

**1300 nm DALGABOYLU YARIİLETKEN  
LAZERLERİN MODELLENMESİ VE  
KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Çağlar DUMAN**

**Y. Lisans Tezi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK  
2008**

**Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Y. LİSANS TEZİ**

**1300 nm DALGABOYLU YARIİLETKEN LAZERLERİN  
MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Çağlar DUMAN**

**ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**ERZURUM  
2008**

**Her hakkı saklıdır**

Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Çağlar DUMAN tarafından hazırlanan bu çalışma 19/08/2008 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

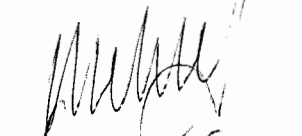
Başkan : Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK

İmza :



Üye : Doç. Dr. Mehmet BİBER

İmza :




Üye : Yrd. Doç. Dr. Birol SOYSAL

İmza :



**Yukarıdaki sonucu onaylarım**



**Prof. Dr. Mehmet ERTUĞRUL**  
**Enstitü Müdürü**

## ÖZET

Y. Lisans Tezi

### **1300 nm DALGABOYLU YARIİLETKEN LAZERLERİN MODELLENMESİ VE KARAKTERİSTİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**Çağlar DUMAN**

Atatürk Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK

Bu çalışmada, 1300 nm dalgaboyunda yayılım yapan yarıiletken lazer modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme sonucunda, yarıiletken lazer parametrelerindeki değişimlerin lazer çıkış karakteristiklerine etkileri incelenmiştir.

Lazer sürekli dalga modunda çalışırken, kendiliğinden emisyon faktörünün büyük değerlerinde ışınımsal olmayan durumdan, ışınımsal duruma geçişin daha yumuşak olduğu gözlemlenmiştir. Lazer çıkış gücünün akımla değişimi kavite boyu arttıkça lazerin eşik akımının arttığını ve lazer çıkışı gözlemlenebilmesi için daha büyük akım değerleri uygulanmasının gerektiğini göstermiştir. Lazerin boylamsal mod spektrumu hakkında yapılan çalışma sonucunda akımın artışıyla boylamsal mod spektrumunun daraldığı gözlemlenmiştir. Lazerin küçük sinyal modülasyon yanıtından şu sonuçlar elde edilmiştir: a) Lazerin sönümlü osilasyon frekansından daha küçük modülasyon frekansı için neredeyse sabit güç çıkışı sağlanmaktadır, b) sönümlü osilasyon frekansına eşit frekansta çıkış gücü en büyük değerini almaktadır ve c) sönümlü osilasyon frekansından daha büyük modülasyon frekansları için çıkış gücü hızla düşmektedir. Son olarak, büyük sinyal modülasyonu durumunda modülasyon akımının artışıyla lazer çıkışındaki darbelerin genişliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir.

**2008, 57 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** yarıiletken lazer, oran denklemleri, boylamsal mod spektrumu, modülasyon yanıtı, küçük sinyal analizi, büyük sinyal modülasyonu

## ABSTRACT

Master of Science Thesis

### MODELLING AND OPERATING CHARACTERISTICS OF SEMICONDUCTOR LASERS WITH 1300 nm WAVELENGTH

Çağlar DUMAN

Atatürk University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Associate Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

In this study, simulation of 1300 nm wavelength semiconductor laser has been carried out. We have observed the effect of variation of laser parameters on laser output characteristics.

While laser is working at continuous wave mode, transition of laser output from nonradiative to radiative state is softer for higher spontaneous emission factors. Laser output versus device current characteristics shows that threshold current of the laser increases with increasing of laser length, and thus more current must be applied for lasing. Results of study on longitudinal mode spectrum of the laser demonstrate that width of longitudinal mode spectrum get narrows with increasing of the current. Following results have been obtained from small signal modulation of the laser: a) Nearly constant power output is observed for the small signal modulation frequency which is smaller than the relaxation oscillation frequency of laser, b) laser output power is the highest at a frequency equal to the relaxation oscillation frequency, c) for the modulation frequency higher than relaxation oscillation frequency, laser output power decreases sharply. Finally at large signal modulation, it is observed that width of the laser output pulses decreases with increasing modulation current.

**2008, 57 Pages**

**Keywords:** semiconductor laser, rate equations, longitudinal mode spectrum, modulation response, small signal analysis, large signal modulation

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu alıőma Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümünde yapılmıştır. Bu çalıőmanın planlanması ve yürütülmesinde tecrübelerini ve bilgilerini esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Bülent ÇAKMAK'a içten őükranlarımı arz ederim.

Çalıőmalarım sırasında benden desteklerini esirgemeyen aileme ve arkadaşlarım İbrahim HAN, Ferit ÇAKIR ve Mustafa KORKMAZ'a teşekkür ederim.

ağlar DUMAN

Ağustos 2008

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER.....</b>	<b>7</b>
2.1. Lazer.....	7
2.2. Yarıiletken Lazerler.....	8
2.2.1. Yarıiletken lazer türleri.....	9
2.2.1.a. Aktif tabaka kalınlıklarına göre lazer türleri.....	9
2.2.1.b. Taşıyıcı hapsedme mekanizmasına göre lazer türleri.....	12
2.2.2. Yarıiletken lazerlerin çalışma prensibi.....	15
2.3. Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi.....	18
2.3.1. Oran denklemleri.....	18
2.3.1.a. Elektron oran denklemi.....	18
2.3.1.b. Foton oran denklemi.....	19
2.3.1.c. Yarıiletken lazerin çıkış gücü.....	20
2.3.2. Lazer sürekli durum karakteristiği.....	21
2.3.2.a. L–I eğrisi.....	21
2.3.2.b. Boylamsal mod spektrumu.....	24

2.4. Modülasyon Yanıtı.....	24
2.4.1. Küçük sinyal analizi.....	26
2.4.2. Büyük sinyal modülasyonu.....	29
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM.....</b>	<b>31</b>
3.1. MATLAB ile Yarıiletken Lazerin Karakterizasyonu.....	31
3.2. Yarıiletken Lazer Sürekli Durum Karakteristiğinin Elde Edilmesi.....	32
3.3. Yarıiletken Lazerlerin Boylamsal Mod Spektrumunun Elde Edilmesi.....	33
3.4. Yarıiletken Lazerlerin Modülasyon Yanıtı.....	34
3.4.1. Küçük sinyal analizi.....	34
3.4.2. Büyük sinyal modülasyonu.....	36
<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....</b>	<b>37</b>
4.1. Yarıiletken Lazerin N-I, P-I ve L-I Grafikleri.....	37
4.2. Yarıiletken Lazerin Boylamsal Mod Spektrumu.....	41
4.3. Yarıiletken Lazerin Küçük Sinyal Modülasyon Yanıtı.....	46
4.4. Yarıiletken Lazerin Büyük Sinyal Modülasyonu.....	47
<b>5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>52</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>54</b>
EK 1.....	54
EK 2.....	55
EK 3.....	56
EK 4.....	57
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>58</b>

## SİMGELER DİZİNİ

$a$	Kazanç sabiti
$A_{nr}$	Işınımsal olmayan rekombinasyon katsayısı
$B$	Işınımsal rekombinasyon katsayısı
$C$	Auger rekombinasyon katsayısı
$c$	Işık hızı
$d$	Aktif tabaka kalınlığı
$G$	Kazanç
$G_N$	Kazancın elektron sayısına göre türevi
$G_P$	Kazancın foton sayısına göre türevi
$h$	Planck sabiti
$I$	Akım
$i$	$\sqrt{-1}$
$I_b$	Kutuplama akımı
$I_m$	Modülasyon akımı
$I_{th}$	Eşik akımı
$L$	Kavite boyu
$m$	Modülasyon derinliği, mod numarası
$N$	Elektron sayısı
$n$	Elektron yoğunluğu
$n_0$	Saydamlık taşıyıcı yoğunluğu
$p$	Momentum
$P$	Foton sayısı
$P_{Çıkış}$	Çıkış gücü
$q$	Elektron yükü
$R$	Yüz yansıtıcılığı
$R_{sp}$	Kendiliğinden emisyon oranı
$V$	Aktif tabaka hacmi
$w$	Aktif tabaka genişliği

$\nu$	Frekans
$\Gamma$	Hapsetme faktörü
$\gamma$	Foton zayıflama oranı
$\omega$	Açısal frekans
$\alpha$	Kayıp
$\phi$	Faz açısı
$\beta_c$	Çizgi kalınlığı iyileştirme faktörü
$\gamma_e$	Taşıyıcı rekombinasyon oranı
$\tau_e$	Taşıyıcı yaşam süresi
$\mu_g$	Grup kırılma indisi
$\alpha_{int}$	Dahili kayıplar
$\alpha_m$	Yüz kayıpları
$\Gamma_N$	Küçük sinyal taşıyıcı bozunma oranı
$\tau_p$	Foton yaşam süresi
$\Gamma_P$	Küçük sinyal foton bozunma oranı
$\theta_p$	Faz kayması
$\Gamma_R$	Sönümlü osilasyon bozunma oranı
$\beta_{sp}$	Kendiliğinden emisyon faktörü
$v_g$	Lazer modlarının grup hızı
$\Omega_R$	Sönümlü osilasyon açısal frekansı
$\lambda$	Dalgaboyu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Bazı lazerlerin yayılım yaptıkları dalgalı boyları.....	8
Şekil 2.2.	Bir kuantum çukur yapısı.....	10
Şekil 2.3.	Çeşitli hapsedme mekanizmalarında durum yoğunlukları.....	11
Şekil 2.4.	Lazer diyot yapıları.....	14
Şekil 2.5.	(a) Soğurma, (b) kendiliğinden emisyon ve (c) uyarılmış emisyonu gösteren enerji seviyesi diyagramı.....	17
Şekil 2.6.	Örnek L-I eğrisi.....	23
Şekil 4.1.	$L=250 \mu\text{m}$ ve $\beta_{sp}=10^{-3}$ için elde edilen N-I karakteristiği.....	39
Şekil 4.2.	$L=250 \mu\text{m}$ ve $\beta_{sp}=10^{-3}$ için elde edilen P-I karakteristiği.....	39
Şekil 4.3.	$L=250 \mu\text{m}$ ve $\beta_{sp}=10^{-3}$ için elde edilen L-I karakteristiği.....	40
Şekil 4.4.	$\beta_{sp}=10^{-3}$ ve $\beta_{sp}=10^{-5}$ için L-I grafikleri.....	40
Şekil 4.5.	$L=250 \mu\text{m}$ ve $L=500 \mu\text{m}$ için L-I grafikleri.....	41
Şekil 4.6.	$L=250 \mu\text{m}$ , $\beta_{sp}=10^{-4}$ ve $I=1.5I_{th}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	42
Şekil 4.7.	$L=250 \mu\text{m}$ , $\beta_{sp}=10^{-4}$ ve $I=2.3I_{th}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	42
Şekil 4.8.	$L=250 \mu\text{m}$ , $\beta_{sp}=10^{-4}$ ve $I=3.3I_{th}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	43
Şekil 4.9.	$L=250 \mu\text{m}$ , $I=1.5I_{th}$ ve $\beta_{sp}=10^{-3}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	43
Şekil 4.10.	$L=250 \mu\text{m}$ , $I=1.5I_{th}$ ve $\beta_{sp}=10^{-4}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	44

<b>Şekil 4.11.</b> $L=250 \mu\text{m}$ , $I=1.5I_{th}$ ve $\beta_{sp}=10^{-5}$ için elde edilen boylamsal mod spektrumu.....	44
<b>Şekil 4.12.</b> $350 \mu\text{m}$ boyundaki yarıiletken lazerin $\beta_{sp}=10^{-4}$ ve $2 \text{ mW}$ çıkış gücü için boylamsal mod spektrumu.....	45
<b>Şekil 4.13.</b> $100 \mu\text{m}$ boyundaki yarıiletken lazerin $\beta_{sp}=10^{-4}$ ve $2 \text{ mW}$ çıkış gücü için boylamsal mod spektrumu.....	45
<b>Şekil 4.14.</b> Hesaplanan küçük sinyal modülasyon yanıtı.....	47
<b>Şekil 4.15.</b> $I_m(t)=0.5I_{th}$ için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği $120 \text{ ps}$ olarak ölçüldü).....	47
<b>Şekil 4.16.</b> $I_m(t)=I_{th}$ için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği $70 \text{ ps}$ olarak ölçüldü).....	48
<b>Şekil 4.17.</b> $I_m(t)=1.5I_{th}$ için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği $50 \text{ ps}$ olarak ölçüldü).....	48

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 4.1</b>	1.3 $\mu\text{m}$ dalgaboyunda yayılım yapan gömülü türdeş olmayan lazer için tipik parametreler.....	38
<b>Çizelge 4.2</b>	Gömülü türdeş olmayan lazer, 2 mW gücünde çalışırken küçük sinyal analizinde kullanılan parametrelerin tipik değerleri.....	46

## 1. GİRİŞ

LASER kelimesi 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation' ifadesinin baş harfleri kullanılarak türetilmiştir (Eisberg and Resnic 1985). İlk kez, 1917'de Einstein,  $h\nu$  enerjili bir fotonun bir elektronu,  $E_1$  enerjili seviyeden  $E_0$  enerjili bir seviyeye geçirebileceğine (uyarılma) işaret etti. Uyarılmış emisyonunda, yayılan ışık, gelen (uyaran) ışıkla aynı fazda olduğundan, şiddetlenmiş uyumlu bir ışık demetidir (Beiser 1997). Lazerin gerçekleştirilmesi fikri ise ancak 1958'de Schawlow ve Townes'in çalışmalarında ortaya atıldı. Bu fikir 1960'ın Mayıs ayında başarılı katıhal yakut lazeri ve aynı yılın Aralık ayında He-Ne gaz lazeri uygulamaları ile gerçekleştirildi (Agraval and Dutta 1993). Uyarılmış emisyonun yarıiletken malzemelerde de gerçekleştirilebileceği düşüncesi bu süreçte öne sürüldü ve 1962 yılında birkaç araştırmacı grup yarıiletken lazer elde ettiklerini bildirdiler. Materyal saflığındaki gelişmeler ve epitaksiyel büyütme teknikleri birçok dalgaboyunda yayılım yapan lazerler üretilebilmesini sağladı (Agraval and Dutta 1993). Yarıiletken lazerler, optik yükselteçlerde, yönlendiricilerde, dalgaboyu dönüştürücülerinde, çapraz bağlantılarda (cross connects) ve sayısal kapılarda yükselteç olarak yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Günümüzde ise fiber optik iletişimde ve ağ sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Das *et al.* 2007). Küçük boyutlu, yüksek verimli, güvenilir ve düşük maliyetli oluşları, yarıiletken lazerleri çok hızlı optik bilgi işleme ve yüksek kapasiteli fiber optik bağlantı sistemleri için ideal optik kaynaklar haline getirirler (Vasil'ev *et al.* 2000). 1.3 ve 1.55  $\mu\text{m}$  dalgalı boyları civarında silika fiberlerde kayıplar düşük olduğu için ilgi, uzun dalgalı boylu (1.1  $\mu\text{m}$ -1.6  $\mu\text{m}$ ) yarıiletken lazerlere kaymıştır (Agraval and Dutta 1993).

Yarıiletken lazerlerin teorik modellemeleri için günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. Bu amaçla oran denklemleri, lazerler için ilk kez 1960'ta formülize

edildi ve uygun genelleştirmelerden sonra yarıiletken lazerler için verimli bir şekilde kullanıldılar. Oran denklemleri, yarıiletken lazerlerde fotonlar ve yük taşıyıcıları arasındaki iç etkileşmeler tarafından yönetilen statik, dinamik, spektral karakteristikleri ve bu karakteristiklerin çeşitli cihaz parametrelerine bağımlılıklarını birleştiren bir yaklaşım sunar (Agraval and Dutta 1993).

Yarıiletken lazerlerin teorisi ve modellemesi üzerine literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir:

Harth (1973), lineer olmayan oran denklemleri yardımıyla enjeksiyon lazerlerin direkt büyük sinyal modülasyonunu tanımladığını bildirmiştir. Bu çalışma sonucunda modüle edilmiş foton yoğunluğunun tepe değerlerinin, sistemin rezonans frekansı yakınlarında üretildiğini gözlemlemiştir.

