

**980 nm YARIİLETKEN
LAZERLERİN MODELLENMESİ**

H. İbrahim KOTAN

**Y. Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK
2008
Her hakkı saklıdır**

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

980 nm DALGABOYLU YARIİLETKEN LAZERLERİN
MODELLENMESİ

Halil İbrahim KOTAN

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

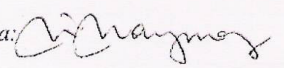
ERZURUM


2008

Her hakkı saklıdır

Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Halil İbrahim KOTAN tarafından hazırlanan bu çalışma 18.09.2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Y. Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK..... İmza: 

Üye : Doç. Dr. İrfan KAYMAZ..... İmza: 

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tevhit KARACALI... İmza: 

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ömer AKBULUT
Enstitü Müdürü

ÖZET

Y. Lisans Tezi
**980 nm DALGABOYLU YARIİLETKEN
LAZERLERİN MODELLENMESİ**

Halil İbrahim KOTAN

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK

Fotonik alanındaki gelişmeler, yarıiletken lazerlerin 1962'deki keşfinden sonra büyük oranda artmıştır. Son birkaç yılda, yüksek hızlı ve yüksek kapasiteli optik sistemlerin gelmiş olduğu nokta tüm optik sistemler için (çok hızlı ürünler) gerekli malzemelerin geliştirilmesini hızlandırmıştır. Son günlerde yarıiletken optik yükselteç ve yarıiletken lazer tabanlı birçok farklı özelliklerde ürünler gerçekleştirilmiştir. Yarıiletken lazerler, diğer lazer kaynaklarına göre elektriksel pompalanabilirlik, yüksek güç, uzun yaşam süresi, yüksek verimlilik, küçük boyut ve gigahertz mertebelerinde modüle edilebilirlik, yüksek bant genişliği gibi birçok avantaja sahiptir.

Bu çalışmada, bir yarıiletken lazerin çalışma prensibi ile kenar veya yüzeysel yayılım gibi yapılar ile ilgili olarak yarıiletken lazerlerin sınıflandırılması tanımlanmıştır. Ayrıca lazer kevgiti tasarımı ve kuantum çukur lazerleri de bu çalışmada incelenmiştir. Oran denklemleri tipik bir yarıiletken lazerin karakteristiklerini sürekli durumda incelemek için kullanılmıştır. Son olarak bir sırt kılavuzlu yarıiletken lazerin LaserMOD simülasyon programı ve Matlab programına dayalı olarak modellenmesi gerçekleştirilmiştir. LaserMOD, Matlab ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.

2008, 64 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yarıiletken Lazerler, Oran Denklemleri, LaserMOD Simülasyon, Sırt Kılavuzlu Yarıiletken Lazerler.

ABSTRACT

MSc. Thesis

MODELLING OF SEMICONDUCTOR LASERS WITH 980 nm WAVELENGTH

Halil İbrahim KOTAN

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical & Electronics Engineering

Supervisor: Ascoc. Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Developments in the photonics area have increased after the demonstration of semiconductor lasers in 1962. In the last few years, the advent of high speed and high capacity optical systems stimulated the development of devices for all-optical, ultrafast processing. Recently many different functional devices based on semiconductor optical amplifiers and semiconductor lasers have been realised. Semiconductor lasers have many additional advantages over other laser sources such as electrically pumpable, compact, high efficiency, high power, long lifetime, high reliability, small size, and high bandwidth modulated up to gigahertz rates.

In this study, the principle of operation and classification of semiconductor lasers are described with respect to their structure such as edge or surface emitting etc. A discussion of commonly used laser cavity designs and quantum well lasers is also included. Rate equations are used to examine the steady-state characteristics of a typical semiconductor laser. Finally, modelling of a ridge waveguide semiconductor laser is realized using LaserMOD simulation program and a MATLAB program written by ourselves. LaserMOD, Matlab and experimental results are given with comparison.

2008, 64 pages

Keywords: Semiconductor Lasers, Rate Equations, LaserMOD Simulation, Ridge Waveguide Semiconductor Lasers.

TEŞEKKÜR

“980 nm Dalgaboylu Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi” araştırma konusunun belirlenmesi ve yapılandırılması aşamalarında yardımlarını esirgemeyen danışmanım Sayın Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK’a teşekkür ederim.

Araştırmanın bütün aşamalarında yakın ilgi, destek ve teşviklerini esirgemeyen aileme teşekkür eder, şükranlarımı sunarım. Araştırmada ortaya konulan bulgu ve sonuçların, hedef kitlelere faydalı olacağını ümit ediyorum.

Halil İbrahim KOTAN

Ağustos 2008

İÇİNDEKİLER

| | |
|---|-------------|
| ÖZET | i |
| ABSTRACT | ii |
| TEŞEKKÜR | iii |
| SİMGELER ve KISALTMALAR | vi |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | viii |
| ÇİZELGELER DİZİNİ | ix |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. KURAMSAL TEMELLER | 4 |
| 2.1. Giriş | 4 |
| 2.2. Bir Yarıiletken Lazerin Çalışma Prensipleri | 4 |
| 2.2.1. Yarıiletken lazerlerde uyarılmış yayılım | 4 |
| 2.2.2. Lazer keviği | 6 |
| 2.3. Tek ve Çok Tip Eklem Yapılı Yarıiletken Lazerler | 8 |
| 2.4. Yarıiletken Lazerlerin Yapısal Sınıflandırılması | 12 |
| 2.4.1. Geniş alan yarıiletken lazerler..... | 14 |
| 2.4.2. Şerit geometri yarıiletken lazerler | 17 |
| 2.4.3. Kazanç kılavuzlu yarıiletken lazerler | 17 |
| 2.4.4. İndis kılavuzlu yarıiletken lazerler..... | 19 |
| 2.5. Yarıiletken Lazerlerin Rezonatör Tasarımı | 21 |
| 2.6. Kuantum Çukur (QW) Lazerler | 25 |
| 2.7. Kuantum Tel ve Kuantum Nokta Lazerler | 28 |
| 3. MATERYAL ve YÖNTEM | 31 |
| 3.1. Oran Denklemleri | 31 |
| 3.2. Bir Yarıiletken Lazerin Sürekli Durum Karakteristikleri..... | 34 |
| 3.3.1. Yazılım tanıtımı | 36 |
| 3.3.2. Modelin oluşturulması..... | 39 |
| 3.3.3. Simülasyon teknikleri | 40 |
| 4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR | 42 |
| 4.1. InGaAs/GaAs Yarıiletken Lazerin Modellenmesi | 42 |
| 4.1.1. Materyal yapısı | 42 |
| 4.2. Yarıiletken Lazerin MATLAB ile Modellenmesi..... | 43 |
| 4.2.1. Elektron sayısı -akım (N-I) karakteristiği | 44 |
| 4.2.2. Foton sayısı -akım (P-I) karakteristiği..... | 45 |
| 4.2.3. Optik güç -akım (L-I) karakteristiği | 46 |
| 4.3. Yarıiletken Lazerin LaserMOD ile Modellenmesi | 47 |
| 4.3.1. Diferansiyel kuantum verimi hesabı..... | 48 |
| 4.3.2. Optik güç -akım (L-I) Karakteristiği | 49 |
| 4.3.3. Akım-gerilim (I-V) karakteristiği..... | 51 |
| 4.3.4. Spektrum, yakın ve uzak alan karakteristikleri | 52 |

| | |
|---|-----------|
| 4.4. L-I ve Spektrum için Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması | 57 |
| 4.4.1. L-I sonuçlarının karşılaştırılması | 58 |
| 4.4.2. Optik spektrum grafiklerinin karşılaştırılması | 60 |
| 5. SONUÇ ve TARTIŞMA..... | 62 |
| KAYNAKLAR..... | 63 |
| ÖZGEÇMİŞ..... | 65 |

SİMGELER ve KISALTMALAR

| | |
|------------|---|
| c | Işık hızı |
| cw | Sürekli Dalga (Continuous wave) |
| d | Aktif bölge kalınlığı |
| DBR | Yayılmış Bragg yansıtıcı (Distributed Bragg reflector) |
| DFB | Yayılmış geri besleme (Distributed feedback) |
| DQW | Çift kuantum çukur (Double quantum well) |
| E_c | İletim bandındaki elektron enerjisi |
| E_f | Fermi enerji seviyesi |
| E_v | Valans bandındaki elektron enerjisi |
| F_e | Elektronlar için Fermi –Dağılım seviyeleri |
| F_h | Delikler için Fermi –Dağılım seviyeleri |
| FP | Fabry–Pèrot |
| g_{th} | Eşik kazancı |
| h | Planck sabiti |
| J_{th} | Eşik akım yoğunluğu |
| K | Boylamsal mod sayısı |
| L | Keviti uzunluğu |
| LD | Lazer diyot |
| LED | Işık yayan diyot (Light emitting diode) |
| MBE | Moleküler demet epidaksi (Molecular beam epitaxy) |
| MOVPE | Metal-organik buhar faz epidaksi (metalorganic vapor-phase epitaxy) |
| MQW | Çoklu kuantum çukur (Multiple quantum well) |
| n | Kırılma indisi |
| R_1, R_2 | Yüzey yansıtıcılığı |
| SQW | Tek kuantum çukur (Single quantum well) |
| V_o | Deplezyon bölgesinde iç potansiyel |
| ν | Foton frekansı |

| | |
|------------|---|
| q | Elektron yükü |
| α_i | Aktif tabakadaki dâhili kayıp |
| Γ | Aktif tabakadaki mod enerjisi içeren optik gömülme faktörü |
| λ | Dalgaboyu |
| QW | Kuantum çukur (Quantum well) |
| WDM | Dalgaboyu bölüşümlü çoğullama(Wavelength division multiplexing) |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|--|----|
| Şekil 2.1 III-V seviyeli yarıiletken modeli (Singh 2001)..... | 5 |
| Şekil 2.2 Yarıiletken lazerin basit bir gösterimi..... | 7 |
| Şekil 2.3 GaAs/GaAlAs çok eklemlı materyal yapı gösterimi..... | 9 |
| Şekil 2.4 Yarıiletken Lazerlerin Sınıflandırılması..... | 13 |
| Şekil 2.5 Bir geniş alan lazer tipinin şematik gösterimi (Singh 2001) | 14 |
| Şekil 2.6 InGaAsP-InP lazerlerde $(1,3 \mu\text{m}) d - J_{th}$ değişimi (İtaya 1979)..... | 15 |
| Şekil 2.7 InGaAsP-InP lazerler için alıcıyoğunluğu - j_{th} değişimi ((İtaya 1979) | 16 |
| Şekil 2.8 InGaAsP materyal sistem kullanılarak fabrikasyonu geręekleřtirilmiř kazanç kılavuzlu lazer yapıları; Oksit şerit (a) ve Eklem şerit (b) lazerler (Dutta 1994)..... | 19 |
| Şekil 2.9 Sırt kılavuzlu lazerler (a) Kaminov tarafından kullanılan yapı ve (b) Heteroepitaksal büyütmüş sırt lazer gösterimi (Dutta, Kominov 1994)..... | 21 |
| Şekil 2.10 (a) F-P ve (b) DFB lazer diyotların dalgaboyu spektrumları ve yapılarının gösterimi (Çakmak 2000)..... | 24 |
| Şekil 2.11 Bir külçe ve kuantum çukur yarıiletkende iletkenlik bandı enerjisine karşın durumların yoğunluğu değişimi (Çakmak 2000)..... | 26 |
| Şekil 2.12 4 adet kuantum çukur yapısının enerji bant diyagramı (Çakmak 2000) | 28 |
| Şekil 2.13 (a) Farklı kuantum yapılar ve (b) Külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta yarıiletkenlerin durum yoğunluklarının gösterimi (Hanna 1998)..... | 29 |
| Şekil 3.1 LaserMOD CAD programı çizim ortamı | 37 |
| Şekil 3.2 LaserMOD CAD programı modül ortamı | 38 |
| Şekil 3.3 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin LaserMOD çizimi | 39 |
| Şekil 4.1 Sürekli durum modunda N-I (Elektron sayısı-Akım) karakteristiği | 45 |
| Şekil 4.2 Sürekli durum modunda P-I (Foton sayısı-Akım) karakteristiği | 46 |
| Şekil 4.3 Sürekli durum modunda L-I (Işık-Akım) karakteristiği..... | 47 |
| Şekil 4.4 Yarıiletken bir lazerin değişik kevti uzunluklarda Akım-Gerilim eğrileri..... | 49 |
| Şekil 4.5 Yarıiletken lazerin optik güç-akım eğrisi | 50 |
| Şekil 4.6 Yarıiletken lazerin akım-voltaj eğrisi..... | 51 |
| Şekil 4.7 Yarıiletken lazerin a) Yakın alan topografik yayılım b) Dikey yönde yakın alan Gaussian dağılımı | 53 |
| Şekil 4.8 Uzak alan yayılımı a) Topografik yayılım b) Gaussian dağılım | 54 |
| Şekil 4.9 (a) Yakın alan ve (b) Uzak alan dağılımı | 55 |
| Şekil 4.10 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin elektroışıma tayfı | 57 |
| Şekil 4.11 a) Matlab kullanılarak elde edilen L-I sonu b) LaserMOD simülasyon programı kullanılarak elde edilen L-I sonucu ve c) Deneysel sonuç | 58 |
| Şekil 4.12 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin (a) ve (b) çalışmalarda elde edilen optik spektrum grafikleri | 60 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Çizelge 2.1 Yarıiletken lazer diyotlar için kullanılan malzeme sistemleri | 11 |
| Çizelge 4.1 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin tabaka yapısı | 43 |
| Çizelge 4.2 Tipik bir çoklu hetero yapıli lazer için sabitler ve lazer parametreleri | 44 |
| Çizelge 4.3 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin farklı çalışmalarda elde edilen sonuçların tablosal gösterimi | 61 |

1.GİRİŞ

Yarıiletken lazer kavramı, taşıyıcıların bir p-n eklemünde rekombinasyonu ile uyarılmış yayılımın meydana geldiğini belirten Basov tarafından 1961 yılında ortaya konuldu. Laboratuvar çalışmalarında lazer ışması elde edilmesi ile ilk yarıiletken lazer 1962 yılında tanımlandı. Bu tarihten sonra ortaya çıkan problemler yarıiletken lazer teknolojisinde yavaşlamalara neden oldu. Bu problemleri aşabilmek için yeni bir yarıiletken teknolojisi geliştirme gerekliliği ortaya çıkmıştır. Yarıiletken lazerler silikondan yapılamıyordu ve bu nedenle kullanılan alaşım yarıiletkenler sınıfında bulunan direkt yasak band yapılı materyaller kullanılarak gerçekleştirildi. Çok düşük sıcaklıklarda çalışma zorunluluğu, lazerin verimli bir aralıkta çalışmasını engelleyen ve yüksek sıcaklık sarfiyatına neden olan yüksek eşik akımı gibi problemlerin çözümlenmesi gerekiyordu.

Bu problemlerin çözümü için 1969 yılında büyük bir adım atıldı ve çoklu yapılı yarıiletken lazerler gerçekleştirildi. Çoklu yapılı lazerlerde farklı bileşiklerden çoklu yarıiletken tabakalar bir araya getirilerek basit bir p-n eklemi oluşturuldu. Oda sıcaklığında daha iyi taşıyıcı ve optiksel hapsedmeden dolayı sürekli dalga modunda (CW) lazerin çalışması mümkün olmuştur. Kuantum çukur ve gerilmiş kuantum çukur yarıiletken lazerlerin kazanç sağlamadaki etkinliği ile daha avantajlı çoklu yapılar geliştirmek lazer performansını etkileyen çalışmaların devamını sağlamıştır. Kuantum çukurunun genişliğini kontrol ederek fotonların dalgaboyunu kontrol etmek mümkün olmuştur. Aynı zamanda kuantum kuyusu normal yarıiletkene göre daha az hal yoğunluğu özelliği gösterdi (Dingle 1974). İlk AlGaAs-GaAs kuantum çukur çok eklemli yapılı diyot lazerleri 1975'te gerçekleşti. Bu lazerler optik olarak pompalanıyordu ve 15 K'de çalışıyorlardı (Van der Ziel 1975). 1978'de oda sıcaklığında darbeli olarak çalışan ve elektrikle pompalanan AlGaAs-GaAs kuantum çukur diyot lazerleri elde edildi (Dupius 1978). 1979'da oda sıcaklığında sürekli modda çalışan AlGaAs-GaAs kuantum çukur diyot lazerleri elde edildi (Dupius 1979).

Bu çalışmalarla birlikte moleküler ışın epitaksisi ilerledi ve bu metodla ilk lazerler 1975'te üretildi (Cho 1976). 1978'de GRINSCH (Graded Index Separate Confinment Heterostructure) yani eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çok eklemli yapıli diyot lazerleri icat edildi (Tsang 1982). Bütün bu gelişmeler yarıiletken diyot lazerlerinin verimlerini arttırdı.

Oda sıcaklığında optoelektronik bileşenlerin sahip olduğu kabiliyetleri yarıiletken lazerlere adapte etmede iki büyük faktör söz konusudur. Bu faktörlerden biri istisnai ve rastlantılı bir şekilde AlAs ve GaAs arasında yakın kafes eşleşmesidir. Bu durum çoklu yapıların, $Al_x Ga_{1-x} As$ büyütülmesinde farklı bileşimli tabakalar içermesine müsaade etmektedir. İkinci faktör ise yarıiletken lazerlerin eşsiz özellikler sergilediği birkaç önemli optoelektronik uygulamalarda önemli bir varlık göstermesidir. Çünkü en küçük boyutlara (birkaç yüz mikrometre), en yüksek verime (%50 den daha fazla) ve var olan bütün lazerler içinde en uzun yaşam süresine sahiptirler. Bu özellikler yarıiletken lazerleri popüler kılmakta ve gelişimi için gerekli olan yatırımların yapılmasına imkân tanımıştır.

Fiber optik haberleşme uygulamalarında cihaz tasarımı, uygulanan akımla lazer çıkışının modüle edilmesi ile basitleştirilebilmiştir. Gigahertz mertebelerindeki bilgi iletimi günümüz şartlarında mümkün kılınmıştır. Fiber optik haberleşmeleri de 1,3 ve 1,5 μm de yarıiletken lazerlerin gelişimi ile gerçekleştirilmiştir. 1,5 μm dalga boyunda fiber optik kayıpları ve dispersiyon minimum sevededir. Tekrarlayıcı gerekliliği lazer kuvvetlendiricilerin gelişimine müsaade etmiş ve su altı optik haberleşme hatları kullanımı, cihaz güvenilirliğinde yapılan gelişmelere ışık tutmuştur. Frekans çoğullamalı iletişimde frekans kararlılığı için yayılmış geri besleme (Distributed feedback- DFB) ve yayılmış bragg yansıtıcı (Distributed Bragg reflector- DBR) lazerler geliştirilmiştir.

Yarıiletken lazerin keşfi ayrıca fotonik teknolojisinde de büyük bir adım olarak kabul edilir. Günümüzde bu aygıtlar optik veri kaydı ve veri okumada, lazer yazıcılarda, optik anahtarlama ve katı-hal lazerleri pompalamada geniş ölçekte kullanılmaktadır. Bunun

dışında yarıiletken lazerler, optik iletişim sistemleri için ışık kaynağı olarak kolayca kendine yer edinmiştir. Bununla eş güdümlü olarak gelişen optik yükselteçlerin, dedektörlerin ve fiber optiğin keşfi, iletişim teknolojisinde bir devrim yaratmış ve çok sayıda verinin yüksek hızda dünyanın herhangi bir yerine taşınması sağlanmıştır.

