



**FİBER OPTİK DALGA BOYLARINDA YÜZEY  
YAYILIMLI DİKEY KAVİTELİ LAZER  
MODELLENMESİ**

**EMRECAN BİNGÖL**

**Yüksek Lisans Tezi  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK**

**2020  
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİBER OPTİK DALGA BOYLARINDA YÜZEY YAYILIMLI DİKEY  
KAVİTELİ LAZER MODELLENMESİ**

**EMRECAN BİNGÖL**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK**

**Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği**

**Erzurum**

**2020**

**Her hakkı saklıdır**

**T.C.**  
**ERZURUM TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**TEZ ONAY FORMU**

---

**FİBER OPTİK DALGA BOYLARINDA YÜZEY YAYILIMLI DİKEY**  
**KAVİTELİ LAZER MODELLENMESİ**

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Emrecan BİNGÖL tarafından hazırlanan bu çalışma 27 / 04 / 2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile** kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Tevhit Karacalı	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Bülent Çakmak	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Çağlar Duman	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

**Prof. Dr. Arzu GÖRMEZ**  
**Enstitü Müdürü**

Bu tez çalışması ..... tarafından ..... nolu proje ile desteklenmiştir.

## **ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

27 / 04 / 2020

EMRECAN BİNGÖL

## ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

### FİBER OPTİK DALGA BOYLARINDA YÜZEY YAYILIMLI DİKEY KAVİTELİ LAZER MODELLENMESİ

Emreca BİNGÖL

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Bu çalışmada fiber optik haberleşmede önemli bir yere sahip olan yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Fiber optik haberleşmede zayıflamanın en düşük seviyelerde olduğu dalga boylarında yayılım yapan yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin aktif bölge, alt-DBR ve üst-DBR tasarımı yapılmıştır. Fiber optik dalga boylarında yayılım yapan yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin taşıyıcı yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-akım ve çıkış gücü-akım değişimleri ve modülasyon cevabı incelenmiştir. Tasarlanan alt-DBR ve üst-DBR için tabaka çifti sayısı-yansıtıcılık ve dalga boyu-yansıtıcılık değişimleri incelenmiştir. Taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiklerinin sonucunda uygulanan akımın artışı ile sürekli durumda ulaşılan taşıyıcı yoğunluğunun uygulanan akım ile değişmediği ve sürekli duruma daha kısa sürede geçildiği görülmektedir. Foton yoğunluğu-zaman grafiklerinin sonucunda uygulanan akımın artışı ile sürekli durumda ulaşılan foton yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Çıkış gücü-akım ve foton yoğunluğu-akım grafiklerinin sonucunda uygulanan akımın eşik akımından büyük olduğu durumda uygulanan akım ile çıkış gücünün ve foton yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Modülasyon cevabı grafiklerinin sonucunda uygulanan akımın artışı ile çıkış gücünün azaldığı ve modülasyon hızının arttığı görülmektedir. Ayrıca sönümlü osilasyon frekans değerinin uygulanan akım değeri ile arttığı görülmektedir. Sönümlü osilasyon frekans değerinde elde edilen çıkış gücünün en yüksek değerde olduğu ve sönümlü osilasyon frekans değerinden büyük frekans değerlerinde çıkış gücünün hızlı bir şekilde azaldığı görülmektedir.

2020, 78 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Yarı İletken Lazerler, Yüzey Yayımlı Lazerler, Dikey Kaviteli Lazerler, Yüzey Yayımlı Dikey Kaviteli Lazer, DBR

## ABSTRACT

MS. Thesis

### MODELLING OF VERTICAL CAVITY SURFACE EMITTING LASERS IN FIBRE OPTICAL WAVELENGTHS

Emrecañ BİNGÖL

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

In this thesis, vertical-cavity surface-emitting lasers had been modelled, which is vital for fibre optical communication. The active zone, sub-DBR and upper-DBR had been designed for the vertical-cavity surface-emitting laser which spreads at wavelengths where attenuation is at the lowest levels in fibre optical communication. In this study, carrier density-time, photon density-time, photon density-current and output power-current changes and modulation response of the vertical-cavity surface-emitting lasers emitting at fibre optical wavelengths had been examined. Layer number-reflectivity and wavelength-reflectivity alterations had been examined for the designed sub-DBR and upper-DBR of vertical-cavity surface-emitting lasers. It can be seen in density-time graphs that while applied current increase, steady-state carrier density does not change, and steady-state occurs early. According to photon density-time graphs, when applied current increase at steady-state photon density increases. The output power-current and photon density-current graphs show that when the applied current is higher than the threshold current, the output power and the photon density increase. Analysis of modulation response graphs indicates that as the applied current increase, output power decreases and modulation speed increase. Besides, it is observed that damped oscillation frequency increase with the applied current value. It can be seen that the output power at the damped oscillation frequency value is the highest and the output power decreases rapidly at frequency values higher than the damped oscillation frequency value.

**2020, 78 Page**

**Keywords:** Semiconductor Laser, Surface Emitting Laser, Vertical Cavity Laser, Vertical Cavity Surface Emitting Laser, DBR

## TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince bilgi, tecrűbe ve hoőgűrűsűnű esirgemeyen danıőmanım deęerli hocam Sayın Prof. Dr. Bűlent ÇAKMAK'a ok teőekkűr ediyorum ve saygılarımı sunuyorum.

Tez alıőmam sűresince bilgi, tecrűbe ve hoőgűrűsűnű esirgemeyen deęerli hocam Sayın Dr. Őęr. Ŭyesi aęlar DUMAN'a çok teőekkűr ediyorum ve saygılarımı sunuyorum.

Eęitim hayatım boyunca beni her zaman destekleyen ve yanımda olan tűm aileme teőekkűr ederim.

**Emreca BİNGŬL**

**Nisan 2020**

# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>iii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>vi</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
1.1. Tezin Amacı.....	5
1.2. Tezin Kapsamı .....	5
<b>2. KAYNAK ÖZETLERİ</b> .....	<b>7</b>
<b>3. MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>11</b>
3.1. Lazerler .....	11
3.1.1. Soğurma ve emisyon .....	12
3.2. Lazerlerin Çalışma Prensipleri.....	13
3.2.1 Tersinir popülasyon.....	14
3.2.2. Optik geri besleme .....	15
3.3. Lazer Türleri .....	16
3.4. Yarı İletken Lazerler .....	18
3.4.1. Yarı iletken lazer türleri.....	22
3.5. Yüzey Yayılımlı Dikey Kaviteli Lazerler (VCSELs) .....	23
3.5.1. Aktif bölge yapıları .....	27
3.5.2. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılar (DBR).....	33
3.5.3. Oran denklemleri.....	43
3.5.4. Modülasyon yanıtı.....	46



<b>4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA .....</b>	<b>50</b>
4.1. VCSEL için Tasarlanan DBR Ayna Sonuçları .....	51
4.1.1. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan DBR ayna sonuçları .....	51
4.1.2. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan DBR ayna sonuçları .....	55
4.2. VCSEL için Tasarlanan DBR Ayna Grafiklerinin Değerlendirilmesi .....	59
4.3. VCSEL'lerin Geçici ve Sürekli Durum Analizleri .....	60
4.3.1. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in geçici ve sürekli durum analizleri .....	61
4.3.2. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in geçici ve sürekli durum analizleri .....	64
4.4. Yüzey Yayılımlı Dikey Kaviteli Lazerlerin Geçici ve Sürekli Durum Analizleri Grafiklerinin Değerlendirilmesi.....	67
4.5. VCSEL'lerin Modülasyon Cevabı .....	68
4.6. VCSEL'in Modülasyon Cevabı Grafiklerinin Değerlendirilmesi .....	70
<b>5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....</b>	<b>71</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>74</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>78</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$\overleftarrow{X}_n$	DBR ayna sınır yüzey matrisi
$\lambda_0$	Yayılmı dalga boyu
$\lambda_d$	De Broglie dalga boyu
$A_0$	DBR aynanın ilk katmanından iletilen elektromanyetik dalga
$A_n$	DBR aynanın n. katmanından iletilen elektromanyetik dalga
$B_0$	DBR aynanın ilk katmanından yansıyan elektromanyetik dalga
$B_n$	DBR aynanın n. katmanından yansıyan elektromanyetik dalga
$\vec{E}$	Elektrik alan vektörü
$E_c$	İletim bandı enerji seviyesi
$E_f$	Fermi enerji seviyesi
$E_g$	Yasak enerji bant aralığı
$E_{ph}$	Fonon enerjisi
$E_v$	Valans bandı enerji seviyesi
$\vec{H}$	Manyetik alan vektörü
$I_{th}$	Eşik akımı
$L_{out}$	Işık Çıkışı
$\vec{M}$	Transfer matrisi
$N_{qw}$	Kuantum çukur sayısı
$N_{tr}$	Transparanlık taşıyıcı sayısı
$P_{out}$	Çıkış gücü
$R_1$	Birinci aynanın yansıtıcılığı
$R_2$	İkinci aynanın yansıtıcılığı
$\vec{T}$	Transfer matrisi

$U_N(x)$	İkinci dereceden Chebyshev polinomu
$V_a$	Aktif bölge hacmi
$Z_0$	Serbest uzay empedansı
$a_H$	Kırılma indisi yüksek olan tabaka kalınlığı
$a_L$	Kırılma indisi düşük olan tabaka kalınlığı
$d_H$	Kırılma indisi yüksek olan tabaka kalınlığı
$d_L$	Kırılma indisi düşük olan tabaka kalınlığı
$d_{qw}$	Kuantum çukur kalınlığı
$f_R$	Gevşeme-salınım frekansı
$g_{th}$	Eşik kazanç katsayısı
$\hat{k}$	Birim vektör
$\vec{k}$	Dalga vektörü
$k_H$	Kırılma indisi yüksek olan tabakanın yayılma sabiti
$k_L$	Kırılma indisi düşük olan tabakanın yayılma sabiti
$m_c$	Elektronun kütlesi
$n_1$	Birinci ortamın kırılma indisi
$\bar{n}$	Etkin kırılma indisi
$n_0$	Havanın kırılma indisi
$n_2$	İkinci ortamın kırılma indisi
$n_{eff}$	Etkin kırılma indisi
$n_s$	Taşıyıcı ortamın kırılma indisi
$v_g$	Grup hızı
$\alpha_i$	İçsel kayıplar
$\alpha_m$	Ayna kayıpları toplamı
$\alpha_{m1}$	Birinci aynanın kaybı
$\alpha_{m2}$	İkinci aynanın kaybı

$\beta_{sp}$	Rastgele emisyon oranı
$\epsilon_0$	Vakum yalıtkanlık sabiti
$\eta_i$	Akım gömülüm verimliliği
$\mu_0$	Geçirgenlik sabiti
$\tau_c$	Taşıyıcı yaşam süresi
$\tau_p$	Foton yaşam süresi
$\wedge$	DBR ayna hücre kalınlığı
$\Delta\nu$	Frekans aralığı
$A$	DBR ayna hücresinin birinci tabakasından iletilen elektromanyetik dalga
$a$	Geçiş matrisi yönteminde kullanılan matris elemanı
$B$	DBR ayna hücresinin birinci tabakasından yansıyan elektromanyetik dalga
$b$	Geçiş matrisi yönteminde kullanılan matris elemanı
$C$	DBR ayna hücresinin ikinci tabakasından iletilen elektromanyetik dalga
$c$	Geçiş matrisi yönteminde kullanılan matris elemanı
$d$	Aktif tabaka kalınlığı
$D$	DBR ayna hücresinin ikinci tabakasından yansıyan elektromanyetik dalga
$d$	Geçiş matrisi yönteminde kullanılan matris elemanı
$D$	Modülasyon cevabı D faktörü
$E$	Enerji
$g$	Kazanç katsayısı
$h$	Planck sabiti
$I$	Akım
$k$	Yayıma sabiti
$L$	Kavite uzunluğu
$m$	Mod numarası

$M(w)$	Modülasyon cevabı
$N$	Taşıyıcı Sayısı
$P$	Foton sayısı
$P$	Tabaka çiftinin tekrar sayısı
$q$	Elektronun yükü
$r$	Yansıtıcılık
$R$	Yansıtıcılık
$\Gamma$	Hapsetme faktörü
$\eta_i$	Akım gömülüm verimliliği
$a$	Kazanç sabiti
$\nu$	Frekans
$\Delta\lambda$	Dalga boyu aralığı
$\delta$	Faz farkı
$\varepsilon$	Kazanç bastırma faktörü

### **Kısaltmalar**

CW	Sürekli Dalga Modu
DBR	Dağıtılmış Bragg Yansıtıcı
EEL	Kenar Yayılımlı Lazer
MASER	Uyartılmış Işıma ile Mikrodalga Yükseltici
QW	Kuantum Çukur
TMM	Geçiş Matrisi Metodu
VCSEL	Yüzey Yayılımlı Dikey Kaviteli Lazer
QQL	Kuantum Kaskat Lazer

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İlk VCSEL çizimi (İga 1977) .....	2
Şekil 1.2. Silika’da tipik spektral zayıflama grafiği (Anonim 2020) .....	5
Şekil 3.1. Farklı lazerlerin yayılım dalga boyları (Anonim 2019) .....	11
Şekil 3.2. Soğurma.....	12
Şekil 3.3. Rastgele emisyon .....	13
Şekil 3.4. Uyarılmış emisyon .....	13
Şekil 3.5. Lazer şematığı.....	14
Şekil 3.6. Dört seviyeye sahip sistemde popülasyon değişimi a) Pompalama öncesi b) Pompalama sonrası (Wilson and Hawkes 1998).....	15
Şekil 3.7. Fabry–Perot rezonatör şeması .....	16
Şekil 3.8. Lazerlerin çıkış gücü-akım grafiği.....	19
Şekil 3.9. a) Kenar yayımlı lazerin boylamsal mod spektrumu b) VCSEL’in boylamsal mod spektrumu .....	20
Şekil 3.10. Çift türdeş olmayan yarı iletken lazerde taşıyıcı gömülümü .....	21
Şekil 3.11. Çift türdeş olmayan yarı iletken lazerde foton gömülümü.....	21
Şekil 3.12. Yarı iletken lazerlerin yapılarına göre sınıflandırılması (Çakmak 2000) ....	22
Şekil 3.13. Aşındırılmış yarı iletken-hava yapı.....	24
Şekil 3.14. Gömülü türdeş olmayan yapı .....	25
Şekil 3.15. İyon implante edilmiş yapı .....	25
Şekil 3.16. Oksit açıklıklı yapı.....	26
Şekil 3.17. Gömülü tünel eklem yapı .....	27
Şekil 3.18. Külçe yapı gösterimi .....	28
Şekil 3.19. Kuantum çukur yapı gösterimi .....	29
Şekil 3.20. Çoklu kuantum çukur yapı gösterimi .....	30
Şekil 3.21. Kuantum tel yapı gösterimi .....	31
Şekil 3.22. Kuantum nokta yapı gösterimi .....	32
Şekil 3.23. Enerji durum yoğunlukları a) Külçe yapı b) Kuantum çukur yapı c) Kuantum tel yapı d) Kuantum nokta yapı .....	32
Şekil 3.24. Aktif bölge yapılarına göre kazanç eğrileri (Kotan 2008) .....	33
Şekil 3.25. Elektromanyetik alanın yüzey sınırlarında gösterim (Wartak 2013) .....	35
Şekil 3.26. DBR ayna şematik görünümü (Wartak 2013) .....	38

<b>Şekil 4.1.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $TiO_2-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi.....	52
<b>Şekil 4.2.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $Si-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi.....	53
<b>Şekil 4.3.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $TiO_2-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.....	54
<b>Şekil 4.4.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $Si-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi .....	55
<b>Şekil 4.5.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $TiO_2-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi.....	56
<b>Şekil 4.6.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $Si-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi.....	57
<b>Şekil 4.7.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $TiO_2-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.....	58
<b>Şekil 4.8.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan $Si-SiO_2$ DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.....	59
<b>Şekil 4.9.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği .....	62
<b>Şekil 4.10.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-zaman grafiği.....	62
<b>Şekil 4.11.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği.....	63
<b>Şekil 4.12.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in çıkış gücü-akım grafiği .....	64
<b>Şekil 4.13.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği.....	65
<b>Şekil 4.14.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-zaman grafiği.....	65
<b>Şekil 4.15.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği.....	66

<b>Şekil 4.16.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in çıkış gücü-akım grafiği .....	67
<b>Şekil 4.17.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı .....	68
<b>Şekil 4.18.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı .....	69





## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b>Çizelge 4.1.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları.....	51
<b>Çizelge 4.2.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları.....	51
<b>Çizelge 4.3.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri .....	52
<b>Çizelge 4.4.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri .....	53
<b>Çizelge 4.5.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi .....	54
<b>Çizelge 4.6.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi .....	55
<b>Çizelge 4.7.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları.....	55
<b>Çizelge 4.8.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları.....	56
<b>Çizelge 4.9.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri .....	56
<b>Çizelge 4.10.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri .....	57
<b>Çizelge 4.11.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.....	58
<b>Çizelge 4.12.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi.....	59
<b>Çizelge 4.13.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL parametreleri .....	60
<b>Çizelge 4.14.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL parametreleri .....	61

<b>Çizelge 4.15.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile kararlı hale geçiş süresinin değişimi .....	62
<b>Çizelge 4.16.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile foton yoğunluğunun değişimi .....	63
<b>Çizelge 4.17.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum foton yoğunluğunun değişimi.....	63
<b>Çizelge 4.18.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum çıkış gücünün değişimi.....	64
<b>Çizelge 4.19.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile kararlı hale geçiş süresinin değişimi .....	65
<b>Çizelge 4.20.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile foton yoğunluğunun değişimi .....	66
<b>Çizelge 4.21.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum foton yoğunluğunun değişimi.....	66
<b>Çizelge 4.22.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum çıkış gücünün değişimi.....	67
<b>Çizelge 4.23.</b> 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile modülasyon frekansının değişimi.....	69
<b>Çizelge 4.24.</b> 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile modülasyon frekansının değişimi.....	69

## 1. GİRİŞ

---

### 1. GİRİŞ

Yarı iletken malzemelerin elektronik, optoelektronik ve tümleşik devre elemanlarında kullanımındaki artış, yarı iletken yapıların gösterdiği yüksek performans sayesinde oluşmuştur. Yarı iletken yapıların yüksek verimliliği ve gelişen yarı iletken malzeme üretim teknolojisi ile hayatımızın tamamında yarı iletken yapılar kullanılmaktadır. Yarı iletken malzemelerin diğer birçok alanda olduğu gibi optoelektronik alanında geliştirilmesi ve kullanılması ile yarı iletken lazerler günümüz teknolojisinin önemli bir parçası olmuştur.

Laser kelimesi 'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation' ifadesindeki kelimelerin baş harflerinden türetilmiştir. Lazerlerin çalışma prensibinin temelini teşkil eden uyartılmış emisyon fikrini ilk kez 1916 yılında Einstein ortaya atmıştır. Buna rağmen yıllar boyunca elektromanyetik radyasyonun uyartılmış emisyonunu pratikte kullanan bir cihaz gerçekleştirilememiştir. Elektromanyetik radyasyonun uyartılmış emisyonundan yararlanan ilk cihaz olan Maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) Charles Townes ve Arthur Schawlow tarafından 1958 yılında geliştirilmiştir. Maserin geliştirilmesi lazer tarihinde çok önemli bir yer tutmaktadır. Maserin bulunuşundan sonra 1960 yılında Theodore Maiman çalışan ilk lazeri Yakut (ruby) kristalinden üretmiştir. Bundan kısa süre sonra ilk gaz lazeri Ali Javan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Yarı iletken lazer ifadesi 1961 yılında bir p-n eklemde taşıyıcıların rekombinasyonu ile uyartılmış emisyonun oluştuğunu belirten Basov tarafından kullanılmıştır. İlk yarı iletken lazer 1962 yılında Hall tarafından gerçekleştirilmiştir. İlk p-n eklemli lazerler türdeş eklem yapıda olması sebebi ile CW (sürekli dalga) modda oda sıcaklığının altında bile çalıştırılmamaktaydı. 1963 yılında Kromer diyot lazerlerin performansının artırılması için türdeş olmayan yapıların kullanılması gerektiğini belirtmiştir (Kromer 1963). Alferov liderliğindeki bir grup benzer bir fikir üzerinde çalıştı ve çift türdeş olmayan yapıların oluşturulmasında önemli gelişmeler kaydetmiştir. Hayashi ve Panish'nin yaptığı çalışma ve araştırmalar, ilk sürekli dalga modda oda sıcaklığında çalışan diyot lazerlerinin geliştirilmesine önemli katkıda bulunmuştur. Tüm bu çalışmalar, çeşitli türlerde diyot lazer üretimine ve performanslarının iyileştirilmesine yol açmıştır. Lazerlerde dalga boyu

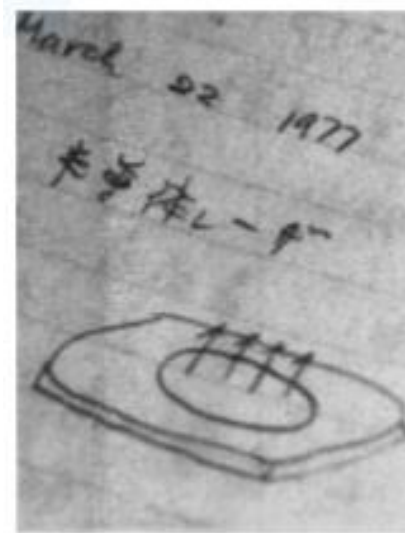
## 1. GİRİŞ

---

çalışma aralığını genişletmek için yeni malzeme araştırmaları geçmişten günümüze devam etmektedir (Basu et al. 2015).

Bant yapısı mühendisliğinin yarı iletken türdeş olmayan yapılar üzerinde çalışmalarının ardından çok önemli bir fikir olan süper kafes (superlattice) yapısı Esaki ve Tsu tarafından ortaya konulmuştur. Aynı dönemlerde enerji seviyeleri arasında geçişlerin ayrıık olduğu yarı iletken lazer yapısı Kazarinov ve Suris tarafından çalışılmıştır. Ancak enerji seviyelerinin ayrıık olduğu bir yapı daha sonra oluşturulmuştur. Esaki ve Tsu'nun çalışmalarından kısa süre sonra Dingle ve çalışma arkadaşları ile Chang ve çalışma arkadaşları türdeş olmayan eklem yapılarında ayrıık enerji seviyeleri ile ilgilenmiştir. Kuantum ukur (Quantum Well) terimi daha sonra ortaya atılmıştır. Dingle ve Henry tarafından gerçekleştirilen bir kuantum çukur lazer yapısı önerilmiştir.

Optik olarak sürülen ilk kuantum çukur lazeri van der Ziel ve çalışma arkadaşları ve elektriksel olarak sürülen ilk kuantum çukur lazeri Dupuis ve çalışma arkadaşları tarafından duyurulmuştur. 1977 yılında İga tarafından dikey kaviteli yüzeyden yayılımlı lazer (VCSEL) terimi önerildi ve bu konu üzerinde kapsamlı çalışmalar başlatıldı. Yüzey yayılımlı dikey kaviteli lazer dizileri Jewell ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Ardından yüzey yayılımlı dikey kaviteli lazer dizilerinde Coldren ve arkadaşları ile Chang-Hasnain ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmalarla geliştirmeler yapılmıştır (Basu et al. 2015).



şekil 1. 1. İlk VCSEL izimi (İga 1977)

## 1. GİRİŞ

---

Ayrık enerji seviyelerinin bulunduğu kuantum çukur yapıların etkisi ile kuantum tel (Quantum Wire) ve kuantum nokta (Quantum Dot) yapıların lazerde kullanımının avantajları Arakawa ve Sakaki tarafından incelenmiştir. 1994 yılında ilk başarılı kuantum nokta lazerin büyütülmesi ve sürülmesi gerçekleştirilmiştir. Aynı yıl Faist ve arkadaşları tarafından türdeş eklemeli kuantum çukur lazer yapısı bildirilmiştir.

Enerji seviyeleri arasında geçişlerin ayrık olduğu yarı iletken lazer yapısının Kazarinov ve Suris tarafından bahsedilmesinden yaklaşık yirmi yıl sonra kuantum kaskad lazerler (Quantum Cascade Lasers) farklı dalga boyları ve farklı malzeme sistemleri kullanılarak birçok çalışmada rapor edilmiştir. Kuantum çukur lazerler keşiflerinden bu yana önemli ölçüde geliştirilmiştir. Yüksek güce sahip terahertz bölgesinde ve oda sıcaklığında çalışan ilk kuantum kaskat lazerleri (QCL) Evans ve arkadaşları tarafından 2002 yılında geliştirilmiştir. Kuantum çukur lazerlerde tünel enjeksiyonu (tunnel injection) kavramı Bhattacharyya ve arkadaşları tarafından ortaya konulmuş ve aynı yıl avantajlarının belirtildiği çalışma yapılmıştır. (Basu et al. 2015).

Transistör lazer olarak adlandırılan yeni bir lazer türü 2004 yılında Feng ve Holonyak liderliğindeki bir grup tarafından geliştirilmiştir. Temelde türdeş olmayan iki kutuplu transistör (Heterojunction Bipolar Transistor) olan transistör lazerler aynı zamanda normal bir transistör gibi yükselteç işlevi görmektedir.

