



**İNP TABANLI PASİF MOD KİLİTLİ ÇOK BÖLÜMLÜ
DİYOT LAZERLERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Rukiye AKSAKAL

Doktora Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

2025

Her hakkı saklıdır.



FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
DOKTORA TEZİ

İnP TABANLI PASİF MOD KİLİTLİ ÇOK BÖLÜMLÜ DİYOT LAZERLERİN
TASARIMI VE ÜRETİMİ

Rukiye AKSAKAL

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2025

Her hakkı saklıdır

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

**İnP TABANLI PASİF MOD KİLİTLİ ÇOK BÖLÜMLÜ DİYOT LAZERLERİN
TASARIMI VE ÜRETİMİ**

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Rukiye AKSAKAL tarafından hazırlanan bu çalışma 13 / 01 / 2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **Oy birliği (5/5)** ile kabul edilmiştir.

Başkan	: Prof. Dr. Tevhit KARACALI	İmza	:
Üye	: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Kenan ÇİÇEK	İmza	:
Üye	: Doç. Dr. Çağlar DUMAN	İmza	:
Üye	: Dr. Öğr. Üyesi Meltem GÖR BÖLEN	İmza	:

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Bünyamin ÖZGERİŞ
Enstitü Müdürü

*Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 122E681 nolu proje ile desteklenmiştir.

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

13 / 01/2025

İmzası

Rukiye AKSAKAL

ÖZET

DOKTORA TEZİ

InP TABANLI PASİF MOD KİLİTLİ ÇOK BÖLÜMLÜ DİYOT LAZERLERİN TASARIMI VE ÜRETİMİ

Rukiye AKSAKAL

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

İletilmek istenen mesajların en güvenli ve en hızlı şekilde karşı tarafa iletilmesi etkin iletişimdeki en temel amaçtır. Fiber optik haberleşme sistemlerinde yarı iletken (diyot) lazerlerin ışık kaynağı olarak kullanılmaya başlanmasının en önemli sebeplerinden biri, iletilen bilgide bozulma ve zayıflamayı en aza indirerek, çok kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbelerle bilgi aktarımı sağlanmaktadır. Bu zayıflama 1350 nm’de 0,5 dB/km olarak elde edilirken 1550 nm’de 0,2 dB/km’dir. Kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbe çıkışı veren diyot lazerler üretmek için, kavite üzerinde farklı işlevlere sahip çok bölümlü yapılar üretilir. Fiber optik haberleşme sistemlerinde, yüksek güçlü lazerler sayesinde tekrarlayıcıların sayısı azaltılmakta ve optik bilginin dispersiyona uğraması minimuma indirilmektedir. Bununla birlikte, çok kısa süreli optik darbeler üreterek daha fazla optik bilginin iletilmesi yani bant genişliğinin artması sağlanmaktadır. Bu tezde, kavite uzunluğu kısa ($<500 \mu m$) tutularak InGaAsP/InP (1350 nm) ve AlGaInAs/InP (1550 nm) malzeme yapısı kullanılarak kazanç ve soğurma bölümlerine sahip olan mod kilitli diyot lazerlerin farklı konfigürasyonlarda tasarım ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Üretilen lazerlerin ışık çıkışı-akım (L-I), akım-gerilim (I-V), optik spektrum ve optik darbe gibi karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

2025, 87 Sayfa

Anahtar Kelimeler: InP, Yarı iletken, Diyot lazer, Lazer fabrikasyonu, Mod kitleme

ABSTRACT

Ph.D

DESIGN AND FABRICATION OF INP-BASED PASSIVE MODE-LOCKED MULTISECTION DIODE LASERS

Rukiye AKSAKAL

Erzurum Technical University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

The primary aim of effective communication is to deliver the intended messages to the other party in the most secure and fastest way possible. In optoelectronic communication, semiconductor (diode) lasers have begun to be used as light sources, and one reason these lasers are significant light sources in fiber optic communication systems is that they enable information transfer through very short and high-power optical pulses, minimizing distortion in the transmitted data. While an attenuation of 0,5 dB/km is achieved at 1350 nm, it is 0,2 dB/km at 1550 nm. To produce diode lasers that emit short-duration and high-power optical pulses, multi-section structures with different functions are developed over the cavity. In fiber optic communication systems, the number of repeaters is reduced by using high-power lasers, thereby minimizing the dispersion of optical information. Additionally, by generating very short optical pulses, it is possible to transmit more optical information, which increases bandwidth. In this thesis, different configurations of diode lasers with gain and absorption sections were designed and fabricated by keeping the cavity length short ($<500\text{ }\mu\text{m}$) using InGaAsP/InP (1350 nm) and AlGaInAs/InP (1550 nm) material structures. Characterization measurements as light output-current (L-I), current-voltage (I-V), optical spectrum and optical pulses were conducted on the produced lasers.

2025, 87 page

Keywords: InP, Semiconductor, Diode laser, Laser Fabrication, Mode Locked

TEŞEKKÜR

Bilgisi, tecrübesi ve sabrıyla her zaman bana rehberlik eden; çalışmamın her aşamasında yön gösteren, yapıcı eleştirileri ve teşvik edici yaklaşımıyla beni motive eden ve karşılaştığım her türlü zorluğun üstesinden gelmemde yol gösteren değerli danışman hocam Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a ayırdığı kıymetli vakit ve sağladığı destek için sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez İzleme Komitesin'de yer alan ve tez çalışmamın tamamlanması için akademik bilgilerini benimle paylaşan değerli hocalarım Prof. Dr. Tevhit KARACALI, Doç. Dr. Çağlar DUMAN ve karakterizasyon ölçümlerine yönelik desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Ömer ÇOBAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarına gerekli zamanı ayırabilmeme imkân sağlayan Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nden hocalarım Prof. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU ve Prof. Dr. Abdullah BAŞÇI'ye ve tez çalışmamı yürütürken manevi desteği ile daima yanımda olan arkadaşım Arş. Gör. Burcu TİRYAKİ'ye teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarımı bünyesinde bulunan temiz odada gerçekleştirdiğim Erzurum Teknik Üniversitesi, Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ndeki ve Atatürk Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümündeki çalışma arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Yapılan bu çalışmayı 122E681 nolu proje ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK)'a ve 2211-C Yurt İçi Öncelikli Alanlar Doktora Burs Programı ile doktora eğitimimi destekleyen TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı'na (BİDEB) teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma süresince ve eğitim hayatımın her aşamasında yanımda olan bana her zaman destek veren sevgili aileme sonsuz teşekkür ederim.

Rukiye AKSAKAL

Ocak 2025

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1. Lazer Nedir?	1
1.2. Lazer Türleri.....	2
1.3. Yarı İletken Lazerler	4
1.4. Yarı İletken Lazer Rezonatörler.....	7
1.5. Yarı İletken Lazer Çeşitleri.....	9
1.5.1. Yarı iletken lazerlerin yanal hapsetme mekanizmalarına göre sınıflandırılması ..	10
1.5.2. Yarı iletken lazerlerin aktif tabaka kalınlığına göre sınıflandırılması	11
1.6. Çok Bölümlü Yarı İletken Lazerler	13
1.6.1. Kazanç bölümü.....	14
1.6.2. Soğurma bölümü	14
1.6.3. Darbe oluşturma ve şekillendirme mekanizması	15
1.7. Yarı İletken Lazerlerden Kısa Süreli Optik Darbe Üretimi	16
1.7.1. Kazanç anahtarlama tekniği	16
1.7.2. Q-anahtarlama tekniği.....	17
1.7.3. Mod (Kip) kilitleme tekniği	18
1.7.4. Aktif mod kilitli yarı iletken lazerler	22
1.7.5. Pasif mod kilitli yarı iletken lazerler	23
1.7.6. Hibrit mod kilitli yarı iletken lazerler	24
2. KAYNAK ÖZETLERİ	25
3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Yarı İletken Lazer Fabrikasyonunda Kullanılan Malzemelerin Yapısı	30
3.2. Çoklu Bölümlü Yarı İletken Lazer Üretim Aşamaları.....	31
3.3. Yarı İletken Lazer Fabrikasyonunda Kullanılan Maskeler	34
3.4. Yarı İletken Lazer Fabrikasyon Adımları	34
3.5. InP Aşındırma İşlemi	45

3.5.1. Kuru aşındırma (dry etching).....	45
3.6. P ve N Kontak Kaplama.....	57
3.7. Hızlı Termal Tavlama	58
3.8. Tek Kazançlı Lazerin Optik Mikroskop ve 3D Profilometre Görüntüleri.....	59
3.9. İki Kazançlı Lazerin Optik Mikroskop ve 3D profilometre görüntüleri.....	60
3.10. Lazer Ölçüm Düzenegi	61
3.11. Lazerlerin Kesilmesi (Cleavage).....	65
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	66
4.1. 1350 nm (ATRK) ve 1550 nm (IEGENS) Lazerlerin I-V ve L-I Karakterizasyon Sonuçları.....	66
4.2. İki Bölümlü ve Üç Bölümlü Lazerlerin Pasif Mod Kilitleme Spektrum Sonuçları.....	67
4.2.1. 1350 nm (ATRK) iki bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları.....	67
4.2.2. 1350 nm (ATRK) üç bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları.....	68
4.2.3. 1550 nm (IEGENS) iki bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları	71
4.2.4. 1550 nm (IEGENS) üç bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları	72
4.3. Pasif Mod Kilitleme ile Elde Edilen Optik Darbe Sonuçları	73
4.3.1. İki bölümlü lazerlerden elde edilen optik darbeler	74
4.3.2. Üç bölümlü lazerlerden elde edilen optik darbeler	75
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	78
KAYNAKLAR	81

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

B	Bant genişliği
E	Foton enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
h	Plank Sabiti
k	Momentum
L	Lazer Kavite Uzunluğu
n	Kırılma İndisi
λ	Dalgaboyu
ν	Frekans
τ	Darbe genişliği

Kisaltmalar

3D	Üç boyutlu
CW	Sürekli dalga
DBR	Dağıtılmış bragg yansıtıcı
DC	Doğru akım
DFB	Dağıtılmış geri beslemeli kavite
DI	Deiyonize su
F-P	Fabry-Perot
fs	Femtosaniye
ICP	İndüktif kuplajlı plazma
ICP-RIE	İndüktif kuplajlı plazma reaktif iyon aşındırma
MQW	Çoklu kuantum çukur
PECVD	Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme
ps	Pikosaniye
PR	Fotorezist
QW	Kuantum çukur
QD	Kuantum nokta
Ra	Ortalama pürüzlülük
RIE	Reaktif iyon dağlama
SCH	Türdeş olmayan ayırık hapsetme tabakası
SEM	Taramalı elektron mikroskobu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Yükselteç şematiği (Çakmak 2018).....	1
Şekil 1.2. (a) Soğurma (absorpsiyon) ve (b) emisyon (Çakmak 2018).	2
Şekil 1.3. (a) Spontane emisyon ve (b) uyartılmış (stimulated) emisyon (Çakmak 2018).	2
Şekil 1.4. İleri yönde kutuplanmış p-n eklem yapısı (Basu 2015).....	4
Şekil 1.5. Heteroyapılı lazerlerde; a) aktif tabaka daha düşük yasak enerji aralığına sahiptir ve b) aktif tabaka daha yüksek kırılma indisine sahiptir (Çakmak 2018).....	5
Şekil 1.6. a) Direkt bant aralığı ve b) indirekt bant aralığı (Çakmak 2018).	6
Şekil 1.7. Fabry-Perot kavitede modların şekillenmesi (Çakmak 2018).	7
Şekil 1.8. Fabry-Perot rezonatöründe mod oluşumu (Çakmak 2018).	7
Şekil 1.9. a) DFB ve b) DBR spektrumları ve kavite ortamları (Çakmak 2018).....	8
Şekil 1.10. Yarı iletken lazerlerin yapısal sınıflandırılması (Çakmak 2000).....	10
Şekil 1.11. a) Geniş alan (broad-area) lazerler b) Kazanç-kılavuzlu (gain-guided) lazerler ve c) İndis-kılavuzlu (index-guided) lazerler.	10
Şekil 1.12. Farklı sınırlama konfigürasyonlarına göre durumların yoğunluğu; a) külçe (bulk), b) kuantum çukur (quantum well), c) kuantum tel (quantum wire) ve d) kuantum nokta (quantum dot) (Çakmak 2018).....	12
Şekil 1.13. InGaAs/AlGaAs çoklu kuantum çukur lazer ve enerji bant diyagramı (Duman 2014).	13
Şekil 1.14. Çok bölümlü yarı iletken lazerler (Bajek 2016).	13
Şekil 1.15. Darbe oluşturma ve şekillendirme mekanizması (Lau 2000).	15
Şekil 1.16. Kazanç anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).....	17
Şekil 1.17. Q-anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).	18
Şekil 1.18. Mod kilitleme tekniği (Bajek 2016).	19
Şekil 1.19. Mavi dikey çizgiler, L uzunluğundaki lazer kavitesinde desteklenen modları; kırmızı çizgi, kazanç ortamının bant genişliğini; yeşil çizgiler ise lazer emisyon spektrumunu oluşturan boyuna modları gösterir (Bajek 2016).	20
Şekil 1.20. Üstte lazer kavitesi içinde sabit faz ilişkili ayrı modların salınımı, altta mod kilitleme sonucu oluşan darbeli ışınım gösterilmektedir (Bajek 2016).	21
Şekil 1.21. Darbe katarı.	21
Şekil 1.22. Aktif mod kilitli yarı iletken lazerin şematiği.	22

Şekil 1.23. Pasif mod kilitli yarı iletken lazerin şematiği.	23
Şekil 1.24. Hibrit mod kilitli yarı iletken lazerin şematiği.	24
Şekil 3.1. Çoklu bölmeli yarı iletken lazer üretim aşamalarının gösterimi.	33
Şekil 3.2. Litografi işleminde kullanılan ve Clewin programında çizilen maskeler.	34
Şekil 3.3. Çoklu yarı iletken tabaka temizlik aşaması.	35
Şekil 3.4. PECVD ile Si_3N_4 kaplama ve birinci maskesiz litografi.	35
Şekil 3.5. (a) Banyo (development) aşamasının şematiği ve (b), (c) maskeleme cihazında farklı maskelerden görüntüler.	36
Şekil 3.6. Temiz odada maskesiz hizalama cihazında gerçekleştirdiğimiz litografi işlemi.	36
Şekil 3.7. Termal buharlaştırma cihazı ile nikel kaplama.	37
Şekil 3.8. Aseton içinde PR kaldırılarak nikel aşındırma maskesi oluşturma.	37
Şekil 3.9. (a ve b) Ni maske optik mikroskop ve (c) profilometre görüntüsü.	37
Şekil 3.10. Si_3N_4 aşındırma.	38
Şekil 3.11. Si_3N_4 ICP-RIE cihazında aşınma görüntüleri.	39
Şekil 3.12. ICP-RIE cihazında Si_3N_4 aşınma grafiği.	39
Şekil 3.13. (a) H_2SO_4 ile nikelin kaldırılması ve (b) Optik mikroskop görüntüsü.	39
Şekil 3.14. (a) ICP-RIE cihazı ile InP aşındırma ve Si_3N_4 kaldırma ve (b) Optik mikroskop görüntüsü.	40
Şekil 3.15. Temiz odada aşındırma yaparken kullandığımız ICP-RIE cihazı.	40
Şekil 3.16. ICP-RIE aşındırma şematiği.	41
Şekil 3.17. ICP-RIE cihazı kullanılarak elde edilen InP aşınma görüntüleri.	41
Şekil 3.18. Nikel ve Si_3N_4 kaldırma işleminin optik profilometre görüntüleri.	42
Şekil 3.19. (a) PECVD ile Si_3N_4 kaplama ve ikinci maskesiz litografi ve (b) banyo (development).	42
Şekil 3.20. İkinci kez Si_3N_4 kaplama işleminin optik mikroskop görüntüleri.	43
Şekil 3.21. İkinci litografi işleminden sonra elde edilen dalga kılavuzunun maskeleme cihazındaki görüntüsü.	43
Şekil 3.22. (a) Si_3N_4 aşındırma ve (b) asetonla fotorezistin kaldırılması.	43
Şekil 3.23. Si_3N_4 aşındırma işleminin optik mikroskop görüntüleri: (a) 25x ve (b) 20x lensler kullanılarak elde edilen optik mikroskop görüntüleri.	44
Şekil 3.24. Üçüncü maskesiz litografi.	44
Şekil 3.25. Üçüncü maskesiz fotolitografi işleminin maskeleme cihazındaki (üstteki şekil)	45

Şekil 3.26. İki farklı deney sonucuna ait SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2=16/28$ sccm, $R_a=0,293 \mu\text{m}$ ve (c, d) $\text{CH}_4/\text{H}_2=16/32$ sccm $R_a=0,182 \mu\text{m}$	48
Şekil 3.27. İki farklı deney sonucuna ait SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2= 10/20$ sccm, $R_a=0,282 \mu\text{m}$ ve (c, d) $\text{CH}_4/\text{H}_2= 20/40$ sccm, $R_a= 0,187 \mu\text{m}$	49
Şekil 3.28. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2= 16/32/5$ sccm, $R_a=0,205 \mu\text{m}$ (c,d) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2= 16/32/10$ sccm, $R_a=0,176 \mu\text{m}$ ve (e,f) $\text{CH}_4/\text{H}_2/ \text{Cl}_2 = 16/32/20$ sccm, $R_a=2,02 \mu\text{m}$	50
Şekil 3.29. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2=10/20/4$ sccm, $R_a=0,201 \mu\text{m}$, (c,d) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2= 10/20/6$ sccm, $R_a=0,137 \mu\text{m}$ (e, f) ve $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2= 10/20/10$ sccm, $R_a=0,218 \mu\text{m}$	51
Şekil 3.30. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{H}_2/\text{Cl}_2= 10/18$ sccm, $R_a=0,292 \mu\text{m}$, (c, d) $\text{H}_2/\text{Cl}_2=8/20$ sccm, $R_a= 0,266 \mu\text{m}$ ve (e, f) $\text{Cl}_2=18$ sccm, $R_a=0,349 \mu\text{m}$	52
Şekil 3.31. ICP-RIE ile aşındırılan InP numunelerin profil görüntüleri: (a) $\text{CH}_4/\text{H}_2= 20/40$ sccm, (b) $\text{H}_2/\text{Cl}_2= 10/18$ sccm ve (c) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2= 10/20/6$ sccm.....	53
Şekil 3.32. AlGaInAs/InP lazer için $1,7 \mu\text{m}$ aşınma profilometre görüntüleri.	55
Şekil 3.33. InGaAsP/InP lazer için $1,5 \mu\text{m}$ aşınma profilometre görüntüleri.	56
Şekil 3.34. Numunenin p tarafı, Ti/Au (20nm/150nm) kaplandı.....	57
Şekil 3.35. Numunenin n tarafını inceltme (polishing) işlemi.	57
Şekil 3.36. Numunenin n tarafına metal alaşım kaplama işlemi: Au/Ge/Au/Ni/Au (14nm/14nm/14nm/11nm/200nm).	58
Şekil 3.37. Tavlamadan önce yüzeyin optik mikroskop görüntüsü.	58
Şekil 3.38. Tavlamadan sonra optik mikroskop görüntüleri: (a) reçete 1 ve (b) reçete 2.	59
Şekil 3.39. Tek kazançlı lazerler için optik mikroskop görüntüleri.....	59
Şekil 3.40. Tek kazançlı lazerler için 3D profilometre görüntüleri: (a) yukarıdan, (b) yandan, (c) sol üstten, (d) üç boyutlu yukarıdan ve (e) iki boyutlu yukarıdan.	60
Şekil 3.41. İki kazançlı lazer maskeleme cihazı görüntüsü.	60

