



T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

950-1050 nm DALGABOYLU LAZER KAVİTESİNİN
OLUŞTURULMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fikriye Eda BULUT
(20209233010)

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Didem ALTUN

SIVAS
MAYIS 2024

Fikriye Eda BULUT'un hazırladığı ve “**950—1050 nm DALGABOYLU LAZER KAVİTESİNİN OLUŞTURULMASI**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı **Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN**

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Doç. Dr. Serdar KOÇKANAT**

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Dr. Öğr. Üyesi Burcu ARPAPAY**

Eskişehir Teknik Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nevcihan GÜRSOY
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır.



Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) tarafından yürütülen STBMYO-2023-003 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Fikriye Eda BULUT, 2024

ETİK

Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

03/05/2024

Fikriye Eda BULUT

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tamamlanması süresince bilgi ve deneyimlerini benimle paylaşan, çok değerli rehberliği ile bana yol gösteren ve bu çalışmanın tamamlanmasında büyük emeği olan tez danışmanım sayın hocam Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN'a çok teşekkür ederim.

Bu süreçte yardımlarına ihtiyaç duyduğum ve desteklerini esirgemeyen sayın Doç. Dr. Behçet Özgür ALAYDİN'e çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca her koşulda yanımda olan ve beni destekleyen aileme çok teşekkür ederim.

Bu çalışma, CÜBAP Komisyonu tarafından STBMYO-2023-003 numaralı yüksek lisans tez projesi olarak desteklenmektedir.

ÖZET

950-1050 nm DALGABOYLU LAZER KAVİTESİNİN OLUŞTURULMASI

Fikriye Eda BULUT

Yüksek Lisans Tezi

Elektrik – Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Didem ALTUN

2024, xviii + 51

Yarı iletken lazerler temel olarak iki temel grupta incelenirler ve düşey dış kovuklu yüzey ışıklı lazerler (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser- VECSEL) bantlar arası geçiş yapan lazer grubundadır. VECSEL çipi iki ana kısımda oluşur: i) Dağınımlı Bragg Yansıtıcısı (Distributed Bragg Reflector-DBR) ve ii) Aktif bölge. DBR yüksek yansıtıcılığa sahip aynadır, aktif bölge ise kazanç bölgesini oluşturur. VECSEL'in çalışabilmesi için gerekli olan lazer kovuğu ise harici olarak çıkış kuplörü OC (Output Coupler) kullanılarak elde edilir. Rezonans lazer kavitesinde DBR ile OC arasında meydana gelir. Bu tez çalışmasında VECSEL çipi GaAs alttaş üzerine büyütülmüş GaAs/AlAs DBR'den, kazanç bölgesi ise InGaAs/GaAs kuantum kuyularından oluşmaktadır. Çalışmada yüksek güç ve verim amaçlandığından flip-chip metodu ile fabrikasyon gerçekleştirilmiştir. Bunun için sırasıyla metalizasyon, indiyum lehimleme, ıslak aşındırma ve dielektrik işlemleri gerçekleştirilmiştir. Fabrikasyon işlemi sonrasında fotoluminesans ve reflektans ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Fotoluminesans ölçümündeki pik dalgaboyu ile reflektans ölçümündeki dip noktası örtüşmektedir. Bu nokta VECSEL'in çalışma dalga boyunu göstermektedir. Fabrikasyon sonrası lazer kavitesinin kurulması, hizalanması ve lazer ışımalarının elde edilmesi üzerine çalışılmıştır. Öncelikle 976 nm dalgaboyunda hizalama lazeri kullanılarak "beam walking" yöntemi ile kavite hizalaması gerçekleştirilmiştir. Hizalama sonrası, lazer kavitesi dört farklı OC için kurulmuştur. %1 geçirgenliğe ve sırasıyla 50, 75 ve 100 mm eğrilik yarıçapına sahip OC'ler

kullanılarak oda sıcaklığında maksimum 2 W çıkış gücü elde edilmiştir. Ancak bu tez çalışmasında hedeflenen verim değerine ulaşılamamıştır. Son olarak kazancın artırılması, VECSEL çipinin korunması için %2 geçirgenliğe sahip 75 mm eğrilik yarıçapına sahip OC kullanılarak elde edilen lazer ışması da 3,02 W lazer ışmasının üzerine çıkılmıştır. Optik verim %25,9 ve M^2 değeri 1,03 elde edilmiştir. Bu değerler ile çalışmadaki hedefler sağlanmıştır ve tez çalışması başarı ile sonlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: VECSEL, Lazer, Kavite



ABSTRACT

CREATION OF 950-1050 nm WAVELENGTH LASER CAVITY

Fikriye Eda BULUT

Master of Science Thesis

Department of Electrical Electronics Engineering

Supervisor: Assistant Prof. Didem ALTUN

2024, xviii+51 pages

Semiconductor lasers are basically examined in two basic groups and vertical external cavity surface emitting lasers (VECSEL) are in the group of lasers that have interband transitions. The VECSEL chip consists of two main parts: i) Distributed Bragg Reflector (DBR) and ii) active region. The DBR is the high reflectivity mirror, while the active region forms the gain region. The laser cavity required for VECSEL to work is obtained externally by using the Output Coupler (OC). Resonance occurs between DBR and OC in the laser cavity. In this thesis study, the VECSEL chips, consists of GaAs/AlAs DBR grown on GaAs substrate and the gain region consists of InGaAs/GaAs quantum wells, are used. Since high power and efficiency are aimed in the study, it is fabricated with the flip-chip method. For this, metallization, indium soldering, wet etching and dielectric processes are carried out, respectively. After the fabrication process, photoluminescence and reflectance measurements are carried out. The peak wavelength in the photoluminescence measurement coincides with the minimum in the reflectance measurement. This sharp decrease represents the operating wavelength of VECSEL. After fabrication, the establishment and alignment of the laser cavity and the acquisition of laser radiation are studied. First of all, cavity alignment is performed with the "beam walking" method using an alignment laser at a

wavelength of 976 nm. After alignment, the laser cavity is set up for four different OCs. By using OCs with 1% transmission and curvature radius of 50, 75 and 100 mm, respectively, a maximum output power of 2 W is obtained at room temperature, but the efficiency value can not be reached according to the thesis study requirements. Finally, in order to increase the gain and protect the VECSEL chip, the laser radiation obtained by using OC with a transmittance of 2% and a radius of curvature of 75 mm has exceeded the 3.02 W laser irradiance. The optical efficiency is 25.9% and the M^2 value is 1.03. With these values, the study requirements are met and the project is successfully terminated.

Key words: VECSEL, Laser, Cavity



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR	vi
ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
SİMGELER DİZİNİ	xv
KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ	1
2. YARI İLETKENLER	6
3. LAZERLER	8
3.1 Lazer Çalışma Prensipleri.....	9
3.2 Yarı İletken Lazerler.....	10
3.2.1 Interband lazerler.....	11
3.2.2 Intraband lazerler.....	11
4. GEREÇ VE YÖNTEM	12
4.1 MOCVD ile Kristal Büyütme.....	12
4.2 PL-Fotoluminesans Ölçüm Sistemi.....	13
4.3 Spektrofotometre Ölçüm Sistemi.....	13
4.4 VECSEL Üretimi.....	14
4.5 VECSEL Fabrikasyonu.....	16
4.6 Lazer Kavite Tasarımı.....	19
5. UYGULAMALAR VE TARTIŞMA	22
5.1 VECSEL Çip Fabrikasyonu.....	22
5.2 VECSEL Prototipinin Oluşturulması.....	27
6. SONUÇ ve ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR	47
ÖZGEÇMİŞ	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Katarakt ameliyatlarında kullanılmak üzere ticari olarak satılan bir lazer ...	2
Şekil 1.2 AMS firması tarafından dikey ışıklı lazer kullanılarak üretilmiş LIDAR.	3
Şekil 1.3 LIDAR sistemleri kullanılarak mesafe kontrollü güvenlik sistemi	3
Şekil 1.4 Ermaksan firması tarafından üretilen metal lazer kesim makinesi.....	4
Şekil 1.5 VCSEL ya da VECSEL yapılarının, kullanılan yarı iletkene göre çalışma bölgeleri	5
Şekil 2.1 a) Yalıtkan, b) Yarı iletken, c) İletken materyallerin enerji bant yapıları. ...	7
Şekil 3.1 Uyarılmış ışımaya prensibi (Url-2).	9
Şekil 3.2 Lazerin genel bileşenleri, çalışma prensibi (Kasnak, 2016).....	10
Şekil 4.1 MOCVD büyütme şeması (Altun, 2018).....	12
Şekil 4.2 Işığın yansıma, geçirgenlik soğurma olayları.....	14
Şekil 4.3 MOCVD yöntemi ile GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs DBR'nin taramalı elektron mikroskopu görüntüsü (sol), teorik simülasyonu ve yansıma ölçümü (sağ).....	15
Şekil 4.4 MOCVD yöntemi ile GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 5 adet InGaAs/GaAs kuantum kuyusu içeren VECSEL'in taramalı elektron mikroskop görüntüsü.	16
Şekil 4.5 VECSEL fabrikasyonunda kullanılan soğutucu sistemler: Yüzey soğutmalı (sol) ve alttaş çıkarma işlemleri uygulanmış (sağ) VECSEL çiplerinin gösterimi. ...	17
Şekil 4.6 Elmas soğutucu ve VECSEL çiplerinin metalizasyon sırası ve kaplama kalınlıkları.	18
Şekil 4.7 Alttaş çıkarma için mum kaplamanın yapılması ve aşındırma yönünün gösterimi (sol), aşındırma işlemi sonrası elde edilen çip.	19
Şekil 4.8 Aygıt inceltme metodu ile elde edilen VECSEL çiplerinden elde edilmiş düz lazer kavitesi.	20

Şekil 4.9 100 mm OC eğrilik yarı çapına sahip lazer kavitesi için kavite uzunluğuna bağlı olarak kavite dengesi (sol) ve kavite uzunluğu ile OC'nin eğrilik yarıçapına bağlı olarak elde edilen 2-boyutlu kavite denge haritalandırması (sağ).	21
Şekil 5.1 2 inç GaAs alttaştan kesilmiş dörtte bir VECSEL çipi a),4.5 mm ² boyutlarında kesilmiş VECSEL çipleri b).	22
Şekil 5.2 Metalizasyonu gerçekleştirilmiş VECSEL çipleri.....	23
Şekil 5.3 Lehimleme sonrası VECSEL çiplerinin görünümü.....	24
Şekil 5.4 Aşındırma sonrası mikroskop ile alınan yüzey görüntüleri.....	25
Şekil 5.5 VECSEL çip tutucu çizimi a), lehimleme sonrası VECSEL çipinin görünümü b).	26
Şekil 5.6 VECSEL çiplerinin fotoluminesans ve yansıma ölçümü.	27
Şekil 5.7 Su hattı ve bağlantıları.	28
Şekil 5.8 Sıcaklık kontrol ünitesinin elektriksel bağlantısı.....	29
Şekil 5.9 TED4015 sıcaklık kontrol ünitesi.....	29
Şekil 5.10 Matlab kullanılarak gerçekleştirilen lazer kavite tasarımları a) Kavitenin görünümü, b) 50 mm, c) 75 mm ve d) 100 mm eğrilik yarıçapları için denge durumundaki kavite için ışın genişliğinin kavite uzunluğu ile değişimi.....	30
Şekil 5.11 VECSEL çipinin konumunun pompa lazer yardımı ile belirlenmesi.	31
Şekil 5.12 Hizalama lazerinin lensler yardımı ile ışın boyutunun sabitlemesi.....	32
Şekil 5.13 Hizalama lazerinin optik yol boyunca görünümü ve irisler yardımı ile hizalanması.....	32
Şekil 5.14 Geri yansımanın hizalanması için kullanılan gümüş aynalar ve iris.	33
Şekil 5.15 Lazer diyot ve optik ray sistemi.	34
Şekil 5.16 Pompa lazerin fiber çıkışı sonrası boyutu ve odaklayıcı lensler	34
Şekil 5.17 Pompa lazerin akıma bağlı olarak güç değişimi.....	35
Şekil 5.18 Lazer kavitesi ve optik pompalama anında görünümü.....	36

Şekil 5.19 Sıcaklık kontrol ünitesi ile VECSEL çipinin sıcaklığının sabitlenmesi ve 1.81 V 7.63 A güç değerinde lazer çalıştırılması.	37
Şekil 5.20 İlk lazer ışınması, pompa lazerin cep telefonu kamerası ile VECSEL.....	38
Şekil 5.21 Lazer güç ölçümünde kullanılan fotodiyot ve güç metre.	38
Şekil 5.22 $T=1\%$ geçirgenlik ile 50, 75 ve 100 mm ROC değerine sahip OC'ler ile $T=2\%$ ve 75 mm ROC değerine sahip OC için güç eğrileri.	39
Şekil 5.23 1% geçirgenlik ve 50 mm ROC değerine sahip OC için soldan sağa sırasıyla 20 sırası ile 20, 23 ve 26 °C VECSEL sıcaklıklarına ait lazer ışın profili.	42
Şekil 5.24 Sırasıyla 1% geçirgenliğe 75 (üst) ve 100 (orta) mm ROC değerine sahip OC'ler ve 2% geçirgenlik ile 75 mm ROC değerine sahip OC için lazer ışın profili ölçüm sonuçları.	45

SİMGELER DİZİNİ

W	Watt
kW	Kilo watt
eV	Elektron volt
T	Geçirgenli
m	Metre
nm	Nano metre
fs	Femto saniye
N	Newton
λ	Dalga boyu
n	Reel kırılma indisi
Δn	Kırılma İndisi farkı
E_g	Bant aralığı
GHz	Giga Herz



KISALTMALAR DİZİNİ

Al:	Alüminyum
AlN:	Alüminyum Nitrat
AlAs:	Alüminyum Arsenik
AlInAs:	Alüminyum İndiyum Arsenik
As:	Arsenik
Au:	Altın
CO:	Karbon Monoksit
CO₂:	Karbon Dioksit
CH₄:	Metan
Cu:	Bakır
C₆H₈O₇:	Sitrik Asit
DBR:	Dağınımlı Bragg Aynası (Distributed Bragg Reflector)
Ga:	Galyum
GaAs:	Galyum Arsenik
GaAsP:	Galyum Arsenik Fosfat
GaN:	Galyum Nitrat
GaP:	Galyum Fosfor
GaSb:	Galyum Antimonit
Ge:	Germanyum
In:	İndiyum
AlInAs:	Alüminyum İndiyum Arsenik
InAs:	İndiyum Arsenik
AlGaAs:	Alüminyum Galyum Arsenik
H₂O₂:	Hidrojen Peroksit
ICL:	Interband Cascade Laser
InGaAs:	İndiyum Galyum Arsenik
InP:	İndiyum Fosfat
IR:	Kızılötesi (Infrared)
LAZER:	Uyarılmış radyasyon emisyonu tarafından ışık amplifikasyonu (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
LD:	Lazer Diyot
LED:	Işık yayan diyot (Light Emitting Diode)
LIDAR:	Lazer Görüntüleme Tespiti ve Ölçümü (Laser Imaging Detection and Ranging)
3D-LIDAR:	3 boyutlu LIDAR
MOCVD:	Metal- organik kimyasal buhar biriktirme
MWI:	Orta kızılötesi dalgaboyu
N:	Azot
NH₃:	Amonyak
nm:	Nanometre
O₂:	Oksijen
OC:	Çıkış Kuplörü (Output Coupler)
P:	Fosfor

Pt:	Platin
PT1000:	Sıcaklık Sensörü
RADAR:	Radyo frekans ile tespit etme (Radio Detection And Ranging)
ROC:	Eğrilik Yarıçapı
QCL:	Kuantum çağlayan lazer
Sb:	Antimonit
SBW:	Bant genişliği (Stop Band Width)
SE:	Spektroskopik elipsometri
SEL:	Yüzey Işımalı Lazer (Surface Emitting Laser)
Si:	Silikon
SiC:	Silisyum Karbür
SiOx:	Silisyum Oksit
TED4015:	Sıcaklık kontrol elemanı
Ti:	Titanyum
UV:	Mor ötesi (Ultraviyole)
VCSEL:	Dikey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer (Vertical Cavity Surface-Emitting Laser)
VECSEL:	Dikey Dış Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer (Vertical External-Cavity Surface- Emitting Laser)

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde elektronik ve optoelektronik alanlarda gelişimi hızla artan yarı iletken materyallerin yeri her geçen gün artmaktadır. Düşük enerji tüketimi ile yüksek performans sergileyen diyot, transistör, LED, LAZER gibi yarı iletken aygıtların yaygın kullanımı tüm dünyayı tehdit eden enerji sorunu karşısında kaçınılmazdır. Ayrıca bu yüksek performanslarına karşılık hiçbir atık madde oluşturmamaları da ayrı bir tercih nedenidir. Mekanik parçalarının olmaması, bakımlarının kolay olması, uzun ömürlü olmaları ve küçük ebatları ile fazla yer kaplamamaları ayrı birer avantajdır. Bu yarı iletken aygıtlar arasında ise LAZER yapılarındaki gelişme dikkat çekicidir. Teknolojik gelişmelere en çok ihtiyaç duyan askeri alanlar, sağlık sektörü, endüstri gibi geniş ve önemli alanlarda lazer yapılarının kullanımı hızla artmaktadır.

Lazer bir kısaltma olup açılımı Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation'dır. Anlamı Uyarılmış Radyasyon Emisyonu Tarafından Işık Amplifikasyonu'dur. Lazer; eş fazlı, yoğun, dar ve tek renkli ışık demeti oluşturan aynı zamanda bu ışık demetini güçlendiren optoelektronik cihazdır. Lazerin en önemli özelliği uyumlu (coherent) yapıda olmasıdır. Albert Einstein'ın uyarılmış yayını teorik olarak ispatlamasının ardından, 20. yüzyılda ortaya çıkan en önemli optoelektronik cihazlardan bir tanesi 1960 yılında Theodore Maiman tarafından yakut kristalinden üretilen lazerdir (Maiman, 1960). Yakut lazeri gaz lazerler takip etmiş, helyum ve neon'dan ilk gaz lazerler üretilmiştir. İlk yarı iletken temelli lazer ise Hall tarafından 1962 yılında GaAs kullanılarak üretilmiştir (Hall, 1962) ve bu lazer kızılötesi bölgede çalışmaktadır. İlklerin ardından lazerler üzerine yapılan bilimsel araştırmalar hız kazanmış ve lazer uygulamaları sanayi ve teknoloji alanında birçok yer edinmiştir.