Silisyum gibi direkt olmayan bant geçişine sahip yarı iletkenlerden verimli bir lazer çıkışı elde edilememesine rağmen silisyum tabanlı diğer elektronik devrelerle uyumu sebebiyle böyle bir yapının lazerlerde kullanılması pek çok avantaj sağlayabilmektedir. Bu konu üzerine yapılan çalışmaların devam etmesi ile 2005 yılında Rong ve arkadaşları tarafından Raman lazeri gerçekleştirildi. 2010 yılında silisyum üzerine büyütülen ve optik olarak sürülen germanyum lazer yapısı Liu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. 2012 yılında ise bu germanyum lazerin elektriksel olarak sürülmesi gerçekleştirilmiştir (Basu et al. 2015).

Gelişen lazer teknolojisi ile beraber kullanım alanları ve kullanımda sağladıkları avantajları sebebiyle günümüz teknolojisinde lazerler önemli bir yere sahip olmuşlardır. Günümüzde lazer teknolojisinin uygulama alanlarına örnekler aşağıda verilmiştir.

## 1. GİRİŞ

---

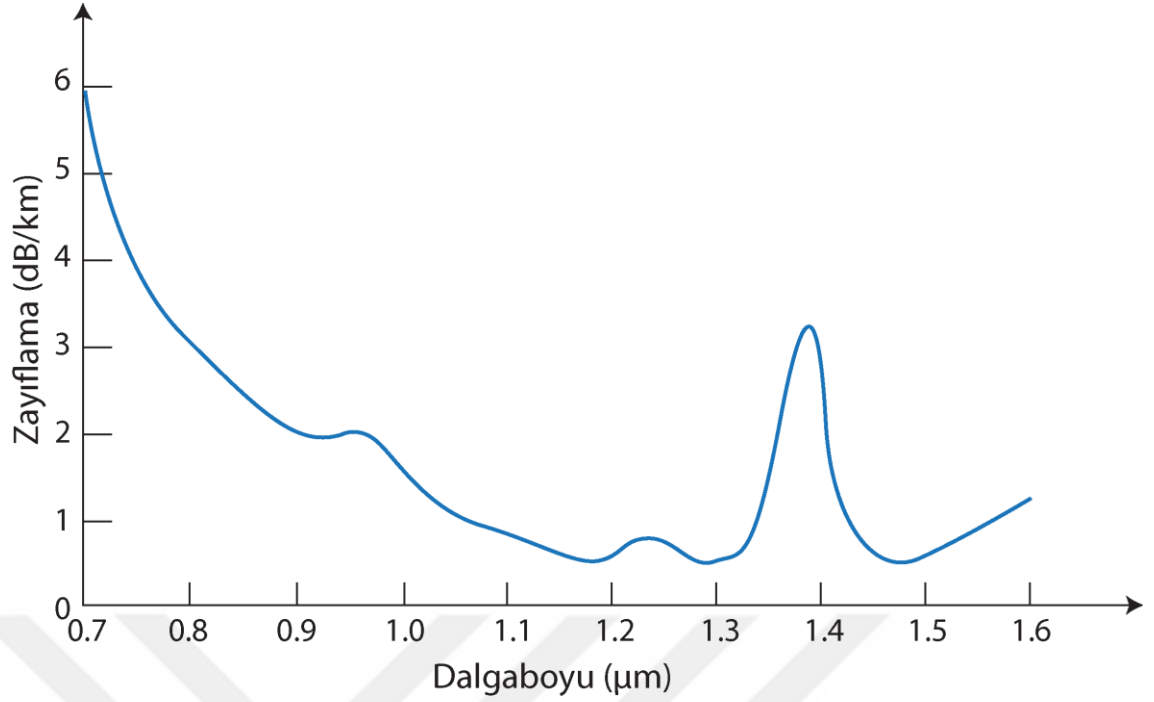
- Haberleşme Teknolojileri
- Bilgisayar Teknolojileri
- Üretim Teknolojileri
- Fotoğraflama ve Haritalama
- Kimya Teknolojileri
- Sağlık Teknolojileri
- Askeri Uygulamalar
- Bilimsel Araştırmalar

Veri, ses, görüntü iletiminde yaşanan hızlı gelişmeler ile yüksek kapasiteli ve ekonomik haberleşme sistemlerine ihtiyaç duyulmuştur. Bu ihtiyaçlar karşısında fiber optik haberleşme teknolojisi geliştirilmiştir. Fiber optik haberleşme teknolojisi, iletimde veri kaybının düşüklüğü, veri iletim hızının yüksekliği, bant genişliğinin yüksek olması, mevcut sistemler ile entegrasyonunun kolay oluşu, iletim ortamının ham maddesi olan silisyumun ucuz olması, az yer kaplaması ve elektromanyetik alanlardan az etkilenmesi gibi nedenlerle günümüzde tercih edilmektedir.

Yarı iletken lazerler yüksek verimliliği, kompakt yapısı, uzun ömre sahip olması, ucuz olması, doğrudan modüle edilebilir olması, elektronik devreler ile uyumluluğu ve yüksek hızlarda anahtarlanabilir olması gibi sebeplerle optik iletişim için en önemli ışık kaynağıdır. Fiber optik teknolojisindeki gelişmeler ile yarı iletken lazerler modern telekomünikasyon sistemlerinin temel ışık kaynağı haline gelmiştir. Uzun mesafeli veri iletimi için 1300 nm ve 1550 nm dalga boylarında yayılım yapan yarı iletken lazerler kullanılmaktadır. Bunun sebebi ise optik haberleşmenin bu dalga boylarında en az kayıp ile yapılmasıdır.

## 1. GİRİŞ

---



Şekil 1. 2. Silika'da tipik spektral zayıflama grafiği (Anonim 2020)

### 1.1. Tezin Amacı

Haberleşme alanında kenar yayımlı lazerlere göre üstün özellikleri sebebiyle tercih edilen yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin fiber optik haberleşmenin gerçekleştiği dalga boylarında modellenerek incelenmesidir.

### 1.2. Tezin Kapsamı

Giriş bölümünde lazer tarihinin önemli gelişmeleri, tezin amacı ve kapsamı verilmiştir.

Kaynak Özetleri bölümünde yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin geçici ve kalıcı durum analizi, modülasyon cevabı ve dağıtılmış Bragg yansıtıcılar ile ilgili yapılan çalışmalara ait bilgiler verilmiştir.

Materyal ve Yöntem bölümünde lazerlere ait genel bilgiler verilmiştir. VCSEL'lere ait teorik bilgiler, VCSEL'lerin tasarımında kullanılan formüller ile DBR ayna tasarımında kullanılan formüller verilmiştir.

## 1. GİRİŞ

---

Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde 1330 nm ve 1550 nm dalga boylarında VCSEL modellenmesi ile elde edilen geçici ve sürekli durum karakteristikleri, modülasyon cevapları ve DBR ayna modelinin yansıtıcılık değerleri ve yansıtıcılık spektrumu verilmiştir.

Sonuç ve Öneriler bölümünde VCSEL'lerin modellenmesi ile elde edilen geçici ve sürekli durum karakteristiklerinin, modülasyon cevaplarının ve DBR ayna modelinin yansıtıcılık değerlerinin ile yansıtıcılık spektrumunun değerlendirilmesi ve yorumlanması gerçekleştirilmiştir.





## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

### 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Bu çalışmada fiber optik haberleşme dalga boylarında yayılım yapan VCSEL'lerin modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Yapılan modellemelerde VCSEL'lerin geçici ve sürekli durum analizi, modülasyon cevabı ile DBR aynaların yansıtıcılık değerleri ile yansıtıcılık spektrumu incelenmiştir. Benzer çalışmalara ait bilgiler bu kısımda verilmiştir.

Lear et al. (1997) tarafından yapılan çalışmada, 850 nm dalga boyunda yayılım yapan oksit açıklıklı VCSEL'in modülasyon cevabı incelenmiştir. İyon implantasyonu ile cihaz kapasitansının azaldığı ve modülasyon bant genişliğinin 21,5 GHz'ye ulaştığı gösterilmiştir.

Sceats et al. (1999) tarafından yapılan çalışmada, aktif bölgesi külçe yapıya sahip olan VCSEL için 125 K ve 240 K sıcaklıkları arasında lazer eşik akımı, polarizasyon ve çizgi genişliği ölçümleri yapılmıştır. Çeşitli sıcaklık değerlerinde yapılan bu ölçümlerde minimum eşik akımı değeri 180 K sıcaklıkta  $26,5 \pm 0,5$  mA ve dalga boyu değişimi ise  $1,501 \mu\text{m} - 1,512 \mu\text{m}$  arasında elde edilmiştir. Lazerden alınan maksimum çıkış gücü ise 180 K sıcaklıkta 0,18 mW olarak elde edilmiştir.

Krishnamoorthy et al. (2000) tarafından yapılan çalışmada, 850 nm dalga boyunda yayılım yapan intracavity yapıya sahip VCSEL'in modülasyon cevabı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda modülasyon bant genişliğinin 10 GHz'e ulaştığı gösterilmiştir.

Linnik et al. (2001) tarafından yapılan çalışmada, 1546 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in tasarımını ve fabrikasyonunu gerçekleştirmiştir. DBR ayna ara yüzelerinin büyütülmesi ve indis profilinin lazerin eşik akımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. DBR ayna ara yüzelerinin arasında doğrusal indis profilinin kullanılmasının DBR seri direncini düşüreceği fikri ortaya atılmıştır. DBR ayna ara yüzelerinde var olabilecek pürüzlerin DBR ayna yansıtıcılığına ve VCSEL performansına ciddi bir etkisinin olduğu gösterilmiştir. DBR ayna tabakalarının kalınlıklarının rastgele değişimi ile yansıtıcılık spektrumunun bozulduğu gösterilmiştir. DBR ayna üretiminde tabaka kalınlıklarının; yansıtıcılığın, eşik akımının ve cihaz

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

performansının optimum düzeyde olması için hassas bir şekilde üretilmesi gerektiği gösterilmiştir.

Lin et al. (2003) tarafından yapılan çalışmada, 1300 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL’de hava-InP yapısı kullanarak DBR ayna oluşturmuştur. Oda sıcaklığında sürekli modda elektriksel olarak sürülen lazerlerin eşik akım yoğunluğu  $1,1 \text{ kA/cm}^2$  olarak elde edilmiştir. 1300 nm dalga boyunda yayılım yapan 6,3 mikrometre açıklığa sahip lazerde ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan 5,7 mikrometre açıklığa sahip lazerde oda sıcaklığında elde edilen çıkış gücünün  $1,1 \text{ mW}$  olduğu gösterilmiştir.

Şentürk (2008) yaptığı çalışmada, 1300 nm dalga boyunda VCSEL’de DBR aynada geçiş matrisi yöntemi ile tabaka çifti sayısının, tabaka kalınlığının ve tabaka diziliminin yansıtıcılığa olan etkilerini incelemiştir. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılarda tabaka sayısının artması ile yansıtıcılığın arttığı ve tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indisi farkının artması ile yüksek yansıtıcılık bölgesi genişliğinin arttığını göstermiştir.

Muting et al. (2008) yaptığı çalışmada, 1100 nm dalga boyunda VCSEL’de yüksek sıcaklıkların etkisini incelemiştir. Sıcaklığın artması ile çıkış gücünün ve modülasyon bant genişliğinin azaldığı gösterilmiştir.

Babaoğlu (2011) yaptığı çalışmada, az miktarda azot eklenmiş uzun dalga boylu VCSEL’de azot oranının yapıya etkisi ve DBR aynada geçiş matrisi yöntemi ile tabaka çifti sayısının yansıtıcılığa etkisi incelenmiştir. Azot eklenmiş III-V grubu yapılarda bant aralığının azot miktarındaki artış ile arttığı gösterilmiştir.

Westbergh (2011) tarafından yapılan çalışmada, 850 nm dalga boyuna sahip VCSEL’in kısa mesafe iletiminde veri iletim hızının artırılmasına yönelik incelemeler yapmıştır. Aktif bölge tasarımı, elektriksel parazitlerin azaltılması ve foton yaşam süresinin optimize edilmesi ile maksimum modülasyon bant genişliğinin artabileceği gösterilmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Hoffman et al. (2011) tarafından yapılan çalışmada, 1550 nm dalga boyuna sahip gömülü tünel eklem VCSEL'in modülasyon cevabı incelenmiştir. Açıklığı 5  $\mu\text{m}$  olan tek moda sahip lazer için eşik akımı 0,6 mA, çıkış gücü 2,5 mW ve modülasyon bant genişliği 19 GHz civarında elde edilmiştir.

Basak et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 1550 nm dalga boyunda AlGaInAs/InP çoklu kuantum çukur yapısına sahip VCSEL'in parametrelerini hesaplamıştır. Yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerin kalıcı durum analizi ve modülasyon cevabı incelenmiştir. 8,5 mA enjeksiyon akımında 1,02 mW çıkış gücü ve maksimum modülasyon bant genişliği 14,2 GHz olarak elde edilmiştir.

Basak et al. (2013) tarafından yapılan çalışmada, 1550 nm dalga boyunda AlGaInAs/InP çoklu kuantum çukur yapısına sahip VCSEL'in parametreleri hesaplanmıştır. VCSEL'e uygulanan akımın, kalıcı durum analizine ve modülasyon cevabına olan etkisi incelenmiştir. Enjeksiyon akımının 6,1 mA'den 16,1 mA'ye yükseltilmesi ile maksimum modülasyon bant genişliğinin 12,3 GHz'den 19,3 GHz'ye ulaştığı gösterilmiştir.

Khan et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada, VCSEL'in karakteristik matrisi için geçiş matrisi yöntemi kullanmıştır. DBR aynayı oluşturan tabaka çifti sayısının değiştirilmesinin yasıtıcılığa etkisi incelenmiştir. Bu çalışmada Matlab ile modellenerek optimal sonuçların elde edilebileceği gösterilmiştir.

Moser et al. (2015) tarafından yapılan çalışmada, 980 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL yapısında oksit açıklığın sıcaklık bağımsızlığı, bant genişliği ve enerji verimliliğine etkisini incelemiştir. Elde edilen sonuçlarda küçük oksit açıklık değerlerinde sıcaklık bağımsızlığının ve enerji verimliliğinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir.

Basak et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada, 1330 nm dalga boyunda AlGaInAs / InP çoklu kuantum çukur yapısına sahip VCSEL tasarlanmış ve parametreleri hesaplanmıştır. VCSEL'in kalıcı ve geçici durum analizi ile modülasyon cevabı incelenmiştir.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

---

Spiga et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada, 1500 nm dalga boyunda yayılım yapan InP tabanlı VCSEL'in elektriksel, termal ve optik karakteristikleri tünel eklemının yarıçapına bağlı olarak -10 ve 65 °C arasında incelemiştir. Yapılan küçük sinyal analizinin sonucunda modülasyon bant genişliğinin oda sıcaklığında 21 GHz seviyelerine ulaştığı gösterilmiştir.

Hossain et al. (2018) 1550 nm dalga boyunda AlGaInAs/InP çoklu kuantum çukur yapısına ve oksit açıklığa sahip VCSEL'in parametrelerini hesaplamıştır. VCSEL'e uygulanan akımın ve oksit açıklığının, kalıcı durum analizine ve modülasyon cevabına olan etkisi incelenmiştir. Oksit açıklığının artması ile maksimum modülasyon bant genişliğinin azaldığı ancak enjekte edilen akımın artması ile maksimum modülasyon bant genişliğinin arttığı gösterilmiştir.

Alaydin (2018) tarafından yapılan çalışmada, optik pompalı VCSEL yapısı gösterilmiştir. DBR ayna yansıtıcılığını etkileyen tabaka çift sayısı, katman kalınlıkları ve fosfor oranının etkisi incelenmiştir. Çalışmasında temel gerilme problemi ortaya koymuş, gerilme probleminin çözülmesi amacıyla AlAs'a fosfor eklenerek elde edilen AlAs<sub>0,96</sub>P<sub>0,04</sub> yarıiletken yapısı önerilmiştir.

Rahman et al. (2018) tarafından yapılan çalışmada, 1550 nm dalga boyunda GaInNAsSb/GaNAs çoklu kuantum çukur yapısına sahip VCSEL'in parametrelerini hesaplamıştır. VCSEL'in kalıcı durum analizi ve modülasyon cevabı incelenmiştir. Çalışmada maksimum modülasyon bant genişliği 16 mA enjeksiyon akımında 20,5 GHz olarak elde edilmiştir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

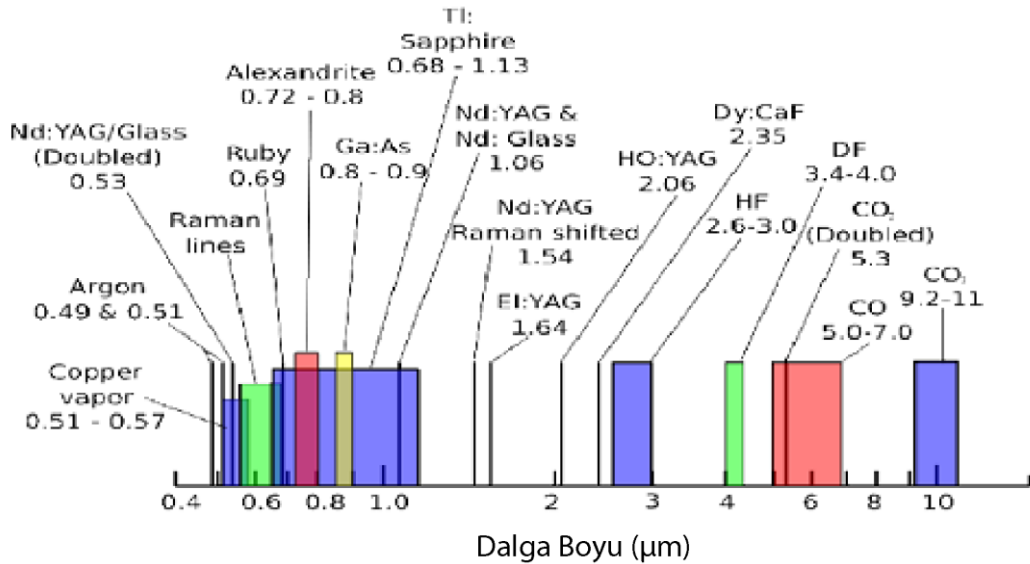
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1. Lazerler

Lazerler morötesinden kızılötesi bölgeye varıncaya kadar değişik dalga boylarında optik çıkış üretebilen ışık kaynaklarıdır. Lazer ışığı diğer ışık kaynaklarından farklı özelliklere sahiptir. Lazer ışığının diğer ışık kaynaklarına göre avantajları;

- Işığın oluşturan fotonlarda faz farkı bulunmaz, eş fazlıdır. Böylece ışık kaynağından elde edilen çıkış tek fazlıdır.
- Oluşan modların çizgi genişliklerinin çok düşük olması ve tek renkli ışık çıkışına müsaade etmesi ile elde edilen çıkış tek renklidir.
- Elde edilen çıkış ışığında iraksama çok düşüktür.
- Işığın yoğun ve güçlüdür.

Lazerler kullanılan madde hallerine ve türüne göre farklı dalga boylarında ve çıkış güçlerinde ışık oluşturmaktadır. Bazı lazerler türlerinin yayılım yaptıkları dalga boyları Şekil 3.1’de verilmektedir.



Şekil 3.1. Farklı lazerlerin yayılım dalga boyları (Anonim 2019)

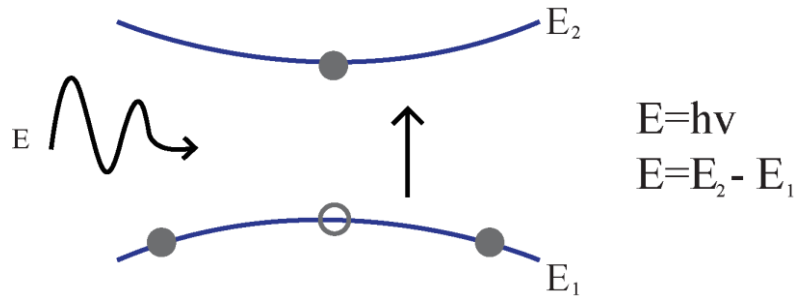
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.1.1. Soğurma ve emisyon

Elektromanyetik dalgalar foton (enerji paketleri) halinde ilerlerler. Diğer bir deyişle fotonlar elektromanyetik dalgaları taşıyan enerji paketleridir. Elektromanyetik dalgalar tanecik veya dalga özelliğinden birini gösterirler. Bu iki özellik hiçbir zaman aynı anda görülmez. Elektromanyetik dalgalar atomlar veya moleküllerle etkileşiminde tanecik özelliği ile açıklanırken, yansıma gibi özellikleri ise dalga mekaniği ile açıklanmaktadır (Çetinkaya 2006).

#### Soğurma

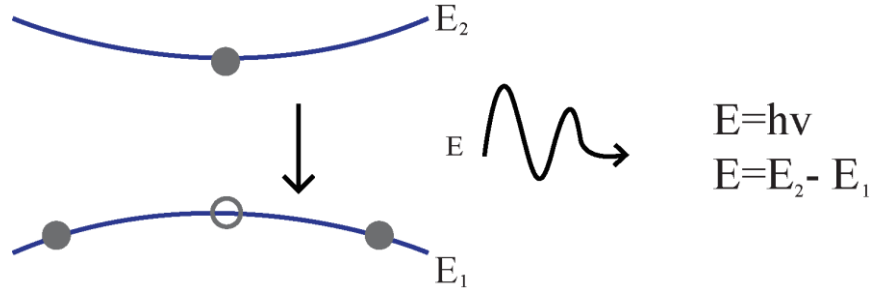
Atomların enerji seviyelerinde bulunan elektronlara ortama dahil olan ve belirli enerjiye sahip bir foton çarptığında foton enerjisini elektrona aktarır. Bu elektron fotondan aldığı enerji ile daha üstteki enerji seviyesine geçebilir. Bu olay soğurma olarak tanımlanır (Çetinkaya 2006).



Şekil 3.2. Soğurma

#### Rastgele emisyon

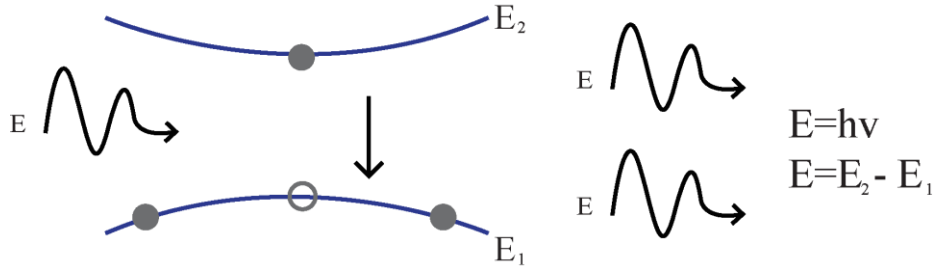
Atoma bağlı olan elektronlar farklı sebeplerle enerjilerinin artması ile daha üst enerji seviyesine geçmişler ise daha sonra temel enerji seviyesine dönmek için sahip oldukları enerjilerini foton olarak yayabilirler. Bu olay rastgele emisyon olarak tanımlanır. Rastgele emisyon ile oluşan fotonların fazları birbirinden farklıdır.



Şekil 3.3. Rastgele emisyon

#### Uyartılmış emisyon

Atomların enerji seviyelerinde bulunan elektronlardan birine bir foton çarptığında fotonun enerjisi elektron tarafından soğurulur. Üst enerji seviyesi ve temel enerji seviyesi arasındaki enerji farkı kadar enerjiye sahip olan bir foton ile etkileşime giren üst enerji seviyesinde bulunan elektron temel enerji seviyesine inmek için fazla enerjisini etkileşime girdiği foton ile aynı fazda olan bir foton olarak yayacaktır. Yayımlanan ve etkileşen fotonların enerjileri eşit olduğu için frekansları da eşit olacaktır. Bu olay uyartılmış emisyon olarak tanımlanır ve lazer ışığının oluşmasındaki temel mekanizmadır (Çetinkaya 2006).