Şekil 3.42. İki kazançlı lazerlerin optik mikroskop görüntüleri (a) 10x odaklı lensde (b) 25x odaklı lensde (c) soğurma bölümü sondayken.	61
Şekil 3.43. İki kazançlı lazerin 3D profilometrede farklı konumlardaki görüntüleri: (a) üstten görünüşü ve (b) yandan görünüş.	61
Şekil 3.44. Lazer ölçüm şematığı.....	62
Şekil 3.45. (a) Optik güç ölçerin sensörü ve (b) optik güç ölçer.	62
Şekil 3.46. Optik spektrum analizör.	62
Şekil 3.47. Ölçüm sisteminde kullanılan; (a) akım kaynağı ve (b) gerilim kaynağı.	63
Şekil 3.48. Kullandığımız New Focus marka fotodedektör.....	63
Şekil 3.49. Lazer ölçüm düzeneği.....	63
Şekil 3.50. Ölçüm alınırken lazer ölçüm düzeneği.	64
Şekil 3.51. Lazerin kazanç ve soğurma bölümlerine temas ettirilen prob görüntüleri. ..	64
Şekil 3.52. Fiber optik kablo ile optik spektrum ölçüm.....	65
Şekil 3.53. Lazerlerin kesilmesi için kullanılan çizici (scriber) cihazı.	65
Şekil 3.54. (a) Fabrikasyonu tamamlanan lazerler ve (b) çizip kırdığımız lazerler.....	65
Şekil 4.1. 1350 nm lazerler için L-I-V karakteristiği.....	66
Şekil 4.2. 1550 nm lazerler için L-I-V karakteristiği.....	67
Şekil 4.3. Tek kazançlı iki bölümlü 1350 nm lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA, b) I=40 mA, c) I=40 mA, V=-0.5 V ve d) I=40 mA, V=-1.5 V.	68
Şekil 4.4. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü sonda) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA ve b) I=40 mA, V=-1.5 V.	69
Şekil 4.5. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) lazerlerin spektrum sonuçları a) I=20 mA ve b) I=40 mA, V=-1.5 V.	69
Şekil 4.6. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) olan lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=40 mA ve b) I=60 mA, V=-1.5 V.	70
Şekil 4.7. 1350 nm iki kazançlı üç bölümlü soğurma bölümü ortada olan lazerlerin spektrum sonuçları a) I=60 mA, V=-1.5 V ve b) I=80 mA, V=-1.5 V.	70
Şekil 4.8. 1550 nm iki bölümlü (tek kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA ve b) I=40 mA.....	71
Şekil 4.9. 1550 nm iki bölümlü (tek kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA, b) I=40 mA ve c) I=40 mA, V=-1.5 V.	72

- Şekil 4.10.** 1550 nm üç bölümlü (iki kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) $I=20$ mA, b) $I=40$ mA, c) $I=40$ mA, $V=-0.5$ V ve d) $I=40$ mA, $V=-1.5$ V.73
- Şekil 4.11.** Enstrümantasyon yükseltici devre şeması (Kaleli, 2009).74
- Şekil 4.12.** İki bölümlü (tek kazançlı ve soğuruculu) lazerlerden farklı ters kutuplama gerilimleri (V) için elde edilen optik darbeler: a) $V=-0.5$ V, b) $V=-1$ V ve c) $V=-1.5$ V.75
- Şekil 4.13.** Üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) lazerlerde farklı ters kutuplama gerilimleri (V) için elde edilen optik darbeler: a) $V=-0.5$ V, b) $V=-1$ V ve c) $V=-1.5$ V.76



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. AlGaInAs/InP malzeme yapısını oluşturan katmanlar	30
Çizelge 3.2. InGaAsP/InP /InP malzeme yapısını oluşturan katmanlar	31
Çizelge 3.3. PECVD ile Si ₃ N ₄ kaplama parametreleri	35
Çizelge 3.4. Si ₃ N ₄ aşındırma parametreleri	38
Çizelge 3.5. O ₂ plazma ile temizlik parametreleri	38
Çizelge 3.6. InP'nin ICP-RIE aşındırması sırasında kullanılan parametreler	40
Çizelge 3.7. CH ₄ , H ₂ , Cl ₂ gaz akış oranları ve elde edilen sonuçlar	54
Çizelge 3.8. Tavlama için iki farklı reçete	58

1. GİRİŞ

1.1. Lazer Nedir?

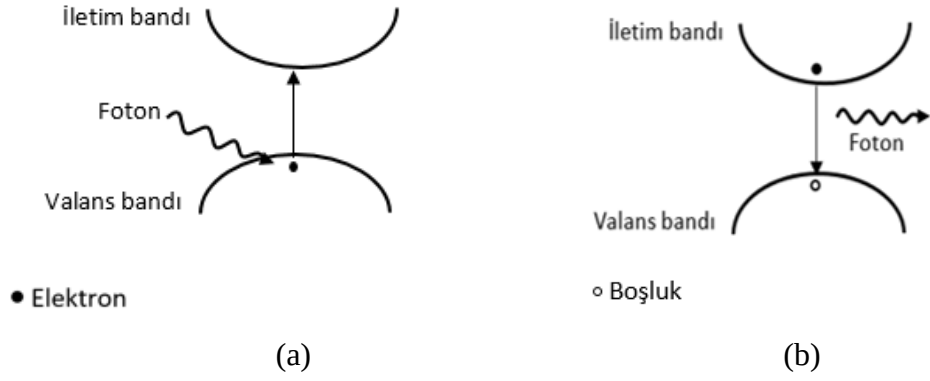
Lazer, "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (Uyartılmış Emisyon ile Işığı Güçlendirme) kısaltmasıyla anılan ve belirli bir dalga boyunda koherent (faz uyumlu) yoğun ışık üreten bir optik cihazdır (Okoye and Yamada 2010). Optik bir yükselteç olan lazerler, ışık dalgalarının güçlendirilmesi amacıyla kullanılan cihazlardır. Lazerler, bir enerji kaynağı (pompa) ile uyarılır ve bu uyarılmış atomlar koherent fotonlar üretir. Bu fotonlar, lazer sistemini oluşturan optik kazanç ortamında ve geri beslemeyi sağlayan mekanizmalar sayesinde sürekli olarak gidiş-dönüş yapar ve güçlenir.



Şekil 1. 1. Yükselteç şematiği (Çakmak 2018).

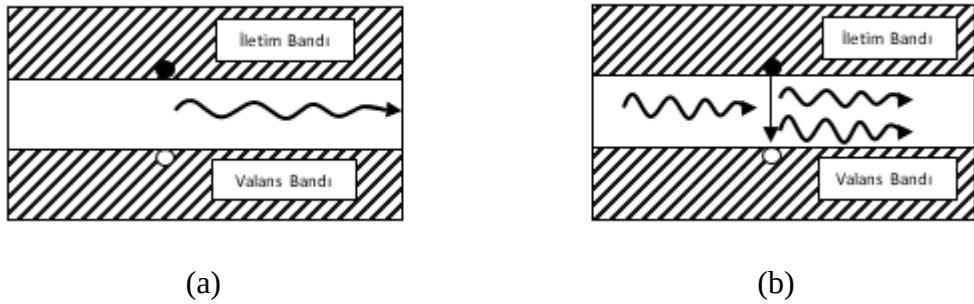
Lazerlerde optik kazanç oluşturmak için lazerler pompalama ile sürülerek nüfus tersinmesi sağlanmalıdır. Lazerlerde pompalama, optik, elektron bombardımanı, kimyasal enerji serbest bırakımı ve elektrik akımı ile yapılmaktadır. Yükseltme ortamında kazanç sağlanması için gerekli olan nüfus tersinmesinde üst seviyedeki enerji seviyesi, alt seviyeden daha fazla nüfusa sahiptir. Optik yükseltme tersinir popülasyonlu bir sistemden uyartılmış emisyon ile elde edilir. Böylece lazerlerden güçlü, koherent ve monokromatik (tek dalgaboyuna sahip) bir ışık çıkışı elde edilmiş olur (Okur 2000).

Atomun enerji seviyeleri arasında yukarı ya da aşağı geçiş sonucu foton üretilmekte (emisyon) veya soğurulmaktadır. Şekil 1.2'de soğurma ve emisyon durumu gösterilmiştir.



Şekil 1. 2. (a) Soğurma (absorpsiyon) ve (b) emisyon (Çakmak 2018).

Işınımsal rekombinasyon süresince, elektron-boşluk çifti yeniden birleşirken bant aralığı enerjisine E_g karşılık gelen bir enerji salınımı gerçekleşir. Bu enerji, genellikle bir foton şeklinde yayılır ve yayılan fotonun frekansı (ν) veya dalgaboyu (λ), enerji koruma ilişkisini $E_g = h\nu = hc/\lambda$ sağlar. Bu, Şekil 1.3'te gösterildiği gibi spontane emisyon ve uyartılmış emisyon olarak bilinen iki optik proses şeklinde oluşur (Çakmak 2018).



Şekil 1. 3. (a) Spontane emisyon ve (b) uyartılmış (stimulated) emisyon (Çakmak 2018).

Spontane emisyon durumunda, fotonlar aralarında hiçbir faz ilişkisi olmayan random yönlerde yayılırlar. Uyartılmış emisyon ise aksine var olan bir fotonla başlatılır. Yayılan foton, orijinal fotonla yalnızca aynı dalgaboyunda (frekansta) değil aynı zamanda aynı fazdadır (Çakmak 2018).

1.2. Lazer Türleri

Theodore Maimann'ın ilk katı hal lazeri icadı ve aynı dönemde Ali Javan'ın Helyum-Neon lazeri geliştirmesi, fotonik camiasında büyük bir heyecan yarattı (Maiman

1960; Javan et al. 1961). Özellikle 1962’de yarı iletken lazerlerin keşfi, lazerlerin optik iletişimde ışık kaynağı olarak kullanılmasına öncülük etti (Dumke 1962). Lazerler aktif ortamlarına göre şu şekilde sınıflandırılabilir:

Katıhal lazerleri: Katı hal lazerleri, lazer ışığını üretmek için katı bir malzemenin kullanıldığı lazer türleridir. Aktif ortam genellikle kristal ya da cam malzemelerle birlikte, neodimyum veya erbiyum gibi nadir toprak elementleri ile katkılanır. Bu katkılar, lazerin çalışması için gerekli yarı kararlı enerji seviyelerini oluşturur. En bilinen katı hal lazerlerinden biri, YAG kristali kullanılarak yapılan Nd:YAG lazeridir. İlk üretilen katı hal lazerleri arasında yer alan yakut lazerlerinde de aktif ortam, kristal yapıdadır. Katı hal lazerleri, yüksek enerji yoğunlukları ve darbe modunda çalışma özellikleri sayesinde endüstride, tıbbi uygulamalarda ve bilimsel araştırmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Okur 2000).

Gaz lazerleri: Gaz lazerler, lazer ışığını üretmek için gaz halindeki bir aktif ortam kullanan lazer türleridir. Bu lazerlerde, gaz karışımları genellikle bir tüp içerisinde düşük basınç koşullarında bulunur ve elektriksel enerji ile uyarılarak yüksek enerji seviyelerine çıkarılır. En bilinen gaz lazerlerden biri, kırmızı ışık yaymasıyla tanınan Helyum-Neon (He-Ne) lazeridir (Okur 2000).

Fiber Lazerler: Lazer ışığını üretmek için optik fiberleri kullanan lazer türleridir. Bu lazerler, genellikle bir tür nadir toprak elementi olan itriyum, neodimyum veya erbiyum ile katkılanmış fiber optik kablolar içerir. Fiber lazerler, geniş bir dalga boyu aralığında çalışabilme yetenekleri sayesinde esnek uygulama seçenekleri sunar (Okur 2000).

Yarı İletken Lazerler: Lazer ışını üretiminde yarı iletken malzemelerin kullanıldığı optoelektronik cihazlardır ve genellikle p-tipi ile n-tipi yarı iletkenlerin birleşimiyle oluşturulan bir aktif bölge içerir. Bu lazerler, küçük boyutları, düşük enerji tüketimleri ve yüksek verimlilikleri ile bilinir. Yüksek hızlı modülasyon yetenekleri sayesinde, telekomünikasyon, veri iletimi ve optik depolama gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, biyomedikal alanlarda, özellikle lazer terapisi ve görüntüleme tekniklerinde de önemli bir yer tutarlar. Yarı iletken lazerlerin temel avantajları arasında,

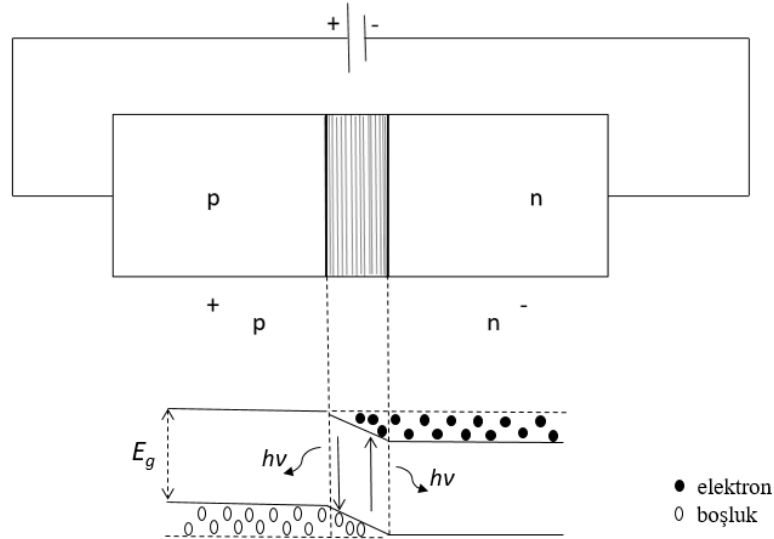
1. GİRİŞ

geniş dalga boyu aralığı, kompakt tasarım, dayanıklılık ve düşük işletme maliyetleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, sıcaklık değişimlerine karşı hassasiyetleri ve düşük dalga boyu stabilitesi gibi bazı dezavantajlar da mevcuttur. Bu nedenle, yarı iletken lazerlerin performansını artırmak ve uygulama alanlarını genişletmek için sürekli olarak araştırmalar yapılmaktadır.

Bu lazer türlerine ek olarak sıvı lazerler, kimyasal lazerler, biyolojik lazerler gibi lazer çeşitleri de vardır.

1.3. Yarı İletken Lazerler

Yarı iletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri, belirli katkı maddeleri ile değiştirilebilir. 5. grup elementleri (örneğin fosfor ve arsenik), fazla değerlilik elektronlarına sahip (donors-vericiler) olduklarından, yarı iletkenin n-tipi olmasını sağlar. Buna karşılık, değerlilik elektron sayısı düşük olan (acceptors-alıcılar) 3. grup elementleri (örneğin bor, indiyum, galyum, alüminyum), p-tipi yarı iletkenlerin oluşumuna katkıda bulunur.



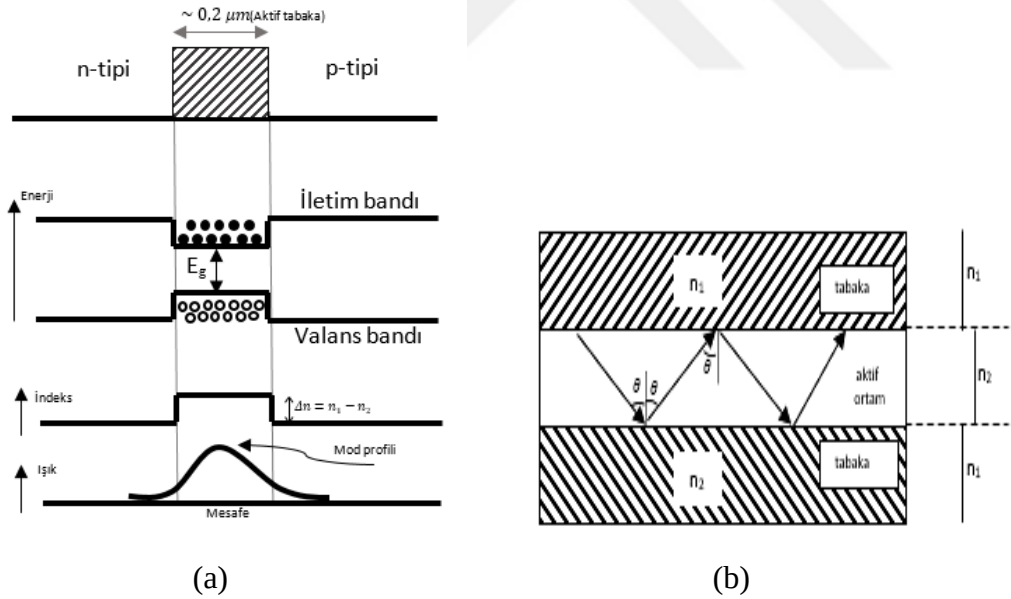
Şekil 1. 4. İleri yönde kutuplanmış p-n eklem yapısı (Basu 2015).

Bir p-n ekleminden lazer ışığı elde edebilmek için iki kritik şart bulunmaktadır: Birincisi, p-n eklemine ileri yönde kutuplanması ile oluşturulan nüfus terslenmesi sonucu elde edilen optik kazançtır. İkincisi, yarı iletken kristalindeki kırılma

1. GİRİŞ

yüzeylerinden yansıyan ışığın, yani aynaların sağladığı optik geri besleme mekanizmasıdır. Bu koşulların yerine getirilmesiyle üretilen lazer ışığı, tek bir dalga boyunda ve aynı fazda olan koherent dalgalardan oluşur. Harici bir gerilim uygulayarak p-n eklemi, ileri kutuplandığı zaman elektrik alanı azalır ve eklem boyunca elektron ve boşlukların (hole) difüzyonuna imkan sağlar. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi, elektronlar ve boşluklar dar bir boşaltılmış (deplasyon) bölgede uyarılmış veya uyarılmamış olarak rekombine olurlar. $h\nu \cong E_g$ 'lik foton enerjisi, uyarılmış rekombinasyon süresince yayılır. Bununla birlikte bu fotonlar da absorbe edilebilirler. Harici akım kritik değeri (threshold) aştığı zaman, tersinir popülasyon gerçekleşir. Böylece foton emisyon oranı absorpsiyonu aşar. Böylece p-n eklemine optik kazanç tesis edilmiş olur. Bir tek tip eklem (homojunction) için kazancın yüksek olduğu bölgenin kalınlığı çok küçüktür ($\sim 0,01 \mu m$), çünkü taşıyıcıları gömmek için hiçbir mekanizma yoktur (Çakmak 2018).

Farklı yarı iletken malzemeler arasındaki eklem, heteroyapı (heterojunction) olarak adlandırılmaktadır.



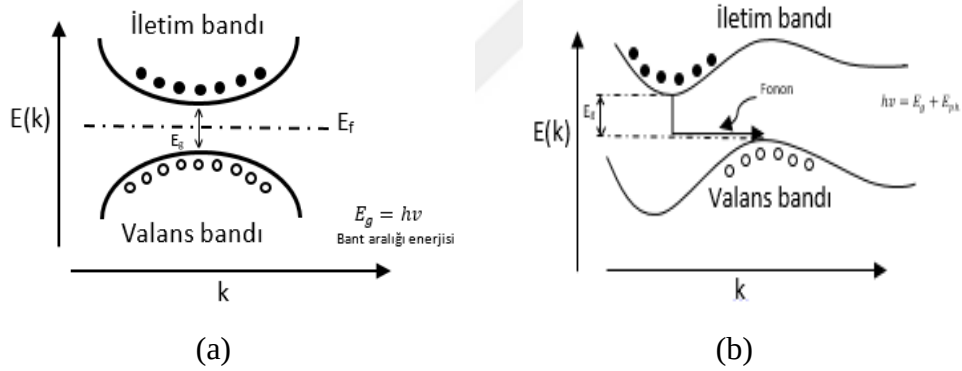
Şekil 1. 5. Heteroyapılı lazerlerde; **a)** aktif tabaka daha düşük yasak enerji aralığına sahiptir ve **b)** aktif tabaka daha yüksek kırılma indisine sahiptir (Çakmak 2018).

Valans ve iletim bandındaki en yüksek elektron enerjileri arasındaki enerji farkı yasak enerji aralığı olarak tanımlanır. Şekil 1.5(a)'da görüldüğü gibi heteroyapılı lazerlerde aktif tabaka daha düşük yasak enerji aralığına sahiptir. Bu sayede elektron-

1. GİRİŞ

boşluk yayılımını önlerler bu da taşıyıcı sınırlandırması (carrier confinement) sağlar ve böylece lazerler daha düşük eşik akımı ve yüksek sıcaklıklarda daha uzun süreli çalışma sergiler. Heteroyapıların diğer bir avantajı ise Şekil 1.5(b)'de görüldüğü gibi aktif bölgenin daha yüksek kırılma indisine sahip olmasıdır. Bu da fotonların aktif bölgede tutulmasını (optik hapsedme/optical confinement) sağlar. Yarı iletken malzeme tipleri genel olarak periyodik tablonun 4. grubundaki (örneğin silisyum ve germanyum gibi) elementlerden oluşur. P ve n tipi katkılandırmalar (doping) ise alıcı (akseptör) ve verici (donör) atomlara sahip olan 3. ve 5. grup elementlerinden elde edilir.

