

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MİKRONALTI BOYUTTA LİTOGRAİK YÜZEY-İŞİMALI LAZER  
TASARIMI VE NÜMERİK ANALİZİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Doğukan APAYDIN**

**Elektrik ve Elektronik Mühendisliğı Bölümü**

**Danışman: Prof. Dr. Hamza KURT**

**TEMMUZ 2020**



Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı



.....  
**Prof. Dr. Osman EROĞUL**  
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığımı onaylarım.



.....  
**Doç. Dr. Tolga GİRİCİ**  
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 171211022 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Doğukan Apaydın**'nın ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**MİKRONALTI BOYUTTA LİTOGRAFİK YÜZEY-İŞİMALI LAZER TASARIMI VE NÜMERİK ANALİZİ**" başlıklı tezi **27.07.2020** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. Hamza KURT**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi



**Eş Danışman :** **Dr. Öğr. Üyesi Abdullah DEMİR**  
Bilkent Üniversitesi



**Jüri Üyeleri :** **Doç. Dr. İbrahim Özdür (Başkan)**  
Abdullah Gül Üniversitesi



**Doç. Dr. Ali Bozbey**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi



**Dr. Öğr. Üyesi İtir Köymen**  
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi





## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Doğukan APAYDIN

İMZA



## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### MİKRONALTI BOYUTTA LİTOGRAFİK YÜZEY-İŞİMALI LAZER TASARIMI VE NÜMERİK ANALİZİ

Doğukan Apaydın

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hamza Kurt

Tarih: Temmuz 2020

Mikronaltı boyutlara sahip lazerler, 3 boyutlu tarama ve algılama teknolojilerinin de gelişmesiyle birlikte büyük hacimli lazerlere karşı sahip oldukları yüksek verim, yüksek modülasyon hızı ve düşük eşik akımı gibi avantajlar sayesinde bu alandaki araştırmaların odak noktası olmuştur. Yüzey-ışımali lazerlerin mikronaltı boyutlara inebilmesi gerek üretimden kaynaklı yapıda oluşan deformasyonların yol açtığı kayıplar, gerekse optik kipi kavite içinde sınırlandırmak için kullanılan yöntemlerden dolayı oldukça zordur. Bunun ana nedeni, güncel olarak kullanılan oksit-açıklık ve derin-dağlama yöntemleri ile optik kipi ve yük taşıyıcıların aynı anda dalga boyundan daha küçük bir bölgeye hapsedilmesindeki zorluktur. Litografik yüzey-ışımali lazerlerde optik kipi ve yük taşıyıcıların hapsedme işlemleri litografik yöntemler ile sağlandığından küçük boyutlara inebilmeye olanak sağlamaktadır.

Bu tez kapsamında litografik yüzey-ışımali lazer tasarımı geliştirilmiş, optik ve elektriksel özellikleri nümerik yöntemler ile analiz edilmiştir. Kavite parametreleri farklı açıklık çapı değerleri ve efektif kırıcılık indisi farkları için incelenmiştir. Yapı içerisine yerleştirilen fazladan bir katman sayesinde mikronaltı boyutlarda yüksek kalite faktörlerine ulaşılmış ve yapının yüksek güçlü tek-kip operasyon kabiliyetine sahip olduğu gösterilmiştir. Ayrıca ileri besleme gerilim uygulandığı durumda,

yerleştirilen bu katman sayesinde yapı içerisinde ters gerilim oluşturulmuş, akımın geçmemesi istenilen bölgelerde yüksek gerilimlerde bile yük taşıyıcıların geçişi durdurulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** VCSEL, Nanolazer, Mikronaltı kavite, Yüksek kalite faktörü





## **ABSTRACT**

Master of Science

### **DESIGN AND NUMERICAL ANALYSIS OF SUBMICRON LITHOGRAPHIC SURFACE-EMITTING LASER**

Doğukan Apaydın

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Supervisor: Prof. Dr. Hamza Kurt

Date: July 2020

With the emerging 3D scanning and sensing technologies, submicron lasers have become the main focus of the studies due to the advantages they carry compared to the lasers having larger volumes such as high efficiency, high modulation speed, and low threshold. Achieving submicron surface-emitting laser is still challenging because of the difficulties caused by the losses due to the deformation that occurred when fabricating a laser or the techniques employed for the confining the light in a cavity. The main reason for this is the difficulty when confining both photons and charge carriers in a region smaller than the emission wavelength by utilizing conventional techniques such as oxide-aperture and deep-etching. In lithographic surface-emitting lasers, the obstacle preventing alternating techniques reaching submicron dimensions is removed since all confinement mechanisms are provided by the lithographical processes.

In the thesis, a new lithographical surface-emitting laser design is presented, and optical and electrical properties are analyzed with numerical methods. Cavity parameters are investigated for different values of the aperture diameter and the effective refractive index difference. With an extra layer placed inside the structure, high-quality factor in submicron dimensions is reached, and it is shown that the cavity

can potentially increase single-mode operation power. By using this layer, a reverse-biased region is created when a forward voltage is applied; thus, the flow of the load carriers has been stopped even at high voltages in the areas where the current should not flow.

**Keywords:** VCSEL, Nanolaser, Submicron cavity, High quality factor



## TEŞEKKÜR

Çalıőmamı tamamlamamda en büyük pay sahipleri olan danıőmanım Prof. Dr. Hamza Kurt'a ve eş danıőmanım Dr. Abdullah Demir'e bu süreçte verdikleri tavsiyeler, paylaőtıkları tecrübeler ve gösterdikleri sabır dolayısıyla teşekkür ederim. Ayrıca bilgilerini benimle paylaşmaktan çekinmeyen TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine, Kurt Research Group ve Nanophotonic Devices Laboratory çalışanlarına, bu süreçte her daim yanımda olan aileme ve sevgili niőanlım Funda Koca'ya teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	vi
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	x
<b>KISALTMALAR</b> .....	xi
<b>SEMBOL LİSTESİ</b> .....	xii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. MİKRO- VE NANO-ÖLÇEKLİ YÜZEY-IŞIMALI LAZERLERİN TEMELLERİ</b> .....	3
2.1 VCSEL'in Kısa tarihi .....	3
2.1.1 İyon İmplant VCSEL'ler.....	9
2.1.2 Oksit VCSEL'ler.....	10
2.1.3 Mikrosütun Kaviteler.....	12
2.2 YüzeY-Işimalı Lazerlerin Mikronaltı Boyutta Üretimi.....	13
2.3 Li-VCSEL'e Giriş.....	14
<b>3. LI-VCSEL TASARIMI VE NÜMERİK ANALİZİ</b> .....	16
3.1 Li-VCSEL Tasarımı.....	17
3.2 Efektif İndis Modeli ve Nümerik Analiz .....	21
3.2.1 Optik kip profilleri .....	24
3.2.2 Rezonans dalga boyu .....	26
3.2.3 Kavite kalite faktörü .....	27
3.2.4 Purcell faktörü.....	29
3.2.1 Yan-kip bastırma oranı .....	30
3.3 PSCB Yapısı ve Taşıyıcı Yoğunlukları .....	31
<b>4. SONUÇ VE İLERİ ÇALIŞMALAR</b> .....	35
<b>REFERANSLAR</b> .....	37
<b>EK</b> .....	45
A. Li-VCSEL Fabrikasyon Adımları.....	45
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	51



## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 VCSEL yapısının temel bölümleri.....	3
Şekil 1.2. (a) VCSEL, (b) LED and (c) EEL yapılarının ışına desenleri ve iraksama açıları.....	6
Şekil 1.3. İyon implante VCSEL yapısı.....	8
Şekil 1.4. Oksit açıklığa sahip bir VCSEL yapısı.....	9
Şekil 1.5. Mikrosütun kavite yapısı.....	11
Şekil 2.1. D genişliğinde açıklığa sahip Li-VCSEL yapısı ve kavite içerisinde elektrik alan yoğunluğunun ilüstrasyonu [54]. ....	15
Şekil 2.2. Basitleştirilmiş Li-VCSEL fabrikasyon adımları: (a) ilk büyütme sonrası yonga, (b) açıklığın litografi yöntemler ile belirlenmesi, (c) ikinci büyütme sonrası yonga, (d) yapının son durumu.....	16
Şekil 2.3. (a) PSCB katmanı olmayan ve (b) 100 nm PSCB katmanı olan kavitelerin yansıma tayfları.....	18
Şekil 2.4. Dış bölgede rezonans dalga boyunun PSCB kalınlığı $d_{PSCB}$ 'ye göre değişimi.....	19
Şekil 2.5. Kavitenin iç (Region 1) ve dış bölgesinin (Region 2) efektif kırıcılık indisleri [58]......	22
Şekil 2.6. $\Delta n_{eff}$ değerinin PSCB kalınlığına bağlı değişimi.....	23
Şekil 2.7. (a) $\Delta n_{eff} = 0.022$ ve (b) $\Delta n_{eff} = 0.087$ durumları için elektrik alan profilleri ve ışına tayfları.....	24
Şekil 2.8. (a) Farklı $\Delta n_{eff}$ değerleri için rezonans dalga boyunun çapa bağlı değişimi [55] ve (b) $\Delta n_{eff} = 0.053$ iken farklı açıklık çapı değerlerinde tayfta gerçekleşen kayma.....	26
Şekil 2.9. Farklı $\Delta n_{eff}$ değerleri için Q-faktörünün çapa bağlı değişimi.....	28
Şekil 2.10. Farklı $\Delta n_{eff}$ değerleri için Purcell faktörünün çapa bağlı değişimi.....	29
Şekil 2.11. Farklı $\Delta n_{eff}$ değerleri için yan-kip bastırma oranının çapa bağlı değişimi.....	30
Şekil 2.12. Açıklığın olduğu bölgede (a) 0V ve (b) 1.5V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.....	31
Şekil 2.13. PSCB'nin (GaAs) olduğu bölgede (a) 0V, (b) 1.5V ve (c) 4V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.....	31
Şekil 2.14. (a) GaAs ve (b) $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ PSCB için enerji bant diyagları.....	32
Şekil 2.15. PSCB'nin ( $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ ) olduğu bölgede (a) 0V, (b) 1.5V ve (c) 4V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.....	32





## KISALTMALAR

<b>DBR</b>	: Dağınık Bragg Yansıtıcısı (Distributed Bragg Reflector)
<b>DFB</b>	: Dağınık Geribildirim Lazeri (Distributed Feedback Laser)
<b>DQE</b>	: Diferansiyel Kuantum Verimi (Differential Quantum Efficiency)
<b>EEL</b>	: Kenar-ışımali Lazer (Edge-Emitting Laser)
<b>FDTD</b>	: Zaman-Alanında Sonlu Fark (Finite-Difference Time-Domain)
<b>FMCW</b>	: Frekands-Modulasyonlu Sürekli-Dalga (Frequency-Modulated Continuous-Wave)
<b>FWHM</b>	: Yarı-Maksimumda Tam-Genişlik (Full-Width Half-Maximum)
<b>LED</b>	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
<b>Lidar</b>	: Işık Algılama ve Mesafelendirme (Light Detecting and Ranging)
<b>Li-VCSEL</b>	: Litografik Yüzey-Işımali Dikey-Kaviteli Lazer (Lithographic Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)
<b>MBE</b>	: Moleküler Hüzme Epitaksisi (Molecular Beam Epitaxy)
<b>MEMS</b>	: Mikro-elektromekanik sistem (Micro-electromechanical system)
<b>MOCVD</b>	: Metalorganik Kimyasal Biriktirme (Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)
<b>PCE</b>	: Güç Dönüşürme Verimi (Power Conversion Efficiency)
<b>PSCB</b>	: Faz-kaydırıcı Akım-engelleyici (Phase-Shifting Current-Blocking)
<b>Q-factor</b>	: Kalite faktörü (Quality factor)
<b>SMSR</b>	: Yan-kip Bastırma Oranı (Side Mode Suppression Ratio)
<b>VECSEL</b>	: Dikey-Dış-Kaviteli Yüzey-Işımali Lazer (Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser)
<b>VCSEL</b>	: Dikey-Kaviteli Yüzey-Işımali Lazer (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser)



## SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
$\beta$	Yayıma sabiti
$c$	Işık hızı
$D$	Kavite çapı
$d_{PSCB}$	PSCB kalınlığı
$E$	Elektrik alan
$\epsilon$	Bağıl elektriksel geçirgenlik
$\epsilon_{eff}$	Efektif dielektrik sabiti
$\epsilon$	Orantılılık sabiti
$F_p$	Purcell faktörü
$J_0$	Birinci tür Bessel fonksiyonu
$k_0$	Boş uzaydaki dalga numarası
$\lambda$	Ortam içindeki dalga boyu
$\lambda_0$	Boş uzaydaki dalga boyu
$l$	Kavite uzunluğu
$n$	Kırıcılık indisi
$n_{eff}$	Efektif kırıcılık indisi
$n_{PSCB}$	PSCB kırıcılık indisi
$P_0$	Boş uzaya yayılan güç
$P_{sistem}$	Kavite içinde yayılan güç
$Q$	Kalite faktörü
$Q_{düzlemsel}$	Düzlemsel kavitenin kalite faktörü
$Q_{kenar-saçılımı}$	Kavite kenarında ana kipin yoğunluğula ilgili olan terim
$r$	Yarıçap
$t$	Zaman
$\tau$	Zaman koordinatı
$v$	Boylamsal kip aralığı
$V$	Kip hacmi
$\omega_0$	Açısal frekans
$\varphi$	Özfonksiyon



## 1. GİRİŞ

Çalışmada mikronaltı boyutta yeni bir Litografik-Dikey-Kavite Yüzey-Işımalı Lazer (Lithographic-Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser, Li-VCSEL) tasarımı yapılmış, bu tasarımın optik ve elektriksel özellikleri nümerik olarak analiz edilmiştir. Sunulan bu yeni tasarım, diğer türlerdeki dikey-kavite yüzey-ışmalı lazer (VCSEL) yapılarına karşı sahip olduğu mikronaltı boyutlarda üretim imkanı, gösterdiği optik performans ve optimizasyon kolaylığı gibi avantajlar sayesinde Lidar (Light Detection and Ranging) ve 3 boyutlu (3D) algılama teknolojilerinin ihtiyaçlarına cevap verebilecek potansiyele sahip olduğunu göstermiştir. Tasarım sürecinde öncelikli olarak diğer yüzey-ışmalı lazer ve kavite türlerinin elektriksel ve optik özelliklerini sınırlandıran nedenler ile fabrikasyon yöntemleri belirlenmiş, yeni tasarımın bunlar kullanılmadan üretilmesi amaçlanmıştır. Güncel dikey-kavite yüzey-ışmalı lazer teknolojilerini sınırlayan etkenlerin yeni tasarımda kullanılmaması, yüksek kalite faktörüne (Q-faktör) sahip tek-kipli mikronaltı boyuta sahip yüzey-ışmalı lazerlerin ve yüksek yoğunluklu 2 boyutlu dizilerinin üretilmesine imkan sağlamıştır.

Çalışmanın ikinci bölümünde VCSEL'lerin temel özelliklerine ve güncel VCSEL teknolojilerine yer verilmiş, bu teknolojilerin geçmişlerine kısaca değinilmiştir. Araştırmalarda ve ticari ürünlerde en çok tercih edilen oksit açıklığa sahip, iyon implantasyonlu VCSEL'ler ve mikrosütun kavitelerden bahsedilmiştir. Bu yapıların kabiliyetleri ve fabrikasyon yöntemleri ile bu yöntemlerden veya yapıdaki malzemelerin özelliklerinden kaynaklanan sınırlayıcı etkenler açıklanmıştır. Bölüm sonunda ise Li-VCSEL'lerin geçmişi sunulmuştur.

Üçüncü bölümde Li-VCSEL'lerin temelleri, elektriksel ve optik hapsedme mekanizmaları açıklanmıştır. Akımın belirlenmiş bir alandan geçecek şekilde sınırlandırılabilmesi için kullanılacak malzemeler kıyaslanmış, ortalama katkılama oranları verilmiştir. Çalışmada temel olarak alınan optik hapsedme yöntemi ve bu yöntemin 1995'te Hadley tarafından sunulan matematiksel modeli sunulmuştur. Tasarlanan lazerin nümerik analizleri Lumerical FDTD (Finite-Difference Time-

Domain) ve SimuLase Designer yazılımları kullanılarak yapılmış, analizler farklı kavite çapları ve efektif kırıcılık indisi farkları için tekrarlanmıştır.

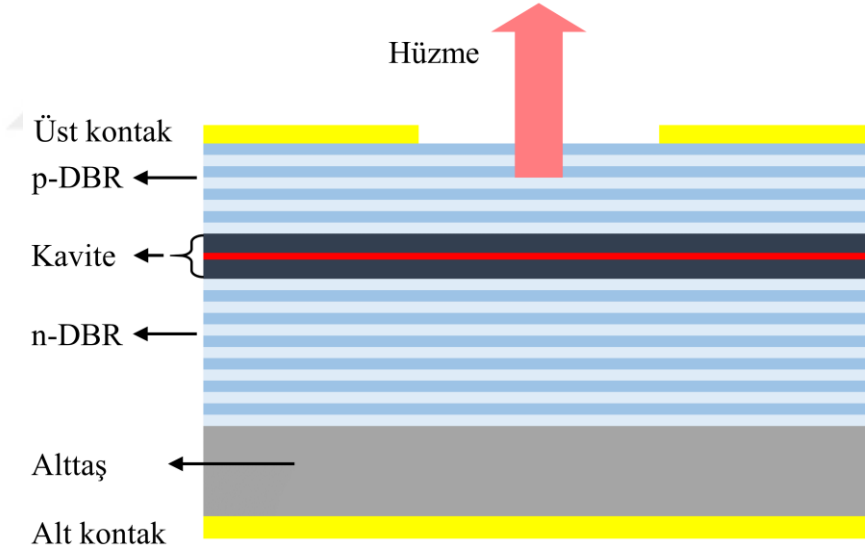
Dördüncü bölümde VCSEL'lerin güncel uygulama alanları ve gelecekteki muhtemel araştırma alanlarına değinilmiş, Li-VCSEL'lerin bu alanlara getirebileceği yeniliklerden bahsedilmiştir.