Daikoku (1977), yarıiletken lazer diyotların direkt darbe modülasyon oranlarının istenmeyen sönümlü osilasyonlar tarafından sınırlandırıldığını buldu. Ayrıca bu sönümlü osilasyonların, lineer olmayan bir oran denklemiyle ifade edildiğini ve bu denklem sayesinde lazer diyotun istenmeyen osilasyonlar üretmediği koşulları ortaya koyduklarını rapor etti. Lineer olmayan oran denklemlerinin bu koşullar için çözülebileceğini ve genel oran denklemlerinin iskeletini oluşturacak analitik çözümün direkt darbe modülasyonu karakteristiğini gösterebileceğini bildirdi.

Danielsen and Mengel (1978), yarıiletken enjeksiyon şerit lazerin statik, dinamik ve küçük sinyal davranışlarını dalgaboyuna bağlı çoklu mod oran denklemleri ile kolay bir şekilde yorumlanabileceğini gösterdiler.

Morishita *et al* (1979), lazerin çalışmaya başlamasının ışık çıkışı-voltaj karakteristiğine, empedans karakteristiğine ve lazer diyotun ışık modülasyon

karakteristiğine etkilerini, oran denklemleri yardımıyla incelediler. Bu çalışmada empedans ve ışık modülasyon karakteristikleri küçük sinyal yaklaşımı ile elde edildi. Küçük sinyal modülasyon karakteristiğinin, lazerin sabit bir akım veya voltaj modülasyonu ile uyarılıp uyarılmadığına bağımlı olduğunu buldular. Ayrıca lazer çıkışının başlamasıyla empedansın hızla değiştiğini rapor ettiler.

Ito *et al* (1979), AlGaAs lazerlerde sönümlü osilasyonların taşıyıcı difüzyon uzunluğuna bağımlılığını, taşıyıcı difüzyon ve kendiliğinden emisyon terimleri içeren çoklu mod oran denklemleri kullanarak analiz ettiler. Şerit genişliği tarafından normalize edilen difüzyon uzunluğunun, nümerik sonuçların deneysel olanlarla karşılaştırılması sonucunda 0.6 civarında olduğunu tahmin ettiler.

Tarucha and Otsuka (1981), lazer diyotun güçlü sinüzoidal akım modülasyonuna yanıtını deneysel ve teorik olarak incelediler. Bu çalışmada, harici kavitesi olmayan lazer diyotun uygulanan akımın genliği ile uyumlu optik darbe üretebilmesi üzerinde durdular ve ek olarak sinüzoidal akımla modüle edilmiş lazer diyotlarda harici ışık enjeksiyonuyla uyumlu titreşimleri teorik ve deneysel olarak çalıştılar.

Lee *et al*(1982), InGaAsP enjeksiyon lazerlerde kavite uzunluğunun bir fonksiyonu olarak tek mod gücünün alt ve üst limitlerini tanımlayan basit bir ifade sundular. Çalışmaları sonucunda tek mod gücünün alt limitinin kavite boyuyla doğru orantılı, üst limitinin ise kavite boyuyla ters orantılı olduğunu ve bu nedenle de kısa kaviteli lazerlerin geniş bir tek mod güç aralığı için uygun bir geometri sağladığını belirttiler.

Guo *et al* (1985), lineer olmayan kazancın tek boylamsal moda etkisini, çoklu boylamsal mod ve enine mod oran denklemlerinin lineer kazanç hesaplamalarını ve deneysel sonuçlarını karşılaştırarak analiz ettiler. Işınım yapmayan modlar

üzerindeki üçüncü dereceden lineer olmayan kazancın daha fazla bastırılmasının tek boylamsal mod sürecini hızlandırdığını belirttiler. Ayrıca bu sonucun kavite uzunluğu fazla olan lazerler için elde edilen lineer kazanç profilinin aksine uzun kaviteli lazerlerde elde edildiğini belirttiler.

Agrawal (1985), tek mod yarıiletken lazerlerin direkt akım modülasyonu altındaki güç spektrumunu, oran denklemlerinden elde edilen küçük sinyal analizi sonuçlarını kullanarak hesapladığını bildirdi. Genel formülasyonun kendiliğinden emisyonla ilişkili olarak, faz yayılımı etkisi kadar akım modülasyonuna bağlı frekans kaymasını da kapsadığını belirledi. Aynı zamanda bu çalışmada frekans kaymasının, frekans modülasyonu ile olan ilişkisini ortaya koydu ve özellikle frekansın ve geçici sönümlü osilasyonların bozulma oranının, aynı zamanda ortaya çıkan genlik ve frekans modülasyonlarını yönettiğini belirtti.

Lee and Shin (1989), kazanç doyumunun, kendiliğinden emisyonun, Auger rekombinasyonunun ve çabuk doyumlu absorpsiyonun lazer diyot dinamikleri üzerine etkisini araştırdılar. Bu amaçla oran denklemlerini genelleştirilmiş koordinatlara göre değiştirdiler ve dönüştürülmüş lineer olmayan oran denklemlerine çoklu ölçek genişletme (multiple scale expansion) metodunu uygulayarak, lazer diyottaki sönümlü osilasyonların geçici çözümlerini türettiklerini bildirdiler.

Hermery *et al* (1990), güçlü sinüzoidal modülasyon durumunda yarıiletken lazerin dinamik davranışı için teorik ve deneysel bir çalışma yapmışlardır. Teorik analiz, kazanç bastırma etkileri dahil edilerek oran denklemleri ile yapılmış ve lazerin düzensiz davranışlarının tahmini için genel kriterler kullanmışlardır. Deneyler, tek mod InGaAsP lazer ile 1.3  $\mu\text{m}$ 'de gerçekleştirilmiştir.

Arnauld (1991), lazer diyotların çizgi kalınlıkları için Nyquist formülüne dayanan basit bir ifade elde etti. Bu ifade standart oran denklemlerinden elde edilen duruma uygulanarak kazanç bastırılmasının elektriksel iletkenlikle beraber, çizgi kalınlığını ve genlik gürültüsünü azalttığını belirtti. Ayrıca optik kazancın taşıyıcı ve foton sayısına bağlı olduğunu buldu.

Dodds (1995), analog iletimde lazer performansını göstermek amacıyla tek mod Fabry-Perot yarıiletken lazerin bir modelini geliştirdi ve bu modelin bir yarıiletken lazer için oran denklemlerinin zaman domeninde simülasyonunu temel aldığını bildirdi.

Bjerkkan *et al* (1996), lazerin sürekli durum ve küçük sinyal analizi ölçümleri ile bulunan bir dizi yeni parametre kullanarak yarıiletken lazer oran denklemlerini tekrar geliştirdiler. Parametreleri üç farklı üretici firmanın 1550 nm lazerinden elde ettiler. Büyük sinyal ölçümleri ve ölçülen parametrelerin kullanıldığı simülasyonların karşılaştırmasının, modülasyon akımının eşik değerinin yeterince üstünde olduğu durumlar için iyi bir uyum gösterdiğini belirttiler.

Sayın ve Özyazıcı (1997), kazanç anahtarlama frekansının ultra kısa darbe üretimine etkisini, çoklu mod oran denklemleri temelli bir model kullanılarak incelediler ve çok kullanılan lazer parametrelerine ek olarak farklı lazer diyot materyallerine ve yapılarına karşılık gelen anahtarlama parametrelerinin bu modelde kullanıldığını belirttiler.

Yousefi *et al* (2003), yarıiletken lazerlerin çoklu boylamsal mod oran denklemlerinin tasvirini sunan çalışmalarında, uzaysal boşluk yanması gibi nedenlerden oluşan boylamsal modlar arası kazanç ilişkisini içeren bir model geliştirdiler. Modelde kullanılan parametrelerin simülasyonla karşılaştırmak üzere gerçek bir cihazdan elde edilmiş olduğunu bildirdiler.

Habibullah and Huang (2005), yarıiletken lazer oran denklemleri parametrelerinin çıkarılması için bir çalışma gerçekleştirdiler. Küçük sinyal ölçümlerini kullanarak oran denklemleri parametrelerini formülize ettiler ve elde edilen yeni denklemlerin analitik olarak çözülebileceğini belirttiler. Ek olarak, parametreler fonksiyonel ilişkilerle birbirlerine bağlı olduklarından oran denklemleri çözümlerinin hiç bir optimizasyona ihtiyaç duymadığını bildirdiler.

Gang *et al* (2006), cebirsel dinamikler metodunu kullanarak oran denklemlerinin zamana bağımlı katsayılarla tam analitik çözümlerini elde ettiklerini bildirdiler. Bu zamana bağımlı katsayıların pratik yarıiletken lazer parametrelerinin fiziksel mekanizmalarının etkin tanımlarını sağladığı ve tam çözümler ele alınarak InGaAsP lazerin emisyon ve dinamik özelliklerini tespit ettiklerini bildirdiler. Bu çalışmada, 1300 nm dalgaboyunda yayılım yapan yarıiletken lazer, sürekli dalga (CW–continuous wave) modunda çalışırken aktif bölgedeki elektron sayısının ( $N$ ), aktif bölgedeki foton sayısının ( $P$ ) ve lazer çıkış gücünün ( $L$ ) lazere uygulanan akıma karşı değişimleri incelendi. Bu değişimleri incelemek için MATLAB 7.04 yazılımı kullanılarak hazırlanan programla  $N-I$ ,  $P-I$  ve  $L-I$  grafikleri oluşturuldu. Ardından, lazerin çoklu mod (multi mode) çalışma durumu yine MATLAB’da hazırlanan başka bir programla simüle edildi. Lazerin spektral özelliklerinin çeşitli lazer parametrelerine bağlı değişimleri incelendi. Yine, aynı yazılım kullanılarak lazerin küçük sinyal analizi ve büyük sinyal modülasyon yanıtları da simüle edildi. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar, lazer parametrelerinin ve lazerin çeşitli fiziksel özelliklerinin lazerin çalışması üzerine etkilerini inceleme fırsatı vermiştir.

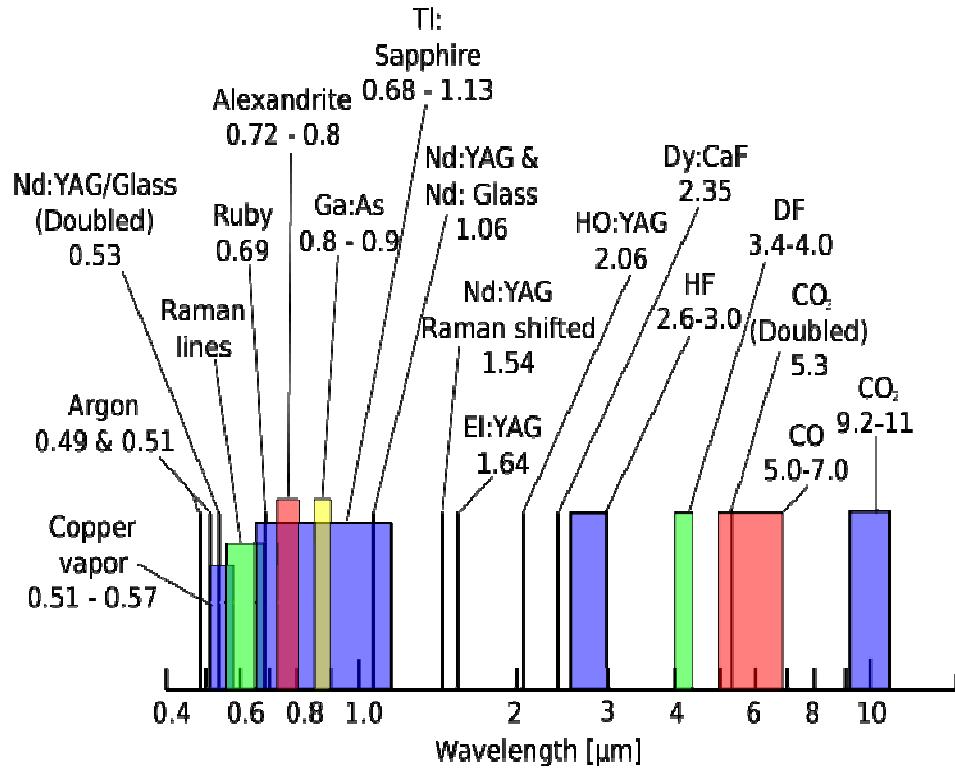
## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Lazer

Lazer, ışık demeti oluşturan bir aygıt olup bu ışık demetinin özellikleri şunlardır.

- 1- Işığın eş fazlıdır, bütün dalgalar birbiriyle tam uyumludur. Sadece bir lazer ışık demetine bir çift yarık koyarak değil, iki farklı lazerden gelen ışık demetleri kullanarak da bir girişim deseni elde edilebilir.
- 2- Işığın hemen hemen tek renklidir. Kavite modlarının çizgi genişliği oldukça küçük olmakla beraber lazer çıkışında birçok mod bulunabilir. Çizgi genişliklerinin çok küçük olmasından yararlanılarak, tek mod ve frekans sabitleme işlemleri ile yüksek spektral saflığa sahip lazer radyasyonu elde edilebilir.
- 3- Bir lazer ışık demetinde ıraksama hemen hemen hiç yoktur. Dünyadan, Apollo 11 seferinde ayda bırakılan bir aynaya gönderilen böyle bir ışık demeti, bir milyon kilometrenin dörtte üçünden fazla toplam yol gittikten sonra, dünyaya dönüşünde algılanabilecek kadar dar kalmıştır. Başka herhangi bir yolla oluşturulan bir ışık demeti, algılanamayacak kadar çok dağılırdı.
- 4- Işık demeti çok şiddetlidir, başka herhangi bir kaynaktan çıkan ışıktan daha şiddetlidir. Bazı lazer ışık demetlerinde bulunana eşit bir enerji yoğunluğu elde etmek için, sıcak bir cisim  $10^{30}$  K'de olmalıdır (Beiser 1997).

Lazer türleri katı hal lazerleri (Yakut, Nd–YAG, Nd–Cam lazerleri), gaz lazerleri (He–Ne, Ar–Ion, CO<sub>2</sub> lazerleri), sıvı lazerler (boya lazerler), plazma (X–Ray) lazerler, excimer lazerleri, fiber lazerler, serbest elektron lazerleri ve yarıiletken lazerler olarak sıralanabilir. Şekil 2.1 bazı lazerlerin yayılım yaptıkları dalgaboylarını göstermektedir.



Şekil 2.1. Bazı lazerlerin yayılım yaptıkları dalgaboyları

## 2.2. Yarıiletken Lazerler

Tüm lazerlerde ortak olan çalışma prensipleri, basit bir p–n eklemiyle yarıiletken lazerlerde de elde edilebilir (Vasil'ev 1995). İlk yarıiletken lazer ileri kutuplanmış bir GaAs ekleminden ibaretti. Teknolojik gelişmeler sonucunda 0.3 μm–100 μm

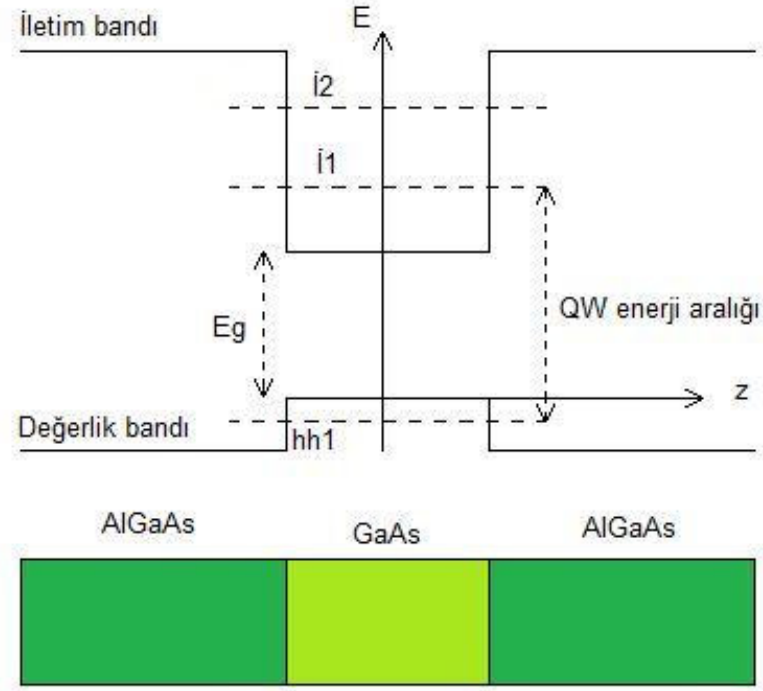
dalgaboyu aralığında ışımaya yapan çeşitli yarıiletken lazerler üretildi (Agraval and Dutta 1993).