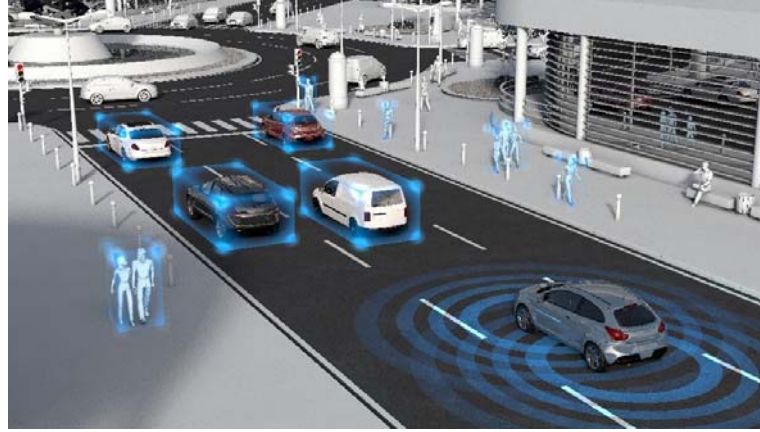
Lazerlerin başlıca kullanım alanlarından biri sağlık sektörüdür. Yüksek güçlü monokromatik lazer ışını optik elemanlar (lens ve aynalar) ile mikrometre boyutuna kadar odaklanabilmektedir. Odaklanmış lazer ışını doku hücrelerinin sıcaklığını lokal olarak hızlıca yükselterek buharlaşma sağlamaktadır, böylece bu bölgede bulunan

istenmeyen doku türlerinin (kanser hücreleri, akne vb.) uzaklaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Bunun yanı sıra hassas kesim gerektiren cerrahi işlemlerde de (göz, prostat vb.) son yıllarda sıkça kullanılmaktadır (Atri, 2009), (Chu , 2014), (Gamal Ebidalla Elghobaier , 2020), (Hirsch, 2003), (Kantola, 2014), (Paithankar, 2002) ve dünya genelinde birçok firma tarafından ticarileştirilmiş ürün bulunmaktadır.

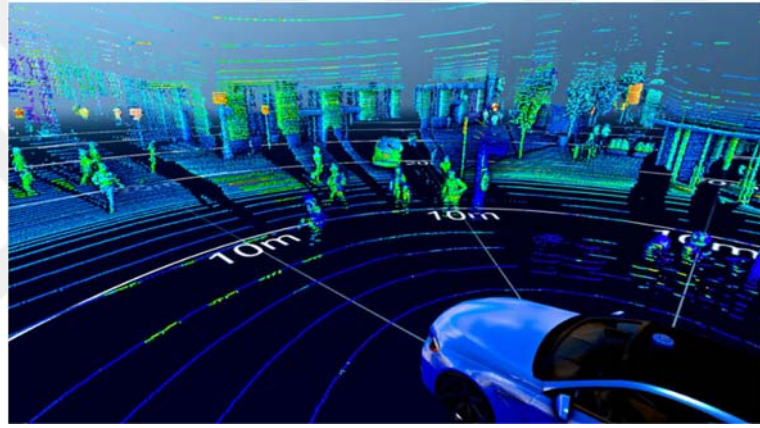


Şekil 1.1 Katarakt ameliyatlarında kullanılmak üzere ticari olarak satılan bir lazer cerrahisi ürünü.

Lazerlerin 21. yüzyılın ikinci on yılından itibaren kullanılmaya başlandığı bir alan ise askeri ve sivil olmak üzere görüntüleme sistemleridir. Lazerler LIDAR (light detection and ranging) sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. LIDAR sistemleri ise 3-boyutlu yüzey haritalandırmasında ve otonom araçlarda çevre kontrolünde kullanılmaktadırlar (Bergen, 2009), (Fallahi, 2006), (Strobel, 2010). 1-200m arası otonom uygulamalara yönelik 3D- LIDAR sistemlerinde nano saniye mertebesinde darbelerle sahip bir ışına ihtiyaç vardır (M.Herper, 2019). Bu nedenle LIDAR sistemleri için VECSEL'ler uygun lazer yapılarıdır. Bu kapsamda 1030 nm dalgaboyuna sahip tek modlu (single mod) VECSEL kullanılarak LIDAR uygulaması literatürde gösterilmiştir (Nürnberg, 2019).



Şekil 1.2 AMS firması tarafından dikey ışımlı lazer kullanılarak üretilmiş LIDAR sistemlerinin uygulanmasına ait simülasyon.



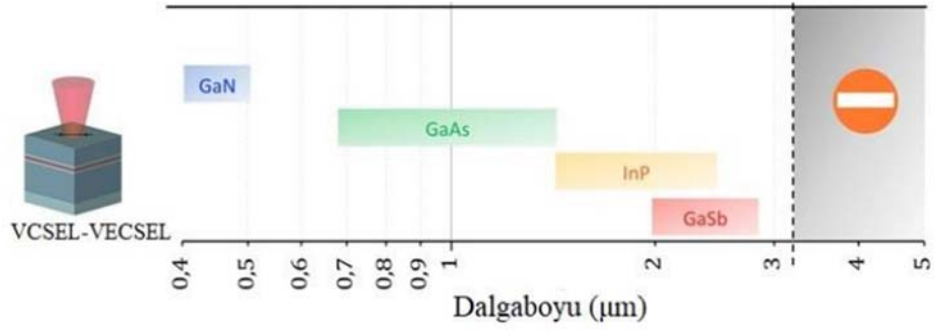
Şekil 1.3 LIDAR sistemleri kullanılarak mesafe kontrollü güvenlik sistemi uygulanmasına ait simülasyon.

Bunların yanı sıra spektroskopi ve askeri bölgelerde tehlikeli gaz taramalarında lazer tabanlı sistemler kullanılmaya başlanmıştır. Çünkü NH_3 (Amonyak), CH_4 (Methan) ve SO_2 (Sülfür Dioksit) gibi birçok gazın soğurma spektrumu lazer ışınımları ile belirlenebilmektedir. Benzer olarak atomik ve moleküler araştırmalarda etalon gazının 1030 nm dalgaboyuna sahip VECSEL (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser) kullanılarak tespiti gösterilmiştir (Nürnberg, 2019). Bilimsel uygulamalarla beraber sanayide ise lazer kesim makinalarında lazerler yoğun şekilde kullanılmaktadırlar.



Şekil 1.4 Ermaksan firması tarafından üretilen metal lazer kesim makinesi.

Bu kadar yoğun şekilde kullanılan lazer yapılarının arasında ise yüzey ışıklı lazerler geleneksel kenar ışıklı lazerlere göre avantajları ile ilgi odağı olmuştur. Yüzey ışıklı lazer ilk olarak 1979 yılında K.Iga tarafından yapılmıştır (Iga,1987). VCSEL-Düşey Kovuklu Yüzey Işıklı Lazer olarak isimlendirilen bu lazerlerde pompalama işlemi elektriksel etki ile yapılmaktadır. Kenar ışıklı geleneksel lazerlere nispeten birçok avantajları olan VCSEL yapısı, fiber optik ağlarda, optik bağlantılarda kullanılmaktadır. Fakat VCSEL lazerlerin çıkış gücü, küçük aktif bölge yapılarından dolayı düşüktür. Bu durum bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bu dezavantajı aşabilmek adına yapılan çalışmalarla, optik pompalı düşey kovuklu yüzey ışıklı lazerler (VECSEL) araştırılmaya başlanmıştır, 1997 yılında Kuznetsov tarafından çalışılmıştır (Kuznetsov, 1997). VECSEL - Vertical External Cavity Surface Emitting Laser veya optik pompalı-VCSEL olarak bilinir. Bu lazer yapılarında daha geniş bir ışınma yüzeyi olduğundan düşük güç problemi ortadan kaldırılmıştır. Bunun dışında elektriksel pompalı lazerlerde karşılaşılan pek çok dezavantaj da VECSEL'lerle ortadan kaldırılmıştır. Böylece VECSEL'lerin kullanımı tüm dünyada yaygınlaşmıştır. Hem VCSEL hem de VECSEL'ler elektromanyetik spektrumda Ultraviyole (UV) bölgeden orta kızılötesi (MWI – Middle Wavelength Infrared) bölgeye kadar olan aralıkta başarı ile çalışılmıştır (Kaneda, 2008; Rahim, 2008). Şekil 1.5'te VCSEL ya da VECSEL yapılarında kullanılan yarı iletken materyallere göre elektromanyetik spektrumda çalışma bölgeleri verilmiştir



Şekil 1.5 VCSEL ya da VECSEL yapılarının, kullanılan yarı iletkene göre çalışma bölgeleri.

Yüzey ışıklı lazerler günümüzde LIDAR, RADAR, Telekom sistemleri ile hem haberleşme hem de askeri alanlarda (Strobel, 2010), (Bergen, 2009), (Fallahi, 2006), ameliyat, hastalık teşhisi gibi konularda sağlık sektöründe (Perez, 2010), CO₂, CH₄, CO, HF, H₂O ve NH₃ gibi gazların algılama ve tespitinde (L. Cerutti, 2005) sıklıkla kullanılmaktadır.

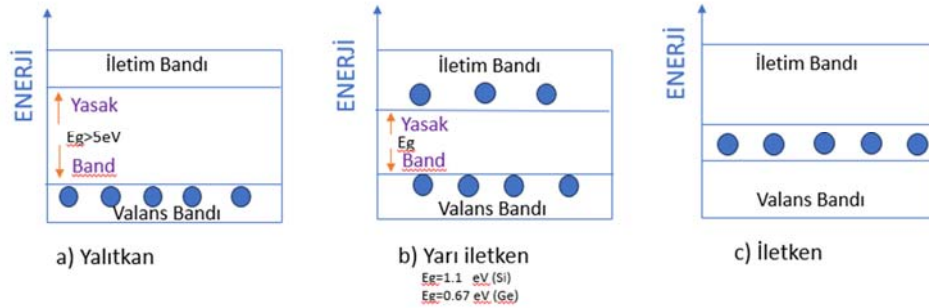
2. YARI İLETKENLER

20. yüzyılın sonlarına doğru başlayan yarı iletken teknolojisindeki gelişmeler günümüze kadar hızla devam etmektedir. İlk olarak 1947 yılında transistörün ticari olarak üretilip, piyasaya sunumunun ardından yarı iletken teknolojisi hızla gelişmiştir. Çünkü temel yarı iletken yapılarından biri olan transistörün ticarileşmesi devrim niteliğinde bir gelişme olmuş, günlük hayatta kullanılan elektronik sistemlerin hemen hepsinde kullanılır hale gelmiştir. Bu yapıların mekanik aksamalarının olmaması, küçük yapılı ve uzun ömürlü olmaları, bakım gerektirmemeleri ve mekanik aksamalarının olmamasından dolayı çalışma hızlarının yüksek olması bu teknolojinin hızla gelişmesinde öncül sebepler olmuştur ve yarı iletken teknolojisi farklı yapılarda hızla gelişmiştir. Bilgisayar donanımlarından, optik depolama aygıtlarına, görünür ışık, morötesi, kızılötesi gibi geniş bir elektromanyetik bölgede çalışan çevre aydınlatmasından ekran aydınlatmasına kadar pek çok alanda kullanılan yarı iletken tabanlı LED'lere, yine geniş bir elektromanyetik spektrumda çalışma alanı bulan LAZER'lere kadar pek çok farklı şekilde yarı iletken teknoloji kullanılmaktadır.

Yarı iletkenler iletkenlikleri, yalıtkanlarla (seramik vb.) iletkenler (metal vb.) arasında, kontrol edilebilen malzemelerdir. Yarı iletken malzemeler galyum arsenik (GaAs) gibi bileşikler ya da silisyum (Si), germanyum (Ge) gibi elementlerdir. Germanyum en eski kullanılan yarı iletkenidir ve valans bandında 4 elektron bulunmaktadır (Url-1). Yarı iletkenlerde iletkenliği elektron ve deşik (holl) denilen taşıyıcılar sağlamaktadır. Elektronlar negatif yüklü iken, deşikler pozitif yüklüdürler. Yarı iletkenlerin ilettime geçmeleri enerji bant teorisi ile açıklanır. Bant yapıları ise pek çok atomun bir araya gelmesi ile oluşur. Tek bir atomun elektronları atomun orbitallerini doldurur. Her bir orbital bir enerji seviyesi olarak düşünülebilir. Pek çok atomun bir araya gelerek molekülleri oluşturması ile her biri ayrı enerji seviyesine sahip moleküler orbitaller oluşur. Atom sayısı arttıkça moleküler orbitaller de genişler ve enerji seviyeleri yoğunlaşarak bant yapılarını oluşturur. Oluşan moleküler yapılardaki enerji seviyelerinin yani enerji bantlarının arasındaki fark bu malzemelerin iletkenlik, yalıtkanlık ya da yarı iletkenlik durumlarını oluşturur.

Valans bandı elektronların uyarılarak iletim bandına geçirildiği elektron bandına denir. Herhangi bir atomun en dıştaki elektron yörüngesi olarak da düşünülebilir. İletim bandı ise valans bandının üstünde, genellikle boş bulunan banttır. Valans bandındaki elektronlara herhangi bir enerji verildiğinde elektronların çıktıkları ve burada serbest elektron oldukları banttır. Valans bantta elektronlar atoma bağlı iken iletim bandında elektronlar atoma bağlı değildirler. Valans bant ile iletim bandı arasında ise yasak enerji aralığı denilen bir boşluk vardır ki, bu boşluk valans bant ile iletim bandı arasındaki enerji farkı kadardır. Yasak enerji aralığı ($E_g = \text{Energy Bandgap}$) olarak bilinir. Valans bandındaki bir elektron bu aralıktan atlayarak iletim bandına geçer ve bu geçiş esnasında en az E_g kadar bir enerjiye ihtiyaç duyar.

Yalıtkanlarda valans ve iletim bantları arasındaki yasak enerji aralığı geniştir ($E_g > 5\text{eV}$). Bu nedenle valans banttaki bir elektron iletim bandına geçip iletkenliğe katkı sağlayamaz. İletkenlerde ise valans bant ile iletim bandı iç içe geçmiş durumdadır ve son banttaki tüm elektronlar ilettime katılır. Yarı iletken metaryallerde ise yasak enerji aralığı düşük olup (Si için $E_g = 1.1\text{eV}$, Ge için $E_g = 0,67\text{eV}$), sıcaklık, optiksel veya elektriksel etkilerle valans banttaki elektronlar iletim bandına geçerek ilettime katılırlar. Yalıtkan, yarı iletken ve iletkenlere ait bant yapılarının gösterimi Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 a) Yalıtkan, b) Yarı iletken, c) İletken materyallerin enerji bant yapıları.

3. LAZERLER

Yarı iletken lazerler temel olarak bantlar arası (interband) ve bant içi (intraband) geçiş yapan lazerler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Bantlar arası geçiş yapan lazer türlerini de kenar ışıklı ve yüzey ışıklı olmak üzere iki kısımda incelemek mümkündür. Düşey dış kovuklu yüzey ışıklı lazerler (Vertical External Cavity Surface Emitting Laser-VECSEL) bantlar arası geçiş yapan lazer grubundadır ve kenar ışıklı bantlar arası geçiş yapan lazer diyotlar (laser diode-LD) ve “interband cascade laser (ICL)” lara göre birtakım avantajları vardır:

- Yüksek Verim
- Dairesel ışın
- Alltaşı üzerinde test
- Kolay Paketleme

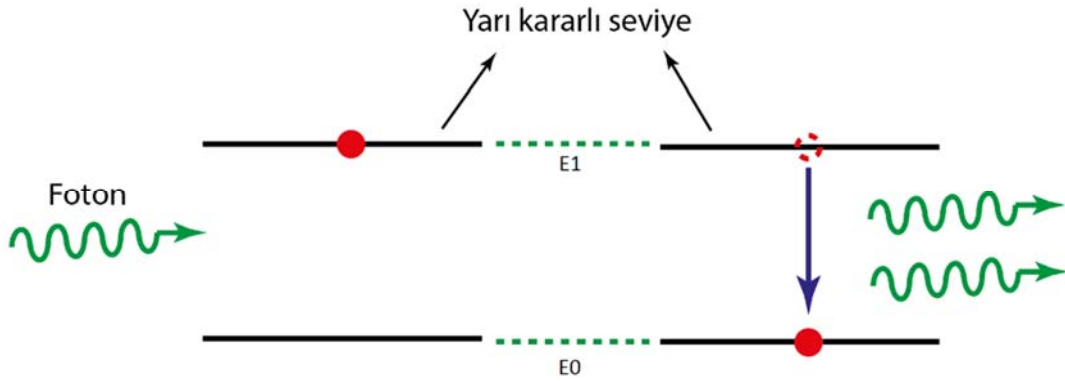
İlk VECSEL 1997 yılında Kuznetsov tarafından gösterilmiştir. Özellikle dairesel ışın kalitesinin lazer diyot, QCL ve diğer lazer (katıhal lazer ve fiber lazer) türlerine göre daha iyi olması VECSEL’leri endüstriyel kullanımlarında daha cazip hale getirmektedir (De, 2014).

Literatürde VECSEL’lerin gösterimi günümüze kadar görünür bölge, yakın kızılötesi, orta kızılötesi bölgede mevcuttur. Görünür bölgede sürekli dalga modunda 20 W sarı renkte güç değerine ulaşmıştır (Kantola, 2014). Ancak bu bölgede henüz tek-modlu lazer ışınması henüz elde edilememiştir. İlk VECSEL çalışmalarının yapıldığı alan yakın kızılötesi bölge olmuştur ve bununla birlikte sıra dışı açıcı performanslar VECSEL’ler için yakın kızılötesi bölgede elde edilmiştir. GaAs/AlAs DBR ve InGaAs/GaAsP gerilim giderici kuantum kuyu tasarımı ile sürekli dalga lazer ışınmasında 1 µm dalga boyunda 100 W çıkış güçleri elde edilmiştir (Wang, 2012). Bununla beraber tek modlu lazer ışınması birçok grup için elde edilmiştir. 10 kW pik gücü yine GaAs tabanlı VECSEL’lerden elde edilmiştir. Bunun yanı sıra yüksek tekrarlama oranı olarak 10 GHz seviyeleri yakın kızılötesi bölgede pasif mod kilitleme yöntemi ile elde edilmiştir. Bu çalışmalara ek olarak literatürde tek modlu VECSEL’lerden 100 fs darbe genişliğinden daha küçük lazer ışınmaları gösterilmiştir (Waldburger, 2016). Orta kızılötesi bölge de ise görünür bölgeye benzer bir durum mevcuttur. Telekom dalgaboylarında (1,31 ve 1,55 µm) sürekli dalga ışınmasında

maksimum 4,8 W güce ulaşılabilmiştir. Bunun nedeni bu dalgalarda AlInAs/InGaAs DBR kullanılması ve bu materyallerin termal iletkenliklerinin düşük olması sebebiyle termal ısının yapıdan uzaklaştırılamamasıdır (Mereuta, 2019). Sürekli dalganın yanı sıra tek modlu lazer ışımalarında da henüz kaydedilebilir bir gelişim elde edilememiştir. Telekom dalgalının ötesinde GaSb tabanlı yarı iletkenler kullanılarak 2 μm dalgalı boyunda sürekli ve tek modlu lazer ışımaları gösterilmiştir (Heidrich, 2022). Ancak, henüz GaAs tabanlı VECSEL'ler ile karşılaştırılabilir seviyede sonuçlar edilememiştir. Bunun nedeni VECSEL kalınlığının dalgalı boyu ile orantılı olmasına bağlı olarak $>2 \mu\text{m}$ dalgalı boylarında VECSEL üretiminin zorlaşmasıdır. Çünkü bu dalgalı boylarında da yine ısıl problemler meydana çıkmaktadır.