Şekil 3.4. Uyartılmış emisyon

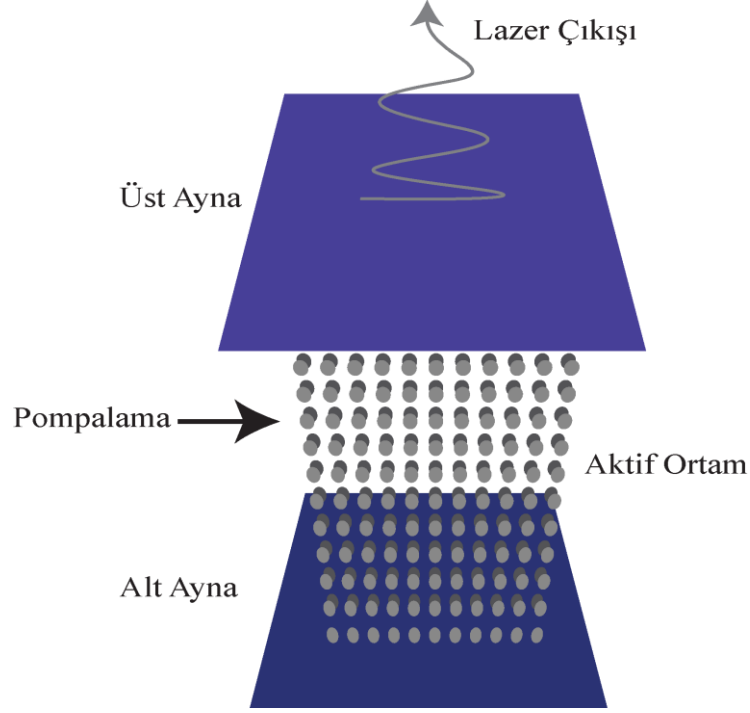
#### 3.2. Lazerlerin Çalışma Prensibi

Lazerler optik bir osilatör olarak tanımlanabilir. Bir lazerde kazancın sağlandığı (yükseltmenin gerçekleştiği) ortam aktif bölgedir, aktif bölgeye pozitif geri beslemeyi sağlayan yapı ise aynalardır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Lazer osilasyonunun gerçekleşmesi için iki şart vardır;

- Tersinir Popülasyon
- Optik Geri Besleme



Şekil 3.5. Lazer şematığı

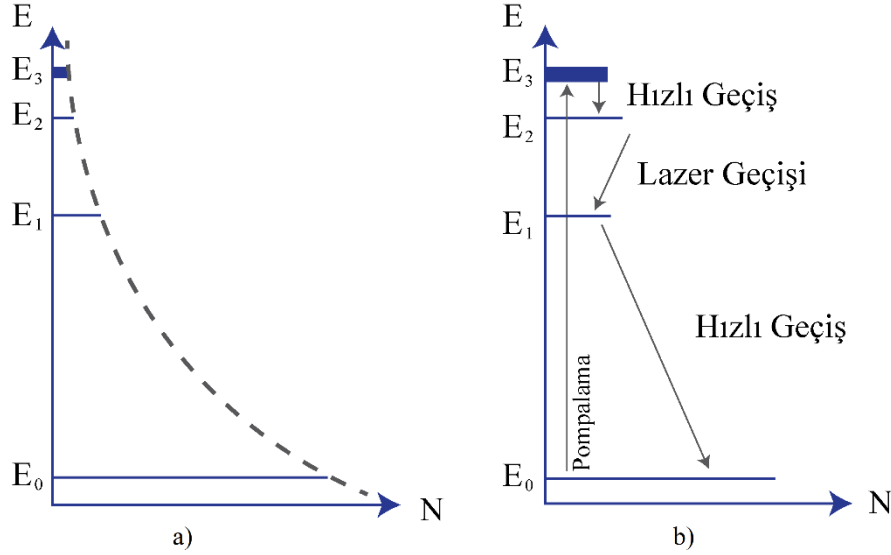
#### 3.2.1. Tersinir popülasyon

Lazer çıkışının gerçekleşmesi için yapıda uyarılmış emisyonun baskın olması gerekmektedir. Uyarılmış emisyonun gerçekleşmesi için üst enerji seviyelerinden valans banda sürekli elektron geçişi sağlanmalıdır. Elektronlar doğaları gereği üst enerji seviyelerinden temel enerji seviyesine dönme eğilimindedirler. Denge durumunda valans banttaki elektronların sayısı iletim bandında bulunan elektronların sayısından yüksektir. Tersinir popülasyon ile üst enerji seviyelerinde bulunan elektronların sayısı valans bantta bulunan elektron sayısından yüksek duruma gelir. Bu olayın gerçekleşmesine tersinir popülasyon denir. Lazerlerde uyarılmış emisyonun sürekliliğinin sağlanması için üst enerji seviyesinde bulunan elektron sayısının alt enerji seviyesinde bulunan elektron sayısından yüksek olması gerekir. Bu durumun sağlanması için ortama sürekli enerji



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

verilerek elektronların uyarılması gerekmektedir Lazer ortamına harici olarak enerji verilmesine pompalama ya da sürme denir.



**Şekil 3.6.** Dört seviyeye sahip sistemde popülasyon değişimi a) Pompalama öncesi b) Pompalama sonrası (Wilson and Hawkes 1998)

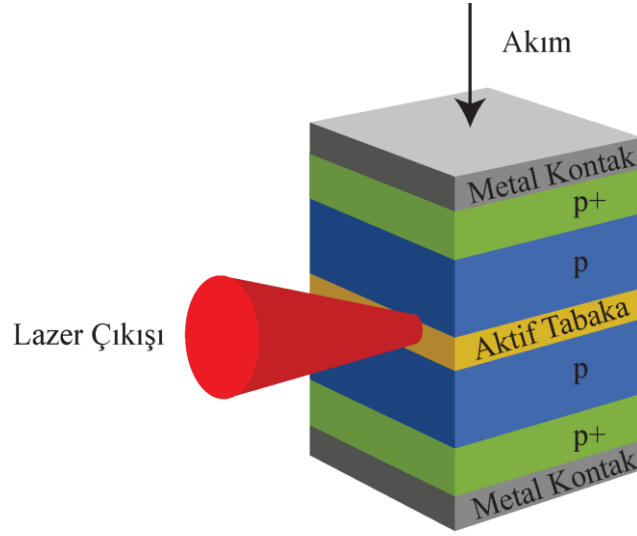
#### 3.2.2. Optik geri besleme

Tersinir popülasyonun gerçekleşmesinin ardından uyarılmış emisyon nedeniyle oluşan fotonların belirli bir yönde toplanması ve güçlendirilmesi için rezonatöre ihtiyaç duyulur.

Lazer rezonatörlerinde aktif bölge iki ayna arasında bulunmaktadır. Elektromanyetik dalgalar bu iki ayna arasında hareket etmektedir. Lazer operasyonunda kalıcılığın sağlanması için elektromanyetik dalganın fazının rezonatör içinde iki ayna arasındaki bir turu sonunda kendini tekrar etmeli ve yıkıcı girişimler oluşturmamalıdır. Dalga boyu  $\lambda_0$ , aktif ortamın kırılma indisi  $n_{eff}$ , rezonatör boyu  $L$  ve boylamsal mod sayısı  $m$  olmak üzere rezonatör boyu elektromanyetik dalganın dalga boyunun yarım tam katları olmak üzere denklem 3.2 ile verilir.

$$\exp\left((-j)\frac{2\pi}{\lambda_0/n_{eff}}(2L)\right) = 1 \quad (3.1)$$

$$L = \frac{m\lambda_0}{2n_{eff}} \quad (3.2)$$



**Şekil 3.7.** Fabry-Perot rezonatör şeması

Lazer ışığının bir kısmı devamlı olarak aktif ortamda hapsedilerek fotonlar tarafından üretilen ışığa geri besleme sağlaması gerekir. Bu nedenle aktif ortam farklı tür ve şekillerde aynaların arasına yerleştirilmiştir. Bu aynalar aktif ortamda devamlı olarak bir miktar ışığı hapsederek geri beslemeyi oluşturur. Üretilen aynalardan birinin geçirgenliği diğer aynaya nazaran yüksek yapılarak, ışığın aktif ortamdaki dışarı çıkışı sağlanır.

### 3.3. Lazer Türleri

Birçok farklı formda ve türde aktif ortama sahip olan lazerler bulunmaktadır. Oluşturulan optik yapıya göre çeşitli dalga boylarında ve çeşitli çıkış güçlerine sahip lazerler elde edilmektedir. Lazer türlerine örnek olarak;

#### **Katı hal lazerleri**

Aktif ortamın katı formdaki lazer materyallerini kullanan lazerlerdir. Bu tür lazerlerde aktif ortam olarak kristaller kullanılır. Katı hal lazerler, aktif ortam olarak

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

kullandıkları materyallere göre farklı isimlerle adlandırılır. Bu lazerler sürekli dalga ve darbeli modlarda çalışabilirler.

#### **Gaz lazerler**

Gaz lazerler aktif ortamın gazlar tarafından oluşturulan lazerlerdir. Gaz lazerlerde ışımalar enerji seviyeleri arasında gerçekleşen geçişler veya moleküllerin dönme/titreme seviyeleri arasında oluşmaktadır. Gaz lazerler nötr atom içeren lazerler, iyon lazerleri ve moleküler lazerler olmak üzere üç ana gruba ayrılır. Gaz lazerlere; Helyum-Neon lazeri (He-Ne), Argon lazeri (Ar), Karbondioksit lazeri (CO<sub>2</sub>) ve Azot lazeri (N) örnek verilebilir. Geniş dalga boyu aralığında çalışabilen bu lazerler sürekli dalga ve darbeli modlarda çalışabilirler (Okur 2000).

#### **Sıvı lazerler**

Farklı çeşitlerde sıvı lazeri üretilmiştir. Bunların en önemlisi boya (dye lasers) lazerlerdir. Boya lazerler aktif ortamı bir çözücüde çözünen organik boyadır. Bu tür lazerler çeşitli dalga boylarında çıkış alınabilecek özelliklerde ayarlanabilirler (Okur 2000).

#### **Fiber lazerler**

Fiber lazerlerde aktif ortam, kavite ve aynalar tek bir optik fiber içinde bulunmaktadır. Optik bir fiberin nadir elementler ile katkılanması ile de oluşturulabilir.

#### **Kimyasal lazerler**

Kimyasal lazerler aktif ortamda oluşan nüfus tersinmesinin ekzotermik bir kimyasal reaksiyon ile elde edildiği lazerlerdir. 1965’de Pimentel ve Kasper ilk kimyasal lazeri gerçekleştirmiştir. 1984 yılında 1 MW gücüne sahip Hidrojen florür (HF) lazeri geliştirilmiştir (Bloembergen and Patel 1987).

#### Serbest elektron lazerleri

Bu tür lazerde aktif ortam olmadan lazer ışığı elde edilmektedir. Yüksek enerjili serbest olarak hareket eden elektronların manyetik alan ile etkileşmesi ile elektronlar bir lazer aktif ortamı gibi davranarak lazer ışığını oluştururlar. Serbest elektron lazerinin spektrum aralığı vakum ultraviyole (VUV-Vacuum Ultra Violet)'den sert X-ışını (hard X-ray) bölgesine kadar geniş bir aralığa sahiptir (Gezgin 2009).

#### 3.4. Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken maddeler iletkenliği metaller ve yalıtkanlar arasında olan malzemeler olarak tanımlanmaktadır. Yarı iletkenler malzemeler iki sınıfa ayrılabilirler; Bunlar yarı iletken elementler ve yarı iletken bileşiklerdir. Yarı iletken elementler periyodik tablonun IV. grup elementleridir. Yarı iletken bileşikler ise periyodik tablonun II-VI ve III-V gruplarında bulunan elementler kullanılarak oluşturulan bileşiklerdir. Tüm yarı iletkenler lazer yapımında kullanılamamaktadır. Lazer yapımında kullanılan yarı iletkenler direkt yasak bant enerjisine (direct band gap) sahip olmalıdır.

Yarı iletken lazerlerde ışığın yükseltildiği ortam katkısız (undoped - instrictic) ve direkt yasak bant geçişine sahip bir yarı iletkenidir. Bu ortam katkısız ortamın kırılma indisinden düşük bir kırılma indisine sahip p ve n tipi iki yarı iletken malzemenin arasında bulunmaktadır. P-n eklemi ileri yönde kutuplandığı zaman boşluklar ve elektronlar aktif bölgede birleşerek ışınımsal geçişler ve ışınımsal olmayan geçişler oluştururlar. Eşik akımı olarak tanımlanan ve oluşturulan yapıya bağlı olarak değişiklik gösteren bir akım değerinde optik kazanç kavitede meydana gelen kayıplara eşit olur ve lazer operasyonu başlamış olur.

Rezonatör kayıpları yarı iletken malzemenin yüzeyinde meydana gelen kısmı yansımalar sebebi ile oluşmaktadır. Rezonatörün uzunluğu  $L$ , birinci aynanın yansıtıcılığı  $R_1$ , ikinci aynanın yansıtıcılığı  $R_2$ , ayna kayıpları  $\alpha_m$ , yarı iletken malzemedeki optik homojensizlik, yapıdaki kusurlar ve serbest taşıyıcı soğurması sebebiyle oluşan kayıplar  $\alpha_i$  ve hapsetme faktörü  $\Gamma$  olmak üzere. Ayna kayıpları 3.3'de bulunan denklem ile gösterilmektedir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

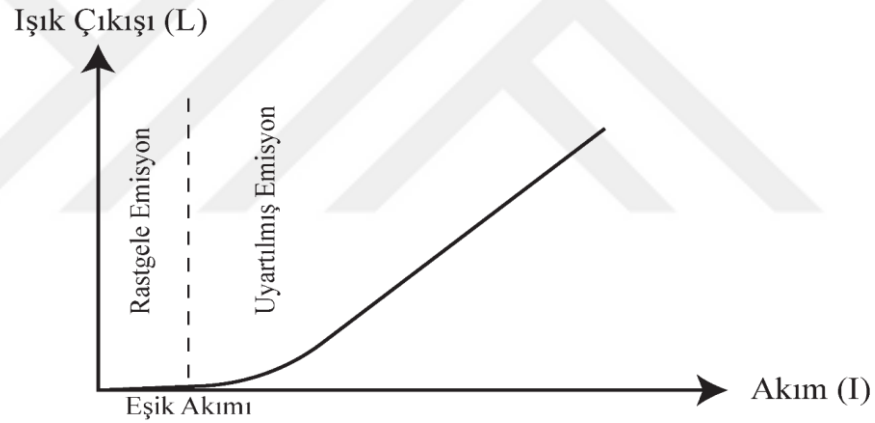
$$\alpha_m = \alpha_{m1} + \alpha_{m2} = \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \quad (3.3)$$

Eşik kazanç katsayısı 3.5’de bulunan denklem ile gösterilmektedir.

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} [\alpha_i + \alpha_m] \quad (3.4)$$

$$g_{th} = \frac{1}{\Gamma} \left[ \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left( \frac{1}{R_1 R_2} \right) \right] \quad (3.5)$$

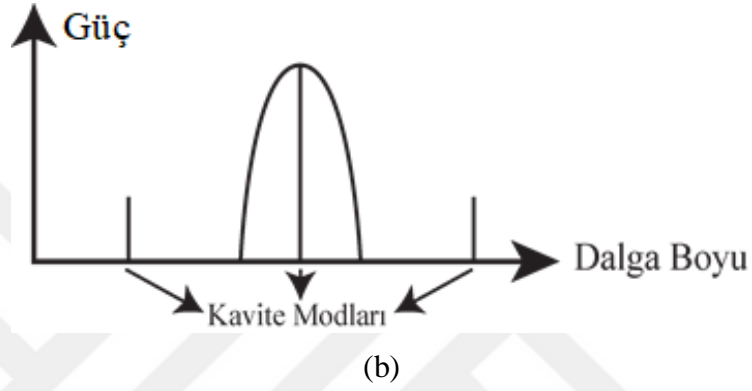
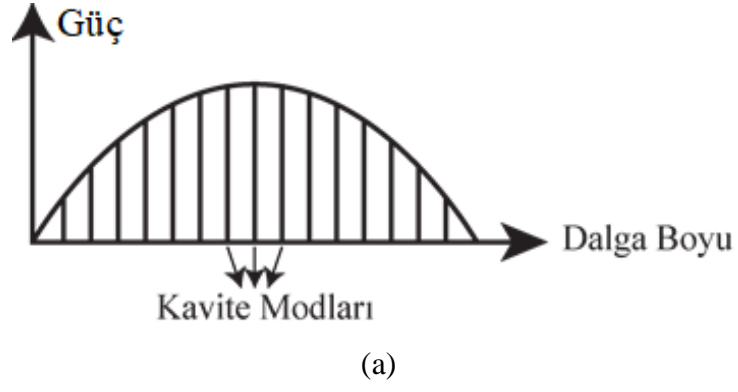
Eşik kazanç katsayısı kavitede elde edilen kazancın, kavite kayıplarına eşit olduğu değerdir. Yapıda eşik akımının üzerine çıkıldıkça uyartılmış emisyon oluşmaya başlar ve zamanla rastgele emisyon baskın gelerek lazer çıkışı elde edilir. (Şekil 3.8)



**Şekil 3.8.** Lazerlerin çıkış gücü-akım grafiği

Yarı iletkenlerin enerji seviyeleri arasındaki farklar nedeniyle bu enerji farklar kadar enerjiye sahip olan fotonlar oluşacaktır. Bu nedenle lazer ışığının çıkış spektrumunda belirli aralıklara sahip frekans bileşenleri görülecektir. Bunlara boylamsal mod denir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.9. a) Kenar yayımlı lazerin boylamsal mod spektrumu b) VCSEL'in boylamsal mod spektrumu

Boylamsal mod sayısını veren ifade 3.6'da gösterilmiştir.

$$m = \frac{2n_{eff}L}{\lambda_0} \quad (3.6)$$

Boylamsal modlar arasında frekans aralığını veren ifade 3.7'de gösterilmiştir.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2n_{eff}L} \quad (3.7)$$

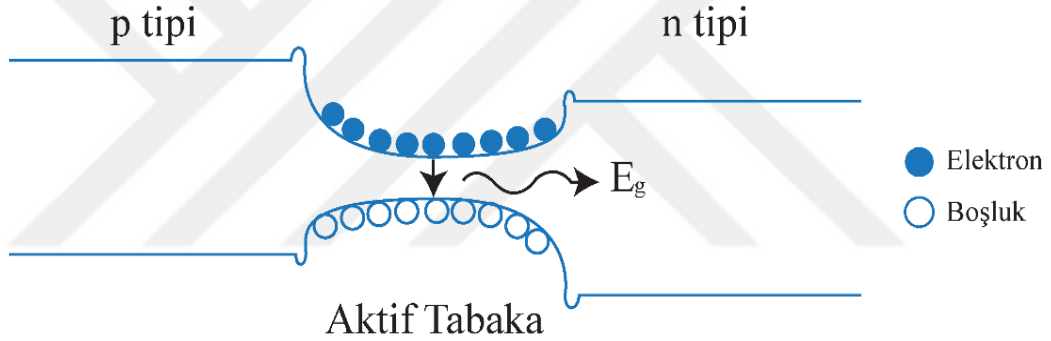
Boylamsal modlar arasında dalga boyu aralığını veren ifade 3.8'de gösterilmiştir.

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_0^2}{2n_{eff}L} \quad (3.8)$$

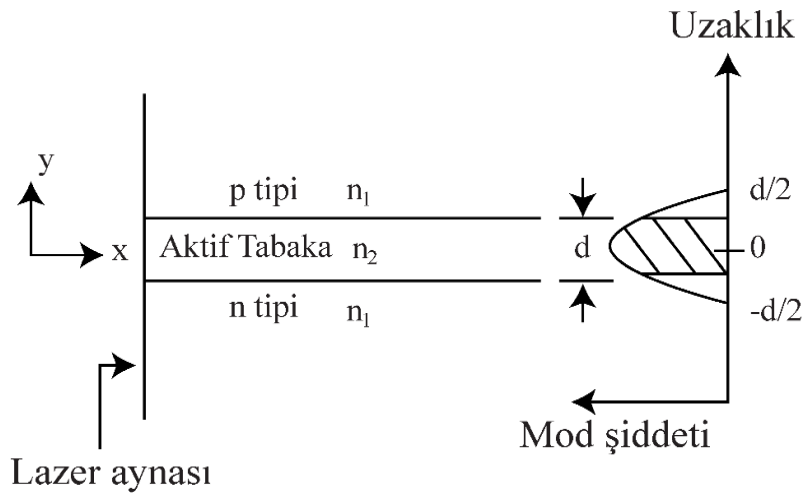
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Yarı iletken lazerden optik kazanç elde edilebilmesi için harici olarak optik veya elektriksel olarak pompalama gerçekleştirilmelidir. Oluşturulan p-n eklemi ileri yönde kutuplanarak optik kazanç elde edilir.

Kaviterlerin taşıyıcı gömülüm düzeyleri lazerlerin performanslarında önemlidir. Bu sebeple yarı iletken lazerlerde türdeş olmayan yapılar (heterostructure) kullanılarak yapıların bant potansiyel farkları ile taşıyıcıların aktif tabaka ve yakınlarında gömülmesi sağlanır. Çift türdeş olmayan (double heterostructure) yapılarda aktif ortam iki türdeş olmayan katman arasında oluşur. Bu aktif ortamın kalınlığı türdeş olan ve türdeş olmayan yapılarda bulunan aktif ortama nazaran daha kalındır. Aktif ortamı oluşturan malzemenin bant aralığından daha yüksek bant aralığına sahip olan diğer katmanlar sayesinde taşıyıcı gömülümü mekanizması gerçekleştirilir (Agrawal and Dutta 1993).



Şekil 3.10. Çift türdeş olmayan yarı iletken lazerde taşıyıcı gömülümü

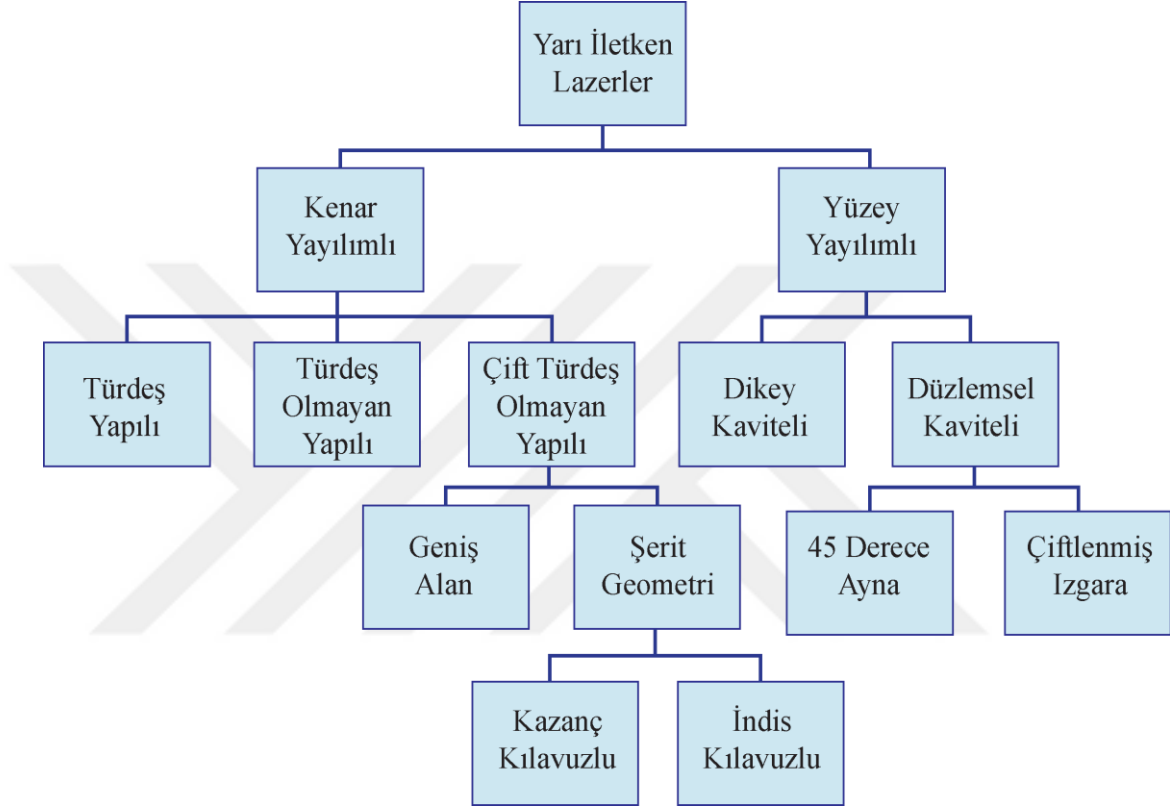


Şekil 3.11. Çift türdeş olmayan yarı iletken lazerde foton gömülümü

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### 3.4.1 Yarı iletken lazer türleri

Yarı iletken lazerler çeşitli parametrelerine göre sınıflandırılabilirler. Yarı iletken lazerlerin Şekil 3.12’de yapılarına göre yapılan bir sınıflandırma gösterilmektedir (Çakmak 2000).



Şekil 3.12. Yarı iletken lazerlerin yapılarına göre sınıflandırılması (Çakmak 2000)

Lazerler ışınım yaptıkları bölgelere göre yüzey yayılımlı lazerler ve kenar yayılımlı lazerler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kenar yayılımlı lazerler büyütme doğrultusuna dik ışınım yaparken yüzey yayılımlı dikey kaviteli lazerler büyüte doğrultusuna paralel ışınım yapmaktadırlar. Kenar yayılımlı lazerlerde aynalar büyütme doğrultusuna dik konumda bulunurken yüzey yayılımlı dikey kaviteli lazerlerde aynalar büyütme doğrultusuna paraleldir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin kenar yayımlı lazerlere göre sahip olduğu avantajları aşağıda verilmiştir (İga 2000);

- Yayılım cihaz yüzeyine diktir.
- Kompakt ve düşük boyutlardadır.
- Dairesel ışık çıkışı elde edilebilir.
- Işığın ıraksaması çok düşüktür.
- Oldukça düşük eşik akım değerine sahiptir.
- Dalga boyu ve eşik değerleri sıcaklık değişimine neredeyse duyarlıdır.
- Dar spektral çizgi genişliğine sahiptir.
- Yüksek hızlarda anahtarlanabilir.
- Cihazlar uzun ömre sahiptir.
- Yüksek verime sahiptir.
- Fiber optik kabloya kablajı kolaydır.
- Üretimde cihaz testlerinin yapılması kolaydır.
- Üretim ve paketleme maliyeti düşüktür.
- Doğrudan modüle edilebilir.
- 2 boyutlu diziler oluşturulabilir.

