

T.C.
KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FİZİK ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

ÇİFT FARKLI YAPI SEÇİMİ VE KUANTUM İLETKENLERİNDE
UYGULANMASI İLE KUANTUM NOKTALI LAZERİN GELİŞİMİNİN
VE ÜSTÜNLÜKLERİNİN İNCELENMESİ

DAVUT OLGUN

ARALIK 2007

ÖZET

ÇİFT FARKLI YAPI SEÇİMİ VE KUANTUM İLETKENLERİNDE UYGULANMASI İLE KUANTUM NOKTALI LAZERİN GELİŞİMİNİN VE ÜSTÜNLÜKLERİNİN İNCELENMESİ

OLGUN, Davut

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. İhsan ULUER

Aralık 2007, 261 sayfa

Bu tez çalışmasında, Kuantum Lazerlerinde bazı çift farklı yapı seçimleri için kullanılan Verim programı ve Kuantum Lazer tasarımı için gereken parametreleri hesaplayan Dalga Kılavuzu programı kullanılarak; çift farklı yapı seçimi ve kuantum iletkenlerinde uygulamaları yedi malzeme ile gerçekleştirilmiş ve kuantum noktalı lazerin diğer kuantum lazerlere olan üstünlükleri incelenmiştir.

Verim bilgisayar programı kullanılarak; her bir malzeme sistemi için giriş parametreleri, çıkış parametreleri, band hesaplamaları, malzeme seçimi, iletim bandı, değerlik bandı ve zayıf deşik bandları için enerji değerleri, hapis faktörleri, verim hesaplamaları, eşik akım yoğunluğu J_{th} ve verim eğim

hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile uygun QWs sayısı, QWs sayısı, verim eğimi (%), eşik akım yoğunluğu J_{th} (A/cm^2), eşik akımı $I_{th}(mA)$ ve her bir malzeme için band offset değerleri ayrı ayrı elde edilmiş ve malzemelerin veriminin pik değerinin bulunması sağlanmıştır.

Dalga kılavuzu programı kullanılarak hapis faktörü, uzak alan, yakın alan, dalga kılavuzu parametreleri ile formüllerin kullanımı, karmaşık modun dalga kılavuzu ile çözümü, dalga kılavuzu ile numerik metod kullanımı ile ilerleme sabitinin çözümü, giriş dosyaların oluşturulması ve dalga kılavuzlu yapı ile bu bilgiler ışığında analiz yapılması ve bu bilgilerin grafiklerle değerlendirilmesi üzerinde durulmuş ve bu verilerle yedi malzeme üzerinde değişik dalga boylarında hesaplamalar yapılmıştır.

Elde edilen değerlerin daha önce yapılmış deneysel ve teorik çalışma sonuçları ile uyum içinde olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Eşik akım yoğunluğu J_{th} , verim eğimi (%) J_{th} (A/cm^2), eşik akımı $I_{th}(mA)$, hapis faktörü, band offset oranı, uzak alan, yakın alan, dalga kılavuzu parametreleri.

ABSTRACT

DOUBLE HETEROSTRUCTURE SELECTION AND THE APPLICATION IN
QUANTUM CONDUCTORS FOR THE INVESTIGATION OF THE
DEVELOPMENT OF QUANTUM DOT LASERS AND THEIR ADVANTAGES

OLGUN, Davut

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Physics, Ph.D.Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İhsan ULUER

December 2007, 261 Pages

In this thesis, by using the program code of Gain for the selection of double hetero-structure, and program code of Waveguide which calculate the needed parameters for designing Quantum Lasers; the selection of double hetero-structure and the application of Quantum Conductures are realised with seven materials and its priority of Quantum dot lasers on other Quantum Lasers are observed.

By using Gain computer program; for each material systems, input parameters, output parameters, band calculations, selection of materials, conduction band, valance band and weak hole bands for energy values,

confinement factors, efficiency calculations, threshold current density J_{th} and calculations for slope of efficiency are carried out. The outputs handed from calculations and suitable number of Quantum wells, slope of efficiency (%), threshold current density J_{th} (A/cm^2), threshold current $I_{th}(mA)$ and band offset values for each materials are handed one by one and it is ensured the determination of peak values of efficiency of materials.

By using waveguide program, confinement factor, far field, near field, parameters of waveguide with the use of formulas, the solution of complex mode by using waveguide, the solution of propagation constant by using the numeric method of waveguide the establishment of input files, under the light of these information are analysed and stressed on the evaluation of graphics, and with these data at various wavelengths on seven materials have been calculated.

It is observed that the values obtained are in agreement with the previous experimental and theoretical results.

Key Words: Threshold current density J_{th} , efficiency slope (%), J_{th} (A/cm^2), threshold current $I_{th}(mA)$, confinement factor, band offset ratio, far field, near field, parameters of waveguide.

Aileme

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda bana verdiği destek ve özveri dolayısı ile danışman hocam ve bölüm başkanım Sayın Prof.Dr.İhsan ULUER'e, yoğun çalışmalarımda bana gösterdikleri anlayıştan dolayı anneme, eşime, çocuklarıma ve bana emeği geçmiş tüm büyüklerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
İTHAF.....	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
SİMGELER DİZİNİ.....	xxvi
KISALTMALAR.....	xxix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Kaynak Özeti.....	2
1.2. Çalışmanın Amacı.....	7
2. MATERYAL VE YÖNTEM.....	8
2.1. Kuantum Lazerlerin Yük Düzeylerinin Kuantumlu Olması.....	8
2.2. Kuantum Nokta Lazerlerin Avantajları.....	10
2.3. Kuantum Nokta Gereksinimleri.....	11
2.4. Noktaların Üretimi.....	12
2.4.1. Eritme Yöntemi.....	12
2.4.2. Engel Arası İç Yayılma Yöntemi ve Kuantum Kuyusu...14	
2.4.3. Seçici Büyütme Yöntemi ile Kuantum Noktası Üretilmesi.....	15
2.4.4 Yarı İletken Mikrokristaller.....	16

2.4.5 Elektrik Alanı Modülasyonu Yöntemi.....	17
2.5 Kuantum Nokta Lazerlerin Çalışması ve Özellikleri.....	19
2.6. Kuantum Nokta VCSELs.....	23
2.6.1 Optik Haberleşme.....	24
2.6.2 Dikey-oyuk lazerleri.....	25
2.6.3 VCL'lerin Avantajları.....	27
2.6.4 Uzun-Dalgaboylu VCL'ler Önündeki Engeller.....	28
2.6.5 VCL Temelleri.....	30
2.7. Genel Tasarım Meseleleri.....	30
2.7.1.Optik Oyuk.....	30
2.7.2.Kazanç-Oyuk Ayarı.....	33
2.7.3. Aktif Bölge Malzemeleri.....	36
2.8. Verim Programı İle Hesaplamalar.....	39
2.8.1.Birleşik Malzeme ve Band Kenarı Hesabı.....	40
2.8.2. Enerji ve Band Hesaplamaları.....	44
2.9. Verim Programı İle Simulasyonlar ve Lazer Özellikleri.....	47
2.9.1.Üç Tabakalı Dalga Kılavuzu Örneği.....	48
2.9.2.Çapraz Matrix Yöntemi (TMM).....	48
2.9.3. Nümerik Metod.....	49
2.9.4. Uzak Alan ve Yakın Alan.....	50
2.9.5. Hapis Faktörü.....	54
2.9.6. Hapis Faktörü Hesaplamaları.....	54
2.9.7. Çapraz(Enine) Modlar.....	55
2.9.8. Yan Modları.....	57
2.9.9. Toplam Hapis Faktörü.....	57

2.10. Optiksel Verim.....	57
2.11. Mod Verimi.....	59
2.12. Türevsel Verim.....	59
2.13. Topluluğun Geri Çevrilmesi.....	63
2.14. Durgunlaşma Titreşim Frekansı.....	64
2.15. Yarı İletken Lazerlerin Tek Mod Denklem Oranları.....	65
2.16. Verim Önleme.....	68
2.17. Taklit Frekans Oluşumu.....	69
2.18. Kuantum Kuyusu.....	70
2.19. Lazer Diyot Parametreleri ve Özellikleri.....	75
2.19.1. P-I Eğrisi ve İlgili Parametreleri.....	75
2.19.2. G-Enerji Eğrisi ve İlgili Parametreler.....	77
2.19.3. G-J Eğrisi ve İlgili Parametreler.....	79
2.20. Luttinger-Kohn Hamiltonian Denklemleri.....	82
2.21. İletim ve Değerlik Bandlarında Taşıyıcı Yoğunluğu.....	85
3. ARAŞTIRMA BULGULARI	90
3.1.1. AlGaAs malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	90
3.1.2. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	108
3.2.1. InGaAs/InGaAlAs/InP malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	116
3.2.2. InGaAs/InGaAlAs/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	128
3.3.1. InGaAs/InGaAsP/InP malzeme için Verim programı ile yapılan	

hesaplamalar.....	132
3.3.2. InGaAs/InGaAsP/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	146
3.4.1. InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	149
3.4.2. InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	159
3.5.1. InGaAs/AlGaAs/AlGaAs malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	162
3.5.2. InGaAs/AlGaAs/AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	172
3.6.1. $\text{AlyIn}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ (Zemin: GaAs) malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	175
3.6.2. $\text{AlyIn}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ (Zemin: GaAs) malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar.....	183
3.7.1. $\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ (Zemin: GaAs) malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar.....	187
4. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	194
KAYNAKLAR.....	212
EK.....	227
ÖZGEÇMİŞ.....	261

ÇİZELGELER DİZİNİ

ÇİZELGE

2.1. Farklı malzemelerin iletkenlik bandı ofFset oranları.....	37
3.1.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri.....	91
3.1.2. Verim Programı İçin Kullanılan Malzeme Bileşenleri ve denklemleri..	91
3.1.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	92
3.1.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerleri.....	93
3.1.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	94
3.1.6. İletim ve değerlik bantları öz değer fonksiyonları ve bant off set.....	95
3.1.7. Öz değer fonksiyonları ve konum değişimi.....	101
3.1.8. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	108
3.1.9. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	110
3.1.10. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu program çıktıları.....	115
3.2.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri.....	117
3.2.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler...	117
3.2.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen karakteristik iletim bandı kenar enerjisi ve tabaka kalınlığı değerleri	118

3.2.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen karakteristik değerlik bandı kenar enerjisi ve tabaka kalınlığı değerleri	119
3.2.5. n ve p tipi taşıyıcılar ve Fermi enerjileri.....	120
3.2.6. İletim ve değerlik bantları (ağır ve hafif) öz değer fonksiyonları ve bant off set değer değişimleri.....	124
3.2.7. Verim programını ile tasarlanmış kuantum lazerin karakteristik özellikleri	128
3.2.8. InGaAlAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	128
3.2.9. InGaAlAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	130
3.3.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri.....	133
3.3.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve eşitlikler.....	133
3.3.3. Verim programından elde edilen enerji hapis faktörü değerleri.....	134
3.3.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	135
3.3.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde karakteristik değerler.....	136
3.3.6. InGaAsP malzeme için elde edilen öz değer fonksiyonu ve band off-set enerji değerleri.....	137
3.3.7. InGaAsP malzeme n ve p taşıyıcılar için elde edilen Fermi enerjisi değerleri.....	138
3.3.8. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerleri.....	145

3.3.9. InGaAsP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	146
3.3.10. InGaAsP malzeme için Dalga Kılavuzu çıktıları	147
3.4.1. Verim programı için programa giriş değerleri.....	150
3.4.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve eşitlikler.....	150
3.4.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri.....	151
3.4.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri.....	151
3.4.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	158
3.4.6. InGaAlAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	159
3.4.7. Dalga Kılavuzu program çıkış değerleri.....	161
3.5.1. Verim programı için programa giriş parameter değerleri.....	163
3.5.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve eşitlikler.....	163
3.5.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri.....	164
3.5.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı yoğunluğu ve Fermi enerji değerleri.....	165
3.5.6. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	171
3.5.7. InGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri.....	172
3.5.8. Dalga Kılavuzu çıktı değerleri.....	174

3.6.1. Verim programı için programa giriş değerleri.....	176
3.6.2 .Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve eşitlikler.....	176
3.6.3 .Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri.....	177
3.6.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri.....	178
3.6.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ malzeme için elde edilen karakteristik değerler.....	183
3.6.6. AlInGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerleri	183
3.6.7. AlInGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı çıktı değerleri.....	185
3.7.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri.....	187
3.7.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve eşitlikler.....	188
3.7.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri.....	189
3.7.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri.....	189
4.1. $\Delta E_c / \Delta E_v$ (bant off set oranları) değerlerinin karşılaştırılması.....	198
4.2. $\Delta P / \Delta I$ (L-I eğrisinden elde edilen verim eğimi) değerlerinin karşılaştırılması.....	206
4.3. Seçilen malzemeler için iletim bandı yarı Fermi enerjileri.....	210

ŞEKİLLER DİZİNİ

ŞEKİL

2.1 Seviyelerdeki yoğunluğun kuantumlanmış olmasının karşılaştırılması.....	9
2.2. Eritme yöntemi kullanılarak kuantum noktalarının elde edilmesi.....	13
2.3. Lazer ışın demeti ile ısıtılarak belirli genişlikteki kuantum kuyusundan kuantum noktasının elde edilmesi.....	14
2.4. Seçici büyütme yöntemi kullanılarak kuantum noktalarının elde edilmesi.....	16
2.5. Kuantum kuyusu üzerinde oluşturulan elektrotlar yardımıyla kuantum noktalarının elde edilmesi.....	18
2.6. Kuantum nokta lazer (QDL).....	19
2.7. Bir QDL VCSEL'in şematik gösterimi.....	19
2.8. QDL yapının ürün spektrumu.....	20
2.9. İki yapının sıcaklık sonuçları (T) ile eşik akımı arasındaki ilişki.....	22
2.10. Sıcaklık eşik akımı ilişkisi.....	23
2.11. Düzlem lazerle, Dikey-oyuk lazeri arasındaki temel farklar.....	26
2.12. Bir VCL'deki 1λ kalınlığındaki optik oyuğa ait yansıtıcılık indeksi ve dikine optik alan yoğunluğu.....	31
2.13. Kazanç faktörüne karşılık duran dalga deseninin aktif bölgeden normalize edilmiş yer değiştirmesi.....	33
2.14. Kazanç spektrumu ve oyuk rezonansı arasındaki ilişki.....	34
2.15. Farklı alaşım kompozisyonları için SQW çözümleri.....	39
2.16. Basit SCH.....	40
2.17. SCH derecelenmiş indisi.....	40

2.18. Yarı iletken yapılarda enerji bandı. kuantum kuyulu, barierli ve kaplama tabakalı bir yarı iletken yapı için, iletim , değerlik , potansiyelleri.....	42
2.19. Bir kuantum kuyusu içerisine hapsedilmiş parçacığın, elektronların, ağır boşlukların(deşiklerin), hafif boşlukların(deşiklerin) enerji düzeylerinin şematik gösterimi.....	46
2.20. Üç tabakalı dalgaın uzak alanının koordinat sistemindeki şematik gösterimi.....	52
2.21. Üç tabakalı dalga dilimi modeli.....	56
2.22. Bir kuantum kuyusunda iletim ve değerlik bantları arasındaki geçişler.....	60
2.23. Toplam geçiş oranları.....	62
2.24. Zaman ve taşıyıcı yoğunluğu değişimi.....	64
2.25. Grup frekansı değişimi.....	68
2.26. Ters güç ve ışık tayfı doğru genişliği değişimi.....	71
2.27. Yakalama ve kaçma yoluyla taşıyıcı yayılması.....	72
2.28. Frekans ve SCH genişliğine göre sistemin cevabı.....	72
2.29. AlGaAs malzeme için bant yapısı.....	74
2.30. Kuantum noktaları.....	75
2.31. Genel çıkış gücü ve girilen akım yoğunluğu ilişkisi.....	77
2.32. Sonlu sıcaklık-verim tayfı.....	77
2.33. Verim tayfı (spektrumu).....	78
2.34. a) Bir kuantum kuyulu lazer için devreye verilen akım yoğunluğun (J_w) nin Verim g_w ile değişimi. b) n_w (birden fazla) kuantum kuyulu bir	

lazer yapı için devreye verilen akım yoğunluğu ($n_w J_w$) ile verim ($n_w g_w$) in değişimi.....	79
2.35. Sıcaklık eşik akım yoğunluğu ile değişimi.....	81
2.36. Eşik akım yoğunluğu ile sıcaklık artışı değişimi. Grafikteki ters eğim karakteristik sıcaklık değerini verir. J_{th} değerleri yerine I_{th} değerleri kullanılması halinde de aynı sonuçlar elde edilir.....	82
3.1.1. Çift yapılı AlGaAs malzeme için enerji band diyagramı.....	90
3.1.2. AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri	92
3.1.3. AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri arasındaki ilişki.....	93
3.1.4. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişki.....	94
3.1.5. Fermi enerji düzeyleri ile p taşıyıcılar arasındaki ilişki.....	94
3.1.6. İletim Bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	96
3.1.7. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	97
3.1.8. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi....	97
3.1.9. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi.....	98
3.1.10. Pik malzeme verimi ($1/cm$) ve taşıyıcı yoğunluğu*($E+18$) ilişkisi.....	99
3.1.11. Pik malzeme verimi ($1/cm$) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi	99
3.1.12. Pik mod verimi ($1/cm$) ve akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi.....	100
3.1.13. Sızıntı akımı (A/cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu ($1/cm^3$) ilişkisi.....	100
3.1.14. Kırılma indisi değişimi ve foton enerjisi	100
3.1.15. Enerji ve konum değişimi	102

3.1.16. Sızıntı akımı (A/cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu ($1/cm^3$) ilişkisi.....	102
3.1.17. Kırılma indisi değişimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi.....	102
3.1.18. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisindeki değişme ilişkisi.....	103
3.1.19. Güç ve akım ilişkisi.....	105
3.1.20. Dinlenme titreşim frekansı ve akım yoğunluğu ilişkisi.....	105
3.1.21. Işıma dalga boyu ve malzeme verimi ilişkisi.....	106
3.1.22. Kıvrımsal mod verimi.....	106
3.1.23. Kıvrımsal optiksel verim.....	107
3.1.24. Kıvrımsal mod verimi.....	107
3.1.25. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi	110
3.1.26.QZMR-PHM grafiği.....	114
3.1.27. THETA-FFIELD grafiği.....	114
3.2.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji band diyagramı.....	116
3.2.2. InGaAlAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri	119
3.2.3. InGaAlAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri.....	119
3.2.4. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişki.....	121
3.2.5. Fermi enerji düzeyleri ile p taşıyıcılar arasındaki ilişki.....	121
3.2.6. Konum ve öz değer fonksiyonu iletim bandı ilişkisi.....	122
3.2.7. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi ...	122
3.2.8. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi...	122
3.2.9. Türevsel verim (cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu $*(E+18)$ ilişkisi	123
3.2.10. Pik malzeme verimi ($1/cm$) ve taşıyıcı yoğunluğu $*(E+18)$ ilişkisi	123
3.2.11. Pik malzeme verimi ve akım yoğunluğu değişimi.....	123

3.2.12. Pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi.....	124
3.2.13. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi.....	125
3.2.14. Güç ve akım ilişkisi.....	125
3.2.15. Dinlenme titreşim frekansı ve akım yoğunluğu ilişkisi.....	126
3.2.16. Kıvrımsal mod verim.....	126
3.2.17. Kıvrımsal optik verimi.....	126
3.2.18. Mod verimi (1/cm) ve foton enerjisi (eV) değişimi.....	127
3.2.19. Malzeme verimi (1/cm) ve foton enerjisi (eV) değişimi.....	127
3.2.20. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi.....	129
3.2.21. QZMR-PHM grafiği.....	129
3.2.22. THETA-FIELD grafiği.....	129
3.2.23. FWHPF ve FWHPN değerleri değişimi.....	130
3.3.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji band diyagramı.....	132
3.3.2. InGaAsP malzeme için enerji öz değer ve hapis faktörü değerleri....	135
3.3.3. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji	135
3.3.4. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri arasındaki ilişki.....	136
3.3.5. InGaAsP malzeme için normalleştirilmiş genişlik ve band offset enerji değerleri değişimi.....	137
3.3.6. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişki.....	137
3.3.7. Fermi enerji düzeyleri ile p taşıyıcılar arasındaki ilişki.....	138
3.3.8. Akım yoğunluğu ve anti kılavuz faktörü değişimi.....	138
3.3.9. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu değişimi.....	139
3.3.10. Güç-akım ilişkisi.....	139

3.3.11. Konum ve iletim bandı öz değer fonksiyon değeri-1-2 değerleri	
değişimi.....	140
3.3.12. Konum ve ağır değerlik bandı öz değer fonksiyonu değerleri değişimi-	
band offset değerleri değişimi.....	141
3.3.13. Konum ve hafif değerlik bandı öz değer fonksiyonu-1-2-band offset	
değerleri değişimi.....	141
3.3.14. Türevsel verim (cm^2).....	141
3.3.15. Pik malzeme verimi ($1/\text{cm}$) ve akım yoğunluğu (A/cm^2) değişimi	
.....	142
3.3.16. Pik malzeme verimi ($1/\text{cm}$) ve akım yoğunluğu (A/cm^2).....	142
3.3.17. Pik mod verimi ($1/\text{cm}$) ve akım yoğunluğu (A/cm^2).....	143
3.3.18. Taşıyıcı konsantrasyonu ($1/\text{cm}^3$) ve sızıntı akımı (A/cm^2).....	143
3.3.19. Kırılma indisi değişimi ve taşıyıcı sayısı değişimi.....	143
3.3.20. Malzeme verimi ($1/\text{cm}$) ve ışıma dalga boyu (μm) değişimi.....	144
3.3.21. Mod verimi ($1/\text{cm}$) ve ışıma dalga boyu (μm).....	144
3.3.22. Malzeme verimi ($1/\text{cm}$) ve foton enerjisi (eV).....	144
3.3.23. Mod verimi ($1/\text{cm}$) ve foton enerjisi (eV).....	145
3.3.24. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi.....	146
3.3.25. QZMR-PHM grafiği.....	146
3.3.26. THETA-FIELD grafiği.....	147
3.4.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji band diyagramı.....	149
3.4.2. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri	
.....	151
3.4.3. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji	
değerleri.....	152

3.4.4. İletim Bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	152
3.4.5. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi....	153
3.4.6. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi ...	153
3.4.7. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi.....	154
3.4.8. Pik malzeme verimi (1/cm) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi	154
3.4.9. Pik malzeme verimi (1/cm) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi	154
3.4.10. Güç (mW) ve akım (mA) ilişkisi.....	155
3.4.11. Pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm^2) ilişkisi.....	155
3.4.12. Sızıntı akımı (A/cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu ($1/cm^3$) ilişkisi.....	156
3.4.13. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisindeki değişme ilişkisi.....	156
3.4.14. Işıma dalga boyu ve malzeme verimi ilişkisi.....	156
3.4.15. Kıvrımsal mod verimi.....	157
3.4.16. Kıvrımsal optiksel verim.....	157
3.4.17. Kıvrımsal mod verimi.....	157
3.4.18. PHM ve FWHPN-PWHPF değişimi.....	158
3.4.19. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi.....	159
3.4.20. QZMR ve TL (23) değerleri değişimi.....	159
3.4.21. QZMR ve WZI değerleri değişimi.....	160
3.4.22. QZMR-PHM grafiği.....	160
3.4.23. THETA-FFIELD grafiği.....	160
3.4.24. FWPHP ve FWPHF-IT değerleri değişimi.....	161
3.5.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji band diyagramı.....	162

3.5.2. InGaAs/AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri.....	164
3.5.3. InGaAs/AlGaAs malzeme için p ve n taşıyıcılar ve Fermi enerji değerleri.....	165
3.5.4. InGaAs/AlGaAs malzeme için türevsel verim taşıyıcı yoğunluğu değişimi.....	165
3.5.5. InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı yoğunluğu ile değişen malzeme pik verimi (1/cm) değişimi.....	166
3.5.6. InGaAs/AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve Al malzeme için iletim ve değerlik bandı değerleri değişimi.....	166
3.5.7. InGaAs/AlGaAs malzeme için konum ve iletim bandı öz değer fonksiyon değeri-1-2 değerleri değişimi.....	167
3.5.8. InGaAs/AlGaAs malzeme türevsel verim (cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu*(E+18).....	167
3.5.9. InGaAs/AlGaAs malzeme için akım yoğunluğu (A/cm^2) ve pik malzeme verimi (1/cm).....	168
3.5.10. InGaAs/AlGaAs malzeme için akım yoğunluğu (A/cm^2) ve pik malzeme verimi (1/cm).....	168
3.5.11. InGaAs/AlGaAs malzeme için pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm^2) değişimi.....	168
3.5.12. InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı konsantrasyonu ($1/\text{cm}^3$) ve sızıntı akımı (A/cm^2) değişimi.....	169
3.5.13. InGaAs/AlGaAs malzeme için kırılma indisi ve taşıyıcı sayısı değişimi	169
3.5.14. InGaAs/AlGaAs malzeme için güç akım değişimi.....	169

3.5.15. InGaAs/AlGaAs malzeme için malzeme verimi (1/cm) ve Işıma dalga boyu değişimi (μm).....	170
3.5.16. InGaAs/AlGaAs malzeme için mod verimi ve ışıma dalga boyu değişimi	170
3.5.17. InGaAs/AlGaAs malzeme için malzeme verimi ve foton enerji değişimi	171
3.5.18. InGaAs/AlGaAs malzeme için mod verimi ve foton enerjisi değişimi	171
3.5.19. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi.....	172
3.5.20. QZMR ve WZI değerleri değişimi.....	172
3.5.21. QZMR-PHM grafiği.....	173
3.5.22. THETA ve FFIELD-FFPHASE değişimi.....	173
3.6.1. Çift yapılı AlInGaAs malzeme için enerji band diyagramı.....	175
3.6.2. AlInGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri	177
3.6.3. AlInGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri	178
3.6.4. AlInGaAs malzeme için iletim bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	179
3.6.5. AlInGaAs malzeme için ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	179
3.6.6. AlInGaAs malzeme için hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi.....	180
3.6.7. AlInGaAs malzeme akım yoğunluğu ile anti taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi	180

3.6.8. AlInGaAs malzeme için akım yoğunluğu ve pik mod verimi değişimi	181
3.6.9. Güç (mW) ve akım (mA) değişimi	181
3.6.10. Işıma dalgaboyu ve mod verimi değişimi	182
3.6.11. Işıma dalgaboyu ve malzeme verimi değişimi	182
3.6.12. Mod verimi ve foton enerjisi değişimi	182
3.6.13. Malzeme verimi ve foton enerjisi değişimi	183
3.6.14. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi	184
3.6.15. QZMR ve TL (6) değerleri değişimi	184
3.6.16. QZR ve WZI değerleri	184
3.6.17. GAMMA (2) – PHM grafiği	185
3.6.18. THETA ve FFIELD-FFPHASE değişimi	186
3.6.19. NFINT ve XXFT-PHASE değişimi	186
3.7.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı	187
3.7.2. Güç (mW) ve akım (mA) değişimi	190
3.7.3. İletim bandı için yarı Fermi enerji düzeyinin n taşıyıcı sayısına göre değişimi	190
3.7.4. Değerlik bandı için yarı Fermi enerji düzeyinin p taşıyıcı sayısına göre değişimi	191
3.7.5. Taşıyıcı yoğunluğu ve türevsel verim değişimi	191
3.7.6. Verim sıkışıklığı değişimi	191
3.7.7. Pik malzeme verimi ve eşik akım yoğunluğu değişimi	192
3.7.8. Pik mod verimi ve eşik akım yoğunluğu değişimi	192
3.7.9. Taşıyıcı sayısına göre kırılma indisi değişimi	192
3.7.10. Taşıyıcı sayısına göre azaltılmış kırılma indisi değişimi	193

3.7.11. Taşıyıcı konsantrasyonuna göre sızıntı akımı değişimi.....	193
3.7.12. Foton enerjisi ve malzeme verimi değişimi.....	193
4.1. AlGaInAs malzeme için malzeme verimi foton enerjisi – akım yoğunluğu mod verimi değişimi, bu çalışmadaki ve deneysel olarak çizilmiş grafiklerinin değişiminin karşılaştırılması.....	200
4.2. InGaAsP ve AlGaInAs malzemeleri için pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu değişiminin, bu çalışmadaki ve deneysel olarak çizilmiş grafiklerinin değişiminin karşılaştırılması.....	202
4.3. InGaAsP ve AlGaInAs malzemeleri için toplam akım yoğunluğu-ışımali akım yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu değişiminin, bu çalışmadaki ve deneysel olarak çizilmiş grafiklerinin değişiminin karşılaştırılması.....	203
4.4. AlGaAs malzeme için bu çalışmada ve diğer çalışmalarda elde edilen konum ve enerji değişiminin karşılaştırılması.....	205
4.5. InGaAsN malzeme için bu çalışmada elde edilen $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ değerleri ile deneysel olarak yapılan hesaplamaların karşılaştırılması.....	207
4.6. AlInGaAs, InGaAsN malzemelerin bu çalışmada elde edilen ve daha önceki deneylerden elde edilen dalga boyu – verim grafiği verilerinin karşılaştırılması.....	208
4.7. InGaAs, InAlGaAs malzemelerin bu çalışmada elde edilen ve daha önceki deneylerden elde edilen dalga boyu – verim, akım yoğunluğu – verim, taşıyıcı yoğunluğu ile grafiği verilerinin karşılaştırılması	209
4.8. Seçilen malzemelerden altısının n taşıyıcılar için iletim bandı yarı Fermi enerjilerinin karşılaştırılması.....	211

SİMGELER DİZİNİ

M_B : momentum Matris elementi

E : Optik enerji

N : Kırılma indisi

W : Kuyu genişliği

$m_{r,ij}$: Azaltılmış etkin kütle

C_{ij} : Üst üste binme faktörü

A_{ij} : Anisotropic factorü

f_c, f_v : İletim ve değerlik bandlarının Fermi-Dirac dağılımı.

H : Basamak fonksiyonu

$L(E)$: Lorentz dönüşümü

f_c ve f_v : Fermi dağılımları

$|M_T|$: Geçiş matris elementi

ρ_{red} : Düzeylerin azaltılmış yoğunluğu

A_0 : Sabit olarak alınabilen vektör potansiyeli

C : Işık hızı (cm/s)

α : Malzeme kaybı (1/cm)

R : Aynanın yansıtıcı kısmının gücü

n : Kırılma indisi

L : Oyuk uzunluğu (cm)

N : Taşıyıcı yoğunluğu ($1/\text{cm}^3$)
 V : Aktif bölgenin hacmi (cm^3)
 I : Pompalanmış akım (mA)
 V_g : Fotonun grup hızı (cm/s)
 n_i : İç kuantum Verimi
 q : Elektron
 τ : Taşıyıcı yarı ömrü ($1/\text{s}$)
 P : Foton yoğunluğu ($1/\text{cm}^3$)
 Γ : Hapis faktörü
 β_{sp} : Kendiliğinden ışıma faktörü
 R_{sp} : Kendiliğinden ışıma oranı ($1/\text{s.cm}^3$)
 τ_p : Oyuk yarı ömrü ($1/\text{s}$)
 $g \cong a(N - N_{tr})$: türevsel Verim
 N_{tr} : Saydam taşıyıcı yoğunluğu
 P_0 : Kararlı düzey foton yoğunluğu
 ε : Engelleme katsayısı
 P : Foton yoğunluğu
 $\delta\nu_0$: Maksimum değişim ve f_R pik değişimi
 w_m : Frekans ayarlaması
 β_c : Doğru yükseltme faktörü
 I_p : Akım ayarlama pik değeri
 P_0 : Optiksel olarak elde edilen çıkış gücü

α_H : Doğrusal genişlik ilerleme faktörü

$4\pi P$: Kendiliğinden ışıma faz değişiminden

α_H^2 : Taşıyıcı düzensizliğinden kaynaklanmaktadır

ΔL_L : I nın artışı dolayısıyla sızıntı akımında meydana gelen ek artışı hesaplar.

α_i : Gerçek kayıp

α_m : Aynaların iki uç yüzeyi arasındaki geçişleri hesaplar

η_i : İç kuantum Verimidir ve radyoaktif yeniden birleşmelere katkıda bulunan devreye girilen taşıyıcıların yüzdesini tanımlar.

η_e : Dış türevsel kuantum Verimi

$\Delta E_c / \Delta E_v$: Bant off set oranı

k_B : Boltzman sabiti

$\Delta P / \Delta I$: Verim eğimi

KISALTMALAR

CASE – Genel program değişkeni

STRUCT – Genel yapı bilgisi

LAYER – Özel tabaka bilgisi

MODCON – Sınır şartları

GAMOUT – Hapis faktörü (Gamma)

LOOPXn – Düşük düzey çevirim (Nreal, Nloss, TI)

LOOPZn – Yüksek düzey çevirim (Wvl, Grw, Qw)

OUTPUT –Çıktılar

NREAL- Etkin indis

NLOSS-Kayıp

STRUCTURE WAVELENGTH-Yapı dalga boyu

NEAR FIELD – Yakın alan

FAR FIELD – Uzak alan

GAMMA – Hapis faktörü

db – Çıkış çizim dosyaları

ly – Tabaka giriş dosyaları

ot – Program çalıştırma dosyaları

nf – Yakın alan çizim dosyası

ff – Uzak alan çizim dosyası

PHM – Faz integrali

GAMMA – Hapis faktörü

WZR - Eigenvalue Kökü (gerçek kısmı)

WZI - Eigenvalue Kökü (sanal kısmı)

QZR - WZR karesi alınmış hali

QZI - WZI karesi alınmış hali

FWHPN – Yarım güç,tam genişlikte yakın alan

FWHPF - Yarım güç,tam genişlikte uzak alan

XXFT - X yerleşim

NFINT – Yakın alan şiddeti

PHASE – Yakın alan fazı

NFREAL – Yakın alan (gerçek kısmı)

NFIMAG – Yakın alan (sanal kısmı)

THETA - X yerleşim

FFIELD – Uzak alan

PHASE – Uzak alan fazı

BW – Engel genişliği

GRW – Derecelenmiş tabaka genişliği

GRW1 – İlk derecelenmiş tabaka genişliği

GRW2 – İkinci derecelenmiş tabaka genişliği

GRW3 – Üçüncü Derecelenmiş Tabaka Genişliği

GRW4 – Dördüncü derecelenmiş tabaka genişliği

LGRAD – Derecelenmiş tabaka genişliği için tabaka numarası

LN – Yapı içindeki toplam tabaka sayısı

LSTART – Yapı için tabaka sayısına giriş

NBAR – Etkin engel indisi

NQW – Kuantum kuyusunun etkin indisi

NSLC1 - Derecelenmiş birinci tabaka için dilim sayısı

NSLC2 – Derecelenmiş ikinci tabaka için dilim sayısı

NUMQWS – Kuantum kuyusu sayısı

QW –Kuantum kuyusunun genişliği

TMM – Çapraz matrix yöntemi

1. GİRİŞ

Kuantum Lazerlerinde bazı çift farklı yapı seçimleri için kullanılan Verim programı ile verim hesabı ve yarı iletken kuantum lazer yapılarının ilgili parametreleri hesaplanabilir. Bu program genellikle optoelektronik ve fotonik alanlarda kullanılabilir. DOS ve Windows temel üzerine kurulan sistemlerde kullanılabilir.

Bu program çeşitli farklı çift yapıların; iletim ve değerlik bantlarının her ikisinin de enerji seviyelerinin bant yapılarını ve dalga boyu ile akım yoğunluğuna bağlı verim eğrilerinin grafiklerini bulmamıza yarar. Program bir boyutlu hesaplama analizi kullanır ve pratik ve kesin sonuçlar verir.

Verim programı; malzeme seçimi ve bant kenarlarının hesaplarında, enerji bandı hesaplamalarında, lazerlerin özelliklerinin incelenmesinde ve verim simülasyonlarında çok kullanışlı bir programdır.

Dalga kılavuzu bir CAD analiz aletidir ve çeşitli optoelektronik aygıtlarla çalışabilir ve simülasyon yapılabilir. Çapraz Matris Yöntemi (TMM) çok tabakalı Dalga kılavuzu yapıların eigen (öz değer) modlarını bulmada kullanılır. Her bir tabakanın çapraz matrisleri hesaplanır ve etkin kırılma indislerinin öz değerleri, rakamsal öz değer fonksiyonlarının çözümü ile bulunabilir. Böylece karmaşık değerler ile etkin kırılma indisleri bulunabilir. Dalga kılavuzu öz değer modları ve zayıf modları bulabilir. Bununla birlikte bir tabakanın optik hapis faktörü, dalga çiftleri, yakın alan, uzak alan ve diğer optik parametreler hesaplanabilir ve grafikleri çizilebilir.

Dalga kılavuzu bir Windows sistemi ile çalışabilir. Bu program cihaz tasarımının ötesinde elektromanyetik teorelin anlaşılmasına da yardım eder. Dalga kılavuzu, aktif ve pasif fotonik cihaz analizinde güçlü bir programdır. Bu program ile çeşitli cihaz tasarımları yapılabilir.

Dalga kılavuzu, yarı iletken kuantum lazerlerin tabakalarının tasarımında, malzemelerin kırılma indislerinin bulunmasında, tabakalardaki renklerin dağılımında, yönlü çiftlerin tasarlanmasında, değişik yarı iletken lazerlerin tasarlanmasında kullanılan çok kullanışlı bir programdır.

Hesaplamalar kısmında bu iki program ile çeşitli malzemeler ile değişik dalga boylarında hesaplamalar yapılmıştır.

1.1. Kaynak Özeti

Son zamanlarda küçük boyutlu yarı iletken malzemelerin üretimindeki ilerlemeler şu an kullanılan aygıtların boyutlarını üç boyutlu genişlikteki malzemelerden iki boyutlu kuantum kuyu sistemlerine, bir boyutlu kuantum tellerine ve hatta sıfır boyutlu kuantum noktalarına indirmeyi mümkün hale getirmiştir. Bu kuantum sınırlamalarına sahip ve yapının tasarımına uygun bir dereceye indirilebilen, kontrol edilebilen yapıların değişen görsel ve elektronik özellikleri oldukça ilgi uyandırdı. Bu yarı iletken lazerler mikro elektronikler, doğrusal olmayan optikler ve birçok alandaki mevcut aygıtlardaki yapılacak yenilikler için umut verici bir ortam oluşturdu. Kuantum noktaları bir yarı iletken içerisindeki çok küçük ileticilerdir. Bu noktaların çok sayıda yük taşıyıcısı olanları vardır(1'den 1000'e kadar). Bu noktalar çok iyi

tanımlanmıştır ve farklı kuantum enerji seviyelerindedirler. Bunlar genellikle yapay atomlara benzer şekilde tanımlanırlar. Yarı iletken titreşimli tünel diyotlar (kuantum mekanik sınırlarına dayanan), süper iletken Josephson eklem devreleri(büyük ölçekli durumlardaki mantığa dayanan), metalik tek elektron transistörleri (yükün kuantumlaşması temeline dayanan), moleküler elektronik aygıtlar(bir çift kuantum nokta yapısındaki iç nokta çiftlenmeleri temeline dayanan) gibi kuantum özelliklerinin kullanıldığı çeşitli aygıtlar vardır. Bu tezde belirli bir kuantum nokta veya kuyusuna sahip olan kuantum lazerleri ile ilgili çalışmalar yapılacaktır.

1974'de Bell Laboratuvarı'ndan Raymond Dingle ilk kez yük taşıyıcıların kuantum sınırlarını ispatlamıştır^(1,2,4). Ayrıca 1979'da yine Bell Laboratuvarı'ndan Won-Tien Tsang ilk kez kuantum sınırlarına dayalı yarı iletken lazeri yapmıştır^(3,4). Bundan sonra kuantum kuyu lazerleri lifli yapıdaki görsel iletişim sistemlerinin bel kemiği olmuştur. Kuantum tel lazerleri ise seksenli yılların sonunda yapılmıştır.

Yasuhito Arakawa ve sonra Mashahiro Ashada'nın 1986'da Tokyo Üniversitesi'ndeki çalışmaları optoelektronik iletişime olan ilgiyi kuantum kuyu lazerlerden, kuantum nokta lazerlerine çevirmiştir⁽⁴⁾. Son zamanlarda ise araştırmacılar mikro boşlukların aktif ışık yayıcılar ile yapılmasına yönelmişlerdir. Bu boşluklu yapılar yüksek verimli, düşük güçlü , tek noktalı, dikey boşluklu yüzeyinden ışın yayıcı lazerlerin (VCSELs) yapılmasına ışık tutmuştur⁽⁵⁻⁸⁾. Bu lazerler paralel iç bağlantılar için son derece uygundur.

1960'ların başında yarı iletken lazerin keşfi^(9,10) fotonik teknolojisinde büyük bir adım olarak kabul edilir. Günümüzde bu cihazlar optik veri kaydı ve

veri okumada, lazer yazıcılarda, optik pompalamada ve katı-hal lazerleri yapımında geniş ölçekte kullanılmaktadır⁽¹¹⁻¹²⁾. Bunun dışında yarı iletken lazerler, optik iletişim sistemleri için ışık kaynağı olarak kolayca kendine yer edinmiştir. Bununla eş güdümlü olarak gelişen optik yükselteçler, detektörler ve yüksek-hızlı elektronik, fiber optiğin keşfi, iletişim teknolojisinde bir devrim yaratmış ve çok sayıda veriyi yüksek hızda dünyanın istediğiniz yerine taşınmasını sağlamıştır⁽¹³⁻²⁰⁾. Yükselen veri trafiği, kapasitede ve kullanımda sürekli talepler oluşturmuştur.

Çift-sarım bakır kablolar bu talebe karşılık verememiş ve limitlerine çabuk erişmiştir. Sonuç olarak optik teknoloji, birçok ağ'da tercih edilen bir seçenek durumuna gelmiştir⁽²¹⁻²⁷⁾. Uzun-erimli ağlarda verici-alıcı sayısı çok olmamakla birlikte cihaz maliyeti çok önemli değildir. Kısa-erimli şehir içi ya da ofis içi ağlarda çok verici-alıcı ve düşük maliyet önem kazanır. Bunun yanında kısa-erimli ağlarda genellikle, verimliliğine karşı ucuzluğuyla ve düşük güç harcamasına karşın sunduğu yüksek hızlarla 850 nm dalga boylu GaAs tabanlı VCL' ler kullanılır⁽²⁷⁻³²⁾. Günümüzde ticari olarak satılan 12 paralel vericili lineer dizilerle standart çok-modlu optik hatlarda yüzlerce metre uzaklığa 3,5 Gbit/s hızında veri aktarımı yapılabilmektedir^(6,33-38). Uzak-erimli uygulamalar için 1,3 – 1,6 µm dalga boylu lazer kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. 1,3 ve 1,55µm'lik lazer uygulamaları veri transferleri için uygundur. İlk dalga boyu, tek-modlu fiberlerde düşük dağınılılığıyla, ikinci dalga boyuda az kaybıyla dikkat çeker. Fabry-Pèrot (FP) ve dağıtılmış geri besleme (DFB) gibi geleneksel yüzey lazerleri orta ve uzak-erimli uygulamalarda kullanılmaktadır. 10 Gigabit Ethernet (10 Gb E)^(6,31-32,41,140-151) gibi yeni bir standartla daha düşük maliyetli alıcı-vericiler ile 10 km ötesi

hızlı iletişim beklenmektedir. Orta ve uzun-erimli tek-modlu fiber uygulamaları için ucuz 1,3 ve 1,55 μm dalga boylu VCL' ler yeni kuşak optik iletişim için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkar^(6,44-50,100-137).

Dikey-oyuk lazer fikri ilk olarak 1978'de Tokyo Teknoloji Enstitüsünde Iga ve arkadaşları tarafından ileri sürülmüştür^(6,41,44). Bu tür lazerlerin oda sıcaklığında (OS) atmalı ve düzenli dalgalı (CW) çalışan ilk örnekleri aynı grup tarafından 1984 ve 1989 yıllarında yapıldı^(6,42,43). 1980'lerin sonuna doğru VCL' ler tüm dünya da araştırılan bir konu haline geldi. 1990'ların ortalarından itibaren VCL' ler araştırma laboratuvarlarından çıkıp üretim alanına girdi ve sonunda ticari olarak bulunur hale geldi. VCL' lerin alet geometrisi, geleneksel düzlem lazer diyotlarından farklılık gösterir ve birçok potansiyel avantaj sunar^(6,44-51). Düzlem lazerlerde lazer emisyonu ve titreşimi, lazer yonga yüzeyine paralel meydana gelirken, VCL'ler titreşimi ve ışık yayılımını dik olarak yaparlar⁽⁵²⁾. Oyuk boyu düzlem lazerlerin yüzlerce mikronla ölçülecek boyutuna karşın, yayılan ışığın dalga boyu mertebesinde⁽⁵³⁾. Bu çalışmaların yanında;

K. Iga ve arkadaşları dikey oyuklu ve yüzeyden ışımalı kuantum lazerler üzerinde önemli çalışmalar yapmışlardır^(41-43,53,68,80,96-97,119,111,169).

J. Thibeault ve arkadaşları, dikey oyuklu yüzeyden ışımalı lazer sistemlerinin optik özelliklerini, offset oranlarını, lazer verimlerini ve boşluk enerji değerlerini incelemişlerdir.^(47,57,111).

P.S. Zory ve arkadaşları çift farklı yapılı kuantum lazerler ile ilgili araştırmalar yapmışlardır^(82,154,159,170,178,188,193).

Sandra R. ve arkadaşları kuantum kuyu lazer tasarımları üzerinde çalışmalar yapmışlardır⁽¹⁵²⁾.

S. Adachi III-V yarı iletken malzemelerin fiziksel özelliklerini araştırmıştır^(112,114).

M. Ustinov ve arkadaşları düşük eşik değerlerine sahip kuantum nokta ve kuyularına sahip lazer sistemleri üzerinde çalışmalar yapmışlardır^(20,30,72).

Y. Zou ve arkadaşları uzun dalga boyuna sahip lazer sistemlerini incelemişlerdir^(19,21,31,212).

Shun Lien Chung optoelektronik cihazların fiziksel özelliklerini incelemiştir⁽¹⁵³⁾

Stephen R. ve arkadaşları diyot lazerler üzerinde çalışmalar yapmışlardır⁽¹⁵⁴⁾.

Tso-Min Chou ve arkadaşları çift farklı yapıya sahip kuantum kuyu lazerlerin hapis faktörleri ve tasarımları üzerinde araştırma ve çalışmalar yapmışlardır⁽¹⁵⁵⁾.

P. W. A. McIlroy ve arkadaşları kuantum kuyu lazerler ile ilgili olarak teoriksel çalışmalar yapmışlardır⁽¹⁵⁶⁾.

A. R. Adams ve arkadaşları kuantum kuyu lazerleri oluşturan tabakaların optiksel özelliklerini incelemişlerdir^(179,198,205,207,209).

1.2. Çalışmanın Amacı

Hesaplamaların yapılmasında kullanılan, verim ve dalga kılavuzu paket programları ile her bir malzeme sistemi için giriş parametreleri ve çıkış parametreleri ile bant hesaplamaları, malzeme seçimi, iletim bandı, değerlik bandı ve zayıf deşik bantları için enerji değerleri, hapis faktörleri, türevsel verim, optiksel verim, malzeme verimi, pik malzeme ve mod verimi, eşik akım yoğunluğu J_{th} , verim eğimi, QWs sayısını bulma, eşik akımı $I_{th}(mA)$, hapis faktörü, uzak alan, yakın alan, λ (dalga boyu) nın pik değerlerinin bulunması hesaplamaları yapılacaktır. Bu hesaplamalar yapılırken seçilen her bir malzeme sistemi için deşik zor sabitleri, malzeme kalınlıkları ve dalga boyları kullanılarak, bu malzemelerin ayrı ayrı grafiklerinin çiziminin yapılması sağlanacaktır. Bu değer ve grafiklerin daha önceden yapılan deneysel veya teorik değerler ile karşılaştırmalarının yapılması ile deney yapmadan da bu değerlere veya yakın değerlere ulaşıp ulaşılamayacağı incelenecektir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Kuantum Lazerlerin Yük Düzeylerinin Kuantumlu Olması

Çift karışımli yapıya sahip lazerlerin geleneksel yapısında yüksek yasak enerji bandına sahip malzeme(Örneğin: AlGaAs) ile düşük yasak enerji bandına sahip ve kalınlığı 0.1-0.3 μ m olan malzeme'nin (Örneğin: GaAs) her iki tarafı da kaplanmıştır. Bu aktif bölgeler elektronlar ve boşluklar için birer tuzak vazifesi görürler. Böylece elde edilen eşik akımının azalması sağlanır. Eğer aktif tabakanın kalınlığı 50-100 Å a kadar azaltılabilirse, boyut termik(ısıtılmış) elektronların dalga boyları ile karşılaştırılabilir hale gelir ve bağlanmış elektron ve boşluklar kuantum etkisi gösterirler^(8, 9, 10). Bir kuantum noktasındaki bütün üç boyutların içerisinde yük taşıyıcılarının hareketi sınırlandırıldığı için, enerji düzeylerindeki bozulma büyük oranda ortadan kaldırılır ve zamandan bağımsız üç boyutlu Schrodinger denkleminin çözümünün bulunmasıyla seviyelerdeki yoğunluk son derece kuantumlanmış olur. Kuantum noktasının daha küçük boyutları ve komşu enerji düzeyleri arasındaki büyük ayrılmalar ve farklı bağlı biçimlerde enerji düzeylerindeki yoğunlukların karşılaştırılmaları Şekil.2.1' de gösterilmiştir. İdeal olarak bir kuantum noktası sıfır boyutlu bir noktadır. Bu yüzden enerji düzeylerindeki yoğunluk müsaadeli enerjilerdeki delta fonksiyonunun bir dizisi olmalıdır^(20,24).

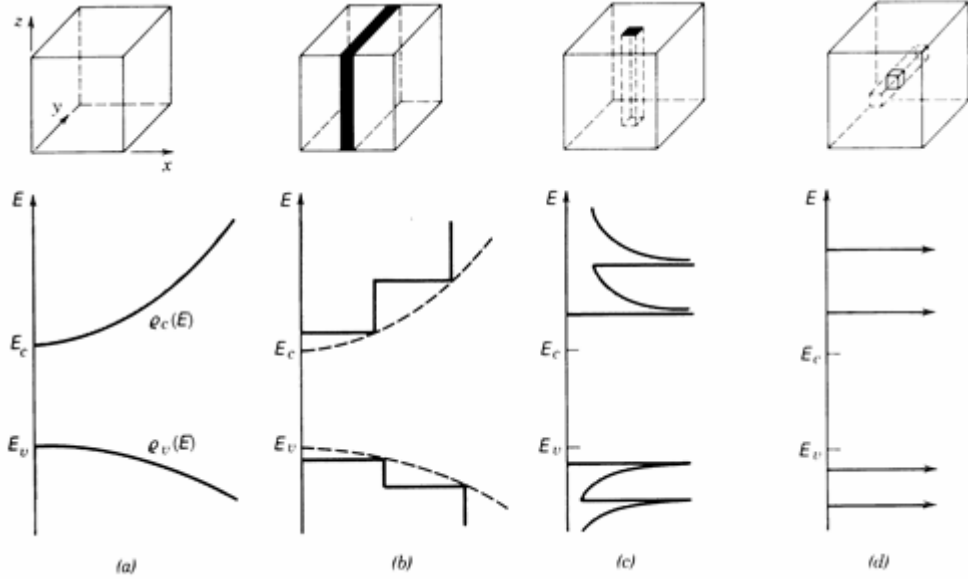
Fakat üç yönde de birleştirilmiş sonlu boyutlar olduğu için fiziksel yapıları bir noktadan çok hacmi $d_1d_2d_3$ olan bir kuantum kutusuna benzer. DOS spektrumu sonsuz küçük yollarla sonlu doğrusal bir genişliği gösterir. Enerji denklem (2.1) deki gibi kuantumlaşmayla elde edilir.

$$E=E_c+E_{q1}+E_{q2}+E_{q3}, \quad (2.1)$$

Burada;

$$E_{qn}=h^2(q_n\pi/d_n)^2/(8\pi^2m_c), \quad n=1,2,3 \quad (2.2)$$

Denklem (2.1) deki, $q_{1,2,3}$ temel (alt) enerji bandı ile birleştirilmiş üçlü kuantum sayılarıdır. $q_{1,2,3}$ ün her biri integral değerleri alır ve $d_{1,2,3}$ nokta boyutlarındadır.



Şekil 2.1 Seviyelerdeki yoğunluğun kuantumlanmış olmasının karşılaştırılması⁽⁴⁾: **a)** hacim, **b)** kuantum kuyusu, **c)** kuantum teli, **d)** kuantum noktası iletim ve değerlik bantları üst üste binmiş alt bantlara bölünmesiyle daha büyük boyutlarda elektronun hareketi sınırlandırıldığı için dar sınırlar elde edilir

Verim elde edebilmek için, kenar bandına yakın enerjilerdeki boşluk ve elektronların her ikisinin de içindeki taşıyıcıların büyük bir yoğunluğa sahip olmaları tasarlanır. Böylece taneciklerin sayısının tersine çevrilmesi kolaylaşmış olur. Elektronlar uyarılmış seviyede temel seviyeden daha fazla

olmalıdır. Kuantum nokta lazerlerde temel seviyedeki kısa bulunma süresi birim hacimdeki optiksel geçiş sayısının büyük olmasını sağlar. Bu geçişlerin çoğu yüksek iç verimle sonuçlanan radyoaktif yeniden birleşmelerden oluşurlar. Sisteme pompalanan enerji bir enerji seviyesinden diğerine geçen yük taşıyıcılarını artırır. Bu yük taşıyıcılarının hiçbiri rast gele hareket etmezler. Çünkü orada diğer bir serbestlik derecesi yoktur. Böylece kuantum kuyuları ve tellerinin her ikisinden de daha düşük eşik akımında ve yüksek verimli noktalardan kayıp olmaması beklenir⁽³⁰⁾.

2.2. Kuantum Nokta Lazerlerin Avantajları

a. Kuantum nokta lazerler yasak enerji bandı enerjilerinin yanında, noktaların enerji düzeyleri ile tanımlanmış dalga boylarında ışık yayabilmelidirler. Böylece Kuantum nokta lazerler dalga boyunu ayarlayabilmek için yüksek esneklik ve gelişmiş aygıt performansı sunarlar.

b. Kuantum nokta lazerlerin maksimum malzeme ve türevsel kazançları vardır. Bu kazançları kuantum kuyu lazerlere göre en azından 2-3 kat daha fazladır.

c. Küçük aktif hacmin birçok yararı vardır. Örneğin; düşük güçte yüksek frekansta çalışma, büyük modülasyon bant genişliği, küçük dinamik sesler, küçük doğru genişliğini artırıcı faktör ve düşük eşik akımı.

d. Kuantum nokta lazerler eşik akımındaki, yüksek sıcaklık dengesini de gösterirler. Eşik akımı denklem (2.3) den bulunabilir.

$$I_{\text{eşik}}(T) = I_{\text{eşik}}(T_{\text{ref}}) \cdot \exp((T - T_{\text{ref}})/T_0), \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)' deki, T: aktif bölge sıcaklığı, T_{ref} : referans sıcaklık ve T_0 : deneysel olarak bulunmuş karakteristik sıcaklıktır. Karakteristik sıcaklık cihazın boyunun ve sıcaklığının bir fonksiyonudur. Kuantum nokta lazerlerde T_0 yüksek olabilir. Çünkü iç alt bantlardaki ayırımın yüksek olmasıyla elektron-fonon etkileşimi etkili bir şekilde çiftlenebilir. Bu durum dış termal denge olmadan da oda sıcaklığı performansının azalmamasını sağlar.

e. Ayrıca kuantum nokta lazerleri, eşit olmayan ışık yayılmasını engelleyerek aktif bölgeden sızmaların azalmasına neden olurlar.

f. Daha yeni yapılar, örneğin; dağıtıcı geri beslemeli lazerler ve tek nokta VCSELs son derece güvenilir olmasının yanında tek mod çalışması ile ilgili olarak da umut vermektedirler⁽⁴⁷⁻⁴⁹⁾.

2.3. Kuantum Nokta Gereksinimleri

Bir kuantum noktasının büyüklüğünün limiti kuantum noktasının içerisinde yalnızca bir elektronik seviyenin büyüklüğü ile tanımlanır. Bu kritik boyut (D_{min}), güçlü olarak denklem (2.4)' e göre kuantum noktalarının yapılması için kullanılan uygun birleşik yapıdaki süreksiz iletim bandına (ΔE_c) bağlıdır⁽¹¹⁾.

$$\Delta E_c = (\hbar^2 \pi^2) / (2 \cdot m_e \cdot D_{min}^2), \quad (2.4)$$

Genellikle, $\Delta E_c \sim 0.3$ eV (GaAs-AlGaAs sistemi için), $D_{min} \sim 40 \text{Å}$.

Büyüklüğün üst limitine ihtiyaca göre karar verilir.

Isısal enerji, $kT >$ enerji düzeyleri arasındaki mesafe ye bağlıdır.

Bu şartlar üst seviyedeki toplanmayı azaltmak için gereklidir. Genellikle, $D_{\max} \sim 120 \text{ Å}$.

Ayrıca diğer optoelektronik aygıtlarla çalışabilmek için kuantum noktaları bozukluklar veya eksiklikler içermemelidir. Kuantum noktasının yoğunluk düzeni lazerin yüksek mod kazancını anlamamız için gereklidir. Kuantum noktalarının bir düzlemde dizilişi ve periyodik kafeslerin oluşma olasılığı küçük bir numune içerisinde de tasarlanabilir.

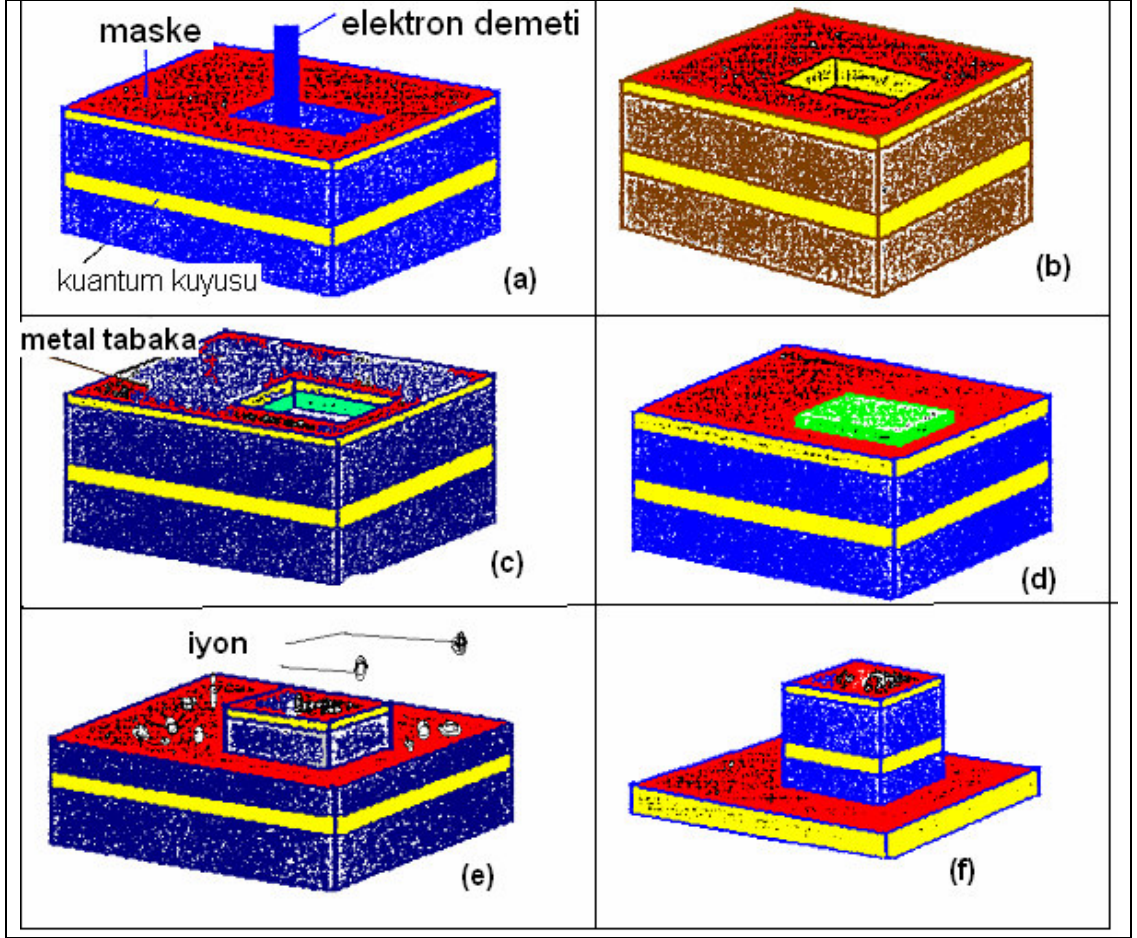
2.4 Noktaların Üretimi

Noktalar mümkün olduğu ölçüde şekil ve büyüklük olarak tek biçimde olabilirlerse kuantum nokta yapılarının birçok avantajı elde edilebilir. Fakat yapısal olarak birbirinin aynı verimli ve tekrar üretilebilir bir şekilde yapmak önemli bir deneysel başarıdır. Geleneksel yarı iletken işlem teknikleri esasında birçok problemlerle karşı karşıyadır. Örneğin sınırlı çözümler ve üretim sırasında yüzey bozukluklarına giriş gibi. Böylece birçok araştırma grubu kuantum nokta yapıların doğrudan doğruya sentezini yapabilmek için çeşitli teknikler üzerinde çalışmaya başlamışlardır. Bunlardan bazı teknikler ve özellikleri şöyledir;

2.4.1. Eritme Yöntemi

Bu yöntemde önce bir veya daha fazla kuantum kuyusundan meydana gelmiş olan yapının yüzeyi polimer bir tabaka ile kaplanır ve nanometre

büyükliğünde bir yüzey elde edilir. Bu bölgenin şekli ve sınırları elektron demeti yardımıyla tespit edilir (Şekil 2.2.a).



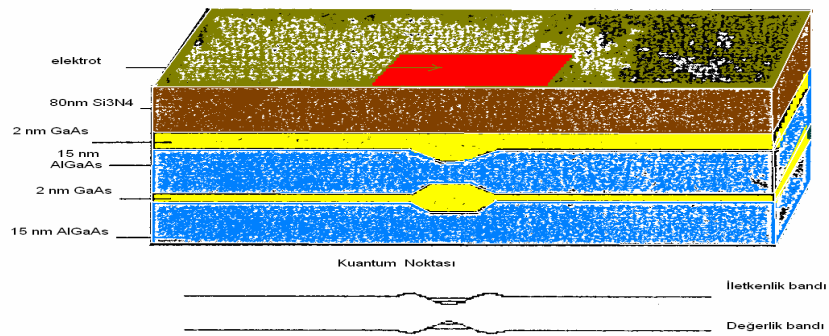
Şekil 2.2. Eritme yöntemi kullanılarak kuantum noktalarının elde edilmesi

Elektron demeti yardımıyla seçilen bölgenin yüzeyi temizlenir (Şekil 2.2.b). Görünür bölge elektromanyetik dalgaları polimer tabakanın yüksek çözünürlüğü nedeniyle kuantum noktasının sınırlarını belirlemede ve seçilen yüzeyin temizlenmesinde kullanılmaz. Daha sonra tüm yüzey(kuantum noktası olarak belirlenen yüzey de dahil) altın veya benzeri bir metal tabaka

ile kaplanır (Şekil 2.2.c). Sonra seçilmiş olan yüzeyin dışında kalan tüm yüzey aktif iyon demetine maruz bırakılır ve alttaki polimer yapı temizlenerek basit yapı elde edilir (Şekil 2.2.d). Sınırlandırıcı yüzeyin üzerindeki metal tabaka elektrot olarak kullanılır. Son olarak eritme yöntemi ile diğer alt tabakalara erişilir ve sütun elde edilir (Şekil 2.2.e). Bu yöntem kullanılarak boyutları 10 Å ile 100 Å arasında olan düzgün ve sıralı olarak dizilmiş kuantum noktaları veya kuantum noktası elde edilmektedir⁽³³⁾.

2.4.2. Engel Arası İç Yayılma Yöntemi ve Kuantum Kuyusu

Bu yöntemde kuantum kuyusunun belirli bir bölümü lazer ışın demeti ile ısıtılır. Bunun için genellikle kalınlığı 2 nm olan GaAs kuyusu kullanılır. GaAs tabaka kalınlıkları 15 nm olan iki adet $\text{Al}_{0.35}\text{Ga}_{0.65}\text{As}$ tabaka arasına yerleştirilir ve bir kuantum kuyusu elde edilir. Sonra kalınlığı 2 nm olan GaAs, AlGaAs tabaka üzerine yerleştirilir. Lazer ışınından kaynaklanacak erime ve oksitlenmeyi engellemek amacıyla üst yüzey kalınlığı 80 nm olan Si_3N_4 tabakası ile kaplanır.



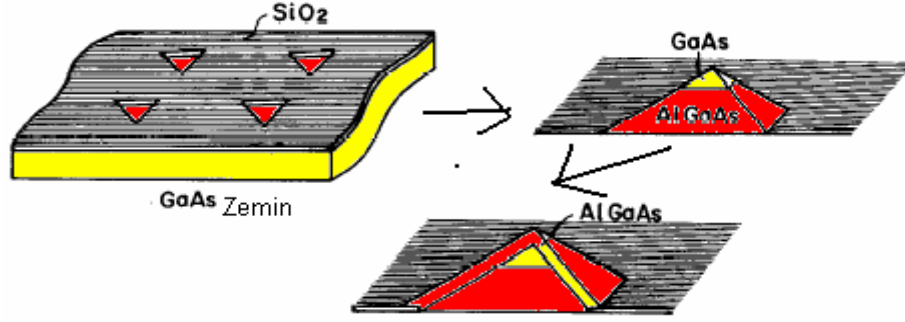
Şekil 2.3. Lazer ışın demeti ile ısıtılarak belirli genişlikteki kuantum kuyusundan kuantum noktasının elde edilmesi

Seçilen belirli genişliği olan yüzey, lazer ışın demeti ile ısıtılır. Isıtılan kısmın altında kalan Ga ile Al atomları birbirine karışarak bölgesel bant yapısının oluşmasına neden olurlar

Lazer ışını ile ısıtılan bölgedeki yasak enerji aralığı, ısıtılmayan bölgeye göre daha küçüktür. Bu şekilde işlemler tekrar edilmek suretiyle daha büyük malzemelerin kullanılmasıyla aralarında yasak enerji aralığı bulunan ve içine bir veya birden çok elektronun hapsedilebileceği kuantum noktaları elde edilebilir⁽³⁴⁾.

2.4.3. Seçici Büyütme Yöntemi ile Kuantum Noktası retilmesi

GaAs gibi oldukça küçük yasak enerji aralığına sahip yarı iletken bir malzemenin üzeri daha geniş yasak enerji aralığına sahip AlGaAs malzemeyle kaplanır. Bu malzemenin yüzeyi de koruyucu tabaka olarak SiO₂ ile kaplanır. Yüzey üzerinde büyütme yapılacak alan belirlenir ve yüzey üzerinde eritme yapılarak küçük üçgenler oluşturulur. Bu küçük üçgen yüzeyler zerine MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) tekniği uygulanarak sıcaklık 800 °C' ye kadar yükseltilebilir. Bu şekilde bu üçgen yüzeylerin hacmi büyültülmüş olur. genler dört yüzlü piramit haline dönüşür ve büyütme işlemleri tamamlanmış olur (şekil 2.4).



Şekil 2.4. Seçici büyütme yöntemi kullanılarak kuantum noktalarının elde edilmesi

Ga As elde edilen kristal yapının üst kısmında bulunur. Bu şekilde boyutları 100 nm veya daha küçük olan kuantum noktaları elde edilebilir^(35, 36).

Benzer tekniklerle kuantum noktasını seçici büyütme yöntemiyle de elde edebiliriz. Bunun için 5 nm kalınlığındaki GaAs yarı iletken malzemenin yüzeyi önce 1µm kalınlığındaki AlGaAs ile ve daha sonrada 10 nm kalınlığındaki Si₃N₄ bileşiği ile kaplanır. Yüzey üzerinde seçilen küçük üçgen şeklindeki yüzeylerin elektron demetine tabii maruz bırakılması ile Si₃N₄ bileşiğinden temizlenir. Sonra ise MOVPE (Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) yöntemiyle GaAs çökeltisi elde edilir. Bu şekilde elde edilen kuantum noktası boyut olarak 100 nm veya daha küçüktür.

2.4.4 Yarı İletken Mikro kristaller

Cam gibi dielektrik malzemelerin içerisine yarı iletken mikro kristal yapıların yerleştirilmesi ile de kuantum nokta yapılar elde edilir. Bunun için

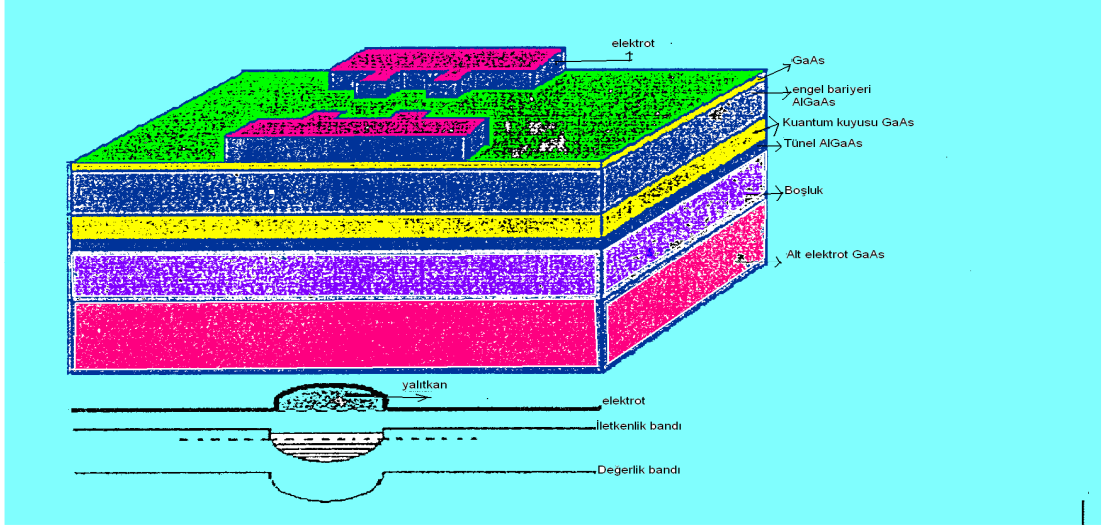
belirli ölçülerdeki CdS, CuCl, CdSe ve CuBr benzeri bileşikler ile silikat cam bileşiklerle birlikte birkaç yüz derece sıcaklıkta ısıtılırlar. Sıcaklığa ve süreye bağlı olarak istenilen şekil ve boyutta kuantum noktaları elde edilebilir.

$$a^{-3} = te^{-\frac{\epsilon}{k_b T}} \quad (2.5)$$

Kuantum noktasının genişliğinin bulunması ifadesinden yararlanılarak nokta genişliği kontrol edilebilir⁽³⁷⁾. Bu yöntem kullanılarak kuantum noktalarının büyüklükleri 1,2 nm ve 18 nm aralığında elde edilebilir.

2.4.5. Elektrik Alanı Modülasyonu Yöntemi

Bu yöntem litografik yöntem olarak bilinen ve kuantum kuyusu yüzeyine oldukça küçük elektrotların yerleştirilmesiyle uygulanan yöntemdir. Bu elektrotların üzerine uygun miktarda gerilim uygulanmasıyla elektronun hareketlerini sınırlandıran küçük bir elektrik alan oluşturulur. Elektrik alanın uygulanan gerilim ile ayarlanması yapılabilir. Bu şekilde elde edilen kuantum noktalarında malzeme nedeniyle oluşan kenar kusurları da oluşmaz. Bu yöntemle eritme yöntemindeki gibi düzgün olarak dizilmiş çok sayıda kuantum noktası oluşturulabilir.



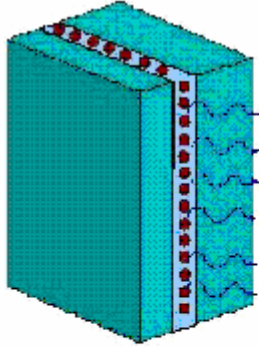
Şekil 2.5. Kuantum kuyusu üzerinde oluşturulan elektrotlar yardımıyla kuantum noktalarının elde edilmesi

Litografi yöntemi ile önce malzeme yüzeyi üzerinde küçük GaAs adacıkları oluşturulur. Sonra bu adacıkların yüzeyi metal tabaka ile kaplanır. Bu metal tabaka elektrot olarak kullanılır. Bu elektrot tabakaya gerilim uygulanarak elektriksel potansiyel ve elektriksel alan oluşturulur. Bu elektriksel potansiyel ve elektrik alan ile elektrot ile kuantum kuyusunun yüzeyi arasındaki mesafenin genişliği ayarlanabilir. Elektriksel potansiyel tepeliğin altındaki malzemenin değerlik ve iletkenlik band yapıları değişime uğrar. Diğer bir şekilde malzemenin alt kısmındaki n^+ GaAs de bir elektrot olarak kullanılabilir (Şekil 2.5). Oluşan potansiyel yardımıyla kuyu şekline dönüşen iletkenlik bandının genişliği ve derinliği de ayarlanabilir. Böylece elde edilmiş olan kuantum noktası içindeki hareketi sınırlandırılabilen elektronların sayısı da istenildiği gibi ayarlanabilir^(38,89).

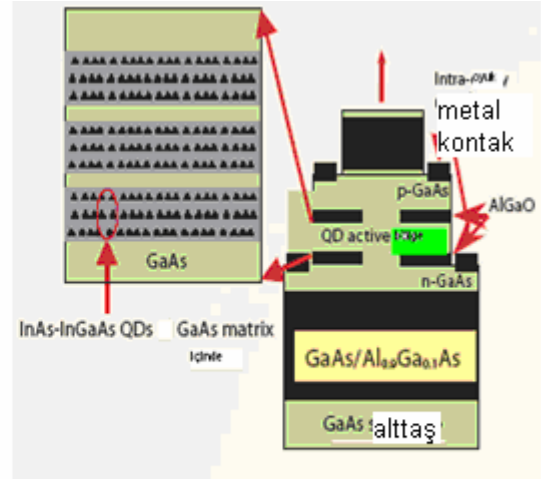
2.5 Kuantum Nokta Lazerlerin Çalışması Ve Özellikleri

Yarı iletken yapılar optik sınırlamalara ihtiyaç duyarlar. Kuantum nokta lazer üretimi için bu durum, birbirinden ayrılmış yapıların içindeki kuantum noktalarının sandviç edilmesi ile elde edilebilir (Şekil 2.6).

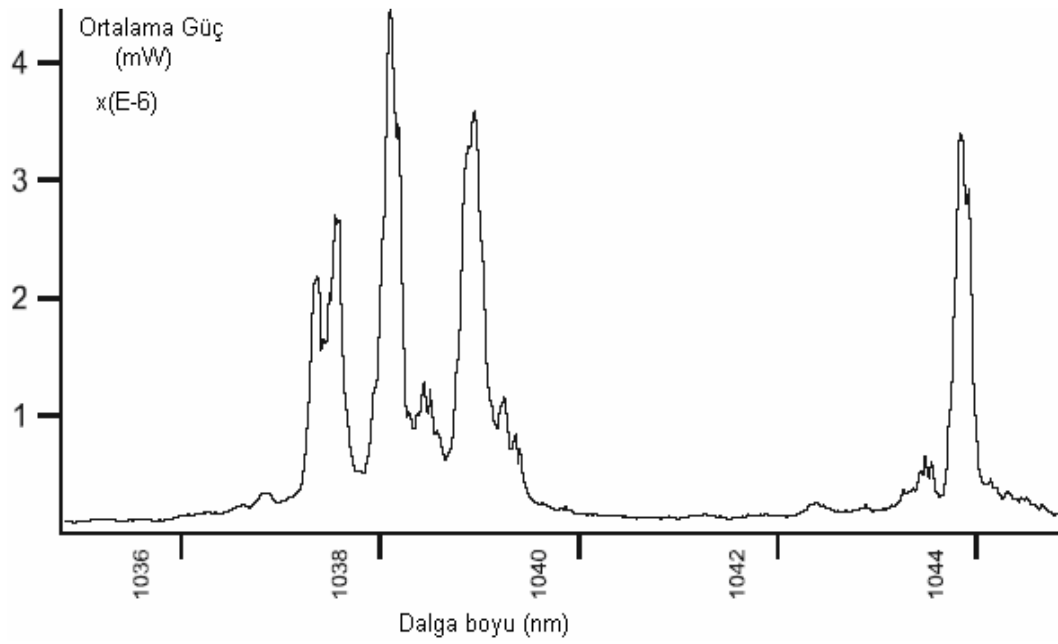
1995 yılında Stuttgart Max Plank Enstitüsündeki araştırmacılar, 690 nm dalga boyunda pike sahip 6.7 MeV bant genişliğindeki, oda sıcaklığında optiksel olarak uyarılmış InP kuantum nokta lazerleri yapmayı başarmışlardır. Bunun yanında, değişik nokta büyüklüklerinin küçük olması, üst üste toplanmış olan noktaların dar doğrusal bir genişlikte yerleşmiş olduğu ve elektriksel olarak uyarılmış olan lazerlerde, oda sıcaklığındaki kuantum kuyu lazerlerin eşik akımının eşlenememesindeki başarısızlık nedenlerinin araştırılması ile ilgili çalışmalarda yapılmıştır^(6,7).



Şekil 2.6. Kuantum nokta lazer (QDL)⁽¹⁶³⁾



Şekil 2.7. Bir QDL VCSEL'in şematik gösterimi⁽¹⁶³⁾



Şekil 2.8. QDL yapının ürün spektrumu^(20,163)

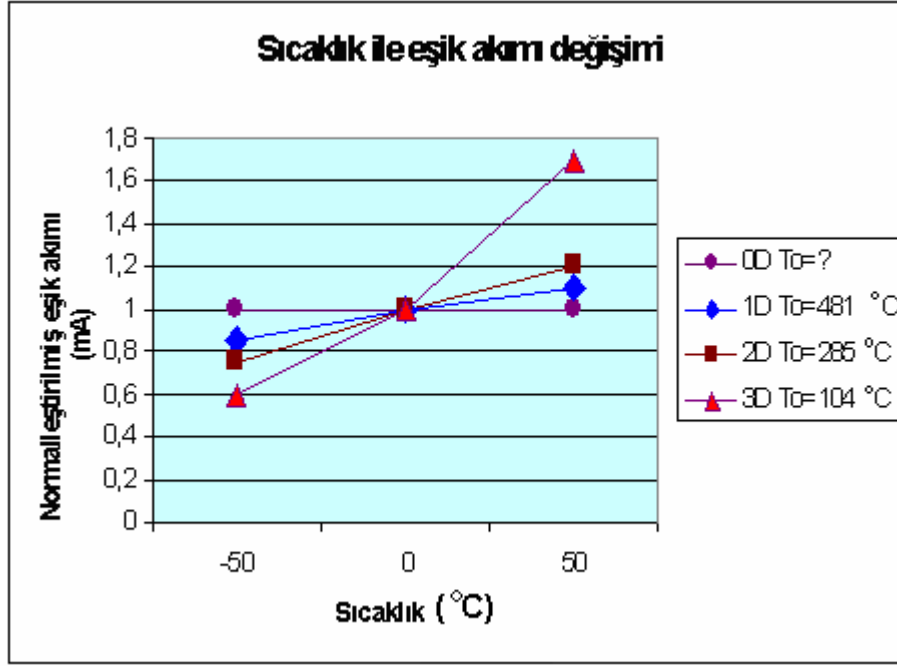
Kuantum nokta lazerlerdeki günümüze kadar gelen gelişmelerle dalga boyu bakımından esnek olan yapılar elde edilmiştir. Son zamanlarda özellikle dalga boyu 690-710 nm lik ^(15, 16), 0.9-1.1 mikron⁽¹⁷⁾, 1.14 mikron⁽¹⁸⁾, 1.27-1.3 mikron⁽¹⁹⁻²¹⁾, 1.84 mikron⁽²⁰⁾ ve 1.9 mikron⁽²²⁻²⁴⁾ lük ışık yayan değişik ve farklı yapılar geliştirilmiştir. Bu değişiklik, malzeme ve tasarımlarındaki değişikliklerden elde edilebilir. Örneğin; son raporlara göre bazıları, InGaAs matris kafeslere InAs noktalar yerleştirilmiş ve etrafı 1.8-1.9 mikron kalınlığında malzeme ile kaplanmıştır. Fakat diğerleri InGaAs⁽¹⁷⁾ noktaları silikon veya kalınlığı 1 mikron olan GaAs malzemelerin üzerinden elde etmişlerdir. Gerçekten de bu çeşit yapılar için dalga boyunun sınırı yaklaşık olarak 1.3 mikron civarındadır. Şekil 2.8, QDL için spektrum sonuçlarını göstermektedir. İncelenen çok sayıdaki kuantum noktası göstermiştir ki; kuantum noktalarının birçok özelliği spektrum sonuçlarının beklenen ve

malzeme yapısının spektrum sonuçları ile karşılaştırılması ile elde edilebilmektedir. InAs/GaAs kuantum malzemelerdeki malzeme kazancının yaklaşık 6000 cm^{-1} olduğu bulunmuştur. Bu oran kuantum kuyu yapılara göre oldukça iyi bir orandır.

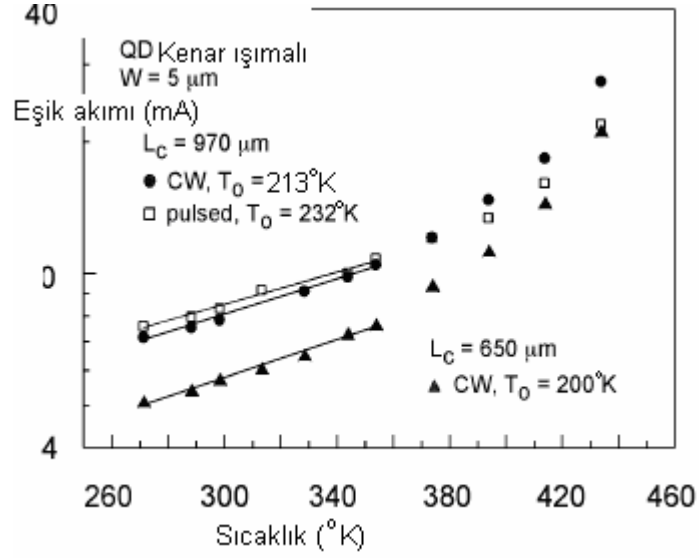
Dikey olarak bir GaAs/AlGaAs GRINSCH lazerin aktif bölgesindeki dikey olarak çiftlenerek (InGa)noktalarının büyümesiyle elde edilmiş olan kuantum nokta lazerler için düşük akım yoğunluğu 77 K de 65 A/cm^2 ve 300 K de 65 A/cm^2 olarak bulunmuştur⁽²⁰⁾. Son zamanlardaki çalışmalar uygun bir lazer yapısı için eşik akımının 45 mA olduğunu göstermiştir⁽¹⁷⁾. Fakat ışık dalgasını iletim sistemleri fiber teknolojinin gerçekleştirilmesi için daha yüksek dalga boylarına ihtiyaç duymaktadırlar. Yukarıda açıklanan yapı için bu oran 1-1.3 mikron arasındadır. Daha yüksek dalga boyları da elde edilmiştir. Örneğin; InP üzerindeki büyüyen InGaAs malzemesinin içerisine yerleştirilen InAs noktaları için ışığın 1.84 mikron da yayıldığı tespit edilmiştir. Bu da bize eşik akımı yoğunluğunun 77 K de 64 A/cm^2 olduğunu göstermiştir⁽²⁰⁾. Daha sonra GaAs üzerine 1.3 mikron değerli InGaAs kullanılarak ve GaAs 'in dış yüzeyini yüksek yansıtıcı kaplama ile kaplayarak eşik akımı 90 A/cm^2 e çıkarılmıştır⁽²¹⁾.

Kuantum nokta lazer yapılarıdaki diğer bir beklenti ise bu yapıların dikkate değer ölçülerde sıcaklık dengelerine sahip olmalarıdır. Bu yapılar eşik akımını 180 K e kadar 80 A/cm^2 civarında koruduğu görülmüştür⁽¹¹⁾. Hesaplamalar hemen hemen 380 K civarındaki bir deneysel T_0 değerinin azaltılabileceğini göstermiştir. Örneğin; InP kuantum kuyu lazerler 60 K civarında deneysel T_0 değerine sahiptir. Fakat bu sıcaklığın üzerindeki

sıcaklıklarda eşik akımı yükselmeye başlamaktadır. Bu durum kısmen uyarılma seviyesi ışıma hareketine yardımıyla oluşan yetersiz artışından kaynaklanmaktadır. Bu durum bazen oda sıcaklığında denge sıcaklığının yükseltilmesi için geliştirilebilir.



Şekil 2.9. İki yapının sıcaklık sonuçları (T) ile eşik akımı arasındaki ilişki.
 $J_{th}(T) = J_{th}(0) \exp^{(T/T_0)}$ T_0 lazerin karakteristik sıcaklığı⁽⁵⁾



Şekil 2.10. Sıcaklık eşik akımı ilişkisi⁽¹⁹⁾

Şekil 2.10' daki yapı temel seviyedeki durumunu 324 °K ve daha da ilerisine kadar korumayı başarmıştır. Fakat T_0 değeri yinede 250 °K den daha ilerideki değerler için düşmeye devam etmektedir⁽¹⁹⁾.