Yükselen veri trafiği, kapasitede ve kullanımda sürekli talepler yaratmıştır. Çift-sarım bakır kablolar bu talebe karşılık verememiş ve limitlerine çabuk erişmiştir. Sonuç olarak optik teknoloji, bir çok ağ'da tercih edilen bir opsiyon durumuna gelmiştir. Uzun mesafeli ağlarda verici-alıcı sayısı çok olmamakla birlikte cihaz maliyeti çok önemli değildir, kısa mesafeli şehir içi ya da ofis içi ağlarda verici-alıcı çoğunluğu ve düşük maliyet önem kazanır. Kısa mesafeli ağlarda genellikle verimliliği, ucuzluğu, düşük güç harcaması ve yüksek hızlı olması ile 850 nm dalgaboylu GaAs tabanlı yarıiletken lazer 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. Uzak-mesafeli uygulamalar için 1,3–1,5 μm dalgaboylu lazer kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. 1,3 ve 1,55 μm 'lik lazer uygulamaları veri transferleri için uygundur. Fabry-Perot (F-P) ve dağıtılmış geri besleme (DFB) gibi geleneksel yarıiletken lazerler orta ve uzak mesafe optik haberleşme uygulamalarında kullanılmaktadır. 10 Gigabit Ethernet gibi yeni bir standartla pazar daha düşük maliyetli alıcı-vericiler ve 10 km ötesi hızlı iletişim beklemektedir. Orta ve uzun mesafeli tek-modlu fiber uygulamaları için ucuz 1,3 ve 1,55 μm dalgaboylu yarıiletken lazerler yeni kuşak optik iletişim için uygun bir seçenek olarak karşımıza çıkmaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Giriş

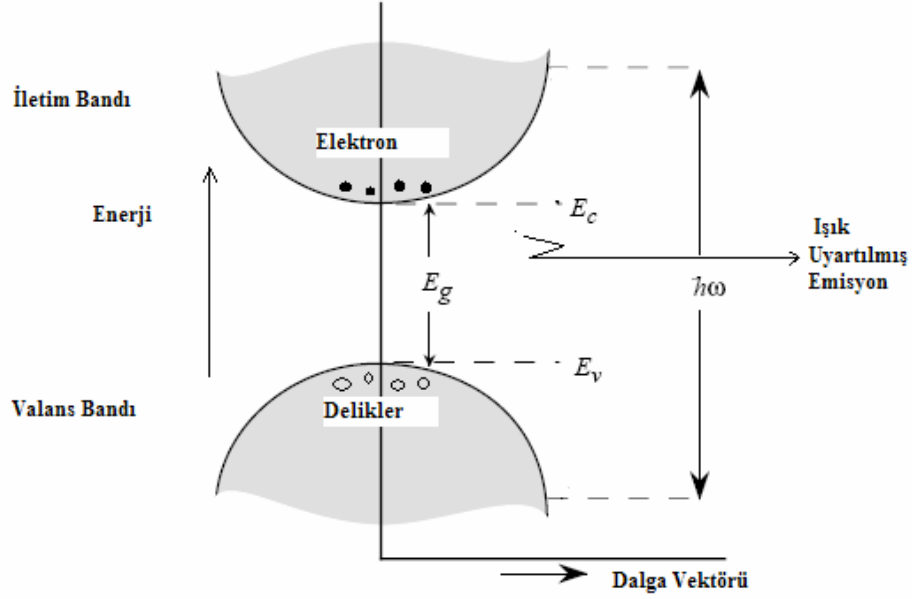
Bu çalışmanın birinci kısmı yarıiletken lazerlerin yapısal sınıflandırılması, yaygın olarak kullanılan lazer kevti tasarımı ve kuantum çukur lazerleri de içeren bilgilerin verildiği kuramsal temel ifadeler üzerinedir. İkinci kısım ise, tipik bir yarıiletken lazerin karakteristiklerini sürekli durumda özetlemek için oran denklemleri kullanılarak modelleme yapılmasını verilerin değerlendirilmesini ve sonuçların tartışılmasını içermektedir.

2.2. Bir Yarıiletken Lazerin Çalışma Prensibi

2.2.1. Yarıiletken lazerlerde uyarılmış yayılım

Bir yarıiletken lazer p-n eklemine oluşturan ve bir sandiviç şeklini anımsatan p ve n malzemelerini içermektedir. Bu durumda p ve n arasında aktif bir tabaka oluşmaktadır. p-n eklemi ileri kutuplandığı zaman, elektron ve deliklerden oluşan taşıyıcılar eklemeye doğru hareket ederler ve bu durum bir akım akışına neden olur. Eklemde elektron ve deliklerin tekrar birleşmesi olayı meydana gelir. Bu taşıyıcıların tekrar birleşmesi uyarılmış ve uyarılmamış yayılımın meydana gelmesini sağlamaktadır. Germanyum ve Silisyum gibi indirek yasak bant aralıklı yarıiletkenler, orta seviyelere doğru elektron akışlarında, E_g (yasak bant enerjisi) nin küçük bir bölümünü her elektron geçişlerinde etkiler ve ortaya çıkan enerjiyi titreşim enerjisi şeklinde fonon olarak serbest bırakırlar. Bırakılan bu fonon enerjisi ısı olarak ortamda yok olmaktadır. Fakat uyarılmış geçişlerden dolayı direk yasak bant aralıklı III-V grubundaki yarıiletkenlerdeki yasak bant enerjisine eşit enerjili fotonlar yayılmaktadır. Uyarılmış elektron ve deliklerin tekrar birleşmesi (rekombinasyon) sonucu oluşan fotonlar soğrulabilir veya bir fotonun

yayılımına neden olabilir. III-V seviyeli yapıda bir yarıiletkenin basitleştirilmiş elektron geçişi Şekil 2.1 de verilmiştir.



Şekil 2.1 III-V seviyeli yarıiletken modeli (Singh 2001)

İletim bandından valans banda geçiş bir uyarıma sebep olup

$$h\nu = E_c - E_v = E_g \quad (2.1)$$

eşitliği ile verilen bir foton enerjisi üretir.

Bu eşitlikte

h : Planck sabiti

ν : foton frekansını göstermektedir.

E_c ve E_v : iletim ve valans bandındaki elektron enerjileri

Elektronlar (F_e) ve Delikler (F_h) için

Fermi –Dağılım seviyeleri

$$F_e - F_h > hf \quad (2.2)$$

eşitliği ile verilmektedir.

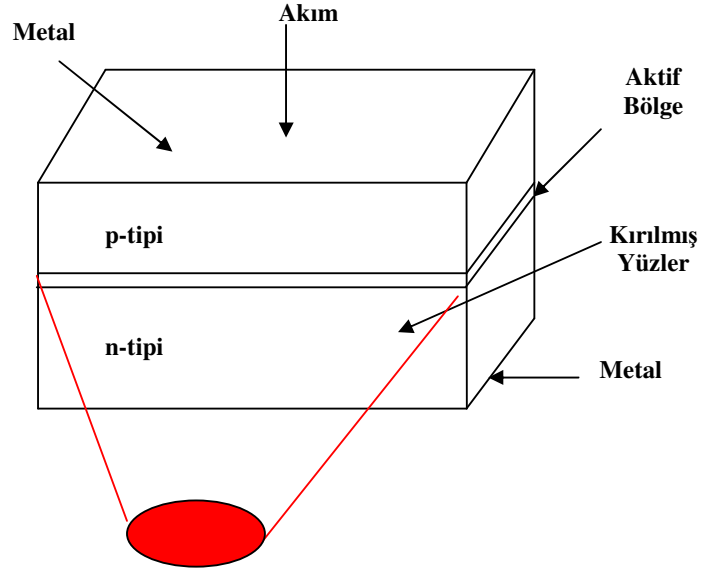
Bu şart bir yarıiletken lazerde optik kazanç elde etmek için gereklidir. Fakat optik kazanç bir lazerin oluşumu için tek başına yeterli değildir. Lazer diyotların lazer kevi ile gerçekleştirilen optik geri besleme işlemi ise başka bir gerekli durumdur.

2.2.2. Lazer kevi

Bir p-n lazer diyot ileri kutuplandığı zaman, elektronlar ve delikler ekleme doğru dar aktif bölgeye kayar ve bu durumda elektron ve deliklerin tekrar birleşmesi olayı gerçekleşerek foton yayılımı başlar. Kendiliğinden emisyon ileri kutup akımı çok küçük olduğunda ve tamamen rastgele bir şekilde elektronların valans bandına düşmesiyle oluşur. Bu fotonlar soğurulmuş, yayılmış veya dışarıya kayıp olarak çıkmıştır. Düşük taşıyıcı yoğunluğu sebebiyle cihazdaki kazanc, kevi kaybını yenmek için çok küçüktür. Bununla birlikte ileri kutuplamanın artışı ile daha fazla taşıyıcı eşik şartları oluşana kadar aktif bölgeye enjekte edilir. Kazancın kayıpları aştığı geçişlerde, elektronlar buldukları enerji seviyesinden en alt enerji seviyesine düşmesiyle (E_2-E_1) ışımaya şartları oluşur ve lazer ışın yaymaya başlar.

Buna ilaveten yayılım fotonla yalnızca aynı frekansta değil aynı zamanda aynı fazdadır. Işıma hem Monokromatik hem de koherentir. Aktif bölgedeki optik kazanç saçılma, serbest taşıyıcı soğurması ve lazerdeki ayna kayıpları gibi çeşitli kayıpları aşacak kadar yeterli olmalıdır.

Daha öncede söylendiği gibi, optik kazanç tek başına lazeri çalıştırmak için yeterli olmayıp optik geri beslemede diğer bir gerekliliktir. Yarıiletken lazerdeki optik geri besleme optik kevti tarafından sağlanır. Aslında optik kevti, içinde fotonların birçoğunun yansımısını sağlayan sistemdir. Foton oluştuğu zaman her döngüde çok küçük bir kısım kevtiyi terk eder. Bir Fabry-Perot kevti Şekil 2.2’de gösterildiği gibi aygıtın yüzleri bir ayna gibi yansıtıcı yapılmak suretiyle oluşturulur.



Şekil 2.2 Yarıiletken lazerin basit bir gösterimi

Sonuç olarak kevti içinde foton yoğunluğu oluşmaya başlar. Eşik şartlarını elde etmek için kevtide ki optik alan sürekli durum şartları altındadır. Böylece eşik şartları herhangi bir foton enerjisindeki kevti kazancın kevti kaybını aşması olarak tanımlanır.

Optik gömülme faktörü ise;

$$\Gamma_{gth} = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (2.3)$$

Eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte,

Γ : Aktif tabakadaki mod enerjisi içeren optik gömülme faktörü,

g_{th} : Eşik kazancı,

α_i : Aktif tabakadaki dâhili kayıplar,

L : Keviti uzunluğu,

R_1, R_2 : Yüzey yansıtıcılığıdır.

(2.3) eşitliğindeki ikinci terim lazer ayna kayıplarını temsil eder.

2.3. Tek ve Çok Tip Eklem Yapılı Yarıiletken Lazerler

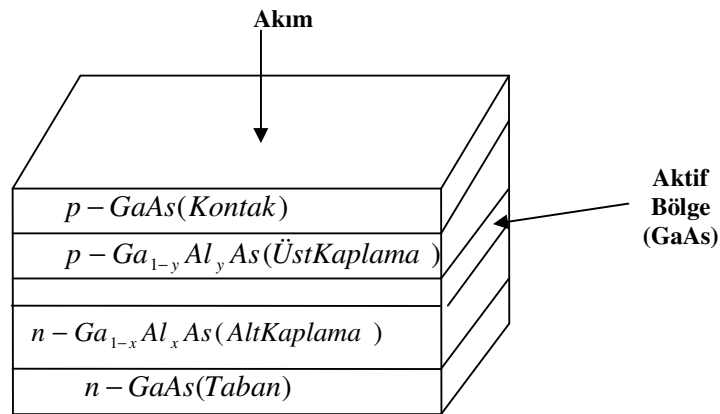
Bir yarıiletkenin farklı katılanmış bölgeleri arasındaki eklemeler tek tip eklem yapılı (homojunction) lazer olarak adlandırılır. Farklı yarıiletken malzemeler arasında kalan eklemeler ise çok eklem yapılı (heterojunction) lazer olarak isimlendirilir. p-n eklemi p ve n-tipi yarıiletkenler arasında kalan bir tekli eklemidir.

Tek tip eklemli yapıda; elektron ve delikler yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru hareket ederler. p- tarafına geçen elektronlar eklem bölgesinde boşluklarla rekombine olurlar. Böylece eklem civarında boşaltılmış bölge (depleasyon) meydana gelir. Bu depleasyon bölgesi sabit yükler içerir ve bir elektrik alanı

meydana getirir. Bu alan daha fazla taşıyıcının eklemi aşmasına mani olur. Bu alan, depleasyon bölgesinde bir iç potansiyel (V_o) oluşturur.

Tek tip eklem yapıları yarıiletken lazerlerde kazanç ortamı, d kalınlıklı bir aktif bölgeye sahip p-n eklemi içerir. Bu aktif bölgede ileri besleme altında pozitif kazanç üretecek şekilde yeterli miktarda elektron ve delikler bulunmaktadır. Tek tip (homostructure) eklem lazerler genelde GaAs olmak üzere tek materyalden oluşur. Oda sıcaklığında çalışmak için yetersizdirler ve eşik akımları, optik ve taşıyıcı gömülmesi için çok yüksektir. Taşıyıcı gömülmesi çok eklemli lazer kullanılarak etkili bir biçimde gerçekleştirilebilir.

Farklı yarıiletken malzemeler arasındaki eklemeler ise çoklu tip (heterostructure) eklemli yapı olarak isimlendirilir. Bu tür eklemeler bipolar, FET transistörler ile lazer ve dedektörlerde kullanılmaktadır. Farklı yasak band aralıklı materyaller arasındaki eklemeler enerji-band diyagramında sıçramalar (jumps) meydana getirir. Potansiyel enerji kesikliği (discontinuity) bir bariyer sağlar. Bu bariyer sayesinde taşıyıcıların istenmeyen bölgelere kaçması önlenir ve p-n eklemde hapsedilebilir.



Şekil 2.3 GaAs/GaAlAs çok eklemli materyal yapı gösterimi

Şekil 2.3’de GaAs/GaAlAs çoklu tip eklem yapıdaki bir lazer gösterilmiştir (x indeksi Al atomunun yerini alan GaAs’deki Ga atomlarıdır). Aktif bölge iki GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs bölgeleri tarafından sandviçlenmiştir. Bu tabakalar alt ve üst kaplamalı tabaka olarak adlandırılır ve aktif bölgeden daha geniş band aralığı ve daha düşük kırılma indisine sahiptir. p-n eklemi ileri kutuplandığı zaman yasak bant aralığı farklılıklarından dolayı iki kaplama tabaka arasında bir potansiyel bariyer meydana gelir ve aktif tabakada bulunan elektron-boşluk çiftlerinin aktif tabaka boyunca gömülmesine neden olur. Bu nedenle çok eklemli lazerler daha iyi taşıyıcı hapsedilmesi, düşük eşik akımı, 30 mW veya daha yukarı mertebelere kadar lineer ışık akımı karakteristiği ve yüksek sıcaklıkta uzun süre çalışma gibi özellikler sergilerler. Çoklu tip eklemli yapıların diğer bir avantajı ise aktif bölgenin daha yüksek kırılma indisine sahip olmasıdır.

Optik dalga kılavuzu, optik hapsedme sağlayan çok eklemli yapı tarafından oluşturulur. III-V grup yarıiletken ile oluşturulmuş çok eklemli yapılar büyük miktarda moleküler demet epidaksi (Moleküler Beam Epitaxy-MBE) ve metal-organik buhar faz epidaksi (Metalorganic Vapour-Phase Epitaxy-MOVPE) gibi ileri büyütme teknikleri ile üretilir. Üretimde başarılı olmak için, uygun materyal üzerinde yarıiletken yapı büyütülmeli ve cihaz yapısındaki tabakalar birbirleri ile uyum içinde olmalıdır. Çizelge 2.1’de yarıiletken lazerler için kullanılan çeşitli materyal sistemleri verilmiştir ve her biri optik spektrumun farklı dalga boyunda çalışmaktadır.

Çizelge 2.1 Yarıiletken lazer diyotlar için kullanılan malzeme sistemleri

| Bileşim | Dalgaboyu (nm) | Kullanım Alanı |
|--|----------------|---|
| AlGaInN | 200-640 | Tek modlu işlemler |
| AlGaInP | 630-680 | Optik data depolama uygulamaları |
| Ga _{0,5} In _{0,5} P | 670 | Data depolama |
| GaAs/Ga _{1-x} Al _x As | 750-895 | Kısa mesafe haberleşme (<2km) |
| In _{0,2} Ga _{0,8} As/GaAs | 980 | Pompalama uygulamaları |
| In _{1-x} Ga _x As _y P _{1-y} | 1200-1650 | InP taban, uzak mesafe optik haberleşme |
| In _{0,73} Ga _{0,27} As _{0,58} P _{0,42} | 1310 | Fiber optik haberleşme dalgaboyu |
| In _{0,58} Ga _{0,42} As _{0,9} P _{0,1} | 1550 | Fiber optik haberleşme dalgaboyu |
| InGaAsSb | 1700-4400 | Gaz sensör uygulamaları |

Bu cihazların ışınım dalga boyları infrared bölge ile görünür bölge sınırlarını kapsamaktadır. Örnek olarak görünür dalga boyunda çalışan lazer diyotlar optik bilgi depolama ve lazer çıktı uygulamaları için geliştirilmiştir. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs ve In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}/InP materyal sistemler yarıiletken lazerlerin en önemli yapılarındandır. İlk sistem için aktif bölge GaAs veya Ga_{1-x}Al_xAs tabanlıdır. 750-895 nm dalgaboyunda kısa mesafe optik haberleşme uygulamaları için uygundur. İkinci sistem ise aktif bölge olarak In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y} tabanlı bir yapıya sahiptir. Bu lazerler $1,2\mu\text{m} < \lambda < 1,65\mu\text{m}$ 'de yayılım yapar ve dalgaboyu aralığı x ve y' ye bağlıdır. 1.55 μm dalgaboyu, uzun mesafe fiber optik haberleşme için tercih edilmektedir. Çünkü optik fiberler bu dalga boyunda 0,1 dB/km gibi küçük kayıplara sahiptirler.

Çok eklemli lazerler yaklaşık olarak aktif bölge uzunluğunun 50 μm veya daha fazla olması ile geniş alan(broad-area) lazer olabilirler. Bu tipteki çok eklemli lazerlerde ışınım bütün aktif tabaka genişliği boyunca gerçekleşir. Geniş alan yayılım bölgesi bazı problemlere neden olmaktadır. Bu problemler yüksek eşik akım içermesi, lineer olmayan ışık çıkışı, geniş aktif bölge içinde çok modlu ışınımın gerçekleşmesi gibi olumsuz durumlardır. Bu gibi problemlerin üstesinden gelmek için şerit geometri (stripe-geometri) çok eklemli lazerler kullanılmaktadır. Bu tip lazerler düşük

pompalama akımları ile sürülmekte ve optik kevitin genişliği birkaç mikron civarlarında olmaktadır.

2.4. Yarıiletken Lazerlerin Yapısal Sınıflandırılması

Lazer diyot yapıları kenar ve yüzey yayılımlarına göre de sınıflandırılabilirler. Lazer yayılımı kristal kenarlarda meydana gelir. Çünkü lazer kevitinin her iki ucundaki iki kırılmış yüz tarafından oluşturulmuştur. Yarıiletken lazerler, dalga kılavuzu yapısını, akım akışını ve kevitin sınırlarını tanımlayan çeşitli III-V grubu bileşiklerin çoklu katmanlarının epitaksiyal büyütülmesiyle elde edilen malzeme yapılarından üretilir. Kenar yayımlı yarı iletken lazerler, tek eklem ya da çoklu eklem yapıları olarak sınıflandırılır.

Çoklu tip eklem yapıları lazerlerde optik mod eklem düzlemine dikey bir şekilde gömülmüştür. Çünkü kırılan yüzler, aktif bölgenin kırılma indisi ile karşılaştırıldığında daha düşük bir kırılma indisine sahiptir. Temel mod oluşumu için düşük eşik akımı ile eklem yüzeyi boyunca optik modun gömülmesi gereklidir.