## 2. MİKRO- VE NANO-ÖLÇEKLİ YÜZEY IŞIMALI LAZERLERİN TEMELLERİ

### 2.1 VCSEL'in Kısa Tarihi

İlk VCSEL Kenichi Iga ve Haruhisa Soda tarafından 1979'da tanıtılmıştır [1]. Şekil 1.1'de gösterildiği gibi basit bir VCSEL yapısı iki adet yansıtıcı yüzey ve bu yansıtıcı yüzeyler arasında sıkıştırılmış bir adet aktif bölgeden oluşmaktadır. Bu yansıtıcı yüzeyler kalın ve tek bir katmandan oluşmazlar. Aksine, periyodik olarak birbiri üzerine büyütülmüş, farklı kırıcılık indislerine sahip iki ayrı malzemenin birleşiminden oluşurlar. Bu tarz yansıtıcılar dağınık Bragg yansıtıcıları (Distributed Bragg Reflector, DBR) olarak adlandırılırlar.



Şekil 1.1 VCSEL yapısının temel bölümleri.

Yapıda bulunan aynalardan birisi %100'e yakın bir yansıtıcılığa sahipken, diğer ayna görece daha az yansıtıcılığa sahiptir. Aradaki bu düşük fark, yansıtıcılığı az olan aynanın olduğu bölgeden foton emisyonu elde etmeye olanak sağlar. Bu derece yüksek yansıtıcılığa sahip aynaların kullanılmasının nedeni; kavitenin, uyarılmış emisyon elde etmek için gerekli kazancı oluşturabilecek kadar uzun olmamasından dolayı fotonların

aktif bölge üzerinden geçiş sayısını artırmaktır. Kıyaslama yapmak gerekirse; kenarışmalı lazerlerde (Edge-Emitting Lasers, EEL) kavite herhangi bir ayna kullanmadan, lazerin kenarlarında gerçekleşen ortam değişikliği nedeniyle oluşan yansıma sayesinde gerekli kazancı oluşturabilecek kadar uzundur.

VCSEL'ler yapıları nedeniyle Fabry-Perot kaviteler olarak değerlendirilirler. Fabry-Perot kaviteler, paralel iki düzlem aynadan oluşurlar ve bu iki ayna arasında  $l = k\lambda_0/2n$  denklemini sağlayan duran dalgalar oluşmasına olanak sağlarlar. Burada  $l$  kavite kalınlığına,  $\lambda_0$  ışığın boş uzaydaki dalga boyuna,  $n$  ortamın kırıcılık indisine ve  $k$  da herhangi bir doğal sayıya karşılık gelmektedir.  $l$  kalınlığına sahip bir kavitenin desteklediği boylamsal kiplerin aralığı  $\nu = c/2l$  ile hesaplanır. Burada  $\nu$  boylamsal kiplerin aralığına,  $c$  ışık hızına karşılık gelmektedir.  $l$  ve  $\nu$  arasındaki ters orantıdan dolayı, kavitenin kalınlığı azaldıkça boylamsal kiplerin arasındaki fark artmaktadır. VCSEL'lerde kavite kalınlığı genellikle  $\lambda_0/n$  olacak şekilde seçilir. Kalınlığın bu şekilde kısa seçilmesi, boylamsal kipler arasındaki farkın artmasına ve kavitenin malzemenin kazanç bant genişliği içinde yer alan sadece bir boylamsal kipi desteklemesine olanak sağlar.

İlk VCSEL'in gösterilmesinden bu yana yüzey-ışmalı lazerler alanında muazzam gelişmeler yaşanmıştır. GaAs/AlGaAs malzemelerin ilk defa yüzey-ışmalı lazer yapısı içerisinde kullanılmasıyla oda sıcaklığında sürekli-dalga operasyonunda çalışan, %10 diferansiyel kuantum verimine (Differential Quantum Efficiency, DQE) sahip lazerler elde edilmiştir [2]. Elde edilen değerler, bugün gelinen noktaya kıyasla düşük olsa da bilim insanlarını etkilemiş, VCSEL'lerin optik haberleşme ve optik algılama sistemleri gibi alanların vazgeçilmezi olmasına önayak olmuştur. Yıllar süren çalışmalar sonunda; diferansiyel eğim verimi %77.5 olan 976nm dalga boyunda tabanışmalı VCSEL'ler elde edilmiştir [3]. 200 °C ye varan sıcaklıklarda sürekli-dalga operasyonunda çalışan GaAs malzeme tabanlı 905 nm VCSEL gösterilmiştir [4]. Bu süreçte güçleri kW gibi yüksek değerlere ulaşmıştır. VCSEL'ler, çok dar bir tayfsal genişliğe ve stabil bir ışımaya sahip olduklarından ısıtma [5] ve diğer tipteki lazerleri pompalama [6] gibi yüksek güç gerektiren sanayi uygulamalarında kullanılmıştır. Böylesine yüksek güçler söz konusu olduğunda, birim güç başına maliyete etkisinden dolayı kullanılan lazerin verimi çok büyük önem arz etmektedir. Yapıyı ve fabrikasyon adımlarını optimize ederek üretilen 1064nm VCSEL ile %63.4 güç dönüştürme verimi



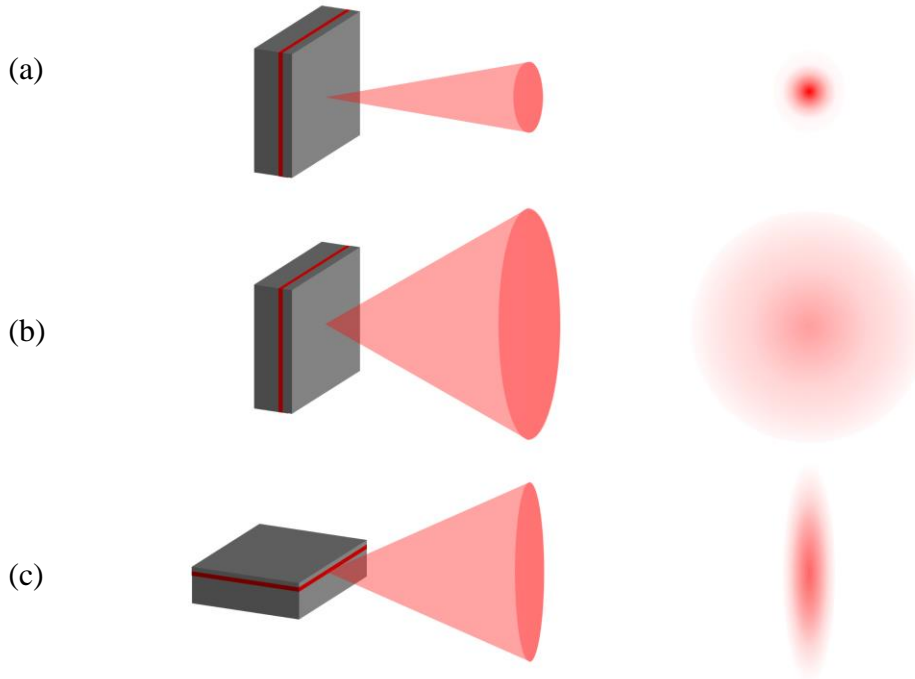
(Power conversion efficiency, PCE) elde edilmiştir [7]. Elde edilen bu yüksek PCE, tüm VCSEL'ler içinde rekoru hala elinde tutmaktadır.

VCSEL'ler, kabiliyetlerini daha da öteye taşıyabilmek için diğer fotonik yapılarla birleştirilmiştir. Fotonik kristaller ile kombine edilen VCSEL'ler watt seviyelerinde güçlere çıkmış, 60 dB yan-kip bastırma oranına (Side-mode Suppression Ratio, SMSR) ulaşmıştır [8]. Ayrıca yapıda fotonik kristallerin kullanılması, lazer içindeki enine kiplerin kontrolüne de olanak sağlamıştır [9]. Fotonik kristallerin yapı içerisinde kullanılmasıyla ana kipteki kayıplar sabit tutulurken, yüksek-dereceli kiplerin kayıplarını artırabilmek olanaklı hale gelmiştir. Bu yöntem sayesinde daha geniş açıklığa sahip lazerler ile yüksek güçlü tek-kipli operasyon elde edilebilir. Fotonik kristal VCSEL'ler, DBR'ın üzerinde periyodik dairesel çukurlar açılarak oluşturulurlar. Açılan bu dairesel çukurlar sayesinde yapı 2 boyutlu fotonik kristal gibi davranır. Bir diğer VCSEL konfigürasyonu ise dış kavite kullanıldığı VECSEL'lerdir (Vertical-External-Cavity Surface-Emitting Laser). Dış kavite kullanılarak oluşturulan yüzey ışıklı lazerler ile 4.35 kW tepe gücüne ve 400 femtosaniye atımlara sahip kip-kilitli lazerler elde edilmiştir [10]. İç kaviteye sahip lazerler ile bu derece düşük süreli atımlar elde etmek olanaksızdır. VECSEL'ler ile düşük atımlara ulaşabilmek için genellikle SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror) yapıları kullanılır [11]. VECSEL ve SESAM'ları çok çeşitli konfigürasyonlarda oluşturmak mümkündür [12].

Yapının desteklediği dalga boyu kavite kalınlığına göre belirlendiğinden, iç kaviteli lazerlerde dalga boyunu dışarıdan bir etki ile değiştirmek oldukça zordur. Bu yapıların aksine MEMS (Mikro-elektromekanik sistemler) kullanılarak oluşturulmuş VCSEL'ler ile kavite ve üst DBR arasındaki mesafe değiştirilerek lazerin dalga boyu ayarlanabilir. Bu yöntemle üretilmiş 1550 nm dalga boyuna sahip tek-kipli çalışan bir VCSEL'de 100 nm kadar değiştirilebilen dalga boyu elde edilmiştir [13].

VCSEL teknolojisinin günümüzde geldiği nokta ve yakın gelecekte bulunacağı muhtemel konum ele alındığında, VCSEL'in, sahip olduğu avantajlardan dolayı birçok uygulamada kenar-ışıklı lazer ve LED (Light-Emitting Diode) gibi yarıiletken ışık kaynaklarının yerini alacağını söylemek yanlış olmaz. VCSEL'ler, LED'lere kıyasla dar bir spektruma, düşük eşik akımına, geniş modülasyon bant genişliğine, yüksek güce ve yüksek güç dönüştürme verimine sahiptir. Diğer yandan, kenar-ışıklı lazerler ile kıyaslamak gerekirse, eliptik hüzmeye sahip kenar-ışıklı lazerlerin aksine sahip

oldukları dairesel hüzme şekli sayesinde kolimasyonu ve fiber içerisine yönlendirilmesi daha kolaydır (Şekil 1.2). Ek olarak, VCSEL’ler küçük kavite kalınlıklarından dolayı tek boylamsal kip ile çalışırlar ve oldukça düşük eşik akımlarına ulaşabilirler. VCSEL’lerde şimdiye kadar ulaşılan en küçük eşik akımı  $36 \mu A$ ’dır [14]. Tüm bunların yanında VCSEL’ler, kullanım amacına göre tekli veya dizi olarak üretilebilir, yonga seviyesinde test edilebildiğinden maliyet ve zaman açısından kenar ışıklı lazerlere göre avantaj sağlamaktadır. Sonuç olarak ise, VCSEL’ler sahip oldukları özellikler sayesinde 3 boyutlu algılama ve Lidar teknolojilerinde, veri merkezlerinde ve optik haberleşme gibi birçok uygulamada yer edinmiştir [15, 16]. Fiber optik kablo kayıplarınının 850 nm ve 1550 nm dalgaboylarında az olmasından dolayı optik haberleşme için en çok bu dalga boyları kullanılır. 850nm dalga boyuna sahip bir VCSEL ile 57 Gbit/s hızında ulaşan hatasız veri aktarımı elde edilmiştir [17].



Şekil 1.2. (a) VCSEL, (b) LED and (c) EEL yapılarının ışın desenleri ve iraksama açıları.

Gelişen 3 boyutlu algılama ve Lidar teknolojileri sonucu olarak VCSEL’lerin son zamanlarda cep telefonlarına ve tüketici elektroniği ürünlerine girmesiyle pazar hacmi çok kısa bir sürede oldukça büyüme kaydetmiştir. Bu hızlı büyüme, VCSEL’lerin ana uygulama alanını optik haberleşmeden objelerin aydınlatılmasına doğru kaydırmıştır. Bu amaç doğrultusunda kayda değer birçok araştırma yüksek güçlü VCSEL’lere, yüksek yoğunluklu VCSEL dizilerine odaklanmıştır. Uzak mesafe aydınlatmaları için

kaynağın gücü ve parlaklığı önemli rol oynamaktadır. Yüksek güç gerektiren uygulamalar için, taban-ışımali VCSEL'leri seri bağlayarak 300 A tepe akımı ve 7.2 ns atım süresi ile 1200 W tepe gücü elde edilmiştir [16]. Tabandan ışımaya göre MEMS veya lensler ile birleştirebilme gibi çeşitli üstünlüklere sahiptir. Fakat taban-ışımali VCSEL tasarlarırken unutulmaması gereken bir nokta vardır: soğurma kayıplarının önüne geçmek için kullanılacak lazer alttaş malzemesi lazer ışımaya dalga boyunda geçirgen olmalıdır. VCSEL'ler ayrıca ısıtma gibi yüksek güç gerektiren uygulamalarda da kullanılabilir. Diğer uygulamaların aksine, bu tarz uygulamalar onlarca kW güç gerektirir. Bu uygulamalarda önemli olan bir diğer parametre ise lazerin parlaklığıdır. Parlaklık ise güç ve hüzme genişlemesi (Etendue) ile doğrudan ilişkilidir. Genişleme, ışığın optik bir sistemde yayılma karakteristiğini belirtir ve ışımaya yapılan alan ile hüzme açısının çarpımına eşittir [6]. Lazerin parlaklığının artırılabilmesi için hüzmenin genişlemesinin azaltılması veya lazerin gücünün artırılması gerekir. Alanın ve açının küçük değerlere doğru gitmesi hüzme genişlemesini azaltır, dolayısıyla lazerin parlaklığını da artırır. VCSEL dizilerinde 2 boyutlu mikro lensler kullanarak hüzme açısı azaltılabilir [18]. Bir diğer seçenek olan ışımaya alanının küçülmesi için ise VCSEL dizilerinde açıklıklar arasında bulunan boşluklar küçültülebilir. Bu sayede dizi içerisinde belirli sayıda bulunan lazerler daha küçük bir alandan ışımaya yapabilir. Fakat akımı ve optik kipi bir alanda hapsetmek için kullanılan fabrikasyon yöntemleri, dizi içerisindeki lazerlerin aralarındaki mesafenin belirli bir değerin altına inmesine engel olur.

VCSEL'ler, yapıda kullanılan malzemeler, akımı ve optik kipleri hapsetmeyi sağlayan yöntemler bakımından birbirlerinden ayrılırlar. Literatürde kullanılan birçok malzeme ve yöntem olsa da bu çalışmada en çok kullanılanlar incelenmiştir.

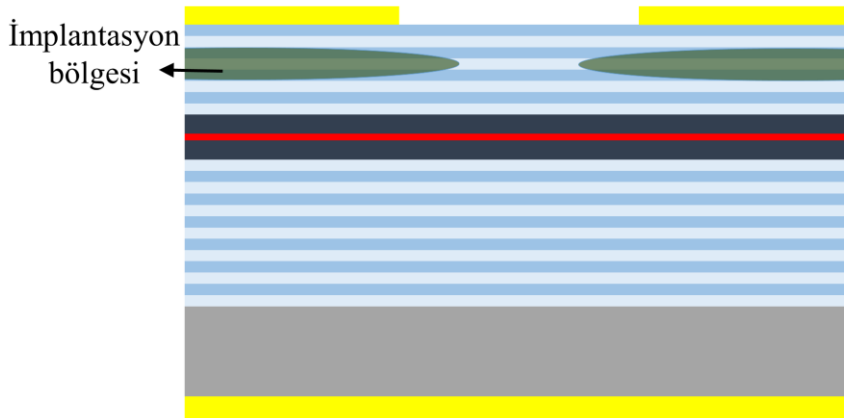
### **2.1.1 İyon implante VCSEL'ler**

VCSEL çağının başlarında akımın belirli bir alandan akmasını sağlamak için iyon implantasyon yöntemi kullanılmaktaydı [19]. Bu yöntem, implantasyon işlemi yapılan ve yapılmayan bölgeler arasında kırıcılık indisi farkı yaratsa da bu fark optik kipi bir bölgede hapsedilmesini sağlamak için yeterli düzeyde değildir [20]. Bu nedenle implantasyon yöntemi, oldukça küçük olan bu kırıcılık indisi farkı nedeniyle optik kipi bir alana hapsedemez ve kayıplara yol açar. Ayrıca bu küçük indis değişimi hacim genişlemesine, iyonizasyona ve difüzyon efektlerine bağlıdır.

VCSEL’lerde implantasyon yöntemi ilk olarak InGaAs/GaAs malzeme sistemi ile 1990 yılında gerçekleştirilmiştir [19]. Bu ilk iyon implantasyonlu VCSEL’de 1000 A/cm<sup>2</sup> eşik akımına ulaşılmış ve verimli sürekli-dalga operasyonu sağlanmıştır. Ayrıca 20 x 20 µm<sup>2</sup> VCSEL ile 4.2 mA eşik akımı ve 11 mW güç elde edilmiştir. Birkaç yıl sonra ise %21 güç dönüştürme verimine, 3.7 mW tek-kip gücüne ve 50 µm çapa sahip lazer ile yüzey-ışıklı lazerlerde o zamana kadar elde edilmiş en yüksek sürekli-dalga operasyonu gücü olan 23 mW’a ulaşılmıştır [21].