### **2.2.1. Yarıiletken lazer türleri**

#### **2.2.1.a. Aktif tabaka kalınlıklarına göre lazer türleri**

Aktif tabaka kalınlığına göre lazerler külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta olarak dörde ayrılabilirler. Normal lazerlerde aktif tabaka kalınlığı tipik olarak 0.1  $\mu\text{m}$ –0.3  $\mu\text{m}$  civarındadır. Bu tip lazerler külçe lazerler (bulk lasers) olarak adlandırılırlar.

Kuantum çukur lazerlerde ise aktif tabaka kalınlığı elektronun yarıiletkendeki de Broglie dalgaboyunda olup 2–10 nm civarındadır. de Broglie dalgaboyu  $\lambda_d = h/p$  formülüyle hesaplanır. Burada  $h$ , Planck sabitini ve  $p$  elektron momentumunu göstermektedir. Örneğin GaAs'de de Broglie dalgaboyu 50 nm'dir. Aktif tabaka kalınlığı, elektronların de Broglie dalgaboyundan küçük olduğunda külçe yarıiletkenler için geçerli olan enerji–momentum ilişkisi artık geçerli değildir. Kuantum boyut etkisi iletim ve değerlik bantlarında oluşan potansiyel kuyulara taşıyıcıların gömülümünden kaynaklanır (Vasil'ev 1995). Şekil 2.2'de bu durum gösterilmektedir.



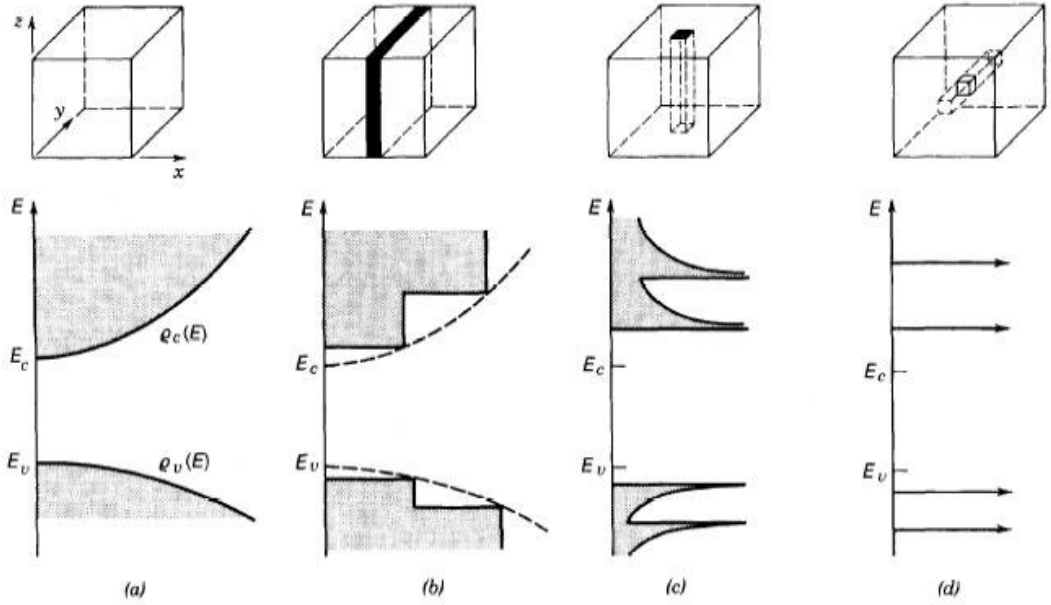
**Şekil 2.2.** Bir kuantum çukur yapısı

Kuantum çukur lazerlerin tek ve çoklu aktif tabakalı türleri üretilmiştir. Tek aktif tabakası olan kuantum çukur lazer, tekli kuantum çukur lazer (Single Quantum Well–SQW Laser) olarak isimlendirilir. Çoklu aktif tabakası olan lazer, çoklu kuantum çukur lazer (Multi Quantum Well–MQW Laser) olarak adlandırılır. Aralarındaki temel fark optik mod gömme (hapsetme) faktörünün ( $I$ ) SQW lazerlerde MQW lazerlere göre çok daha küçük olmasıdır. Bu nedenle SQW lazerler, MQW lazerlerle karşılaştırıldıklarında daha yüksek eşik taşıyıcı yoğunluğu ve daha yüksek eşik akım yoğunluğuna sahiptirler (Agraval and Dutta 1993).

Daha geniş bant aralıklı başka bir materyalle çevrenmiş, dikdörtgen kesitli, ince kablo şeklindeki bir yarıiletken materyal ise kuantum tel yapı olarak adlandırılır.

Bu tel elektronları ve boşlukları iki yönde dar bir bölgede hapseden bir potansiyel kuyu gibi davranır.

Kuantum nokta yapılarında ise elektronlar, noktasal bir hacme hapsedilmiştir (Saleh and Teich 1991). Şekil 2.3'te anlatılan yapıların gösterimleri ve bu yapılarla durumların (müsaade edilen enerji seviyelerinin) yoğunluğu (density of states) gösterilmektedir.



**Şekil 2.3.** Çeşitli hapsedme mekanizmalarında durum yoğunlukları: (a) Külçe; (b) kuantum çukur; (c) kuantum tel; (d) kuantum nokta

Şekilde gösterildiği gibi, kuantum tel lazerlerde, enerji azalan bir fonksiyona sahiptir ve kuantum teldeki alt bandlar, kuantum çukurdakinden daha dardır. Kuantum nokta lazerlerde ise müsaade edilen enerji seviyeleri ayrıktır.

### **2.2.1.b. Taşıyıcı hapsetme mekanizmasına göre lazer türleri**

Işığın veya taşıyıcıları gömme (hapsetme) mekanizmasına göre üç tür lazer diyot yapısı vardır.

1- Geniş alan (Broad Area) lazerler: Hapsetme için hiç bir yanal mekanizma yoktur.

2- Kazanç kılavuzlu (Gain Guided) lazerler: Hapsetme için kazancın yanal değişimleri kullanılır.

3- İndis kılavuzlu (Index Guided) lazerler: Hapsetme için yanal kırılma indisi değişimi kullanılır (Saleh and Teich 1991).

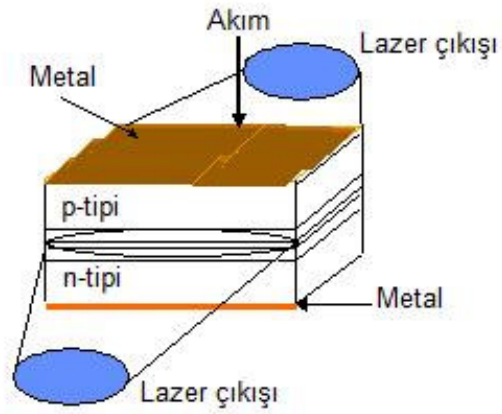
Lazere uygulanan akımın ve taşıyıcıların yanal gömülümü ile lazer verimliliği artırılabilir ve ışık çıkışının yayılma şekli uygulamalar için daha uygun hale getirilebilir. Optik alanın gömülümü etkin kırılma indisinin yanal değişimi materyal bileşimi veya dalga kılavuzu şekli değiştirilerek sağlanabilir. Eklem düzlemine dik doğrultuda aktif ve kılıf tabakaları arasındaki kırılma indisi süreksizliği (farklılığı) ara yüzelerde görülen toplam iç yansımayla optik alan gömülümünü sağlar.

Kazanç kılavuzlu lazerlerde akımın uygulandığı şerit, taşıyıcıların yanal yönde yayılımını sınırlar. Bu doğrultudaki optik alan gömülümü, aynı olmayan kırılma indisi dağılımı ve kazanç–kayıp nedeniyledir. Optik kazanç–kayıp sabiti ile kırılma indisinin birbirleriyle çok ilişkili olması nedeniyle, kazanç kılavuzlu lazerlerde kılavuzlama etkisinin ana kaynağının belirlenmesi zorlaşmaktadır. Kırılma indisinde görülen küçük bir değişim kazanç–kayıpta değişime neden olur.

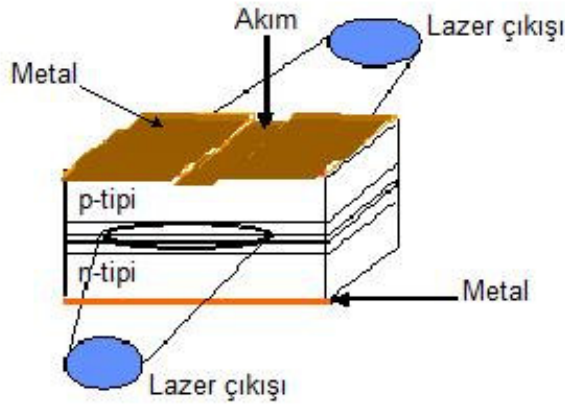
Kazanç-kayıpta meydana gelen küçük bir değişim de kırılma indisinin değişmesine neden olur. Şerit geometrili diyot lazerlerde kırılma indisi şerit merkezinde daha düşüktür. Bu durum anti-kılavuzlama etkisi yapar ve bu durumun üstesinden sadece keskin tepeli bir kazanç profili ile gelinir. Bu durumda ışık üretimi şerit boyunca gerçekleşirken şerit kenarlarında çok daha fazla ışık soğrulur. Geniş şeritler (7  $\mu\text{m}$ 'den 10  $\mu\text{m}$ 'ye kadar) için kendiliğinden odaklanma etkisi ve daha yüksek yanal mod oluşumu görülebilir.

İndis kılavuzlu lazerlerde ise, ek olarak blok tabakaları nedeniyle oluşan yanal indis basamakları mod gömülümünü sağlar. Kazanç kılavuzlu lazerler uzun dalgaboyunda daha kötü sonuçlar veren özelliklere sahiptirler. Bu nedenle indis kılavuzlu lazerler geliştirilmiş ve bu lazerlerin üstün performansları nedeniyle çok daha fazla tercih edilir olmuşlardır (Vasil'ev 1995). İndis kılavuzlu lazerlerin hassas fabrikasyonu ile ışık-akım eğrisinde kinkler (optik vericilerde gürültü oluşumuna neden olan olay) görülmez. Çıkış tek modludur ve eşik akımı çok küçüktür. Tabii ki elektronik özelliklerinin tümünden yararlanmak için aktif tabaka çoklu kuantum çukur olmalıdır (Sing 1995).

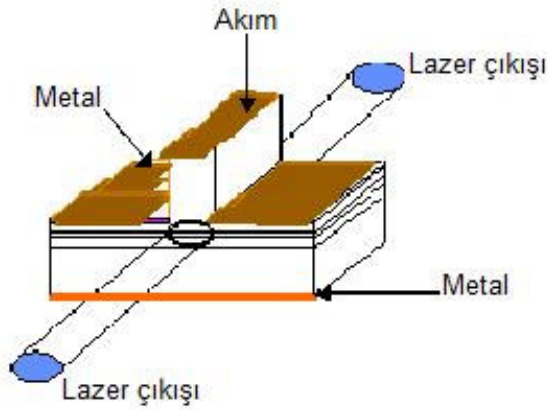
Aşağıdaki şekilde lazer yapıları gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 2.4.** Lazer diyot yapıları (a) Geniş alan lazer yapısı; (b) kazanç kılavuzlu lazer yapısı; (c) indis kılavuzlu lazer yapısı

### 2.2.2. Yarıiletken lazerlerin çalışma prensibi

Lazerlerde ışık çıkışının oluşabilmesi için iki şart vardır.

- 1- Optik kazanç
- 2- Optik geri besleme

Yarıiletken lazerin çalışma prensibi diğer lazer türlerinininki ile aynıdır. Yani tersinir popülasyon sağlanarak uyarılmış emisyonun, soğurmadan baskın olması sağlanmaktadır. Popülasyon tersinmesi için p–n eklemine ileri kutuplama voltajı uygulanır ve elektrik akımının p–n eklemine enjeksiyonu sağlanır (Saleh and Teich 1991).

p–n eklemının harici bir voltaj kaynağı ile ileri kutuplanması, elektron ve boşlukların difüzyonunu ve eklem bölgesine sürüklenmelerini mümkün kılar. Dar bir boşalma bölgesinde elektron–boşluk çiftleri ışımali ve ışımaz olarak rekombine olurlar. Yani, yarıiletkenlerden lazer oluşumu yük taşıyıcıların (elektronların ve boşlukların) karşılıklı bantlarda rekombine olmalarıyla foton açığa çıkışıyla sağlanır (Vasil'ev 1995).

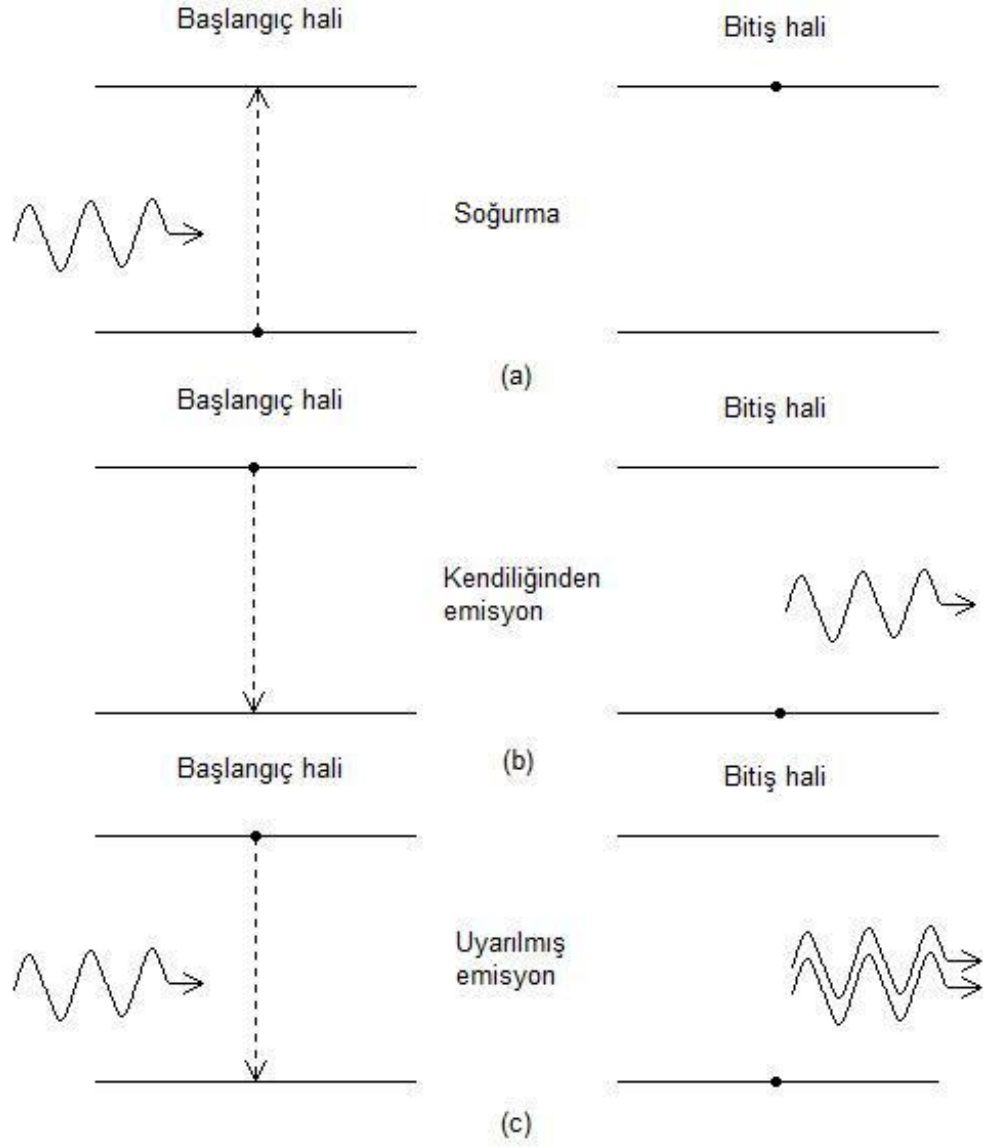
Işınımsal olmayan rekombinasyonlar lazer operasyonuna yardımcı değildirler ve bunların oluşumu, noktasal kusurlar ve kristal yapı düzensizlikleri (dislocations) kontrol edilerek minimum hale getirilmeye çalışılır.