Yanal mod gömülmenin olmadığı durumda ise lazer, bir geniş alan (broad-area) lazer gibi davranır ve eşik akımı yoğunluğu 1 kA/cm^2 civarındadır. 1 A ' lik bir eşik akımı $250 \mu\text{m} \times 380 \mu\text{m}$ lik bir lazer için gereklidir. Böyle yüksek bir eşik akımı da yarıiletken lazerlerin kullanımını sınırlandırmaktadır.

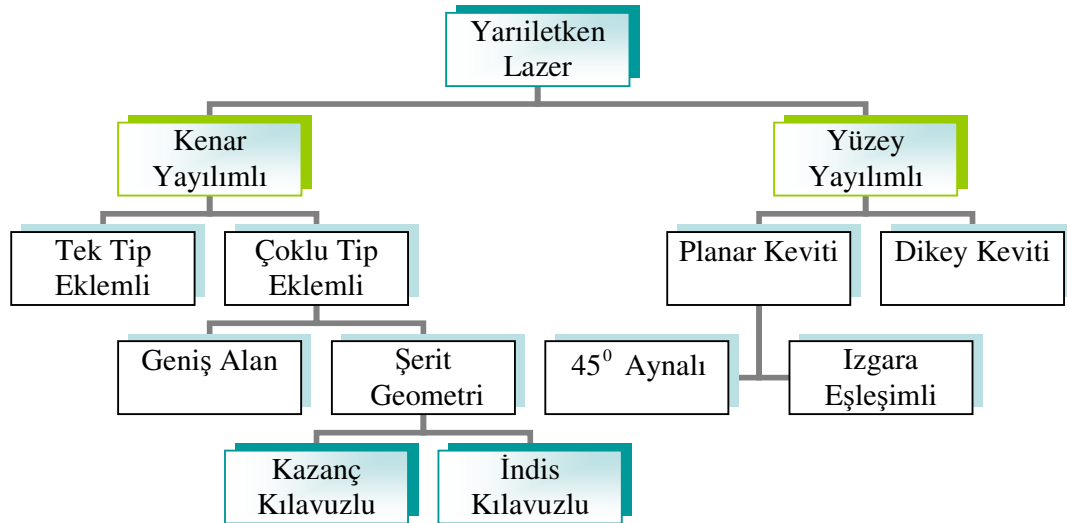
Yarıiletken lazer tasarımında birincil amaç yüksek güçlü ve düşük eşik akımlı bir lazer yapısını elde etmektir. $1,3 \mu\text{m}$ 'ye yakın yayılım yapan InGaAsP yapılı lazerler genellikle 20°C de $10\text{--}15 \text{ mA}$ eşik akımına sahiptirler.

Lazer yapıları genellikle iki grupta sınıflandırılır. Kazanç kılavuzlu ve indis kılavuzlu lazerler. Kazanç kılavuzlu lazerlerde eklem yüzeyi boyunca optik mod genişliği, akım

uygulanan bölge içinde yer alan optik kazanç bölgesinin genişliği ile belirlenir. Tipik olarak bu bölge 5–10 μm aralığındadır.

Fabrikasyondaki bu zorluklara rağmen, düşük eşik akımı, yüksek güç, temel modda yayılım ve yüksek hızlı modülasyon gibi yüksek performans karakteristikleri bu lazerleri birincil bir aday yapmaktadır. Özellikle optik haberleşme sistemleri bu lazerleri daha cazibeli hale getirmektedir.

Gerçekte, son birkaç yılda güçlü indis kılavuzlu lazer yapılarındaki gelişmeler InGaAsP/InP malzeme yapılarını uzun mesafeli optik haberleşme sistemleri için uygun kılmıştır. Zayıf indis kılavuzlu lazerler, güçlü indis kılavuzlu lazerlerden fabrikasyon açısından daha kolaydır. Fakat genellikle 50mA gibi daha yüksek eşik akımlarına sahiptirler.

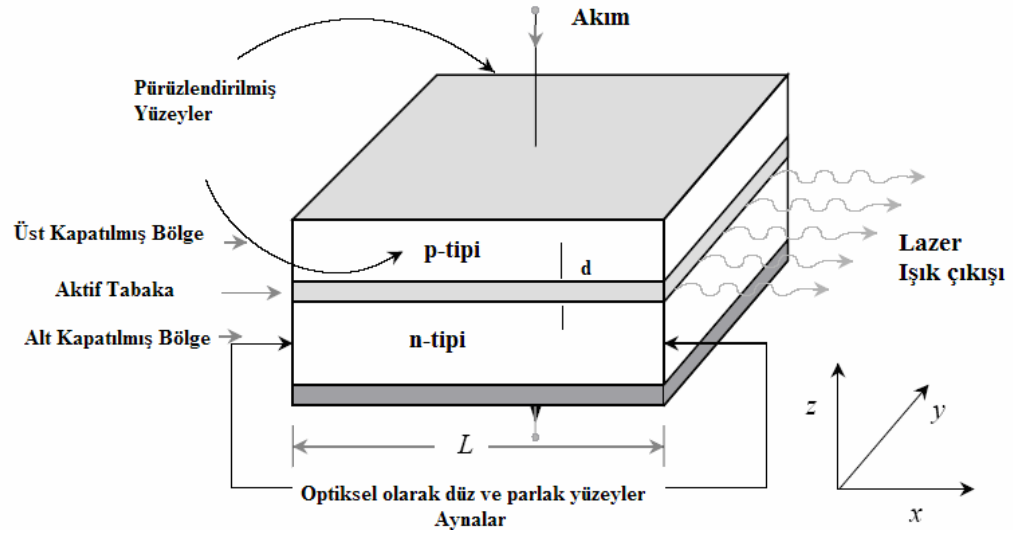


Şekil 2.4 Yarıiletken Lazerlerin Sınıflandırılması

Şekil 2.4’de yarıiletken lazerlerin yapılarına göre sınıflandırılması verilmiştir. Çoklu tip eklem yapılı lazerleri eşik akımları, optik ve taşıyıcı gömülmesi gibi özellikleri ele alarak daha detaylı bir şekilde açıklamaya çalışacağız.

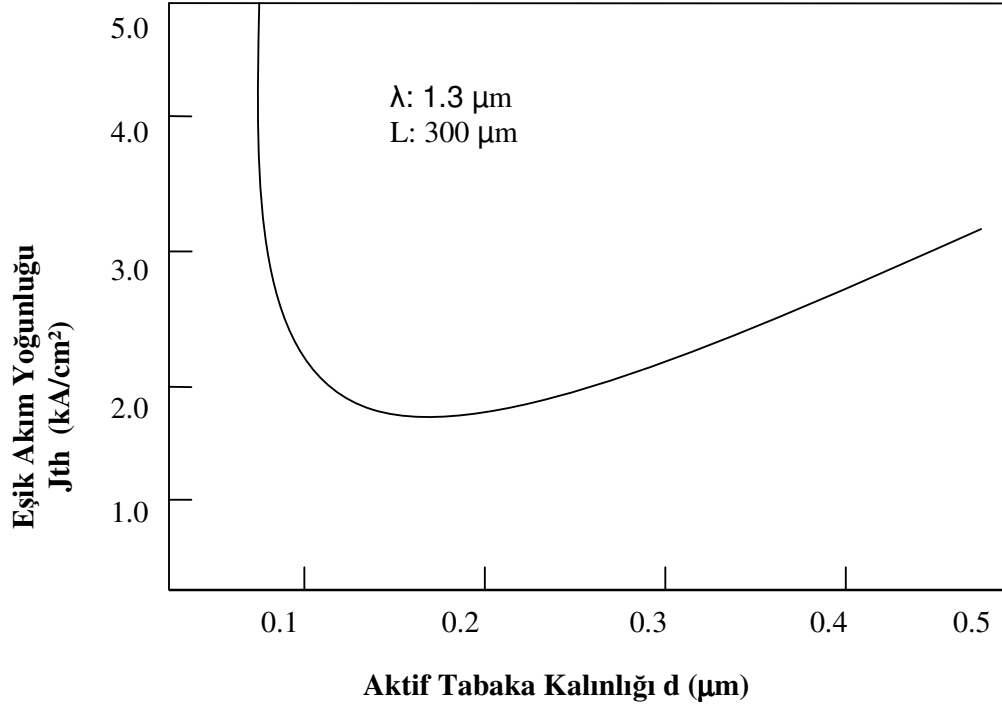
2.4.1. Geniş alan yarıiletken lazerler

Bir geniş alan lazer, akım gömülümü için herhangi bir mekanizmaya sahip değildir. Şekil 2.5 bir geniş alan (broad-area) lazer tipinin şematığını göstermektedir. Kırılan yüzler lazer kevitinin aynalarını oluşturur ve tipik bir aygıtın boyutlarını belirler.



Şekil 2.5 Bir geniş alan lazer tipinin şematik gösterimi (Singh 2001)

Eşik akım yoğunluğu J_{th} , optik modun gömülmesine bağlıdır ve aktif bölgenin kalınlığı (d) ile değişir. Şekil 2.6'da InGaAsP-InP çoklu tip eklemli lazerlerde $1,3 \mu\text{m}$ için d nin bir fonksiyonu olarak J_{th} değişimi verilmiştir.



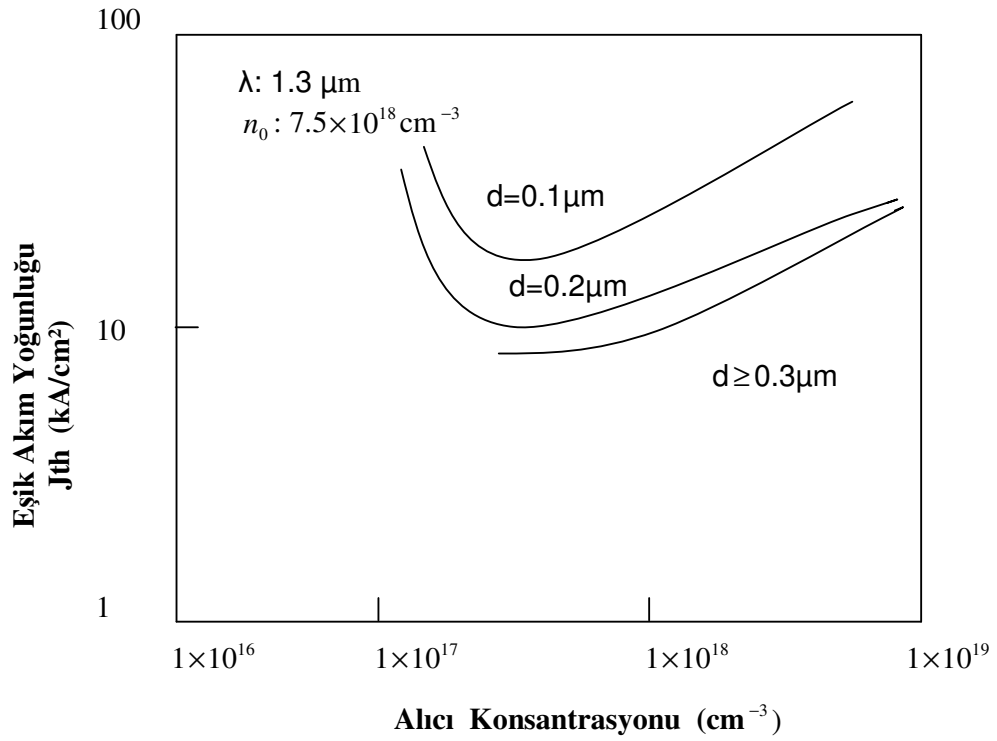
Şekil 2.6 InGaAsP-InP lazerlerde ($1,3 \mu\text{m}$) $d - J_{th}$ değişimi (İtaya 1979)

d 'nin uygun bir değeri için J_{th} 'ın minimum olacağını belirtelim. $d \leq 0.1 \mu\text{m}$ iken, J_{th} 'ın hızlı artışının nedeni ince aktif tabakalar için mod gömülmesindeki kayıplardan kaynaklanmaktadır. $0.2 \mu\text{m}$ 'den daha büyük kalınlık için ölçülen eşik akım yoğunluğu d ile lineer olarak değişir. Bununla birlikte J_{th}/d , farklı dalga boylarında veya farklı materyal sistemlerde, lazer yayılımının karakteristiği için yararlı bir evrensel parametredir.

Bir geniş alan lazerin eşik akım yoğunluğunu etkileyen faktörlerden biri aktif bölgedeki taşıyıcı konsantrasyonudur. Aktif bölgenin p katkısının artırılması genellikle eşik akımını artırabilir yöndedir. Bu etki kısmen ışına yapmayan Auger rekombinasyon oranı ve kısmen optiksel soğurmadan meydana gelen bir artıştan kaynaklanmaktadır.

InGaAsP-InP lazerlerin fabrikasyonunda, aktif tabaka katkılanmamıştır. Fakat In-P

kaplanmış tabakanın LPE ile büyütülmesi esnasında katkılamada genellikle Zn atomları kullanılır. Aktif tabaka içinde bir Zn difüzyonu meydana gelir ve yapı p tipi olarak kullanılır. Aktif tabakanın alıcı (acceptor) konsantrasyonunun bir fonksiyonu olarak gözlenen eşik akım yoğunluğu (aktif tabakanın üç farklı kalınlığı için) Şekil 2.7 de gösterilmiştir. n-InP'nin verici (donor) konsantrasyonu $7,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ gibi ince tabakalı kaplanmış yüzeylerde farklı olduğu gözlenmiştir.



Şekil 2.7 InGaAsP-InP lazerler için alıcıyoğunluğu - j_{th} değişimi ((İtaya 1979)

Geniş alan lazerlerin eşik akım yoğunluğu da kevti boyuna (L) bağlıdır. Uzun kevitler için yansıtıcı ayna kaybı α_m , iç kayıpla α_{int} ile karşılaştırıldığında daha küçük olmaktadır. 1,3 μm 'de bir InGaAsP lazerde 1500 μm li bir kevti boyu için 770A/cm² bir eşik akım yoğunluğu tesbit edilmiştir. Son zamanlarda 500A/cm² 'ye yakın düşük bir değer 400 μm kevti uzunluklu 1,3 μm InGaAsP lazerler için elde edilmiştir.

2.4.2. Şerit geometri yarıiletken lazerler

Şerit geometri tipi lazerler kazanç veya indis kılavuzlu olabilir. Çünkü dalga kılavuzlama kazanç veya kırılma indis değişiminin her biri ile gerçekleştirilebilir. Kazanç kılavuzlama aktif bölge içinde yanal akım enjeksiyonunu sınırlandırır. Oksit-şerit lazerlere, dağlanmış dielektrik maske (örnek olarak SiO_2) ile dar bir şerit içinde akımın hapsedilme işlemi gerçekleştirilmiş kazanç kılavuzlu bir lazer örnek olarak verilebilir. Kazanç kılavuzlu lazerlerde enine mod eklem yüzeyi boyunca optik kazanç dağılımı ile oluşturulmuştur. Bu durum enjekte edilmiş taşıyıcı dağılımı ile gerçekleştirilmiş ve bundan dolayı zayıf optik gömülmeye neden olmuştur. Işık-Akım karakteristiğinde taşıyıcı gömülmesi tam olarak gerçekleşmediğinden ışık-akım eğrisi lineer olmayan bir özellikte olup, aynı zamanda lazerin kılavuzlanamaması gibi olumsuz sonuçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu sebeple kazanç kılavuzlu lazerler düşük kuantum verimliliği ile birlikte yüksek eşik akımı sergilemektedir.

Kazanç kılavuzlu şerit lazerlerdeki bu temel problemler, lazerin yanal yapısı içinde kırılma indis değişimleri ile önlenebilmektedir. Bu tip lazerler sırt kılavuzlu lazerlerdeki gibi daha kompleks yapı ve daha güçlü taşıyıcı yanal hapsedme sağlarlar. Bu lazerler indis kılavuzlu lazerler olarak isimlendirilir, zayıf ve kuvvetli indis kılavuzlu lazerler olmak üzere iki kategoriye ayrılır.

İndis kılavuzlu lazerler kaliteli ışığa ve düşük eşik akımları (10-20 mA) gerektiren düşük güç uygulamalarında yaygın olarak kullanılır. Taşıdığı bu özelliklerden dolayı çoğu diyot lazer uygulamalarında bu tip lazerler kullanılmaktadır.

2.4.3. Kazanç kılavuzlu yarıiletken lazerler

Ticari uygulamalar için hazırlanan çoğu yarıiletken lazerler eklem yüzeyi boyunca küçük bir bölgede akımı sınırlayan bir özellikte yapılırlar. Bu sınırlama birkaç amaca hizmet eder;

i- Geniş Alan (Broad-Area) lazerler için elde edilen 1 A gibi yüksek değerlerle karşılaştırıldığında, 10–100 mA gibi düşük bir eşik akımına müsaade eder.

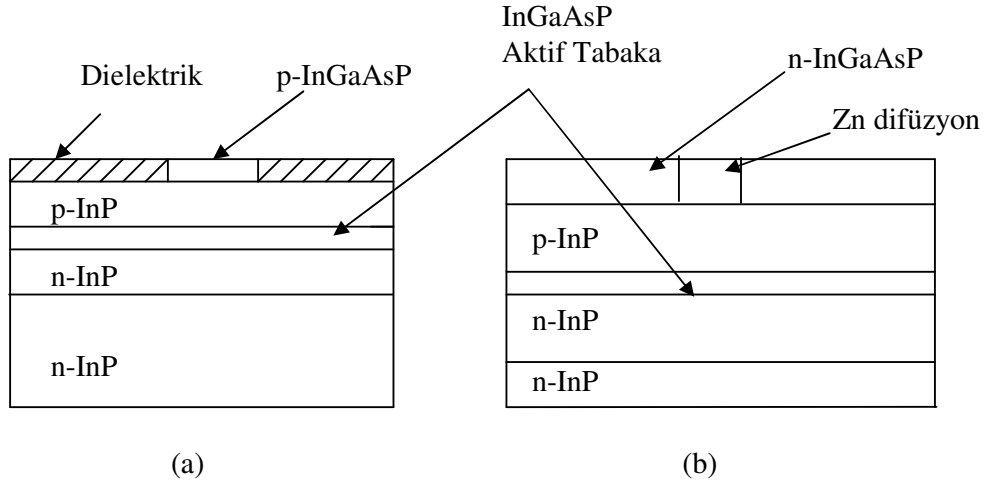
ii- Eklem yüzeyi boyunca temel modda lazer çalışması devam ettirilir. Bu, optik fiber içinde ışığın kublajlanmasında ciddi kolaylıklar sağlar.

iii-Soğutma için gereklilikler, geniş alan lazerler için gerekli olandan daha düşüktür ve düşük işletim akımlarında çalışmaya müsaade eder ve aygıtın çalışma ömrünü uzatır.

En basit akım sınırlandırıcı yapı oksit-şerit yapıdır. Orjinal olarak Dymant firması tarafından fabrikasyonu gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.8, InGaAsP materyal sistem kullanılarak fabrikasyonu gerçekleştirilmiş iki adet kazanç kılavuzlu lazer yapılarını göstermektedir. Oksit-şerit lazerlerde Şekil 2.8 (a)'da p kontak üzerine SiO_2 tabakanın bulunduğu yere enjekte edilmiş akım küçük bir bölgeye hapsedilir. Bu küçük bölge, dielektrik içinde bir açıklık oluşturularak elde edilir.

Eklem-şerit lazerlerde ise Şekil 2.8 (b)'de gösterildiği gibi p- tipi içinde n- tipi tabakanın en üst seviyesinin küçük bir bölgesi Zn difüzyonu ile çevrilir böylece akım gömülmesi sağlayan bölgenin üzerinde ters kutuplu ekleme bir akım yolu sağlanır.



Şekil 2.8 InGaAsP materyal sistem kullanılarak fabrikasyonu gerçekleştirilmiş kazanç kılavuzlu lazer yapıları; Oksit şerit (a) ve Eklem şerit (b) lazerler (Dutta 1994)

Bütün bu yapılarda aktif bölge düzlemsel ve devamlıdır. Bir lazerin uyarılmış emisyon karakteristikleri eklem yüzeyi boyunca (optik kazanç sağlayan) taşıyıcı dağılımı ile belirlenir. Çünkü eklem boyunca optik mod dağılımı optik kazanç ile belirlenir. Bu lazerler kazanç-kılavuzlu lazerler olarak adlandırılır.