#### 3.5. Yüzey Yayımlı Dikey Kaviteli Lazerler (VCSELs)

Yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin icadından sonra, VCSEL'ler hem araştırmacılar hem de teknoloji üreticileri için önemli bir konu haline gelmiştir. 1996'da Honeywell tarafından ticari olarak ilk üretilen VCSEL'ler ile kenar yayımlı lazerler birçok uygulamada ve özellikle haberleşme alanında yerlerini VCSEL'lere bırakmışlardır.

VCSEL'lerin kenar yayımlı lazerlere göre sahip olduğu üstün özellikler sebebi ile haberleşme alanında popüler olarak kullanılan ışık kaynağı olmuştur. Kısa mesafeli optik haberleşme, uzun mesafeli optik haberleşme, yüksek hızlı yerel alan ağları (LANs), fiber optik kanallar, optik bağlantılar, sensörler, görüntüleme ve haritalama gibi birçok uygulama alanında kullanılmaktadırlar.

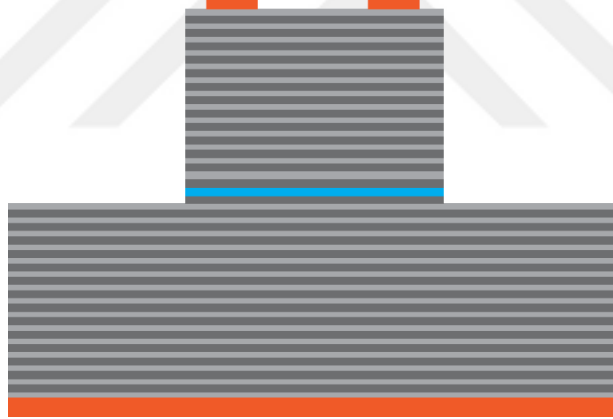
### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

VCSEL'lerin aktif ortamını kuantum çukur yapılar oluşturmaktadır. Kısa aktif ortam nedeniyle ile azalan kazanç ortamının etkisini ortadan kaldırmak için VCSEL'lerin aynaları yüksek yansıtıcılığa sahip olan Dağıtılmış Bragg Yansıtıcılar (DBR) kullanılmaktadır.

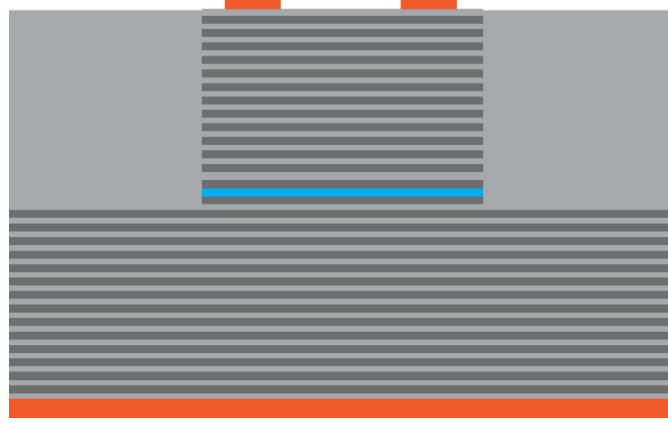
VCSEL'ler farklı yapılar halinde tasarlanıp üretilmektedirler. Farklı yapıların tasarlanmasındaki amaç taşıyıcı ve optik gömülümünün çeşitli değerlerde elde edilmesidir.

İlk yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerde üretimi kolay ve en basit yapı olan aşındırılmış yarı iletken-hava yapı kullanılmıştır. Aşındırılmış yarı iletken-hava yapı Şekil 3.13'de gösterilmektedir. Bu yapıda kırılma indisi farkı yarı iletken ve hava arasında oluşmaktadır. Kırılma indisi farkı ile optik gömülüm sağlanırken ışınımsal olmayan (nonradiative) kayıplar yüksektir.



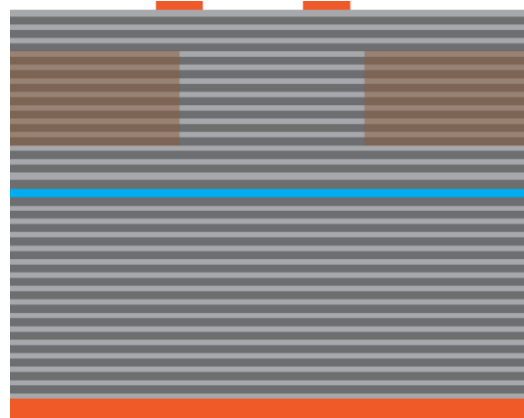
**Şekil 3.13.** Aşındırılmış yarı iletken-hava yapı

Aşındırılmış yarı iletken-hava yapıda yapılan bir geliştirme ile gömülü türdeş olmayan yapı elde edilmiştir. Gömülü türdeş olmayan yapı Şekil 3.14'de gösterilmektedir. Bu yapıda mesa daha düşük kırılma indisine sahip olan başka bir yarı iletken malzeme ile çevrelenmiştir. Bu yapı sayesinde optik gömülüm sağlanmış ve aşındırılmış yarı iletken-hava yapıda yaşanan ışınımsal olmayan kayıplar azaltılmıştır (Westbergh 2011).



**Şekil 3.14.** Gömülü türdeş olmayan yapı

Mesa etrafına iyon implantasyonu ile elde edilen yapı gömülü türdeş olmayan yapıya benzemektedir. İyon implantasyonu ile elde edilen yapı Şekil 3.15’de gösterilmektedir. Bu yapı bahsedilen diğer tekniklerle elde edilen yapılardan daha başarılı olmuştur. Kolay üretim, cihaz ömrü ve güvenilirliği nedeniyle ticari olarak üretilen ilk VCSEL’lerde iyon implantasyonu ile elde edilen yapı kullanılmıştır. Farklı çeşitlerde iyon kullanılmasına rağmen  $H^+$  tercih edilmektedir. İyon implantasyonu ile yalıtkan bir alan elde edilerek akım gömülümünün verimi artırılmıştır. Ancak iyon implantasyonu ile optik gömülüm için zayıf bir kılavuzlama sağlanmıştır (Badilita 2004; Westbergh 2011).



**Şekil 3.15.** İyon implante edilmiş yapı

Dielektrik (oksit) açıklıklı yapıda iyon implantasyonu ve gömülü türdeş olmayan yapının aksine tüm kavite boyunca bir kaplama yapılmamış ve aşındırılmış yarı iletken-hava yapıya benzer bir yapı kullanılıp sadece belirli bir noktada indisleme yapılmıştır. Dielektrik (oksit) açıklıklı yapı Şekil 3.16’da gösterilmektedir. Dielektrik (oksit) açıklıklı yapının oluşturulması ile yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin performansında önemli

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

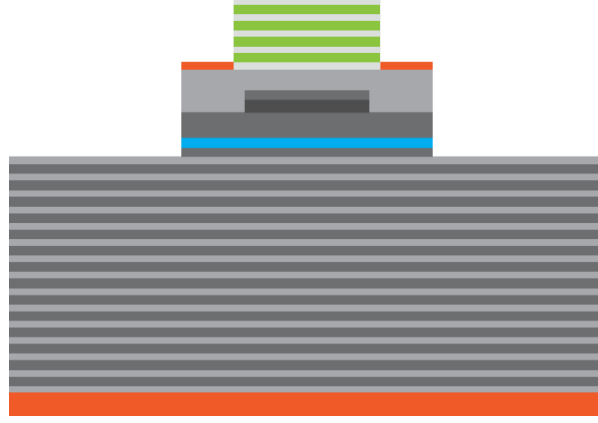
gelişmeler sağlanmış ve aygıtların yaşam süresi uzatılmıştır. Dielektrik (oksit) açıklıklı yapının kullanılması ile optik mod ve taşıyıcı gömülümü sağlanarak cihazın boyutunun ve eşik akımının azalması sağlanmıştır. Dielektrik (oksit) açıklıklı yapıda açıklığın tasarlanması ve yerleştirilmesi önemli bir unsurdur, çünkü açıklığın konumu ve şekli cihaz performansını etkilemektedir (Badilita 2004; Westbergh 2011).



**Şekil 3.16.** Oksit açıklıklı yapı

Gömülü tünel eklem yapı ile taşıyıcı ve optik gömülümü etkili bir biçimde sağlanabilir. Gömülü tünel eklem yapı Şekil 3.17'de gösterilmektedir. Taşıyıcı gömülümü yüzey yayımlı dikey kaviteli lazer ileri yönde kutuplandıktan sonra kenarlardaki n tipi ve p tipi yüzeyin ters kutuplanması ile etkili bir şekilde sağlanır.

Gömülü tünel eklem yapı yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerde, bant-bant emiliminden kaçınmak için kuantum çukurların bant aralığından daha büyük bir malzeme kullanılır. Ayrıca kullanılan bu malzeme ile optik mod gömülümü de sağlanmaktadır (Westbergh 2011).



Şekil 3.17. Gömülü tünel eklem yapısı

#### 3.5.1 Aktif bölge yapıları

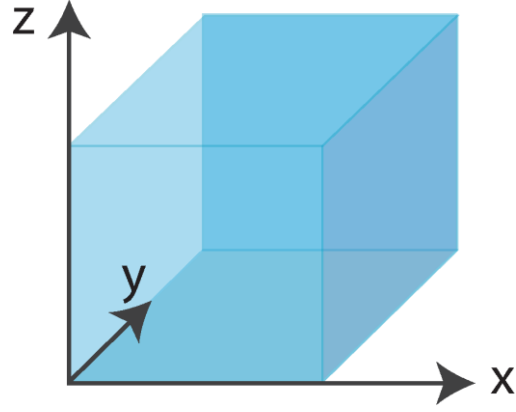
Yarıiletken lazerler aktif tabakalarının kalınlıklarına göre;

- Külçe (Bulk)
- Kuantum çukur (Quantum well)
- Kuantum tel (Quantum wire)
- Kuantum nokta (Quantum dot)

olarak sınıflandırılabilirler.

Külçe lazerlerde aktif tabakanın tüm boyutları de Broglie dalga boyunun ( $\lambda_d$ ) üzerindedir. Şekil 3.18'de külçe lazer yapısı gösterilmektedir. Aşağıdaki gösterimde  $k$  yayılma sabiti,  $h$  Planck sabiti ve  $p$  elektron momentumudur.

$$\lambda_d = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p} = \frac{h}{m.v} \quad (3.9)$$



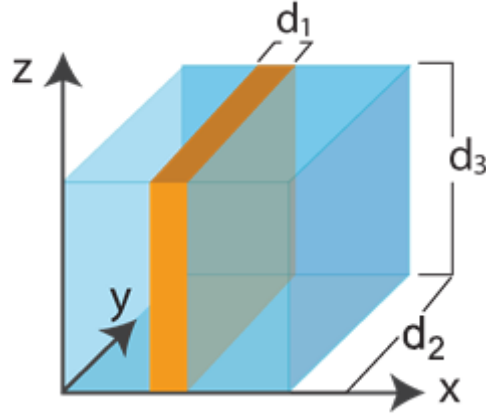
**Şekil 3.18.** Külçe yapı gösterimi

Külçe lazerlerde aktif tabakada boşluk ve elektron hareketinde bir sınırlama bulunmamaktadır. Bir külçe yarıiletkende enerji-momentum ilişkisi aşağıda verilen ifade ile gösterilmektedir.

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_c} \quad (3.10)$$

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 n^2}{2m_c} \quad (3.11)$$

Bant aralıkları farklı iki yarıiletken madde yeterince ince kalınlıklarda art arda büyütülürken daha düşük bant aralığına sahip yarıiletken tabakasının (aktif tabaka) kalınlığı de Broglie dalga boyundan ( $\lambda_d$ ) küçük ise kuantum çukurlar elde edilir. Şekil 3.19'da kuantum çukur lazer yapısı gösterilmektedir. Aktif tabaka kalınlığının de Broglie dalga boyundan düşük olduğu zaman külçe lazerlerin sahip olduğu enerji-momentum ilişkisi ortadan kalkar. Kuantum boyutların yapıdaki etkisi ile valans ve iletim bantlarında oluşan potansiyel çukurlara boşluk ve elektronların gömülümü sağlar.



Şekil 3.19. Kuantum çukur yapı gösterimi

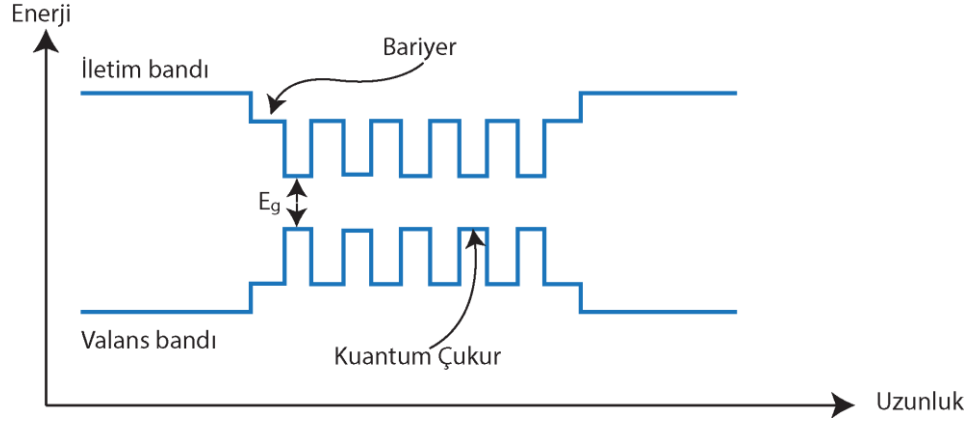
Kuantum çukur lazerlerin külçe lazerler göre birçok avantajı bulunmaktadır (Çakmak 2000). Bunlar;

- Nüfus terslenmesi daha kolay gerçekleşir.
- Daha düşük eşik akımına sahiptirler.
- Spektral genişlikleri daha dardır.
- Daha yüksek çıkış gücüne sahiptir.
- Sıcaklığa bağımlılığı daha azdır.
- Verimliliği yüksektir.
- Daha yüksek hızlarda anahtarlanabilirler.

Kuantum çukur lazerler tek veya çoklu aktif tabakalar halinde üretilmektedir. Tek aktif tabakaya sahip olan lazerlere tek kuantum çukur lazerler (Single Quantum Well–SQW Laser) olarak adlandırılırken çoklu aktif tabakaya sahip lazerler (Multi Quantum Well–MQW Laser) olarak adlandırılır. Çoklu kuantum çukur lazerlerde birden fazla kuantum çukur kullanarak kazanç katsayısı artırılmaktadır. Çoklu kuantum çukur lazerlerin hapsedme faktörü tek kuantum lazerlere göre daha yüksektir. Bu sebeple çoklu kuantum çukur lazerlerin eşik akım yoğunluğu ve eşik taşıyıcı yoğunluğu tek kuantum çukur lazerlere göre daha düşüktür.

$$\Gamma = 2 \times \frac{L_{\text{aktif bölge}}}{L_{\text{efektif}}} \times 0,9 \quad (3.12)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM



Şekil 3.20. Çoklu kuantum çukur yapı gösterimi

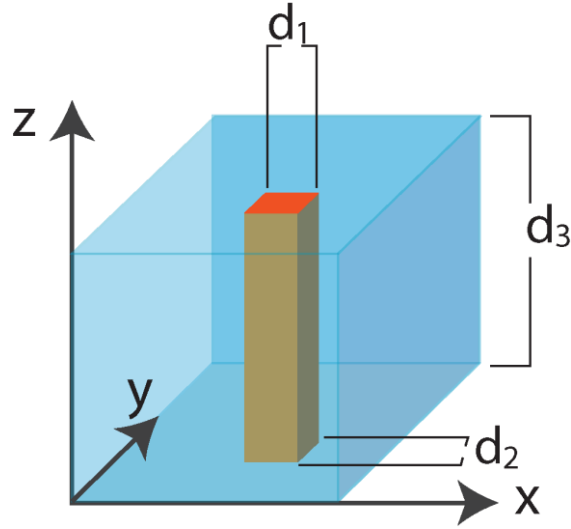
Kuantum çukur yapılarında boşlukların ve elektronların hareketi büyütme doğrultusunda neredeyse sonsuz derinlikte olduğu kabul edilen bir potansiyel çukurda sınırlandırılmışken (kuantize olmuşken), büyütme doğrultusu dışındaki iki doğrultuda ise hareketleri sınırlandırılmamıştır. Kuantum çukur yapılarda boşluklar ve elektronlar  $d_1$  (çukur kalınlığı) içinde tek bir doğrultuda hapsedilmektedir.  $d_1 \ll d_2$  ve  $d_1 \ll d_3$  olması nedeniyle  $k_2$  ve  $k_3$  birbirine yakın ayrık değerler alırken  $k_1$ 'den farklı değerler almaktadırlar. Bu sebeple  $k_2$  ve  $k_3$ , külçe yapısında olduğu gibi davranmaktadır.

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_2^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_c} \quad (3.13)$$

$$E = E_c + E_{q1} + \frac{\hbar^2 n_2^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 n_3^2}{2m_c} \quad (3.14)$$

Kuantum tel yapılarda aktif tabakanın herhangi iki doğrultusundaki kalınlığı, de Broglie dalga boyundan küçüktür. Şekil 3.21'de kuantum tel lazer yapısı gösterilmektedir. Bu aktif tabaka yapısında boşluk ve elektronların hareketi herhangi iki doğrultuda sınırlandırılırken diğer doğrultuda herhangi bir sınırlama bulunmamaktadır. Böylece kuantum tel yapısında boşluklar ve elektronlar iki doğrultuda hapsedilmektedir. Bir kuantum tel yarıiletkeninde enerji-momentum ilişkisi aşağıda verilen ifade ile gösterilmektedir. ( $d_1 \ll d_3$  ve  $d_2 \ll d_3$ )



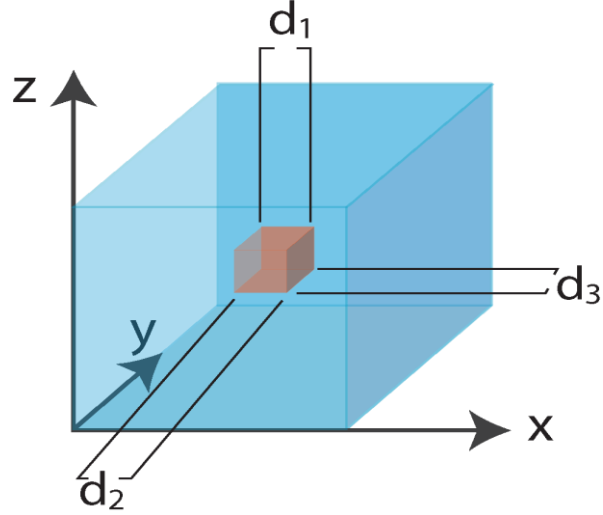


Şekil 3.21. Kuantum tel yapı gösterimi

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_2^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_c} \quad (3.15)$$

$$E = E_c + E_{q1} + E_{q2} + \frac{\hbar^2 n_3^2}{2m_c} \quad (3.16)$$

Kuantum nokta yapılarda aktif tabakanın üç doğrultusundaki kalınlığı de Broglie dalga boyundan küçüktür. Şekil 3.22’de kuantum nokta lazer yapısı gösterilmektedir. Bu aktif tabaka yapısında boşluk ve elektronların hareketi üç doğrultuda da sınırlandırılmıştır. Böylece kuantum nokta yapısında boşluklar ve elektronlar üç doğrultuda hapsedilmektedir. Bir kuantum nokta yarıiletkeninde enerji-momentum ilişkisi aşağıda verilen ifade ile gösterilmektedir.

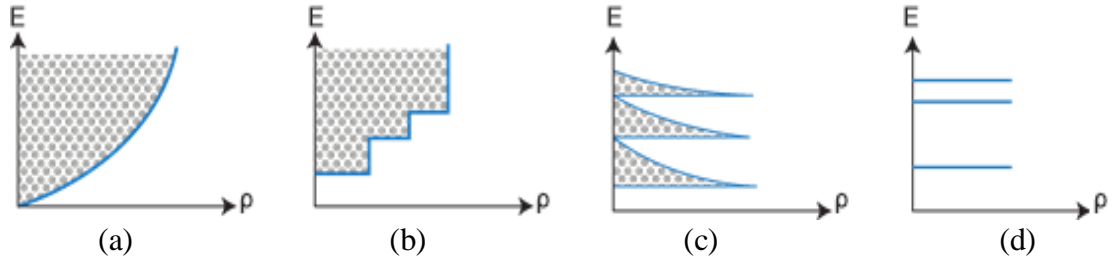


Şekil 3.22. Kuantum nokta yapı gösterimi

$$E = E_c + \frac{\hbar^2 k_1^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_2^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_c} \quad (3.17)$$

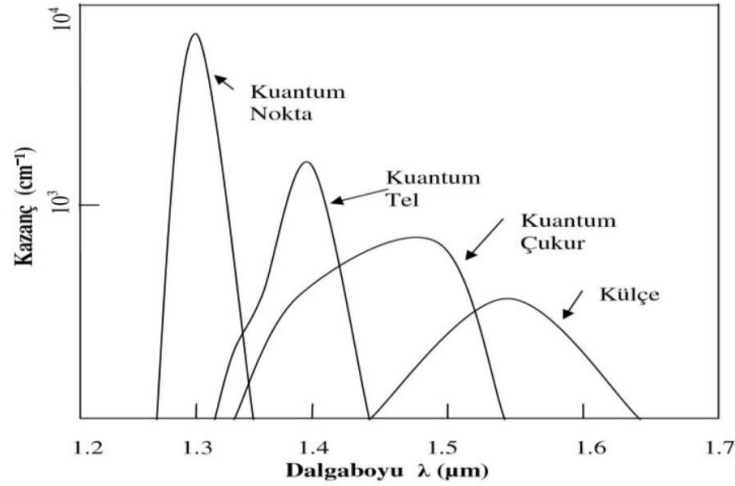
$$E = E_c + E_{q1} + E_{q2} + E_{q3} \quad (3.18)$$

Şekil 3.23'de külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta yapıların durum yoğunluklarının gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.23. Enerji durum yoğunlukları a) Külçe yapı b) Kuantum çukur yapı c) Kuantum tel yapı d) Kuantum nokta yapı

Şekil 3.24'de külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta yapılarının dalga boyu ve kazanç grafiği verilmiştir. Aktif tabakanın farklı doğrultulardaki kalınlıklarına göre boşluk ve elektronların hapsedilme mekanizmalarına göre külçe yapılardan kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta yapılara gidildikçe elde edilen maksimum kazanç artarken, kazanç bant genişliği azalmaktadır (Kotan 2008).



Şekil 3.24. Aktif bölge yapılarına göre kazanç eğrileri (Kotan 2008)

#### 3.5.2. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılar (DBRs)

Dağıtılmış Bragg yansıtıcılar düşük ve yüksek kırılma indisine sahip yarıiletken veya dielektrik malzemelerin art arda periyodik olarak büyütülmesi ile oluşturulan yüksek yansıtıcılığa ve düşük soğurma kaybına sahip aynalardır.

Yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin kazanç ortamının düşük hacimlerde olması sebebiyle yüksek yansıtıcılığa ve düşük soğurma kaybına sahip olan dağıtılmış Bragg yansıtıcılar kullanılmaktadır. Aynaların yansıtıcılığı 0,99 yapılırsa soğurma kayıpları yaklaşık olarak  $15 \text{ cm}^{-1}$  değerinde olacaktır. Kenar yayımlı lazerlerde yansıtıcılık yaklaşık olarak 0,3 civarında ve buna bağlı olarak soğurma kayıpları ise  $10^3 \text{ cm}^{-1}$  ve daha yüksek değerlere ulaşmaktadır. Dağıtılmış Bragg yansıtıcıların soğurma kaybının değeri düşük eşik akım yoğunluğuna sahip lazerler için uygun bir değerdir. Yüksek yansıtıcılığa sahip dağıtılmış Bragg yansıtıcılar bu özellikleri ile yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerde kullanılmaktadır.

Dağıtılmış Bragg yansıtıcıların yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerle kullanılması ile elde edilen birçok avantajının yanında dezavantajı da bulunmaktadır. Aktif bölge ile ayna kalınlıklarının hatasız bir şekilde seçilmesi ve üretilmesi dikey kaviteli yüzey yayımlı lazerlerin performansı için çok önemlidir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Yüzey yayımlı dikey kaviteli lazerlerin aynalarında periyodik yapıda olan dağıtılmış Bragg yansıtıcılar kullanılarak, kısa kavite uzunluğundan kaynaklanan sorunları ortadan kaldırmayı sağlayan yüksek yansıtıcılık elde edilmiştir. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılar aktif tabakayı çevreleyen tabakaların kalınlıkları  $d_1$ ,  $d_2$  ve kırılma indisleri  $n_1$ ,  $n_2$  olan tabakaların art arda oluşturulması ile elde edilen yapıdır. Yapıyı oluştururken tabakaların kalınlığı için 3.19’da gösterilen denklem ile tabakaların kalınlıkları seçilmektedir.

$$n_1 d_1 = n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{4} \quad (3.19)$$

$$n_1 d_1 + n_2 d_2 = \frac{\lambda_0}{2} \quad (3.20)$$

Dağıtılmış Bragg yansıtıcıların, Bragg şartı sağlandığında yansıtıcılık değerleri çok yüksektir. Dağıtılmış Bragg yansıtıcıların yansıtıcılık değeri,

$$R = \left[ \frac{\left(1 - \left(\frac{n_s}{n_0}\right)\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\right)^{2P}}{\left(1 + \left(\frac{n_s}{n_0}\right)\left(\frac{n_1}{n_2}\right)\right)^{2P}} \right]^2 \quad (3.21)$$

denklem 3.21 ile elde edilir (Sale T. E. 1995). Bu gösterimde  $P$  katmanların yineleme sayısıdır.  $n_0$  havanın,  $n_s$  taşıyıcı tabakanın,  $n_1$  ve  $n_2$  birbirinden farklı olan iki tabakanın kırılma indisidir. Eğer yineleme sayısı ve  $n_1/n_2$  oranı uygun seçilirse yansıtıcılık 0,999’a ulaşır.