Bu durumun üstel artıştan kaynaklandığını savunan birçok kaynak vardır. Buna göre homojen olmayan doğru genişlemesi, taşıyıcıların ıslak tabakadan kaynak dalga bölgesine ve heterojen bölgeye doğru kaçışlarının neden olduğuna inanılmaktadır. Bu problemi çözmeye yönelik çalışmalar devam etmektedir.

2.6. Kuantum Nokta VCSELs

Düzlem lazerlere göre çok avantajlıdırlar. VCSELs lerin bazı temel özellikleri aşağıdaki gibidir;

2.6.1 Optik Haberleşme

1960'ların başında yarı iletken lazerin keşfi⁽³⁹⁾ foton teknolojisinde büyük bir adım olarak kabul edilir. Günümüzde bu cihazlar optik veri kaydı ve veri okumada, lazer yazıcılarda, optik pompalamada ve katı-hal lazerleri yapımında geniş ölçekte kullanılmaktadır. Bunun dışında yarı iletken lazerler, optik iletişim sistemleri için ışık kaynağı olarak kolayca kendine yer edinmiştir. Bununla eş güdümlü olarak gelişen optik yükselteçler, detektörler ve yüksek-hızlı elektronik, fiber optiğin keşfi, iletişim teknolojisinde bir yenilik oluşturmuş ve çok sayıda veriyi yüksek hızda dünyanın istediğiniz yerine taşınmasını sağlamıştır. Yükselen veri trafiği, kapasitede ve kullanımda sürekli talepler oluşturmuştur.

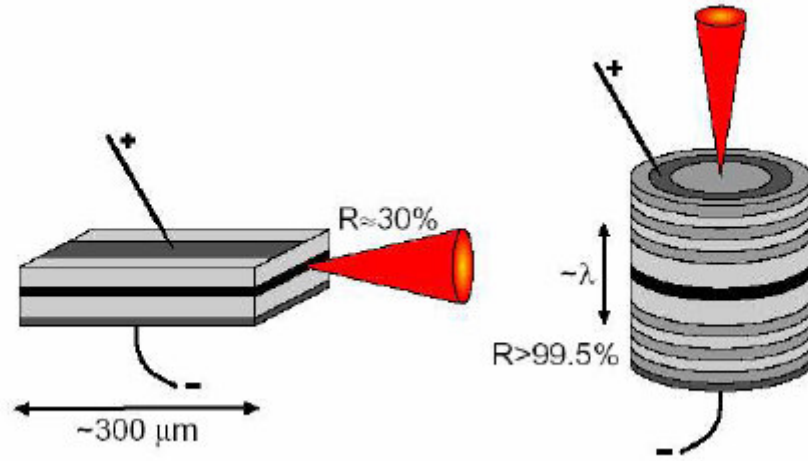
Çift-sarım bakır kablolar bu talebe karşılık verememiş ve limitlerine çabuk erişmiştir. Sonuç olarak optik teknoloji, birçok iletişim alanında tercih edilen bir seçenek durumuna gelmiştir. Uzun-erimli sistemlerde verici-alıcı sayısı çok olmamakla birlikte cihaz maliyeti çok önemli değildir, kısa-erimli şehir içi ya da ofis içi ağlarda çok verici-alıcı ve düşük maliyet önem kazanır. Son yıllarda gelişen Dikey-oyuk lazerleri (VCL) etkilediği optik iletişim teknolojisine çok çeşitli avantajlar sunmuştur. Kısa-erimli ağlarda genellikle, verimliliğine karşı ucuzluğuyla ve düşük güç harcamasına karşın sunduğu yüksek hızlarla 850nm dalga boylu GaAs tabanlı VCL'ler kullanılır. Günümüzde ticari olarak satılan 12 paralel vericili lineer dizilerle standart çok-modlu optik hatlarda yüzlerce metre uzaklığa 3,5 Gbit/s hızında veri aktarımı yapılabilmektedir⁽⁴⁰⁾. Uzak-erimli uygulamalar için 1,3 – 1,6µm dalga boylu lazer kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. 1,3 ve 1,55µm'lik lazer uygulamaları

veri transferleri için uygundur. İlk dalga boyu, tek-modlu fiberlerde düşük dağılganlığıyla, ikinci dalga boyuda az kaybıyla dikkat çeker. Fabry-Pèrot (FP) ve dağıtılmış geri besleme (DFB) gibi geleneksel yüzey lazerleri orta ve uzak-erimli uygulamalarda kullanılagelmiştir⁽⁸⁶⁻⁸⁸⁾. 10 Gigabit Ethernet (10 GbE) gibi yeni bir standartla daha düşük maliyetli alıcı-vericiler ve 10 km. ötesi hızlı iletişim beklenmektedir. Orta ve uzun-erimli tek-modlu fiber uygulamaları için ucuz 1,3 ve 1,55 μm dalga boylu VCL'ler yeni kuşak optik iletişim için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkar^(6,45,46,148).

2.6.2 Dikey-oyuk lazerleri

Dikey-oyuk lazer fikri ilk olarak 1978'de Tokyo Teknoloji Enstitüsünde Iga ve arkadaşları tarafından ileri sürülmüştür^(41,97). Bu tür lazerlerin oda sıcaklığında (OS) atmalı ve düzenli dalgalı (CW) çalışan ilk örnekleri aynı grup tarafından 1984 ve 1989 yıllarında yapıldı⁽⁴²⁻⁴³⁾. 1980'lerin sonuna doğru VCL'ler tüm dünya da araştırılan bir konu haline geldi. 1990'ların ortalarından itibaren VCL'ler araştırma laboratuvarlarından çıkıp üretim alanına girdi ve sonunda ticari olarak bulunur hale geldi. VCL'lerin cihaz geometrisi, geleneksel düzlem lazer diyotlarından farklılık gösterir ve birçok potansiyel avantaj sunar⁽⁴⁴⁾. Düzlem lazerlerde lazer ışması ve titreşimi, lazer yonga yüzeyine paralel meydana gelirken, VCL'ler titreşimi ve ışık yayılımını dik olarak yaparlar (Şekil. 2.11). VCL'lerde oyuk boyu düzlem lazerlerin yüzlerce mikronla ölçülecek boyutuna karşın, yayılan ışığın dalga boyu mertebesinde dir. Bu nedenle VCL'ler boyuna geniş mod aralığı ile kısa kazanç bölgesi özelliği gösterir. Daha uzun kazanç bölgesine sahip olan

düzlem lazerler, başarılı bir lazer titreşimi yapabilmesi için parlak yarı iletken/hava düzleminde yaklaşık %30'luk yansıtmaya sahipken, daha kısa kazanç bölgesi VCL' lerde bu durum üretilen yüksek yansıtımlı aynalarla %99,5 civarındadır. Bu aynalar, düşük ve yüksek kırılma indisli çoklu çeyrek dalga katmanlarından oluşur ve Dağıtılmış Bragg Yansıtıcıları (DBR) olarak adlandırılırlar⁽⁸⁹⁻¹⁰¹⁾.



Şekil 2.11. Düzlem lazerle (sol), Dikey-oyuk lazeri (sağ) arasındaki temel farklar⁽⁶⁾

Buna karşın düzlem lazerlere benzer olarak fotonları enine sınırlama ölçümleri ve iyi kazançlı lazer işlemi oluşturmak için gerekli olan VCL oyuğundaki yük taşıyıcıları benzerlik göstermektedir⁽⁶⁾.

2.6.3 VCL'leri Avantajları

Düzlem lazerlere göre VCL'in en büyük avantajı ince silikon parçası yüzeyine dik olan lazer ışınması sağlamasıdır. Bu ince silikon parçası düzeyinde düşük masrafının yanında ayrıca, cihazı kılıflamadan önce ince silikon parçası üzerinden test edilebilmesine olanak sağlamaktadır. Düzlem lazerlerdeki lazerin optik oyuğunun parlak yüzeylerini oluşturma işlemi olmadığından, VCL'ler daha ucuz ve daha kısa sürede yapılabilir. Bu özelliğiyle bir ya da iki boyutlu VCL dizilerini yapmak kolaylaşır. Bu diziler, birçok cihazın tek bir cihaz gibi işlem görmesi demek olduğundan ekstra masraf getirmez. VCL'ler ince silikon parçası düzeyinde de kontrol edilebildiklerinden dolayı, sorunlu lazerler daha ince silikon parçası üzerinde belirlenip işleme sokulmazlar. VCL'leri fiber-optik iletişimde kullanılmasını sağlayan bir kaç önemli özellik daha bulunur. Düzlem lazerler, dalga-kılavuzu dikdörtgen yapıda olduğundan, eliptik bir ışık demeti oluştururlar. Fakat VCL'lerin dairesel simetrisi, VCL'lerin düşük dağılımıya sahip dairesel bir demet oluşturmaya olanak sağlar. Buda tek ya da çok modlu fiber hatların optik yönelimleri ile uyumludur. Çifttenim verimlerinin, hiçbir ilave optik sistemi kullanılmadan tek-modlu hatlarda %80, çok modlu hatlarda %90 dolaylarında olduğu anlaşılmıştır. Düzlem lazerlerde, çifttenim verimleri oldukça düşüktür. Bu düşük çifttenim verimi ilave lens takılarak çözülebilir. Fakat bu ilave masraf ve kılıflama sorunu demektir^(45,46). Dikey-oyuk lazerleri, geniş dikey-mod boşluğuna ait dikey tek-modlu işlem gösterirler. Bu durumda optik kazanç spektrumu çizgi şeklinden daha geniştir. Buna karşın düzlem lazerlerin gelişmiş oyuk tasarımları, tek dikey modlu işlem yapması için tasarlanmıştır (Örneğin ;DBR ve DFB lazerlerde ızgara kullanılması). Düzlem

lazerlerin aksine VCL'lerin küçük aktif bölgesinin yüksek yansıtma özellikli DBR'lerle kullanımı cihazların düşük akımlarla eşiğe ulaşmasını ve çalışmasını sağlar. Ek olarak bu küçük hacim, düşük akımlarda yüksek modülasyon bant genişliği sağlar. Bazı gruplar VCL'lerin 10,000 saatlik kullanım ömürlerine ulaştığını bildirmiştir^(47,48,149-150). Bu değerin bağlı olduğu bazı faktörler vardır: düşük güç tüketimi ve DBR kullanımıdır^(49,50). Doğaları gereği DBR'ler açıkta değildirler. Bu durum düzlem lazerlerdeki parlatılmış yüzeyler için sorun teşkil eder⁽¹¹³⁻¹¹⁸⁾. Bu sayede DBR'nin mekanik hasar görmesinin de önüne geçilir. Dahası düzlem lazerlerde yüksek alan yoğunluğunda ortaya çıkabilen çok kötü optik hasar DBR'ler de geçerli olmayan bir problemdir^(6,106-112).

2.6.4 Uzun-Dalga boylu VCL'ler Önündeki Engeller

Piyasadaki geniş kullanım alanlarına, dünya çapında son on sene boyunca yapılan araştırmalara rağmen uzun-dalga boylu VCL'ler (LW VCL) konusundaki gelişmeler kısa-dalga boylu benzerlerine göre daha yavaş ilerlemekte ve ticari kullanıma daha uzun bir yol var gibi görülmektedir. Bunun sebebi LW VCL'ler de temel malzeme olarak kullanılan InGaAsP/InP sisteminin yetersiz olmasıdır. 780-980nm kısa dalga boyunda çalışan GaAs VCL'lerin aksine 1300-1600 nm civarında çalışan bu sistemde yüksek-yansıtıcı aynalar oluşturma zorluğu ve yükselen sıcaklıklarda aktif katlarda yeterli kazanç sağlanamaması sorunları ortaya çıkar. İdeal olarak hem aynalar hem de aktif bölge VCL'in bütün-tek parça büyümesini sağlamak için zemin ile aynı yapıda olur. Düşük ve yüksek-dalga boyları için yüksek-

yansıtıcı aynalar GaAs sistemde kristal yapıları uyan AlGaAs ile yapılabilirken, bu klasik ve verimli GaAs-tabanlı yapı 1000 nm'den yüksek dalga boylarında çalışmamaktadır. Daha uzun dalga boylarında InGaAsP/InP, aktif kat yapımında düzlem lazerde başarılı sonuçlar verir ve bu sebeplere yaygın olarak kullanılır. Fakat InP zemin üzerinde ayna oluşturmada, GaAs-yapıda olanların aksine yüksek verimli VCL oluşturmak için yetersiz sonuçlar alınır. Kristal parametrelerinin farkı dolayısıyla da GaAs ve InP sistemler ince kaplama tabakalı yöntemlerle de birbirlerinin üzerinde büyütülemez. InGaAsP sisteminin diğer bir sorunu da InGaAsP ve InP arasındaki düşük iletim bandı dengesidir. Bu yükselen sıcaklıklarda taşıyıcı kaçağı olarak da adlandırılan düşük elektron hapsine neden olur. Yüksek-performanslı işlem sağlayan GaAs 'a yanal oxide edilen AlGaAs gibi güçlü tekniklerin, InP' nin sistemde bulunmaması da sorunlara sebep olarak gösterilebilir. Bu malzeme tabanlı sorunların yanı sıra uzun-dalga boylarının doğasına özgü bazı sorunlarda bulunmaktadır. Bunlar arasında serbest-taşıyıcı ve ara-değerlik bandı soğurulması sebebiyle kaynaklanan taşıyıcı ile ilgili optik kayıplar, Auger-yeniden birleşmesi' ne ait yayıcı olmayan kayıplar bulunur^(44,50,51).

Bu iki sorunda dalga boyu arttıkça artar. Yetersiz ayna ve aktif bölge sorunları yüksek eşik akımı, düşük çıkış gücü ve başarısız yüksek sıcaklık çalışması olarak kendini gösterir^(44,51,52). Fiber-optik ağların yapısına göre maksimum çalışma sıcaklığı 70-85 °C olarak belirlenmiştir. VCL' lerin, düzlem-lazere olan fiyat avantajını koruyabilmesi için termoelektrik soğutucular kullanmadan bu sıcaklarda çalışabilmesi gerekir. LW VCL' lerin gerçekleşmesi kısa dalga boyunda çalışan benzerleri gibi kolay olmayacaktır.

InGaAsP malzeme sisteminin getirdiği yetersizlikler yeni malzeme araştırmaları ya da cihaz fikrinin oluşması ile kapatılabilir.

2.6.5 VCL Temelleri

Bu bölüm LW VCL' ler hakkında bazı temel bilgiler içerir. Genel tasarım meseleleri ile başlar, DBR ve Aktif bölge gibi VCL bloklarının açıklamalarıyla devam eder. LW VCL' ler hakkında geçmiş yıllarda gelişen önemli olayların sıralandığı bir kısımda bulunmaktadır. Bu bölüm konu hakkında doyurucu bilgi içermemektedir. VCL' lerin tasarımı, fabrikasyonu ve uygulamaları için ilgili referanslara bakılabilir. ^(52,53,54)

2.7. Genel Tasarım Problemleri

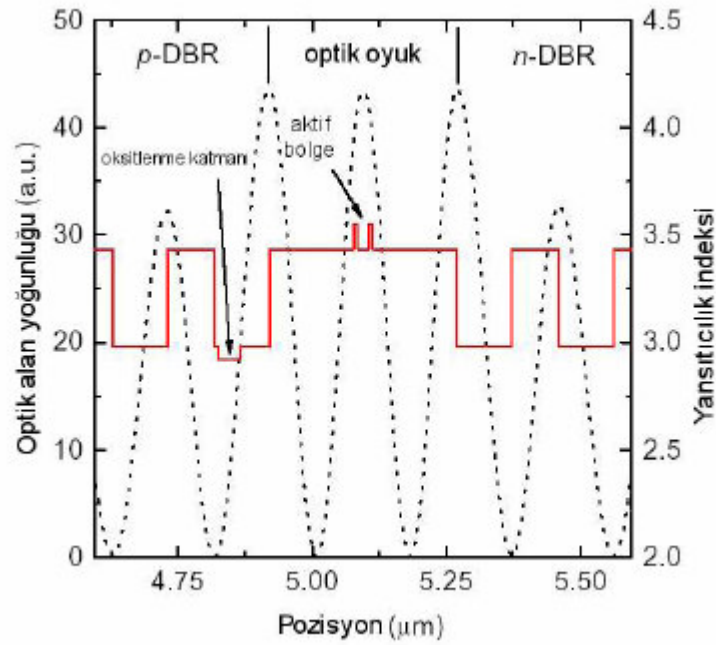
2.7.1. Optik Oyuk

Herhangi bir lazerde olduğu gibi VCL'lerde içine kazanç maddesi konulmuş Fabry-Pèrot optik çınlatıcı temellidir. Kazanç maddesi optik alanı yükseltirken, FP çınlatıcı geri besleme sağlar. VCL' lerde böyle bir çınlatıcı aralarında L mesafesi bulunan iki yüksek yansıtma özellikli DBR' den oluşur. Optik alanın titreşim dalga boyu olan ilerleyen dalga, bir dönülük hareketinin fazının 2π 'nin katları olması gereken faz şartıyla belirlenir.

$$2kL = m2\pi \quad k = 2\pi\bar{n} / \lambda \quad (2.6)$$

Burada m bir tam sayı, k dalga yayılım sabiti ve n ise etkin yansıtma indisidir. Denklem (2.6) ya göre oyuk boyu L, $\lambda/2$ 'nin katlarına sahip optik kalınlık $\bar{n}L$ ile ilişkilidir. İdeal olarak yüksek-kaliteli bir çınlatıcı için, titreşim

dalga boyu her iki DBR' nin de Bragg dalga boyuna uyumlu olmalıdır. **Şekil 2.12'** de kazanç maddesi eklenmiş bir VCL optik oyuğu görülmektedir. VCL'in katkılama profili, aktif bölgenin, lazer diyotun tam p-n kavşağında olacak şekilde seçilmiştir. Aktif bölge normalde, birbirleri ile bariyer katmanlarıyla ayrılmış belli sayıda QW' lerden oluşur^(52,53).



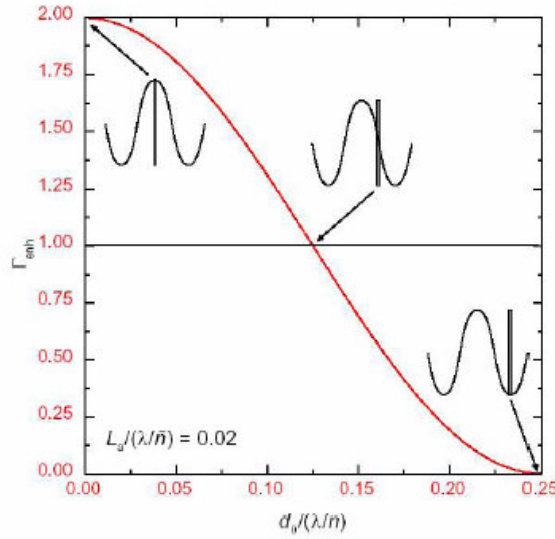
Şekil 2.12 - Bir VCL'deki 1λ kalınlığındaki optik oyuğa ait yansıtıcılık indeksi ve dikine optik alan yoğunluğu⁽⁶⁾

Bunun yanında, değerlik bandı arası soğurma ve serbest taşıyıcılardan kaynaklanan optik kaybı minimuma indirmek için katkılanmamıştır. VCL oyuğun titreşim dalga boyu için iyi bir optik kazanım sağlamak amacıyla, QW malzemesi üzerinde değişiklik yapılır. Düzlem lazerlerin aksine, aktif kazanç bölgesi, tam oyuğa yayılmaz ve aktif

katmalarla (toplam kalınlık: L) duran dalga deseni çakışması hesaba katılır. Maksimum optik kazanımı sağlamak için duran dalga deseni göz önüne alınarak QW' ler uygun mesafelerle oluşturulurlar⁽⁵⁵⁾. Bu katmanların yüksek hassasiyetle konulması zorunluluğunu getirir. Yoksa duran dalga deseninde ki kaymalar kazancın düşmesine sebep olur⁽⁵⁴⁾. Bu kazanç faktörü:

$$T_{enh} = 1 + \frac{\sin(2\pi\bar{n}L_{\alpha} / \lambda)}{2\pi\bar{n}L_{\alpha} / \lambda} \cos(4\pi\bar{n}d_0 / \lambda) \quad (2.7)$$

ile gösterilir d_0 duran dalga pikinin aktif bölgeden yer değiştirmesini verir (Şekil. 2.12). T_{enh} 'nin ince aktif bölgeye göre normalleştirilmiş yer değiştirmesini $d_0 / (\lambda / \bar{n})$ verir. Mükemmel ayarlanmış ince aktif katman için $T_{enh} \rightarrow 2$ sonucu bulunur. Öbür taraftan $L_{\alpha} = m\lambda / (2\bar{n})$ için düzlem lazerlerdeki gibi $T_{enh} = 1$ bulunur (Denklem 2.7). Şekil 2.11' de gösterilen oksitlenme katmanı, p-DBR' nin ilk periyodunda yanall oksitlenme ile akım boşluğu oluşturmaya yarar. Buna göre bu oksitlenme katmanı yansıtıcılık indisinde yanall bir tedirginliğe yol açarak optik modun indis rehberliğini yapar. Dağılma kayıplarını önlemek için genellikle duran dalga deseninin düğüm noktalarına yakın yerleştirilir^(55,56).

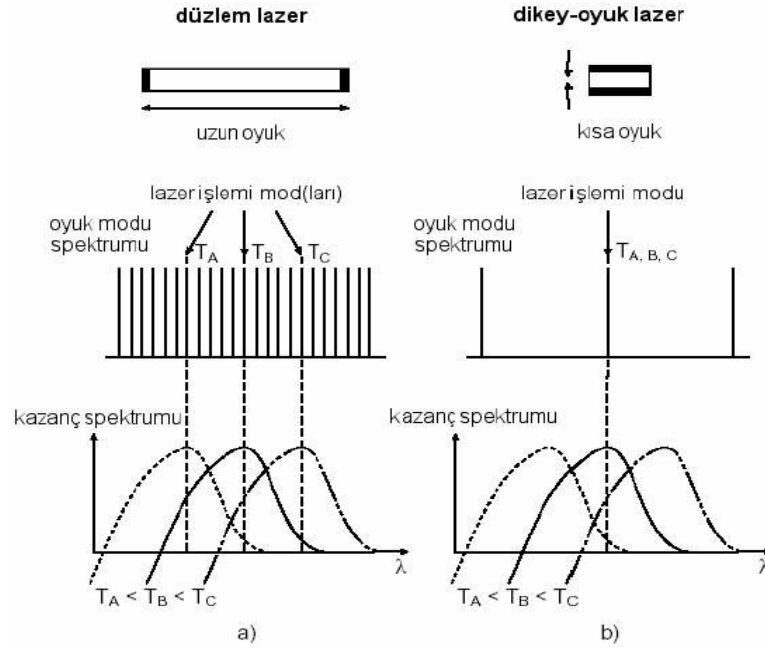


Şekil 2.13 - Kazanç faktörüne karşılık duran dalga deseninin aktif bölgeden normalleştirilmiş yer değiştirmesinin grafiği. Barlar duran dalga deseninin aktif kazanç bölgesiyle çakışma kısımlarını temsil eder⁽⁶⁾.

2.7.2.Kazanç-Oyuk Ayarı

Standart düzlem lazerlerde, yüzlerce mikrometrelik enine optik oyuğun yanında, boyuna oyuk modları birbirine çok yakındır. Bu yüzden birçok boyuna modlar, aktif bölgenin kazanç profili ile üst üste gelir. Bu durum, lazer işleminin kazanç pik dalga boyuna yakın dalga boyunda olmasını sağlar. Eğer etkin oyuk uzunluğu ya da kazanç spektrumu ısınma ile değişiyorsa, lazer işleminin kazanç spektrumu maksimumuna en yakın bir oyuk bölgesini atlar. Sonuç olarak düzlem lazerlerde lazer işleminin dalga boyu, sıcaklığa bağlı olan kazanç spektrumu piki pozisyonuna bağlıdır. Benzer şekilde düzlem lazerde yükselen sıcaklıkla, aktif bölgenin daha az kazanç vermesi sebebiyle, eşik akımı da sıcaklığa bağlıdır. VCL' ler için optik oyuk birkaç mikrometre civarındadır. Bu durum, boyuna mod aralıklarının geniş

olması ve lazer kazanç bölgesiyle tipik olarak sadece bir modun üst üste gelmesi anlamına gelir. Bunun sonucunda lazer modu sıcaklık değişimiyle atlama yapmaz. Burada cihaz karakteristikleri, tek modun sebep olduğu boyuna titreşim ile kazanç spektrumu arasındaki tayf ile ilgili düzenlenişe bağlıdır. Yansıtıcılık indisi^(55,56) ve enerji bant aralığının^(55,57) sıcaklığa bağlılığı sebebiyle, sıcaklık yükseldikçe oyuk modu ve kazanç piki daha uzun dalga boylarına kayar. Fakat, kazanç piki, oyuk titreşim değerine göre uzun dalga boylarına daha hızlı kayar. Lazer işlemi dalga boyu, oyuk boyu ile sabit olduğundan, bir VCL' in yayılım dalga boyunun sıcaklığa bağlılığı, düzlem lazerlere göre daha azdır⁽⁵⁵⁾.



Şekil 2.14 Kazanç spektrumu ve oyuk rezonansı arasındaki ilişki
a) düzlem lazer için **b)** dikey-oyuk lazer için⁽⁶⁾

Bunun yanında, sıcaklıktaki farktan kaynaklanan dalga boyu kaymasının sebep olduğu kazanç piki ve oyuk modu arasında tayf ile ilgili uyumsuzluk bulunur. Bu durum cihazların sıcaklığa bağlı performanslarını önemli ölçüde etkiler. Şekil 2.14' düzlem lazerler ve VCL'lerde oyuk modu ve kazanç spektrumu davranışlarını göstermektedir. Kazancın sıcaklık değişiminden etkilenmediğini varsayarsak, kazanç pik dalga boyu ile uyuşan oyuk modunda, mevcut sıcaklık için ideal olan minimum eşik akımı bulunabilir. Bu noktadan daha düşük ya da daha yüksek sıcaklıklara hareket, eşik akımında yükselişe sebep olur. Sıcaklıkta ki yükseliş, Fermi-Dirac dağılımının genişlemesinden kaynaklanan kazancın düşüşüne neden olur. Bu nedenle minimum eşik akımı, oyuk moduyla kazanç pikinin tam uyuştğu sıcaklıkta gerçekleşmez. Oyuk modu ve kazanç pikinin sıcaklığa göre kaymalarının farklı olması, sıcaklığın kazançta değişikliğe yol açmasıyla birlikte, bazı sıcaklık aralıklarında, eşik akımında küçük değişikliklere sahip cihazlar yapılabilmesine olanak tanır. Bu kazanç pikinden daha yüksek dalga boyunda oyuk titreşimi oluşturularak başırlır. Yükselen sıcaklıkla oyuk modu ve kazanç pikinin kırmızıya kayma hızları farklılık gösterir. Bu esnada da kazanç düşer. Genel olarak oyuk modunun daha yüksek kazançlı bir pozisyona gelmesine rağmen, artan sıcaklık yüzünden toplam kazanç düşer. Bu sebepten, VCL' lerin ince kaplama tabakalı üretiminde değişen sıcaklıklarda görel olarak sabit kalan eşik akımı oluşturacak şekilde kazanç-oyuk hesabı yapılır^(59,60). Kazanç piki ve oyuk modu arasında büyük tayf ile ilgili fark bulunan VCL' lerde, kazanç piki dalga boyu sadece 1200 nm civarına yerleşmiş olmasına rağmen, 1260nm'ye kadar lazer titreşimleri elde edilmiştir⁽⁶¹⁾.

2.7.3. Aktif Bölge Malzemeleri

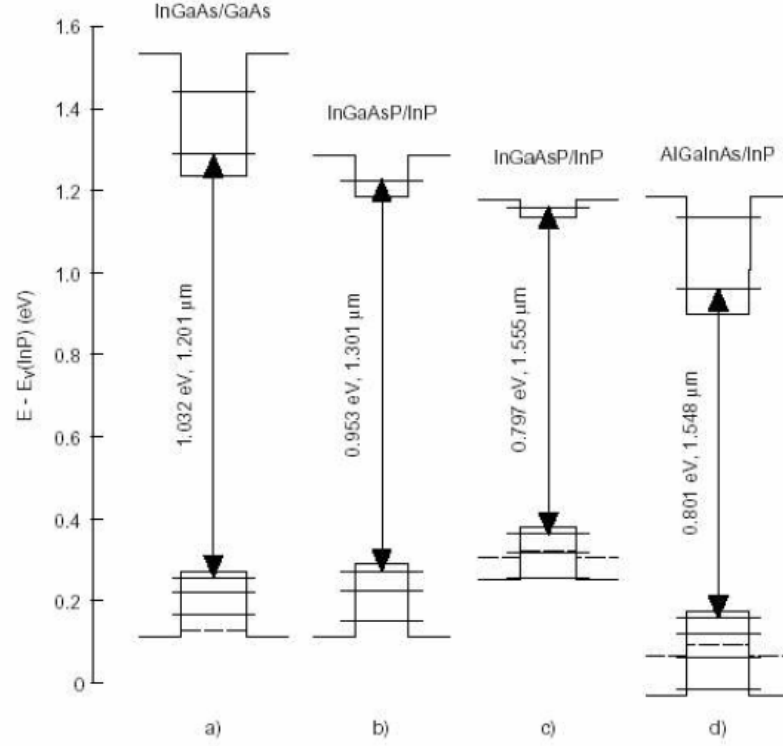
İlk LW VCL⁽⁴¹⁾, bu gibi birçok cihazda olduğu gibi, InGaAsP (hacim) aktif bölgesi yapısı üzerine kurulmuştur. Sonradan, LW VCL' lerin OS üzerinde çalışabilmeleri için sıkıca sıralanmış QW' lerin bulunması gerektiği farkedilmiştir. Bunun sebebi, böyle aktif bölgelerin gösterdiği daha düşük açıklık ve yüksek türevsel kazançtır. Bunun dışında gergin QW' leri ve Auger-tekrar-birleşim sebebiyle oluşan kayıpları azalttıgıda anlaşılmıştır. LW yarı iletken lazerlerde InP zemin üzerine büyültülmüş InGaAsP QW' ler çok sayıda yapılmış ve en iyi incelenen yapılar olmuştur. Bu malzemeye dayalı VCL' lerde düşük-kayıplı optik oyukların fabrikasyonu, QW kazanç doyumu ve yüksek taşıyıcı yoğunlukları ve sıcaklıklardaki taşıyıcı kayıpları⁽⁴¹⁾ göz önüne alınarak 5- 15 kadar çok sayıda QW oluşturulur. Çok sayıda QW içeren aktif bölge ancak bozukluk oluşumunda önemli olan kritik kalınlığın üstünde yapılarak sağlanabilir. Bu gergin QW' lerin gerginliğini azaltmak için bariyerler kullanılır. QW' ler ve etrafındaki bariyerlerin gerginliği yaklaşık %1 civarındadır⁽⁶²⁾. Elektron hapsi ve sıcaklığa bağlı dengeyi artırma amaçlı istekleri bu malzemedeki düşük iletkenlik bant offseti karşılar^(63,64). Gelişmiş elektron hapsetme özelliğine sahip rakip bir malzemedede InP zemin üzerine büyültülmüş AlGaAs' dir. 1µm dalga boyu altında çalışan GaAs tabanı bazı aktif bölgelerde de yüksek iletkenlik bandı offset' i ile karşılarız. Bu sebeple son yıllarda 1,3 µm üzeri lazer araştırmalarında GaAs- tabanlı aktif malzemeler araştırmalarda ilgi çekmeye başlamıştır^(64,65).

Çizelge 2.1 Farklı malzemelerin iletkenlik bandı offset oranları ⁽⁸²⁻⁸⁵⁾

materyal sistemi	$\Delta E_c/\Delta E_g$
$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{GaAs}$	0.65
$\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{N}_y\text{As}_{1-y}/\text{GaAs}$	0.80
$\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As}/\text{InP}$	0.72
$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$	0.40

Aktif bölgesinin beklenen sıcaklık performansı InGaAsP için iyi olmamasına rağmen, ince kaplama tabakalı büyütülmüş bütün-tek parça GaAs tabanlı LW VCL yapıları oluşturmada çok yol kat edilmiş ve AlGaAs/GaAs DBR içeren LW VCL teknolojileri başarı ile geliştirilmiştir. Gelecek vadeden yeni aktif bölgelerden biride 1996'de Kondow ve arkadaşları tarafından araştırılan NAs/GaAs QW' lerin verimleridir^(66,67). InGaAs alaşımındaki Grup V malzemesi yaklaşık %1'lik bir N yoğunluğun, gerginliği azalttığı gibi bant aralığını da etkilediği görülmüştür. InP tabanlı sistemlere göre en olası rakip olarak, bu malzeme görünmektedir⁽⁶⁸⁾. Fakat dalga boyuna kuvvetlice bağlı parlaklık becerisi, ısısal tavlınmaya bağlı maviye kayma gibi karmaşık ve kontrolü zor özellikleri bulunmaktadır. QW' den daha karmaşık GaAs tabanlı malzeme yapılar⁽⁶⁹⁾, InAs kuantum nokta⁽⁷⁰⁾, tür-II GaAsSb QW's^(71,72) de bulunmaktadır. GaAs tabanlı LW aktif malzeme üretiminde başka bir yapıda yüksek gerginlikli InGaAs/GaAs'dır. Aslında bu sistem 1 μm 'dan daha ötesine pek geçemez. Fakat kristal büyütme metodunun, PL pik dalga boyuna^(73,74) ve düzlem lazerlerde CW işlemine^(72,74-77) ait dalga boylarını 1,2 μm ' nin ötesine geçirdiği görülmüştür. Büyümenin,

gevşeme mekanizmalarını saklı tutması için, QW' lerin kalınlığı bozukluk oluşmaya başladığı kritik kalınlıktan fazla olmalıdır. LW yarı iletken lazerlerde genel aktif bölge yapımında kullanılan alaşımların iletkenlik bandı offset oranlarını vermektedir⁽⁶²⁾ (Çizelge 2.1). Bu değerler ortalama değerler olup, ilgili alaşım için literatüre bakılmalıdır. Çizelge 2.1' e bağlı olarak Şekil 2.15 'de tek QW (SQW) için hesaplanmış alt bant enerji seviyeler diyagramı görülmektedir. Sıfır değeri InP' nin değerlik bant kenarını verir. Gergin katman durumunda değerlik bandı ağır-deşik (kesiksiz çizgi) ve hafif-deşik (kesikli çizgi) ile gösterilmiştir. Gösterilen değerlik bandında ki alt bant enerji seviyeleri sadece ağır-deşik çözümleridir. Daha geniş iletkenlik bandı devamsızlığına sahip (a) ve (d) malzemelerin elektron hapsediciliğinin klasik (b) ve (c) malzemelerinden daha iyi olduğu görülmektedir.



Şekil 2.15. Farklı alaşım kompozisyonları için SQW çözümleri. Katmanlardaki gerginlikler, değerlik bandı ağır(kesiksiz çizgi) ve hafif deşikler (kesikli çizgi) olarak böler. Enerji çizgilerinde, sıfır InP'nin değerlik bandı kenarını gösterir. InP 1,35 eV'luk doğru enerji aralığına sahiptir. Ana geçiş ayrıca gösterilmiştir⁽⁶⁾

2.8. Verim Programı İle Hesaplamalar

Verim bilgisayar programı kullanılarak; her bir malzeme sistemi için giriş parametreleri ve çıkış parametreleri ile bant hesaplamaları ve malzeme seçimi yapılmıştır. Daha sonra iletim bandı, değerlik bandı ve zayıf deşik bantları için enerji değerleri, hapis faktörleri, verim hesaplamaları, eşik akım yoğunluğu J_{th} ve verim eğim hesaplamaları yapılmıştır. Verim programının kullanımı için bilinmesi gerekli olan bazı temel kavramlar ve bunların programda kullanılmasıyla elde edilen hesaplamalar ile elde edilen sonuçlar aşağıda çıkarılmıştır.

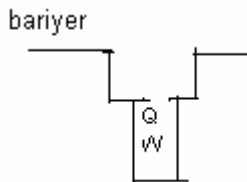
2.8.1.Birleşik Malzeme ve Band Kenarı Hesabı

Bu bölüm için her bir malzeme sistemi için programa giriş parametreleri programa girilir ve programdan çıkış dosyaları oluşturulur.

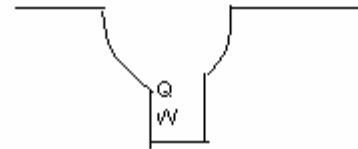
Malzeme sistemleri için programa giriş parametreleri:

Her bir malzeme sistemi için dört çeşit programa giriş parametresi (I, II, III ve IV) vardır. Bu parametreler şunlardır;

a) Kuantum kuyusunun dışındaki tabaka sayısı (N): Örneğin basit bir SCH kuantum kuyu yapısının sahip olduğu N sayısı 2 ise, tek kuantum kuyulu SCH yapının indis derecesi için kaplama bölümü ile kuantum bölümü arasında 10 basamak vardır ve N 'i 11 e eşit olarak almamız gerekir. N -1 kaplama tabakasını içermez. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17, basit ve derecelenmiş SCH indislerin farklı iletim yapılarını göstermektedir.



Şekil 2.16.Basit SCH indis



Şekil 2.17. SCH derecelenmiş indis

b) Kuyu, engel ve kaplama dalga boyu: Malzeme sistemlerine göre dalga boyları farklılık gösterir. QW dalga boyları farklı tabakalardaki farklı boşluk bantlarından dolayı en yüksek dalga boylarına, engel dalga boyuna ve kaplama dalga boyuna sahiptir. QW deki dalga boyu tasarlanmış olan ışım

dalga boyu ile ilgilidir. Fakat programa girilen dalga boylarına malzemenin enerji bant boşluğuna göre yaklaşılr. Eğer kuantum kuyusunun bileşenleri için engel ve kaplama tabakası bilinirse dalga boyu formül ile hesaplanabilir.

c) Kaplama, engel ve kuantum kuyusunun genişliği: Bu genişlik değerleri A^0 cinsindendir. Eğer GRINSCH ve çok sayıdaki kuantum kuyulu yapılar tasarlanmışsa, engel genişliğinin programa giriş değerleri dikkate alınmalıdır. Program, kuantum kuyuları arasındaki engel genişliğinden dolayı, programa giriş engel genişliğini $N - 1$ 'e böler⁽¹¹⁷⁾.

d) Programa giriş zoru: (ϵ) zor sabitinden

$$\epsilon = \frac{(a_b - a_q)}{a_b} \quad (2.8)$$

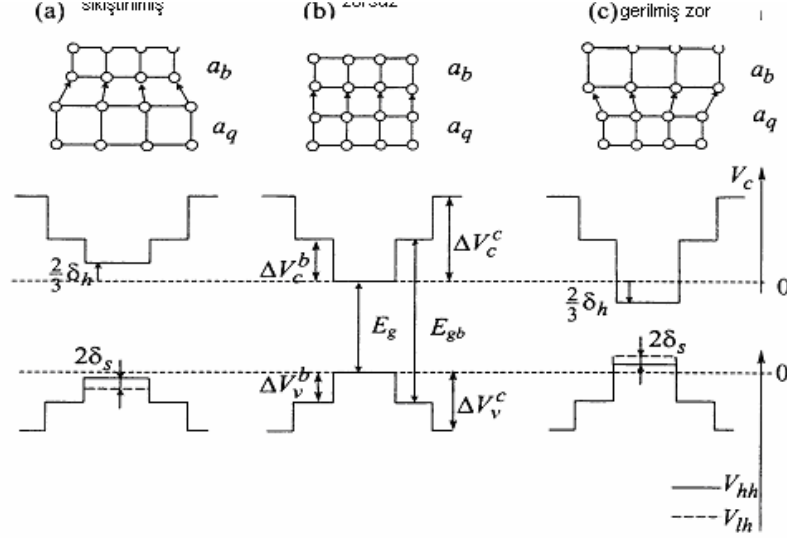
Burada a_q ve a_b sırasıyla kuantum kuyusunun ve engel tabakasının kafes sabitleridir. Yarı iletkenlerin enerji band yapısından, gerilme zor değeri $a_q < a_b$ için pozitiftir (Şekil 2.18). Sıkıştırılmış zor değeri ise $a_q > a_b$ değeri için negatiftir. Denklem (2.8) zorsuz bir engel için iyi bir açıklamadır. Engel tabaka üzerine kafes eşlemesidir. Denklem (2.9) için a_q zor tabakası ve a_b zorsuz tabaka olarak kullanılır. Bu değerleri zoru hesaplamak için tabaka üzerine kafes eşlemesi olarak kullanırız. Örneğin, eğer engel içerisine zor koyarsak, engel kafesine a_q ve taban kafesine a_b olarak sahip olabiliriz⁽¹¹⁷⁾.

Zor sabiti için kullanılan diğer bir tanım ise,

$$\epsilon = \frac{(a_s - a_u)}{a_u} \quad (2.9)$$

Burada, a_u zorsuz tabaka ve genellikle temel tabaka ile eşleşen

kafestir. a_s ise zor tabakasıdır.



Şekil 2.18. Yarı iletken yapılarda enerji bandı, kuantum kuyulu, engelli ve kaplama tabakalı bir yarı iletken yapı için, iletim V_c , değerlik V_{hh} , V_{lh} potansiyelleri. δ_h : hidrostatik potansiyel, E_g : kuantum kuyusu için enerji boşluk bandı, E_{gb} : engel için enerji boşluk bandı, ΔV_c^b : engel için iletim denge bandı, ΔV_c^c : kaplama tabakası için denge iletim bandı, ΔV_v^b : engel için değerlik denge bandı, ΔV_v^c : kaplama değerlik denge bandı. (117)

Bu tanıma göre, $a_s > a_u$ sıkıştırılmış zor'dur ve pozitif zor sabitini elde ederiz. Eğer $a_s < a_u$ ise gerilmiş zor için negatif zor sabitini elde ederiz. Fakat Verim programı için zor sabiti olarak denklem (2.8) kullanılır⁽¹¹⁷⁾.

Farklı malzeme sistemleri için biraz farklı programa giriş parametreleri ve işlem basamakları olabilir.

Malzeme sistemleri için programdan çıkış parametreleri:

Seçilmiş malzeme sistemleri için gerekli bütün programa giriş değerleri programa girildikten sonra, iki tane programdan çıkış dosyaları(cbandeg.dat ve vbandeg.dat) oluşturulur. Her iki dosya içerisinde de ilk sütun zor ve kuantum kuyusunun kafes sabitini gösterir. Birinci, ikinci ve üçüncü sütunlar sırasıyla tabaka kalınlığını, her bir tabaka için x ve y bileşenlerini, cbandeg.dat ın dördüncü sütunu her bir tabakanın iletim bandının denge değerini ve vbandeg.dat ın dördüncü sütunu ise her bir tabakanın değerlik bandının denge değerini verir.

Cbandeg.dat ve vbandeg.dat dosyalarındaki tabaka kalınlığı ve kafes sabitinin birimleri angstrom ($\text{\AA}$) cinsindendir. Enerji denge bandının birimleri ise elektron volt (eV) cinsindendir. Zor ile sıkıştırılmış kuantum kuyusu, gerilerek zorlanmış kuantum kuyusunun pozitif değerine zıt, negatif bir değere sahiptir. Denge iletim bandı için sıfır enerji referans düzeyi, sıkıştırılmamış kuantum kuyusu hacimli malzemenin iletim bandının kenarıdır. Denge değerlik bandı için sıfır enerji referans düzeyi, sıkıştırılmamış kuantum kuyusu hacimli malzemenin değerlik bandının kenarıdır. Bu nedenle Şekil 2.18' de gösterildiği gibi; kuantum kuyusu denge iletim bandı sıkıştırılmamış kuantum kuyusu için sıfır, sıkıştırılmış ve zorlanmış kuantum kuyusu için pozitif ve gerilerek zorlanmış kuantum kuyusu için negatiftir. Kuantum kuyusunun değerlik bandı için tam terside geçerlidir. Engel ve denge kaplama bandı iletim bandı için daima pozitif ve değerlik bandı için daima negatiftir.

QW, BR ve CL kelimelerini kuantum, engel ve kaplama anlamlarında

kullanırsak her bir tabakanın malzeme bileşenleri $A(x)B(1-x)C(y)D(1-x)$ genel formundadır. A,B,C ve D harfleri 4 tane malzemeyi temsil eder ve x,1-x,y,1-y A,B,C ve D nin bileşenlerini gösterir.

2.8.2. Enerji ve Band Hesaplamaları

Aktif bölgenin kalınlığı de Broglie dalga boyu ile karşılaştırılabilir duruma geldiği zaman, yüksek enerji boşluklu yarı iletkenler arasına hapsedilmiş düşük enerji boşluklu yarı iletken tabakalar bulunabilir. Bu durumda kuantum mekaniksel etkiler beklenir. Bu etkiler lazerlerde soğurulma ve yayılma karakteristiği şeklinde gözlemlenir^(86,117,192).

Bir çift yapı içerisindeki bir taşıyıcı (elektron veya boşluk) bir üç boyutlu potansiyel kuyusu içine hapsedilir. Böyle taşıyıcıların enerji düzeyleri, Hamiltonian sisteminin uygun kinetik enerjili x,y ve z yönlerinde ayrılmasıyla bulunabilir. Çift yapıların kalınlığı de Broglie dalga boyu ile karşılaştırıldığı zaman, z eksenini boyunca taşıyıcı hareketine uygun kinetik enerji kuantumlanabilir⁽¹¹⁷⁾. Sürekli düzeyin enerji seviyeleri,

$$E = \frac{h^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2) \quad (2.10)$$

Burada k_x ve k_y , x ve y yönleri boyunca uzanan dalga vektörü bileşenleridir. m ise taşıyıcının etkin kütlesidir.

Denklem (2.10) dan, z yönündeki enerji düzeyleri, bir boyutlu potansiyel kuyusunda Shrödinger denkleminin çözümüyle (2.11) bulunabilir.

$$E_\psi = -\frac{h^2}{2m} \cdot \frac{d^2\psi}{dz^2} \quad \text{kuyunun içinde } (0 \leq z \leq L_z) \quad (2.11)$$

$$E_\psi = -\frac{h^2}{2m} \cdot \frac{d^2\psi}{dz^2} \cdot V\psi \quad \text{kuyunun dışında } (z \geq L_z; z \leq 0) \quad (2.12)$$

Sonlu bir kuyu için enerji düzeyleri ve dalga fonksiyonları denklem (2.13) ve $z=0$ ile $z=L_z$ sürekli yüzeylerindeki ψve.... $d\psi/dz$ sınır şartları kullanılarak bulunabilir. Çözümü;

$$\psi_n = \begin{cases} A \exp(k_1 z) \dots\dots\dots (z \leq 0) \\ B \sin(k_2 z + \delta) \dots\dots\dots (0 \leq z \leq L_z) \\ C \exp(-k_1 z) \dots\dots\dots (z \geq L_z) \end{cases} \quad (2.13)$$

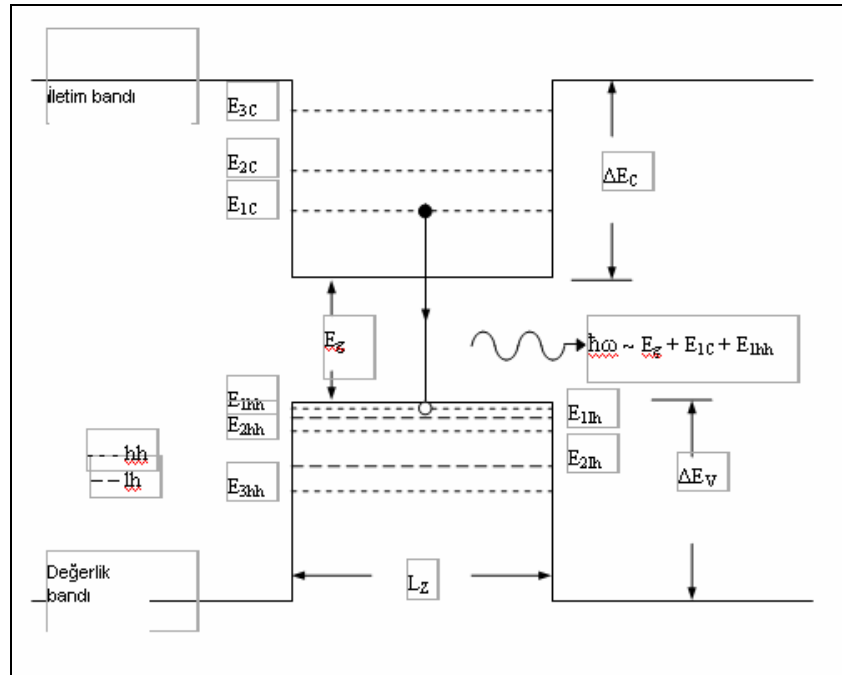
$$\text{Burada, } k_1 = \left[\frac{2m(V-E)}{h^2} \right]^{1/2} \dots\dots\dots k_2 = \left(\frac{2mE}{h^2} \right)^{1/2} \quad (2.14)$$

Bu formüllerdeki A,B,C ve δ sabit değerlerdir. Yukarıdaki denklemlerde sınır şartları kullanılırsa, aşağıdaki eigen (öz değer) denklemi elde edilir. $\tan k_2 L_z = k_1 / k_2$ bir potansiyel kuyusundaki bir taneciğin enerji düzeylerini (E_n) elde etmek için sayısal olarak çözülür (denklem (2.14)).

z eksenini boyunca farklı düzeylerde ve x - y yönleri boyunca sürekli düzeylerde hesaplamalar yapılırsa, kuantum kuyusuna hapsedilmiş bir parçacık için enerji öz değerleri (2.15) denkleminden bulunur.

$$E(n, k_x, k_y) = E_n + \frac{h^2}{2m_n^*} (k_x^2 + k_y^2) \quad (2.15)$$

Burada E_n , taşıyıcı hareketi için n.hapsedilmiş parçacığın enerji düzeyi ve m_n^* bu düzeyin etkin kütlesidir.



2.9. Verim Programı İle Simulasyonlar ve Lazer Özellikleri

Verim programı ile tasarlanmış olan ve verimi, eşik akım yoğunluğu ve verim eğiminin spektrumunu içeren kuantum yarı iletken lazerlerin simülasyonu yapılabilir. Lazerlerin aktif bölgelerinin optik verim simülasyonları güçlüklerle karşılaşılan işlemlerdir. Verim programı Lorentz dönüşümlerini içeren doğru ve güvenilir olarak optik verim hesaplayan bir programdır.

$$G(E') = \frac{q^2 |M_B|^2}{E' \epsilon_0 m^2 c \hbar N W} \sum_{ij} \int_{E_g}^{E_b} m_{r,ij} C_{ij} A_{ij} [f_c - (1 - f_v)] L(E) dE \quad (2.16)$$

Burada,

M_B	...	momentum Matris elementi
E	...	Optik enerji
N	...	Kırılma indisi
W	...	Kuyu genişliği
C	...	Işık hızı
$m_{r,ij}$	...	Azaltılmış etkin kütle
C_{ij}	...	Üst üste binme faktörü
A_{ij}	...	Anisotropic factorü
f_c, f_v	...	İletim ve değerlik bantlarının Fermi-Dirac dağılımı.
H	...	Basamak fonksiyonu
$L(E)$	...	Lorentz dönüşümü

İletim ve değerlik bantlarının Fermi-Dirac dağılımlarını hesaplayan denklem

(2.16) için f_c, f_v lerin bilinmesine ihtiyaç vardır. Bunun için de denklem (2.17) yi iletim bandı için, denklem (2.18) de değerlik bandı için kullanarak yarı Fermi seviyelerini E_{fc}, E_{fv} hesaplamak gerekir⁽¹⁵²⁻¹⁶⁰⁾.

$$N = \frac{m_n^* kT}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_i \ln[1 + e^{(E_{fc} - E_i)/kT}] \quad (2.17)$$

$$P = \frac{m_{hh}^* kT}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_i \ln[1 + e^{(E_{fp} - E_{hi})/kT}] + \frac{m_{lh}^* kT}{\pi \hbar^2 L_z} \sum_i \ln[1 + e^{(E_{fp} - E_{li})/kT}] \quad (2.18)$$

öz değer fonksiyonları sayısal çözüm ile bulunur. Bunun yanında, etkin kırılma indisi bir karmaşık değer olabilir, etkin kırılma indisi dalga kılavuzunun zayıf modlarını bulmaya veya bir zayıf malzemenin öz değer modlarını bulmaya yardımcı olur. Buna ek olarak, bir özel tabakadaki optik hapis faktörü, dalga kılavuzu çifti, yakın alan, uzak alan, ve diğer optik parametreler hesaplanabilir ve çizilebilir⁽¹⁵⁶⁾.

2.9.1.Üç Tabakalı Dalga kılavuzu Örneği

Bu bölüm üç tabakalı bir dalga kılavuzu için karmaşık modların nasıl çözüleceğini gösterir. İlk önce dalga kılavuzu kullanılarak 2x2 matrisinin çözülmesi ile üç tabakanın ilerleme sabiti bulunur.

2.9.2. Çapraz Matris Yöntemi (TMM)

Dalga kılavuzu keyfi olarak seçilen çok tabakalı malzemeler ile de kullanılabilir. Maxwell denkleminin düzlem dalga ele alınırsa, bir skaler dalga denklemini i.dalga için aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi_i + (k_0^2 \epsilon_i + \gamma^2) \psi_i = 0 \quad (2.19)$$

Burada φ_i i. tabakanın TE modu için E_y ve TM modu için H_y dir. γ , mod ilerleme sabiti($= \alpha + j\beta$), ve $k_0^2 = \omega^2 \mu_0 \epsilon_0$ dır.

TE modu için, sınırlar farklı tabaklar üzerinde sürekli φ_i ve $\partial \varphi_i / \partial x$ ye sahip olması gerekir. Eğer verim veya kayıpsız sınırlı modu düşünürsek, (bunun anlamı üç tabakalı bir dalga kılavuzu için ϵ_i ve γ nın gerçek olmasıdır) iç tabaka için Matris şeklinde bir çift denklem elde edebiliriz.

$$\begin{bmatrix} \varphi_i \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h_i x) & \dots & \sin(h_i x) \\ -h \sin(h_i x) & \dots & h_i \cos(h_i x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Burada $h_i = \sqrt{k_0^2 \epsilon_i + \gamma^2}$ dir

Dış tabakanın matris formu;

$$\begin{bmatrix} \gamma_i \\ \frac{\partial \varphi_i}{\partial x} \end{bmatrix} = [1 - h_{1orL}] \begin{bmatrix} A_0 \\ A_0 \end{bmatrix} \quad \text{dır.} \quad (2.21)$$

Burada A_0 birinci tabakanın A_1 i ve son tabaka için de A_L dir. TMM 2x2 matrisinin temel karakteristiğidir. Dalga kılavuzu karmaşık matris elementlerini kullanır.

2.9.3. Nümerik Metod

Dalga kılavuzu farklı tabakalardaki verim ve kaybı bulunduğu karmaşık modlar ile çalışır. Bu nedenle sınır şartları karmaşık modlar için farklıdır. Alan çözümü yarı sonsuz tabakaların çözümü ile sınırlandırılır. Yarı sonsuz tabakadaki mod karakteristiği, modun düzgün olup olmadığını belirler. Mod

karakteristiği, faz ilerlemesi ve üslü davranışlar, iletilen sabit düzlemin ilerlemesinden tanımlanabilir. Sınırlı modlar için öz değeri problemi iyi bir şekilde tanımlanır ve bütün kökler fiziksel olarak kabul edilebilir. Bir karmaşık mod için karmaşık kökler araştırıldığı zaman, tek değeri karakteristik fonksiyonlar ile iyi bir şekilde tanımlanmış problemleri çözümüne yardımcı olunur. Karmaşık mod araştırmaları için dalga kılavuzu iyi sonuçlar vermektedir. Karmaşık düzlemler için Muller-Traub yöntemi dalga kılavuzu içinde kullanılır.

2.9.4. Uzak Alan ve Yakın Alan

Uzak alan ve yakın alan kavramı, bir yayılmış optik alanın iki önemli karakteristik özelliğidir. Yakın alan, yüzlerin bitiminde dalga kenarlarındaki yayılmış ışığın uzaysal dağılım şiddetidir. Yüzeyden uzaktaki açısal dağılım şiddeti de uzak alan olarak bilinir.

Uzak alan çiftlerin verimliliğini tanımlamak için önemli bir kavramdır. Matematiksel olarak, uzak alan numunesi yakın alan şiddeti dağılımına Fourier dönüşümü kullanılarak yaklaştırılabilir. Fakat anten alanlarında kabul edilmesine rağmen, dielektrik dalgalar için bu yöntem kesin değildir. Dalga kılavuzu uzak alan hesaplamaları esnasında “ zorunluluk faktörü” fikrini de içerir. Dalganın kalınlığı dalganın genişliği ile karşılaştırıldığında, dalganın genişliği çok büyükse, mod alanlarının y yönünden bağımsız olduğunu söyleyebiliriz. Optik alanın uzaysal dağılımı, çapraz mod ile $\psi(x)$ birleştirilir. Çapraz modu dalga denkleminde ve sınır şartlarından çözülebilir. TE modu için elektrik alan, aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$E_y = F\psi(x)e^{jx(wx-\beta z)} \quad (2.22)$$

z eksenini boyunca ilerleyen mod dağılımı, her üç tabakada da farklı formlara sahiptir,

$$\psi(x) = \begin{cases} ce^{-px} & (x \geq d) \\ A\cos(qx) + B\sin(qx) & (d \geq x \geq 0) \\ De^{r(x+d)} & (x \leq d) \end{cases} \quad (2.23)$$

Burada, p,q ve r her bir tabakanın dalga sayılarıdır ve z yönündeki ilerleme sabiti ile uygun aşağıdaki şartları sağlar,

$$\begin{pmatrix} p^2 + \epsilon_1 k_0^2 = \beta^2 \\ -q^2 + \epsilon_2 k_0^2 = \beta^2 \\ r^2 + \epsilon_3 k_0^2 = \beta^2 \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

Sınır şartları ile birleştirildiği zaman ve normalleştirildiği zaman, (iç yüzlerdeki tanjant alanları ve onların türevleri süreklidir), p,q ve r değerlerini ve A,B,C ve D sabitlerini çözebiliriz. Böylece $\psi(x)$ bulunabilir.

$\psi(x)$ Fourier dönüşüm teorisi ile düzlem dalgası şeklinde yazılırsa,

$$\bar{\psi}(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)e^{j sx} dx \quad (2.25)$$

Burada s, x yönünde ilerleme sabitidir.

Elektrik alan ise denklem (2.26) daki gibi yazılabilir;

$$E_y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} F \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\psi}(s)e^{j(wx-sx-\beta z)} ds \quad (2.26)$$

Dalganın uç kısmından ışık yayıldığı zaman, yansıma ve geçişin her ikisi de olur ve iletilmiş alan,

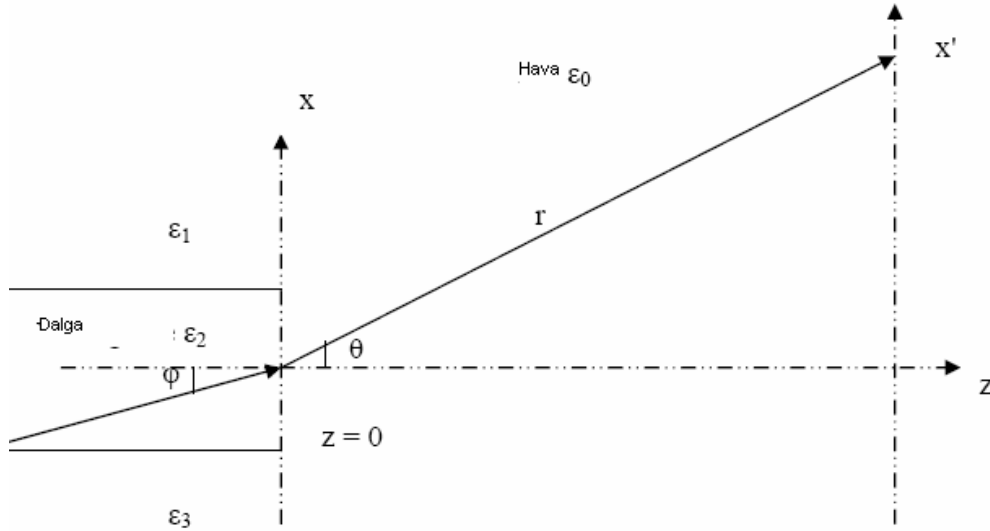
$$E_y(x)^{iletilme} = \tau F' \int_{-\infty}^{\infty} \bar{\psi}(s) e^{j(wx-sx-\beta z)} ds \quad (2.27)$$

Burada τ iletim sabitidir ve ,

$$\tau = \frac{2\eta_{hava}}{\eta_{hava} + \eta_{dalga akıllı}} = \frac{2\beta}{(k_0^2 - s^2)^{1/2} + \beta} \quad (2.28)$$

Şekil 2.20' deki koordinat sistemi düşünüldüğünde, burada elektromanyetik alanın havaya ışıma yaptığı görülür ve aşağıdaki denklemleri elde ederiz.

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \dots\dots\dots z = r \cos \theta \\ s &= k_0 \sin \phi \dots\dots\dots ds = k_0 \cos \phi d\phi \end{aligned} \quad (2.29)$$



Şekil 2.20. Üç tabakalı dalga uzak alanının koordinat sistemindeki şematik gösterimi^(117,192)

Daha sonra (r, θ) daki toplam alan şiddeti : ($e^{j\omega x}$ yi ihmal edin),

$$E(r, \theta) = F' \int_{-\infty}^{\infty} \frac{2\beta}{k_0 \cos \phi + \beta} \bar{\psi}(k_0 \sin \phi) e^{-jk_0 r \cos(\theta - \phi)} k_0 \cos \phi d\phi \quad (2.30)$$

ye dönüşür ve “nokta yükleme yöntemi” uzak mesafeler için $E(r, \theta)$ değerine yaklaşık olarak kullanılır. “Nokta yükleme yöntemi” aşağıdaki gibi gösterilir;

$$\int_{-\infty}^{\infty} g(x) e^{kh(x)} dx \approx g(a) e^{kh(a)} \sqrt{\frac{-2\pi}{kh''(a)}} \quad (2.31)$$

Burada a bu durumda $h'(x) = 0$ dan oluşur $h'(x) = 0$

$$\sin(\theta - \phi) = 0 \Rightarrow \theta = \phi \quad \text{ve}$$

$$\sqrt{\frac{-2\pi}{kh''}} = \sqrt{\frac{-2\pi}{-jk_0 r (-\cos(\theta - \phi))}} = \sqrt{\frac{2\pi}{k_0 r}} \quad (2.32)$$

Bu nedenle uzak alan dağılımı için denklem;

$$E(r, \theta) = F' \sqrt{\frac{2\pi}{k_0 r}} \frac{2\beta}{k_0 \cos \theta + \beta} k_0 \cos \theta \bar{\psi}(k_0 \sin \theta) e^{-jk_0 r}$$

(2.33)

ve uzak alan şiddeti;

$$I(\theta) = |E(r, \theta)|^2 = I_0 \frac{\cos^2 \theta}{|k_0 \cos \theta + \beta|^2} |k_0 \sin \theta|^2 \quad (2.34)$$

Burada $\cos \theta$ “Huygens zor faktörü” ve $\cos^2 \theta$ “zor faktörünün şiddetidir”. Dalganın kılavuzu de $g(\theta)$ bütün Huygens zor faktörlerini birleştirmede kullanılır ve kırılma indisinin daha önceki basamaklardan hesaplanmış etkin değeri $g(\theta)$ değerinden bulunabilir.

$$g(\theta) = 2 \cos \frac{\beta / k_0 + \sqrt{n_{eff}^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n_{eff}^2 - \sin^2 \theta}} \quad (2.35)$$

Daha sonra dalga kılavuzu deki uzak alan şiddeti aşağıdaki gibi hesaplanabilir;

$$I(\theta) = I_0 \left| \overline{\psi(k_0 \sin \theta)} \right|^2 g(\theta)^2$$

(2.36)

Buna ilaveten, $\theta=0^\circ$ için maksimum değeri 1 olacak kadar, bütün uzak alanlarda dalga kılavuzu normalleştirilmiştir.

2.9.5. Hapis Faktörü

Fiziksel olarak hapis faktörü, verimlilikteki azalma için bir hesaplama olarak aktif bölgenin ötesinde, optik modun yayılmasından dolayı oluşur. Aktif bölgedeki oluşmuş enerjinin parçalarını gösterir. Özetle, dalganın hapis faktörünün hesaplaması çapraz mod şeklinde sunulabilir.

2.9.6. Hapis Faktörü Hesaplamaları

Maxwell denkleminden, zamandan bağımsız dalga denklemini;

$$\nabla E + \epsilon k_0^2 E = 0 \quad (2.37)$$

şeklinde elde edebiliriz. Burada ϵ karmaşık dielektrik sabitidir.

$$\epsilon = \epsilon' + \epsilon'' \quad (2.38)$$

Burada k_0 vakum dalga sayısıdır;

$$k_0 = w / c = 2\pi / \lambda \quad (2.39)$$

E ise elektrik alandır;

$$E \cong e\phi(y;x)\psi(x)\exp(i\beta z) \quad (2.40)$$

β ilerleme sabiti, e birim vektör ve z ilerleme yönüdür.

(Denklem 2.39) in (2.36) da yazılması ile,

$$\frac{1}{\psi} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{1}{\phi} \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + [\varepsilon(x,y)k_0^2 - \beta^2] = 0 \quad (2.41)$$

elde ederiz. Denklem (2.40) dan çapraz alan dağılımını $\phi(y;x)$ 'i

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + [\varepsilon(x,y)k_0^2 - \beta_{eff}^2(x)]\phi = 0 \quad (2.42)$$

yi çözerek elde edebiliriz.

Burada $\beta_{eff}(x)$ x in bir sabit değeri için etkin ilerleme sabitidir.

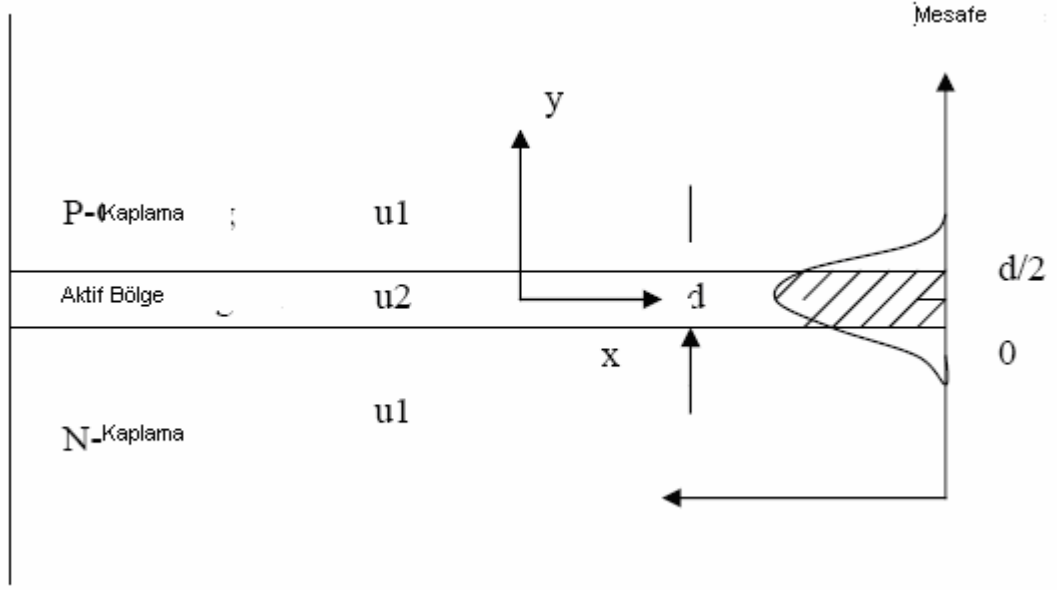
Denklem (2.39) dan, son alan dağılımını,

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + [\beta_{eff}^2(x) - \beta^2]\psi = 0 \quad (2.43)$$

in çözümünü elde edebiliriz⁽¹⁵²⁻¹⁶⁰⁾.

2.9.7. Çapraz(Enine) Modlar

Bir yarı iletken lazer oluşturulurken kullanılan değişik tabakaların enine modları, kırılma indisleri ve kalınlığına bağlıdır. Genel olarak, enine modların hesaplamalarını yaparken dört veya beş tabaka olarak düşünmek gereklidir. Fakat, dielektrik dalgadaki temel fikir, üç tabakalı dalgaın simetriği kullanılarak anlaşılabilir.



Şekil 2.21. Üç tabakalı dalga dilimi modeli⁽¹⁹²⁾

Yukarıdaki şekil $u_2 > u_1$ şeklinde kırılma indisli bir yarı iletkenin üç tabakalı dalga dilimi modelini göstermektedir. Şekil de dalga modunun temelinin şiddet dağılımı gösterilmiştir. Kapak bölgesi aktif bölgeyi modun küçük bir parçasını temsil etmektedir. Enine hapis faktörü aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\Gamma_T = \frac{\int_{-d/2}^{d/2} \phi^2(y) dy}{\phi^2(y) dy} \quad (2.44)$$

Burada:

Γ_T : enine hapis faktörü

$\phi(y)$: enine alan dağılımı, denklem (2.44) den çözülebilir

d : aktif tabaka kalınlığıdır.

2.9.8. Yan Modları

Yarı iletken lazerlerdeki yan mod davranışlarının farklı olması verimliliğin öncülük edip etmemesine ve yan modları hapsedip hapsetmemesine bağlıdır.

$$\Gamma_L = \frac{\int_{-w/2}^{w/2} |\psi^2(x)| dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi^2(x)| dy} \quad (2.45)$$

Burada:

Γ_L : Yan hapis faktörü

$\psi(x)$: yan elektrik dağılımı, denklem (2.42) den çözülebilir.

w: merkezi bölgenin genişliği.

2.9.9. Toplam Hapis Faktörü

Dalga kılavuzu tanımında,

$$\Gamma = \Gamma_T * \Gamma_L \quad (2.46)$$

Tipik olarak $w \cong 2\mu m, T \cong 1$ dir ve Γ_T, Γ yerine kullanılabilir.

2.10. Optiksel verim

Uyarılmış salınım (ışınım) ve soğurulma oranı arasındaki farktır. Yukarı geçişler bir foton soğururken, her bir aşağı geçiş bir foton oluşturur. Saniyede aşağı geçişlerin sayısı yukarı geçişlerin sayısını geçerse, net bir foton oluşumu gözlenir ve optiksel verim elde edilebilir. Malzemenin optiksel verimi

N_{tr} nin ötesinde taşıyıcı yoğunluğu eklendiğinde elde edilebilir. Böylece Fermi düzeylerinin yarısı boşluk bandından daha fazla bir enerji ile ayrılabilir.

$$\text{Optiksel verim: } g \equiv \frac{1}{\phi} \frac{d\phi}{dz} \quad (2.47)$$

Burada ϕ foton akısı (birim alandan birim zamanda geçen foton sayısı) ve z elektromanyetik alanın ilerleme yönüdür.

$$\frac{d\phi}{dz} = W_{c \rightarrow v} - W_{v \rightarrow c} \quad (2.48)$$

Foton Akısı:

$$\phi(w) = \frac{1}{\hbar w} \left(\frac{c}{\bar{n}_g} \right) \left(\frac{1}{2} n^{-2} \epsilon_0 w^2 A_0^2 \right) \quad (2.49)$$

$$\bar{n}_g = \bar{n}_{eff} + w(d\bar{n}_{eff} / dw) \quad (2.50)$$

Burada;

$\bar{n}$: Kristalin kırılma indisi

$\bar{n}_g$: Kırılma indisi grubu

$\bar{n}_{eff}$: Klavuz modun etkin kırılma indisi

$$g(\hbar w) = \left(\frac{1}{\hbar w} \right) \frac{\pi e^2 \hbar \bar{n}_g}{\epsilon_0 c m_0^2 \bar{n}^2} |M_T|^2 \cdot \rho_{red}(E_{eh} - E_g^t)(f_c - f_v) \quad (2.51)$$

Toplam verim bütün alt band geçiş çiftlerinin toplanmasıyla bulunur.

$$g(\hbar w) = \sum_{n_c} \sum_{n_v} g_{sub}(\hbar w, n_c, n_v) \quad (2.52)$$

Burada n_c ve n_v iletim ve değerlik bantlarının kuantum sayılarıdır. Her bir alt bant geçişi, alt bant boşluğuna ve öz değer fonksiyonuna sahip olmalıdır. Yeni fotonlarla elde edilen optik veriminin fotonun enerjisine bağımlılığı çok fazladır. $f_c(E_e) \gg f_v(E_h), g(\hbar\omega)$ pozitif olduğu zaman, $\hbar\omega$ foton enerjili gelen ışık dalgası malzeme ile yükseltilir. Bir foton enerjisinin verimi için $E_g < \hbar\omega < E_{fc} - E_{fv}$ olmalıdır. $E_{fc, fv}$ iletim ve değerlik bantlarının eşit olmayan yarı Fermi düzeyleridir. Yarı Fermi düzey ayırımı, malzemenin optiksel verimini elde edebilmek için boşluk bandından fazla olmalıdır. $E_{fc} = E_{fv}$ eşitliği durumunda optiksel verimi elde etmek mümkün değildir. Kuantum kuyusu fazla olan lazerlerde optiksel verim yüksektir^(117,152-160,192).

2.11. Mod verimi

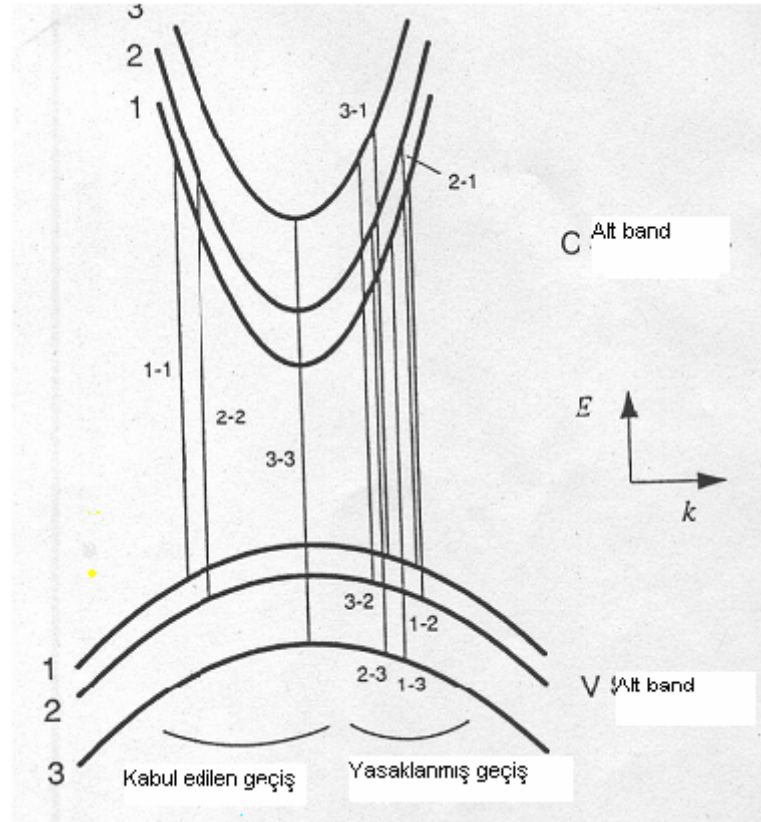
Kuantum kuyularındaki elektron envelope (örtü) fonksiyonu ve optik mod arasında daima olan üst üste gelmeyi hesaplayan ayarlanmış malzeme verimidir.

Mod verimi=Malzeme verimi x Hapis faktörü

Mod verimi verim katsayısı ve verim hapis faktörü ile açıklanır^(117,155,192).

2.12. Türevsel (differensial) verim $G^I=(dg/dN)$

Daha fazla taşıyıcı alınması ile verim artışı oranıdır. Şekil 2.22' de bir kuantum kuyusunda iletim ve değerlik alt bantları arasındaki geçişler görülmektedir⁽¹¹⁷⁾.



Şekil 2.22. Bir kuantum kuyusunda iletim ve değerlik alt bantları arasındaki geçişler⁽¹²⁾

Kabul edilebilir bütün geçişler kuvvetli geçiş olasılıklarına sahiptirler. Bir sonsuz engele sahip kuantum kuyusu içerisindeki yasaklanmış geçişler sıfır geçiş olasılığına sahiptirler ve en iyi ihtimalle sonlu engele sahip kuantum kuyuları içerisinde ise zayıf geçiş olasılığına sahiptir. Türevsel verim, optiksel şiddetin artırılması ile azalır. $W_r \propto \sqrt{G'} \Rightarrow$ yüksek türevsel verim yüksek bant genişliği ayarlamasına sebep olur. Anti kılavuz faktörü veya doğru genişliği artırma faktörü $\alpha \propto G'^{-1} \Rightarrow$ yüksek türev verimi, düşük frekans oluşumuna (α) parametresi ve dar doğru genişliği kapasitesine neden olur.

Fermi'nin Altın Kuralı (Geçiş oranı $W_{e \rightarrow h}$):

$$W_{e \rightarrow h} = \frac{2\pi}{h} |H'_{eh}|^2 \delta(E_e - E_h - \hbar\omega) \quad (2.53)$$

Burada;

$$H'_{eh} \equiv \langle \psi_h | H'(r) | \psi_e \rangle = \int \psi_h^* H'(r) \psi_e d^3r \quad (2.54)$$

$$H'(r) = \frac{e}{2m_0} A(r) \hat{e} \cdot P \quad (2.55)$$

$H'(r)$ zamana bağlı ve esas Hamiltonian a göre düzensizliktir. İletim ve değerlik bantları arasındaki geçişleri azaltır. $E_{e,h}$ elektronun başlangıç ve sonuç enerjisidir.

Fermi' nin Altın Kuralı ile ilgili bazı tanımlar:

*Yarı iletkenlerdeki optiksel verim iletim bandından değerlik bandına doğru geçen fotonların elektriksel geçişleri ile oluşur.

*Fermi' nin Altın Kuralı kristal içerisindeki elektron-foton iletişimini karakterize eder. Bir tek çift için iletim bandı düzeyinden değerlik bandı düzeyine geçiş oranını verir.

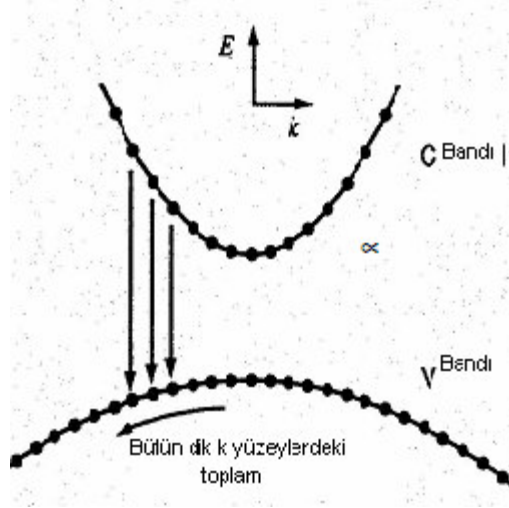
*Bu kurala göre elektron başlangıçta bir düzeye yerleşir. Bu durum daha büyük sayılı bir düzeye geçişi sağlar ve foton iletişimi olan birçok sistemde kullanılır.

*Delta fonksiyonu elektronun sonuç ve başlangıç enerjileri arasındaki farkı verir. Uyarılmış geçişi ve fotonun enerjisine $\hbar\omega$ ya eşittir.

* $W_{e \rightarrow h}$ sürekli düzeyler arasındaki bir tek geçişi gösterir.

Toplam Geçiş Oranları:

$$\begin{aligned}
 W &= \frac{1}{v} \int W_{e \rightarrow h} dN_s = \int W_{e \rightarrow h} \frac{1}{v} \frac{dN_s}{dk} dk \\
 &= \frac{2\pi}{\hbar} \int |H'_{eh}|^2 \delta(E_e - E_h - \hbar\omega) \rho(k) dk
 \end{aligned} \tag{2.56}$$



Şekil 2.23. Toplam geçiş oranları⁽¹²⁾

Yukarı yönde ve aşağı yönde geçiş oranları:

$$\begin{aligned}
 W_{c \rightarrow v} &= \frac{2\pi}{\hbar} |H'_{eh}|^2 \rho_{red} f_c (1 - f_v) \\
 W_{v \rightarrow c} &= \frac{2\pi}{\hbar} |H'_{eh}|^2 \rho_{red} f_v (1 - f_c)
 \end{aligned} \tag{2.57}$$

Burada

$$|H'_{eh}|^2 = \left(\frac{eA_0}{2m_0} \right)^2 |M_T|^2$$

f_c ve f_v : Fermi dağılımları

$|M_T|$: Geçiş matris elementi

ρ_{red} : Düzeylerin azaltılmış yoğunluğu

A_0 : Sabit olarak alınabilen vektör potansiyeli

2.13. Topluluğun geri çevrilmesi

Uyarılmış atom topluluğu γ temel düzey yoğunluğu olması, saydamlık ile başlar. Yarı iletkenlerde, elektron ve deşiklerin yarı Fermi düzeylerini düşünmeye ihtiyaç vardır. $E_{fc} - E_{fv} > E_g$ ışıma yapmak için gereklidir. Yeniden birleşme; ışımalı ve ışımasız yeniden birleşme genellikle taşıyıcı yoğunluğuna (N) bağlıdır ve birlikte bir sabit olarak düşünülebilir.

Taşıyıcı yarı ömrü: Yeniden birleşme oranı: $R(N) = N / \tau$

τ : Ortalama taşıyıcı yarı ömrü

Bunun yanında, uyarılmış ışımanın yarı ömrü γ kendiliğinden ışımanın yarı ömrü olmalıdır.

Foton (oyuk) yarı ömrü:

Bir Fabry-Perot lazeri için, aynanın her iki ucu da aynı yansıtma faktörüne sahiptir. Oyuk şiddeti için bozulma oranı;

$$dI/dT = -I/\tau_p \Rightarrow I(t) = I_0 e^{t/\tau_p} \quad (2.58)$$

Dairesel dolanımın eşik şiddeti ile birleştirilirse, fotonun yarı ömrü elde edilir.

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{c}{n} \left(\alpha + \frac{1}{L} \ln \frac{1}{R} \right) \quad (2.59)$$

bulunur.

Burada;

c: Işık hızı (cm/s)

α : Malzeme kaybı (1/cm)

R: Aynanın yansıtıcı kısmının gücü

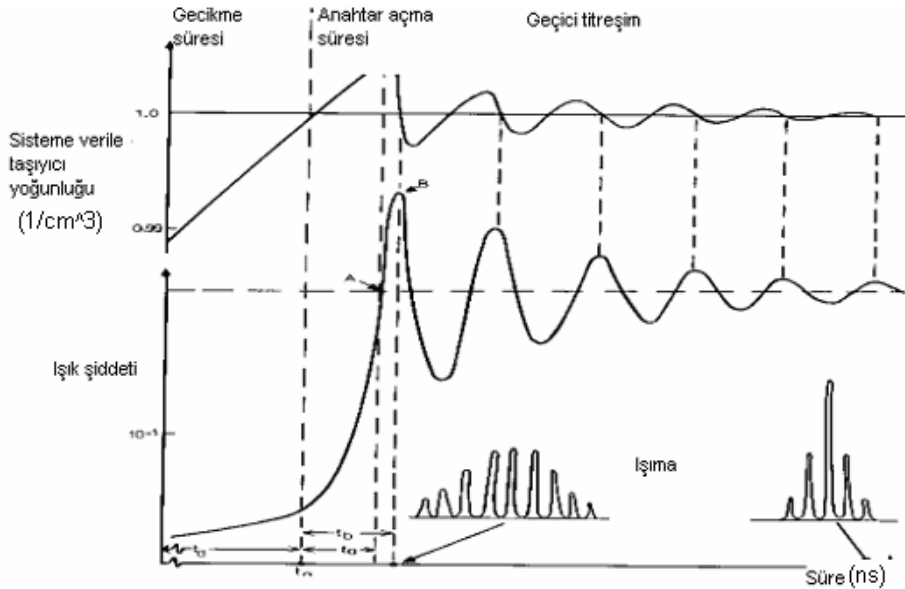
n: Kırılma indisi

L: Oyuk uzunluğu (cm)

Yarı iletken lazerlerde, genellikle oyuk yarı ömrü birkaç ps ve eşik taşıyıcı yarı ömrü ise birkaç ns civarındadır.

2.14. Durgunlaşma Titreşim Frekansı

Lazer çalışmaya başladıktan sonra; bir süre için genlik değişime uğrar, bir süre sonra ise sabit bir denge konumuna gelir. Lazerin genliğinin denge konumuna gelmeden önceki frekansı durgunlaşma titreşim frekansı olarak adlandırılır. Durgunlaşma titreşim frekansı sistemin dengeye gelmeden önceki dengeye yakın olan frekansıdır^(172,177,206).



Şekil 2.24. Zaman ve taşıyıcı yoğunluğu değişimi⁽¹⁷⁷⁾

2.15. Yarı İletken Lazerlerin Tek Mod Denklem Oranları

Taşıyıcı oran denklemi:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{n_i I}{qV} - \frac{N}{\tau} - v_g g P \quad (2.60)$$

Burada ;

N: Taşıyıcı yoğunluğu ($1/\text{cm}^3$)

V: Aktif bölgenin hacmi (cm^3)

I: Pompalanmış akım (mA)

v_g : Fotonun grup hızı (cm/s)

n_i : İç kuantum verimi

q: Elektron

τ : Taşıyıcı yarı ömrü (1/s)

g: Optiksel verim

Buna göre foton oran denklemi:

$$\frac{dP}{dt} = \Gamma v_g P + \Gamma \beta_{sp} R_{sp} - \frac{P}{\tau_p} \quad \text{elde edilir.} \quad (2.61)$$

Burada;

P: Foton yoğunluğu ($1/\text{cm}^3$)

Γ : Hapis faktörü

β_{sp} : Kendiliğinden ışıma faktörü

R_{sp} : Kendiliğinden ışıma oranı ($1/\text{s.cm}^3$)

τ_p : Oyuk yarı ömrü (1/s)

Denklem (2.60) ve (2.61) deki optiksel verime bir doğru ile yaklaşılabılır.