2.4.4. İndis kılavuzlu yarıiletken lazerler

İndis kılavuzlu lazerler genel olarak iki alt gruba ayrılır. Bunlar zayıf indis kılavuzlu lazerler ve güçlü indis kılavuzlu lazerlerdir. Zayıf indis kılavuzlu lazerlerde aktif bölge, değişik kalınlıkta ki tabakalar tarafından sağlanan devamlı ve etkili bir indis yapısına sahiptir. İndis kılavuzlu lazerlerde eklem yüzeyinde daha büyük kırılma indisine sahip bir bölge oluşturulup ışınım modu bu bölgeye gömülür. Tasarıma bağlı olarak, bu yapılar değişik isimler alırlar. Örnek olarak sırt (ridge) dalga kılavuzlu, düzlem-konveks dalga kılavuzlu ve kanal tabanlı dalga kılavuzlu lazerler.

Güçlü indis kılavuzlu lazerler gömülü çok eklemli yapılar kullanır. Bu lazerlerde aktif bölge düşük indis ile sınırlandırılır. Eklem yüzeyi boyunca her iki tabaka da epitaksiyal

olarak büyütülür. Yanal indis farkı zayıf indis kılavuzlu için 0.01'e yakın bir değerdedir. Güçlü indis kılavuzlu lazerler için ise bu değer 0.2'e yakındır.

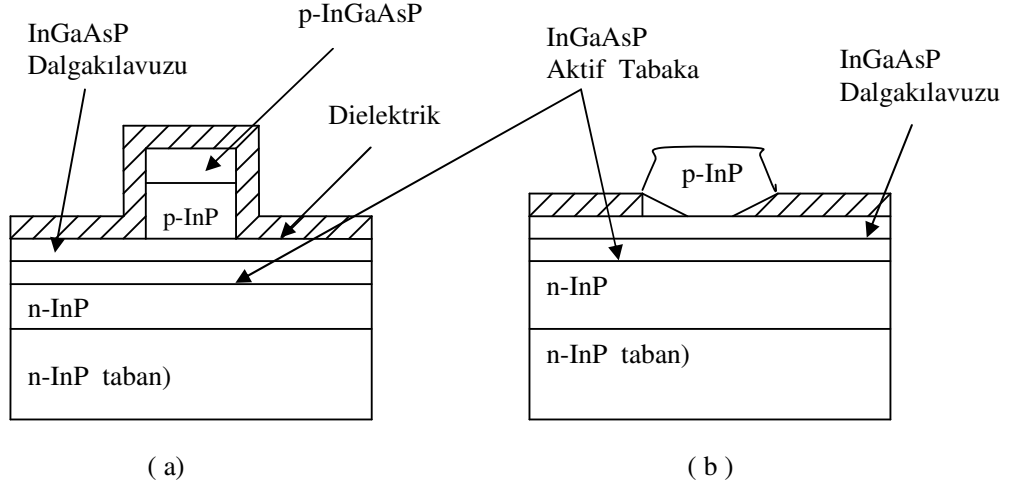
Kazanç kılavuzlu lazerler, indis kılavuzlu lazerlerden daha kolay üretilebilirler. Fakat kazanç kılavuzlu lazerler, indis kılavuzlu lazerlere göre daha yüksek eşik akımları sergilerler. Kazanç kılavuzlu lazerlerin tipik eşik akımları 100–150 mA civarlarındadır. İndis kılavuzlu lazerler için bu değer 10–15 mA dir. Güçlü indis kılavuzlu lazerlerin fabrikasyonu genellikle tekli bir epitaksiyal büyütme veya ikili epitaksiyal büyütmenin herhangi birine gereklilik duyar. Bu işlemi gerçekleştirmek için ise büyük bir dikkat gereklidir.

Daha öncede belirtildiği gibi, kazanç kılavuzlu lazerlerde yanall mod, eklem yüzeyi boyunca optik kazancın dağılımı ile belirlenir. Kazanç kılavuzlu InGaAsP lazerler istenmeyen bazı karakteristiklere sahiptir. Bunlara örnek olarak yüksek eşik akımı ve düşük bir diferansiyel kuantum verimliliği gösterilebilir.

Zayıf indis kılavuzlu lazerlerde eklem yüzeyi boyunca optik mod temel olarak aygıt yapısı ile belirlenir. Bu yapılarla örnek olarak sırt (ridge) dalga kılavuzlu, bumble dalga kılavuzlu, düzlem-konveks kılavuzlu gibi yapılar verilebilir. Genel olarak sırt (ridge) kılavuzlu tip en çok bilinen yapıdır ve zayıf indiks kılavuzlu lazerlere örnek olarak verilebilir. Sırt kılavuzlu yapılarda, sırt civarında dielektriğin kullanımı Şekil 2.9'da gösterildiği gibi akımın p-InP tabaka yayılımını engellemektedir. Sırt bölge altında yanall mod için 10^{-2} ye yakın etkili bir indis basamağı sağlanmakta ve mod esas olarak indis kılavuzlu olmaktadır. Şekil 2.9(a)'da InGaAsP lazerler için Kaminov tarafından kullanılan yapı ve Şekil 2.9(b)'de ise Heteroepitaksal büyütülmüş sırt lazer gösterilmektedir.

Gösterilen sırt kılavuzlu lazerlerin iki tipi arasındaki farklar;

- a)- Değişik kalınlıktaki bir kılavuzlu tabaka ile sağlanan yanall indis basamağı
- b)- Değişik kalınlıktaki bir aktif tabakadan kaynaklanan yanall indis basamağı olarak belirtilebilir.



Şekil 2.9 Sırt kılavuzlu lazerler (a) Kaminov tarafından kullanılan yapı ve (b) Heteroepitaksal büyütülmüş sırt lazer gösterimi (Dutta, Kominov 1994)

Bir sırt kılavuzlu lazer üretmek için kıymık (wafer), standart dielektrik kaplama, fotolitografik ve kaplama teknikleri gibi işlemlerden geçirilir. Düzlemsel epitaksiyel tabakalar LPE, VPE veya MOVPE' den her hangi biri ile başarılı bir şekilde büyütülür. $5\mu\text{m}$ 'ye yakın bir genişlikte bir sırt şekillendirmek için kıymık dalgakılavuzuna kadar dağlanır. $1,1\mu\text{m}$ InGaAsP tabaka bir dağlamayı durdurucu (stop-etch) tabaka gibi davranır. Meydana gelen sırt yalnızca zayıf indis kılavuzlama için gerekli çalışma koşullarını sağlamakla kalmaz, ayrıca akım gömücü dar bir şerit gibi davranır.

Sırt kılavuzlu lazerlerin eşik akımları 40–60 mA aralığındadır. Sırt kılavuzlu lazerler dayanıklılık, yüksek çıkış gücü gibi avantajlarından dolayı kullanım tercihi sunarlar. Bu çalışmada kullanılan lazerler sırt kılavuzlu yarıiletken lazerlerdir.

2.5. Yarıiletken Lazerlerin Rezonatör Tasarımı

Yarıiletken lazerlerin iki tipi mevcuttur; Fabry-Perot (F-P) lazerler ve dalga boyu seçiciliğinin bulunduğu yayılmış geri beslemeli lazerler (Distributed feedback -DFB) ile yayılmış bragg yansıtıcı (Distributed Bragg reflector -DBR) lazer diyotlarıdır.

F-P lazerlerin kırılmış yüzleri yarıiletkene bağı olarak %30-%40 Freshnel yansıma sağlar. Kırılan yüzler aynı zamanda kevitin içinde oluşturulan rezonant modları sağlar. Rezonans için şart, yarım dalga boylarının tam sayısının kevitin sınırları arasında tutulmasıdır.

Bu ifade ise;

$$L = \frac{k\lambda_0}{2n} \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada

L : Kevitin uzunluğu

k : Boylamsal mod sayısı (Dalga sayısı)

λ_0 : Serbest uzaydalga boyu

n : Kevitin kırılma indisi.

Fabry-Perot lazerlerde birçok kevitin modu oluşur. Bu boylamsal modların frekans aralığı optik kevitin uzunluğuna bağlıdır ve genellikle nanometrenin birkaç onda biri mertebesinde dir.

Frekans aralığı şu ifade ile verilir;

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL} \quad (2.5)$$

c ; ışık hızı (boşlukta)

n ; kırılma indisi

L ; kevitin uzunluğu

Boylamsal modlar arasındaki mesafe ($\Delta\lambda$) ise

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2nL} \quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir.

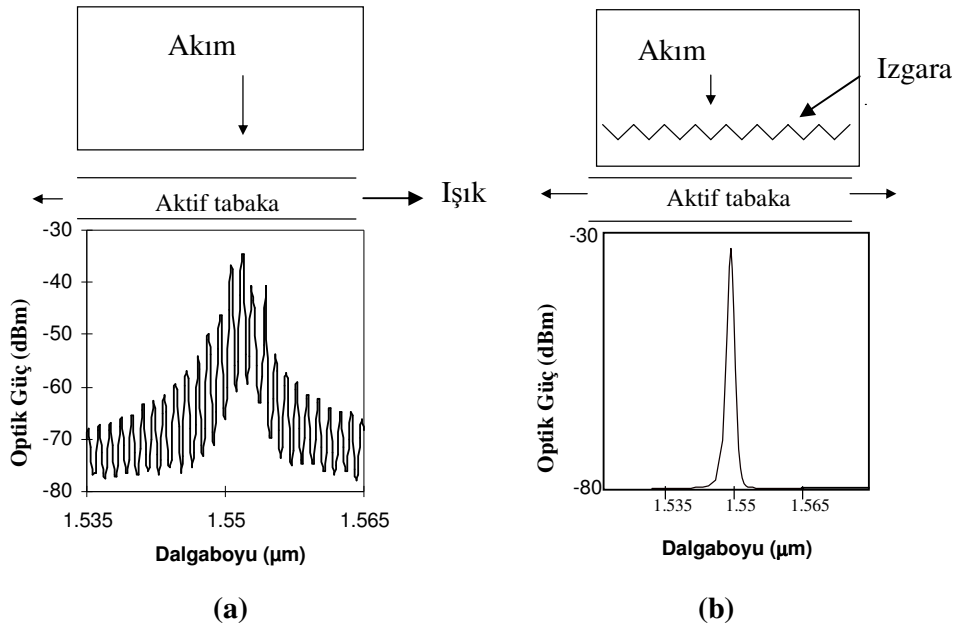
300 μm GaAs lazerler için, 1 nm boylamsal mod aralığı, kazanç spektrumunda onlarca mod oluşmasına neden olmaktadır.

Malzemedeki kırılma indisi ızgaralama sistemi ile tekli boylamsal mod oluşumunu destekleyen yayılım, geri beslemeli lazerlere ilgiyi artırmıştır. Izgaralama, çok dar bir spektrum bölgesinde ışık için bir seçici geribesleme sağlamaktadır. Böylece lazer spektrumu Şekil 2.10(b)'de tanımlandığı gibi tek bir dalga boyunda oluşmaktadır. Yansımaz tabaka, F-P mod salınımın ortadan kaldırılabilmesi için ayna kayıplarını azaltmada kullanılır. Ancak; yüksek hızlı sinyallerle modüle edildikleri zaman lazer kevitinin kırılma indisi değişiminden dolayı DFB lazerler dalga boyunda meydana gelen istenmeyen etkilerden zarar görürler.

DFB lazerlerin fabrikasyon işlemleri F-P fabrikasyon işlemlerinden çok daha karışıktır. Çünkü fabrikasyon, temel lazer yapısının büyütülmesi, bir ızgara yapımı ve üst tabakanın tekrar büyütülmesi gibi işlemler içerir. Optik dalğanın ızgara ile kuvvetli bir şekilde etkileşebilmesi için, ızgaralama aktif bölgeye mümkün olduğu kadar yakın bir şekilde oluşturulmalıdır.

DFB lazerlerin fabrikasyonunda karşılaşılan zorluklardan dolayı maliyeti bir F-P lazerin fabrikasyonundan daha fazladır.

F-P ve DFB yarıiletken lazerlerin karşılaştırılması Şekil 2.10'da verilmiştir. Burada FP ve DFB diyot lazerlerin optik spektrumları gösterilmektedir.



Şekil 2.10 (a) F-P ve (b) DFB lazer diyotların dalgaboyu spektrumları ve yapılarının gösterimi (Çakmak 2000)

F-P ve DFB yapıları arasındaki temel fark, ışımının meydana geldiği yer olan aktif tabakanın tasarımında yatmaktadır.

F-P lazer diyot pompalandığı zaman, kazanç pozitif olmakta ve sonuç olarak kevti kaybının kazançtan daha düşük olması sağlanmaktadır. Bu durumda F-P lazerin çok geniş kazanç bant genişliğinden dolayı kevti içinde bir dizi boylamsal mod oluşmaktadır. Yayılan ışığın spektral şekli, aktif tabakanın kazanç bant genişliği içinde

var olan duran dalgaların frekansı ile belirlenebilir. Feby-Perot kevitini fabrikasyonu kolay olup yarıiletken lazerde kullanılan en basit optik kevitilerden biridir.

DFB lazerlerin aksine, DBR lazer diyotlar Bragg yansıtıcı olarak adlandırılan bir ızgara kullanır. Bölgenin son kısımlarındaki kıvrımlar frekans seçici aynalar olarak davranır ve Bragg yansıtıcı ile geri besleme olayı meydana gelir. Optik kayıplar DBR bölgesi için lazer ışınım dalga boyunda saydam materyal kullanımı ile önlenir. DBR lazerler Bragg dalga boyunda ışınım yaptığında sadece bir tek mod baskındır. Dar çizgi genişliğine sahip tek mod DFB ve DBR lazerler, dalgaboyu bölüşümlü çoğullama (Wavelength Division Multiplex-WDM) ve kohorent dedeksiyon uygulamaları için kullanılabilir.

2.6. Kuantum Çukur (QW) Lazerler

Bu tezde incelenen aygıtların tümü kuantum çukur lazer olduğundan bu bölümde kuantum çukur lazerlerin özet tanımı verilmektedir.

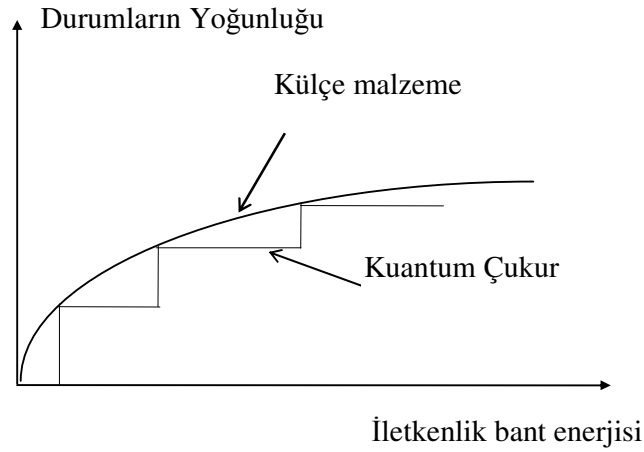
Bir külçe lazerin aktif tabaka kalınlığı birkaç yüz nanometrede iken, kuantum çukur lazerlerde aktif tabaka kalınlığı birkaç nanometre genişliğinde olmaktadır. Kuantum çukur lazerlerde ince bir aktif tabaka taşıyıcı gömülmesini potansiyel çukura kuantum boyutta etkili bir şekilde gerçekleştirir. QW (Quantum Well)'de çukur kalınlığı elektronların de Broglie dalgaboyu (λ_d) civarındadır. Broglie dalgaboyu aşağıda verilmektedir.

$$\lambda_d = \frac{2\pi}{k} = h / p \quad (2.7)$$

k, yayılım sabiti, h Planck sabiti, p elektron momentidir.

Aktif tabaka inceltildiğinde, ekleme dikey yöndeki taşıyıcıların serbest hareketine izin veren enerji seviyeleri daha geniş bir şekilde enerji yayılımı sergiler.

Bir külçe lazerin aktif tabakasında enerji ve durum yoğunluğu arasında bir parabolik ilişki bulunmaktadır. Öte yandan kuantum çukur aktif tabaka durum yoğunluğu bir basamaklı şekil ile karakterize edilebilir. Bu fark Şekil 2.11’de gösterilmiştir.



Şekil 2.11 Bir külçe ve kuantum çukur yarıiletkeninde iletkenlik bantı enerjisine karşın durumların yoğunluğu değişimi (Çakmak 2000)

Bir kuantum çukur lazerde, ışımaya en alt iletim bantının dibi ve valans bantının tepesi arasındaki altband arasında gerçekleşir. Şekil 2.11’de her basamak yeni bir ayrık enerji seviyesini oluşturan yeni bir bantı göstermektedir.

Aktif tabaka kalınlığı ile basamak yüksekliğinin artışı azalır ve hapsedici potansiyel bariyer yükselir. Bu sonuçlar daha yüksek foton enerjisinde elde edilir. Durum yoğunluğundaki kesintiler istenilen birkaç etkiye neden olmaktadır. Bu etkilerin en önemlisi taşıyıcı gömülmesi ile optik kazanç değişiminin daha yüksek olmasıdır.

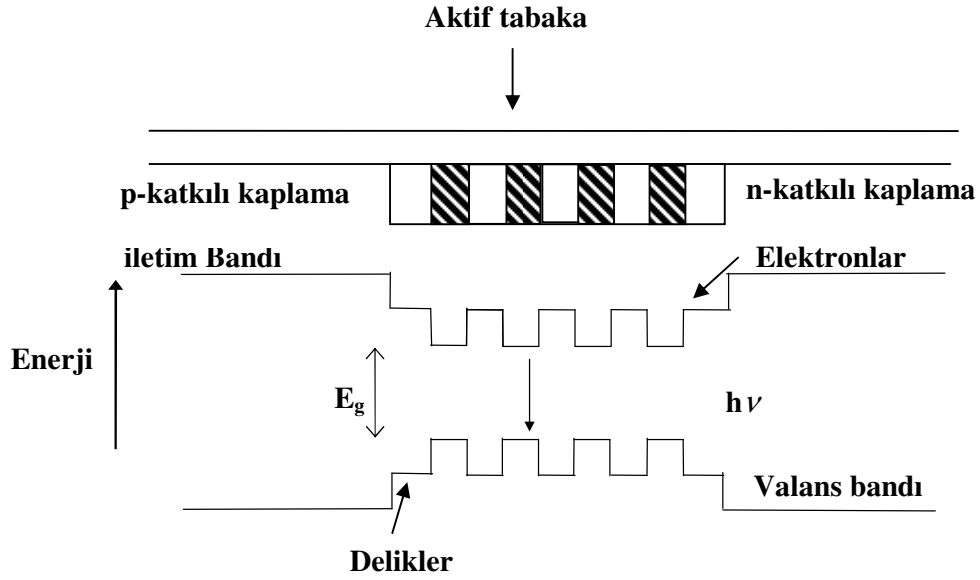
İlave olarak lazerin gücü ile dalga boyunun değişimi ve çizgi kalınlığı iyileştirme faktörü azaltılabilir.

Basamaklarda taşıyıcı konsantrasyonunun artışıdan dolayı, spontane emisyon spektrumu külçe materyalinkinden daha dar olmaktadır.

Külçe aktif tabakaya sahip aygıtlarla karşılaştırıldığında daha yüksek modülasyon bant genişlikleri sağlayan kuantum çukur lazerlerde aynı zamanda daha fazla diferansiyel kazanç sağlanmaktadır. Ancak bununla birlikte kuantum çukur lazerlerde bir enerji altband varlığı daha fazlaysa, kazanç spektral genişliği bir külçe aygıtın sahip olduğu genişliği aşabilmektedir.

Kuantum çukur yarıiletken lazerler, külçe materyallerin sahip olduğu eşik akımlarından çok daha küçük eşik akımlarına sahiptirler. Ayrıca yarıiletken lazerlerin performansı çoklu kuantum çukurların (Multi Quantum Well-MQW) kullanımı ile artırılabilir. Çünkü kuantum etkileri daha büyük hacimli materyallerde gerçekleştirilebilmektedir.