İyon implantasyonunda yonganın bütünlüğün korunduğundan yüksek miktarlı üretimlerde avantaja sahiptir. Şekil 1.3’te iyon implantasyonuna sahip bir VCSEL yapısı paylaşılmıştır.

İmplantasyon ile kırıcılık indisi değışse de, önceden belirtildiği gibi bu değer o kadar küçüktür ki iyon implantasyonlu VCSEL’ler kazanç kılavuzlu lazerler olarak ele alınırlar. Bu durum da lazerin eşik akımının yükselmesine neden olur [22]. Aynı nedenden dolayı küçük çaplarda oluşan kırınım kayıpları termal odaklama ile engellenebilir fakat bu da stabil olmayan bir hüzme profiline, düşük atımlı operasyonlarda lazerin açılma/kapanma sürelerinde artışa neden olur.



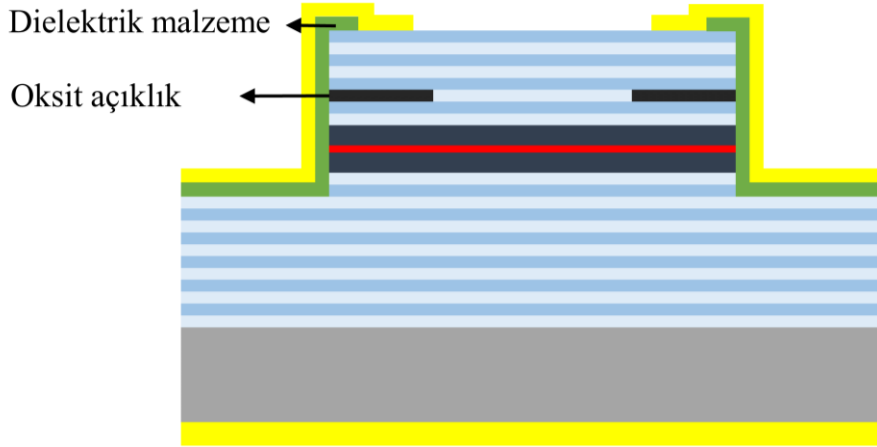
Şekil 1.3. İyon implante VCSEL yapısı.

Düşük gerilim ileri besleme p-n eklemlerinde 2kT akımı difüzyon akımı olarak ele alınabilir [23]. İyon implantasyonlu VCSEL’lerde ise 2kT akımı, çoğunlukla implantasyon yapılmış bölgenin yakınlarında gerçekleşen yüzey rekombinasyonları da dahil olmak üzere ışımsız rekombinasyonlardan dolayı artar [24]. Ayrıca ışımsız rekombinasyonların eşik akımı yoğunluğunun bir bölümünde de sorumlu olduğu

gösterilmiştir. Kuantum kuyuları ve implantasyon yapılmış bölgeler arasındaki kalan yüzey ışımaz rekombinasyonlara neden olur ve lazerin çapı küçüldükçe etkisi artar. Sonuç olarak eşik akımının yükselmesine neden olur ve bu lazerlerde istenmeyen bir durumdur. Oksit VCSEL ile bu nedenle oluşan ışımaz rekombinasyonların önüne geçilebilmiştir.

### 2.1.2 Oksit VCSEL'ler

Oksit açıklığa sahip ilk VCSEL 1994 yılında gerçekleştirilmiştir [25]. O zamandan beri, oksit açıklık pazarda ticari olarak satılan VCSEL'lerde akımı ve optik kipleri bir alanda hapsedmek için en yaygın olarak kullanılan yöntemdir. Oksit VCSEL'lerin pazardaki bu hakimiyetinin nedeni; oksitlemenin iyi bilinen bir işlem olması, akımı ve optik kipleri diğer yöntemlerden göre daha iyi hapsedmesidir. VCSEL'lerde oksit açıklık yapıda bulunan yüksek Al oranının sahip AlGaAs tabakasının seçimli oksidasyonu ile sağlanır. Oksitlenen AlGaAs'ın elektriksel olarak iletken olmayan karakteristiği sayesinde akım belirli bir alandan akmaya zorlanır. Oksit tabakası ayrıca optik kipleri de kavite içerisinde belirli bir alanda hapseder.



Şekil 1.4. Oksit açıklığa sahip bir VCSEL yapısı.

AlGaAs içerisindeki Al oranı arttıkça malzemenin kararsız yapıya geçtiği bilinen bir gerçektir ve bu durum AlGaAs'ın daha kararlı bir yapı olan  $Al_xO_y$ 'e dönüşümüne yol açar [26]. Oksidasyon hızı da AlGaAs içindeki Al oranına bağlı olarak artar. Fakat VCSEL'lerde oksit tabakasının yapıda neden olduğu gerginliği engellemek adına AlAs yerine ~%98 Al içeren AlGaAs malzemeler kullanılır. Oksit açıklık elde etmek

için öncelikli olarak açıklık olacak bölgenin çevresinde bulunan malzeme dağlanır. Bu sayede oksitlenme işleminin gerçekleşmesi için gerekli alan sağlanmış olur. Son olarak, yapı sıcaklığı 400 °C'a varan fırında su buharı ve azot kullanılarak oksitlendirilir [27]. Şekil 1.4'te oksit açıklığa sahip bir VCSEL yapısı paylaşılmıştır.

Oksidasyon hızı, AlGaAs katmanının kalınlığına ve içerisindeki Al oranına, katkılama oranına, kristal kalitesine ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden, açıklığın optimizasyonu için yapı hakkında oldukça iyi bir bilgiye sahip olmak gerekir. Ayrıca oksidasyon hızı kristal yapısına bağlı olarak eksenden eksene değişiklik gösterebilir. Bunun sonucu olarak aşındırma işlemi dairesel olsa bile oksidasyon sonunda kare benzeri bir açıklık ile karşılaşmak olasıdır. Açıklık şeklindeki bu bozulma küçük çaplara doğru gittikçe daha da belirginleşmektedir.

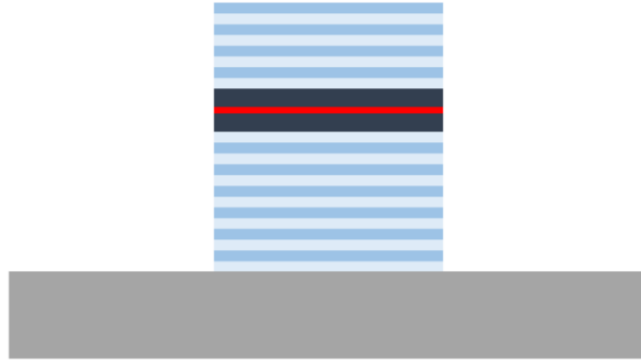
Yüksek Al oranına sahip AlGaAs oksidasyon işlemi VCSEL'ler ilk olarak 1994 yılında uygulanmıştır [21]. Akım ve optik kiplerin hapsedilmesi için oksit açıklık kullanılmasıyla eşik akımı kayda değer biri biçimde azalma elde edilmiştir [28]. Bu başarının ardından oksit VCSEL'ler bilgisayar fareleri, yüksek hızlı veri merkezleri ve optik haberleşme gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmış [29]; yüksek hızlı hatasız haberleşmenin önünü açmıştır [17]. Ayrıca bu süreçte yüksek güç gerektiren uygulamalarda da kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek güç talebini karşılamak adına lazerden elde edilen gücü yükseltebilmek için lazerin çapını genişletmek bir seçenek olabilir. Ancak lazer çapının genişlemesi, yüksek dereceli yanıl kiplerin de ışmasına neden olur. Oksit VCSEL'ler, kavite ile dış bölge arasında yüksek kırıcılık indisi farkına sahip olduklarından yüksek çaplarda tek- kipli ışımaya yapmaları oldukça zordur. Yani VCSEL'lerde tek-kipli operasyon ve yüksek güç arasında bir ödünleşim söz konusudur [30]. Büyük çaplarda tek- kipli operasyon elde edebilmek için kırıcılık indisi farkının azaltılması gerekmektedir.

Oksit VCSEL'ler veri aktarımında konusunda da devrim niteliğinde sonuçlar ortaya koymuştur. Optik ara bağlantılarda kullanılmak üzere yüksek verimli, bit başına 81 fJ enerji harcayan 850nm oksit VCSEL üretilmiştir [31]. Kullanılan optik kaynakların sayısı fazla olması nedeniyle harcanan gücün de oldukça fazla olduğu veri merkezlerinde lazerin verimi önemli bir parametre konumuna gelir [32]. Kavitenin kalite faktörünü artırmak daha yüksek verimlere ulaşmaya yardımcı olur. Bir kavitede kalite faktörü, emisyon dalga boyunun o değerdeki yarı maksimum tam genişlik noktasının tayfsal hat genişliğine bölünmesiyle elde edilir. Kavitenin yüksek kalite

faktörüne sahip olması kavite kayıplarının az, dolayısıyla da veriminin yüksek olduğu anlamına gelir. 21  $\mu\text{m}$  mikrosütun çapına ve 0.5  $\mu\text{m}$  oksit açıklığa sahip oksit kavite ile 48.000 kavite kalite faktörüne ulaşılmıştır [33]. Ancak bu kaviteler küçük çaplarda güvenilir değildir ve ayrıca yüksek yoğunluğa sahip dizilerinin üretimi de zordur. Küçük bir alanda optik kipi hapsedmek için oksit açıklık yerine, yapının dışında kalan tüm malzemenin dağlanmasıyla elde edilecek olan toplam iç yansıma prensibi kullanılabilir.

### 2.1.3 Mikrosütun Kaviteler

Mikrosütun kaviteler, üretimde ve fotonları hapsedmede sağladığı kolaylıklar nedeniyle üzerinde en çok çalışma yapılmış kavite türlerinden biridirler. Mikrosütun kavite fabrikasyonunda yapının çapını belirlemek için litografik yöntemler kullanılır ve ardından çevresindeki malzemeler kimyasal veya kuru dağlama yöntemleriyle ortamdan kaldırılır [34, 35, 36]. Geride kalan, dielektrik ortam tarafından çevrelenmiş yarıiletken malzeme optik kipi toplam iç yansıma prensibi ile yapı içerisine hapseder (Şekil 1.5). Fabrikasyonunun ve kontrolünün kolay olmasından dolayı mikronaltı boyutta üretiminde diğer yöntemlere göre daha çok tercih edilmektedirler.



Şekil 1.5. Mikrosütun kavite yapısı.

Mikrosütunlar, ışına yaptıkları alan dışında üzerlerinde elektriksel uyarmanın yapılabileceği bir bağlantı noktasına sahip olmadığından genellikle optik pompalama ile uyarılırlar. Büyük boyutlarda fabrikasyon sırasında çok iyi bir hizalama yapılırsa elektriksel uyarma da yapılabilir [37, 38]. Hizalamanın iyi olmaması durumunda

yapılan ışımaya kontak olarak kullanılan metal tarafından soğurulacak ve kayıp yaratacaktır. Ancak mikronaltı boyutlara inildiğinde bu durum mümkün değildir.

## 2.2 Yüzey-Işımalı Lazerin Mikronaltı Boyutta Üretimi

Lazerlerin boyutlarının küçültülmeye çalışılmasının arkasındaki motivasyon, kavite içerisinde kip hacminin küçültülmek istenmesidir. Bunun nedeni ise; ışımaya rekombinasyonların kip hacmi ile değişiklik göstermesidir. Kipe bağlı nokta benzeri bir yayıcı için verilen bir kipteki emisyon oranı [39]

$$R_{cav} = \frac{\pi}{\hbar \epsilon_0 \epsilon_{ra}} \frac{d_{if}}{V} (N_{ph} + 1) \int_0^\infty \rho(\omega) L(\omega) d\omega, \quad (1.1)$$

denklemleri ile belirtilebilir. Burada  $V$  kip hacmine,  $\epsilon_{ra}$  aktif malzemenin dielektrik katsayısına,  $\rho(\omega)$  optik durumların yoğunluğuna,  $L(\omega)$  tayfsal çizgi şeklindeki homojen genişlemeye ve  $d_{if}$  ise ışımaya yapan noktasal kaynağın ilk ve son durumlar arasındaki matris elemanına karşılık gelmektedir. Denklemlerde emisyon oranı  $R_{cav}$  ve kip hacmi  $V$  arasındaki ters orantıdan kaynaklı olarak kip hacmi azaltılarak emisyon oranı artırılabilir. Dolayısıyla kip hacminin azalması lazer ışımaya eşliğinin azalması ve modülasyon hızının artması anlamına gelir.

Kayda değer bu avantajlar nedeniyle, son yıllarda araştırmalarda kavite boyutlarının küçültülebilmesi üzerine bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir [40]. Ancak çeşitli yüzey ışımaya lazerler olsa da mikronaltı boyutlarda verimli bir lazer üretilmek istenildiğinde, her tasarımın kendine özgü, kabiliyetini sınırlandıran sorunlarla yüzleşilmektedir. Bu nedenle limitlerin ötesine geçebilmek için bazı parametrelerin optimizasyonunun yapılması gerekir. Örnek olarak; mikrosütun kavite için aşındırma derinliği, yan duvarların eğimi ve duvarların pürüzlülüğünün göz önünde bulundurulması gerekir [41]. Özellikle yanal yüzey pürüzlülüğü mikrosütun kavite için veriminde oldukça önemli rol oynamaktadır. Kavitenin çapı azaldıkça pürüzlülüğünden kaynaklanan kayıplar artmaktadır. Yanal yüzeydeki pürüzlerden kaynaklanan saçılmaların olduğu düşük çap limiti mikrosütun kavite için çalışılmıştır [42, 43]. Ayrıca yüzeydeki pürüzlerin artmasıyla kavitenin kalite faktörünün ve veriminin azaldığı nümerik olarak gösterilmiştir [44]. Yüksek çaplarda ise saçılma kayıpları azaldığından, soğurma kayıpları ana faktör durumuna gelmektedir [45]. Şu ana kadar mikrosütun kavite



elde edilmiş olan en yüksek kalite faktörü yaklaşık olarak 250.000'dir [46]. Kalite faktörü, DBR sayısını artırarak bir noktaya kadar artırılabilir fakat belirli bir değerden sonra kalite faktörü değeri doyuma ulaşır ve daha fazla artmaz [42]. Kalite faktörü artmadığı gibi lazerin çıkış gücü ve eğim verimi de azalır [47].

İyon implante VCSEL'lerde fabrikasyon sırasında yonga bütünlüğü korunsa da kavite ve dış bölge arasında kırıcılık indisi farkı ihmal edilebilecek derecede düşüktür. Bundan dolayı optik kipi hapsedilmesi için kullanmak mümkün değildir.

Oksit VCSEL'ler ise birçok açıdan iyi sonuçlar ortaya koysa da, oksit tabakanın sahip olduğu özelliklerden ve üretiminde kullanılan yöntemlerden kaynaklanan zorluklar ortaya çıkmaktadır. Daha önce de değinildiği üzere oksidasyon; tabakadaki Al oranı, katkılama miktarı, kristal yapısı gibi birçok parametreye bağlı bir işlemdir. Ayrıca bu işlemin gerçekleşmesi için yüksek sıcaklıklara ihtiyaç duyulur. Sonuç olarak, oksit açıklığının kontrolünü sağlayabilmek oldukça zordur ve nanolazer elde etmek amacıyla çap azaltıldıkça daha da zorlaşmaktadır.

Oksit VCSEL'lerde, oksit tabakanın kalınlığı genel olarak 20-30 nm aralığında seçilir. Tabaka oluşurken aynı zamanda yapı içinde gerilmeye neden olur [48]. Ayrıca tabakanın kenarlarında ışımaya yapmayan birleşme görülür ve fotonlar soğurulur. Bunun yanında oksitlenen AlGaAs'ın kristal formda olmaması, VCSEL'lerde en çok karşılaşılan sorun olan dislokasyona neden olur [49]. Tüm bunlara ek olarak, oksit tabakanın termal iletkenliği okside olmayan bölgeye göre çok daha düşüktür. Sonuç olarak yapıdaki ısı enerjisinin yayılımı oksit tabaka tarafından engellenir; eğim verimi, diferansiyel kuantum verimi düşer [50] ve lazerin güvenilirliği azalır.

Li-VCSEL'lerde, diğer VCSEL türlerinin mikronaltı boyutlarda üretimini zorlaştıran, oksit tabakanın neden olduğu düşük termal iletkenlik ve işlemin kontrolünün zorluğu, iyon implantasyonun sonucunda oluşan düşük indis farkı gibi nedenler ortadan kaldırılmıştır. Bu durum verimli dikey kaviteli nanolazer üretimini olanaklı kılmıştır.