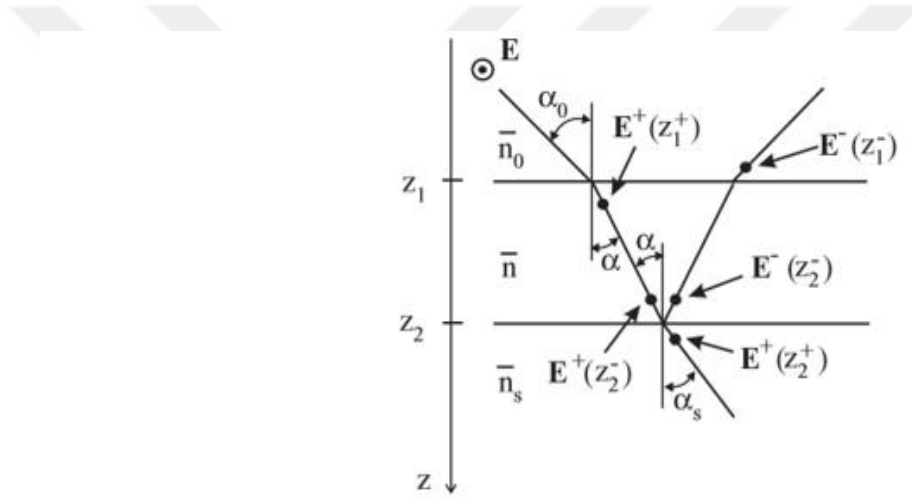
Dağıtılmış Bragg yansıtıcılarda farklı kalınlığa ve kırılma indisine sahip üst üste periyodik olarak büyütülen tabakaların her bir ara yüzeyinde yapıcı girişimler oluşur. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılardan elde edilen toplam yansıtıcılık üst üste büyütülen tabakaların periyoduna bağlı olarak artar.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

#### Geçiş matrisi yöntemi (TMM)

VCSEL'ler temel olarak alt ve üst dağıtılmış Bragg yansıtıcılar ile aktif bölgeden oluşmuştur. Dağıtılmış Bragg yansıtıcılarda lazerin çalışma çeyrek dalga boyu kalınlığına sahip farklı iki kırılma indisine sahip yarıiletken ya da dielektrik malzemeler kullanılmıştır. Kullanılan yöntem Geçiş Matrisi Yöntemi ya da Karakteristik Matris Yöntemi olarak adlandırılmıştır.

Kırılma indisi  $n_s$  olan bir alt tabaka üzerine büyütülen  $n$  kırılma indisine sahip bir tabaka ve  $n_0$  taşıyıcı ortamına sahip bir sistem düşünelim. (Şekil 3.25)



Şekil 3.25. Elektromanyetik alanın yüzey sınırlarında gösterimi (Wartak 2013)

Elektromanyetik dalganın elektrik alan vektörünün düzleme dik olduğunu (s-polarize) kabul edelim. Sınır koşullarda ( $z = z_1$ ) ve ( $z = z_2$ ) elektrik alan ve manyetik alan bileşenleri süreklidir.

$E^+(z)$  pozitif  $z$  yönünde ilerleyen ışığı ifade ederken,  $E^-(z)$  negatif  $z$  yönünde ilerleyen ışığı ifade eder. Sınır yüzeyde ( $z = z_1$ ) teğetsel bileşenlerin sürekliliği nedeniyle denklem 3.22 yazılır.

$$E(z_1) = E^+(z_1^+) + E^-(z_1^+) = E^+(z_1^-) + E^-(z_1^-) \quad (3.22)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Burada  $z_1^+$  değeri  $z_1$  değerinden biraz daha büyüktür. Benzer şekilde  $z_2^+$  değeri  $z_2$  değerinden biraz daha büyüktür.

$$E(z_2) = E^+(z_2^+) + E^-(z_2^+) = E^+(z_2^-) + E^-(z_2^-) \quad (3.23)$$

Elektromanyetik dalga, kalınlığı  $d = z_2 - z_1$  olan filmde hareket ederken oluşan faz farkı denklem 3.24'de gösterilmiştir.

$$\delta = \frac{2\pi\bar{n}d \cos \alpha}{\lambda} \quad (3.24)$$

Elektrik alanın sınır yüzeylere çok yakın noktalarda aralarındaki ilişki denklem 3.25 ve denklem 3.26'da verilmiştir.

$$E^+(z_2^-) = E^+(z_1^+)e^{-j\delta} \quad (3.25)$$

$$E^-(z_2^-) = E^-(z_1^+)e^{j\delta} \quad (3.26)$$

Manyetik alan denklemini tanımlamak için elektrik alan ve manyetik alan arasında bulunan ilişkiyi kullanarak  $\hat{k}$  birim vektör ve  $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$  serbest uzay empedansı olmak üzere denklem 3.27 yazılır.

$$H = \frac{\bar{n}}{Z_0} \hat{k} \times E \quad (3.27)$$

Manyetik alanın sınır yüzeylere çok yakın noktalarda aralarındaki ilişki denklem 3.28 ve denklem 3.29'da verilmiştir.

$z = z_1$  için;

$$Z_0 H(z_1) = [E^+(z_1^-) - E^-(z_1^-)]\bar{n} \cos \alpha_0 = [E^+(z_1^+) - E^-(z_1^+)]\bar{n} \cos \alpha \quad (3.28)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

$z = z_2$  için;

$$Z_0 H(z_2) = [E^+(z_2^-) - E^-(z_2^-)] \hat{n} \cos \alpha = E^+(z_2^+) \hat{n}_s \cos \alpha \quad (3.29)$$

Denklem 3.23, 3.25, 3.26 ve 3.29 kullanılarak 3.30 ve 3.31 denklemleri elde edilir.

$$E(z_2) = E^+(z_2^-) e^{-j\delta} + E^-(z_1^+) e^{j\delta} \quad (3.30)$$

$$H(z_2) = \frac{\hat{n} \cos \alpha}{Z_0} [E^+(z_1^+) e^{-j\delta} - E^-(z_1^+) e^{j\delta}] \quad (3.31)$$

Yukarıda verilen denklemlerin çözümü için aşağıda ara denklemler verilmiştir.

$$2E^-(z_1^+) e^{j\delta} = E(z_2) - \frac{Z_0}{\hat{n} \cos \alpha} H(z_2) \quad (3.32)$$

$$2E^+(z_1^+) e^{-j\delta} = E(z_2) + \frac{Z_0}{\hat{n} \cos \alpha} H(z_2) \quad (3.33)$$

Ara denklemlerin yardımı ile 3.22 ve 3.28 denklemleri  $z_1$  ve  $z_2$  noktaları için elde edilir.

$$E(z_1) = E(z_2) \cos \delta + \frac{Z_0}{\hat{n} \cos \alpha} H(z_2) j \sin \delta \quad (3.34)$$

$$Z_0 H(z_1) = E(z_2) j \sin \delta \hat{n} \cos \alpha + Z_0 H(z_2) \cos \delta \quad (3.35)$$

Denklem 3.34 ve 3.35 matris formunda yazılabilir.

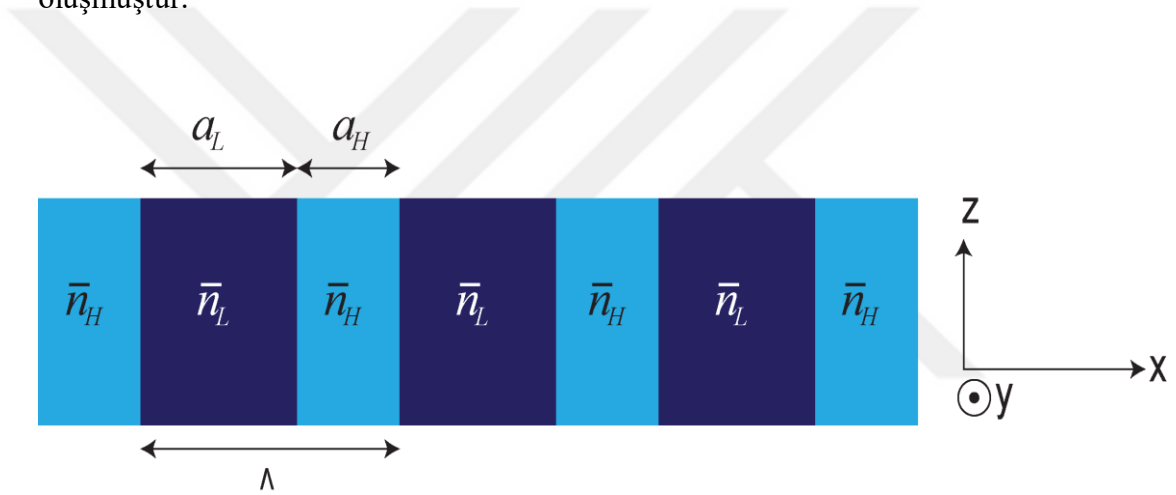
$$\begin{bmatrix} E(z_1) \\ Z_0 H(z_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{j \sin \delta}{\hat{n} \cos \alpha} \\ j \sin \delta \hat{n} \cos \alpha & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(z_2) \\ Z_0 H(z_2) \end{bmatrix} = \vec{M} \begin{bmatrix} E(z_2) \\ Z_0 H(z_2) \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

$\alpha = 0$  durumunda transfer matrisi denklem 3.37’de gösterilmiştir.

$$\vec{M} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{j \sin \delta}{\hat{n}} \\ j \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

Dağıtılmış Bragg Yansıtıcılar için Geçiş Matris Yöntemi uygulanacaktır. Elektromanyetik dalganın s-polarizasyona sahip olduğu kabul edilmektedir. Elektrik alan vektörünün y eksenini boyunca hareket ettiği ( $E = E(x) \cdot \hat{a}_y$ ) kabul edilmektedir. Temsili yapı şekil 3.26’da gösterilmektedir. Bu yapıda her hücre  $\bar{n}_L$  düşük kırılma indisli  $a_L$  uzunluğuna sahip ve hücre  $\bar{n}_H$  yüksek kırılma indisli  $a_H$  uzunluğuna sahip iki katmandan oluşmuştur.



Şekil 3.26. DBR ayna şematik görünümü (Wartak 2013)

Şekil 3.26’da  $A_n$  yüksek kırılma indisi değerine sahip olan katmandan iletilen elektromanyetik dalga ve yüksek kırılma indisi değerine sahip olan katmandan yansıyan elektromanyetik dalga  $B_n$ ’dir.  $C_n$  düşük kırılma indisi değerine sahip olan katmandan iletilen elektromanyetik dalga ve düşük kırılma indisi değerine sahip olan katmandan yansıyan elektromanyetik dalga  $D_n$ ’dir.

Şekil 3.26’da  $a_H$  yüksek kırılma değerine sahip olan katman kalınlığı ve  $a_L$  düşük kırılma değerine sahip olan katman kalınlığını ifade etmektedir.  $\Lambda$  düşük ve yüksek kırılma indisine sahip iki tabakadan oluşan hücrenin kalınlığını ifade etmektedir.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Transfer matris yöntemi temelde elektrik alanın  $n$ . hücreden  $(n - 1)$ . hücreye geçişi ile geliştirilir. Hücre, daha sonra birkaç kez tekrarlanan ve temel bir periyodik yapı oluşturan iki komşu tabakadan oluşur.  $n$ . hücrede elektrik alan denklem 3.38'de gösterilmektedir.

$$E_y(x) = \begin{cases} A_n e^{-jk_H(x-x_n)} + B_n e^{jk_H(x-x_n)} & x_p < x < x_n \\ C_n e^{-jk_L(x-x_p)} + D_n e^{jk_H(x-x_p)} & x_p < x < x_n \end{cases} \quad (3.38)$$

Denklem 3.38'de gösterilen  $k_H$  ve  $k_L$  aşağıda verilmektedir.

$$k_H^2 = \left(\frac{\bar{n}_H \omega}{c}\right)^2 \quad (3.39)$$

$$k_L^2 = \left(\frac{\bar{n}_L \omega}{c}\right)^2 \quad (3.40)$$

Manyetik alan vektörü Maxwell denklemlerinde tanımlanmıştır. Kullanılacak yapı için manyetik alan, denklem 3.41'de tanımlanmıştır.

$$\frac{\partial E_y(x)}{\partial x} = -j\omega\mu_0 H_z \quad (3.41)$$

$x_p$  ve  $x_{n-1}$  noktalarında elektrik alanın sürekliliği ile denklem 3.42 ve 3.43 elde edilir.

$$x = x_p \quad C_n + D_n = A_n e^{jk_H d_H} + B_n e^{-jk_H d_H} \quad (3.42)$$

$$x = x_{n-1} \quad A_{n-1} + B_{n-1} = C_{n-1} e^{jk_L d_L} + D_{n-1} e^{-jk_H d_L} \quad (3.43)$$

Benzer şekilde  $x_p$  ve  $x_{n-1}$  noktalarında manyetik alanın sürekliliği ile denklem 3.44 ve 3.45 elde edilir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

$$x = x_p \quad -k_L C_n + k_L D_n = -k_H A_n e^{jk_H d_H} + k_H B_n e^{-jk_H d_H} \quad (3.44)$$

$$x = x_{n-1} \quad -k_H A_{n-1} + k_H B_{n-1} = -k_L C_n e^{jk_L d_L} + k_L D_n e^{-jk_L d_L} \quad (3.45)$$

Verilen denklemler aşağıdaki gibi matris formunda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_L & -k_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-jk_H d_H} & e^{jk_H d_H} \\ k_H e^{-jk_H d_H} & -k_H e^{jk_H d_H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.46)$$

ve

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ k_H & -k_H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{jk_L d_L} & e^{-jk_L d_L} \\ k_L e^{jk_L d_L} & -k_L e^{-jk_L d_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

Yukarıda verilen matrisler  $n$ . hücreden  $(n-1)$ . hücreye elektrik ve manyetik alanın geçişini göstermektedir. Bir sonraki adımda  $\begin{bmatrix} C_n \\ D_n \end{bmatrix}$  ifadesi ortadan kalkar ve geçiş işlemi  $\begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix}$  ifadesi ile tanımlanacaktır.

$$\begin{bmatrix} A_{n-1} \\ B_{n-1} \end{bmatrix} = \vec{T} \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.48)$$

$\vec{T}$  Matrisi aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$\vec{T} = \vec{X}_H \cdot \vec{T}_L \cdot \vec{X}_L \cdot \vec{T}_H \quad (3.49)$$

$\vec{T}_L$  matrisi  $n_L$  kırılma indisine ve  $d_L$  kalınlığa sahip uniform bir ortamda yayılmayı göstermektedir. Benzer şekilde  $\vec{T}_H$  matrisi,  $n_H$  kırılma indisine ve  $d_H$  kalınlığa sahip uniform bir ortamda yayılmayı göstermektedir.

$$\vec{T}_L = \begin{bmatrix} e^{jk_L d_L} & 0 \\ 0 & e^{-jk_L d_L} \end{bmatrix} \quad (3.50)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

$\vec{X}_H$  ve  $\vec{X}_L$  sınır yüzeydeki davranışları tanımlayan matrislerdir.

$$\vec{X}_H = \begin{bmatrix} \frac{k_H+k_L}{2k_H} & \frac{k_H-k_L}{2k_H} \\ \frac{k_H-k_L}{2k_H} & \frac{k_H+k_L}{2k_H} \end{bmatrix} \quad (3.51)$$

$$\vec{X}_L = \begin{bmatrix} \frac{k_L+k_H}{2k_L} & \frac{k_H-k_L}{2k_L} \\ \frac{k_H-k_L}{2k_L} & \frac{k_L+k_H}{2k_L} \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

$\vec{T}$  matrisi denklem 3.53'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

$$a = e^{jk_H d_H} \left[ \cos d_L k_L + \frac{j}{2} \left( \frac{k_H}{k_L} + \frac{k_L}{k_H} \right) \sin d_L k_L \right] \quad (3.54)$$

$$b = \frac{j}{2} e^{-jk_H d_H} \left( \frac{k_L}{k_H} - \frac{k_H}{k_L} \right) \sin d_L k_L \quad (3.55)$$

$$c = \frac{j}{2} e^{jk_H d_H} \left( \frac{k_H}{k_L} - \frac{k_L}{k_H} \right) \sin d_L k_L \quad (3.56)$$

$$d = e^{-jk_H d_H} \left[ \cos d_L k_L - \frac{j}{2} \left( \frac{k_H}{k_L} + \frac{k_L}{k_H} \right) \sin d_L k_L \right] \quad (3.57)$$

Yansıtma katsayısının büyüklüğü denklem 3.58'de tanımlanmıştır.

$$r = \frac{B_0}{A_0} \quad (3.58)$$

Seçilen herhangi bir katmanın tanımlanmasında tüm katmanların özdeş olmasından yararlanılır.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^N \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} = \vec{T}^N \begin{bmatrix} A_n \\ B_n \end{bmatrix} \quad (3.59)$$

$\vec{T}$  matrisi unimodular olduğu için aşağıda verilen denklem 3.60 yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}^N = \begin{bmatrix} aU_{N-1}(x) - U_{N-2}(x) & bU_{N-1}(x) \\ cU_{N-1}(x) & dU_{N-1}(x) - U_{N-2}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Bu denklemde  $x = \frac{1}{2}(a + d)$  ve  $U_N(x)$  olmak üzere ikinci dereceden Chebyshev polinomları için;

$$U_m(x) = \frac{\sin[(m+1)\cos^{-1}x]}{\sqrt{1-x^2}} = \frac{\sin[(m+1)\theta]}{\sin\theta} \quad (3.61)$$

Bu denklemde  $x = \cos\theta$  olmak üzere  $N$  hücreli bir yapının yansıtıcılık katsayısının genliği denklem 3.62'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} aU_{N-1}(x) - U_{N-2}(x) & bU_{N-1}(x) \\ cU_{N-1}(x) & dU_{N-1}(x) - U_{N-2}(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_N \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Yukarıdaki denklemler yardımıyla denklem 3.63 aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$r = \frac{B_0}{A_0} = \frac{cU_{N-1}(x)}{aU_{N-1}(x) - U_{N-2}(x)} \quad (3.63)$$

Yansıma ifadesi  $R = |r|^2$  olmak üzere, diğer denklemlerin yardımı ile yansıma denklemi 3.64'de verilmiştir.

$$R = \frac{|c|^2}{|c|^2 + \left(\frac{\sin K\Lambda}{\sin NK\Lambda}\right)^2} \quad (3.64)$$

$$K = \frac{1}{\lambda} \cos^{-1} \left( \frac{a+d}{2} \right) \quad (3.65)$$

#### 3.5.3. Oran denklemleri

Bir yarıiletken lazerin statik, dinamik ve spektral karakteristikleri oran denklemleri olarak adlandırılan denklemler ile tanımlanabilir. Oran denklemleri elektronlar ve fotonlar arasında gerçekleşen etkileşim ve enerji transferlerini tanımlayan ifadelerdir (Çakmak 2000).

Oran denklemleri ile lazerlerin geçici ve sürekli durum analizi yapılmaktadır. Sürekli durum analizinde parametreler akıma bağlı olarak değişirken, geçici durum analizinde parametreler zamana bağlı değişmektedir.

Taşıyıcı oran denklemleri denklemler 3.66'da gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$\frac{dN}{dt} = \eta_i \frac{I}{qV_a} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{v_g a (N - N_{tr}) P}{(1 + \epsilon P)} \quad (3.66)$$

Bu denklemlerde;

- $N$ : Elektron sayısı
- $P$ : Foton sayısı
- $\eta_i$ : Akım gömülüm verimliliği
- $I$ : Akım
- $q$ : Elektron yükü
- $V_a$ : Aktif bölgenin hacmi
- $\tau_c$ : Taşıyıcı yaşam süresi
- $v_g$ : Grup hızı
- $a$ : Kazanç Sabiti
- $N_{tr}$ : Transparanlık taşıyıcı sayısı
- $\epsilon$ : Kazanç bastırma faktörü

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Taşıyıcı oran denkleminde ilk terim aktif tabakaya pompalanan elektron sayısını, ikinci terim taşıyıcı yaşam süresi sebebiyle oluşan kaybı ve üçüncü terim uyarılmış emisyonu ifade etmektedir.

Foton oran denklemi, denklem 3.67’de gösterildiği şekilde yazılabilir.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{\Gamma v_g a(N - N_{tr})P}{(1 + \varepsilon P)} + \Gamma \beta_{sp} \frac{\eta_i I_{th}}{q} - \frac{P}{\tau_p} \quad (3.67)$$

Bu denklemde;

- $P$  : Foton sayısı
- $\Gamma$  : Hapsetme faktörü
- $v_g$  : Grup hızı
- $N$  : Elektron sayısı
- $N_{tr}$  : Transparanlık taşıyıcı sayısı
- $\varepsilon$  : Kazanç bastırma faktörü
- $\beta_{sp}$  : Kendiliğinden emisyon oranı
- $\eta_i$  : Akım gömülüm verimliliği
- $I_{th}$  : Eşik akımı
- $q$  : Elektron yükü
- $\tau_p$  : Foton yaşam süresi

Foton oran denkleminde ilk terim uyarılmış emisyonu, ikinci terim rastgele emisyonu ve üçüncü terim foton yaşam süresi sebebiyle oluşan kaybı ifade etmektedir.

#### **Yarı iletken lazerlerin geçici durum analizi**

Taşıyıcı ve foton oran denklemleri kullanılarak lazerlerin geçici durum analizi elde edilmektedir. Geçici durum analizinde parametrelerin zamana bağlı olan değişimi incelenmektedir. Geçici durum analizi ile taşıyıcı yoğunluğu-zaman (N-t) ve foton yoğunluğu-zaman (P-t) grafikleri elde edilmektedir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Bir lazere bir akım darbesi uygulandığında geçici durum oluşmakta ve lazerin kalıcı duruma geçmesi için birkaç nanosaniye civarında süre gerekmektedir. Geçici durumda geçen süre uygulanan akıma ve diğer parametrelere bağlı olarak değişmektedir (Çakmak 2000).

#### Yarı iletken lazerlerin sürekli durum analizi

Geçici durumun sona ermesi ile sürekli durum oluşmaktadır. Sürekli durum analizi için taşıyıcı ve foton oran denklemleri kullanılmaktadır. Türevler sıfıra eşitlenerek elde edilen oran denklemleri ile sürekli durum analizi için kullanılacak denklemler elde edilmektedir. Sürekli durum analizi ile ışık-akım (L-I) ve foton yoğunluğu-akım (P-t) grafiği elde edilmektedir.

Taşıyıcı ve foton oran denklemlerinde türevlerin sıfıra eşitlenmesi ile 3.68 ve 3.69 denklemleri elde edilmektedir.

$$0 = \eta_i \frac{I}{qV_a} - \frac{N}{\tau_c} - \frac{v_g a(N-N_{tr})P}{(1+\epsilon P)} \quad (3.68)$$

$$0 = \frac{\Gamma v_g(N-N_{tr})P}{(1+\epsilon P)} + \Gamma \beta_{sp} \frac{\eta_i I_{th}}{q} - \frac{P}{\tau_p} \quad (3.69)$$

Işık-Akım ve Foton Yoğunluğu-Akım ilişkisini sürekli durumda ifade eden denklemler 3.70 ve 3.71'de verilmektedir.

$$L_{out} = \frac{\alpha_m h \nu \eta_i}{q g \Gamma} (I - I_{th}) \quad (3.70)$$

$$P_o = \frac{\eta_i}{q g v_g V_a} (I - I_{th}) \quad (3.71)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Bu denklemlerde;

- $L_{out}$ : Işık
- $P_o$ : Foton yoğunluğu
- $\alpha_m$ : Ayna kayıpları
- $h$  : Planck sabiti
- $\nu$  : Lazer çalışma frekansı
- $\eta_i$  : Akım gömülüm verimliliği
- $I$ : Akım
- $I_{th}$  : Eşik akımı
- $q$ : Elektron yükü
- $g$  : Modal Kazanç Katsayısı
- $\Gamma$  : Hapsetme faktörü
- $v_g$ : Grup hızı
- $V_a$ : Aktif bölge hacmi

#### 3.5.4. Modülasyon yanıtı

Yarıiletken lazerlerin sağladığı en büyük avantajlarından biri de doğrudan modüle edilebilir olmalarıdır. Lazerler optik haberleşme sistemlerinde kullanışlı olan kısa optik darbeleri uygulanacak akımın modüle edilmesiyle oluşturulabilir (Duman 2008).