Lazerlerin, silisyum veya germanyum gibi 4. grup yarı iletkenlerden değil de 3-5 grubu yarı iletken bileşiklerden (örneğin GaAs, InP, AlGaAs, InGaAs vb.) yapılmasının sebebi, Şekil 1.6(b)'de görüldüğü gibi silisyum ve germanyum gibi yarı iletkenlerin indirekt bant aralığına sahip olmalarıdır. Öte yandan, 3-5 grubu yarı iletkenler, Şekil 1.6(a)'da gösterildiği gibi direkt bant aralığına sahiptir.



Şekil 1. 6. a) Direkt bant aralığı ve b) indirekt bant aralığı (Çakmak 2018).

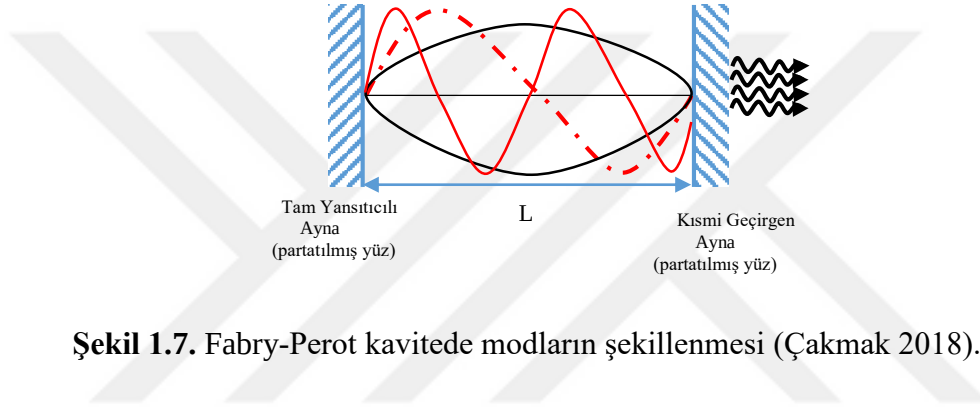
Direkt bant aralığına sahip yarı iletkenlerde (örneğin InP gibi), iletim bandındaki $E(k)$ enerjisinin minimum değeri, valans bandındaki $E(k)$ 'nin maksimum değeriyle aynı dalga vektöründe (k) oluşur. Bu nedenle, bir valans elektronu, bant aralığı enerjisine (E_g) eşit bir enerjiye sahip olduğunda doğrudan bir geçiş gerçekleşebilir. Bu durumda elektronlar, bir fotonun enerjisini absorbe ederek (soğurma) veya ters yönde geçişte bir foton yayarak (emisyon) doğrudan geçiş yapabilirler. Bu özellik, yarı iletken lazerler veya LED'ler için temel teşkil eder. Bir 3-5 yarı iletkeni için, iletim bandından valans bandına geçiş ışımsal (radyatif) olup, belirli bir foton enerjisi üretir. Öte yandan, indirekt bant aralığına sahip yarı iletkenlerde (örneğin Si gibi), iletim bandındaki enerjinin minimum

1. GİRİŞ

değeri, valans bandındaki maksimum değerden farklı bir dalga vektörü (k) değerinde oluşur. İndirekt geçişlerde foton oluşumu çok düşüktür, çünkü bu tür geçişlerde enerji ve momentum korunumu, yalnızca bir fononun katılımıyla sağlanabilir. Fonon enerjisi, E_g 'ye kıyasla çok küçük olduğundan, bu süreçler oldukça düşük bir ihtimalle gerçekleşir.

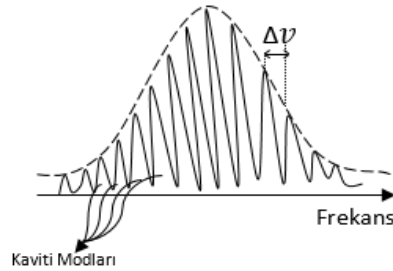
1.4. Yarı İletken Lazer Rezonatörler

Lazerin çalışması için gerekli olan optik geribesleme, yarı iletken lazerlerde üretilen fotonların içinde bulunduğu dalga kılavuzu (waveguide) ile sağlanır.



Şekil 1.7. Fabry-Perot kavitede modların şekillenmesi (Çakmak 2018).

En temel optik rezonatörlerden biri olan Fabry-Perot, Şekil 1.7’de görüldüğü gibi aygıtın her iki ucunda kısmi yansıtıcı yüzeylerin bulunması ve kazanç bölgesinin bu yüzeyler arasına yerleştirilmesiyle elde edilir. Fotonlar, paralel yüzler arasında ileri geri hareket ederek çoklu yansımalar yapar ve her yansıma döngüsünde fotonların bir kısmı kaviteden (kısmi geçirgen aynadan) ışık olarak dışarı çıkar. Aynalar arasındaki mesafe L , dalga boyunun yarısının tam katı olacak şekilde ayarlanırsa rezonans koşulu ($L = n \frac{\lambda}{2}$) sağlanır. Rezonans gerçekleştiğinde, kavite içinde duran dalgalar aynı fazda olup genlik artışı gözlenir. Bu durumda lazer ortamı bir yükselteç gibi işlev görür (Çakmak 2018).

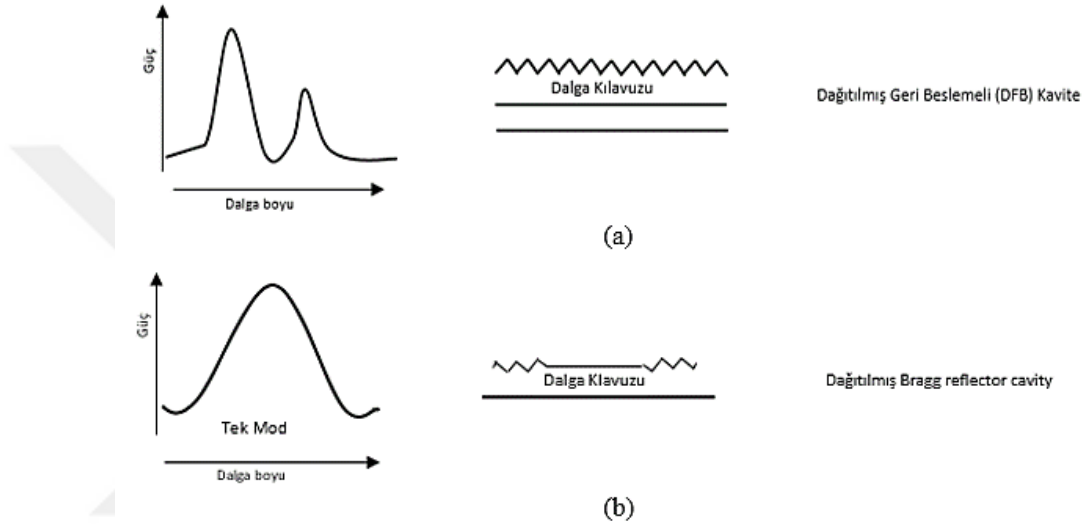


Şekil 1.8. Fabry-Perot rezonatöründe mod oluşumu (Çakmak 2018).

1. GİRİŞ

F-P kavitede, Şekil 1.8’de görüldüğü gibi birçok mod oluşur. Bu modların arasındaki uzaklık kavite uzunluğuna bağlıdır. Modlar arasındaki frekans aralığı ($\Delta\nu$), denklem 1.1’deki gibi ifade edilir. Burada c , boşluktaki ışık hızı; n , kırılma indisi ve L , kavite uzunluğudur.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2nL} \quad (1.1)$$



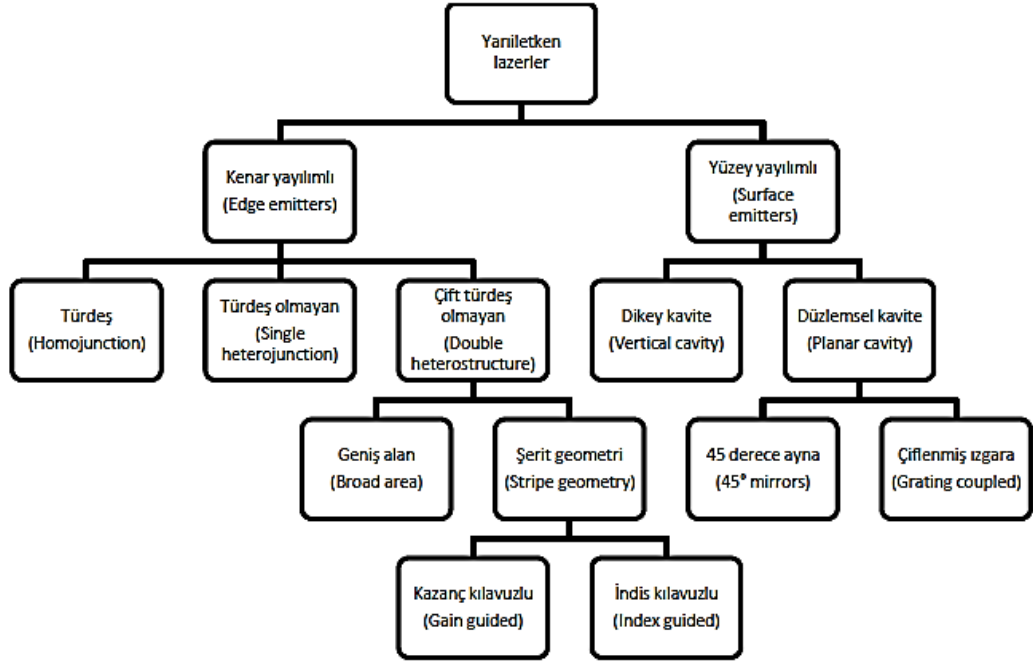
Şekil 1.9. a) DFB ve b) DBR spektrumları ve kavite ortamları (Çakmak 2018).

DFB lazerlerin üretim süreçleri, F-P lazerlerin üretiminden daha karmaşık olup, temel lazer yapısının büyütülmesi, ızgara tasarımının gerçekleştirilmesi ve üst tabakanın yeniden büyütülmesi gibi adımları içermektedir. Optik dalgaların ızgara ile etkin bir şekilde etkileşimde bulunabilmesi için ızgaranın, aktif bölgeye olabildiğince yakın bir konumda yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu karmaşıklık, DFB lazerlerin maliyetinin F-P lazerlere kıyasla daha yüksek olmasına yol açmaktadır. F-P ve DFB yapıları arasındaki temel farklılık, ışının oluştuğu aktif katmanın tasarımında yer almaktadır. Şekil 1.9’da DFB ve DBR rezonatörlerine ait kavite yapıları ve spektrumları verilmiştir. DFB lazerlerin aksine, DBR lazer diyotları, Bragg yansıtıcı olarak bilinen bir ızgara kullanmakta olup, bu ızgaranın uç kısımlarındaki kıvrımlar frekans seçici aynalar işlevi görerek geri besleme sağlamaktadır. DBR ve DFB lazerler, geri besleme mekanizmaları açısından farklılık gösterir. DBR lazerlerde, Bragg yansıtıcısı aktif bölgenin dışında, kavitenin uç bölgelerine yerleştirilmiştir ve bu yansıtıcılar frekans seçici aynalar olarak işlev görür. Geri besleme, bu Bragg yansıtıcıları aracılığıyla sağlanır ve çalışma Bragg

dalga boyunda gerçekleşerek tek bir mod baskın olur. Buna karşılık, DFB lazerlerde Bragg ızgarası aktif bölgenin içine yerleştirilmiştir ve geri besleme tüm kavite boyunca dağıtılmış şekilde sağlanır. DFB lazerlerde, faz kaydırma bölgesi olmadığında Bragg yansıtma bandının iki kenarında mod kazancı ortaya çıkabilirken, DBR lazerlerde geri besleme yapısı nedeniyle yalnızca tek bir mod gözlenir. Tek modlu DFB ve DBR lazerler, dar çizgi genişliği ile dalga boyu bölümlü çoğullama ve koherent dedeksiyon uygulamalarında kullanılmaktadır (Cakmak 2000).

1.5. Yarı İletken Lazer Çeşitleri

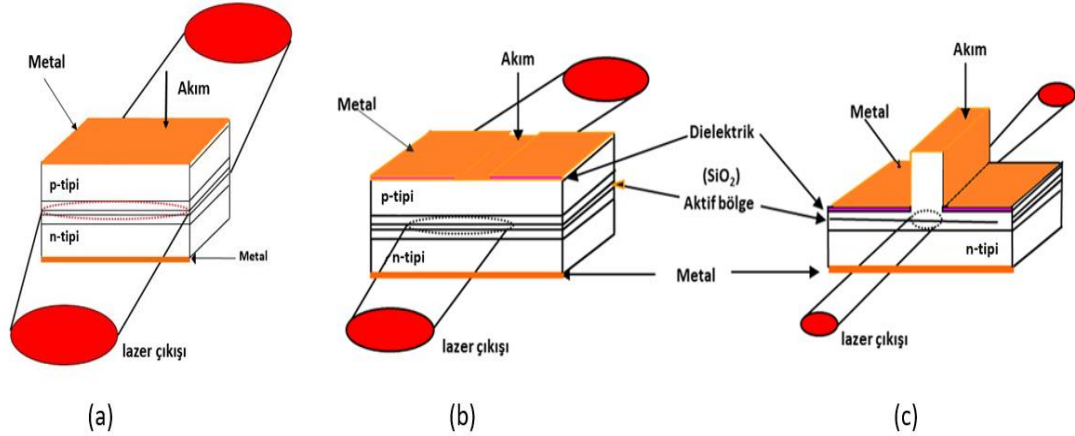
Yarı iletken lazerler çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Şekil 1.10'da, bu lazerlerin yapılarına göre yapılan bir sınıflandırmayı göstermektedir Diyot lazerler, yapısal özelliklerine göre kenar yayımlı (edge-emitting) ve yüzey yayımlı (surface-emitting) lazerler olarak sınıflandırılabilir. İlerleyen bölümlerde, ışık yayılımının kristalin kenarlarından gerçekleştiği kenar yayımlı lazerlere odaklanılmıştır. Bu tür lazerlerde, lazer kavitesi her iki uçtaki kesilmiş yüzeyler tarafından tanımlanır. Kenar yayımlı yarı iletken lazerler, homoelem (homojunction), tek heteroelem (single heterojunction) veya çift heteroelem (double heterojunction) lazerler olarak sınıflandırılır. Türdeş yarıiletken lazerler, foton ve taşıyıcı hapsedme mekanizmalarının yetersizliği nedeniyle yüksek eşik akımlarına sahipken, çift türdeş olmayan lazerler ise gelişmiş foton ve taşıyıcı hapsedme mekanizmaları sayesinde üstün lazer performansı sunmaktadır (Cakmak 2000).



Şekil 1.10. Yarı iletken lazerlerin yapısal sınıflandırılması (Cakmak 2000).

1.5.1. Yarı iletken lazerlerin yanal hapsetme mekanizmalarına göre sınıflandırılması

Yanal yönde(lateral direction), yani eklem düzleminde ışık veya taşıyıcıların hapsedilme mekanizması dikkate alındığında, Şekil 1.11’de gösterildiği üzere üç farklı lazer türünden söz edilebilir.



Şekil 1.11. a) Geniş alan (broad-area) lazerler b) Kazanç-kılavuzlu (gain-guided) lazerler ve c) İndis-kılavuzlu (index-guided) lazerler.

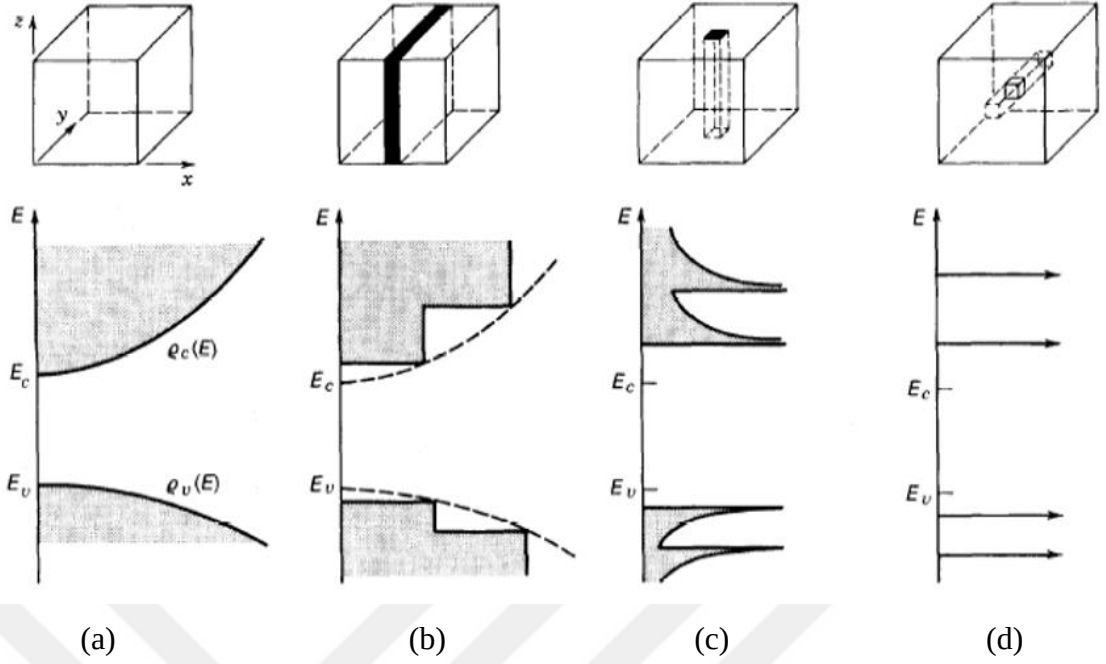
Geniş alan (broad-area) lazerler: Bu tür lazerlerde ışık çıkışı bütün aktif yüzey alanı boyuncaadır. Bu da eşik akımını yükseltir ve kazancı düşürür. Akımın yanal hapsedilme (lateral confinement) mekanizması yoktur.

Kazanç-kılavuzlu (gain-guided) lazerler: Oksit-şerit lazerlerde olduğu gibi bir şerit boyunca akımın yanal gömülümü (lateral confinement) sağlanır.

İndis-kılavuzlu (index-guided) lazerler: Yanal kırılma indisi (refractive index) değişimleri kullanılır. Üretim sürecindeki adımlardan biri olan aşındırma aşamasında, sırt-dalga kılavuzlu (ridge-waveguide) yapılar elde etmek için sıkça kullanılır. Sırt dalga kılavuzlu lazerler, oksit-şerit lazerler ile karşılaştırıldığında, eşik akımı düşük, verimliliği ve ömrü yüksek olduğu için, şerit-kılavuzlu olanlara göre tercih edilirler.

1.5.2. Yarı iletken lazerlerin aktif tabaka kalınlığına göre sınıflandırılması

Yarı iletken lazerler aktif tabaka kalınlığına göre sınıflandırılabilir. Aktif tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 0,1 μm ile 0,3 μm arasındaysa bu lazerler külçe lazer olarak adlandırılır. Eğer aktif tabaka kalınlığı de-Broglie dalga boyuna (yaklaşık 2-10 nm) kadar küçültülürse, bu durumda kuantum çukur (quantum well) lazerler elde edilir (Duman 2014). Bu yapılar, elektron ve boşlukları yalnızca iki boyutta hapseden bir kuyu gibidir (Vasil'ev 1995). Tek bir aktif tabakaya sahip olanlar, tekli kuantum çukur (single quantum well-SQW) lazer, birden fazla aktif tabakaya sahip olanlar ise çoklu kuantum çukur (multi quantum well-MQW) lazer olarak adlandırılmaktadır (Agrawal and Dutta 1993).