MQW yapılar ile düşük hapsedilme probleminin üstesinden gelmekte ve genellikle daha yüksek çıkış güçleri elde edilebilmektedir. Bir MQW lazerin enerji bant diyagramı Şekil 2.12'de verilmiştir.



Şekil 2.12 4 adet kuantum çukur yapısının enerji bant diyagramı (Çakmak 2000)

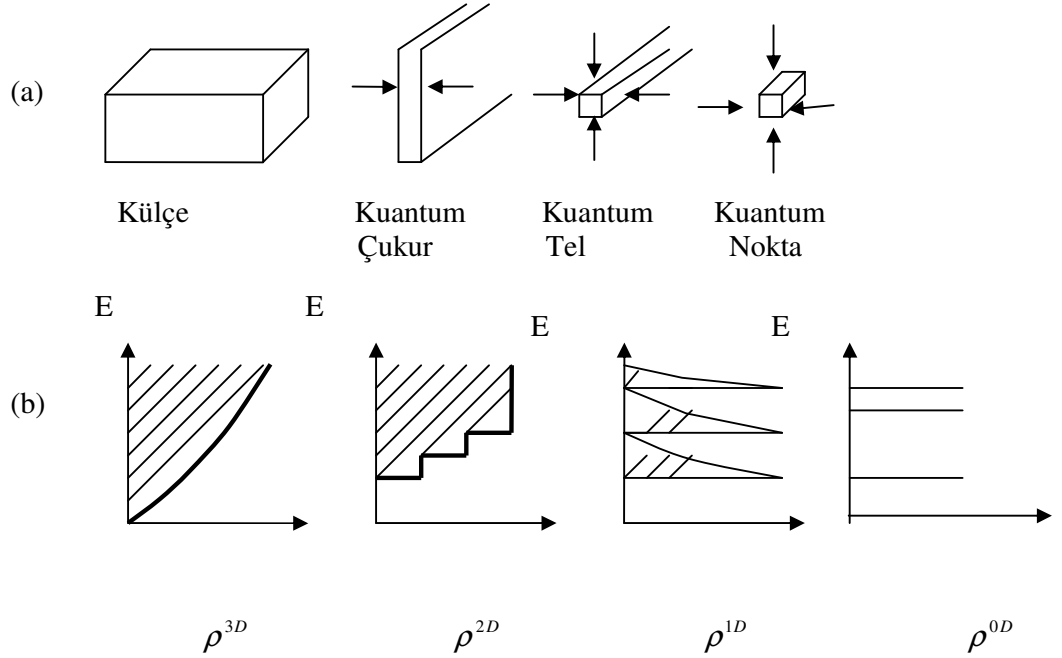
2.7. Kuantum Tel ve Kuantum Nokta Lazerler

Külçe (bulk) materyaller yerine kuantum çukur (QW) materyallerin kullanımı ile elde edilen optiksel nitelikteki gelişme temel olarak kuantum hapsedilme etkisinden kaynaklanmakta olup bu da bir boyutlu yarıiletkenlerin De Broglie dalga boyu ile kıyaslama gerçeğini doğurmuştur. Bunun sonucu olarak kuantum tel ve kuantum nokta olarak adlandırılan iki kuantum hapsedilme işleminin iki veya üç boyutlu olarak De Broglie dalga boyuna kıyaslanması düşünülmüştür.

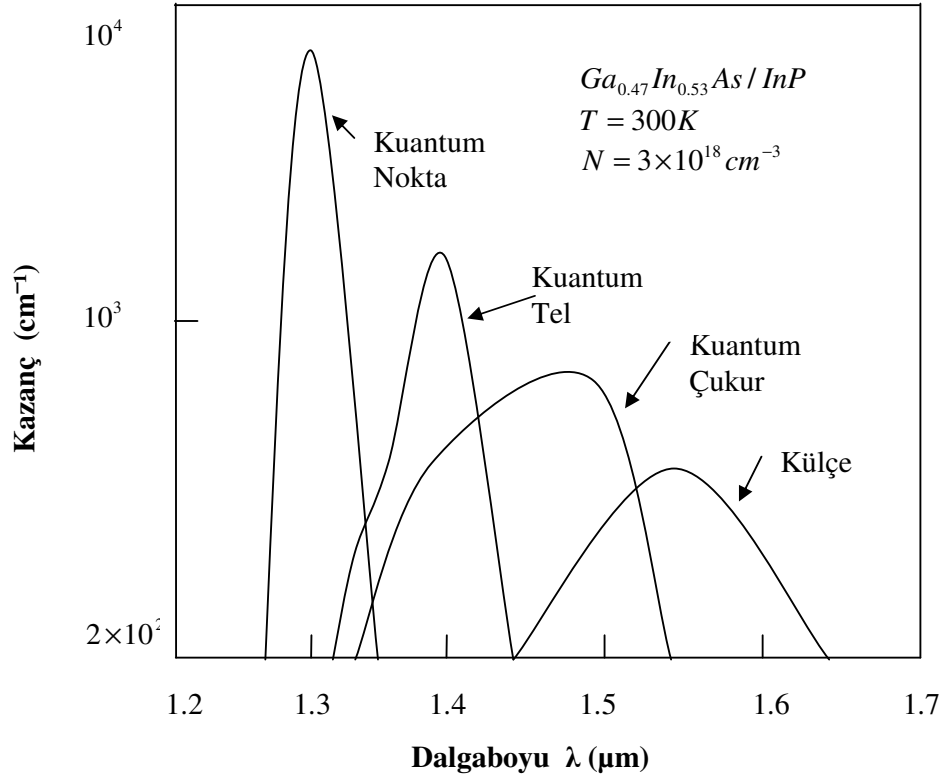
Bu kuantum gömülme yapıları ve külçe materyal arasındaki temel fark durum yoğunluğunun farklı yapılarda olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 2.13 külçe ve kuantum çukur materyaller ile karşılaştırılan kuantum tel ve kuantum nokta için durum yoğunluğunun niteliksel davranışını göstermektedir. Şekil 2.14’de gösterilen grafikte bir $\text{Ga}_{0.47}\text{In}_{0.51}\text{As}/\text{InP}$ yapı için foton enerjisine karşın materyal kazanç gösterilmiştir. Şekilde 10 nm QW, 10 nm x 10 nm kuantum tel ve 10 nm x 10 nm x 10 nm kuantum

nokta için foton enerjisi-materyal kazanç eğrisi aynı elektron enjeksiyonu ($N = 3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) için çizilmiştir.

Hesaplanan yoğunluk; külçe, kuantum çukur ve kuantum tel için aynı değerlerdedir ($N_{tr} = 1.3 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Fakat bunların aksine kuantum nokta için bu değer daha yüksektir ($N_{tr} = 1.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$). Bu durumda Külçe yapıdan kuantum çukur yapıya gidildikçe kazanç artmaktadır ve aynı şekilde kuantum çukurdan kuantum tel yapıya ve kuantum telden de kuantum nokta yapıya gidiş aynı şekilde kazançta artış göstermektedir. Öte yandan, Kazanç bant genişliği kuantum çukur dan kuantum tel yapıya ve kuantum telden kuantum nokta yapıya doğru gidildikçe azalacaktır.



Şekil 2.13 (a) Farklı kuantum yapılar ve (b) Külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta yarıiletkenlerin durum yoğunluklarının gösterimi (Hanna 1998)



Şekil 2.14 $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ bulk (külçe) yarıiletken, $Ga_{0.47}In_{0.51}As/InP$ 10 nm kuantum çukur, 10 nm x 10 nm kuantum tel ve 10 nm x 10 nm x 10 nm kuantum nokta yarıiletken için $N = 3 \times 10^{18} cm^{-3}$ elektron sayısında dalgaboyu yayılımına karşın hesaplanan kazanç faktörü grafiği (Hanna 1998)

Kaliteli optiksel özellikleri bulunan kuantum tel ve kuantum nokta yarıiletkenlerin fabrikasyon aşamalarında teknolojik zorluklar bulunmaktadır. Eğer bu zorluklar aşılırsa, yarıiletken lazer materyaller için daha düşük eşik akımı, daha yüksek diferansiyel kazanç ve daha dar bir bant genişliği elde edilebilecektir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Oran Denklemleri

Bir yarıiletken lazerin statik, dinamik ve spektral karakteristikleri, fotonlar ve elektronlar arasındaki etkileşimi yöneten oran denklemleri ile tanımlanabilir. Diğer bir deyişle, oran denklemleri elektronlar ve fotonlar arasında vuku bulan enerji transfer oranını tanımlar. Bu denklemler, dalga denkleminde elde edilebilir. (3.1) ve (3.2) denklemleri, sırasıyla foton ve elektron oran denklemleridir. Foton oran denklemi şu şekilde yazılabilir;

$$\dot{P} = (G - \gamma)P + R_{sp} = GP - P/\tau_p + R_{sp} \quad (3.1)$$

Bu eşitlikte;

P : Fotonların sayısı

\dot{P} : P 'nin türevi

G : Uyartılmış emisyon kazancı (normalize edilmiş kazanç)

γ : Foton zayıflama oranı, kevti içindeki foton yaşam süresini tanımlamak için ($\gamma=1/\tau_p$ kullanılır)

R_{sp} : Spontane emisyon oranını ifade etmektedir.

(3.1) denklemindeki birinci terim, uyarılmış emisyonu, ikinci terim foton yaşam süresi ile karakterize edilen kaybı ve son terim de spontane emisyon oranını göstermektedir. Elektron oran denklemi ise

$$\dot{N} = I/q - \gamma_e N - GP \quad (3.2)$$

Bu eşitlikte;

N : Elektron sayısını

\dot{N} : N 'nin türevini

I : Akımı

q : Elektron yükünü ($1.6 \times 10^{-19} C$)

N : Elektron sayısını

γ_e : Taşıyıcı rekombinasyon oranını ifade etmektedir.

(3.2) denklemdaki ilk terim, aktif bölgeye pompalanan akım oranını, ikinci terim spontane emisyon oranını ve son terim de uyarılmış emisyon oranını gösterir. Oran denklemlerini tamamlamak için, γ_e , G , R_{sp} terimlerini de ifade etmek gerekmektedir.

Bu terimler aşağıdaki (3.3), (3.4), (3.5)' de belirtilen denklemler ile ifade edilebilir.

$$\gamma_e = A_{nr} + Bn + Cn^2 \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte;

γ_e : Taşıyıcı rekombinasyon oranı

A_{nr} : Uyarılmamış rekombinasyon oranı

B : Uyarılmış rekombinasyon katsayısı

C : Auger rekombinasyon katsayısı ve n taşıyıcı yoğunluğunu göstermektedir.

Net kazanç ise

$$G = \Gamma ca(N/V - n_o) / \mu_g \quad (3.4)$$

Bu eşitlikte;

Γ : Mod hapsedme faktörü

c : ışık hızı

a : kazanç sabiti

V : lazerin aktif hacmi

n_o : taşıyıcı yoğunluğu

μ_g : grup kırılma indisidir.

R_{sp} , spontane emisyon oranı, şu formülle verilebilir.

$$R_{sp} = \beta_{sp} N^2 B / V \quad (3.5)$$

Burada B , uyarılmış rekombinasyon katsayısını ifade etmektedir.

3.2. Bir Yarıiletken Lazerin Sürekli Durum Karakteristikleri

Sürekli durum, geçici durum sona erdikten sonra oluşmaktadır. Aynı elektron ve foton oran denklemleri (3.1) ve (3.2) sürekli durum için de kullanılabilir. İki sürekli durum özelliği, L-I (Işık-Akım) ve boylamsal mod spektrumu olup bunlar lazer performansını karakterize etmekte çok önemlidir.

Sürekli durum çözümleri, elektron ve foton oran denklemlerinin türevlerini sıfıra eşitleyerek elde edilir.

\dot{P} ve \dot{N} 'i sıfırlarsak

$$0 = (G - \gamma)P + R_{sp} \Rightarrow P = R_{sp} / (\gamma - G) \quad (3.6)$$

$$0 = I/q - \gamma_e N - GP \Rightarrow I/q = \gamma_e N + GP \quad (3.7)$$

Denklemleri elde edilir.

$L - I$ Karakteristiğini elde etmek için, (3.3), (3.4), (3.5) ve (3.6) eşitlikleri kullanılarak, denklem (3.7) aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$I/q = (A_{nr} + BN/V + CN^2/V^2)N + [(\Gamma ca(N/V - n_o) / \mu_g)(\beta_{sp} N^2 B/V) / (\tau_p^{-1} - \Gamma ca(N/V - n_o) / \mu_g)] \quad (3.8)$$

Akım (I) ya karşılık (P) foton popülasyonu karakteristiğini bulmak için, akım ve diğer bilinen parametreler cinsinden aşağıdaki denklem elde edilebilir.

$$P = [\beta_{sp} [I/q - \Gamma ca(N/V - n_o)P]^2 B / (\gamma_e^2 V)] / [\tau_p^{-1} - \Gamma ca(N/V - n_o) / \mu_g] \quad (3.9)$$

Sonuç olarak, yarıiletken lazerin çıkış gücü P_{out} aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$P_{out} = hc v_g \alpha_m P / 2 \quad (3.10)$$

Burada;

h : Planck sabiti ($6.626 \times 10^{-34} Js$)

c : Vakum içindeki ışık hızı ($3 \times 10^8 m/s$)

v_g : Grup hızı

α_m : Ayna kayıpları

P : Denklem (3.9)'da elde edilen foton popülasyonudur.

Bir yarıiletken lazerin sürekli durum karakteristiklerini modellemek için, yukarıdaki denklemler kullanılır.

3.3. LaserMOD Ticari Yazılımı ile Yarıiletken Lazer Simülasyonu

LaserMod optik, elektronik ve yarıiletken lazerlerin çalışma karakteristiklerinin simülasyonu için geliştirilmiş bir fotonik tasarım yazılımıdır. LaserMOD; materyal kaynakları, çok boyutlu fiziksel modelleme, açıklayıcı örnekler, online yardım menüleri gibi özelliklerini simülasyon ve analiz kabiliyeti ile bir bütün olarak tamamlayan bir niteliğe sahiptir.

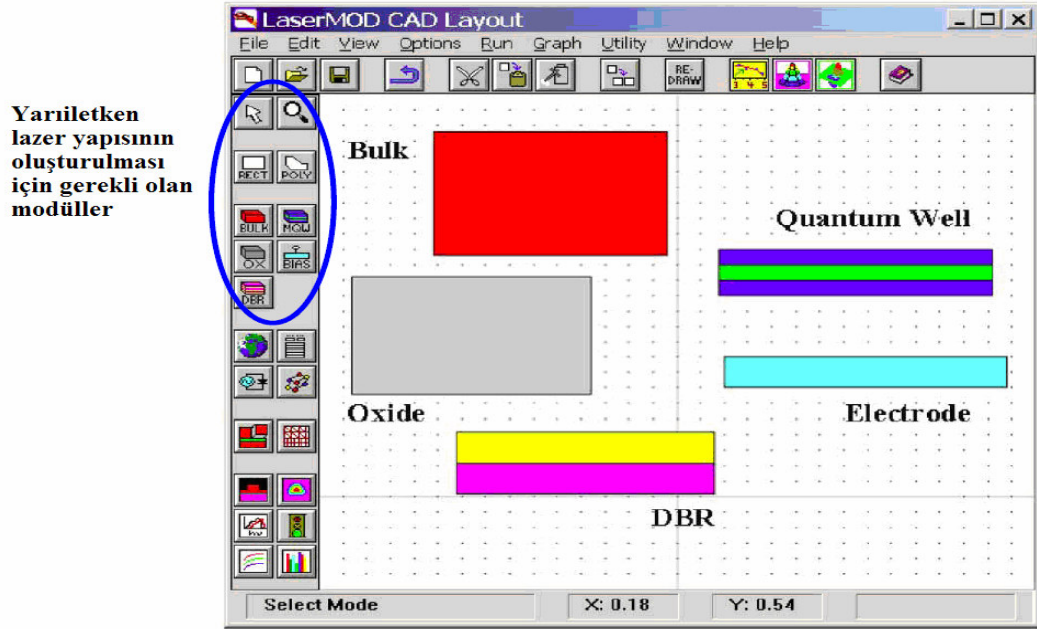
Tasarım uygulama içeriği iki şekilde gerçekleştirilmektedir.

1-Kenar yayımlı lazerler, örnek olarak Fabry-Perot ve DFB tip lazerler verilebilir.

2-VCSEL (vertical-cavity surface-emitting laser), Dikey Oluk Yüzey Yayımlı Lazerler

3.3.1.Yazılım tanıtımı

LaserMOD CAD, geometriksel parametrik tanımlamaları ve materyal parametreleri tam olarak desteklediği için kullanım açısından kolaylıklar sağlamaktadır. Hesaplama modüllerinde kullanıcının isteğine göre yapılan herhangi bir değişiklik, tasarımın değişik bakış açıları eşliğinde analizinin yapılmasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca yapılan çalışmaya paralel lazer simülasyonu üzerinde değişiklikler yapılarak kişisel gözlemler gerçekleştirilmektedir. Şekil 3.1’de LaserMOD CAD programı çizim ortamı gösterilmiştir.

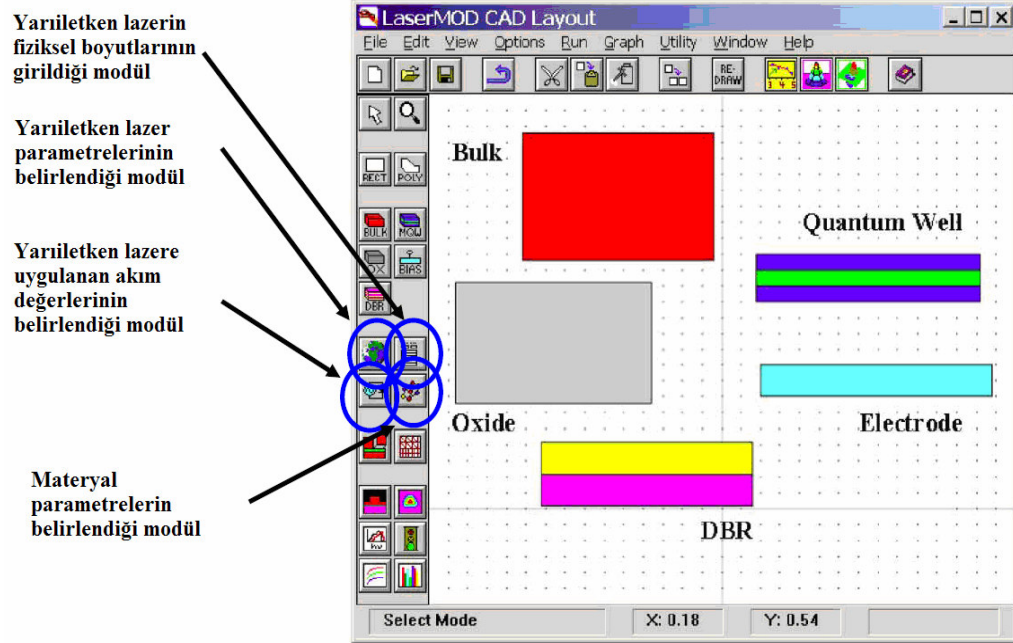


Şekil 3.1 LaserMOD CAD programı çizim ortamı

Çizim ortamının içerdiği özellikler:

- Çoklu kuantum çukuru (MQW), Külçe (Bulk) veya DBR (Distributed Bragg Reflector) gibi yapıların özellikleri ve yapıda yer alacağı tabaka önceden tanımlanabilir. Tabakaların birbirleri ile olan uyumu hızlı bir şekilde sağlanabilir.
- Geometrik boyutlar ve materyal özellikler, simülasyon için global veya bölge içinde lokal olarak tanımlanan aritmetik ifadeler veya değişkenler kullanılarak karakterize edilebilir.
- Katkılama veya materyal bileşenler tanımlanabilir ve profil tanımı gerçekleştirilebilir.
- Tasarımı gerçekleştirilecek yapıların birbirleri ile birleşimini sağlayan ağ yapısı bölgesel ve global parametre ayarları ile kontrol edilebilir.