3.1 Lazer Çalışma Prensipleri

LASER kelime açılımından da anlaşılacağı üzere uyarılmış ışık emisyonu ile ışığın güçlendirilmesi, yükseltilmesidir. Albert Einstein 1917'de uyarılmış ışımının varlığını öne sürmüştür. Buna göre atom ışık, elektrik veya farklı bir şekilde uyarıldığında yani enerji verildiğinde atomun elektronları uyarılmış olur. Böylece düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine geçerler. Ama uyarılmış elektronlar bu yüksek enerji seviyesinde sürekli kalmazlar. Yüksek enerji seviyesindeki bu elektronların düşük enerji seviyesine geçişlerinde bu enerji seviyelerinin arasındaki fark kadar bir enerjiyi foton olarak dışarıya salar. Salınan bu foton enerjisi ile başka bir elektronu uyararak uyarılmış ışımaya katkı sağlar ve böylece başka bir foton daha açığa çıkar. Bu şekilde çok fazla sayıda foton oluşumu sağlanır.



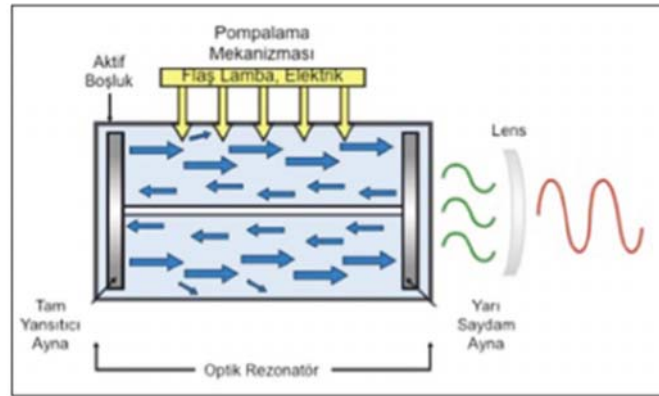
Şekil 3.1 Uyarılmış ışımaya prensibi (Url-2).

Lazer yapılarında önemli olan uyarılmış ışığa ile elde edilen aynı fazlı fotonların sayısını artırmaktır. Bunun içinde kullanılması şart olan 4 mekanizma vardır.

1. Aktif alan
2. Pompalama mekanizması
3. %100 Yansıtıcı ayna
4. %99,9 Yansıtıcı ayna

Aktif alan, dış etki ile elektronlarının daha yüksek bir enerji seviyesine uyarılabileceği atomlardan oluşan yapıdır. Bu alan gaz (CO₂ gibi), katı kristal (yakut gibi) ya da bizim çalışmamızda kullandığımız gibi yarı iletken bir malzeme olabilir.

Pompa mekanizması ise aktif bölgeye elektronların uyarılması için enerji sağlayan kısımdır. Biz çalışmamızda bu amaçla pompa lazer kullandık. %100 ve %99,9 yansıtıcılıktaki aynalar ise, yansımalarla ışık sayısını artırmayı amaçlamaktadır. Bu iki ayna arasında oluşan çok sayıda fotondan çok çok azı %99,9 yansıtıcılıktaki aynadan çıkış yapar. Böylece monokromatik, koharent, tek yönlü, küçük çaplı fakat yüksek enerjili ışınlar elde edilmiş olur (Kasnak, 2016). Bu bileşenlerin tamamı Şekil 3.2’de gösterildiği gibi lazer yapısının içinde bulunan aktif boşluğun içerisinde.



Şekil 3.2 Lazerin genel bileşenleri, çalışma prensibi (Kasnak, 2016).

3.2 Yarı İletken Lazerler

Yarı iletken lazerler, yarı iletken malzemelerden oluşan ve ışık üreten cihazlardır. Işık üretimi, enerji seviyeleri arasında elektronları geçiş yapmaya zorlayarak ortaya çıkar.

3.2.1 Interband lazerler

Yarı iletken malzemelerin elektronlarının enerji seviyeleri arasındaki geçişlerden kaynaklanan ışık emisyonuyla çalışan lazerlerdir. Interband lazerlerde, elektronlar valans bandından iletim bandına atlayarak ışık üretir. Bu atlamalar, yarı iletken malzemenin doğru bir şekilde tasarlanmasıyla gerçekleştirilir. Interband lazerler, yüksek verimlilik, düşük eşik akımı ve yüksek optik güç çıkışı gibi avantajlara sahiptir.

3.2.2 Intraband lazerler

Yarı iletken malzemelerdeki elektronların aynı enerji seviyesi içindeki geçişlerden kaynaklanan ışık emisyonuyla çalışan lazerlerdir. Bu lazerlerde, elektronlar aynı enerji seviyesindeki farklı durumlar arasında geçiş yaparak ışık üretir. Intraband lazerler, farklı yarı iletken malzemelerin kullanılmasıyla elde edilebilir. Bu malzemeler, genellikle kuantum noktaları, kuantum iplikleri veya kuantum telciklerinden oluşur. Bu yapılar, elektronların enerji seviyelerinin kısıtlanması ve belirli enerji seviyelerinde kalması için tasarlanır. Intraband lazerlerin bazı avantajları vardır. Örneğin, enerji tüketimi düşüktür ve yüksek verimlilikle çalışabilirler. Ayrıca, geniş bir dalga boyu aralığında ışık üretebilme yetenekleri vardır, bu da çeşitli uygulamalara olanak sağlar. Intraband lazerler elektronların enerji seviyeleri arasındaki geçişlerin kontrol edilmesiyle çalışan önemli bir lazer teknolojisidir.

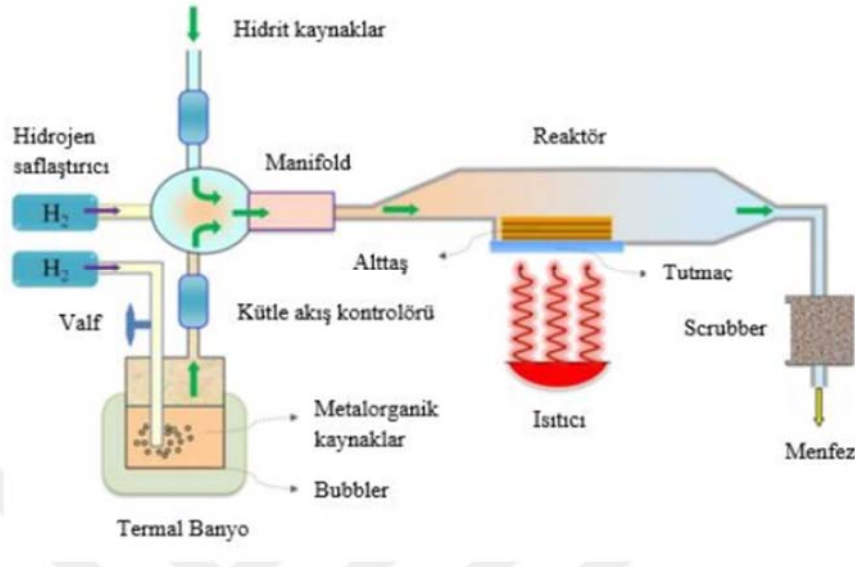
4. GEREÇ VE YÖNTEM

4.1 MOCVD ile Kristal Büyütme

Günümüz teknolojisinde kullanılan yarı iletken aygıtların pek çoğu ince alıtışların üzerine yine aynı veya farklı ince tabakalar kaplanarak oluşturulur. Bu tabakalar alıtış yarı iletken malzemesinin kristal yapısını bozmadan oluşturuluyorsa bu büyütme epitaksiyel büyütme denir. Epitaksiyel büyütmede büyüme alıtış üzerinde gerçekleşir.

Gaz fazdaki reaktifler taşıyıcı gaz ile alıtış üzerine taşınır. Alıtış yüzeyine gelen moleküller temas ettikleri yüzeyin çekme kuvveti ile alıtışın yüzeyine yapışır ve birleşme gerçekleşmiş olur. Alıtış yüzeyinde birleşen moleküller artık büyümeyi başlatmış olur (Altun, 2018).

Lazerlerin de içinde bulunduğu günümüz teknolojisinde yarı iletken malzemelerin büyütülmesinde kullanılan yöntemlerden bir tanesi de MOCVD'dir. MOCVD – Metalorganik kimyasal buhar biriktirme anlamı taşıyan bir büyütme tekniğidir.



Şekil 4.1 MOCVD büyütme şeması (Altun, 2018).

MOCVD ile büyütmede ilk olarak reaktör içerisine hidritler ve metalorganikler belirli miktarlarda alınır. Reaktörün içinde aynı zamanda radyo frekans altında ve yüksek

değerli sıcaklığın altında bir tutucu ve bu tutucunun üzerinde de alttaş bulunmaktadır. Alttaşın yüksek sıcaklık altında bulunması önemli noktalardan biridir.

Bu etkilerle gaz fazda bulunan bileşikler katı yüzeydeki bileşiklerle tepkimeye girer ve epitaksiyel büyüme gerçekleşmiş olur (Altun, 2018).

4.2 PL-Fotoluminesans Ölçüm Sistemi

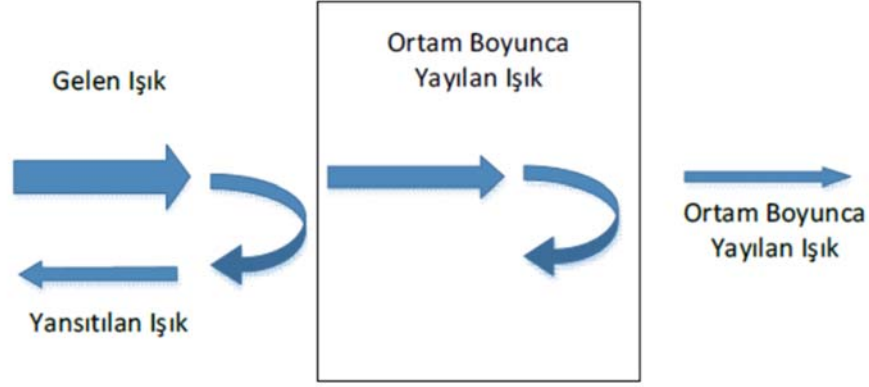
Yarı iletken aygıtların pek çoğunun çalışma prensibi kullanılan malzemenin enerji bant aralıklarına bağlıdır. Bu nedenle yarı iletken malzemenin enerji bant aralığının belirlenmesi önemlidir. Malzemeye zarar vermeden kullanılan en yaygın yöntemlerden biri fotoluminesans (PL) spektroskopisidir. Bu ölçüm yönteminde malzemeden salınan ışığın ölçülmesiyle optik ve elektronik yapılar hakkında bilgi edinilir. Malzemeye fiziksel temas olmadığından tahribatsızdır.

PL spektroskopisinde, yarı iletken malzemenin enerji bant aralığından daha büyük bir enerjiye sahip ışığın malzeme üzerine gönderilmesi ile malzemenin ışığı soğurup enerji kazanması sağlanır. Malzemenin kazandığı bu enerjiyi geri vermesine fotoluminesans denir.

Yarı iletkenlerde en sık geçiş iletim bandı ile değerlik bandı arasında olur. Bu geçişlerde alınan fotoluminesans piki çok keskindir. Yani keskin fotoluminesans pikinin görüldüğü kısım yarı iletken materyalin enerji bant aralığı (E_g)'dır.

4.3 Spektrofotometre Ölçüm Sistemi

Spektrofotometrik ölçüm, elektromanyetik spektrumun belli bir bölgesinde ışığın özelliklerini analiz ederek yarı iletken materyalin optik özelliklerini belirler. Yarı iletken ile ışığın etkileşimi optoelektronik ve fotonik aygıtlar için çok önemlidir (Marius, 2006). Bir yarı iletken üzerine ışık gönderildiğinde yansıma, geçirgenlik ve soğurma gerçekleşir. Bu durum ışığın enerjisine başka bir deyişle dalga boyuna bağlıdır.



Şekil 4.2 Işığın yansımaya, geçirgenlik soğurma olayları

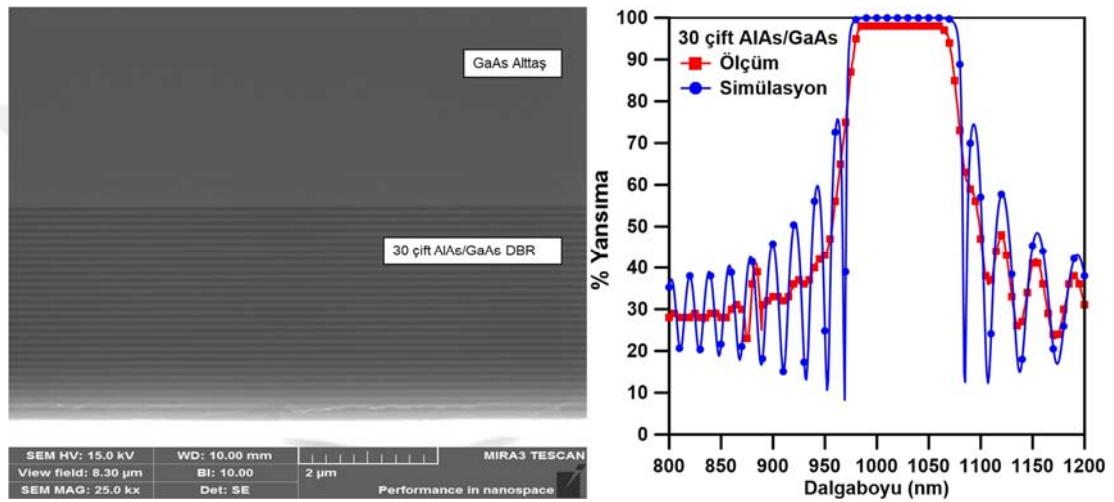
Yarı iletken bir materyal yüzeyindeki yansımaya R (reflectance) ile geçirgenlik T (transmittance) ile belirlenir. Yüzeyde soğurma veya saçılma yoksa yansımaya ve geçirgenliğin toplamı 1 olmalıdır. (Alaydin, B.O., 2019) çalışmasında DBR yapılarına ait örnek spektroskopik ölçümleri incelenebilir.

4.4 VECSEL Üretimi

Dairesel ışın geometrisi ile watt düzeyinde optik güçlerin elde edilmesi için yarı iletken lazerler ile ilgili sorunların minimize edilmesi sebebiyle VECSEL'ler ortaya çıkmıştır. VECSEL yarı iletken alttaş üzerine epitaksiyel yöntemlerle (Alaydin, 2018) büyütülen temel iki kısımdan; ayna ve kazanç bölgesinden oluşmaktadır. VECSEL çiplerinin ayna kısmı Şekil 4.3'de gösterildiği üzere Dağınımlı Bragg Yansıtıcısıdır (Distributed Bragg Reflector-DBR) (Alaydin, 2019). DBR çeyrek dalga boyu ($\lambda/4n$) kalınlıkta yüksek ve düşük kırılma indisli farklı materyallerin çoklu olarak üst üste büyütülmesi ile elde edilen yüksek yansıtıcılığa sahip aynadır. Çeyrek dalga boyuna sahip materyallerin üst üste büyütülmesi ile her bir ara yüzeyde yapıcı girişim oluşur ve DBR yüzeyinden elde edilen toplam yansımaya her bir ayna çiftine (bir düşük ve bir yüksek kırılma indisli katman bir çift olarak tanımlanmaktadır) bağlı olarak artar (Alaydin, 2019).

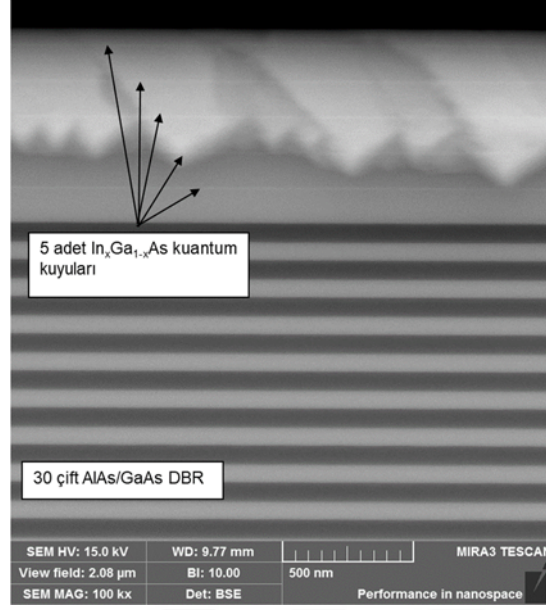
Bu çalışmada kullanılan yarı iletken çiplerde kırılma indisi farkının ($\Delta n = \sim 0,6$) ve ısı iletkenliklerinin yüksek olması nedeni ile AlAs (60 W/m.K) ve GaAs (35 W/m.K) yarı iletkenlerinden oluşan DBR yapısı tercih edilmiştir. Böylece maksimum yansımaya

minimum DBR çift sayısı ile elde edilmiş ve lazer ışınımı sırasında ortaya çıkacak ısı daha hızlı ve etkili şekilde yapıdan uzaklaştırılmıştır. DBR'den elde edilen yansımadağının %99,9'dan büyük olması istenilmektedir. Böylece lazer uygulamaların da aktif bölgede kayıp daha düşük olacak ve lazerden elde edilecek güç ve verim artacaktır. Şekil 4.4'de GaAs üzerine MOCVD ile büyütülmüş 5 adet InGaAs/GaAs kuantum kuyusu ve 30 çift AlAs/GaAs DBR'den oluşmuş bir VECSEL'in taramalı elektron mikroskobu görüntüsü verilmiştir. Bu çalışmada >%99,9 değerinde yansımada elde edildiği gösterilmiştir (Alaydin, 2018).



Şekil 4.3 MOCVD yöntemi ile GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 30 çift AlAs/GaAs DBR'nin taramalı elektron mikroskobu görüntüsü (sol), teorik simülasyonu ve yansımada ölçümü (sağ).

VECSEL'lerin kazanç bölgesi $\lambda/2n$ kalınlığa sahip aktif bölgeleri oluşturan kuantum kuyuları ve bariyerlerinden oluşmaktadır. Bu çalışmada hedeflenen dalgaboyu için literatürde kullanılan malzeme $In_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyusu ve GaAs kuantum bariyeridir. VECSEL'den maksimum gücün sağlanması amacıyla kuantum kuyusu $\lambda/2n$ kalınlığının tam ortasına gelecek şekilde (elektrik alanın maksimum olduğu bölge) büyütülmektedir. Bunun amacı optik pompalama ile kuantum kuyusunda maksimum soğurmanın sağlanması, kuantum kuyusundan elde edilecek ışınımın artırılması ve ışımada için eşik değerin düşürülmesidir.