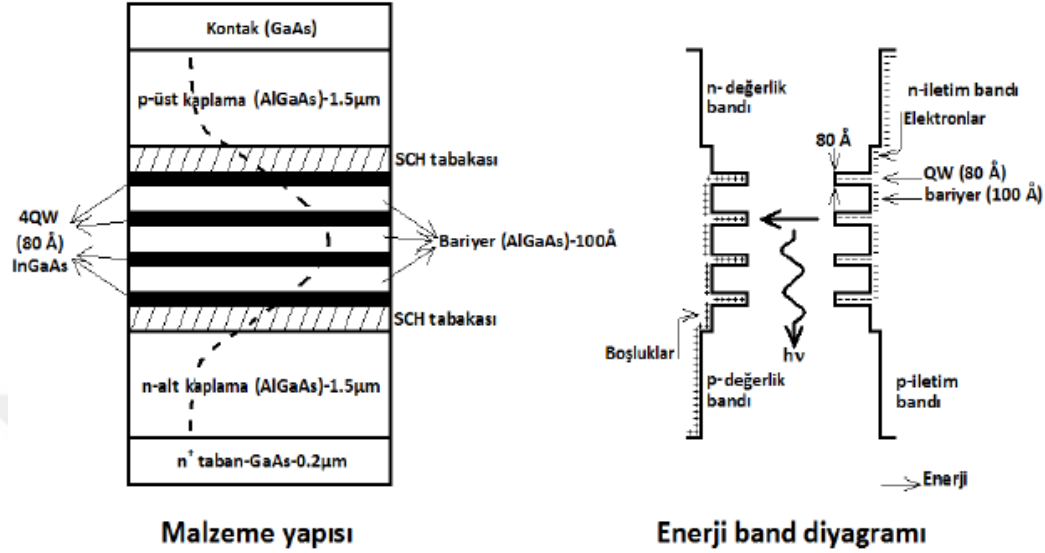
Şekil 1.12. Farklı sınırlama konfigürasyonlarına göre durumların yoğunluğu; a) külçe (bulk), b) kuantum çukur (quantum well), c) kuantum tel (quantum wire) ve d) kuantum nokta (quantum dot) (Çakmak 2018).

Geniş bant aralığına sahip başka bir malzeme ile çerçevelenmiş, dikdörtgen kesitli ve ince bir tel şeklindeki yarı iletken malzeme, kuantum tel (quantum wire) olarak adlandırılır. Bu sistem, elektronları ve boşlukları tek boyutta sınırlı bir alanda hapsederken, kuantum nokta (quantum dot) yapılarında elektronlar, boyutsuz olarak sınırlandırılmıştır (Saleh and Teich 2007) (Duman 2014). Şekil 1.12’de külçe, kuantum çukur (QW), kuantum tel ve kuantum nokta (QD) için durumların yoğunluğu dağılımı (taşıyıcıların bulunabileceği enerji seviyeleri) gösterilmiştir.

Kuantum çukur yapılar, enerji seviyelerinin ayrık olması sayesinde çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bunların başında, taşıyıcı yoğunluğundaki değişimle birlikte optik kazançta artış olması yer almaktadır. Ayrıca, QW lazerlerde lazere uygulanan akımın lazer dalga boyuna etkisi, külçe lazerlere göre daha düşüktür; bu durum, kuantum çukur lazerlerin enerji düzeylerinin basamaklı yapısından dolayı dar bir emisyon spektrumu sağlamasından kaynaklanmaktadır. Kuantum çukur lazerler, daha düşük eşik akımına sahip olmalarının yanı sıra, çoklu kuantum yapılar kullanılarak tekli kuantum çukur lazerlere kıyasla daha yüksek performans elde edilebilmektedir. Bu durum, düşük hapsedme kapasitesi problemini de aşarak yüksek güç çıkışı sağlar (Cakmak 2000). Şekil

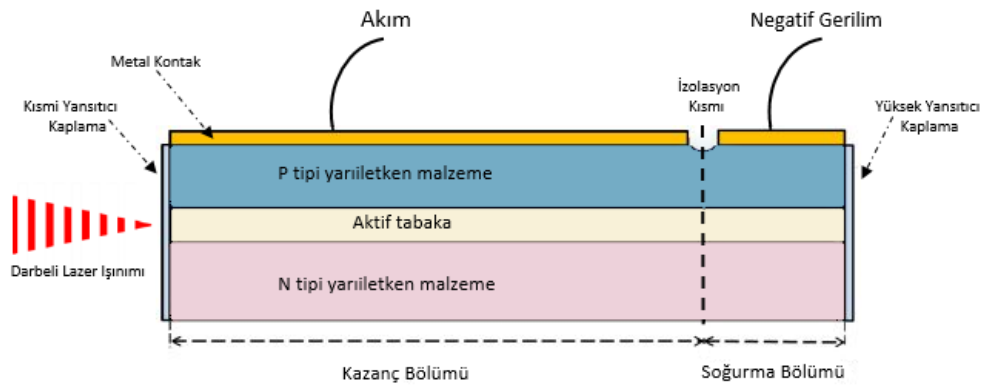
1. GİRİŞ

1.13'te bir InGaAs/AlGaAs çoklu kuantum çukur lazerin yapısı ve enerji düzeyleri verilmektedir (Duman 2014).



Şekil 1.13. InGaAs/AlGaAs çoklu kuantum çukur lazer ve enerji bant diyagramı (Duman 2014).

1.6. Çok Bölümlü Yarı İletken Lazerler



Şekil 1.14. Çok bölümlü yarı iletken lazerler (Bajek 2016).

Çok bölümlü yarı iletken lazerlerde Şekil 1.14'te görüldüğü gibi kavite üzerinde farklı işlevlere sahip birkaç bölüm oluşturulur. Bu yapılarda, bölmelere verilen akımların çeşitlendirilmesiyle her bir bölgedeki taşıyıcı yoğunluğu değiştirilebilmektedir (Duman 2014). Çok bölümlü lazerler, tek bölümlü yarı iletken lazerlere göre daha kısa darbeler üretebilmektedir (Derickson et al. 1992).

Bu bölümlü yapı, lazerin dalga boyu, faz, kazanç ve modülasyon derinliği gibi parametrelerin bağımsız olarak kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Q-anahtarlama, aktif, pasif ve hibrit mod kilitleme, dalga boyu ayarlanabilir lazerler, optik geri besleme kontrollü lazerler ve modülasyonlu lazerler gibi yapılarla kullanılan çok bölümlü yarı iletken lazerler, telekomünikasyon, spektral analiz ve hassas ölçüm uygulamalarında geniş bir kullanım alanı bulmaktadır (Vasil'ev 1995). Bu yapı, her bir parametrenin bağımsız şekilde kontrol edilmesini sağlayarak spektral saflık, hızlı modülasyon ve hassas dalga boyu ayarı gibi özelliklerde önemli iyileştirmeler sunar (Kawaguchi 1993).

1.6.1. Kazanç bölümü

Şekil 1.14'te gösterildiği gibi çok bölümlü yarı iletken lazerlerde kazanç bölümü, akım uygulanmak suretiyle iletim yönünde kutuplanır. Kazanç bölümü, lazerin ışık üretiminde ana rolü üstlenir ve lazer ışınının amplifikasyonunu sağlayan aktif bölme olarak işlev görür. Bu bölüme uygulanan akım, lazerin kazancını artırarak elektron ve boşluk çiftlerinin birleşmesini sağlar ve böylece foton oluşumu gerçekleşir. Kazanç bölümüne uygulanan akım seviyesinin kontrol edilmesiyle, lazerin çıkış gücü ayarlanabilir.

Kazanç bölmesinin hassas ayarlanması, lazerin toplam çıkış gücünü, spektral genişliğini ve modülasyon hızını doğrudan etkileyerek çok bölümlü lazerlerin telekomünikasyon, sinyal işleme ve hassas ölçüm uygulamalarındaki kullanımını destekler (Derickson et al. 1992; Kawaguchi 1993; Vasil'ev 1995; Duman 2014).

1.6.2. Soğurma bölümü

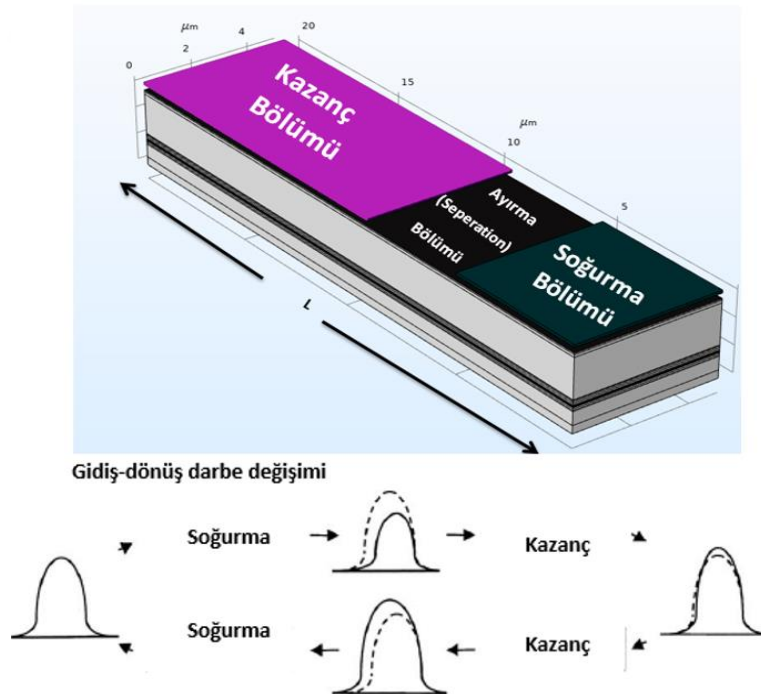
Şekil 1.14'te görüldüğü gibi tıkama yönünde gerilim uygulanan veya hiç gerilim uygulanmayan ve çok kontaklı yarı iletken lazerlerde doyumlu soğurucu işlevi gören bölüm, soğurma bölgesi olarak adlandırılır. Bu bölüm, lazerin ışık üretiminde kritik bir pasif bileşen olup, lazer ortamındaki fotonların bir kısmını emerek çalışma koşullarını ayarlar. Soğurma bölümü, ters kutuplama yöntemiyle taşıyıcıların daha hızlı bir biçimde süpürülmesini mümkün kılar ve bu durum, darbe süresinin daralmasına ve darbenin tepe noktasındaki kayıpların artmasına neden olur. Soğurma bölgesinin kısaltılması,

1. GİRİŞ

taşıyıcıların daha hızlı süpürülmesine ve böylece darbe genişliğinin azalmasına imkân tanır. Ultrakısa darbeler için 20-80 μm aralığında soğurucu uzunlukları tercih edilir (Arahira et al. 2001).

Ayrıca, lazerin kavitesi içerisinde konumlanan soğurma bölümü, lazer çıkışına ulaşmadan önce fotonların bir kısmını emerek toplam kazancı dengelemeye yardımcı olur, böylece lazerin çıkış gücünün stabil kalmasını sağlar ve aşırı güç artışlarını önler. Spektral genişliği kontrol ederek lazerin emisyon spektrumunun daralmasına katkıda bulunur ve böylece belirli bir dalga boyunda daha kararlı çalışmasını sağlar. Soğurma bölümü, lazerin modülasyon derinliğini etkileyerek yüksek hızlı veri iletimi gibi uygulamalarda kullanım alanı bulmasına imkân tanır. Sonuç olarak, bu bölüm lazerin genel performansını artırarak çıkış gücünü düzenler, spektral kontrol ve dinamik modülasyon sağlar, böylece lazerin daha kararlı ve verimli bir şekilde çalışmasına yardımcı olur (Derickson et al. 1992; Kawaguchi 1993; Vasil'ev 1995; Duman 2014).

1.6.3. Darbe oluşturma ve şekillendirme mekanizması



Şekil 1.15. Darbe oluşturma ve şekillendirme mekanizması (Lau 2000).

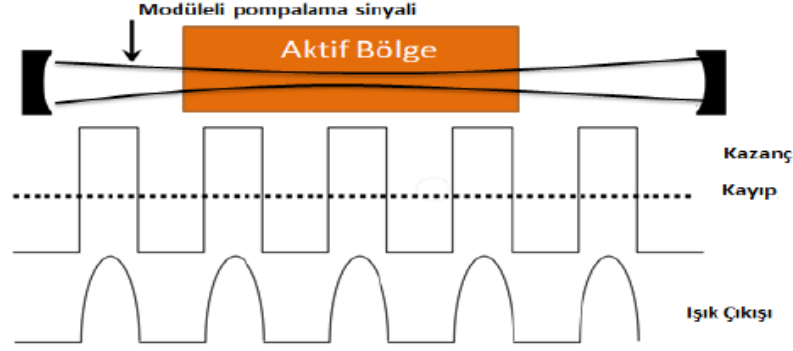
Şekil 1.15'te gösterildiği gibi, darbenin lazer ortamı boyunca ilerleyip başlangıç konumuna geri dönmesine neden olan gidiş-geliş hareketi, soğurucu bölgedeki daralma ile kazanç bölgesindeki genişleme arasındaki etkileşim sonucu meydana gelmektedir. Soğurucu bölüme giren darbe, fotonların valans elektronları tarafından emilmesiyle iletim bandında serbest taşıyıcıların oluşmasına yol açar. Darbe ilerledikçe, soğurulma seviyesi azalır ve bu durum, ön kenarın arka kenara göre daha fazla zayıflamasına neden olur.

1.7. Yarı İletken Lazerlerden Kısa Süreli Optik Darbe Üretimi

Yarı iletken lazerler, elektrik akımı ile doğrudan modülasyon, yüksek verimlilik, kompaktlık ve entegrasyon potansiyeli sunar. Kısa darbeler üretmek için çeşitli teknikler bulunmaktadır: Kazanç anahtarlama, Q-anahtarlama ve mod (kip) kilitleme. Kip kilitleme, genellikle daha kısa darbeler ve daha yüksek tekrarlama hızları sağladığı için tercih edilen bir tekniktir (Vasil'ev 1995).

1.7.1. Kazanç anahtarlama tekniği

Kazanç anahtarlama tekniği, lazerlerin kısa ve yüksek güçlü ışık darbeleri üretmek için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, lazer ortamına uygulanan elektrik akımının ani değişimiyle kazanç koşulları hızlıca değiştirilerek lazerin ışık çıkışı başlatılır ve durdurulur, bu da yüksek pik gücüne sahip kısa darbelerin elde edilmesini sağlar. Lazerin aktif bölgesindeki taşıyıcı konsantrasyonunun ani artışı ve hızlı düşüşü, kazanç durumunu değiştirerek yüksek verimlilikle kısa süreli optik darbeler oluşturur. Telekomünikasyon ve hızlı veri iletim uygulamalarında önemli bir rol oynayan kazanç anahtarlama, genellikle pikosaniye mertebelerinde darbeler üretir. Öte yandan, kazanç anahtarlama, genellikle hızlı değişiklikler dalga boyu stabilitesini olumsuz etkileyebilir (Derickson 1992; Vasil'ev 1995; Duman 2014). Harici kavite gerektirmeyen bu teknikte, yarı iletken lazere uygulanan akımın oluşturduğu kazancın kaybı aşması durumunda optik darbeler oluşmaktadır. Darbelerin tekrarlama oranı lazerin gidiş-dönüş süresi ile sınırlı değildir ve soğurma bölgesinin olmaması, daha geniş bir kazanç bant genişliği sağlar. GHz seviyesinde büyük bir AC sinyali ile lazerin modüle edilmesi, kazanç anahtarlama optik darbelerin üretilmesini sağlar (Cakmak 2000).

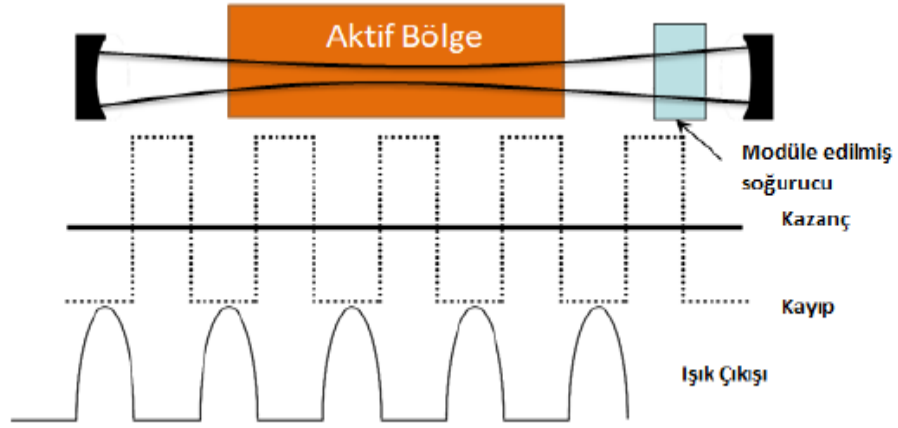


Şekil 1.16. Kazanç anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).

Lazere uygulanan darbeli akımın yanı sıra, belirli bir DC akım da eklenir ve lazerin eşik akım seviyesine yakın bir değerde seçilir. Eğer lazerdeki DC akım, eşik akımının altında kalıyorsa, ışık çıkışı yalnızca alternatif akımın bu eşiği geçmesi ile meydana gelir. Şekil 1.16’da gösterildiği üzere, lazer darbeli akım ile sürüldüğünde, darbenin yükselen kenarında (aktif durumda) ışık çıkışı sağlanır. Lazeri modüle eden alternatif akımdaki artış, lazerden yayılan optik darbelerin sürelerini kısaltmaktadır.

1.7.2. Q-anahtarlama tekniği

Q-anahtarlama tekniği, çok kısa süreli optik darbeler elde etmek için kullanılan bir diğer yöntemdir ve lazerlerden yüksek güçlü, kısa süreli ışık darbeleri üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu yöntem, lazer rezonatörü içindeki soğurucu (absorber) eleman aracılığıyla rezonatör kayıplarını artırarak (yani Q kalite faktörünü düşürerek) lazer çıkışını kapatmayı sağlar. Kayıplar yüksekken pompalama devam ettiğinden, enerji (popülasyon farkı) rezonatör içinde birikir. Kayıplar düştüğünde (Q yüksek olduğunda), bu birikmiş popülasyon farkı yüksek güçlü ve kısa süreli bir ışık darbesi olarak lazerden dışarı salınır. Q-anahtarlama, yarı iletken lazerleri çoklu bölmeli üreterek ve bu bölümlerden birini de soğurucu olarak yaparak gerçekleştirilmektedir. Soğurma bölümüne negatif gerilim uygulanmak suretiyle lazer rezonatöründeki kayıplar anlık olarak azaltılarak lazerin kazancı değiştirilmektedir. Bu süreç, darbe genişliğini ve pik gücünü optimize etmek için büyük önem taşımaktadır (Gordon 2008; Hänninen 2012, Çakmak 2018).

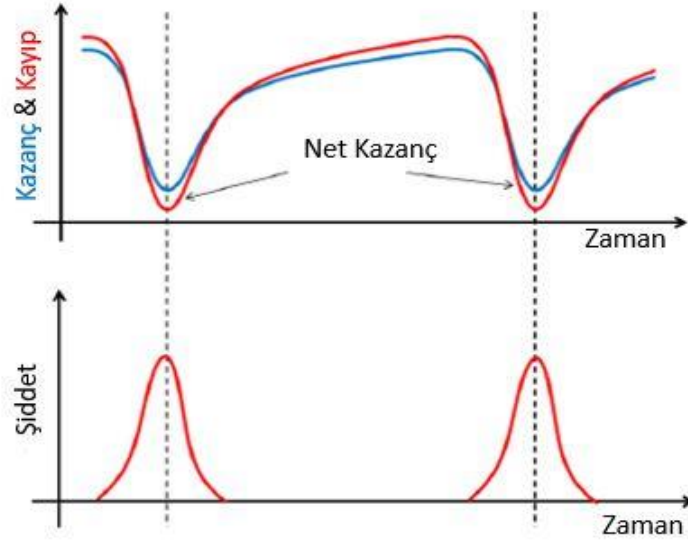


Şekil 1.17. Q-anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).

Aktif Q-anahtarlama, harici kaynak gerektirdiği için çok tercih edilmez; bunun yerine pasif Q-anahtarlama yaygın olarak kullanılmaktadır. Pikosaniye süreli yüksek güçlü optik darbeler elde etmek amacıyla kullanılan en kolay yöntemlerden biri pasif Q-anahtarlama. Bu yöntemde, kazanç bölümüne darbeli akım uygulanırken soğurma bölümüne ise negatif gerilim uygulanmaktadır. Ayrıca, kazanç bölümündeki elektriksel darbelerin süresinin kısaltılması, daha simetrik darbelerin elde edilmesine yardımcı olmaktadır (Cakmak et al. 2011). Q-anahtarlama darbelerin oluşabilmesi için kaybın taşıyıcı yoğunluğuyla değişimlerinin, kazancın taşıyıcı yoğunluğuyla değişimlerinden daha hızlı gerçekleşmesi gerekir. Bunun yanı sıra kazanç bölümündeki taşıyıcıların yaşam süresinin, soğurma bölümündeki taşıyıcıların yaşam süresinden daha uzun olması gerekir (Cakmak 2000).