$g \cong a(N - N_{tr})$: türevsel verim

N_{tr} : Saydam taşıyıcı yoğunluğu

Bir lazer diyota küçük bir ac akımı (I_1) ile eşik dc akımının (I_c) üzerinde bir akım uygulandığında;

$$I = I_0 + Ie^{j\omega t}, N = N_0 + N_1e^{j\omega t}, P = P_0 + P_1e^{j\omega t} \quad (2.62)$$

(2.62) denklemini (2.60) ve (2.61) de yerine yazarsak, $e^{j2\omega t}$ yi bulunduran ikinci uyum terimini ihmal ederek, $e^{j\omega t}$ ye bölersek, bileşenler elde edilebilir.

$$j\omega N_1 = \frac{\eta_i I_1}{qV} - \frac{N_1}{\tau} - \frac{P_1}{\Gamma \tau_p} - v_g a N_1 P_0 \quad (2.63)$$

$$j\omega P_1 = \Gamma v_g a N_1 P_0 \quad (2.64)$$

N_1 ve P_1 bileşenleri birbirine bağlıdır.

Titreşim durumunda:

* P_1 ve zamanın artışı ile N_1 artar ve pozitif olur.

* Uyarılmış ışıma yoluyla P_1 artışı, N_1 azalmasına neden olur.

* P_1 azalırsa N_1 azalır ve negatif olur.

* İlk önce P_1 negatif olur ve bu durum N_1 in artışına neden olur.

* Daha sonra bu döngü devam eder gider.

f_R nin bulunuşu:

Denklem (2.63) ve (2.64)' i çarparsak, uyarılma teriminin dışındaki bütün terimleri ihmal edersek ;

$$w_R^2 = \frac{v_g a P_0}{\tau_p} \quad (2.65)$$

$$f_R = \frac{w_R}{2\pi} \quad (2.66)$$

elde edilir.

Burada;

f_R : Gevşeme titreşim frekansı olup; türevsel verimin karekökü, oyuktaki ortalama foton yoğunluğu ve fotonun yarı ömrü ile ilgilidir.

Gevşeme Çıkış Gücü ve Gevşeme Titreşim Frekansı (f_R) :

f_R yi akım terimlerini kullanarak yazarsak;

* P_0 : Kararlı düzey foton yoğunluğudur ve

$$P_0 = \frac{\eta_i (I - I_{th})}{qv_g g_{th} V} \quad (2.67)$$

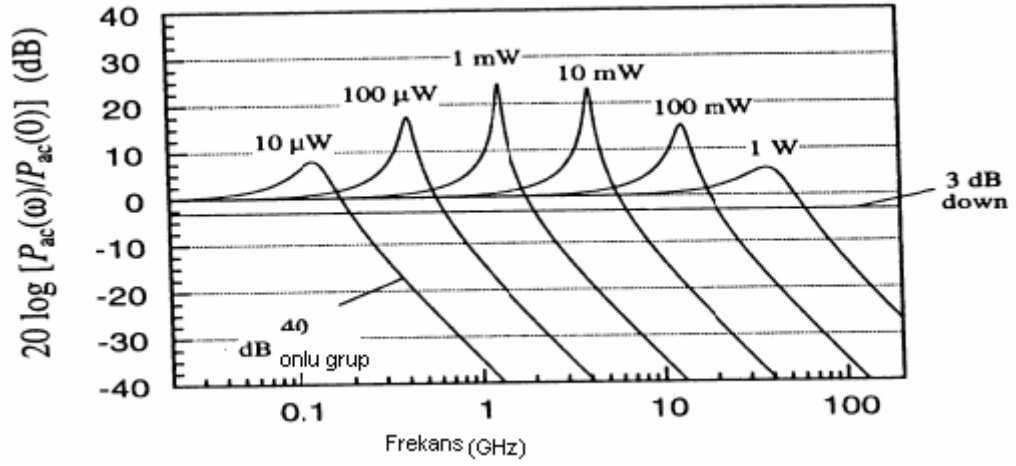
$$g_{th} (eşşikverim) = \frac{1}{\Gamma v_g \tau_g} \quad (2.68)$$

Denklem (2.67) ve (2.68) kullanılarak;

$$w_R = \left[\frac{\Gamma v_g a}{qV} \eta_i (I - I_{th}) \right]^{1/2} \quad (2.69)$$

elde edilir. Gevşeme frekanslı çıkış gücü (OP) nün modülasyona göre denklemi;

$$\frac{OP_{ac}(w)}{I_1} = \frac{\eta_d h\nu / q}{1 - (w/w_R)^2 + j(w/w_R)[w_R \tau_p + 1/w_R \tau]} \quad (2.70)$$



Şekil 2.25. Grup frekansı değişimi⁽¹⁷⁷⁾

Modülasyon frekansı için, modülasyon verimindeki azalma $\propto f_R$ dir. Lazer çalışırken bir geçici titreşim oluşturur. Uygun bir frekans dağılımı içinde, modülasyondaki artış bir küçük sinüs akımına neden olur. f_R piki kendiliğinden ışıma, taşıyıcı yayılması ve değişik ışık tayfı ışıması ile önlenabilir. Doğru genişliği ilerleme faktörü (AM ve FM nin birbiri ile olan bağıllığı), verimin bastırılması, frekans oluşması, kısa ötesi atma oluşumu, taşıma etkisi ile ilgilidir.

2.16. Verim önleme (Doğrusal olmayan verim etkisi)

Bir optiksel dalga ile oyukta oluşturulan optiksel verim daha düşük optik şiddetine neden olabilir. Bu durum verim doyumuna neden olur. Toplam elektron yoğunluğu sabittir ve titreşim taşıyıcılarının yoğunluğundaki azalmadır (elektron ve değişik içerir).

$$G(N) = \frac{G_0 + G'(N - N_0)}{1 + \varepsilon P} \quad (2.71)$$

Burada $G_0 = G(N_0)$, $G' = (\partial G / \partial n)_{N=N_0}$

ε : Engelleme katsayısıdır ve genellikle deneysel olarak hesaplanır.

P: Foton yoğunluğudur.

$-1 + \varepsilon P$: foton yoğunluğu yüksek olduğu zaman doğrusal olmayan verim doyumunu hesaplar.

Doğrusal olmayan verim ile oran denklemini;

$$(w_R)_{\max} = \frac{a}{\sqrt{2\varepsilon}} \quad (2.72)$$

elde edilir.

2.17. Taklit Frekans Oluşumu

Modülasyon (ayarlanma) esnasında, akım optik frekansı etkiler ve frekans değişimine neden olur. P ve N nin periyodik titreşimleri akım ayarlamasına verilen bir yanıttır. Faz değişimi düşünülürse, taklit frekansı elde ederiz.

$$\delta(t) = \delta v_0 \sin(w_m + \theta_c) \quad (2.73)$$

Burada;

δv_0 : Maksimum değişim ve f_R pik değişimi

w_m : Frekans ayarlaması

Eğer maksimum taklit frekansını incelersek;

$$\delta v_0 \propto \frac{\beta_c I_p}{4\pi q GP} f(w_m, P, R_{sp}, G, w_R G') \quad (2.74)$$

olur.

Burada;

β_c : Doğru yükseltme faktörü

I_p : Akım ayarlama pik değeri

I_p nin genliğinin artırılması, optik spektrumu genişletir ve simetrik olmayan çift pik oluşturur. R_{sp} verimi öncü indis değerinden büyüktür. G ile ilgili β_c ve τ_p önce indis ile hesaplanabilir.

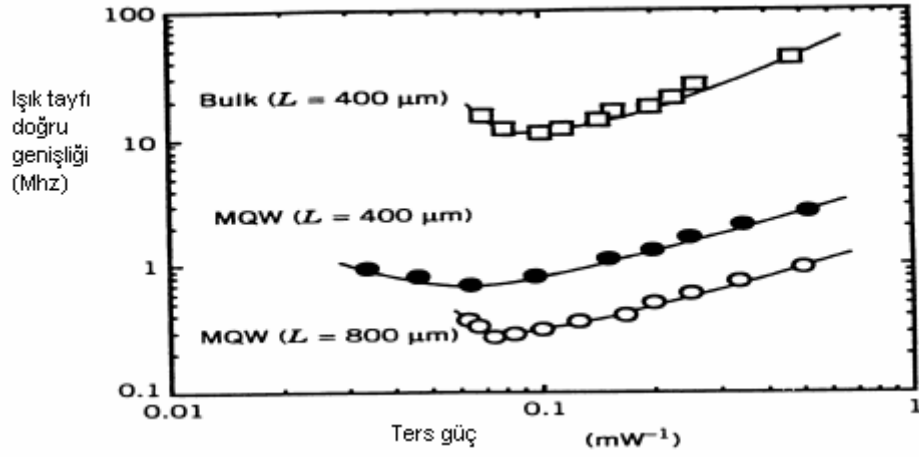
2.18. Kuantum kuyusu

Kuantum kuyu lazerler yüksek türev verimine sahiptir ve bu durum yüksek ayarlanabilen bant genişliği sağlar. Gerilmiş kuantum kuyu lazer daha fazla bant genişliği ayarlaması verir.

Tek kuantum kuyusuna sahip kuantum kuyulu lazer sistemleri için optiksel verim denklem (2.75) ile bulunur⁽¹⁷¹⁾.

$$g(w) = w \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{m_r}{\pi \hbar^2 W} \right) \int_{e_g + E_{cn} + E_{vn}}^{\infty} \langle R_{cv}^2 \rangle (f_c - f_v) F_T(E_{cv}) dE_{cv} \quad (2.75)$$

Burada w ışığın açısal frekansı, μ geçirgenlik katsayısı, ε dielektrik sabiti, m_r azaltılmış etkin kütle, $\langle R_{cv}^2 \rangle$ sadece geçişler için matris elementi, $F_T(E_{cv})$ geçiş sınırlarını açıklayan fonksiyondur.



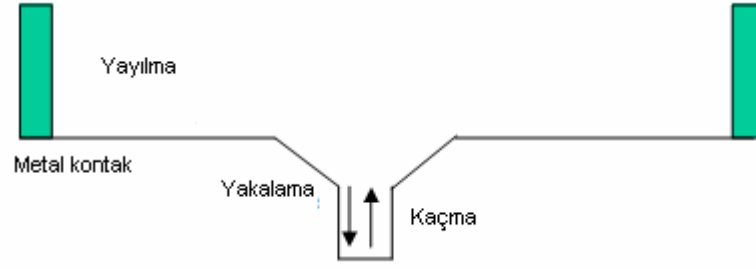
Şekil 2.26. Ters güç ve ışık tayfı doğru genişliği değişimi⁽¹⁷¹⁾

Taşıma etkisi

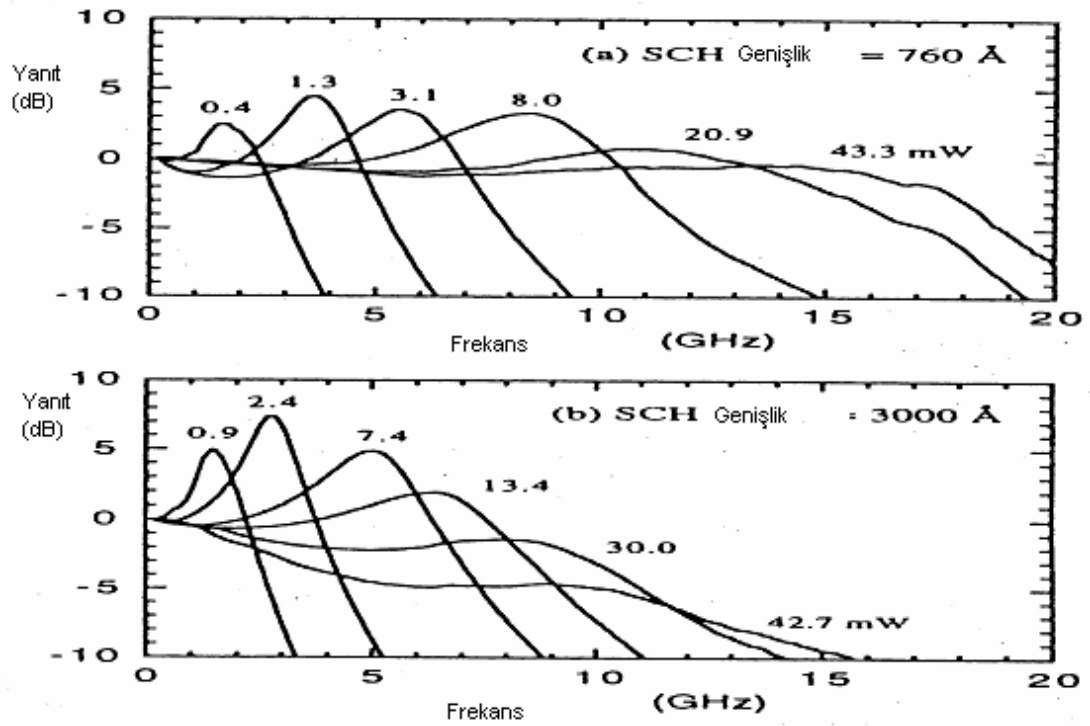
Kuantum lazerler için taşıma etkisi için aşağıdakilere ihtiyaç vardır; Taşıyıcıların SCH bölgeler ve kuantum kuyuları arasında, sonlu yakalama ve kaçma zamanı arasında;

SCH $\Rightarrow$ yakalama ve ısı ışıınımı $\Rightarrow$ kaçma yoluyla taşıyıcı yayılması, ilişkisi vardır.

Üçlü oran denklemi kullanımı için, taşıyıcı denklemi yedek denklemlerle yer değiştirir. Bunlardan biri engel bölgesi için diğerleri ise merkez aktif bölge içindir. Buradaki zaman doğrudan doğruya ayarlama sıralamasıyla karşılaştırıldığında çok küçüktür. Fakat bütün bunlar türev verimine katkıda bulunabilirler. SCH boyunca taşıma türev verimini ve gevşeme frekansını düşürür. Böylece geniş SCH bölgesi daha düşük gevşeme frekansına sahiptir.



Şekil 2.27. Yakalama ve kaçma yoluyla taşıyıcı yayılması⁽¹⁷¹⁾



Şekil 2.28. Frekans ve SCH genişliğe göre sistemin cevabı⁽¹⁷¹⁾

Doğrusal Genişlikteki Artış

Doğrusal genişlikteki artma, şiddet değişimi (karmaşık dielektrik sabitinden) kendiliğinden ısımanın şiddeti ve faz değişimi nedeniyle oluşur.

$$\Delta f = \frac{\hbar \omega \nu_g \alpha_m R_{sp}}{8\pi P_0} (1 + \alpha_H^2) \quad (2.76)$$

Burada;

P_0 : Optiksel olarak elde edilen çıkış gücü

α_H : Doğrusal genişlik ilerleme faktörü

Doğrusal genişlik ilerleme faktörü devreye girilen türev verimi ile taşıyıcıların kırılma indisi değişimi ile ilgilidir.

$$\alpha_H = -\frac{4\pi}{\lambda} \frac{dn/dN}{dg/dN} \quad (2.77)$$

Son zamanlarda ilerleme faktörünü azaltma çalışmaları ile kuantum aktif bölge gerilimi sağlanmış ve taşıyıcı sayısını azaltarak, indis değişiminin azaltılması sağlanmıştır.

Enerjide düzensizlik

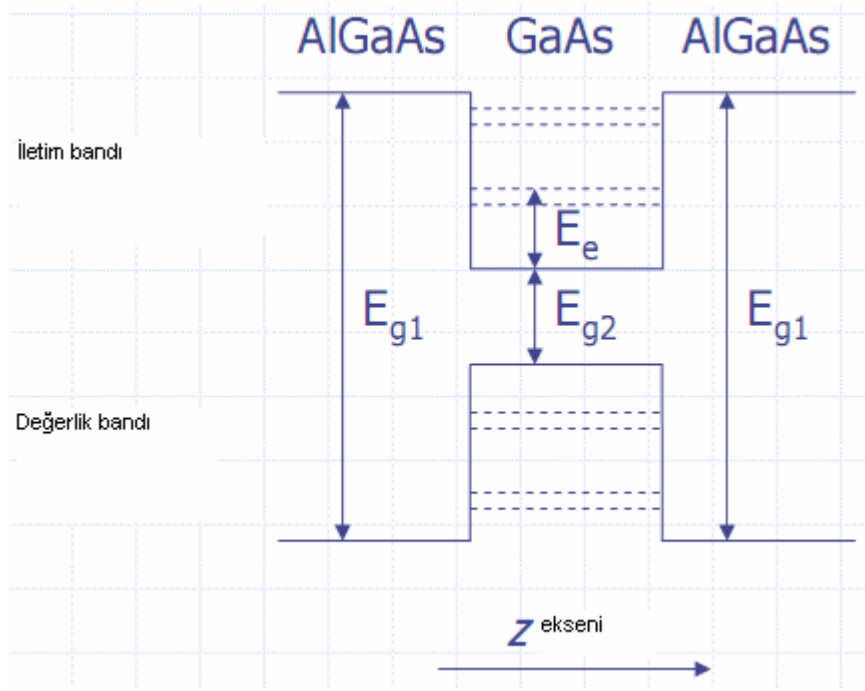
Şiddet düzensizliği ve faz düzensizliği olarak ikiye ayrılır;

Şiddet düzensizliği:

Bütün dalgalanmalar ve düzensizlikler ışıma işleminin kuantum doğasından kaynaklanmaktadır. Şiddetin düzensizliği; eşik etrafında pik değerine ulaşır. Bu pik değeri gevşeme titreşim frekansının yanındadır. Şiddet düzensizliği, bağıl şiddet düzensizliği (RIN) ile karakterize edilir ve ışıma gücündeki artış ile azalır.

Faz düzensizliği:

Işık tayfındaki her bir boyuna mod ve doğru genişliği ile ilgilidir.



Şekil 2.29. AlGaAs malzeme için bant yapısı⁽¹⁵⁴⁾

$$S_{v_{FW}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\Gamma R_{sp}}{4\pi P} \left(1 + \alpha_H^2 |H(W)|^2 \right) \quad (2.78)$$

$4\pi P$: Kendiliğinden ışıma faz değişiminden

α_H^2 : Taşıyıcı düzensizliğinden kaynaklanmaktadır.

Kuantum kuyusu:

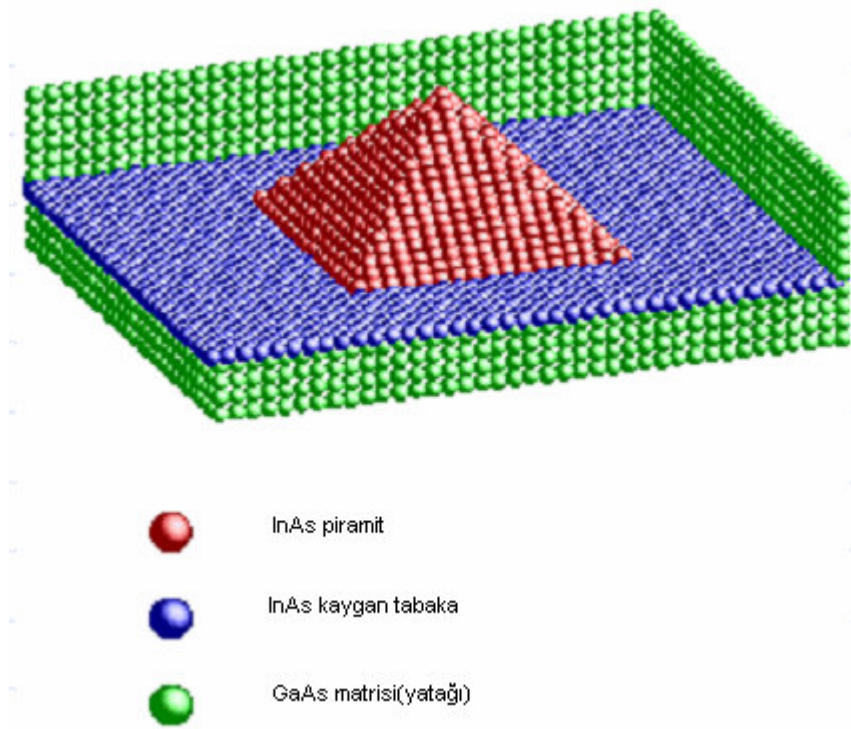
*hapis z ekseninde ve E_z kesiklidir.

*Kabul edilen enerjiler alt bantların kesikli enerjileridir.

*Taşıyıcılar en düşük enerji düzeyinde bulunmak isterler.

*Deşiklerin ve elektronların yakınlığı daha fazla yeniden birleşme olasılığı sağlar.

Bütün üç boyutlu hapis faktörlerinde E_x, E_y, E_z kuantumlaşmıştır ve kesiklidir. Yeniden birleşme oranının yüksek olması daha fazla ışımaya neden olur.



Şekil 2.30. Kuantum noktaları⁽¹⁵⁴⁾

2.19. Lazer Diyot Parametreleri ve Özellikleri

2.19.1. P-I Eğrisi ve İlgili Parametreleri

Genel çıkış gücü ve devreye girilen akım ilişkisi:

Çıkış optiksel gücü ($P_{\text{çıkı}}$) nün girilen akım I ile ilişkisi denklem (2.79) deki gibidir.

$$P_{\zeta uki} = \frac{\hbar w}{q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \eta_i (I - I_{th} - \Delta I_L) \quad (2.79)$$

Burada;

ΔI_L : I'nin artışı dolayısıyla sızıntı akımında meydana gelen ek artışı hesaplar.

α_i : Gerçek kayıp

α_m : Aynaların iki uç yüzeyi arasındaki geçişleri hesaplar.

η_i : İç kuantum verimidir ve radyoaktif yeniden birleşmelere katkıda bulunan devreye girilen taşıyıcıların yüzdesini tanımlar.

η_e : Dış türevsel kuantum verimidir ve denklem (2.80) deki gibi tanımlanır.

$$\eta_e = \frac{dP_{\zeta uki} / dI}{\hbar w / q} = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \quad (2.80)$$

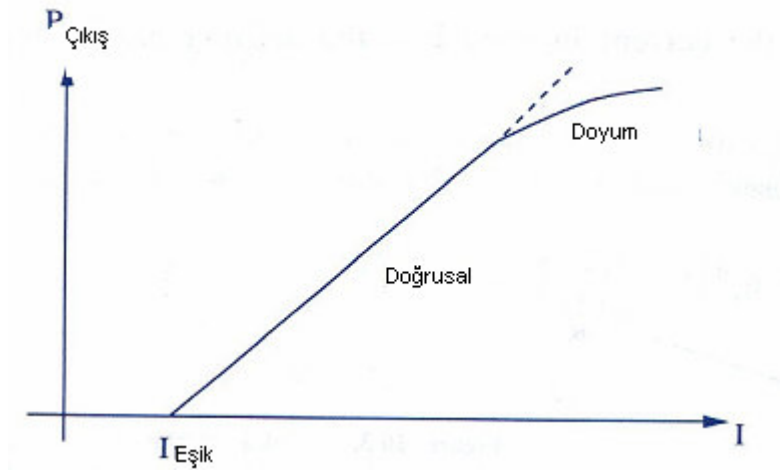
Eşik akımının altındaki değerler için çıkış ışık şiddeti ihmal edilecek kadar küçüktür. Yukarısında ise, doyum etkisi görülene kadar çıkış gücü doğrusal olarak artar.

Doyum etkisinin nedenleri:

*Devreye girilen akım ile sızıntı akımı azalır.

*Eşik akımı, eklem ısınmasından dolayı devreye girilen akıma da bağlı olabilir. Bu durumda, sıcaklıktaki artış tekrar birleşme yarı ömrünü azaltır.

*İç soğurulma devreye verilen akım ile artar.



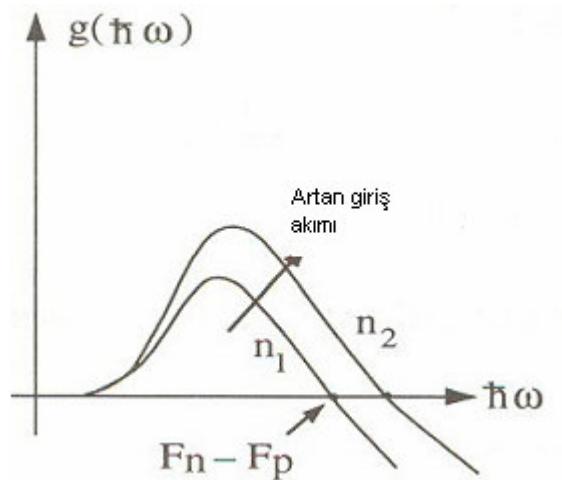
Şekil 2.31. Genel çıkış gücü ve girilen akım yoğunluğu ilişkisi

2.19.2. G-Enerji (Dalga boyu) Eğrisi ve İlgili Parametreler

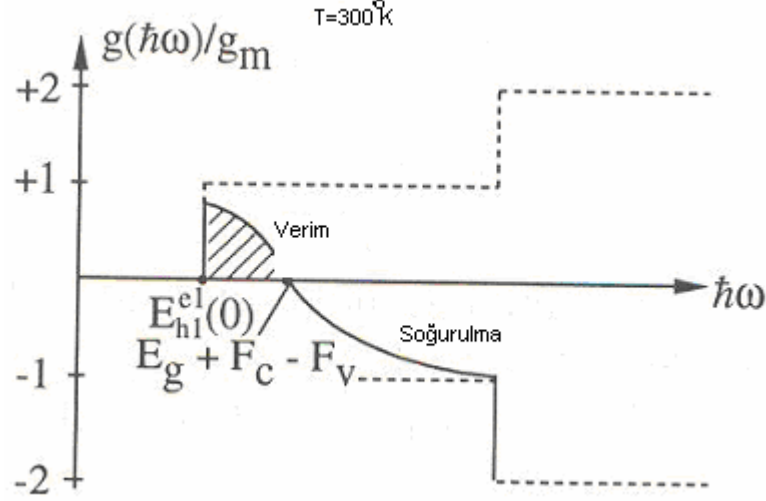
Sonlu sıcaklık verim tayfı denklem (2.81) ile gösterilir.

$$g(\hbar\omega) = \sum_{n,m} g_m \left[f_c^n(E_t = \hbar\omega - E_{hm}^{en}) - f_c^m(E_t = \hbar\omega - E_{hm}^{en}) \right] H(\hbar\omega - E_{hm}^{en}) \quad (2.81)$$

Verim $f_c^n > f_v^m$ olduğu zaman gerçekleşir.



Şekil 2.32. Sonlu sıcaklık-verim tayfı⁽¹³⁾



Şekil 2.33. Verim Tayfı (Spektrumu)⁽¹³⁾

Yukarıdaki şekilden de görülebileceği gibi, verim kenar geçişindeki bir atma ile başlar. Burada $E_t = 0$ ve $\hbar\omega = E_{hl}^{el}(0) = E_g + E_{e1} - E_{h1}$ değeri $E_g + F_c - F_v$ de 0 değerine doğru azalmaya başlar. Daha sonra daha yüksek optik enerji değerlerinde soğurulma oluşur. 3D hacimli, hafif verim artışı ile karşılaştırılmış bant kenarı yakınlarındaki keskin verim artışı 2D hacimdeki düzey yoğunluğunun, 3D deki düzey yoğunluğunun karekökündeki yavaş artıştan kaynaklanmaktadır. Fermi-Dirac dağılımı, bu keskin basamaklı fonksiyondan sapar ve yarı- Fermi düzeyinde $1/2$ ye eşitlenir. Deşik toplanması denklem (2.82) ile elde edilir.

$$p = \sum_{m=1}^{\infty} n_v \ln(1 + e^{(E_{hm} - F_v)/k_B T}) \quad (2.82)$$

Burada;

$$n_v = \frac{m_h^* k_B T}{\pi \hbar^2 L_z} \quad (2.83)$$

Denklem (2.82) ve denklem (2.83) ağır ve hafif deşik alt bantlarını hesaplayabilir. m deşik alt bantları için hesaplamadır.

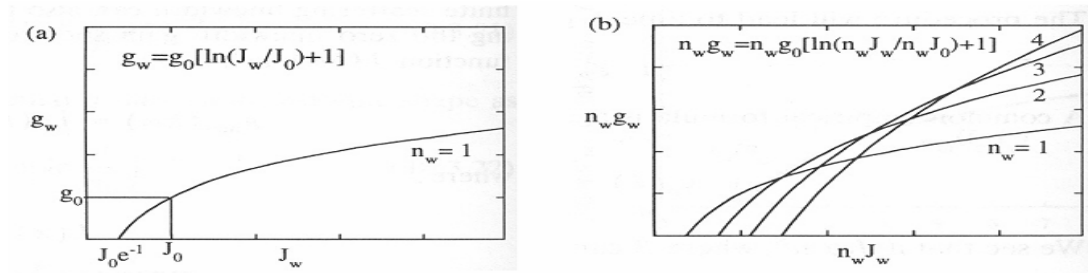
2.19.3. G-J Eğrisi ve İlgili Parametreler

Yalnızca ilk kuantumlaşmış elektron ve deşik alt bantlı bir kuantum lazerin ışması için deneysel ve logaritmik atma verimi-akım yoğunluğu ilişkisini açıklayan denklem (2.84) kullanılır^(117,192).

$$g_w(J) = g_0 \left(1 + \ln \frac{J_w}{J_0} \right) \quad (2.84)$$

Burada J_w ve g_w sırasıyla devreye girilen akım yoğunluğu ve tek kuantum kuyusuna sahip (SQW) lazerin zayıf verim katsayısıdır.

$J_{tr} = J_0 e^{-1}$ de saydam akım yoğunluğu oluşur.



Şekil 2.34. a) Bir kuantum kuyulu lazer için devreye verilen akım yoğunluğun (J_w) nin verim g_w ile değişimi. **b)** n_w (birden fazla) kuantum kuyulu bir lazer yapı için devreye verilen akım yoğunluğu ($n_w J_w$) ile verim ($n_w g_w$) in değişimi⁽¹³⁾

Çoklu Kuantum Kuyulu Lazer:

Bir çoklu kuantum kuyulu n_w lazer için verimin $(n_w g_w)$ nin devreye verilen akım yoğunluğu $(n_w J_w)$ ile değişimi denklem (2.85) deki gibidir.

$$n_w g_w = n_w g_0 \left[\ln \left(\frac{n_w J_w}{n_w J_0} \right) + 1 \right] \quad (2.86)$$

İşlemi basitleştirmek için kuyu-kuyu eşlemesi ihmal edilebilir. Yatay kesişim 2 faktörü ile değiştirilmektedir.

n_w kuantum kuyusu için eşik akım yoğunluğu:

$$J_{th} = \frac{n_w j_w}{\eta} = \left(\frac{n_w J_0}{\eta} \right) \exp \left[\left(\frac{g_w}{g_0} \right) - 1 \right] \quad (2.86)$$

Burada; η devreye verilen akımın iç kuantum verimidir.

$J_{th} - T$ ilişkisi:

Eşik akım yoğunluğu sıcaklıkta değişim yapılarak denklem (2.87) deki gibi bulunabilir.

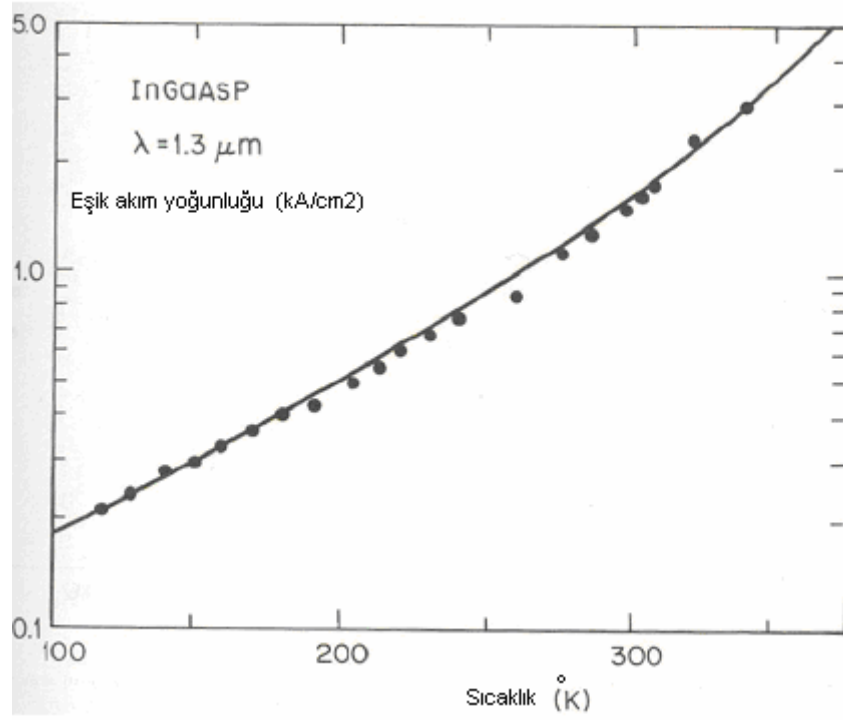
$$J_{th} = J_0 \exp[T/T_0] \quad (2.87)$$

Burada, J_0 bir sabit ve T_0 ise eşik akım yoğunluğunun sıcaklığa bağlılığını gösteren karakteristik bir sıcaklıktır. T_0 ın değerinin yüksek olması; sıcaklık artışının yavaş olmasını sağlayan cihazın, dış türev kuantum verimini ve eşik akım yoğunluğunu açıklar. InGaAsP lazerlerin eşik akım yoğunluğunun yüksek sıcaklıklardaki hassasiyeti yüksek sıcaklıklar altında çalışmasını kısıtlar⁽¹²¹⁻¹²⁹⁾.

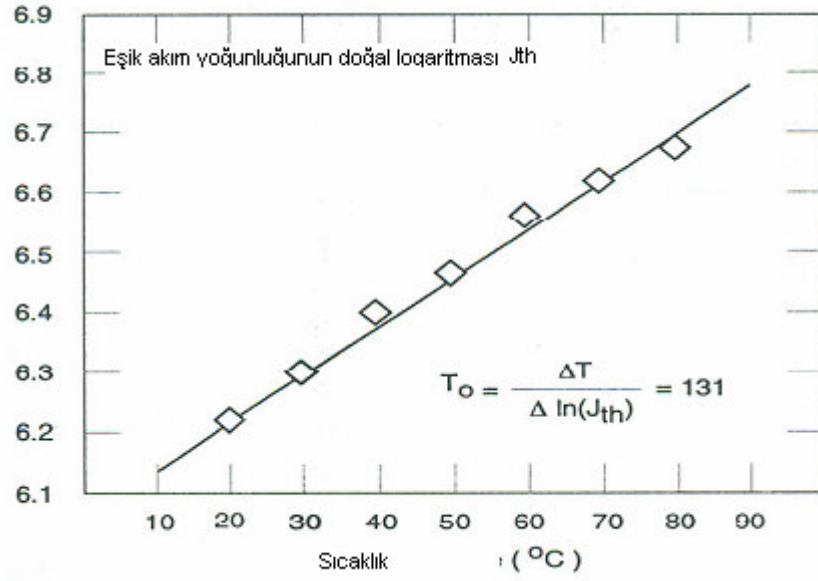
Logaritmik ölçülerde J_{th} ile T değişimi:

Denklem (2.88) den karakteristik sıcaklık T_0 elde edilebilir.

$$\ln(J_{th}) = \frac{T}{T_0} + \ln(J_0)$$
$$T_0 = \frac{\Delta T}{\Delta \ln(J_{th})}$$
(2.88)



Şekil 2.35. Sıcaklığın eşik akım yoğunluğu ile değişimi⁽¹³⁾



Şekil 2.36. Eşik akım yoğunluğu ile sıcaklık artışı değişimi. Grafikteki ters eğim karakteristik sıcaklık değerini verir. J_{th} değerleri yerine I_{th} değerleri kullanılması halinde de aynı sonuçlar elde edilir⁽¹³⁾

2.20. Luttinger-Kohn Hamiltonian Deklemi

QW malzemenin verimini bulabilmek için, QW in önce bant yapısının hesaplaması yapılmıştır. L_w genişliğin de ki bir QW in büyümesi z ekseninde düşünülmüştür. QW in değerlik yapısının hesaplanmasında Luttinger-Kohn Hamiltonian' ı kullanılmıştır^(117,192). Hamiltonian aşağıdaki gibidir.

$$H = \begin{pmatrix} P+Q & -S & R & 0 \\ -S^* & P-Q & 0 & R \\ R^* & 0 & P-Q & P+Q \\ 0 & R^* & S^* & P+Q \end{pmatrix} \quad (2.89)$$

Buradaki matris elementleri ;

$$\begin{aligned}
P &= P_k + P_e \\
Q &= Q_k + Q_e \\
P_k &= \frac{\hbar^2}{2m_0} \gamma_1 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \\
Q_k &= \frac{\hbar^2}{2m_0} \gamma_2 (k_x^2 + k_y^2 + k_z^2) \\
S &= \frac{\hbar^2}{2m_0} 2\sqrt{3} \gamma_3 (k_x - ik_y) k_z \\
R &= -\frac{\hbar^2}{2m_0} 2\sqrt{3} (\gamma_2 (k_x^2 - ik_y^2) - 2i\gamma_3 k_x k_y) \\
P_e &= -a_v (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} + \epsilon_{zz}) \\
Q_e &= -\frac{b}{2} (\epsilon_{xx} + \epsilon_{yy} - 2\epsilon_{zz})
\end{aligned} \tag{2.90}$$

Burada k düzlem dalga vektörü, γ_1 , γ_2 ve γ_3 Luttinger parametreleri ve m_0 serbest elektronun kütlesidir. QW ler için $k_z = i(d/d_z)$, z eksenindeki hapis faktörünü değiştirir. P_e ve Q_e sırasıyla hidrostatik enerji değişimi ve kesme gerilimidir. Düzlemdeki büyümenin gerilim zoru;

$$\epsilon_{xx} = \epsilon_{yy} = \frac{a_0 - a}{a} \tag{2.91}$$

Burada a_0 zemin tabakasının kafes katsayısı, a büyüme tabakasının kafes sabitidir. Dik gerilim zoru denklem (2.92) deki gibidir.

$$\epsilon_{zz} = -\frac{2C_{12}}{C_{11}} \epsilon_{xx} \tag{2.92}$$

Burada C_{11} ve C_{12} esnek sertlik sabitleri, a_v değerlik bantı için hidrostatik deformasyon potansiyeli ve b kesme bozulma potansiyelidir. QW in envelope (öz değer) fonksiyonları ve daha sonra alt bant enerjileri etkin kütle denklemleri kullanılarak bulunmuştur.

$$\sum_m \left[H_{vv'} \left(k_u, -i \frac{\partial}{\partial z} \right) + V(z) \delta_{vv'} \right] x F_m^{v'}(k_u, z) = E_m F_m^{v'}(k_u, z) \quad (2.93)$$

Burada $H_{vv'}$ Luttinger-Kohn Hamiltonian' ıdır. $E_m(k)$ değ erlik bant kenarından ölçülmüş toplam deşik enerjisi iken, F_m^v deşik envelope fonksiyonudur. V_z deşik potansiyelidir ve $k_u = k_x \hat{x} + k_y \hat{y}$ dir. InGaAsN^(138,140) dışındaki malzemelerin iletim bant yapıları ve hapsedilmiş elektron düzeyleri için yaygın olarak kullanılan parabolik yaklaşım, Schrodinger dalga eşitliğı çözülerek bulunur. InGaAsN malzeme için ise, malzemedeki azot malzemenin kısıtlı olmasından dolayı, hapsedilmiş elektron düzeyleri üzerinde sınırlı azot düzeylerindeki bant kesişmeme etkisi hesaplanır. Denklem (2.94) deki matrisin öz değ erleri malzemenin bant yapısını verir.

$$\begin{bmatrix} E_0(x, z) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e(z)} \dots \dots \dots V_{MN}(x, z) \\ V_{MN}(x, z) \dots \dots \dots E_N(x, z) \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

Burada k hacim dalga vektörü, x azot yoğunlaşması, m_e elektronun etkin kütlesi ve V_{MN} kuyunun içindeki L_w uzunluğ unda ve $2.4\sqrt{x}$ eV ve 0 değ erlerine sahip etkileşim terimidir. k_z 2D yapılar için genel bir ifade olan $i(d/d_z)$ ile yer değı ştirir. $E_0(x, z)$ denklem (2.95) ile tanımlanır.

$$E_0(x, z) = \begin{bmatrix} E_0(z) - 1.55 \text{ eV}, \dots \dots \dots |z| \leq \frac{L_w}{2} \\ E_0(z), \dots \dots \dots |z| \geq \frac{L_w}{2} \end{bmatrix} \quad (2.95)$$

Burada, $E_o(z)$ malzemenin azotsuz kenar iletim bandıdır. QW içindeki azot enerji düzeyi $E_N(x, z) = 1.52 - 3.9xeV$ ile bulunur.

2.21. İletim ve Değerlik Bantlarında Taşıyıcı Yoğunluğu

Bir bandın taşıyıcı yoğunluğu; bütün bant üzerindeki yoğunluk düzeylerinin ve taşıyıcıların bulunma olasılığının çarpımının integrali alınarak bulunur. Düzey yoğunluğu; iletim ve değerlik bandındaki birim enerjilerine enerji düzeylerinin nasıl dağıtıldığını açıklar. Bulunma olasılığı olarak tanımlanan denklem (2.96) (Fermi fonksiyonu) de; E elektronun enerjisi, $E_{fc, fv}$ iletim ve değerlik bantlarının yarı Fermi düzeyleri, T °Kelvin cinsinden sıcaklık ve k_B Boltzmann sabitidir.

$$f_{c,v}(E, E_{fc}, E_{fv}) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{(E - E_{fc, fv})}{k_B T}\right]} \quad (2.96)$$

Elektron ve deşik taşıyıcı yoğunluklarının hesaplamasında, düzey doldurma etkisi ve taşıyıcıların aşırı derecede engel/SCH ' a dolmaları kullanılır. QW lerin bütün enerjileri ve hapsedilmiş alt bantları ile, engel/SCH bölgesindeki düzeyler kadar iyi bir şekilde hesaplamalarda yer alır. Böylece, toplam taşıyıcı yoğunluğunun her ikisi de N_{tot} veya P_{tot} ile, QW bölgedeki toplam taşıyıcı yoğunluğu N_w veya P_w ile, SCH/bölge engelindeki taşıyıcı yoğunluğu ise N_B veya P_B ile gösterilir ve aralarında;

$$N_{tot} = N_w + N_B \quad (2.97)$$

ilişkisi vardır.

$$N_w = \frac{m_e k_B T}{\pi \hbar^2 L_w} \sum \ln \left\{ 1 + \exp \left(\frac{-E_{fc} + E_{cn}}{k_B T} \right) \right\} \quad (2.98)$$

Bu toplam QW deki bütün enerji düzeyleri (E_{cn}) üzerinde gerçekleştirilebilir. m_e elektronun etkin kütesidir. Parabolik olmayan bant yapıları için k yüzeyinde integral alınabilir ^(178,190).

$$P_w = \sum_{h_{HH}, n_{LH}} \int_0^{k_{\max}} \rho(k) [1 - f_v(E_{vn}(k), E_{fv})] dk \quad (2.99)$$

$$N_w = \sum_n \int_0^{k_{\max}} \rho(k) [f_c(E_{cn}(k), E_{fc})] dk \quad (2.100)$$

QW lerin bütün enerji düzeylerinin üzerinden tekrar toplam alınır. Burada $E_{cn, vn}$ sırasıyla iletim ve değerlik bantlarının n. alt bant enerjileridir. Bizim yaptığımız çalışmaya göre SCH bölgedeki engel, bölünmemiş 3D düzeyleri gibi ele alınır. SCH engel bölgesindeki taşıyıcılar denklem (2.101) deki gibidir.

$$N_B = \frac{1}{2\pi^2} \left(\frac{2m_e}{\hbar^2} \right)^{3/2} \int_{E_B}^{\infty} \frac{\sqrt{E - E_B}}{1 + \exp \left[\frac{(E - E_{fc})}{k_B T} \right]} dE \quad (2.101)$$

Burada E_B engel malzemesinin kenar iletim bandının enerjisidir. Benzer diğer bir işlemde değerlik bandının deşik taşıyıcın yoğunluğunu hesaplayabilmek için yapılabilir. Kaplama tabakasındaki SCH dan sızan taşıyıcıları nitelikli olarak, statik yaklaşım kullanarak tahmin etmek mümkündür. Kaplama tabakasının kenarında toplanan elektron N_{PO} denklem (2.102) deki gibidir.

$$N_{PO} = 2 \left(\frac{m_e k_b T}{2\pi^2 \hbar^2} \right)^{3/2} \exp \left[\frac{(E_{fc} - E'_B)}{(k_b T)} \right] \quad (2.102)$$

Burada E'_B kaplama tabakasının engel yüksekliğidir. Bu yaklaşım kullanılarak, yüksek sıcaklıklarda, InGaAsP malzemenin kaplama tabakasının enerjisinin üzerindeki enerji değerlerinde toplam elektron taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilir (tahmini olarak InP kaplama tabakasının üzerindeki toplam elektron taşıyıcı yoğunluğu % 3 civarındadır. Bu yüksek enerjili taşıyıcılar ısısal sızıntı akımına katkıda bulunurlar. Özellikle AlGaInAs ve InGaAsN malzeme sistemlerinde, bu yüksek enerjili taşıyıcılar % 5 den az ve ihmal edilebilen etki ile verim hesaplamasını azaltan ısısal sızıntı akımının oluşmasını sağlarlar. Bunun yanında, kaplama tabakasına doğru sızan taşıyıcılar aletin yapısından etkilenirler⁽¹⁷³⁻¹⁸¹⁾.

Fermi' nin Altın Kuralı yaklaşımı malzeme veriminin hesaplanmasında kullanılır. Alt bant verimi denklem (2.103) deki gibidir ⁽¹⁷²⁻¹⁷⁹⁾.

$$g_{sub}(\hbar\omega, E_{eh}) = \frac{\pi e^2 \hbar}{\epsilon_0 c m_0^2 n} |M_t|^2 \frac{\rho^{2D}(k)}{\frac{\partial E_{eh}}{\partial k}} (f_c - f_v) \quad (2.103)$$

Kuantum lazerlerin bant genişliklerinin ayarlanmasında taşıma zamanı ile InGaAsP, AlGaInAs ve InGaAsN malzemeler için SCH daki taşıyıcı yakalama ve kaçış zamanının önemli etkileri vardır ⁽¹⁹³⁾.

Denklem (2.103) deki E_{eh} geçiş enerjisidir.

$$E_{eh} = E_{cn}(k, n_c) - E_{vn}(k, n_v)$$

Burada $E_{cn}(k, n_c)$ elektronların yeniden birleşme enerjileri, $E_{vn}(k, n_v)$ deşik yeniden birleşme enerjileri, n_c ve n_v uygun kuantum sayıları, ρ^{2D} 2D düzey yoğunluğu ve $|M_t|^2$ spin bozunmasını içeren çapraz matris elementidir^(173,179).

Bu çalışmada da görülebileceği gibi, incelenen bütün QW malzeme sistemlerinin genişliğinin azaltılması ile türevsel verim artırılabilir. Devreye verilen akın yoğunluğu denklem (2.104) deki gibi yazılabilir.

$$J = J_{rad} + J_{mon} + J_{Aug} \quad (2.104)$$

Burada J_{rad} yeniden birleşme akım yoğunluğu, J_{mon} ışımasız yeniden birleşme akım yoğunluğu ve J_{Aug} ise ışımasız Auger yeniden birleşme akım yoğunluğudur. J_{rad} toplam kendiliğinden ışıma oranından denklem (2.105) deki gibi bulunur.

$$J_{rad} = eL \int R_{sp}(\hbar\omega) d\hbar\omega \quad (2.105)$$

Burada e elektronun yükünü, L kuyu ve engel genişliğinin her ikisini, $R_{sp}(E)$ toplam kendiliğinden ışıma oranını temsil eder. Tek bir iletim-değerlik alt bandındaki geçişten kendiliğinden ışıma oranı denklem (2.106) daki gibidir^(173,187).

$$\tau_{sp}(\hbar\omega) = \left(\frac{4\pi e^2}{\epsilon_0 c m_0^2} \right) \hbar\omega |M_T|^2 \frac{\rho(k)}{\frac{\partial E_{eh}}{\partial k}} f_c (1 - f_v) \quad (2.106)$$

Burada $\rho(k)$ QW deki ve engel bölgesindeki düzey yoğunluğudur.

$$J_{moon}(eL(AN)) \quad (2.107)$$

Burada A tek moleküllü yeniden birleşme katsayısıdır. J_{moon} yüksek taşıyıcı yoğunluğu ve yüksek kalite malzemeleri için ihmal edilebilir ^(181,206). Bu durum AlGaInAs ve InGaAsP malzemeler için kabul edilebilir olmasına rağmen InGaAsN için malzemedeki yeniden birleşme işlemi hala belirsizliğini korumasına rağmen radyoaktif olmayan yeniden birleşme akımı eksikliğine rağmen önemli olabilmektedir^(207,209,210). Çünkü malzemelerin N saflık düzeyi eksik yeniden birleşme merkezi olarak görev yapmaktadır. Bu nedenle J_{moon} InGaAsN malzeme sistemi için ihmal edilemez ve A değeri $1 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ olarak alınır ⁽²¹¹⁾.

Auger yeniden birleşme akım yoğunluğu ise denklem (2.107) deki gibidir^(191,207).

$$J_{Aug} = eL(CN^3) \quad (2.108)$$

Burada C Auger katsayısıdır ve C nin sıcaklığa bağımlılığı olarak denklem (2.109) ile tanımlanır^(187,188).

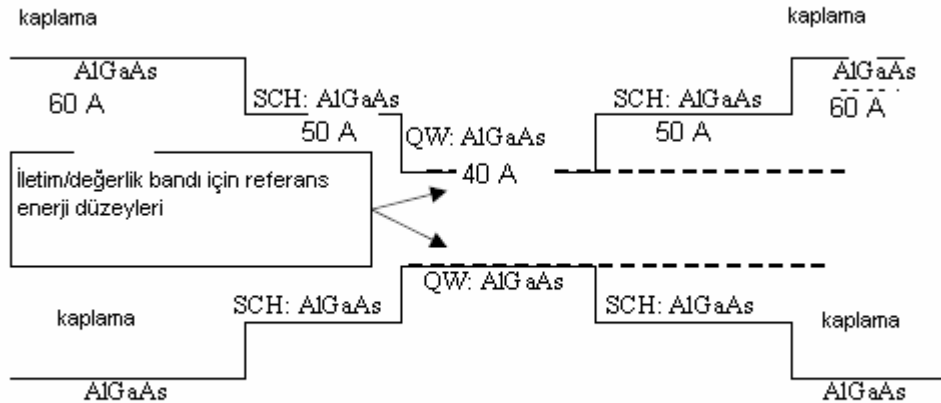
$$C = C_0 \exp\left(\frac{-\Delta E_a}{kT}\right) \quad (2.109)$$

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada VERİM VE DALGA KILAVUZU paket programları ile hesaplamalar yapılmıştır.

3.1.1 AlGaAs malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar

VERİM programı ile hesaplama yaparken yapılacak işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir (Çizelge 3.1.1).



Şekil 3.1.1. Çift yapılı AlGaAs malzeme için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır.

Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir^(152-163,192).

Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane output (program çıktıları) dosyası oluşturulur (Çizelge 3.1.1). Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır (Çizelge 3.1.2).

Çizelge 3.1.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık (Å)
QW ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)	0.98	0.009	40
SCH ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)	0.87		50
Kaplama ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$)	0.74		60

Çizelge 3.1.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	AlGaAs/AlGaAs
Malzeme bileşenleri	$\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$
Giriş Parametreleri	QW' in çoğunluk malzemesinin dalga boyu, QW' in iletim ve değerlik bandının engel ve kaplama, kalınlık değerleri
Işınım dalga boyu	<870nm
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı
Dalga boyu ile x hesaplama denklem	$E_g(\Gamma) = 1.424 + 1.247x(\text{eV}) \dots\dots\dots x(0.4 \dots\dots 300..K..de$ $= 1.519 + 1.447x - 0.15x^2(\text{eV}) \dots\dots\dots x(0.4 \dots\dots 0.....K..de$

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışınım dalga boyu ile ilgilidir.

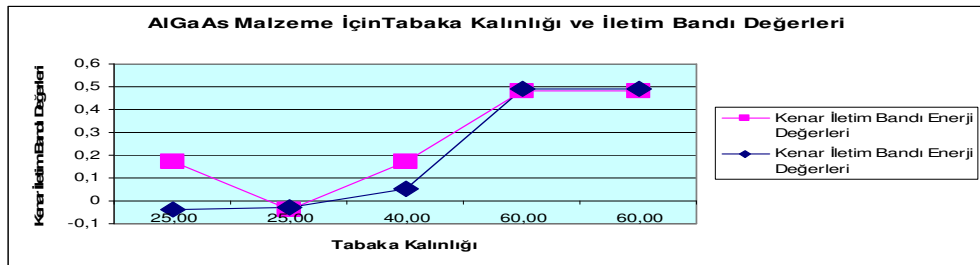
Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu, 1.24 / boşluk bandı enerjisinden elde edilebilir.

Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile AlGaAs malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır (Şekil 3.1.2 ve Şekil 3.1.3).

Çizelge 3.1.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

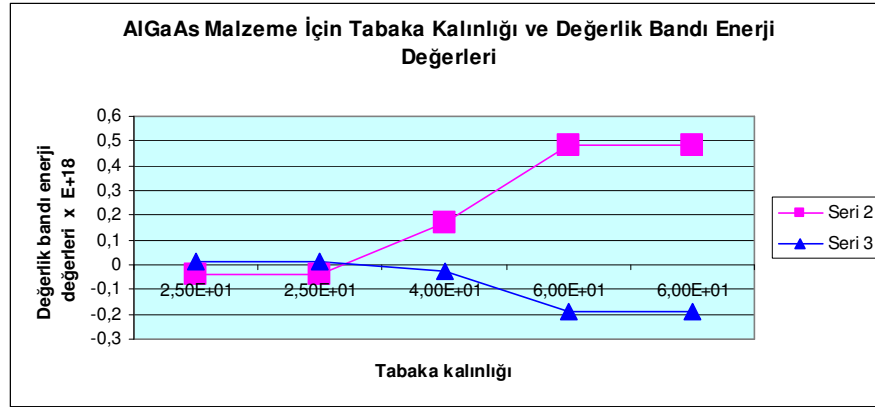
Tabaka Kalınlığı	Malzeme (Al)	Kenar İletim Bandı Enerji Değerleri		
0.60000000E+02	0.00000000E+00	0.4806046	0.4882942	Kaplama Tabakası
0.25000000E+02	0.63203887E+00	0.1711442	-0.0374689	SCH Tabakası
0.40000000E+02	0.13014575E+00	0.1711442	0.0524536	Kuantum Kuyusu
0.25000000E+02	0.63203887E+00	-0.0374728	-0.0264689	SCH Tabaka
0.60000000E+02	0.00000000E+00	0.4806046	0.4882942	Kaplama Tabakası



Şekil 3.1.2. AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

Çizelge 3.1.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Tabaka Kalınlığı	Malzeme (Al)	Kenar İletim Bandı Enerji Değerleri		
0.60000000E+02	0.00000000E+00	0.4806046	-0.1898922	Kaplama Tabakası
0.25000000E+02	0.63203887E+00	-0.0374728	0.0159165	SCH Tabakası
0.40000000E+02	0.13014575E+00	0.1711442	-0.0262268	Kuantum Kuyusu
0.25000000E+02	0.63203887E+00	-0.0374728	0.0159165	SCH Tabaka
0.60000000E+02	0.00000000E+00	0.4806046	-0.1898922	Kaplama Tabakası



Şekil 3.1.3. AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri arasındaki ilişki

QW (ΔE_{gap}) in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark

sırasıyla iletim ve değerlik (ΔE_c ..ve.. ΔE_v) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı

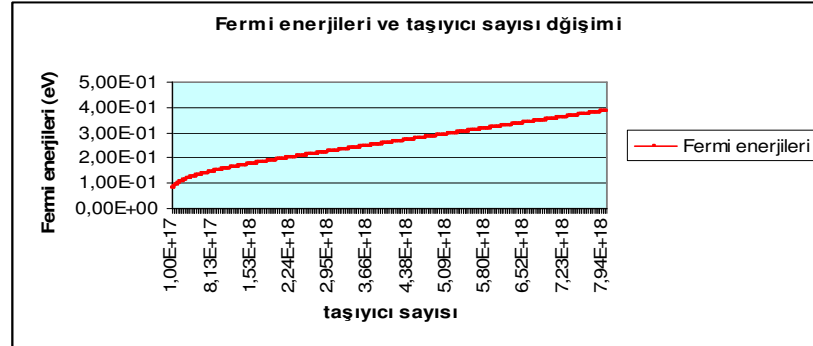
bant-offset oranı olarak adlandırılır

AlGaAs malzeme için;

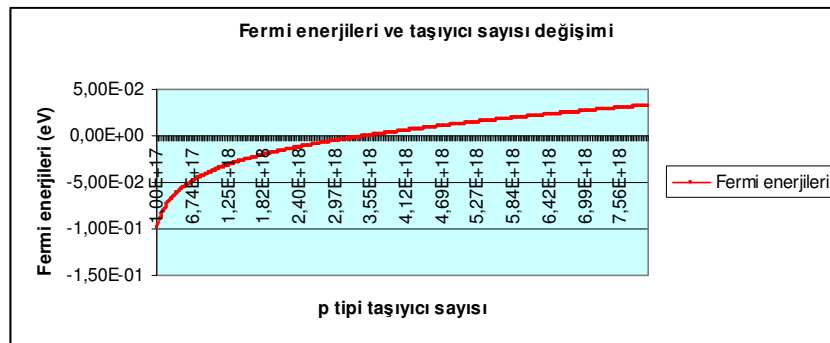
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = \frac{-0.30}{-1.43} = 0.22$$

Çizelge 3.1.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

N-PTAŞIYICI SAYISI	FERMI-N ENERJİSİ	FERMI-P ENERJİSİ
1,00E+17	8,02E-02	-9,88E-02
1,20E+17	8,52E-02	-9,41E-02
1,40E+17	8,94E-02	-9,01E-02
1,59E+17	9,32E-02	-8,67E-02
1,79E+17	9,65E-02	-8,36E-02
1,99E+17	9,95E-02	-8,09E-02
2,19E+17	1,02E-01	-7,84E-02
2,39E+17	1,05E-01	-7,62E-02
2,58E+17	1,07E-01	-7,41E-02
2,78E+17	1,09E-01	-7,21E-02
2,98E+17	1,12E-01	-7,03E-02
3,18E+17	1,14E-01	-6,86E-02
3,38E+17	1,15E-01	-6,70E-02
3,57E+17	1,17E-01	-6,55E-02
3,77E+17	1,19E-01	-6,41E-02
3,97E+17	1,21E-01	-6,27E-02



Şekil 3.1.4. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişki



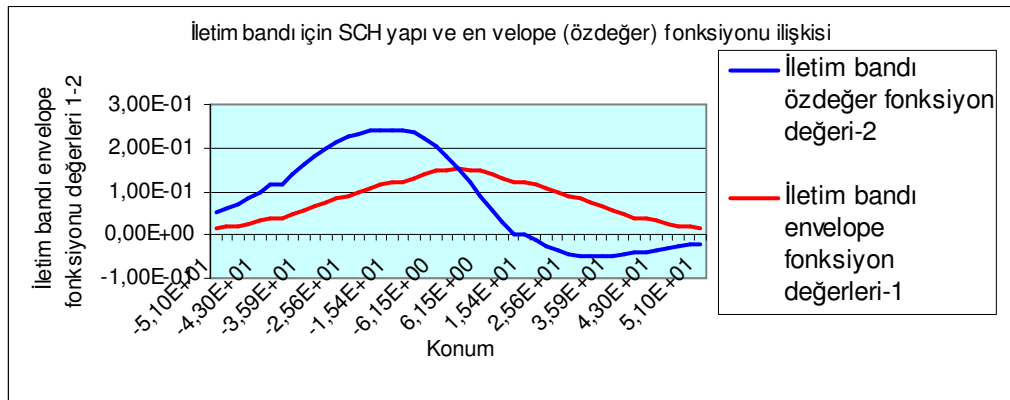
Şekil 3.1.5. Fermi enerji düzeyleri ile p taşıyıcılar arasındaki ilişki

Verim programı ile elde edilen verilerden; İletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışıma dalga boyu ve malzeme-mod verimi ilişkisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.

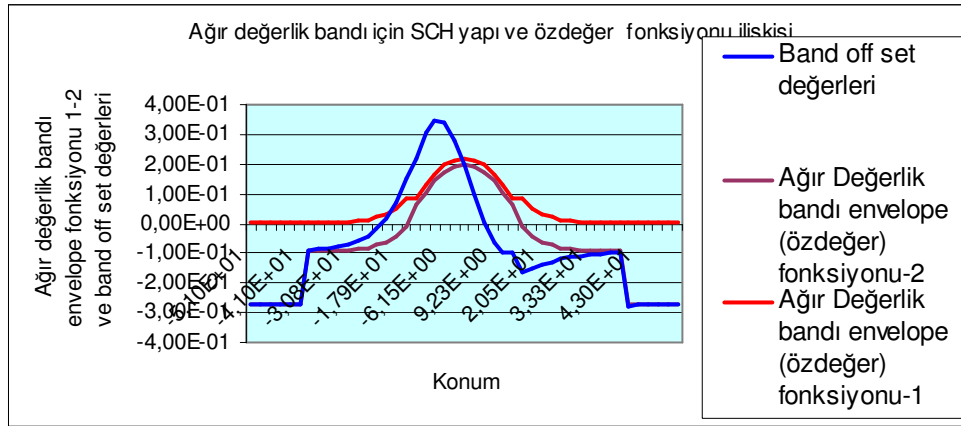
Çizelge 3.1.6. İletim, ağır ve hafif değerlik bantları öz değer fonksiyonları enerji değerleri ve bant offset değerleri

Konum	İletim bandı Öz değer fonksiyon değeri-1	İletim bandı Öz değer fonksiyon değeri-2	Ağır Değerlik bandı fonksiyonu-1	Ağır Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-2	Bant off set değerleri	Konum	Hafif Değerlik bandı öz değer fonksiyon u-1	Hafif Değerlik bandı fonksiyon u-2
- 5,10E+01	1,50E-02	3,57E-02	<u>1,02E-05</u>	-2,74E-01	9,07E-05	-3,31E+01	9,20E-02	9,20E-02
- 4,90E+01	1,80E-02	4,16E-02	<u>2,32E-05</u>	-2,74E-01	1,92E-04	-3,11E+01	9,95E-02	9,95E-02
- 4,70E+01	2,17E-02	4,86E-02	<u>5,27E-05</u>	-2,74E-01	4,06E-04	-2,91E+01	<u>1,08E-01</u>	1,08E-01
- 4,50E+01	2,61E-02	5,67E-02	<u>1,20E-04</u>	-2,74E-01	8,60E-04	-2,71E+01	1,16E-01	1,16E-01
- 4,30E+01	3,15E-02	6,62E-02	<u>2,74E-04</u>	-2,74E-01	1,82E-03	-2,51E+01	1,26E-01	1,26E-01
- 4,10E+01	3,79E-02	7,72E-02	<u>6,23E-04</u>	-2,74E-01	3,85E-03	-2,31E+01	1,36E-01	1,36E-01
- 4,10E+01	3,79E-02	7,72E-02	<u>6,23E-04</u>	-9,33E-02	3,85E-03	-2,31E+01	1,36E-01	1,36E-01
- 3,85E+01	4,70E-02	9,21E-02	<u>1,09E-03</u>	-9,33E-02	6,28E-03	-2,18E+01	1,42E-01	1,42E-01
- 3,59E+01	5,61E-02	1,05E-01	<u>1,82E-03</u>	-9,33E-02	9,45E-03	-2,05E+01	1,45E-01	1,45E-01
- 3,33E+01	6,50E-02	1,16E-01	<u>2,97E-03</u>	-9,33E-02	1,38E-02	-1,92E+01	1,46E-01	1,46E-01
- 3,08E+01	7,38E-02	1,24E-01	<u>4,80E-03</u>	-9,33E-02	1,97E-02	-1,79E+01	1,45E-01	1,45E-01
- 2,82E+01	8,24E-02	1,30E-01	<u>7,76E-03</u>	-9,33E-02	2,80E-02	-1,67E+01	1,42E-01	1,42E-01
- 2,56E+01	9,07E-02	1,34E-01	<u>1,25E-02</u>	-9,33E-02	3,96E-02	-1,54E+01	1,37E-01	1,37E-01

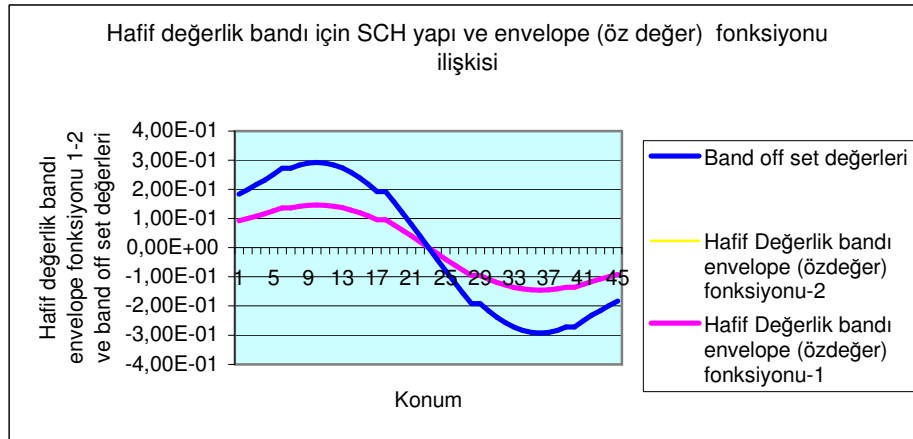
-	2,31E+01	9,89E-02	1,34E-01	2,02E-02	-9,33E-02	5,60E-02	-1,41E+01	1,29E-01	1,29E-01
-	2,05E+01	1,07E-01	1,32E-01	3,26E-02	-9,33E-02	7,90E-02	-1,28E+01	1,20E-01	1,20E-01
-	1,79E+01	1,14E-01	1,27E-01	5,26E-02	-9,33E-02	1,11E-01	-1,15E+01	1,09E-01	1,09E-01
-	1,54E+01	1,22E-01	1,20E-01	8,48E-02	-9,33E-02	1,57E-01	-1,03E+01	9,59E-02	9,59E-02
-	1,54E+01	1,22E-01	1,20E-01	8,48E-02	-2,40E-02	1,57E-01	-1,03E+01	9,59E-02	9,59E-02
-	1,23E+01	1,32E-01	1,04E-01	1,29E-01	-2,40E-02	2,02E-01	-8,20E+00	7,83E-02	7,83E-02
-	9,23E+00	1,40E-01	8,27E-02	1,67E-01	-2,40E-02	2,05E-01	-6,15E+00	5,96E-02	5,96E-02
-	6,15E+00	1,46E-01	5,75E-02	1,95E-01	-2,40E-02	1,66E-01	-4,10E+00	4,02E-02	4,02E-02
-	3,08E+00	1,50E-01	2,95E-02	2,13E-01	-2,40E-02	9,24E-02	-2,05E+00	2,02E-02	2,02E-02
-	0,00E+00	1,51E-01	-1,94E-13	2,19E-01	-2,40E-02	-4,97E-07	0,00E+00	4,61E-13	4,61E-13
-	3,08E+00	1,50E-01	-2,95E-02	2,13E-01	-2,40E-02	-9,24E-02	2,05E+00	-2,02E-02	-2,02E-02
-	6,15E+00	1,46E-01	-5,75E-02	1,95E-01	-2,40E-02	-1,66E-01	4,10E+00	-4,02E-02	-4,02E-02
-	9,23E+00	1,40E-01	-8,27E-02	1,67E-01	-2,40E-02	-2,05E-01	6,15E+00	-5,96E-02	-5,96E-02
-	1,23E+01	1,32E-01	-1,04E-01	1,29E-01	-2,40E-02	-2,02E-01	8,20E+00	-7,83E-02	-7,83E-02
-	1,54E+01	1,22E-01	-1,20E-01	8,48E-02	-2,40E-02	-1,57E-01	1,03E+01	-9,59E-02	-9,59E-02
-	1,54E+01	1,22E-01	-1,20E-01	8,48E-02	-9,33E-02	-1,57E-01	1,03E+01	-9,59E-02	-9,59E-02
-	1,79E+01	1,14E-01	-1,27E-01	5,26E-02	-9,33E-02	-1,11E-01	1,15E+01	-1,09E-01	-1,09E-01
-	2,05E+01	1,07E-01	-1,32E-01	3,26E-02	-9,33E-02	-7,90E-02	1,28E+01	-1,20E-01	-1,20E-01
-	2,31E+01	9,89E-02	-1,34E-01	2,02E-02	-9,33E-02	-5,60E-02	1,41E+01	-1,29E-01	-1,29E-01
-	2,56E+01	9,07E-02	-1,34E-01	1,25E-02	-9,33E-02	-3,96E-02	1,54E+01	-1,37E-01	-1,37E-01
-	2,82E+01	8,24E-02	-1,30E-01	7,76E-03	-9,33E-02	-2,80E-02	1,67E+01	-1,42E-01	-1,42E-01
-	3,08E+01	7,38E-02	-1,24E-01	4,80E-03	-9,33E-02	-1,97E-02	1,79E+01	-1,45E-01	-1,45E-01
-	3,33E+01	6,50E-02	-1,16E-01	2,97E-03	-9,33E-02	-1,38E-02	1,92E+01	-1,46E-01	-1,46E-01
-	3,59E+01	5,61E-02	-1,05E-01	1,82E-03	-9,33E-02	-9,45E-03	2,05E+01	-1,45E-01	-1,45E-01



Şekil 3.1.6. İletim Bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



Şekil 3.1.7. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



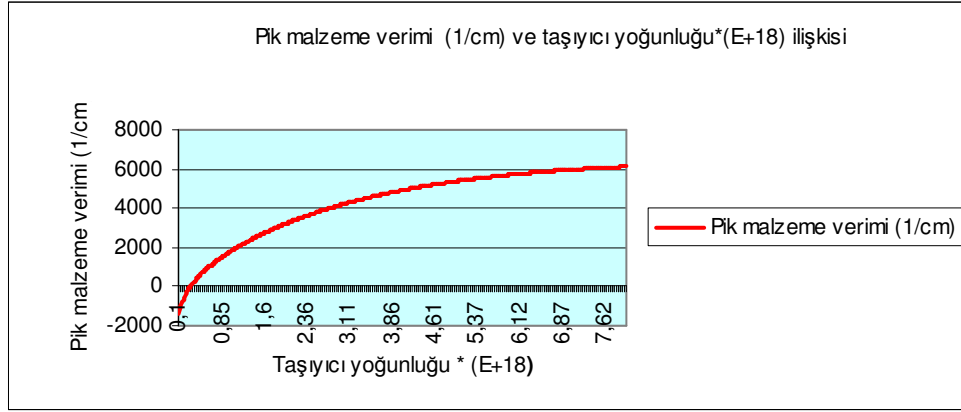
Şekil 3.1.8. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi

Türevsel verim $G^I = (dg/dN)$; Daha fazla taşıyıcı alınması ile verim artışı oranıdır. Kuantum kuyusunda kabul edilebilir bütün geçişler kuvvetli geçiş olasılıklarına sahiptirler. Bir sonsuz engele sahip kuantum kuyusu içerisindeki yasaklanmış geçişler sıfır geçiş olasılığına sahiptirler ve en iyi ihtimalle sonlu engele sahip kuantum kuyuları içerisinde ise zayıf geçiş olasılığına sahiptir. Türevsel verim optiksel şiddetin artırılması ile azalır. $W_r \propto \sqrt{G^I} \Rightarrow$ yüksek türevsel verim yüksek bant genişliği modülasyonuna sebep olur. Anti kılavuz

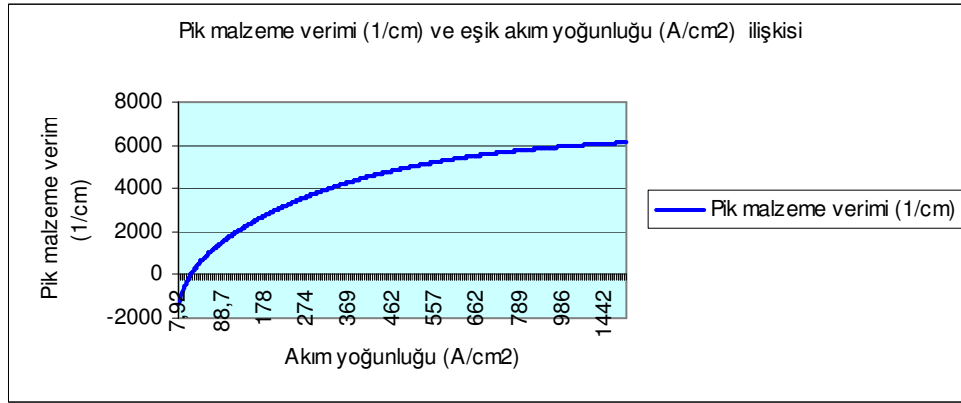
faktörü veya doğru genişliği artırma faktörü $\alpha \propto G^{I^{-1}} \Rightarrow$ yüksek türev verimi, düşük frekans oluşumuna (α) parametresi ve dar doğru genişliği kapasitesine neden olur. Yarı iletkenlerdeki optiksel verim iletim bandından değerlik bandına doğru geçen fotonların elektriksel geçişleri ile oluşur. Fermi'nin Altın Kuralı kristal içerisindeki elektron-foton iletişimini karakterize eder. Bir tek çift için iletim bandı düzeyinden değerlik bandı düzeyine geçiş oranını verir. Bu kurala göre elektron başlangıçta bir düzeye yerleşir. Bu durum daha büyük sayılı bir düzeye geçişi sağlar ve foton iletişimi olan birçok sistemde kullanılır. Delta fonksiyonu elektronun sonuç ve başlangıç enerjileri arasındaki farkı verir. Uyarılmış geçişi ve fotonun enerjisine $\hbar\omega$ ya eşittir.



Şekil 3.1.9. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi



Şekil 3.1.10. Pik malzeme verimi (1/cm) ve taşıyıcı yoğunluğu*(E+18) ilişkisi

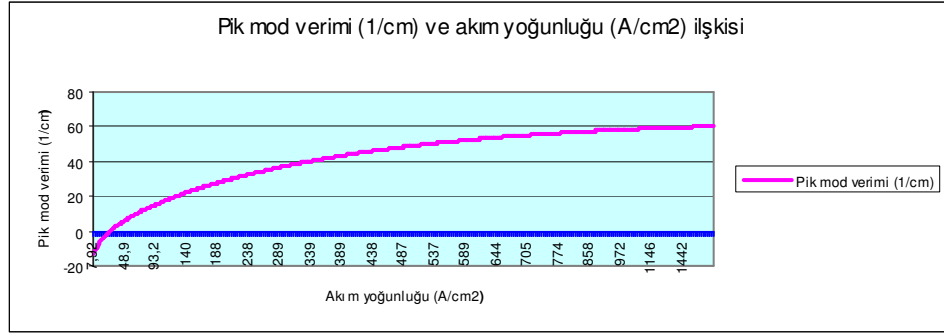


Şekil 3.1.11. Pik malzeme verimi (1/cm) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi

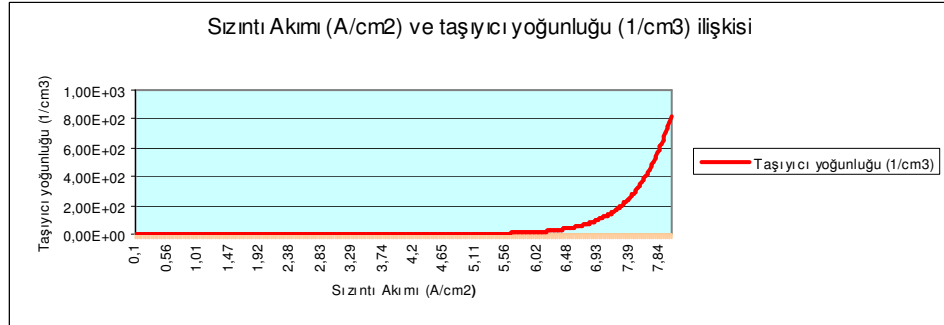
Mod verimi; Kuantum kuyularındaki elektron envelope (öz değer-örtü) fonksiyonu ve optik mod arasında daima olan üst üste gelmeyi hesaplayan ayarlanmış malzeme verimidir.

Mod verimi=Malzeme verimi x hapis faktörü

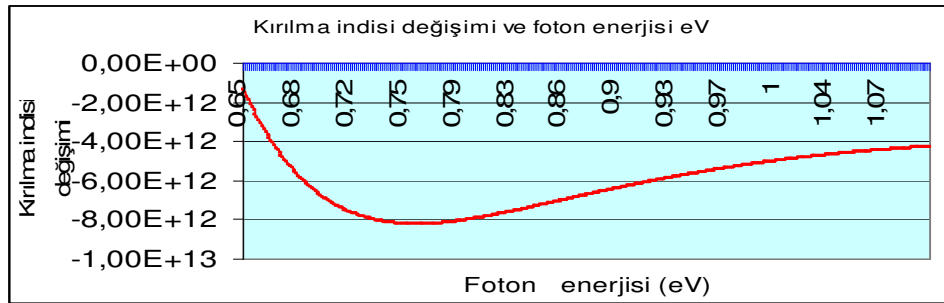
Mod verimi verim katsayısı ve verim hapis faktörü ile açıklanır.



Şekil 3.1.12. Pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi



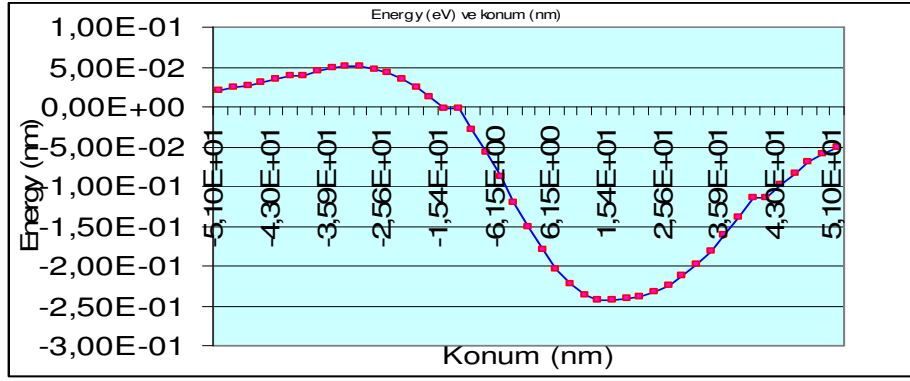
Şekil 3.1.13. Sızıntı Akımı (A/cm²) ve taşıyıcı yoğunluğu (1/cm³) ilişkisi



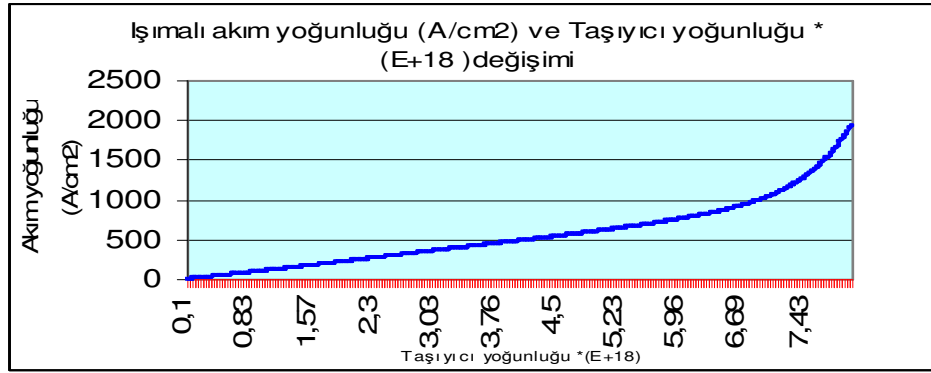
Şekil 3.1.14. Kırılma indisi değişimi ve foton enerjisi eV

Çizelge 3.1.7. Öz değer fonksiyonları ve konum değişimi

Konum	Özdeğer fonksiyonu iletim	Özdeğer fonksiyonu değerlik	Özdeğer fonksiyonları farkı
-5,10E+01	1,50E-02	3,57E-02	2,07E-02
-4,90E+01	1,80E-02	4,16E-02	2,36E-02
-4,70E+01	2,17E-02	4,86E-02	2,69E-02
-4,50E+01	2,61E-02	5,67E-02	3,06E-02
-4,30E+01	3,15E-02	6,62E-02	3,47E-02
-4,10E+01	3,79E-02	7,72E-02	3,94E-02
-4,10E+01	3,79E-02	7,72E-02	3,94E-02
-3,85E+01	4,70E-02	9,21E-02	4,50E-02
-3,59E+01	5,61E-02	1,05E-01	4,89E-02
-3,33E+01	6,50E-02	1,16E-01	5,08E-02
-3,08E+01	7,38E-02	1,24E-01	5,05E-02
-2,82E+01	8,24E-02	1,30E-01	4,79E-02
-2,56E+01	9,07E-02	1,34E-01	4,29E-02
-2,31E+01	9,89E-02	1,34E-01	3,54E-02
-2,05E+01	1,07E-01	1,32E-01	2,53E-02
-1,79E+01	1,14E-01	1,27E-01	1,29E-02
-1,54E+01	1,22E-01	1,20E-01	-1,79E-03
-1,54E+01	1,22E-01	1,20E-01	-1,79E-03
-1,23E+01	1,32E-01	1,04E-01	-2,81E-02
-9,23E+00	1,40E-01	8,27E-02	-5,74E-02
-6,15E+00	1,46E-01	5,75E-02	-8,85E-02
-3,08E+00	1,50E-01	2,95E-02	-1,20E-01
0,00E+00	1,51E-01	-1,94E-13	-1,51E-01
3,08E+00	1,50E-01	-2,95E-02	-1,79E-01
6,15E+00	1,46E-01	-5,75E-02	-2,03E-01
9,23E+00	1,40E-01	-8,27E-02	-2,23E-01
1,23E+01	1,32E-01	-1,04E-01	-2,36E-01
1,54E+01	1,22E-01	-1,20E-01	-2,42E-01
1,54E+01	1,22E-01	-1,20E-01	-2,42E-01
1,79E+01	1,14E-01	-1,27E-01	-2,42E-01
2,05E+01	1,07E-01	-1,32E-01	-2,39E-01
2,31E+01	9,89E-02	-1,34E-01	-2,33E-01
2,56E+01	9,07E-02	-1,34E-01	-2,24E-01
2,82E+01	8,24E-02	-1,30E-01	-2,13E-01
3,08E+01	7,38E-02	-1,24E-01	-1,98E-01
3,33E+01	6,50E-02	-1,16E-01	-1,81E-01
3,59E+01	5,61E-02	-1,05E-01	-1,61E-01
3,85E+01	4,70E-02	-9,21E-02	-1,39E-01
4,10E+01	3,79E-02	-7,72E-02	-1,15E-01
4,10E+01	3,79E-02	-7,72E-02	-1,15E-01
4,30E+01	3,15E-02	-6,62E-02	-9,76E-02
4,50E+01	2,61E-02	-5,67E-02	-8,28E-02
4,70E+01	2,17E-02	-4,86E-02	-7,03E-02
4,90E+01	1,80E-02	-4,16E-02	-5,97E-02
5,10E+01	1,50E-02	-3,57E-02	-5,06E-02



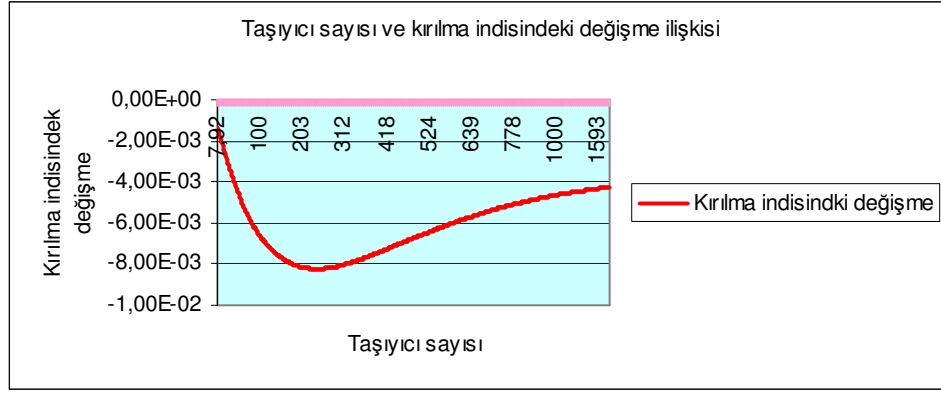
Şekil 3.1.15. Enerji ve konum değişimi



Şekil 3.1.16. Sızıntı Akımı (A/cm^2) ve taşıyıcı yoğunluğu ($1/cm^3$) ilişkisi



Şekil 3.1.17. Kırılma indisi değişimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi



Şekil 3.1.18. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisindeki değişim ilişkisi

Çıkış optiksel gücü ($P_{\text{çıkı}}$) nün girilen akım I ile değişimi denklem (3.1) deki gibidir.

$$P_{\text{çıkı}} = \frac{\hbar\omega}{q} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \eta_i (I - I_{th} - \Delta I_L) \quad (3.1)$$

Burada;

ΔI_L : I nin artışı dolayısıyla sızıntı akımında meydana gelen ek artışı hesaplar.