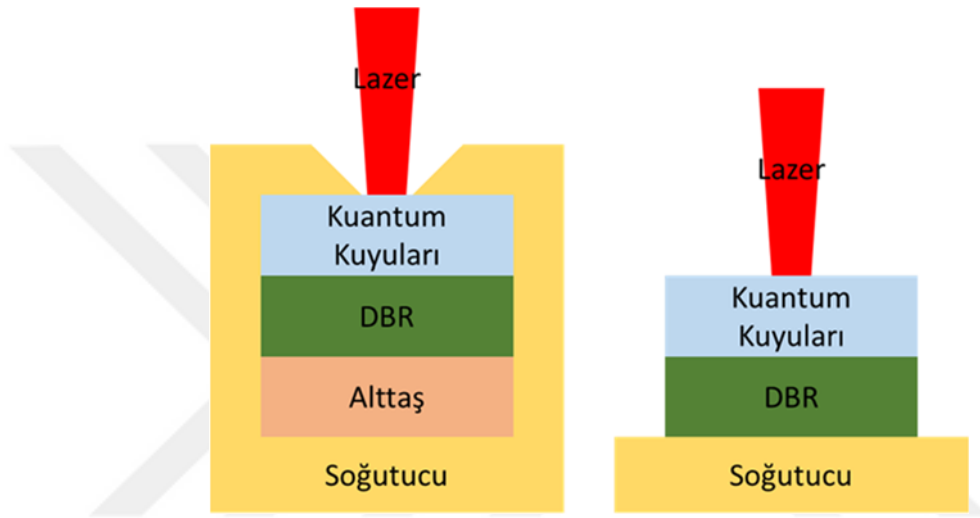
Şekil 4.4 MOCVD yöntemi ile GaAs alttaş üzerine büyütülmüş 5 adet InGaAs/GaAs kuantum kuyusu içeren VECSEL'in taramalı elektron mikroskop görüntüsü.

Şekil 4.3'de gösterildiği üzere büyütme sonrasında yapılan yansıma ölçümünde yansımanın 980 nm civarında dip noktası görülmektedir. Bu dip noktası In_xGa_{1-x}As kuantum kuyularda gerçekleşen soğurma nedeni ile oluşmaktadır. Bunun yanı sıra VECSEL çiplerinin fotoluminesans (PL) ölçümünde 983nm dalgaboyunda ışımaya yaptığı görülmektedir. PL ışımaya ve yansıma dip noktasının aynı dalgaboyunda olduğu görülmektedir ve büyütmenin başarılı olarak gerçekleştiğini göstermektedir.

4.5 VECSEL Fabrikasyonu

VECSEL çiplerinden lazer ışınımı elde edilmesi için fabrikasyonunun yapılması gerekmektedir. Bunun nedeni optik pompalama sırasında soğurma kaynaklı ısının yapıdan uzaklaştırılmasıdır. Aksi takdirde epitaksiyel tabakalarda aşırı ısınma sonucunda kalıcı hasarlar meydana gelecek ve çipler tekrar kullanılamayacaktır. Şekil 4.5'de gösterildiği üzere literatürde VECSEL çiplerinden yüksek performans elde etmek için kavite içi soğutma (intra cavity heat spreading) ya da alttaş çıkarma (substrate removing) metotları kullanılmaktadır. Kavite içi soğutma metodunda VECSEL çipinin ışık çıkaran yüzeyinin üzerine ısı iletkenliği ve optik geçirgenliği yüksek malzemeler yapıştırılır. Bu amaçla silisyum-karbür (SiC) ya da elmas (diamond) malzemelerinden elde edilmiş ısı yayıcı elemanlar alttaş yapıştırma (wafer

bonding) yöntemi ile yapıştırılır. Aygıt inceltme metodunda ise alttaş tamamen ya da kısmi olarak kimyasal aşındırma yöntemi ile çıkarılır (Şekil 4.5, sağ). Alttaşdan soğutmanın etkili şekilde yapılması amacıyla VECSEL çipi ısı iletkenliği yüksek bakır (Cu), silisyum-karbür (SiC) ya da elmas gibi soğutma barlarının (heat spreader) üzerine lehimleme (soldering) yöntemi ile yapıştırılır. Kavite içi soğutmada VECSEL çipi ile soğutucu ara yüzeyinde meydana gelen iç saçılmalar nedeni ile bir miktar güç kaybı olur.



Şekil 4.5 VECSEL fabrikasyonunda kullanılan soğutucu sistemler: Yüzey soğutmalı (sol) ve alttaş çıkarma işlemleri uygulanmış (sağ) VECSEL çiplerinin gösterimi.

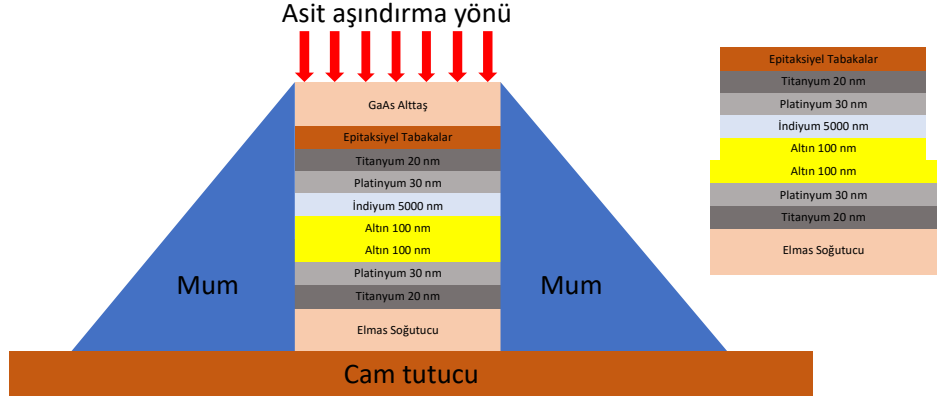
Metalik kaplama epitaksiyel katmanların elmas soğutucunun üzerine aktarılmasında gereklidir. Aynı zamanda bu iki kısım arasında termal iletkenliği sağlar. Bu amaçla VECSEL çipleri ve elmas soğutucu üzerine Şekil 4.6'da verildiği gibi metal kaplama işlemi gerçekleştirilecektir.

	Altın 100 nm
	İndiyum 5000 nm
Altın 100 nm	Platinyum 30 nm
Platinyum 30 nm	Titanyum 20 nm
Titanyum 20 nm	Epitaksiyel Tabakalar
Elmas Soğutucu	GaAs Alttaş

Şekil 4.6 Elmas soğutucu ve VECSEL çiplerinin metalizasyon sırası ve kaplama kalınlıkları.

Metalizasyon sonrası VECSEL çipleri elmas soğutucunun üzerine altın kaplamalar üst üste gelecek şekilde ters olarak ısıtıcı tablanın üzerine yerleştirilir. Bunun ardından lehimlemenin gerçekleşebilmesi için VECSEL çiplerinin üzerine 105 N kuvvet uygulanması için gerekli olan grafit (graphite) basınç dağıtıcı ve ağırlıklar yerleştirilir. Ardından ısıtıcı tabla önce 160 °C olan indiyum erime sıcaklığına kadar ısıtılır. İndiyum metalinin erimesinin ardından sıcaklık kademeli olarak 200 °C'ye kadar ısıtılır ve indiyumun ara yüzeye homojen olarak dağılması ve difüzyonu sağlanır (Waldburger, 2016). Ardından sıcaklık düşürülür.

Alttaş aşındırma işlemi lehimleme işlemi tamamlanmış soğutucu ve çipin cam tutucu lamel üzerine yerleştirilmesi ile başlar. Cam tutucu ısıtıcı üzerine yerleştirilir ve GaAs alttaş yüzeyine kadar eriyik mumla kaplanır. Mum kaplamanın amacı asit solüsyonunun kenarlardan aşındırma yapma işlemini engellemektir. Mum kaplama işleminin ardından çipler AlAs ile GaAs arasında seçiciliği yüksek olan $C_6H_8O_7:H_2O:H_2O_2$ sitrik asit solüsyonuna daldırılır. Sitrik asit karışımı oda sıcaklığında GaAs alttaş aşındırarak eritecek AlAs yüzeyine geldiğinde ise aşındırma işlemi duracaktır. Alttaşın çıkarılmasının ardından aşındırma durdurucu katman $Al_{0,85}Ga_{0,15}As$ ile GaAs arasında seçiciliği yüksek olan 1:50 oranında seyreltilmiş hidroflorik asit ile yüzeyden kaldırılacak ve en üstte VECSEL'in aktif bölgesi kalacaktır. Aşındırma işleminin ardından mum kaplamanın çıkarılması için çipler 3-klorin (three chlorine) solüsyonu ile temizlenecektir. Ardından yüzeyde herhangi bir kirlilik kalmaması için çipler sırası ile aseton (acetone), propanol ve saf su ile temizlenecektir (Gaulke, 2021). Şekil 4.7'de (küçük resim) aşındırma işlemleri sonrasında elde edilmiş olan VECSEL çipi gösterilmiştir.

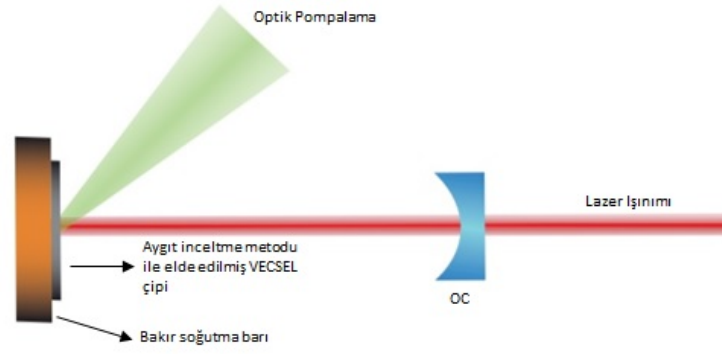


Şekil 4.7 Alttaş çıkarma için mum kaplamanın yapılması ve aşındırma yönünün gösterimi (sol), aşındırma işlemi sonrası elde edilen çip.

VECSEL çiplerinden maksimum verimin elde edilmesindeki en önemli faktörlerden biri de optik pompalamanın soğurulmasıdır. Literatürde $In_xGa_{1-x}As$ kuantum kuyularında meydana gelen soğurmanın artırılması amacıyla VECSEL çiplerinin yüzeyleri yansıma engelleyici (anti-reflection coating-AR) katmanlar ile kaplanarak pompa lazerin yüzeyden yansımaları azaltılıp VECSEL çiplerinin içerisine girmesi hedeflenmiştir (Tilma, 2015).

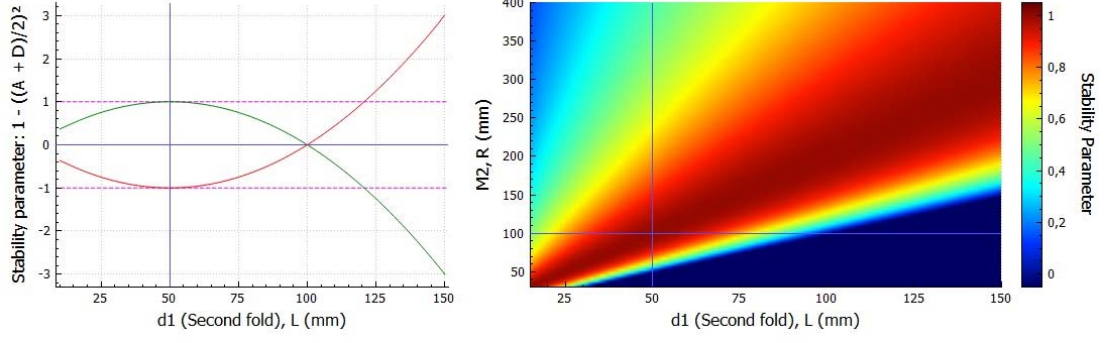
4.6 Lazer Kavite Tasarımı

VECSEL’lerde lazer kavitesinin uzunluğu, çıkış kuplörü (output coupler-OC) ve VECSEL çipi arasındaki mesafe ile tanımlanır. VECSEL’lerde ışımaya OC tarafından elde edilir. VECSEL kavitesi oluşturmak için literatürde düz kavite (straight cavity), V-şekilli (V-shaped cavity) ya da Z-şekilli (Z-zhaped cavity) kavite kullanılır (Guina, 2017).



Şekil 4.8 Aygıt inceltme metodu ile elde edilen VECSEL çiplerinden elde edilmiş düz lazer kavitesi.

Kavite tasarımı kavite uzunluğu, OC geçirgenliği ve farklı OC eğrilik yarıçapları için yapılmıştır. Şekil 4.9’de literatürde sıkça bulunan kavite tasarımına ait kavite stabilite grafikleri gösterilmektedir. Soldaki grafikte gösterildiği üzere 100 mm’lik eğrilik yarıçapına sahip OC kullanıldığında lazer kavitesi denge değerine 50 mm kavite uzunluğunda ulaşmaktadır. Bunun yanı sıra Şekil 4.9’da kavite uzunluğu ile OC’nin eğrilik yarıçapına bağlı olarak elde edilen 2-boyutlu kavite denge haritalandırması gösterilmektedir. 2-boyutlu lazer kavite denge haritalandırmasına göre farklı lazer kavite uzunlukları ve OC eğrilik yarıçaplarına bağlı olarak lazer ışınımının elde edilebileceği görülmektedir. Tez çalışması kapsamında hedeflenen güç değerlerine ulaşılması için farklı kavite uzunlukları denenmiştir. Bunun yanı sıra kavite uzunluğunun değiştirilmesi ile VECSEL çipi üzerindeki ışın genişliği değiştirilmiştir. Işın genişliği artırılması ile VECSEL çipinden elde edilen kazancın artırılması mümkündür. Kazancın artırılması ile elde edilen gücün yükselmesi beklenen bir etkidir.



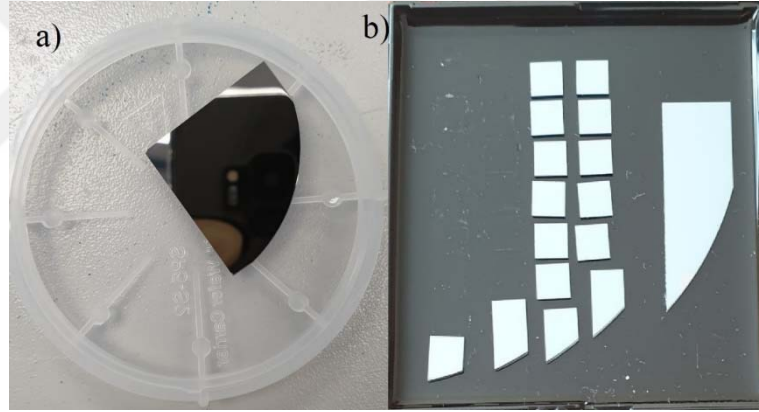
Şekil 4.9 100 mm OC eğrilik yarı çapına sahip lazer kavitesi için kavite uzunluğuna bağlı olarak kavite dengesi (sol) ve kavite uzunluğu ile OC'nin eğrilik yarıçapına bağlı olarak elde edilen 2-boyutlu kavite denge haritalandırması (sağ).

5. UYGULAMALAR VE TARTIŞMA

5.1 VECSEL Çip Fabrikasyonu

İlk amaç; epitaksiyel olarak büyütülmüş VECSEL çiplerinin (alttaşların) fabrikasyonu ve ardından da çiplerin karakterizasyonunu içermektedir. Fabrikasyon adımları temel olarak; alttaşların kesilmesi, metalizasyonu (elmas soğutucu metalizasyonunu da içermektedir), lehimlenme ve aşındırılma aşamalarından oluşmaktadır.

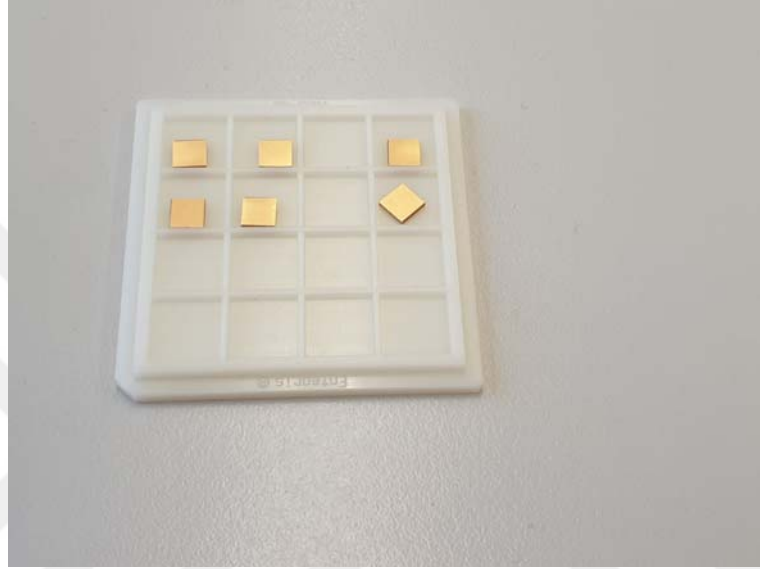
Büyütme işlemi 2 inç GaAs üzerine gerçekleştirilmiştir. Fabrikasyon için çeyrek alttaş boyutunda majör eksene göre elmas kesici ile cetvel kullanılarak kesilmiştir (Şekil 5.1 a). Fabrike edilecek çipler bu çeyrek alttaştan hassas kesim ile $4.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$ boyutlarında olacak şekilde kesilmiştir (Şekil 5.1 b). Kesim işlemi tez çalışmasının gerçekleştiği altyapıda bulunmaması sebebiyle dış merkezde gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.1 2 inç GaAs alttaştan kesilmiş dörtte bir VECSEL çipi a), $4.5 \times 4.5 \text{ mm}^2$ boyutlarında kesilmiş VECSEL çipleri b).

Alttaş metalizasyonu için öncelikle kesilmiş çipler üzerlerindeki tozların ve kirliliklerin gitmesi için izopropanol' la birlikte ultrasonik banyoda yaklaşık 1 dakika temizlenmiştir. Ardından kimyasal atıkların temizlenmesi için saf su ile yıkanarak izopropanol kalıntıları çözdürülmüş ve N_2 ile kurutulmuştur. Alttaşlar temizlenmelerinden sonra metalizasyon için termal buharlaştırıcıya (thermal evaporator) yerleştirilmiştir. GaAs üzerine altının direk yapışmaması nedeni ile sırasıyla titanyum, platinyum ve altın kaplanır. Kaplama kalınlıkları 30/20/100 nm şeklindedir (Şekil 5.2'de kaplama sonrası VECSEL çipleri gösterilmiştir). Titanyum

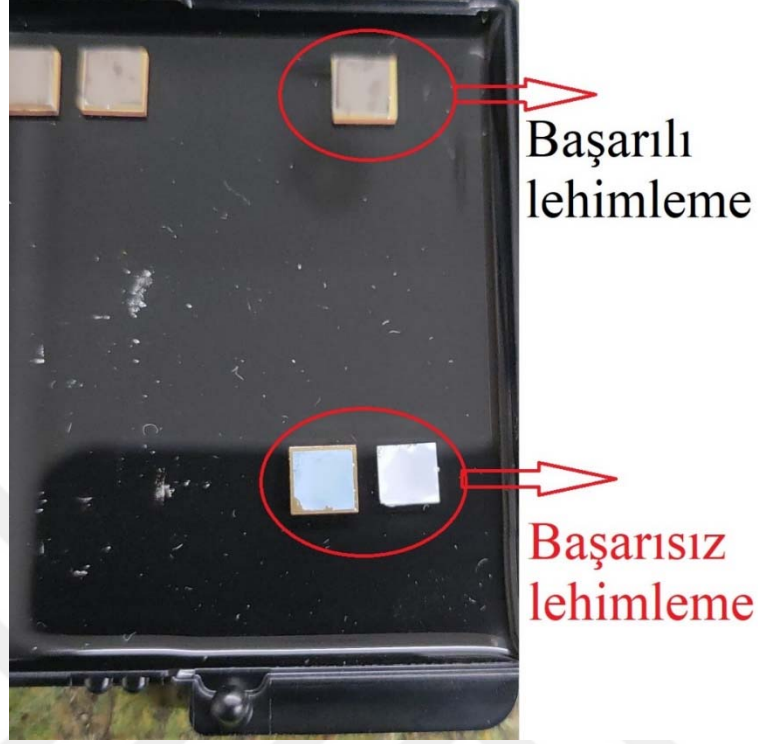
yapışkanlığı sağlarken platinyum altının alt katmanlara difüzyonunu engellemek için kaplanmıştır. Bu kaplamanın ardından elmas soğutucu üzerine metal kaplama yapılmıştır. Kaplama sırasıyla Titanyum, Platinyum, İndiyum ve Altın'dır. Kalınlıklar 30/20/5000/100 nm şeklindedir. İndiyumun kirlilik yaratması sebebiyle kaplama oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Sistem temizlendikten sonra tekrar altın kaplaması gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.2 Metalizasyonu gerçekleştirilmiş VECSEL çipleri.