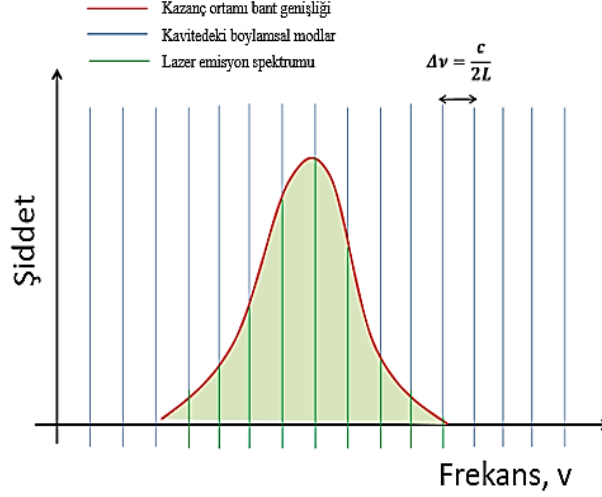
1.7.3. Mod (Kip) kilitleme tekniği

Mevcut yöntemler içinde en kısa süreli optik darbe üretimine imkân tanıyan teknik, mod kilitleme tekniğidir. Bu teknikte, lazer kavitesinde oluşan modların fazlarının kilitlenmesi sayesinde darbeler üretilir ve osilasyon, kavite uzunluğuna bağlı olarak belirlenen tekrarlama frekansında gerçekleşir. Şekil 1.18’de, kavite uzunluğuna bağlı olarak gidiş-dönüş yapan modların kazanç ve soğurma bölgeleri üzerindeki etkileri göz önünde bulundurularak darbe oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 1.18. Mod kilitleme tekniği (Bajek 2016).

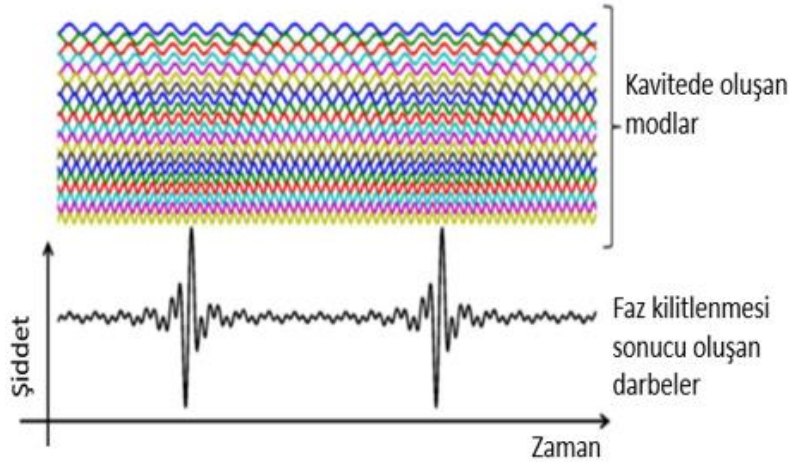
Darbelerin tekrarlama oranını artırmak için, optik kavitedeki kazanç ve soğurma bölümlerinin toparlanma sürelerinin (recovery time) hızlı olması gerekmektedir. Mod kilitli yarı iletken lazerlerde bu hızlı toparlanma süresinin bazı önemli sonuçları bulunmaktadır. Pasif mod kilitli bir yarı iletken lazerde, soğurma toparlanma hızı, elde edilebilecek tekrarlama oranı için bir üst limit belirler; bu da yüksek frekanslı mod kilitlemenin (örneğin, 100 GHz) gerçekleşebileceğini gösterir. Ek olarak, doyumlu soğurucunun hızlı toparlanma süresi, hatalı yansıma önleyici kaplamaların neden olduğu birden fazla darbe oluşumunu engellemeye yardımcı olabilir (Derickson et al. 1992). Soğurma bölümündeki toparlanma hızı, kazanç bölümündeki hızdan daha yüksek olduğunda, optik darbenin tepe noktası dışındaki alanlarda lazer kayıpları kazançtan fazla olur ve bu durum, optik darbenin zirve kısmını yükseltirken diğer kısımları zayıflatarak darbe süresinin kısalmasını sağlar. Soğurucu bölümüne uygulanan ters gerilim arttıkça, soğurucunun toparlanma süresi azalır ve darbe süresi daha da kısalır. Sürecin her darbeye tekrar edebilmesi için, kazanç ve soğurma bölümlerinin toparlanma sürelerinin lazerin dönüş süresinden daha kısa olması gerekir.



Şekil 1.19. Mavi dikey çizgiler, L uzunluğundaki lazer kavitesinde desteklenen modları; kırmızı çizgi, kazanç ortamının bant genişliğini; yeşil çizgiler ise lazer emisyon spektrumunu oluşturan boyuna modları gösterir (Bajek 2016).

Mod kilitleme lazerlerden ultra kısa darbeler üretmek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir (Hangrove 1964). Işık dalgaları rezonatörde ilerleyip tekrar yansiyarak birbirleriyle yapıcı ve yıkıcı girişim yaparlar ve böylece yüksek ve kısmen yansıtıcı aynalar arasında duran dalgalar oluşur. Bu sayede, yalnızca boyuna modlar olarak bilinen belirli frekanslar rezonatör içinde salınım yapabilir. Uzunluğu L olan bir rezonatörde, yalnızca osilasyon yapan ışığın hızı c ile yarı dalga boyunun katları olan modlar desteklenir. Frekans domeninde, bu modlar arasındaki aralık $c/2L$ ile verilir. Bu nedenle, kazanç ortamının bant genişliği, optik rezonatör içinde desteklenen modlarla birlikte değerlendirilmelidir; bu durum Şekil 1.19’da gösterilmektedir.

Belirli bir lazer kavite uzunluğunda yalnızca belirli boyuna modlara yer verilebilir, ancak bu modlar, aralarında sabit bir faz ilişkisi olmaksızın zaman içinde yayılabilirler. Sürekli dalga (cw) modunda çalışan bir lazerde birden fazla boyuna modun toplamı, zamanla gözlemlenen gürültülü bir çıkış deseni oluşturur; bu durum, sürekli dalga lazer emisyonunun karakteristik bir özelliğidir. Bu gürültü deseninin bile boyuna modların periyodik yapısı sebebiyle aslında periyodik olduğu görülebilir. Aynı boyuna modların sabit bir faz ilişkisine sahip olması halinde her bir dalga zirvesinin belirli aralıklarla hizalanacağı, bu noktada yapıcı girişimin artacağı, diğer zamanlarda ise yıkıcı girişimlerin ortaya çıkacağı anlaşılır. Bu olgu Şekil 1.20’de görselleştirilmiştir.



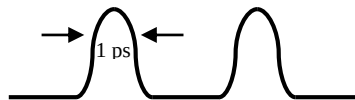
Şekil 1.20. Üstte lazer kavitesi içinde sabit faz ilişkili ayrı modların salınımı, altta mod kilitleme sonucu oluşan darbeleri gösterilmektedir (Bajek 2016).

Bant genişliği, belirli bir frekans aralığında bir sistemin, cihazın veya sinyalin etkin bir şekilde veri taşıma, iletim veya işlem yapabilme kapasitesini ifade eden kritik bir parametredir. Elektronik ve optik sistemlerde bant genişliği, sinyalin iletim hızını, veri taşıma kapasitesini ve spektral çözünürlüğünü doğrudan etkileyerek sistem performansını belirler. Lazer sistemlerinde bant genişliği, lazerin üretebildiği dalga boyu aralığını ve dolayısıyla üretilen ışığın spektral genişliğini tanımlarken, telekomünikasyon gibi alanlarda ise daha yüksek bant genişlikleri, veri iletim kapasitesinin artmasına olanak sağlar. Bant genişliği kavramının tanımını yapmak gerekirse bir devrenin çıkış gücünün maksimum değerinin yarısına düştüğü sınırları arasındaki frekans aralığı olarak tanımlanır.

Bant genişliği ifadesi denklem 1.2’de verilmiştir.

$$B = \frac{1}{\tau} \quad (1.2)$$

Burada B, bant genişliği (Hz); τ , ışık darbe genişliği’dir. Örneğin, 1 pikosaniyelik (ps) darbe elde etmek için lazer emisyon bant genişliği birkaç terahertz olarak elde edilir.



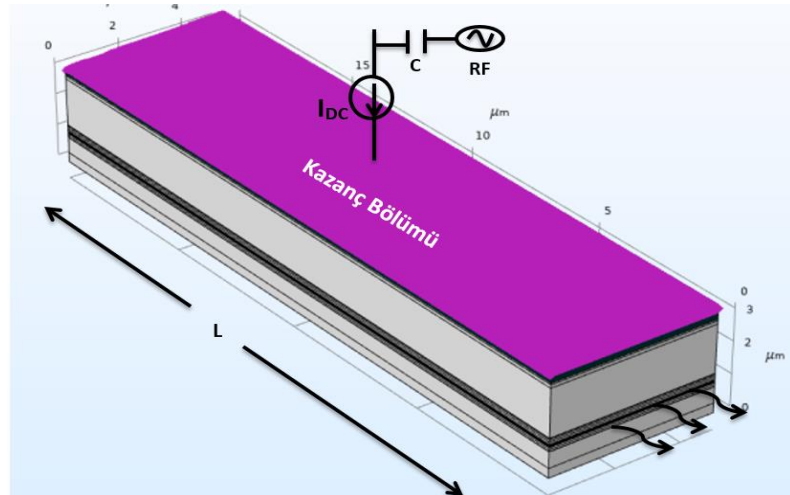
Şekil 1.21. Darbe katarı.

1. GİRİŞ

Çok kısa süreli optik darbeler elde etmek için genellikle mod kilitli lazerler kullanılır. Lazer diyotlarda mod kitleme, özellikle aktif, pasif veya hibrit teknikler kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

1.7.4. Aktif mod kilitli yarı iletken lazerler

Bu yöntemde, Şekil 1.22’de gösterildiği gibi, lazerin kazanç bölgesi lazer boşluğundaki gidiş-dönüş süresine yakın bir yüksek frekanslı elektrik darbeleri ve sabit akım (DC) ile modüle edilir. Zaman domeninde kaymanın minimum düzeyde olduğu darbeler gerektiğinde, aktif mod kitleme yöntemi tercih edilir. Aygıttan oldukça kısa optik darbeler elde etmek amacıyla elektriksel modülasyon darbelerinin dar olması ve aygıtın net kazanç alanının kısa sürede oluşabilmesi için yüksek genlikli olması gereklidir (Derickson et al. 1992). Zaman domeninde kaymanın az olduğu darbeler gerektiğinde aktif mod kitleme yönteminden faydalanılır. Bu durum, RF modülasyon kaynağının darbe periyodunun kararlılığını sağlama işlevi görmesinden kaynaklanmaktadır. RF kaynağı, kendiliğinden gürültü içermesine rağmen, darbe periyodunu daha etkili bir şekilde stabilize edebilir. Pasif mod kitleme ise böyle bir dengeleyici kaynağa sahip olmadığından, zaman alanında daha yüksek kayma eğilimi göstermektedir (Lau 2000).



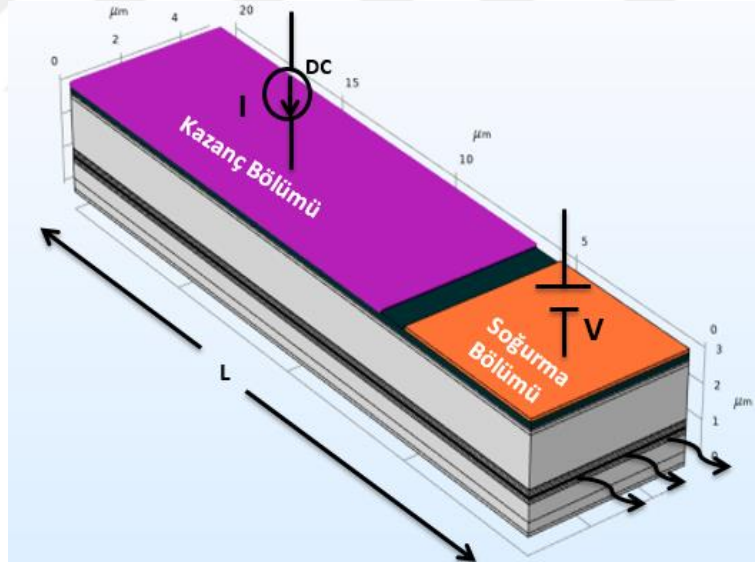
Şekil 1.22. Aktif mod kilitli yarı iletken lazerin şematiği.

Harici rezonatörlü yarı iletken lazerlerde aktif mod kitleme, uygulanması oldukça basit bir yöntemdir ve rezonatör uzunluğuna bağlı olarak GHz seviyesinde tekrarlama hızına sahip darbe serileri oluşturur. Ancak, bu yöntemin bir dezavantajı, lazer

çıkışında elde edilen darbe sürelerinin diğer mod kilitleme yöntemlerine göre daha uzun olmasıdır.

1.7.5. Pasif mod kilitli yarı iletken lazerler

Kısa süreli optik darbelerin üretimi için pasif mod kilitleme tekniği, birçok lazer sisteminde tercih edilmekte olup, lazerin uzun kısmı kazanç sağlamak amacıyla ileri yönde kutuplanırken, ters kutuplanmış kısa bölüm soğurma işlevini yerine getirmektedir. Ters kutuplanmış soğurma kısmı, taşıyıcıların daha çabuk süpürülmesini sağlayarak toparlanma süresini de kısaltmaktadır (Pusino 2013). Pasif mod kilitlemede en önemli bileşen, uygun bir soğurucu bölümün varlığıdır. Yarı iletken lazerlerde kullanılan doyurulabilir soğurucu (saturable absorber), yavaş doyumlu soğurucu türündedir (Haus 1975). Bu, bir optik darbenin ön kısmının soğurulması, ancak arka kısmının soğurma alanından geçerken zayıflamaması anlamına gelir; böylece mod kilitlenmiş lazer kavitesi optik darbeye belirgin bir daralmaya yol açar.



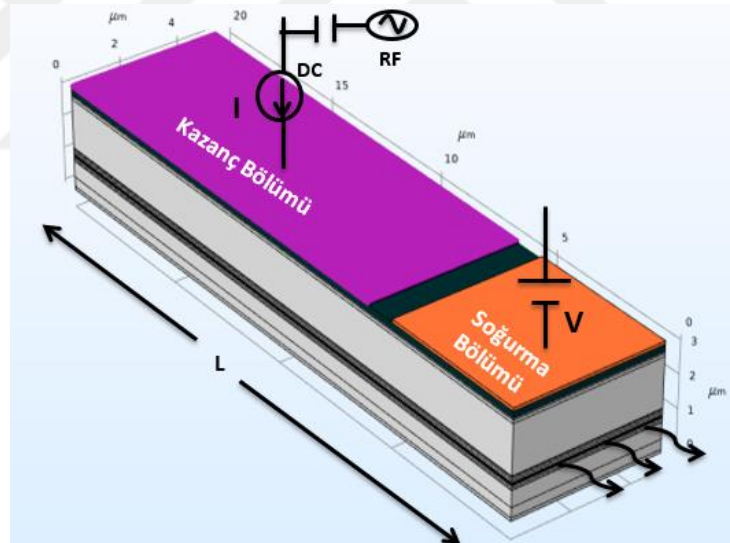
Şekil 1.23. Pasif mod kilitli yarı iletken lazerin şematığı.

Pasif mod kilitlemede soğurucu bölümün daha kısa olması, kazanç bölümüne göre daha yüksek bir kayba sahip olduğu ve dolayısıyla kazançtan daha hızlı doyuma ulaşabileceği anlamına gelir. Ayrıca, doyurulabilir soğurucuda taşıyıcı yoğunluk seviyesi kazanç bölgesine göre daha düşük olduğundan, yarı iletkenlerdeki doyurulabilir soğurucular kazanç bölgelerine kıyasla daha düşük bir doyma enerjisine sahiptir. Yapılan

araştırmalar, darbe sürelerinin soğurucunun doyma seviyesindeki azalmayla birlikte kısaldığını göstermektedir (Vasil'ev 1995). Başarılı bir pasif mod kilitleme için, doyurulabilir soğurucunun kazanç ortamından daha düşük bir enerjide doyuma ulaşması gerekmektedir (Derickson et al. 1992).

1.7.6. Hibrit mod kilitli yarı iletken lazerler

Şekil 1.24'te gösterildiği gibi, hibrit mod kilitleme, aktif ve pasif mod kilitleme tekniklerinin bir birleşimidir. Bu yöntemde lazerin kazanç bölümüne DC ve RF elektrik akımları birlikte uygulanırken, soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi verilir; böylece hibrit mod kilitlemeli bir yarı iletken lazer yapısı oluşturulur. Çok bölümlü harici kaviteli mod kilitlemeli yarı iletken lazerlerde, bu teknikler kullanılarak genellikle 1-3 ps aralığında darbe genişlikleri elde edilir. Kısa optik darbeler üretmek açısından hibrit ve pasif mod kilitleme yöntemleri genellikle daha etkilidir (Derickson et al. 1992).



Şekil 1.24. Hibrit mod kilitli yarı iletken lazerin şematığı.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yarı iletken lazerin (diyot lazer) keşfi ile diyot lazerler, optik iletişim için ışık kaynağı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yarı iletken lazerlerin fiber optik haberleşme sistemlerinde önemli bir lazer kaynağı olmasının nedenlerinden biri çok kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbelerle bilgi aktarımının sağlanması suretiyle iletilen bilgidaki bozulmanın en az düzeyde tutulmasıdır. Kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbe üreten yarı iletken lazerlerde, kavite uzunluğu önemli bir parametredir. Kavite uzunluğuna bağlı olarak literatürde gerçekleştirilen birçok çalışma vardır (Hou et al. 2010; Hou et al. 2013; Marsh et al. 2017). Ancak literatürdeki çalışmalardan bilindiği üzere, kavite uzunluğu kısaldıkça oluşan modların tekrarlama oranı yani frekansı artar (Chen et al. 1991; Arahira et al. 2001; Vasco et al. 2017). Literatürde yapılan çalışmalarda, tipik kavite uzunluğu 0,5 ile 1 mm arasında olan mod kilitli lazer diyotlar üretilmiştir (Portnoi and Chelnokov 1990). Kavite uzunluğu 500 μm olarak üretilen iki bölümlü mod kilitli yarı iletken lazerde tekrarlama oranı 81 GHz olarak elde edilmiştir (Akahane et al. 2021). Yapılan çalışmalarda kavite uzunluğu 500 μm altına (400-415 μm) düşürüldüğünde tekrarlama oranı 90 GHz'den daha yüksek oranlara çıkmıştır (Zhaou et al. 2011, Sun et al. 2022). Ayrıca, iki bölümlü mod kilitli yarı iletken lazerlerde, 1,5 μm dalga boyunda kavite uzunluğu 400 μm 'ye kadar düşürüldüğünde tekrarlama oranının 100 GHz'i aştığı rapor edilmiştir (Sun et al. 2022).

Bununla birlikte, iki kazanç bölümlü diyot lazerlerde tek kazanç olanlara göre darbe süresinin daha kısa ve çıkış gücünün daha yüksek olduğu bilinmektedir (Rosales et al. 2011; Hou et al. 2013; Marsh et al. 2017; Aksakal et al. 2020). Literatürde yapılan çalışmalarda, kavite uzunluğu 500 μm 'den daha uzun tek ve iki kazanç bölümlü ve soğurma bölümlü yarı iletken lazer çalışmaları yapılmıştır (Hou et al. 2010; Hou et al. ; 2013; Akahane et al. 2021; Janjua et al. 2021). Ancak kavite uzunluğu arttıkça mod kilitli lazerlerde modların kilitlenmesi için kazanç bölümüne uygulanan akım ve soğurma bölümüne uygulanan gerilim değeri azalmaktadır (Janjua et al. 2021). Akım ve gerilim değerleri arttıkça ısınma problemlerinin arttığı bilinmektedir. Bununla birlikte uzun kaviteli lazerlerde, elde edilen darbelerde güç artmasına rağmen darbe süresi de artmaktadır. Yarı iletken lazerden kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbeler üretmek için kavite uzunluğu, kazanç bölümünün sayısı ve uzunluğu, soğurma bölümünün

uzunluğunun yanı sıra bölümlerin konumları da oldukça önemlidir (Thompson et al. 2009; Gordón et al. 2018; Akahane et al. 2021; Janjua et al. 2021).