α_i : Gerçek kayıp

α_m : Aynaların iki uç yüzeyi arasındaki geçişleri hesaplar.

η_i : İç kuantum verimidir ve radyoaktif yeniden birleşmelere katkıda bulunan devreye girilen taşıyıcıların yüzdesini tanımlar.

η_e : Dış türevsel kuantum verimidir ve denklem (3.2) deki gibi tanımlanır.

$$\eta_e = \frac{dP_{\text{çıkı}} / dI}{\hbar\omega / q} = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \quad (3.2)$$

Eşik akımının altındaki değerler için çıkış ışık şiddeti ihmal edilecek kadar küçüktür. Yukarısında ise, doyum etkisi görülene kadar çıkış gücü doğrusal olarak artar.

Lazerin çıkış optiksel gücünün devreye verilen akıma göre grafiğinin eğimi verimi verir ve Verim programı ile hesaplanabilir.

$$P = \frac{(1 - R_1)(\sqrt{R_2})}{(\sqrt{R_1} + \sqrt{R_2})(1 - \sqrt{R_1 R_2})} h\nu \eta_i WL \frac{\alpha_m}{(\alpha_i + \alpha_m)q} (J - J_{th}) \quad (3.3)$$

Burada P: Lazerin çıkış gücü

α_i : Gerçek kayıp

α_m : Ayna kaybı

η_i : İç kuantum verimi

W: Kuantum kuyusunun genişliği

L: Kuantum kuyusunun uzunluğu

ν : Foton frekansı

J_{th} : Eşik akım yoğunluğu

q: Giriş yükü

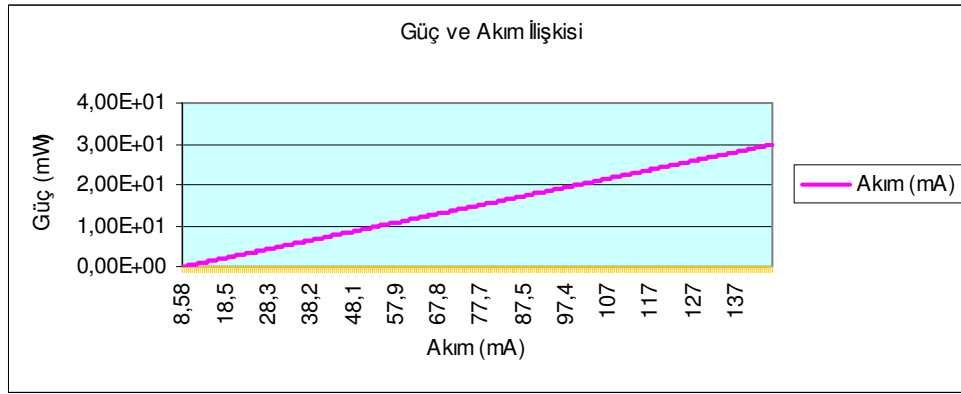
h: plank constant

R_1, R_2 : Yüzlerin yansıtıcılıkları.

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

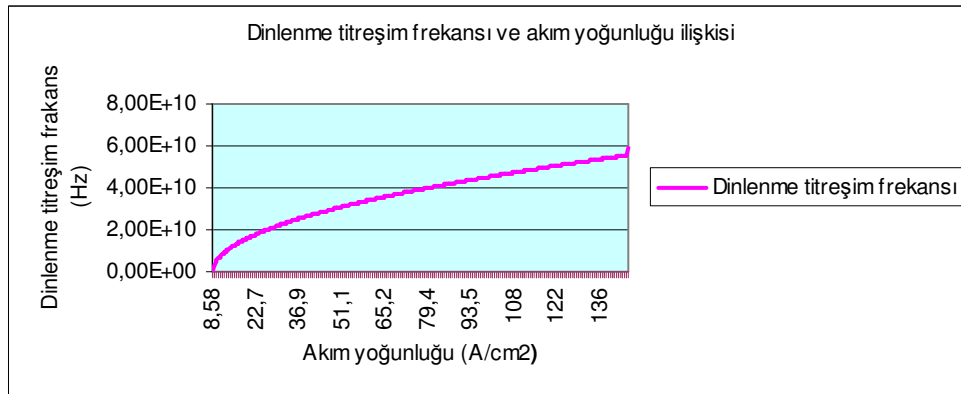
AlGaAs malzeme için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{35}{137 - 8.58} = 0.2725 = 27.25\% \text{ olarak bulunmuştur.}$$

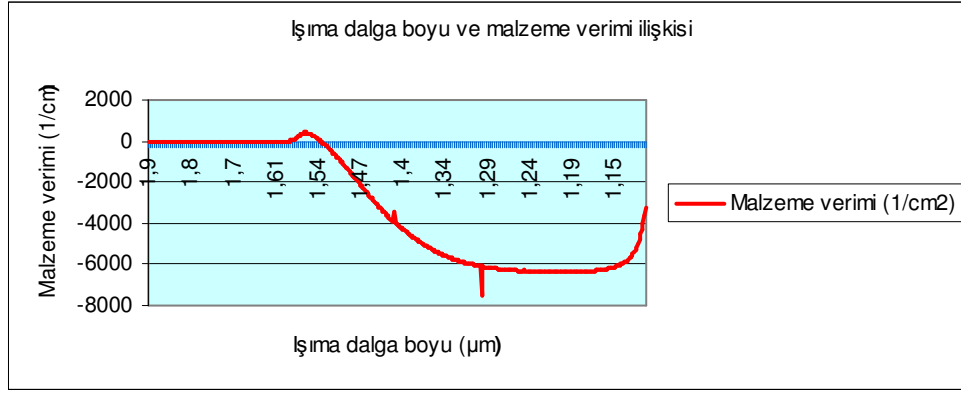


Şekil 3.1.19. Güç ve Akım İlişkisi

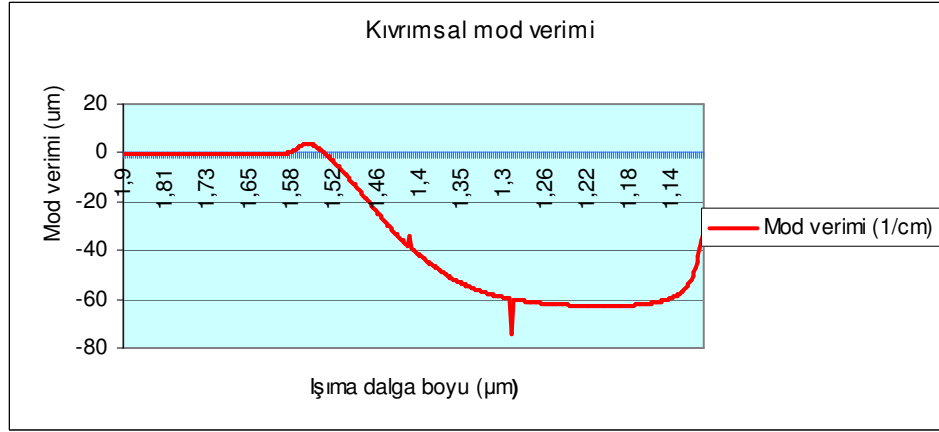
Durgunlaşma Titreşim Frekansı; lazer çalışmaya başladıktan sonra; bir süre için genlik değişime uğrar, bir süre sonra ise sabit bir denge konumuna gelir. Lazerin genliğinin denge konumuna gelmeden önceki frekansı durgunlaşma titreşim frekansı olarak adlandırılır. Durgunlaşma titreşim frekansı sistemin dengeye gelmeden önceki dengeye yakın olan frekanstır.



Şekil 3.1.20. Dinlenme titreşim frekansı ve akım yoğunluğu ilişkisi

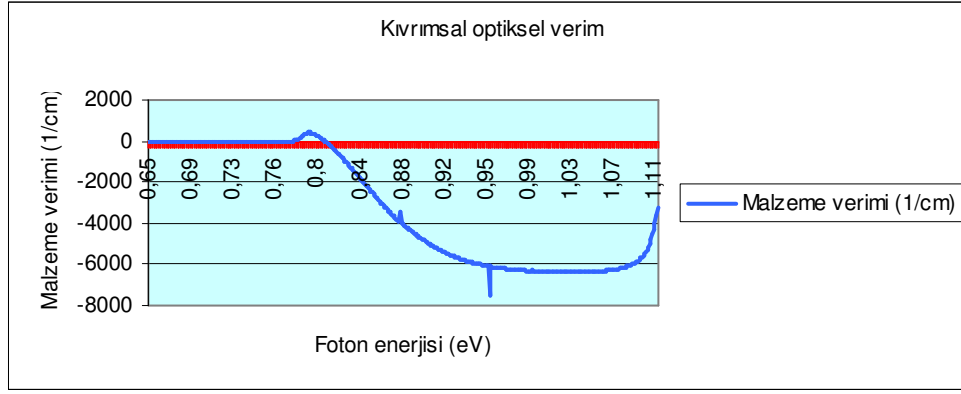


Şekil 3.1.21. Işıma dalga boyu ve malzeme verimi ilişkisi

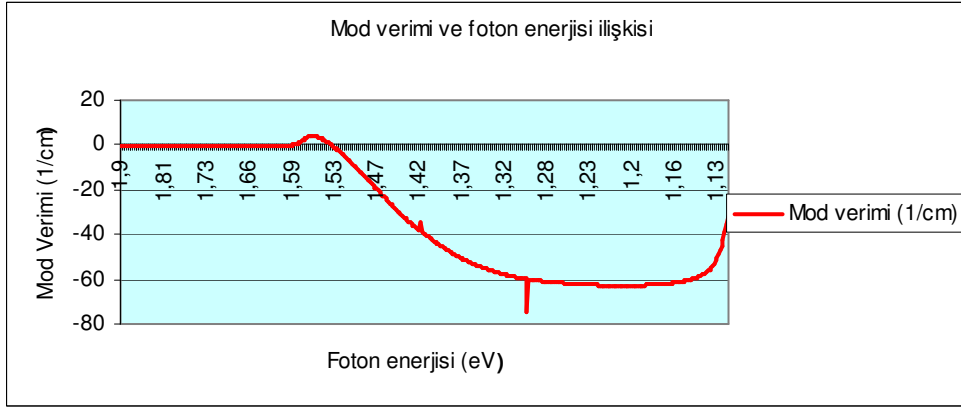


Şekil 3.1.22. Kıvrımsal mod verimi

Optiksel verim; uyarılmış salınım (ışık) ve soğurulma oranı arasındaki farktır. Malzemenin optiksel verimi N_{tr} nin ötesinde taşıyıcı yoğunluğu eklendiğinde elde edilebilir. Böylece Fermi düzeylerinin yarısı boşluk bandından daha fazla bir enerji ile ayrılabilir.



Şekil 3.1.23. Kıvrımsal optiksel verim



Şekil 3.1.24. Kıvrımsal mod verimi

Verim programı' nın yukarıdaki verilerine göre göre AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler Çizelge 3.1.8' de gösterilmiştir. Bu değerler kuantum lazer tasarımı için kullanılır.

Çizelge 3.1.8. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Uygun QWs sayısı	5
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.46
J_{th} (A/cm^2)	473.85 1.kontrol 192.89 2.kontrol
I_{th} (mA)	10.67 1.kontrol 4.34 2.kontrol
k Faktörü değeri	0.16652 ns
Maksimum frekans	53.3607 (GHz)
Pik malzeme verimi (1/cm)	3.11 (E+18) taşıyıcı yoğunluğunda 4000(1/cm)
Çalışma sıcaklığında dalga boyunun pik değeri (um)	1.56 um

3.1.2. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Dalga Kılavuzuprogramının çalışması için:

Programa giriş dosyasının değerlendirilmesi: QZMR değerleri 30 (yineleme-tekrarlama) ile bütün rakamları tam olarak uyuşmayabilir. Fakat example.db dosyasını kontrol ederek, kullanıcılar bütün değerlerin gerekli olmadığını, bazılarının gerekli olduğunu tahmin edebilir. Programda beliren uyarı mesajına rağmen kökler output (programdan çıkış) dosyasında görülür^(152-163,192).

Temel modun etkin kırılma indisi:Programa giriş dosyasının değerlendirilmesinden sonra bütün output (programdan çıkış) dosyaları

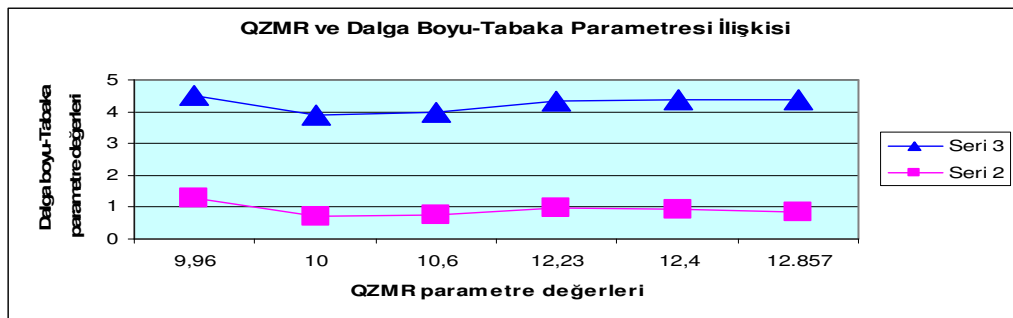
Dalga Kılavuzu programının sağ tarafındaki ekranda listelenir. Temel modun QZMR modunu bulabilmek için, example.db dosyasına sağ tıklayıp notepad dosyasının açılması sağlanır. Bir temel modun QZMR değerlerini bulabilmek için gerekli olan parametreler; PHM, KM ve IT dir. PHM faz integralidir. KM hesaplama etiketidir ve QZM ile aynı kalitededir. IT ise yeniden tekrarlama zamanıdır. Bir temel mod için PHM 1 den küçük, KM 6 veya 7 ve IT ise 30 dan küçük olmalıdır. Bir temel modun kriterleri karşılayıp karşılamadığına bakabilmek için QZMR değerlerinin WZR ve QZR değerleri ile aynı değerler olup olmadığına bakılır. Bunlar sırasıyla etkin kırılma indisi ve WZR nin karesidir. Buradan üç tabakalı dalga kılavuzu için temel modun etkin kırılma indisini bulabiliriz.

Temel modun uzak alan, yakın alan ve hapis faktörü: Dalga Kılavuzu programı ile uzak alan, yakın alan ve hapis faktörlerinin simülasyonları gösterilmiştir. Temel modun etkin kırılma indisi (WZR) ve karesi (QZR) bulunur. Tekrar input (programa giriş) dosyası oluşturulur ve yeniden değerlendirme yapılır. Tekrar example.db dosyası oluşturulur. Burada GAMMA(2) oluşturulan 2. tabakanın hapis faktörüdür. WZR temel modun etkin kırılma indisinin gerçek kısmı, WZI ise sanal kısmıdır. QZR, WZR nin karesidir. QZI, WZI nin karesidir. FWHPN yarım güç ve tam genişlikte yakın alandan uzaklaşmadır. FWHPF ise yarım güç ve tam genişlikte uzak alandan uzaktır. Derece olarak ölçüm sonucu verirler. Uzak alan ve yakın alan bilgileri output (programdan çıkış) dosyasında sırasıyla example.ff ve example.nf dosyalarının içerisinde.

Malzeme sistemi ve Dalga Kılavuzu programdan çıkış parametreleri: III-V yapılı malzemeler Dalga Kılavuzu programına tabaka-tabaka girilebilir. Kırılma indisini programa girebilmek için iki yol vardır. Birincisinde kırılma indisi doğrudan programa girilir. İkincisinde ise malzeme düğmesi seçilerek kırılma indisleri programa girilir. Her iki durumda da kırılma indisi değerleri (NREAL) tabaka değeri olarak alınabilir. XPERC ve YPERC parametreleri sırasıyla elementlerin x e y eksenlerindeki yüzdeleridir. Program output (programdan çıkış) dosyasında kırılma indisi değerleri (NREAL) gösterilir. Kırılma indisini düzgün olarak hesaplayabilmek için yapının dalga boyu programa girilmelidir.

Çizelge 3.1.9. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerler çizelgesi

Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOPX Parametresi
AlGaAs	12.857	0.82	3.55	1	2	17
AlGaAs	12.40	0.92	3.48	1	1	5
AlGaAs	12.23	0.98	3.37	1	1	3
AlGaAs	10.60	0.74	3.23	1	1	3
AlGaAs	10.00	0.72	3.16	1	2	17
AlGaAs	9.96	12.8	3.23	2	2	5



Şekil.3.1.25. QZMR ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi

Dalga Kılavuzu Programı İle Işığın Cam Tabakası İçinde Dağılmasının

İncelenmesi: Işığın bir cam malzeme içinde dağılmasını incelemek için üç tabakalı dalga kılavuzu kullanılır. Toplam dağılma, malzeme dağılması ve dalga kılavuzu dağılmasından oluşur. Toplam dağılmayı hesaplamanın iki yolu vardır. Bunlardan birincisi dalga kılavuzu programının toplam dağılmayı hesaplaması, diğeri ise dalga kılavuzu programı ile dalga kılavuzu dağılmasını hesaplamak ve bunu malzeme dağılmasına eklemektir. Tel kullanılarak yapılan iletişim için üç çeşit dağılım sinyalin bozulmasına ve dağılmasına neden olur. Çok modlu tel sistemleri için malzemenin iç şekline göre dağılım olur. Bir mod içinde iki dik olarak polarize olmuş dalga kutuplanmış mod dağılımına neden olur. Renk dağılımı dalga ve malzeme dağılımından oluşur. Her bir malzeme için kırılma indisi dalga boyu ile değişir. Bu değişme malzeme dağılımını oluşturur. Malzemelerin tabakaları dağıtıcı olmamasına rağmen, bir dalganın etkin kırılma indisi de bir sabit tabaka kalınlığı için dalga boyu ile değişir. Bu dalga kılavuzu dağılımıdır. Her iki dağılımda dalga boyu ile değişir. Genellikle, malzeme ve dalga kılavuzu dağılımı aynı zamanda olurlar. Renk dağılımı malzeme ve dalga kılavuzu dağılımlarının her ikisinin de etkisi ile oluşur.

Dalga Kılavuzu programında malzeme sistem parametreleri ile renk dağılımı hesaplanabilir. Malzeme sistemlerini kullanma yerine her bir tabaka için kırılma indisini kullanırsak, yalnızca dalga kılavuzu dağılımını bulabiliriz. Çünkü farklı dalga boylu döngüler için, program her bir tabaka için sabit kırılma indislerini kullanır.

Malzeme Dağılımının Hesaplanması: Malzeme dağılımı için önce cam bileşenler için kırılma indisi denklem;

Cam bileşenlerin kırılma indisi denklem (3.4) deki gibidir.

$$n^2 - 1 = \sum_{l=1}^3 \frac{A_l \lambda^2}{\lambda^2 - l_l^2} \quad (3.4)$$

Burada n kırılma indisi, λ dalga boyu, A_i malzemenin titreşim kuvveti ile ilgili sabit, l_i titreşim dalga boyudur.

Her bir cam bileşen için malzeme dağılımı denklem (3.4) ile hesaplanabilir.

Yayılan atmalar malzemenin indisinin dalga boyuna göre ikinci türevi ile ilgilidir. Denklem (3.5) bu ilişkiyi gösterir.

$$\Delta(\tau / L) = -\frac{\lambda}{c} n'' \Delta\lambda = -M \Delta\lambda \quad (3.5)$$

Burada M malzeme dağılımı $= \lambda \cdot n''$ ve birimi ps/(nm*km) dir. Burada λ dalga boyu, c ışık hızı, $\Delta(\Gamma/L)$ birim uzunlukta yayılan atmadır ve denklem (3.4) in ikinci türevini alıp denklem (3.5) de yerine yazılırsa dalga boyuna göre malzeme dağılımı elde edilir. Dağılım eğrisi, Etkin kırılma indisinin dalga boyuna göre grafiği çizilecek olursa, bu grafiğin ikinci türevi ile malzeme dağılımı elde edilir.

Dalga Kılavuzu dağılımının hesaplanması: Dağılımı hesaplamak için üç tabakalı simetrik tabaka kullanılır. Programda merkez tabaka kırılma indisi her iki yüzdeki diğer tabakalardan daha büyüktür. Merkez tabakanın kalınlığı sabitlenir ve TEO modu için bir mod taslağı elde etmek için her bir tabaka için sabit kırılma indisi kullanılır. Farklı modlar d/λ eğrisine göre farklı kırılma

indislerine sahiptirler. n_{eff} değişimi kırılma indisi n gibi atma oluşturur. Bu yayılan atmalar dalga dağılımasıdır. Buna göre dalga dağılımı denklem (3.6) deki gibi yazılabilir.

$$\Delta(\tau / L) = -\frac{\lambda}{c} n_{eff}'' \Delta\lambda = -M_g \Delta\lambda \quad (3.6)$$

Burada n_{eff} etkin kırılma indisidir.

M_g (dalga dağılımı) $= \lambda^* n_{eff}'' / c$ ve birimi ps/(nm*km) dir.

Programa giriş dosyasının oluşturulması: Dalga Kılavuzu parametreleri ile çeşitli bileşenler oluşturulabilir. Önce merkez ve kenar (kaplama) tabakaları seçilir ve Δn hesaplanır. Genellikle dalga dağılımı hesaplamalarında merkez tabakasının kalınlığı ve kırılma indisi, aynı malzeme için farklı dalga dağılımları elde etmek için değiştirilir.

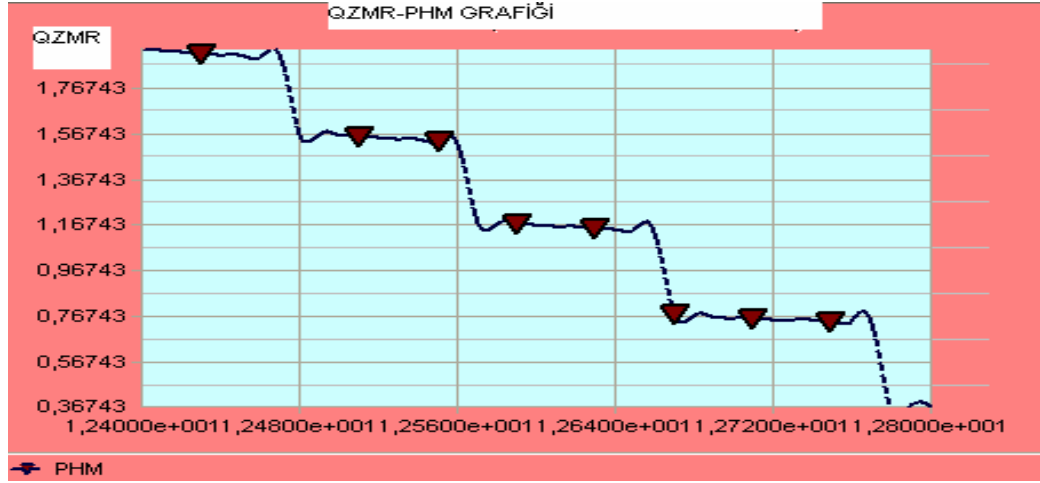
Dağılım Eğrisi: output (programdan çıkış).db dosyasından WZR nin dalga boyuna göre grafiği çizilir. Bu grafiğin ve denklem (3.6) in ikinci türevi alınırsa dalga dağılımının grafiği çizilir.

Dalga Kılavuzu ile Renk Dağılımı: Dalga Kılavuzu programı renk dağılımını direkt olarak yapabilir. Dalga Kılavuzu kesin bir dalga ile tek bir modda kırılma indisini hesaplar. Bu şekilde renk dağılımı dalga boyunun bir fonksiyonu olarak oluşur.

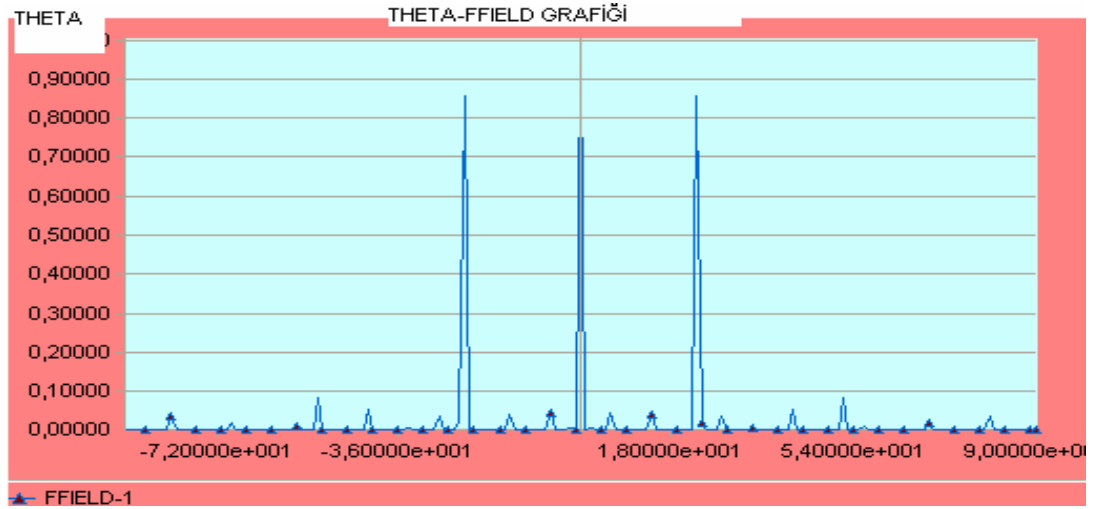
İnput (programa giriş) dosyasının oluşturulması: Dalga dağılımına benzer şekilde input (programa giriş) dosyası oluşturulur. Buradaki fark kırılma indisi olarak NREAL yerine malzeme sistemi parametrelerinin kullanılmasıdır.

Renk Dağılımı Eğrisi: output (programdan çıkış)*db dosyasından WZR nin dalga boyuna göre grafiği çizilir. Bu grafiğin ve denklem (3.6) nın ikinci

türevinin alınması ile dalga dağılımı eğrisi çizilir. Böylece renk dağılımı ve dalga dağılımı nın karşılaştırılması yapılabilir. Bu karşılaştırmalar Δn , merkez tabaka kalınlığı ve çekirdek ve kaplama tabakaları için farklı malzeme bileşenleri için yapılabilir.



Şekil 3.1.26. QZMR(ortalama kırılma indisinin karesi)-PHM(faz integrali) grafiği



Şekil 3.1.27. THETA(uzak alan için Θ açısı)-FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı) grafiği

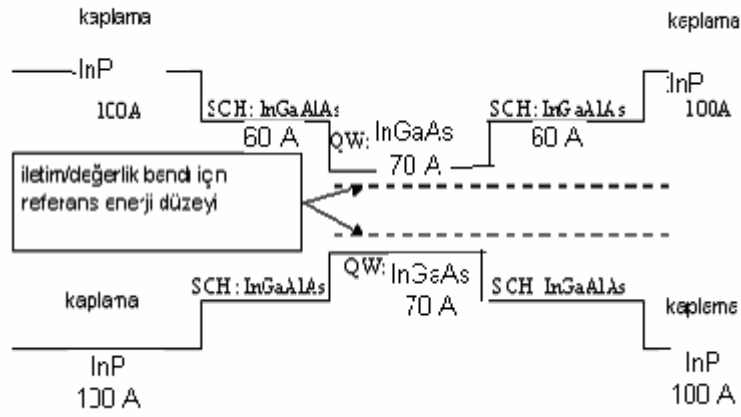
QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 7.2 den 12.80 $n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge 3.1.10 deki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için PHM[<]1.0, KM=6 ve IT=3 olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 9.96 dır. QZMR(ortalama kırılma indisinin karesi)-PHM(faz integrali) ve THETA(uzak alan için Θ açısı)-FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı) grafiklerinin çizilmesi ile elde edilen değerler kırılma indisi hesaplamasında kullanılmıştır.

Çizelge 3.1.10. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu program çıktıları

QZMR	TL(2	PHM	GAMMA(2)	WZR	WZI	QZR	QZI	FWHP	FWHPF	KM	IT
1,28E+01	5,00E-02	3,23E-01	0,00E+00	9,18E-01	3,17E-01	7,43E-01	5,83E-01	0,00E+00	0,00E+00	4	30
1,28E+01	1,50E-01	4,17E-01	0,00E+00	1,14E+00	1,51E-01	1,28E+00	3,46E-01	0,00E+00	0,00E+00	4	30
1,28E+01	2,50E-01	6,06E-01	3,99E-01	1,09E+00	3,56E-02	1,19E+00	7,77E-02	2,56E-01	5,02E+01	6	4
1,28E+01	3,50E-01	6,81E-01	5,95E-01	1,16E+00	2,21E-02	1,35E+00	5,13E-02	2,92E-01	5,66E+01	6	4
1,28E+01	4,50E-01	7,35E-01	7,17E-01	1,21E+00	1,39E-02	1,46E+00	3,36E-02	3,44E-01	5,59E+01	6	4
1,28E+01	5,50E-01	7,76E-01	7,95E-01	1,23E+00	9,27E-03	1,52E+00	2,29E-02	4,02E-01	5,32E+01	6	4
1,28E+01	6,50E-01	8,08E-01	8,48E-01	1,25E+00	6,47E-03	1,57E+00	1,62E-02	4,60E-01	5,04E+01	6	4
1,28E+01	7,50E-01	8,35E-01	8,83E-01	1,27E+00	4,71E-03	1,61E+00	1,19E-02	5,18E-01	4,71E+01	6	4
1,28E+01	8,50E-01	8,57E-01	9,09E-01	1,28E+00	3,53E-03	1,63E+00	9,03E-03	5,73E-01	4,40E+01	6	4
1,28E+01	9,50E-01	8,75E-01	9,28E-01	1,29E+00	2,72E-03	1,65E+00	6,99E-03	6,23E-01	4,12E+01	6	4
1,28E+01	1,05E+00	8,91E-01	9,42E-01	1,29E+00	2,14E-03	1,67E+00	5,53E-03	6,73E-01	3,88E+01	6	4
1,28E+01	1,15E+00	9,05E-01	9,52E-01	1,30E+00	1,71E-03	1,68E+00	4,45E-03	7,25E-01	3,64E+01	6	3
1,28E+01	1,25E+00	9,18E-01	9,61E-01	1,30E+00	1,40E-03	1,69E+00	3,63E-03	7,74E-01	3,44E+01	6	3
1,28E+01	1,35E+00	9,28E-01	9,66E-01	1,30E+00	1,15E-03	1,70E+00	3,01E-03	8,24E-01	3,25E+01	6	3
1,28E+01	1,45E+00	9,38E-01	9,72E-01	1,31E+00	9,62E-04	1,71E+00	2,52E-03	8,75E-01	3,08E+01	6	3
1,28E+01	1,55E+00	9,47E-01	9,76E-01	1,31E+00	8,12E-04	1,71E+00	2,13E-03	9,24E-01	2,93E+01	6	3
1,28E+01	1,65E+00	9,54E-01	9,79E-01	1,31E+00	6,92E-04	1,72E+00	1,81E-03	9,75E-01	2,79E+01	6	3
1,28E+01	1,75E+00	9,61E-01	9,82E-01	1,31E+00	5,94E-04	1,72E+00	1,56E-03	1,02E+00	2,66E+01	6	3
1,28E+01	1,85E+00	9,68E-01	9,84E-01	1,31E+00	5,14E-04	1,73E+00	1,35E-03	1,08E+00	2,54E+01	6	3
1,28E+01	1,95E+00	9,74E-01	9,86E-01	1,32E+00	4,48E-04	1,73E+00	1,18E-03	1,13E+00	2,43E+01	6	3
1,28E+01	2,05E+00	9,79E-01	9,88E-01	1,32E+00	3,92E-04	1,73E+00	1,03E-03	1,17E+00	2,34E+01	6	3
1,28E+01	2,15E+00	9,84E-01	9,89E-01	1,32E+00	3,46E-04	1,74E+00	9,11E-04	1,22E+00	2,24E+01	6	3
1,28E+01	2,25E+00	9,89E-01	9,90E-01	1,32E+00	3,06E-04	1,74E+00	8,08E-04	1,28E+00	2,16E+01	6	3
1,28E+01	2,35E+00	9,93E-01	9,92E-01	1,32E+00	2,73E-04	1,74E+00	7,20E-04	1,33E+00	2,08E+01	6	3

3.2.1 InGaAs/InGaAlAs/InP malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar

Tek kuantum kuyulu, iki ayrılmış hapisli çift tabakalı ve iki kaplama tabakalı bir InGaAs/InGaAlAs/InP malzeme için simülasyon Şekil 3.2.1' deki gibidir.



Şekil 3.2.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır⁽¹⁹²⁾. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane output (programdan çıkış) dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve

vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa girilen input (programa giriş) değerleri Çizelge 3.2.1 ve Çizelge 3.2.2' deki gibidir.

Çizelge 3.2.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık(Å)
QW ($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	1.50	-0.012	70
SCH ($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	1.20		60
Kaplama ($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	0.88		100

Çizelge 3.2.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	InGaAs/InGaAlAs
Malzeme bileşenleri	$Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$
Giriş Parametreleri	QW' in çoğunluk malzemesinin dalga boyu, QW' in iletim ve değerlik bandının engel ve kaplama, kalınlık değerleri
Işıma dalga boyu	1.3um, 1.55um, 1.6um
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı
Dalga boyu ile hesaplama denklem	$E_g(x, y) = (1 - x - y)E_g(InAs) + yE_g(AlAs) + xE_g(GaAs)$ $a(x, y) = (1 - x - y)a(InAs) + ya(AlAs) + xa(GaAs)$ Burada ; $E_g(InAs) = 0.354.....E_g(AlAs) = 3.03....E_g(GaAs) = 1.424.....300K..de$ $E_g(InAs) = 0.42.....E_g(AlAs) = 3.13....E_g(GaAs) = 1.519.....0K.....de$ $a(InAs) = 6.0584 \quad a(AlAs) = 5.6600 \quad a(GaAs) = 5.6533$

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışıma dalga boyu ile ilgilidir.

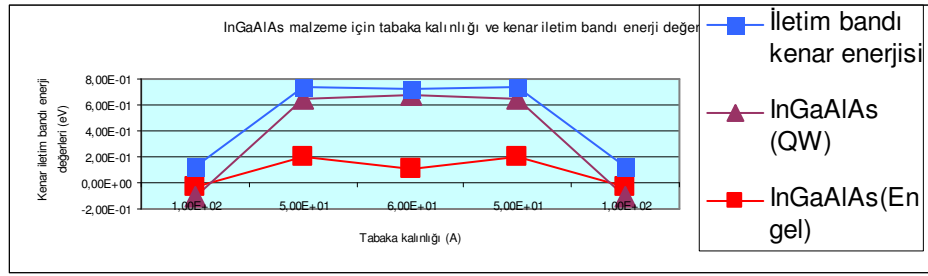
Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu 1.24/boşluk bandı enerjisinden elde edilebilir.

Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile InGaAlAs malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, Şekil 3.1.2 ve Şekil 3.1.3' den de görülebileceği gibi birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.2.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen karakteristik iletim bandı kenar enerjisi ve tabaka kalınlığı değerleri

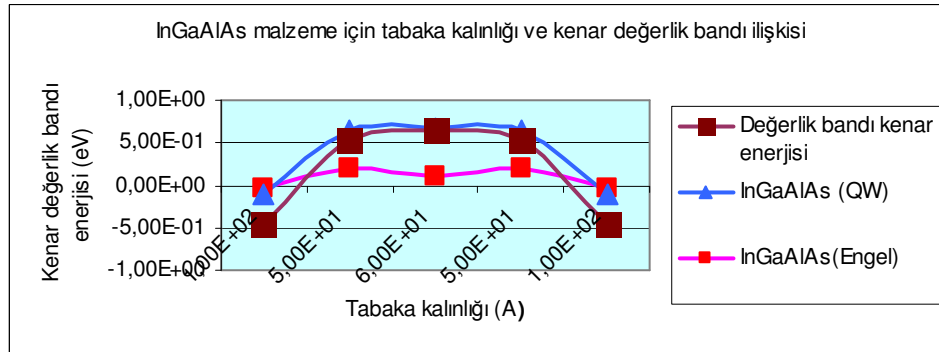
Tabaka Kalınlığı	InGaAlAs(Engel)	InGaAs (QW)	İletim bandı kenar enerjisi	
1,00E+02	-3,39E-02	-0,0751603	0,2271455	Kaplama tabakası
5,00E+01	2,05E-01	0,4470206	0,0806	SCH tabaka
6,00E+01	1,01E-01	0,5801419	0,0467873	Kuantum kuyusu
5,00E+01	2,05E-01	0,4470206	0,0806	SCH tabaka
1,00E+02	-3,39E-02	-0,0751603	0,2271455	Kuantum kuyusu



Şekil 3.2.2. InGaAlAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

Çizelge 3.2.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen karakteristik değerlik bandı kenar enerjisi ve tabaka kalınlığı değerleri

Tabaka Kalınlığı	InGaAlAs(Engel)	InGaAs (QW)	Değerlik bandı kenar enerjisi	
1,00E+02	-3,39E-02	-0,0751603	-0,3552788	Kaplama tabakası
5,00E+01	2,05E-01	0,4470206	-0,1260667	SCH tabaka
6,00E+01	1,01E-01	0,5801419	-0,0233937	Kuantum kuyusu
5,00E+01	2,05E-01	0,4470206	-0,1260667	SCH tabaka
1,00E+02	-3,39E-02	-0,0751603	-0,3552788	Kuantum kuyusu



Şekil 3.2.3. InGaAlAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri

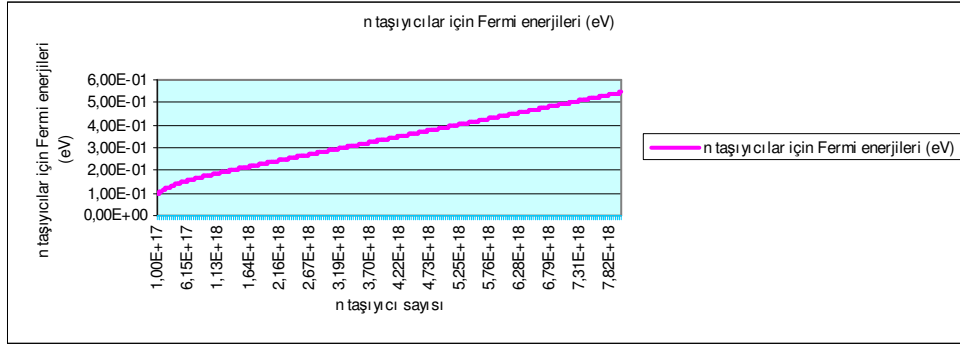
QW (ΔE_{gap}) in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik (ΔE_c ..ve.. ΔE_v) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır

InGaAlAs malzeme için;

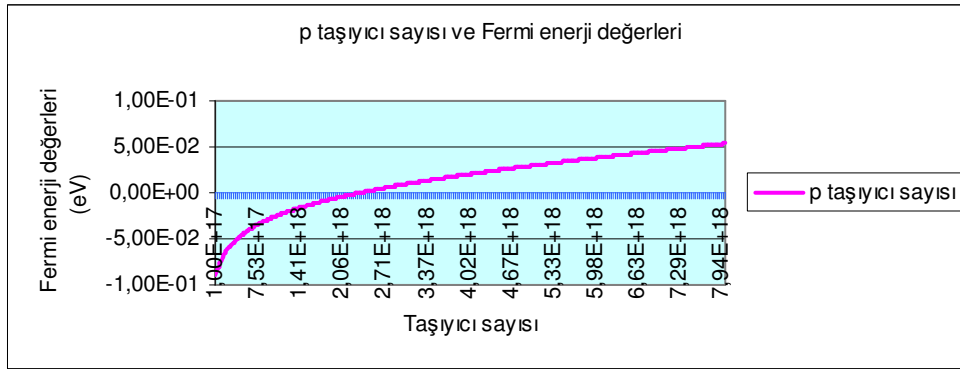
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = \frac{-0.66158}{-2.30995} = 0.2864$$

Çizelge 3.2.5. n ve p tipi taşıyıcılar ve Fermi enerjileri

N-Taşıyıcı Sayısı	Fermi-N Enerjisi	P-Taşıyıcı Sayısı	Fermi-P Enerjisi
1,00E+17	9,36E-02	1,00E+17	-8,83E-02
1,20E+17	9,88E-02	1,20E+17	-8,36E-02
1,40E+17	1,03E-01	1,40E+17	-7,96E-02
1,59E+17	1,07E-01	1,59E+17	-7,61E-02
1,79E+17	1,11E-01	1,79E+17	-7,31E-02
1,99E+17	1,14E-01	1,99E+17	-7,03E-02
2,19E+17	1,17E-01	2,19E+17	-6,78E-02
2,39E+17	1,20E-01	2,39E+17	-6,55E-02
2,58E+17	1,22E-01	2,58E+17	-6,34E-02
2,78E+17	1,25E-01	2,78E+17	-6,14E-02
2,98E+17	1,27E-01	2,98E+17	-5,96E-02
3,18E+17	1,29E-01	3,18E+17	-5,79E-02
3,38E+17	1,31E-01	3,38E+17	-5,63E-02
3,57E+17	1,33E-01	3,57E+17	-5,48E-02
3,77E+17	1,35E-01	3,77E+17	-5,33E-02
3,97E+17	1,37E-01	3,97E+17	-5,19E-02
4,17E+17	1,39E-01	4,17E+17	-5,06E-02
4,37E+17	1,41E-01	4,37E+17	-4,94E-02
4,56E+17	1,43E-01	4,56E+17	-4,82E-02
4,76E+17	1,44E-01	4,76E+17	-4,70E-02
4,96E+17	1,46E-01	4,96E+17	-4,59E-02
5,16E+17	1,48E-01	5,16E+17	-4,48E-02
5,36E+17	1,49E-01	5,36E+17	-4,38E-02
5,55E+17	1,51E-01	5,55E+17	-4,28E-02
5,75E+17	1,52E-01	5,75E+17	-4,18E-02
5,95E+17	1,54E-01	5,95E+17	-4,09E-02
6,15E+17	1,55E-01	6,15E+17	-4,00E-02
6,35E+17	1,57E-01	6,35E+17	-3,91E-02
6,54E+17	1,58E-01	6,54E+17	-3,82E-02
6,74E+17	1,59E-01	6,74E+17	-3,74E-02

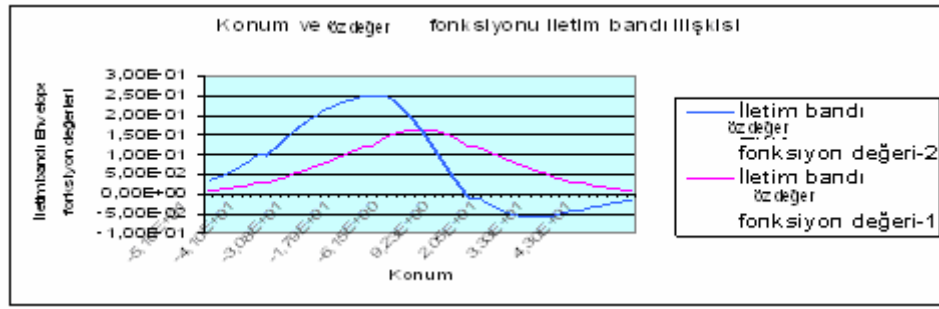


Şekil 3.2.4. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişkisi

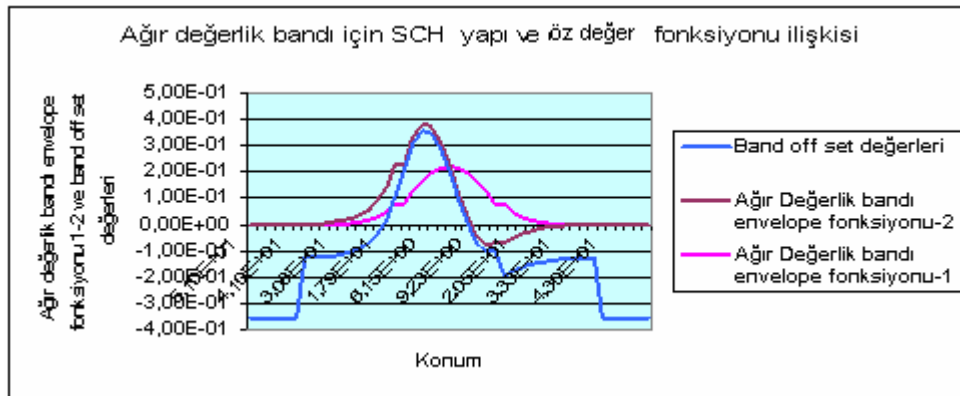


Şekil 3.2.5. Fermi enerji düzeyleri ile p taşıyıcılar arasındaki ilişki

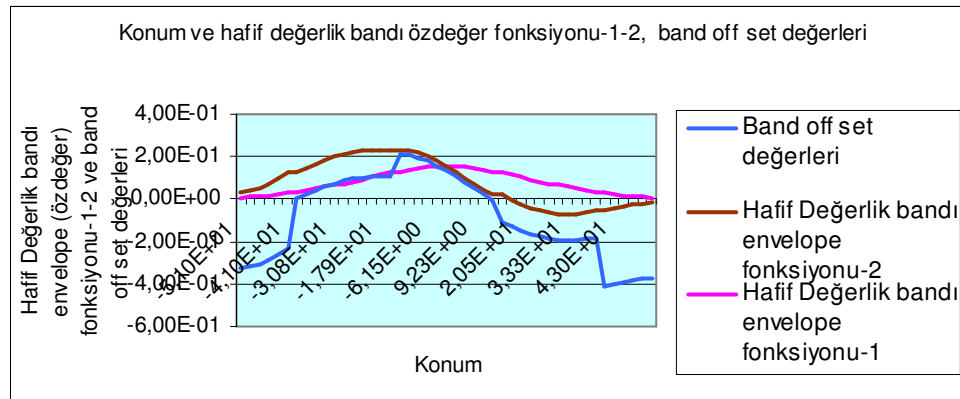
Verim programı ile elde edilen verilerden; İletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, Türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışıma dalga boyu ve malzeme-mod verimi ilişkisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.



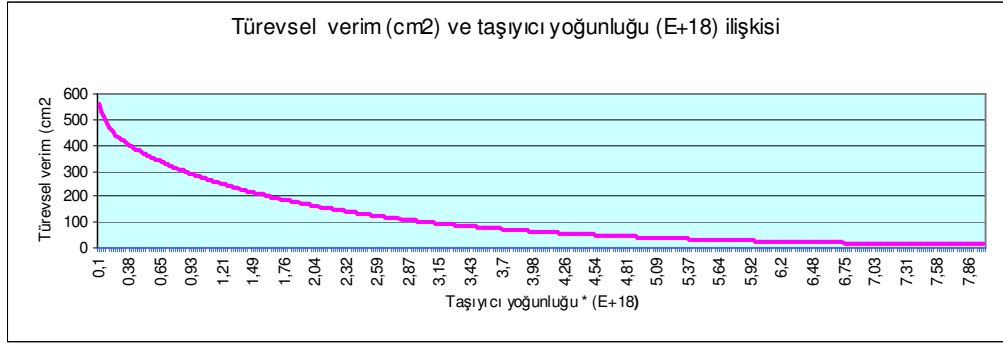
Şekil 3.2.6. Konum ve öz değer fonksiyonu iletim bandı ilişkisi



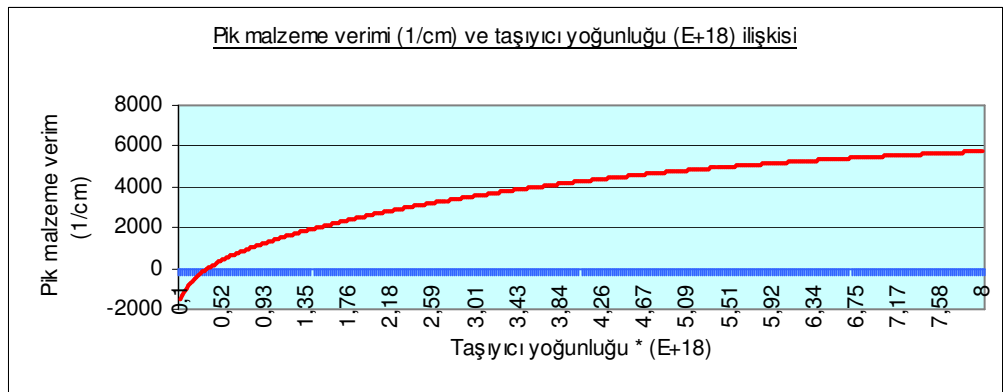
Şekil 3.2.7. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



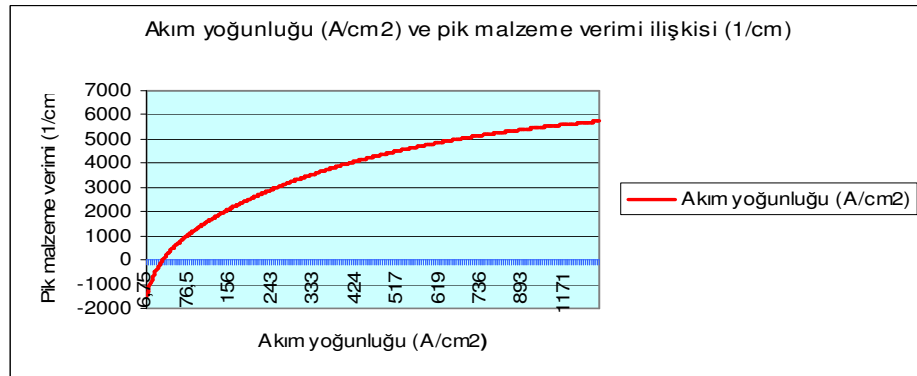
Şekil 3.2.8. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



Şekil 3.2.9. Türevsel verim (cm²) ve taşıyıcı yoğunluğu*(E+18) ilişkisi



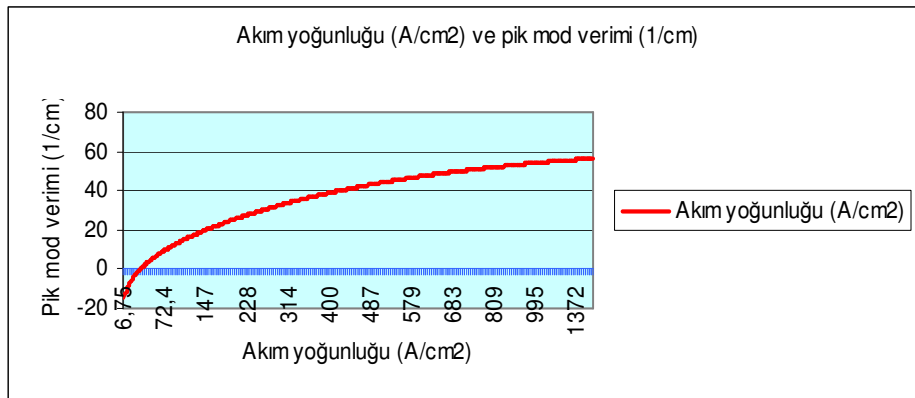
Şekil 3.2.10. Pik malzeme verimi (1/cm) ve taşıyıcı yoğunluğu*(E+18) ilişkisi



Şekil 3.2.11. Pik malzeme verimi ve akım yoğunluğu değişimi

Çizelge 3.2.6. İletim ve değerlik bantları ağır ve hafif bantları öz değer fonksiyonları ile bant offset değişimleri

Konum	İletim bandı Öz değer fonksiyon değeri-1	İletim bandı Öz değer fonksiyon değeri-2	Ağır Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-1	Ağır Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-2	Bant off set değerleri	Hafif Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-1	Hafif Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-2
-51	0,009	0,0267	2,3E-06	1,89E-05	-0,35528	6,23E-03	0,0223
-49	0,012	0,0323	5,7E-06	4,48E-05	-0,35528	8,81E-03	0,0296
-47	0,014	0,0391	1,5E-05	0,000106	-0,35528	1,25E-02	0,0394
-45	0,018	0,0473	3,7E-05	0,000253	-0,35528	1,76E-02	0,0523
-43	0,023	0,0572	9,4E-05	0,0006	-0,35528	2,49E-02	0,0695
-41	0,028	0,0692	0,00024	0,00142	-0,35528	3,52E-02	0,0924
-41	0,028	0,0692	0,00024	0,00142	-0,12607	3,52E-02	0,0924
-38,5	0,036	0,0844	0,00047	0,00257	-0,12607	4,24E-02	0,106
-35,9	0,044	0,0981	0,00085	0,00423	-0,12607	4,99E-02	0,118
-33,3	0,053	0,11	0,00151	0,00673	-0,12607	5,76E-02	0,127
-30,8	0,061	0,12	0,00266	0,0106	-0,12607	6,58E-02	0,133
-28,2	0,07	0,127	0,0047	0,0165	-0,12607	7,44E-02	0,137
-25,6	0,079	0,133	0,00827	0,0257	-0,12607	8,35E-02	0,137
-23,1	0,088	0,135	0,01458	0,04	-0,12607	9,32E-02	0,134
-20,5	0,098	0,136	0,02568	0,0622	-0,12607	1,04E-01	0,128
-17,9	0,109	0,133	0,04524	0,0967	-0,12607	1,14E-01	0,119
-15,4	0,12	0,129	0,0797	0,15	-0,12607	1,26E-01	0,108
-15,4	0,12	0,129	0,0797	0,15	-0,02339	1,26E-01	0,108
-12,3	0,136	0,115	0,12689	0,205	-0,02339	1,37E-01	0,0933
-9,23	0,149	0,0939	0,16676	0,214	-0,02339	1,45E-01	0,0742
-6,15	0,158	0,0663	0,197	0,176	-0,02339	1,51E-01	0,0516
-3,08	0,164	0,0343	0,21587	0,0986	-0,02339	1,55E-01	0,0264



Şekil 3.2.12. Pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi



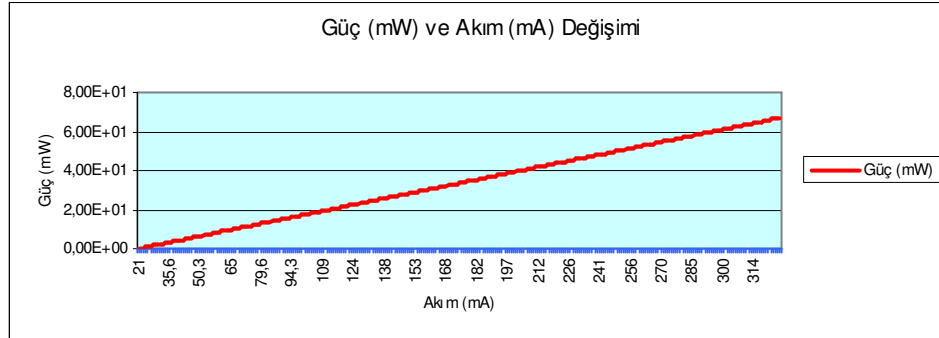
Şekil 3.2.13. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

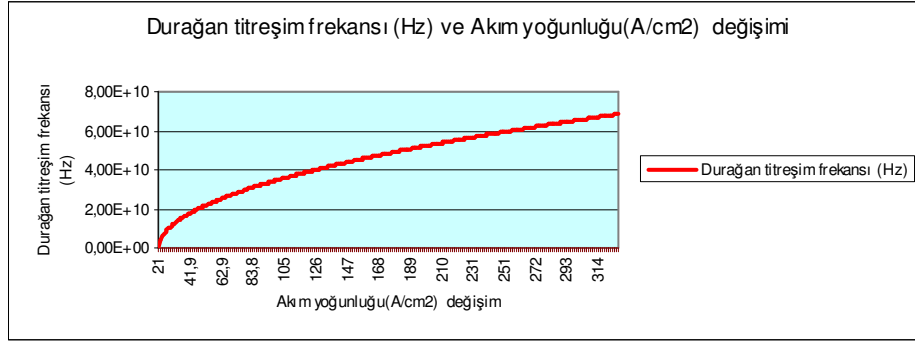
InGaAlAs malzeme için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{20}{113 - 21} = 0.2173 = 21.73\% \text{...}$$

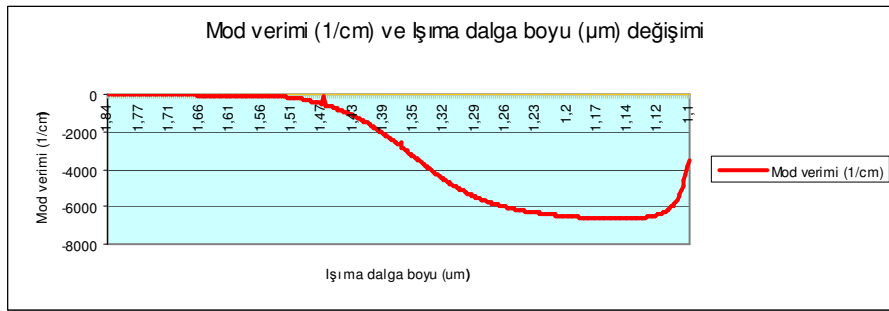
olarak bulunmuştur.



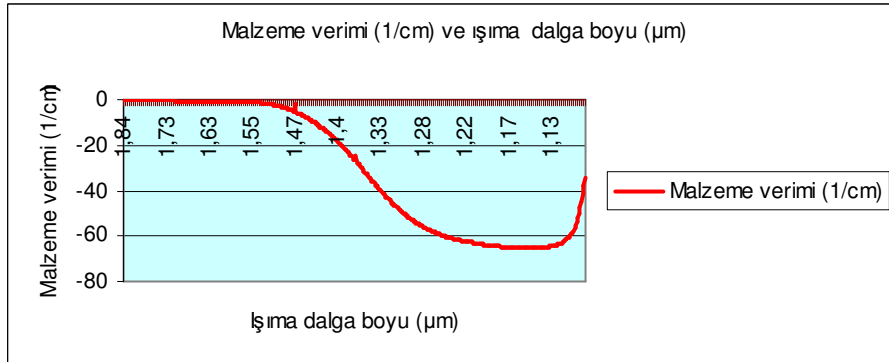
Şekil 3.2.14. Güç ve Akım ilişkisi



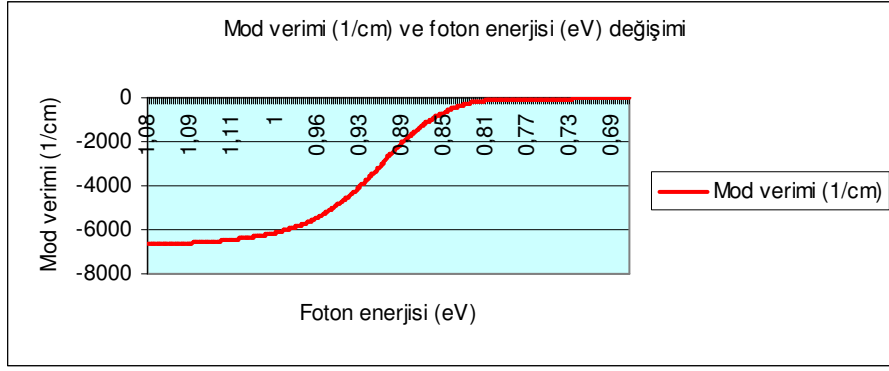
Şekil 3.2.15. Dinlenme titreşim frekansı ve akım yoğunluğu ilişkisi



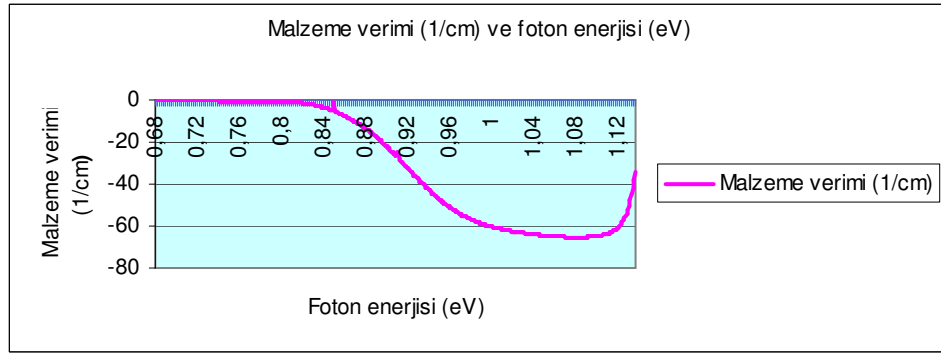
Şekil 3.2.16. Kıvrımsal mod verimi



Şekil 3.2.17. Kıvrımsal optik verimi



Şekil 3.2.18. Mod verimi (1/cm) ve foton enerjisi (eV) değişimi



Şekil 3.2.19. Malzeme verimi (1/cm) ve foton enerjisi (eV) değişimi

Verim programının yukarıdaki verilerine göre InGaAs/InGaAlAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler Çizelge 3.2.7' de gösterilmiştir. Bu değerler kuantum lazer tasarımı için kullanılır.

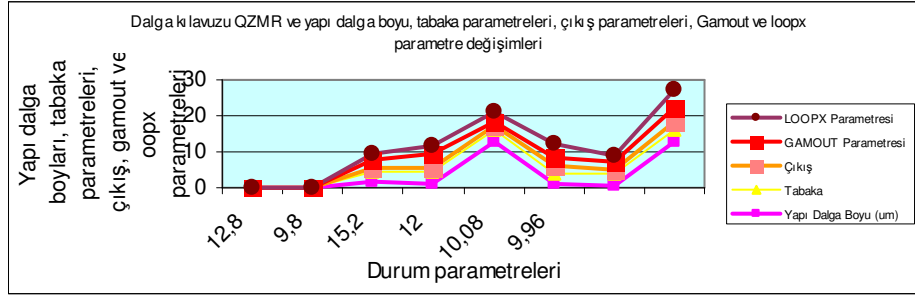
Çizelge 3.2.7. Verim programını InGaAs/InGaAlAs malzeme ile tasarlanmış kuantum lazerin karakteristik özellikleri

Uygun QWs sayısı	5
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.84
$J_{th} (A/cm^2)$	381.42 1.kontrol 213.82 2.kontrol
$I_{th} (mA)$	8.58 1.kontrol 4.81 2.kontrol
Çalışma sıcaklığında dalga boyunun pik değeri (um)	1.15 um 1.19 um
Pik malzeme verimi (1/cm)	1.6 /cm ² yük yoğunluğu için 200 /cm
k faktörü	0.16505 ns
Maksimum frekans	53.8361 GHz

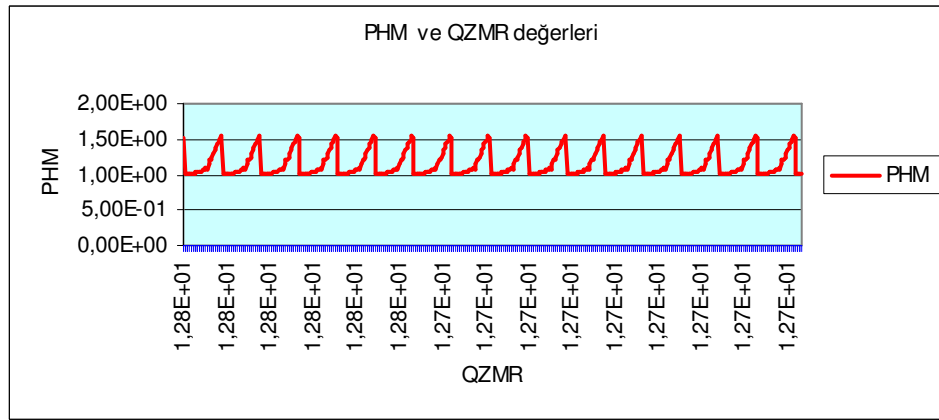
3.2.2. InGaAs/InGaAlAs/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Çizelge 3.2.8. InGaAlAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerler çizelgesi

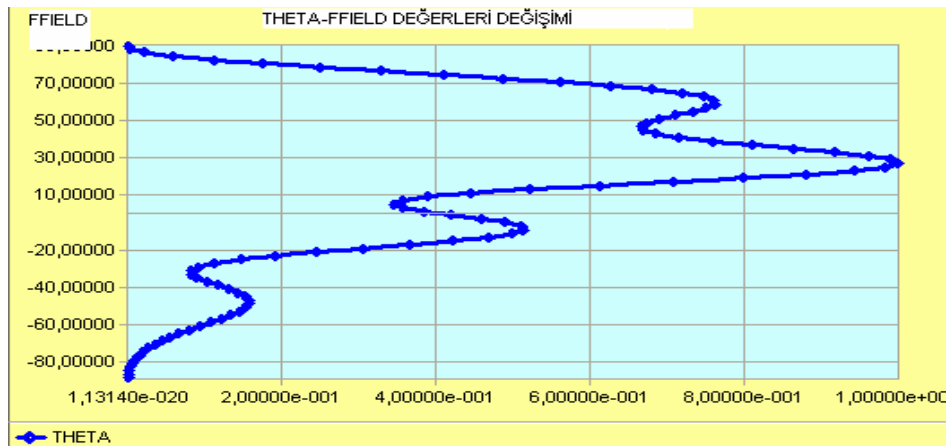
Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOPX Parametresi
InGaAlAs	12.8	1.50	3.19	1	2	2
InGaAlAs	9.8	1.20	3.37	0.8	4	2
InGaAlAs	15.0	1.28	3.48	1	1	3
InGaAlAs	12.0	0.88	3.23	2	2	4
InGaAlAs	10.08	0.82	3.16	1	2	2
InGaAlAs	9.96	1.30	3.23	2	4	5



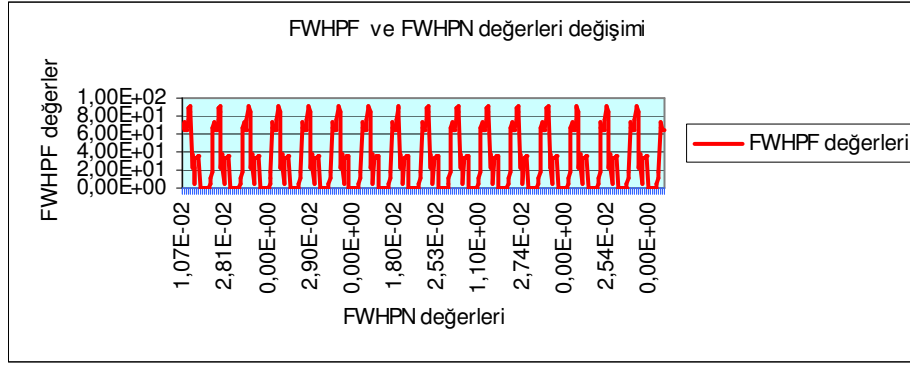
Şekil.3.2.20. QZMR(ortalama kırılma indisinin karesi) ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi



Şekil 3.2.21. QZMR(ortalama kırılma indisinin karesi)-PHM (faz integrali) grafiği



Şekil 3.2.22. THETA(uzak alan Θ açısı)-FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı) grafiği



Şekil 3.2.23. FWHPF(uzak alandan sapma açısı) ve FWHPN(yakın alandan sapma açısı) değerleri değişimi

Çizelge 3.2.9. InGaAlAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen bazı program çıktıları

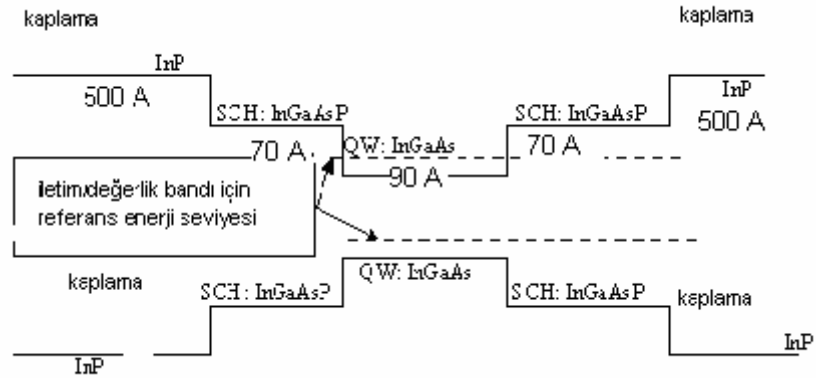
QZMR	NREAL 2	PHM	GAMMA 2	GAMMA REA	GAMMA İ
1,280000E	1,079076E	1,507434E	6,17E-03	-7,36E-03	1,63E-03
1,280000E	1,179076E	1,017773E	1,07E-03	-5,30E-04	7,31E-04
1,280000E	1,279076E	1,020361E	5,45E-03	4,98E-03	4,67E-03
1,280000E	1,379076E	1,021304E	1,31E-02	2,04E-02	1,52E-02
1,280000E	1,479076E	1,021962E	2,38E-02	4,42E-02	3,33E-02
1,280000E	1,579076E	1,022644E	3,66E-02	7,34E-02	5,64E-02
1,280000E	1,679076E	1,023494E	5,00E-02	1,04E-01	7,92E-02
1,280000E	1,779076E	1,024616E	6,24E-02	1,32E-01	9,63E-02
1,280000E	1,879076E	1,026102E	7,21E-02	1,52E-01	1,04E-01
1,280000E	1,979076E	1,028057E	7,76E-02	1,62E-01	9,97E-02
1,280000E	2,079076E	1,030604E	7,79E-02	1,58E-01	8,53E-02
1,280000E	2,179076E	1,033892E	7,28E-02	1,41E-01	6,28E-02
1,280000E	2,279076E	1,038089E	6,29E-02	1,15E-01	3,59E-02
1,280000E	2,379076E	1,043378E	4,97E-02	8,59E-02	9,74E-03
1,280000E	2,479076E	1,049930E	3,56E-02	5,86E-02	-9,95E-03
1,280000E	2,579076E	1,057871E	2,30E-02	3,69E-02	-1,93E-02
1,280000E	2,679076E	1,067249E	1,33E-02	2,28E-02	-1,95E-02
1,280000E	2,779076E	1,078029E	6,97E-03	1,13E-02	-1,15E-02
1,280000E	2,879076E	1,094546E	0,000000E	1,13E-02	-1,15E-02
1,280000E	2,979076E	1,083934E	0,000000E	1,13E-02	-1,15E-02
1,280000E	3,079076E	1,161899E	0,000000E	1,13E-02	-1,15E-02

QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 9.8 den 15.2 $n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge 3.2.9' deki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için PHM[<] 1.0, KM=6 ve IT=3 olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 12.8 dir.

FWHPF(uzak alandan sapma açısı) ve FWHPN(yakın alandan sapma açısı) değerleri değişimi grafiği ile uzak alandan sapma açısının dış kaplama tabakasının kalınlığındaki artış ile arttığı, Γ (hapis faktörü) değerinin belli bir değere kadar artarak sabit kaldığı ve kayıp değerinin dış kaplama tabakasındaki artış ile azaldığı gözlenmiştir.

3.3.1. InGaAs/InGaAsP/InP malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar

Tek kuantum kuyulu, iki ayrılmış hapisli çift tabakalı ve iki kaplama tabakalı bir InGaAs/InGaAsP/InP malzeme için simülasyon Şekil 3.3.1' deki gibidir.



Şekil 3.3.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır⁽¹⁹²⁾. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane programdan çıkış dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa girilen programa giriş değerleri Çizelge 3.3.1 ve Çizelge 3.3.2' deki gibidir.

Çizelge 3.3.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık (Å)
QW (InGaAs)	1.52	0.004	90
SCH (In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y})	1.28		70
Kaplama (InP)	0.98		500

Çizelge 3.3.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	InGaAs/InGaAsP/InP (Zemin: InP)
Malzeme bileşenleri	In _{1-x} Ga _x As/ In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y}
Giriş Parametreleri	QW' in çoğunluk malzemesinin dalga boyu, QW' in iletim ve değerlik bandının engel ve kaplama, kalınlık değerleri
Işıma dalga boyu	1.2µm -1.7µm
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı
Dalga boyu ile x hesaplama denklem; <i>InGaAs malzeme için:</i> $E_g(\Gamma) = 0.36 + 0.505x + 0.555x^2 (eV) \dots\dots\dots 300 \dots K \dots de$ $\dots\dots\dots = 0.324 + 0.7x + 0.4x^2 (eV) \dots\dots\dots 300 \dots K \dots$ $\dots\dots\dots = 0.422 + 0.7x + 0.4x^2 (eV) \dots\dots\dots 2 \dots\dots K \dots de$ <i>InGaAsP malzeme için:</i> $E_g(x, y) = 1.35 + 0.668x - 1.068y + 0.758x^2 + 0.078y^2 - 0.069xy - 0.032x^2y + 0.03xy^2 (eV)$ $a(x, y) = 5.8688 - 0.4176x + 0.1896y + 0.0125xy (\text{Å})$ InP ile eşlenildiğinde; $x = \frac{0.1894y}{0.4184 - 0.013y}$ $E_g(y) = 13.5 - 0.77y + 0.149y^2 (eV) \dots\dots\dots 298 \dots K \dots de$ $\dots\dots\dots = 1.425 - 0.7668y + 0.149y^2 (eV) \dots\dots\dots 2 \dots\dots K \dots de$	

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama

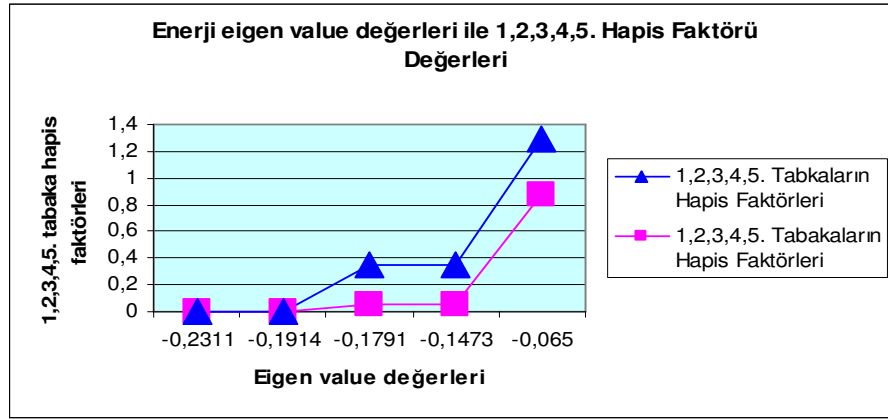
dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışıma dalga boyu ile ilgilidir. Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu $1.24/\text{boşluk bandı enerjisi}$ nden elde edilebilir.

Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile InGaAsP malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, Şekil 3.3.2 ve Şekil 3.3.3' den de görülebileceği gibi birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.3.3. Verim programından elde edilen enerji hapis faktörü değerleri

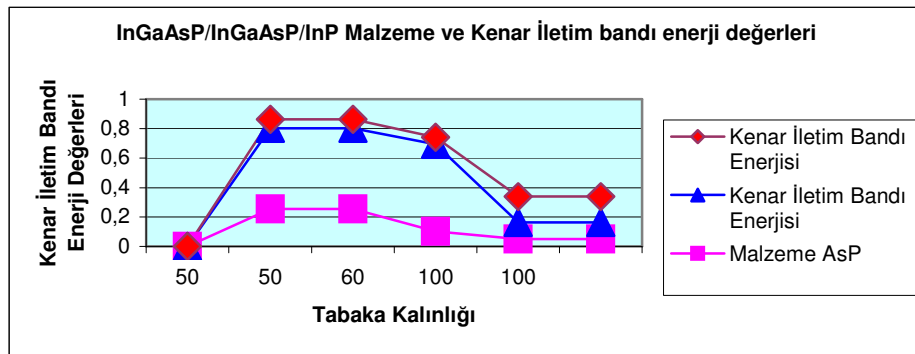
Enerji Eigenvalue Değerleri	1,2,3,4,5. Tabakaların Hapis Faktörleri	1,2,3,4,5. Tabakaların Hapis Faktörleri
-0.231097188243E+00	0.55345182E-04	0.53470996E-02
-0.191369790031E+00	0.59643161E-01	0.28562334E+00
-0.179149998702E+00	0.88060299E+00	0.41805912E+00
-0.147261863238E+00	0.59643161E-01	0.28562334E+00
-0.649955081950E-01	0.55345182E-04	0.53470996E-02



Şekil 3.3.2. InGaAsP malzeme için enerji öz değer ve hapis faktörü değerleri ilişkisi

Çizelge 3.3.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Tabaka Kalınlığı	Malzeme (AsP)	Kenar İletim Değerleri	Bandı Enerji	
0.10000000E+03	0.50731155E-01	0.1116804	0.1753115	Kaplama Tabakası
0.50000000E+02	0.25335652E+00	0.5501187	0.0596546	SCH Tabakası
0.60000000E+02	0.10208711E+00	0.5923067	0.0480322	Kuantum Kuyusu
0.50000000E+02	0.25335652E+00	0.5501187	0.0596546	SCH Tabaka
0.10000000E+03	0.50731155E-01	0.1116804	0.1753115	Kaplama Tabakası



Şekil 3.3.3. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

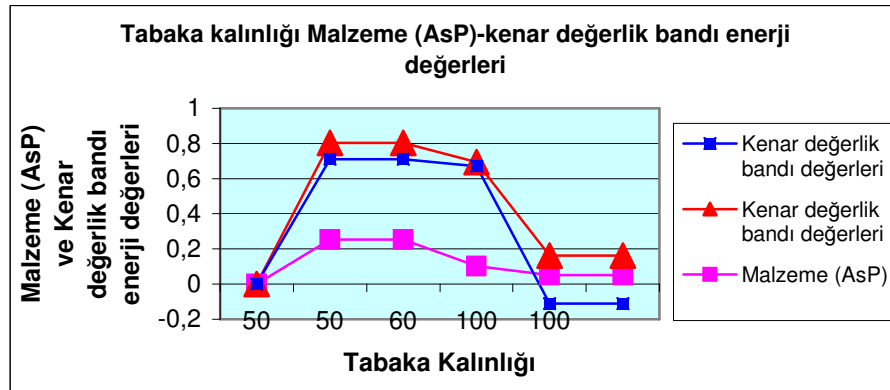
Çizelge 3.3.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Tabaka Kalınlığı	Malzeme (AsP)	Kenar Değerlik Bandı Enerji Değerleri		
0.10000000E+03	0.50731155E-01	0.1116804	-0.2742052	Kaplama tabakası
0.50000000E+02	0.25335652E+00	0.5501187	-0.0933059	SCH tabakası
0.60000000E+02	0.10208711E+00	0.5923067	-0.0240161	Kuantum Kuyusu
0.50000000E+02	0.25335652E+00	0.5501187	-0.0933059	SCH tabaka
0.10000000E+03	0.50731155E-01	0.1116804	-0.2742052	Kaplama tabakası

$QW (\Delta E_{gap})$ in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik ($\Delta E_c..ve.. \Delta E_v$) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır

InGaAlAs malzeme için;

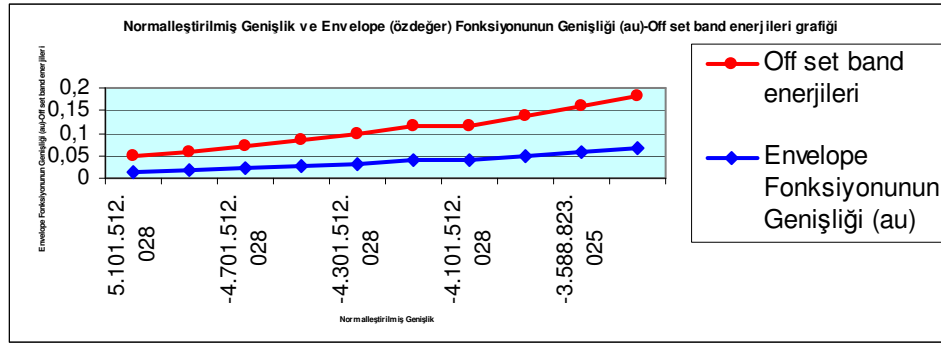
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = \frac{-1.3979}{-2.2890} = 0.61$$



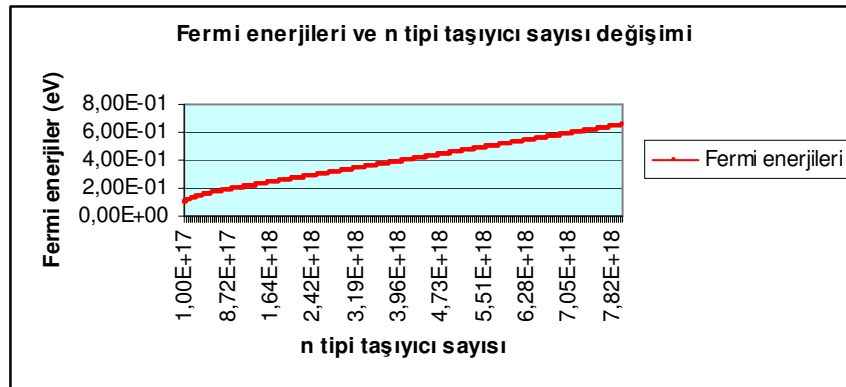
Şekil 3.3.4. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri arasındaki ilişki

Çizelge 3.3.6. InGaAsP malzeme için elde edilen öz değer fonksiyonu ve bant offset enerji değerleri

Normalleştirilmiş Genişlik	Öz değer Fonksiyonunun Genişliği (au)	Offset bant enerjileri
0.5101512028E+02	0.1496959865E-01	0.3567676540E-01
-0.4901512028E+02	0.1802271540E-01	0.4163570963E-01
-0.4701512028E+02	0.2169852899E-01	0.4858995193E-01
-0.4501512028E+02	0.2612404124E-01	0.5670573289E-01
-0.4301512028E+02	0.3145215656E-01	0.6617705956E-01
-0.4101512028E+02	0.3786696487E-01	0.7723034318E-01
-0.4101512028E+02	0.3786696487E-01	0.7723034318E-01
-0.3845167527E+02	0.4704254157E-01	0.9205378115E-01
-0.3588823025E+02	0.5610227973E-01	0.1050128698E+00
-0.3332478523E+02	0.6502387047E-01	0.1158451511E+00



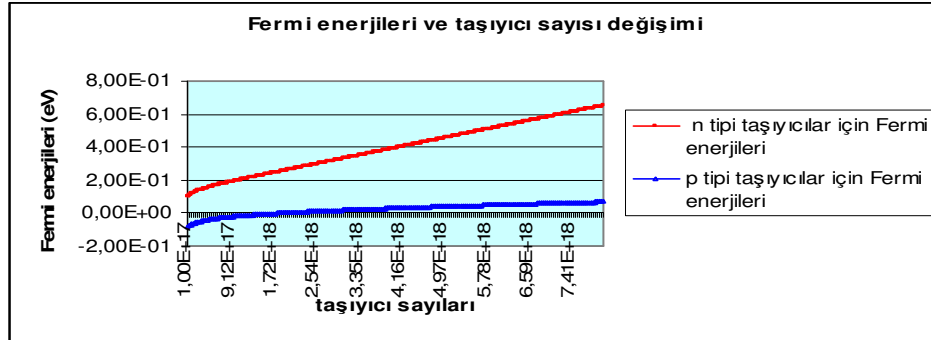
Şekil 3.3.5. InGaAsP malzeme için normalleştirilmiş genişlik ve bant offset enerji değerleri değişimi



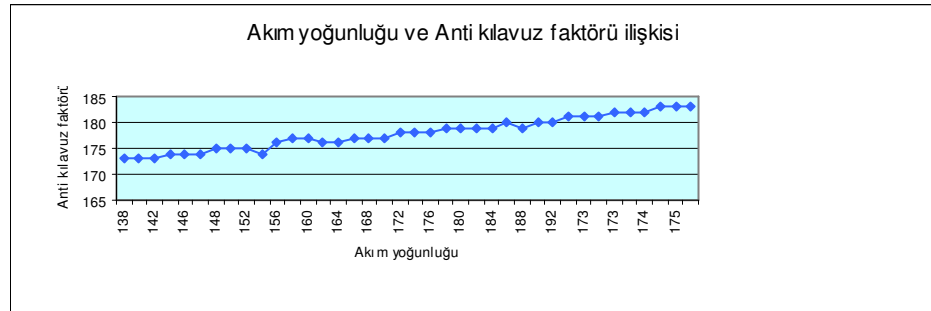
Şekil 3.3.6. Fermi enerji düzeyleri ve n taşıyıcı değerleri arasındaki ilişki

Çizelge 3.3.7. InGaAsP malzeme n ve p taşıyıcılar için elde edilen Fermi enerjisi değerleri

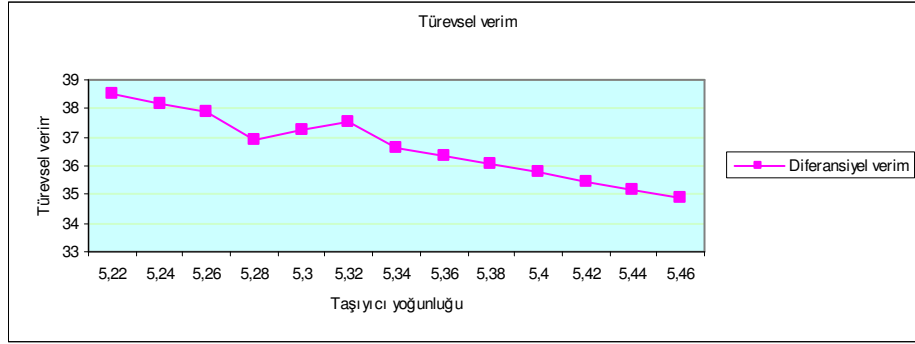
N-TAŞIYICI SAYISI	FERMI-N ENERJİSİ	FERMI-P ENERJİSİ
1,00E+17	1,00E-01	-8,23E-02
1,20E+17	1,06E-01	-7,76E-02
1,40E+17	1,10E-01	-7,35E-02
1,59E+17	1,14E-01	-7,01E-02
1,79E+17	1,18E-01	-6,70E-02
1,99E+17	1,21E-01	-6,42E-02
2,19E+17	1,24E-01	-6,17E-02
2,39E+17	1,27E-01	-5,94E-02
2,58E+17	1,30E-01	-5,72E-02
2,78E+17	1,33E-01	-5,53E-02
2,98E+17	1,35E-01	-5,34E-02
3,18E+17	1,38E-01	-5,17E-02
3,38E+17	1,40E-01	-5,01E-02
3,57E+17	1,42E-01	-4,85E-02
3,77E+17	1,44E-01	-4,70E-02
3,97E+17	1,46E-01	-4,56E-02



Şekil 3.3.7. Fermi enerji düzeylerinin n ve p tipi taşıyıcılar ile değişiminin karşılaştırılması



Şekil 3.3.8. Akım yoğunluğu ve anti kılavuz faktörü değişimi



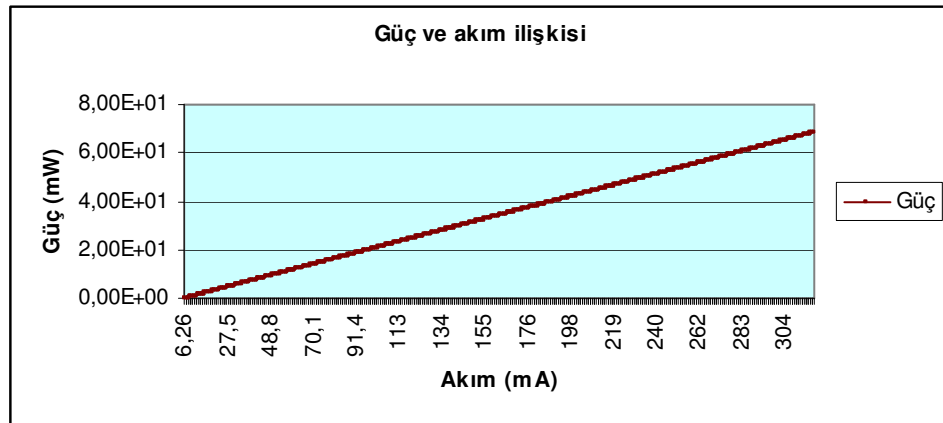
Şekil 3.3.9. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu değişimi

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

InGaAsP malzeme için;

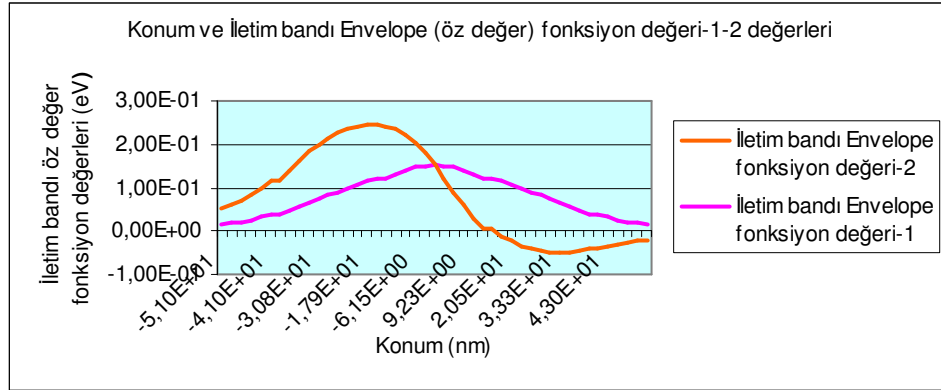
$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{60}{283} = 0.2120 = 21.20\ldots\%$$

olarak bulunmuştur.