Akım uygulandığı anda uyarılmış emisyon oluşmasına rağmen akım, eşik akımı olarak adlandırılan belirli bir değere ulaşmadan lazer, uyumlu bir ışık çıkışı vermez. Bunun nedeni foton soğurularak elde edilen elektron–boşluk çifti üretimi

sırasında uyarılmış emisyonun soğurmayı yenmek zorunda olmasıdır. Genellikle değerlik bandındaki elektron popülasyonu iletim bandındakinden çok daha fazla olduğundan ilk durumda soğurma baskındır. Akımın belirli bir değerinde iletim bandında bulunan yeterli sayıdaki elektronlar yarıiletkeni optik açıdan saydam (transparent) hale getirir. Akımın daha fazla artmasıyla yarıiletken lazerin aktif bölgesinde optik kazanç ortaya konur ve içinden geçen elektromanyetik radyasyonu yükseltebilir. Kendiliğinden (spontane) emisyonla ortaya çıkan fotonlar yükseltme işleminde gürültüye neden olurlar (Agraval and Dutta 1993).

Yarıiletken lazer teorisi diğer lazer teorilerine göre çok daha karmaşıktır. Çünkü geçişler oldukça ayırık enerji seviyeleri yerine yakın yerleşmiş enerji seviyeleri arasındadır. Karşılaştırma amacıyla yarıiletken lazerler iki üst seviyesi iletim bandında ve iki alt seviyesi değerlik bandında bulunan dört seviyeli lazer sistemlerine benzetilebilirler (Saleh and Teich 1991).

Aşağıdaki şekilde iki enerji seviyeli bir lazer sistemi için soğurma, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon mekanizmaları gösterilmektedir.



**Şekil 2.5.** (a) Soğurma, (b) kendiliğinden emisyon ve (c) uyarılmış emisyon durumları için enerji seviyesi diyagramı. Siyah nokta atomun geçişten önce ve sonra bulunduğu yeri gösterir

Lazerin çalışması için gereken ikinci unsur olan optik geri besleme, yarıiletken malzemenin kristal düzlemi boyunca kırılması (cleaving) ile sağlanır. Bu şekilde elde edilen kavitenin (cavity) iki görevi vardır. Bunlardan birincisi, sadece eksen boyunca hareket eden fotonları ileri ve geri yansıtarak uyarılmış emisyonun

yönünü seçmek, ikincisi ise, kavitenin boylamsal modlarına karşılık gelen dalgaboyları için geri beslemeyi daha güçlü yaparak dalgaboyu seçiciliğini sağlamaktır (Agraval and Dutta 1993).

## 2.3. Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi

### 2.3.1. Oran denklemleri

Bir yarıiletken lazerin statik, dinamik ve spektral karakteristikleri ile fotonlar ve elektronlar arasındaki karşılıklı etkileşmeler, oran denklemleri (rate equations) ile tanımlanabilir. Yani, oran denklemleri elektronlar ve fotonlar arasında vuku bulan enerji transfer oranını tanımlar. Bu denklemler, dalga denkleminde elde edilebilirler.

#### 2.3.1.a. Elektron oran denklemi

Elektron oran denklemi,

$$\frac{dN}{dt} = I/q - \gamma_e N - GP \quad (2.1)$$

ile verilir.

Burada  $N$  elektron sayısı,  $I$  akım,  $q$  elektron yükü ( $1.6 \times 10^{-19}$  C),  $\gamma_e$  taşıyıcı rekombinasyon oranı,  $G$  kazanç ve  $P$  foton sayısıdır.

Denklemdaki ilk terim, aktif bölgeye pompalanan akım oranını, ikinci terim spontane emisyon oranını ve son terim de uyarılmış emisyon oranını gösterir.

Elektron oran denklemini tamamlamak için gerekli olan  $\gamma_e$  ve  $G$  aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\gamma_e = (A_{nr} + Bn + Cn^2) = \tau_e^{-1} \quad (2.2)$$

Burada  $A_{nr}$  ışınımsal olmayan rekombinasyon oranı,  $B$  ışınımsal rekombinasyon oranı,  $C$  Auger rekombinasyon oranı,  $\tau_e$  taşıyıcı yaşam süresi ve  $n$  taşıyıcı yoğunluğudur.

Kazanç ise,

$$G = \Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g \quad (2.3)$$

olarak verilir.

Burada  $\Gamma$  hapsetme (gömme) faktörü,  $c$  ışık hızı,  $a$  kazanç sabiti,  $V$  lazerin aktif tabaka hacmi, ve  $\mu_g$  grup kırılma indisidir.  $n_0$  ise saydamlığı (nüfus tersinmesinin başlangıcına tekabül eden durumu) sağlayabilmek için gerekli olan taşıyıcı yoğunluğudur.

### 2.3.1.b. Foton oran denklemi

Foton oran denklemi,

$$\frac{dP}{dt} = (G - \gamma)P + R_{sp} \quad (2.4)$$

ile verilir.

Burada  $P$  foton sayısı,  $\gamma$  foton zayıflama oranı ve  $R_{sp}$  kendiliğinden emisyon oranıdır. Foton zayıflama oranı, kavite içindeki foton yaşam süresi ( $\tau_p$ ) ile ilgilidir ve  $\gamma = 1/\tau_p$  şeklinde de hesaplanabilir.

Denklemdaki birinci terim, uyarılmış emisyonu, ikinci terim foton yaşam süresi ile karakterize edilen kaybı ve son terim de kendiliğinden emisyon oranını göstermektedir.

$R_{sp}$  aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$R_{sp} = \beta_{sp} N^2 B / V \quad (2.5)$$

Burada  $\beta_{sp}$  kendiliğinden emisyon faktörüdür ve pratikte bir uygunlaştırma faktörü gibi davranır. Örneğin indis kılavuzlu AlGaAsP lazerler için sayısal değeri  $10^{-4}$ – $10^{-5}$  arasındadır.

### 2.3.1.c. Yarıiletken lazerin çıkış gücü

Eşit yansıtıcılı iki yüze sahip bir yarıiletken lazer için çıkış gücü ( $P_{çıkış}$ ) denklem şöyle ifade edilir.

$$P_{çıkış} = \frac{1}{2} \hbar \omega \vartheta_g \alpha P \quad (2.6)$$

Bu denklemde  $\hbar = h/2\pi$  'dir ve  $h$  Planck sabitinin değeri  $6.626 \times 10^{-34}$  Js 'dir.  $\nu$ , lazerin yayılım yaptığı frekansı göstermek üzere  $\omega = 2\pi\nu$  açısal frekanstır.  $\vartheta_g$ , lazerde yayılan modların grup hızını,  $\alpha$  ise lazer kayıplarını göstermektedir.

### 2.3.2. Lazer sürekli durum karakteristiği

Lazer sürekli dalga (CW) modunda çalışırken oran denklemlerinde zamana bağımlı tüm türevler sıfıra eşitlenerek, lazerin geçici durumları sona erdikten sonraki sürekli durum karakteristikleri elde edilir. Lazer performansı karakterize edilirken genellikle iki sürekli durum özelliği ile ilgilenilir. Bunlardan ilki ışık akım (L–I) eğrisi ve ikincisi boylamsal mod spektrumudur. L–I eğrisi uygulanan akımla çıkış gücünün nasıl değiştiiğini gösterir. Boylamsal mod spektrumu ise belirli bir akım değeri için gücün çeşitli modlar boyunca nasıl dağıldığını gösterir.

#### 2.3.2.a. L–I eğrisi

Genel durumda çoklu mod oran denklemleri akla gelse de, tek mod oran denklemleri ile lazer eşik akımının basit fiziksel tanımı yapılabilir ve L–I eğrisi elde edilebilir. Sürekli durum için foton oran denkleminin zamana bağlı tüm türevleri sıfıra eşitlenerek foton sayısı (2.7) denklemi ile hesaplanabilir.

$$P = R_{sp}/(\gamma - G) \quad (2.7)$$

Bu eşitlik, lazerin gürültü yenileyici bir yükselteç gibi düşünölebileceğini vurgular. Kendiliğinden emisyonla üretilen fotonlar bir gürültü girişi sağlarlar ve enjekte edilen taşıyıcılar tarafından sağlanan bir kazancın varlığında, bu gürültü yükseltilir. (2.7) denklemi ihtiyaç duyulan kazancın kavite kayıp seviyesinden

hafifçe aşağıda olduğunu ve çıkış gücünün artışıyla  $G$ 'nin,  $\gamma$ 'nın asimptotik değerini yakalayacağını gösterir.

Belirli bir akım değeri için aktif bölgedeki elektron sayısı sürekli durumda sabit olduğundan, elektron oran denkleminin zamana bağlı tüm türevleri sıfıra eşitlenir ve (2.8) denklemi elde edilir. L-I eğrisini elde etmek için (2.7) denklemi, (2.8) denkleminde yerine konur ve (2.9) denklemi elde edilir.

$$I/q = \gamma_e N + GP \quad (2.8)$$

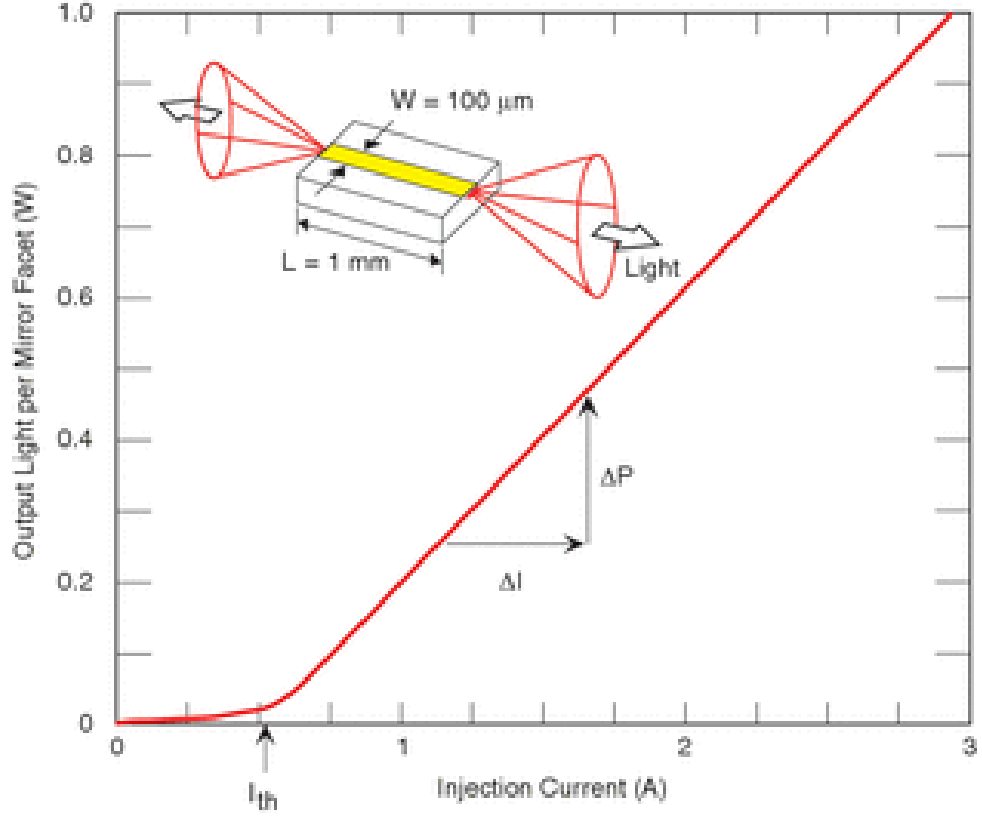
$$\gamma_e(N)N + R_{sp}(N)G/(\gamma - G) = I/q \quad (2.9)$$

(2.9) denkleminde elektron sayısı  $N$ , belirli akım değerleri için hesaplanabilir. Ancak bunun yapılabilmesi için kazancın elektron sayısına bağımlılığının bilinmesi gerekir. Tek mod oran denklemlerinde  $G$  kazancının, çoklu mod kazancının tepe değerine tekabül ettiğine dikkat edilmelidir. Çünkü kazancın tepe değerine en yakın boylamsal mod eşik değerini önce geçmektedir. Kazancın elektron sayısına lineer bağımlılığı (2.3) denkleminde görüldüğü gibidir. Bu denklemin farklı bir yazılışı (2.10) denkleminde görülmektedir.

$$G(N) = \Gamma \vartheta_g a(N/V - n_0) \quad (2.10)$$

(2.2), (2.5) ve (2.10) denklemlerinin (2.9) denkleminde yerine konması ile  $N$ 'e bağlı dördüncü dereceden bir polinom elde edilir. Bu polinom yardımıyla, elektron sayısı  $I$  akımına bağlı olarak hesaplanabilir. Bulunan elektron sayısı, (2.7) denkleminde yerine konularak foton sayısı  $P$  hesaplanabilir. Son olarak, bulunan foton sayısı, (2.6) denkleminde yerine konularak çıkış gücü hesaplanabilir.

Şekil 2.6’de örnek L–I eğrisi gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Örnek L–I eğrisi

Foton sayısının, lazer eşığının geçilmesiyle hızla arttığına dikkat edilmelidir. Eşik akımı civarında L–I eğrisinin eğiminin hızla değişmesi uyarılmış emisyonun, kendiliğinden emisyona göre ön plana çıktığının ve spektral genişliğin daralması gibi bazı karakteristik özelliklerin oluştuğunun göstergesidir. Eşik akımı civarında foton sayısı önemli ölçüde değişir. Buna rağmen lazer eşığının keskinliği  $\beta_{sp}$ 'ye bağlıdır.

Elektron sayısı, eşik akımının üstündeki akım değerlerinde neredeyse sabittir. Yani, eşik akımının üstünde akımın artırılmasıyla önemli ölçüde değişmez. (2.7) denkleminde anlaşılabileceği gibi kazancın, foton zayıflama oranına yakın

değerleri için elektron sayısındaki küçük bir değişim, aynı miktarda kazançta da küçük bir değişime neden olur ve foton sayısında büyük bir artış olur. Elektron sayısını sınırlayan eşik taşıyıcı popülasyonu,  $N_{th}$  olarak ifade edilir ve  $G=\gamma$  durumundaki elektron sayısına tekabül eder.

Pratik bir bakış açısıyla, lazerde asıl ilgilenilen özellik eşik akımıdır. Kendiliğinden emisyonun varlığında eşik akımı belirlenemez. Kendiliğinden emisyonun artışıyla lazer çıkışı olmayan durumdan lazer çıkışı olan duruma geçiş daha yumuşak olur. Alışıl gelmiş olarak  $\beta_{sp}=0$  kabul edilerek eşik akımı hesaplanabilir. Bu durumda  $R_{sp}$  de sıfıra eşit olur ve (2.11) denklemi elde edilir.

$$I_{th} = q\gamma_e(N_{th})N_{th} \quad (2.11)$$

Bu denklemde  $N_{th}$  hesaplanırken,  $G(N_{th})=\gamma$  kabul edilmiştir. Bu eşitlikle hesaplanan akım miktarı lazerin aktif bölgesinden geçen akım miktarını göstermektedir ve gerçek cihaz akımı genelde daha yüksektir. Bunun nedeni aktif bölge dışına akan kaçak akımların varlığıdır.

Oran denklemlerinde eksensel modların yoğunluklarının ihmal edildiğini ve L-I eğrisinin ısıya bağımlılığının yüksek olduğunu unutmamak gerekir.

### 2.3.2.b. Boylamsal mod spektrumu

Bir yarıiletken lazerin güç spektrumu bir spektrometre kullanılarak incelendiğinde güçleri akımla değişen bir kaç boylamsal mod görülür. Yarıiletken lazerlerin bu çok modlu doğası ilk zamanlardan beri ilgi konusu olmuştur. Bir yarıiletken lazerin spektral karakteristiğini belirlemede kendiliğinden emisyonun önemli bir rol oynadığına inanılmaktadır. Boylamsal mod sayısı ve bunların şiddetleri gibi

önemli spektral özellikleri belirlemede çoklu mod oran denklemleri kullanılır. Bu denklemlerin basit şekilleri güçlü indis kılavuzlu cihazların analizinde uygulanabilir. Çoklu mod oran denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilirler.

$$\frac{dP_m}{dt} = (G_m - \gamma_m)P_m + R_{sp}(\omega_m) \quad (2.12)$$

$$\frac{dN}{dt} = I/q - \gamma_e N - \sum_m G_m P_m \quad (2.13)$$

Bu denklemlerdeki m indisi, ilgili boylamsal modu ifade etmektedir. Çoklu mod oran denklemlerini çözebilmek için kazanç spektrumu  $G_m$  ( $G_m = G(\omega_m)$ ) bilinmelidir. Deneysel olarak elde edilen veya nümerik olarak hesaplanan kazanç spektrumunun fonksiyonel bir ifadesi yoktur. Basit bir yaklaşım kazancın tepe değerinden karesel olarak azaldığıdır.