## 2.2 Li-VCSEL'e Giriş

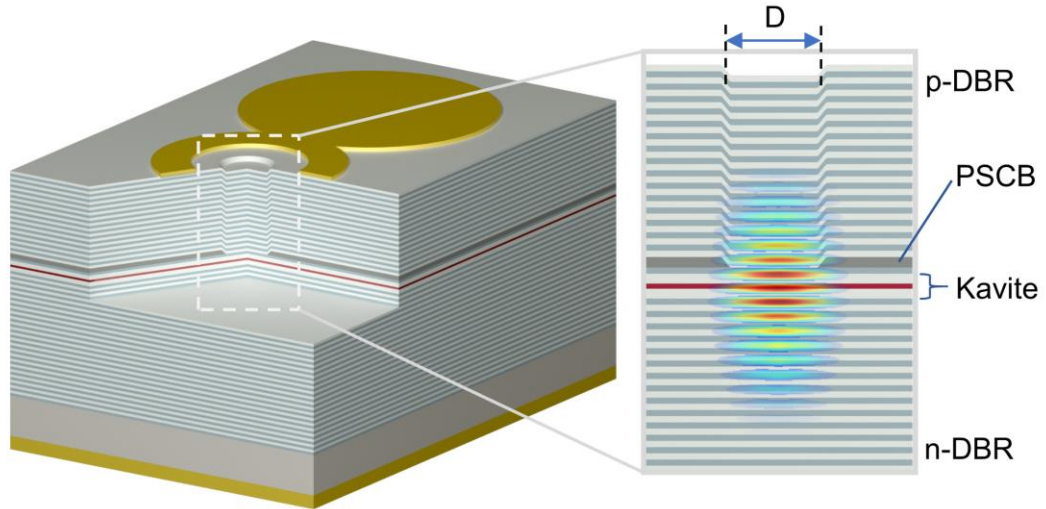
Epitaksiyel olarak kipleri hapseden VCSEL ilk olarak 2004 yılında gösterilmiştir [51]. Oksit açıklığının dezavantajını ortadan kaldırmak amacıyla üretilen bu ilk VCSEL'de 15 µm çap ile 736 A/cm<sup>2</sup> eşik akımına yoğunluğuna ulaşılmış, %10,8 diferansiyel kuantum verimi elde edilmiştir. Birkaç yıl sonra elektriksel özelliklerin iyileştirilmesi

sayesinde 8  $\mu\text{m}$   $\text{\AA}$ apında litografik VCSEL ile bu değer %70'e  $\text{\AA}$ ıkarılmış, %26 g $\text{\AA}$   $\text{\AA}$ on $\text{\AA}$ st $\text{\AA}$ rme verimi elde edilmiştir [52]. Ayrıca, oksit tabakanın neden olduğu ısı yayılımının engellenmesinin  $\text{\AA}$ on $\text{\AA}$ ne ge $\text{\AA}$ ilmesiyle, akım belirli bir değerin  $\text{\AA}$ zerine  $\text{\AA}$ ıktıktan sonra oluşan g $\text{\AA}$  d $\text{\AA}$ ř $\text{\AA}$ m $\text{\AA}$  engellenmiş, daha y $\text{\AA}$ sek akımlara  $\text{\AA}$ ıkmak m $\text{\AA}$ mk $\text{\AA}$ n olmuştur. Farklı boyutlara sahip VCSEL'ler  $\text{\AA}$ alışılmış, 3  $\mu\text{m}$   $\text{\AA}$ ap ile 260  $\mu\text{A}$  eşik akımı ve 0.76 W/A eğim verimi elde edilmiştir [53]. Litografik VCSEL'lerde şu ana kadar ulaşılmış en y $\text{\AA}$ sek g $\text{\AA}$   $\text{\AA}$ on $\text{\AA}$ st $\text{\AA}$ rme verimi ise %50'dir [54].

Li-VCSEL tasarımıını  $\text{\AA}$ eşitli şekillerde yapmam m $\text{\AA}$ mk $\text{\AA}$ n. Optik kipin hapsedilmesi i $\text{\AA}$ in Gauss eğrisi benzeri bir yapı eklenerek oluşturulan lazer n $\text{\AA}$ merik olarak  $\text{\AA}$ alışılmıştır [55]. Diğer a $\text{\AA}$ ıklıklara g $\text{\AA}$ re kavitenin kalite fakt $\text{\AA}$ r $\text{\AA}$ nde olduk $\text{\AA}$ a artış sağlamış ve ayrıca mikronaltı boyutta kip hacminde de mikros $\text{\AA}$ tun kavitelere yakın bir performans sergilemiştir.

### 3. Li-VCSEL TASARIMI VE NÜMERİK ANALİZİ

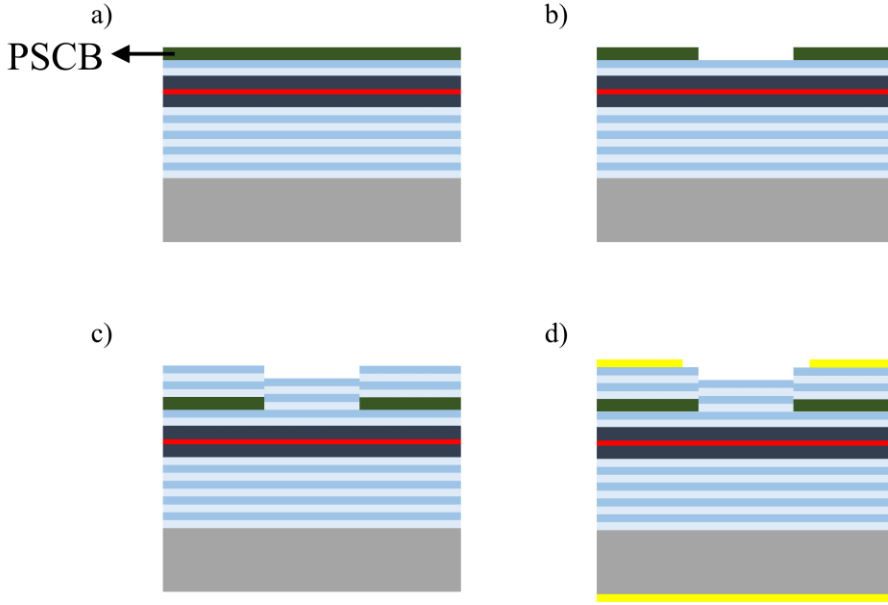
Bu çalışmanın amacı, diğer yüzey-ışıklı lazerlerin dezavantajlarından kurtularak yeni bir tasarım sunmak ve onu nümerik olarak analiz etmektir. Litografik VCSEL'ler akımın ve optik kipin belirli bir bölge içinde hapsedilmesi sadece litografi tarafından sağlanır. Bu nedenle diğer lazerler gibi ne oksidasyon ne de herhangi bir implantasyon işlemine ihtiyaç duyar. Yapıda oksit tabaka kullanılmadığından, lazerdeki ısınma sorununun önüne geçilmiş ve yapı içerisindeki gerilim ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca kolayca ayarlanabilir kırıcılık indis farkı sağladığından yüksek çaplarda tek-kipli operasyonun önünü açmıştır. Mikrosütun kavitelele kıyaslandığında, yan duvarlarda pürüzlerden dolayı gerçekleşen saçılma kayıpları da ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 2.1. D genişliğinde açıklığa sahip Li-VCSEL yapısı ve kavite içerisinde elektrik alan yoğunluğunun ilüstrasyonu [56].

Şekil 2.1'de Li-VCSEL yapısının bir çizimi paylaşılmıştır. Görüleceği üzere yapıda PSCB (Faz-Kaydırıcı Akım-Engelleyici, Phase-Shifting Current-Blocking) adında fazlardan bir katman bulunmaktadır. Bu katman, elektriksel akımın ve optik kipin ikisini birden belirli bir alanda hapsedebilmeye olanak sağlamaktadır. Böyle bir lazerin

üretilebilmesi için iki aşamalı büyütme işlemi gerekir. İlk büyütme işlemi PSCB katmanı büyütüldükten sonra durdurulmalıdır. PSCB katmanı üzerinde lazer açıklıkları litografik yöntemlerle dağlanmalı, ardından üst ayna için ikinci bir büyütme işlemi gerçekleştirilmez. Fabrikasyonun temel adımları Şekil 2.2’de paylaşılmıştır.



Şekil 2.2. Basitleştirilmiş Li-VCSEL fabrikasyon adımları: (a) ilk büyütme sonrası yonga, (b) açıklığın litografik yöntemlerle belirlenmesi, (c) ikinci büyütme sonrası yonga, (d) yapının son durumu.

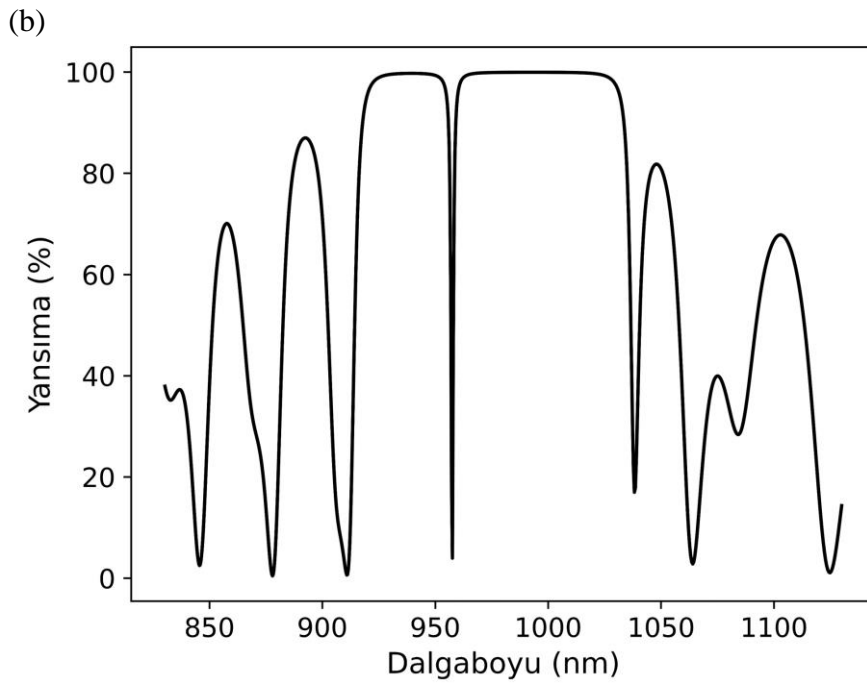
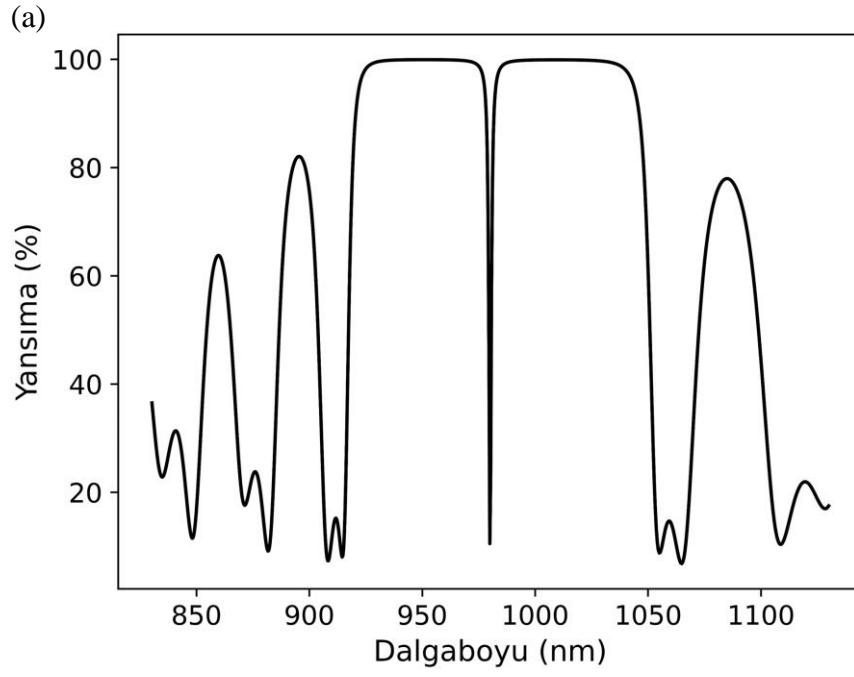
### 3.1 Li-VCSEL Tasarımı

Bu çalışmada nümerik olarak analiz edilmiş Li-VCSEL yapısında; GaAs alttaş, GaAs/AlAs’tan oluşan 15 çift üst DBR, 35.5 çift alt DBR ve bu iki ayna arasında sıkıştırılmış GaAs aktif bölge bulunmaktadır. Malzemelerin kırıcılık indisleri 980 nm’de GaAs için 3.493, AlAs için 2.951 seçilmiştir. Tabakaların kalınlıkları ise kavite için  $\frac{\lambda_0}{n_{GaAs}}$ , DBR’lardaki GaAs için  $\frac{\lambda_0}{n_{GaAs}}$ , AlAs için  $\frac{\lambda_0}{n_{AlAs}}$  olacak şekilde seçilmiştir. Bunlara karşılık gelen değerler ise sırasıyla; 280.6 nm, 70.1 nm ve 83 nm’dir. PSCB kalınlığı ( $d_{PSCB}$ ) ve kavite çapı için farklı değerler seçilmiş, bu değişimlerin kaviteye ve kaviteye bağlı parametrelere etkileri incelenmiştir.

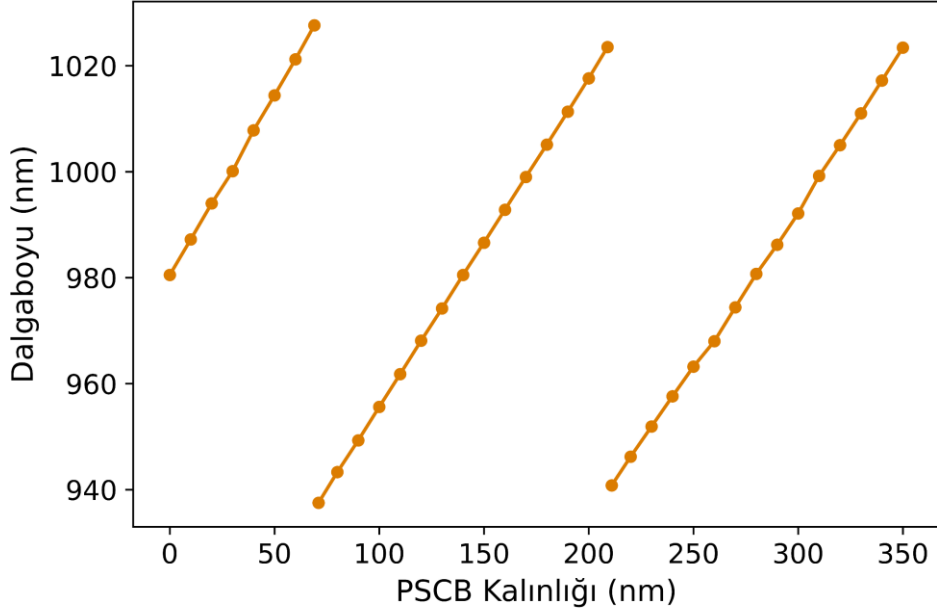
Nümerik analizler, Lumerical FDTD [57] ve SimuLase Designer [58] yazılımları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda kavitenin içerisine geniş bant çift kutuplu noktasal bir kaynak yerleştirilmiş ve kavite aydınlatılmıştır. İletim tayfları

oluşturmak için veriler lazer üzerine yerleştirilmiş bir monitör (Frequency-domain field and power) ile toplanmıştır. Yüksek kalite faktörlerinin hesaplanabilmesi için monitörün dalga boyu ekseninde çözünürlüğü 0.002 nm olacak şekilde ayarlanmıştır. Yansıma tayfları elde edilirken, lazerin üzerine paralel olarak yerleştirilen bir düzlem dalga kaynağı yüzeye doğru gönderilmiş, yansıyan dalgalar yine yüzeye paralel bir monitör ile toplanmıştır. 3 boyutlu olarak seçilen simülasyon alanının sınırları, sonuçları etkilememesi için kaviteden uzağa yerleştirilmiş, bütün simülasyonlarda sınırlar için Perfectly-Matched Layer sınır koşulu uygulanmıştır. Simülasyonlarda kavite yakınlarında, kavite çapına göre 20 nm ile 150 nm aralığında yanal örgüler kullanılırken; dikey örgü aralığı ise aktif bölgede çevresinde 2 nm, kalan bölgelerde ise 10 nm örgüler kullanılmıştır. Gerçekleştirilen tüm simülasyonlarda aynalardaki soğurma kayıpları ihmal edilmiştir.

VCSEL'lerde iletim dalga boyu kalınlıklar ve kavite çapı tarafından belirlenir. Yani kalınlıkları değiştirerek yapının desteklediği dalga boyları değiştirilebilir. Bu durumun sonucu olarak da PSCB kalınlığı ile yapının desteklediği rezonans dalga boyu istenilen değerde seçilebilir. Şekil 2.3'te (a) PSCB katmanı olmayan bir kavite ve (b) 100 nm PSCB katmanı olan bir kavitenin yansıma tayfi verilmiştir. Görüleceği üzere, fazladan 100 nm kalınlığındaki bir katman yapının desteklediği dalga boyunu maviye, yani daha yüksek enerji seviyesine sahip dalga boylarına doğru kaydırmıştır. Rezonans dalga boyunun PSCB kalınlığına bağlı değişimini daha net görebilmek için yansıma tayfi simülasyonları farklı PSCB kalınlıkları için tekrarlanmıştır. Şekil 2.4'te, rezonans dalga boyunun PSCB kalınlığına göre değişimi verilmiştir. Rezonans dalga boyunun  $\lambda_0/2n_{PSCB}$  yani 140 nm'lik periyotlarla değişimi görülebilir.



Şekil 2.3. (a) PSCB katmanı olmayan ve (b) 100 nm PSCB katmanı olan kavitelelerin yansima tayfları.



Şekil 2.4. Dış bölgede rezonans dalga boyunun PSCB kalınlığı  $d_{PSCB}$ 'ye göre değişimi.

Li-VCSEL'de PSCB üst aynanın katmanları arasına yerleştirilmiştir. Eğer bu tabaka için n-tipi bir malzeme seçilecek olursa, üst ayna da p-tipi malzeme olduğundan PSCB ile kavite arasında p-tipi bir bölge kalacaktır. Sonuç olarak tüm yapı yukarıdan aşağıya p-n-p-i-n şekline gelecektir. Yapıya ileri besleme bir gerilim uygulandığında PSCB ve altında kalan bölge ters beslenmiş diyot gibi davranarak akımın geçmesini engelleyecektir. Fabrikasyon sırasında PSCB'nin aşındırıldığı dairesel bölgeler ise önceki gibi p-i-n şeklinde kalacak ve açılma gerilimi aşıldığında akım bu bölgelerden akacaktır.