Şekil 3.2’de LaserMOD CAD programı çizim ortamında yer alan modüller açıklanmış olarak gösterilmiştir.



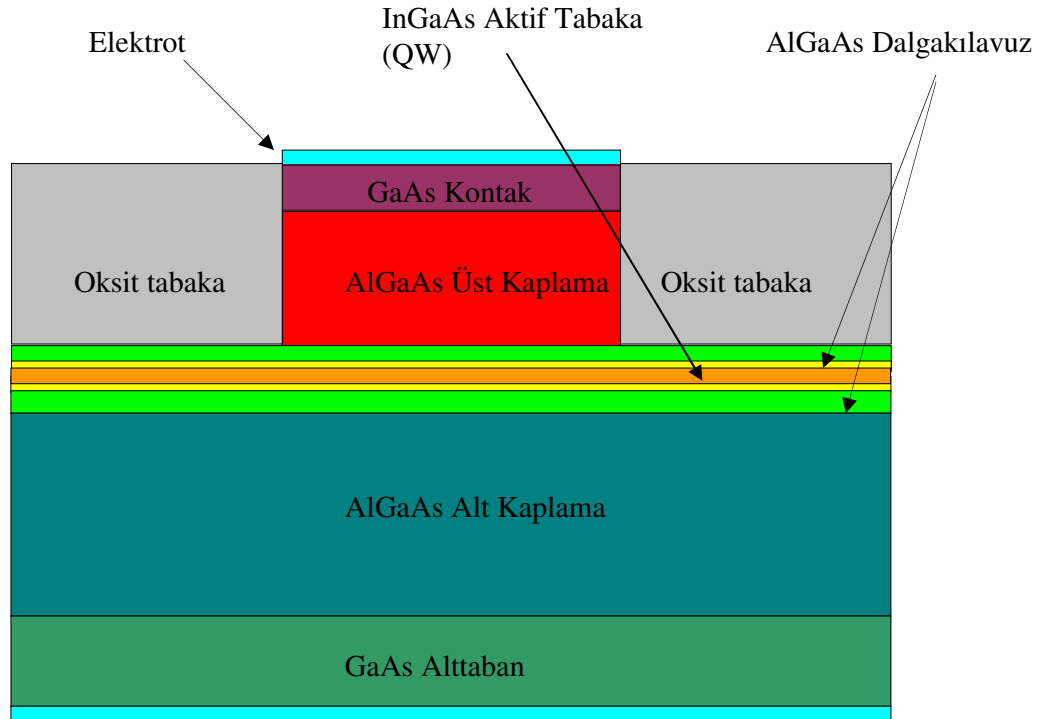
Şekil 3.2 LaserMOD CAD programı modül ortamı

- Mod hesaplama modülü, oluşturulan yapının optik özelliklerini tasarlama açısından kullanıcıya yardımcı olmaktadır.
- Kazanç hesaplama modülü, aktif tabakaların (Çoklu kuantum çukurları) tasarımını kolaylaştırmak için ilave edilmiştir.
- Kutuplama (bias) tablosunda belirtilen değerler kullanılarak simülasyonu gerçekleştirilen lazer, uygulanan kutuplama değerlerinde elde edilen sonuçların karşılaştırılmasında kullanıcıya yardımcı olmaktadır.

- Gerçekleştirilen simülasyonun sonuçları grafiksel olarak ekran penceresinde gözlemlenebilir.

3.3.2. Modelin oluşturulması

Modellemenin sağlıklı yapılabilmesi ve karakteristiklerin elde edilebilmesi için modellenmesi gerçekleştirilecek lazerin tabaka yapısının LaserMOD simülasyon programında çizilerek yapının oluşturulması gerekmektedir. Yapı oluşturulduktan sonra lazer simülasyonu gerçekleştirilerek L-I-V, yakın ve uzak alan karakteristikleri, spektrum analizi gibi özellikler incelenebilmektedir. Şekil 3.3’de sırt kılavuzlu yarıiletken lazerin LaserMOD simülasyon programındaki çizimi gösterilmiştir. Verilen sırt kılavuzlu yarıiletken yapıda sırt genişliği 20 μm genişliğindedir. Sırt kılavuz dağlama ile şekillendirilmiştir.



Şekil 3.3 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin LaserMOD çizimi

3.3.3.Simülasyon teknikleri

Simülasyon paket programı Illinois Üniversitesinde geliştirilen Minilase-II programı temel alınarak gerçekleştirilmiştir. Minilase-II programı ile karşılaştırıldığında bu yazılımda oran denklemleri daha basit şekilde ele alınmış olup, elektro-termal geçiş optiksel dalga yayılım ve taşıyıcı-foton etkileşimleri daha kolay çözülebilmektedir. Simülasyonlar, cw performans analizi için sürekli durum çözümleri ve sistem performans analizi için geçici durum çözümleri sağlayabilir.

Simülasyon aşağıda belirtilen özellikleri içermektedir.

- FEM, Transfer Matris Metodu, Işık Yayılım Metodu ve FDTD gibi optiksel mod çözücü gibi çeşitli simülasyon yapıları içermektedir.
- Taşıyıcı hareketliliği, uyartılmış ve uyartılmamış rekombinasyon, harmonik yayılım, kuantum doğrulama ve diğer etkiler için modellerin oluşturulması sağlanmaktadır.
- Taşıyıcı-taşıyıcı, taşıyıcı-foton etkileşimi ile taşıyıcı hapsedilmesinin sağlanması için aktif bölgedeki kuantum çukurlar için kuantum mekaniksel modellerin geliştirilmesi mümkün olmaktadır.
- Yük dağılımı, materyal kazanç, 8x8 KP band yapısı hesaplarını temel alan durum yoğunlukları için Schrödinger denklem çözümleri de mevcuttur. Kazanç ifadesi, kendiliğinden emisyon ve yansıma indis bilgisi, oluşturulacak kazanç teorisinin elde edilmesinde yararlanılacak ana bileşenlerdir. Bu kazanç bilgisi için oluşturulan ara yüz aynı zamanda diğer harici modellerin veya ölçülen bilgilerin kullanımına olanak sağlamaktadır.

LaserMOD kullanıcıya üretim öncesi gözlemlenebilirlik kabiliyeti sağlayan bir tamamlayıcı ara yüz görevi görmektedir. Gözlemlenebilirlik kabiliyeti ile IV, LI, taşıyıcıların uzaysal

dağılımı, tipik kazanç spektrumu, enerji bantları ve diğer bir çok karakteristiğın hızlı bir şekilde görüntülenmesine müsaade eden standart grafik listeleri sunulmaktadır. Kullanıcının tercihine bağılı olarak grafik özellikleri için bütün simülasyon bilgilerine erişim sağlanabilmektedir. Grafikte değışikliklerin yapılabilmesi, kullanıcıya yeni bir bakış açısı kazandırmakta ve grafiklerin tekrar uzaysal çözümünün elde edilmesine müsaade etmektedir.

4. ARAŞTIRMA ve BULGULAR

4.1. InGaAs/GaAs Yarıiletken Lazerin Modellenmesi

Bu bölümde, çalışmamızda kullandığımız iki kuantum çukurlu sırt kılavuzlu bir InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin MATLAB ve LaserMOD simülasyon programı kullanarak modellenmesi gerçekleştirilecektir. Modellemesi gerçekleştirilecek olan lazerin materyal yapısı ve tabaka özellikleri aşağıda açıklanmıştır.

4.1.1. Materyal yapı

Si katkılı GaAs alt taban üzerine epitaksiyal tabakalar büyütülmüştür. Alt taban üzerine yerleştirilen tabakalar: 1.5 µm kalınlığında n- tipi alt koruyucu tabaka, 226 nm dalga kılavuzu, 1.5 µm kalınlığında p- tipi üst koruyucu tabaka ve son olarak 0.2 µm kalınlığında $9.8 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ Zn katkılı GaAs kontak tabaka. Aktif tabaka ise 2 tane 0.008 µm kalınlığında InGaAs kuantum çukuru ve üç adet 0.01 µm kalınlığında bariyerlerle çevrilmiştir. Yapıda bariyer kullanmak suretiyle, elektron girişimi (interference) ile taşıyıcıların aktif tabakanın dışına (yani p ya da n tarafına) geçişleri önlenmiştir. Kuantum çukurlar her iki yönden 0.09 µm kalınlığında basamak indisli bir tabaka ile çevrelenmiştir.

Çizelge 4.1'de modellenmesi gerçekleştirilen InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin tabaka kalınlığı, materyal sıralaması ve katkılama oranları gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin tabaka yapısı

| Materyal | Tabaka | Kalınlık | Katkılama |
|-------------------------|--------------|---------------|-------------------------|
| GaAs | Kontak | 0.2 μ m | 9.8*10 ¹⁸ Zn |
| Al _{0.35} GaAs | Kaplama | 1.5 μ m | 1.2*10 ¹⁸ C |
| AlGaAs- Grade | Dalgakılavuz | 0.09 μ m | Katkısız |
| GaAs | Bariyer | 0.01 μ m | Katkısız |
| InGaAs QW | Aktif tabaka | 0.008 μ m | Katkısız |
| GaAs | Bariyer | 0.01 μ m | Katkısız |
| InGaAs QW | Aktif tabaka | 0.008 μ m | Katkısız |
| GaAs | Bariyer | 0.01 μ m | Katkısız |
| AlGaAs- Grade | Dalgakılavuz | 0.09 μ m | Katkısız |
| Al _{0.35} GaAs | Kaplama | 1.5 μ m | 7.5*10 ¹⁷ Si |
| GaAs | Alttaban | 0.5 μ m | 1.5*10 ¹⁸ Si |

4.2. Yarıiletken Lazerin MATLAB ile Modellenmesi

Bir önceki bölümde verilen foton ve elektron oran denklemleri kullanılarak elde edilen (3.8), (3.9), (3.10) denklemleri ile modelleme yapılacaktır. MATLAB’de yazdığımız program ile InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin modellenmesi gerçekleştirilecektir. Modellemenin sağlıklı yapılması için öncelikle oran denklemleri kullanılarak elde edilen eşitliklerde parametre değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. Çizelge 4.2’de gerekli parametre ve büyüklükler verilmektedir.

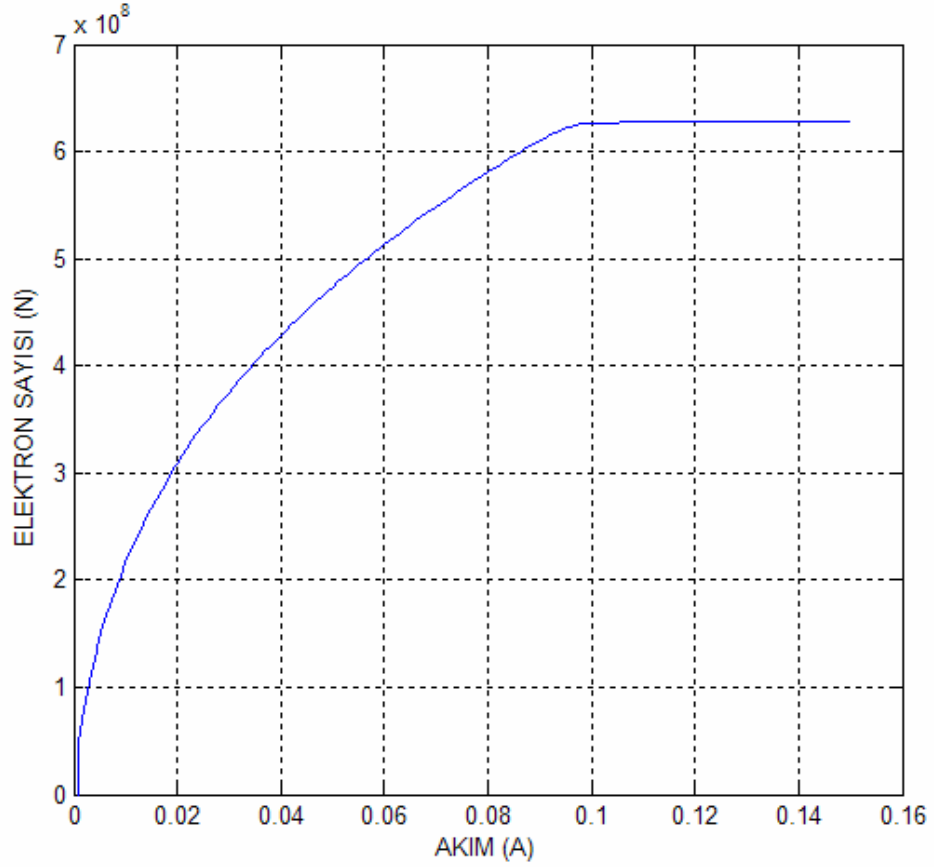
Çizelge 4.2 Tipik bir çoklu hetero yapılı lazer için sabitler ve lazer parametreleri

| PARAMETRELER | SEMBOL | DEĞER |
|----------------------------------|----------------|--|
| Işık Hızı | c | 3×10^8 m/s |
| Elektron yükü | q | 1.6×10^{-19} C |
| Spontane emisyon faktörü | β_{sp} | 10^{-3} |
| Keviti uzunluğu | L | 500 μm |
| Aktif bölge genişliği | w | 20 μm |
| Aktif tabaka kalınlığı | d | 0.016 μm |
| Hapsetme faktörü | Γ | 0.3 |
| Efektif mod indisi | $\bar{\mu}$ | 3.4 |
| Grup kırılma indisi | μ_g | 4 |
| Enine gömülme faktörü | β_c | 5 |
| Ayna kaybı | α_m | 45 cm^{-1} |
| Dahili kayıplar | α_{int} | 40 cm^{-1} |
| Kazanç sabiti | a | $2.5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$ |
| Taşıyıcı yoğunluğu | n_o | 10^{18}cm^{-3} |
| Uyartılmamış rekombinasyon oranı | A_{nr} | 10^8s^{-1} |
| Uyartılmış rekombinasyon oranı | B | $10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$ |
| Auger rekombinasyon katsayısı | C | $3 \times 10^{-29} \text{cm}^6/\text{s}$ |
| Eşik akım taşıyıcı popülasyonu | N_{th} | 2.14×10^8 |
| Taşıyıcı ömrü | τ_e | 2.2 ns |
| Foton yaşam süresi | τ_p | 1.6 ps |
| Dalgaboyu | λ | 980 nm |

4.2.1. Elektron sayısı -akım (N-I) karakteristiği

N-I modellemesi oran denklemleri ile (Lazer, sürekli durumda çalıştığı için) MATLAB de elde edildi. Akım, lazere uygulandığı zaman ışık çıkışından önce bir gecikme oluşur ve elektron konsantrasyonu bu süre zarfında artış gösterir. Gecikme zamanından sonra P(foton sayısı) ve Pout (çıkış gücü) artarken, N (elektron sayısı) sabit kalır.

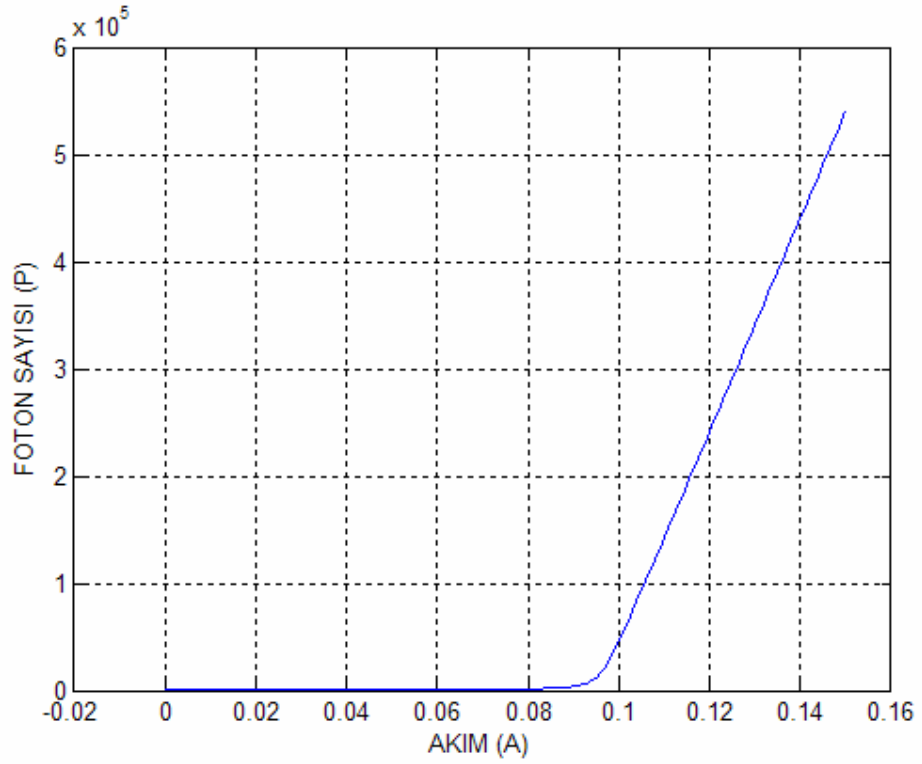
Gecikme zamanı göstermektedir ki, taşıyıcı konsantrasyonu eşik değerini (N_{th}) aşana kadar uyartılmış emisyon oluşmaz. Gecikmeden sonra, lazer ışık çıkışı başlar. Bu karakteristik, eşik akımı 0.1 A'e ulaşana kadar sabit bir şekilde (N) elektron sayısının arttığını ve eşik akımından sonra hemen hemen sabit kaldığını göstermektedir. N değeri eşik akımı yoğunluğuna bağlı olarak hesaplanabilir.



Şekil 4.1 Sürekli durum modunda N-I (Elektron sayısı-Akım) karakteristiği

4.2.2. Foton sayısı -akım (P-I) karakteristiği

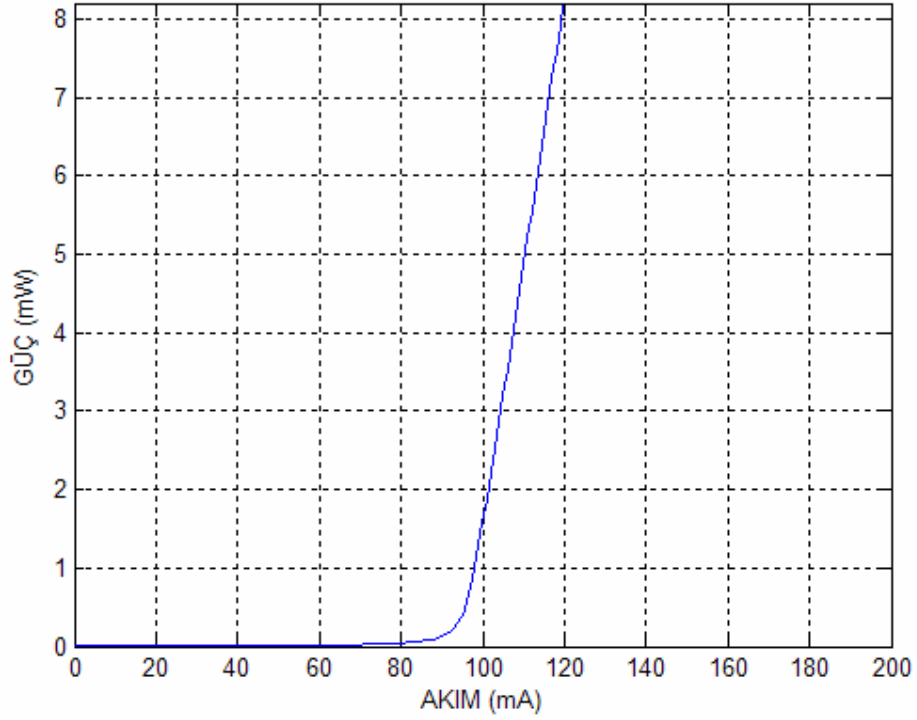
P-I modellemesi sürekli durumda MATLAB’de çözüldü. Eşik akımından sonra lazer çıkışı başlamakta ve foton sayısında artış akımla doğru orantılı olarak devam etmektedir. Lazer gecikme süresi sonrası sürekli duruma ulaşır.