Bu tez çalışmasında da, literatürden farklı olarak kavite uzunluğunu en kısa şekilde tutarak (kavite uzunluğu $<500 \mu\text{m}$) çoklu bölümlü yarı iletken lazerler, kazanç ve soğurma bölümlerinin farklı konumlarına göre üretilmiş ve lazerlerin karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen çalışmalarda, iki kazanç bölümlü lazerlerde, birinci kazanç uzunluğu daha uzun olan yarı iletken lazerlerde çıkış gücünün daha yüksek olduğu görülmüştür. Aynı çalışmada, ayrıca iki kazanç bölümüne sahip yarı iletken lazerlerde, soğurma bölümü ortadayken çıkış gücünün, soğurma bölümünün sonda olduğu duruma göre daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Aksakal et al. 2020).

Mod kilitli yarı iletken lazerle ilgili literatürdeki bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Silberberg et al. (1984) çalışmalarında, GaAs/GaAlAs çoklu kuantum çukur (MQW) yapısı kullanarak, harici bir rezonatörde doyurulabilir bir soğurucuya sahip pasif mod kilitli diyot lazeri ilk kez pasif modda kilitleyerek, 1 GHz tekrarlama hızına sahip darbeler elde etmişlerdir.

Ziel et al. (1985) tarafından pasif mod kitleme yöntemiyle ps sürelerinde optik darbeler üretilbileceği ortaya konulmuştur.

Derickson et al. (1992), çok bölümlü mod kilitli yarı iletken lazerlerin tek bölümlü tasarımlara göre daha iyi performans sağladığını rapor etmiştir.

Arahira et al. (1994), kazanç bölgesinin polarizasyon durumuna göre 38,8 GHz temel frekansı ile 400 GHz, 800 GHz ve 1,54 THz harmoniklerini tespit etmiş, pasif mod kitleme yöntemiyle terahertz düzeyinde optik atım üretimini ilk kez ortaya koymuştur.

Williams et al. (2004), mod kilitli yarı iletken lazerlerde aktif, pasif ve hibrit mod kilitleme yöntemlerini kullanarak, ilerleyen dalga modeli temelinde 1-10 ps darbe süresi ve 20-40 GHz tekrarlama oranları rapor etmiştir.

Hou et al. (2010) tarafından 1,55 μm AlGaInAs kuantum kuyulu, kavite içi yansımalarla oluşturulan bir bileşik kaviteye sahip yarı iletken lazerden harmonik mod kilitleme çalışmasının ilk kez gösterimi gerçekleştirilmiş ve bu lazerden 160 GHz frekansta 1,67 ps'lik bir darbe süresi elde edilmiştir.

Stolarz et al. (2011), 40 GHz tekrarlama oranına sahip 1550 nm dalga boylu pasif mod kilitli yarı iletken lazerde soğurucu bölümüne uygulanan gerilim ve kazanç bölümüne uygulanan akıma bağlı olarak ortaya çıkan farklı rejimler hem zaman hem de frekans/dalga boyu domeninde karakterize edilmiştir.

Rosales et al. (2011) tarafından 1,55 μm InP tabanlı pasif mod kilitli yarı iletken lazerde, 300 GHz tekrarlama oranına sahip pikosaniye altı darbe üreten tek ve iki bölümlü lazerlerin karşılaştırmasının ilk kez yapıldığı bildirilmiştir.

Marsh et al. (2017) tarafından yapılan çalışmada, kısa kavite uzunluğunda çalışmanın zorluğu belirtilerek uzun kaviteli (~ 1 mm), tek ve iki kazançlı mod kilitli yarı iletken lazerden 40 GHz'de 490 fs süreli optik darbeler elde edilmiştir.

Marsh et al. (2017) tarafından mod kilitlemeli lazer diyotlarının (MLLD) 40 GHz'den >1 THz'e kadar çeşitli frekanslardaki karakterizasyon ölçümlerini yapabilmek için farklı lazer tasarımları deneysel olarak gerçekleştirilmiştir.

Gordon et al. (2018) ayrıca, kavite uzunluğuna bağlı olarak pasif mod kilitli yarı iletken lazerler için kazanç ve soğurma bölümünün uzunluklarını belirlemek için teorik ve deneysel çalışmalar yaparak karşılaştırmalı sonuçlar elde etmiştir.

Zhao et al. (2018) tarafından pasif mod kilitli yarı iletken lazerlerde soğurma bölümünün uzunluğunun kavite uzunluğu oranına bağlı olarak darbe süresi ve spektrum genişliğini karşılaştıran deneysel çalışmalar yapılmıştır.

Simos et al. (2018), ilerleyen dalga modeli ile iki 40 GHz yarı iletken pasif mod kilitli lazerin performansını inceleyerek, lazerler arasındaki optik mesafenin kavite uzunluklarının tamsayı katlarına yaklaştığında yüksek senkronizasyonla çalıştığını göstermiştir.

Alloush et al. (2018), pasif mod kilitleme yönteminde bant genişliğinin artırıldığını ve 216 fs darbe genişliği ile ultrakısa darbeler üretildiğini göstermiştir.

Aksakal et al. (2020) tarafından iki ve üç bölümlü pasif mod kilitli yarı iletken lazerlerin kazanç ve soğurma bölümlerinin uzunluk ve konumlarına göre darbe süresi ve çıkış gücü teorik olarak elde edilen sonuçlarda gösterilmiştir.

Liu et al. (2020), 20 GHz tekrarlama oranına sahip olan iki kazançlı hibrit mod kilitli lazerin zamanlama titremesinde (timing jitter) 6,7 kat azalma ve 890 fs darbe genişliği elde edildiğini raporlamışlardır.

Wang et al. (2021), mod kilitleme tekniğinde kilitli modları filtreleyerek 42 GHz'den 377 GHz'e kadar ayarlanabilir bant genişliğine sahip fotonik terahertz (THz) taşıyıcı üretim şeması önerilmiş ve deneysel olarak gösterilmiştir.

Liu et al. (2022), lazerin kendiliğinden ısınma etkisini azaltmak için çok bölümlü bir dalga kılavuzu yapısı kullanarak, sıcaklığa duyarlı çıkış yüzeyindeki ısınmayı baskılayarak 13,6 W yüksek gücüne sahip diyot lazerler üretmişlerdir.

Sun et al. (2022) tarafından eşit uzunlukta iki kazanç ve soğurma bölümünden oluşan AlGaInAs/InP lazerlerden 100 GHz tekrarlama oranına sahip darbe genişliği 203 fs ve gücü 1,54 W optik darbeler elde edilmiştir.

Wohlfeil et al. (2023) tarafından çok bölümlü konik ve düz bölümlü kazanç kısımlarından oluşan pasif mod kilitli InGaAsP lazer ile 2,4 ps genişliğinde, 34 W tepe gücünde ve 6,3 GHz tekrarlama hızında darbeler üretilmiştir ve elde edilen 34 W'lık tepe gücünün mod kilitlemeli kuantum well yapılı konik lazerden elde edilen en yüksek darbe tepe gücü olduğu belirtilmiştir.

Janjua et al. (2023), AlInGaAs çok bölümlü pasif Q anahtarlı mod kilitli lazerden 22 GHz tekrarlama oranına sahip, 10 W çıkış gücünde 250 fs süreli optik darbeler elde etmiştir.

Hazan et al. (2024) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, uygulanan farklı akımlara karşı Q anahtarlama, pasif mod kilitleme ve Q anahtarlama mod kilitleme dinamiği gösterilmiştir ve bu davranışların tekrarlama oranları karşılaştırılmıştır.

Qin et al. (2024), kaviteyi halka şeklinde tasarlayarak pasif mod kilitlemeli yarı iletken halka lazerlerin tasarımında optik sınırlama faktörü ve enjeksiyon akımı gibi parametrelerin optimize edilmesiyle yüksek enerjili darbeler elde edilebileceğini ve performansın iyileştirilebileceğini göstermiştir. Pasif uzunluk kısaltılarak ve kazanç spektrumu daraltılarak yüksek enerjili darbeler elde etmenin mümkün olduğu bulunmuştur.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Yarı İletken Lazer Fabrikasyonunda Kullanılan Malzemelerin Yapısı

Bu çalışmada, 1550 nm dalga boyu için IEGENS (AlGaInAs) ve 1350 nm dalga boyu için ATRK (InGaAsP) olarak adlandırılan InP tabanlı çift türdeş yapılar kullanıldı. Bu yapılar IQE (Europe) firması tarafından üretilmiştir (Cakmak et al. 2011).

Çizelge 3.1 AlGaInAs/InP malzeme yapısını oluşturan katmanlar

Katman numarası	Malzeme	x	y	Kalınlık (μm)
16	In_xGaAs	0,53		0,2
15	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,71	0,62	0,05
14	InP			0,1
13	InP			1,5
12	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,85	0,33	0,02
11	InP			0,05
10	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,9	0,53	0,06
9	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,72-0,9	0,53	0,06
8	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,44	0,49	0,01
7x5	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,24	0,71	0,006
6x5	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,44	0,49	0,01
5	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,9-0,72	0,53	0,06
4	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,9	0,53	0,06
3	$[\text{Al}_x\text{Ga}]\text{In}_y\text{As}$	0,86-0,9	0,53	0,01
2	InP			0,5
1	InP			0,3

AlGaInAs/InP (1550 nm) malzeme yapısı, InP tabanından itibaren beş adet QW içerecek şekilde şu katmanlardan oluşmaktadır. 800 nm kalınlığında n-tipi InP alt kaplama, katkısız 216 nm kalınlığında dalga kılavuzu katmanı, 50 nm kalınlığında p-tipi InP aşındırma durdurma katmanı, 1,6 μm kalınlığında p-tipi InP üst kaplama tabakası, 50 nm kalınlığında p-tipi InGaAsP geçiş tabakası ve 0,2 μm kalınlığında p-tipi InGaAs kontak tabakası. 0,01 μm kalınlığındaki AlGaInAs bariyerlerin arasında yer alan aktif tabaka, her biri 0,006 μm kalınlığında 5 adet AlGaInAs kuantum çukur (QW) içerir ve bu kuyular, her iki yönde 0,06 μm kalınlığında AlGaInAs ayırık hapsetme heteroyapısı (SCH-separate confinement heterostructure) ile çevrelenmiştir.

Çizelge 3.2. InGaAsP/InP /InP malzeme yapısını oluşturan katmanlar

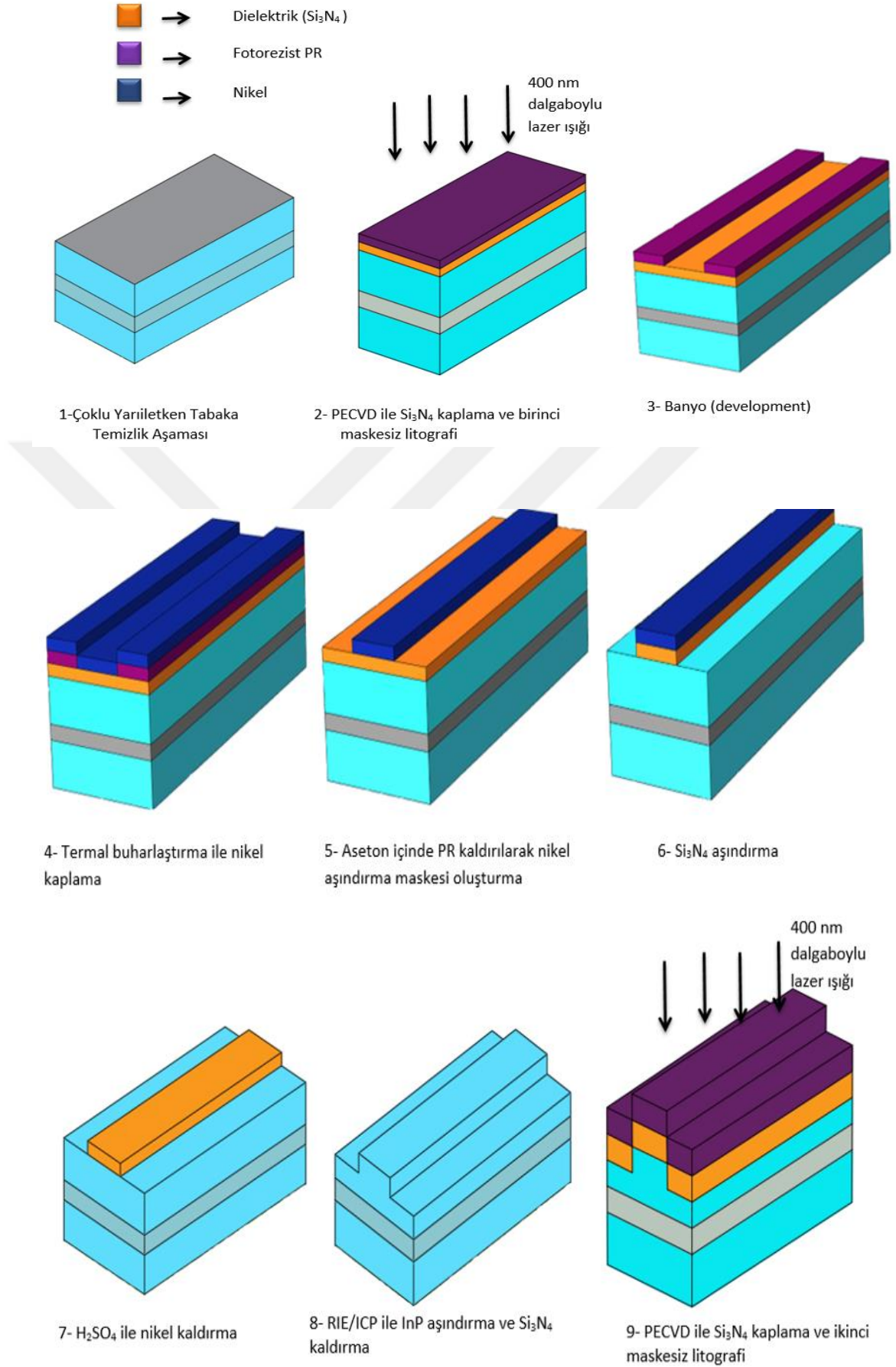
Katman numarası	Malzeme	x	y	Kalınlık (μm)
12	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0,53		0,2
11	InP			1,3
10	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,85	0,32	0,008
9	InP			0,2
8	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,88	0,24	0,22
7	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,85	0,32	0,02
6x2	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,67	0,69	0,008
5x2	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,85	0,32	0,01
4	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,67	0,69	0,008
3	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,85	0,32	0,02
2	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	0,88	0,24	0,22
1	InP			1

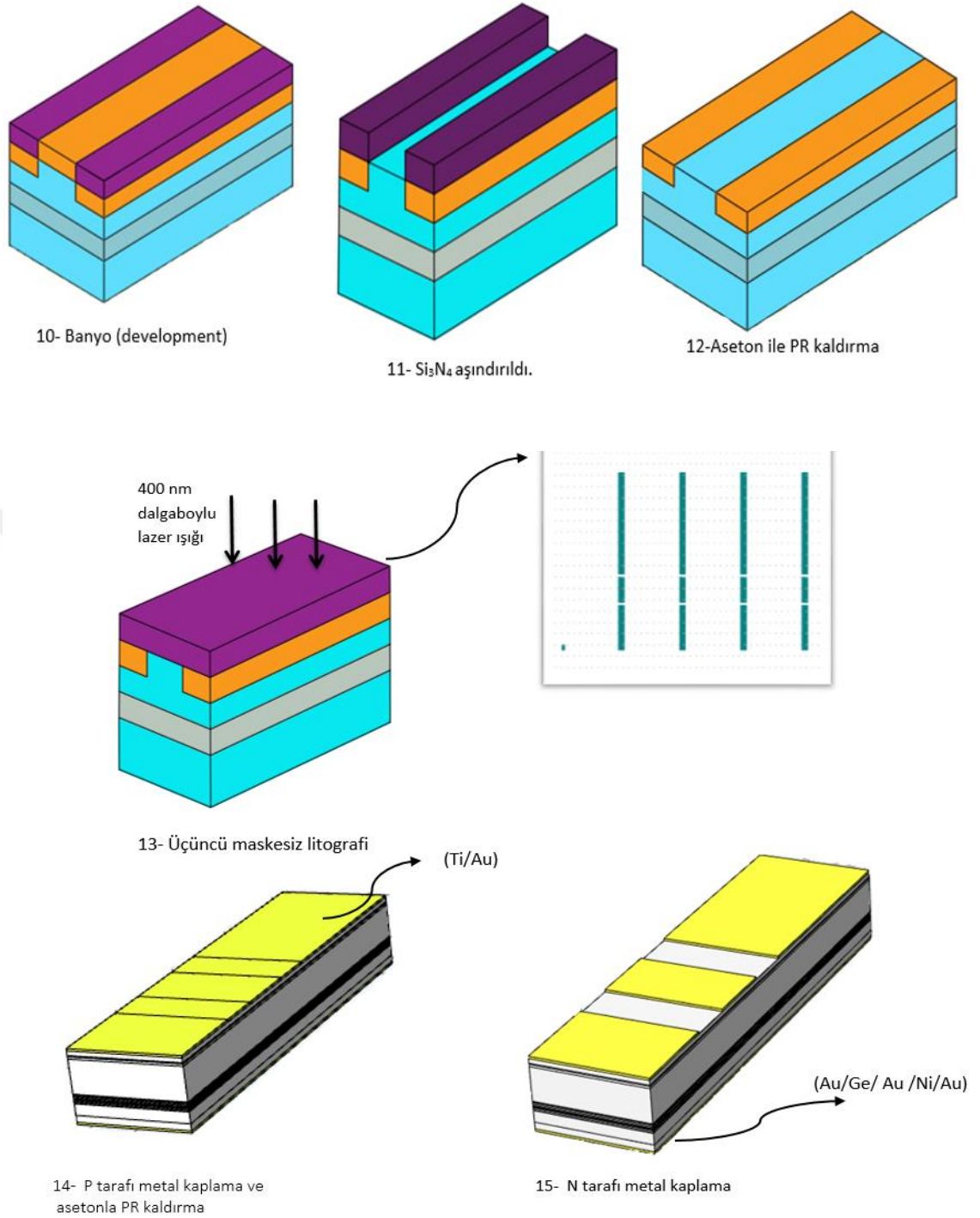
InGaAsP/InP (1350 nm) malzeme yapısı, InP tabanından itibaren 3 adet QW içerecek şekilde şu katmanlardan oluşmaktadır. 1 μm kalınlığında n-tipi InP alt kaplama, katkısız 524 nm kalınlığında dalga kılavuzu tabakası, 0,2 μm p-tipi InP geçiş tabakası, 0,008 μm p-tipi InGaAsP aşındırma durdurma tabakası, 1,3 μm kalınlığında p-tipi InP üst kaplama tabakası ve 200 nm p-tipi InGaAs kontak tabakası. Dalga kılavuzunda yer alan aktif tabaka, 2 adet 0,008 μm kalınlığındaki InGaAsP kuantum çukur (QW) ve bu kuyuların etrafını saran 3 adet 0,01 μm kalınlığındaki InGaAsP bariyerden meydana gelmektedir. Bariyerler 0,22 μm kalınlığında InGaAsP dörtlü bileşiğinden oluşan bir ayrık hapsetme heteroyapı katmanı ile çevrelenmiştir.

Bu tez çalışmasında, AlGaInAs/InP ve InGaAsP/InP çoklu tabakalı malzeme yapıları kullanılarak çoklu bölümlü yarı iletken lazerlerin üretimi gerçekleştirilerek karakterizasyon ölçümleri yapılmıştır.