PSCB'nin lokasyonu akımın yayılması açısından oldukça önemlidir ve tasarım yapılırken bu durum göz önünde bulundurulmalıdır. Kaviteden uzak bir bölgeye yerleştirilmesi akımın daha fazla alana yayılmasına, bu ise lazer açıklık çapından daha büyük bir alanda rekombinasyonların oluşumuna, dolayısıyla da güç dönüştürme veriminin azalmasına yol açacaktır. Akımın sınırlandırılabilmesi için implantasyon yöntemi de kullanılabilir. Fakat bu durum önceden bahsedilen dezavantajların doğmasına neden olacaktır. Ayrıca ince bir alanda akımı engelleyebilmek, düşük eşik akımına ulaşabilmek ve lazer üzerindeki gerilim düşümünü en aşağı seviyeye çekebilmek için yapı ve malzeme sistemi hakkında iyi bilgiye, sadece bu amaç uğruna yapılacak ciddi bir çalışmaya ihtiyaç vardır. Ek olarak, elektriksel özellikler katkılama

miktarları, elektron ve boşluk mobiliteleri, iletkenlik gibi birçok parametreye bağlıdır. Yapının elektriksel performansına ileride kısaca değinilecektir.

### 3.2 Efektif İndis Modeli ve Nümerik Analiz

Çalışmada kullanılan tasarım ve hesaplamalar Hadley'in 1995 yılında yayınladığı efektif indis modeline göre gerçekleştirilmiştir [59]. Modele göre, kavite ve dış bölgede aynı malzemeler kullanılsa bile efektif olarak kırıcılık indisi farkı elde etmek mümkündür. Yüzey-ışımali lazerlerde optik kipler, aynalara dik olan optik eksen ile çok küçük bir açı yaptığından paraksiyel hüzmeler olarak değerlendirilirler. Bu yaklaşım ile skaler dalga denklemi

$$\nabla^2 E - \frac{\varepsilon}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0, \quad (1.2)$$

eşitliğini çözmek için elektrik alanın tek bileşeni yeterlidir. Burada  $\varepsilon$  elektriksel geçirgenliğe ve  $c$  ışık hızına karşılık gelmektedir. Elektrik alan  $E$ 'nin koordinatlara bağımlılığından dolayı VCSEL benzeri yapılar için Eşitlik (3.1)'i çözmek kolay değildir. Fakat iki varsayım ile eşitlik sadeleştirilebilir: (1) zamana bağlı  $E$  radyal frekans  $\omega_0$  ile neredeyse harmoniktir ve (2) lazerin yapısı silindirik bölgede sadece yayılım doğrultusunda değişir. Böylelikle eşitlik

$$E(r, z, \phi, t) \approx \varphi_i(z)E(r, \phi, t) \exp(-i\omega_0 t), \quad (1.3)$$

ilişkisini  $i$  bölgesi içinde sağlar. Eşitlik (3.2)'nin Eşitlik (3.1)'de yerine koyulması ve  $\nabla^2 = \partial^2/\partial z^2 + \nabla_t^2$  değişiminin yapılmasıyla

$$\varphi_i'' E + \varphi_i \nabla_t^2 E + \varepsilon k_0^2 \varphi_i E + 2i \varepsilon k_0 \varphi_i \frac{\partial E}{\partial \tau} = 0, \quad (1.4)$$

eşitliği elde edilir. Burada  $k_0 = \omega_0/c$  dalga sayısına,  $\tau = ct$  ise zaman koordinatına karşılık gelmektedir. Bu noktadan sonra efektif indis modeli iki varsayım ile sağlanır: (1) özfonksiyon  $\varphi_i$ , 1-boyutlu özdeğer denklemi



$$\varphi_i'' + k_0^2(1 - \xi_i)\varepsilon_i(z)\varphi_i = 0, \quad (1.5)$$

'i sağlar ve (2)  $\varphi_i$  değerleri neredeyse eşittir, yani  $\varphi_i(z) \approx \varphi_j(z) \approx \varphi(z)$ . Özdeğer  $\xi_i$ 'in gerçek ve sanal kısımları sırasıyla efektif indise ve kavite kayıplarına karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.4) kullanılarak Eşitlik (3.3)'teki  $\varphi_i''$  teriminden kurtulmak mümkündür. Sonuç olarak

$$\frac{\partial E}{\partial \tau} = \frac{i}{2k_0 \langle \varepsilon_i \rangle} (\nabla_t^2 + k_0^2 \Delta \varepsilon_{eff}) E, \quad (1.6)$$

eşitliğini elde ederiz. Burada  $\langle \varepsilon_i \rangle \equiv \int \varphi^* \varepsilon_i(z) dz$  normalleştirme sabiti  $\int \varphi^* \varphi dz = 1$  olan ortalama miktara ve  $\Delta \varepsilon_{eff} = \Delta(n_{eff}^2) = \xi_i \langle \varepsilon_i \rangle$  efektif kırıcılık indisindeki değişime karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.5)'in sonucu olarak elde edilen kırıcılık indisi farkına sahip olan dairesel simetrik silindirik VCSEL yapısının enine kesiti Şekil 2.6'da verilmiştir.  $\xi_i$ 'in gerçek kısmını etkileyen parametreleri incelemek için Eşitlik (3.4)'ü  $\varphi^*$  ile çarpalım ve

$$\xi_i \langle \varepsilon_i \rangle = n_{eff}^2 = \langle \varepsilon_i \rangle - \frac{1}{k_0^2} \int |\varphi^*|^2 dz, \quad (1.7)$$

Eşitliğini elde ederiz. Burada  $\langle \varepsilon_i \rangle$ ,  $\xi_i$ 'in gerçek kısmına karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.6)'daki zıt yönlerde yayılan iki adet düzlem dalğanın girişimi belirten  $\frac{1}{k_0^2} \int |\varphi^*|^2 dz$  terimi

$$\frac{1}{k_0^2} \int |\varphi^*|^2 dz = \frac{1}{k_0^2} \int (k_0')^2 \varepsilon |\varphi^*|^2 dz = \frac{(k_0')^2}{k_0^2} k_0^2 \quad (1.8)$$

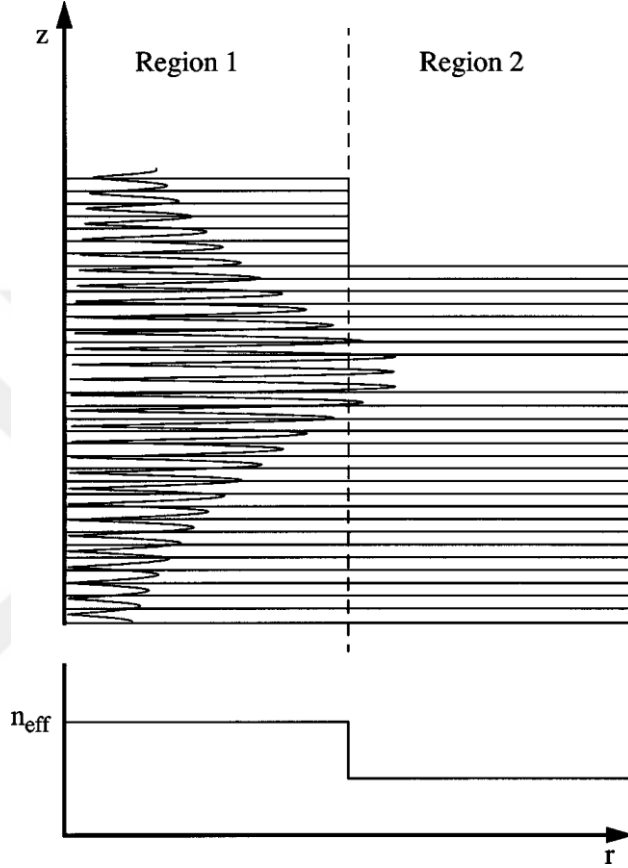
şeklinde ele alınabilir. Burada  $k_0'$  bölge içerisindeki Fabry Perot kipinin dalga numarasına,  $k_0$  ise referans bölgedeki dalga numarasına karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.7)'yi Eşitlik (3.6)'da yerine yazarak

$$\Delta n_{eff}^2 \approx \langle \varepsilon_i \rangle \left[ 1 - \frac{(k_0')^2}{k_0^2} \right], \quad (1.9)$$

elde edilir ve bu eşitlik ise

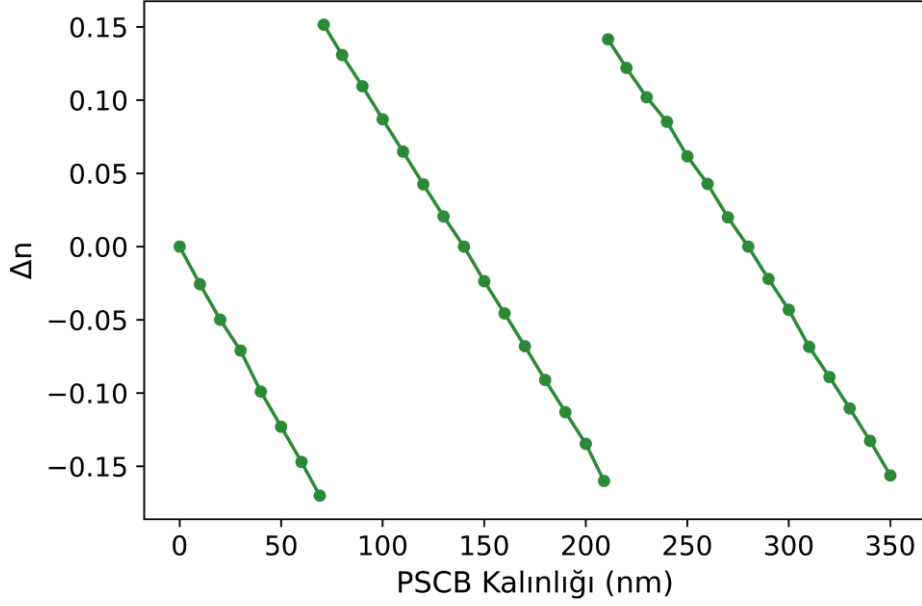
$$\frac{\Delta n_{eff}}{n_{eff}} \approx \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \quad (1.10)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\Delta \lambda_0$  kavite ve dış bölge arasındaki rezonans dalga boyuna ve  $\Delta n_{eff}$  efektif kırıcılık indisi farkına karşılık gelmektedir.



Şekil 2.5. Kavitenin iç (Region 1) ve dış bölgesinin (Region 2) efektif kırıcılık indisleri [59].

Eşitlik (3.9)'a göre, eğer kavite ve dış bölge dalga arasındaki dalga boyu farkı sıfırdan farklı bir değer alırsa bu iki bölge arasında efektif olarak bir kırıcılık indisi farkı oluşur (Şekil 2.5). Dış bölgenin dalgaboyuna bağlı olarak ayarlanabilen bu efektif kırıcılık indisi farkı sayesinde lazerin optimizasyonu kolaylaşır ve yüksek kalite faktörüne sahip verimli bir lazer tasarımı mümkün hale gelir.



Şekil 2.6.  $\Delta n_{eff}$  değerinin PSCB kalınlığına bağlı değişimi.

$\Delta n_{eff}$ 'in PSCB kalınlığı  $d_{PSCB}$ 'ye göre değişimi Şekil 2.6'de verilmiştir. Görüleceği üzere bazı  $d_{PSCB}$  değerleri için  $\Delta n_{eff}$  negatif değerler almaktadır. Bu ise iç bölgenin dış bölgeden daha düşük bir efektif kırıcılık indisine sahip olduğu anlamına gelir. Fakat toplam iç yansımaya prensibi gereğince, hüzmeyi bir hacim içinde hapsedebilmek için o bölgenin kırıcılık indisinin onu çevreleyen bölgeden daha yüksek olması gerekir. Sonuç olarak sadece  $\Delta n_{eff}$ 'in sıfırdan yüksek değerler aldığı

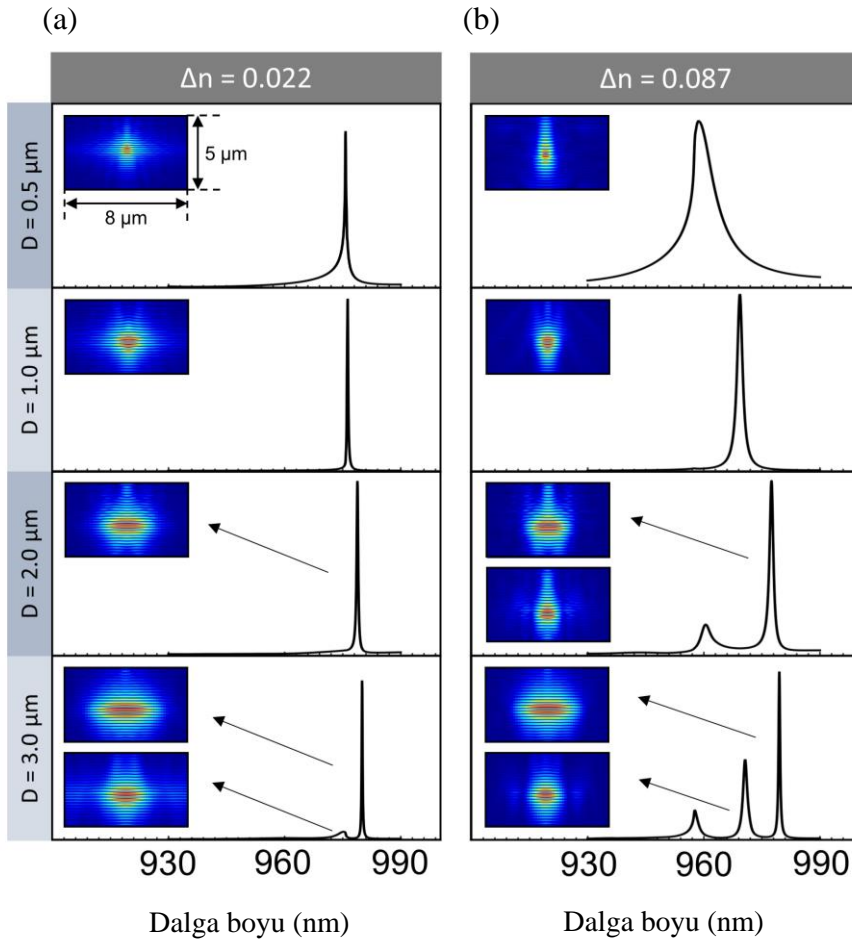
$$m \frac{\lambda_0}{4n_{GaAs}} < d_{PSCB} \leq (m + 1) \frac{\lambda_0}{4n_{GaAs}},$$

eşitsizliğini sağlayan  $d_{PSCB}$  değerleri yapıda optik kipi hapsedilmesi için kullanılabilir. Burada  $m$  herhangi bir çift doğal sayıya karşılık gelmektedir. Bu eşitsizliği sağlamayan  $d_{PSCB}$  değerleri saçılmaya yol açacaktır. Analizlerde bunun önüne geçmek adına  $d_{PSCB}$  için  $\Delta n_{eff}$ 'in pozitif değerler aldığı 100 nm, 115 nm, 130 nm, 135 nm, 137 nm, 138.5 nm değerleri seçilmiştir.

### 3.2.1 Optik kip profilleri

Öncelikli olarak çalışmada lazer çapının ana kipe ve yüksek dereceli kiplere etkisi incelenmiştir. Etkinin daha anlaşılabilir olması için bu çalışmada  $\Delta n_{eff}$  değeri 0.022 ve 0.087 alınmıştır. Bu efektif kırıcılık indisi farklarına karşılık gelen PSCB kalınlığı sırasıyla 130 nm ve 100 nm'dir.

Şekil 2.7 (a) ve (b)'de farklı açıklık çapı değerleri için ana kiplerin elektrik alan yoğunlukları ve ışına tayfları verilmiştir. Çok-kipli olan kaviteler için yüksek dereceli ilk kip de eklenmiştir. Görüleceği üzere elektrik alan profilleri lazerin çapı arttıkça genişlemektedir. Lazer çapı büyüdükçe, kip profilleri iki durum için birbirine benzemeye başlasa da küçük çaplarda yüksek kırıcılık indisi farkıyla profili bastırmak ve hacmini küçültmek mümkündür. Bunun yanı sıra düşük kırıcılık indisi farkıyla da yüksek dereceli kiplerin saçılması sağlanabilir.



Şekil 2.7. (a)  $\Delta n_{eff} = 0.022$  ve (b)  $\Delta n_{eff} = 0.087$  durumları için elektrik alan profilleri ve ışına tayfları.

Yüksek dereceli kipler, büyük kırıcılık indisi farkının olduğu durumlarda düşük indis farklarına nazaran lazerin kazanç bandına görece küçük çaplarda girerler. Bu nedenle büyük çaplarda tek-kipli operasyon elde edilmek isteniyorsa  $\Delta n_{eff}$ 'in düşük seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca  $\Delta n_{eff}$ 'in düşük olduğu durumlarda maviye kayma az, kalite faktörü daha yüksektir.