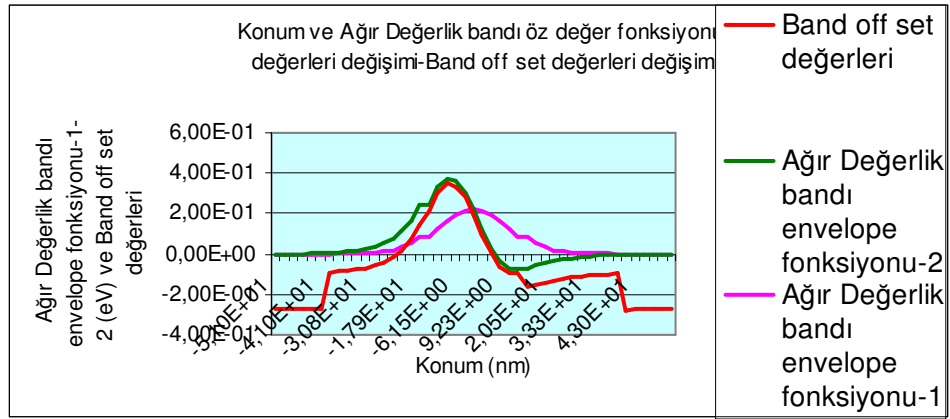


Şekil 3.3.10. Güç-Akım ilişkisi

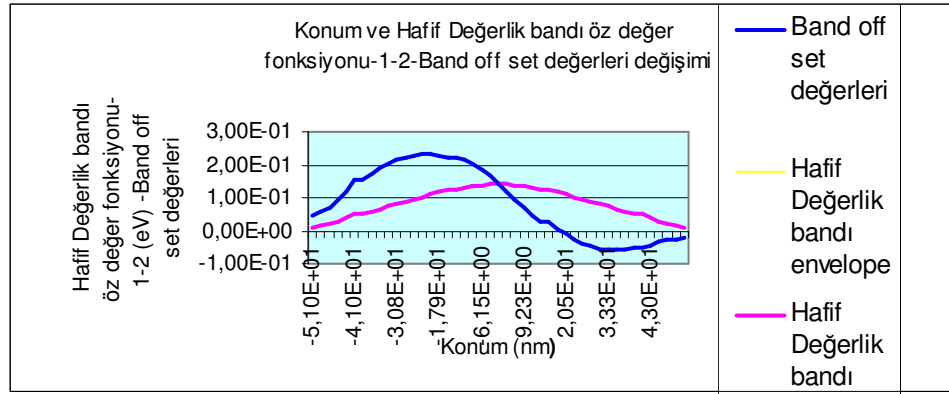
Verim programı ile elde edilen verilerden; İletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, Türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışıma dalga boyu ve malzeme-mod verimi ilişkisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.



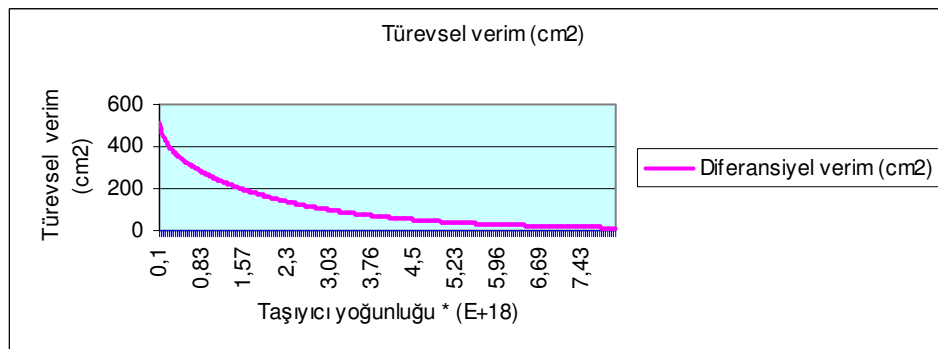
Şekil 3.3.11. Konum ve İletim bandı öz değer fonksiyon değeri-1-2 değişimi



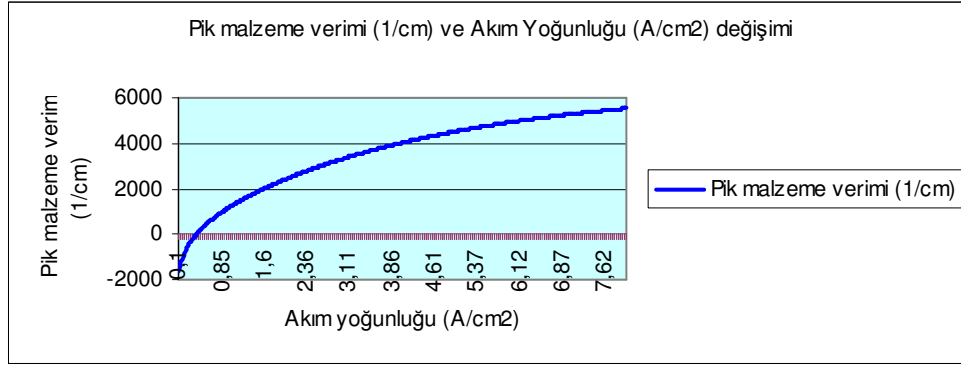
Şekil 3.3.12. Konum ve Ağır Değerlik bandı öz değer fonksiyonu değerleri değişimi-Bant offset değerleri değişimi



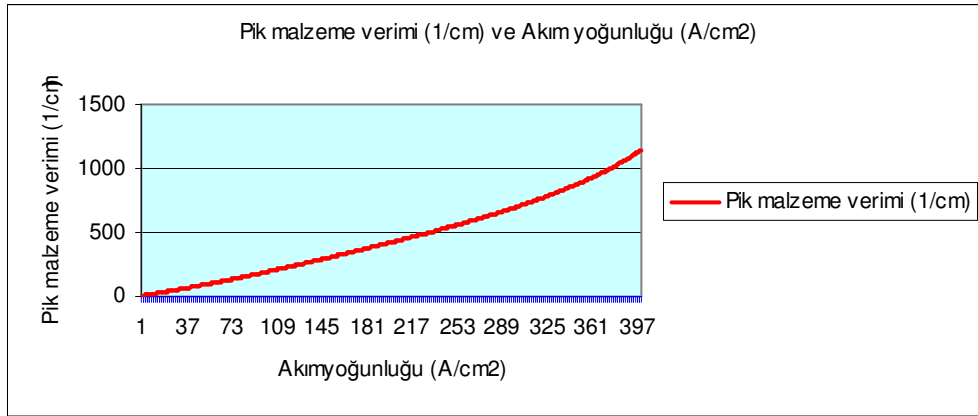
Şekil 3.3.13. Konum ve Hafif Değerlik bandı öz değer fonksiyonu-1-2-bant off set değerleri değişimi



Şekil 3.3.14. Türevsel verim (cm²)



Şekil 3.3.15. Pik malzeme verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm²) değişimi

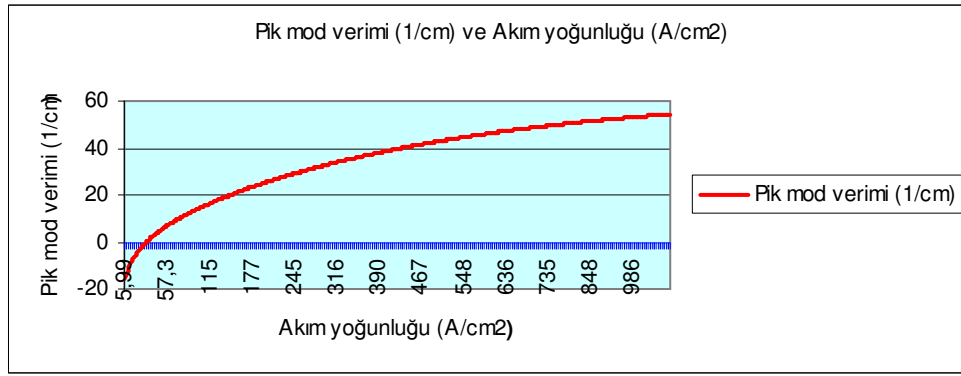


Şekil 3.3.16. Pik malzeme verimi (1/cm) ve Akım yoğunluğu (A/cm²)

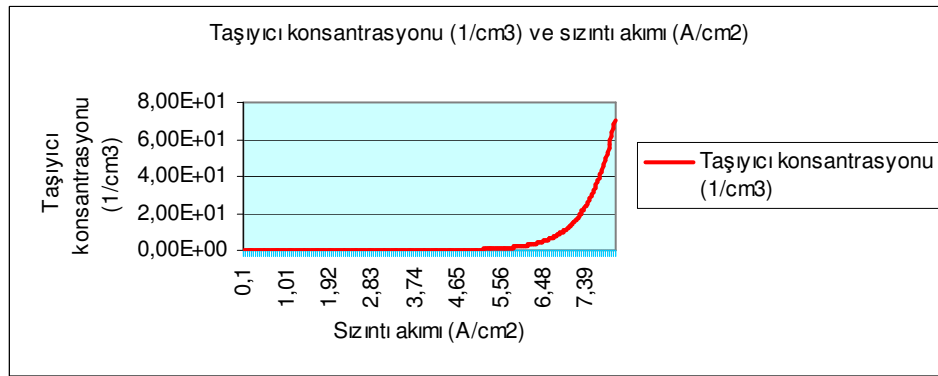
Mod verimi; Kuantum kuyularındaki elektron öz değer-örtü fonksiyonu ve optik mod arasında daima olan üst üste gelmeyi hesaplayan ayarlanmış malzeme verimidir.

Mod verimi=Malzeme verimi x Hapis faktörü

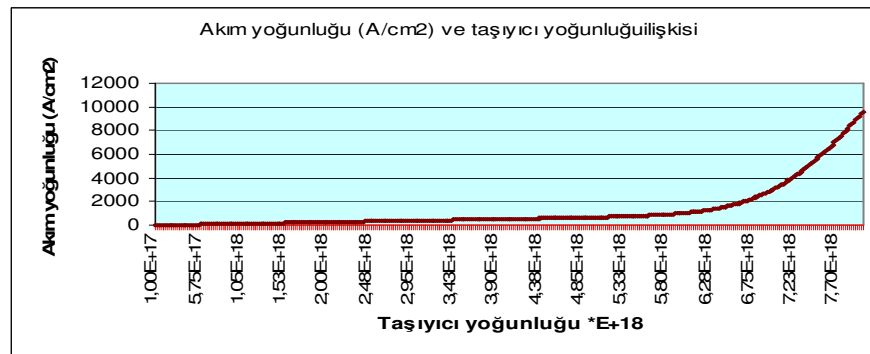
Mod verimi verim katsayısı ve verim hapis faktörü ile açıklanır.



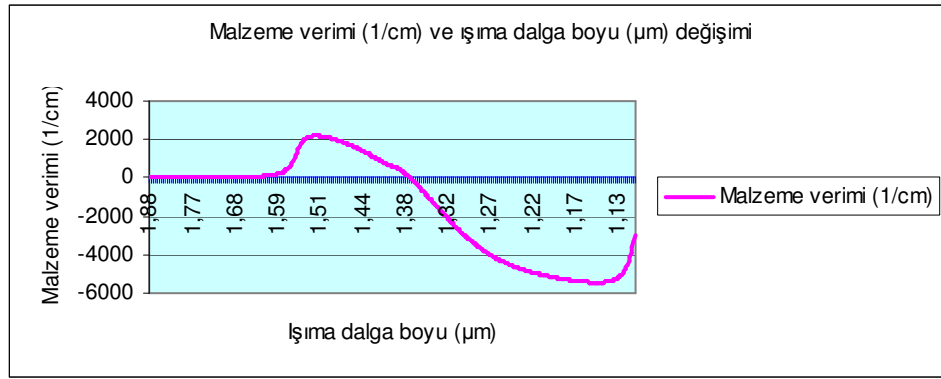
Şekil 3.3.17. Pik mod verimi (1/cm) ve Akım yoğunluğu (A/cm²)



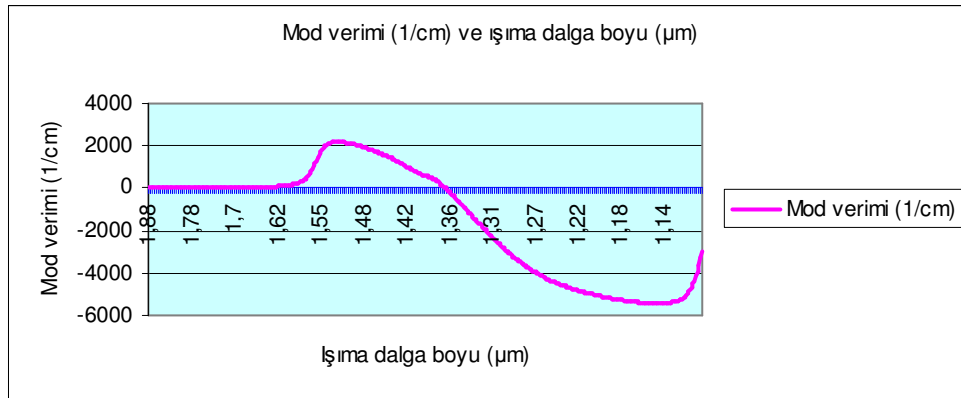
Şekil 3.3.18. Taşıyıcı konsantrasyonu (1/cm³) ve sızıntı akımı (A/cm²)



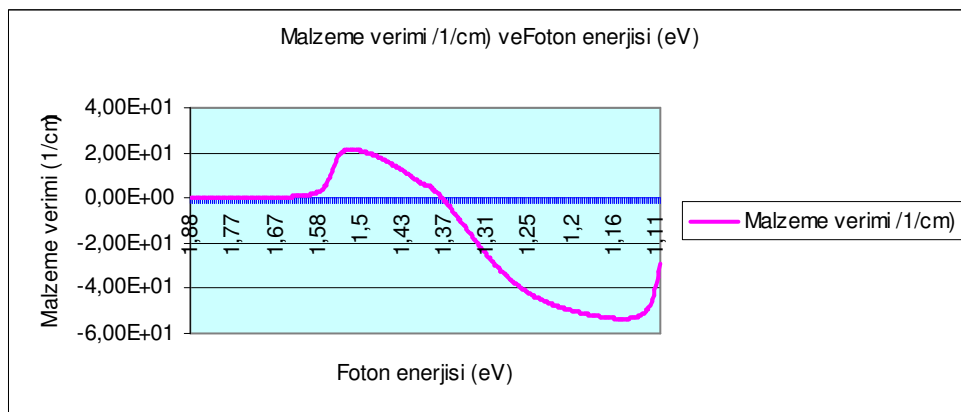
Şekil 3.3.19. Akım yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğu değişimi



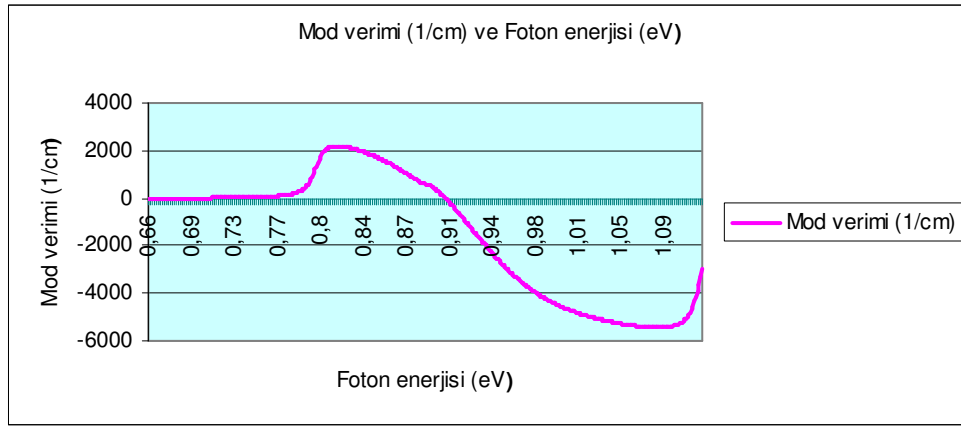
Şekil 3.3.20. Malzeme verimi (1/cm) ve ışıma dalga boyu (μm) değişimi



Şekil 3.3.21. Mod verimi (1/cm) ve ışıma dalga boyu (μm)



Şekil 3.3.22. Malzeme verimi /1/cm ve Foton enerjisi (eV)



Şekil 3.3.23. Mod verimi (1/cm) ve Foton enerjisi (eV)

Verim programı' nın yukarıdaki verilerine göre göre InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerler Çizelge 3.3.8' de gösterilmiştir. Bu değerler kuantum lazer tasarımı için kullanılır.

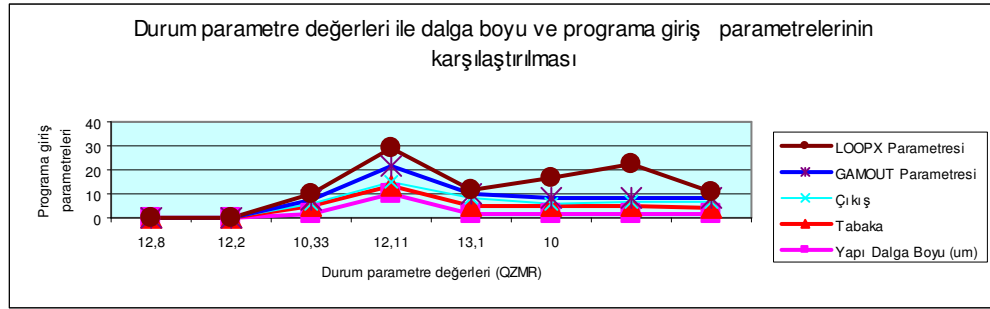
Çizelge 3.3.8. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAsP malzeme için elde edilen karakteristik değerleri

Uygun QWs sayısı	5
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.88
$J_{th} (A / cm^2)$	418.586 1.kontrol 278.126 2.kontrol
$I_{th} (mA)$	9.41 mA 1.kontrol 6.25 mA 2.kontrol
Çalışma sıcaklığında λ at pik değeri (um)	1.53 um
Pik malzeme verimi (1/cm)	0.166416D+19 1/cm ³ yük yoğunluğu için 28.0530 1/cm
k faktörü	0.16534 ns
Maksimum frekans	53.7421 GHz

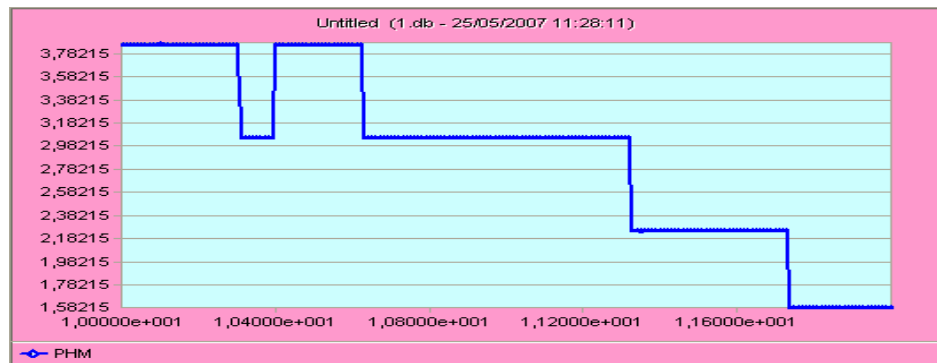
3.3.2. InGaAs/InGaAsP/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Çizelge 3.3.9. InGaAsP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerler çizelgesi

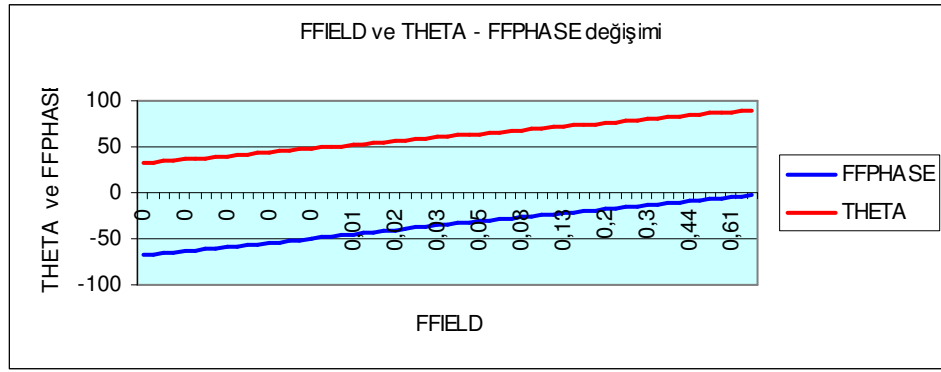
Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOPX Parametresi
InGaAsP	12.80	1.52	3.19	1	2	2
InGaAsP	12.20	10.00	3.40	2	6	8
InGaAsP	10.33	1.57	3.37	3	2	2
InGaAsP	12.11	1.48	3.11	1.34	2	9
InGaAsP	13.10	1.58	3.80	1	2	14
InGaAsP	10.00	1.52	3.00	2	2	2



Şekil.3.3.24. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi



Şekil.3.3.25. QZMR(ortalama kırılma indisi)-PHM (faz integrali) grafiği



Şekil 3.3.26. THETA(uzak alan Θ açısı)-FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı) grafiği

QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 10.00 den 15.80 $n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge (3.3.10)' daki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için PHM < 1.0, KM=6 ve IT=3 olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 12.26 dir.

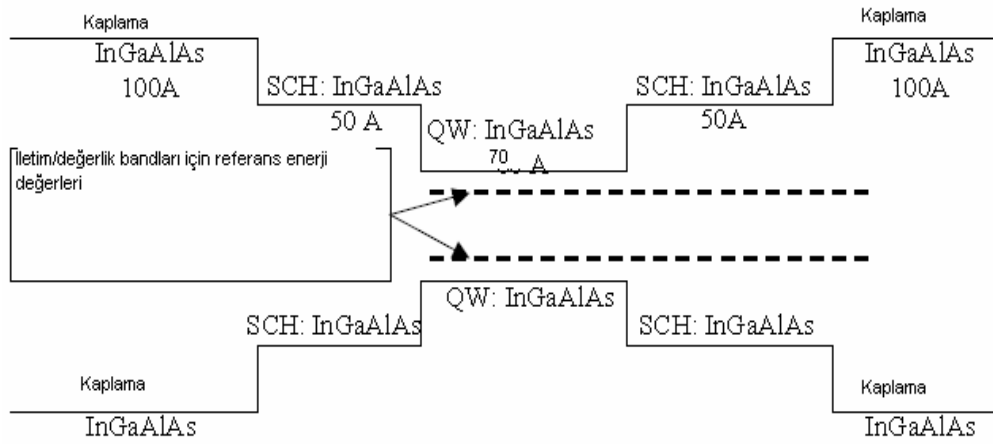
Çizelge 3.3.10. InGaAsP malzeme için Dalga Kılavuzu çıktıları

QZMR	TL	PHM	GAMMA	GAMMA Re	GAMMA lma	WZR	WZI	QZR
1,229000E	8,000000E	5,634166E	1,21E-04	-8,01E-05	8,06E-05	3,413910E	1,269723E	1,004258E
1,229000E	8,100000E	5,634167E	2,72E-04	-1,45E-04	2,03E-04	3,413907E	1,269722E	1,004257E
1,229000E	8,200000E	5,634178E	1,85E-04	-1,03E-04	1,48E-04	3,413900E	1,269722E	1,004252E
1,229000E	8,300000E	5,634243E	0,000000E - 1,	025220E-04 1,	478890E-04 3,4	13879E 1,	269734E 1,0	04234E 8,
1,229000E	8,400000E	5,634148E	1,29E-04	-8,83E-05	8,88E-05	3,413844E	1,269687E	1,004223E
1,229000E	8,500000E	5,633435E	0,000000E - 8,	832805E-05 8,	879013E-05 3,4	14147E 1,	269591E 1,0	04454E 8,
1,229000E	8,600000E	5,669736E	1,86E-04	-1,11E-04	4,93E-05	3,420233E	1,284333E	1,004848E
1,229000E	8,700000E	5,664800E	1,63E-04	-8,57E-05	8,79E-05	3,420678E	1,282908E	1,005518E
1,229000E	8,800000E	5,664803E	2,47E-04	-1,40E-04	1,44E-04	3,420678E	1,282909E	1,005518E
1,229000E	8,900000E	5,662983E	1,64E-04	-8,71E-05	8,98E-05	3,421066E	1,282486E	1,005892E
1,229000E	9,000000E	5,663537E	0,000000E - 8,	712877E-05 8,	980709E-05 3,4	21048E 1,	282661E 1,0	05835E 8,
1,229000E	9,100000E	5,660247E	1,45E-04	-7,71E-05	7,86E-05	3,419157E	1,280715E	1,005040E
1,229000E	9,200000E	5,659218E	0,000000E - 7,	711446E-05 7,	860249E-05 3,4	20693E 1,	281076E 1,0	05999E 8,

1,229000E	9,300000E	5,657800E	1,79E-04	-1,16E-04	6,06E-05	3,420163E	1,280367E	1,005818E
1,229000E	9,400000E	5,657800E	1,47E-04	-7,95E-05	8,18E-05	3,420166E	1,280368E	1,005819E
1,229000E	9,500000E	5,657823E	0,000000E - 7,	951222E-05 8,	182529E-05 3,4	20176E 1,	280380E 1,0	05823E 8,
1,229000E	9,600000E	5,656603E	1,53E-04	-7,30E-05	1,24E-04	3,421061E	1,280381E	1,006428E
1,229000E	9,700000E	5,656598E	1,57E-04	-9,83E-05	4,93E-05	3,421058E	1,280379E	1,006427E
1,229000E	9,800000E	5,656504E	1,53E-04	-7,31E-05	1,24E-04	3,421068E	1,280352E	1,006441E
1,229000E	9,900000E	5,656544E	0,000000E - 7,	305610E-05 1,	235853E-04 3,4	21064E 1,	280363E 1,0	06435E 8,
1,229000E	1,000000E	5,651890E	1,54E-04	-9,07E-05	9,33E-05	3,419764E	1,278238E	1,006089E
1,229000E	1,010000E	5,652853E	1,44E-04	-8,12E-05	8,35E-05	3,419690E	1,278522E	1,005966E
1,229000E	1,020000E	5,652160E	1,74E-04	-1,17E-04	6,49E-05	3,419763E	1,278326E	1,006066E
1,229000E	1,030000E	5,652163E	1,43E-04	-8,15E-05	8,40E-05	3,419762E	1,278327E	1,006065E
1,229000E	1,040000E	5,652178E	1,43E-04	-8,15E-05	8,40E-05	3,419759E	1,278331E	1,006062E
1,229000E	1,050000E	5,652181E	3,24E-04	-1,38E-04	2,18E-04	3,419759E	1,278331E	1,006062E
1,229000E	1,060000E	5,651891E	1,43E-04	-8,16E-05	8,41E-05	3,419735E	1,278225E	1,006073E
1,229000E	1,070000E	5,651888E	0,000000E - 8,	162646E-05 8,	407319E-05 3,4	19733E 1,	278223E 1,0	06072E 8,

3.4.1 InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar

Tek kuantum kuyulu, iki ayrılmış hapisli çift tabakalı ve iki kaplama tabakalı bir InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için simülasyon Şekil 3.4.1 deki gibidir.



Şekil 3.4.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı

VERİM programı ile hesaplama yaparken ile yapılacak işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane program çıktıları dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa giriş değerleri Çizelge 3.4.1' deki gibidir.

Çizelge 3.4.1. Verim programı için programa giriş değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık (Å)
QW ($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	1.72	-0.02	70
SCH ($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	0.98	0.009	60
Kaplama($Ga_xAl_yIn_{1-x-y}As$)	0.78		100

Çizelge 3.4.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

	InGaAlAs/InGaAlAs (Zemin: InP)
Malzeme bileşenleri	$Al_yGa_xIn_{1-x-y}As$
Giriş Parametreleri	QW' in çoğunluk malzemesinin dalga boyu; QW' in iletim ve değerlik bandının engel ve kaplama, kalınlık değerleri
Işıma dalga boyu	1.3um, 1.55um, 1.6um
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı
Dalga boyu ile x hesaplama denklem; $E_g(x, y) = (1 - x - y)E_g(InAs) + yE_g(AlAs) + xE_g(GaAs)$ $a(x, y) = (1 - x - y)a(InAs) + ya(AlAs) + xa(GaAs)$ Burada ; $E_g(InAs) = 0.354.....E_g(AlAs) = 3.03.....E_g(GaAs) = 1.424.....300K..de$ $E_g(InAs) = 0.42.....E_g(AlAs) = 3.13.....E_g(GaAs) = 1.519.....0K.....de$ $a(InAs) = 6.0584 \quad a(AlAs) = 5.6600 \quad a(GaAs) = 5.6533$	

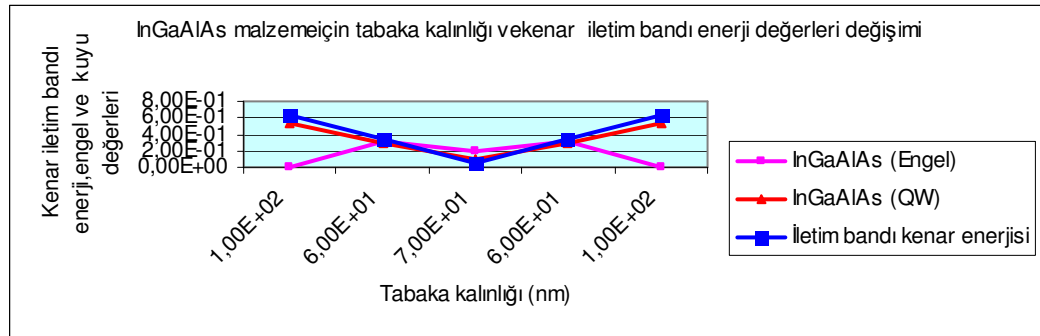
Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile InGaAlAs malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar

değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, Şekil 3.4.2 ve Şekil 3.4.3' den de görülebileceği gibi birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.4.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri.

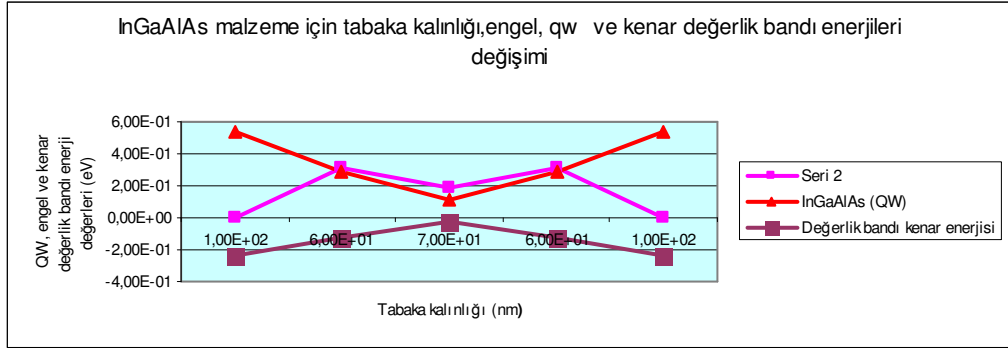
Tabaka Kalınlığı	InGaAlAs (Engel)	InGaAlAs (QW)	İletim bandı kenar enerjisi	
1,00E+02	0,00E+00	0,54247	0,6255456	Kaplama tabakası
6,00E+01	3,14E-01	0,2860684	0,3451963	SCH tabaka
7,00E+01	1,93E-01	0,1073898	0,0533999	Kuantum kuyusu
6,00E+01	3,14E-01	0,2860684	0,3451963	SCH tabaka
1,00E+02	0,00E+00	0,54247	0,6255456	Kuantum kuyusu



Şekil 3.4.2. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

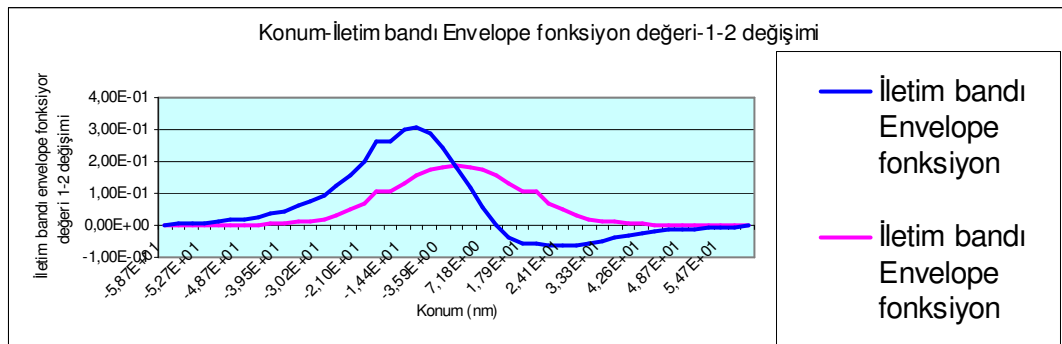
Çizelge 3.4.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri

Tabaka Kalınlığı	InGaAlAs (Engel)	InGaAlAs (QW)	Değerlik bandı kenar enerjisi	
1,00E+02	0,00E+00	0,54247	-0,243268	Kaplama tabakası
6,00E+01	3,14E-01	0,286068	-0,129048	SCH tabaka
7,00E+01	1,93E-01	0,10739	-0,0267	Kuantum kuyusu
6,00E+01	3,14E-01	0,286068	-0,129048	SCH tabaka
1,00E+02	0,00E+00	0,54247	-0,243268	Kuantum kuyusu

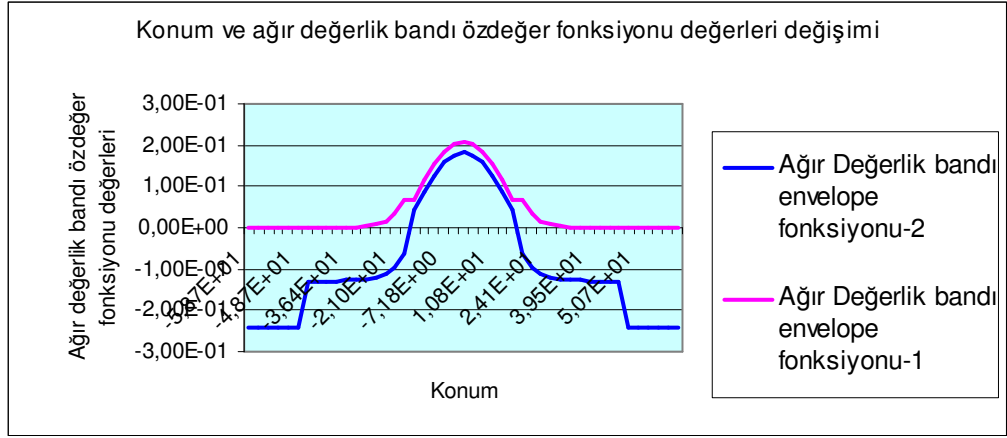


Şekil 3.4.3. InGaAsP malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri

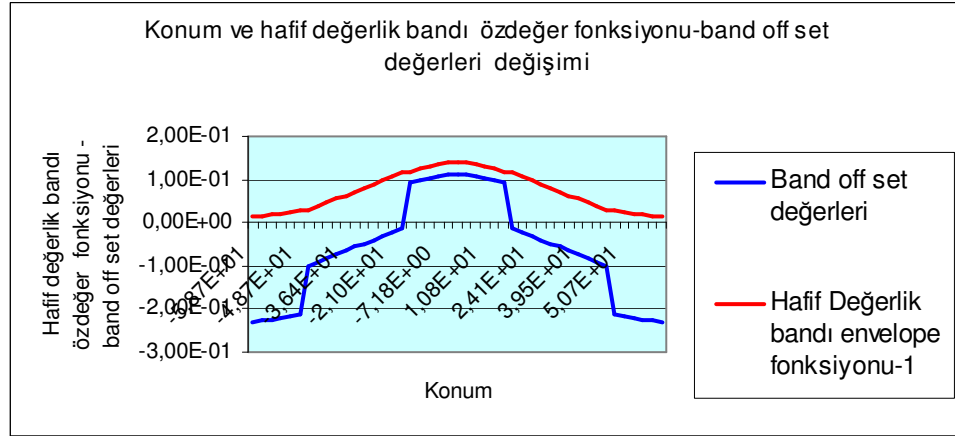
Verim programı ile elde edilen verilerden; İletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, Türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışıma dalga boyu ve malzeme-mod verimi ilişkisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.



Şekil 3.4.4. İletim Bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



Şekil 3.4.5. Ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi

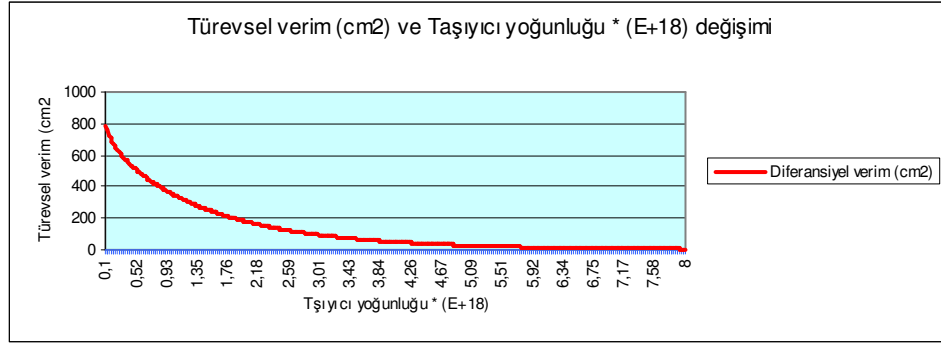


Şekil 3.4.6. Hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi

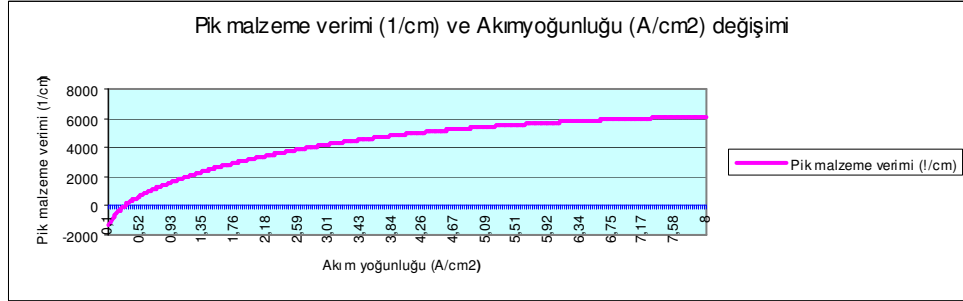
$QW (\Delta E_{gap})$ in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik (ΔE_c ..ve.. ΔE_v) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır

InGaAlAs malzeme için;

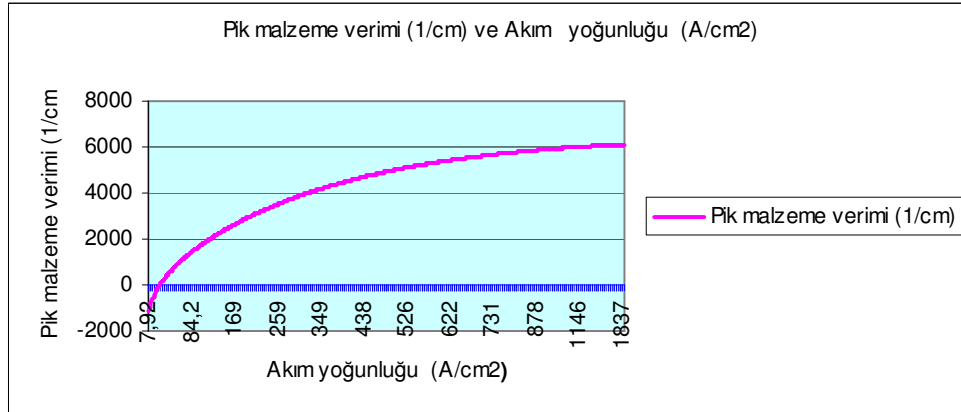
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = 0.28$$



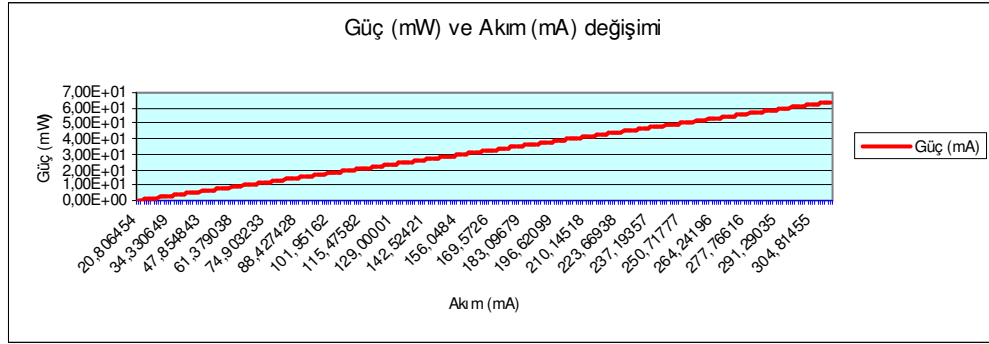
Şekil 3.4.7. Türevsel verim ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisi



Şekil 3.4.8. Pik malzeme verimi (1/cm) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi



Şekil 3.4.9. Pik malzeme verimi (1/cm) ve eşik akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi



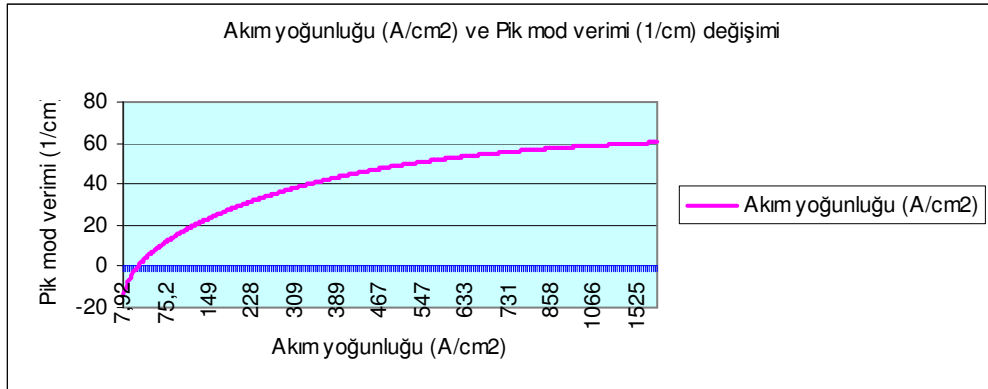
Şekil 3.4.10. Güç (mW) ve Akım (mA) ilişkisi

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

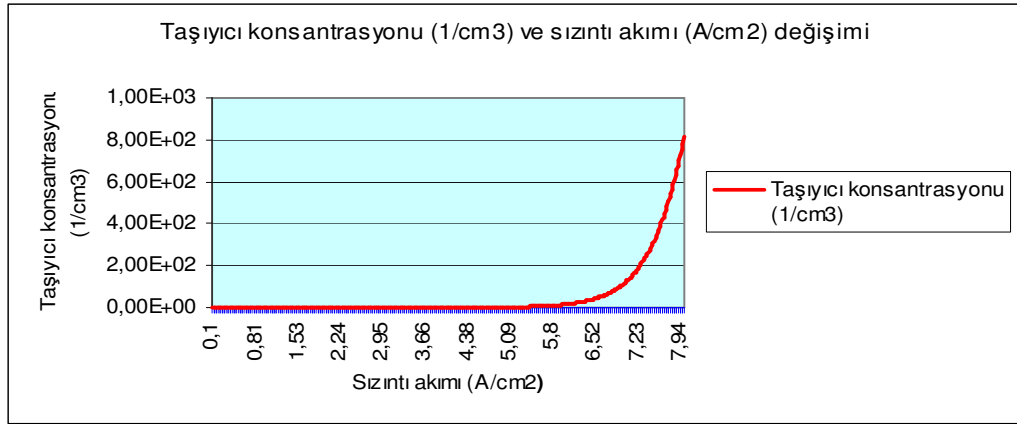
AlGaAs malzeme için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{20}{104 - 26,8} = 0.2590 = 25.90\ldots\%$$

olarak bulunmuştur.



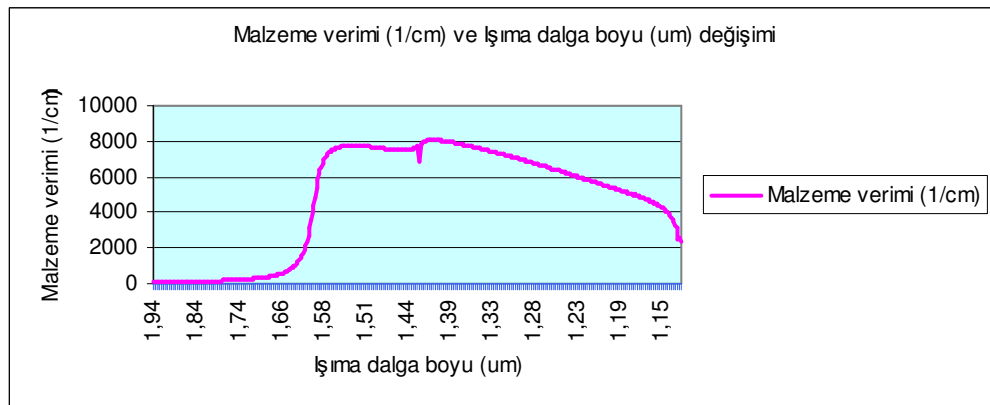
Şekil 3.4.11. Pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm²) ilişkisi



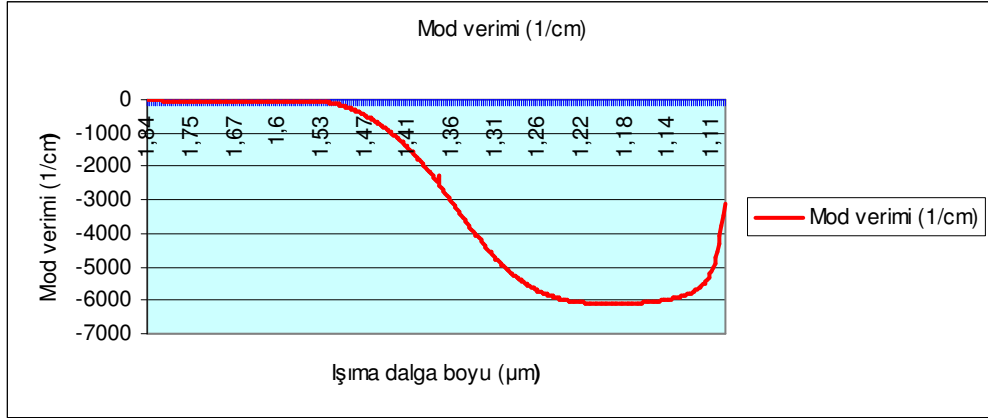
Şekil 3.4.12. Sızıntı Akımı (A/cm²) ve taşıyıcı yoğunluğu (1/cm³) ilişkisi



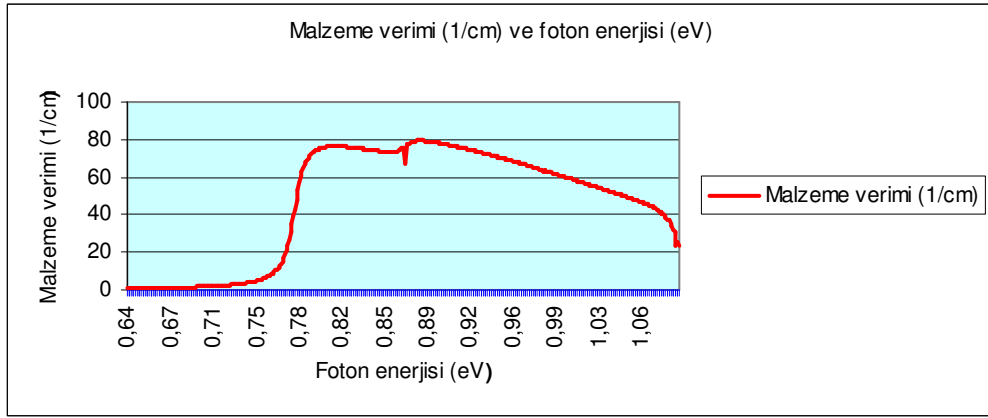
Şekil 3.4.13. Taşıyıcı sayısı ve kırılma indisindeki değişme ilişkisi



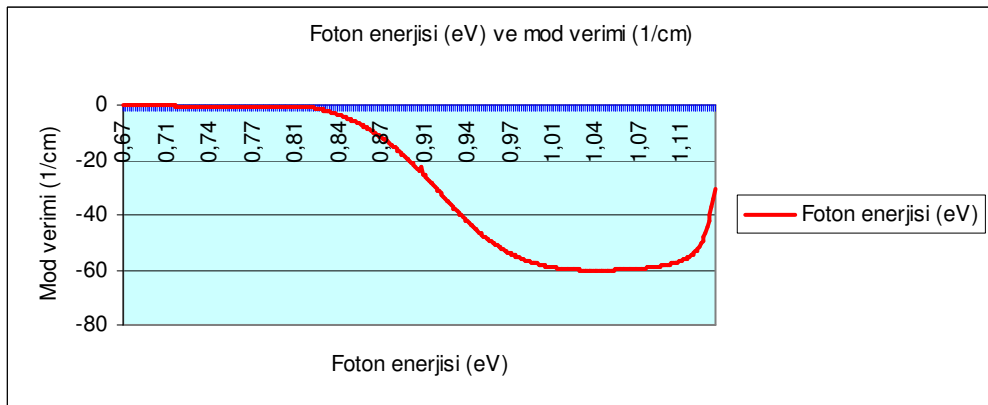
Şekil 3.4.14. Işın dalga boyu ve malzeme verimi ilişkisi



Şekil 3.4.15. Kıvrımsal mod verimi



Şekil 3.4.16. Kıvrımsal optiksel verim

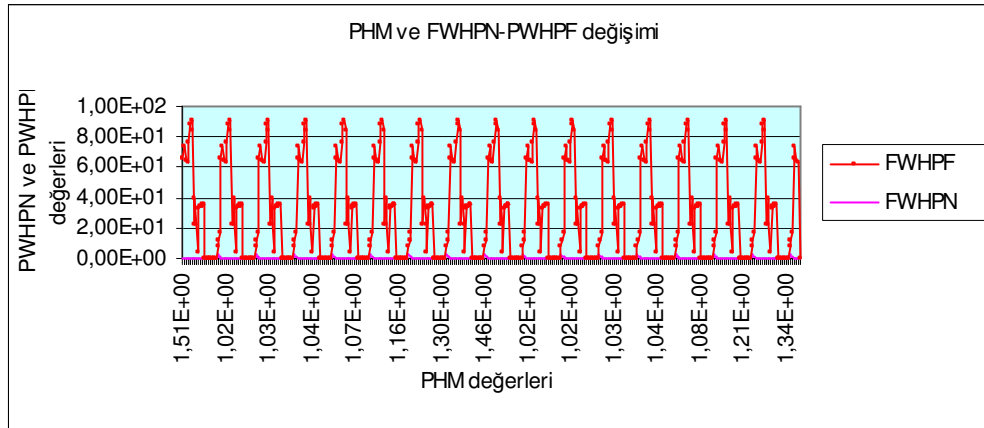


Şekil 3.4.17. Kıvrımsal mod verimi

Verim programı' nın yukarıdaki verilerine göre InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için elde edilen karakteristik değerler Çizelge 3.4.5' de gösterilmiştir. Bu değerler kuantum lazer tasarımı için kullanılır.

Çizelge 3.4.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Uygun QWs sayısı	5
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.84
J_{th} (A/cm^2)	381.426 1.kontrol 213.827 2.kontrol
I_{th} (mA)	8.58 1.kontrol 4.81 2.kontrol
K Faktörü değeri (ns)	0.16505 ns
Maksimum frekans (GHz)	53.8361 (GHz)
Çalışma sıcaklığında λ at pik değeri (um)	1.39 um
Pik malzeme verimi (1/cm)	0.170376D+19 $1/cm^3$ yük yoğunluğu için 28.0530 1/cm

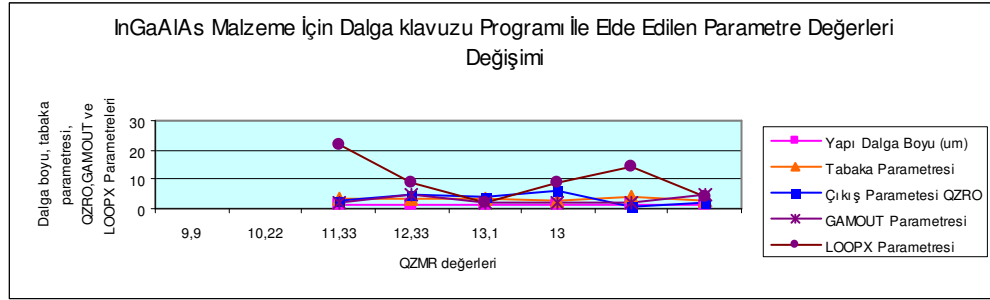


Şekil 3.4.18. PHM ve FWHPN-PWHPF değişimi

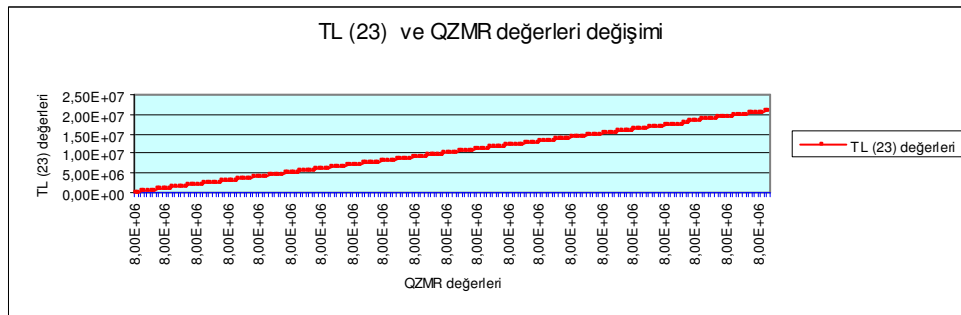
3.4.2 InGaAlAs/InGaAlAs/InP malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Çizelge 3.4.6. InGaAlAs Malzeme İçin Dalga Kılavuzu Programı İle Elde Edilen Parametre Değerler Çizelgesi

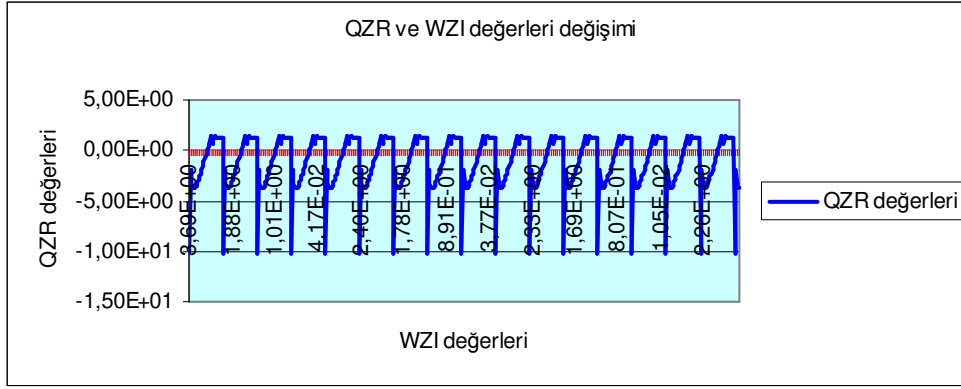
Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOPX Parametresi
InGaAlAs	9.9	1.62	3.60	3	2	22
InGaAlAs	10.22	1.54	3.45	5	5	9
InGaAlAs	11.33	1.44	3.37	4	2	2
InGaAlAs	12.33	1.49	3.01	6	2	9
InGaAlAs	13.10	1.58	3.80	1	2	14
InGaAlAs	13.00	1.52	3.06	2	5	4



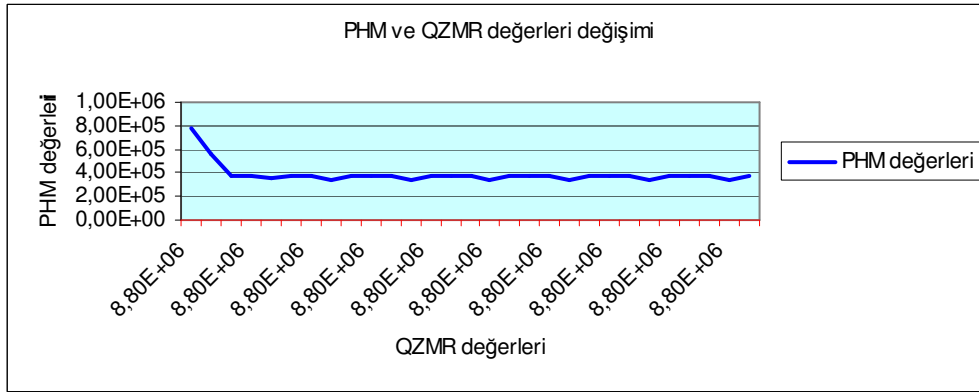
Şekil.3.4.19. QZMR(kırılma indisinin ortalama değeri) ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi



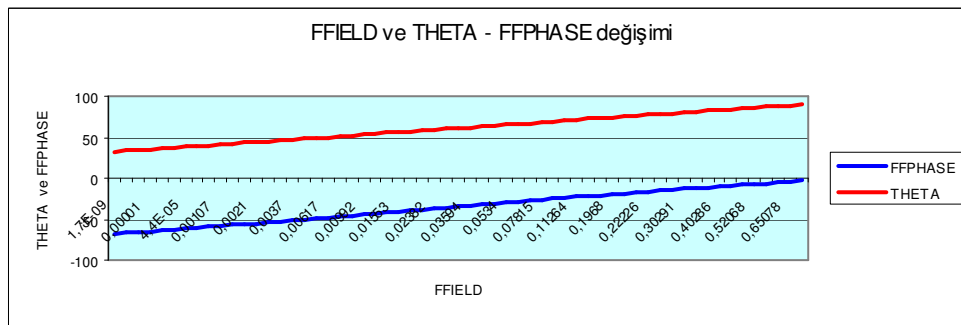
Şekil.3.4.20. QZMR(kırılma indisinin ortalama değeri) ve TL-23(kalınlık parametresi) değerleri değişimi



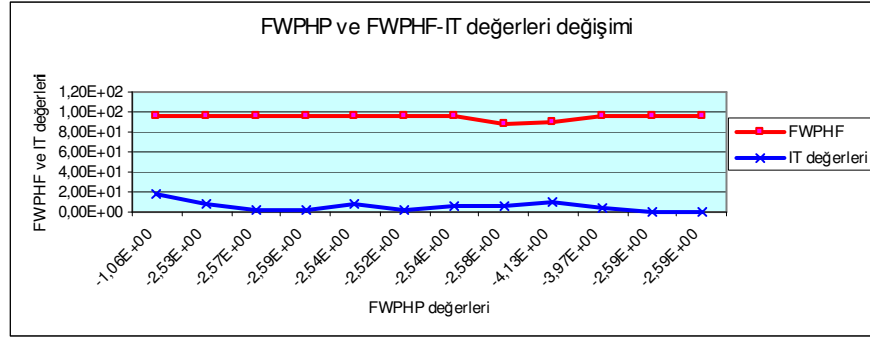
Şekil.3.4.21. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve WZI(kayıp parametresi (cm^{-1}) değerleri değişimi



Şekil.3.4.22. QZMR(ortalama kırılma indisi)-PHM (faz integrali) grafiği



Şekil 3.4.23. THETA(uzak alan Θ açısı)-FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı) grafiği



Şekil 3.4.24. FWPHP(uzak alandan sapma açısı) ve FWPHF-IT(yakın alandan sapma açısı) değerleri değişimi

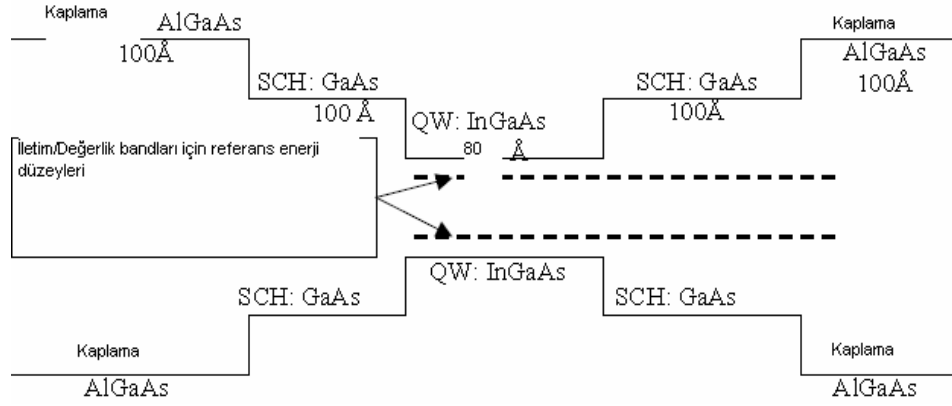
QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır⁽¹⁹²⁾. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 8.80 den 17.2 $n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge 3.4.7' deki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için PHM[<]1.0, KM=6 ve IT=3 olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 9.00 dır.

Çizelge 3.4.7.Dalga Kılavuzu program çıkış değerleri

QZMR	PHM	GAMMAReal(2)	GAMMAImag(2)	WZR	WZI	QZR	QZI	FWHPN	KM
8,990000	3,738824E-01	0,00E+00	3,000028	9,000093	5,178606E-02	0,000000	0,000000	4	30
8,990000	3,780039E-01	0,00E+00	3,000136	9,000737	5,357155E-02	0,000000	0,000000	4	30
8,990000	3,438752E-01	0,00E+00	3,001957	9,011667	5,415375E-02	0,000000	0,000000	4	30
8,990000	3,681323E-01	0,00E+00	2,999956	8,999666	4,978111E-02	0,000000	0,000000	4	30
8,990000	3,738824E-01	0,00E+00	3,000028	9,000093	5,178606E-02	0,000000	0,000000	4	30
9,000000	4,444919	0,00E+00	3,044801	8,161658	6,413347	0,000000	0,000000	3	30
9,000000	6,516768	3,62E-06	3,465278	7,714153	1,436147E+01	-1,064952	9,625378E+01	5	19
9,000000	6,516792	1,61E-06	3,465277	7,714105	1,436153E+01	-2,532011	9,577738E+01	5	9
9,000000	6,516807	6,77E-06	3,465278	7,714086	1,436158E+01	-2,569265	9,559465E+01	5	3
9,000000	6,516796	1,57E-06	3,465288	7,714161	1,436161E+01	-2,585127	9,615845E+01	5	2
9,000000	6,516786	6,46E-06	3,465280	7,714136	1,436154E+01	-2,539294	9,635103E+01	6	9
9,000000	6,516786	1,57E-06	3,465280	7,714135	1,436154E+01	-2,524932	9,615843E+01	5	3
9,000000	6,516810	3,75E-06	3,465279	7,714088	1,436160E+01	-2,539293	9,568524E+01	5	7
9,000000	6,516809	-1,26E-03	3,465279	7,714086	1,436160E+01	-2,577121	8,753399E+01	6	7

3.5.1 InGaAs/AlGaAs/AlGaAs malzeme için Verim programı ile yapılan hesaplamalar

Tek kuantum kuyulu, iki ayrılmış hapisli çift tabakalı ve iki kaplama tabakalı bir InGaAs/AlGaAs/AlGaAs malzeme için simülasyon Şekil 3.5.1' deki gibidir.



Şekil 3.5.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır. Bunun için ilk önce ışıma dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane program çıktıları dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa (programa giriş değerleri Çizelge 3.5.1' deki gibidir.

Çizelge 3.5.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık (Å)
QW ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	1.08	-0.012	80
SCH ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	0.84	-	100
Kaplama ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	0.50	-	100

Çizelge 3.5.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ (Zemin: GaAs)
Malzeme bileşenleri	$\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}/\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$
Giriş Parametreleri	Dalga boyları
Işıma dalga boyu	980nm
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı, $\text{InGaAs}/\text{AlGaAs}$ malzeme için zor
Dalga boyu ile x ve y denklem;	
<i>InGaAs malzeme için:</i>	
$E_g(\Gamma)$	$= 0.36 + 0.505x + 0.555x^2$ (eV) at 300K
<i>AlGaAs</i>	$= 0.324 + 0.7x + 0.4x^2$ (eV) at 300K
<i>malzeme</i>	$= 0.422 + 0.7x + 0.4x^2$ (eV) at 2K
($x < 0.4$)	
$645\text{nm} < \lambda < 878\text{nm}$;	
$E_g(\Gamma)$	$= 1.424 + 1.247x$ (eV) at 300K for $x < 0.4$
	$= 1.519 + 1.447x - 0.15x^2$ at 0K for $x < 0.4$

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışıma dalga boyu ile ilgilidir. Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu 1.24/boşluk bandı enerjisinden elde edilebilir.

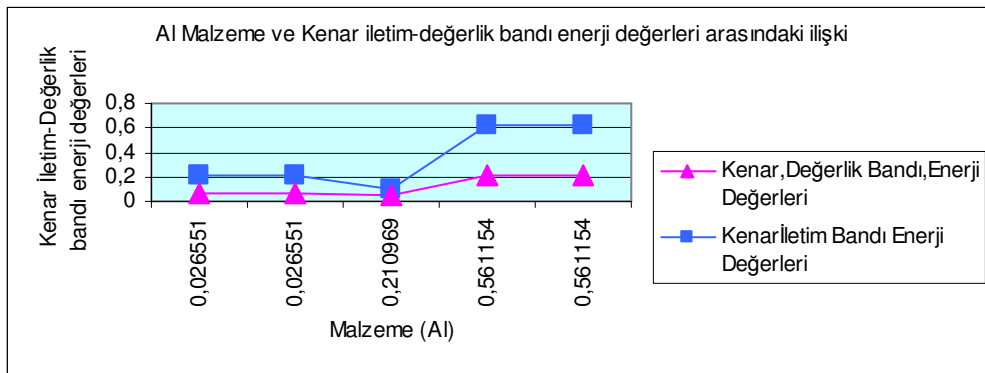
Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı,

auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile InGaAs/AlGaAs malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, Şekil 3.5.2 ve Şekil 3.5.3' den de görülebileceği gibi birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.5.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri

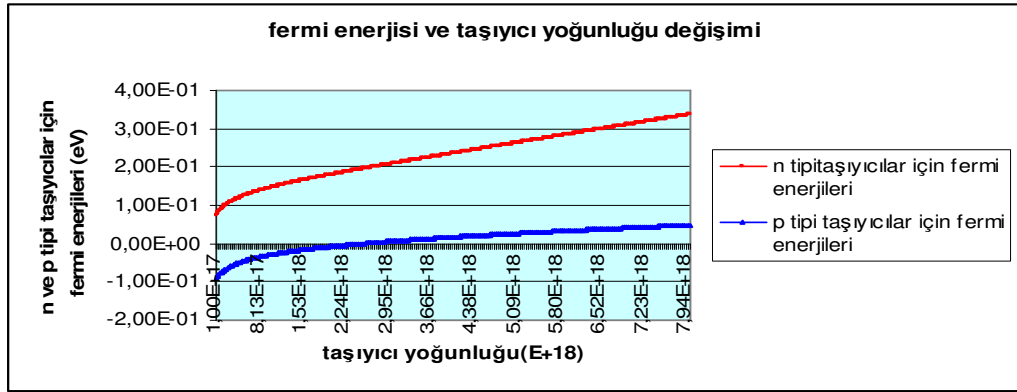
Tabaka Kalınlığı	Malzeme (Al)	Kenar İletim Bandı Enerji Değerleri	Kenar. Değerlik Bandı. Enerji Değerleri	
0.10000000E+03	0.56115438E+00	0.6184729	-0.4123153	Kaplama Tabakası
0.10000000E+03	0.26551149E-01	0.2099799	-0.1399866	SCH Tabakası
0.80000000E+02	0.21096921E+00	0.0961180	-0.0480590	Kuantum Kuyusu
0.10000000E+03	0.26551149E-01	0.2099799	-0.1399866	SCH Tabaka
0.10000000E+03	0.56115438E+00	0.6184729	-0.4123153	Kaplama Tabakası



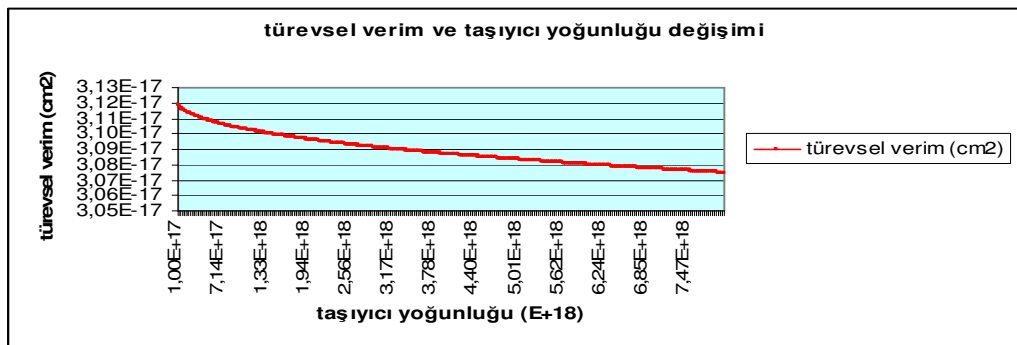
Şekil 3.5.2. InGaAs/AlGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

Çizelge 3.5.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı yoğunluğu ve Fermi enerji değerleri

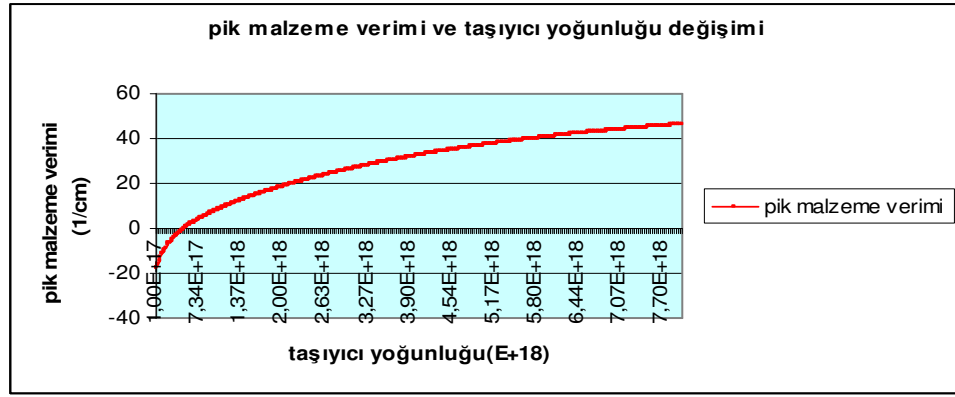
Taşıyıcı yoğunluğu (E+18)	n taşıyıcılar için Fermi enerji değerleri (eV)	p taşıyıcılar için Fermi enerji değerleri (eV)	Türevsel verimi (cm ²)	Malzeme pik verimi (1/cm)
1,00E+17	7,44E-02	-9,04E-02	3,12E-17	-17,58887904
1,20E+17	7,93E-02	-8,57E-02	3,12E-17	-15,69870488
1,40E+17	8,35E-02	-8,17E-02	3,12E-17	-14,08926474
1,59E+17	8,71E-02	-7,83E-02	3,12E-17	-12,68842677
1,79E+17	9,04E-02	-7,52E-02	3,12E-17	-11,44863827
1,99E+17	9,33E-02	-7,25E-02	3,11E-17	-10,33675959
2,19E+17	9,60E-02	-7,00E-02	3,11E-17	-9,32872975
2,39E+17	9,85E-02	-6,77E-02	3,11E-17	-8,406513871
2,58E+17	1,01E-01	-6,56E-02	3,11E-17	-7,5562561
2,78E+17	1,03E-01	-6,36E-02	3,11E-17	-6,767084513



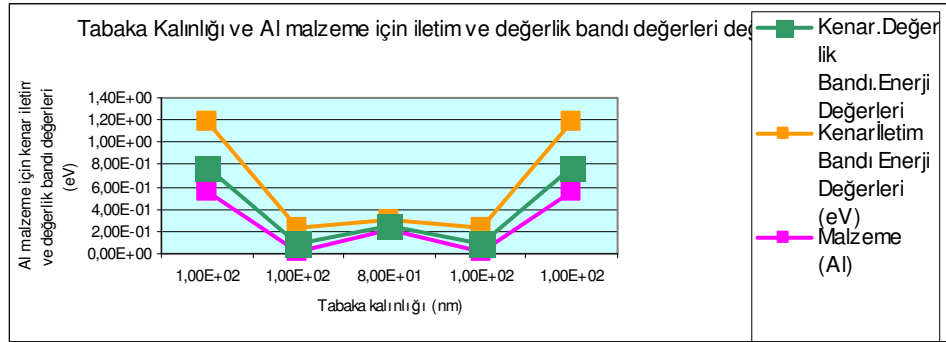
Şekil 3.5.3. InGaAs/AlGaAs malzeme için p ve n taşıyıcılar ve Fermi enerji değerleri



Şekil 3.5.4. InGaAs/AlGaAs malzeme için türevsel verim taşıyıcı yoğunluğu değişimi

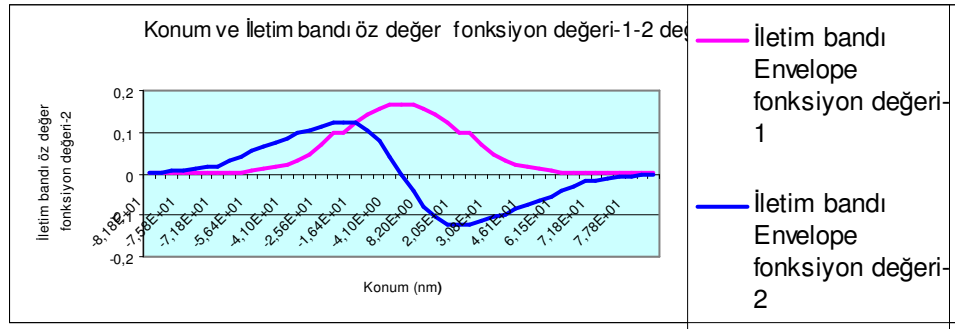


Şekil 3.5.5. InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı yoğunluğu ile değişen malzeme pik verimi (1/cm) değişimi



Şekil 3.5.6. InGaAs/AlGaAs malzeme için tabaka kınılığı ve Al malzeme için iletim ve değerlik bandı değerleri değişimi

Verim programı ile elde edilen verilerden; iletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışıma dalga boyu ve malzeme-mod verimi ilişkisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.

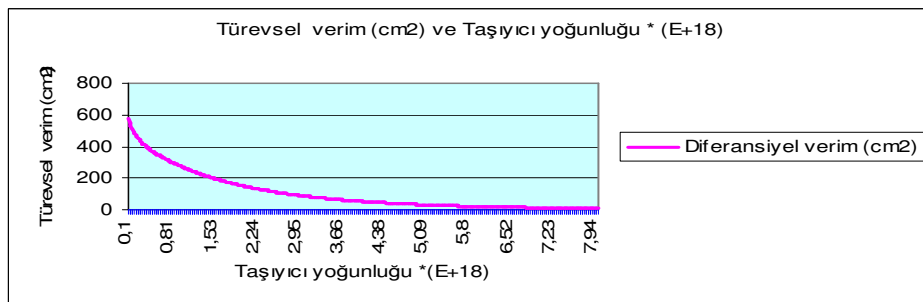


Şekil 3.5.7. InGaAs/AlGaAs malzeme için konum ve iletim bandı öz değer fonksiyon değeri-1-2 değerleri değişimi

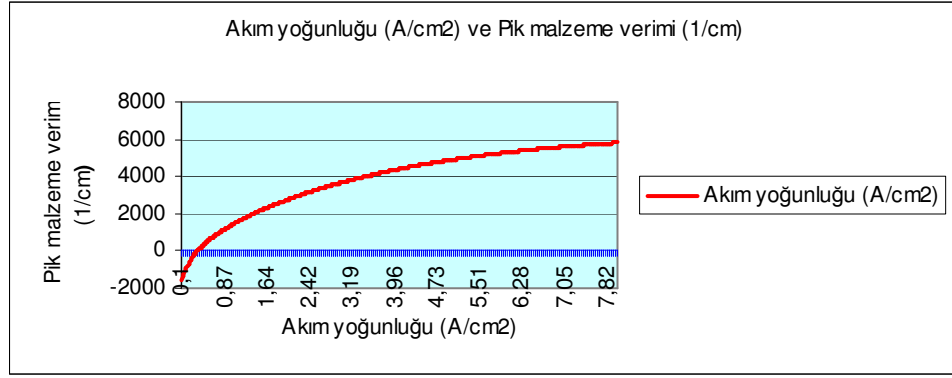
QW (ΔE_{gap}) in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik (ΔE_c ..ve.. ΔE_v) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır.

InGaAs/AlGaAs malzeme için;

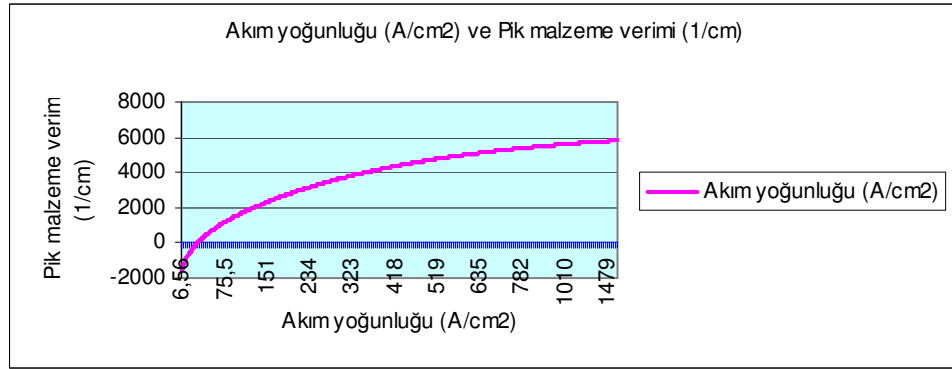
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = 0.63$$



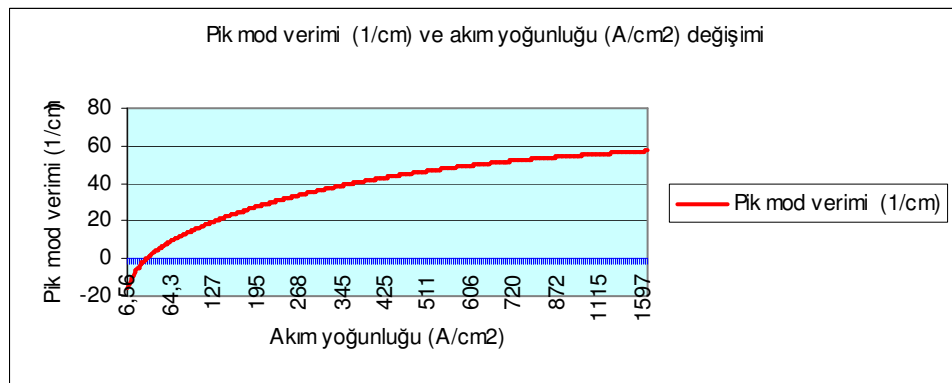
Şekil 3.5.8. InGaAs/AlGaAs malzeme türevsel verim (cm²) ve taşıyıcı yoğunluğu*(E+18)



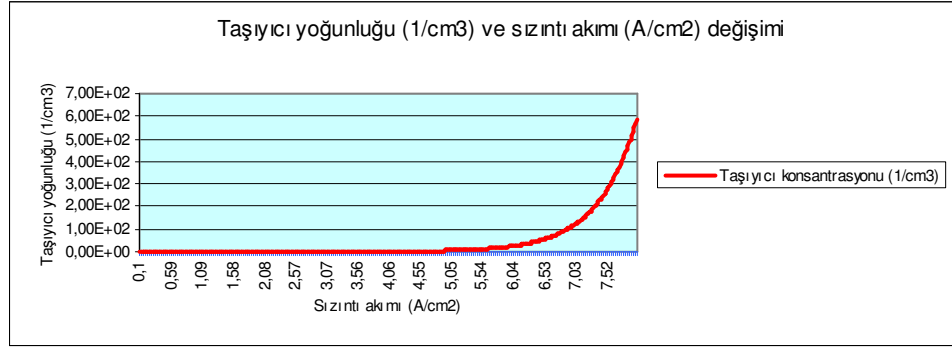
Şekil 3.5.9. InGaAs/AlGaAs malzeme için akım yoğunluğu (A/cm²) ve pik malzeme verimi(1/cm)



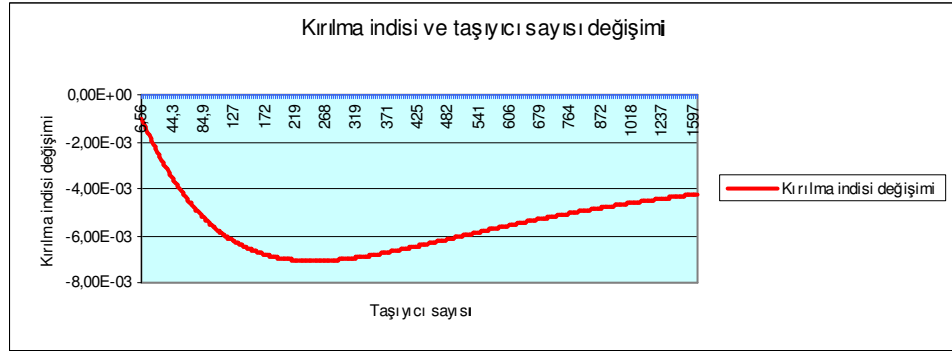
Şekil 3.5.10. InGaAs/AlGaAs malzeme için akım yoğunluğu (A/cm²) ve pik malzeme verimi (1/cm)



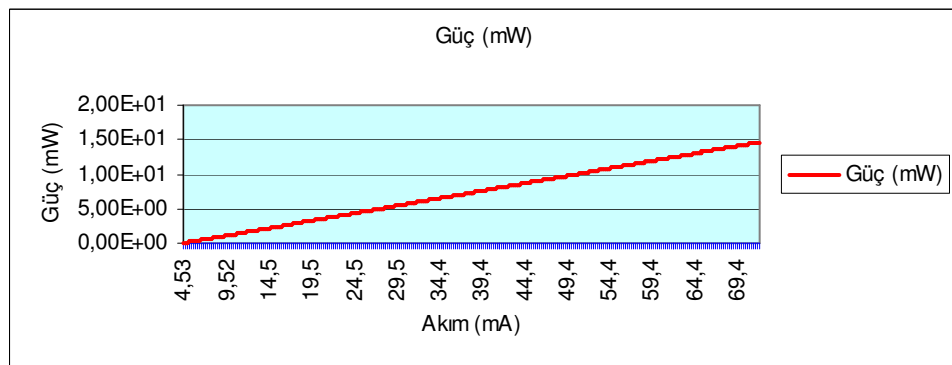
Şekil 3.5.11. InGaAs/AlGaAs malzeme için pik mod verimi (1/cm) ve akım yoğunluğu (A/cm²) değişimi



Şekil 3.5.12. InGaAs/AlGaAs malzeme için taşıyıcı yoğunluğu (1/cm³) ve sızıntı akımı(A/cm²) değişimi



Şekil 3.5.13. InGaAs/AlGaAs malzeme için kırılma indisi ve taşıyıcı sayısı değişimi



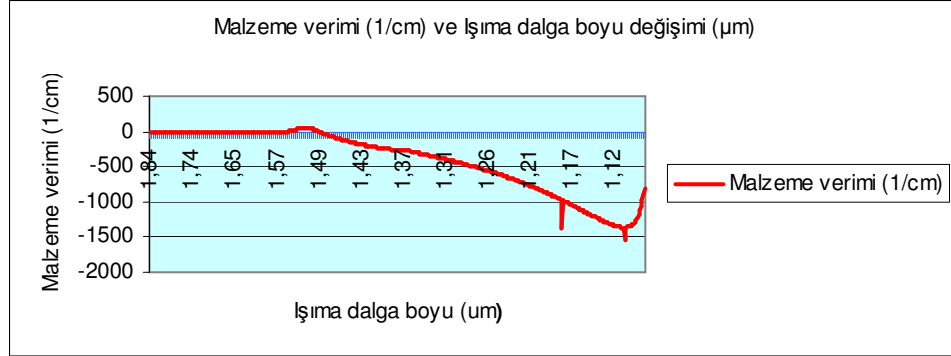
Şekil 3.5.14. InGaAs/AlGaAs malzeme için güç akım değişimi

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

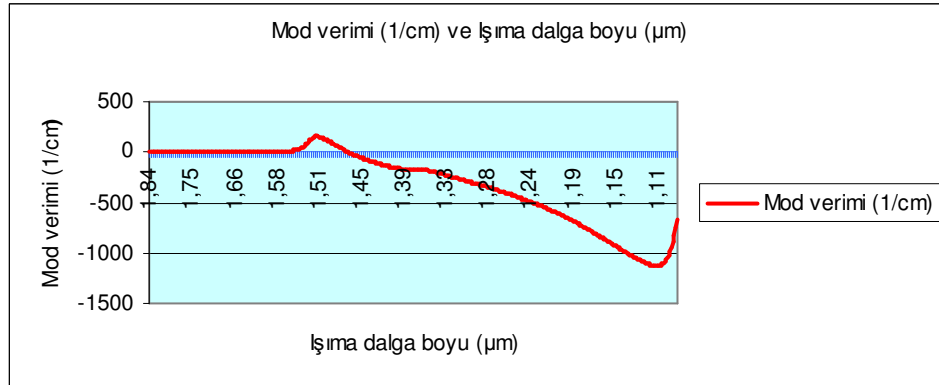
InGaAs/AlGaAs malzeme için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = \frac{15}{69,4 - 4,63} = 0.2358 = 23.58\ldots\%$$

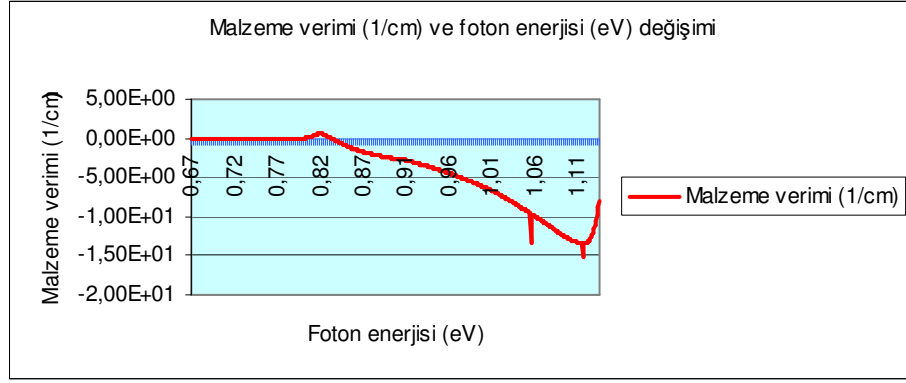
olarak bulunmuştur.