Şekil 4.2 Sürekli durum modunda P-I (Foton sayısı-Akım) karakteristiği

4.2.3. Optik güç -akım (L-I) karakteristiği

L-I modellemesi, lazer sürekli durumda (cw) çalışıyor iken MATLAB'de çözüldü. L-I çıkışı, kazancın kaybı yendiği noktada başlayacaktır. Eşik akımı (I_{th}) sonrası lazer çıkışı akımla hemen hemen lineer olarak artar. Aktif bölgeye enjekte edilen tüm elektron ve delikler uyarılmış emisyon ile rekombine olduğu zaman dahili verimlilik %100 yaklaşır.



Şekil 4.3 Sürekli durum modunda L-I (Işık-Akım) karakteristiği

4.3. Yarıiletken Lazerin LaserMOD ile Modellenmesi

Bu bölümde InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin LaserMOD simülasyon programı kullanarak modellenmesi gerçekleştirilecektir. Materyal yapısı verilen lazer modeli LaserMOD simülasyon ekranında çizilecek ve parametre değerleri bir önceki MATLAB program tabanlı modellemedeki parametreler ile aynı değerde alınacaktır.

4.3.1.Diferansiyel kuantum verimi hesabı

Diferansiyel kuantum verimi çıkan fotonların (optik güç) giren elektronlara (akım) oranıdır. Denklem 4.1’de diferansiyel kuantum veriminin nasıl hesaplanacağı belirtilmiştir. Kuantum verim hesabı, optik gücün değişiminin akım değişimine oranının elektron yükü (q) ile çarpılıp foton enerjisine ($h\nu$) bölünmesi ile elde edilir. Bu denklemde kendiliğinden salınımın çok küçük olan etkisi hesaba katılmamaktadır.

Diferansiyel kuantum verimi

$$\eta_d = \frac{q}{h\nu} \cdot \frac{\Delta P}{\Delta I} \quad (4.1)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4.2)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.

Bu eşitliklerde

h : Planck sabiti

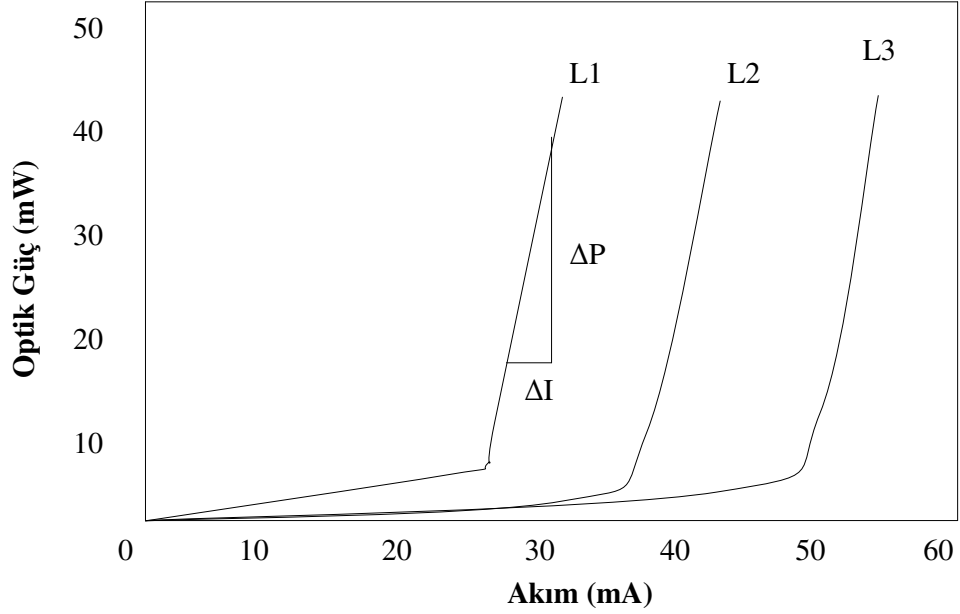
q : elektron yükü

ν : foton frekansı

c : ışık hızı

λ : dalgaboyu

Şekil 4.4 de değişik kevit uzunlukları için elde edilen L-I karakteristikleri gösterilmektedir.

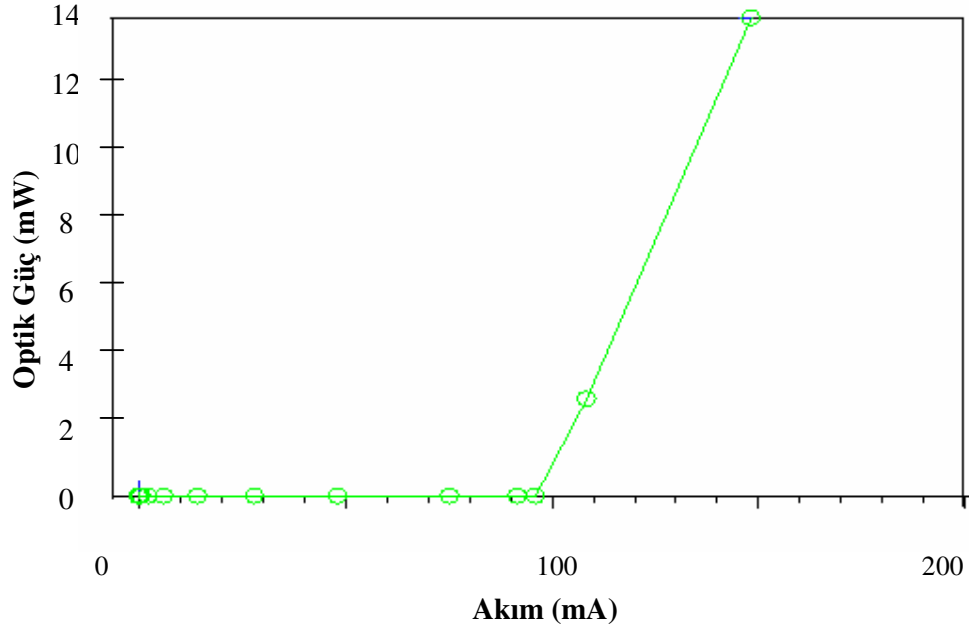


Şekil 4.4 Yarıiletken bir lazerin değişik kevit uzunluklarında Akım-Güç eğrileri

Şekil 4.4'den de görüldüğü gibi kevit uzunluğu arttıkça eşik akımı da artmaktadır.

4.3.2. Optik güç –akım (L-I) Karakteristiği

Işık çıkışı (optik güç) ile akım arasındaki ilişki diyot lazerinin temel karakteristiğidir. Bunu ölçerek eşik akımını, eşik akım yoğunluğunu ve türevsel kuantum verimini belirleyebiliriz. Akım-voltaj ve akım-optik güç ölçümleri LaserMOD simülasyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Sürekli durum altında lazerin L-I karakteristiğini ölçmek için lazere DC akım uygulanmaktadır. Şekil 4.5'de sürekli durum altında LaserMOD'da elde edilen lazerin L-I karakteristiği gösterilmektedir.



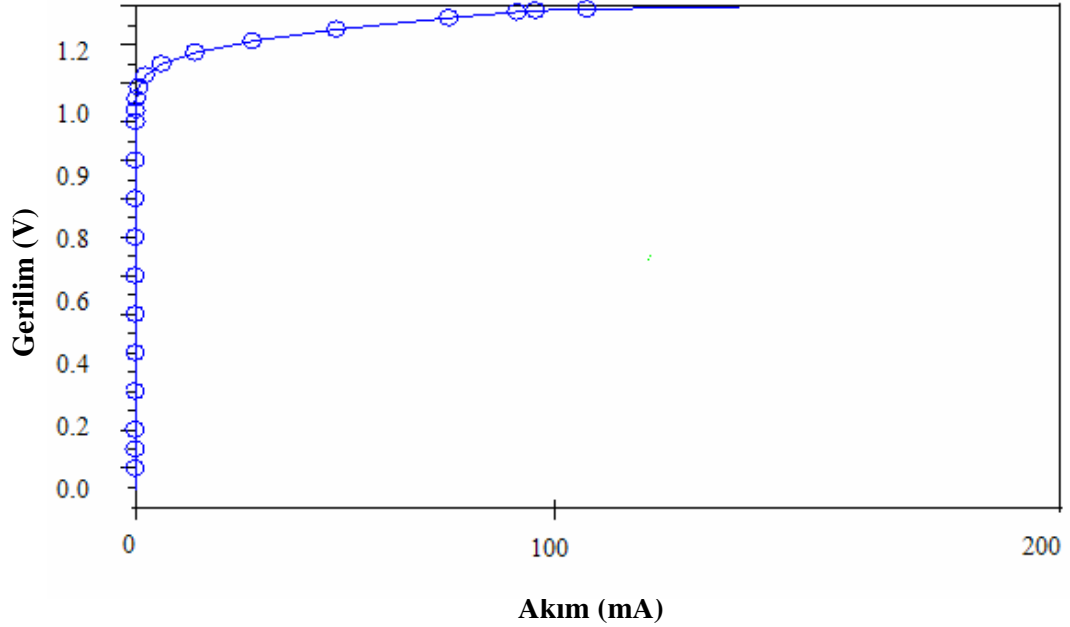
Şekil 4.5 Yarıiletken lazerin optik güç-akım eğrisi

Diyot lazerinde küçük akımlar için sadece kendiliğinden salınım meydana gelir. Akım arttıkça, ortamın kazancı artar ve uyarılmış salınım kendiliğinden salınıma geçer. Lazer olayının başlangıcı ışık çıktısındaki ani bir artışla kendini belli eder. Bundan sonrada ışık çıkışıyla akım arasında doğrusal bir ilişki vardır. Lazer olayının başladığı akıma eşik akımı denir. Şekil 4.5’de sürekli durum altında edilen L-I grafiğinde eşik akımı $I_{th} = 98 \text{ mA}$ dir.

Diferansiyel kuantum verim hesabı yapıldığında (4.1) ve (4.2) eşitlikleri kullanılır. Bu eşitliklerde değerler yerlerine yazıldığında, diferansiyel kuantum verimliliği $\eta_d = 0.29$ olarak bulunur. Lazerin her iki yönde ışığa yaptığı göz önünde bulundurulduğunda lazerimizin %58 verimde çalıştığını söyleyebiliriz.

4.3.3. Akım-gerilim (I-V) karakteristiği

Lazerin akım-gerilim özellikleri ve seri direnci belirlenerek aygıtın elektronik özellikleri belirlenebilir. Üretim kalitesi iyi olan lazerlerin, p-n ekleminden dolayı tipik diyot akım-gerilim özelliği göstermeleri beklenir. Lazer diyotlarda önemli bir parametre olan seri direnç, gerilim değişikliğini akım değişikliğine bölerek bulunur. Şekil 4.6'da lazer diyotlarımızın akım-gerilim özellikleri gösterilmektedir. Yüksek seri direnç ısınmaya ve lazer frekansında değişime sebep olur. Bundan dolayı yarıiletken lazerlerde kullanılması en uygun olan direnç literatürle uyum içinde olan, 6 – 23 ohm arasında seri dirençlerdir.



Şekil 4.6 Yarıiletken lazerin akım-voltaj eğrisi

Şekil 4.6'da yarıiletken lazerimizin akım-gerilim grafiğinden seridirenç $R_s = 5 \Omega$ olarak hesaplanmıştır.

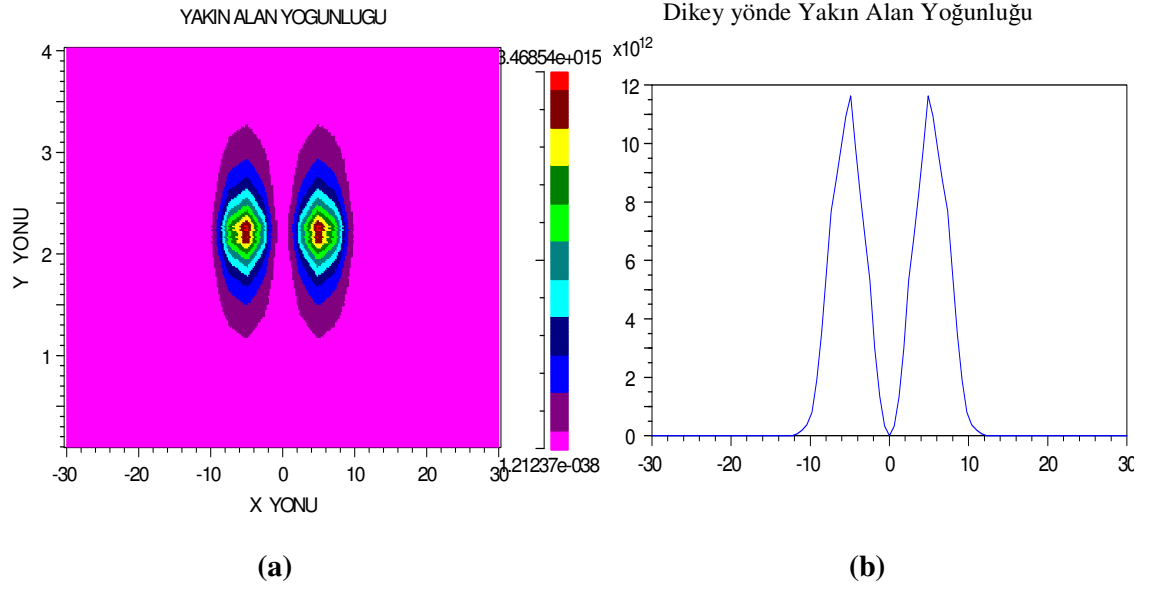
4.3.4. Spektrum, yakın ve uzak alan karakteristikleri

Bir yarıiletken lazer, ışığı eliptik şekle sahip dar bir ışık şeklinde yayar. Lazer yüzüne (facet) yakın yayılan ışığın uzaysal yoğunluk dağılımı yakın alan (near field) olarak bilinir. Eklem yüzeyine dik olan yakın alan, çok eklemlilerde kullanılan değişik tabakaların bileşimlerine ve kalınlığına bağlıdır. Açısal yoğunluk dağılımının lazer yüzeyine uzak bir mesafede yayılması ise uzak alan (far field) olarak ifade edilmektedir. Her iki yakın ve uzak alan dağılımları, lazerleri karakterize etmek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Eklem yüzeyine dikey yönde tek pikli yakın ve uzak alan dağılımları sadece temel enine modu destekler. Aktif tabaka ve dalga kılavuzu yeterli derecede dar değil ise, birkaç uzaysal mod lazer içinde yayılabilir. Açısal sapma aktif tabaka kalınlığının bir fonksiyonudur ve çoklu eklemlerde kırılma indis basamağının bir büyüklüğüdür.

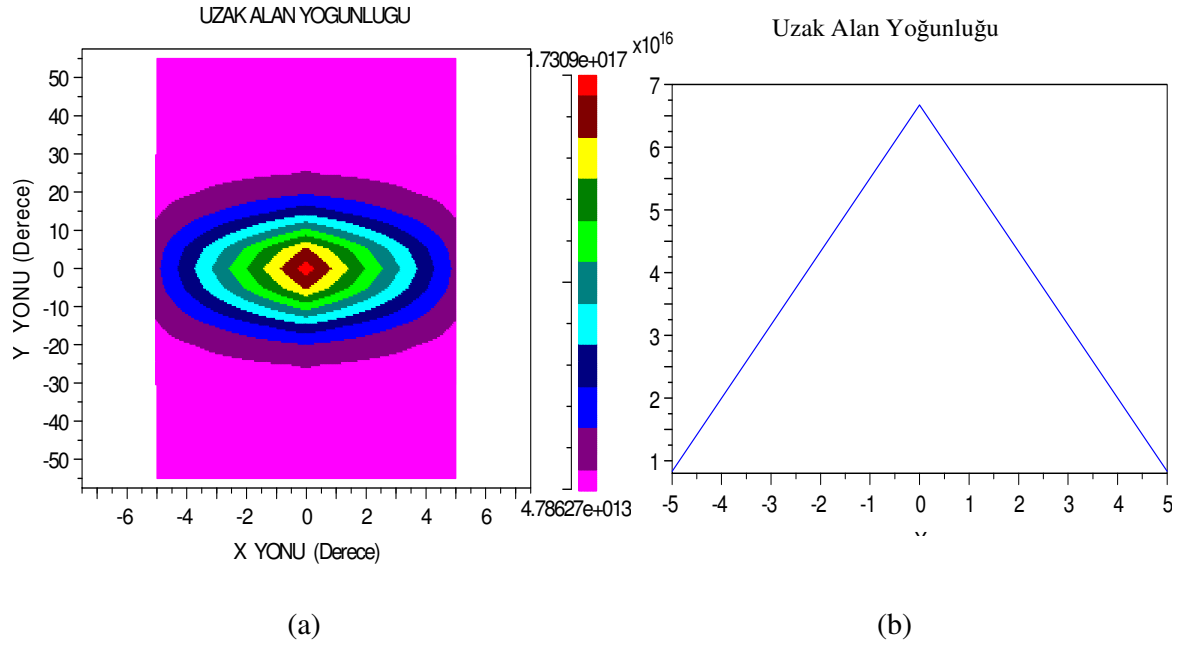
Yakın alanda lazer diyot yayılımının optiksel alan içinde uzaysal değişimleri incelenir. Yakın alan genişliği kamera üzerinde lazerin kendiliğinden yayılım görüntüsü ile kalibre edilmektedir. Yakın alan genişliği idealde aygıtın şerit genişliğine eşittir.

LaserMOD simülasyon programında yapılan modelleme sonucunda yakın ve uzak alan yoğunlukları Şekil 4.7 ve Şekil 4.8' da verilmiştir.



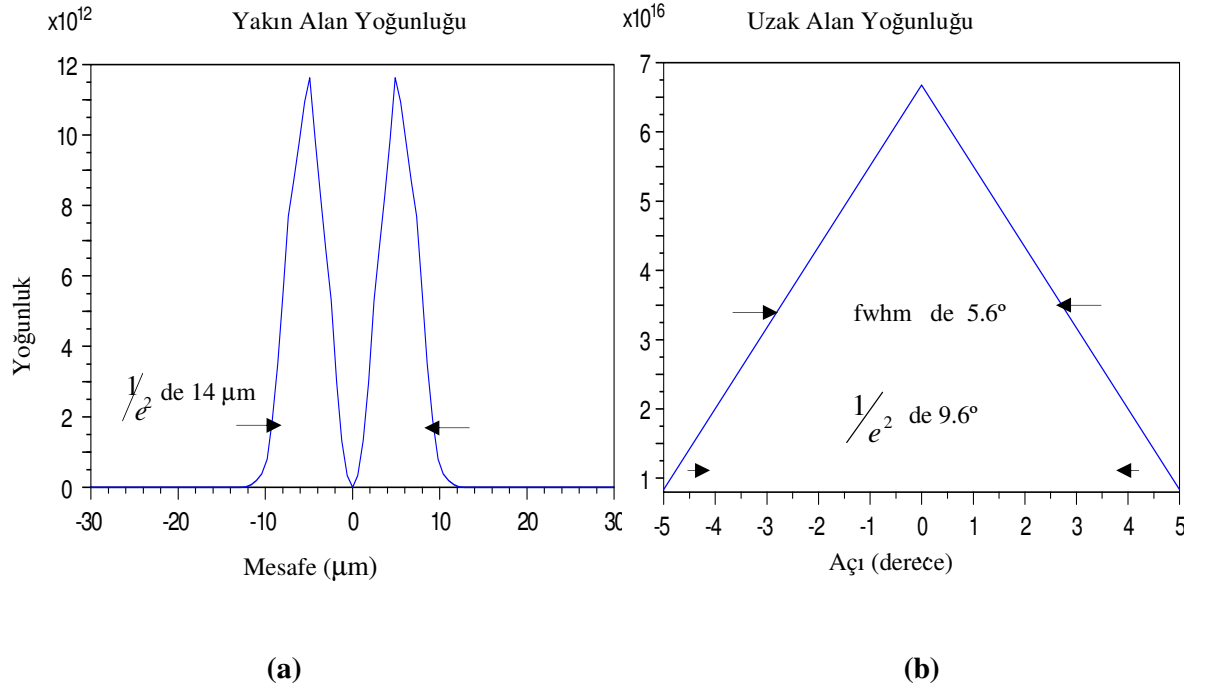
Şekil 4.7 Yarıiletken lazerin **a)** yakın alan topografik yayılımı **b)** Dikey yönde yakın alan Gaussian dağılımı

Şekil 4.7 a) Lazer mod yoğunluğu lazer yüzeyi ve tepe noktasının topografik görüntüsünü, b) Dikey yönde yakın alan yoğunluğunun Gaussian dağılımını vermektedir.