3.2. Çoklu Bölümlü Yarı İletken Lazer Üretim Aşamaları

Tasarımını ve üretimini yaptığımız iki bölümlü (tek kazanç ve tek soğurma bölümlü) ve üç bölümlü (iki kazanç ve tek soğurma bölümlü) yarı iletken lazerlerin fabrikasyonu, Üniversitemiz bünyesinde yer alan Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezinde (YÜTAM) gerçekleştirilmiş olup üretim adımları Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



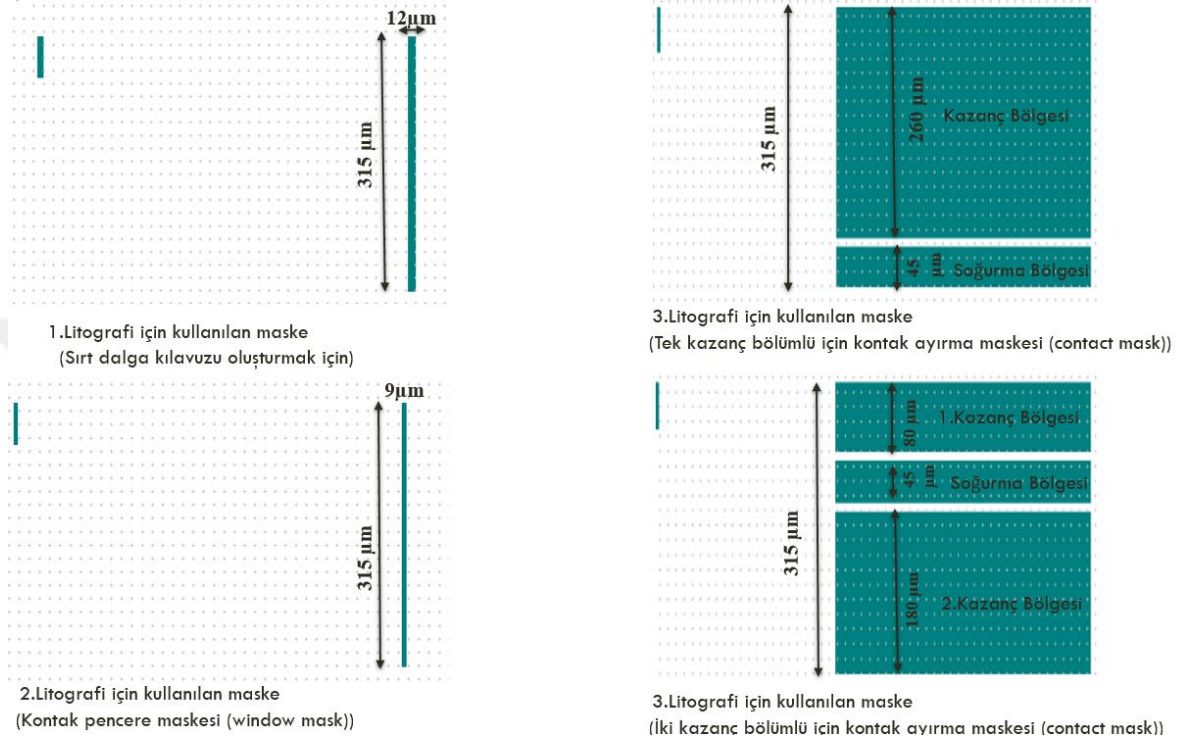


Şekil 3.1. Çoklu bölmeli yarı iletken lazer üretim aşamalarının gösterimi.

Üretimini yaptığımız tek ve iki kazanç bölümlü yarı iletken lazerlerin deneysel çalışmalarına ilişkin fabrikasyon adımları aşağıda sırasıyla sunulmuştur. Ayrıca üretimde kullanılan cihazlar için aşağıdaki maddelerde anlatıldığı gibi uygun reçeteler hazırlanmıştır.

3.3. Yarı İletken Lazer Fabrikasyonunda Kullanılan Maskeler

Yarı iletken lazerlerin fabrikasyon işlemleri boyunca üç farklı litografi işlemi yapılmıştır. Bu litografi işlemlerinde kullanılan maskeler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

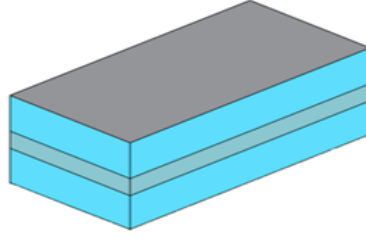


Şekil 3.2. Litografi işleminde kullanılan ve Clewin programında çizilen maskeler.

Lazerlerde birinci fotolitografi sırt dalga kılavuzunu oluşturmak için sırt dalga kılavuz maskesiyle, ikinci litografi kenarlardan oksit tabakasıyla pencere oluşturulmasını sağlayan kontak pencere maskesiyle, üçüncü fotolitografi ise kazanç ve soğurma bölgelerini şekillendirmek için kontak ayırma maskesiyle gerçekleştirilmiştir. Bunun için üç farklı maske yapısı kullanılmıştır.

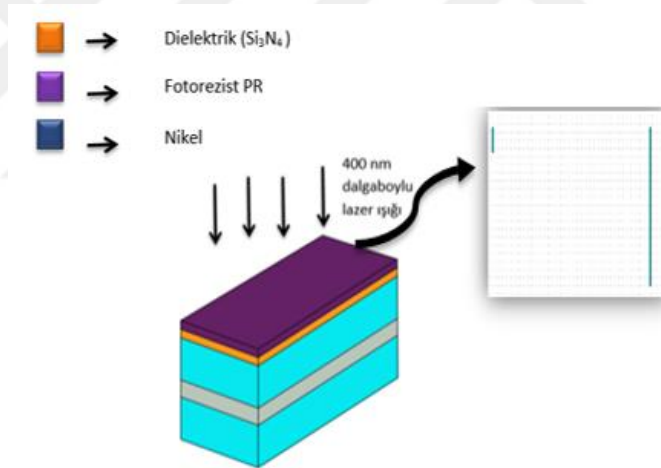
3.4. Yarı İletken Lazer Fabrikasyon Adımları

1- Temizlik Aşaması: Numune (InP), sırasıyla metanol, aseton ve isopropanol içinde beşer dakika bekletildi. Ardından numuneler deiyonize (DI) su ile yıkandı, azot gazı ile kurutuldu ve 110°C’de 130 saniye sıcak tabakta (hot plate) tavlandı.



Şekil 3.3. Çoklu yarı iletken tabaka temizlik aşaması.

2- Si₃N₄ kaplama ve fotorezist serme: Plazmayla iyileştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (Plasma Enhancement Chemical Vapor Deposition-PECVD) cihazı ile Çizelge 3.3'te verilen parametrelere bağlı olarak numunelere 300 s süresince 200 nm Si₃N₄ kaplandı. Numunelere, dönel kaplama (spin coater) cihazında, primer kullanılarak 3000 rpm'de 30 s süresince S1805 pozitif fotorezist serildi. Fotorezist kalınlığı 50 nm olarak ölçüldü.



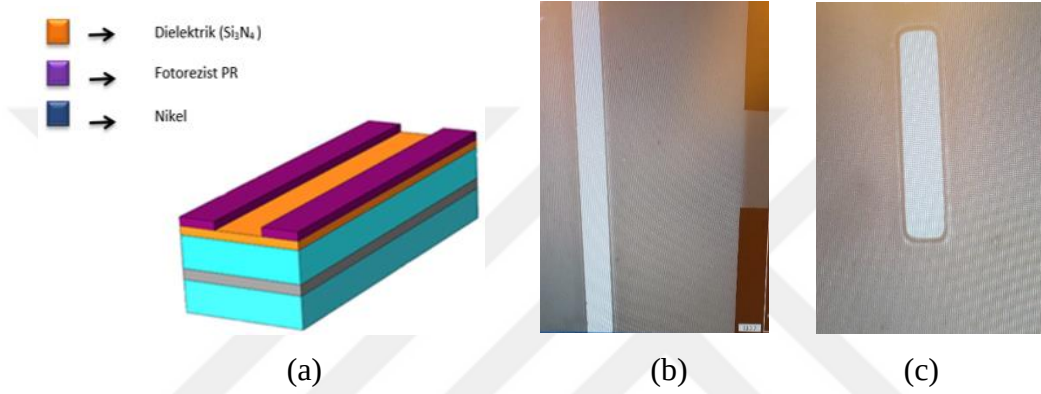
Şekil 3.4. PECVD ile Si₃N₄ kaplama ve birinci maskesiz litografi.

Çizelge 3.3 PECVD ile Si₃N₄ kaplama parametreleri

Basınç	155 Torr
RF güç	80 W
Gazlar	SiH: 140 sccm NH ₃ : 13 sccm Ar: 100 sccm

3- Birinci Fotolitografi: Fotorezist kaplanan numuneler maskeleme (Maskless Aligner) cihazında 29,3 kazançta 4 dakika pozlandırıldı. Daha sonra aşağıda verilen tarifteki gibi banyo (develop) edildi.

- 1 ölçek DI su ve 1 ölçek MF319 banyo kimyasalı (developer) karıştırılarak banyo solüsyonu elde edildi.
- Numuneler 80 s yavaşça çalkalanarak bu solüsyonda banyo edildi.
- Bu karışımdan çıkarılan numuneler DI su ile yıkandı ve azot gazı ile kurutularak birinci fotolitografi yapıldı.

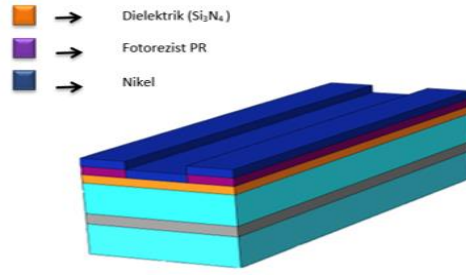


Şekil 3.5. (a) Banyo (development) aşamasının şematiki ve (b), (c) maskeleme cihazında farklı maskelerden görüntüler.



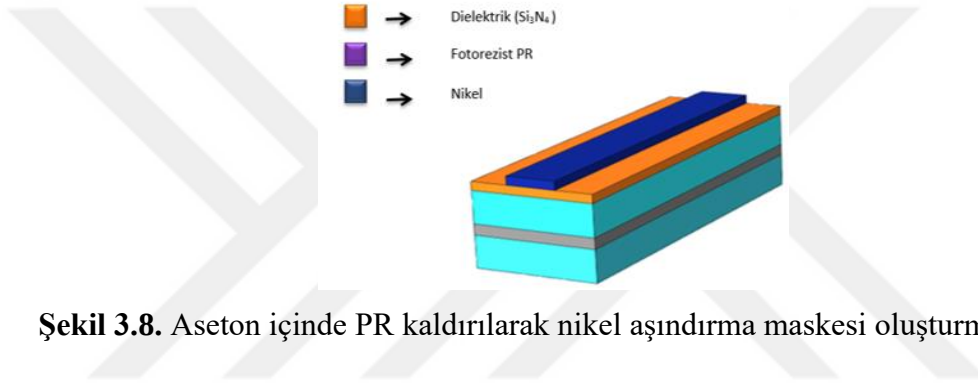
Şekil 3.6. Temiz odada maskesiz hizalama cihazında gerçekleştirdiğimiz litografi işlemi.

4- Si₃N₄/Ni maske elde edilmesi: Numunelere termal buharlaştırıcı (thermal evaporator) ile 10 dakika süresince nikel kaplandı. Nikel kalınlığı 40 nm olarak ölçüldü.



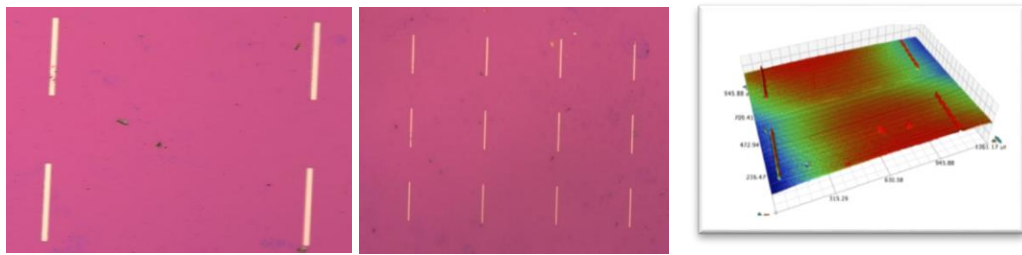
Şekil 3.7. Termal buharlaştırma cihazı ile nikel kaplama.

5- Kaldırma (Lift-off) ile Ni/Si₃N₄ maske oluşturma: Numuneler aseton içinde bekletildi, DI su ile yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu.



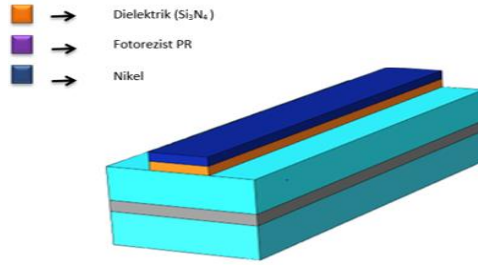
Şekil 3.8. Aseton içinde PR kaldırılarak nikel aşındırma maskesi oluşturma.

Şekil 3.9’da nikel maskenin (a) ve (b)’de optik mikroskop görüntüleri verilirken (c)’de 3D profilometre görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9. (a ve b) Ni maske optik mikroskop ve (c) profilometre görüntüsü.

6- Si₃N₄ tabakasının aşındırılması: Yüzey üzerinde 200 nm kalınlığındaki Si₃N₄ tabakanın aşındırılması için indüktif kuplajlı plazma (ICP-RIE) cihazı kullanıldı. Bu işlem sonrası oluşabilecek polimer tabakasını yok etmek için numunelere aynı cihazda O₂ plazma ile hassas temizlik yapıldı. Si₃N₄ aşındırma için ICP’de Çizelge 3.4’te verilen parametreler kullanılmıştır.



Şekil 3.10. Si₃N₄ aşındırma.

Çizelge 3.4 Si₃N₄ aşındırma parametreleri

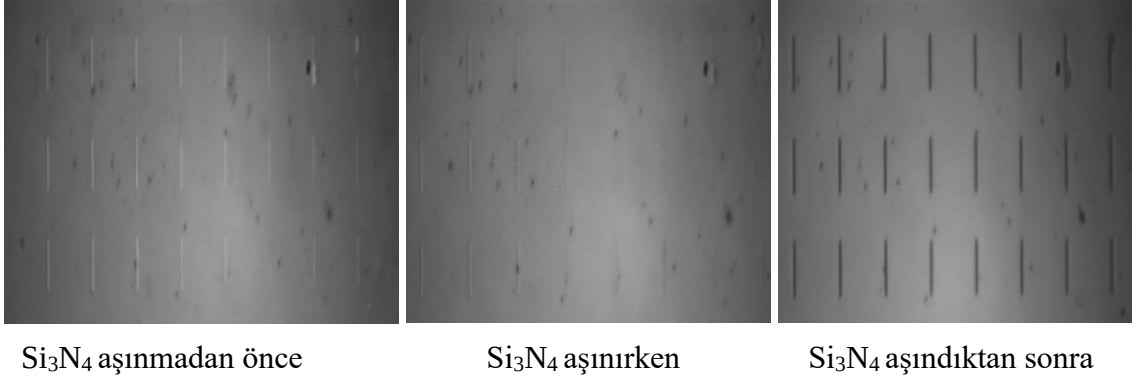
Basınç	15 mTorr
RF güç	150 W
ICP güç	400 W
Gazlar	CHF ₃ : 20 sccm Ar: 10 sccm
Süre	300 s
Si ₃ N ₄ aşındırma oranı	60 nm/dk

O₂ plazma ile hassas temizlik tarifi Çizelge 3.5'te verilmiştir.

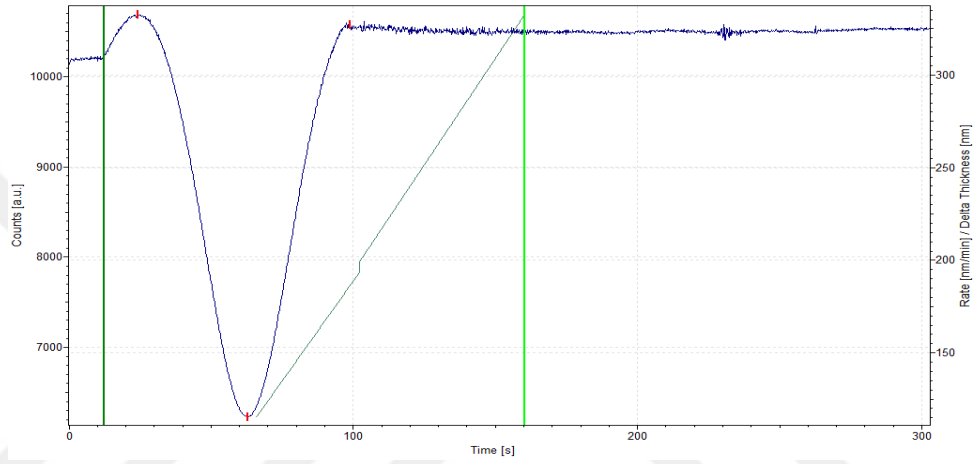
Çizelge 3.5. O₂ plazma ile temizlik parametreleri

Basınç	15 mTorr
RF güç	20 W
ICP güç	800 W
Gazlar	O ₂ :90sccm Ar:10 sccm
Süre	180 s

ICP-RIE cihazında Si₃N₄ aşındırma işlemleri sırasında alınan görüntüler Şekil 3.11'de sırasıyla verilmiştir. Bununla birlikte Şekil 3.12'de ise yine aşındırma esnasında cihazdan alınan aşındırma grafiği gösterilmektedir.



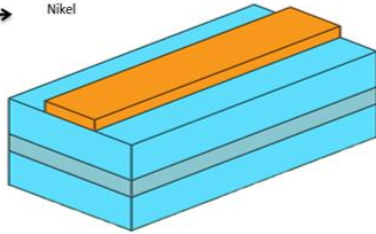
Şekil 3.11. Si₃N₄ ICP-RIE cihazında aşınma görüntüleri.



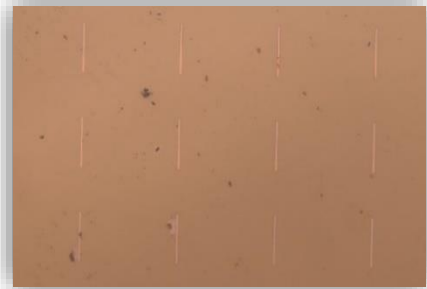
Şekil 3.12. ICP-RIE cihazında Si₃N₄ aşınma grafiği.

7- Si₃N₄/Ni maskenin ıslak aşındırma (wet etch) ile kaldırılması: Numunelerin sırt kılavuzları üzerindeki Si₃N₄/Ni maske H₂SO₄ kullanılarak kaldırıldı.

- Dielektrik (Si₃N₄)
- Fotorezist PR
- Nikel



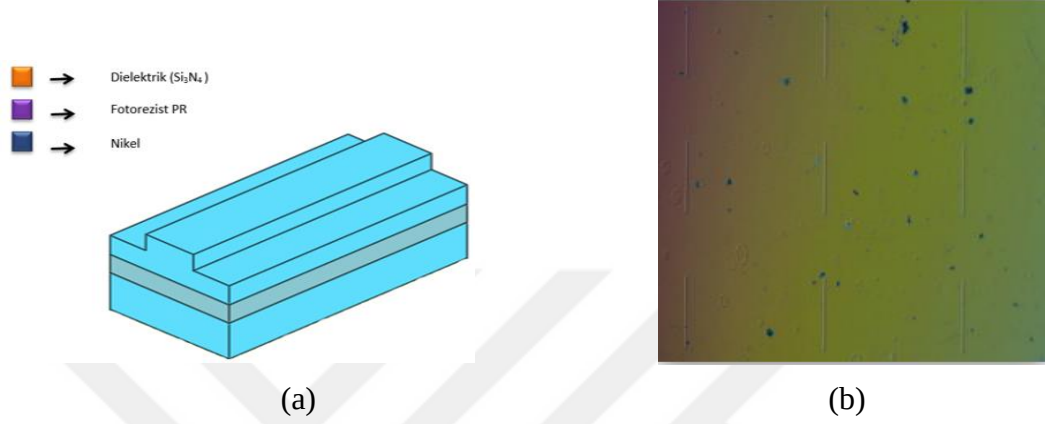
(a)



(b)

Şekil 3.13. (a) H₂SO₄ ile nikelin kaldırılması ve (b) Optik mikroskop görüntüsü.