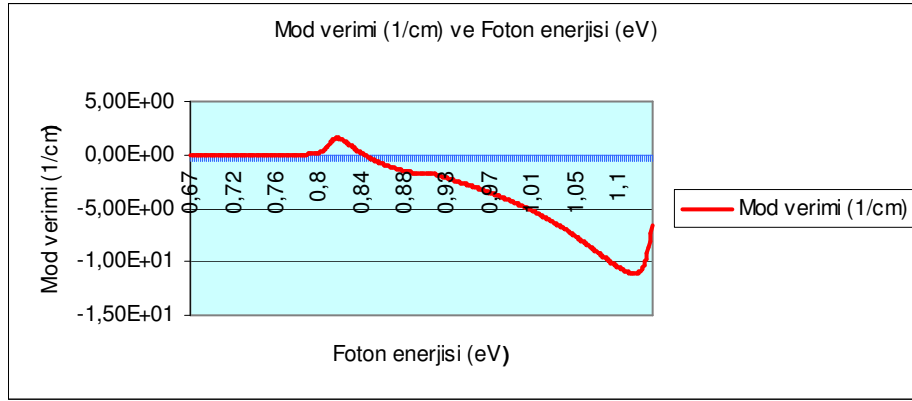
Şekil 3.5.15. InGaAs/AlGaAs malzeme için malzeme verimi (1/cm) ve Işıma dalga boyu değişimi (μm)



Şekil 3.5.16. InGaAs/AlGaAs malzeme için mod verimi ve ışıma dalga boyu değişimi



Şekil 3.5.17. InGaAs/AlGaAs malzeme için malzeme verimi ve foton enerji değişimi



Şekil 3.5.18. InGaAs/AlGaAs malzeme için mod verimi ve foton enerjisi değişimi

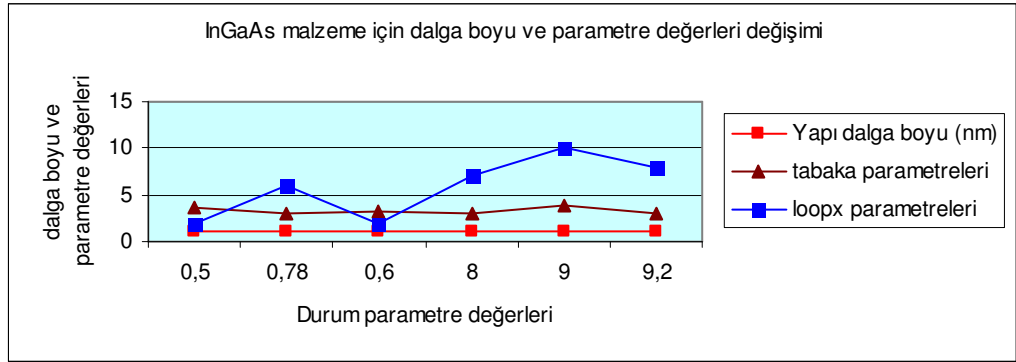
Çizelge 3.5.6. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

Uygun QWs sayısı	5
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.71
$J_{th} (A/cm^2)$	201.46 1.kontrol 106.28 2.kontrol
$I_{th} (mA)$	0.45 1.kontrol 0.24 2.kontrol
K faktörü değeri	0.16743 ns
Maksimum frekans	53.0708 GHz
Çalışma sıcaklığında λ at pik değeri (um)	1.50 um
Pik malzeme verimi (1/cm)	0.170376D+19 $1/cm^3$ yük yoğunluğu için 28.0530 1/cm

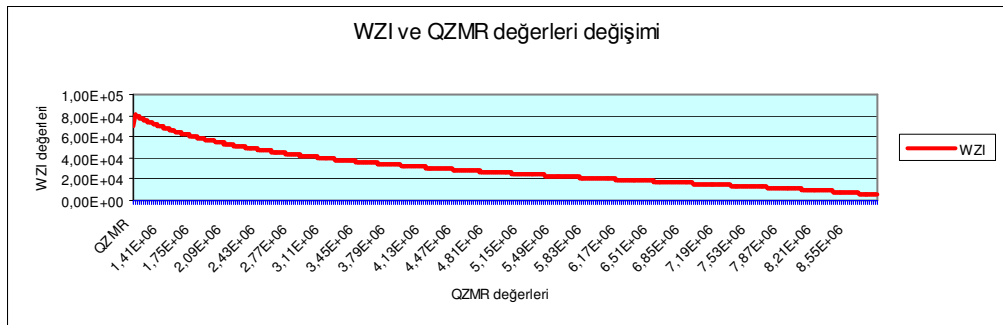
3.5.2 InGaAs/AlGaAs/AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Çizelge 3.5.7. AlGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerler çizelgesi

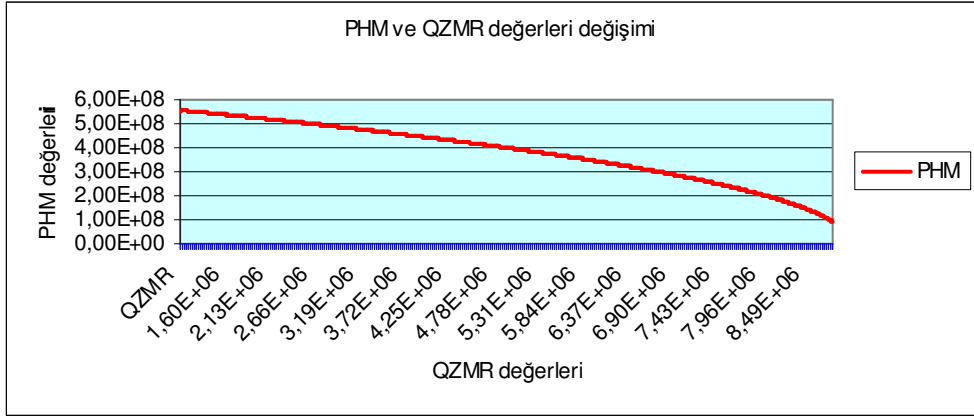
Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOPX Parametresi
AlGaAs	0.50	1.08	3.60	3	2	2
AlGaAs	0.78	1.02	3.02	4	2	6
AlGaAs	0.60	1.00	3.11	5	2	2
AlGaAs	8.0	1.06	3.01	5	2	7
AlGaAs	9.0	1.10	3.80	1	2	10
AlGaAs	9.2	1.11	3.06	2	6	8



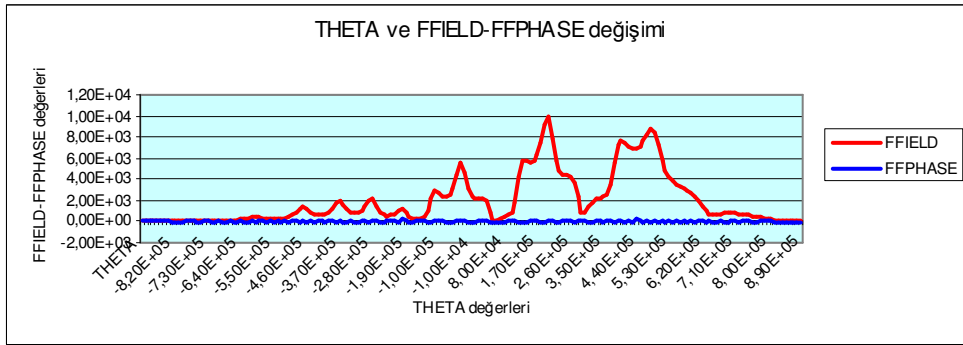
Şekil.3.5.19. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi



Şekil.3.5.20. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve WZI(kayıp parametresi) değerleri değişimi



Şekil.3.5.21. QZMR(ortalama kırılma indis)-PHM(faz integrali) grafiği



Şekil.3.5.22. THETA(uzak alandan sapma açısı) ve FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı)-FFPHASE (kırılma indisinin sanal kısmı) değişimi

QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 6.0 den $1.08 n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge 3.5.9' deki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için $PHM \leq 1.0$, $KM=6$ ve $IT=3$ olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 6.28 dir.

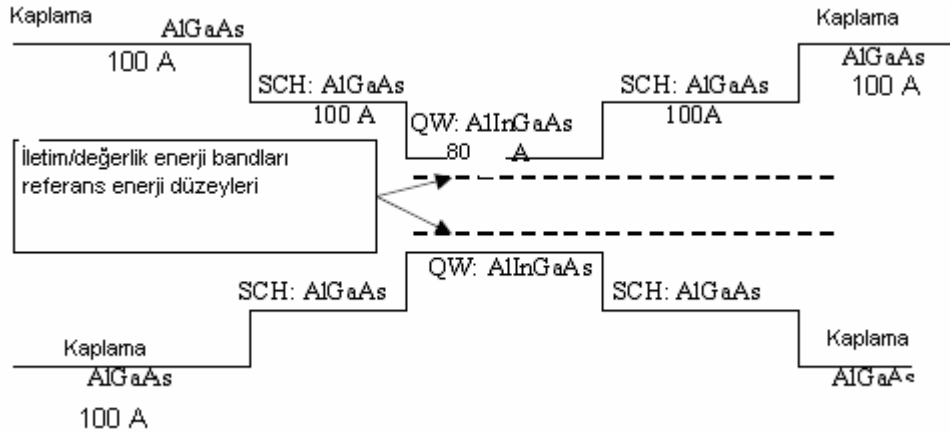
Çizelge 3.5.8. Dalga Kılavuzu çıktı değerleri

QZMR	TL(2)	PHM	WZR	WZI	QZR	QZI	THETA	FFIELD
1,08E+06	1,00E+08	5,47E+08	1,11E+06	6,91E+04	1,23E+06	1,53E+05	-9,00E+05	2,08E-16
1,09E+06	1,00E+08	5,57E+08	9,75E+05	8,02E+04	9,43E+05	1,56E+05	-8,90E+05	1,49E+00
1,10E+06	1,00E+08	5,56E+08	9,80E+05	7,98E+04	9,53E+05	1,56E+05	-8,80E+05	5,83E+00
1,11E+06	1,00E+08	5,56E+08	9,85E+05	7,94E+04	9,64E+05	1,56E+05	-8,70E+05	1,27E+01
1,12E+06	1,00E+08	5,56E+08	9,90E+05	7,89E+04	9,74E+05	1,56E+05	-8,60E+05	2,18E+01
1,13E+06	1,00E+08	5,55E+08	9,95E+05	7,85E+04	9,84E+05	1,56E+05	-8,50E+05	3,25E+01
1,14E+06	1,00E+08	5,55E+08	1,00E+06	7,80E+04	9,94E+05	1,56E+05	-8,40E+05	4,39E+01
1,15E+06	1,00E+08	5,54E+08	1,00E+06	7,76E+04	1,00E+06	1,56E+05	-8,30E+05	5,54E+01
1,16E+06	1,00E+08	5,54E+08	1,01E+06	7,72E+04	1,01E+06	1,56E+05	-8,20E+05	6,57E+01
1,17E+06	1,00E+08	5,54E+08	1,01E+06	7,66E+04	1,02E+06	1,56E+05	-8,10E+05	7,42E+01
1,18E+06	1,00E+08	5,53E+08	1,02E+06	7,63E+04	1,03E+06	1,56E+05	-8,00E+05	8,01E+01
1,19E+06	1,00E+08	5,53E+08	1,02E+06	7,59E+04	1,04E+06	1,56E+05	-7,90E+05	8,32E+01
1,20E+06	1,00E+08	5,53E+08	1,03E+06	7,55E+04	1,05E+06	1,55E+05	-7,80E+05	8,37E+01
1,21E+06	1,00E+08	5,52E+08	1,03E+06	7,51E+04	1,06E+06	1,55E+05	-7,70E+05	8,19E+01
1,22E+06	1,00E+08	5,52E+08	1,04E+06	7,47E+04	1,07E+06	1,55E+05	-7,60E+05	7,87E+01
1,23E+06	1,00E+08	5,52E+08	1,04E+06	7,43E+04	1,08E+06	1,55E+05	-7,50E+05	7,49E+01
1,24E+06	1,00E+08	5,51E+08	1,05E+06	7,39E+04	1,09E+06	1,55E+05	-7,40E+05	7,10E+01
1,25E+06	1,00E+08	5,51E+08	1,05E+06	7,34E+04	1,11E+06	1,55E+05	-7,30E+05	6,77E+01
1,26E+06	1,00E+08	5,51E+08	1,06E+06	7,31E+04	1,12E+06	1,55E+05	-7,20E+05	6,54E+01
1,27E+06	1,00E+08	5,50E+08	1,06E+06	7,28E+04	1,13E+06	1,55E+05	-7,10E+05	6,43E+01

3.6.1 $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ (Zemin: GaAs) malzeme için

Verim programı ile yapılan hesaplamalar

Tek kuantum kuyulu, iki ayrılmış hapisli çift tabakalı ve iki kaplama tabakalı bir $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için simülasyon Şekil (3.6.1)' deki gibidir.



Şekil 3.6.1. Çift yapılı AlInGaAs malzeme için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane program çıktıları dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa giriş değerleri Çizelge 3.6.1' deki gibidir.

Çizelge 3.6.1. Verim programı için programa giriş değerleri

Tabaka	λ (nm)	Zor	Kalınlık(Å)
QW ($Al_yIn_xGa_{1-x-y}As$)	0.97	-0.014	80
SCH ($Al_zGa_{1-z}As$)	0.76		100
Kaplama ($Al_zGa_{1-z}As$)	0.52		100

Çizelge 3.6.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	$Al_yIn_xGa_{1-x-y}As/Al_zGa_{1-z}As/GaAs$ (Zemin: GaAs)
Malzeme bileşenleri	$Al_yIn_xGa_{1-x-y}As/Al_zGa_{1-z}As/GaAs$
Giriş Parametreleri	QW' in çoğunluk malzemesinin dalga boyu, x ve y değerleri; QW' in iletim ve değerlik bandının engel ve kaplama, kalınlık değerleri
Işıma dalga boyu	808nm-980nm
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı
Dalga boyu ile x , y ve z denklem; <i>AlInGaAs malzeme için;</i> $E_g(x, y) = 1.424 + 1.455y + 0.191y^2 - 1.614x + 0.55x^2 + 0.043xy$ $a(x, y) = (1 - x - y)a(InAs) + xa(AlAs) + ya(GaAs)$ $E_g(\Gamma) = 1.424 + 1.247x(eV).....x \in [0.4.....300..K..de$ $= 1.519 + 1.447x - 0.15x^2(eV).....x \in [0.4.....0.....K..de$	

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışıma dalga boyu ile ilgilidir. Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu 1.24/boşluk bandı enerjisinden elde edilebilir.

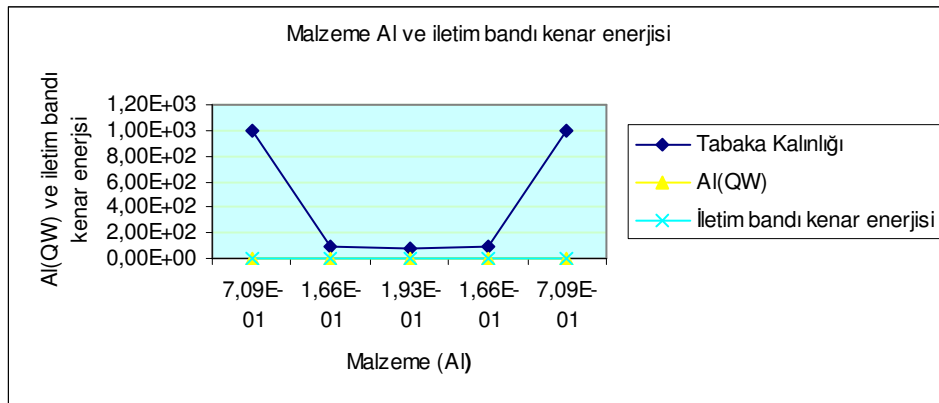
Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu,

verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinin, Şekil 3.6.2 ve Şekil 3.6.3' den de görülebileceği gibi birbirleri ile hemen hemen uyum içinde olduğu anlaşılmaktadır.

Çizelge 3.6.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri

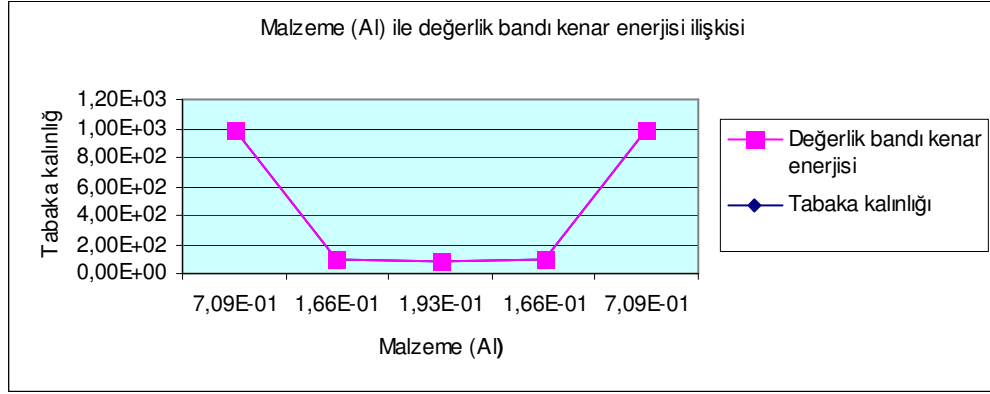
Tabaka Kalınlığı	Al(Engel)	Al(QW)	İletim bandı kenar enerjisi	
1,00E+03	7,09E-01	0	0,7522601	Kaplama tabakası
1,00E+02	1,66E-01	0	0,2401954	SCH tabaka
8,00E+01	1,93E-01	0,0985311	0,0868082	Kuantum kuyusu
1,00E+02	1,66E-01	0	0,2401954	SCH tabaka
1,00E+03	7,09E-01	0	0,7522601	Kuantum kuyusu



Şekil 3.6.2. AlInGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve iletim bandı enerji değerleri

Çizelge 3.6.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{Al}_y\text{In}_x\text{Ga}_{1-x-y}\text{As}/\text{Al}_z\text{Ga}_{1-z}\text{As}/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri

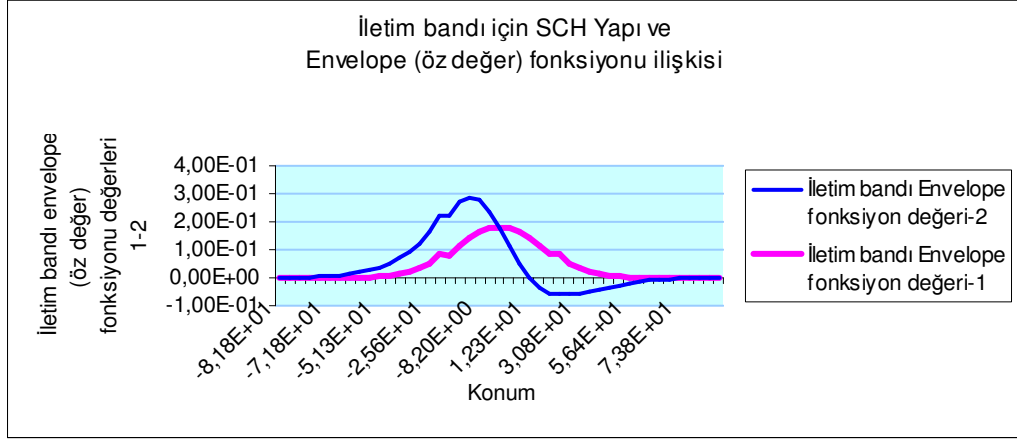
Tabaka Kalınlığı	Al(Engel)	Al(QW)	Değerlik bandı kenar enerjisi	
1,00E+03	7,09E-01	0	-0,3540048	Kaplama tabakası
1,00E+02	1,66E-01	0	-0,1130331	SCH tabaka
8,00E+01	1,93E-01	0,0985311	-0,0434041	Kuantum kuyusu
1,00E+02	1,66E-01	0	-0,1130331	SCH tabaka
1,00E+03	7,09E-01	0	-0,3540048	Kuantum kuyusu



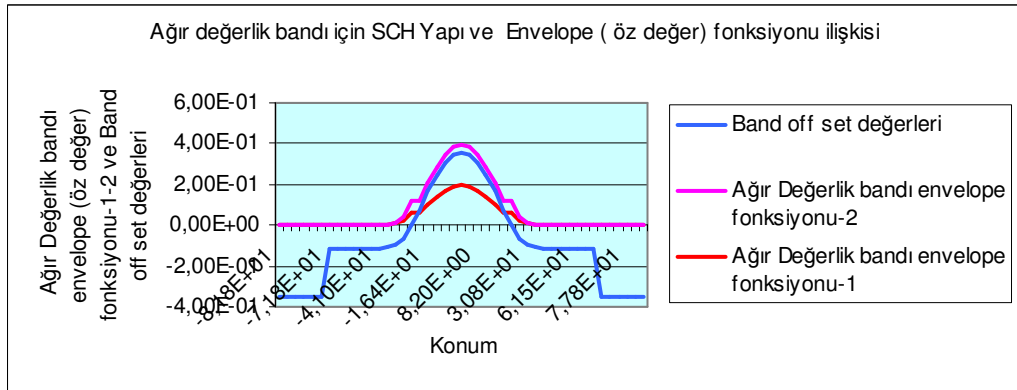
Şekil 3.6.3. AlInGaAs malzeme için tabaka kalınlığı ve değerlik bandı enerji değerleri

Verim programı ile elde edilen verilerden; İletim ve değerlik bandı, ağır ve hafif değerlik bantları SCH yapıları ve öz değer fonksiyonu arasındaki bağlantıyı açıklayan, türevsel ve pik malzeme verimi ile pik malzeme verimi ve taşıyıcı yoğunluğu ilişkisini açıklayan, pik malzeme ve mod verimi ile akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, sızıntı akımı' nın taşıyıcı yoğunluğu' na bağlılığını gösteren, taşıyıcı sayısı ve kırılma indisi değişimi ilişkisini gösteren, güç-akım bağlantısını açıklayan, frekans-akım yoğunluğu arasındaki bağlantıyı gösteren, ışınım dalga boyu ve malzeme-mod verimi

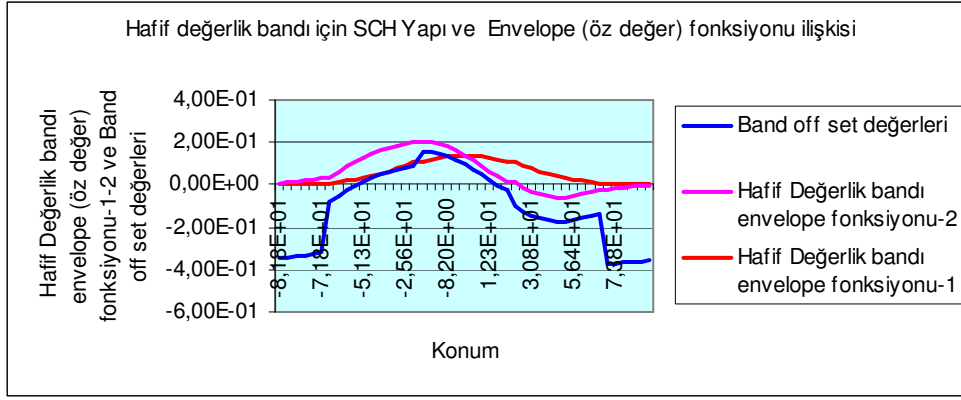
ilişisini gösteren ve foton enerjisi ile mod-malzeme ilişkisini açıklayan grafikler aşağıda çizilmiştir.



Şekil 3.6.4. AlInGaAs malzeme için iletim bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi



Şekil 3.6.5. AlInGaAs malzeme için ağır değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi

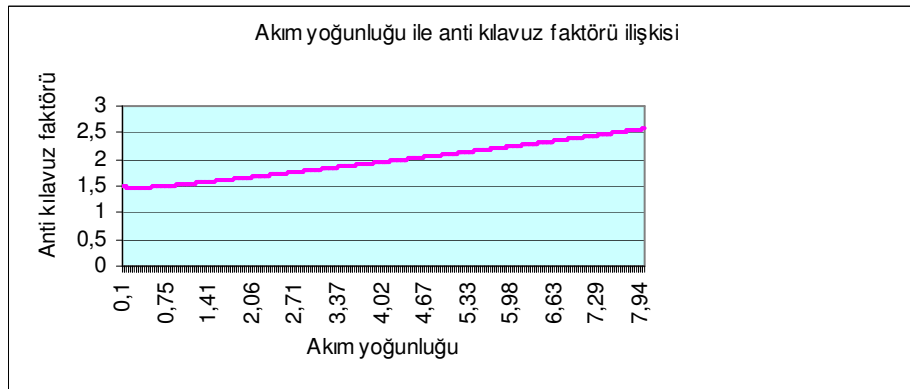


Şekil 3.6.6. AlInGaAs malzeme için hafif değerlik bandı için SCH yapı ve öz değer fonksiyonu ilişkisi

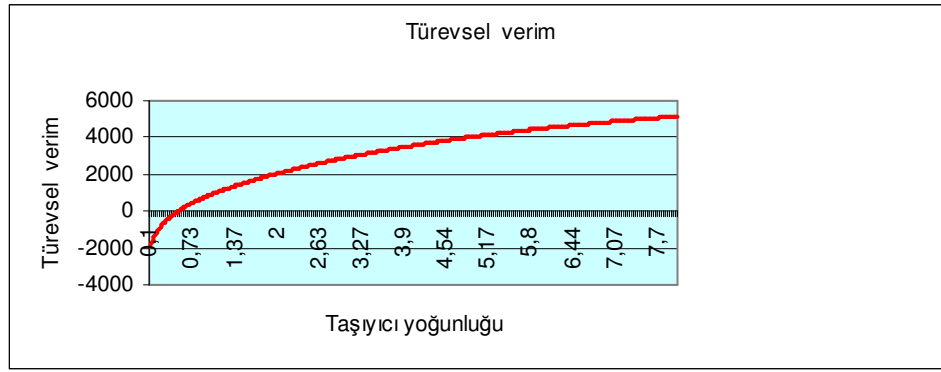
$QW (\Delta E_{gap})$ in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik ($\Delta E_c \dots ve \dots \Delta E_v$) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır

AlInGaAs/AlGaAs malzeme için;

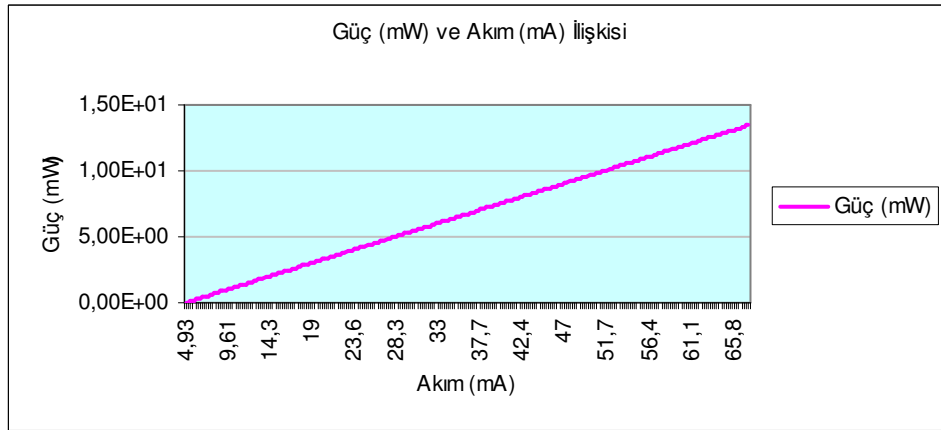
$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = 2.1$$



Şekil 3.6.7. AlInGaAs malzeme akım yoğunluğu ile anti kılavuz faktörü ilişkisi



Şekil 3.6.8. AlInGaAs malzeme için türevsel verim değişimi



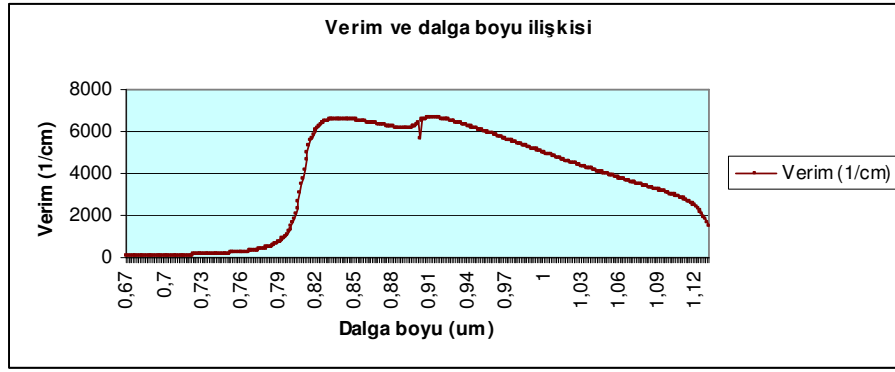
Şekil 3.6.9. Güç (mW) ve Akım (mA) değişimi

Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P / \Delta I$ ile gösterilir.

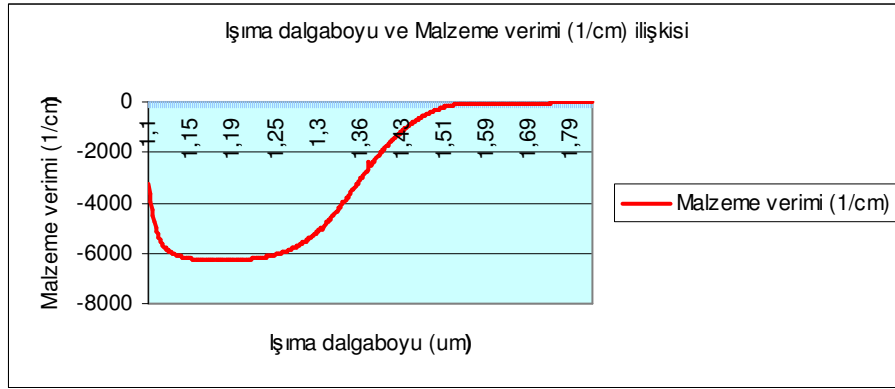
AlGaAs malzeme için;

$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = 25,00$$

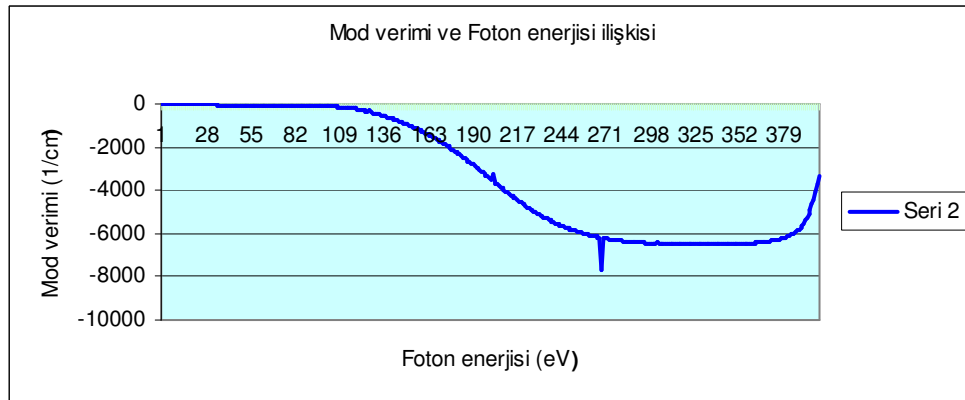
olarak bulunmuştur.



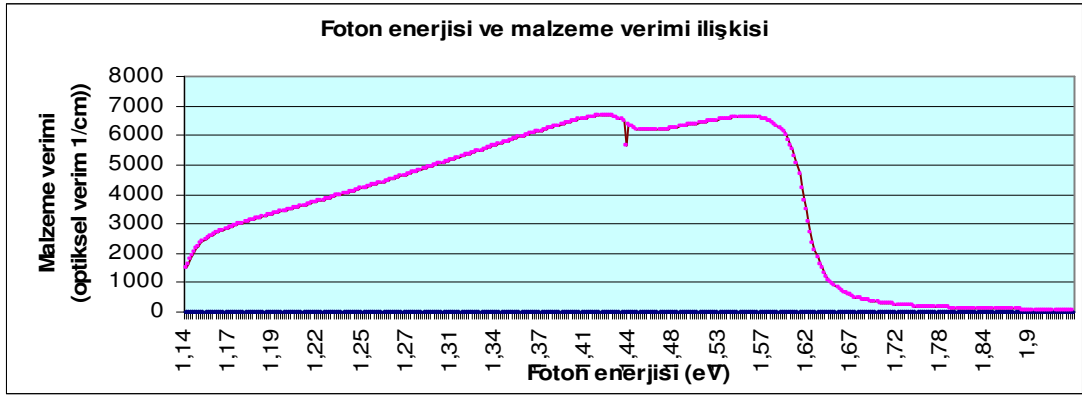
Şekil 3.6.10. Işıma dalga boyu ve mod verimi değişimi



Şekil 3.6.11. Işıma dalga boyu ve malzeme verimi değişimi



Şekil 3.6.12. Mod verimi ve foton enerjisi değişimi



Şekil 3.6.13. Malzeme verimi ve foton enerjisi değişimi

Çizelge 3.6.5. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için InGaAs/AlGaAs malzeme için elde edilen karakteristik değerler

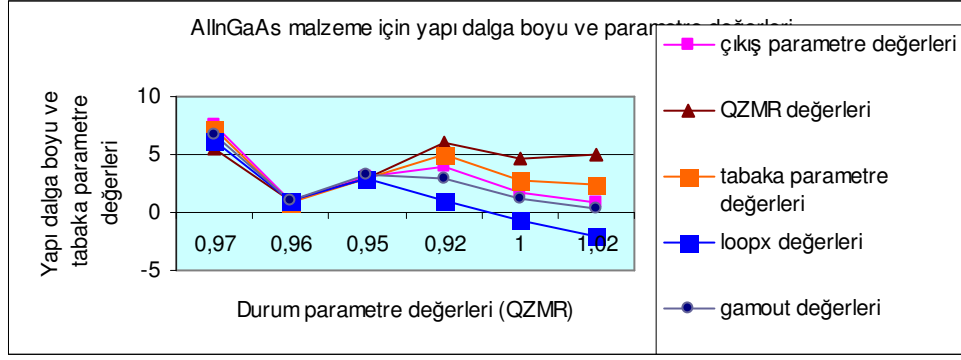
QWs sayısı	1
Verim eğimi (%)	21.52
J_{th} (A/cm^2)	218.92 1.kontrol 97.77 2.kontrol
I_{th} (mA)	4.92 1.kontrol 2.19 2.kontrol
K faktörü değeri	0.16650 (ns)
Maksimum frekans	53.3688 GHz
Çalışma sıcaklığında λ at pik değeri (um)	1.54 um
Pik malzeme verimi (1/cm)	0.297093D+19 $1/cm^3$ yük yoğunluğu için 28.0530 1/cm

3.6.2. AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1-zAs/GaAs (Zemin: GaAs) malzeme için

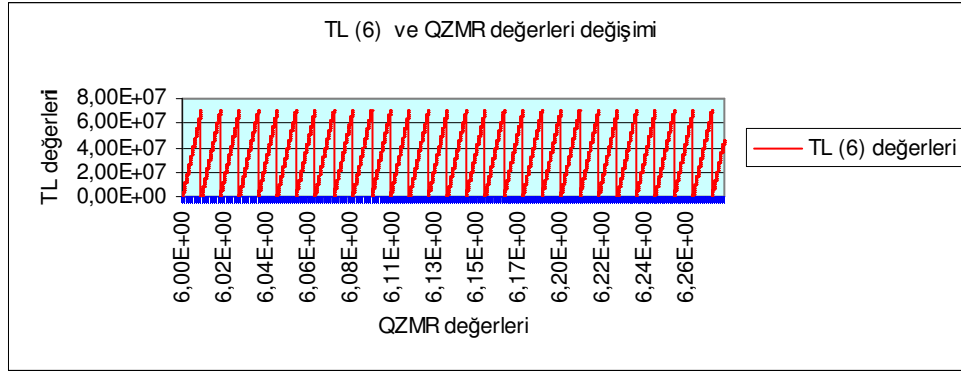
Dalga Kılavuzu programı ile yapılan hesaplamalar

Çizelge 3.6.6. AlInGaAs malzeme için Dalga Kılavuzu programı ile elde edilen parametre değerler tablosu

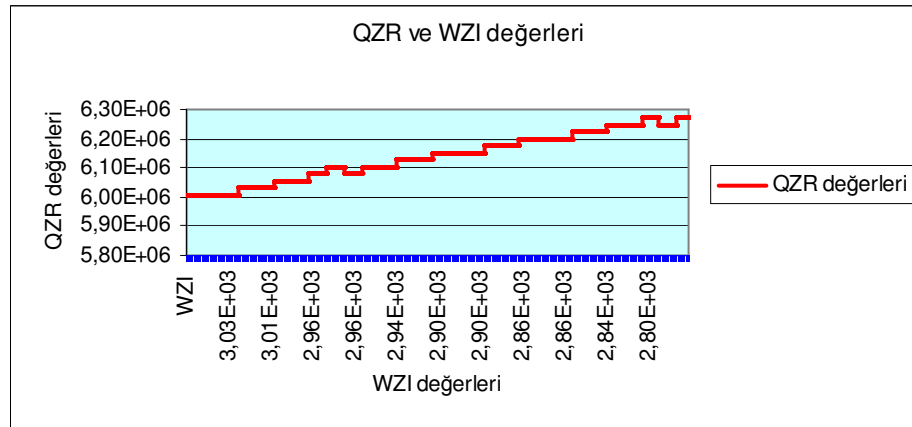
Malzeme	Durum parametresi QZMR	Yapı Dalga Boyu (um)	Tabaka Parametresi	Çıkış Parametresi QZRO	GAMOUT Parametresi GAMOUT LAYGAM	LOOP X Parametresi
AlInGaAs	5.20	0.97	3.04	3	6	2
AlInGaAs	7.60	0.96	3.02	4	6	6
AlInGaAs	5.60	0.95	2.94	6	2	2
AlInGaAs	7.2	0.92	2.88	5	2	7
AlInGaAs	6.2	1.00	2.90	1	2	8
AlInGaAs	6.8	1.02	3.21	3	6	4



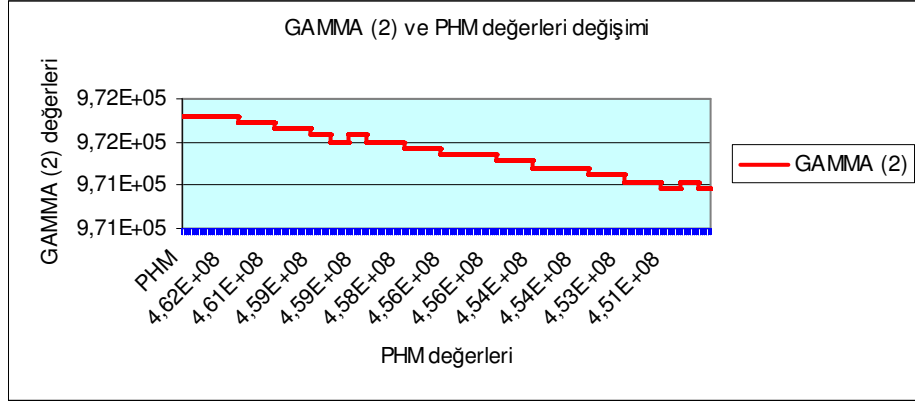
Şekil.3.6.14. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve dalga boyu-tabaka parametresi ilişkisi



Şekil.3.6.15. QZMR(ortalama kırılma indisi) ve TL-6 (kalınlık parametresi) değerleri değişimi



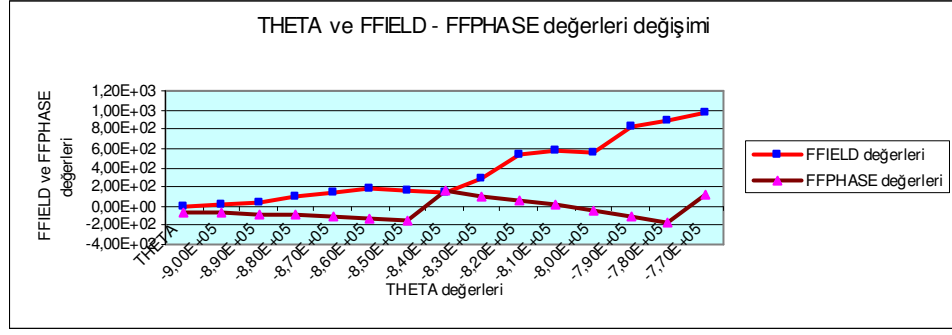
Şekil.3.6.16. QZR(kırılma indisinin gerçek kısmının karesi) ve WZI(kırılma indisinin sanal kısmının karesi)değerleri



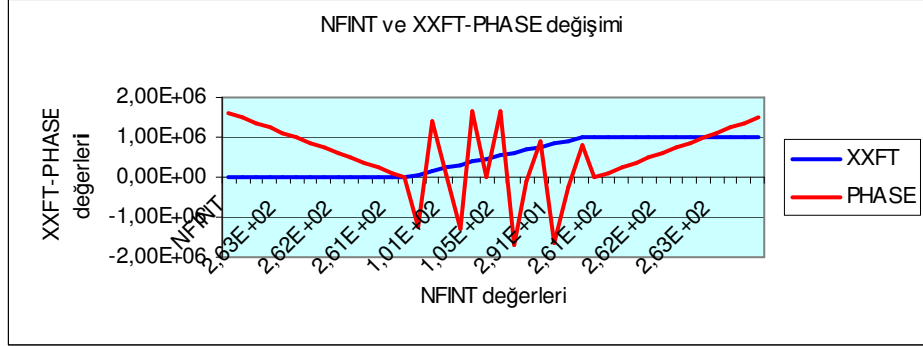
Şekil.3.6.17. GAMMA -2(hapis faktörü) – PHM(faz integrali) grafiği

Çizelge 3.6.7.Dalga Kılavuzu program çıktı değerleri

THETA	FFIELD	FFPHASE	XXFT	NFINT	PHASE	NFREAL	NFIMAG
-9,00E+05	1,42E-15	-7,52E+01	-2,60E+03	2,64E+02	1,62E+06	-1,55E+03	5,06E-02
-8,90E+05	1,03E+01	-7,70E+01	-2,40E+03	2,64E+02	1,49E+06	-1,40E+03	8,26E-02
-8,80E+05	4,14E+01	-8,23E+01	-2,20E+03	2,64E+02	1,37E+06	-1,19E+03	1,11E-01
-8,70E+05	9,16E+01	-9,09E+01	-2,00E+03	2,63E+02	1,25E+06	-9,20E+02	1,34E-01
-8,60E+05	1,47E+02	-1,03E+02	-1,80E+03	2,63E+02	1,12E+06	-6,10E+02	1,50E-01
-8,50E+05	1,75E+02	-1,21E+02	-1,60E+03	2,63E+02	9,96E+05	-2,71E+02	1,60E-01
-8,40E+05	1,52E+02	-1,50E+02	-1,40E+03	2,63E+02	8,72E+05	8,01E+01	1,62E-01
-8,30E+05	1,43E+02	1,59E+02	-1,20E+03	2,62E+02	7,47E+05	4,27E+02	1,56E-01
-8,20E+05	2,87E+02	1,05E+02	-1,00E+03	2,62E+02	6,23E+05	7,54E+02	1,43E-01
-8,10E+05	5,32E+02	6,60E+01	-8,00E+02	2,62E+02	4,98E+05	1,04E+03	1,24E-01
-8,00E+05	5,76E+02	2,40E+01	-6,00E+02	2,62E+02	3,74E+05	1,29E+03	9,81E-02
-7,90E+05	5,46E+02	-3,72E+01	-4,00E+02	2,61E+02	2,49E+05	1,47E+03	6,81E-02
-7,80E+05	8,16E+02	-1,01E+02	-2,00E+02	2,61E+02	1,25E+05	1,58E+03	3,48E-02
-7,70E+05	8,84E+02	-1,62E+02	-2,08E-13	2,61E+02	2,28E-10	1,61E+03	6,43E-17
-7,60E+05	9,67E+02	1,21E+02	7,50E+04	1,21E+02	-1,27E+06	-6,62E+02	-8,79E-02
-7,50E+05	1,22E+03	4,72E+01	1,50E+05	1,01E+02	1,41E+06	-7,79E+02	6,34E-02
-7,40E+05	1,21E+03	-3,78E+01	2,25E+05	1,48E+02	4,47E+04	1,21E+03	9,47E-03
-7,30E+05	1,54E+03	-1,23E+02	3,00E+05	2,91E+01	-1,31E+06	-3,56E+02	-4,05E-02
-7,20E+05	1,53E+03	1,42E+02	3,75E+05	6,41E+01	1,67E+06	-7,79E+02	1,84E-02
-7,10E+05	1,85E+03	4,72E+01	4,50E+05	1,05E+02	1,87E+04	1,02E+03	3,35E-03
-7,00E+05	1,98E+03	-5,97E+01	5,25E+05	3,07E+00	1,63E+06	-1,68E+02	5,11E-03
-6,90E+05	2,10E+03	-1,64E+02	6,00E+05	7,94E+01	-1,72E+06	-8,82E+02	-1,24E-02
-6,80E+05	2,62E+03	8,13E+01	6,75E+05	1,05E+02	-9,40E+04	1,01E+03	-1,67E-02
-6,70E+05	2,65E+03	-3,72E+01	7,50E+05	2,91E+01	9,00E+05	2,97E-01	5,40E-02
-6,60E+05	3,52E+03	-1,54E+02	8,25E+05	1,43E+02	-1,64E+06	-1,15E+03	-3,28E-02
-6,50E+05	2,98E+03	9,16E+01	9,00E+05	1,59E+02	-2,53E+05	1,14E+03	-5,38E-02
-6,40E+05	2,33E+03	-6,03E+01	9,75E+05	1,31E+02	7,77E+05	2,45E+02	1,12E-01
-6,30E+05	2,27E+03	1,63E+02	1,00E+06	2,61E+02	2,48E-08	1,61E+03	6,99E-15



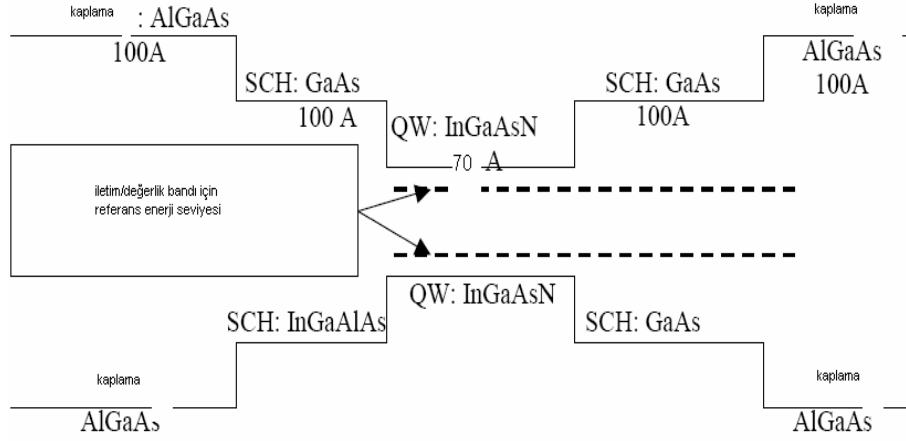
Şekil 3.6.18. THETA(uzak alandan sapma açısı) ve FFIELD(kırılma indisinin gerçek kısmı parametresi)-FFPHASE(kırılma indisinin sanal kısım parametresi) değişimi



Şekil 3.6.19. NFINT(yakın alanın ışık şiddeti büyüklük parametresi) ve XXFT(yakın alanın konum parametresi)-PHASE(yansıtıcılık parametresi) değişimi

QZMR değeri, minimum kırılma indisinin karesi ($n_{\min}^2$) ile maksimum kırılma indisinin karesi $n_{\max}^2$ arasında değer almalıdır. Buna göre QZMR değeri, $n_{\min}^2$ değeri 5.2 den 1.02 $n_{\max}^2$ değerine kadar bir çevrim yapar. QZMR çevriminden sonra Çizelge 3.6.7' deki sonuçlar elde edilir. TE modunun QZMR pik değerine ulaşabilmek için $PHM < 1.0$, $KM=6$ ve $IT=3$ olmalıdır. Bu kriterlere göre, TE modu için QZMR değeri 5.82 dir

3.7.1 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}_x\text{N}_{1-x}/\text{GaAs}$ malzeme için VERİM programı ile yapılan hesaplamalar



Şekil 3.7.1. Tek kuantum kuyulu yapı için enerji bant diyagramı

Verim programı ile hesaplama yaparken yapılacak ilk işlem, malzeme bileşenlerini ve her bir tabakanın bant kenarlarının enerjilerini hesaplamaktır. Bunun için ilk önce ışınım dalga boyunun, QW-SCH zorunun, kalınlığının ve kaplama tabakalarının bilinmesi gerekir. Bu parametreler programa girildikten sonra program iki tane program çıktıları dosyası oluşturur. Bunlar malzeme bileşenlerini, iletim bant kenarı enerjilerini, değerlik bant kenarı enerjilerini ihtiva eden cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyalarıdır. Programa giriş değerleri çizelge 3.7.1' deki gibidir.

Çizelge 3.7.1. Verim programı için programa giriş parametre değerleri

Tabaka	λ um	Zor	Kalınlık (Å)
QW ($\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	1.30	-0.018	70
SCH ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	0.84	-	100
Kaplama ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_{1-y}$)	0.60	-	100

Çizelge 3.7.2. Verim programı için kullanılan malzeme bileşenleri ve denklemler

Malzeme	InyGa1-yAsxN1-x (Zemin: GaAs)
Malzeme bileşenleri	InyGa1-yAsxN1-x
Giriş Parametreleri	Dalga boyları ve zor
Işıma dalga boyu	1.3 μ m
Ekran çıktısı	QW boşluk bandı, zor vektörü, zor
Dalga boyu ile x denklem; <i>InGaAsN malzeme için:</i> $Q(x, y) = xyQ(GaAs) + x(1-y)Q(GaN) + (1-x)yQ(InAs) + (1-x)^*(1-y)^*Q(InN)$ $E_g(GaAs) = 1.424 \quad E_g(InAs) = 0.355 \quad E_g(GaN) = 3.44 \quad E_g(InN) = 1.95$	

Farklı malzeme sistemleri için, dalga boyu farklı değerler alır. QW dalga boyu en büyük dalga boyuna sahiptir. Daha sonra engel ve kaplama dalga boyları gelir. QW dalga direkt olarak ışıma dalga boyu ile ilgilidir. Programa giriş dalga boyu boşluk enerji bandındaki çoğunluk malzemesi ile uyumlu olmalıdır. Dalga boyu 1.24/boşluk bandı enerjisinden elde edilebilir.

Verim programı için son basamak ise simülasyon basamağıdır. Daha önce hesaplanan malzeme bileşenleri, enerji seviyeleri, malzeme kaybı, auger sabiti v.b parametreler ile program eşik akımı, eşik akım yoğunluğu, verimin eğimi, optik kazanç ve mod kazancını foton enerjisinin ve dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplar.

Verim programı ile In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-x)/GaAs malzeme için, cbanteg.dat ve vbanteg.dat dosyaları ile elde edilen verilerden kenar iletim bandı, kenar değerlik bandı ve tabaka kalınlıkları verilerinden band-offset değerleri elde edilmiş ve deneysel değerler ile karşılaştırılmıştır.

Çizelge 3.7.3. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen iletim bandı karakteristik değerleri

Tabaka Kalınlığı	Malzeme (Ga)	Malzeme (Al)	Kenar. İletim Bandı Enerji Değerleri	
0.10000000E+03	0.51185140E+00	0.0000000	0.7789743	Kaplama Tabakası
0.10000000E+03	0.10000000E+01	-0.0064845	0.3656410	SCH Tabakası
0.70000000E+02	0.99457830E+00	0.2663635	0.0980229	Kuantum Kuyusu
0.10000000E+03	0.10000000E+01	-0.0064845	0.3656410	SCH Tabaka
0.10000000E+03	0.51185140E+00	0.0000000	0.7789743	Kaplama Tabakası

Çizelge 3.7.4. Tasarlanabilecek kuantum lazeri için $\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ malzeme için elde edilen değerlik bandı karakteristik değerleri

Tabaka Kalınlığı	Malzeme (Ga)	Malzeme (Al)	Kenar. Değerlik Bandı Enerji Değerleri	
0.10000000E+03	0.51185140E+00	0.0000000	-0.3338462	Kaplama Tabakası
0.10000000E+03	0.10000000E+01	-0.0064845	-0.1567033	SCH Tabakası
0.70000000E+02	0.99457830E+00	0.2663635	-0.0490115	Kuantum Kuyusu
0.10000000E+03	0.10000000E+01	-0.0064845	-0.1567033	SCH Tabaka
0.10000000E+03	0.51185140E+00	0.0000000	-0.3338462	Kaplama Tabakası

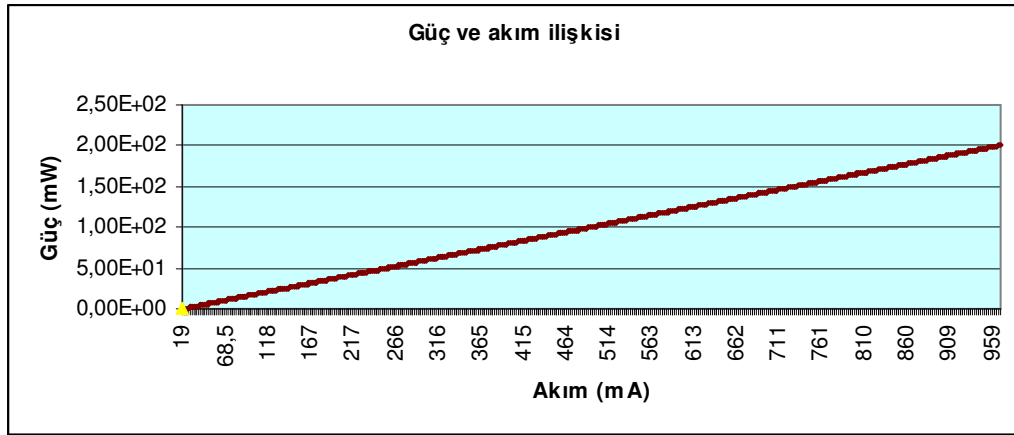
Bu bölümde deneysel değerler ile karşılaştırma yapılacak iki hesaplama yapılmıştır.

$\text{QW } (\Delta E_{gap})$ in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik $(\Delta E_c \dots ve \dots \Delta E_v)$ bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı bant-offset oranı olarak adlandırılır.

$\text{In}(y)\text{Ga}(1-y)\text{As}(x)\text{N}(1-x)/\text{GaAs}$ malzeme için;

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta E_v} = 2.39$$

Verim programının pi çıktı dosyasından, güç-akım ilişkisinin grafiğinin çiziminden verim eğimini bulabiliriz. Bu değer diğer deneysel değerler ile karşılaştırılması sonuç bölümündedir.



Şekil 3.7.2. Güç (mW) ve Akım (mA) değişimi

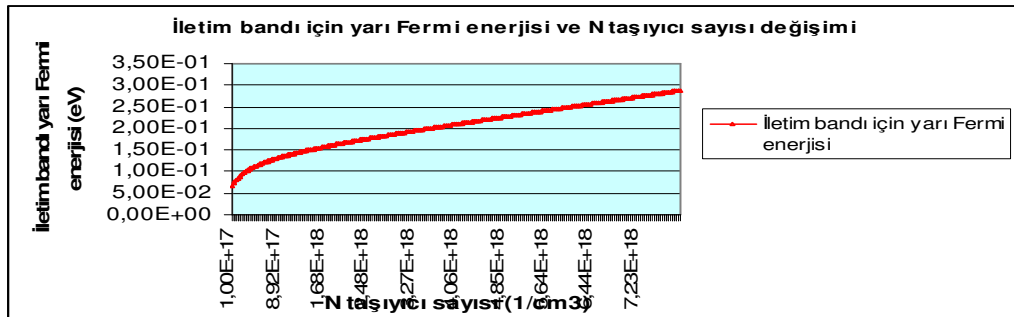
Eğimin verimi, L-I eğrisinden elde edilebilir. $\Delta P/\Delta I$ ile gösterilir.

In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-x)/ GaAs malzeme için;

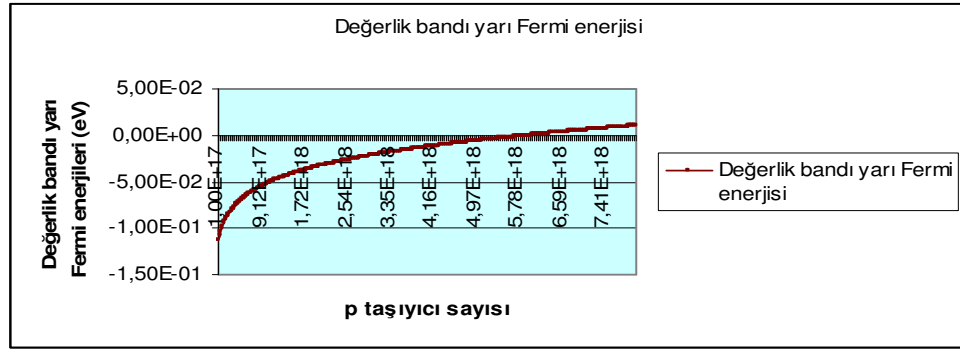
$$\frac{\Delta P}{\Delta I} = 20,85$$

olarak bulunmuştur.

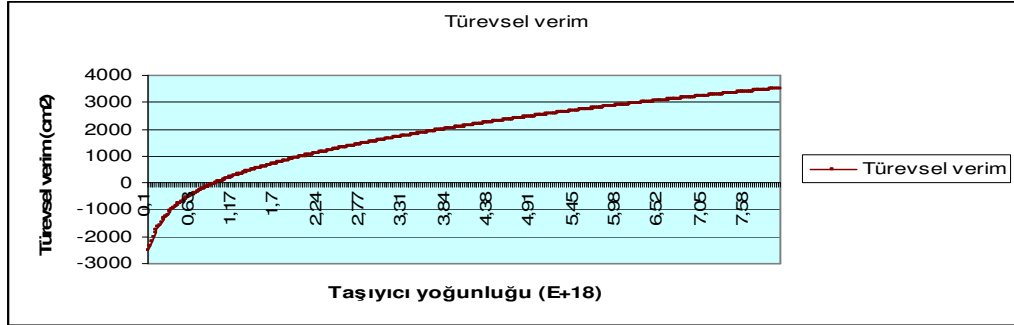
Verim programı ile elde edilen verilerin birbirleriyle nasıl değiştiğini, uygun değerler girilerek hesaplamaları yapılmış kuantum lazer tasarım verilerinin grafikleri aşağıda çizilmiştir.



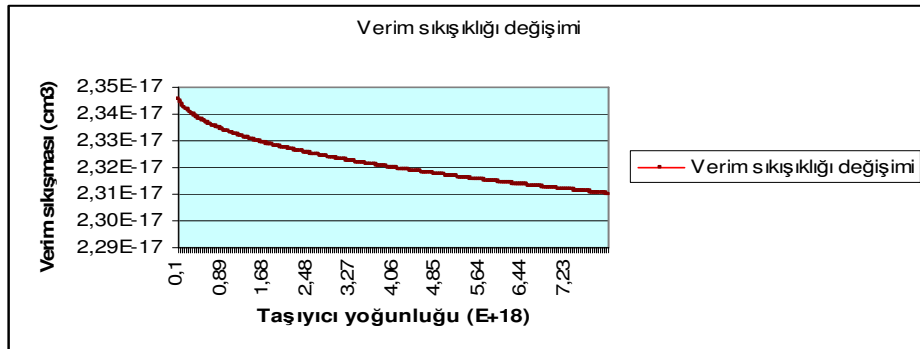
Şekil.3.7.3. İletim bandı için yarı Fermi enerji düzeyinin n taşıyıcı sayısına göre değişimi



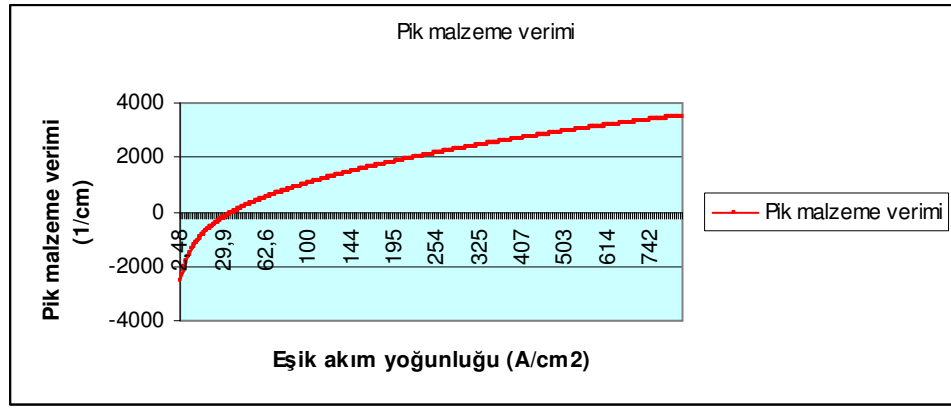
Şekil.3.7.4. Değerlik bandı için yarı Fermi enerji düzeyinin p taşıyıcı sayısına göre değişimi



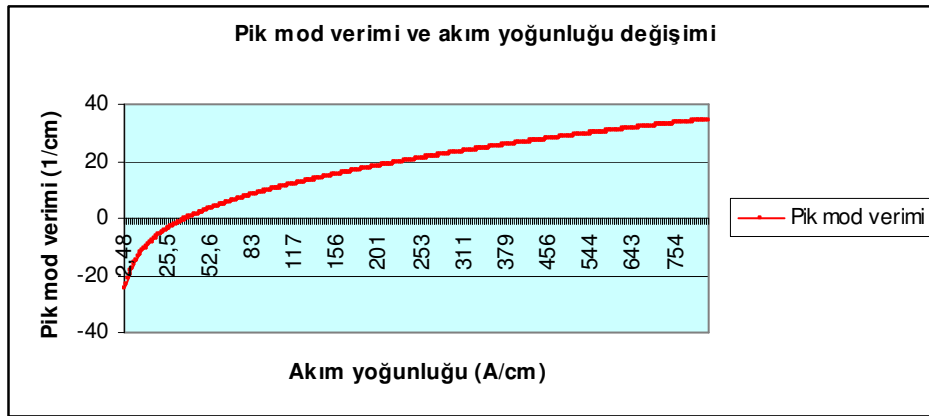
Şekil.3.7.5. Taşıyıcı yoğunluğu ve türevsel verim değişimi



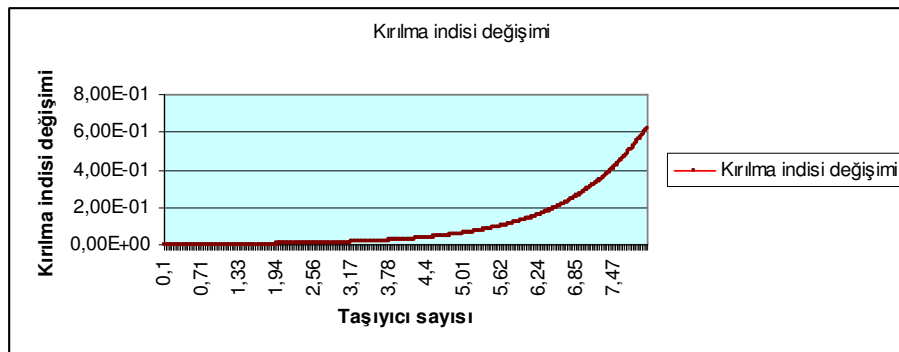
Şekil.3.7.6. Verim sıkışıklığı değişimi



Şekil.3.7.7. Pik malzeme verimi eşik akım yoğunluğu değişimi



Şekil.3.7.8. Pik mod verimi eşik akım yoğunluğu değişimi



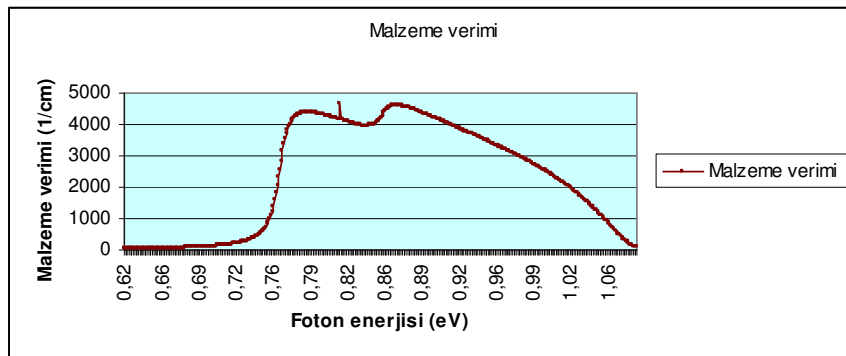
Şekil.3.7.9. Taşıyıcı sayısına göre kırılma indisi değişimi



Şekil.3.7.10. Taşıyıcı sayısına göre azaltılmış kırılma indisi değişimi



Şekil.3.7.11. Taşıyıcı konsantrasyonu' na göre sızıntı akımı değişimi



Şekil.3.7.12. Foton enerjisi ve malzeme verimi değişimi

4. TARTIŞMA VE SONUÇ

Verim ve Dalga kılavuzu paket programları kullanılarak bazı malzemeler üzerinde çeşitli hesaplamalar yapılmıştır.

Verim bilgisayar programı kullanılarak; her bir malzeme sistemi için giriş parametreleri ve çıkış parametreleri ile bant hesaplamaları ve malzeme seçimi yapılmıştır. Daha sonra iletim bandı, değerlik bandı ve zayıf deşik bantları için enerji değerleri, hapis faktörleri, verim hesaplamaları, eşik akım yoğunluğu J_{th} ve verim eğim hesaplamaları yapılmıştır. Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlar ile uygun QWs sayısı, verim eğimi (%), J_{th} (A/cm^2), I_{th} (mA), bant offset değerleri her bir malzeme için ayrı ayrı elde edilmiş, bunların grafiklerinin çizimi yapılmış ve bu grafiklerden dalga boyu (λ)'nın pik değerlerinin bulunması ile malzemenin veriminin pik değerleri bulunmuştur.

Verim ve dalga kılavuzu paket programları ile yedi çeşit malzeme ile hesaplama yapılmış olup lazer tasarımı için gereken bazı önemli parametre değerleri elde edilmiştir.

Dalga kılavuzu programı kullanılarak hapis faktörü, uzak alan, yakın alan, dalga kılavuzu parametreleri ile formüllerin kullanımı, dalga kılavuzu mod ve numerik metod kullanımı ile ilerleme sabitinin çözümü, programa giriş dosyalarının oluşturulması, çift farklı yapı ile bu bilgiler ışığında analiz yapılması ve bu bilgilerin grafiklerle değerlendirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu verilerle altı malzeme üzerinde çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Her bir

tabakanın çapraz matrisleri hesaplanmış, rakamsal eigen (öz değer) fonksiyonlarının çözümü ile etkin kırılma indisleri bulunmuş, dalga kılavuzu eigen (öz değer) modları ve zayıf modlarının bulunması üzerinde durulmuş optik hapis faktörü, dalga çiftleri, yakın alan, uzak alan ve diğer optik parametrelerinin hesaplanması, grafikleri ile kuantum lazer tasarımı ile ilgili çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışma ile kuantum lazerlerin hapis faktörlerinin, türevsel verimi azalttığı ve bant genişliğini sınırladığı anlaşılmaktadır. Taşıyıcı yoğunluğu üzerindeki hapis faktörü hesaplamaları ile etkin türevsel verim ve titreşim frekansı bulunur. Eğer tek kuyulu kuantum lazerlerde, hapis tabakası çok ince ve eşik taşıyıcı yoğunluğu çok yüksekse, etkin türevsel verimin önemli ölçüde azaltılabildiği görülmüştür. Hapis tabakasındaki taşıyıcılar, bu tabakalardaki modülasyonu büyük ölçüde azaltmaktadır. Türevsel verimin taşıyıcı yoğunluğu ile azaldığı, tabaka kalınlığı ile arttığı gözlenmiştir.

Yeni fotonlarla elde edilen optik veriminin fotonun enerjisine bağımlılığı çok fazladır. $f_c(E_e) \gg f_v(E_h), g(\hbar\omega)$ pozitif olduğu zaman, $\hbar\omega$ foton enerjili gelen ışık dalgası malzeme ile yükseltilir. Malzemenin optiksel veriminin, N_{tr} nin ötesinde, taşıyıcı yoğunluğu eklendiğinde elde edilebilir. Böylece Fermi düzeylerinin yarısı, boşluk bandından daha fazla bir enerji ile ayrılabilir. Yarı Fermi düzey ayırımı, malzemenin optiksel verimini elde edebilmek için boşluk bandından fazla olmalıdır. $E_{fc} = E_{fv}$ eşitliği durumunda optiksel verimi elde etmek mümkün değildir. Çalışmada; programa daha fazla kuantum kuyusu değerleri girildiğinde, optiksel verimin yükseldiği de görülmüştür.

Türevsel verim optiksel şiddetin artırılması ile azalır. Gerçekten de; uyarılmış ışımanın yarı ömrü $\langle$ kendiliğinden ışımanın yarı ömrü olmalıdır. Eşik akımının altındaki değerler için çıkış ışık şiddeti ihmal edilecek kadar küçüktür. Yukarısında ise, doyum etkisi görülene kadar çıkış gücü doğrusal olarak artar.

Kuantum lazerler, gerçek ve sanal kısmı indise sahiptirler ve aktif bölgelerinde periyodik bir modülasyon vardır. Bu teorik çalışma ile yedi farklı aktif tabakalı malzeme ile her bir malzeme sistemi için verim hesaplaması yapılmış ve her bir malzeme sisteminin verimini etkileyen faktörleri incelenmiştir.

Uzun dalga boylu kuantum kuyu lazerler özellikle iletişim de geniş olarak kullanılırlar. Fakat yüksek sıcaklıklarda bu lazerlerin performansları sınırlıdır. Soğutma işlemleri lazerlerin maliyetini artırmamalı ve belli bir seviyenin üzerinde güç tüketmesi cihazın güvenilirliğini azaltmamalıdır. Yüksek sıcaklıkta lazerin performansındaki zayıflamanın elektron hapsinin azaltılmasından ve Auger kaybının artırılmasından kaynaklanmaktadır. Özellikle son yıllarda aktif bölge performansının artırılması üzerinde farklı malzemeler üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışma da bu araştırmalardan biridir. Yüksek sıcaklıklardaki bu malzemeler üzerindeki beklenti, yükseltilmiş bant-offset değerleri ve daha uygun bant-offset oranları ile daha iyi elektron ve deşik hapsi sağlamaktır. Işıma ortamındaki taşıyıcı yük yoğunluğunun verim bağımlılığı, uyarılmış ışımada olmadan önce oyuk kaybına eşit malzeme veriminden dolayı, lazerin eşik akım yoğunluğunu etkiler. Buna ilaveten, uygun türevsel verim ile lazerin bant genişliğindeki

ayarlama artırılabilir. Özellikle $1.3 \mu m$ dalga boyundaki uygun QW malzemeler çok fazla ilgi odağı olmalarına rağmen, daha önceki çalışmalar özellikle bu yedi malzemenin karşılaştırılması üzerine olmuştur. Fakat çok az çalışmada bu malzemelerin verim hesaplamalarının karşılaştırılması üzerinde durulmuştur.

Bu çalışmada, özellikle mümkün olduğu kadar özel, bağımsız cihaz tasarımları yapabilmek, genel tasarım kuralları bulabilmek ve devreye verilen akımın yanında, malzeme veriminin taşıyıcı yoğunluğuna göre fonksiyonunun özellikleri üzerinde durulmuştur. Devreye verilen akıma göre malzeme verimi özellikle kayıp işlemlerini (radyoaktif olmayan ışıma ve Auger olayı) ihtiva eder. Kayıp işlemleri farklı hapisli çift farklı yapılar ile ilgilidir.

Optiksel verim ise malzeme veriminin ve optiksel hapis faktörünün bir ürünüdür. Bu nedenle özellikle kaybı minimuma indirmek ve verimi maksimuma çıkarmak gerekir. Bu çalışmada, tek kuyulu bir standart SCH engelli bir yapının verimi üzerinde durulmuştur. QW ve engel malzemesinin her ikisinin de bant yapısı, verim için zor ve önemli bir kavramdır. Bu nedenle QW ve engel malzemenin her ikisi de, uygun olarak bulunmuş sıcaklık ve dalga boyundaki maksimum verime ihtiyaç duyarlar. QW malzemenin verimini bulabilmek için, QW in önce bant yapısının hesaplaması yapılmıştır. L_w genişliğin de ki bir QW in büyümesi z ekseninde düşünülmüştür. QW in değerlik yapısının hesaplanmasında Luttinger-Kohn Hamiltonian' ı kullanılmıştır. Hamiltonian hesaplamaları Bölüm 2.20' de açıklandığı gibidir.

QW (ΔE_{gap}) in boşluk bandı ve engel boşluk bandı arasındaki fark sırasıyla iletim ve değerlik ($\Delta E_c \dots ve \dots \Delta E_v$) bantlarına bölünür. $\Delta E_c / \Delta E_v$ oranı

bant-offset oranı olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklıklardaki çalışmalarda $\Delta E_c > \Delta E_v$ olması önemlidir. Çünkü zayıf etkin kütleli elektronlar sıcaklık artışı ile daha yüksek düzeylere kolaylıkla yükseltilebilirler. Bu işlem verimi azaltır ve ısısal sızıntı akımını artırır. Bunun yanında, bütün QW leri ağır deşiklerin eşit olarak doldurduğu zaman ΔE_v lerin çok fazla sayıda olmasının önemi yoktur. Bu çalışmada elde edilen $\Delta E_c / \Delta E_v$ değerleri ve diğer çalışmalarda elde edilen $\Delta E_c / \Delta E_v$ değerlerinin karşılaştırılması Çizelge 4.1’ de yapılmıştır.

Çizelge 4.1. $\Delta E_c / \Delta E_v$ (bant off set oranları) değerlerinin karşılaştırılması

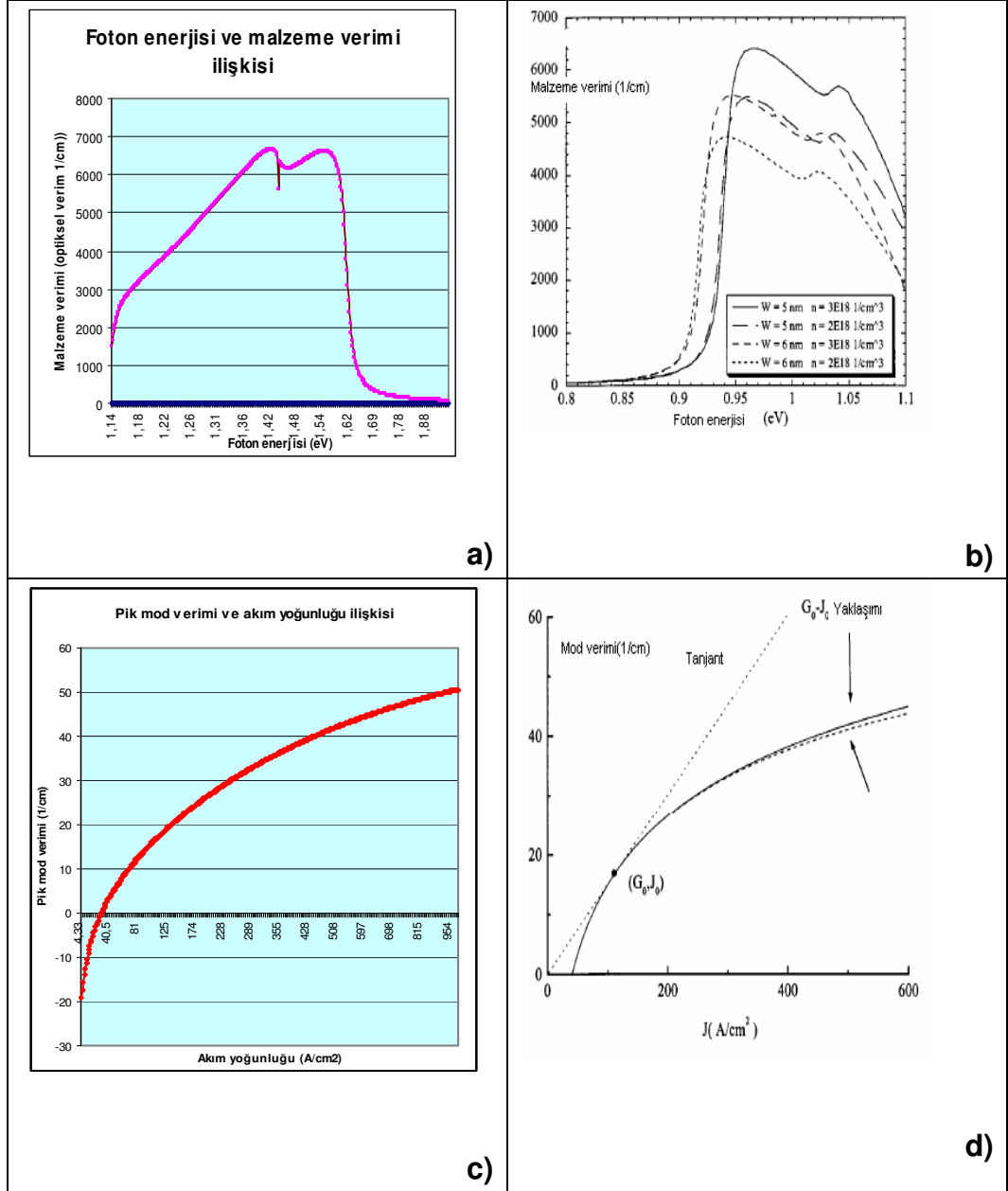
Malzeme	Bu çalışmada $\Delta E_c / \Delta E_v$ değeri	Deneysel çalışmalardan elde edilen band offset değerleri						
		(172, 196)	(143,196, 168,172, 184,218)	(184, 196, 198)	(83, 164, 184)	(165 ,216)	(166 ,184 218)	(167)
AlGaAs-GaAs	0.22	-	-	-	-	0.6	0.6	0.45
InGaAsP-InP	0.61	0.67	0.66	-	0.4	0.66	0.5	-
AlGaInAs-GaAs	2.1	-	2.57	-	0.72	-	2.57	-
InGaAsN-GaAs	2.39			3.7	4.1	-	4.0	-
InGaAs-GaAs	0.63	-	-	-	0.65	-	-	-
InGaAlAs-InP	0.28	0.36	0.42	-	-	-	-	-

Çizelge 4.1’ den de görüleceği gibi bu çalışmada elde edilen bant offset oranları ile diğer bazı çalışmalardan elde edilen bant offset oranlarının birbiri ile uyum içinde olduğunu ve verim programının bant offset oranı hesaplamada da kullanılabilecek bir program olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmadan da görülebileceği gibi; InGaAsN-GaAs diğer malzemeler içerisinde en büyük ΔE_c sahip olduğu için yüksek sıcaklık değerlerinde taşıyıcıların sistemden dışarıya olacak taşıyıcı sızıntısını önleyecek önemli bir malzeme olduğunu göstermektedir⁽²¹⁷⁾.

Farklı kuyu genişlikleri ile daha önceki çalışmalardan elde edilen veriler ile bu çalışmada elde edilen 8 nm kuyu genişliğindeki AlGaInAs-InP malzeme veriminin foton enerjisine göre ve taşıyıcı yoğunluğunun mod verimine göre değişiminin karşılaştırılması şekil 4.1' de gösterilmiştir. Daha nceki yapılan çalışmalarda mod veriminin kuyu genişliği ile ters orantılı olarak değiştiği şekil 4.1' den anlaşılmaktadır⁽²¹⁸⁾. Deneysel çalışmada kuyu genişliği artırıldığı zaman malzeme veriminin azaldığı görülmektedir⁽²¹⁸⁾. Bu çalışmada ise kuyu genişliği olarak daha büyük bir genişlik kullanılmış ve çıkan sonucun daha önceki çalışmalardaki değerler ile uyumlu olduğu görülmüştür.

Bir bandın taşıyıcı yoğunluğu; bütün bant üzerindeki yoğunluk düzeylerinin ve taşıyıcıların bulunma olasılığının çarpımının integrali alınarak bulunur. Denklem (2.92) deki gibi düzey yoğunluğu; iletim ve değerlik bandındaki birim enerjilerine, enerji düzeylerinin nasıl dağıtıldığını ve bulunma olasılığını açıklar.