İndiyum lehimleme altyapı yetersizliği nedeni ile vakum altında değil normal oda sıcaklığında sıcak tabla (hot plate) üzerinde gerçekleştirilmiştir. Öncelikle elmas soğutucu ve VECSEL çipi ısıtıcı tabla üzerinde üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Ardından VECSEL çipinin üzerine homojen ağırlık yayılması ve alttaşın kırılmaması için grafen plaka yerleştirilmiştir. En son alttaş üzerine 100 g ağırlık sabitleyiciyle beraber yerleştirilmiştir. Isıtıcı tabla 200°C'ye kadar ısıtılmıştır. İndiyum 126°C' de erimektedir. Böylelikle indiyum eriyerek basınç altında alttaş ile VECSEL çipini yapıştırmıştır. İndiyumun oksitlenmemesi ve yapıştırma işleminin başarı ile gerçekleşmesi için ısıtıcı tabla sıcaklığı 135°C dereceye kadar hızlı bir şekilde düşürülüp ardından 100°C'ye kadar yavaş bir şekilde soğutulmuştur. Şekil 5.3'te lehimleme işlemi sonrası alttaş ve VECSEL çipi gösterilmektedir. Optimum olmayan lehimleme şartları nedeni ile fabrikasyonu gerçekleştirilen 4 alttaştan 1 tanesi

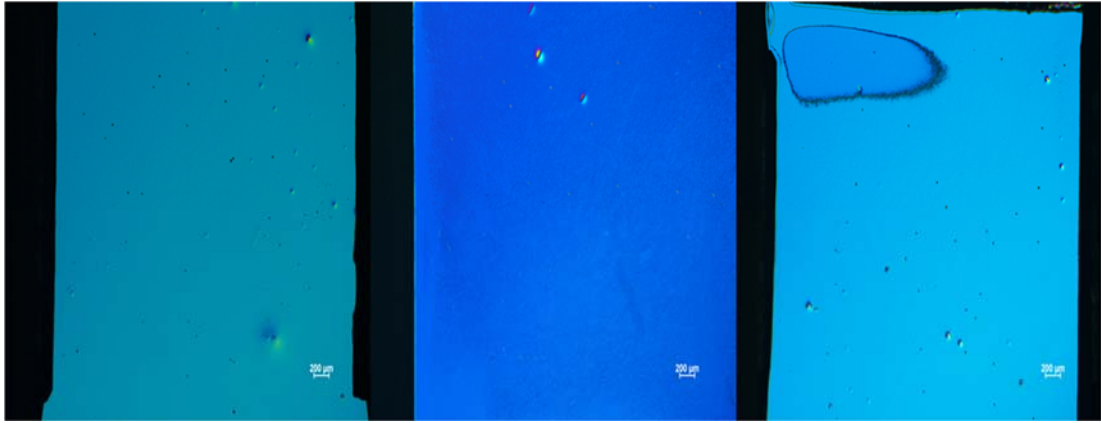
yapışmamıştır. Bunun nedenini lehimleme sırasında basıncın düzgün dağıtılamaması ve indiyumun açık hava basıncında oksitlenmesi olarak görüyoruz.



Şekil 5.3 Lehimleme sonrası VECSEL çiplerinin görünümü.

VECSEL çipleri flip-chip metodu kullanılacak olması sebebiyle ters sıra ile büyütülmüştür (önce kuantum kuyuları ardından dağınımlı Bragg aynası). Flip-chip metodu ile alttaşın çıkarılması durumunda kuantum kuyuları üst yüzeyde kalacaktır. Böylece optik pompalama direk olarak yüzeyden gerçekleştirilecektir. Aşındırma işlemi için literatürde GaAs tabanlı malzemeler için sıkça kullanılan sitrik asit, peroksit ve su karışımı kullanılmıştır. Karışım oranları sırası ile 200 g sitrik asit, 200 ml saf su ve 100 g hidrojen peroksittir. Karışımın ekzotermik reaksiyon olması sebebi ile su sitrik asit karışımı sonrası 30 dk karışımın oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir. Ardından peroksit eklenmiştir. VECSEL çipleri asite batırılmadan önce kenarlarda meydana gelecek aşınmayı önlemek amacıyla kenarlar ağda (wax) ile kaplanmıştır. Bu işlem için metal lehim cihazı ağdayı eritmek ve çiplerin kenarına kaplama yapmak için kullanılmıştır. Cam lamel üzerine yapıştırılan çipler ardından asite batırılmıştır. 12-14 saat arası aşındırma işlemi sonrasında aşındırma durdurucu katmana (AlGaAs) ulaşmıştır. Yüksek seçicilik nedeni ile sitrik asit alüminyum kaplamaları aşındırmamaktadır. Bu katmana ulaşılmasından sonra çip yüzeyleri saf su ile

temizlenmiş ve yüzeyde kalıntı birikmesi engellenmiştir. VECSEL çiplerinin yüzeyine ulaşmak amacı ile aşındırma durdurucu katman GaAs ile AlGaAs arasında yüksek seçiciliğe sahip olan hidroflorik asit kullanılarak aşındırılmıştır. Bu işlemde 1:50 oranında asit su karışımı kullanılmıştır. Yaklaşık 20 s aşındırma sonrasında 200 nm AlGaAs aşındırma durdurucu katman tamamen yüzeyden uzaklaştırılmıştır. Aşındırma sonrası mikroskop ile çekilen çip görüntüleri Şekil 5.4'te verilmiştir. Mikroskop görüntülerine göre ilk iki çip başarılı bir şekilde aşındırılırken üçüncü çipte aşırı aşındırma meydana gelmiştir (sol üst taraftaki eliptik bölge). Bunun nedeni aşındırma durdurucu katmanın sitrik asit ve hidroflorik asitte fazla maruz kalmasıdır. Alttaş aşındırma sırasında asit döndürülmektedir (stirring) ancak çip yüzeylerine aynı dairesel hızda asit çarpmadığı için alttaş aşındırma hızları farklılık göstermektedir. Bu nedenle üç numaralı alttaş daha fazla aşınmıştır.

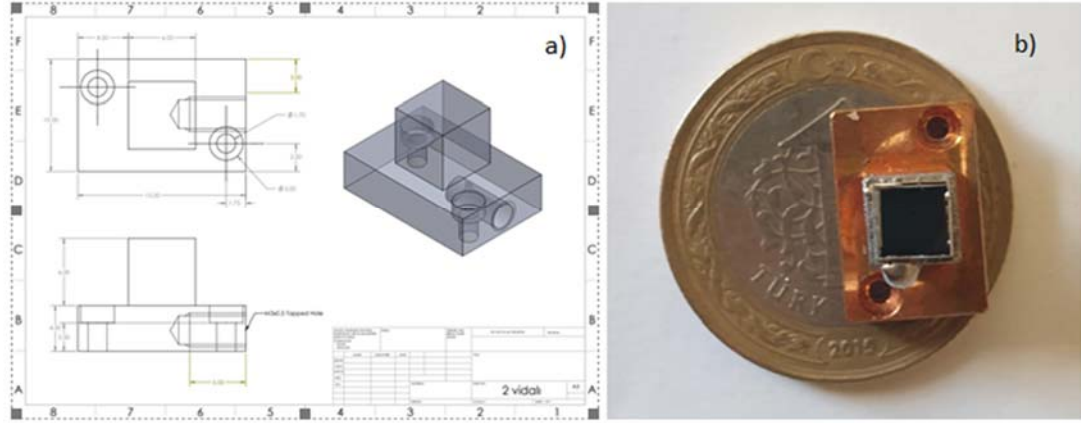


Şekil 5.4 Aşındırma sonrası mikroskop ile alınan yüzey görüntüleri.

Pompa lazerin yüzeyi deforme etmemesi ve yüzeyden geri yansımaması için çip yüzeyleri SiOx ile kaplanmıştır. SiOx'in kırılma indisi hedeflenen lazer ışınım dalgaboyunda 1,5'tir. Bu nedenle ışınım dalgaboyunun dörtte biri kalınlığında yaklaşık olarak 186 nm olarak RF-püskürtme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.

VECSEL çiplerinin fabrikasyon işlemlerinin son aşaması çipleri bakır tutucu üzerine lehimlemektir. Bu amaçla çalışma kapsamında SolidWorks programı kullanılarak T-şekilli tutucu çizimi gerçekleştirilmiştir. Tutucular sanayide üretilmişlerdir. Şekil 5.5'te ölçüleri verilen tutucunun üzerine VECSEL çipleri kurşun lehim kullanılarak ısıtıcı tabla üzerinde lehimlenmiştir. Isıtıcı tabla 120°C'ye kadar ısıtılmıştır. Bu

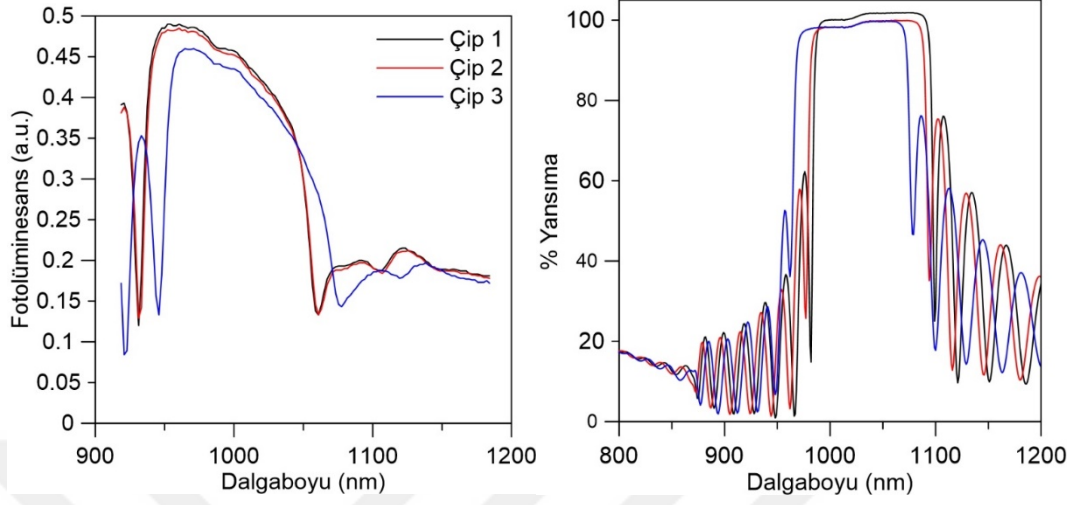
sıcaklıkta kurşun katkılı lehim bakır tutucunun üzerine sürülerek dağıtılmıştır. Ardından VECSEL çipi tutucunun üzerine yerleştirilmiş ve ısıtıcı tabla kapatılmıştır. Bu esnada temiz oda peçetesi ile VECSEL çipinin yüzeyine bastırılmış ve oynamaması sağlanmıştır. Sıcaklığın düşmesiyle beraber lehim donmuş ve işlem bitirilmiştir. Bunun nedeni yapışkanlığın artması ve termal iletkenliğin maksimuma çıkarılmasıdır. Lehimleme işlemi sonrası VECSEL çiplerinin görünümü Şekil 5.5 b)'de verilmiştir.



Şekil 5.5 VECSEL çip tutucu çizimi a), lehimleme sonrası VECSEL çipinin görünümü b).

Lehimle sırasında fazlalık lehim VECSEL çipinin yüzeyine bastırılmasından dolayı yandan çıkmıştır. Şekil 5.5 b)'de çipin alt tarafında damla şeklinde görülmektedir. Bu adımdan sonra sıra fotoluminesans ve spektrofotometre ölçümlerindedir. Şekil 5.6'da VECSEL çiplerine ait fotoluminesans ve yansıma ölçümleri gösterilmektedir. Fotoluminesans ölçümüne göre çiplerin tamamı ışımaya yapmıştır. Tüm çipler 950-1050 nm arasında geniş bir kazanç bölgesine sahiptir. Tez çalışmasının hedef dalgaboyu 1030 nm PL ölçüm aralığındadır ancak PL ışımalarının maksimum değeri daha düşük dalgaboyundadır. Lazer operasyonu sırasında çip sıcaklığının artması dolayısıyla ışımaya dalgaboyunda meydana gelecek olan red-shift nedeni ile PL maksimum değeri daha düşük dalgaboyuna ayarlanmıştır. Aksi takdirde ısınma ile PL dalgaboyu bant genişliğinin dışına kaymakta ve lazer ışınması sönümlenmektedir. Bunun yanı sıra büyütme homojenliğine bağlı olarak alttaşın farklı bölgelerde farklı kalınlıklara sahip olması ve fabrikasyon işlemlerinin etkisi ile 3 numaralı çip daha düşük ışımaya gerçekleştirmiş ve oda sıcaklığında red-shift gözlenmiştir. Bu da beklendiği üzere 3

numaralı çipin altta kenarına daha yakın kısımdan seçilmiş olması sebebiyle kuantum kuyusunun daha ince olmasından kaynaklanmaktadır.



Şekil 5.6 VECSEL çiplerinin fotoluminesans ve yansımaya ölçümü.

Şekil 5.6’da verilen yansımaya ölçümüne göre soğurma tüm çiplerde gözlenmiştir. 1 ve 2 numaralı çip PL ölçümüne benzer olarak eş dalgaboyunda soğurma gerçekleştirirken sadece yansımaya değerleri farklılık göstermiştir. Bu da 1 numaralı çipin daha iyi olduğunu göstermektedir. 3 numaralı çip ise soğurmaya diğer çiplerle eş dalgaboyunda başlarken PL ölçümünden görüldüğü üzere dağınımlı Bragg aynası daha düşük dalgaboyuna kaymıştır. Bu da 3 numaralı çipin daha ince olarak büyütüldüğünü göstermektedir.

5.2 VECSEL Prototipinin Oluşturulması

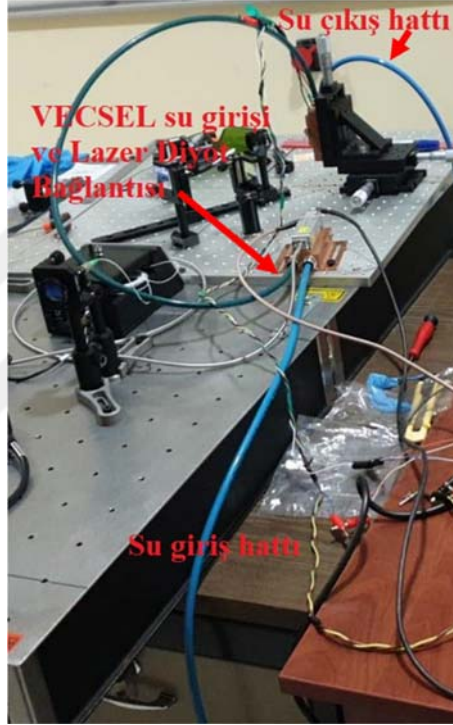
Lazer fabrikasyonunun tamamlanmasının ardından VECSEL prototipinin laboratuvar ortamında oluşturulması işlemlerine geçilmiştir. Bu kapsamda aşağıdaki işlemler sırasıyla tamamlanmıştır.

- I. Su soğutma hattının tamamlanması
- II. Düz lazer kavite tasarımı
- III. VECSEL çipinin montajı
- IV. Hizalama işleminin gerçekleştirilmesi

V. Pompa lazerin kurulumu

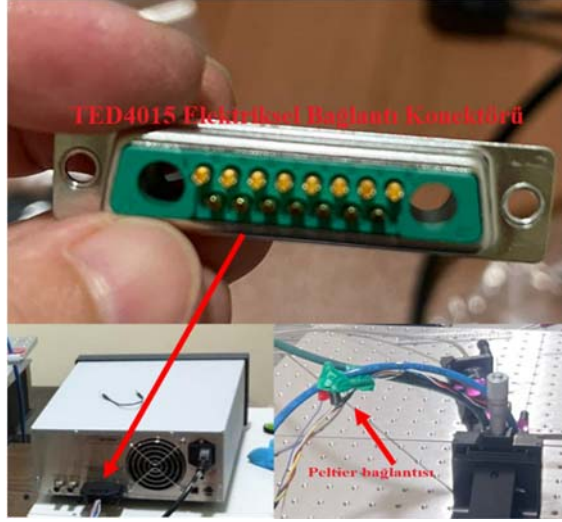
VI. Lazer kavitesinin oluşturulması

Şekil 5.7’de ‘Chiller’den gelen su hattının yolu gösterilmektedir. Soğutulan su öncelikle lazer diyotun altında bulunan bakır soğutucuya girmektedir. Su sıcaklığı burada 2°C olarak ayarlanmıştır. Bakır soğutucudan çıkan su VECSEL çipine girmektedir. Bu noktada VECSEL soğutucu üzerinde peltier ısı kontrol elemanının soğuk yüzeyini soğutarak ‘Chiller’a geri dönmektedir. Lazer diyot ile VECSEL soğutucular seri olarak bağlanmıştır.



Şekil 5.7 Su hattı ve bağlantıları.

Su bağlantı hattının tamamlanmasının ardından soğutma sisteminin elektriksel bağlantıları yapılmıştır. Bunun için öncelikle sıcaklık kontrol ünitesinin elektriksel bağlantısı gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.8).



Şekil 5.8 Sıcaklık kontrol ünitesinin elektriksel bağlantısı.