#### Küçük sinyal analizi

Doğrusal olmayan davranışlara sahip devre elemanları küçük sinyal modelleriyle doğrusal olarak yaklaşık bir şekilde incelenebilir. Bu doğrusallaştırma işlemi hiçbir sinyal uygulanmadığı zaman gözlenen gerilim ya da akım değerinde yapılır. Bu model yeterince küçük sinyaller için çok verimlidir. Ve bazı sistem parametrelerinin hesaplanmasında doğrusal cebir kullanılmasına izin verdiği için büyük kolaylık sağlar. Küçük sinyal analizi denklemlerinin oluşturulmasında foton ve taşıyıcı oran denklemleri kullanılır.



### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

$\frac{dN}{dt} = 0$  ve  $\frac{dP}{dt} = 0$  kabulü ile oran denklemleri;

$$0 = \eta_i \frac{I_0}{qV_a} - \frac{N_0}{\tau_c} - v_g g(N_0) P_0 \quad (3.72)$$

$$0 = \Gamma v_g g(N_0) P_0 + \Gamma \beta_{sp} R_{sp} - \frac{P_0}{\tau_p} \quad (3.73)$$

Rastgele emisyonun ihmal edilmesi ile foton yaşam süresi denklem 3.74'de gösterilmektedir.

$$\frac{1}{\tau_p} = \Gamma v_g \frac{g_0}{1 + \epsilon P_0} \quad (3.74)$$

Rastgele emisyonun ihmal ve  $g = a(N - N_{tr})$  doğrusal kazanç modeli kullanılarak elde edilen denklemler 3.75 ve 3.76'da verilmiştir.

$$\frac{dN}{dt} = \eta_i \frac{I}{qV_a} - \frac{N}{\tau_c} - v_g a(N - N_{tr}) P \quad (3.75)$$

$$\frac{dP}{dt} = \Gamma v_g a(N - N_{tr}) P - \frac{P}{\tau_p} \quad (3.76)$$

Modülasyon işleminde cihaz akımı zamana bağlı olarak değişmektedir. Modülasyon yapılmaksızın lazer  $I_0$  kutuplama akımında sürekli olarak çalışır. Küçük sinyal analizinde kullanılan kabuller denklem 3.77, 3.78 ve 3.79'da verilmektedir.

$$I(t) = I_0 + i(w)e^{j\omega t} \quad (3.77)$$

$$N(t) = N_0 + n(w)e^{j\omega t} \quad (3.78)$$

$$P(t) = P_0 + p(w)e^{j\omega t} \quad (3.79)$$

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

Bu denklemlerde  $w$  harici uyarımın açısal frekansı ve  $I_0$  kutuplama akımının değeridir.  $N_0$  ve  $P_0$  ifadeleri sürekli durum çözümleridir. Taşıyıcı oran denkleminde gerekli işlemler ardından ikinci dereceden terimlerin ihmalinden sonra sürekli hal sonuçları kullanılarak denklem 3.80 ve 3.81 elde edilir.

$$jwn(w) = \frac{\eta_i}{qV_a} i(w) - \frac{n(w)}{\tau_c} + \frac{p(w)}{\Gamma\tau_p} - v_g a P_0 n(w) \quad (3.80)$$

$$jws(w) = \Gamma v_g a P_0 n(w) \quad (3.81)$$

Denklem 3.80 ve 3.81 kullanılarak modülasyon cevabı denklem 3.82'de tanımlanmıştır.

$$M(w) = \frac{s(w)}{i(w)} \quad (3.82)$$

Denklem 3.81'de gösterilen  $n(w)$  ifadesi 3.80'de gösterilen ifade de yerine koyulursa denklem 3.82 elde edilir.

$$\frac{s(w)}{i(w)} = \frac{\frac{\eta_i}{qV_a} \Gamma v_g a P_0}{D(w)} \quad (3.83)$$

Denklem 3.83'de verilen  $D(w)$  ifadesi denklem 3.84'de tanımlanmıştır.

$$D(w) = -w^2 + jw \left( \frac{1}{\tau_c} + v_g a P_0 \right) + \frac{v_g a P_0}{\tau_p} \quad (3.84)$$

Modülasyon cevabını tanımlayan fonksiyon denklem 3.85'de verilmiştir.

$$r(w) = \left| \frac{s(w)}{i(w)} \right| = \frac{\frac{\eta_i}{qV_a} \Gamma v_g a P_0}{|D(w)|} \quad (3.85)$$

Eğer  $D(w) = a + jb$  olarak yazılırsa,  $|D(w)|^2 = a^2 + b^2$  olarak elde edilir. Böylece denklem 3.86 elde edilir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

---

$$|D(w)|^2 = \left(w^2 - \frac{v_g a P_0}{\tau_p}\right)^2 + w^2 \left(\frac{1}{\tau_c} + v_g a P_0\right)^2 \quad (3.86)$$

Modülasyon cevabı fonksiyonu tepe değerine  $f_R$  frekans değerinde ulaşmaktadır. Bu frekans değerini bulmak için  $\frac{d(|D(w)|^2)}{dw^2}$  ifadesinin birinci dereceden türevi sıfıra eşitlenir.

$$\frac{d(|D(w)|^2)}{dw^2} \Big|_{w=w_R} = -2 \left(\frac{v_g a P_0}{\tau_p} - w^2\right) - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_c} + v_g a P_0\right) \quad (3.87)$$

$$w_R^2 = \frac{v_g a P_0}{\tau_p} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_c} + v_g a P_0\right) \quad (3.88)$$

$f_R$  gevşeme-salınım frekansı olarak bilinir. Ve yapıda taşıyıcılar ve fotonlar arasında gerçekleşen enerji değişim hızını tanımlar. Denklem 3.86'da ikinci terim genelde çok küçük bir değere sahip olduğu için ihmal edilebilir. Bu yaklaşım ile  $w_R$  denklem 3.89 ile gösterilmektedir.

$$w_R = \sqrt{\frac{1}{\tau_p} \frac{v_g a P_0}{1 + \varepsilon P_0}} \quad (3.89)$$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

---

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin simülasyonları MATLAB ortamında hazırlanan programlar ile gerçekleştirilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin tasarımında kullanılan DBR ayna yapılarının yansıtıcılık değerlerinin tabaka çifti sayısı ve dalga boyu ile değişimi Bölüm 4.1'de verilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin tasarımında kullanılan DBR ayna yapılarının yansıtıcılık değerlerinin tabaka çifti sayısı ve dalga boyu ile değişimi Bölüm 4.2'de değerlendirilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin geçici ve sürekli durum analizleri bölüm 4.3'de verilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin geçici ve sürekli durum analizleri Bölüm 4.4'de değerlendirilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin Modülasyon Cevabı Bölüm 4.5'de verilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin modülasyon cevabı Bölüm 4.6'da değerlendirilmiştir.

## 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

### 4.1. VCSEL için Tasarlanan DBR Ayna Sonuçları

MATLAB’de hazırlanan programlar ile 1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL’ler için tasarlanan DBR aynaya ait yansıtıcılık-tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık-dalga boyu grafikleri elde edilmiştir.

Lazerlerde kullanılacak olan üst-DBR  $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$  dielektrik malzemeleri ile oluşturulurken, alt-DBR  $\text{Si-SiO}_2$  dielektrik malzemelerinden oluşturulmuştur.

#### 4.1.1. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan DBR ayna sonuçları

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

**Çizelge 4.1.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları

Malzeme	Kırılma İndisi	Kalınlık (nm)
$\text{TiO}_2$	2,4612	135,10
$\text{SiO}_2$	1,4466	229,85

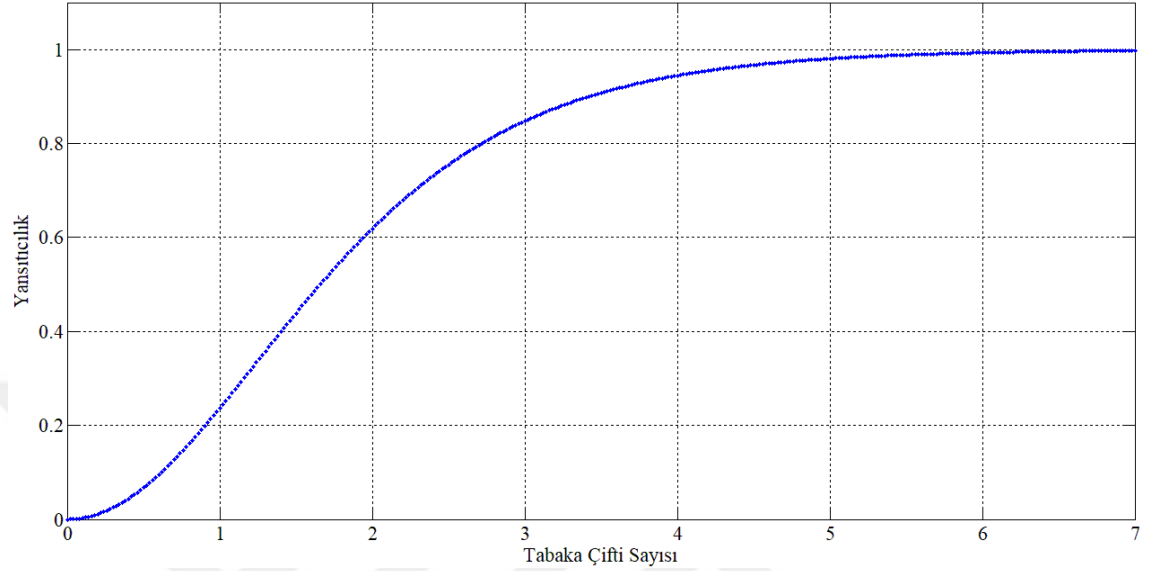
1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları Çizelge 4.2’de verilmiştir.

**Çizelge 4.2.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları

Malzeme	Kırılma İndisi	Kalınlık (nm)
Si	3,5139	94,62
$\text{SiO}_2$	1,4466	229,85

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR ayna tasarımında kullanılan  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısında tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.1'de verilmiştir.



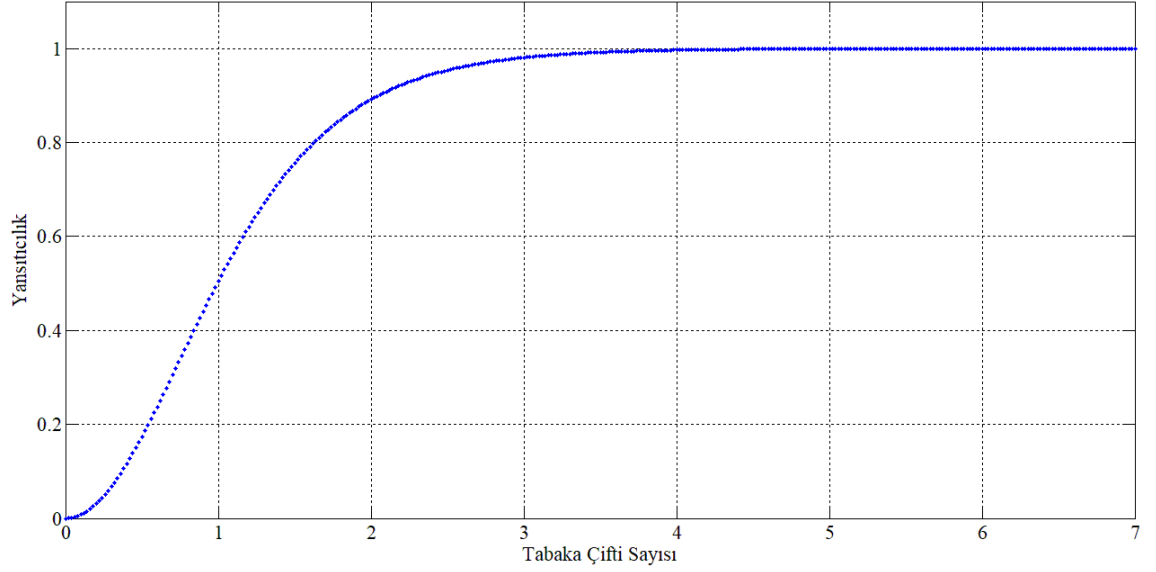
**Şekil 4.1.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan  $\text{TiO}_2$ - $\text{SiO}_2$  DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi

**Çizelge 4.3.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık
4	0,9446
5	0,9805
6	0,9932
7	0,9977

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in alt-DBR ayna tasarımında kullanılan  $\text{Si}$ - $\text{SiO}_2$  dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısında tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.2'de verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



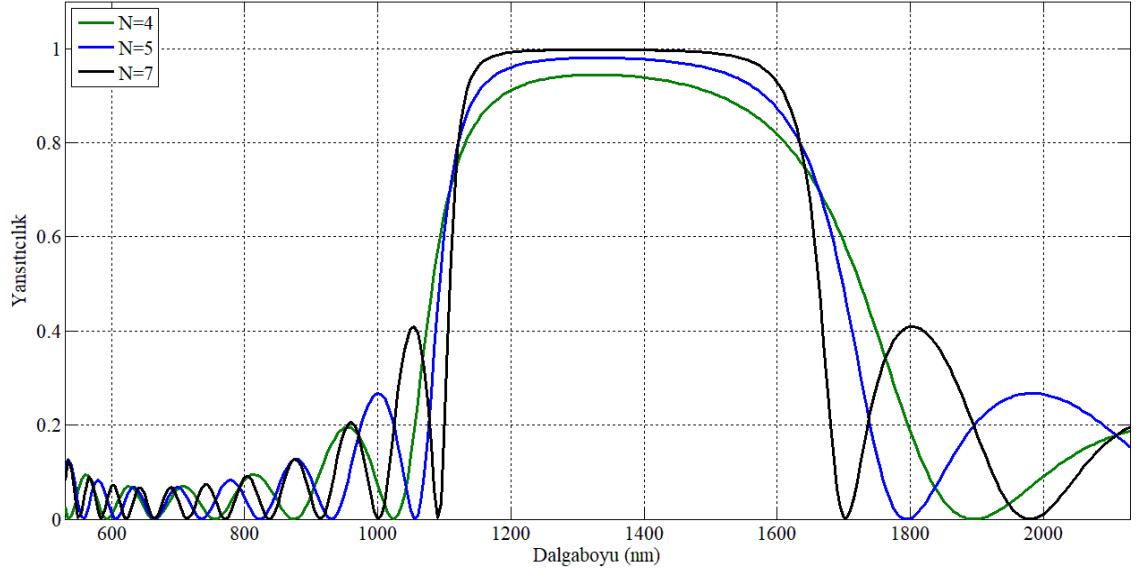
**Şekil 4.2.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan Si-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi

**Çizelge 4.4.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık
3	0,9807
4	0,9967
5	0,9994
6	0,9999
7	1

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR ayna tasarımında kullanılan TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının dalga boyu ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.3'de verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



**Şekil 4.3.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

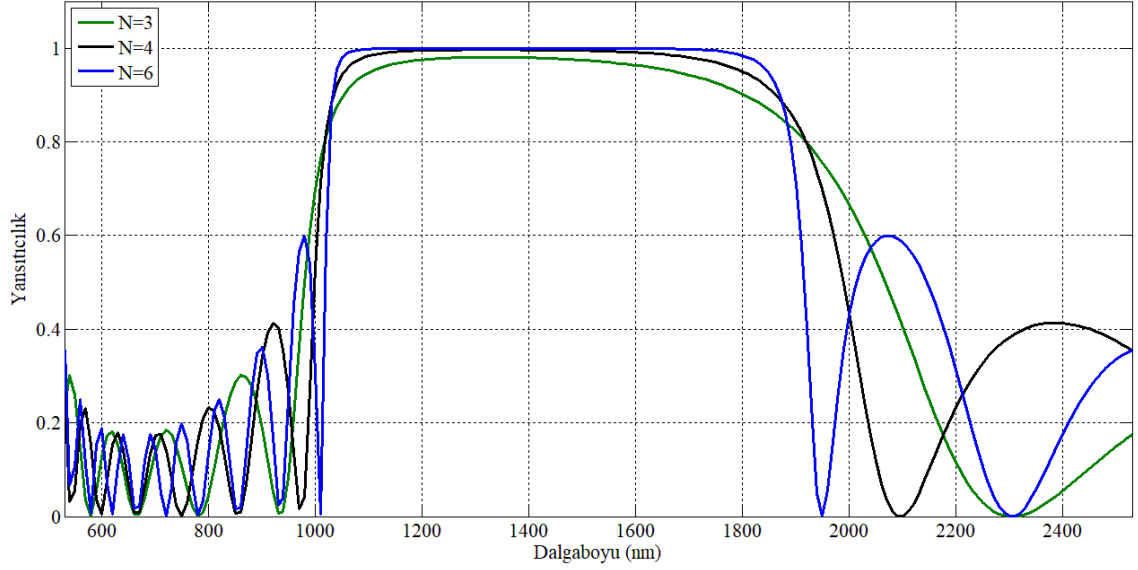
**Çizelge 4.5.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık ( $\lambda=1330$ nm)
4	0,9446
5	0,9805
7	0,9977

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in alt-DBR ayna tasarımında kullanılan Si-SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının dalga boyu ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.4'de verilmiştir.



#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



**Şekil 4.4.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan Si-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

**Çizelge 4.6.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık ( $\lambda=1330$ nm)
3	0,9807
4	0,9967
6	0,9999

#### 4.1.2. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan DBR ayna sonuçları

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları Çizelge 4.7’de verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları

Malzeme	Kırılma İndisi	Kalınlık (nm)
TiO <sub>2</sub>	2,4328	159,28
SiO <sub>2</sub>	1,4440	268,35

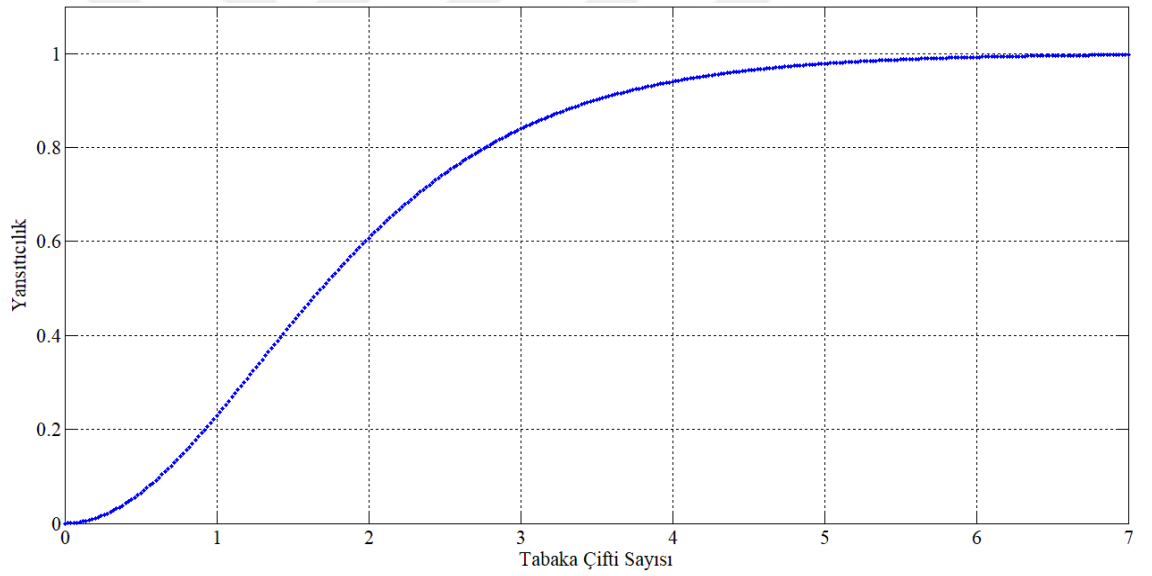
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları Çizelge 4.8’de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR ayna malzemelerine ait kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları

Malzeme	Kırılma İndisi	Kalınlık (nm)
Si	3,4800	111,35
SiO <sub>2</sub>	1,4440	397,70

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL’in üst-DBR ayna tasarımında kullanılan TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.5’de verilmiştir.



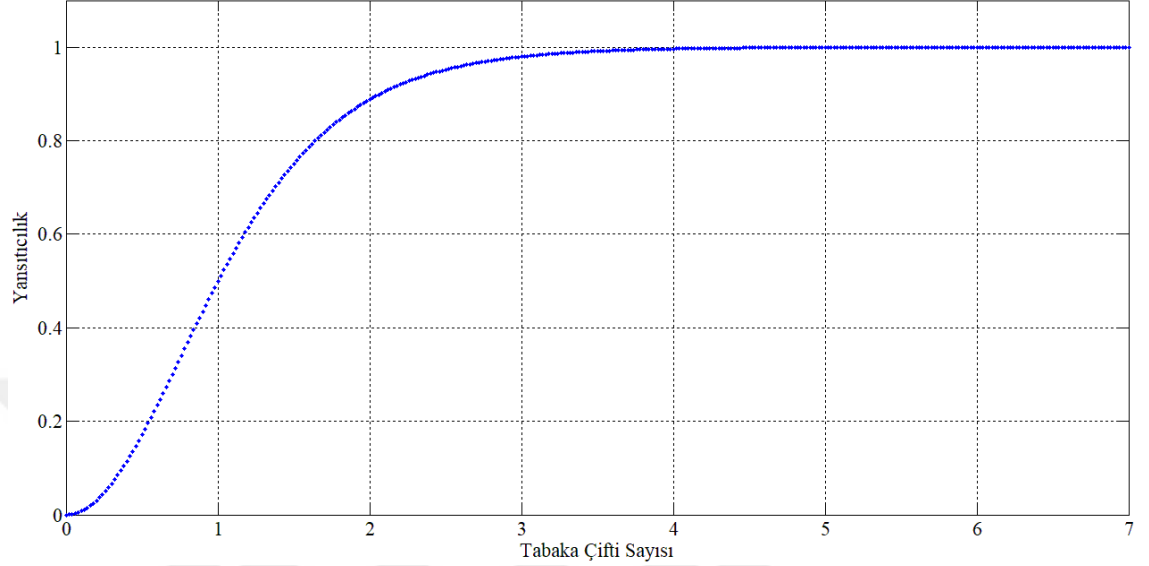
**Şekil 4.5.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan TiO<sub>2</sub>–SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi

**Çizelge 4.9.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık
4	0,9402
5	0,9785
6	0,9924
7	0,9973

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in alt-DBR ayna tasarımında kullanılan Si-SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir.