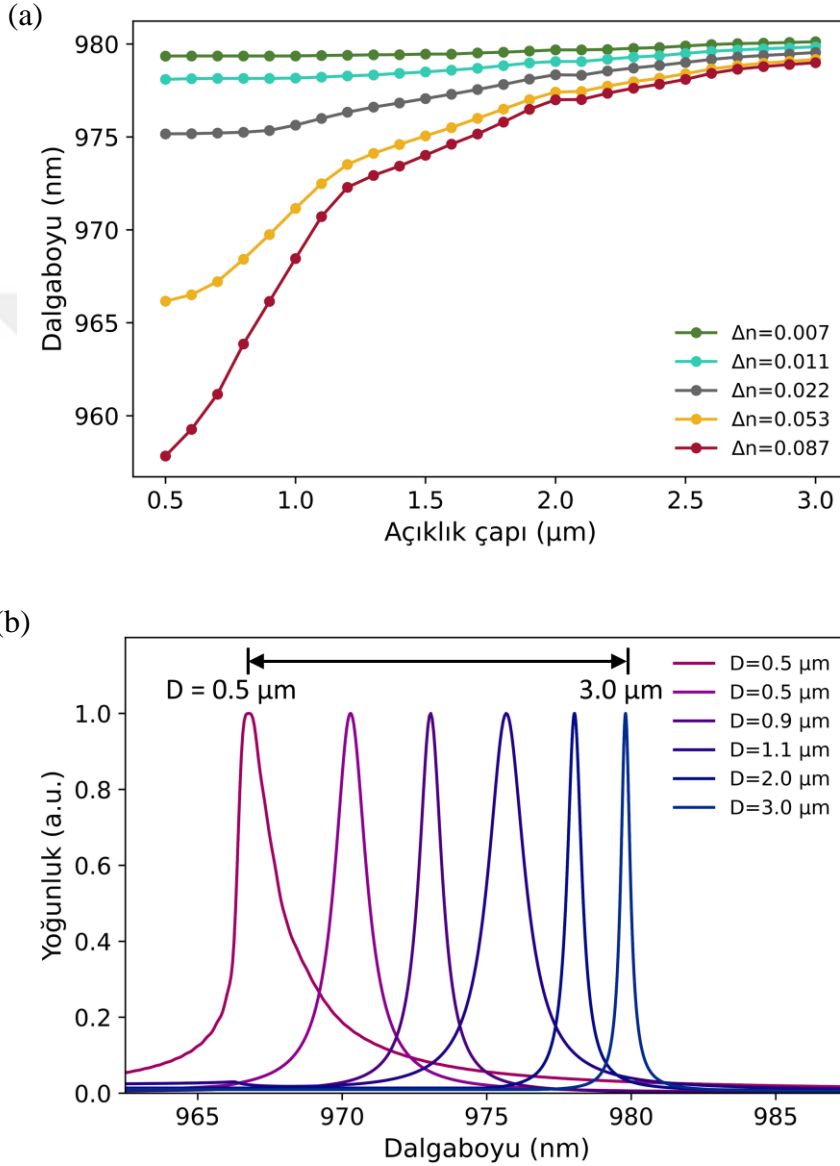
### 3.2.2 Rezonans dalga boyu

VCSEL'lerde lazer çapı küçüldükçe rezonans dalga boyu da yüksek enerjili düşük dalga boylarına doğru kaymaya başlamaktadır (Şekil 2.8 (a)). Işıma tayfında gerçekleşen bu kayma Şekil 2.8 (b)'de açıkça görülmektedir. Mikronaltı boyutlarda ve özellikle efektif kırıcılık indisi farkının yüksek olduğu durumlarda bu kayma daha da belirgindir. Kavite çapı  $D = 0.5 \mu\text{m}$  ve  $\Delta n_{eff} = 0.087$  iken ışıma dalga boyunun, tasarlandığı değer olan  $980 \text{ nm}$ 'den  $22.2 \text{ nm}$  kaydığı ve  $957.8 \text{ nm}$  olduğu gözlemlenmiştir. Kavite çapının yine  $0.5 \mu\text{m}$  fakat  $\Delta n_{eff}$ 'in  $0.007$  durumunda ise dalga boyu  $979.3 \text{ nm}$ 'dir. Bu değer  $1 \text{ nm}$ 'nin bile altında olduğundan ihmal edilebilir düzeydedir. Işıma dalga boyunda küçülen çapla beraber gerçekleşen kaymanın nedeni bant genişliği kenar frekanslarındaki artıştır [60, 61]. Diğer bir deyişle; küçülen çapla beraber bant genişliği artar. Çapı  $2 \mu\text{m}$  büyük olan lazerlerde bant genişliği lazer çapının sonsuz olduğu durumdaki gibi ele alınabilir. Tüm durumlar içinde  $2 \mu\text{m}$  çapta görülen en büyük kayma yaklaşık olarak  $3 \text{ nm}$ 'dir. Daha düşük  $\Delta n_{eff}$  değerlerinde ise bu kayma daha da azdır. Mikronaltı boyutlarda kaymanın önüne geçmek amacıyla  $\Delta n_{eff}$  düşük seçilmelidir.

Işıma yapılan dalga boyundaki kayma ayrıca iki mekanizmadan daha etkilenmektedir; kırıcılık indisi ve malzemelerin uzaysal boyutlarındaki değişimler [62]. İkisi arasında baskın olan ve kaymanın %90'ından sorumlu olan mekanizma kırıcılık indisindeki varyasyonlardır. GaAs ve AlAs için kırıcılık indisi varyasyonları çalışılmış ve sıcaklıkla arasındaki ilişki gösterilmiştir [63]. Elde edilen sonuçlarda ikisi arasında doğru orantı gözlemlenmiştir. Yani sıcaklığın artması malzemelerin kırıcılık indislerinin artmasına yol açmaktadır. Bu durum dalganın ortam içerisinde katettiği efektif mesafenin artmasına ve kavitenin daha yüksek dalga boylarını desteklemesine neden olmaktadır. Sonuçta ise sıcaklıktaki artış dalga boyunda da artışa yol açmaktadır. Tüm bu etkilerin kombinasyonu ele alındığında VCSEL'lerde kayma  $0.06 \text{ nm}/^\circ\text{K}$ , EEL'lerde ise  $0.3 \text{ nm}/^\circ\text{K}$ 'dir [64].

Mikrosütun kavitelere gerçekleşen dalga boyu kayması yüksek indis farkından dolayı diğer VCSEL çeşitlerine göre daha çoktur. GaAs/AlAs malzeme sisteminden oluşan bir mikrosütun kavitenin efektif kırıcılık indisi yaklaşık 3 olacaktır. Kaviteyi dışarıdan çevreleyen malzemenin hava olduğu durumlarda indis farkı yaklaşık 2,  $\text{SiO}_2$  veya benzeri dielektrik malzemeler olduğu durumlarda ise yaklaşık 1.5 olacaktır. Bu fark

Li-VCSEL’de azaltıldığından, dalgaboyunda gerçekleşen kayma mikrosütun kavitelere kıyasla çok daha az olmaktadır. Fakat daha önceden belirtildiği gibi fark azaldıkça kip hacmi de genişlemektedir. Bu sebeple, mikronaltı boyuttaki lazerlerde dalgaboyu ve kip hacmi arasında bir ödünleşimden söz edilebilir. Lazer tasarımında bu durumun göz önünde bulundurulması gerekir.



Şekil 2.8. (a) Farklı  $\Delta n_{eff}$  değerleri için rezonans dalga boyunun çapa bağlı değişimi [55] ve (b)  $\Delta n_{eff} = 0.053$  iken farklı açıklık çapı değerlerinde tayfta gerçekleşen kayma.

### 3.2.3 Kavite kalite faktörü

Analizlerde kavitenin kalite faktörü, rezonans dalga boyunun o dalga boyundaki tayfsal genişliğine bölünmesiyle hesaplanmıştır. Toplam kalite faktörü ayrıca

$$\frac{1}{Q} = \frac{1}{Q_{düzlemsel}} + \frac{1}{Q_{kenar-saçılımı}}, \quad (1.11)$$

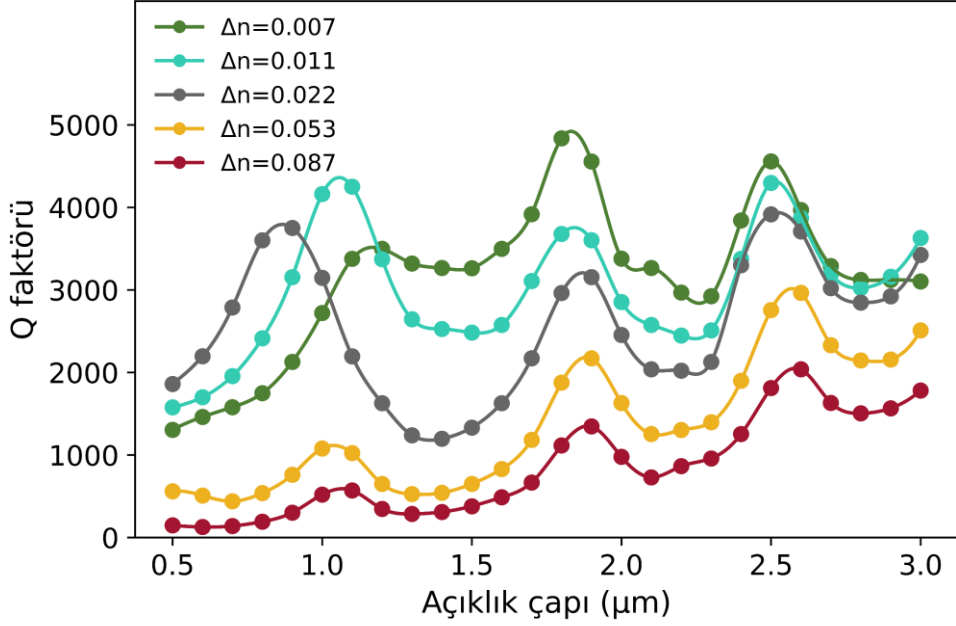
şeklinde yazılabilir [42, 45, 65]. Burada  $Q_{düzlemsel}$  düzlemsel kavitenin kalite faktörüne,  $Q_{kenar-saçılımı}$  ana kip  $I(r)$ 'ın  $r$  yarıçaplı kavitenin kenarındaki yoğunluğuyla orantılı olan terime karşılık gelmektedir.  $I(r)$  birinci tür Bessel fonksiyonu  $J_0(k_t \rho)$  olarak tanımlanabilir ve  $k_t = n_1^2 k_0^2 - \beta^2$ . Bu denklemde  $n_t$  iç bölgenin kırıcılık indisi,  $\beta$  ise yayılım sabitidir. Son durumda Eşitlik (3.10)

$$\frac{1}{Q(r)} = \frac{1}{Q_\infty} + \epsilon \frac{J_0^2(k_t r)}{r}, \quad (1.12)$$

şeklinde yazılabilir. Bu eşitlikte  $\epsilon$  orantılılık sabitidir. Anlaşıldığı üzere kavite kalite faktörü hesaplanırken yan duvarlarda gerçekleşen saçılmadan dolayı oluşan kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca bu durum; kayıpların azaltılmasıyla  $Q_{kenar-saçılımı}$  teriminin, dolayısıyla da toplam kalite faktörünün artacağı anlamına da gelir. Lazerlerin çapını arttırmak duvarlarda oluşan kayıpları engelleyebilir. Fakat kalite faktörü çap arttıkça onunla doğru orantılı olarak artmamaktadır. Şekil 2.9'da gösterildiği gibi kalite faktörünün farklı çaplarda aldığı değerlerin grafiği, doğrusal veya eksponansiyel bir artış-azalış değil salınım hareketi yapmaktadır. Bu salınım hareketinin nedeni; kavite kipinin ve DBR'lar arasında yayılım yapan Bloch kiplerinin eşleşmesidir [43, 66, 67].

Mikronaltı boyutta çapa sahip Li-VCSEL'lerde en yüksek kalite faktörü,  $\Delta n_{eff}$ 'in 0.022 ve çapın 1  $\mu\text{m}$  olduğu durumda elde edilmiş olup ve yaklaşık olarak 3750'dir. Tüm durumlar içerisindeki en yüksek değer ise yaklaşık olarak 5000'dir ve  $\Delta n_{eff}$ 'in 0.007, çapın 1.8  $\mu\text{m}$  olduğu durumda elde edilmiştir. Yüksek efektif kırıcılık indisi farkının kalite faktörünün azalmasına neden olduğu görülmektedir (Şekil 2.9). Bunun nedeni; yüksek indis farkının dalga boyunda daha fazla kaymaya neden olması ve DBR'ların 980 nm için tasarlanmış olmasıdır. Mikronaltı boyutlarda farkı azaltmak bir noktaya kadar kalite faktörünü artırmaya yardımcı olur. Fakat farkın daha da azaltılarak sıfıra doğru yaklaştırılması, kavitenin düzlemsel bir yapı gibi davranmasına ve kalite faktörünün azalmasına neden olur. İndis farkının azalmasıyla birlikte kalite faktörünün en yüksek değere ulaştığı optimum nokta tekrardan yüksek değerlere doğru

kayar. Bu noktalar; 0.087, 0.053, 0.022, 0.007, 0.0043  $\Delta n_{eff}$  değerleri için sırasıyla 1.1  $\mu\text{m}$ , 1  $\mu\text{m}$ , 0.9  $\mu\text{m}$ , 1.1  $\mu\text{m}$  and 1.3  $\mu\text{m}$ 'dir.



Şekil 2.9. Farklı  $\Delta n_{eff}$  değerleri için Q-faktörünün çapa bağlı değişimi.

### 3.2.4 Purcell faktörü

Kendiliğinden ışına oranındaki artış olan Purcell faktörü E.M Purcell tarafından 1946'da tanımlanmıştır [68] ve

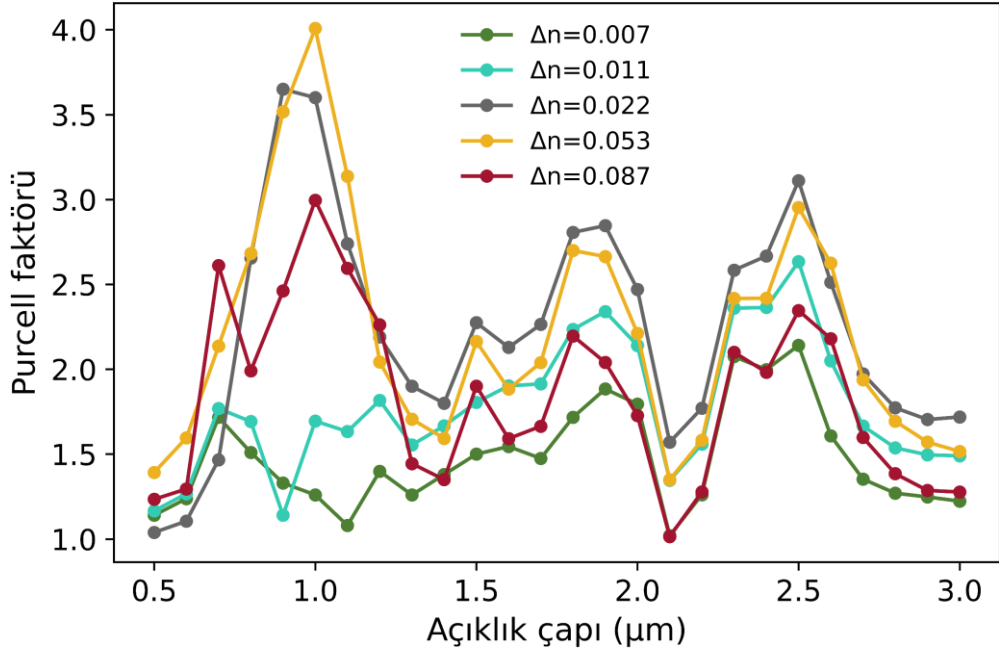
$$F_p = \frac{3\lambda^3 Q}{4\pi^2 V}, \quad (1.13)$$

şeklinde ifade edilidir. Bu eşitlikte  $F_p$  Purcell faktörüne,  $V$  kip hacmine ve  $\lambda$  ise malzeme içerisindeki dalga boyuna karşılık gelmektedir ( $\lambda = \lambda_0/n$ ). Ek olarak güç cinsinden de

$$F_p = \frac{P_{sistem}}{P_0}, \quad (1.14)$$

Şeklinde genellenebilir.  $P_{sistem}$  kavite içerisine yayılan güce  $P_0$  ise boş uzaya yayılan güce karşılık gelmektedir. Eşitlik (3.12)'den de görüleceği üzere Purcell faktörü  $F_p$ ; kalite faktörü  $Q$  ile doğru, kip hacmi ile ters orantılıdır. Yani yüksek bir Purcell faktörü elde edebilmek için  $Q$ -faktörün yükseltilmesi veya kip hacminin düşürülmesi gerekmektedir.





Şekil 2.10. Farklı  $\Delta n_{eff}$  değerleri için Purcell faktörünün çapa bağlı değişimi.