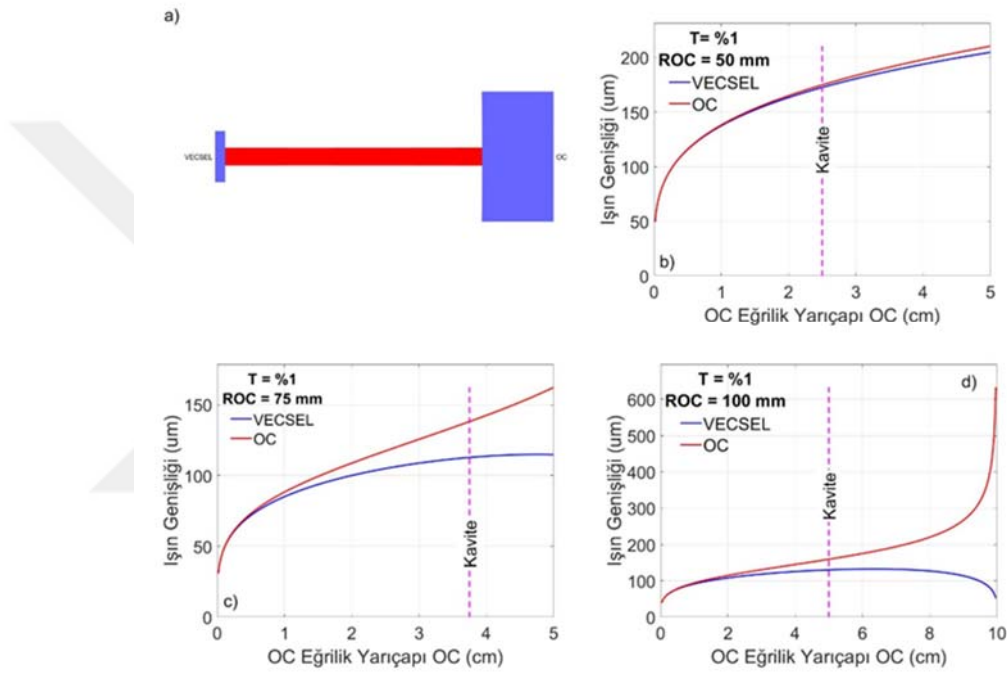
Sıcaklık kontrol ünitesinin peltier ile bağlantısının ardından sıcaklık kontrol elemanı TED4015 çalıştırılmıştır. VECSEL çipinin sıcaklık kontrolü PT1000 sıcaklık sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9’da TED4015 sıcaklık kontrol elemanı kullanılarak VECSEL çipinin sıcaklığının optik pompa altında 12 °C’ye ayarlandığı resim gösterilmektedir.



Şekil 5.9 TED4015 sıcaklık kontrol ünitesi.

TED4015'in çalışması ve sıcaklığın peltier ile kontrolü üzerine bu adım başarı ile tamamlanmış, lazer kavite tasarımına geçilmiştir.

Lazer kavite tasarımında ABCD matris yöntemi kullanılarak yazılan MATLAB kodu kullanılmıştır. Simülasyon'da daha önceki projelerden alımı gerçekleştirilen çıkış kuplörlerinin (Output Coupler - OC) değerleri kullanılmıştır. Geçirgenlikleri %1, eğrilik yarıçapları 50, 75 ve 100 mm olan üç OC'nin yanı sıra geçirgenliği %2 olan 75 mm OC'de kullanılmıştır.

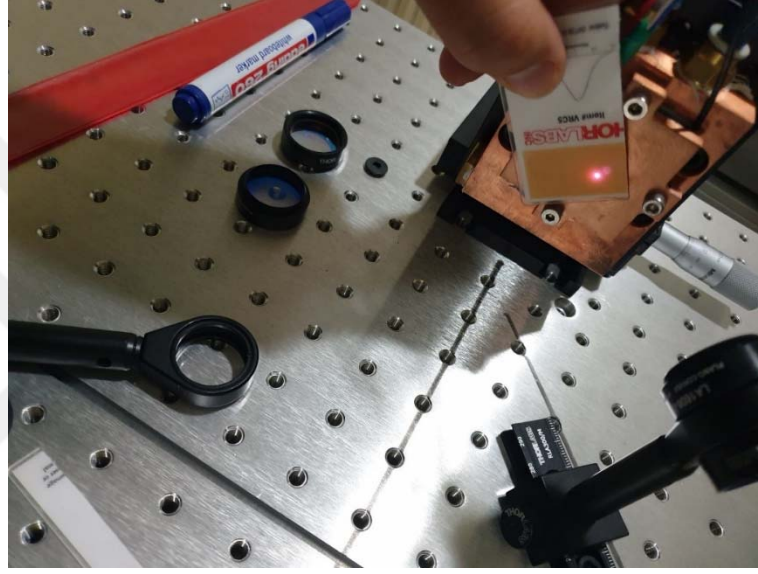


Şekil 5.10 Matlab kullanılarak gerçekleştirilen lazer kavite tasarımları a) Kavitenin görünümü, b) 50 mm, c) 75 mm ve d) 100 mm eğrilik yarıçapları için denge durumundaki kavite için ışın genişliğinin kavite uzunluğu ile değişimi.

Şekil 5.10 a)'da MATLAB ile oluşturulan düz lazer kavitesi gösterilmektedir. Bunun yanı sıra, sırasıyla tüm OC'ler için yapılan simülasyonlarda lazer kavitesinin denge durumundaki kavite için ışın genişliğinin kavite uzunluğuna bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil 5.10 b)'de 50 mm'lik OC için 25 mm kavite uzunluğunda lazerin denge durumunda olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra ışın genişliği eğrilik yarı çapı ve kavite uzunluğuna bağlı olarak hesaplandığında VECSEL çipi üzerinde ışın genişliğinin 175 mm yarıçapa sahip olduğu görülmektedir. 75 mm'lik OC için VECSEL üzerindeki ışın yarıçapı 110 mm (Şekil 5.10 c) ve 100 mm'lik OC için

yaklaşık olarak 110 mm olarak hesaplanmıştır (Şekil 5.10 d). Lazer kavite tasarımlarının gerçekleştirilmesi ile bu adımda başarı ile tamamlanmıştır. Bu adımın ardından VECSEL çipinin montajına geçilmiştir.

Bu adımda öncelikle pompa lazerin yaklaşık konumuna göre üç eksenli öteleme düzlemi (3 axis stage) kullanılarak VECSEL çipinin konumu yaklaşık olarak Şekil 5.11’de verildiği üzere gösterilmiştir.

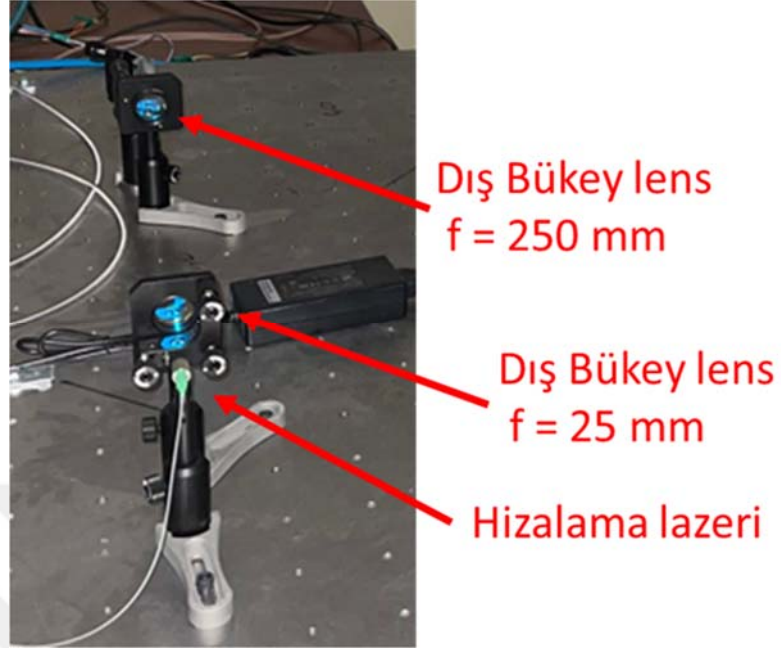


Şekil 5.11 VECSEL çipinin konumunun pompa lazer yardımı ile belirlenmesi.

Görüntüleme işlemi tez çalışmasının ilk dönemlerinde ışın görüntüleyici (beam viewer) ya da kızılötesi kamera olmadığı için dedektör kart ile gerçekleştirilmiştir. Konumun belirlenmesinin ardından VECSEL çipi özel bakır soğutucu üzerine monte edilmiştir. Montaj işlemi sırasında termal iletkenliğin artırılması amacıyla iki bakır eleman arası termal macun sürülmüştür. Bu işlem ile VECSEL montajı tamamlanmıştır. Bu adım ile su soğutma, elektriksel bağlantılar ve VECSEL çipinin fiziksel olarak montajı tamamlanmış ve hizalama işlemine geçilmiştir.

Hizalama işleminde ışın yürüme (beam walking) yöntemi kullanılmıştır. Hizalama lazerinin aşırı genişleme ve saçılması sebebi ile öncelikle hizalama lazerinin ışın boyutu sabitlenmıştır. Işın boyutunu sabitlemek amacıyla fiber optik çıkışına bir adet

dış bükey (convex) ve bir adet düz-dış bükey (plano convex) lens odak noktalarına yerleştirilerek ışın boyutu sabitlenmiş ve saçılma engellenmiştir (Şekil 5.12).



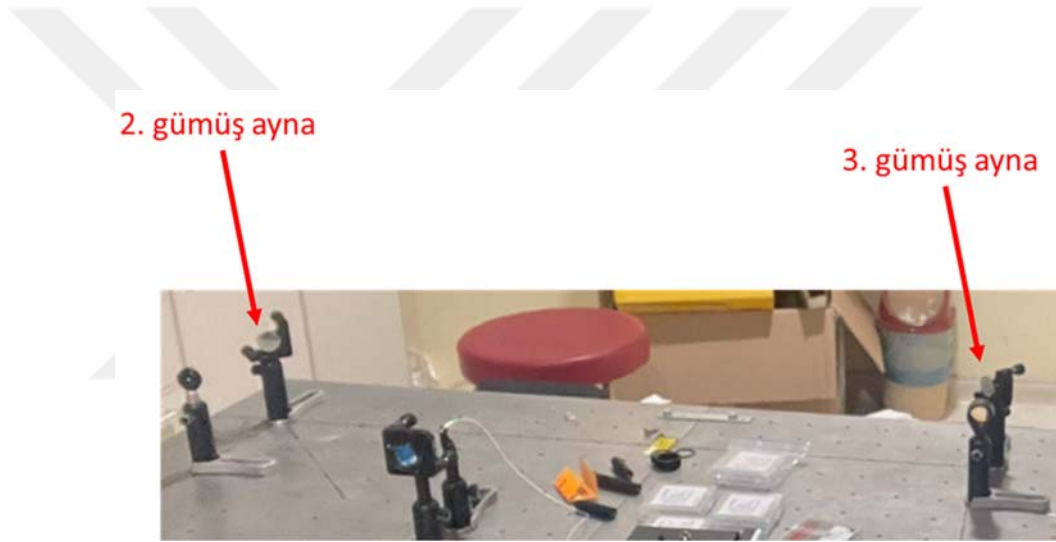
Şekil 5.12 Hizalama lazerinin lensler yardımı ile ışın boyutunun sabitlenmesi.

Işın boyutunun sabitlenmesi sonrasında hizalama ışını yol boyunca gümüş aynalar ile yönlendirilmiştir. Bu yol boyunca öncelikle iki adet iris ile ışının yüksekliği ve doğrultusu hizalanmıştır.



Şekil 5.13 Hizalama lazerinin optik yol boyunca görünümü ve irisler yardımı ile hizalama.

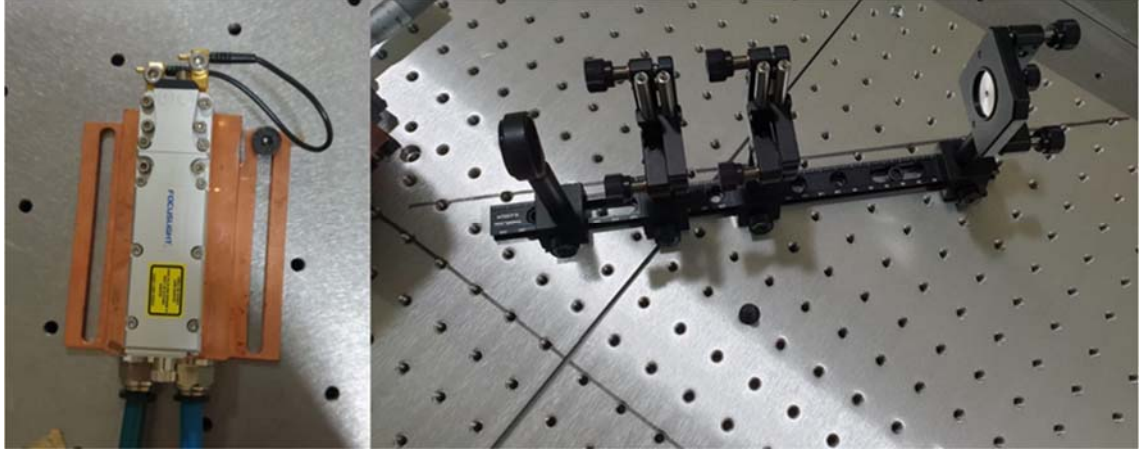
Son gümüş aynadan sonra ise hizalamanın doğru ve düzgün yapılması için hizalama lazeri 750 mm eğrilik yarıçapına sahip dış bükey lens ile VECSEL çipinin üzerine odaklanmıştır. Odaklama sonrasında geri yansıma takip edilmiştir. Bu noktada Şekil 5.14'de gösterildiği üzere 2. ve 3. aynalar kullanılarak geri yansımanın geliş yolu üzerinden geri dönmesi sağlanmıştır. 2 numaralı gümüş ayna hizalama esnasında hizalama lazerinin VECSEL çipi üzerine odaklanmasında kullanılmıştır. 3 numaralı ayna ise geri yansımanın 2 numaralı iris deliğine odaklamada kullanılmıştır. Bu işlem geri yansımanın 1. iris sonrasında dedektör kartı ile gözlenmesi ile tamamlanmıştır. Burada optik yol hizalamanın mükemmel yakın olması amacıyla yaklaşık olarak 6,5 metre olarak hesaplanmıştır. Hizalamanın mesafe ile doğru orantılı olarak değişeceğinden mesafe uzun seçilmiştir.



Şekil 5.14 Geri yansımanın hizalanması için kullanılan gümüş aynalar ve iris.

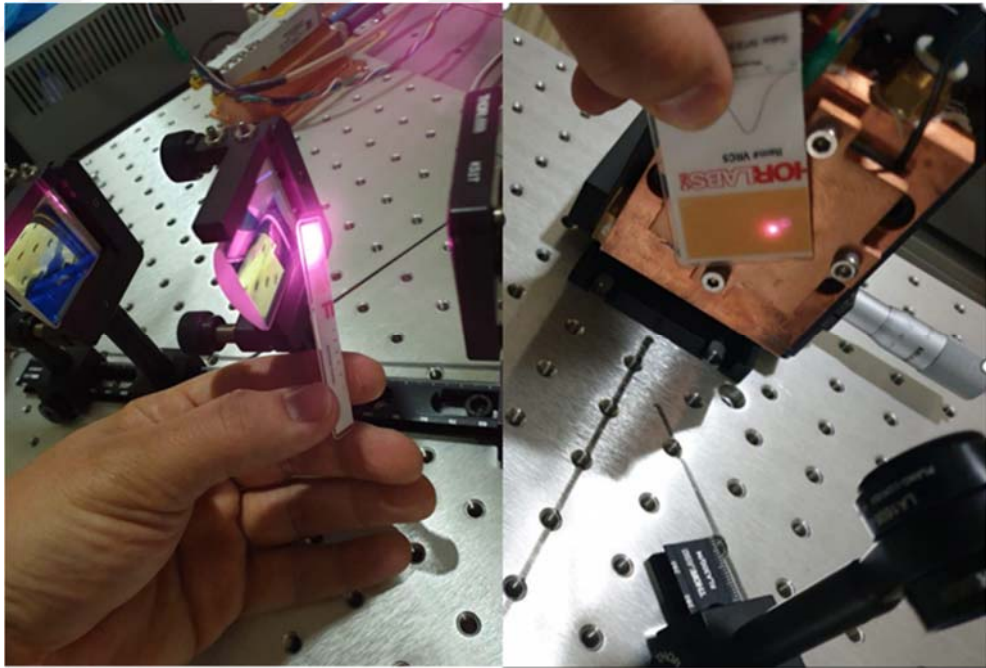
Geriyansımanın 1. iris sonrasında görüntülenmesi sonrasında hizalama işlemi başarı ile tamamlanmıştır.

Pompa lazer tez danışmanının içinde bulunduğu daha önceki projelerden alınmış olup 808 nm dalga boyunda ve çok modludur. Maksimum 32 W çıkış gücüne sahiptir. Pompa lazerin kurulumu için öncelikle yine danışmanın görevli olduğu daha önceki projelerden alınan optik ray sistemi (Şekil 5.15) ve öteleme elemanları kullanılmıştır. Sürücü olarak da 12.5VDC 60A TDK-LAMBDA GEN-12.5-60 güç kaynağı kullanılmıştır.



Şekil 5.15 Lazer diyot ve optik ray sistemi.

Pompa lazerin çok modlu olması ve ışının hızlı dağılımı sebebi ile odaklayıcı lensler kullanılarak ışın boyutu düşürülmüştür. Bunun için silindirik ve küresel lensler kullanılmıştır. Işın boyutu her bir kavite tasarımına göre değiştirilmiş, VECSEL çipi üzerindeki ışına ile eş boyuta indirgenmiştir. Bu işlem ışın kalitesinin artırılması için yapılmıştır.



Şekil 5.16 Pompa lazerin fiber çıkışı sonrası boyutu ve odaklayıcı lensler kullanılarak odaklanması sonucu boyutundaki değişim.