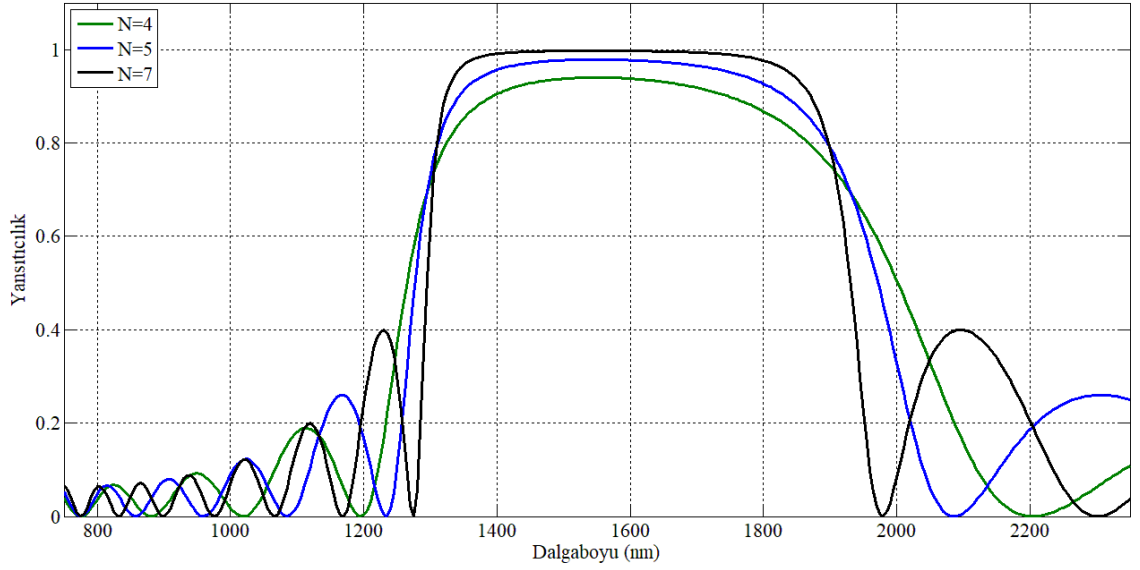
**Şekil 4.6.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan Si-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin değişimi

**Çizelge 4.10.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerleri

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık
3	0,9798
4	0,9965
5	0,9994
6	0,9999

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR ayna tasarımında kullanılan TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının dalga boyu ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



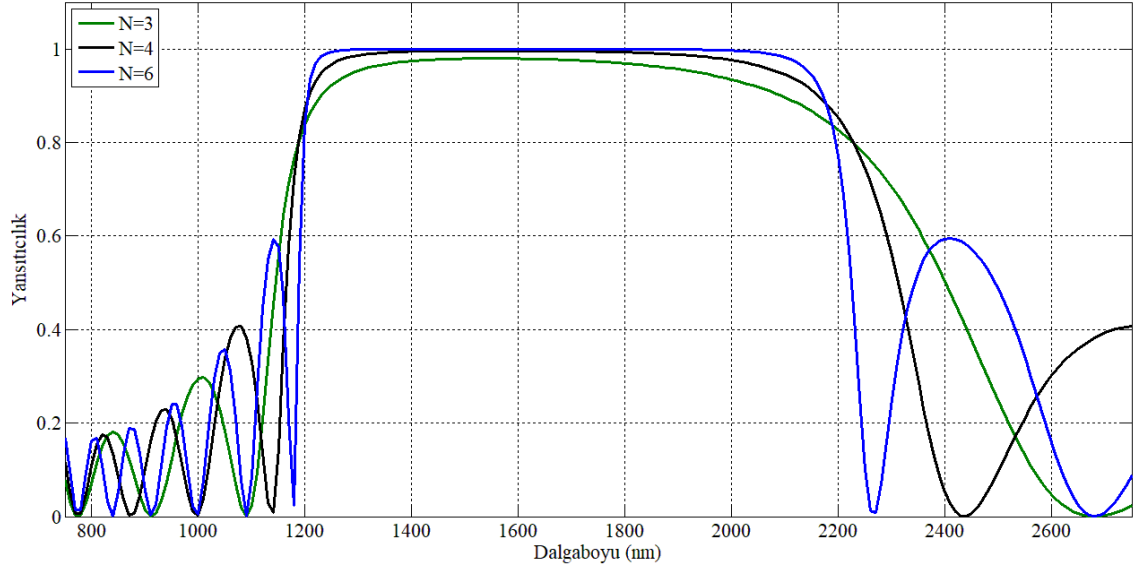
**Şekil 4.7.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

**Çizelge 4.11.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan üst-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık ( $\lambda=1550$ nm)
4	0,9402
5	0,9805
7	0,9973

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in alt-DBR ayna tasarımında kullanılan Si-SiO<sub>2</sub> dielektrik malzemelerin art arda büyütülmesi ile oluşturulan ayna yapısının dalga boyu ile yansıtıcılık değerinin değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



**Şekil 4.8.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan Si-SiO<sub>2</sub> DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

**Çizelge 4.12.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL için tasarlanan alt-DBR aynanın tabaka çifti sayısı ve yansıtıcılık değerlerinin dalga boyuna göre değişimi

Tabaka Çifti Sayısı	Yansıtıcılık ( $\lambda=1550$ nm)
3	0,9798
4	0,9965
6	0,9999

#### 4.2. VCSEL için Tasarlanan DBR Ayna Grafiklerinin Değerlendirilmesi

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için tasarlanan üst-DBR aynaya ait Şekil 4.1, Şekil 4.5 ve alt-DBR aynaya ait Şekil 4.2, Şekil 4.6'de yansıtıcılık-tabaka çifti sayısı grafikleri verilmiştir. Bu grafiklere bakıldığı zaman yansıtıcılığın tabaka çifti sayısı ile doğru orantılı olarak değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca yaklaşık olarak 0.999 yansıtıcılığa farklı tabaka çifti sayısında ulaşıldığı görülmektedir. Bunun sebebi ise tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indislerinin farklarının farklı değerlerde oluşudur. Tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indislerinin farkının yansıtıcılık ile doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için tasarlanan üst-DBR aynaya ait Şekil 4.2, Şekil 4.6 ve alt-DBR aynaya ait Şekil 4.3, Şekil 4.7'de yansıtıcılık–dalga boyu grafikleri verilmiştir. Belirtilen grafiklere bakıldığı zaman maksimum yansıtıcılık bölgesi dalga boyu aralığının tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indislerinin farkı ile doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca tabaka çifti sayısının artması ile yansıtıcılık bölgesi dışında osilasyonun arttığı görülmektedir.

#### 4.3. VCSEL'lerin Geçici ve Sürekli Durum Analizleri

MATLAB'de hazırlanan programlar ile 1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin tasarımlarının geçici ve sürekli durum analizleri oran denklemleri yardımı ile elde edilmiştir.

**Çizelge 4.13.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Işık Hızı	c	$3 \times 10^8$ m/s
Planck Sabiti	h	$6,626074 \times 10^{-34}$ Js
Elektron Yüğü	q	$1,602 \times 10^{-19}$ C
Dalga boyu	$\lambda$	1330 nm
Kazanç Sabiti	a	$10^{-15}$ cm <sup>-1</sup>
Kendiliğinden Emisyon Sabiti	$\beta_{sp}$	$1,69 \times 10^{-4}$
Transparanlık Taşıyıcı Sayısı	$N_{tr}$	$1,5061 \times 10^{18}$
Kazanç Bastrma Faktörü	$\epsilon$	$1,5 \times 10^{-17}$
Kuantum Çukur Sayısı	$N_{qw}$	5
Kuantum Çukur Kalınlığı	$d_{qw}$	10 nm
Ortalama Aktif Bölge Kırılma İndisi	$n_{eff}$	3,313
Dahili Kayıplar	$\alpha_i$	20 cm <sup>-1</sup>
Akım Gömülüm Verimliliği	$\eta_i$	0,80
Foton Yaşam Süresi	$\tau_p$	$3,0252 \times 10^{-12}$ s
Hapsetme Faktörü	$\Gamma$	0,0451
Taşıyıcı Yaşam Süresi	$\tau_c$	$2,63 \times 10^{-9}$ s

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

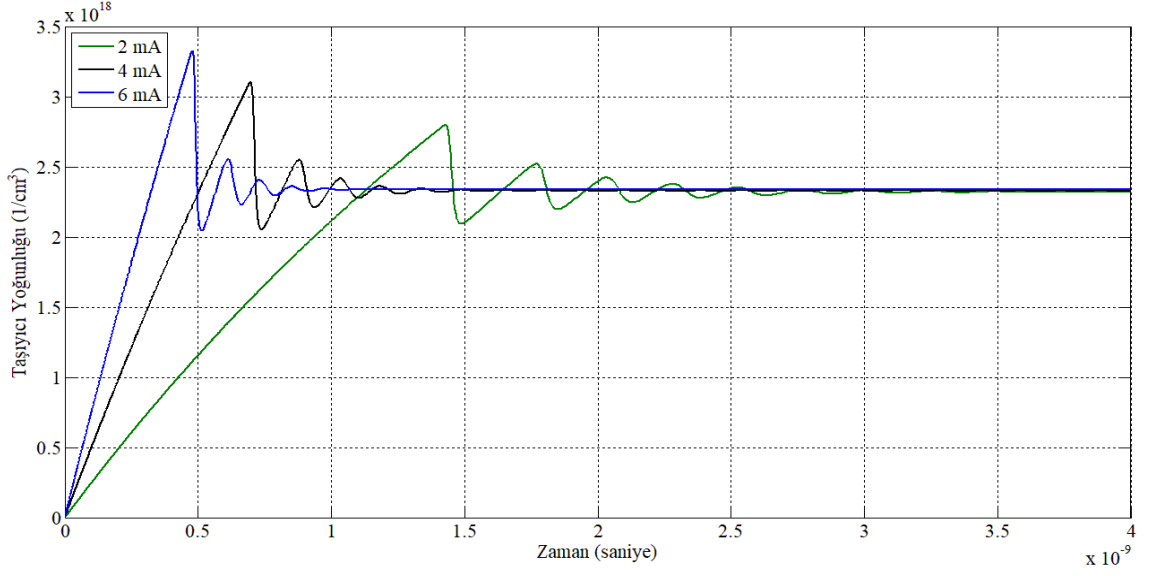
**Çizelge 4.14.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
Işık Hızı	$c$	$3 \times 10^8$ m/s
Planck Sabiti	$h$	$6,626074 \times 10^{-34}$ Js
Elektron Yüğü	$q$	$1,602 \times 10^{-19}$ C
Dalga boyu	$\lambda$	1550 nm
Kazanç Sabiti	$a$	$10^{-15}$ cm <sup>-1</sup>
Kendiliğinden Emisyon Sabiti	$\beta_{sp}$	$1,69 \times 10^{-4}$
Transparanlık Taşıyıcı Sayısı	$N_{tr}$	$1,3780 \times 10^{+18}$
Kazanç Bastırma Katsayısı	$\epsilon$	$1,5 \times 10^{-17}$
Kuantum Çukur Sayısı	$N_{qw}$	5
Kuantum Çukur Kalınlığı	$d_{qw}$	10 nm
Ortalama Aktif Bölge Kırılma İndisi	$n_{eff}$	3,2913
Dahili Kayıplar	$\alpha_i$	20 cm <sup>-1</sup>
Akım Gömölüm Verimliliği	$\eta_i$	0,80
Foton Yaşam Süresi	$\tau_p$	$3,0844 \times 10^{-12}$
Hapsetme Faktörü	$\Gamma$	0,0387
Taşıyıcı Yaşam Süresi	$\tau_c$	$2,63 \times 10^{-9}$

##### 4.3.1. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in geçici ve sürekli durum analizleri

MATLAB'de hazırlanan programlar ile 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği Şekil 4.9'da ve foton yoğunluğu-zaman grafiği Şekil 4.10'da verilmiştir.

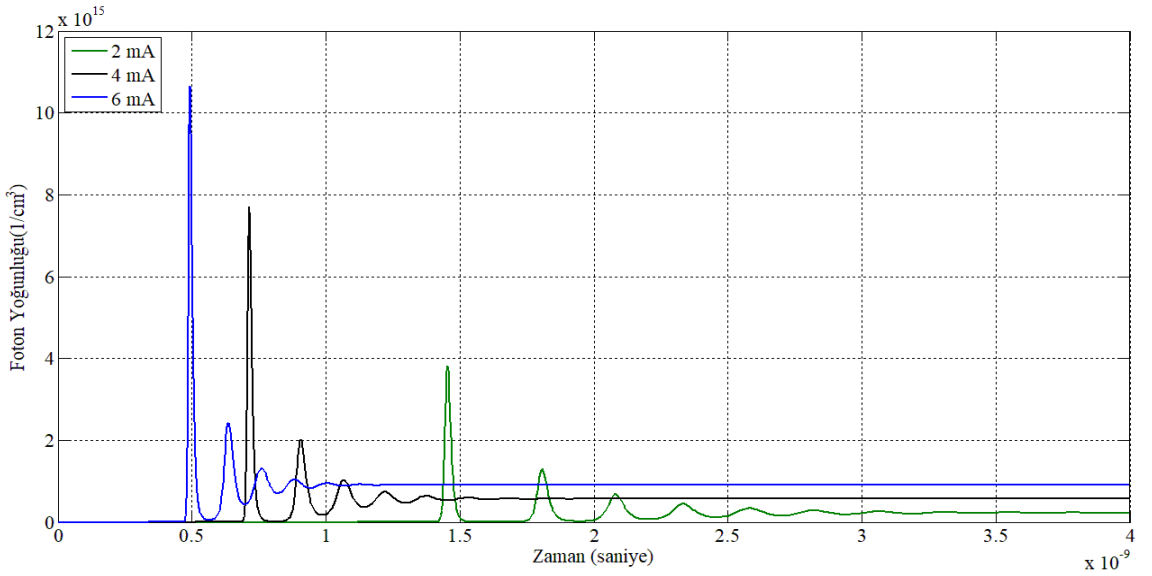
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.9. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği

Çizelge 4.15. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile kararlı hale geçiş süresinin değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	Kararlı Hale Geçiş Süresi (ns)
2	3,606
4	1,824
6	1,294



Şekil 4.10. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-zaman grafiği

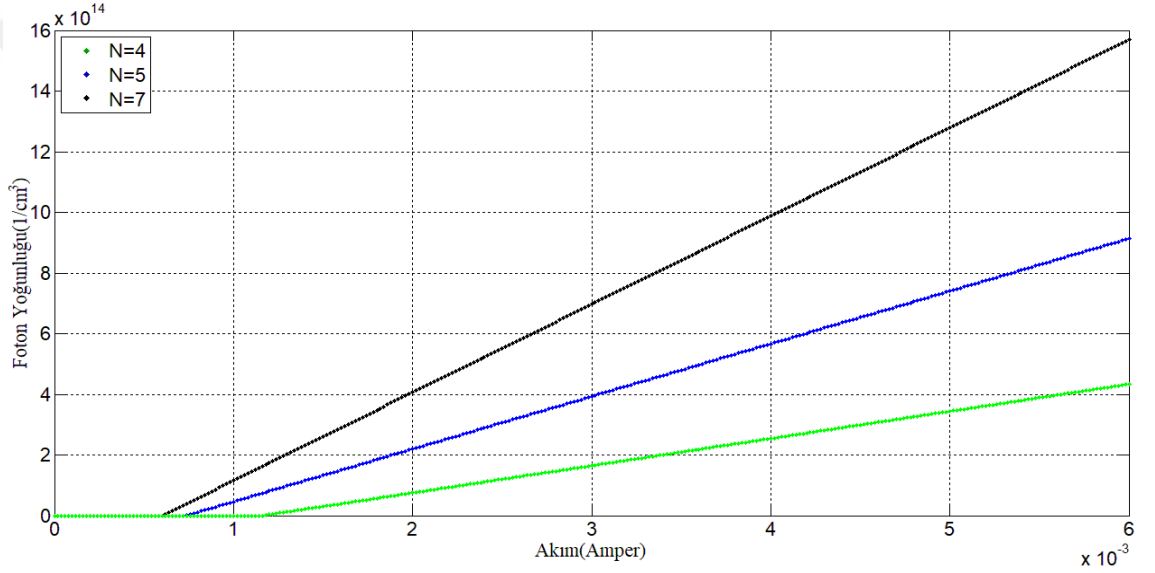


#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

**Çizelge 4.16.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile foton yoğunluğunun değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	Foton Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )
2	$2,285 \times 10^{14}$
4	$5,658 \times 10^{14}$
6	$9,088 \times 10^{14}$

MATLAB'de hazırlanan programlar ile 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği Şekil 4.11'de ve çıkış gücü-akım grafiği Şekil 4.12'de elde edilmiştir.

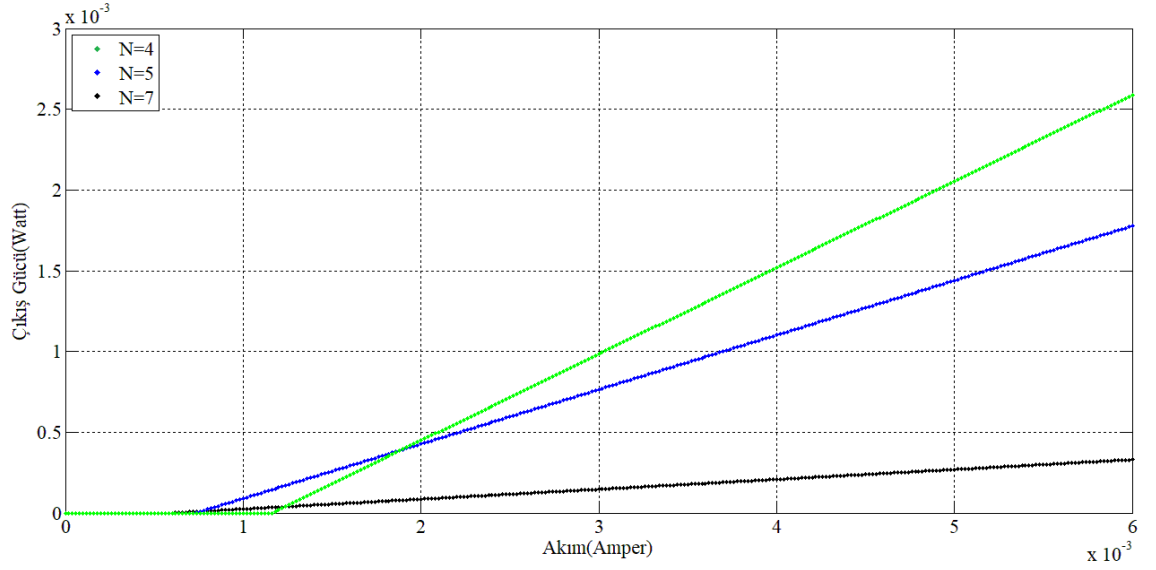


**Şekil 4.11.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği

**Çizelge 4.17.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum foton yoğunluğunun değişimi

Üst-DBR Tabaka Çifti Sayısı	Ayna Kayıpları ( $\text{cm}^{-1}$ )	Eşik Akımı ( $\mu\text{A}$ )	Maksimum Foton Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )
4	50,6961	1162,59	$4,335 \times 10^{14}$
5	16,5051	734,89	$9,137 \times 10^{14}$
7	1,7861	603,20	$1,569 \times 10^{15}$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.12. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in çıkış gücü-akım grafiği

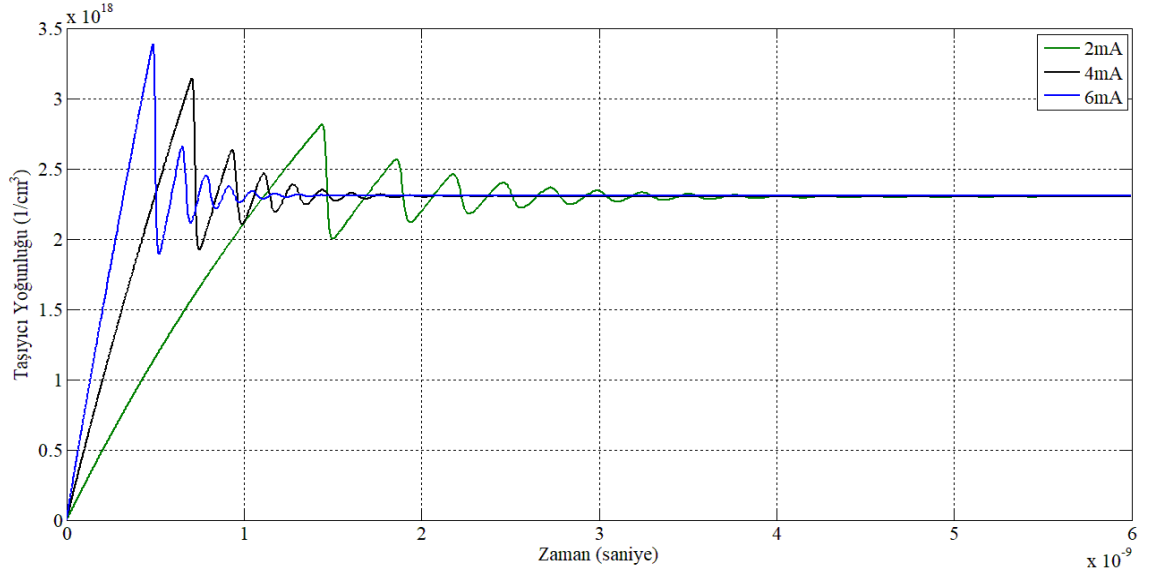
Çizelge 4.18. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum çıkış gücünün değişimi

Üst-DBR Tabaka Çifti Sayısı	Ayna Kayıpları (cm <sup>-1</sup> )	Eşik Akımı (µA)	Maksimum Çıkış Gücü (mW)
4	50,6961	1162,59	2,589
5	16,5051	734,89	1,777
7	1,7861	603,20	0,3302

#### 4.3.2. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in geçici ve sürekli durum analizleri

MATLAB'de hazırlanan programlar ile 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği Şekil 4.13'de ve foton yoğunluğu-zaman grafiği Şekil 4.14'de elde edilmiştir.

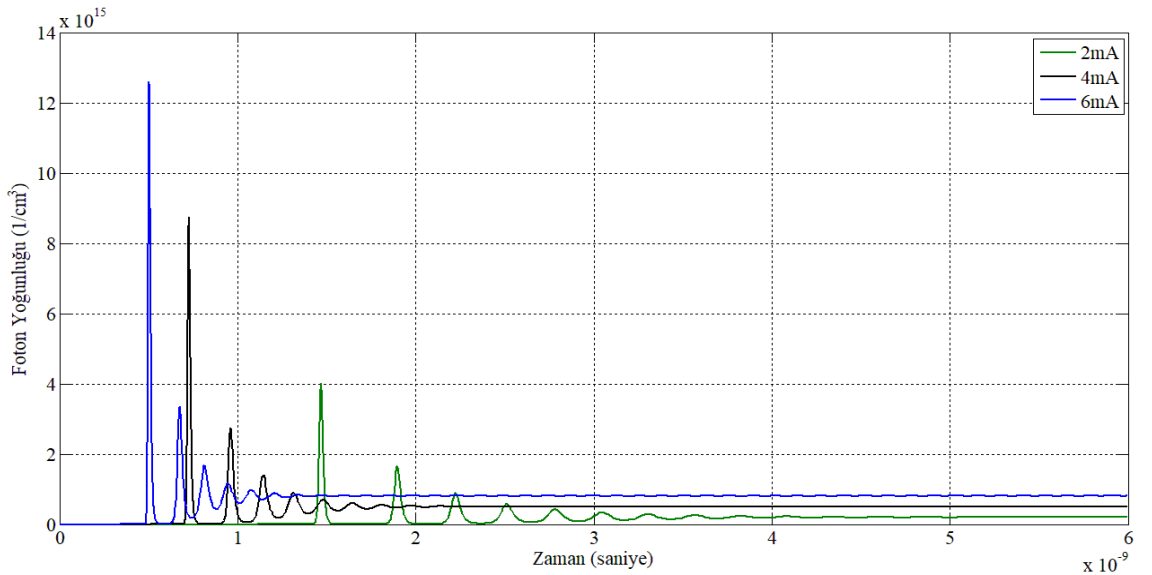
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.13. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği

Çizelge 4.19. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile kararlı hale geçiş süresinin değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	Kararlı Hale Geçiş Süresi (ns)
2	5,816
4	2,228
6	1,518



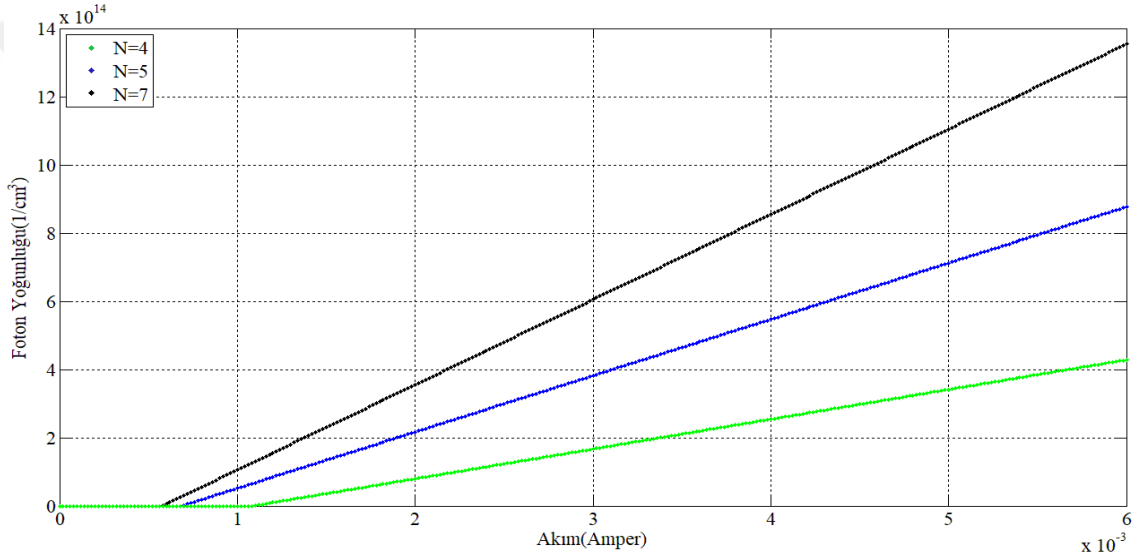
Şekil 4.14. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-zaman grafiği

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

**Çizelge 4.20.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile foton yoğunluğunun değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	Foton Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )
2	$1,979 \times 10^{14}$
4	$5,046 \times 10^{14}$
6	$7,961 \times 10^{14}$

MATLAB'de 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği çıkış Şekil 4.15'de ve gücü-akım grafiği Şekil 4.16'da elde edilmiştir.