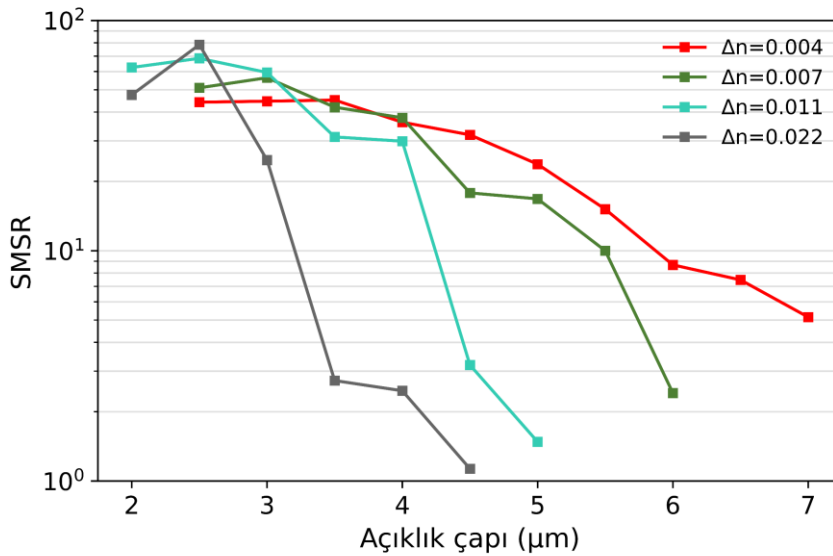
Şekil 2.10'de  $F_p$ 'nin  $\Delta n_{eff}$  değeri için çapa bağlı değişimi verilmiştir. 1  $\mu\text{m}$ 'den küçük çapa sahip lazerler için  $F_p$  değerlerinde herhangi bir örüntü görünmese de daha büyük çaplar için salınımın Q-faktörü ile aynı fazda olduğunu söyleyebiliriz. Bu durum yüksek çaplardaki kip hacimlerinin yaklaşık olarak aynı olması ile açıklanabilir. Kip hacimlerinin benzer olduğu durumlarda  $F_p$  Q-faktörü tarafından belirlenecektir. Analizlerdeki en yüksek  $F_p$  değeri, çapın 1  $\mu\text{m}$  ve  $\Delta n_{eff}$ 'in 0.053 olduğu durumda elde edilmiş ve değeri yaklaşık olarak 4'tür. Çalışılmış olan en düşük iki  $\Delta n_{eff}$  değeri olan  $F_p$  küçük değerler almaktadır. Bunun nedeni ise kip hacminin küçük indis farkıyla beraber artması, dolayısıyla  $Q/V$  oranının azalmasıdır.  $F_p$  yükseltmek için büyük  $\Delta n_{eff}$  değerleri seçmek ise yüksek dereceli kiplerin de ışınım yapısına neden olur. Bu durum ise tek-kipli ışınım yapılabilecek çap limitinin düşürmektedir. Sıradan oksit VCSEL'ler için bu limit oksit açıklığına bağlı olmakla birlikte 3  $\mu\text{m}$  ve 4  $\mu\text{m}$  arasındadır [67].

### 3.2.5 Yan-kip bastırma oranı

Yan-kip bastırma oranı (SMSR), ışınım tayfındaki ana kipi birinci yüksek dereceli kipe oranıdır ve yüksek dereceli kipi ana kip tarafından ne kadar bastırıldığıının

ölçüsüdür. Çalışmalarda kazanç oluşturacak bir malzeme kullanılmadığından SMSR değerleri testlerde ölçülen değerlerden düşük çıkmıştır.

Şekil 2.11’de SMSR’nin farklı  $\Delta n_{eff}$  değerleri için çapa bağlı değişimi verilmiştir. Beklenildiği gibi çap arttıkça SMSR değeri de düşmektedir. Düşük efektif kırıcılık indisi farkı olan durumlarda birinci yüksek dereceli kip saçılıma uğradığından SMSR değerleri de yüksektir. Farkın yüksek olduğu durumlarda ise yüksek dereceli kipler kavite içine hapsedildiğinden ışığa tayfında görülmektedir ve SMSR değerini de düşürmektedir. Li-VCSEL’de, oksit VCSEL’lerde elde edilen SMSR değerlerine yakın değerler 0.004  $\Delta n_{eff}$  ile yaklaşık 6  $\mu\text{m}$ ’ye yakın çaplarda edildi. Bu çap değerleri yüksek güçlü tek-kip operasyon için bu oldukça önemlidir. Optik haberleşme sistemlerinde ana kipi gücünün yüksek olması istenmektedir. Sonuç olarak Li-VCSEL’de uygulamaya bağlı olarak çap ve  $\Delta n_{eff}$ ’in optimizasyonu ile talep edilen değerler elde edilebilir.



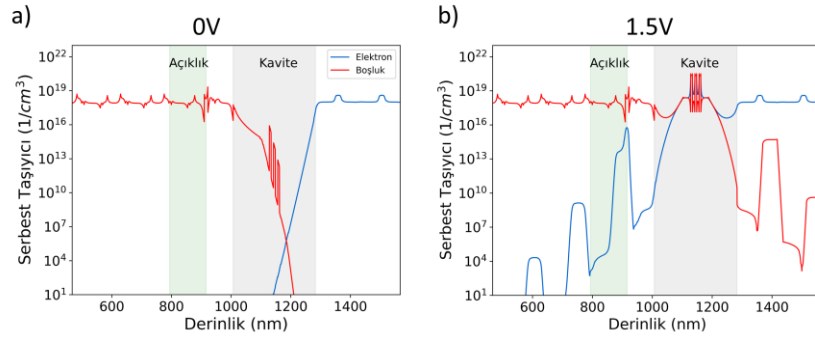
Şekil 2.11. Farklı  $\Delta n_{eff}$  değerleri için yan-kip bastırma oranının çapa bağlı değişimi.

### 3.3 PSCB Yapısı ve Taşıyıcı Yoğunlukları

Simülasyonlarda kullanılan yapıda üst DBR p-katkılı, alt DBR ise n-katkılıdır. İki DBR için de kavite yakınlarında ortalama katkılama oranı  $1 \times 10^{18}$ ’dir. Simülasyonlar 0V, 1.5V ve 4V için tekrarlanmıştır. Şekilde 2.13’te açıklığın olduğu bölgenin 0V ve 1.5V ileri gerilim altındaki serbest taşıyıcı yoğunluğu paylaşılmıştır. Yapıya ileri gerilim uygulanmadığında boşluk-elektron rekombinasyonu gerçekleşmemekte, 1.5V

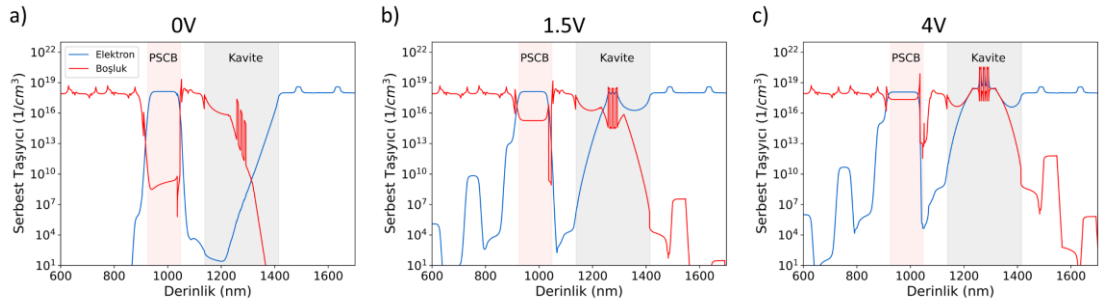
uygulandığında ise kavite içerisinde kuantum kuyularında boşluk-elektron rekombinasyonları gerçekleşmektedir.

Şekil 2.12’te ise PSCB’nin GaAs ve  $1 \times 10^{18}$  n-katkılı olduğu durumda, PSCB ile kaplı bölgenin 0V, 1.5V ve 4V gerilim altında sahip oldukları serbest taşıyıcı yoğunluğu verilmiştir. PSCB’nin olduğu bölgelerde elektron konsantrasyonu  $1 \times 10^{18}$  iken, çevreleyen ortamda boşluk yoğunluğu  $1 \times 10^{18}$ ’dir. Bu durum yapı içerisinde ters gerilime neden olmaktadır. Bu sayede yapı gerilim ileri beslendiğinde bu bölgede oluşan ters gerilim sayesinde akımın geçişinin engellenmesi hedeflenmektedir.



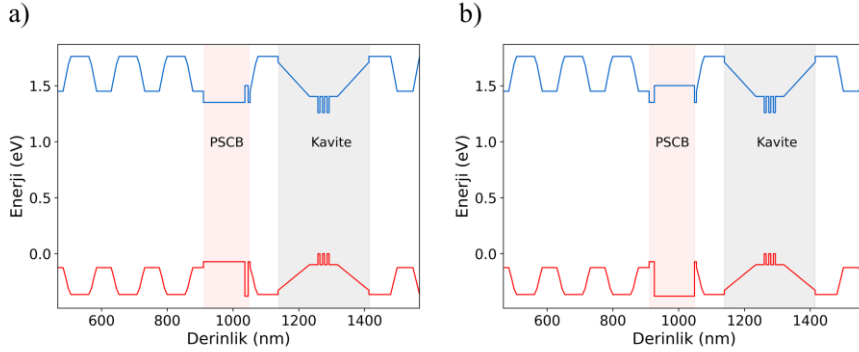
Şekil 2.12. Açıklığın olduğu bölgede (a) 0V ve (b) 1.5V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.

Ancak Şekil 2.13’te yapıya 1.5V ileri gerilim uygulandığında PSCB bölgesinde boşluk yoğunluğunun kayda değer bir biçimde arttığı, 4V uygulandığında ise elektron ve boşluk yoğunluğunun yaklaşık olarak aynı değerlere ulaştığı görülmektedir. Bu durumun PSCB’nin yüksek gerilimlere dayanamayabileceğini, lazer yapısında kayıplara yol açabileceğini göstermektedir.



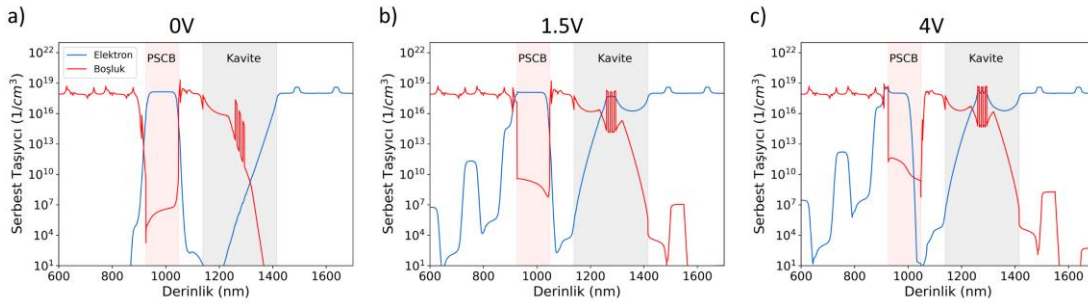
Şekil 2.13. PSCB’nin (GaAs) olduğu bölgede (a) 0V, (b) 1.5V ve (c) 4V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.

PSCB için kullanılan GaAs, arasında bulunduğu DBR tabakası ile benzer enerji diyagramına sahip olduğundan boşlukların yapı içerisindeki hareketi kolaylaşmaktadır. (Şekil 2.14)



Şekil 2.14. (a) GaAs ve (b)  $In_{0.49}Ga_{0.51}P$  PSCB için enerji bant diyagramları

PSCB tabakası için n-katkılı GaAs yerine hemen hemen aynı kafes sabitine ( $5.65325 \text{ \AA}$ ) sahip olan  $1 \times 10^{18}$  n-katkılı  $In_{0.49}Ga_{0.51}P$  kullanıldığında yapının 1.5V gerilime dayanabildiği, 4V gerilim uygulandığında bile boşluk yoğunluğunun PSCB bölgesinde kayda değer şekilde artmadığı görülmektedir (Şekil 2.15). Bu durumun nedeni,  $In_{0.49}Ga_{0.51}P$  kullanımıyla yapı içerisinde boşlukların hareket ettiği değerlik bandında enerji seviyesi farkının yaratılmış olmasıdır.



Şekil 2.15. PSCB'nin ( $In_{0.49}Ga_{0.51}P$ ) olduğu bölgede (a) 0V, (b) 1.5V ve (c) 4V ileri gerilim altında boşluk ve elektron yoğunlukları.

#### 4. SONUÇ VE İLERİ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada güncel VCSEL teknolojilerinin limitlerini aşmak amacıyla yeni bir litografik VCSEL tasarımı sunulmuş ve bu tasarımın optik ve elektriksel özellikleri nümerik yöntemlerle analiz edilmiştir. Analizler farklı lazer çapları ve efektif kırıcılık indis farkları için tekrarlanmıştır. Sonuç olarak, üretiminin de kolay olmasıyla birlikte elde edilen değerler doğrultusunda mikronaltı boyutlarda Li-VCSEL'in diğer türlerdeki VCSEL'lere kıyasla daha iyi bir seçenek olduğu ortaya konmuştur. Mikronaltı boyutta elde edilen en yüksek Q-faktörü yaklaşık olarak 3750, tüm analizlerde elde edilen en yüksek Q-faktörü ise yaklaşık olarak 5000'dir. Bu değerler sırasıyla 0.9  $\mu\text{m}$  ve 1.8  $\mu\text{m}$  çaplarında 0.022 ve 0.007 efektif kırıcılık indis farkları ile elde edilmiştir. Düşük kırıcılık indis farkları ile lazerin çapı küçüldükçe gerçekleşen maviye kayma durumunun önüne geçilmiştir. 0.5  $\mu\text{m}$  çapında elde edilen minimum kayma 0.0043 kırıcılık indis farkı ile 1 nm'nin altındadır. En yüksek Purcell faktörü ise çapın 1  $\mu\text{m}$  ve indis farkının 0.053 olduğunda elde edilmiştir. Ayrıca Li-VCSEL'in, oksit VCSEL'lerin çok-kipli operasyon yaptığı 6  $\mu\text{m}$  çaplara kadar tek-kipli operasyon yapabilme kabiliyeti olduğu da nümerik olarak gösterilmiştir.

Sergilenen iyi optik performansların yanında Li-VCSEL'in sağlamış olduğu en büyük avantaj, açıklık şeklinin litografik işlemler ile belirlenmesinden dolayı istenilen şekilde üretilebilmesidir. Bu kabiliyet Parite-Zaman (PT) simetrisi gibi uygulamaların VCSEL'ler ile birleştirilebilmesine olanak sağlar. Dairesel Bragg lazerlerde PT simetri ve kipli özellikleri transfer matris metodu ile nümerik ve analitik olarak çalışılmıştır [70]. Oksit ve iyon implante gibi diğer türdeki VCSEL'ler ile üretilemeyecek bu yapıların Li-VCSEL ile üretilmesi mümkün hale gelir. PT simetrik dairesel lazerlerde kırıcılık indis modülasyonu yapının üzerine periyodik desenlerin oluşturulması ile elde edilir. Desenin derinliği ve periyodu ayarlanarak eşik kazancı artırılabilir veya iraksama açısı azaltılabilir. Ayrıca eşik kazancı artırıldığından yüksek güçlü tek-kipli operasyon elde edilmesine olanak sağlar. Yüksek güç tek-kipli operasyonu ve düşük iraksama açısı Lidar uygulamalarında önem taşımaktadır [16, 71]. ToF (Time-of-Flight) Lidarlarda uzak nesnelere aydınlatılmak için kırınım kayıplarının az,

hüzmenin ıraksama açısının ise düşük olması gerekir. Bu sayede hüzme daha uzak hedeflere ulaşabilir ve sistemin etkili menziline artırır. Basit mesafe ölçüm sistemlerinin yanında, VCSEL'lerin hali hazırda DFB (Distributed Feedback) lazerlerden iyi performans sergilediği frekans-modüasyonlu sürekli-dalga (Frequency-Modulated Continuous Wave, FMCW) ölçüm sistemleri [72] için de güçlü bir aday konumundadır.

Li-VCSEL'ler, uygulamaların gereksinimlerine bağlı olarak farklı özellikler ve geniş bir serbestlik derecesi sunmaktadır. Fakat unutulmaması gereken bir nokta: Li-VCSEL'lerin sağladığı kırıcılık indis farkının bir üst limiti bulunmaktadır. Kırıcılık indis farkı dalga boyunun kaydırılması ile elde edildiğinden bu limit DBR'ların yansıtıcılık tayfındaki bant genişliğine bağlıdır. Dalga boyunun kaydırılabildiği ölçüde efektif indis değiştirilebilmektedir. Bu bantı genişletmek için DBR'larda dielektrik malzeme kullanılabilir.

Sonuç olarak, Li-VCSEL diğer VCSEL'lere kıyasla daha iyi optik performans sergilemiştir. Ayrıca farklı desenlerde açıklıklar ile üretilebilmesi sayesinde PT simetri gibi uygulamaların gerçekleşmesine imkan tanıyacak, bu potansiyel sayesinde dairesel ve simetrik olmayan lazerlerin 2 boyutlu fotonik kristaller gibi tasarlandığı araştırma konularına da ön ayak olacaktır.