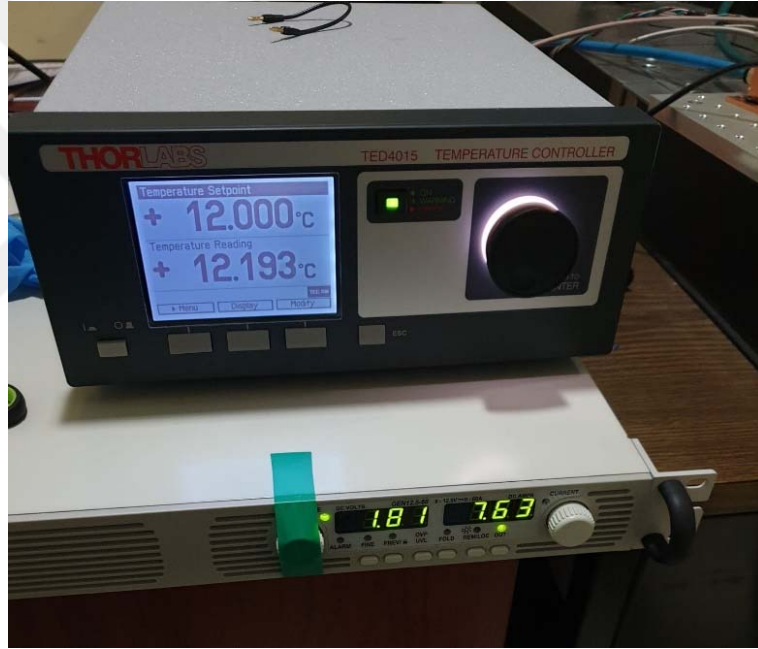


Şekil 5.18 Lazer kavitesi ve optik pompalama anında görünümü

Öteleme düzleminin sabitlenmesinin ardından hizalama lazeri kullanılarak hizalama gerçekleştirilmiştir. İlk hizalama 50 mm'lik OC için gerçekleştirilmiş olup kavite uzunluğu 25 mm olarak sabitlenmiştir. Bunun için sadece 2 eksenli OC tutucu kullanılmıştır. Bir önceki adımda VECSEL çipinin hizalanmasının tamamlanmasının ardından gümüş aynalar ile oynanmamıştır. OC tutucunun yatay ve dikey yöndeki ayar vidaları yardımı ile gelen ışın ve geri yansımanın üst üste bindirilmesi ile hizalama gerçekleştirilmiştir. Bunun yanı sıra hizalama lazerinin geri yansıması 1. iris sonrasında görüntü kartı ile tespit edilinceye kadar hizalama gerçekleştirilmiştir. Geri yansımanın hizalanması sonrasında pompa lazerin hizalama lazeri ile aynı noktaya getirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bunun için Şekil 5.18'de gösterildiği üzere yine 2 boyutlu fiber tutucu kullanılmıştır. Bu işlem VECSEL çipinin fabrikasyonu sonrasında yüzeyde oluşabilecek dalgalanmalardan etkilenmemek ve ilk kısımda yapılan

hizalama noktası için ışımanın elde edilmesi içindir. Aksi takdirde lazer ışımasının elde edilememesi söz konusudur.

Hizalamaların tamamlanmasının ardından VECSEL çipinin sıcaklığı 12 °C'ye ayarlanmıştır. Düşük oda sıcaklığı ilk ışımanın yüksek pompa güçlerinde elde edilmesi sebebiyle tercih edilmiştir. Lazer ışımasının elde edilmesi sonrasında sıcaklık oda sıcaklığına yükseltilmektedir. Sıcaklığın sabitlenmesi sonrasında pompa lazer Şekil 5.19'da gösterildiği gibi açılmış ve Şekil 5.18'de gösterildiği üzere VECSEL çipi pompalanmıştır. Pompalama esnasında lazer diyotun aşırı voltajdan yanmaması için voltaj üst limiti fabrika verileri doğrultusunda 9 V olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 5.19'da voltaj düğmesi yeşil bant ile bağlanarak bu işlem gerçekleştirilmiştir.



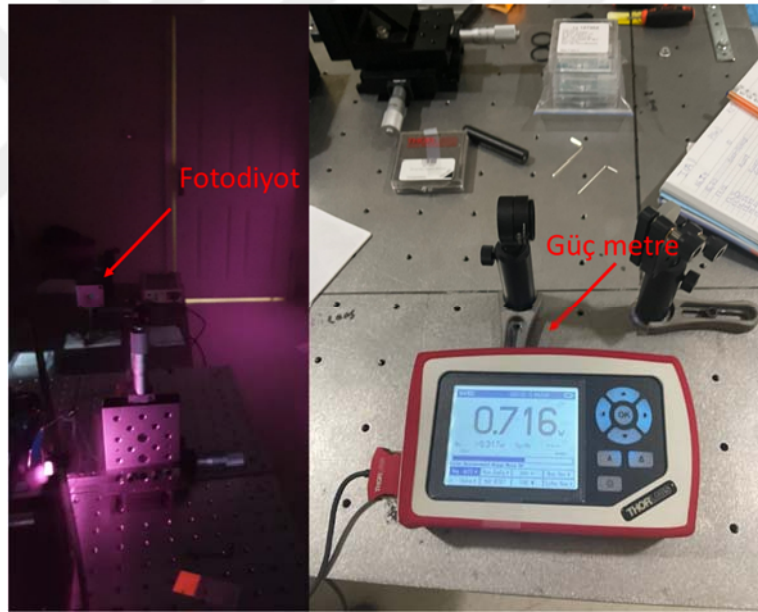
Şekil 5.19 Sıcaklık kontrol ünitesi ile VECSEL çipinin sıcaklığının sabitlenmesi ve 1.81 V 7.63 A güç değerinde lazer çalıştırılması.

İlk lazer ışıması yaklaşık olarak 5,97 V 22 A elde edilmiştir (Şekil 5.20). Işımanın elde edildiği anda hizalama lazerinin kapalı olduğu kontrol ünitesi üzerinde görülmektedir. Sonuç olarak ışımanın elde edilmesi ile bu iş paketi başarı ile sonuçlandırılmıştır.



Şekil 5.20 İlk lazer ışınması, pompa lazerin cep telefonu kamerası ile VECSEL üzerine gönderilmesi ve pompa lazerin duvar üzerine geri yansıması (artık pompa).

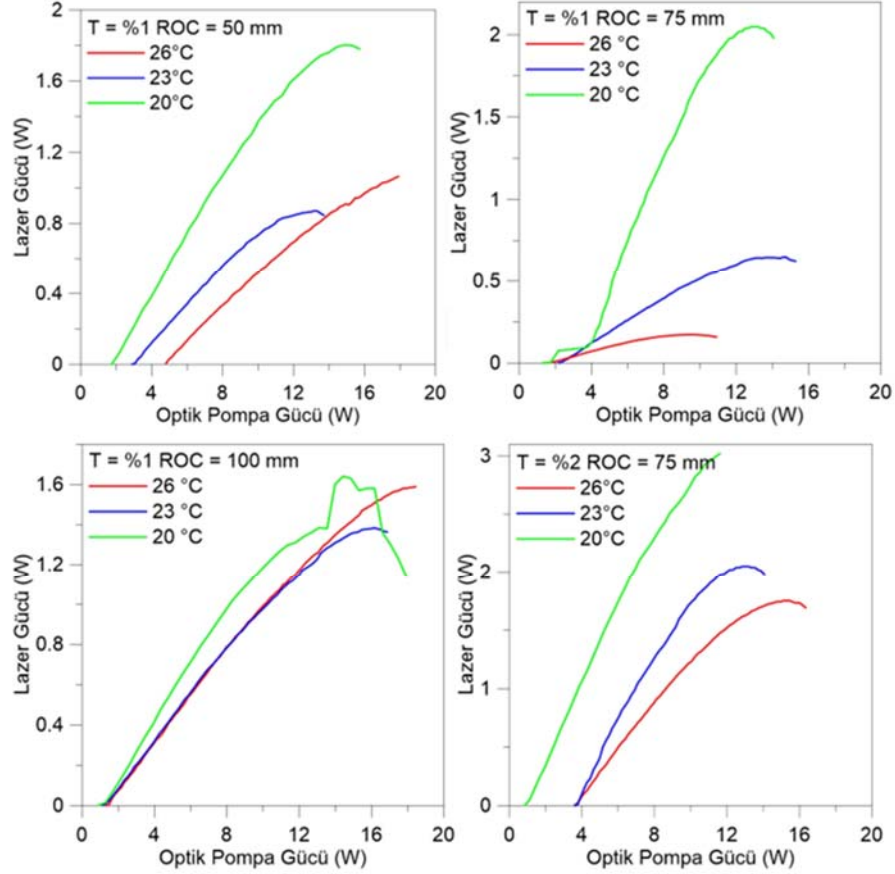
Lazer ışınmasının elde edilmesi sonrasında tüm güç ölçümleri fotodiyot ve geçici olarak temin edilen güç metre ile gerçekleştirilmiştir. (Şekil 5.21)



Şekil 5.21 Lazer güç ölçümünde kullanılan fotodiyot ve güç metre.

Çalışmanın bu aşamasında yapılan işlemler temel olarak farklı OC'ler için lazer kavitelerinin elde edilmesi ve lazer karakterizasyonunu içermektedir. Bu amaçla her bir OC için dört adet lazer kavitesi oluşturulmuştur. Bir önceki iş paketinde belirtildiği üzere düz lazer kaviteleri oluşturulmuştur. Sırası ile %1 geçirgenliğe sahip 50, 75 ve 100 mm eğrilik yarıçapına sahip OC'ler ardından 75 mm ve %2 geçirgenliğe sahip OC için lazer kavitesi oluşturulmuştur. Şekil 5.22'de farklı eğrilik yarıçapları (ROC) ve

geçirgenlik değerine sahip lazer kavitelerine ait ölçümler gösterilmektedir. İlk lazer ışınması 12°C’de elde edildikten sonra VECSEL sıcaklıkları sırası ile 20, 23 ve 26°C için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.22 T=%1 geçirgenlik ile 50, 75 ve 100 mm ROC değerine sahip OC’ler ile T=%2 ve 75 mm ROC değerine sahip OC için güç eğrileri.

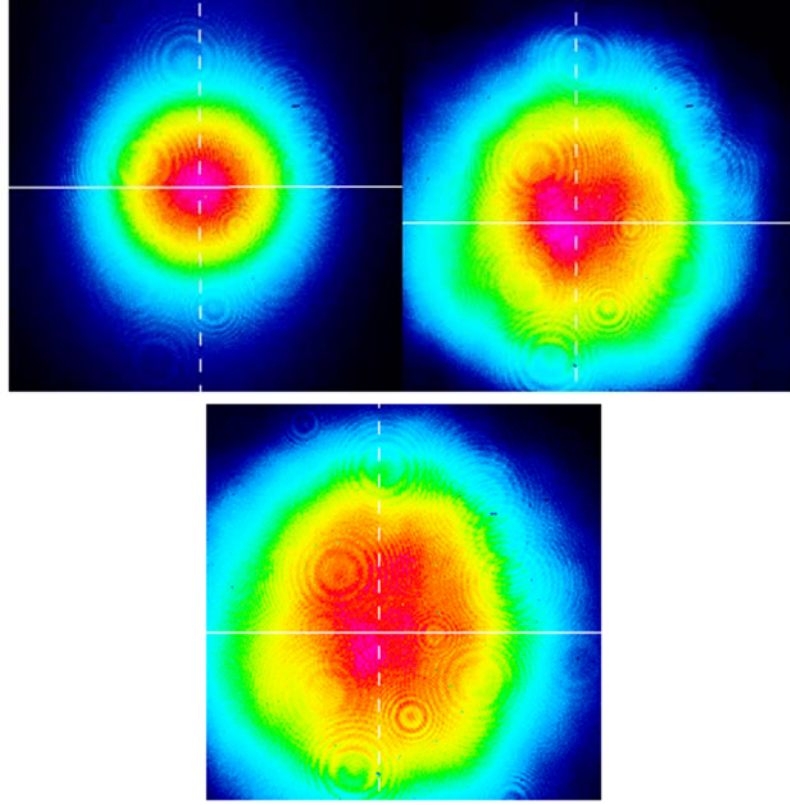
T=%1 geçirgenlik ile 50 mm ROC değerine sahip OC için sırasıyla farklı sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde eşik değerleri sırasıyla 1,74, 2,88 ve 4,80 W olarak ölçülmüştür. Artan sıcaklık ile ışınma eşik değerinin artışı literatür ile uyumludur ancak beklenilen üzerinde bir değişim meydana gelmiştir. Bunun nedeninin VECSEL çipindeki bozulma olduğunu düşünülmüştür. Elde edilen maksimum güç değerleri ise sırasıyla 1,80, 0,85 ve 1,06 W olarak ölçülmüştür. 50 mm ROC değerine sahip OC için 2W hedef değerinin altında güç elde edilmiştir. Bunun yanı sıra 23°C sıcaklıkta yapılan ölçümde çip daha hızlı doyuma ulaşmıştır. Bunun nedeninin 20°C’de yapılan pompalama sonrasında çipte bozulmanın meydana gelmesidir. Sonraki ölçümlerde aynı noktada benzer güç değerlerinin elde edilememesi ve ışınma eşik değerinin hızla

artması düşüncemizi doğrulamaktadır. Maksimum güçte optik pompa gücü 14,86 W olarak ölçülmüştür. Bu değer yaklaşık olarak %12,11 optik verime karşılık gelmektedir. Gücü maksimize etmek adına kavite hizalama işlemleri birçok defa gerçekleştirilmiş olsa da çalışmada hedeflenen 2W maksimum güce ulaşamamıştır. Bunun nedeninin OC eğrilik yarıçapının çok yüksek olması sebebi ile lazer ışımalarının hızlı bir şekilde saçılması olduğunu düşünmekteyiz.

İlk lazer ışması sonrasında $T=1\%$ geçirgenlik ve 75 mm ROC değerine sahip OC kullanılarak lazer ışması ikincil olarak elde edilmiştir. Ancak VECSEL çipi üzerinde meydana geldiğini düşündüğümüz bozulma etkisinden kurtulmak üzere farklı bir nokta seçilerek optik pompalama ve hizalama gerçekleştirilmiştir. Lazer ışma eşik değeri yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa doğru sırasıyla 1,78, 1,74 ve 1,48 W olarak ölçülmüştür. Şekil 5.22'de gösterildiği üzere en yüksek sıcaklıktan başlayarak 0,158, 0,626 ve 2,050 W güç değerleri elde edilmiştir. Maksimum güçte optik pompa gücü 12,85 W olarak hesaplanmıştır. Bu da yaklaşık olarak %15,9 optik verime karşılık gelmektedir. İlk pompalama sonrasında VECSEL çipinde bozulma bu noktada gerçekleşmiştir. Bunun nedeninin VECSEL çip fabrikasyonundan kaynaklandığını düşünmekteyiz. Çiplerin fabrikasyonunda sırasıyla Ti/Pt/Au ve In/Au kullanılmıştır. İndiyum lehimleme 126°C 'de yapılmıştır. Optik pompalama esnasında optik pompa gücünün hızla artması sonucunda anlık olarak da olsa bu sıcaklığa ulaşıldığını düşünmekteyiz. Bu da lehimleme işleminin bozulmasına, lehimleme yüzeyinde indiyumun kısmi olarak eriyik hale gelmesinden kaynaklandığı öngörülmektedir. $T=1\%$ geçirgenlik ve 100 mm ROC değerine sahip OC kullanılarak gerçekleştirilen lazer kavitesine ait güç eğrisi Şekil 5.22'de gösterilmiştir. Çipteki lokal bozulmadan etkilenmemek adına yine farklı bir nokta seçilmiştir. Lazer ışma eşik değerleri 20, 23, 26°C 'de sırasıyla 0,87, 1,13 ve 1,31 W olarak ölçülmüştür. Maksimum güçler ise sırasıyla 1,64, 1,58 ve 1,38 W olarak ölçülmüştür. 1.64 W çıkış gücü için 14,42 W olarak belirlenmiştir ki bu da yaklaşık olarak %11,3 optik verime karşılık gelmektedir. Bunun yanı sıra lazer ışımalarının doyuma ulaştığı noktalarda lazer gücünde 20°C sıcaklığında salınmalar meydana gelmiştir. Bu aşamada çipe zarar vermemek adına pompa gücü değişimi daha küçük aralıklarla ve daha uzun süre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Bu işlemin ardından farklı sıcaklıklarda benzer güç değerlerine ulaşılmıştır. Bu sonuç bize diğer OC değerlerinde VECSEL çipinde meydana geldiğini

düşündüğümüz bozulmanın doğru olduğunu göstermektedir. İlk üç OC değerinde 2 W maksimum gücü sağlanmış ancak beklenen optik verim elde edilememiştir. Bunun nedeninin çipin optik pompalama sonucunda bozulduğunun, bozulma sonrasında yüzey morfolojisinin değiştiğinin belirlenmesi sonucunda çipten kazancın artırılması, kavite enerjisinin azaltılması, pompa gücünün daha yavaş değiştirilmesi ve sıcaklık dengesinin oluşması için daha uzun beklenilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür. Bu amaçla %2 geçirgenlik ve 75 mm ROC değerine sahip son OC kullanılarak lazer kavitesi oluşturulmuştur. Şekil 5.22’de verilen güç eğrisinde lazer ışıma eşikleri 0,83, 3,58 ve 3,58 W olarak ölçülmüştür. Maksimum güç değerleri ise 3,02, 2,05 ve 1,75 W olarak ölçülmüştür. Geçirgenliğin artırılması sonucunda maksimum güçlerde kayda değer bir artış meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra kavite enerjisinin azalması çipteki bozulmayı olumlu yönde etkileyerek azaltmıştır. Maksimum güçte optik pompa gücü 11,62 W ve dolayısı ile optik verim %25,9 olarak elde edilmiştir.

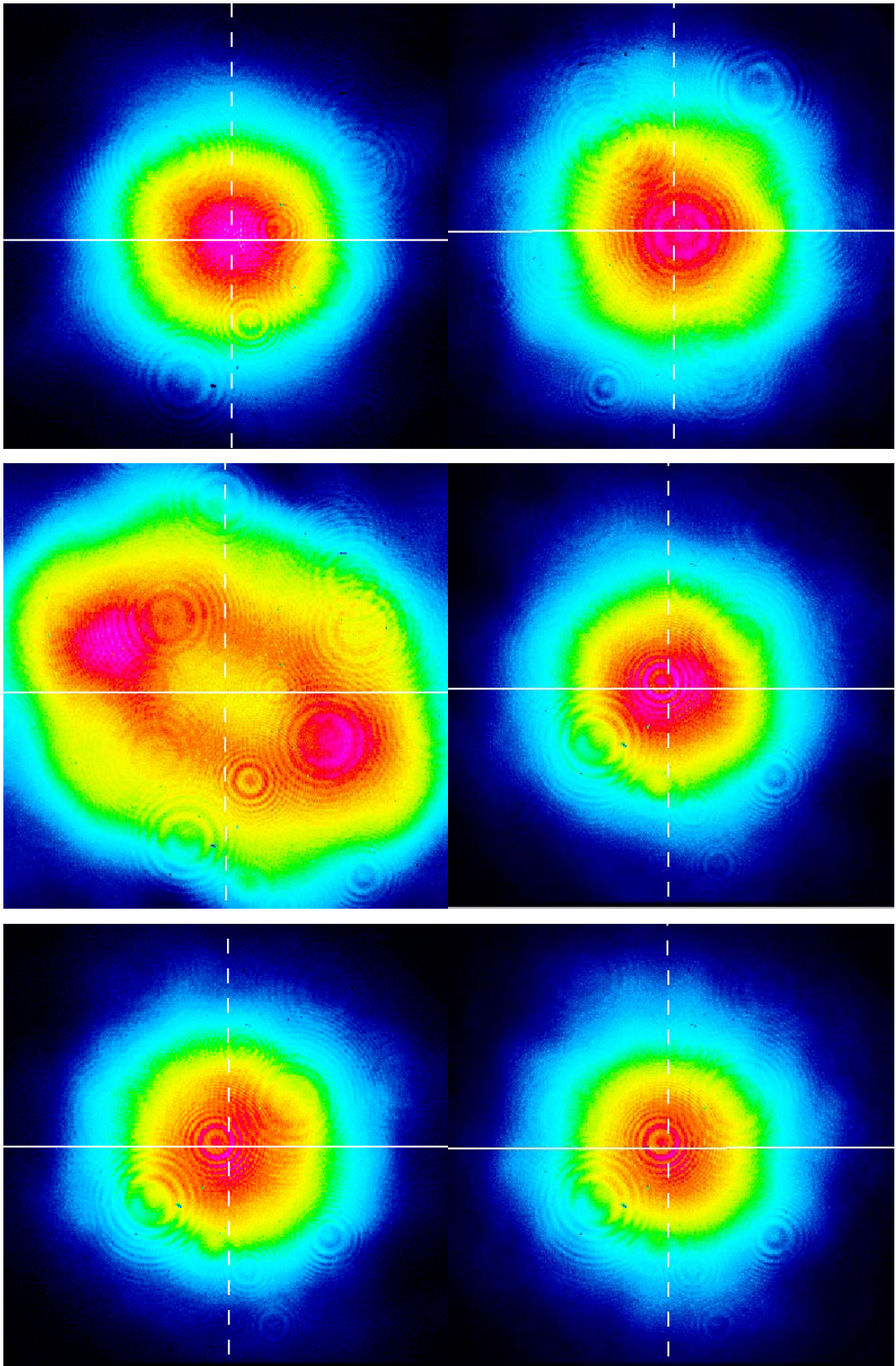
Lazer güç eğrilerinin elde edilmesinin ardından lazer karakterizasyonu için ışın kalitesi ölçümleri gerçekleştirilmiştir. %1 geçirgenliğe ve 50 mm ROC değerine sahip OC için farklı sıcaklıklara ait lazer ışıma profilleri Şekil 5.23’te verilmiştir.