Şekil 4.8 Uzak alan yayılımı a) Topografik yayılım b) Gaussian dağılım

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8’de verilen yakın ve uzak alan yayılımlarının optiksel eksen boyunca değişimleri Gaussian dağılım şeklindedir.



Şekil 4.9 (a) Yakın alan ve (b) Uzak alan dağılımı

Şekil 4.9 (a) elde edilen yakın alan dağılımını göstermektedir. Yakın alan dağılımında $1/e^2$ 'de hesaplanan genişlik $14 \mu\text{m}$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.9 (b) ise uzak alan dağılımını göstermektedir. Uzak alan yoğunluğunda $1/e^2$ 'ye karşılık gelen açı ise 9.6° dir. Uzak alan dağılımında maksimum değer yarı (fwhm) 5.6° derece olarak belirlenmiştir.

Yakın alan yoğunluğunda $14 \mu\text{m}$ genişlikteki teorik saçılma limitini (diffraction limit) şu şekilde hesaplanır.

$$DL = \frac{\lambda}{D} \quad (4.3)$$

Bu eşitlikte

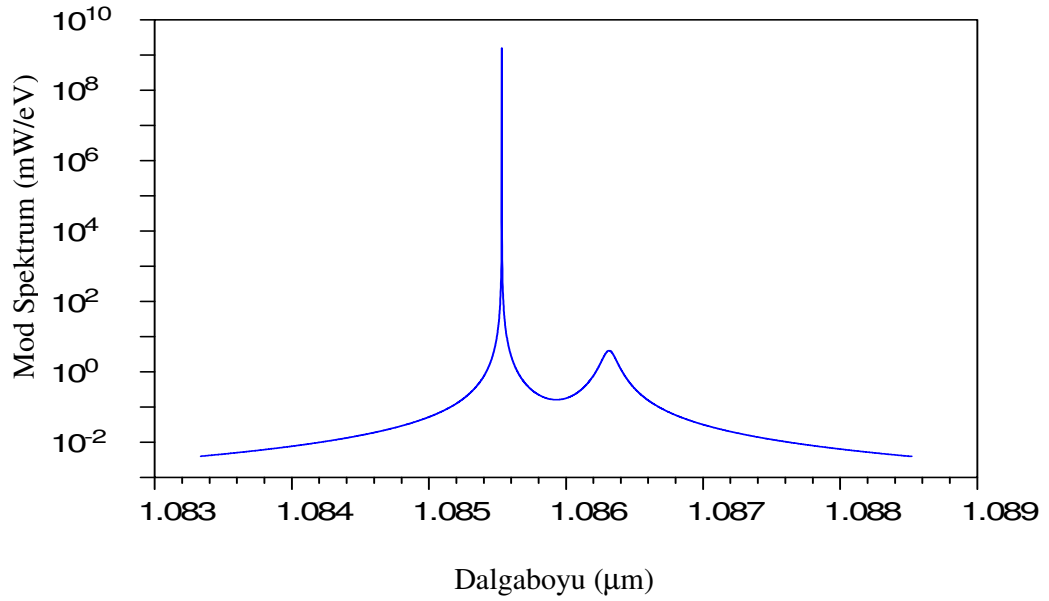
DL : Teorik saçılma limiti

λ : dalga boyu

D : Yakın alan yoğunluğunun $1/e^2$ veya fwhm genişliğindeki değeri.

Kullandığımız lazer için $\lambda = 980$ nm ve $1/e^2$ 'de $D=14$ μm için denklem (4.3) kullanılarak teorik saçılma limiti 0.07 radyan olarak bulunur. Bu değer açı olarak 4.01° bulunur. Kullandığımız lazer için uzak alan değeri $1/e^2$ 'de 9.6° olup teorik limitten çok uzak değildir. Ayrıca ışın tek lop içinde gerçekleşmektedir.

Elektroişınma tayfı (optik spektrum) yarıiletken lazerlerin temel özelliklerinden biridir. Yarıiletken lazer eşik akımına ulaştığında kevitinin uzunlamasına (longitudinal) modlarında lazer operasyonuna başlar. Şekil 4.10'da modellemesini gerçekleştirdiğimiz InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin LaserMOD simülasyon programında elde edilen elektroışınma tayfı gösterilmektedir.



Şekil 4.10 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin elektroışıma tayfı

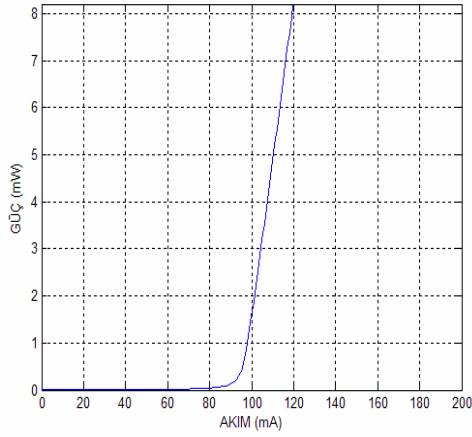
Şekil 4.10’da gösterildiği gibi merkezi dalgaboyu 1085 nm civarındadır ve ikinci bir pik 1086 nm’ de oluşmuştur.

4.4. L-I ve Spektrum için Deneysel ve Teorik Sonuçların Karşılaştırılması

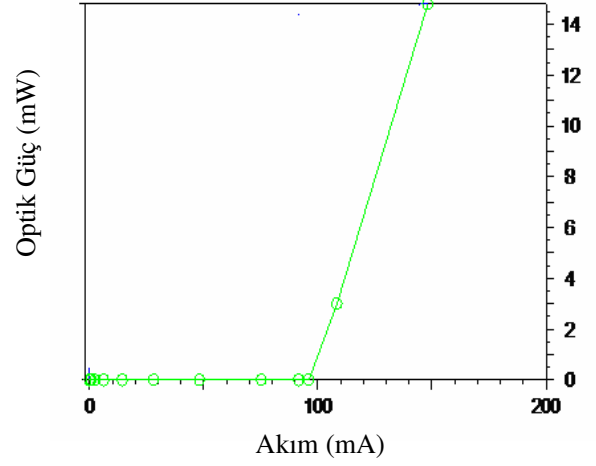
Verim, çıkan ışığın gücünün verilen pompalama gücüne oranı olarak ifade edilebilir. Dolayısıyla verim, sistem kayıplarına bağlı olarak pompalama gücünün nasıl bir ters birikim oluşturacağı ile ilgilidir.

Titreşimin kararlı halinin, kazanç – kayıp dengesi sağlandığında elde edileceğini daha önce açıklamıştık. Bu durum sürekli çıkışlı (cw) lazerler için geçerlidir. Bir lazer sistemindeki toplam kayıp değişik sebeplerden oluşmaktadır. Bunlardan bazıları, yansımaya katsayısı, soğurma ve saçılma, arzu edilen geçişler dışındaki geçişler sebebiyle lazer ortamındaki soğurma, lazer ortamında optik homojensizliklerden saçılma ve aynalardaki kırınım kayıplarıdır.

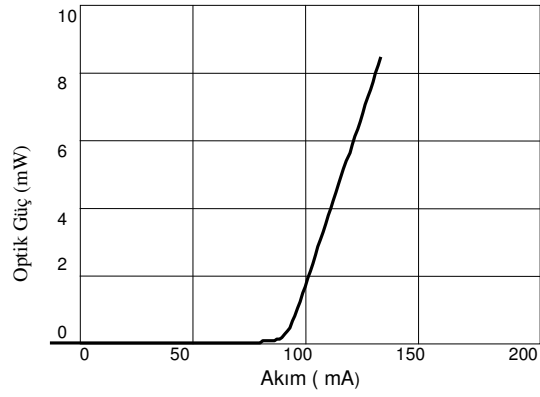
4.4.1. L-I sonuçlarının karşılaştırılması



(a) Matlab L-I sonucu



(b) LaserMOD L-I sonucu



(c) Deneysel sonuç (Çakmak 2000)

Şekil 4.11 a) Matlab kullanılarak elde edilen L-I sonu b) LaserMOD simülasyon programı kullanılarak elde edilen L-I sonucu ve c) Deneysel sonuç

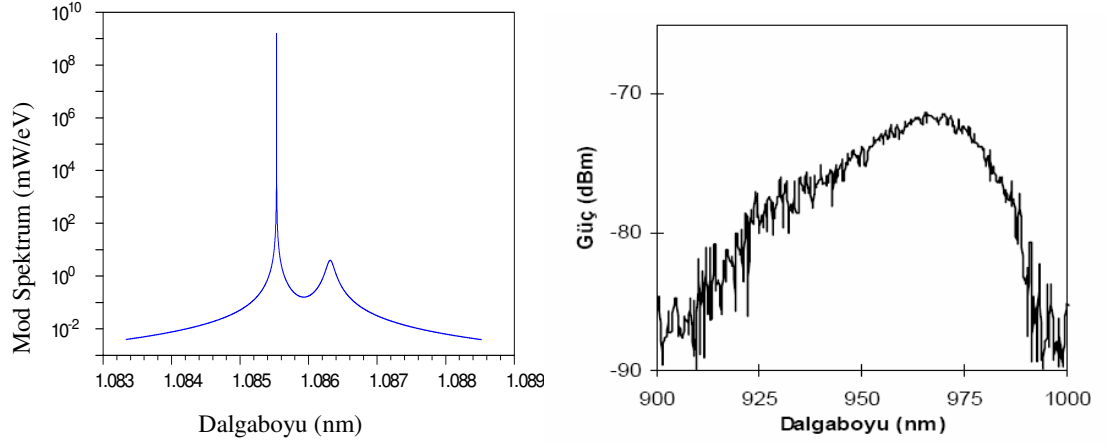
Şekil 4.11 (a)'da eşik akımı $I_{th} = 96$ mA ve diferansiyel kuantum verimliliği hesaplandığında $\eta_d = 0.33$ olarak bulunmaktadır.

Şekil 4.11 (b)'de LaserMOD simülasyon programı kullanılarak elde edilen L-I grafiğinde eşik akımı $I_{th} = 98$ mA ve diferansiyel kuantum verimliliği ise $\eta_d = 0.29$ olarak bulunmaktadır.

Şekil 4.11 (c)' de bir doktora çalışmasında elde edilen L-I grafiğinde ise eşik akımı $I_{th} = 90$ mA ve diferansiyel kuantum verimliliği $\eta_d = 0.15$ mA olarak hesaplanmaktadır.

Yukarıda hesaplanan diferansiyel kuantum verimi yariletken lazerin tek yönde vermiş olduğu ışığa için elde edilen değerlerdir. Yariletken lazerde ışık çıkışı her iki yönde gerçekleştiği için hesaplanan diferansiyel kuantum verimi her iki yöndeki ışığa dikkate alınarak değerlendirilmelidir.

4.4.2. Optik spektrum grafiklerinin karşılaştırılması



(a) LaserMOD sonucu

(b) Deneysel sonuç (Çakmak 2000)

Şekil 4.12 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin (a) ve (b) çalışmalarında elde edilen optik spektrum grafikleri

Şekil 4.12 (a) ve (b) 'de elde edilen grafikleri farklı kılan etkenleri şöyle sıralayabiliriz.

1-LaserMOD simülasyon programı ile gerçekleştirilen modellemede birçok bozucu etken ihmal edilmektedir.

2-Quasi cw (Darbeli mod) - cw çalışma modları birbirlerinden farklı çalışma modlarıdır.

InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin modellenmesinde MATLAB programı tabanlı, LaserMOD simülasyon programı ve daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda elde edilen L-I (Işık-Akım), yakın ve uzak alan dağılımları ve optik spektrum sonuçlarını bir tablo halinde Çizelge 4.3 de görmek çok daha kavrayıcı olacaktır.

Çizelge 4.3 InGaAs/GaAs yarıiletken lazerin farklı çalışmalarda elde edilen sonuçların tablosal gösterimi

| Parametreler | LaserMOD | Deneysel Sonuç | MATLAB |
|---------------------------|------------------|-----------------------|---------------|
| Eşik akımı | 98 mA | 90 mA | 96 mA |
| Yakın alan $1/e^2$ değeri | 14 μm | 19 μm | - |
| Uzak alan $1/e^2$ değeri | 9.6° | 14° | - |
| Uzak alan fwhm değeri | 5.6° | 2.6° | - |
| Optik spektrum | 1085.5 nm | 970 nm | - |

5. SONUÇ ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, GaAs tabanlı ve çift kuantum çukur epitaksiyel tabakalara sahip olan yarıiletken diyot lazerin LaserMOD simülasyon programında modellenmesi gerçekleştirildi. Optik hapsedilme için, 0.09 μm kalınlıkta dalgakılavuzları kullanıldı. Yarıiletken lazerlerin tasarımı, silisyum dioksit, p-kontak ve n-kontak metal kaplama ile tamamlandı.

Lazerlerin akım-optik güç, akım-voltaj ve elektroışıma (optik spektrum) özellikleri incelendi. Optik spektrum lazer dalgaboyunu ölçmek için kullanıldı. Akım-voltaj, akım-optik güç simülasyonları, seri direnç, eşik akımı ve türevsel kuantum verimi incelendi. Akım- voltaj simülasyonları yapılarak, yarıiletken lazerlerimizin diyot özelliği gösterdiği teyit edildi.

Optik-güç ile akım arasındaki ilişkiyi belirleyerek lazerlerin, eşik akımı, eşik akım yoğunluğu ve türevsel kuantum verimi belirlendi. 90-100 mA arasında değişen eşik akımları bulundu. Aygıtımızın eşik akım yoğunluğu ise 500A/cm olarak ifade edilmişti. Bu değerler literatürde bulunan diğer değerler ile karşılaştırılabilir. Fabry-Perot lazerlerimizin bir yüzünden elde edilen türevsel kuantum verimi, 500 μm kevti uzunluğu için %29 olarak hesaplanmıştır.

LaserMOD simülasyon programında yapılan modelleme sonucunda yakın ve uzak alan yoğunlukları elde edildi. Elde edilen yakın alan ve uzak alan dağılımlarında, yakın alan dağılımı için $1/e^2$ 'de hesaplanan genişlik 14 μm ve uzak alan yoğunluğu için $1/e^2$ 'ye karşılık gelen açı ise 9.6° olarak bulundu. Ayrıca uzak alan dağılımında maksimum değerinin yarısı (fwhm) 5.6° derece olarak hesaplandı. Teorik saçılma limiti yakın alan yoğunluğunda 14 μm genişliği dikkate alınarak 4.01° olarak bulundu.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P. and N. K. Dutta, *Semiconductor Lasers*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- Cakmak, B. " Fabrication and Characterisation of InP and GaAs Based Optoelectronic components ", the University of Bristol in accordance with the requirements of the degree of Doctor of Philosophy in the department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering (June 2000).
- Cakmak, B., Williams K. W., Penty R. V., ve White I. H., "Experimental investigation of A Q-switched triple contact InGaAs bow-tie diode laser," *IEE Proceedings- ptoelectronic* 146(6), s. 259–262, December 1999.
- Cakmak B. Penty R. V., Williams K. W., Yu S., veWhite I. H, "High power and picosecond pulse generation from a passively Q-switched tapered InGaAs/GaAs Lazer, Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO'2000), Mayıs 2000, San Fransisco, USA, Makale CThM28, s. 469–470.
- Chen, G. Md. M. Mazumder, Y. R. Chemla, A. Serpengüzel, R. K. Chang, and S. C. Hill, "Wavelength Variation Of Laser Emission Along The Entire Rim Of Slightly Deformed Microdroplets," *Opt. Lett.* 18, 1993–1995 (1993).
- Chow, W. W. Stephan W.Koch, "Semiconductor-Laser Fundamentals" *Physics of the Gain Materials*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (1999)
- Coldren, L.A. and S.W. Corzine, "Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits", John Wiley and Sons, Inc., New York, USA (1995).
- Ebeling, K. J. "IntegratedOptoElectronics", Springer-Verlag, New York, USA (1993).Erwin, K.Lau, LaserMOD Tutorial EE232, 9.26.2006
- Govind, P. Agrawal, Niloy K. Dutta, *Semiconductor Lasers* Second Edition, "Capter 5 Laser Structures and Their Performance", "Capter 6 Rate Equations and Operating Characteristics".
- Hall, R. N. G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R.O. Carlson, "Coherent Light Emission from GaAs Junctions," *Phys. Rev. Lett.* 9, 366 (1962).
- Haug, H. And S.W.Koch (1994), *Quantum Theory of the Optical and Electronic Properties of Semiconductors*, 3rd edi., World Scientific, Singapore.
- Hecht, J. "Understanding Lasers: an entry level guide", IEEE Press, New York, USA (1992)
- Iga, K. And S. Kinoshita, "Process Technology for Semiconductor Lasers", Springer- Verlag, Berlin, Germany (1996).
- Iga, K. S. Ishikawa, S. Ohkouchi, and T. Nishimura, Room-temperature "pulsed Oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting injection laser, " *Appl. Phys. Lett*, Vol. 45, no. 4, pp. 348 350, Aug. 1984.
- Krauss, T. and P.J.R. Laybourn, "Very low threshold current operation of semiconductor lasers", *IEE Proceedings*, 139, 383 (1992).
- Liao, A.S.H, and S. Wang, "Semiconductor injection lasers with a circular resonators", *Appl Phys. Lett.* 36, 801 (1980).
- Mogg, S. Çeviren S. B Lişesivdin, "Uzun-Dalgaboylu Dikey-Oyuk Lazer Materyalleri ve Cihaz Analizi Bölüm 1-3 /6, Gazi Üniversitesi İleri Teknolojileri A.D.
- Mroziewicz, B. M. Bugajski, and Nakwaski, "Physics of Semiconductor Lasers", North Holland Inc. Amsterdam, Netherlands, (1991).
- Seprengüzel, B.E Sağol, "Yarıiletken Diyot Lazerlerinde Kendiliğinden Salınımın Kuvvetlendirilmesi" Proje No: TBAG–1368

- Singh, Teresa J. Semiconductor optoelectronic, Physics and Technology, Cover art and layout McGraw-Hill, Inc., (1995). ISBN: 0-07-057637-8
- Sundgren, P. R. Marcks von Württemberg, J. Berggren, M. Hammar, M. Ghisoni, V. Oscarsson, E. Odling, and J. Malmquist, Highperformance "1.3- μ m InGaAs vertical-cavity surface-emitting lasers," *Electron.Lett.*, vol. 39, no. 15, pp.1128-1129 July 2003.
- Suematsu, Y. and A.R. Adams, "Handbook of Semiconductor Lasers and Photonic Integrated Circuits", Chapman and Hall, London, England (1994).
- Svelto, O. David C. Hana, "Principles of Lasers, 3.4. Quantum Wires and Quantum Dots" (1998).
- Zory, P.S. Jr., "Quantum Well Lasers", Academic Press Inc., New York, USA (1993).
- Wilson, J. And J.F.B. Hawkes, "Laser Principles and Applications", Prentice Hall, London England (1987).

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Erzurum'da doğan Halil İbrahim KOTAN, ilk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 1997 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2002 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2004 yılında TEDAŞ Erzurum İl Müdürlüğünde kamu görevine başladı. 2006 yılında TEİAŞ Erzurum Doğu Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğünde İşletme Mühendisi olarak görev aldı. Halen TEİAŞ Erzurum Doğu Anadolu Yük Tevzi İşletme Müdürlüğünde İşletme Mühendisi olarak görevine devam etmektedir. 2005 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisansa başladı.