## REFERANSLAR

- [1] Soda, H., Iga, K., Kitahara, C., & Suematsu, Y. (1979). GaInAsP/InP Surface Emitting Injection Lasers. *Japanese Journal Of Applied Physics*, 18(12), 2329-2330.  
doi: 10.1143/jjap.18.2329
- [2] Koyama, F., Kinoshita, S., & Iga, K. (1989). Room-temperature continuous wave lasing characteristics of a GaAs vertical cavity surface-emitting laser. *Applied Physics Letters*, 55(3), 221–222.  
doi: 10.1063/1.101913
- [3] Seurin, J., Ghosh, C., Khalfin, V., Miglo, A., Xu, G., & Wynn, J. et al. (2008). High-power high-efficiency 2D VCSEL arrays. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XII*.  
doi: 10.1117/12.774126
- [4] Morgan, R., Hibbs-Brenner, M., Marta, T., Walterson, R., Bounnak, S., Kalweit, E., & Lehman, J. (1995). 200/spl deg/C, 96-nm wavelength range, continuous-wave lasing from unbonded GaAs MOVPE-grown vertical cavity surface-emitting lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 7(5), 441-443.  
doi: 10.1109/68.384503
- [5] Moench, H., Conrads, R., Deppe, C., Derra, G., Gronenborn, S., & Gu, X. et al. (2015). High-power VCSEL systems and applications. *High-Power Diode Laser Technology And Applications XIII*.  
doi: 10.1117/12.2076267
- [6] Seurin, J., Xu, G., Wang, Q., Guo, B., Van Leeuwen, R., & Miglo, A. et al. (2010). High-brightness pump sources using 2D VCSEL arrays. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XIV*.  
doi: 10.1117/12.842492
- [7] Zhou, D., Seurin, J., Xu, G., Miglo, A., Li, D., & Wang, Q. et al. (2014). Progress on vertical-cavity surface-emitting laser arrays for infrared illumination applications. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XVIII*.  
doi: 10.1117/12.2040429
- [8] Hirose, K., Liang, Y., Kurosaka, Y., Watanabe, A., Sugiyama, T., & Noda, S. (2014). Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers. *Nature Photonics*, 8(5), 406-411.  
doi: 10.1038/nphoton.2014.75

- [9] Siriani, D., Meng Peun Tan, Kasten, A., Harren, A., Leisher, P., & Sulkin, J. et al. (2009). Mode Control in Photonic Crystal Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers and Coherent Arrays. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 15(3), 909-917.  
doi: 10.1109/jstqe.2008.2012121
- [10] Wilcox, K., Tropper, A., Beere, H., Ritchie, D., Kunert, B., Heinen, B., & Stolz, W. (2013). 435 kW peak power femtosecond pulse mode-locked VECSEL for supercontinuum generation. *Optics Express*, 21(2), 1599.  
doi: 10.1364/oe.21.001599
- [11] Keller, U., Weingarten, K., Kartner, F., Kopf, D., Braun, B., & Jung, I. et al. (1996). Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 2(3), 435-453.  
doi: 10.1109/2944.571743
- [12] Gaafar, M., Rahimi-Iman, A., Fedorova, K., Stolz, W., Rafailov, E., & Koch, M. (2016). Mode-locked semiconductor disk lasers. *Advances In Optics And Photonics*, 8(3), 370.  
doi: 10.1364/aop.8.000370
- [13] Gierl, C., Gruendl, T., Debernardi, P., Zogal, K., Grasse, C., & Davani, H. et al. (2011). Surface micromachined tunable 155  $\mu\text{m}$ -VCSEL with 102 nm continuous single-mode tuning. *Optics Express*, 19(18), 17336.  
doi: 10.1364/oe.19.017336
- [14] Huffaker, D. L., & Deppe, D. G. (1997). Improved performance of oxide-confined vertical-cavity surface-emitting lasers using a tunnel injection active region. *Applied Physics Letters*, 71(11), 1449-1451.  
doi:10.1063/1.119933
- [15] Warren, M., Block, M., Dacha, P., Carson, R., Podva, D., Helms, C., & Maynard, J. (2018). Low-divergence high-power VCSEL arrays for lidar application. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XXII*.  
doi: 10.1117/12.2290937
- [16] Carson, R., Warren, M., Dacha, P., Wilcox, T., Maynard, J., & Abell, D. et al. (2016). Progress in high-power high-speed VCSEL arrays. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XX*.  
doi: 10.1117/12.2215009
- [17] Westbergh, P., Safaisini, R., Haglund, E., Larsson, A., Gustavsson, J., & Haglund, E. (2013). High-speed 850 nm VCSELs operating error free up to 57 Gbit/s. *Electronics Letters*, 49(16), 1021-1023.  
doi: 10.1049/el.2013.2042
- [18] Hao-Lin Chen, Francis, D., Nguyen, T., Wupen Yuem, Gabriel Li, & Chang-Hasnian, C. (1999). Collimating diode laser beams from a large-area VCSEL-array using microlens array. *IEEE Photonics Technology Letters*, 11(5), 506-508.  
doi: 10.1109/68.759380



- [19] Orenstein, M., Lehmen, A., Chang-Hasnain, C., Stoffel, N., Harbison, J., & Florez, L. et al. (1990). Vertical-cavity surface-emitting InGaAs/GaAs lasers with planar lateral definition. *Applied Physics Letters*, 56(24), 2384-2386.  
doi: 10.1063/1.102923
- [20] Vázquez, G. (2014). Refractive index change in ion-implanted waveguides. *Latin America Optics And Photonics Conference*, Cancun, Mexico.  
doi: 10.1364/laop.2014.ltu2a.3
- [21] Lear, K., Schneider, R., Choquette, K., Kilcoyne, S., Figiel, J., & Zolper, J. (1994). Vertical cavity surface emitting lasers with 21% efficiency by metalorganic vapor phase epitaxy. *IEEE Photonics Technology Letters*, 6(9), 1053-1055.  
doi: 10.1109/68.324666
- [22] Lear, K., Schneider, R., Choquette, K., & Kilcoyne, S. (1996). Index guiding dependent effects in implant and oxide confined vertical-cavity lasers. *IEEE Photonics Technology Letters*, 8(6), 740-742.  
doi: 10.1109/68.502079
- [23] Sah, C., Noyce, R., & Shockley, W. (1991). Carrier Generation and Recombination in P-N Junctions and P-N Junction Characteristics. *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*, 78-94.  
doi: 10.1142/9789814503464\_0005.
- [24] Ramaswamy, A., van der Ziel, J., Biard, J., Johnson, R., & Tatum, J. (1998). Electrical characteristics of proton-implanted vertical-cavity surface-emitting lasers. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 34(11), 2233-2240.  
doi: 10.1109/3.726619
- [25] Huffaker, D., Deppe, D., Kumar, K., & Rogers, T. (1994). Native-oxide defined ring contact for low threshold vertical-cavity lasers. *Applied Physics Letters*, 65(1), 97-99.  
doi: 10.1063/1.113087
- [26] Sugg, A., Holonyak, N., Baker, J., Kish, F., & Dallesasse, J. (1991). Native oxide stabilization of AlAs-GaAs heterostructures. *Applied Physics Letters*, 58(11), 1199-1201.  
doi: 10.1063/1.105213
- [27] Weigl, B., Grabherr, M., Jung, C., Jager, R., Reiner, G., & Michalzik, R. et al. (1997). High-performance oxide-confined GaAs VCSELs. *IEEE Journal Of Selected Topics In Quantum Electronics*, 3(2), 409-415.  
doi: 10.1109/2944.605686
- [28] Choquette, K., Lear, K., Schneider, R., & Geib, K. (1994). Low threshold voltage vertical-cavity lasers fabricated by selective oxidation. *Electronics Letters*, 30(24), 2043-2044.  
doi: 10.1049/el:19941421
- [29] Iga, K. (2018). Forty years of vertical-cavity surface-emitting laser: Invention and innovation. *Japanese Journal of Applied Physics*, 57(8S2).  
doi:10.7567/jjap.57.08pa01

- [30] Kao, H., Tsai, C., Leong, S., Peng, C., Chi, Y., & Huang, J. et al. (2017). Comparison of single-/few-/multi-mode 850 nm VCSELs for optical OFDM transmission. *Optics Express*, 25(14), 16347. doi: 10.1364/oe.25.016347
- [31] Moser, P., Hofmann, W., Wolf, P., Lott, J., Larisch, G., & Payusov, A. et al. (2011). 81 fJ/bit energy-to-data ratio of 850 nm vertical-cavity surface-emitting lasers for optical interconnects. *Applied Physics Letters*, 98(23), 231106. doi: 10.1063/1.3597799
- [32] Miller, D. (2009). Device Requirements for Optical Interconnects to Silicon Chips. *Proceedings Of The IEEE*, 97(7), 1166-1185. doi: 10.1109/jproc.2009.2014298
- [33] Stoltz, N., Rakher, M., Strauf, S., Badolato, A., Lofgreen, D., & Petroff, P. et al. (2005). High-quality factor optical microcavities using oxide apertured micropillars. *Applied Physics Letters*, 87(3), 031105. doi: 10.1063/1.1999843
- [34] Jewell, J., Harbison, J., Scherer, A., Lee, Y., & Florez, L. (1991). Vertical-cavity surface-emitting lasers: Design, growth, fabrication, characterization. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 27(6), 1332-1346. doi: 10.1109/3.89950
- [35] Yamashita, H., Kawamoto, N., Ogawa, Y., & Yamaguchi, K. (2015). Fabrication of GaAs/AlAs micro-pillar cavities including low-density InAs quantum dots and their photoluminescence properties. *Japanese Journal Of Applied Physics*, 54(6S1), 06FH03. doi: 10.7567/jjap.54.06fh03
- [36] Varoutsis, S., Laurent, S., Sagnes, I., Lemaître, A., Ferlazzo, L., & Mériadec, C. et al. (2005). Reactive-ion etching of high-Q and submicron-diameter GaAs/AlAs micropillar cavities. *Journal Of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics And Nanometer Structures*, 23(6), 2499. doi: 10.1116/1.2131084
- [37] Farrow, T., See, P., Bennett, A., Ward, M., Atkinson, P., & Cooper, K. et al. (2008). Single-photon emitting diode based on a quantum dot in a micropillar. *Nanotechnology*, 19(34), 345401. doi: 10.1088/0957-4484/19/34/345401
- [38] Böckler, C., Reitzenstein, S., Kistner, C., Debusmann, R., Löffler, A., & Kida, T. et al. (2008). Electrically driven high-Q quantum dot-micropillar cavities. *Applied Physics Letters*, 92(9), 091107. doi: 10.1063/1.2890166
- [39] Romeira, B., & Fiore, A. (2018). Purcell Effect in the Stimulated and Spontaneous Emission Rates of Nanoscale Semiconductor Lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 54(2), 1-12. doi:10.1109/jqe.2018.2802464

- [40] Karl, M., Kettner, B., Burger, S., Schmidt, F., Kalt, H., & Hetterich, M. (2009). Dependencies of micro-pillar cavity quality factors calculated with finite element methods. *Optics Express*, *17*(2), 1144.  
doi: 10.1364/oe.17.001144
- [41] Ma, R., & Oulton, R. F. (2018). Applications of nanolasers. *Nature Nanotechnology*, *14*(1), 12-22.  
doi:10.1038/s41565-018-0320-y
- [42] Rivera, T., Debray, J., Gérard, J., Legrand, B., Manin-Ferlazzo, L., & Oudar, J. (1999). Optical losses in plasma-etched AlGaAs microresonators using reflection spectroscopy. *Applied Physics Letters*, *74*(7), 911-913.  
doi: 10.1063/1.123407
- [43] Lalanne, P., Hugonin, J., & Gérard, J. (2004). Electromagnetic study of the quality factor of pillar microcavities in the small diameter limit. *Applied Physics Letters*, *84*(23), 4726-4728.  
doi: 10.1063/1.1759375
- [44] Xu, Q., Xie, X., Shen, B., Chen, J., Dai, Q., Song, H., & Zhou, Q. (2017). Surface roughness effect on micropillar cavities. *2017 9Th International Conference On Advanced Infocomm Technology (ICAIT)*, Chengdu, China.  
doi: 10.1109/icaic.2017.8388883
- [45] Reitzenstein, S., & Forchel, A. (2010). Quantum dot micropillars. *Journal Of Physics D: Applied Physics*, *43*(3), 033001.  
doi: 10.1088/0022-3727/43/3/033001
- [46] Schneider, C., Gold, P., Reitzenstein, S., Höfling, S., & Kamp, M. (2016). Quantum dot micropillar cavities with quality factors exceeding 250,000. *Applied Physics B*, *122*(1).  
doi: 10.1007/s00340-015-6283-x
- [47] Jasim, F., Omar, K., & Hassan, Z. (2010). The effect of number of distributed Bragg reflectors on VCSEL output performance. *Optoelectronics And Advanced Materials-Rapid Communications*, *4*(6), 774-777.
- [48] Choquette, K., Geib, K., Chui, H., Hammons, B., Hou, H., Drummond, T., & Hull, R. (1996). Selective oxidation of buried AlGaAs versus AlAs layers. *Applied Physics Letters*, *69*(10), 1385-1387.  
doi: 10.1063/1.117589
- [49] Herrick, R., Dafinca, A., Farthouat, P., Grillo, A., McMahon, S., & Weidberg, A. (2013). Corrosion-Based Failure of Oxide-Aperture VCSELs. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, *49*(12), 1045-1052.  
doi: 10.1109/jqe.2013.2285572.
- [50] Jasim, F., Omar, K., & Hassan, Z. (2009). Temperature effect on VCSEL output performance. *Optoelectronics And Advanced Materials-Rapid Communications*, *3*(11), 1136-1138.

- [51] Lu, D., Ahn, J., Huang, H., & Deppe, D. (2004). All-epitaxial mode-confined vertical-cavity surface-emitting laser. *Applied Physics Letters*, 85(12), 2169-2171.  
doi: 10.1063/1.1795982
- [52] Demir, A., Zhao, G., & Deppe, D. (2010). Lithographic lasers with low thermal resistance. *Electronics Letters*, 46(16), 1147.  
doi: 10.1049/el.2010.8532
- [53] Demir, A., Zhao, G., Freisem, S., Liu, X., & Deppe, D. (2011). Scaling properties of lithographic VCSELs. *Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers XV*.  
doi: 10.1117/12.875579
- [54] Yang, X., Zhao, G., Li, M., Liu, X., Zhang, Y., & Deppe, D. (2014). 50% Power Conversion Efficiency on a Non-Oxide VCSEL. *CLEO: 2014*.  
doi: 10.1364/cleo\_si.2014.sf1g.2
- [55] Ding, F., Stöferle, T., Mai, L., Knoll, A., & Mahrt, R. (2013). Vertical microcavities with highQ and strong lateral mode confinement. *Physical Review B*, 87(16).  
doi: 10.1103/physrevb.87.161116
- [56] Demir, A., Apaydın, D. and Kurt, H. (2019). Submicron Size All-Semiconductor Vertical Cavities with High Q. *The European Conference on Lasers and Electro-Optics*, Munich, Germany.
- [57] FDTD Solutions, Lumerical Inc., <http://www.lumerical.com/tcad-products/fdtd/>
- [58] SimuLase Designer, Nonlinear Control Strategies Inc., <http://www.nlcstr.com/>
- [59] Hadley, G. (1995). Effective index model for vertical-cavity surface-emitting lasers. *Optics Letters*, 20(13), 1483.  
doi: 10.1364/ol.20.001483
- [60] Vučković, J., Pelton, M., Scherer, A., & Yamamoto, Y. (2002). Optimization of three-dimensional micropost microcavities for cavity quantum electrodynamics. *Physical Review A*, 66(2).  
doi: 10.1103/physreva.66.023808
- [61] Pelton, M., Vuckovic, J., Solomon, G., Scherer, A., & Yamamoto, Y. (2002). Three-dimensionally confined modes in micropost microcavities: quality factors and Purcell factors. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 38(2), 170-177.  
doi: 10.1109/3.980269
- [62] Li, H., & Iga, K. (2003). *Vertical-cavity surface-emitting laser devices*. Berlin: Springer.
- [63] Talghader, J., & Smith, J. (1995). Thermal dependence of the refractive index of GaAs and AlAs measured using semiconductor multilayer optical cavities. *Applied Physics Letters*, 66(3), 335-337.  
doi: 10.1063/1.114204

- [64] Khan, N., Choudhury, S., & Roni, A. (2011). A comparative study of the temperature dependence of lasing wavelength of conventional edge emitting stripe laser and vertical cavity surface emitting laser. *International Conference on Data Communication Networking and Optical Communication System* (pp. 141-145), Seville, Spain.
- [65] Englund, D., & Vuckovic, J. (2006). A direct analysis of photonic nanostructures. *Optics Express*, *14*(8), 3472.  
doi: 10.1364/oe.14.003472
- [66] Reitzenstein, S., Gregersen, N., Kistner, C., Strauss, M., Schneider, C., & Pan, L. et al. (2009). Oscillatory variations in the Q factors of high quality micropillar cavities. *Applied Physics Letters*, *94*(6), 061108.  
doi: 10.1063/1.3081030
- [67] Gregersen, N., Reitzenstein, S., Kistner, C., Strauss, M., Schneider, C., & Hofling, S. et al. (2010). Numerical and Experimental Study of the Q Factor of High-Q Micropillar Cavities. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, *46*(10), 1470-1483.  
doi: 10.1109/jqe.2010.2052095
- [68] Purcell, E. (1995). Spontaneous Emission Probabilities at Radio Frequencies. *Confined Electrons And Photons*, 839-839.  
doi: 10.1007/978-1-4615-1963-8\_40
- [69] Jung, C., Jäger, R., Grabherr, M., Schnitzer, P., Michalzik, R., & Weigl, B. et al. (1997). 4.8 mW singlemode oxide confined top-surface emitting vertical-cavity laser diodes. *Electronics Letters*, *33*(21), 1790.  
doi: 10.1049/el:19971207
- [70] Gu, J., Xi, X., Ma, J., Yu, Z., & Sun, X. (2016). Parity-time-symmetric circular Bragg lasers: a proposal and analysis. *Scientific Reports*, *6*(1).  
doi: 10.1038/srep37688
- [71] Shi, J., Chi, K., Chang, J., Wei, Z., Jiang, J., & Yang, Y. (2013). Single-Mode Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser Array With High Power and Narrow Far-Field Divergence Angle. *IEEE Photonics Journal*, *5*(6), 1502508-1502508.  
doi: 10.1109/jphot.2013.2287559
- [72] Ula, R., Noguchi, Y., & Iiyama, K. (2019). Three-Dimensional Object Profiling Using Highly Accurate FMCW Optical Ranging System. *Journal Of Lightwave Technology*, *37*(15), 3826-3833.  
doi: 10.1109/jlt.2019.2921353

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Doğukan Apaydın  
**Uyruk** : Türkiye Cumhuriyeti  
**Doğum Tarihi ve Yeri** : 03.08.1991-ANKARA  
**E-posta** : dapaydin@etu.edu.tr / dogukanapaydin@outlook.com

### ÖĞRENİM DURUMU:

**Lisans** :2016, Çukurova Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi  
Elektrik & Elektronik Mühendisliği (İngilizce)

### MESLEKİ DENEYİM:

Yıl	Yer	Görev
2018 - ...	UNAM	Lisansüstü Araştırmacı
2015	Aselsan	Stajyer
2014	TUSAŞ	Stajyer

### Sınavlar:

**ALES** : 96.6

**YDS** : 77.5 (İngilizce)