Eşik akımının altında veya yakınlarındaki akım değerlerinde güç tüm modlarda artar. Ancak eşik akımının üstünde ana mod gücü tek mod durumundaki gibi artarken yan modlardaki güç doyuma gider. Bir yan moddaki doyum gücü kendiliğinden emisyon faktörü  $\beta_{sp}$ 'ye bağlıdır ve  $\beta_{sp}$ 'deki artışla artar, azalışla azalır. Pratikte boylamsal mod spektrumu ve kazanç asimetriktir. Ancak nümerik hesaplamalarda simetrik alınabilir.

Yarıiletken lazerlerin spektral saflığının bir ölçüsü olarak mod bastırma oranı (MSR–mode suppression ratio) tanımlanmıştır. MSR, ana mod gücünün en şiddetli yan mod gücüne oranıdır. Ana mod gücünün artışıyla MSR artar. Lazerin tek modda çalışması büyük MSR değerine işaret eder. Gerçek hayatta lazerlerin tek boylamsal modla çalışması söz konusu değildir. Lazerin tek modda çalışması MSR değerinin belirlenmesine bağlıdır ve bu amaçla MSR değerinin 20 olduğu durum sıkça kullanılır.

## 2.4. Modülasyon Yanıtı

Yarıiletken lazerlerin en önemli avantajlarından biri doğrudan modüle edilebilmeleridir. Lazer akımı modüle edilerek optik haberleşme sistemleri için kullanışlı olan kısa optik dalgalar kolaylıkla elde edilebilir. Cihazın kendine özgü direnci nedeniyle modülasyon yanıtı, sönümlü osilasyon frekansı  $\Omega_R$ 'de tepe değerine ulaşır ve modülasyon frekansı  $\omega_m$ 'nin,  $\Omega_R$ 'den daha büyük olduğu durumlarda modülasyon verimi hızla düşer.

Kendiliğinden emisyon, taşıyıcı difüzyonu ve uzaysal boşluk yanması gibi mekanizmalar sönümlü osilasyon pik değerinin bastırılmasının nedeni olarak öne sürülmüştür (Agraval and Dutta 1993).

Kendiliğinden faz veya frekans modülasyonlarına (FM) neden olan genlik modülasyonu (AM), yarıiletken lazerin karakteristik özelliklerindedir. Doğrudan akım modülasyonu şartlarında AM ve FM arasındaki bağlantı band genişliği artırma faktörü  $\beta_C$  tarafından belirlenmektedir. AM ve FM'nin eş zamanlı olarak ortaya çıkmasının bir sonucu olarak doğrudan modüle edilmiş yarıiletken lazerlerin mod frekansı, her bir modülasyon döngüsünde periyodik olarak kayar. Bu olgu 1.5  $\mu\text{m}$  optik iletişim sistemlerinin performansını sık sık sınırlayan bir faktör olduğundan son zamanlarda bu olguya çok ilgi gösterilmektedir. Diğer taraftan aynı fiziksel olgu doğrudan frekans modülasyonu için ahenkli optik iletişim sistemlerinde kullanışlı bir tekniktir.

### 2.4.1. Küçük sinyal analizi

Tek mod oran denklemleri kullanılarak modülasyon karakteristikleri açıklanabilir. Gürültü kaynakları olmaksızın bu denklemler aşağıdaki şekli alırlar.

$$\frac{dP}{dt} = (G - \gamma)P + R_{SP} \quad (2.14)$$

$$\frac{dN}{dt} = I/q - \gamma_e N - GP \quad (2.15)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = -(\omega_0 - \omega_{th}) + \frac{1}{2}\beta_c(G - \gamma) \quad (2.16)$$

2.16 denklemi faz oran denklemi olarak bilinir ve elektron sayısı değişimi nedeniyle ortaya çıkan indis değişiminin lazer modlarının frekanslarına etkisini gösterir (Agraval and Dutta 1993).

Direk modülasyon altında cihaz akımı zamana bağlıdır ve iki akım bileşeni içerir.

$$I(t) = I_b + I_m(t) \quad (2.17)$$

Modülasyonun yokluğunda lazer,  $I_b$  kutuplama akımında sürekli olarak çalışır. Modülasyon akımı  $I_m(t)$ 'nin etkisi, modülasyon frekansı  $\omega_m$  ile sürekli olarak değişen  $\delta P(t)$ ,  $\delta N(t)$  ve  $\delta\phi(t)$ 'nin türetilmelerini açıklamak içindir. Küçük sinyal analizinde  $I_m(t)$ , yeterince küçük kabul edilir. Öyle ki,  $\delta P(t) \ll P$ ,  $\delta N(t) \ll N$  ve  $\delta\phi(t) \ll \phi$ 'dir. Bunun geçerliliği için genel kriter olarak modülasyon derinliği kullanılır ve modülasyon derinliği aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$m = \frac{(\delta P)_{max}}{P} = \frac{[I_m(t)]_{max}}{I_b - I_{th}} \quad (2.18)$$

Küçük sinyal analizi sadece  $m \ll 1$  olduğunda geçerlidir.  $m \ll 1$  olduğu kabul edilerek  $\delta P(t)$ ,  $\delta N(t)$  ve  $\delta \phi(t)$  için oran denklemleri, (2.14)–(2.17) eşitlikleri kullanılarak lineerleştirilebilirler. Sonuç olarak aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\delta \dot{P} = -\Gamma_P \delta P + (G_N P) \delta N \quad (2.19)$$

$$\delta \dot{N} = -\Gamma_N \delta N + G \delta N + I_m(t)/q \quad (2.20)$$

$$\delta \dot{\phi} = \frac{1}{2} \beta_C G_N \delta N \quad (2.21)$$

Bu eşitlikler  $\partial R_{sp}/\partial N \ll G_N P$  ve  $G_P P \ll G$  ifadeleri kullanılarak basitleştirilmiştir. Bu denklemlerin frekans domeninde Fourier analizi kullanılarak elde edilen çözümleri aşağıdaki gibidir.

$$\delta \tilde{P}(\omega) = \frac{G_N P \tilde{I}_m(\omega)/q}{(\Omega_R + \omega - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega + i\Gamma_R)} \quad (2.22)$$

$$\delta \tilde{N}(\omega) = \frac{(\Gamma_R + i\omega) \left( \frac{\tilde{I}_m(\omega)}{q} \right)}{(\Omega_R + \omega - i\Gamma_R)(\Omega_R - \omega + i\Gamma_R)} \quad (2.23)$$

$$\delta \tilde{\phi}(\omega) = \frac{\beta_C}{2i\omega} [G_N \delta \tilde{N}(\omega)] \quad (2.24)$$

$$\tilde{I}_m(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} I_m(t) \exp(-\omega t) dt \quad (2.25)$$

Sönümlü osilasyon bozulma oranı  $\Gamma_R$  ve frekansı  $\Omega_R$  aşağıdaki eşitliklerle ifade edilirler.

$$\Gamma_R = \frac{1}{2}(\Gamma_N + \Gamma_P) \quad (2.26)$$

$$\Omega_R = \left[ (G + G_P) \left( G_N P + \frac{\partial R_{sp}}{\partial N} \right) - \frac{(\Gamma_N - \Gamma_P)^2}{4} \right]^{1/2} \quad (2.27)$$

Burada,  $\Gamma_N$  küçük sinyal taşıyıcı bozulma oranı ve  $\Gamma_P$  küçük sinyal foton bozulma oranıdır.  $G_N$  ve  $G_P$  ise kazancın sırasıyla  $N$ 'ye ve  $P$ 'ye göre türevleridir.

(2.22)–(2.24) eşitlikleri modülasyon akımı değişimleri ile aktif bölgede foton ve taşıyıcı popülasyonları değişimlerini gösterir. Buna rağmen lazerin özdirenci yüzünden modülasyon yanıtı frekansa bağımlıdır. (2.25) ifadesi ise modülasyon akımının Fourier transformudur ve benzer ilişki  $\delta P(t)$ ,  $\delta N(t)$  ve  $\delta \varphi(t)$  için de vardır.

#### 2.4.2. Büyük sinyal modülasyonu

Küçük sinyal analizi, modülasyon cevabının parametresel bağımlılığını öngörmeye kullanışlı olsa da pratik şartlarda yeterince geçerli değildir. Optik haberleşme sistemlerinde kullanmak için yarıiletken lazerler genellikle eşğin altında veya eşğe yakın kutuplanırlar ve modülasyon derinliği  $m$ , geçerlilik kriteri olan  $m \ll 1$ 'i sağlayamaz. Bu nedenle lineer olmayan etki önemli bir rol üstlenmeye başlar ve oran denklemlerinin sayısal analizi bir gereklilik halini alır.

Nümerik simülasyonlar, sinüzoidal modülasyon yapılırken modülasyon derinliği arttırılırsa, gücün sinüzoidal değişmeyeceğini ortaya çıkarır.

Büyük sinyal modülasyonu altında optik yanıt sönümlü osilasyonlarla bağlantılı olan ve birbirini takip eden dar darbe formunu alır. Ana darbe sönümlü osilasyonların ilk tepesine tekabül eder. Modülasyon derinliği arttığı için takip eden darbe tepeleri güçlüce bastırılır ve çıkış kısa optik darbe formunu alır. Bu yolla büyük sinyal modülasyonu kısa optik darbeler üretmek için kullanılabilir. Bu teknik kazanç anahtarlama (gain switching) tekniği olarak adlandırılır.

Yarıiletken lazerler, dijital elektriksel bit dizilerinin (1 ve 0'ları rastgele bir sıra ile içeren), mümkün olduğunca küçük bozulma ile optik karşılıklarını elde etmek için kullanılırlar. Lazerin sıfır biti müddetince kapanmaması için eşige yakın kutuplanır.

Optik darbe sınırlı yükseliş ve düşüş zamanlarına sahiptir ve sönümlü osilasyonlarla ilgili özellikler sergiler. Optik darbe, elektriksel darbenin tam bir eşleniği olmaktan uzak olsa da, bilgiyi fiber boyunca iletmede kullanılabilir.

Küçük sinyal modülasyonu durumuna benzer olarak ışık çıkışında güç değişimlerine hatırı sayılır frekans kayması ile sonuçlanan faz değişimi tarafından eşlik edilir. Lazer frekansı darbenin öndeki kenarının yakınında yüksek frekansa (mavi) ve ardından darbenin takip eden kenarının yakınında düşük frekansa (kırmızı) doğru kayar. Optik haberleşme sistemleri için frekans kayması gibi olaylar zararlıdır. Çünkü bu olay fiber optikte alışılmamış bozulma rejimi nedeniyle optik darbenin önemli derecede genişlemesine neden olur. Kaymanın fiziksel temeli yarıiletken lazerde bant genişliği artırma faktörü  $\beta_C$  tarafından yönetilen, genlik eşleşmesiyle bağlantılıdır. Düşük  $\beta_C$  değerli yarıiletken lazerler çeşitli optik uygulamalarda tercih edilir. Bu parametre genelde çoklu kuantum çukur (MQW) lazerler için düşüktür ve zorlanmış MQW yarıiletken lazerlerde daha da küçültülmüştür.

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1. MATLAB ile Yarıiletken Lazerin Karakterizasyonu**

Bu çalışmada, yarıiletken lazerleri MATLAB’de geliştirdiğimiz yazılım ile modelledik. Bilindiği gibi, MATLAB’in önemli üstünlüklerinden birisi birçok klasik algoritmayı bir kaç komut ile kullanıcının hizmetine sunmasıdır. Böylece, hem ana programın sona ermesi kısalmakta, hem de bellek gereksinimi azalmaktadır. MATLAB, geleneksel programlama dillerinin aksine programı derleyip çalıştırılabilir bir dosya haline getirmeden, yorumlayarak çalıştırır. Böylece programın hatalardan arınması sürecinde ciddi bir zaman tasarrufu da sağlanmış olur (Arifoğlu 2005).

MATLAB programlama dilini seçmemizin nedeni, MATLAB’in sahip olduğu aşağıdaki üstünlüklerdir:

- Teknik hesaplamalar için yüksek seviyeli bir dildir. Kodların, dosyaların ve verilerin düzenlenmesi için bir geliştirme ortamıdır.
- İteratif tasarım ve problem çözme yöntemleri için interaktif araçlar sunar.
- Lineer cebir, istatistik, Fourier analizi, filtreleme, optimizasyon ve sayısal integrasyon için matematik fonksiyonlar hesaplayabilir.
- Verilerin görselleştirilmesi için iki ve üç boyutlu grafik araçları bulunmaktadır.

- Grafik ara yüzler tasarlamak için araçları vardır.
- Ortam bağımlı gibi görünse de Linux versiyonu da bulunmaktadır.
- Hızlı bir şekilde ve kolayca öğrenilebilir.

### 3.2. Yarıiletken Lazer Sürekli Durum Karakteristiğinin Elde Edilmesi

(2.2) denklemi, (2.7) denklemi ve (2.10) denklemi (2.8) denkleminde yerine yazılarak  $N$ 'e bağlı dördüncü dereceden bir polinom elde edilmiştir.  $\gamma$  değerini bulabilmek içinde aşağıdaki denklem kullanılmıştır.

$$\gamma = \vartheta_g(\alpha_{int} + \alpha_m) \quad (3.1)$$

$$\alpha_m = 1/L \ln 1/R \quad (3.2)$$

(3.1) denkleminde  $\alpha_{int}$  ve  $\alpha_m$  sırasıyla lazer dahili kaybını ve yüz kaybını göstermektedir. (3.2) denkleminde kullanılan R ayna yansıtıcılığıdır.

(3.1) ve (3.2) denklemlerinin elde edilen dördüncü derece polinomda yerine yazılmasıyla ortaya çıkan polinom akımın değişik değerlerine göre çözülür ve ilgili  $N$  değerleri bulunarak N–I grafiği elde edilir.

Bulunan  $N$  değerleri (2.10) denkleminde yerine yazılır ve kazanç hesaplanır. Hesaplanan elektron sayısı ve kazanç değerleri, (2.7) denkleminde kullanılarak

foton sayısının akıma göre değişimi hesaplanmış olur. Elde edilen değerlerle P–I grafiği çizilebilir.

Bulunan foton sayısı değerleri aşağıdaki çıkış gücü denkleminde yerine yazılarak L–I grafiği elde edilir.

$$P_{\text{Çıkış}} = 0.5hc\vartheta_g\alpha_m P / \lambda \quad (3.3)$$

(3.3) denkleminde  $h$  Planck sabiti,  $c$  ışık hızı ve  $\lambda$  lazerin ışıma yaptığı dalgaboyunu göstermektedir.

### 3.3. Yarıiletken Lazerlerin Boylamsal Mod Spektrumunun Elde Edilmesi

Boylamsal kavite modları, rezonans şartını sağlarlar. Kavite boyu  $L$ 'ye bağlı olarak rezonans şartı aşağıdaki denkleminde ifade edildiği gibidir.

$$\lambda_m = 2nL/m \quad (3.4)$$

Bu denklemde  $n$ , lazer ortamının kırılma indisidir ve  $\lambda_m$ ,  $m$ . modun boşluktaki dalgaboyudur. İki mod arasındaki mesafe ( $\delta\lambda$ ) ise (3.5) denklemindeki gibi ifade edilebilir.

$$\delta\lambda = \lambda_m - \lambda_{m-1} = \lambda_m^2 / (2\mu_g L) \quad (3.5)$$

Bu denklemde  $\mu_g$  grup kırılma indisidir (Lee *et al.* 1982).

(3.5) denklemi kullanılarak ana mod ve bu moda en yakın modlar arasındaki mesafe bulunur. Bu sonuç tüm modlar arasındaki mesafe eşit kabul edilerek ve kazancın tepe değerine karşılık gelen dalgaboyuyla, sıfıra düştüğü noktalara karşılık gelen dalgaboyu arasındaki fark kullanılarak, kaç boylamsal modun bu aralıkta yayılım yaptığını belirlemede kullanılmıştır. Kazancın tepe değerinden karesel olarak azaldığını farz eden bir kazanç profili (3.6) denkleminde gösterildiği gibi yazılmıştır.

$$G_m = G_0(1 - (m/M)^2) \quad (3.6)$$

Bu denklemde  $G_0$  kazancın maksimum değerini,  $2M+1$  boylamsal mod sayısını ve  $m$ ,  $-M$ ,  $+M$  arasında tamsayı değerleri alan mod numarasıdır.