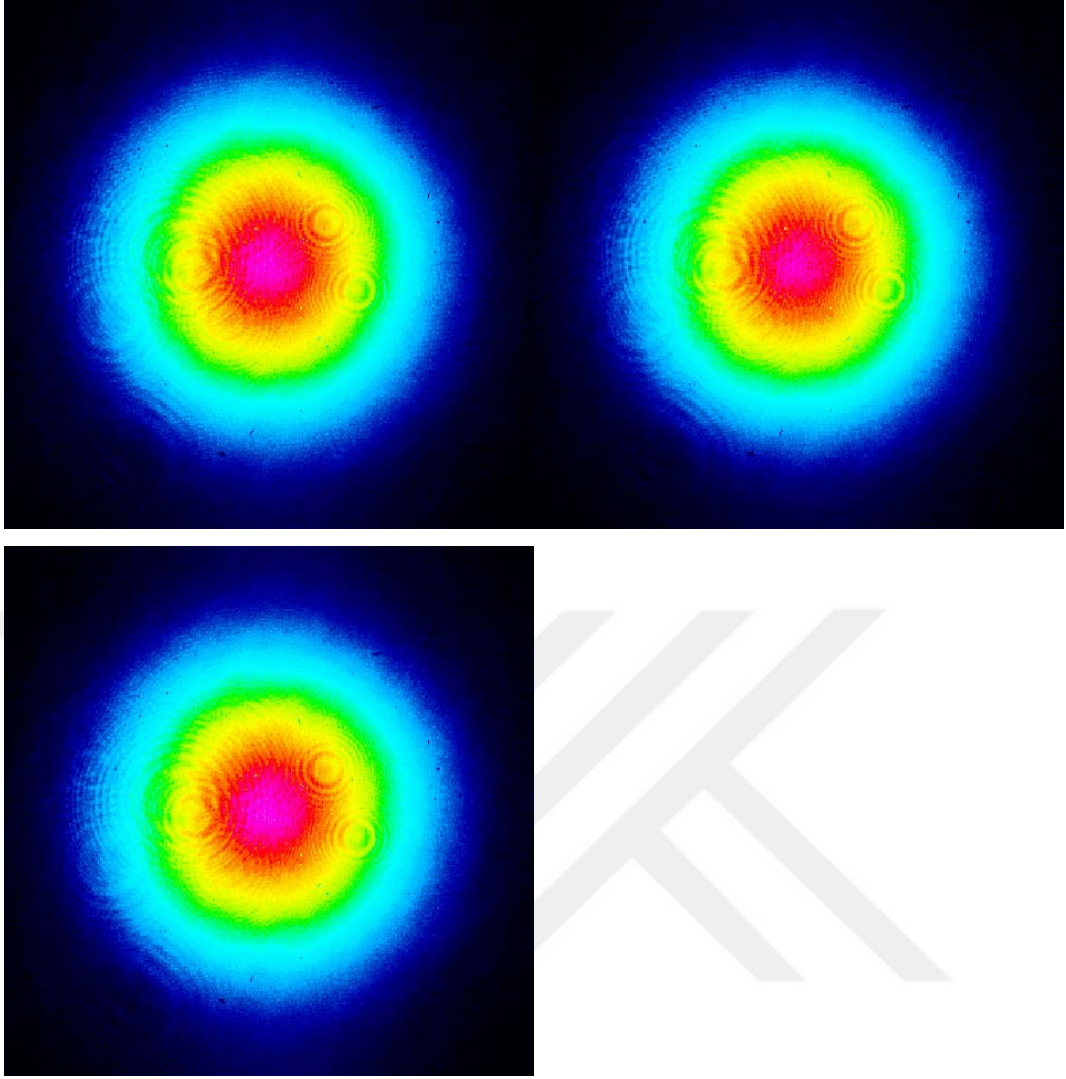


Şekil 5.23 %1 geçirgenlik ve 50 mm ROC değerine sahip OC için soldan sağa sırası ile 20, 23 ve 26 °C VECSEL sıcaklıklarına ait lazer ışın profili.

Şekil 5.23'te görüldüğü üzere lazer ışın profili 20 °C sıcaklıkta Gaussian ışın şeklinde tek boyuna moda (longitudinal) sahiptir. Ancak sonraki sıcaklıklarda Gaussian ışın profili deforme olmuş ve çok modlu ışımaya doğru kaymıştır. 20 °C sıcaklık için M^2 değeri $<1,02$ olarak ölçülmüştür. 23 °C ve 26 °C sıcaklıklar için ise M^2 değeri $<1,22$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç bize VECSEL çipindeki bozulmayı kanıtlamaktadır. Bu ölçümün ardından Şekil 5.24'te diğer OC'lere ait ışın profilleri verilmiştir. Şekil 5.24'te üst resimlerde %1 geçirgenlik ve 75 mm OC için ışın profili 20 °C sıcaklıkta Gaussian ışın şekline sahip ve tek boyuna modludur. M^2 değeri $<1,03$ olarak ölçülmüştür. Ancak sıcaklığın artması ve çipin zarar görmesine bağlı olarak maksimum güçteki hızlı düşüşe ek olarak lazer ışın profili bozulmuş ve direkt olarak çok modlu ışın elde edilmiştir. Lazer kavite uzunluğu ve OC hizalaması değiştirilerek ışın profili düzeltilmeye çalışılmıştır ancak sonuç değişmemiştir. Işın profilinin hızlı değişimi güç eğrisindeki hızlı düşüşü de açıklamaktadır. Şekil 5.24'te orta resimlerde %1 geçirgenlik ve 100 mm OC için ışın profili tüm sıcaklıklarda Gaussian ışın şekline sahip ve tek boyuna modludur. 20 °C'de $M^2 < 1,02$ olarak

ölçülmüştür. Diğer sıcaklıklarda ise sırasıyla $M^2 < 1,05$ ve $M^2 < 1,05$ olarak elde edilmiştir. Bu da sıcaklığın yavaş artırılmasının ışın şeklini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Son olarak Şekil 5.24’de alttaki resimlerde %2 geçirgenlik ve 75 mm OC için ışın profili tüm sıcaklıklarda Gaussian ışın şekline sahip ve tek boyuna modludur. Geçirgenliğin artırılarak kavite enerjisinin düşürülmesi ve çipin korunarak pompa gücünün artırılması çipte bozulmayı önlemiştir. 20 °C ve 23 °C’de $M^2 < 1,03$ ve $M^2 < 1,03$ olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak tez çalışmasında amaçlanan 2W maksimum güç, %25-40 optik verim ve $M^2 < 1,20$ değerleri %2 geçirgenlik ve 75 mm ROC değerine sahip OC kullanılarak 37,5 mm kavite genişliğinde elde edilmiştir. 3,02 W optik güç ile çalışmanın ön hazırlığında öngörülen optik gücün çok üzerine çıkılmış ve ışın kalitesi korunmuştur. Böylece bu aşamanın başarı ile tamamlanması sonucunda tez çalışmasının hedefleri sağlanmış olup, VECSEL üretimi gerçekleştirilmiştir.





Şekil 5.24 Sırasıyla %1 geçirgenliğe 75 (üst) ve 100 (orta) mm ROC değerine sahip OC'ler ve %2 geçirgenlik ile 75 mm ROC değerine sahip OC için lazer ışın profili ölçüm sonuçları.

6. SONUÇ ve ÖNERİLER

950 – 1050 nm Dalgaboylu Lazer Kavitesinin Oluşturulması tez çalışması ve STBMYO-2023-003 nolu CÜBAP projesi, temel olarak iki aşamadan meydana gelmektedir.

I. VECSEL çipinin fabrikasyonu.

II. LAZER'in çalıştırılması.

Fabrikasyon işlemleri ise sırasıyla metalizasyon, lehimleme, aşındırma ve dielektrik kaplama bölümlerinden oluşmaktadır. Metalizasyon, aşındırma ve dielektrik kaplama literatürde iyi bilinen malzeme grubunu içerdiğinden herhangi bir sorun ile karşılaşılmaştır. Ancak altyapının ve tez çalışmasının desteklendiği proje bütçesinin yetersiz olmasından dolayı lehimleme kısmında büyük sıkıntı yaşanmıştır. Bu çalışma için belirlenen hedefler başarı ile sağlanmıştır. Ancak çıkış gücünü ve ışın kalitesini belirleyen en önemli faktör lehimleme kalitesi olmuştur. Lehimleme sisteminin geliştirilmesi ya da tekniğin değiştirilmesi ile çok daha üstün sonuçlar elde edileceği açıktır. Özellikle “wafer bonding” tekniği ile bir lehimleme yapılması ısı iletkenliği arttıracığı için daha verimli olacaktır.

Bu tez çalışmasının hedefleri 2W maksimum güç, %25-40 verim ve $M^2 < 1.20$ olarak belirlenmişti, lazer kavitesinin kurulması sonrasında 75 mm ROC %2 geçirgenliğe sahip OC ile çalışma hedefleri gerçekleştirilmiştir. Ancak çıkış gücüne direk etki etmesi sebebi ile hizalamanın sadece dedektör kart ile yapılması bu sonuçlara direk etki etmiştir.

Proje sonrasında önerilerimiz proje çıktılarının değerlendirilmesi sonucunda destek bulunması halinde sürekli dalga ışımının dışında tek modlu lazer projesi ve portatif prototip geliştirilmesi mümkündür. Özellikle tek modlu lazer için pasif mod kilitleme yönteminde kullanılmak üzere yarı iletken soğurucu ayna üretimi mümkündür.

KAYNAKLAR

- Atri, M., Gertner, M. R., Haider, M. A., Weersink, R. A., & Trachtenberg, J.** (2009). Contrast-enhanced ultrasonography for real-time monitoring of interstitial laser thermal therapy in the focal treatment of prostate cancer. *Canadian Urological Association Journal*, 3(2), 125.
- Alaydin, B. O.** (2018). Düşey Kovuklu Yüzey Işımalı Lazer Yapılarının Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı (Doktora Tezi), 76s, 108s, Sivas.
- Alaydin, B. O., Tuzemen, E. S., Altun, D., & Elagoz, S.** (2019). Comprehensive structural and optical characterization of AlAs/GaAs distributed Bragg reflector. *International Journal of Modern Physics B*, 33(08), 1950054.
- Altun, D.** (2018). Safir Alttaş Üzerine MOCVD ile Büyütülen Mavi Led Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı (Doktora Tezi), 17s, 18s, Sivas.
- Bergen, K. M., Goetz, S. J., Dubayah, R. O., Henebry, G. M., Hunsaker, C. T., Imhoff, M. L., ... & Radeloff, V. C.** (2009). Remote sensing of vegetation 3-D structure for biodiversity and habitat: Review and implications for lidar and radar spaceborne missions. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 114(G2).
- Cerutti, L., Garnache, A., Ouvrard, A., Garcia, M., & Genty, F.** (2005). Vertical cavity surface emitting laser sources for gas detection. *Physica Status Solidi (a)*, 202(4), 631-635.
- Chu, K. F., & Dupuy, D. E.** (2014). Thermal ablation of tumours: biological mechanisms and advances in therapy. *Nature Reviews Cancer*, 14(3), 199-208.
- De, S., Baili, G., Alouini, M., Harmand, J. C., Bouchoule, S., & Bretenaker, F.** (2014). Class-A dual-frequency VECSEL at telecom wavelength. *Optics Letters*, 39(19), 5586-5589.
- Fallahi, M., Moloney, J. V., & Fan, L.** (2006). High power vertical external cavity surface emitting lasers and their applications. *In Quantum Sensing and Nanophotonic Devices III* (Vol. 6127, pp. 69-77). SPIE.
- Gamal Ebidalla Elghobaier, M., Khalil Ibrahim, M. F., Shawkat Abdelhalim, A., Mostafa Eid, A., & Al Said Murad, K.** (2020). Clinical and Surgical Outcomes of Femtosecond Laser-Assisted Cataract Surgery (FLACS) on Hard Cataracts in the Egyptian Population. *Clinical Ophthalmology*, 1383-1389.
- Gaulke, M., Heidrich, J., Alaydin, B. Ö., Golling, M., Barh, A., & Keller, U.** (2021). High average output power from a backside-cooled 2- μm InGaSb VECSEL with full gain characterization. *Optics Express*, 29(24), 40360-40373.
- Guina, M., Rantamäki, A., & Härkönen, A.** (2017). Optically pumped VECSELs: review of technology and progress. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 50(38), 383001.
- Hall, R. N., Fenner, G. E., Kingsley, J. D., Soltys, T. J., & Carlson, R. O.** (1962). Coherent light emission from GaAs junctions. *Physical Review Letters*, 9(9), 366.
- Heidrich, J., Gaulke, M., Golling, M., Alaydin, B. O., Barh, A., & Keller, U.** (2022). 324-fs Pulses from a SESAM Modelocked Backside-Cooled 2- μm VECSEL. *IEEE Photonics Technology Letters*, 34(6), 337-340.

- Herper, M., Gronenborn, S., Gu, X., Kolb, J., Miller, M., & Moench, H.** (2019, March). VECSEL for 3D LiDAR applications. In *Vertical External Cavity Surface Emitting Lasers (VECSELS) IX* (Vol. 10901, pp. 92-102). SPIE.
- Hirsch, L. R., Stafford, R. J., Bankson, J. A., Sershen, S. R., Rivera, B., Price, R. E., ... & West, J. L.** (2003). Nanoshell-mediated near-infrared thermal therapy of tumors under magnetic resonance guidance. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(23), 13549-13554.
- Iga, K., Kinoshita, S., & Koyama, F.** (1987). Microcavity GaAs/GaAs surface-emitting laser with $I_{th} = 6$ mA. *Electronics letters*, 3(23), 134-136.
- Kaneda, Y., Yarborough, J. M., Li, L., Peyghambarian, N., Fan, L., Hessenius, C., ... & Sasaki, T.** (2008). Continuous-wave all-solid-state 244 nm deep-ultraviolet laser source by fourth-harmonic generation of an optically pumped semiconductor laser using CsLiB₆O₁₀ in an external resonator. *Optics letters*, 33(15), 1705-1707.
- Kantola, E., Leinonen, T., Ranta, S., Tavast, M., & Guina, M.** (2014). High-efficiency 20 W yellow VECSEL. *Optics express*, 22(6), 6372-6380.
- Kasnak, G., & Fıratlı, H. E.** (2016). Lazer Fiziği ve Lazer Uygulamalarında Temel Kavramlar, *Türkiye Klinikleri Periodontology-Special Topics*, 2(2), 1-6.
- Kuznetsov, M., Hakimi, F., Sprague, R., & Mooradian, A.** (1997). High-power (> 0.5-W CW) diode-pumped vertical-external-cavity surface-emitting semiconductor lasers with circular TEM₀₀/sub 00/beams. *IEEE Photonics Technology Letters*, 9(8), 1063-1065.
- Maiman, T. H.** (1960). Optical and microwave-optical experiments in ruby. *Physical review letters*, 4(11), 564.
- Marius, G.**, (2006). *The Physics of Semiconductors*, Germany.
- Mereuta, A., Nechay, K., Caliman, A., Suruceanu, G., Rudra, A., Gallo, P., ... & Kapon, E.** (2019). Flip-chip Wafer-fused OP-VECSELS emitting 3.65 W at the 1.55- μ m waveband. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 25(6), 1-5.
- Nürnberg, J., Alfieri, C. G., Chen, Z., Waldburger, D., Picqué, N., & Keller, U.** (2019). An unstabilized femtosecond semiconductor laser for dual-comb spectroscopy of acetylene. *Optics express*, 27(3), 3190-3199.
- Paithankar, D. Y., Ross, E. V., Saleh, B. A., Blair, M. A., & Graham, B. S.** (2002). Acne treatment with a 1,450 nm wavelength laser and cryogen spray cooling. *Lasers in surgery and medicine*, 31(2), 106-114.
- Perez, J. P., Laurain, A., Cerutti, L., Sagnes, I., & Garnache, A.** (2010). Technologies for thermal management of mid-IR Sb-based surface emitting lasers. *Semiconductor science and technology*, 25(4), 045021.
- Rahim, M., Felder, F., Fill, M., & Zogg, H.** (2008). Optically pumped 5 μ m IV-VI VECSEL with Al-heat spreader. *Optics letters*, 33(24), 3010-3012.
- Strobel, O., Rejeb, R., & Lubkoll, J.** (2010). Communication in automotive systems: Principles, limits and new trends for vehicles, airplanes and vessels. In 2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks (pp. 1-6). IEEE.
- Tilma, B. W., Mangold, M., Zaugg, C. A., Link, S. M., Waldburger, D., Klenner, A., ... & Keller, U.** (2015). Recent advances in ultrafast semiconductor disk lasers. *Light: Science & Applications*, 4(7), e310-e310.

Url-1 <<https://irds.ieee.org/topics/semiconductor->

[materials#:~:text=The%20most%20used%20semiconductor%20materials%20are%](#)

20silicon%2C%20germanium%2C%20and%20gallium,outer%20shell%20of%20the
%20atom>, alındığı tarih: 03.01.2024.

Url-2<<https://electrologs.com/2017/12/27/lazerlazerin-calisma-prensibi-ve-lazer-cesitleri/>>, alındığı tarih: 07.01.2024.

Waldburger, D., Link, S. M., Mangold, M., Alfieri, C. G., Gini, E., Golling, M., ... & Keller, U. (2016). High-power 100 fs semiconductor disk lasers. *Optica*, 3(8), 844-852.

Wang, T. L., Heinen, B., Hader, J., Dineen, C., Sparenberg, M., Weber, A., ... & Stolz, W. (2012). Quantum design strategy pushes high-power vertical-external-cavity surface-emitting lasers beyond 100 W. *Laser & Photonics Reviews*, 6(5), L12-L14.