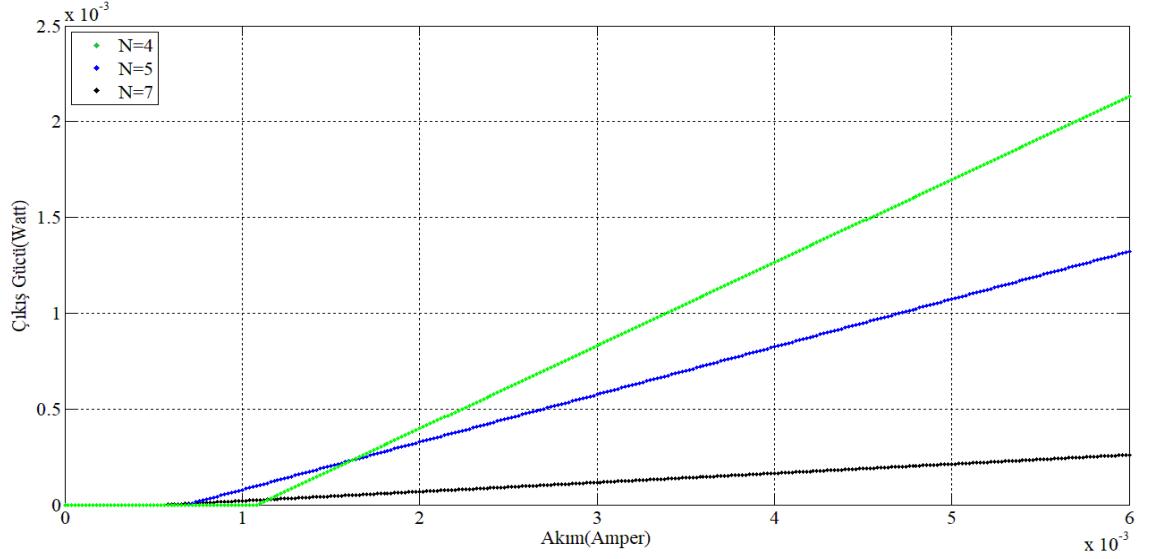


**Şekil 4.15.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in foton yoğunluğu-akım grafiği

**Çizelge 4.21.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum foton yoğunluğunun değişimi

Üst-DBR Tabaka Çifti Sayısı	Ayna Kayıpları ( $\text{cm}^{-1}$ )	Eşik Akımı ( $\mu\text{A}$ )	Maksimum Foton Yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ )
4	41,9558	1069,35	$2,284 \times 10^{14}$
5	12,7070	687,08	$8,777 \times 10^{14}$
7	1,6219	577,75	$1,354 \times 10^{15}$

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.16. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in çıkış gücü-akım grafiği

Çizelge 4.22. 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in üst-DBR tabaka çifti sayısına göre, ayna kayıpları, eşik akımı ve maksimum çıkış gücünün değişimi

Üst-DBR Tabaka Çifti Sayısı	Ayna Kayıpları ( $\text{cm}^{-1}$ )	Eşik Akımı ( $\mu\text{A}$ )	Maksimum Çıkış Gücü (mW)
4	41,9558	1069,35	2,131
5	12,7070	687,08	1,322
7	1,6219	577,75	0,2605

#### 4.4. Yüzey Yayılımlı Dikey Kaviteli Lazerlerin Geçici ve Sürekli Durum Analizleri Grafiklerinin Değerlendirilmesi

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin taşıyıcı yoğunluğu–zaman grafikleri Şekil 4.9 ve 4.13'de verilmiştir. Grafikler incelendiği zaman akımın artışı ile taşıyıcı yoğunluğunun geçici durumda arttığı ancak sürekli durumda akımın artışıyla etkilenmediği görülmektedir. Akımın artışı ile sürekli duruma daha kısa sürede geçildiği görülürken sürekli durumda taşıyıcı yoğunluğu sabittir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin foton yoğunluğu–zaman grafikleri Şekil 4.10 ve 4.14'de verilmiştir. Grafikler incelendiği zaman akımın artışı ile sürekli durumda foton yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Akımın artışı ile sürekli duruma daha kısa sürede geçildiği görülmektedir.

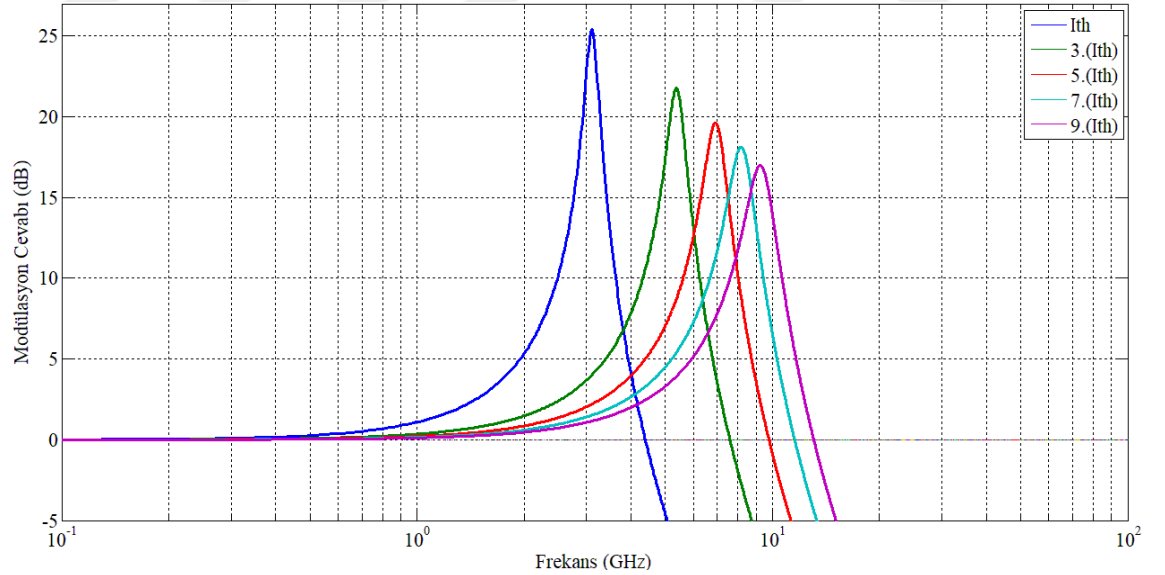
#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin foton yoğunluğu-akım grafikleri Şekil 4.11 ve 4.15'de verilmiştir. Grafikler incelendiği zaman eşik akımından büyük akım değerlerinde akım miktarının artışı ile foton yoğunluğunun arttığı görülmektedir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin çıkış gücü-akım grafikleri Şekil 4.12 ve 4.16'da verilmiştir. Grafikler incelendiği zaman eşik akımından büyük akım değerlerinde akımın artışı ile çıkış gücünün de arttığı görülmektedir.

#### 4.5. VCSEL'lerin Modülasyon Cevabı

Yarı iletken lazerin modülasyon cevabı ile lazerlerin modüle edilebileceği en yüksek modülasyon frekansı hesaplanır. 1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin modülasyon cevabı incelenirken üst-DBR ayna tabaka çifti sayısı 5 ve alt- DBR ayna tabaka çifti sayısı 6 olarak seçilmiş ve değerler bu duruma göre alınmıştır.



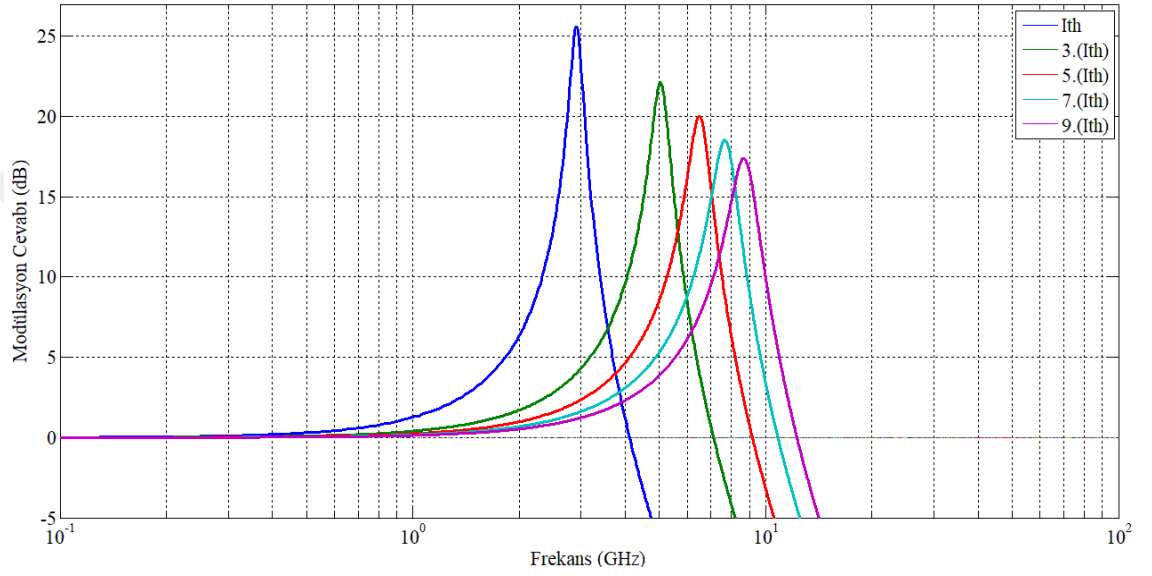
Şekil 4.17. 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı

1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı incelenmiştir. Eşik akımının dokuz katında en yüksek modülasyon frekansı 14,21 GHz'dir.

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

**Çizelge 4.23.** 1330 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile modülasyon frekansının değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	-3dB Modülasyon Frekansı (Ghz)
$I_{th}$	4,761
$3 \times I_{th}$	8,237
$5 \times I_{th}$	10,62
$7 \times I_{th}$	12,55
$9 \times I_{th}$	14,21



**Şekil 4.18.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı

**Çizelge 4.24.** 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in akım ile modülasyon frekansının değişimi

Enjekte Edile Akım Miktarı (mA)	-3dB Modülasyon Frekansı (GHz)
$I_{th}$	4,462
$3 \times I_{th}$	7,72
$5 \times I_{th}$	9,995
$7 \times I_{th}$	11,76
$9 \times I_{th}$	13,62

1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'in modülasyon cevabı incelenmiştir. Eşik akımının dokuz katında elde edilen en yüksek modülasyon frekansı 13,62 GHz'dir.

### 4.6. VCSEL'in Modülasyon Cevabı Grafiklerinin Değerlendirilmesi

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için incelenen modülasyon cevabı Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekil 4.17 ve Şekil 4.18 incelendiğinde uygulanan akımın artması ile çıkış gücünün azaldığı ve modülasyon frekansının arttığı görülmektedir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin sönümlü osilasyon frekans değerinin uygulanan akım ile arttığı görülmektedir. Uygulanan sabit akım için sönümlü osilasyon frekans değerinde elde edilen çıkış gücünün en yüksek değerde olduğu görülmektedir.



### 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada 1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'lerin modellenmesi MATLAB yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu modellemede VCSEL'lerin DBR aynanın tabaka çifti sayısı-yansıtıcılık ve dalga boyu-yansıtıcılık değerleri farklı DBR ayna tabaka sayısı için incelemiştir. Ayrıca VCSEL'lerin geçici ve sürekli durum analizi çeşitli durumlar için incelenmiştir. VCSEL'lerin modülasyon cevabının incelenmesinde ise elde edilen sonuçlar doğrultusunda optimum değer olarak seçilen üst-DBR ayna tabaka çifti sayısı 5 değeri seçilerek gerçekleştirilmiştir.

VCSEL modellenmesinde kullanılan yapı matematiksel olarak hesaplanmış ve MATLAB yazılımı kullanılarak test edilmiştir. Tasarlanan VCSEL'lerin matematiksel modeller ile elde MATLAB yazılımında gerçekleştirilen tabaka çifti sayısı-yansıtıcılık, dalga boyu-yansıtıcılık, taşıyıcı yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-akım, çıkış gücü-akım ve modülasyon cevabı simülasyon sonuçlarının daha önce gerçekleştirilen çalışmalar ile örtüştüğü görülmüştür.

DBR ayna karakteristiğinde, tabaka çifti sayısı ile yansıtıcılık değerinin doğru orantılı olarak değişimi ve dalga boyu ile yansıtıcılık değerinin tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indisi farkının maksimum yansıtıcılık dalga boyu aralığı ile doğru orantılı olarak değişimleri beklenmektedir. DBR ayna tabakalarında kullanılan malzemelerin kırılma indisi farkının artması ile yansıtıcılık değerinin artması beklenmektedir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için tasarlanan üst-DBR ayna ve alt-DBR ayna yansıtıcılık-tabaka çifti sayısı grafikleri MATLAB yazılımında simülasyonu gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Elde edilen grafiklere bakıldığı zaman yansıtıcılığın tabaka çifti sayısı ile doğru orantılı olarak değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca tabaka çifti olarak seçilen malzemelerin kırılma indislerinin farkının yansıtıcılık ile doğru orantılı olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Oran denklemleri kullanılarak elde edilen geçici ve sürekli durum analizinde uygulanan akımın artması ile sürekli duruma daha kısa sürede geçilmesi ve sürekli

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

---

durumda elde edilen foton yoğunluğu miktarının artması beklenmektedir. Ayrıca uygulanan akımın artması ile foton yoğunluğunun ve çıkış gücünün artması beklenmektedir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için gerçekleştirilen taşıyıcı yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-zaman, foton yoğunluğu-akım ve çıkış gücü-akım grafikleri MATLAB yazılımında simülasyonu yapılarak elde edilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiği zaman uygulanan akımın artışı ile sürekli duruma daha kısa sürede geçildiği ve sürekli durumda foton yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Ayrıca uygulanan akımın artması ile foton yoğunluğunun ve çıkış gücünün arttığı görülmektedir.

Modülasyon cevabında ise uygulanan akımın artması ile çıkış gücünün azalması, modülasyon frekansının ve sönümlü osilasyon frekans değerinin artması beklenmektedir. Uygulanan sabit akım için sönümlü osilasyon frekans değerinde elde edilen çıkış gücünün en yüksek değerde olduğu beklenmektedir. Uygulanan sabit akım için sönümlü osilasyon frekans değerinden büyük frekans değerlerinde çıkış gücünün hızlı bir şekilde düşüşü beklenmektedir.

Fiber optik haberleşme için önemli bir yere sahip olan VCSEL yapılarının karakteristik özellikleri sebebi ile sonuçları elde edilen yapılar incelendikten sonra ayna kayıpları, üst-DBR yansıtıcılık değeri, üst-DBR maksimum geçirgenlik dalga boyu aralığı, eşik akımı, optimum çıkış gücü ve foton yoğunluğu dikkate alındığında üst-DBR ayna tabaka çifti sayısı 5 olarak seçilmiştir.

1330 nm ve 1550 nm dalga boyunda yayılım yapan VCSEL'ler için gerçekleştirilen modülasyon cevabı grafikleri MATLAB yazılımında simülasyonu gerçekleştirilerek elde edilmiştir. Elde edilen grafikler incelendiği zaman uygulanan akımın artması ile çıkış gücünün azaldığı, modülasyon frekansının ve sönümlü osilasyon frekans değerinin arttığı görülmüştür. Uygulanan sabit akım için sönümlü osilasyon frekans değerinden büyük frekans değerlerinde çıkış gücünün hızlı bir şekilde düştüğü görülmektedir.

## 5. SONUÇ ve ÖNERİLER

---

VCSEL tasarımında alt-DBR ayna yansıtıcılığının yaklaşık 0.999 seçilmesi ile üst-DBR ayna tasarımında sağlayacağı esneklik ile elde edilmek istenilen özelliklere göre bir yapının elde edilmesinde kolaylık sağlayacaktır.

DBR ayna tasarımında seçilen malzemelerin kırılma indisleri farkının yüksek olması ile yüksek yansıtıcılık değerlerine daha düşük periyot sayısında ulaşılabilir. Böylece yansıtıcılık bölgesi dışında oluşan osilasyonlarında azaltılması sağlanacaktır.

Üst-DBR ayna tasarımı ile daha düşük periyot sayılarında maksimum yansıtıcılık bölgesinin dalga boyu aralığı küçük tutularak farklı lazer türlerinde dalga boyu seçiciliği sağlanabilir.

Alt-DBR ayna yansıtıcılık değeri sabit tutularak, üst-DBR ayna yansıtıcılık değeri değişken iken elde edilen P-I ve L-I grafikleri incelendiğinde ayna kayıplarının çok düşük ya da çok yüksek olması cihaz performansını olumsuz etkilemektedir. Tasarım yapılırken ayna yansıtıcılık değerlerinin uygun seçilmesi ile istenilen yapı elde edilecektir.

Modülasyon cevabında akım miktarının artışı ile çıkış gücü azalmaktadır. Elde edilmek istenilen modülasyon hızı ve çıkış gücü doğrultusunda uygulanacak akım seçilmelidir.

## KAYNAKLAR

- Adachi, S. 2009. Properties Of Semiconductor Alloys, John Wiley & Sons, 400, United Kingdom.
- Agrawal, G. P., Dutta, N. K. 1993. Semiconductor Lasers. Van Nostrand Reinhold, 616, New York.
- Aktar, J., Gomes, P. C., Manzoor, N., Paul, P., Basak, R. 2017. Performance Analysis of the Designed 1330nm VCSEL Using InGaAsP/InP. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences, 30(1), 30(1), 310-324.
- Alaydin, B.Ö. 2018. Düşey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karkterizasyonu. Doktora Tezi. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
- Anonim, 2019. Web Sitesi: <https://tr.wikipedia.org/wiki/Lazer>, Erişim Tarihi: 28.04.2020
- Anonim, 2020. Web Sitesi: <https://www.newport.com/t/fiber-optic-basics>, Erişim Tarihi: 17.01.2020
- Babaoğlu, M. 2011. Az Miktarda Azot Eklenmiş Uzun Dalgaboylu Yüzey Işıması Yapan Lazer Yapılar. Yüksek Lisans Tezi. Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis.
- Badilata, V. 2004. Study od Vertical Coupled-Cavity Laser Structures. Yüksek Lisans Tezi. École Polytechnique Fédérale De Lausanne, Institut De Photonique Et D'électronique Quantiques. Lausanne.
- Basak, R., Rashidul, R. 2013. Characteristics of a Designed 1550 nm AlGaInAs/InP MQW VCSEL. International Journal Of Multidisciplinary Sciences And Engineering, 4(1), 5-9.
- Basu, P.K., Mukhopadhyay, B., Basu, P., 2015. Semiconductor Laser Theory. Taylor & Francis Group, 551, Boca Raton
- Bloembergen, N., Patel, C. K. N., 1987. American Physical Society Study group on the Science and Technology of Directed Energy Weapons, Rev. Mod. Phys., 59(3), Part II, 33-47.
- Cakmak, B. 2018. Yarıiletken Lazerler (Basılmamış) Ders Notları,196
- Cakmak, B. 2000. Fabrication and Characterisation of InP and GaAs Based Optoelectronic Components. Ph.D. Thesis, Department of Electrical And Electronic Engineering University of Bristol, Bristol, United Kingdom.
- Çetinkaya, H., 2006. Lidar İçin Optik Sistem Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- Duman, Ç. 2008. 1300 nm Dalgaboylu Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi ve Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Fox, M. 2001. Optical Properties of Solids. Oxford University Press, 305, Oxford, New York.
- Guden, M., Piprek J. 1996. Material parameters of quaternary III–V semiconductors for multilayer mirrors at 1.55  $\mu\text{m}$  wavelength. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng., 4, 349-357.
- Hofmann, W. 2010. High-Speed Buried Tunnel Junction Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers. IEEE Photonics Journal, 2(5), 802-815.
- Hofmann, W., Müller, M., Wolf, P. Mutig, A. Gründl, T. Böhm, G. Bimberg, D. Amann, M.C. 2011. 40 Gbit/s Modulation of 1550 nm VCSEL. Electronics Letters, 47(4).
- Hossain, S., Ahad, D. M. A. 2018. Performance Analysis of Modulation Response of a Designed 1550 nm Oxide Confined Vertical Cavity Surface Emitting Laser. AJSE, 17(3), 101-106.
- Iga, K. 2000. Surface-Emitting Laser-Its Birth and Generation of New Optoelectronics Field. IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics, 6(6), 1201-1215.
- Iga, K. 2008. Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser: Its Conception and Evolution. Japanese Journal of Applied Physics, 47(1), 1-10.
- Kapon, E. 1999. Semiconductor Lasers I. Academic Press, 453, USA
- Khan, S. A., Hasnayeem, M.A. 2015. Modeling of Low Power Multilayer Vertical Cavity Surface Emitting Laser. International Journal of Optics and Applications, 5(5),155-160.
- Kotan, H.İ. 2008. 980 nm Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Krishnamoorthy. A. V., Chirovsky. L. M. F., Hobson. W.S., Lopata. J., Shah. J., Rozier. R., Cunningham. J. E., D'Asaro. L. A. 2000. Small-Signal Characteristics of Bottom-Emitting Intracavity Contacted VCSEL's. IEEE Photonics Technology Letters, 12(6), 609-611.
- Lear, K. L., Hietala. V. M., Hou. Q. H., Banas J.J., Hammons. B. E., Zolper. J. C., Kiloyne. S. P. 1997. Small and Large Signal Modulation of 850 nm Oxide-Confined VerticalCavity Surface Emitting Lasers. OSA TOPS, 15 (Advances in Vertical Cavity Surface Emitting Lasers), 69-74.
- Lin. C.K., Bour. D.P., Zhu J., Perez W.H., Leary. M. H., Tandon. A., Corzine. S.W., Tan. M.R. 2003. High Temperature Continuous-Wave Operation of 1.3- and 1.55- $\mu\text{m}$  VCSELS With InP/Air-Gap DBRs. Ieee Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics, 9(5), 1415-1421.

- Linnik, M., Christou, A. 2001. Effects of Bragg Mirror Interface Grading and Layer Thickness Variations on VCSEL Performance at 1.55  $\mu\text{m}$ . The International Society for Optical Engineering
- Macleod, H.A. 2010. Thin-Film Optical Filters. CRC Press. 791, Boca Raton.
- Moser, P., Lott, J. A., Larisch, G., Bimberg D. 2015. Impact of the Oxide-Aperture Diameter on the Energy Efficiency, Bandwidth, and Temperature Stability of 980-nm VCSELs. Journal Of Lightwave Technology, 33(4), 825-831.
- Mutig, A., Fiol, G., Moser, P., Arsenijevic, D., Shchukin, V.A., Ledentsov, N.N., Mikhurin, S.S., Krestnikov, I.L., Livshits, D.A., Kovsh, A.R., Hopfer, F., Bimberg, D. 2008. 120 °C 20 Gbit/s operation of 980 nm VCSEL. Electronics Letters, 44(22).
- Okur, İ. 2000. Optoelektronik. Değişim Yayınları, 518 , Türkiye.
- Rahman, A., Karim, R., Akhtar, J., Reja, M. İ. 2018. Performance Characterization of a GaAs Based 1550 nm  $\text{Ga}_{0.59}\text{In}_{0.409}\text{N}_{0.028}\text{As}_{0.89}\text{Sb}_{0.08}$  MQW VCSEL. International Journal of Photonics and Optical Technology, 4(1), 14-18.
- Rashid, S. 2011. Impact of Thermal Management on VCSEL Power and Speed. Doktora Tezi. Colorado State University Department of Electrical and Computer Engineering, Colorado, ABD.
- Roy, T., Das, A., Howlader, S., Rubel, R. N., Basak R. 2013. Design and Performance Analysis of a 1550nm  $\text{Al}_{0.09}\text{Ga}_{0.38}\text{In}_{0.53}\text{As}/\text{InP}$  MQW VCSEL by Varying Injection Current. International Journal Of Multidisciplinary Sciences And Engineering, 4(2), 10-15.
- Sale, T.E. 1993. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers. Doktora Tezi. Department of Electronic and Electrical Engineering of the University of Sheffield. Sheffield, United Kingdom.
- Sceats, R., Balkan, N. Adams M.J., Masum, J., 1999. A GaInAsP/InP Vertical Cavity Surface Emitting Laser for 1.5 $\mu\text{m}$  Operation. Turkish Journal of Physics, 23, 781-787.
- Singh, J. 1995. Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology. McGraw Hill, 725, New York
- Spiga, S., Wounter, S., Andejew, A., Schoke, D. M., Yin, X., Bauwelinck, J., Boehm, G., Amann, M. C. 2017. Single-Mode High-Speed 1.5- $\mu\text{m}$  VCSELs. Journal Of Lightwave Technology, 35(4), 727-733
- Stevens, R. 2001. Modulation Properties of Vertical Cavity Light Emitters. Doktora Tezi. Laboratory of Photonics and Microwave Engineering Department of Microelectronics and Information Technology Royal Institute of Technology, Stockholm.

- Şentürk, Z. 2008. 1.3 µm Dalga Boyunda Işıma Yapan GaInNAs YüzeYden Yayımli Yarıiletken Lazer Sistemi. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Tan, M. P. 2013. Modulation Approaches Of Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers With Mode Control. Doktora Tezi. University of Illinois Electrical and Computer Engineering, Urbana, Illinois. 6(6), 1458-1464.
- Towe, E., Leheny, R.F., Andrew, F. 2000. A Historical Perspective of the Development of the Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, IEEE Journal On Selected Topics In Quantum Electronics,
- Vurugaftman, I., Ram-Mohan, L.R., 2001. Band Parameters for III-V Compound Semiconductors and Their Alloys. Journal of Applied Physic, 89(1), 5815-5875.
- Wartak, M.S. 2013. Computational Photonics. Cambridge University Press, 468, Cambridge, United Kingdom.
- Westerbergh, P. 2011. High Speed Vertical Cavity Surface Emitting Lasers for Short Reach Communication. Doktora Tezi. Chalmers University of Technology, Göteborg.
- Wilmsen, C., Temkin, H., Coldren L.A. 1999. Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers, Cambridge University Press, 455, Cambridge, UK.
- Wilson J., Hawkes J., 1998. Optoelectronics An Introduction. Prentice Hall, 559, University of Northumbria at Newcastle.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Emrecan BİNGÖL  
Uyruğu : T.C  
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.01.1995 / Erzurum  
Medeni Hali : Bekar  
Telefon : +90 539 200 88 25  
e-mail : emrecanbingol25@gmail.com

### Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2020
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2017
Lise	Mecidiye Anadolu Lisesi	2013

### Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl

Aras Elektrik Dağıtım A.Ş. 2019-halen