(2.9) denklemi kullanılarak ana mod için elektron sayısı hesaplanmıştır. Modların kendiliğinden kuantum etkinliği ( $R_{sp}$ ) hesaplanırken ana mod için hesaplanan elektron sayısı kullanılmış ve kazanç profiline göre yan modları destekleyen elektron sayıları hesaplanmıştır. Bulunan bu  $N$  değerleri (2.5) denkleminde yerine konarak  $R_{sp}$  değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler ve (2.7) denklemi, (3.3) denkleminde yerine yazılarak yarıiletken lazerin boylamsal mod spektrumu elde edilmiştir.

### 3.4. Yarıiletken Lazerlerin Modülasyon Yanıtı

#### 3.4.1. Küçük sinyal analizi

Bu çalışmada, yarıiletken lazerin küçük sinyal analizi genlik modülasyonu kullanılarak gerçekleştirildi. Sinüzoidal formdaki modülasyon akımı  $I_m(t)$ ;

$$I_m(t) = I_p \sin(\omega_m t) \quad (3.7)$$

dir. Bu durumda modüle edilmiş güç

$$\delta P(t) = \delta P_0 \sin(\omega_m t + \theta_P) \quad (3.8)$$

olur. Modüle edilmiş gücün maksimum değeri  $\delta P_0$  ve faz kayması  $\theta_P$  aşağıdaki gibi verilirler.

$$\delta P_0 = \frac{G_N P I_P / q}{\left[ (\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_R^2)^2 + 4\omega_m^2 \Gamma_R^2 \right]^{1/2}} \quad (3.9)$$

$$\theta_P = \tan^{-1} \left( \frac{2\Gamma_R \omega_m}{\omega_m^2 - \Omega_R^2 - \Gamma_R^2} \right) \quad (3.10)$$

Burada sönümlü osilasyon bozulma oranı  $\Gamma_R$ , (2.26) denklemi ile verilmiştir. (2.27) denklemi ile verilen sönümlü osilasyon frekansı  $\Omega_R$  ise aşağıdaki gibi basitleştirilebilir.

$$\Omega_R = (G G_p P)^{\frac{1}{2}} \quad (3.11)$$

Yukarıda verilen denklemler kullanılarak hesaplanan  $P_0$ ,  $\theta_P$ ,  $\Gamma_R$  ve  $\Omega_R$  değerleri (3.8) denkleminde yerine yazılarak lazerin küçük sinyal modülasyon yanıtı elde edilmiştir.

### 3.4.2. Büyük sinyal modülasyonu

Kazanç anahtarlama olarak da bilinen büyük sinyal modülasyonunu analiz etmek için (2.4) foton oran denklemi ve (2.1) elektron oran denklemi kullanılır.  $\gamma = I/\tau_p$ , kabulü yapılırsa foton oran denklemi aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{dP}{dt} = GP - P/\tau_p + R_{sp} \quad (3.12)$$

Kazanç ( $G$ ),  $R_{sp}$  ve  $\gamma_e$  ifadeleri (2.1) ve (3.12) denklemlerinde yerlerine yazılarak ve son olarak aktif tabakadaki taşıyıcı sayısı  $N=nV$  şeklinde ifade edilerek aşağıdaki (3.13) ve (3.14) denklemleri elde edilmiş olur. Burada  $n$  aktif tabakadaki taşıyıcı yoğunluğunu ve  $V$ 'de aktif tabaka hacmini ifade etmektedir.

$$\frac{dP}{dt} = [\Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g]P - P/\tau_p + \beta_{sp}BN^2/V \quad (3.13)$$

$$\frac{dN}{dt} = I/q - (A_{nr} + BN/V + CN^2/V^2)N - (\Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g)P \quad (3.14)$$

Bu çalışmada güç–zaman grafiklerindeki optik darbeleri hesaplamak için (3.13) ve (3.14) denklemleri kullanılmıştır.

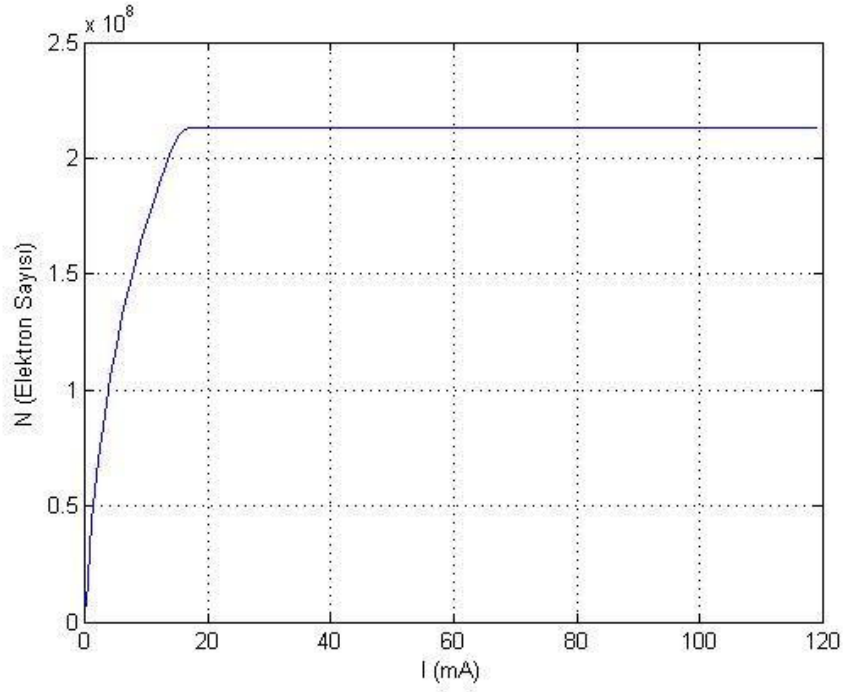
## **4. ARAŞTIRMA BULGULARI**

### **4.1. Yarıiletken Lazerin N-I, P-I ve L-I Grafikleri**

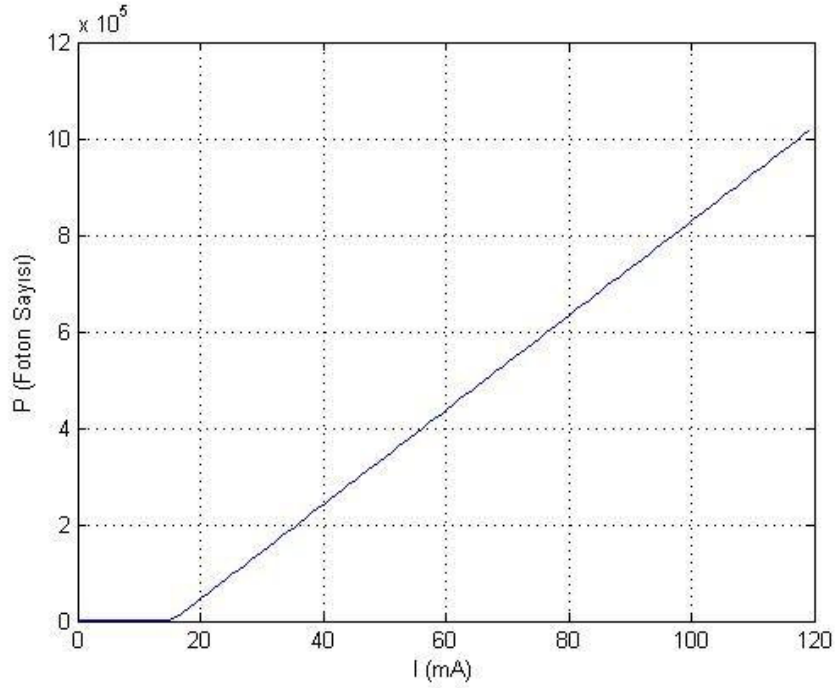
MATLAB programında hazırladığımız bir programla yarıiletken lazerin aktif bölgesindeki elektron sayısının, foton sayısının ve çıkış gücünün lazere uygulanan akıma karşın değişimini gösteren N-I, P-I ve L-I grafikleri elde edildi. Bu programın bir kısmı EK 1'de verilmiştir. Bu grafikler elde edilirken kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 1.3  $\mu\text{m}$  dalgaboyunda yayılım yapan gömülü türdeş olmayan lazer için tipik parametreler

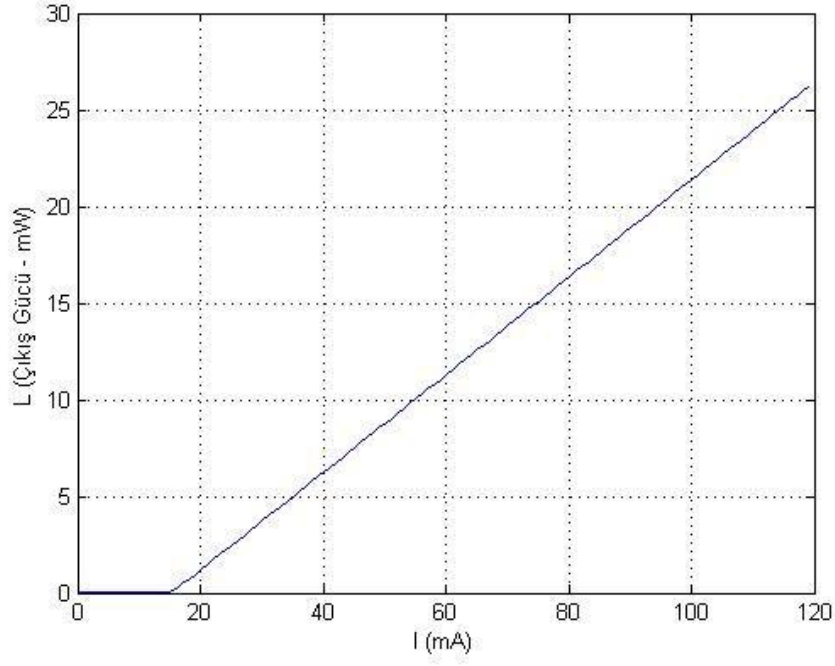
PARAMETRE	SEMBOL	DEĞERİ
Planck sabiti	$h$	$6.626 \times 10^{-34}$ Jsn
Işık hızı	$c$	$3 \times 10^8$ m/s
Elektron yükü	$q$	$1.6 \times 10^{-19}$ C
Kendiliğinden emisyon faktörü	$\beta_{sp}$	$10^{-4}$
Kavite uzunluğu	$L$	250 $\mu\text{m}$
Aktif bölge genişliği	$w$	2 $\mu\text{m}$
Aktif tabaka kalınlığı	$d$	0,2 $\mu\text{m}$
Hapsetme faktörü	$\Gamma$	0.3
Grup kırılma indisi	$\mu_g$	4
Çizgi genişliği iyileştirme faktörü	$\beta_c$	5
Yüz kayıpları	$\alpha_m$	$4500 \text{ m}^{-1}$
Dahili kayıp	$\alpha_{int}$	$4000 \text{ m}^{-1}$
Kazanç sabiti	$a$	$2.5 \times 10^{-20} \text{ m}^2$
Saydamlık taşıyıcı yoğunluğu	$n_o$	$10^{24} \text{ m}^{-3}$
Işınımsal olmayan rekombinasyon katsayısı	$A_{nr}$	$10^8 \text{ s}^{-1}$
Işınımsal rekombinasyon katsayısı	$B$	$10^{-16} \text{ m}^3/\text{s}$
Auger rekombinasyon katsayısı	$C$	$3 \times 10^{-41} \text{ m}^6/\text{s}$
Eşik taşıyıcı popülasyonu	$N_{th}$	$2.14 \times 10^8$
Eşik akımı	$I_{th}$	16 mA
Eşik taşıyıcı yaşam süresi	$\tau_e$	2.2 ns
Foton yaşam süresi	$\tau_p$	1.6 ps
Dalgaboyu	$\lambda$	1300 nm



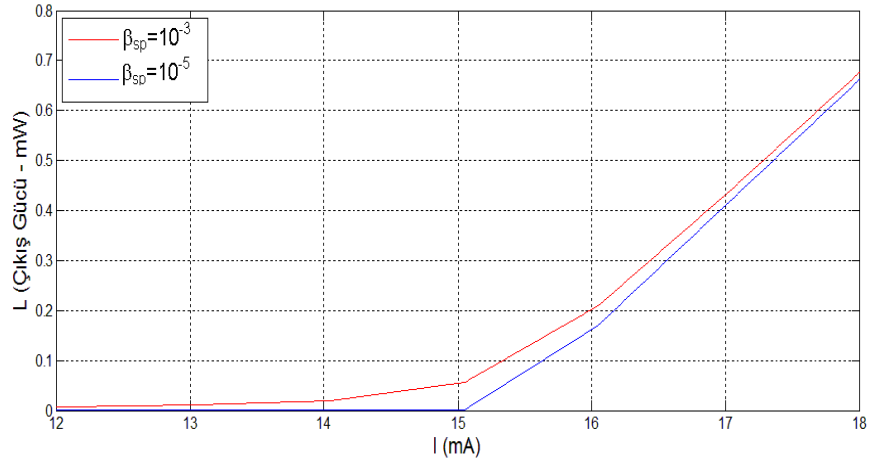
Şekil 4.1.  $L=250 \mu\text{m}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-3}$  için elde edilen N-I karakteristiği



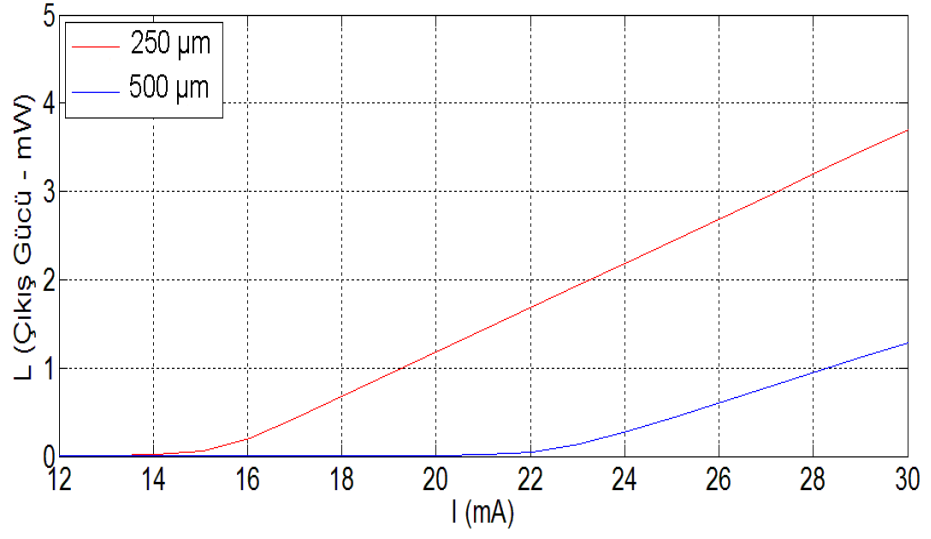
Şekil 4.2.  $L=250 \mu\text{m}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-3}$  için elde edilen P-I karakteristiği



Şekil 4.3.  $L=250 \mu\text{m}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-3}$  için elde edilen L-I karakteristiği



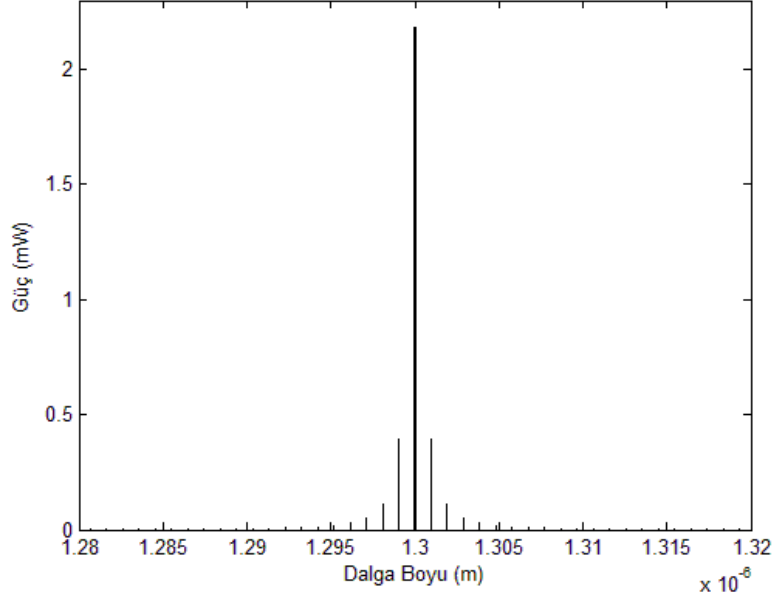
Şekil 4.4.  $\beta_{sp}=10^{-3}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-5}$  için L-I grafikleri