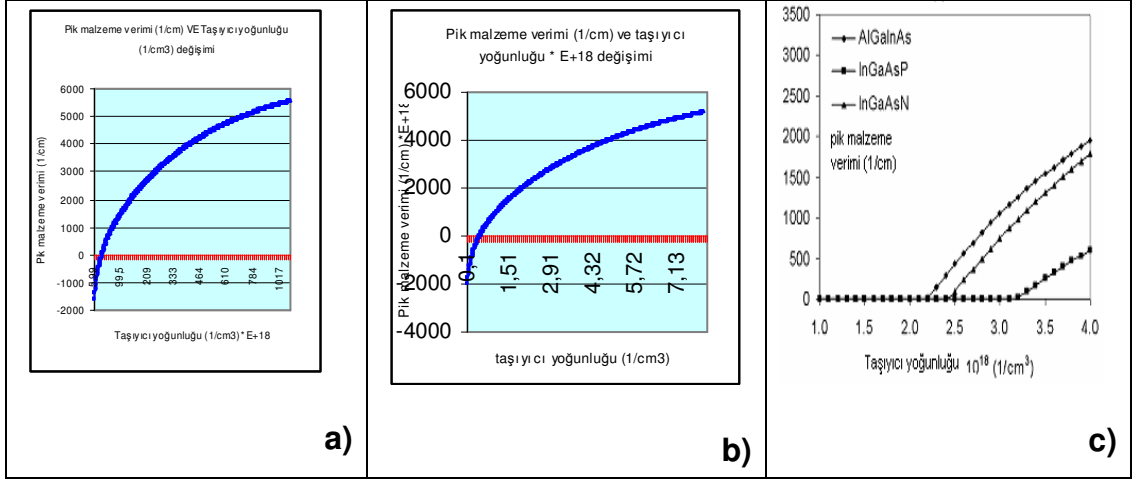


Şekil 4.1. a-c) Bu çalışmada AlGaInAs malzeme için malzeme verimi foton enerjisi – akım yoğunluğu mod verimi değişimi (teorik- 8 nm kuyu genişliğinde) **b-d)** Diğer çalışmalarda AlGaInAs malzeme için malzeme verimi foton enerjisi – akım yoğunluğu mod verimi değişimi (deneysel- 5 ve 6 nm kuyu genişliğinde)⁽²¹⁸⁾

Elektron ve deşik taşıyıcı yoğunluklarının hesaplamasında, düzey doldurma etkisi ve taşıyıcıların aşırı derecede engel/SCH' a dolmaları önemlidir. QW lerin enerjileri ve hapsedilmiş alt bantları ile ilgili hesaplamalar,

engel/SCH bölgesindeki hesaplamalarda kullanılır. Böylece, toplam taşıyıcı yoğunluğunun her ikisi de N_{tot} veya P_{tot} ile, QW bölgedeki toplam taşıyıcı yoğunluğu N_w veya P_w ile, SCH/bölge engelindeki taşıyıcı yoğunluğu ise N_B veya P_B ile gösterilir ve aralarında denklem (2.93) de görülen ilişki vardır. Özellikle AlGaInAs ve InGaAsP malzeme sistemlerinin bant yapılarının parabolik olduğu ve deneysel değerlere hemen hemen yakın değerler elde edildiği görülmektedir^(173,179,189,190).

Denklem (2.98) deki yaklaşım kullanılarak, yüksek sıcaklıklarda, InGaAsP malzemenin kaplama tabakasının enerjisinin üzerindeki enerji değerlerinde toplam elektron taşıyıcı yoğunluğu ihmal edilebilir. Tahmini olarak InP kaplama tabakasının üzerindeki toplam elektron taşıyıcı yoğunluğunun % 3' ü civarında olduğu görülebilir . Bu yüksek enerjili taşıyıcılar ısısal sızıntı akımına katkıda bulunurlar. Özellikle AlGaInAs ve InGaAsN malzeme sistemlerinde bu yüksek enerjili taşıyıcılar, % 5 den az ve ihmal edilebilen etki ile verim hesaplamasını azaltan ısısal sızıntı akımının oluşmasını sağlarlar. Bunun yanında, kaplama tabakasına doğru sızan taşıyıcılar aletin yapısından etkilenirler⁽¹⁷³⁻¹⁸¹⁾.



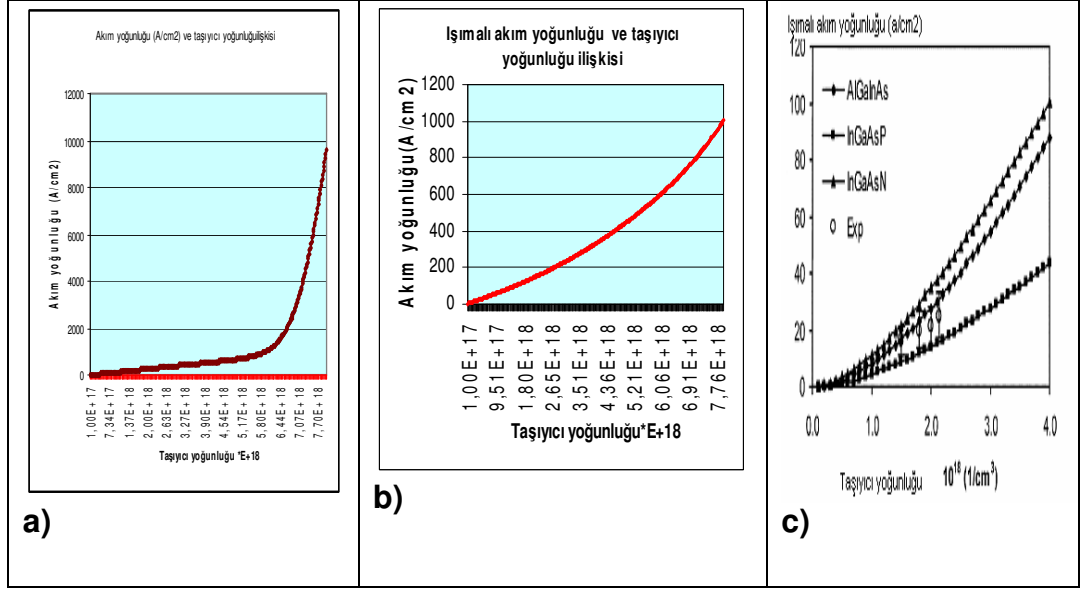
Şekil 4.2. a) Bu çalışmada InGaAsP malzeme için pik malzeme verimi taşıyıcı yoğunluğu değişimi (teorik) **b)** Bu çalışmada AlGaInAs malzeme için pik malzeme verimi taşıyıcı yoğunluğu değişimi (teorik) **c)** Diğer çalışmalarda InGaAsP- AlGaInAs malzeme için pik malzeme verimi taşıyıcı yoğunluğu değişimi - deneysel ^(173,179,184,189,190)

Fermi' nin Altın Kuralı yaklaşımı malzeme veriminin hesaplanmasında kullanılır. Alt bant verimi denklem (2.99) daki gibidir ⁽¹⁷²⁻¹⁷⁹⁾.

Kuantum lazerlerin bant genişliklerinin ayarlanmasında taşıma zamanı ile InGaAsP, AlGaInAs ve InGaAsN malzemeler için SCH daki taşıyıcı yakalama ve kaçış zamanının önemli etkileri vardır ⁽¹⁹³⁾(denklem (2.99)).

Bu çalışmada da görülebileceği gibi, incelenen bütün QW malzeme sistemlerinin genişliğinin azaltılması ile türevsel verim artırılabilir. Devreye verilen akım yoğunluğu denklem (2.100) deki gibi yazılabilir.

Denklem (2.100) deki, J_{rad} radyoaktif yeniden birleşme akım yoğunluğu, J_{mon} ışısız yeniden birleşme akım yoğunluğu ve J_{Aug} ise ışısız Auger yeniden birleşme akım yoğunluğudur. J_{rad} toplam kendiliğinden ışımaya oranını denklem (2.101) deki gibi bulunur.



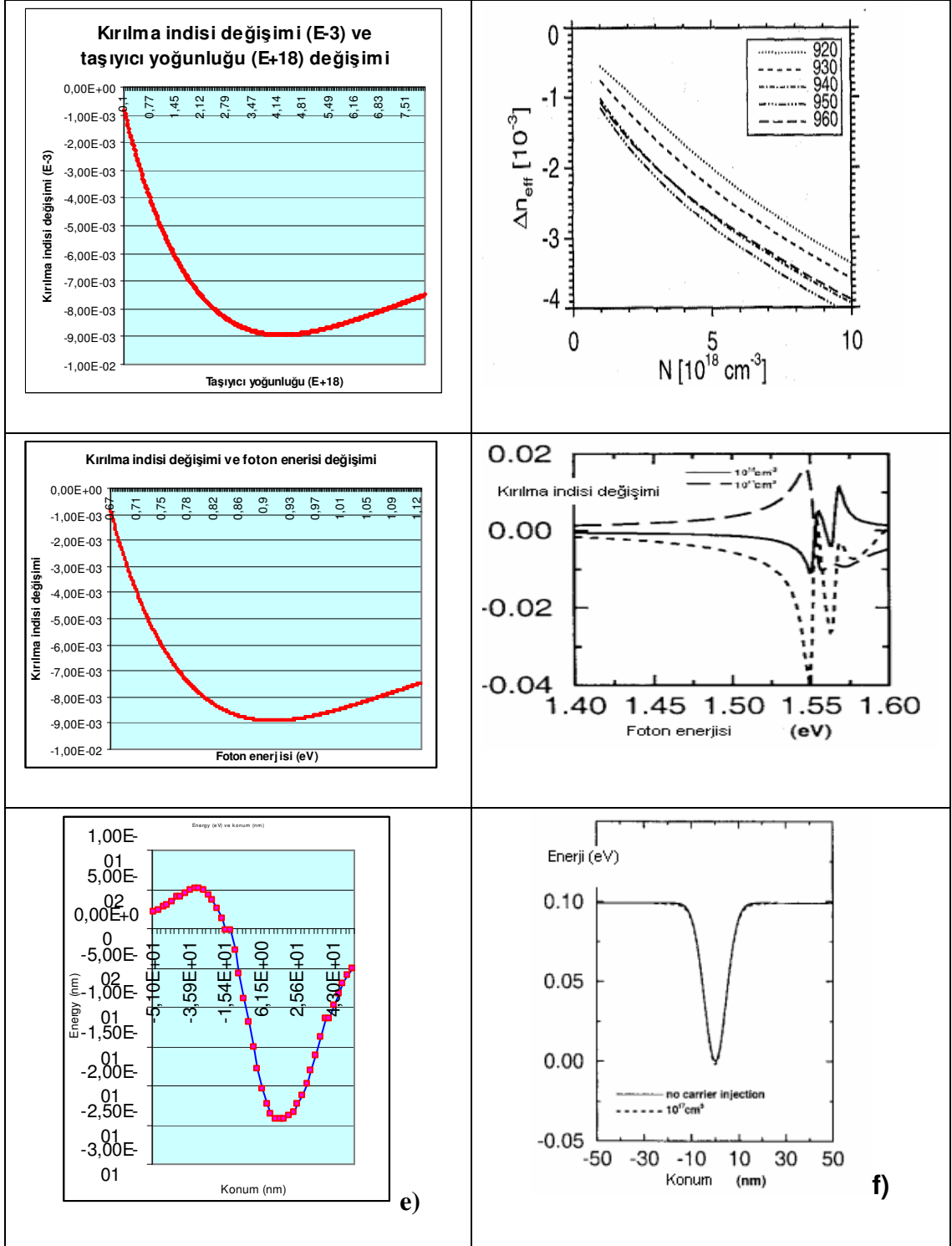
Şekil 4.3. a) Bu çalışmada InGaAsP malzeme için ışımalı akım yoğunluğu taşıyıcı yoğunluğu değişimi (teorik) **b)** Bu çalışmada AlGaInAs malzeme için ışımalı akım yoğunluğu taşıyıcı yoğunluğu değişimi (teorik) **c)** Diğer çalışmada InGaAsP- AlGaInAs malzeme için ışımalı akım yoğunluğu taşıyıcı yoğunluğu değişimi (deneysel) ^(173,184)

Şekil 4.3 farklı malzeme sistemleri için ışımalı akım yoğunluğunun hesaplamalarını göstermektedir. Şekilden de görülebileceği gibi toplam akım yoğunluğu için gereken J_{moon} ve J_{Aug} in de J_{rad} (ışımalı akım yoğunluğu) na eklenmesi ile denklem (2.101) in sağlanabileceği görülmektedir.

Bu durum AlGaInAs ve InGaAsP malzemeler için kabul edilebilir olmasına rağmen, InGaAsN için malzemedeki yeniden birleşme işlemi hala belirsizliğini korumaktadır. Radyoaktif olmayan yeniden birleşme akımı eksikliğine rağmen önemli olabilmektedir^(207,209,210). Çünkü malzemelerin N saflık düzeyi eksik yeniden birleşme merkezi olarak görev yapmaktadır. Bu nedenle

ΔE_a Auger işleminin harekete geçirme enerjisi olup değer olarak 60 meV kullanılır^(187,207). InGaAsP çok ciddi ölçüde radyoaktif olmayan Auger

yeniden birleşmesinden çok ciddi ölçüde zarar görür ^(173,212). Burada Auger akım yoğunluğu toplam akım yoğunluğuna daha baskındır. AlGaInAs malzemedeki durum daha da gelişmiştir ⁽¹⁷³⁻²¹²⁾. InGaAsP malzeme sisteminin ölçülmesi sonucunda, Auger katsayısı değerlerinin $2 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ile $1 \times 10^{-27} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ arasında olduğu, AlGaInAs malzeme sistemi için ise bu değerlerin $3.6 \times 10^{-29} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ ile $1 \times 10^{-28} \text{ cm}^6 \text{ s}^{-1}$ arasında olduğu tespit edilmiştir ^(84,173,210,212). Daha önceki çalışmalar da ve bu çalışmada Auger katsayısının malzeme sisteminin ve kuyu genişliğinin zorunun ayarlanması ile en düşük seviyeye getirilebileceği görülmüştür ^(173, 214, 207).

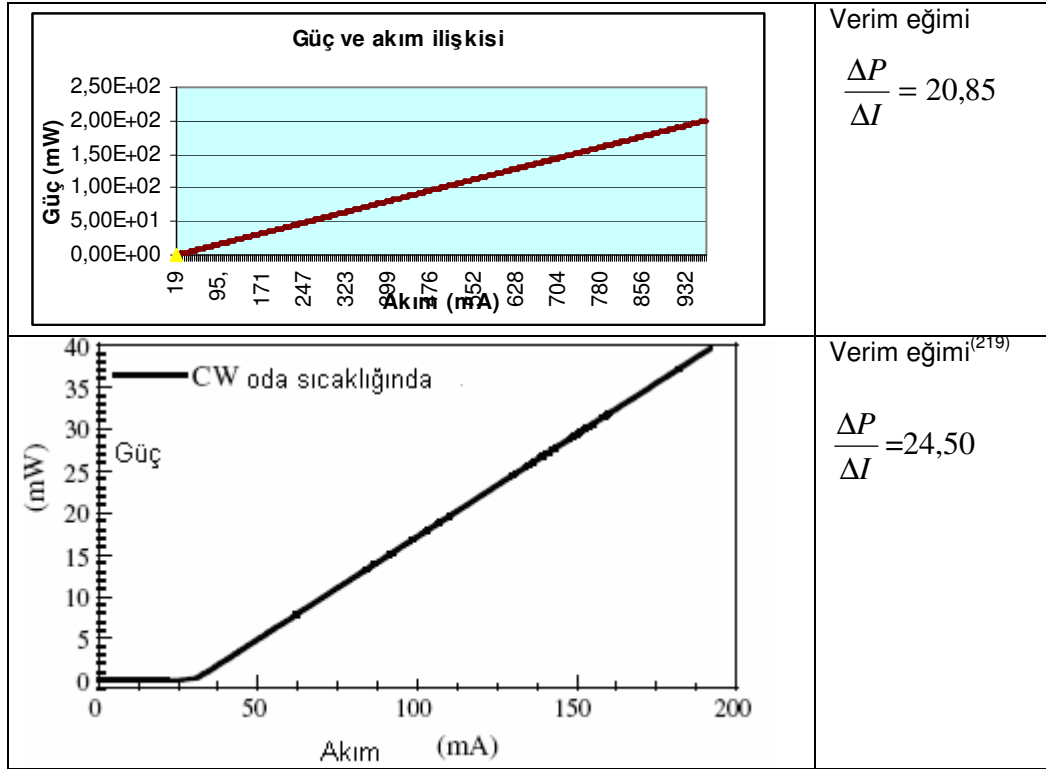


Şekil 4.4. a) Bu çalışmada AlGaAs malzeme için kırılma indisi değişimi ve foton enerjisi değişimi (teorik) (980 nm dalga boyu için-teorik) **b)** AlGaAs malzeme için kırılma indisi değişimi ve foton enerjisi değişimi (deneysel) ⁽²¹⁵⁾ **c)** Bu çalışmada AlGaAs malzeme için konum ve enerji (eV) değişimi (teorik) ⁽²¹⁵⁾ **d)** AlGaAs malzeme için konum ve enerji (eV) değişimi (deneysel) ⁽²¹⁵⁾ **e)** Bu çalışmada AlGaAs malzeme için konum ve enerji değişimi **f)** AlGaAs malzeme için konum ve enerji (eV) değişimi (deneysel) ⁽²¹⁵⁾

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4' den de görülebileceği gibi InGaAsP malzemenin en yüksek toplam akım yoğunluğuna ve dolayısıyla da en yüksek ışımalı akım yoğunluğuna sahip olduğu görülmektedir. Çünkü malzemenin iletim ve değerlik bantlarındaki hapsedilmiş enerji düzeylerindeki büyük enerji ayırımı nedeniyle daha büyük gerilime sahiptir. Malzemenin büyük bant offset e sahip olması hacim bölgesinde daha az sayıda taşıyıcı bulunmasına neden sebep olmaktadır.

Çizelge 4.2. $\Delta P/\Delta I$ (L-I eğrisinden elde edilen verim eğimi) değerlerinin karşılaştırılması

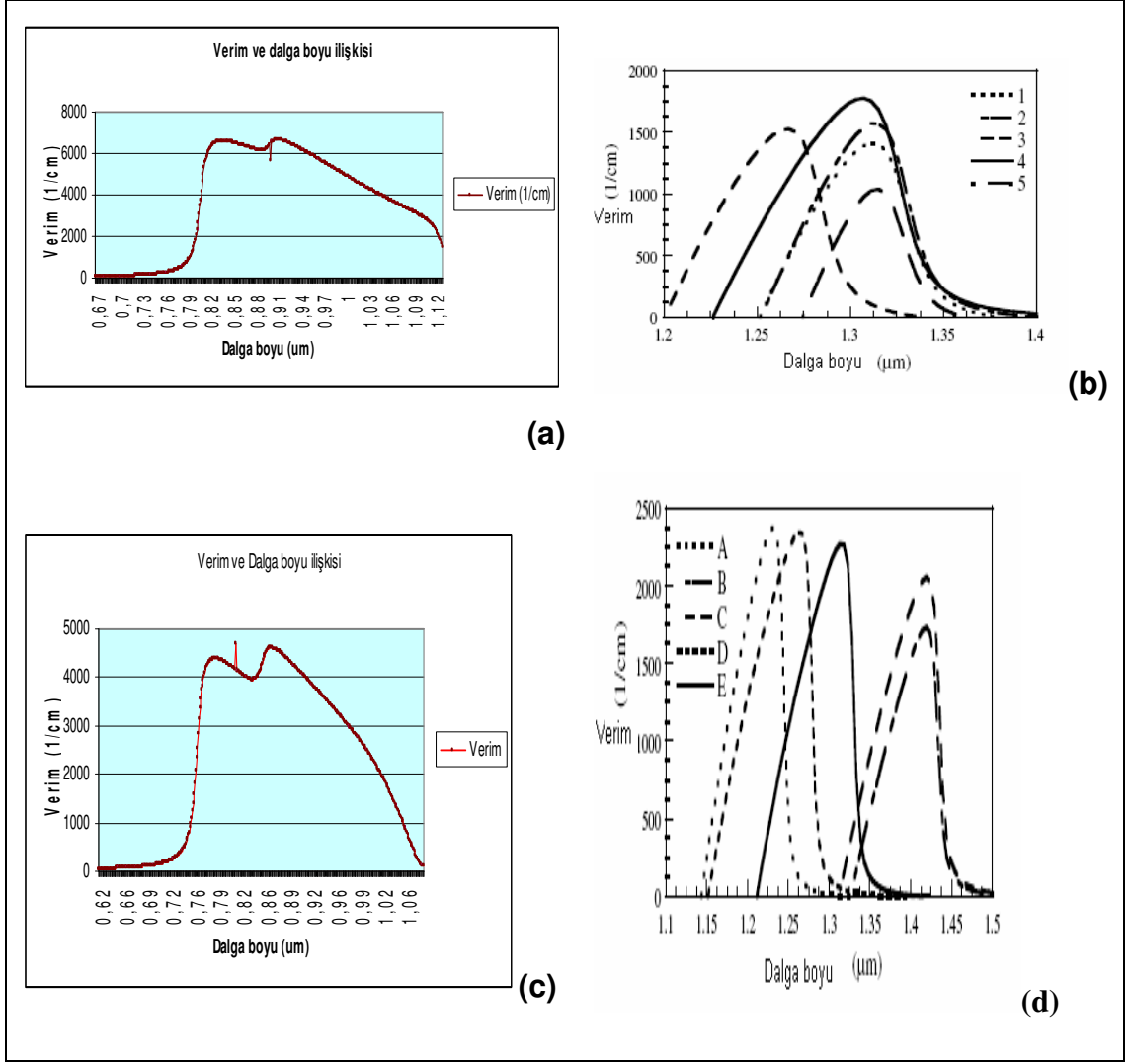
Malzeme	Bu çalışmada $\Delta P/\Delta I$ *% değeri	Deneysel çalışmalardan elde edilen $\Delta P/\Delta I$ değerleri					
		(222, 225) QW kuyu	(219, 220, 222 225) kuyu	(224) QW kuyu	(220, 221) QD nokta	(220, 221) QD nokta	(219, 226) QW kuyu
AlGaAs-AlGaAs	27.25	-	-	31.66	60.02	37.5	30.45
InGaAsP-InP	21.20	28.57	29.01	-	-	-	-
AlGaInAs-GaAs	25.00	-	-	37.79	-	-	28.76
InGaAsN-GaAs	20,85	45.66	-	65.67			24,50
InGaAs-GaAs	23.43	35.29	43.75	-			29.41
InGaAlAs-InP	21.73						



Şekil 4.5. InGaAsN malzeme için bu çalışmada elde edilen $\frac{\Delta P}{\Delta I}$ değerleri ile deneysel olarak yapılan hesaplamaların karşılaştırılması.

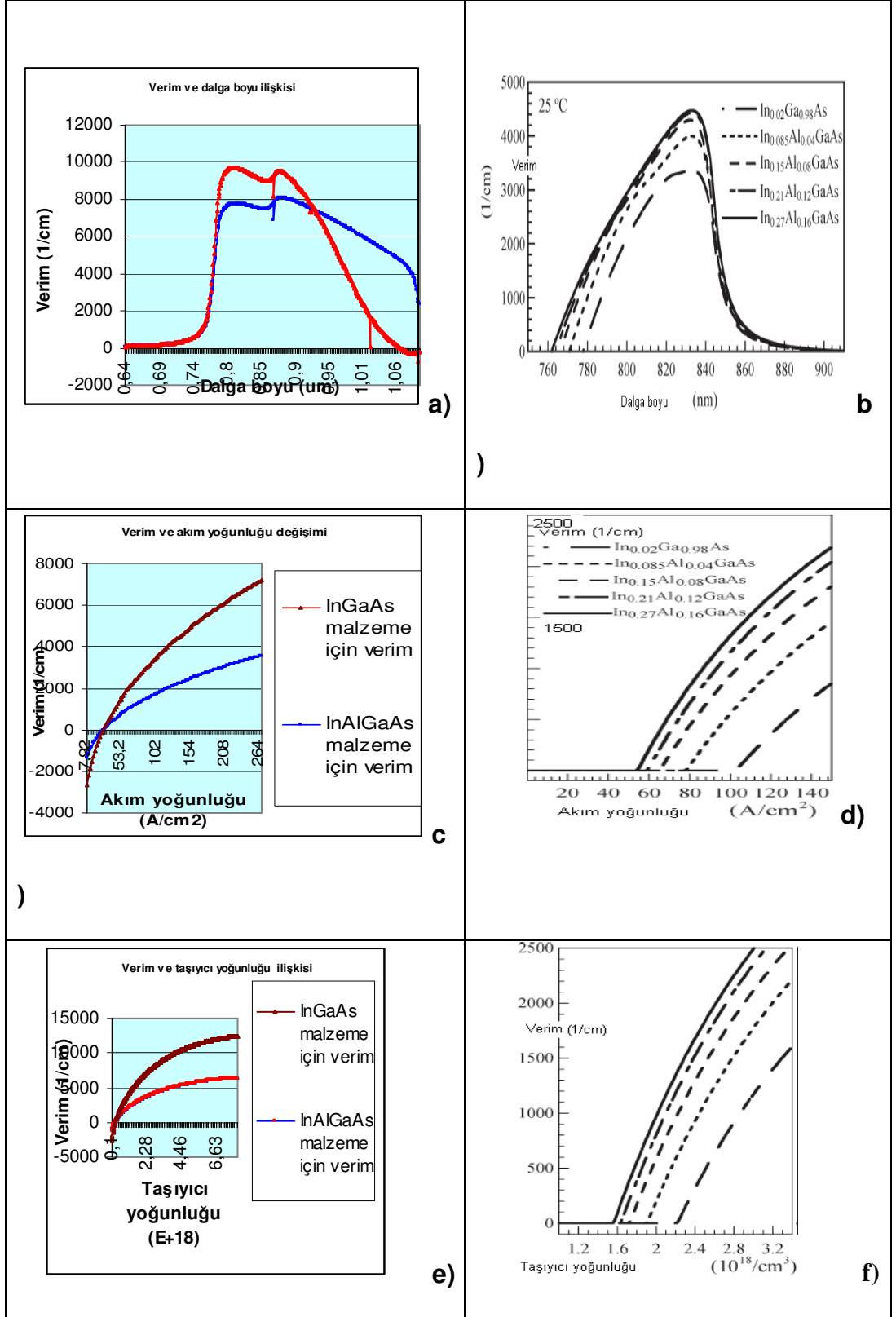
Çizelge 4.2' den görülebileceği gibi quantum nokta (QD) lardaki verim eğiminin (QW) kuantum kuyuların verim eğimine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum kuantum noktalarının kuyulara bir üstünlüğü olarak görülebilir. İncelenen malzemeler arasında InGaAsP-InP nin verim eğiminin diğer malzemelerin eğimine göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Sistem ayarları yapılarak kullanılabilen verim ve dalga kılavuzu paket programları ile yapılan hesaplamalar neticesinde; özellikle bant offset oranları ve verim hesaplamalarında programların deney sonuçları ile karşılaştırılabilir sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 4.6. a) AlInGaAs malzeme için bu çalışmada elde edilen değerler ile çizilen dalga boyu ve verim grafiği **b)** AlInGaAs malzeme için için 330 K de deneysel olarak daha önceden elde edilmiş değerler ile çizilen verim-dalga boyu grafiği⁽²¹⁹⁾ **c)** InGaAsN malzemeler için oda sıcaklığında bu çalışmada elde edilen değerler ile çizilen verim-dalga boyu grafiği **d)** InGaAsN malzeme için 330 K de deneysel olarak daha önceden elde edilmiş değerler ile çizilen verim-dalga boyu grafiği⁽²¹⁹⁾

Bu çalışmadan Şekil 4.6' daki veriler ve bunların grafikleri incelendiğinde, sıcaklığın azaltılıp kuyu genişliği artırılması ile ışıma dalga boyunun azaldığı ve verimin arttığı görülmüştür. Bu durum seçilen parametre değerlerinin uygun olduğunu göstermektedir.



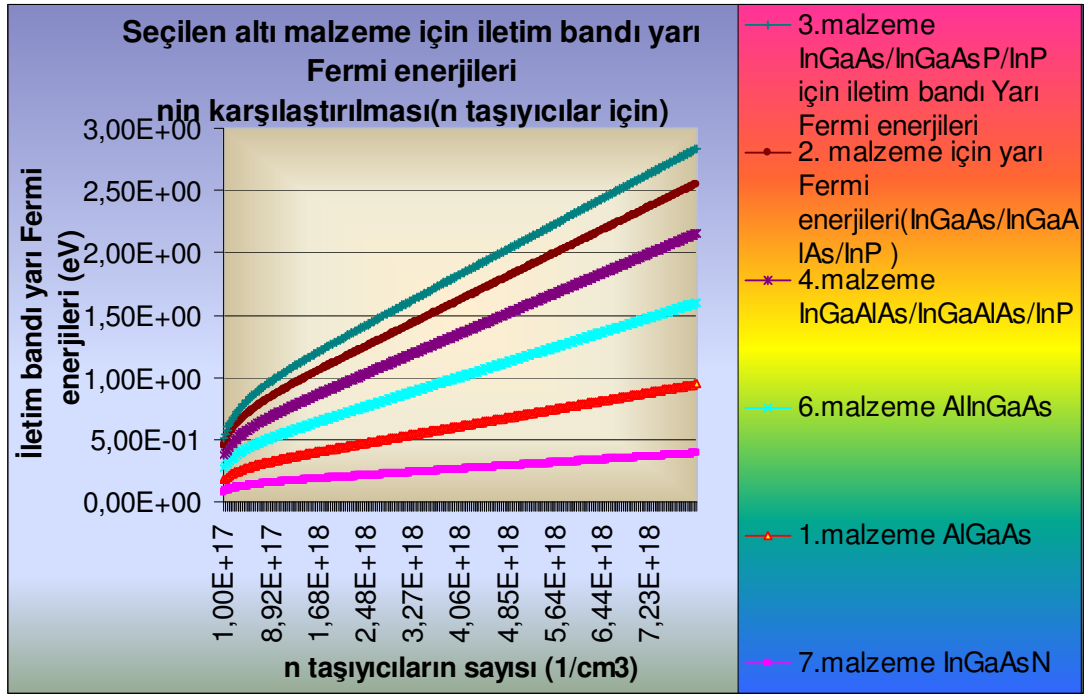
Şekil 4.7. a) Bu çalışmada InGaAs ve InAlGaAs malzeme için elde edilen değerler ile dalga boyu ile verim değişimi **b)** Daha önce deneysel veriler ile dalga boyu ile verim değişimi^(219,221) **c)** Bu çalışmada InGaAs ve InAlGaAs malzemeler için elde edilen değerler ile akım yoğunluğu ile verim değişimi **d)** Daha önce deneysel verilerle akım yoğunluğu ile verim değişimi^(219,221) **e)** Bu

çalışmada InGaAs ve InAlGaAs malzemeler için elde edilen değerler taşıyıcı yoğunluğu ile verim değişimi **f)** Daha önce deneysel veriler ile taşıyıcı yoğunluğu ile verim değişimi^(219,221)

Şekil 4.7.' den InGaAs ve InAlGaAs malzemeler için malzeme veriminin, akım yoğunluğu ile taşıyıcı yoğunluğundan doğru orantılı olarak etkilendiği anlaşılmaktadır. Bunun yanında elde edilen verilerin deney verileri ile hemen hemen uyum içinde olduğu da görülmektedir.

Çizelge 4.3. Seçilen malzemeler için iletim bandı yarı Fermi enerjileri

n tipi taşıyıcı sayısı	1.malzeme (AlGaAs)	2.malzeme (InGaAs/InGaAlAs)	3.malzeme (InGaAs/InGaAsP)	4.malzeme (InGaAlAs/InGaAlAs)	6.malzeme (AlInGaAs)	7.malzeme (InGaAsN)
1,00E+17	8,02E-02	9,46E-02	1,00E-01	9,46E-02	8,08E-02	6,70E-02
1,20E+17	8,52E-02	9,98E-02	1,06E-01	9,98E-02	8,58E-02	7,18E-02
1,40E+17	8,94E-02	1,04E-01	1,10E-01	1,04E-01	9,01E-02	7,59E-02
1,59E+17	9,32E-02	1,08E-01	1,14E-01	1,08E-01	9,38E-02	7,95E-02
1,79E+17	9,65E-02	1,12E-01	1,18E-01	1,12E-01	9,71E-02	8,27E-02
1,99E+17	9,95E-02	1,15E-01	1,21E-01	1,15E-01	1,00E-01	8,56E-02
2,19E+17	1,02E-01	1,18E-01	1,24E-01	1,18E-01	1,03E-01	8,83E-02
2,39E+17	1,05E-01	1,21E-01	1,27E-01	1,21E-01	1,05E-01	9,07E-02
2,58E+17	1,07E-01	1,23E-01	1,30E-01	1,23E-01	1,08E-01	9,29E-02
2,78E+17	1,09E-01	1,26E-01	1,33E-01	1,26E-01	1,10E-01	9,50E-02
2,98E+17	1,12E-01	1,28E-01	1,35E-01	1,28E-01	1,12E-01	9,70E-02
3,18E+17	1,14E-01	1,31E-01	1,38E-01	1,31E-01	1,14E-01	9,88E-02
3,38E+17	1,15E-01	1,33E-01	1,40E-01	1,33E-01	1,16E-01	1,01E-01
3,57E+17	1,17E-01	1,35E-01	1,42E-01	1,35E-01	1,18E-01	1,02E-01
3,77E+17	1,19E-01	1,37E-01	1,44E-01	1,37E-01	1,20E-01	1,04E-01
3,97E+17	1,21E-01	1,39E-01	1,46E-01	1,39E-01	1,21E-01	1,05E-01
4,17E+17	1,22E-01	1,40E-01	1,48E-01	1,40E-01	1,23E-01	1,07E-01
4,37E+17	1,24E-01	1,42E-01	1,50E-01	1,42E-01	1,24E-01	1,08E-01
4,56E+17	1,25E-01	1,44E-01	1,52E-01	1,44E-01	1,26E-01	1,10E-01
4,76E+17	1,27E-01	1,46E-01	1,54E-01	1,46E-01	1,27E-01	1,11E-01



Şekil 4.8. Seçilen malzemelerden altısının n taşıyıcılar için iletim bandı yarı Fermi enerjilerinin karşılaştırılması.

Diğer çalışmalarla olan karşılaştırmalarının yanında, malzemelerin bazı özellikleri bakımından kendi aralarında da karşılaştırmaları yapılmıştır. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.8' den de görülebileceği gibi; seçilen altı malzemenin aynı n tipi taşıyıcılara göre iletim bandı Fermi enerjileri incelendiğinde, Fermi enerjileri en büyük olan malzemenin InGaAs/InGaAsP ve Fermi enerjisi en düşük olan malzemenin ise InGaAsN olduğunu görüyoruz. Bu sonuçlar ve yukarıdaki diğer karşılaştırmalı sonuçlar ve veriler kuantum lazer tasarlamasında, tasarlayıcılara önemli ipuçları sunacaktır.

KAYNAKLAR

1. R. Ashoori, Nature, **379**, 413(1996).
2. Raymond Dingle, Quantum Semiconductor Structures, Elsevier, Academic Press, 1991.
3. Won-Tien Tsang, **28**, pp. 596(1976).
4. Madhumita Datta, Zeynep Dilli and Linda Wasiczko, Quantum Dot Lasers, ENEE 697 Term Project, 2000.
5. Henini, M, Microelectronic Journal, **28**, 2003
6. Sebastian Mogg, Long-Wavelength Vertical-Cavity Lasers: Materials and Device Analysis, KTH, 2003.
7. K. Eberl, Physics World, **10**, 47,(1997).
8. A. Yariv, Quantum Electronics, **3** ed. New York: John Wiley & Sons, 264, 1989.
9. P. Bhattacharya, in Semiconductor Optoelectronic Devices, **2** ed. New Jersey: Prentice Hall, 301, 1997,
10. B. Saleh, Teich, M., in Fundamentals of Photonics. New York: John Wiley & Sons, 569, 1995.
11. N. N. Ledentsov, Semiconductors, **32**, 343 (1998).
12. H. S. Jiang, J., IEEE Journal of Quantum Electronics, **34**, 1188 (1998).
13. Q. M. Xie, A.; Chen, P.; Kobayashi, N.P, Physics Review Letters, **75**, 2542 (1995).
14. B. Levi, Researchers Vie to Achieve a Quantum Dot Laser, Physics Today, 22, 1996.
15. T. F. Riedl, E.; Hangleiter, A.; Zundel, M.K.; Eberl, K., Applied Physics Letters, **73**, 3730 (1998).
16. T. F. Riedl, E.; Zundel, M.K.; Eberl, K.; Hangleiter, A., Japanese Journal of Applied Physics, **38**, 597 (1999).
17. T. Y. Nee, N.; Shiao, P.; Chyi, J.; Lee, C., Japanese Journal of Applied Physics, **38**, 605 (1999).

18. M. M. Sugawara, K.; Nakata, Y., Applied Physics Letters, **74**, 1561 (1999).
19. D. L. P. Huffaker, G.; Zou, Z.; Scheekin, O.B.; Deppe, D.G, Applied Physics Letters, **73**, 2564 (1998).
20. V. M. Ustinov, Kovsh, A.R.; Zhukov, A.E.; Egorov, A.Y.; Ledentsov, N.N.; Lunev, A.V.; Shernyakov, Y.M.; Maksimov, M.V.; Tsatsul'nikov, A.F.; Volovik, B.V.; Kop'ev, P.S.; Alferov, Z.I, Technical Physics Letters, **24**, 22 (1998).
21. G. H. Park, D.L.; Zou, Z.; Shchekin, O.B.; Deppe, D.G., IEEE Photonics Technology Letters, **11**, 301 (1999).
22. A. E. E. Zhukov, A.Y.; Kovsh, A.R.; Ustinov, V.M.; Zaitsev, S.V.; Gordeev, N.Y.; Kopchatov, V.I.; Lunev, A.V.; Tsatsul'nikov, A.F.; Volovik, B.V.; Ledentsov, N.N.; Kop'ev, P.S., Semiconductors, **32**, 795 (1998).
23. S. V. G. Zaitsev, N.Y.; Kopchatov, V.I.; Ustinov, V.M.; Zhukov, A.E.; Egorov, A.Y.; Kovsh, A.R.; Kop'ev, P.S, Japanese Journal of Applied Physics, **38**, 601 (1999).
24. V. M. Z. Ustinov, A.E.; Egorov, A.Y.; Kovsh, A.R.; Zaitsev, S.V.; Gordeev, M.Y.; Kopchatov, V.I.; Ledentsov, N.N.; Tsatsul'nikov, A.F.; Volovik, B.V.; Kop'ev, P.S.; Alferov, Z.I.; Ruvimov, S.S.; Liliental-Weber, Z.; Bimberg, D., Electronics Letters, **34**, 670 (1998).
25. K. K. P. Linder, J.; Qasaimeh, O.; Liu, X.F.; Krishna, S.; Bhattacharya, P.; Jiang, J.C., Applied Physics Letters, **74**, 1355 (1999).
26. H. N. Saito, K.; Ogura, I.; Sugou, S.; Sugimoto, Y., Applied Physics Letters, **69**, 3140 (1996).
27. L. V. S. Asryan, R.A., Applied Physics Letters, **74**, 1215 (1999).
28. D. L. B. Huffaker, O.; Graham, L.A.; Streetman, B.G.; Deppe, D.G., Applied Physics Letters, **70**, 2356 (1997).
29. D. e. a. Huffaker, IEEE Photonics Technology Letters, **10**, 1623 (1998).
30. V. M. M. Ustinov, N.A.; Zhukov, A.E.; Kovsh, A.R.; Egorov, A.Y.; Lunev, A.V.; Volovik, B.V.; Krestnikov, I.L., Musikhin, Y.G.; Bert, N.A Kop'ev, P.S.; Alferov, Z.I., Applied Physics Letters, **74**, 2815 (1999).

31. Z. e. a. Zou, IEEE Photonics Technology Letters, **10**, 1623 (1998).
32. L. V. S. Asryan, R.A., IEEE Journal of Quantum Electronics, **34**, 841 (1998).
33. Smith T.P., Lee K.Y., Knoedler C.M., Hong J.M., and Kern, D.P, Physical Review B Studies, **38**, 2172, (1988).
34. Brunner, K., Boockelmann, U., Abstreiter, G., Walther, M., Böhm, G., Trankle, G. and Weimann, G, Physical Review Letters Studies, **69**, 3216 (1992).
35. Raymond, S., Fafard, S., Poole, P.j., Wojs, A., Hawrylack, P. and Charbonneau, ,Physical Review B Studies **54**, 11548 (1996),
36. Grundmann, M., Stier, O. and Bimberg, D, ,Physical Review B Studies **52**, 11969 (1995),.
37. Ekimov, A.I., Efros, A.I. and Onushchenko, A.A, Quantum Size Effect in Semiconductor Microcrystals, Solid State Communications Studies **56**, 921 (1985).
38. Alsmeier, J., Batke, E. and Kotthaus, J.P, Physical Review B Studies **41**, 1699 (1990).
39. M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns, F. H. Dill, Jr., and G. Lasher, Appl. Phys. Lett., **1**, M, (1962).
40. 850APA1101 data sheet, Avalon Photonics, Zürich, Switzerland.[Online].Available:<http://www.avap.ch/850APA1101.html>.
41. H. Soda, K. Iga, C. Kitahara, and Y. Suematsu, Jpn. J. Appl. Phys., **18**, 2329 (1979).
42. K. Iga, S. Ishikawa, S. Ohkouchi, and T. Nishimura, Appl. Phys. Lett., **45**, 348, (1984).
43. F. Koyama, S. Kinoshita, and K. Iga, Appl. Phys. Lett., **55**, 2218 (1989).
44. K. D. Choquette and H. Q. Hou, Proceedings of the IEEE, **85**, 1730 (1997).
45. J. Heinrich, E. Zeeb, and K. J. Ebeling, IEEE Photon. Technol. Lett, **9**, 1555 (1997).
46. P. Schnitzer, M. Grabherr, R. Jäger, J. Joos, C. Jung, R. King, R. Michalzik, W. Schmid, D. Wiedenmann, and K. J. Ebeling, High

- performance “ VCSEL arrays for optical interconnection, in ” Proc. IEEE 48th Electronic Components and Technology Conference (ECTC'98), Seattle, WA, USA, 762, 1998.
47. B. J. Thibeault, K. Bertilsson, E. R. Hegblom, E. Strzelecka, P. D. Floyd, R. Naone, and L. A. Coldren, IEEE Photon. Technol. Lett., **9**, no. 1, 11(1997).
 48. Y. Satuby and M. Orenstein, IEEE Photon. Technol. Lett., **10**, 760 (1998).
 49. R. W. Herrick and P. M. Petro, IEEE J. Quantum Electron., **34**, 1963 (1998).
 50. L. A. Coldren and S. W. Corzine, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. New York, NY: Wiley, 1995.
 51. G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Semiconductor Lasers. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1993.
 52. C. Wilmsen, H. Temkin, and L. A. Coldren, Eds., Vertical-Cavity Surface- Emitting Lasers: Design, Fabrication, Characterization, and Applications. New York, NY: Cambridge University Press, 1999.
 53. H. Li and K. Iga, Eds., Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Devices. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 2003.
 54. S. W. Corzine, R. S. Geels, J. W. Scott, R.-H. Yan, and L. A. Coldren, IEEE J. Quantum Electron., **25**, 1513 (1989).
 55. J. Talghader and J. S. Smith, Appl. Phys. Lett., **66**, 335 (1995).
 56. Z. Hang, D. Yan, F. H. Pollak, G. D. Pettit, and J. M. Woodall, Phys. Rev. B., **44**, 10 546, (1991).
 57. D. B. Young, J. W. Scott, F. H. Peters, M. G. Peters, M. L. Majewski, B. J. Thibeault, S. W. Corzine, and L. A. Coldren, IEEE J. Quantum Electron., **29**, 2013(1993).
 58. S. Rapp, J. Piprek, K. Streubel, J. Andr e, and J. Wallin, IEEE J. Quantum Electron., **33**, 1839 (1997).
 59. J. Piprek, Y. A. Akulova, D. I. Babic, L. A. Coldren, and J. E. Bowers, Appl. Phys. Lett., **72**, 1814(1998).

60. C. Asplund, P. Sundgren, S. Mogg, M. Hammar, U. Christiansson, V. Oscarsson, C. Runnström, E. Odling, and J. Malmquist, *Electron. Lett.*, **38**, 635 (2002).
61. J. W. Matthews and A. E. Blakeslee, *J. Cryst. Growth*, **27**, 118(1974).
62. K. Streubel, J. Wallin, G. Landgren, U. " Ohlander, S. Lourdudoss, and O. Kjebon, *J. Cryst. Growth*, **143**, 714,(1994).
63. C. Silfvenius, B. Stålnacke, and G. Landgren, *J. Cryst. Growth*, **170**, 122 (1997).
64. R. Bhat, C. E. Zah, M. Koza, B. Pathak, F. Favire, W. Lin, M. C. Wang, N. Andreadakis, D.-M. Hwang, T. P. Lee, Z. Wang, D. Darby, D. Flanders, and J. J. Hsieh, *J. Cryst. Growth*, **145**, 858(1994).
65. H. Hillmer, R. Losch, W. Schlapp, A. Pocker, and H. Burkhard, *Electron. Lett.*, **31**, 1346 (1995).
66. F. Hohnsdorf, J. Koch, S. Leu, W. Stolz, B. Borchert, and M. Druminski, *Electron. Lett.*, **35**, 571 (1999).
67. B. Borchert, A. Y. Egorov, S. Illek, and H. Riechert, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 597 (2000).
68. M. Kawaguchi, E. Gouardes, D. Schlenker, T. Kondo, T. Miyamoto, F. Koyama, and K. Iga, *Electron. Lett.*, **36**, 1776 (2000).
69. M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **35**, 1273 (1996).
70. M. Kondow, T. Kitatani, S. Nakatsuka, M. C. Larson, K. Nakahara, Y. Yazawa, M. Okai, and K. Uomi, *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron.*, **3**, 719 (1997).
71. L. Largeau, C. Bondoux, G. Patriarche, C. Asplund, A. Fujioka, F. Salomonsson, and M. Hammar, *Appl. Phys. Lett.*, **79**, 1795 (2001).34
72. J. Lott, N. N. Ledentsov, V. M. Ustinov, N. A. Maleev, A. E. Zhukov, A. R. Kovsh, M. V. Maximov, B. V. Volovik, and Z. I. Alferov, *Electron. Lett.*, **36**, 1384 (2000).
73. G. Park, O. B. Shchekin, D. L. Hudaker, and D. G. Deppe, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 230 (2000).
74. S.-W. Ryu and P. D. Dapkus, *Electron. Lett.*, **36**, 1387(2000).

75. R. Teissier, D. Sicault, J. C. Harmand, G. Ungaro, G. Le Roux, and L. Largeau, *J. Appl. Phys.*, **89**, 5473(2001).
76. M. Kudo and T. Mishima, *J. Appl. Phys.*, **78**, 1685 (1995).
77. F. Bugge, M. Zorn, U. Zeimer, T. Sharma, H. Kissel, R. Hlsekewede, G. Erbert, and M. Weyers, *J. Cryst. Growth*, **248**, 354(2003).
78. S. Mogg, P. Sundgren, C. Asplund, M. Hammar, U. Christiansson, T. Aggerstam, V. Oscarsson, C. Runnström, E. " Odling, and J. Malmquist, *Proc. SPIE Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers VII*, **4994** (2003).
79. S. Sato and S. Satoh, *Jpn. J. Appl. Phys. 2*, **38**, 990 (1999).
80. T. Kondo, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, M. Kamaguchi, E. Gouardes, F. Koyama, and K. Iga, *Jpn. J. Appl. Phys. 1*, **40**, 467(2001).
81. T. Takeuchi, Y.-L. Chang, A. Tandon, D. Bour, S. Corzine, R. Twist, M. Tan, and H.-C. Luan, *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 2445 (2002).
82. J. J. Coleman, *Strained layer quantum well heterostructure lasers* in *Quantum Well Lasers*, San Diego, CA, USA: Academic Press, 1993.
83. M. Hetterich, M. D. Dawson, A. Y. Egorov, D. Bernklau, and H. Riechert, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 1030 (2000).
84. G. A. Evans, J. P. Sih, T. M. Chou, J. B. Kirk, J. K. Butler, and L. Y. Pang, **3284**, 205(1998).
85. J. Piprek, *Semiconductor Optoelectronic Devices*. San Diego: Academic Press, 2003.
86. I. Vurgaftman, J. R. Meyer, and L. R. Ram-Mohan, *J. Appl. Phys.*, **89**, 5815 (2001).
87. T. E. Sale, *Vertical Cavity Surface Emitting Lasers*. Taunton, Somerset: Research Studies Press, 1995.
88. R. M. A. Azzam and N. M. Bashara, *Ellipsometry and Polarized Light*, 2nd ed. Amsterdam: North-Holland, 1987.
89. R. Baets, P. Demeester, and P. E. Lagasse, *J. Appl. Phys.*, **62**, 723(1987).
90. D. I. Babic, Y. Chung, N. Dagli, and J. E. Bowers, *IEEE J. Quantum Electron.*, **29**, 1950 (1993).

91. H. Wada, D. I. Babic, D. L. Crawford, T. E. Reynolds, J. J. Dudley, J. E. Bowers, E. L. Hu, J. L. Merz, B. I. Miller, U. Koren, and M. G. Young, IEEE Photon. Technol. Lett., **3**, 977 (1991).
92. T. Tadokoro, H. Okamoto, Y. Kohama, T. Kawakami, and T. Kurokawa, IEEE Photon. Technol. Lett., **4**, 409 (1992).
93. M. Ortsiefer, R. Shau, G. Böhmer, F. Köhler, and M.-C. Amann, Appl. Phys. Lett., **76**, 2179 (2000).
94. M. R. McDaniel, D. L. Hudaker, and D. G. Deppe, Electron. Lett., **33**, 1704 (1997).
95. J. Piprek, H. Wenzel, H. J. Wünsche, D. Braun, and F. Henneberger, **2399**, 605 (1995).
96. T. Sakaguchi, F. Koyama, and K. Iga, Electron. Lett., **24**, 928 (1988).
97. A. Chailertvanitkul, K. Iga, and K. Moriki, Electron. Lett., **21**, 303(1985).
98. K. Streubel, J. Wallin, L. Zhu, G. Landgren, and I. Queisser, Mater. Sci. Eng. B, **28B**,285 (1994).
99. P. Salet, P. Pagnod-Rossiaux, F. Gaborit, A. Plais, and J. Jacquet, Gassource, Electron. Lett., **33**, 1145 (1997).
100. J. K. Kim, E. Hall, O. Sjölund, G. Almuneau, and L. A. Coldren, Electron. Lett., **35**, ,1085,(1999).
101. I. F. L. Dias, B. Nabet, A. Kohl, and J. C. Harmand, Electron. Lett., **33**, 716(1997).
102. D. I. Babic, J. Piprek, K. Streubel, R. P. Mirin, N. M. Margalit, D. E. Mars, J. E. Bowers, and E. L. Hu, IEEE J. Quantum Electron., **33**, 1369 (1997).
103. C. H. Henry, R. A. Logan, F. R. Merrit, and J. P. Luongo, IEEE J. Quantum Electron., **QE-19**, 947(1983).
104. S. A. Chalmers, K. L. Lear, and K. P. Killeen, Appl. Phys. Lett., **62**, 1585 (1993).
105. K. L. Lear and R. P. Schneider, Jr., Appl. Phys. Lett., **68**, 605 (1996).
106. H. Kogelnik and C. V. Shank, J. Appl. Phys., **453**, 2327(1972).
107. D. I. Babić, G. H. Döhler, J. E. Bowers, and E. L. Hu, IEEE J. Quantum Electron., **33**, 2195(1997).

108. K. Kojima, R. A. Morgan, T. Mullaly, G. D. Guth, M. W. Focht, R. E. Leibenguth, and M. T. Asom, *Electron. Lett.*, **29**, 1771(1993).
109. K. Kurihara, T. Numai, I. Ogura, A. Yasuda, M. Sugimoto, and K. Kasahara, *J. Appl. Phys.*, **73**, 21(1993).
110. E. F. Schubert, L. W. Tu, G. J. Zyzdik, R. F. Kopf, A. Benvenuti, and M. R. Pinto, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 466(1992).
111. M. G. Peters, B. J. Thibeault, D. B. Young, J. W. Scott, F. H. Peters, A. C. Gossard, and L. A. Coldren, *Appl. Phys. Lett.*, **63**, 3411(1993).
112. S. Adachi, *J. Appl. Phys.*, **54**, 1844(1983).
113. W. Nakwaski, *J. Appl. Phys.*, **64**, 159(1988).
114. S. Adachi, *Physical Properties of III–V Semiconductor Compounds: InP, InAs, GaAs, GaP, InGaAs, and InGaAsP*. New York, NY: Wiley, 1992.
115. M. Osinski and W. Nakwaski, *Electron. Lett.*, **29**, 1015 (1993).
116. M. Guden and J. Piprek, *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, **4**, 349(1996).
117. T.M. Chou, *User's manual for gain program*, University press, 2003
118. J. Piprek, T. Tröger, B. Schröter, J. Kolodzey, and C. S. Ih, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **10**, 81(1998).
119. T. Baba, Y. Yogo, K. Suzuki, F. Koyama, and K. Iga, *Electron. Lett.*, **29**, 913(1993).
120. K. Uomi, S. J. B. Yoo, A. Scherer, R. Bhat, N. C. Andreadakis, C. Zah, M. A. Koza, and T. P. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **6**, 317(1994).
121. S. Uchiyama, N. Yokouchi, and T. Ninomiya, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **9**, 141(1997).
122. M. A. Fisher, Y.-Z. Huang, A. J. Dann, D. J. Elton, M. J. Harlow, S. D. Perrin, J. Reed, I. Reid, and M. J. Adams, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 608(1995).
123. K. Streubel, S. Rapp, J. Andre, and J. Wallin, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **8**, 1121(1996).
124. P. Salet, F. Gaborit, P. Pagnod-Rossiaux, A. Plais, E. Derouin, J. Pasquier, and J. Jacquet, *Electron. Lett.*, **33**, 2048(1997).

125. J. Debray, J. Sagnes, G. Le Roux, P. Legay, M. Quillec, C. Kazmierski, R. Madani, and J. F. Palmier, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 770 (1999).
126. O.-K. Kwon, B.-S. Yoo, J.-H. Shin, J.-H. Baek, and B. Lee, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 1132 (2000).
127. J. J. Dudley, M. Ishikawa, D. I. Babic, B. I. Miller, R. Mirin, W. B. Jiang, J. E. Bowers, and E. L. Hu, *Appl. Phys. Lett.*, **61**, 3095(1992).
128. D. I. Babić, K. Streubel, R. P. Mirin, N. M. Margalit, J. E. Bowers, E. L. Hu, D. E. Mars, L. Yang, and K. Carey, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **7**, 1225 (1995).
129. A. Karim, P. Abraham, D. Lofgreen, Y.-J. Chiu, J. Piprek, and J. Bowers, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 2632(2001).
130. V. Jayaraman, J. C. Geske, M. H. MacDougall, F. H. Peters, T. D. Lowes, and T. T. Char, *Electron. Lett.*, **34**, 1405(1998).
131. Y. Qian, Z. H. Zhu, Y. H. Lo, D. I. Huraker, D. G. Deppe, H. Q. Hou, B. E. Hammons, W. Lin, and Y. K. Tu, *Electron. Lett.*, **33**, 1052(1997). 95
132. S. Rapp, F. Salomonsson, J. Bentell, I. Sagnes, H. Moussa, C. Mériadec, R. Raj, K. Streubel, and M. Hammar, *Electron. Lett.*, **35**, 49(1999).
133. L. Goldstein, C. Fortin, C. Starck, A. Plais, J. Jacquet, J. Boucart, A. Rocher, and C. Poussou, *Electron. Lett.*, **34**, 268(1998).
134. H. Gebretsadik, P. K. Bhattacharya, K. K. Kamath, O. R. Qasaimeh, D. J. Klotzkin, C. Caneau, and R. Bhat, *Electron. Lett.*, **34**, 1316(1998).
135. W. Yuen, G. S. Li, R. F. Nabiev, J. Boucart, P. Kner, R. J. Stone, D. Zhang, M. Beaudoin, T. Zheng, C. He, K. Yu, M. Jansen, D. P. Worland, and C. J. Chang-Hasnain, *Electron. Lett.*, **36**, 1121 (2000).
136. R. Shau, M. Ortsiefer, J. Roskopf, G. Böhm, F. Kohler, and M.-C. Amann, *Electron. Lett.*, **37**, 1295(2001).
137. S., E. Hall, G. Almuneau, J. K. Kim, D. A. Buell, H. Kroemer, and L. A. Coldren, *Appl. Phys. Lett.*, **78**, 1337(2001).
138. A. W. Jackson, R. L. Naone, M. J. Dalberth, J. M. Smith, K. J. Malone, D. W. Kisker, J. F. Klem, K. D. Choquette, D. K. Serkland, and K. M. Geib, *Electron. Lett.*, **37**, 355(2001).

139. G. Steinle, F. Mederer, M. Kicherer, R. Michalzik, G. Kristen, A. Y. Egorov, H. Riechert, H. D. Wolf, and K. J. Ebeling, *Electron. Lett.*, **37**, 632(2001).
140. A. Ramakrishnan, G. Steinle, D. Supper, C. Degen, and G. Ebbinghaus, *Electron. Lett.*, **38**, 322(2002).
141. T. Takeuchi, Y.-L. Chang, M. Leary, A. Tandon, H.-C. Luan, D. Bour, S. Corzine, R. Twist, and M. Tan, *Electron. Lett.*, **38**, 1438(2002).
142. J. Vukusic, P. Modh, A. Larsson, M. Hammar, S. Mogg, U. Christiansson, V. Oscarsson, E. " Odling, J. Malmquist, M. Ghisoni, P. Gong, E. Griths, and A. Joel, *Electron. Lett.*, **39**, 662(2003).
143. T. Anan, M. Yamada, K. Nishi, K. Kurihara, K. Tokutome, A. Kamei, and S. Sugou, *Electron. Lett.*, **37**, 566(2001).
144. S.-W. Ryu and P. D. Dapkus, *Electron. Lett.*, **37**, 177(2001).
145. F. Salomonsson, C. Asplund, P. Sundgren, G. Plaine, S. Mogg, and M. Hammar, *Electron. Lett.*, **37**, 957(2001).
146. J. Joos, F. Mederer, M. Kicherer, I. Ecker, R. Jger, W. Schmid, M. Grabherr, and K. J. Ebeling, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 344(2000).
147. F. Koyama, D. Schlenker, T. Miyamoto, Z. Chen, A. Matsutani, T. Sakaguchi, and K. Iga, *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **12**, 125(2000).
148. Media Access Control (MAC) Parameters, Physical Layers, and Management Parameters for 10 Gb/s Operation, *IEEE Std. 802.3ae*, 2002.
149. P. Sundgren, R. Marcks von W"urtemberg, J. Berggren, M. Hammar, M. Ghisoni, V. Oscarsson, E. " Odling, and J. Malmquist, *Electron.Lett.*, **39**, 1128(2003).
150. F. Salomonsson, K. Streubel, J. Bentell, M. Hammar, D. Keiper, R. Westphalen, J. Piprek, L. Sagalowicz, A. Rudra, and J. Behrend, *J. Appl. Phys.*, **83**, 768(1998).
151. M. Hammar, C. Asplund, P. Sundgren, S. Mogg, U. Christiansson, T. Aggerstam, V. Oscarsson, C. Runnstr"om, E. " Odling, and J. Malmquist, *Proc. SPIE VCSELs and Optical Interconnects*, **4942**, Brugge, Belgium, (2002).

152. Sandra R., IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, **7**, 340(2001).
153. Shun Lien Chung, Physics of Optoelectronic Devices, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
154. Stephen R. Chinn, Peter S. Zory, and Axel R. Reisinger, IEEE J. Quantum Electronics, **24**(1988).
155. Tso-Min Chou, Theory and Design Application of Strained Separate-Confinement Heterostructure Quantum Well Lasers, SMU, Dallas, TX, 1995.
156. P. W. A. McIlroy, A. Kurobe, and Y. Uematsu, IEEE J. Quantum Electron., **QE-21**, 1958(1985).
157. N. K. Dutta, G. P. Agrawal, Semiconductor Lasers, 2nd Edition, Van Norstrand Reinhold, NY, 1993.
158. Chao-Suan Yeh, Theoretical and Experimental Investigation of Slab Waveguides with Periodic Grating Layer. Dallas, TX: SMU, 1992.
159. Peter S. Zory, Quantum Well Lasers, Academic Press Inc., 1993.
160. L.A.Coldren, Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits, John Wiley & Sons, Inc, 1993.
161. Myron B. Allen III, Eli L. Isaacson, Numerical analysis for applied science, New York : Wiley, 1998.
162. Daniel D. McCracken and William S. Dorn, Numerical methods and FORTRAN programming, with applications in engineering and science, New York, Wiley, 1964.
163. Victor Ustinov, Alexey E. Zhukov, Quantum Dot Lasers, Oxford, 2003.
164. E. P. O'Reilly and M. Silver, Appl. Phys. Lett, **63**, 3318(1993).
165. J. O'Gorman, A. F. J. Levi, T. Tanbun-Ek, D. L. Coblentz, and R. A. Logan, *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1058(1992).
166. C. Silfvenius, G. Landgren, and S. Marcinkevicius, IEEE J. Quantum

- Electron., **35**, 603(1999).
167. B. Chen, W. Wanf, X. J. Wang, J. Y. Zhang, and Z. Fan, Jpn. J. Appl. Phys., **38**, 5096(1999).
 168. M. Kondow, K. Uomi, A. Niwa, T. Kitatani, S. Watahiki, and Y. Yazawa, Jpn. J. Appl. Phys., **35**, 1273(1996).
 169. T. Miyamoto, K. Takeuchi, F. Koyama, and K. Iga, IEEE Photon. Technol. Lett, **9**, 1448(1997).
 170. K. M. Lau, Ultralow threshold quantum well lasers in Quantum Well Laser, P. Zory, Ed. San Diego, CA: Academic, 1993.
 171. M.Toshihiko, IEEE J. Quantum Electron., **3**, 493(1996)..
 172. J. Minch, S. H. Park, T. Keating, and S. L. Chuang, IEEE J. Quantum Electron., **35**, 771(1999).
 173. N. Yamamoto, S. Seki, Y. Noguchi, and S. Kondo, IEEE Photon. Technol. Lett, **12**, 137(2000).
 174. Gain comparison for InGaAsP, AlGaInAs and InGaAsP for 1.3 μm laser diode," in Proc. CLEO, 2001.
 175. D. A. Broido and L. J. Sham, Phys. Rev. B., **31**, 888(1985).
 176. J. M. Luttinger and W. Kohn, Phys. Rev., **97**, 869(1955).
 177. D. Ahn, S. L. Chuang, and Y C. Chang, J.Appl. Phys., **64**, 4056(1988).
 178. S. W. Corzine, Quantum well lasers, San Diego, CA: Academic, 1993.
 179. A. R. Adams, E. P. O'Reilly, and M. Silver, Strained layer quantum well lasers in Semiconductor Lasers, San Diego, CA: Academic, 1999.
 180. H. C. Casey and M. B. Panish, Heterostructure Lasers Part A: Fundamentals Principles. New York: Academic, 1978.
 181. J. Hader, S. W. Koch, J. V. Moloney, and E. P. O'Reilly, Appl. Phys. Lett, **77**, 630(2000).
 182. W. Shan, W. Walukiewicz, and J. W. Ager, Phys. Rev. Lett., **82**, 1221(1999).
 183. J. Hader, S. W. Koch, J. V. Moloney, and E. P. O'Reilly, Appl. Phys. Lett, **76**, 3685(2000).
 184. J. C. L. Yong, J. M. Rorison, and I. H. White, Appl. Phys. Lett, **79**, 1085(2001).

185. B. Zhao, T. R. Chen, and A. Yariv, *Appl. Phys. Lett*, **49**, 1930(1992).
186. S. Seki, H. Ohashi, H. Sugiura, T. Hirono, and K. Yokoyama, *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 1478 (1996).
187. H. Ishikawa and I. Suemune, *IEEE Photon. Technol. Lett*, **6**, 344(1994).
188. S. R. Chinn, P. Zory, and A. R. Reisinger, *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 2191(1988).
189. U. Menzel, A. Barwolff, D. Ackermann, R. Puchert, and M. Voss, *Semicond. Sci Technol*, **10**, 1382(1995).
190. J. W. Pan and J. I. Chyi, *IEEE J. Quantum Electron.*, **32**, 2133(1996).
191. R. Nagarajan, M. Ishikawa, T. Fukushima, R. S. Geels, and J. E. Bowers, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **28**, 1990(1992).
192. T. Min Chou, *The Program Package Gain and Waveguide* (2003).
193. M. Asada, "Intraband relaxation effect on optical spectra," in *Quantum Well Laser*, P. Zory, Ed. San Diego, CA: Academic, 1993.
194. J. C. L. Yong, J. M. Rorison, and I. H. White, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **38**, 1553(2002).
195. S. Seki, T. Yamanaka, W. Lui, Y. Yoshikuni, and K. Yokoyama, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **30**, 500(1994).
196. T. Ishikawa, T. Higashi, T. Uchida, T. Yamamoto, T. Fujii, H. Shoji, M. Kobayashi, and H. Soda, *IEEE Photon. Technol. Lett*, **10**, 1703(1998).
197. M. Hetterich, M. Dawson, A. Y Egorov, and H. Riechert, *Appl. Phys. Lett*, **76**, 1030(2000).
198. A. R. Adams, E. P. O'Reilly, and M. Silver, *Strained layer quantum well lasers in Semiconductor Lasers 1*, San Diego, CA: Academic, 1999.
199. M. Nido, K. Naniwae, J. Shimizu, S. Murata, and A. Suzuki, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **29**, 885(1993).
200. T. Ishikawa and J. E. Bowers, *IEEEJ. Quantum Electron.*, **30**, 562(1994).
201. W. A. Harrison, *J. Vac. Sci. Technol*, **14**, 1016(1977).

202. K. H. Hellwege, Landolt-Bornstein: Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology. Berlin, Germany: Springer, 1982.
203. E. Yablonovitch and E. O. Kane, J. Lightwave Technol., **6**, 1292(1988).
204. B. Zhao and A. Yariv, Quantum well semiconductor lasers in Semiconductor Lasers 1 San Diego, CA: Academic, 1999.
205. A. F. Phillips, S. J. Sweeney, A. R. Adams, and P. J. A. Thijs, IEEE J. Select. Topics Quantum Electron., **5**, 40.111(1999).
206. M. C. Wang, K. Kash, C. E. Za, R. Bhat, and S. L. Chuang, Appl. Phys. Lett., **62**, 166(1993).
207. T. Higashi, S. J. Sweeney, A. F. Philips, A. R. Adams, E. P. O'Reilly, T. Ucida, and T. Fujii, IEEE Photon. Technol. Lett, **11**, 409(1999).
208. J. Piprek, P. Abraham, and J. E. Bowers, IEEEJ. Quantum Electron., **32**, 366(2000).
209. R. Fehse, S. J. Sweeney, A. R. Adams, E. P. O'Reilly, A. Y Egorov, H. Riechert, and S. Illek, Electron Lett., **37**, 92(2001).
210. G. P. Agrawal and N. K. Dutta, Long-Wavelength Semiconductor Lasers, New York: Van-Nostrand, 1986.
211. G. Liu and S. L. Chuang, IEEEJ. Quantum Electron., **32**, 1283(2001).
212. Y Zou, S. Osinski, P. Grodzinski, P. D. Dapkus, W. C. Rideout, W. F. Sharfin, J. Schlafer, and F. D. Crawford, IEEE J. Quantum Electron., **29**, 1565(1993).
213. L. Davis, Y Lam, D. Nichols, J. Singh, and P. K. Bhat-tacharya, IEEE Photon. Technol. Lett, **5**, 120(1993).
214. J. Michael, Y Chan, C. Paul, K. Kwort, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics , **4**, (1998).
215. 2D Simulation of a Burried – Heterostructure Twin Guide DFB Laser Diode, Nortel Networks Optical Components, Binzstrasse 17, Switzerland, 1998.
216. Integrated system laboratory, optoelektronik modeling group, ETH Zurich, 2002.

217. Design and characterization of AlGaInAs kuantum well lasers, Report number 92252005, 2003/16.
218. R. Sandra , T Chou, J. Sih, A. Mantie, IEEE Journal of selected topics in quantum electronics , **7**, (2001).
219. Y.K.Kuo, S.H.Yen, M.W.Yao, M.L.Chen, Science direct, Elsevier, **275**, 156(2007).
220. Y.K.Kuo, J.R.Chen, M.L.Chen, B.T.Liou, Applied Physics B, **86**, 623(2007).
221. Y.A.Chang, J.R.Chen, H.C.Kuo, Journal of Lightwave Technology, **24**, 536(2006).
222. J.Minc, S.H. Park, IEEE J.Quantum Electron, **35**, 771(1999).
223. N.Tansu, J.Y.Yeh, Applied Physics Lett., **83**, 2112(2003).
224. J.W.Pan, J.I.Chyi, IEEE J.Quantum Electron, **32**, 2133(1996).
225. T.Tanbun, R.A.Logan, IEEE J.Quantum Electron, **26**, 1323(1990).
226. B.T.Liou, S.H.Yen, Hsiuping Journal, **13**, 297(2006).

EK

1.MALZEME İÇİN HESAPLAMALAR

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

MAKE YOUR SELECTION
NOW!

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

4
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE STRUCTURE
ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs

I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

1

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?
IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2
INPUT SELECT = ?

1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.124778729978E+00 ERROR=
.2060679E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.863457249087E-01 ERROR=
.3459956E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.294883093683E-01 ERROR=
.1940704E-

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.294883093683E-01
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.27308958E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.12865888E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.73722046E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.12865888E+00

CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.27308958E-02
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.863457249087E-01
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.42141416E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.36283020E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.19005676E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.36283020E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.42141416E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

5
THE INPUT FILE NAME=
in1.txt
SELECT MATERIAL=?
1--AlGaAs
2--InGaAsP
3--In1-zGazAs/InGaAsP/InP
4-- InGaAlAs
5--GaInP/AlzGawIn1-z-
wP/Al0.5In0.5P
6-- InxGa1-xAs/AlxGa1-
xAs/AlGaAs
7--In1-xGaxAs/InGaAsP/GaxIn1-
xP(X=0.51) MATCHED TO GaAs
8--AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1-
zAs/GaAs
9--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/InP
10--
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsSb
11--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsSb
12--In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-
x)/GaAs
13--InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT SELECTION
1

```

INPUT MODE = ? FOR TE-->
MODE =1, FOR TM--> MODE
=2
  INPUT TE OR TM ?
1
  IF EL1 BELOW EH1 THEN
  SELECT 1, OTHERWISE
  SELECT 2
  SELECTION=?
1

*****
*****
CALCULATE THE EFFECTIVE
MASS

*****
*****
FOR QUASI-FERMI LEVEL
SELECT=1,
  FOR READ EXISTING QUASI-
FERMI LEVEL SELECT=2
  SELECT=?

  J(LEAKAGE)=0.393099D+00
  A/cm^2 N=0.443609D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.402932D+00
  A/cm^2 N=0.445589D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.413009D+00
  A/cm^2 N=0.447569D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.423337D+00
  A/cm^2 N=0.449549D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.433923D+00
  A/cm^2 N=0.451529D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.444772D+00
  A/cm^2 N=0.453509D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.455891D+00
  A/cm^2 N=0.455489D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.467288D+00
  A/cm^2 N=0.457469D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.478968D+00
  A/cm^2 N=0.459449D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.490938D+00
  A/cm^2 N=0.461429D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.503207D+00
  A/cm^2 N=0.463409D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.515781D+00
  A/cm^2 N=0.465388D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.528669D+00
  A/cm^2 N=0.467368D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.541877D+00
  A/cm^2 N=0.469348D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.555414D+00
  A/cm^2 N=0.471328D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.569288D+00
  A/cm^2 N=0.473308D+19
  1/cm^3

```

```

  J(LEAKAGE)=0.583508D+00
  A/cm^2 N=0.475288D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.598081D+00
  A/cm^2 N=0.477268D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.613017D+00
  A/cm^2 N=0.479248D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.628326D+00
  A/cm^2 N=0.481228D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.644015D+00
  A/cm^2 N=0.483208D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.660095D+00
  A/cm^2 N=0.485188D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.676575D+00
  A/cm^2 N=0.487168D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.693465D+00
  A/cm^2 N=0.489148D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.710776D+00
  A/cm^2 N=0.491128D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.728518D+00
  A/cm^2 N=0.493108D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.746701D+00
  A/cm^2 N=0.495088D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.765338D+00
  A/cm^2 N=0.497068D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.784438D+00
  A/cm^2 N=0.499048D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.804013D+00
  A/cm^2 N=0.501028D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.824076D+00
  A/cm^2 N=0.503008D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.844638D+00
  A/cm^2 N=0.504987D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.865712D+00
  A/cm^2 N=0.506967D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.887310D+00
  A/cm^2 N=0.508947D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.909446D+00
  A/cm^2 N=0.510927D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.932133D+00
  A/cm^2 N=0.512907D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.955385D+00
  A/cm^2 N=0.514887D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.979215D+00
  A/cm^2 N=0.516867D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.100364D+01
  A/cm^2 N=0.518847D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.102867D+01
  A/cm^2 N=0.520827D+19
  1/cm^3

```

```

  J(LEAKAGE)=0.105432D+01
  A/cm^2 N=0.522807D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.108062D+01
  A/cm^2 N=0.524787D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.110756D+01
  A/cm^2 N=0.526767D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.113518D+01
  A/cm^2 N=0.528747D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.116349D+01
  A/cm^2 N=0.530727D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.119250D+01
  A/cm^2 N=0.532707D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.122223D+01
  A/cm^2 N=0.534687D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.125270D+01
  A/cm^2 N=0.536667D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.128393D+01
  A/cm^2 N=0.538647D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.131594D+01
  A/cm^2 N=0.540627D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.134874D+01
  A/cm^2 N=0.542607D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.138236D+01
  A/cm^2 N=0.544586D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.141682D+01
  A/cm^2 N=0.546566D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.145213D+01
  A/cm^2 N=0.548546D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.148832D+01
  A/cm^2 N=0.550526D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.152542D+01
  A/cm^2 N=0.552506D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.156343D+01
  A/cm^2 N=0.554486D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.160240D+01
  A/cm^2 N=0.556466D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.164233D+01
  A/cm^2 N=0.558446D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.168325D+01
  A/cm^2 N=0.560426D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.172520D+01
  A/cm^2 N=0.562406D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.176818D+01
  A/cm^2 N=0.564386D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.181224D+01
  A/cm^2 N=0.566366D+19
  1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.185739D+01
  A/cm^2 N=0.568346D+19
  1/cm^3

```

J(LEAKAGE)=0.111807D+02
A/cm^2 N=0.712882D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.114588D+02
A/cm^2 N=0.714862D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.117439D+02
A/cm^2 N=0.716842D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.120361D+02
A/cm^2 N=0.718822D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.123355D+02
A/cm^2 N=0.720802D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.126424D+02
A/cm^2 N=0.722782D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.129569D+02
A/cm^2 N=0.724762D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.132792D+02
A/cm^2 N=0.726742D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.136096D+02
A/cm^2 N=0.728722D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.139481D+02
A/cm^2 N=0.730702D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.142951D+02
A/cm^2 N=0.732682D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.146507D+02
A/cm^2 N=0.734662D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.150151D+02
A/cm^2 N=0.736642D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.153886D+02
A/cm^2 N=0.738622D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.157714D+02
A/cm^2 N=0.740602D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.161637D+02
A/cm^2 N=0.742581D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.165658D+02
A/cm^2 N=0.744561D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.169778D+02
A/cm^2 N=0.746541D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.174001D+02
A/cm^2 N=0.748521D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.178329D+02
A/cm^2 N=0.750501D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.182765D+02
A/cm^2 N=0.752481D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.187310D+02
A/cm^2 N=0.754461D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.191969D+02
A/cm^2 N=0.756441D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.196744D+02
A/cm^2 N=0.758421D+19
1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.201637D+02
A/cm^2 N=0.760401D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.206652D+02
A/cm^2 N=0.762381D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.211792D+02
A/cm^2 N=0.764361D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.217059D+02
A/cm^2 N=0.766341D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.222458D+02
A/cm^2 N=0.768321D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.227990D+02
A/cm^2 N=0.770301D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.233661D+02
A/cm^2 N=0.772281D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.239472D+02
A/cm^2 N=0.774261D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.245427D+02
A/cm^2 N=0.776241D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.251531D+02
A/cm^2 N=0.778221D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.257786D+02
A/cm^2 N=0.780201D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.264197D+02
A/cm^2 N=0.782180D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.270767D+02
A/cm^2 N=0.784160D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.277500D+02
A/cm^2 N=0.786140D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.284401D+02
A/cm^2 N=0.788120D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.291473D+02
A/cm^2 N=0.790100D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.298721D+02
A/cm^2 N=0.792080D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.306150D+02
A/cm^2 N=0.794060D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.313762D+02
A/cm^2 N=0.796040D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.321564D+02
A/cm^2 N=0.798020D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.329560D+02
A/cm^2 N=0.800000D+19
1/cm^3

G(J) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL
Go=0.138394D+02 1/cm
Jo=0.925880D+02 A/cm^2

G(N) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL

NGo=0.140723D+04 1/cm
XNo=0.156516D+19 1/cm^3

Jtr=0.340612D+02 A/cm^2
NTR=0.575791D+18 1/cm^3

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL FOLLOWS
THE ARTICLE
BY McIlory et al. IEEE JQE-21
1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL Nopt =
3

INPUT Nopt(CAN BE
DIFFERENT FROM ABOVE
CALCULATION)=?

2
NUMBER OF QUANTUM
WELL(MAY OR MAY NOT BE
Nopt)=?
2

1ST CHECK USE SINGLE
WELL TIMES # OF WELLS

2ND CHECK FOLLOWS
FORMULA BY McIlory IN IEEE
JOURNAL OF QUANTUM
ELECTRONIC QE-21 1985.

Gth= 28.0530 1/cm
Nth=0.332732D+19 1/cm^3 IY=
164
1ST CHECK Jth=
473.85102318 A/cm^2
2ND CHECK Jth= 192.89169
A/cm^2

1ST CHECK Ith=0.106616D+02
mA NUMBER OF WELLS= 2
2ND CHECK
Ith=0.434006D+01 mA

CALCULATE THE P-I
RELATION

NDATA= 237

CALCULATE THE SLOPE:
mW/mA Y=A+BX
CONSTANT A= -2.2887428
SLOPE B= 0.2146706

INPUT POWER PO FOR THE
LINEWIDTH, PO=0 FOR STOP
INPUT PO= mW

0
INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
CALCULATION. 2 FOR SKIP
INPUT =
2

K-FACTOR= 0.16652 nS
MAXIUM FREQ.= 53.3607 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMILEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.851824844087E-01 -
0.941039298692E-01
0.119799498747E+18
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
COGLa.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
CMGLa.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
COGEa.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
CMGEa.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT

1

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMILEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.38580014741 0.0324327199946
0.798020050125E+19
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
COGLb.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
CMGLb.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
COGEb.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
CMGEb.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
3

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND

3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND

4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)

6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

3.MALZEME İÇİN HESAPLAMALAR

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

MAKE YOUR SELECTION
NOW!

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND

3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND

4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)

6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

1

ENTER 1 FOR AlGaAs/AlGaAs
2 FOR InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR

InGaAlAs/InGaAlAs/InP

5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP

6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs

7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
MATCHED GaAs)

8 FOR AlyInxGa1-x-

yAs/AlzGa1-zAs/GaAs

9 FOR InzGa1-

zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP

```

10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-
y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
3
INPUT THE LAYER # FOR
GRIN STRUCTURE(STEP)
STEP N=
2
INPUT THE WELL
WAVELENGTH (um)
1.52
INPUT THE BARRIER
WAVELENGTH (um)
1.28
INPUT THE CLADDING
WAVELENGTH (um)
0.98
BANDGAP ENERGY OF
QUANTUM WELL=
0.815789473684211
INPUT CLADDING,
BARRIER,QUANTUM WELL
WIDTH (A)
90 70 500

FOR LATTICE MATCHED
BARRIER SELECT --> 1
FOR STRAIN COMPENSATED
SELECT -- 2

INPUT SELECTION====> ?
1
STRAIN FOR In1-xGaxAs=
4.793626535960454E-003

WRITE CONDUCTION BAND
PARAMETERS INTO
CBANDEG.DAT

WRITE VALENCE BAND
PARAMETERS INTO
VBANDEG.DAT
INPUT 1 FOR NEW
CALCULATION, 2 FOR EXIT
I= ?
2

ENTER 1 FOR AlGaAs/AlGaAs
2 FOR InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/InP
5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
9 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP

```

```

10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-
y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
14
THIS PROGRAM STOP HERE!,
BACK TO MAIN PAGE

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

2
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE LOWEST
POTENTIAL LAYER(1st Q-
WELL) IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER LAYER OF
STRUCTURE ICR=
3

*****
*****
INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In1-
xGaxAs/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)

```

```

I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
y)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

*****
*****
3
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.238114723616E-01 ERROR=
.2674919E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.163019953654E-01 ERROR=
.2993019E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.385791359192E-02 ERROR=
.2595729E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.133576701604E-01 ERROR=
.3258329E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.349531891607E-01 ERROR=
.3152039E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.599377365955E-01 ERROR=
.1813146E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.857754694343E-01 ERROR=
.2193111E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.108429919116E+00 ERROR=
.2887527E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.129053842324E+00 ERROR=
.2351240E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.155009479760E+00 ERROR=
.2398322E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.187503153353E+00 ERROR=
.2239113E

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.0238114723616
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
cb1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.52822897E-05
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.19191247E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.99615119E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.19191246E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.52822897E-05
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=

```

```
-0.0163019953654
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
cb2.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.25482706E-04
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.77826907E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.98438365E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.77826907E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.25482706E-04
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
  1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
2
```

```
  ENTER 1 FOR THE
  NECESSARY PARAMETERS
  2 FOR THE ENERGY
  VALUES OF CONDUCTION
  BAND
  3 FOR THE ENERGY
  VALUES OF HEAVY HOLE
  BAND
  4 FOR THE ENERGY
  VALUES OF LIGHT HOLE
  BAND
  5 FOR THE LASER G-J AND
  G(LAMBDA)
  6 FOR RATE
  EQUATIONS(TWO SECTION
  MODEL INCLUDED)
  7 FOR EXIT
  FOR LATTICE MATCHED
  BARRIER SELECT --> 1
  FOR STRAIN COMPENSATED
  SELECT -- 2
```

```
  INPUT SELECTION====> ?
1
  STRAIN FOR In1-xGaxAs=
4.793626535960454E-003
```

```
  WRITE CONDUCTION BAND
  PARAMETERS INTO
  CBANDEG.DAT
```

```
  WRITE VALENCE BAND
  PARAMETERS INTO
  VBANDEG.DAT
  INPUT 1 FOR NEW
  CALCULATION, 2 FOR EXIT
  I= ?
2
```

```
  ENTER 1 FOR AlGaAs/AlGaAs
  2 FOR InGaAsP/InGaAsP/InP
  3 FOR InGaAs/InGaAsP/InP
  4 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs/InP
  5 FOR
  GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
  6 FOR
  InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
  7 FOR
  InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
  MATCHED GaAs)
  8 FOR AlyInxGa1-x-
  yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
  9 FOR InzGa1-
  zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
```

```
10 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
  x(matched InP)
  11 FOR InzGa1-
  zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
  x
  12 FOR In(y)Ga(1-
  y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
  13 FOR In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-
  y)/GaAs
  14 FOR EXIT, BACK TO
  MAIN PAGE!
14
  THIS PROGRAM STOP HERE!.,
  BACK TO MAIN PAGE
```

```
  ENTER 1 FOR THE
  NECESSARY PARAMETERS
  2 FOR THE ENERGY
  VALUES OF CONDUCTION
  BAND
  3 FOR THE ENERGY
  VALUES OF HEAVY HOLE
  BAND
  4 FOR THE ENERGY
  VALUES OF LIGHT HOLE
  BAND
  5 FOR THE LASER G-J AND
  G(LAMBDA)
  6 FOR RATE
  EQUATIONS(TWO SECTION
  MODEL INCLUDED)
  7 FOR EXIT
```

```
2
  INPUT THE NUMBER OF
  QUANTUM WELLS NUM=?
1
  INPUT TOTAL LAYERS FOR
  STRUCTURE--N ODD
  INPUT N=
5
  INPUT THE LOWEST
  POTENTIAL LAYER(1st Q-
  WELL) IC= ?
3
```

```
  INPUT THE SELECTED
  CENTER LAYER OF
  STRUCTURE ICR=
3
```

```
*****
*****
```

```
  INPUT I=1 FOR AlGaAs
  I=2 FOR InGaAsP
  I=3 FOR In1-
  xGaxAs/InGaAsP/InP
  I=4 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs
  I=5 FOR
  GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
  I=6 FOR
  InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
  I=7 FOR
  InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
  GaAs)
  I=8 FOR AlyInxGa1-x-
  yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
  I=9 FOR InzGa1-
  zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP
  I=10 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
  x(InP)
```

```
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
  I=12 FOR In(y)Ga(1-
  y)As(x)N(1-x)/GaAs
  I=13 FOR InGaAs/In(1-
  y)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
  INPUT I= ?
```

```
*****
*****
```

```
3
  ENERGY EIGENVALUE====> -
0.238114723616E-01 ERROR=
.2674919E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
0.163019953654E-01 ERROR=
.2993019E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
0.385791359192E-02 ERROR=
.2595729E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.133576701604E-01 ERROR=
.3258329E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.349531891607E-01 ERROR=
.3152039E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.599377365955E-01 ERROR=
.1813146E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.857754694343E-01 ERROR=
.2193111E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.108429919116E+00 ERROR=
.2887527E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.129053842324E+00 ERROR=
.2351240E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.155009479760E+00 ERROR=
.2398322E-1
  ENERGY EIGENVALUE====>
0.187503153353E+00 ERROR=
.2239113E-1
```

```
  FOR CHECKING THE
  Schrodinger WAVE FUNCTION
  INPUT I==> 1
  SKIP INPUT I==> 2
  I=?
1
```

```
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
-0.0238114723616
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
cb1.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.52822897E-05
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.19191247E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.99615119E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.19191246E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.52822897E-05
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
  1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
1
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
```

```

-0.0163019953654
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
cb2.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.25482706E-04
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.77826907E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.98438365E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.77826907E-02
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.25482706E-04
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
  1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
2

  ENTER 1 FOR THE
  NECESSARY PARAMETERS
  2 FOR THE ENERGY
  VALUES OF CONDUCTION
  BAND
  3 FOR THE ENERGY
  VALUES OF HEAVY HOLE
  BAND
  4 FOR THE ENERGY
  VALUES OF LIGHT HOLE
  BAND
  5 FOR THE LASER G-J AND
  G(LAMBDA)
  6 FOR RATE
  EQUATIONS(TWO SECTION
  MODEL INCLUDED)
  7 FOR EXIT

3
  INPUT THE NUMBER OF
  QUANTUM WELLS NUM=?
1
  INPUT TOTAL LAYERS FOR
  STRUCTURE--N ODD
  INPUT N=
5
  INPUT THE HIGHEST
  POTENTIAL(1st Q-WELL)
  LAYER IC= ?
3
  INPUT THE SELECTED
  CENTER OF THE STRUCTURE
  ICR=?
3

*****
*****

  INPUT I=1 FOR AlGaAs
  I=2 FOR InGaAsP
  I=3 FOR In(1-
  x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
  I=4 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs
  I=5 FOR
  GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
  I=6 FOR
  InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
  I=7 FOR
  InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
  GaAs)
  I=8 FOR AlyInxGa1-x-
  yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
  I=9 FOR In(z)Ga(1-
  z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP

  I=10 FOR
  InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
  x(InP)
  I=11 FOR InzGa1-
  zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
  x
  I=12 FOR In(y)Ga(1-
  y)As(x)N(1-x)/GaAs
  I=13 FOR InGaAs/In(1-
  x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
  INPUT I= ?

*****
*****
3
*****
*****

  DOES THE STRUCTURE
  STRAIN OR STRAIN-
  COMPENSATED?
  IF STRAIN ONLY INPUT 1,
  STRAIN-COMPENSATED
  INPUT 2
  INPUT SELECT = ?

1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.338323590457E+00 ERROR=
  .5454871E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.321104444741E+00 ERROR=
  .1851890E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.303103797970E+00 ERROR=
  .2379732E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.285571687424E+00 ERROR=
  .1939021E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.269378361371E+00 ERROR=
  .3488401E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.254802925195E+00 ERROR=
  .2368402E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.241038959956E+00 ERROR=
  .3247589E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.226873466359E+00 ERROR=
  .3691247E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.212009537564E+00 ERROR=
  .3095561E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.197143077748E+00 ERROR=
  .3331966E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.183386404024E+00 ERROR=
  .7028974E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.171834818767E+00 ERROR=
  .7661037E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.162092925385E+00 ERROR=
  .2597293E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.151937111814E+00 ERROR=
  .3680201E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.140283174770E+00 ERROR=
  .8987780E-1

  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.128334447911E+00 ERROR=
  .9785479E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.118914253853E+00 ERROR=
  .7065863E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.113822495738E+00 ERROR=
  .2903846E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.108019325221E+00 ERROR=
  .3351184E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.980799728415E-01 ERROR=
  .3878189E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.868028036521E-01 ERROR=
  .3307498E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.757437586099E-01 ERROR=
  .3426417E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.652796837167E-01 ERROR=
  .2886524E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.555374926943E-01 ERROR=
  .4844942E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.465748395692E-01 ERROR=
  .4466981E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.384231687509E-01 ERROR=
  .2299608E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.311016911708E-01 ERROR=
  .3368089E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.246230338331E-01 ERROR=
  .3711276E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.189959014125E-01 ERROR=
  .3324397E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.142264755034E-01 ERROR=
  .2196655E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.103192111657E-01 ERROR=
  .1915946E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.727731672303E-02 ERROR=
  .1824518E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.510305318891E-02 ERROR=
  .2907562E-1
  ENERGY EIGENVALUE====> -
  0.379792314197E-02 ERROR=
  .2268530E-1

  FOR CHECKING THE
  Schrodinger WAVE FUNCTION
  INPUT I==> 1
  SKIP INPUT I==> 2
  I=?
1
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
  -0.0379792314197
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
hh2.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.73235066E-07
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.44857305E-01

```

CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.92877892E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.26363654E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.50914651E-07
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

4
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC=?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE STRUCTURE
ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs

I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I=?