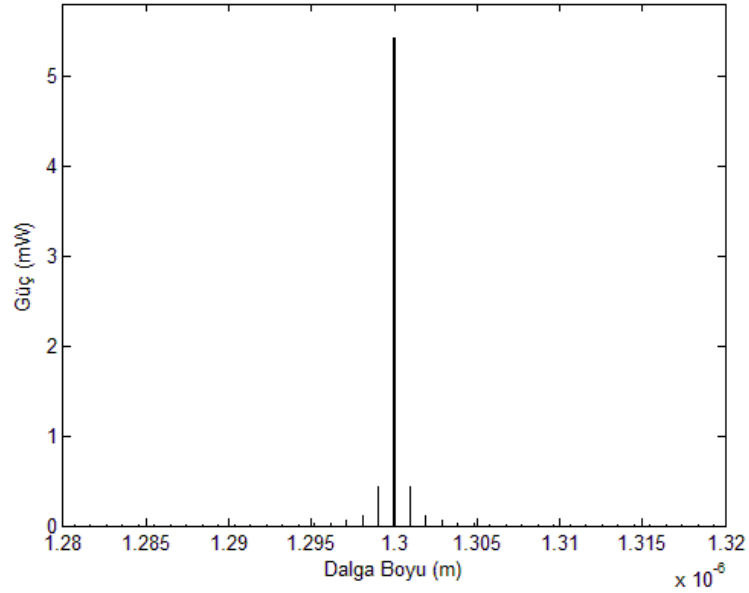
**Şekil 4.5.**  $L=250 \mu\text{m}$  ve  $L=500 \mu\text{m}$  için  $L$ - $I$  grafikleri

#### 4.2. Yarıiletken Lazerin Boylamsal Mod Spektrumu

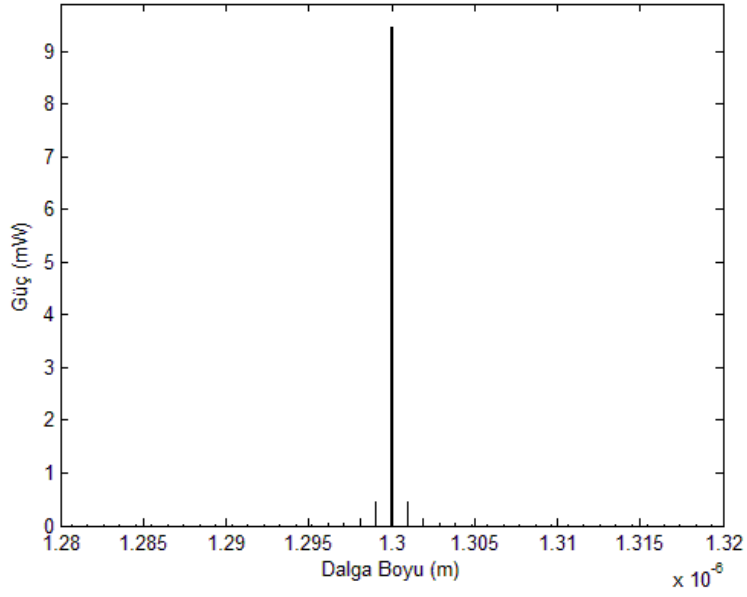
MATLAB programında hazırlanan bir programla yarıiletken lazerin boylamsal mod spektrumu elde edilmiştir. Bu programın bir kısmı EK 2’de verilmiştir. Bu spektrum elde edilirken kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



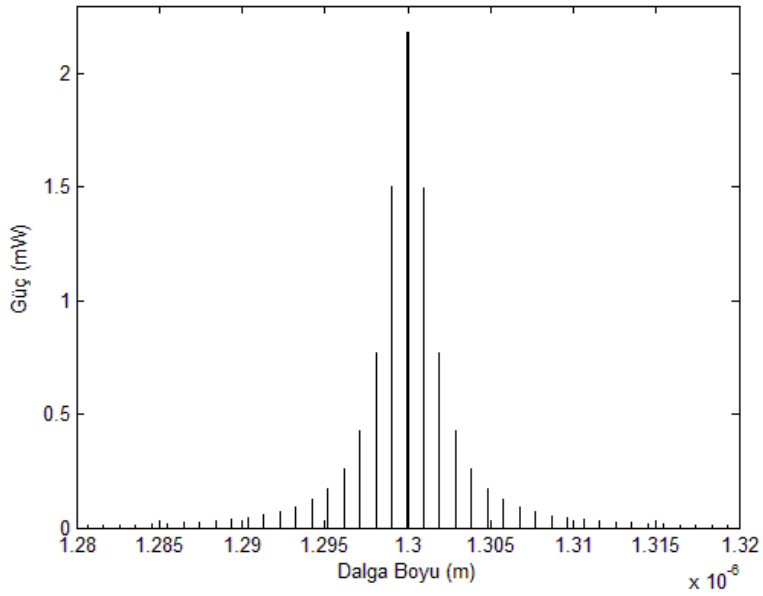
**Şekil 4.6.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $\beta_{sp}=10^{-4}$  ve  $I=1.5I_{th}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



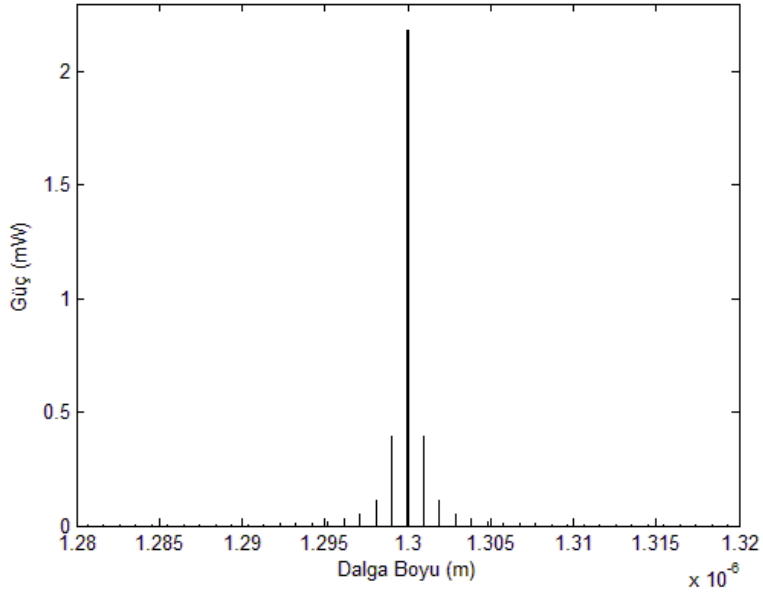
**Şekil 4.7.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $\beta_{sp}=10^{-4}$  ve  $I=2.3I_{th}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



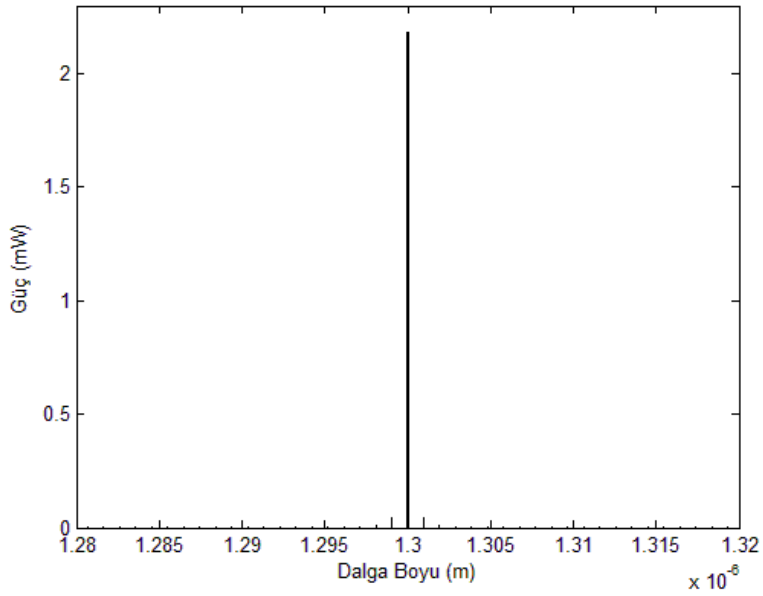
**Şekil 4.8.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $\beta_{sp}=10^{-4}$  ve  $I=3.3I_{th}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



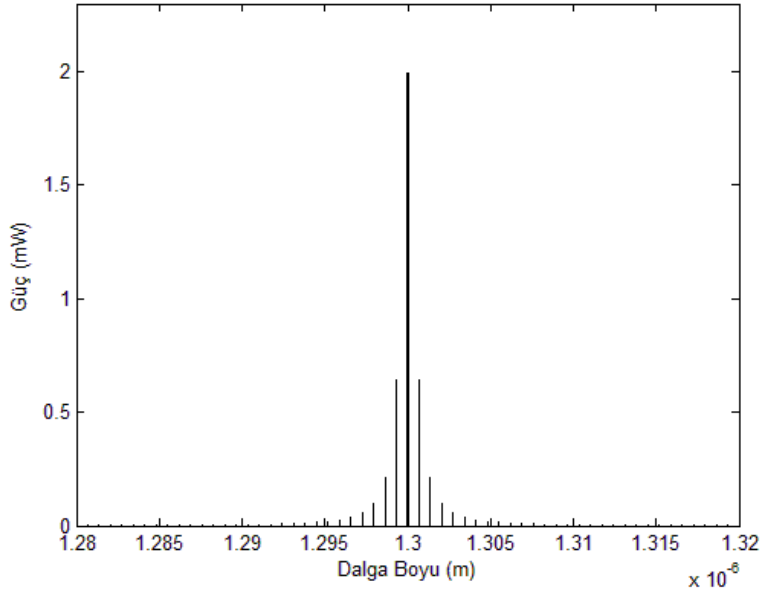
**Şekil 4.9.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $I=1.5I_{th}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-3}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



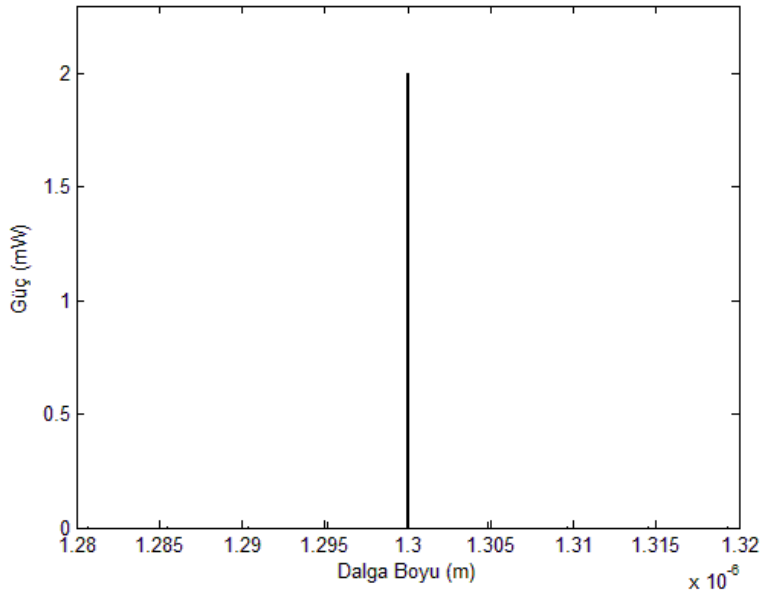
**Şekil 4.10.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $I=1.5I_{th}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-4}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



**Şekil 4.11.**  $L=250 \mu\text{m}$ ,  $I=1.5I_{th}$  ve  $\beta_{sp}=10^{-5}$  için elde edilen boylamsal mod spektrumu



**Şekil 4.12.** 350  $\mu\text{m}$  boyundaki yarıiletken lazerin  $\beta_{sp}=10^{-4}$  ve 2 mW çıkış gücü için boylamsal mod spektrumu



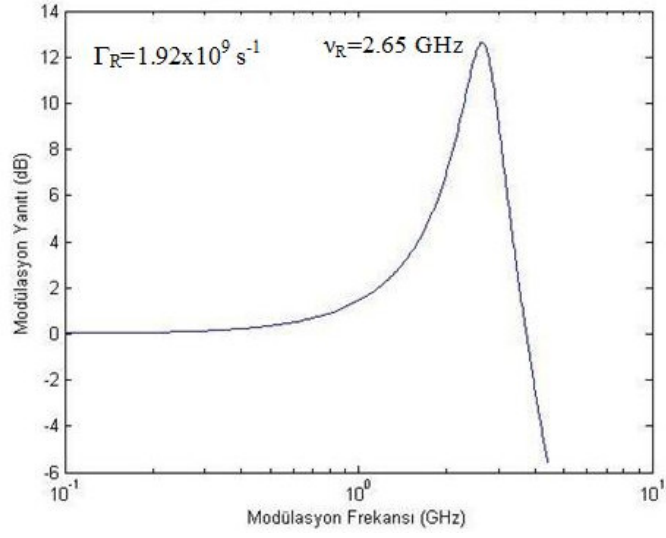
**Şekil 4.13.** 100  $\mu\text{m}$  boyundaki yarıiletken lazerin  $\beta_{sp}=10^{-4}$  ve 2 mW çıkış gücü için boylamsal mod spektrumu

### 4.3. Yarıiletken Lazerin Küçük Sinyal Modülasyon Yanıtı

MATLAB programında hazırladığımız bir programla yarıiletken lazerin küçük sinyal modülasyon yanıtı elde edilmiştir. Bu program EK 3’de verilmiştir. Modülasyon yanıtı elde edilirken kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.2’deki gibidir.

**Çizelge 4.2.** Gömülü türdeş olmayan lazer, 2 mW gücünde çalışırken küçük sinyal analizinde kullanılan parametrelerin tipik değerleri

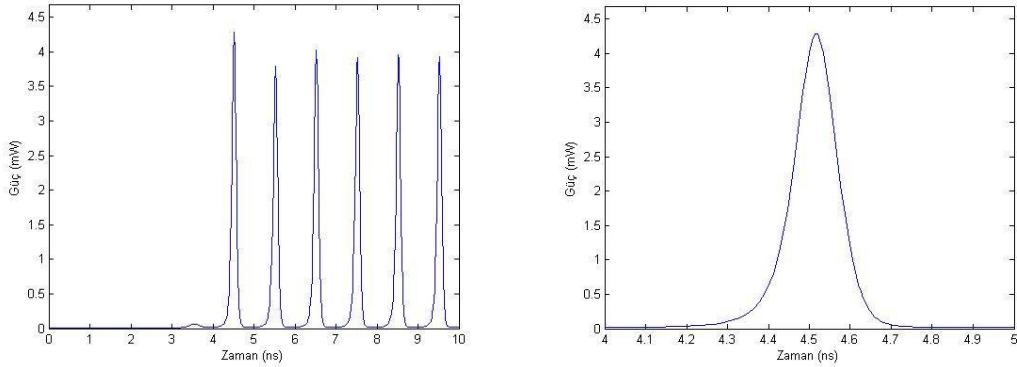
PARAMETRE	SEMBOL	DEĞERİ
Foton popülasyonu	$P$	$7.76 \times 10^{34}$
Taşıyıcı popülasyonu	$N$	$2.14 \times 10^8$
Sürekli durum kazancı	$G$	$6.41 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$
Kendiliğinden emisyon oranı	$R_{sp}$	$1.28 \times 10^{12} \text{ s}^{-1}$
Kazancın türevi ( $\partial G / \partial N$ )	$G_N$	$5.62 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$
Kazancın türevi ( $\partial G / \partial P$ )	$G_P$	$-3.4 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$
Küçük sinyal taşıyıcı bozunma oranı	$\Gamma_N$	$2.56 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
Küçük sinyal foton bozunma oranı	$\Gamma_P$	$2.56 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$
Sönümlü osilasyon frekansı	$\Omega_R / 2\pi$	2.65 GHz
Sönümlü osilasyon bozunma oranı	$\Gamma_R$	$1.92 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$



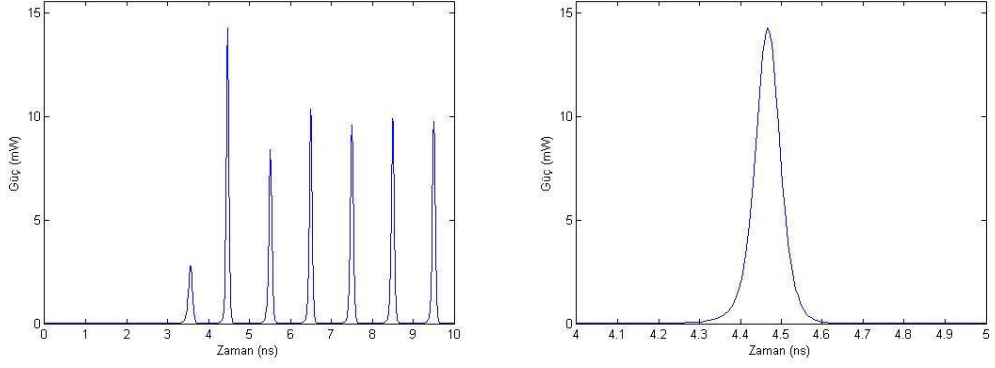
**Şekil 4.14.** Hesaplanan küçük sinyal modülasyon yanıtı

#### 4.4. Yarıiletken Lazerin Büyük Sinyal Modülasyonu

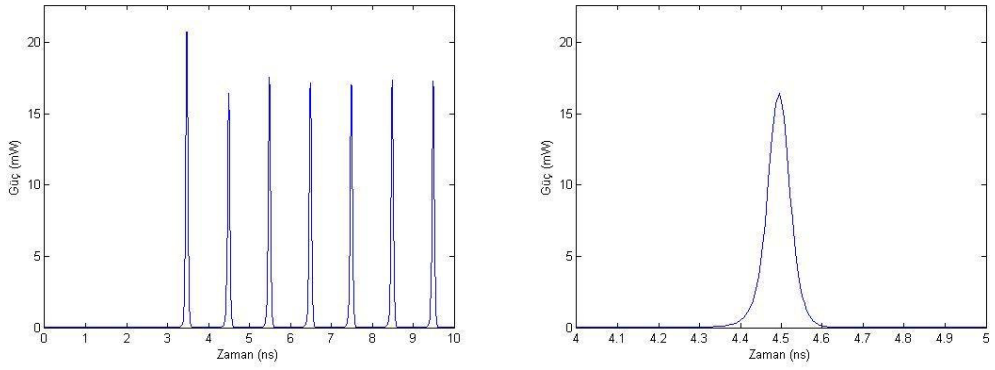
MATLAB programında hazırladığımız bir programla yarıiletken lazerin büyük sinyal modülasyon yanıtı elde edilmiştir. Bu programın bir kısmı EK 4’de verilmiştir. Simülasyonda kullanılan parametrelerin değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.



**Şekil 4.15.**  $I_m(t)=0.5I_{th}$  için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği 120 ps olarak ölçüldü)



**Şekil 4.16.**  $I_m(t)=I_{th}$  için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği 70 ps olarak ölçüldü)



**Şekil 4.17.**  $I_m(t)=1.5I_{th}$  için güç zaman grafikleri (akımın bu değeri için güç yarı değerindeyken darbe genişliği 50 ps olarak ölçüldü)

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Bu çalışmada 1300 nm dalgaboyunda yayılım yapan yarıiletken lazer modellemesi yapılmıştır. Bu modelleme sonucunda, yarıiletken lazerin çıkış karakteristiklerini etkileyen parametrelerin değişiminin lazer çıkışına etkileri gözlemlenmiştir.

Lazer CW modda çalışırken elde edilen lazer çıkış gücü–akım değişimine kendiliğinden emisyon faktörü  $\beta_{sp}$ 'nin etkisi gözlemlenmiştir. Büyük  $\beta_{sp}$  değerlerinde ışınımsal olmayan durumdan, lazer çıkışı olan duruma geçişin, küçük  $\beta_{sp}$  değerlerinde gözlemlenenden daha yumuşak olduğu görülmüştür. Şekil 4.4 bu durumu göstermektedir.

Lazer çıkış gücünün akıma karşı çizdirilen grafiğinde kavite boyu arttıkça lazerin eşik akımının arttığı yani lazer çıkışının gözlemlenebilmesi için daha büyük akım değerleri uygulanması gerektiği gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 4.5'de gösterilmektedir.

Lazerin boylamsal mod spektrumu hakkında yapılan çalışma sonucunda uygulanan akımın artışıyla, boylamsal mod spektrumunun daraldığı gözlenmiştir. Akımın artışıyla ana modun ve yan modların güçleri sürekli olarak artmış ancak yan modların güçleri belirli bir değerden sonra doyuma gitmiştir. Böylece, yarıiletken lazerin spektral saflığının ölçüsü olan MSR değeri azalmış ve lazer tek mod çalışma durumundan uzaklaşmaya başlamıştır. Yani uygulanan akımın artırılmasıyla spektrum daralmıştır. Bu durum, Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de gösterilmektedir.

Kendiliğinden emisyon faktörü  $\beta_{sp}$ 'nin artışıyla yan modların çok daha yüksek akım değerlerinde doyuma gitmeye başladığı görülmüştür. Bu nedenle  $\beta_{sp}$ 'nin

artışıyla MSR değeri azalmış ve lazer tek mod çalışma durumundan uzaklaşmaya başlamıştır. Bu durum, gözlenebilen mod sayısının artışıyla lazerin boylamsal spektrumunun genişlemesi olarak karşımıza çıkmıştır. Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11  $\beta_{sp}$ 'nin değişiminin boylamsal mod spektrumu üzerine etkisini göstermektedir.

Kavite uzunluğunun artışıyla da kavitenin desteklediği mod sayısının arttığı ve yine boylamsal mod spektrumunun genişlediği görülür. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13 bu durumu göstermektedir.

Yarıiletken lazerin küçük sinyal modülasyon yanıtı ile lazerin yanıt verebileceği en büyük modülasyon frekansı belirlenebilir. Elde edilen sonuçlar neticesinde, lazerin sönümlü osilasyon frekansından daha küçük modülasyon frekansları için neredeyse sabit güç çıkışı sağlandığı, sönümlü osilasyon frekansına eşit frekansta çıkış gücünün en büyük değerini aldığı ve sönümlü osilasyon frekansından daha büyük modülasyon frekansları için çıkış gücünün hızla düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 4.14 simülasyon sonucunda elde edilen küçük sinyal modülasyon yanıtını göstermektedir.

Büyük sinyal modülasyonu durumunda ise modülasyon akımının artışıyla lazer çıkışındaki darbelerin genişliklerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Yani yarıiletken lazer eşik akımı civarındaki bir kutuplama akımı ile sürekli açık tutulurken, modülasyon akımının değerinin artırılmasıyla lazer çıkışında çok kısa süreli optik darbeler elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 değişik modülasyon akımları için yarıiletken lazerin büyük sinyal modülasyon yanıtını göstermektedirler.

Özetle; kavite boyunun kısa olması eşik akımının değerinin de küçük olmasını sağlar ve küçük  $\beta_{sp}$  değeri sayesinde ışınımsal olmayan durumdan ışınımsal

duruma geçiş çok daha hızlı olur. Yarıiletken lazerlerin tek mod çalışması için kavite boyunun kısa olduğu ve kendiliğinden emisyon faktörü  $\beta_{sp}$  değerinin küçük olduğu durumlar tercih edilmelidir. Küçük sinyal analizi sonuçlarına göre ise, yarıiletken lazerin yanıt verebileceği en büyük modülasyon frekansının sönümlü osilasyon frekansına eşit olduğu ve bu frekansın üstündeki modülasyon frekansları için lazerin yanıt veremeyeceği görülür. Tabii bu durum ideal şartlar altında geçerlidir. Yarıiletken lazerin büyük sinyal modülasyon sonuçları bize kısa optik darbeler elde etmek amacıyla bu metodun kullanılabileceğini göstermektedir.

**KAYNAKLAR**

- Agrawal, G. P. and Dutta, N. K., 1993. *Semiconductor Lasers*. Van Nostrand Reinhold, 616, New York.
- Agrawal, G. P., 1985. Power Spectrum of Directly Modulated Single-Mode Semiconductor Lasers: Chirp Induced Fine Structure. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-21(6), 680-686.
- Arifoğlu, U., 2005. *MATLAB 7.04 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları*. Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Şti., 679, İstanbul.
- Arnauld, J., 1991. Laser Linewidth With Gain Compression. *Electronics Letters*, 27 (25), 2354-2356.
- Beiser, A., 1995. *Concepts of Modern Physics*. McGraw Hill , 506, New York.
- Bjerkkan, L., Rgyset, A. and Myhre, D., 1996. Measurement of Laser Parameters For Simulation of High-Speed Fiberoptic Systems. *Journal of Lightwave Technology*, 14 (5),839-850.
- Daikoku, K., 1977. Direct Modulation Characteristics of Semiconductor Laser Diodes. *Japanese Journal of Applied Physics*, 16 (1), 117-124.
- Danielsen, M. and Mengel, F., 1978. Multimode Rate Equation Description of Homogeneous Spectral Broadening in Semiconductor Lasers. *Electronics Letters*, 14 (16), 505-507.
- Das, B. A., Sengupta, I. and Basu, P., 2007. A Simple Spice Model for Traveling Wave Semiconductor Laser Amplifier. *Microwave and Optical Technology Letters*, 46 (7), 1558-1561.
- Dodds, D. E., 1995. Fabry-Perot Laser Diode Modeling. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7 (3), 254-256.
- Eisberg, R. and Resnick, R., 1985. *Quantum Physics of Atoms, Solids, Nuclei, and Particles*. John Wiley & Sons, 713, New York.
- Gang, W., Bin, L., Quan, S. W. and Pin, H. B., 2006. Exact Solution to Rate Equation with Time Dependent Coefficients: Its Application in InGaAsP Lasers. *Chine Physics Letters*, 23(3), 535-538.
- Guo, C. Z., Xie, J. S. and Shen, F., 1985. Effects of Nonlinear Gain on Single Longitudinal Mode Behavior of Semiconductor Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE-21 (7), 794-803.
- Habibullah, F. and Huang, W. P., 2006. A Self-Consistent Analysis of Semiconductor Laser Rate Equations for System Simulation Purpose. *Optics Communications*, 258, 230-242
- Hart, W., 1973. Large Signal Direct Modulation of Injection Lasers. *Electronic Letters*, 9 (22), 532-533.
- Hemery, E., Chusseau, L. and Lourtioz, J. M., 1990. Dynamic Behaviors of Semiconductor Lasers Under Strong Sinusoidal Current Modulation: Modeling and Experiments at 1.3  $\mu\text{m}$ . *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 26 (4), 633-641.

- Ito, M., Ito, T. and Kimura, T., 1979. Dynamic Properties of Semiconductor Lasers. *Applied Physic*, 50 (10), 6168-6174.
- Lee, C. H. and Shin S.Y., 1989. Transformation of Rate Equations and Approximate Transient Solutions for Semiconductor Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 25 (5), 878-884.
- Lee, T. P., Burrus, C. A., Copeland, J. A., Dentai, A. G. and Marcuse, D., 1982. Short Cavity InGaAsP Injection Lasers: Dependence of Mode Spectra and Single Longitudinal Mode Power on Cavity Length. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, QE 18 (7), 1101-1112.
- Morishita, M., Ohmi, A. and Nishizawa, J., 1979. Impedance Characteristics of Double-Heterostructure Laser Diodes. *Solid-State Electronics*, 22, 951-962
- Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., 1991. *Fundamentals of Photonics*. Wiley series in Pure and Applied Optics, 966, Canada.
- Sayın, M. and Özyazıcı, M. S., 1997. Effect of Gain Switching Frequency on Ultra Short Pulse Generation From Laser Diodes. *Optical and Quantum Electronics*, 29, 627-638.
- Singh, J., 1995. *Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology*. McGraw Hill, 725, New York.
- Tarucha, S. and Otsuka, K., 1981. Response of Semiconductor Laser to Deep Sinusoidal Injection Current Modulation. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, QE-17 (5), 810-816.
- Vasil'ev, P., 1995. *Ultrafast Diode Lasers Fundamentals and Applications*. Artech House, 271, London.
- Vasil'ev, P., White, I. and Gowar, J., 2000. Fast Phenomena in Semiconductor Lasers. *Reports on Progress in Physics*, 63 (12), 1997-2042.
- Yousefi, M., Barsella, A., Lenstra, D., Morthier, G., Baets, R., McMurtry, S. and Vilcot, J. P., 2003. Rate Equations Model for Semiconductor Lasers with Multilongitudinal Mode Competition and Gain Dynamics. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 39 (10), 1229-1237.

## EKLER

### EK 1

P–I ve L–I karakteristiğinin elde edilmesi için MATLAB’da hazırlanan programın bir kısmı aşağıdaki gibidir.

```

R_sp=(Beta_sp*B*N^2)/V;
G=r*v_g*a*((N1/V)-N_0/V);
P=R_sp./(Gama-G);
for n=1:length(I)
    P1(n)=subs(P(n),N,N1(n));
end
plot(I*1000,P1)
grid
xlabel('I (mA)')
ylabel('P (Foton Sayısı)')
pause
close all
for n=1:length(I)
    P_out(n)=(0.5*h*c*v_g*Alfa_m*P1(n))/Lamda;
end
plot(I*1000,P_out*1000)
grid
xlabel('I (mA)')
ylabel('L (Çıkış Gücü - mW)')
pause
close all

```

**EK 2**

Boylamsal mod spektrumunun elde edilmesi için MATLAB'da hazırlanan programın bir kısmı aşağıdaki gibidir.

```

P_p=subs(P_0,N,N_p);
R_sp_p=subs(R_sp,N,N_p);
delta=R_sp_p/(P_p*Gama);
G_p=Gama*(1-delta);
delta_Lamda_L=Lamda_p^2/(2*m*L);
M=delta_Lamda_g/delta_Lamda_L;
M=M/2;
M=fix(M);
mod_numaralari=-M:1:+M;
for x=1:length(mod_numaralari)
    Lamda(x)=Lamda_p+mod_numaralari(x)*delta_Lamda_L;
end
for x=1:length(mod_numaralari)
    G(x)=G_p*(1-(mod_numaralari(x)/M)^2);
    N1(x)=N_p*(1-(mod_numaralari(x)/M)^2);
    R_sp1(x)=Beta_sp*B*N1(x)^2/V;
end

```

**EK 3**

Küçük sinyal modülasyonu simülasyonu için MATLAB’da hazırlanan program aşağıdaki gibidir.

```
G=6.41*10^11;
G_N=5.62*10^3;
P=7.76*10^4;
r_N=2.27*10^9;
r_P=2.56*10^9;
q=1.602*10^-19;
I_p=0.105*10^-6;
nu_m=0.1*10^9:0.02*10^9:4.4*10^9;
t=sym('t');
for n=1:length(nu_m)
    w_m(n)=nu_m(n)*(2*pi);
end
Omega_R=(G*G_N*P)^(1/2);
r_R=0.5*(r_N+r_P);
for n=1:length(nu_m)
    delta_P_0(n)=(G_N*P*I_p/q)/(((w_m(n)^2-Omega_R^2-
r_R^2)^2+4*w_m(n)^2*r_R^2)^0.5);
    Teta_p(n)=atan(2*r_R*w_m(n)/(w_m(n)^2-Omega_R^2-r_R^2));
    delta_P_t(n)=delta_P_0(n)*sin(w_m(n)*t+Teta_p(n));
    A(n)=10*log(delta_P_0(n));
end
semilogx(nu_m/10^9,A)
xlabel('Modülasyon Frekansı (GHz)')
ylabel('Modülasyon Yaniti (dB)')
```

**EK 4**

Büyük sinyal modülasyonu simülasyonu için MATLAB’da hazırlanan programın bir kısmı aşağıdaki gibidir.

```
t0=0;tf=10*10.^(-9);  
tspan=[t0 tf];  
p0=[0 0]';  
[t,p]=ode45('of',tspan,p0);  
subplot(2,1,1),plot(t,p);  
axis([0 10*10.^(-9) 0 3*10.^8]);  
xlabel('time(sec)');  
ylabel('N ,Number of Electrons');  
subplot(2,1,2),plot(t,p);  
axis([0 10*10.^(-9) 0 0.5*10.^6]);  
xlabel('time(sec)');  
ylabel('P, Number of Photons');
```

## ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Erzurum'da doğan Çağlar DUMAN orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2000 yılında girdiği Niğde Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden 2005 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Elektrik Elektronik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans yapmaya başladı. 2007 yılında Atatürk Üniversitesi Erzurum Meslek Yüksek Okulu'nda, Endüstriyel Elektronik Bölümü'nde öğretim görevlisi olarak göreve başladı. İyi derecede İngilizce bilen Çağlar DUMAN halen Erzurum Meslek Yüksek Okulundaki görevine devam etmektedir.