3

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?
IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2
INPUT SELECT=?

1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.307653901014E+00 ERROR=
.2904615E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.260428235649E+00 ERROR=
.3760091E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.218270529590E+00 ERROR=
.2764559E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.186024843814E+00 ERROR=
.4987232E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.160764073253E+00 ERROR=
.1026189E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.132928870267E+00 ERROR=
.2805327E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.100420542114E+00 ERROR=
.5007190E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.680729638409E-01 ERROR=
.4339102E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.390595796385E-01 ERROR=
.3997392E-1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.146486242417E-01 ERROR=
.4061542E-1
ENERGY EIGENVALUE====>
0.462654708391E-02 ERROR=
.2018124E-1
ENERGY EIGENVALUE====>
0.185138151300E-01 ERROR=
.1655151E-1
ENERGY EIGENVALUE====>
0.268863033644E-01 ERROR=
.2382479E-1

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.0268863033644
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.13133316E-05

CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.11087720E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.99777983E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.11087720E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.13133316E-05
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1

INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.0185138151300
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.62032704E-05
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.45212731E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.99094505E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.45212731E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.62032704E-05
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

MAKE YOUR SELECTION NOW!	J(LEAKAGE)=0.453811D+01 A/cm^2 N=0.443609D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.150642D+02 A/cm^2 N=0.491128D+19 1/cm^3
ENTER 1 FOR THE NECESSARY PARAMETERS	J(LEAKAGE)=0.477093D+01 A/cm^2 N=0.445589D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.158355D+02 A/cm^2 N=0.493108D+19 1/cm^3
2 FOR THE ENERGY VALUES OF CONDUCTION BAND	J(LEAKAGE)=0.501569D+01 A/cm^2 N=0.447569D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.166461D+02 A/cm^2 N=0.495088D+19 1/cm^3
3 FOR THE ENERGY VALUES OF HEAVY HOLE BAND	J(LEAKAGE)=0.527299D+01 A/cm^2 N=0.449549D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.174981D+02 A/cm^2 N=0.497068D+19 1/cm^3
4 FOR THE ENERGY VALUES OF LIGHT HOLE BAND	J(LEAKAGE)=0.554347D+01 A/cm^2 N=0.451529D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.183936D+02 A/cm^2 N=0.499048D+19 1/cm^3
5 FOR THE LASER G-J AND G(LAMBDA)	J(LEAKAGE)=0.582782D+01 A/cm^2 N=0.453509D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.193347D+02 A/cm^2 N=0.501028D+19 1/cm^3
6 FOR RATE EQUATIONS(TWO SECTION MODEL INCLUDED)	J(LEAKAGE)=0.612673D+01 A/cm^2 N=0.455489D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.203238D+02 A/cm^2 N=0.503008D+19 1/cm^3
7 FOR EXIT	J(LEAKAGE)=0.644095D+01 A/cm^2 N=0.457469D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.213634D+02 A/cm^2 N=0.504987D+19 1/cm^3
5 THE INPUT FILE NAME= in1.txt	J(LEAKAGE)=0.677127D+01 A/cm^2 N=0.459449D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.224559D+02 A/cm^2 N=0.506967D+19 1/cm^3
SELECT MATERIAL=?	J(LEAKAGE)=0.711850D+01 A/cm^2 N=0.461429D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.236040D+02 A/cm^2 N=0.508947D+19 1/cm^3
1--AlGaAs	J(LEAKAGE)=0.748351D+01 A/cm^2 N=0.463409D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.248106D+02 A/cm^2 N=0.510927D+19 1/cm^3
2--InGaAsP	J(LEAKAGE)=0.786722D+01 A/cm^2 N=0.465388D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.260786D+02 A/cm^2 N=0.512907D+19 1/cm^3
3--In1-zGazAs/InGaAsP/InP	J(LEAKAGE)=0.827056D+01 A/cm^2 N=0.467368D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.274110D+02 A/cm^2 N=0.514887D+19 1/cm^3
4-- InGaAlAs	J(LEAKAGE)=0.869456D+01 A/cm^2 N=0.469348D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.288113D+02 A/cm^2 N=0.516867D+19 1/cm^3
5--GaInP/AlzGawIn1-z- wP/Al0.5In0.5P	J(LEAKAGE)=0.914025D+01 A/cm^2 N=0.471328D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.302826D+02 A/cm^2 N=0.518847D+19 1/cm^3
6-- InxGa1-xAs/AlxGa1- xAs/AlGaAs	J(LEAKAGE)=0.960874D+01 A/cm^2 N=0.473308D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.318287D+02 A/cm^2 N=0.520827D+19 1/cm^3
7--In1-xGaxAs/InGaAsP/GaxIn1- xP(X=0.51) MATCHED TO GaAs	J(LEAKAGE)=0.101012D+02 A/cm^2 N=0.475288D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.334533D+02 A/cm^2 N=0.522807D+19 1/cm^3
8--AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1- zAs/GaAs	J(LEAKAGE)=0.106189D+02 A/cm^2 N=0.477268D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.351603D+02 A/cm^2 N=0.524787D+19 1/cm^3
9--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x- yAs/InP	J(LEAKAGE)=0.117349D+02 A/cm^2 N=0.481228D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.369538D+02 A/cm^2 N=0.526767D+19 1/cm^3
10-- InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsSb	J(LEAKAGE)=0.123361D+02 A/cm^2 N=0.483208D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.388382D+02 A/cm^2 N=0.528747D+19 1/cm^3
11--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x- yAs/AlAsSb	J(LEAKAGE)=0.129681D+02 A/cm^2 N=0.485188D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.408180D+02 A/cm^2 N=0.530727D+19 1/cm^3
12--In(y)Ga(1-y)As(x)N(1- x)/GaAs	J(LEAKAGE)=0.136323D+02 A/cm^2 N=0.487168D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.428980D+02 A/cm^2 N=0.532707D+19 1/cm^3
13--InGaAs/In(1- x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs	J(LEAKAGE)=0.143304D+02 A/cm^2 N=0.489148D+19 1/cm^3	J(LEAKAGE)=0.450832D+02 A/cm^2 N=0.534687D+19 1/cm^3
INPUT SELECTION		J(LEAKAGE)=0.473788D+02 A/cm^2 N=0.536667D+19 1/cm^3
3		
INPUT MODE = ? FOR TE--> MODE =1, FOR TM--> MODE =2		
INPUT TE OR TM ?		
1		
IF EL1 BELOW EH1 THEN SELECT 1, OTHERWISE SELECT 2		
SELECTION=?		
1		
***** *****		
CALCULATE THE EFFECTIVE MASS		
***** *****		
FOR QUASI-FERMI LEVEL SELECT=1, FOR READ EXISTING QUASI- FERMI LEVEL SELECT=2		
SELECT=?		

J(LEAKAGE)=0.497903D+02
 A/cm^2 N=0.538647D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.523234D+02
 A/cm^2 N=0.540627D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.549842D+02
 A/cm^2 N=0.542607D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.577789D+02
 A/cm^2 N=0.544586D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.607143D+02
 A/cm^2 N=0.546566D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.637971D+02
 A/cm^2 N=0.548546D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.670347D+02
 A/cm^2 N=0.550526D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.704346D+02
 A/cm^2 N=0.552506D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.740048D+02
 A/cm^2 N=0.554486D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.777536D+02
 A/cm^2 N=0.556466D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.816896D+02
 A/cm^2 N=0.558446D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.858220D+02
 A/cm^2 N=0.560426D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.901602D+02
 A/cm^2 N=0.562406D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.947143D+02
 A/cm^2 N=0.564386D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.994944D+02
 A/cm^2 N=0.566366D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.104512D+03
 A/cm^2 N=0.568346D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.109777D+03
 A/cm^2 N=0.570326D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.115303D+03
 A/cm^2 N=0.572306D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.121101D+03
 A/cm^2 N=0.574286D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.127184D+03
 A/cm^2 N=0.576266D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.133566D+03
 A/cm^2 N=0.578246D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.140261D+03
 A/cm^2 N=0.580226D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.147283D+03
 A/cm^2 N=0.582206D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.154648D+03
 A/cm^2 N=0.584185D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.162371D+03
 A/cm^2 N=0.586165D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.170468D+03
 A/cm^2 N=0.588145D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.178957D+03
 A/cm^2 N=0.590125D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.187856D+03
 A/cm^2 N=0.592105D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.197183D+03
 A/cm^2 N=0.594085D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.206956D+03
 A/cm^2 N=0.596065D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.217197D+03
 A/cm^2 N=0.598045D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.227925D+03
 A/cm^2 N=0.600025D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.239162D+03
 A/cm^2 N=0.602005D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.250930D+03
 A/cm^2 N=0.603985D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.263252D+03
 A/cm^2 N=0.605965D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.276151D+03
 A/cm^2 N=0.607945D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.289652D+03
 A/cm^2 N=0.609925D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.303779D+03
 A/cm^2 N=0.611905D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.318560D+03
 A/cm^2 N=0.613885D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.334020D+03
 A/cm^2 N=0.615865D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.350188D+03
 A/cm^2 N=0.617845D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.367090D+03
 A/cm^2 N=0.619825D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.384757D+03
 A/cm^2 N=0.621805D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.403219D+03
 A/cm^2 N=0.623784D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.422505D+03
 A/cm^2 N=0.625764D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.442646D+03
 A/cm^2 N=0.627744D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.463676D+03
 A/cm^2 N=0.629724D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.485626D+03
 A/cm^2 N=0.631704D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.508529D+03
 A/cm^2 N=0.633684D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.532420D+03
 A/cm^2 N=0.635664D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.557331D+03
 A/cm^2 N=0.637644D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.583299D+03
 A/cm^2 N=0.639624D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.610358D+03
 A/cm^2 N=0.641604D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.638544D+03
 A/cm^2 N=0.643584D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.667893D+03
 A/cm^2 N=0.645564D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.698441D+03
 A/cm^2 N=0.647544D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.730223D+03
 A/cm^2 N=0.649524D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.763277D+03
 A/cm^2 N=0.651504D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.797638D+03
 A/cm^2 N=0.653484D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.833344D+03
 A/cm^2 N=0.655464D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.870430D+03
 A/cm^2 N=0.657444D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.908931D+03
 A/cm^2 N=0.659424D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.948884D+03
 A/cm^2 N=0.661404D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.990323D+03
 A/cm^2 N=0.663383D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.103328D+04
 A/cm^2 N=0.665363D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.107780D+04
 A/cm^2 N=0.667343D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.112390D+04
 A/cm^2 N=0.669323D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.117162D+04
 A/cm^2 N=0.671303D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.122100D+04
 A/cm^2 N=0.673283D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.127205D+04
 A/cm^2 N=0.675263D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.132482D+04
 A/cm^2 N=0.677243D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.137933D+04
 A/cm^2 N=0.679223D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.143560D+04
A/cm² N=0.681203D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.149366D+04
A/cm² N=0.683183D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.155354D+04
A/cm² N=0.685163D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.161525D+04
A/cm² N=0.687143D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.167882D+04
A/cm² N=0.689123D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.174427D+04
A/cm² N=0.691103D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.181162D+04
A/cm² N=0.693083D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.188088D+04
A/cm² N=0.695063D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.195207D+04
A/cm² N=0.697043D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.202519D+04
A/cm² N=0.699023D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.210028D+04
A/cm² N=0.701003D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.217732D+04
A/cm² N=0.702982D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.225634D+04
A/cm² N=0.704962D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.233735D+04
A/cm² N=0.706942D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.242034D+04
A/cm² N=0.708922D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.250533D+04
A/cm² N=0.710902D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.259232D+04
A/cm² N=0.712882D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.268132D+04
A/cm² N=0.714862D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.277233D+04
A/cm² N=0.716842D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.286536D+04
A/cm² N=0.718822D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.296041D+04
A/cm² N=0.720802D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.305748D+04
A/cm² N=0.722782D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.315658D+04
A/cm² N=0.724762D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.325771D+04
A/cm² N=0.726742D+19
1/cm³

J(LEAKAGE)=0.336087D+04
A/cm² N=0.728722D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.346608D+04
A/cm² N=0.730702D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.357333D+04
A/cm² N=0.732682D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.368263D+04
A/cm² N=0.734662D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.379400D+04
A/cm² N=0.736642D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.390743D+04
A/cm² N=0.738622D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.402294D+04
A/cm² N=0.740602D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.414052D+04
A/cm² N=0.742581D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.426020D+04
A/cm² N=0.744561D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.438198D+04
A/cm² N=0.746541D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.450587D+04
A/cm² N=0.748521D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.463188D+04
A/cm² N=0.750501D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.476000D+04
A/cm² N=0.752481D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.489026D+04
A/cm² N=0.754461D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.502264D+04
A/cm² N=0.756441D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.515715D+04
A/cm² N=0.758421D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.529379D+04
A/cm² N=0.760401D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.543255D+04
A/cm² N=0.762381D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.557341D+04
A/cm² N=0.764361D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.571636D+04
A/cm² N=0.766341D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.586137D+04
A/cm² N=0.768321D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.600840D+04
A/cm² N=0.770301D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.615743D+04
A/cm² N=0.772281D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.630841D+04
A/cm² N=0.774261D+19
1/cm³

J(LEAKAGE)=0.646127D+04
A/cm² N=0.776241D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.661596D+04
A/cm² N=0.778221D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.677240D+04
A/cm² N=0.780201D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.693053D+04
A/cm² N=0.782180D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.709024D+04
A/cm² N=0.784160D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.725146D+04
A/cm² N=0.786140D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.741408D+04
A/cm² N=0.788120D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.757801D+04
A/cm² N=0.790100D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.774313D+04
A/cm² N=0.792080D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.790934D+04
A/cm² N=0.794060D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.807654D+04
A/cm² N=0.796040D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.824461D+04
A/cm² N=0.798020D+19
1/cm³
J(LEAKAGE)=0.841344D+04
A/cm² N=0.800000D+19
1/cm³

G(J) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL
Go=0.151077D+02 1/cm
Jo=0.982243D+02 A/cm²

G(N) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL
NGo=0.153620D+04 1/cm
XNo=0.852381D+18 1/cm³

Jtr=0.361347D+02 A/cm²
NTR=0.313573D+18 1/cm³

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL FOLLOWS
THE ARTICLE
BY McIlory et al. IEEE JQE-21
1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL Nopt =
2

INPUT Nopt(CAN BE
DIFFERENT FROM ABOVE
CALCULATION)=?
2

NUMBER OF QUANTUM
WELL(MAY OR MAY NOT BE
Nopt)=?
1

1ST CHECK USE SINGLE
WELL TIMES # OF WELLS

2ND CHECK FOLLOWS
FORMULA BY McIlory IN IEEE
JOURNAL OF QUANTUM
ELECTRONIC QE-21 1985.

Gth= 28.0530 1/cm
Nth=0.166416D+19 1/cm^3 IY=
80

1ST CHECK Jth=
418.58690874 A/cm^2
2ND CHECK Jth= 278.12642
A/cm^2

1ST CHECK lth=0.941821D+01
mA NUMBER OF WELLS= 2
2ND CHECK
lth=0.625784D+01 mA

CALCULATE THE P-I
RELATION

NDATA= 321

CALCULATE THE SLOPE:
mW/mA Y=A+BX
CONSTANT A= -2.0612790
SLOPE B= 0.2188611

INPUT POWER PO FOR THE
LINEWIDTH, PO=0 FOR STOP
INPUT PO= mW
0

INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
CALCULATION. 2 FOR SKIP
INPUT =
2

K-FACTOR= 0.16534 nS
MAXIUM FREQ.= 53.7421 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS

1
INPUT FERMI LEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.110143639248E+00 -
0.735425094136E-01
0.139598997494E+18

CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol1.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
ml1.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe1.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
me1.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
1

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS

1
INPUT FERMI LEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.181419036533E+00 -
0.254966846617E-01
0.812781954887E+18

CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol2.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
ml2.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe2.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
me2.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
3

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND

3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND

4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)

6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)

7 FOR EXIT

4.MALZEME İÇİN HESAPLAMALAR

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

MAKE YOUR SELECTION
NOW!

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

4
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE STRUCTURE
ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x

I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

4

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?
IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2
INPUT SELECT = ?

1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.219431227325E+00 ERROR=
.4394220E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.174099299040E+00 ERROR=
.2765246E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.128305224620E+00 ERROR=
.1594944E

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.219431227325
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.15545726E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.24588518E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.19731512E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.24588518E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.15545726E+00
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.174099299040
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.46952295E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.35420538E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.19768466E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.35420538E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.46952295E-01

INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

5
THE INPUT FILE NAME=
in1.txt
SELECT MATERIAL=?
1--AlGaAs
2--InGaAsP
3--In1-zGazAs/InGaAsP/InP
4-- InGaAlAs
5--GaInP/AlzGawIn1-z-
wP/Al0.5In0.5P
6-- InxGa1-xAs/AlxGa1-
xAs/AlGaAs
7--In1-xGaxAs/InGaAsP/GaxIn1-
xP(X=0.51) MATCHED TO GaAs
8--AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1-
zAs/GaAs
9--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/InP
10--
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsSb
11--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsSb
12--In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-
x)/GaAs
13--InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT SELECTION
4
INPUT MODE = ? FOR TE-->
MODE =1, FOR TM--> MODE
=2
INPUT TE OR TM ?
1
IF EL1 BELOW EH1 THEN
SELECT 1, OTHERWISE
SELECT 2
SELECTION=?
1

CALCULATE THE EFFECTIVE
MASS

FOR QUASI-FERMI LEVEL
SELECT=1,
FOR READ EXISTING QUASI-
FERMI LEVEL SELECT=2
SELECT=?

J(LEAKAGE)=0.731128D+00
 A/cm^2 N=0.455489D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.761885D+00
 A/cm^2 N=0.457469D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.793935D+00
 A/cm^2 N=0.459449D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.827333D+00
 A/cm^2 N=0.461429D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.862136D+00
 A/cm^2 N=0.463409D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.898401D+00
 A/cm^2 N=0.465388D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.936192D+00
 A/cm^2 N=0.467368D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.975571D+00
 A/cm^2 N=0.469348D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.101661D+01
 A/cm^2 N=0.471328D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.105937D+01
 A/cm^2 N=0.473308D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.110392D+01
 A/cm^2 N=0.475288D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.115036D+01
 A/cm^2 N=0.477268D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.119874D+01
 A/cm^2 N=0.479248D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.124916D+01
 A/cm^2 N=0.481228D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.130169D+01
 A/cm^2 N=0.483208D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.135644D+01
 A/cm^2 N=0.485188D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.141348D+01
 A/cm^2 N=0.487168D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.147293D+01
 A/cm^2 N=0.489148D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.153487D+01
 A/cm^2 N=0.491128D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.159942D+01
 A/cm^2 N=0.493108D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.166667D+01
 A/cm^2 N=0.495088D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.173676D+01
 A/cm^2 N=0.497068D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.180979D+01
 A/cm^2 N=0.499048D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.188589D+01
 A/cm^2 N=0.501028D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.196519D+01
 A/cm^2 N=0.503008D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.204782D+01
 A/cm^2 N=0.504987D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.213392D+01
 A/cm^2 N=0.506967D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.222364D+01
 A/cm^2 N=0.508947D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.231714D+01
 A/cm^2 N=0.510927D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.241455D+01
 A/cm^2 N=0.512907D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.251607D+01
 A/cm^2 N=0.514887D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.262184D+01
 A/cm^2 N=0.516867D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.273206D+01
 A/cm^2 N=0.518847D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.284691D+01
 A/cm^2 N=0.520827D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.296659D+01
 A/cm^2 N=0.522807D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.309129D+01
 A/cm^2 N=0.524787D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.322123D+01
 A/cm^2 N=0.526767D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.335662D+01
 A/cm^2 N=0.528747D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.349771D+01
 A/cm^2 N=0.530727D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.364471D+01
 A/cm^2 N=0.532707D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.379789D+01
 A/cm^2 N=0.534687D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.395751D+01
 A/cm^2 N=0.536667D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.412382D+01
 A/cm^2 N=0.538647D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.429712D+01
 A/cm^2 N=0.540627D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.447769D+01
 A/cm^2 N=0.542607D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.466584D+01
 A/cm^2 N=0.544586D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.486189D+01
 A/cm^2 N=0.546566D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.506616D+01
 A/cm^2 N=0.548546D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.527901D+01
 A/cm^2 N=0.550526D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.550079D+01
 A/cm^2 N=0.552506D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.573188D+01
 A/cm^2 N=0.554486D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.597266D+01
 A/cm^2 N=0.556466D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.622354D+01
 A/cm^2 N=0.558446D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.648495D+01
 A/cm^2 N=0.560426D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.675732D+01
 A/cm^2 N=0.562406D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.704111D+01
 A/cm^2 N=0.564386D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.733681D+01
 A/cm^2 N=0.566366D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.764490D+01
 A/cm^2 N=0.568346D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.796590D+01
 A/cm^2 N=0.570326D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.830037D+01
 A/cm^2 N=0.572306D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.864885D+01
 A/cm^2 N=0.574286D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.901193D+01
 A/cm^2 N=0.576266D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.939023D+01
 A/cm^2 N=0.578246D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.978438D+01
 A/cm^2 N=0.580226D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.101950D+02
 A/cm^2 N=0.582206D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.106229D+02
 A/cm^2 N=0.584185D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.110687D+02
 A/cm^2 N=0.586165D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.115331D+02
 A/cm^2 N=0.588145D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.120170D+02
 A/cm^2 N=0.590125D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.125211D+02
 A/cm^2 N=0.592105D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.130463D+02
 A/cm^2 N=0.594085D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.135935D+02
 A/cm^2 N=0.596065D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.141636D+02
 A/cm^2 N=0.598045D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.147575D+02
 A/cm^2 N=0.600025D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.153762D+02
 A/cm^2 N=0.602005D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.160208D+02
 A/cm^2 N=0.603985D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.166924D+02
 A/cm^2 N=0.605965D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.173920D+02
 A/cm^2 N=0.607945D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.181208D+02
 A/cm^2 N=0.609925D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.188800D+02
 A/cm^2 N=0.611905D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.196710D+02
 A/cm^2 N=0.613885D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.204949D+02
 A/cm^2 N=0.615865D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.213532D+02
 A/cm^2 N=0.617845D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.222473D+02
 A/cm^2 N=0.619825D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.231787D+02
 A/cm^2 N=0.621805D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.241489D+02
 A/cm^2 N=0.623784D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.251594D+02
 A/cm^2 N=0.625764D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.262121D+02
 A/cm^2 N=0.627744D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.273086D+02
 A/cm^2 N=0.629724D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.284507D+02
 A/cm^2 N=0.631704D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.296403D+02
 A/cm^2 N=0.633684D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.308794D+02
 A/cm^2 N=0.635664D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.321699D+02
 A/cm^2 N=0.637644D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.335141D+02
 A/cm^2 N=0.639624D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.349140D+02
 A/cm^2 N=0.641604D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.363720D+02
 A/cm^2 N=0.643584D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.378904D+02
 A/cm^2 N=0.645564D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.394718D+02
 A/cm^2 N=0.647544D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.411187D+02
 A/cm^2 N=0.649524D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.428337D+02
 A/cm^2 N=0.651504D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.446196D+02
 A/cm^2 N=0.653484D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.464794D+02
 A/cm^2 N=0.655464D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.484160D+02
 A/cm^2 N=0.657444D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.504325D+02
 A/cm^2 N=0.659424D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.525322D+02
 A/cm^2 N=0.661404D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.547184D+02
 A/cm^2 N=0.663383D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.569946D+02
 A/cm^2 N=0.665363D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.593645D+02
 A/cm^2 N=0.667343D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.618318D+02
 A/cm^2 N=0.669323D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.644004D+02
 A/cm^2 N=0.671303D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.670744D+02
 A/cm^2 N=0.673283D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.698579D+02
 A/cm^2 N=0.675263D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.727554D+02
 A/cm^2 N=0.677243D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.757714D+02
 A/cm^2 N=0.679223D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.789106D+02
 A/cm^2 N=0.681203D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.821779D+02
 A/cm^2 N=0.683183D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.855784D+02
 A/cm^2 N=0.685163D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.891172D+02
 A/cm^2 N=0.687143D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.927999D+02
 A/cm^2 N=0.689123D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.966320D+02
 A/cm^2 N=0.691103D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.100619D+03
 A/cm^2 N=0.693083D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.104768D+03
 A/cm^2 N=0.695063D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.109085D+03
 A/cm^2 N=0.697043D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.113575D+03
 A/cm^2 N=0.699023D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.118247D+03
 A/cm^2 N=0.701003D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.123106D+03
 A/cm^2 N=0.702982D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.128160D+03
 A/cm^2 N=0.704962D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.133417D+03
 A/cm^2 N=0.706942D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.138884D+03
 A/cm^2 N=0.708922D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.144568D+03
 A/cm^2 N=0.710902D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.150480D+03
 A/cm^2 N=0.712882D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.156626D+03
 A/cm^2 N=0.714862D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.163015D+03
 A/cm^2 N=0.716842D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.169657D+03
 A/cm^2 N=0.718822D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.176561D+03
 A/cm^2 N=0.720802D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.183737D+03
 A/cm^2 N=0.722782D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.191194D+03
 A/cm^2 N=0.724762D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.198943D+03
 A/cm^2 N=0.726742D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.206994D+03
 A/cm^2 N=0.728722D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.215358D+03
 A/cm^2 N=0.730702D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.224046D+03
 A/cm^2 N=0.732682D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.233070D+03
 A/cm^2 N=0.734662D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.242442D+03
 A/cm^2 N=0.736642D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.252173D+03
 A/cm^2 N=0.738622D+19
 1/cm^3

$J(\text{LEAKAGE})=0.262276\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.740602\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.272765\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.742581\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.283651\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.744561\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.294949\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.746541\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.306671\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.748521\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.318834\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.750501\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.331450\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.752481\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.344534\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.754461\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.358101\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.756441\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.372168\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.758421\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.386749\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.760401\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.401860\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.762381\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.417518\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.764361\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.433739\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.766341\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.450541\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.768321\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.467939\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.770301\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.485951\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.772281\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.504595\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.774261\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.523888\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.776241\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.543848\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.778221\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.564494\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.780201\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.585843\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.782180\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.607914\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.784160\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.630725\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.786140\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$

$J(\text{LEAKAGE})=0.654295\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.788120\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.678642\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.790100\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.703785\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.792080\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.729743\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.794060\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.756533\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.796040\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.784174\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.798020\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.812685\text{D}+03$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.800000\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$

G(J) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL
 $G_o=0.158181\text{D}+02 \quad 1/\text{cm}$
 $J_o=0.954942\text{D}+02 \quad A/\text{cm}^2$

G(N) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL
 $N G_o=0.160843\text{D}+04 \quad 1/\text{cm}$
 $X N_o=0.911779\text{D}+18 \quad 1/\text{cm}^3$

$J_{tr}=0.351304\text{D}+02 \quad A/\text{cm}^2$
 $N_{tr}=0.335425\text{D}+18 \quad 1/\text{cm}^3$

THE OPTIMUM NUMBER OF
 QUANTUM WELL FOLLOWS
 THE ARTICLE
 BY McIlory et al. IEEE JQE-21
 1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
 QUANTUM WELL $N_{opt} =$
 2
 INPUT N_{opt} (CAN BE
 DIFFERENT FROM ABOVE
 CALCULATION)=?
 2
 NUMBER OF QUANTUM
 WELL(MAY OR MAY NOT BE
 N_{opt})=?
 3

1ST CHECK USE SINGLE
 WELL TIMES # OF WELLS

2ND CHECK FOLLOWS
 FORMULA BY McIlory IN IEEE
 JOURNAL OF QUANTUM
 ELECTRONIC QE-21 1985.

$G_{th}= 28.0530 \quad 1/\text{cm}$
 $N_{th}=0.170376\text{D}+19 \quad 1/\text{cm}^3 \quad IY=$
 82
 1ST CHECK $J_{th}=$
 381.42697085 A/cm^2
 2ND CHECK $J_{th}= 213.82690$
 A/cm^2

1ST CHECK $I_{th}=0.858211\text{D}+01$
 mA NUMBER OF WELLS= 2
 2ND CHECK
 $I_{th}=0.481111\text{D}+01 \quad \text{mA}$

CALCULATE THE P-I
 RELATION

$N_{DATA}= 319$

CALCULATE THE SLOPE:
 $mW/\text{mA} \quad Y=A+BX$
 CONSTANT $A= -1.8744106$
 SLOPE $B= 0.2184091$

INPUT POWER P_o FOR THE
 LINEWIDTH, $P_o=0$ FOR STOP
 INPUT $P_o= mW$

1
 THE LINEWIDTH Δf AND
 ALPHA FACTOR AT
 THRESHOLD ARE
 $\Delta f= 0.8213645344\text{D}+00 \quad \text{MHz}$
 ALPHA FACTOR= $1.735501\text{D}+01$

INPUT POWER P_o FOR THE
 LINEWIDTH, $P_o=0$ FOR STOP
 INPUT $P_o= mW$

0
 INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
 CALCULATION. 2 FOR SKIP
 INPUT =
 2

$K\text{-FACTOR}= 0.16505 \quad \text{nS}$
 MAXIMUM FREQ.= 53.8361 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
 THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
 THE LINEWIDTH
 ENHANCEMENT
 FACTOR AND PHOTON
 ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
 PROGRAM

THE INPUT # IS
 1

```

INPUT FERMLEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.108252516581 -
0.0671736732157
0.159398496241E+18
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

*****
*****

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol1.txt

*****
*****

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
ml1.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe1.txt

*****
*****

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
me1.txt

*****
*****

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
1

*****
*****

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMLEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.558909216790
0.0762417809574E
0.800000000000E+19
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

*****
*****

```

```

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol2.txt

*****
*****

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
me2.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe2.txt

*****
*****

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
ml2.txt

*****
*****

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
3

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

```

6.MALZEME İÇİN HESAPLAMALAR

```

*****
*****

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

```

```

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

*****
*****

MAKE YOUR SELECTION
NOW!

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

1

ENTER 1 FOR AlGaAs/AlGaAs
2 FOR InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/InP
5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
9 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-
y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
8
INPUT THE LAYER # FOR
GRIN STRUCTURE(STEP)
STEP N=
2
INPUT THE WELL
WAVELENGTH (um)
0.97
INPUT THE BARRIER
WAVELENGTH (um)
0.76
INPUT THE CLADDING
WAVELENGTH (um)
0.52

```

```

BANDGAP ENERGY OF
QUANTUM WELL=
1.27835051546392
INPUT CLADDING,
BARRIER,QUANTUM WELL
WIDTH (A)
100 100 80
CALCULATE AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs

INPUT STRAIN
-.014
WELL LATTICE =
5.73244687554351 BARRIER
LATTICE =
5.65459840881273
STRAIN = -
1.376728480124305E-002

WRITE CONDUCTION BAND
PARAMETERS INTO
CBANDEG.DAT

WRITE VALENCE BAND
PARAMETERS INTO
VBANDEG.DAT
INPUT 1 FOR NEW
CALCULATION, 2 FOR EXIT
I= ?
2

ENTER 1 FOR AlGaAs/AlGaAs
2 FOR InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/InP
5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
9 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-x)Ga(x)As(y)P(1-
y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
14
THIS PROGRAM STOP HERE!,
BACK TO MAIN PAGE

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

```

```

5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

2
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE LOWEST
POTENTIAL LAYER(1st Q-
WELL) IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER LAYER OF
STRUCTURE ICR=
3

*****
*****
INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In1-
xGaxAs/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
y)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

*****
*****
8
ENERGY EIGENVALUE====>
0.123092454199E+00 ERROR=
.3617095E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.212909594137E+00 ERROR=
.5598330E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.272032958411E+00 ERROR=
.3221017E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.295192350797E+00 ERROR=
.1308078E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.353227742772E+00 ERROR=
.3405371E

```

```

ENERGY EIGENVALUE====>
0.414388854672E+00 ERROR=
.2187799E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.483142932698E+00 ERROR=
.3071024E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.573689682800E+00 ERROR=
.1733525E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.661483156822E+00 ERROR=
.2831957E
ENERGY EIGENVALUE====>
0.751329188256E+00 ERROR=
.2094882E

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.123092454199
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
ce1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.68833614E-06
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.38605911E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.92278680E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.38605912E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.68833616E-06
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.414388854672
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
ce2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.15837793E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.39766981E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.17298479E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.39766981E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.15837793E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

```

5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

3
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE STRUCTURE
ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

8

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?
IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2
INPUT SELECT = ?

1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.334073023896E+00 ERROR=
.5547685E

ENERGY EIGENVALUE====> -
0.307283170298E+00 ERROR=
.4753124E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.274296518399E+00 ERROR=
.2861458E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.249328361861E+00 ERROR=
.1104656E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.224796972377E+00 ERROR=
.3722071E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.198237574466E+00 ERROR=
.8844794E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.182685825950E+00 ERROR=
.2207122E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.158830818883E+00 ERROR=
.5142040E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.146913403579E+00 ERROR=
.3796449E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.133284263654E+00 ERROR=
.2349006E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.122158420278E+00 ERROR=
.1940309E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.118612878623E+00 ERROR=
.1465949E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.824028509181E-01 ERROR=
.2655606E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.380016625361E-01 ERROR=
.2429469E
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.900068964194E-02 ERROR=
.2477106E

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1

INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.900068964194E-02
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
hhe1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.34894223E-11
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.84163372E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.98316733E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.84163372E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.34894223E-11
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.380016625361E-01
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE

hhe2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.25387512E-09
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.37775504E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.92444899E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.37775504E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.25387512E-09
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

4
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?

THE MAIN PROGRAM IS
ONLY A CALLING PROGRAM,
WHICH
CONTAINS THREE MAJOR
PARTS(MORE THAN 20
SUBROUTINES)

FIRST SELECT MATERIAL
PARAMETERS.

SECOND SELECT ENERGY
LEVELS IN BOTH BANDS.

THIRD FIND THE G(J),
G(WAVELENGTH) AND RATE
EQUATIONS

MAKE YOUR SELECTION
NOW!

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND

3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

4
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE STRUCTURE
ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49P(
GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/AlAsxSb1-
x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

8

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?
IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2

INPUT SELECT = ?

1
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.320542572883E+00 ERROR=
.4703413E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.264129514992E+00 ERROR=
.2397841E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.220758109098E+00 ERROR=
.3923622E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.178189482990E+00 ERROR=
.2503675E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.147393589803E+00 ERROR=
.2265484E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.128639570843E+00 ERROR=
.2398749E-
ENERGY EIGENVALUE====> -
0.102376479441E+00 ERROR=
.2085455E-

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?
1

INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.320542572883
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.87232763E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.31329672E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.19894103E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.31329672E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.87232763E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1

INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.1023764779441
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
lh2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.19303169E-03
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.15594887E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.68771625E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.15594882E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.19303162E-03
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS

2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J AND
G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

5
THE INPUT FILE NAME=
in1.txt
SELECT MATERIAL=?
1--AlGaAs
2--InGaAsP
3--In1-zGaxAs/InGaAsP/InP
4-- InGaAlAs
5--GaInP/AlzGawIn1-z-
wP/Al0.5In0.5P
6-- InxGa1-xAs/AlxGa1-
xAs/AlGaAs
7--In1-xGaxAs/InGaAsP/GaxIn1-
xP(X=0.51) MATCHED TO GaAs
8--AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1-
zAs/GaAs
9--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/InP
10--
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsSb
11--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsSb
12--In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-
x)/GaAs
13--InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT SELECTION
8
INPUT MODE = ? FOR TE-->
MODE =1, FOR TM--> MODE
=2
INPUT TE OR TM ?
1
IF EL1 BELOW EH1 THEN
SELECT 1, OTHERWISE
SELECT 2
SELECTION=?
1

CALCULATE THE EFFECTIVE
MASS

FOR QUASI-FERMI LEVEL
SELECT=1,
FOR READ EXISTING QUASI-
FERMI LEVEL SELECT=2
SELECT=?
J(LEAKAGE)=0.354237D+00
A/cm^2 N=0.423810D+19
1/cm^3
J(LEAKAGE)=0.363304D+00
A/cm^2 N=0.425789D+19
1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.372602D+00
 A/cm² N=0.427769D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.382136D+00
 A/cm² N=0.429749D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.391914D+00
 A/cm² N=0.431729D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.401940D+00
 A/cm² N=0.433709D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.412221D+00
 A/cm² N=0.435689D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.422765D+00
 A/cm² N=0.437669D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.433576D+00
 A/cm² N=0.439649D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.444664D+00
 A/cm² N=0.441629D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.456033D+00
 A/cm² N=0.443609D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.467692D+00
 A/cm² N=0.445589D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.479648D+00
 A/cm² N=0.447569D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.491908D+00
 A/cm² N=0.449549D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.504480D+00
 A/cm² N=0.451529D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.517373D+00
 A/cm² N=0.453509D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.530594D+00
 A/cm² N=0.455489D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.544151D+00
 A/cm² N=0.457469D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.558054D+00
 A/cm² N=0.459449D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.572310D+00
 A/cm² N=0.461429D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.586930D+00
 A/cm² N=0.463409D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.601921D+00
 A/cm² N=0.465388D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.617295D+00
 A/cm² N=0.467368D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.633059D+00
 A/cm² N=0.469348D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.649226D+00
 A/cm² N=0.471328D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.665803D+00
 A/cm² N=0.473308D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.682803D+00
 A/cm² N=0.475288D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.700235D+00
 A/cm² N=0.477268D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.718112D+00
 A/cm² N=0.479248D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.736443D+00
 A/cm² N=0.481228D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.755241D+00
 A/cm² N=0.483208D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.774517D+00
 A/cm² N=0.485188D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.794284D+00
 A/cm² N=0.487168D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.814555D+00
 A/cm² N=0.489148D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.835341D+00
 A/cm² N=0.491128D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.856656D+00
 A/cm² N=0.493108D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.878514D+00
 A/cm² N=0.495088D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.900929D+00
 A/cm² N=0.497068D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.923913D+00
 A/cm² N=0.499048D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.947483D+00
 A/cm² N=0.501028D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.971653D+00
 A/cm² N=0.503008D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.996438D+00
 A/cm² N=0.504987D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.102185D+01
 A/cm² N=0.506967D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.104792D+01
 A/cm² N=0.508947D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.107464D+01
 A/cm² N=0.510927D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.110205D+01
 A/cm² N=0.512907D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.113015D+01
 A/cm² N=0.514887D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.115897D+01
 A/cm² N=0.516867D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.118852D+01
 A/cm² N=0.518847D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.121883D+01
 A/cm² N=0.520827D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.124990D+01
 A/cm² N=0.522807D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.128177D+01
 A/cm² N=0.524787D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.131445D+01
 A/cm² N=0.526767D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.134796D+01
 A/cm² N=0.528747D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.138232D+01
 A/cm² N=0.530727D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.141756D+01
 A/cm² N=0.532707D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.145369D+01
 A/cm² N=0.534687D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.149074D+01
 A/cm² N=0.536667D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.152874D+01
 A/cm² N=0.538647D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.156770D+01
 A/cm² N=0.540627D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.160765D+01
 A/cm² N=0.542607D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.164863D+01
 A/cm² N=0.544586D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.169064D+01
 A/cm² N=0.546566D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.173372D+01
 A/cm² N=0.548546D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.177790D+01
 A/cm² N=0.550526D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.182320D+01
 A/cm² N=0.552506D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.186966D+01
 A/cm² N=0.554486D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.191730D+01
 A/cm² N=0.556466D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.196614D+01
 A/cm² N=0.558446D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.201624D+01
 A/cm² N=0.560426D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.206760D+01
 A/cm² N=0.562406D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.212028D+01
 A/cm² N=0.564386D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.217429D+01
 A/cm² N=0.566366D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.222968D+01
 A/cm² N=0.568346D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.228648D+01
 A/cm^2 N=0.570326D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.234472D+01
 A/cm^2 N=0.572306D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.240445D+01
 A/cm^2 N=0.574286D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.246569D+01
 A/cm^2 N=0.576266D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.252850D+01
 A/cm^2 N=0.578246D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.259290D+01
 A/cm^2 N=0.580226D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.265893D+01
 A/cm^2 N=0.582206D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.272665D+01
 A/cm^2 N=0.584185D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.279610D+01
 A/cm^2 N=0.586165D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.286730D+01
 A/cm^2 N=0.588145D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.294033D+01
 A/cm^2 N=0.590125D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.301520D+01
 A/cm^2 N=0.592105D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.309199D+01
 A/cm^2 N=0.594085D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.317072D+01
 A/cm^2 N=0.596065D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.325146D+01
 A/cm^2 N=0.598045D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.333426D+01
 A/cm^2 N=0.600025D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.341915D+01
 A/cm^2 N=0.602005D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.350621D+01
 A/cm^2 N=0.603985D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.359549D+01
 A/cm^2 N=0.605965D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.368703D+01
 A/cm^2 N=0.607945D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.378091D+01
 A/cm^2 N=0.609925D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.387717D+01
 A/cm^2 N=0.611905D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.397588D+01
 A/cm^2 N=0.613885D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.407710D+01
 A/cm^2 N=0.615865D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.418090D+01
 A/cm^2 N=0.617845D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.428734D+01
 A/cm^2 N=0.619825D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.439648D+01
 A/cm^2 N=0.621805D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.450840D+01
 A/cm^2 N=0.623784D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.462317D+01
 A/cm^2 N=0.625764D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.474085D+01
 A/cm^2 N=0.627744D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.486154D+01
 A/cm^2 N=0.629724D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.498529D+01
 A/cm^2 N=0.631704D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.511218D+01
 A/cm^2 N=0.633684D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.524231D+01
 A/cm^2 N=0.635664D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.537574D+01
 A/cm^2 N=0.637644D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.551257D+01
 A/cm^2 N=0.639624D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.565288D+01
 A/cm^2 N=0.641604D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.579676D+01
 A/cm^2 N=0.643584D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.594430D+01
 A/cm^2 N=0.645564D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.609559D+01
 A/cm^2 N=0.647544D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.625073D+01
 A/cm^2 N=0.649524D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.640981D+01
 A/cm^2 N=0.651504D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.657294D+01
 A/cm^2 N=0.653484D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.674022D+01
 A/cm^2 N=0.655464D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.691176D+01
 A/cm^2 N=0.657444D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.708765D+01
 A/cm^2 N=0.659424D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.726802D+01
 A/cm^2 N=0.661404D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.745298D+01
 A/cm^2 N=0.663383D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.764264D+01
 A/cm^2 N=0.665363D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.783713D+01
 A/cm^2 N=0.667343D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.803656D+01
 A/cm^2 N=0.669323D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.824106D+01
 A/cm^2 N=0.671303D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.845076D+01
 A/cm^2 N=0.673283D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.866580D+01
 A/cm^2 N=0.675263D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.888631D+01
 A/cm^2 N=0.677243D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.911242D+01
 A/cm^2 N=0.679223D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.934428D+01
 A/cm^2 N=0.681203D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.958204D+01
 A/cm^2 N=0.683183D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.982585D+01
 A/cm^2 N=0.685163D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.100759D+02
 A/cm^2 N=0.687143D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.103322D+02
 A/cm^2 N=0.689123D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.105951D+02
 A/cm^2 N=0.691103D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.108647D+02
 A/cm^2 N=0.693083D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.111411D+02
 A/cm^2 N=0.695063D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.114245D+02
 A/cm^2 N=0.697043D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.117152D+02
 A/cm^2 N=0.699023D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.120132D+02
 A/cm^2 N=0.701003D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.123189D+02
 A/cm^2 N=0.702982D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.126323D+02
 A/cm^2 N=0.704962D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.129536D+02
 A/cm^2 N=0.706942D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.132832D+02
 A/cm^2 N=0.708922D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.136211D+02
 A/cm^2 N=0.710902D+19
 1/cm^3

$J(\text{LEAKAGE})=0.139676\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.712882\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.143229\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.714862\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.146873\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.716842\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.150609\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.718822\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.154440\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.720802\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.158369\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.722782\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.162398\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.724762\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.166528\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.726742\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.170764\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.728722\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.175108\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.730702\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.179562\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.732682\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.184130\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.734662\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.188813\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.736642\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.193615\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.738622\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.198540\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.740602\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.203590\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.742581\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.208768\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.744561\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.214078\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.746541\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.219523\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.748521\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.225106\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.750501\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.230831\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.752481\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.236702\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.754461\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.242722\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.756441\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.248895\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.758421\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$

$J(\text{LEAKAGE})=0.255224\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.760401\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.261715\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.762381\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.268371\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.764361\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.275196\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.766341\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.282194\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.768321\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.289371\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.770301\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.296729\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.772281\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.304275\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.774261\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.312012\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.776241\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.319947\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.778221\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.328082\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.780201\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.336425\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.782180\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.344980\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.784160\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.353752\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.786140\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.362747\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.788120\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.371970\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.790100\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.381428\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.792080\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.391127\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.794060\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.401071\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.796040\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.411269\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.798020\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$
 $J(\text{LEAKAGE})=0.421725\text{D}+02$
 $A/\text{cm}^2 \quad N=0.800000\text{D}+19$
 $1/\text{cm}^3$

 G(J) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL
 $Go=0.145891\text{D}+02 \quad 1/\text{cm}$
 $Jo=0.938657\text{D}+02 \quad A/\text{cm}^2$

 G(N) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL

$NGo=0.148347\text{D}+04 \quad 1/\text{cm}$
 $XNo=0.146617\text{D}+19 \quad 1/\text{cm}^3$

 $Jtr=0.345313\text{D}+02 \quad A/\text{cm}^2$
 $NTR=0.539372\text{D}+18 \quad 1/\text{cm}^3$

THE OPTIMUM NUMBER OF
 QUANTUM WELL FOLLOWS
 THE ARTICLE
 BY McIlory et al. IEEE JQE-21
 1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
 QUANTUM WELL Nopt =
 2
 INPUT Nopt(CAN BE
 DIFFERENT FROM ABOVE
 CALCULATION)=?
 1
 NUMBER OF QUANTUM
 WELL(MAY OR MAY NOT BE
 Nopt)=?
 1

 1ST CHECK USE SINGLE
 WELL TIMES # OF WELLS

 2ND CHECK FOLLOWS
 FORMULA BY McIlory IN IEEE
 JOURNAL OF QUANTUM
 ELECTRONIC QE-21 1985.

 $Gth= 28.0530 \quad 1/\text{cm}$
 $Nth=0.297093\text{D}+19 \quad 1/\text{cm}^3 \quad IY=$
 146
 1ST CHECK $Jth=$
 218.92046245 A/cm^2
 2ND CHECK $Jth= 97.77680$
 A/cm^2

1ST CHECK $Ith=0.492571\text{D}+01$
 mA NUMBER OF WELLS= 1
 2ND CHECK
 $Ith=0.219998\text{D}+01 \quad \text{mA}$

 CALCULATE THE P-I
 RELATION

NDATA= 255

 CALCULATE THE SLOPE:
 $mW/mA \quad Y=A+BX$
 CONSTANT A= -1.0601458
 SLOPE B= 0.2152270

INPUT POWER PO FOR THE
LINEWIDTH, PO=0 FOR STOP
INPUT PO= mW

0
INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
CALCULATION. 2 FOR SKIP
INPUT =

2
K-FACTOR= 0.16650 nS
MAXIUM FREQ.= 53.3688 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMILEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.0857941393952 -
0.0896824242650
0.119799498747E+18
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol1.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
ml1.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe1.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
me1.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
1

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMILEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.391521998154
0.0406771473872
0.798020050125E+19
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
ol2.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
ml2.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
oe2.txt

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
me2.txt

INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT

7.MALZEME İÇİN

HESAPLAMALAR

7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs

9 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!

12
INPUT THE LAYER # FOR
GRIN STRUCTURE(STEP)
STEP N=

2
INPUT THE WELL
WAVELENGTH (um)

1.30
INPUT THE BARRIER
WAVELENGTH (um)

0.84
INPUT THE CLADDING
WAVELENGTH (um)

0.60
BANDGAP ENERGY OF
QUANTUM WELL=

0.953846153846154
INPUT CLADDING,
BARRIER,QUANTUM WELL
WIDTH (A)

70
70 100 100

For dilute InGaAsN only
(X>0.953, Y<0.289)

In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-x),output
read In first then As

IF ONE OF THE
COMPONENTS IN ACTIVE
REGION IS ZERO,
YOU HAVE TO TRY
ANOTHER INITIAL GUESS
FOR
BOTH WAVELENGTH AND
STRAIN

INPUT STRAIN=?
-0.018
C[
C[STARTING VECTOR:
0.100D+01 0.000D+00
C[
C[STARTING VECTOR:
0.995D+00 0.266D+00
C[
STRAIN= -
1.800000000000002E-002
AZ2= 5.65067318365118

WRITE CONDUCTION BAND
PARAMETERS INTO
CBANDEG.DAT

WRITE VALENCE BAND
PARAMETERS INTO
VBANDEG.DAT

```

INPUT 1 FOR NEW
CALCULATION
2 FOR EXIT
INPUT =?
2

ENTER 1 FOR
AlGaAs/AlGaAs
2 FOR
InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR
InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/InP
5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
9 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
12
INPUT THE LAYER # FOR
GRIN STRUCTURE(STEP)
STEP N=
2
INPUT THE WELL
WAVELENGTH (um)
0.98
INPUT THE BARRIER
WAVELENGTH (um)
1.30
INPUT THE CLADDING
WAVELENGTH (um)
0.60
BANDGAP ENERGY OF
QUANTUM WELL=
1.26530612244898
INPUT CLADDING,
BARRIER,QUANTUM WELL
WIDTH (A)
70 100 100

```

For dilute InGaAsN only
(X>0.953, Y<0.289)

In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-x),output
read In first then As

IF ONE OF THE
COMPONENTS IN ACTIVE
REGION IS ZERO,
YOU HAVE TO TRY
ANOTHER INITIAL GUESS
FOR
BOTH WAVELENGTH AND
STRAIN

```

INPUT STRAIN=?
-0.018
C[
C[ STARTING VECTOR:
0.100D+01-0.648D-02
C[
C[
C[ STARTING VECTOR:
0.101D+01 0.216D+00
C[
STRAIN= -
1.800000000008282E-002
AZ2= 5.74079172443806

```

WRITE CONDUCTION BAND
PARAMETERS INTO
CBANDEG.DAT

WRITE VALENCE BAND
PARAMETERS INTO
VBANDEG.DAT
INPUT 1 FOR NEW
CALCULATION
2 FOR EXIT
INPUT =?
2

```

ENTER 1 FOR
AlGaAs/AlGaAs
2 FOR
InGaAsP/InGaAsP/InP
3 FOR
InGaAs/InGaAsP/InP
4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/InP
5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(MATCHED GaAs)
8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
9 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-yAs/InP
10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(matched InP)
11 FOR InzGa1-
zAs/AlyGaxIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs (dilute N)
13 FOR In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
14 FOR EXIT, BACK TO
MAIN PAGE!
14

```

THIS PROGRAM STOP
HERE!, BACK TO MAIN PAGE

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

```

5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

```

```

2
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE LOWEST
POTENTIAL LAYER(1st Q-
WELL) IC= ?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER LAYER OF
STRUCTURE ICR=
3

```


```

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In1-
xGaxAs/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
y)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

```


```

12
ENERGY EIGENVALUE====>
0.108308858635E+00
ERROR= .3301090
ENERGY EIGENVALUE====>
0.131646854290E+00
ERROR= .1404085
ENERGY EIGENVALUE====>
0.203577843715E+00
ERROR= .2475638
ENERGY EIGENVALUE====>
0.319282320260E+00
ERROR= .2304653
ENERGY EIGENVALUE====>
0.417898257157E+00
ERROR= .1309333

```

ENERGY EIGENVALUE====>
0.518514360788E+00
ERROR= .2840803

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.108308858635
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
cb1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.11002378E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22542729E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.52714067E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22542729E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.11002378E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.203577843715
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
cb2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.14257418E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.23084667E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.50979182E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.23084667E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.14257418E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.319282320260
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
cb3
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.21948311E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22332026E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.50946286E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22332026E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.21948311E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

2

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS

2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND

3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND

4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND

5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

3
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?

1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=

5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC= ?

3
INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE
STRUCTURE ICR=?
3

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(GaAs)
I=8 FOR Al_yIn_xGa_{1-x-y}As/Al_zGa_{1-z}As/GaAs
I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/Al_xGa_{1-x-y}In_{1-x-y}As/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAs_xSb_{1-x}(InP)
I=11 FOR In_zGa_{1-z}As/Al_xGa_{1-x-y}As/AlAs_xSb_{1-x}
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I= ?

12

DOES THE STRUCTURE
STRAIN OR STRAIN-
COMPENSATED?

IF STRAIN ONLY INPUT 1,
STRAIN-COMPENSATED
INPUT 2
INPUT SELECT = ?

1
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.238575361223E+00
ERROR= .4028372
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.204418553924E+00
ERROR= .2401561
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.173832780211E+00
ERROR= .3676442
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.142628648661E+00
ERROR= .2915187
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.111589398510E+00
ERROR= .1835412
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.873072439399E-01
ERROR= .9890892
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.630340077883E-01
ERROR= .1171549
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.372311555676E-01
ERROR= .8950384
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.196107128472E-01
ERROR= .4764699
ENERGY EIGENVALUE====>
-0.508441563564E-02
ERROR= .2868519
ENERGY EIGENVALUE====>
0.129730773163E-01 ERROR=
.2859573

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.0129730773163
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
ce1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.21147361E-02
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.12913715E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.73749623E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.12913715E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.21147361E-02
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
-0.00508441563564
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
ce2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.49583355E-02

```

CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22938374E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.53131585E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22938374E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.49583355E-02
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

```

```

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

```

```

2
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE LOWEST
POTENTIAL LAYER(1st Q-
WELL) IC=?
3
INPUT THE SELECTED
CENTER LAYER OF
STRUCTURE ICR=
3

```


```

INPUT I=1 FOR AlGaAs
I=2 FOR InGaAsP
I=3 FOR In1-
xGaAs/InGaAsP/InP
I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP

```

```

I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(GaAs)
I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
I=9 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-yAs/InP
I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
I=13 FOR InGaAs/In(1-
y)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
INPUT I=?

```


```

12
ENERGY EIGENVALUE==>
0.108308858635E+00
ERROR=.330109
ENERGY EIGENVALUE==>
0.131646854290E+00
ERROR=.140408
ENERGY EIGENVALUE==>
0.203577843715E+00
ERROR=.247563
ENERGY EIGENVALUE==>
0.319282320260E+00
ERROR=.230465
ENERGY EIGENVALUE==>
0.417898257157E+00
ERROR=.130933
ENERGY EIGENVALUE==>
0.518514360788E+00
ERROR=.284080

```

```

FOR CHECKING THE
Schrodinger WAVE FUNCTION
INPUT I==> 1
SKIP INPUT I==> 2
I=?

```

```

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.108308858635
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE

```

```

cb1.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.11002378E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22542729E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.52714067E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22542729E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.11002378E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.203577843715
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE

```

```

cb2.txt
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.14257418E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.23084667E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.50979182E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.23084667E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.14257418E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?

```

```

1
INPUT THE EIGENVALUE
EIGEN VALUE=
0.319282320260
INPUT THE NAME OF
OUTPUT FILE
cb3
CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.21948311E-01
CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22332026E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.50946286E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22332026E+00
CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.21948311E-01
INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
SELECT=?
2

```

```

ENTER 1 FOR THE
NECESSARY PARAMETERS
2 FOR THE ENERGY
VALUES OF CONDUCTION
BAND
3 FOR THE ENERGY
VALUES OF HEAVY HOLE
BAND
4 FOR THE ENERGY
VALUES OF LIGHT HOLE
BAND
5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

```

```

3
INPUT THE NUMBER OF
QUANTUM WELLS NUM=?
1
INPUT TOTAL LAYERS FOR
STRUCTURE--N ODD
INPUT N=
5
INPUT THE HIGHEST
POTENTIAL(1st Q-WELL)
LAYER IC=?
3

```

```

INPUT THE SELECTED
CENTER OF THE
STRUCTURE ICR=?
3

```


```

INPUT I=1 FOR AlGaAs

```

```

      I=2 FOR InGaAsP
      I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
      I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
      I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
      I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
      I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(GaAs)
      I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
      I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
      I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
      I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
      I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
      I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
      INPUT I= ?

*****
*****
12
*****
*****

      DOES THE STRUCTURE
      STRAIN OR STRAIN-
      COMPENSATED?
      IF STRAIN ONLY INPUT 1,
      STRAIN-COMPENSATED
      INPUT 2
      INPUT SELECT = ?

1
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.238575361223E+00
      ERROR= .402837
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.204418553924E+00
      ERROR= .240156
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.173832780211E+00
      ERROR= .367644
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.142628648661E+00
      ERROR= .291518
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.111589398510E+00
      ERROR= .183541
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.873072439399E-01
      ERROR= .989089
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.630340077883E-01
      ERROR= .117154
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.372311555676E-01
      ERROR= .895038
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.196107128472E-01
      ERROR= .476469
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.508441563564E-02
      ERROR= .286851

```

```

      ENERGY EIGENVALUE====>
0.129730773163E-01 ERROR=
.285957

      FOR CHECKING THE
      Schrodinger WAVE FUNCTION
      INPUT I==> 1
      SKIP INPUT I==> 2
      I=?

1
      INPUT THE EIGENVALUE
      EIGEN VALUE=
0.0129730773163
      INPUT THE NAME OF
      OUTPUT FILE
ce1.txt
      CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.21147361E-02
      CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.12913715E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.73749623E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.12913715E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.21147361E-02
      INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
      SELECT=?

1
      INPUT THE EIGENVALUE
      EIGEN VALUE=
-0.00508441563564
      INPUT THE NAME OF
      OUTPUT FILE
ce2.txt
      CONFINEMENT FACTOR OF
1 th LAYER = 0.49583355E-02
      CONFINEMENT FACTOR OF
2 th LAYER = 0.22938374E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
3 th LAYER = 0.53131585E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
4 th LAYER = 0.22938374E+00
      CONFINEMENT FACTOR OF
5 th LAYER = 0.49583355E-02
      INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
      SELECT=?

2

      ENTER 1 FOR THE
      NECESSARY PARAMETERS
      2 FOR THE ENERGY
      VALUES OF CONDUCTION
      BAND
      3 FOR THE ENERGY
      VALUES OF HEAVY HOLE
      BAND
      4 FOR THE ENERGY
      VALUES OF LIGHT HOLE
      BAND
      5 FOR THE LASER G-J
      AND G(LAMBDA)
      6 FOR RATE
      EQUATIONS(TWO SECTION
      MODEL INCLUDED)
      7 FOR EXIT

4
      INPUT THE NUMBER OF
      QUANTUM WELLS NUM=?
1

```

```

      INPUT TOTAL LAYERS FOR
      STRUCTURE--N ODD
      INPUT N=
5
      INPUT THE HIGHEST
      POTENTIAL(1st Q-WELL)
      LAYER IC= ?
3
      INPUT THE SELECTED
      CENTER OF THE
      STRUCTURE ICR=?
3

*****
*****

      INPUT I=1 FOR AlGaAs
      I=2 FOR InGaAsP
      I=3 FOR In(1-
x)Ga(x)As/InGaAsP/InP
      I=4 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs
      I=5 FOR
GaInP/(AlGa)0.5In0.5P/AlInP
      I=6 FOR
InGaAs/AlGaAs/AlGaAs
      I=7 FOR
InGaAs/InGaAsP/Ga0.51In0.49
P(GaAs)
      I=8 FOR AlyInxGa1-x-
yAs/AlzGa1-zAs/GaAs
      I=9 FOR In(z)Ga(1-
z)As/AlxGayIn1-x-yAs/InP
      I=10 FOR
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsxSb1-
x(InP)
      I=11 FOR InzGa1-
zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsxSb1-x
      I=12 FOR In(y)Ga(1-
y)As(x)N(1-x)/GaAs
      I=13 FOR InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
      INPUT I= ?

*****
*****

12
*****
*****

      DOES THE STRUCTURE
      STRAIN OR STRAIN-
      COMPENSATED?
      IF STRAIN ONLY INPUT 1,
      STRAIN-COMPENSATED
      INPUT 2
      INPUT SELECT = ?

1
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.200677393715E+00
      ERROR= .202715
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.147406400698E+00
      ERROR= .354388
      ENERGY EIGENVALUE====>
-0.130317365152E+00
      ERROR= .137811

      FOR CHECKING THE
      Schrodinger WAVE FUNCTION
      INPUT I==> 1
      SKIP INPUT I==> 2

```

```

I=?
1
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
-0.130317365152
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
hh1.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.27866769E-01
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.22158419E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.50109809E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.22158419E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.27866769E-01
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
1
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
-0.147406400698
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
hh2.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.47309356E-01
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.33806995E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.22924139E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.33806995E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.47309356E-01
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
1
  INPUT THE EIGENVALUE
  EIGEN VALUE=
-0.200677393715
  INPUT THE NAME OF
  OUTPUT FILE
hh3.txt
  CONFINEMENT FACTOR OF
  1 th LAYER = 0.51633634E-01
  CONFINEMENT FACTOR OF
  2 th LAYER = 0.20756635E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  3 th LAYER = 0.48160004E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  4 th LAYER = 0.20756635E+00
  CONFINEMENT FACTOR OF
  5 th LAYER = 0.51633634E-01
  INPUT NEW EIGENVALUE-->
1, BACK TO MAIN PAGE--> 2
  SELECT=?
2

  ENTER 1 FOR THE
  NECESSARY PARAMETERS
  2 FOR THE ENERGY
  VALUES OF CONDUCTION
  BAND
  3 FOR THE ENERGY
  VALUES OF HEAVY HOLE
  BAND
  4 FOR THE ENERGY
  VALUES OF LIGHT HOLE
  BAND

```

```

5 FOR THE LASER G-J
AND G(LAMBDA)
6 FOR RATE
EQUATIONS(TWO SECTION
MODEL INCLUDED)
7 FOR EXIT

5
  THE INPUT FILE NAME=
in1.txt
  SELECT MATERIAL=?
  1--AlGaAs
  2--InGaAsP
  3--In1-zGazAs/InGaAsP/InP
  4-- InGaAlAs
  5--GaInP/AlzGawIn1-z-
wP/Al0.5In0.5P
  6-- InxGa1-xAs/AlxGa1-
xAs/AlGaAs
  7--In1-
xGaxAs/InGaAsP/GaxIn1-
xP(X=0.51) MATCHED TO
GaAs
  8--AlyInxGa1-x-yAs/AlzGa1-
zAs/GaAs
  9--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/InP
  10--
InGaAlAs/InGaAlAs/AlAsSb
  11--InzGa1-zAs/AlxGayIn1-x-
yAs/AlAsSb
  12--In(y)Ga(1-y)As(x)N(1-
x)/GaAs
  13--InGaAs/In(1-
x)Ga(x)As(y)P(1-y)/GaAs
  INPUT SELECTION
12
  INPUT MODE = ? FOR TE-->
MODE =1, FOR TM--> MODE
=2
  INPUT TE OR TM ?
1
  IF EL1 BELOW EH1 THEN
  SELECT 1, OTHERWISE
  SELECT 2
  SELECTION=?
1

*****
*****
  CALCULATE THE
  EFFECTIVE MASS

*****
*****
  FOR QUASI-FERMI LEVEL
  SELECT=1,
  FOR READ EXISTING
  QUASI-FERMI LEVEL
  SELECT=2
  SELECT=?
  J(LEAKAGE)=0.158895D-01
A/cm^2 N=0.328772D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.161524D-01
A/cm^2 N=0.330752D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.164194D-01
A/cm^2 N=0.332732D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.166904D-01
A/cm^2 N=0.334712D+19
1/cm^3

```

```

J(LEAKAGE)=0.169655D-01
A/cm^2 N=0.336692D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.172448D-01
A/cm^2 N=0.338672D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.175284D-01
A/cm^2 N=0.340652D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.178162D-01
A/cm^2 N=0.342632D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.181085D-01
A/cm^2 N=0.344612D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.184051D-01
A/cm^2 N=0.346591D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.187063D-01
A/cm^2 N=0.348571D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.190120D-01
A/cm^2 N=0.350551D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.193224D-01
A/cm^2 N=0.352531D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.196375D-01
A/cm^2 N=0.354511D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.199574D-01
A/cm^2 N=0.356491D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.202822D-01
A/cm^2 N=0.358471D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.206118D-01
A/cm^2 N=0.360451D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.209465D-01
A/cm^2 N=0.362431D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.212863D-01
A/cm^2 N=0.364411D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.216312D-01
A/cm^2 N=0.366391D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.219814D-01
A/cm^2 N=0.368371D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.223368D-01
A/cm^2 N=0.370351D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.226977D-01
A/cm^2 N=0.372331D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.230641D-01
A/cm^2 N=0.374311D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.234360D-01
A/cm^2 N=0.376291D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.238136D-01
A/cm^2 N=0.378271D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.241969D-01
A/cm^2 N=0.380251D+19
1/cm^3
  J(LEAKAGE)=0.245860D-01
A/cm^2 N=0.382231D+19
1/cm^3

```

J(LEAKAGE)=0.249810D-01
 A/cm² N=0.384211D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.253821D-01
 A/cm² N=0.386190D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.257892D-01
 A/cm² N=0.388170D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.262025D-01
 A/cm² N=0.390150D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.266221D-01
 A/cm² N=0.392130D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.270480D-01
 A/cm² N=0.394110D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.274804D-01
 A/cm² N=0.396090D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.279194D-01
 A/cm² N=0.398070D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.283650D-01
 A/cm² N=0.400050D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.288175D-01
 A/cm² N=0.402030D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.292767D-01
 A/cm² N=0.404010D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.297430D-01
 A/cm² N=0.405990D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.302163D-01
 A/cm² N=0.407970D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.306969D-01
 A/cm² N=0.409950D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.311847D-01
 A/cm² N=0.411930D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.316799D-01
 A/cm² N=0.413910D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.321827D-01
 A/cm² N=0.415890D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.326930D-01
 A/cm² N=0.417870D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.332112D-01
 A/cm² N=0.419850D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.337372D-01
 A/cm² N=0.421830D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.342711D-01
 A/cm² N=0.423810D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.348132D-01
 A/cm² N=0.425789D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.353635D-01
 A/cm² N=0.427769D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.359222D-01
 A/cm² N=0.429749D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.364894D-01
 A/cm² N=0.431729D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.370651D-01
 A/cm² N=0.433709D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.376496D-01
 A/cm² N=0.435689D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.382430D-01
 A/cm² N=0.437669D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.388454D-01
 A/cm² N=0.439649D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.394569D-01
 A/cm² N=0.441629D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.400778D-01
 A/cm² N=0.443609D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.407080D-01
 A/cm² N=0.445589D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.413478D-01
 A/cm² N=0.447569D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.419973D-01
 A/cm² N=0.449549D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.426567D-01
 A/cm² N=0.451529D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.433261D-01
 A/cm² N=0.453509D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.440057D-01
 A/cm² N=0.455489D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.446955D-01
 A/cm² N=0.457469D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.453959D-01
 A/cm² N=0.459449D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.461069D-01
 A/cm² N=0.461429D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.468286D-01
 A/cm² N=0.463409D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.475614D-01
 A/cm² N=0.465388D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.483052D-01
 A/cm² N=0.467368D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.490604D-01
 A/cm² N=0.469348D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.498270D-01
 A/cm² N=0.471328D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.506052D-01
 A/cm² N=0.473308D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.513953D-01
 A/cm² N=0.475288D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.521973D-01
 A/cm² N=0.477268D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.530116D-01
 A/cm² N=0.479248D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.538381D-01
 A/cm² N=0.481228D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.546773D-01
 A/cm² N=0.483208D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.555292D-01
 A/cm² N=0.485188D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.563940D-01
 A/cm² N=0.487168D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.572719D-01
 A/cm² N=0.489148D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.581631D-01
 A/cm² N=0.491128D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.590679D-01
 A/cm² N=0.493108D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.599864D-01
 A/cm² N=0.495088D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.609189D-01
 A/cm² N=0.497068D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.618655D-01
 A/cm² N=0.499048D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.628265D-01
 A/cm² N=0.501028D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.638021D-01
 A/cm² N=0.503008D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.647924D-01
 A/cm² N=0.504987D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.657979D-01
 A/cm² N=0.506967D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.668185D-01
 A/cm² N=0.508947D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.678547D-01
 A/cm² N=0.510927D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.689066D-01
 A/cm² N=0.512907D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.699744D-01
 A/cm² N=0.514887D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.710585D-01
 A/cm² N=0.516867D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.721590D-01
 A/cm² N=0.518847D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.732762D-01
 A/cm² N=0.520827D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.744104D-01
 A/cm² N=0.522807D+19
 1/cm³
 J(LEAKAGE)=0.755618D-01
 A/cm² N=0.524787D+19
 1/cm³

J(LEAKAGE)=0.767307D-01
 A/cm^2 N=0.526767D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.779173D-01
 A/cm^2 N=0.528747D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.791219D-01
 A/cm^2 N=0.530727D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.803448D-01
 A/cm^2 N=0.532707D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.815863D-01
 A/cm^2 N=0.534687D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.828466D-01
 A/cm^2 N=0.536667D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.841260D-01
 A/cm^2 N=0.538647D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.854248D-01
 A/cm^2 N=0.540627D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.867434D-01
 A/cm^2 N=0.542607D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.880820D-01
 A/cm^2 N=0.544586D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.894409D-01
 A/cm^2 N=0.546566D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.908204D-01
 A/cm^2 N=0.548546D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.922208D-01
 A/cm^2 N=0.550526D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.936425D-01
 A/cm^2 N=0.552506D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.950858D-01
 A/cm^2 N=0.554486D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.965510D-01
 A/cm^2 N=0.556466D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.980384D-01
 A/cm^2 N=0.558446D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.995484D-01
 A/cm^2 N=0.560426D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.101081D+00
 A/cm^2 N=0.562406D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.102637D+00
 A/cm^2 N=0.564386D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.104217D+00
 A/cm^2 N=0.566366D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.105821D+00
 A/cm^2 N=0.568346D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.107449D+00
 A/cm^2 N=0.570326D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.109102D+00
 A/cm^2 N=0.572306D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.110780D+00
 A/cm^2 N=0.574286D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.112483D+00
 A/cm^2 N=0.576266D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.114212D+00
 A/cm^2 N=0.578246D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.115968D+00
 A/cm^2 N=0.580226D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.117750D+00
 A/cm^2 N=0.582206D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.119559D+00
 A/cm^2 N=0.584185D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.121395D+00
 A/cm^2 N=0.586165D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.123260D+00
 A/cm^2 N=0.588145D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.125153D+00
 A/cm^2 N=0.590125D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.127074D+00
 A/cm^2 N=0.592105D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.129025D+00
 A/cm^2 N=0.594085D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.131005D+00
 A/cm^2 N=0.596065D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.133015D+00
 A/cm^2 N=0.598045D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.135056D+00
 A/cm^2 N=0.600025D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.137127D+00
 A/cm^2 N=0.602005D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.139231D+00
 A/cm^2 N=0.603985D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.141366D+00
 A/cm^2 N=0.605965D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.143533D+00
 A/cm^2 N=0.607945D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.145733D+00
 A/cm^2 N=0.609925D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.147967D+00
 A/cm^2 N=0.611905D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.150235D+00
 A/cm^2 N=0.613885D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.152537D+00
 A/cm^2 N=0.615865D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.154874D+00
 A/cm^2 N=0.617845D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.157246D+00
 A/cm^2 N=0.619825D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.159655D+00
 A/cm^2 N=0.621805D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.162099D+00
 A/cm^2 N=0.623784D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.164582D+00
 A/cm^2 N=0.625764D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.167101D+00
 A/cm^2 N=0.627744D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.169659D+00
 A/cm^2 N=0.629724D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.172256D+00
 A/cm^2 N=0.631704D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.174892D+00
 A/cm^2 N=0.633684D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.177568D+00
 A/cm^2 N=0.635664D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.180285D+00
 A/cm^2 N=0.637644D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.183043D+00
 A/cm^2 N=0.639624D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.185842D+00
 A/cm^2 N=0.641604D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.188685D+00
 A/cm^2 N=0.643584D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.191570D+00
 A/cm^2 N=0.645564D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.194499D+00
 A/cm^2 N=0.647544D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.197473D+00
 A/cm^2 N=0.649524D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.200491D+00
 A/cm^2 N=0.651504D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.203556D+00
 A/cm^2 N=0.653484D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.206667D+00
 A/cm^2 N=0.655464D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.209825D+00
 A/cm^2 N=0.657444D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.213031D+00
 A/cm^2 N=0.659424D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.216286D+00
 A/cm^2 N=0.661404D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.219590D+00
 A/cm^2 N=0.663383D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.222944D+00
 A/cm^2 N=0.665363D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.226349D+00
 A/cm^2 N=0.667343D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.229806D+00
 A/cm^2 N=0.669323D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.233315D+00
 A/cm^2 N=0.671303D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.236877D+00
 A/cm^2 N=0.673283D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.240494D+00
 A/cm^2 N=0.675263D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.244165D+00
 A/cm^2 N=0.677243D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.247892D+00
 A/cm^2 N=0.679223D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.251676D+00
 A/cm^2 N=0.681203D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.255517D+00
 A/cm^2 N=0.683183D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.259416D+00
 A/cm^2 N=0.685163D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.263374D+00
 A/cm^2 N=0.687143D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.267392D+00
 A/cm^2 N=0.689123D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.271472D+00
 A/cm^2 N=0.691103D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.275613D+00
 A/cm^2 N=0.693083D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.279817D+00
 A/cm^2 N=0.695063D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.284084D+00
 A/cm^2 N=0.697043D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.288417D+00
 A/cm^2 N=0.699023D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.292815D+00
 A/cm^2 N=0.701003D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.297280D+00
 A/cm^2 N=0.702982D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.301812D+00
 A/cm^2 N=0.704962D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.306414D+00
 A/cm^2 N=0.706942D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.311085D+00
 A/cm^2 N=0.708922D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.315827D+00
 A/cm^2 N=0.710902D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.320641D+00
 A/cm^2 N=0.712882D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.325528D+00
 A/cm^2 N=0.714862D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.330489D+00
 A/cm^2 N=0.716842D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.335525D+00
 A/cm^2 N=0.718822D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.340637D+00
 A/cm^2 N=0.720802D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.345827D+00
 A/cm^2 N=0.722782D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.351096D+00
 A/cm^2 N=0.724762D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.356445D+00
 A/cm^2 N=0.726742D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.361875D+00
 A/cm^2 N=0.728722D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.367387D+00
 A/cm^2 N=0.730702D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.372983D+00
 A/cm^2 N=0.732682D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.378664D+00
 A/cm^2 N=0.734662D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.384430D+00
 A/cm^2 N=0.736642D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.390285D+00
 A/cm^2 N=0.738622D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.396228D+00
 A/cm^2 N=0.740602D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.402261D+00
 A/cm^2 N=0.742581D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.408385D+00
 A/cm^2 N=0.744561D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.414603D+00
 A/cm^2 N=0.746541D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.420914D+00
 A/cm^2 N=0.748521D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.427322D+00
 A/cm^2 N=0.750501D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.433827D+00
 A/cm^2 N=0.752481D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.440430D+00
 A/cm^2 N=0.754461D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.447133D+00
 A/cm^2 N=0.756441D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.453938D+00
 A/cm^2 N=0.758421D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.460846D+00
 A/cm^2 N=0.760401D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.467859D+00
 A/cm^2 N=0.762381D+19
 1/cm^3

J(LEAKAGE)=0.474979D+00
 A/cm^2 N=0.764361D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.482206D+00
 A/cm^2 N=0.766341D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.489543D+00
 A/cm^2 N=0.768321D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.496991D+00
 A/cm^2 N=0.770301D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.504552D+00
 A/cm^2 N=0.772281D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.512227D+00
 A/cm^2 N=0.774261D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.520019D+00
 A/cm^2 N=0.776241D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.527929D+00
 A/cm^2 N=0.778221D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.535959D+00
 A/cm^2 N=0.780201D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.544111D+00
 A/cm^2 N=0.782180D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.552386D+00
 A/cm^2 N=0.784160D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.560787D+00
 A/cm^2 N=0.786140D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.569315D+00
 A/cm^2 N=0.788120D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.577973D+00
 A/cm^2 N=0.790100D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.586762D+00
 A/cm^2 N=0.792080D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.595684D+00
 A/cm^2 N=0.794060D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.604741D+00
 A/cm^2 N=0.796040D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.613935D+00
 A/cm^2 N=0.798020D+19
 1/cm^3
 J(LEAKAGE)=0.623269D+00
 A/cm^2 N=0.800000D+19
 1/cm^3

 G(J) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL
 Go=0.113670D+02 1/cm
 Jo=0.109839D+03 A/cm^2
 G(N) PARAMETERS FROM
 SINGLE WELL
 NGo=0.115583D+04 1/cm
 XNo=0.227794D+19 1/cm^3
 Jtr=0.404074D+02 A/cm^2
 NTR=0.838009D+18 1/cm^3

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL FOLLOWS
THE ARTICLE
BY McIlory et al. IEEE JQE-21
1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL Nopt =

3

INPUT Nopt(CAN BE
DIFFERENT FROM ABOVE
CALCULATION)=?

3

NUMBER OF QUANTUM
WELL(MAY OR MAY NOT BE
Nopt)=?

1

1ST CHECK USE SINGLE
WELL TIMES # OF WELLS

2ND CHECK FOLLOWS
FORMULA BY McIlory IN IEEE
JOURNAL OF QUANTUM
ELECTRONIC QE-21 1985.

Gth= 28.0530 1/cm
Nth=0.588145D+19 1/cm³ IY=
293

1ST CHECK Jth=
1385.06838969 A/cm²
2ND CHECK Jth=
845.42122 A/cm²

1ST CHECK
lth=0.311640D+02 mA
NUMBER OF WELLS= 3
2ND CHECK
lth=0.190220D+02 mA

CALCULATE THE P-I
RELATION

NDATA= 108

CALCULATE THE SLOPE:
mW/mA Y=A+BX
CONSTANT A= -6.5794151
SLOPE B= 0.2111220

INPUT POWER PO FOR THE
LINEWIDTH, PO=0 FOR STOP
INPUT PO= mW

0

INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
CALCULATION. 2 FOR SKIP
INPUT =

2

K-FACTOR= 0.18609 nS
MAXIUM FREQ.= 47.7503 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
G(J) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL

Go=0.113670D+02 1/cm
Jo=0.109839D+03 A/cm²

G(N) PARAMETERS FROM
SINGLE WELL
NGo=0.115583D+04 1/cm
XNo=0.227794D+19 1/cm³

Jtr=0.404074D+02 A/cm²
NTR=0.838009D+18 1/cm³

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL FOLLOWS
THE ARTICLE
BY McIlory et al. IEEE JQE-21
1985.

THE OPTIMUM NUMBER OF
QUANTUM WELL Nopt =

3

INPUT Nopt(CAN BE
DIFFERENT FROM ABOVE
CALCULATION)=?

3

NUMBER OF QUANTUM
WELL(MAY OR MAY NOT BE
Nopt)=?

1

1ST CHECK USE SINGLE
WELL TIMES # OF WELLS

2ND CHECK FOLLOWS
FORMULA BY McIlory IN IEEE
JOURNAL OF QUANTUM
ELECTRONIC QE-21 1985.

Gth= 28.0530 1/cm
Nth=0.588145D+19 1/cm³ IY=
293

1ST CHECK Jth=
1385.06838969 A/cm²
2ND CHECK Jth=
845.42122 A/cm²

1ST CHECK
lth=0.311640D+02 mA
NUMBER OF WELLS= 3
2ND CHECK
lth=0.190220D+02 mA

CALCULATE THE P-I
RELATION

NDATA= 108

CALCULATE THE SLOPE:
mW/mA Y=A+BX
CONSTANT A= -6.5794151
SLOPE B= 0.2111220

INPUT POWER PO FOR THE
LINEWIDTH, PO=0 FOR STOP
INPUT PO= mW

0

INPUT 1 FOR THE DYNAMIC
CALCULATION. 2 FOR SKIP
INPUT =

2

K-FACTOR= 0.18609 nS
MAXIUM FREQ.= 47.7503 GHz

INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHENCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMILEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.0718069063517 -
0.107831218479
0.119799498747E+18
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

```

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
COGLa.txt

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
CMGLa.txt
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
COGEa.txt

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
CMGEa.txt

*****
*****
INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT
1

*****
*****
INPUT 1 FOR CALCULATE
THE GAIN(E) RELATION.

INPUT 2 FOR CALCULATE
THE LINEWIDTH
ENHANCEMENT
FACTOR AND PHOTON
ENERGY RELATION

INPUT 3 FOR EXIT THE
PROGRAM

THE INPUT # IS
1
INPUT FERMI LEVELS IN C-
BAND, V-BAND, AND
CARRIER DENSITY
0.287323558581
0.0103743498562
0.798020050125E+19
CALCULATE THE
CONVOLUTION GAIN(E)
COEFFICIENT

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(LAMBDA)
COGLb.txt

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(LAMBDA)
CMGLb.txt

```

```

INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION OPTICAL
GAIN(E)
COGEb.txt

*****
*****
INPUT THE NAME FOR THE
CONVOLUTION MODE
GAIN(E)
CMGEb.txt

*****
*****
INPUT 1 FOR REPEAT THE
G(E) CALCULATION
INPUT 2 FOR REPEAT THE
ALPHA(E) CALCULATION
INPUT 3 FOR EXIT

```

ÖZGEÇMİŞ

1968 yılında Ankara-Kalecik'te doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Ankara'da tamamladı. 1987 yılında girdiği Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Eğitim Fakültesi Fizik Bölümünden 1992 yılında mezun oldu. Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında, 2000-2002 yılları arasında Yüksek Lisans yaptı. Aynı Enstitüde 2002 yılında doktora programını kazandı. Halen Millî Eğitim Bakanlığında Bakanlık Müfettiş Yardımcısı olarak görevini sürdürmektedir. Evli ve iki çocuk babasıdır.