8- InP aşındırma ile sırt dalga kılavuzu oluşturulması: Numunelere Çizelge 3.6'da verilen parametrelere bağlı olarak reçeteler hazırlandı ve en uygun reçeteye göre kuru aşındırma yapılarak sırt kılavuzu oluşturuldu. Şekil 3.14 (a)'da gösterildiği gibi aşındırma işlemi yapıldıktan sonra HF ile Si_3N_4 kaldırıldı. Şekil 3.14 (b)'de ise Si_3N_4 kaldırıldıktan sonra optik mikroskop görüntüsü gösterilmektedir.



Şekil 3.14. (a) ICP-RIE cihazı ile InP aşındırma ve Si_3N_4 kaldırma ve (b) Optik mikroskop görüntüsü.

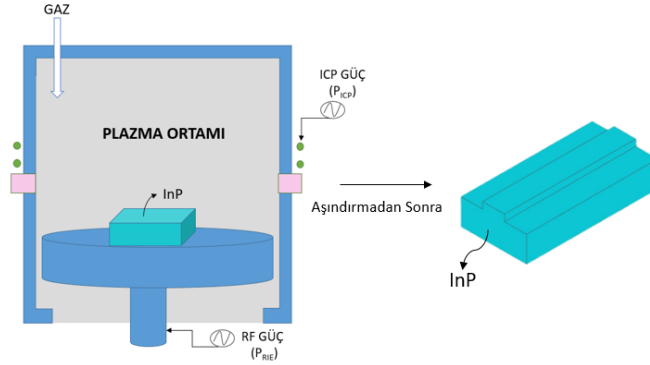
Çizelge 3. 6. InP'nin ICP-RIE aşındırması sırasında kullanılan parametreler

İndüktif Kuplajlı Plazma Reaktif İyon Aşındırma (Inductively Coupled Plasma Reactive Ion Etching ICP-RIE)	
RF Güç (P_{RIE})	150 W
ICP Güç (P_{ICP})	400 W
Gaz karışımları	$\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$
Basınç	15 mTorr
Sıcaklık	25 °C (Isıtma Olmadan)

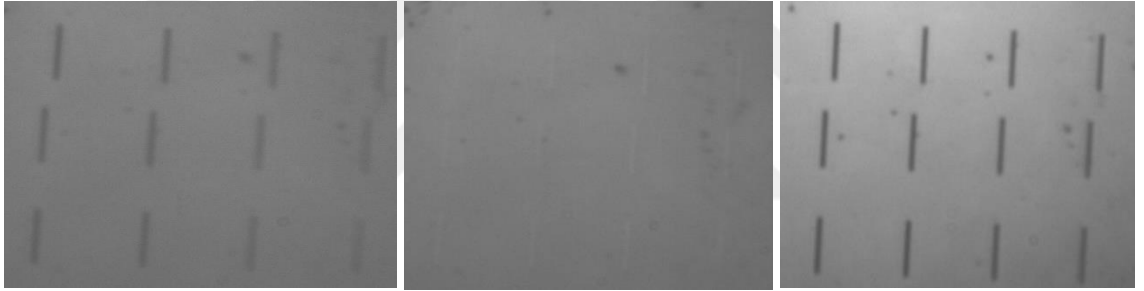


Şekil 3.15. Temiz odada aşındırma yaparken kullandığımız ICP-RIE cihazı.

Şekil 3.15'te temiz odada kullandığımız ICP-RIE cihazının fotoğrafı ve Şekil 3.16'da ise şematiği verilmiştir. Ayrıca Şekil 3.17'de aşınma işlemleri sırasında alınan görüntüler sırasıyla verilmiştir.



Şekil 3.16. ICP-RIE aşındırma şematiği.



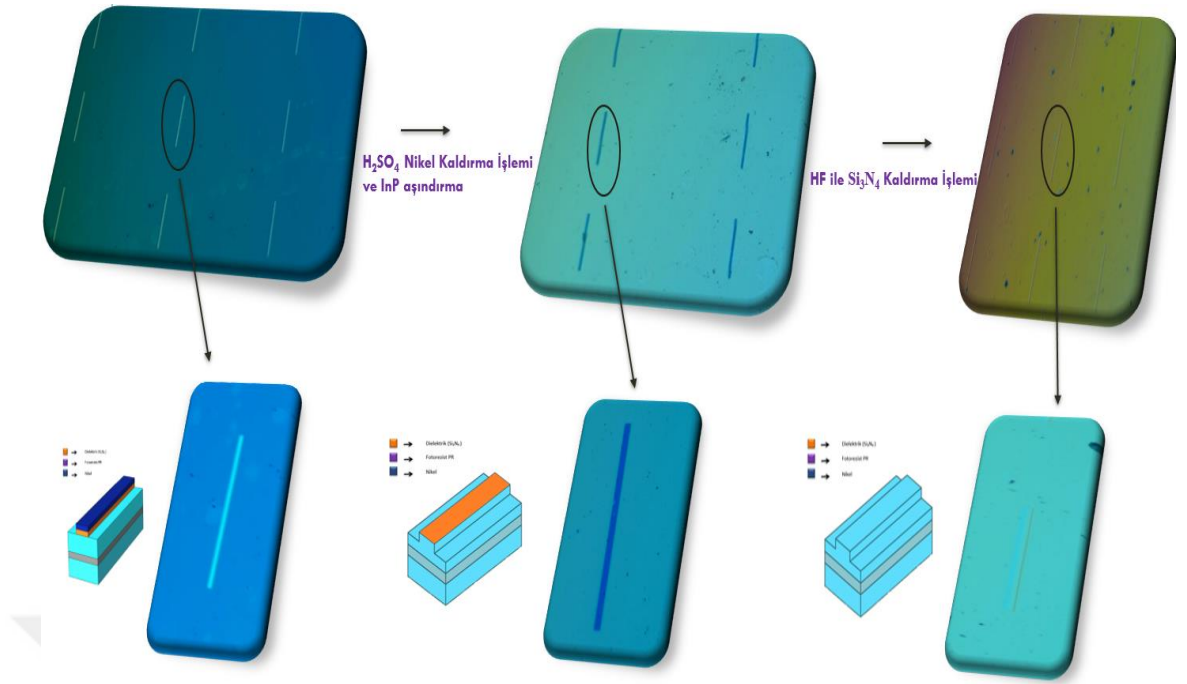
InP aşınmadan önce

InP aşınırken

InP aşındıktan sonra

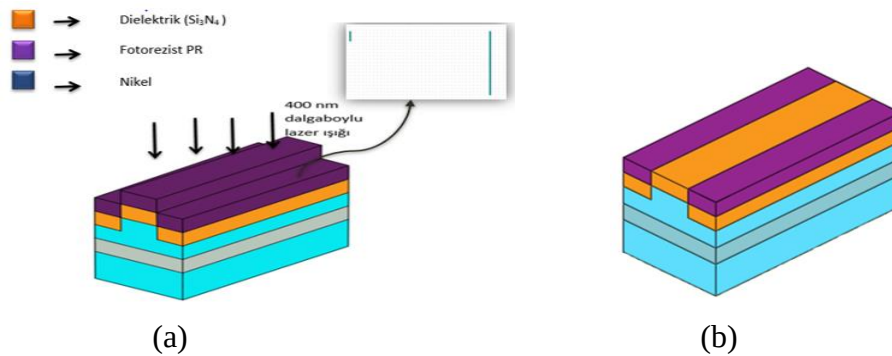
Şekil 3.17. ICP-RIE cihazı kullanılarak elde edilen InP aşınma görüntüleri.

Şekil 3.18'de sırt dalga kılavuzunu oluşturmak için nikel ve Si_3N_4 maskelerin kaldırma işlem aşamaları gösterilmiştir.



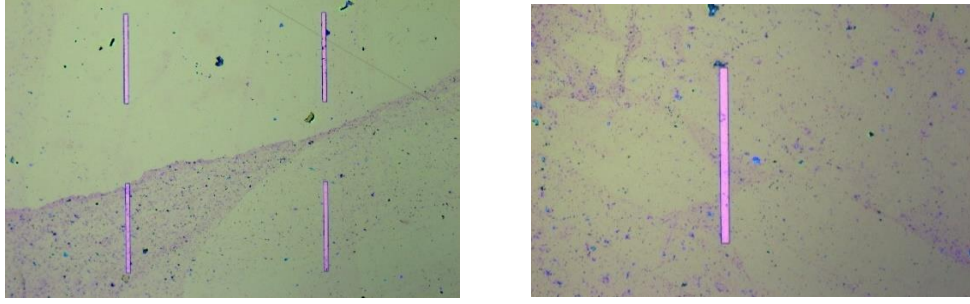
Şekil 3.18. Nikel ve Si₃N₄ kaldırma işleminin optik profilometre görüntüleri.

9- Si₃N₄ kaplama ve ikinci fotolitografi: Plazmayla iyileştirilmiş kimyasal buhar biriktirme (Plasma Enhancement Chemical Vapor Deposition-PECVD) cihazı ile numunelere 300 s’de 200 nm Si₃N₄ kaplandı. Kaplama için kullanılan tarif Çizelge 3.3’te verilmiştir. Numunelere primer kullanılarak S1805 pozitif fotorezisti serildi. Dönel kaplama (Spin Coater) cihazında, S1805 fotorezisti 3000 rpm’de 30 s numuneye kaplandı. Fotorezist kalınlığı 50 nm olarak ölçüldü.



Şekil 3.19. (a) PECVD ile Si₃N₄ kaplama ve ikinci maskesiz litografi ve (b) banyo (development).

Şekil 3.20’de Si₃N₄ kaplama işleminin optik mikroskop görüntüleri gösterilmiştir. Şekil 3.21’de ise ikinci litografi işleminden sonra elde edilen dalga kılavuzunun maskeleme cihazındaki görüntüsü verilmiştir.



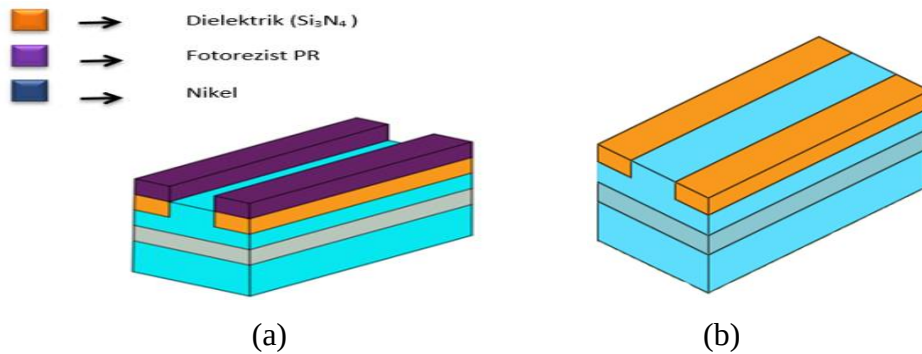
Şekil 3.20. İkinci kez Si_3N_4 kaplama işleminin optik mikroskop görüntüleri.



Şekil 3.21. İkinci litografi işleminden sonra elde edilen dalga kılavuzunun maskeleme cihazındaki görüntüsü.

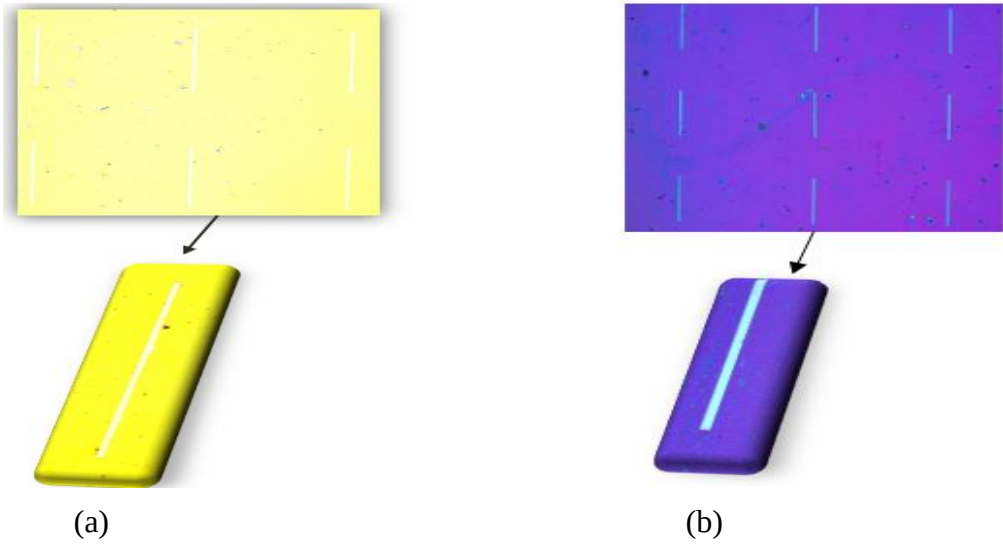
10- Si_3N_4 tabakasının aşındırılması ve fotorezistin kaldırılması:

Maskelenmemiş orta kısımdaki 200 nm kalınlığındaki Si_3N_4 tabakası Çizelge 3.4'teki parametreler kullanılarak indüktif kuplajlı plazma (ICP-RIE) cihazı ile aşındırıldı (Şekil 3.22(a)). Bu işlem sonrası Çizelge 3.5'teki değerler kullanılarak O_2 plazma ile hassas temizlik yapıldı. Şekil 3.23(b)'de görüldüğü gibi asetonla fotorezist kaldırıldı.



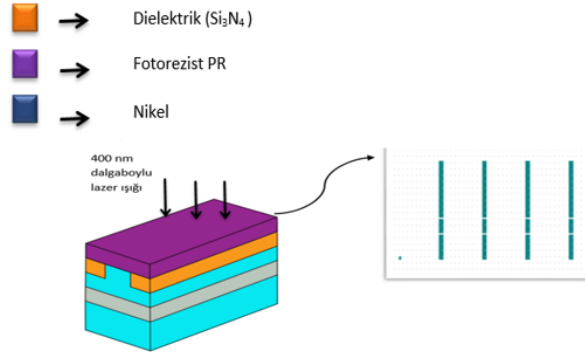
Şekil 3.22. (a) Si_3N_4 aşındırma ve (b) asetonla fotorezistin kaldırılması.

Şekil 3.23'te Si_3N_4 aşındırma işleminin optik mikroskop görüntülerinin mikroskobun yakın ve uzak lenslerine göre görüntüleri verilmiştir. Şekil 3.24(a) 25x lens ile büyötmeye ve (b) 20x lens ile büyötmeye sahip olan görüntülerdir.



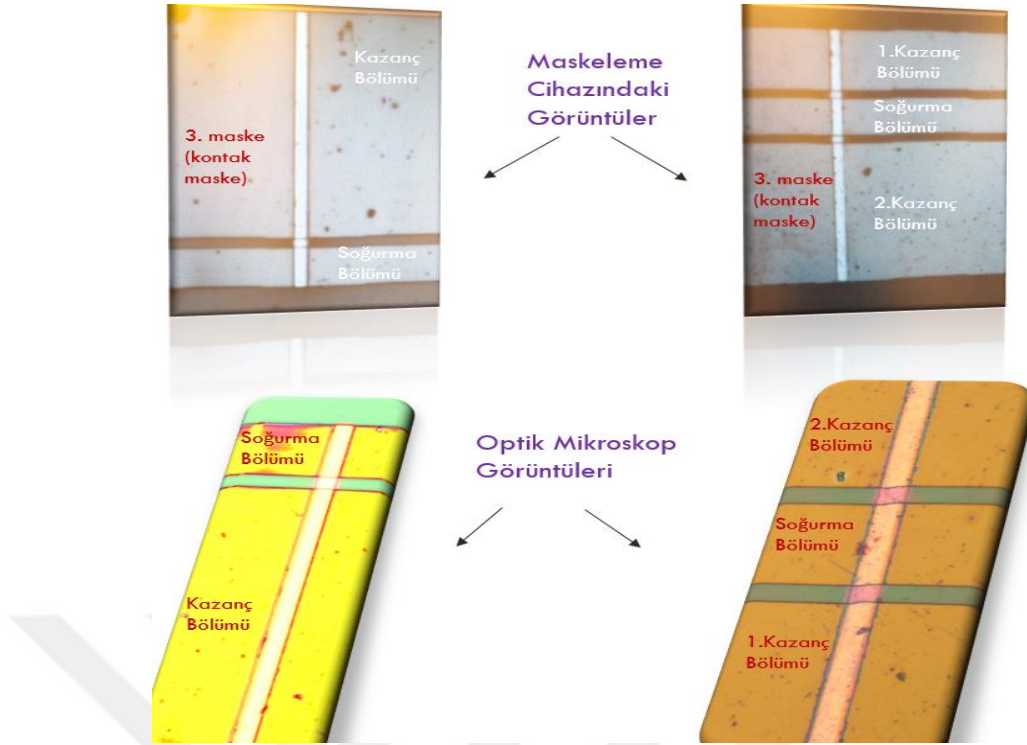
Şekil 3.23. Si_3N_4 aşındırma işleminin optik mikroskop görüntüleri: (a) 25x ve (b) 20x lensler kullanılarak elde edilen optik mikroskop görüntüleri.

11-Üçüncü fotolitografi: Numunelere primer kullanılarak S1805 pozitif fotorezisti serildi. Dönel kaplama (Spin Coater) cihazında, S1805 fotorezisti 3000 rpm’de 30 s süreyle numuneye kaplandı. Fotorezist kalınlığı 50 nm olarak ölçüldü.



Şekil 3.24. Üçüncü maskesiz litografi.

Şekil 3.25’te üçüncü maskesiz litografi işleminin maskeleme cihazındaki ve optik mikroskoptaki görüntüleri verilmiştir.



Şekil 3.25. Üçüncü maskesiz fotolitografi işleminin maskeleme cihazındaki (üstteki şekil ve optik mikroskoptaki görüntüleri (alttaki şekil).

3.5. InP Aşındırma İşlemi

3.5.1. Kuru aşındırma (dry etching)

Kuru aşındırma, yarı iletken lazerler, mikro-kavite lazerler ve fotonik kristaller gibi fotonik cihazların mikrofabrikasyonunda önemli bir rol oynamaktadır (Matsutani et al. 2001). Bu amaca ulaşmak için, dar, tek modlu sırt dalga kılavuzları üretebilen; yüksek derecede anizotropik profile ve pürüzsüz yan duvarlara sahip, alt kesikler (undercut) veya çentikler içermeyen bir kuru aşındırma sürecine ihtiyaç vardır. Bu sayede optik saçılma kayıpları en aza indirilebilir (Guilet et al. 2006). Mikroelektronik endüstrisinde de yaygın olarak kullanılan kuru aşındırma tekniğinde, birden fazla katmanla çalışılırken, aşındırma işleminin istenilen katmanda tam olarak durdurulabilmesi için sürecin dikkatle kontrol edilmesi gerekmektedir (Oubensaid et al. 2011).

Plazma aşındırma, günümüzde araştırma, geliştirme ve üretim aşamalarında nanoteknoloji platformlarının imalatında geniş bir kullanım alanına sahiptir ve çok çeşitli bileşenler ile entegre devrelere uygulanabilmektedir. Bu yöntem, silikon ve III–V

malzemeleri gibi geniş bir yarı iletken yelpazesini kapsamaktadır. Fotonik cihaz üretiminde kullanılan indiyum fosfat (InP) da bu malzemeler arasında yer almaktadır (Gutiérrez et al. 2020). InP, optoelektronik uygulamalarda önemli bir III–V malzeme olarak öne çıkar ve sahip olduğu çeşitli avantajları nedeniyle tercih edilmektedir. GaAs ile karşılaştırıldığında, InP daha hızlı elektron hareketine olanak tanıyarak daha yüksek performans potansiyeli sunar. Ayrıca, InP daha yüksek kırılma voltajı, daha geniş bir enerji aralığı farkı, daha düşük iyonlaşma katsayısı ve daha küçük bir dielektrik sabiti ile de avantaj sağlar (Malherbe and Barnard 1991). InP tabanlı cihazlar, düşük kayıplı fiber iletişimi ve entegre optik uygulamalara uyumları sayesinde optoelektronikte giderek yaygınlaşmaktadır (Aksakal et al. 2020).

İdeal koşullarda, InP kullanılarak üretilmesi gereken entegre optoelektronik cihazların üretiminde, kesin kontrol ve ayarlanabilir anizotropi sunan desen aktarma tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır (Cakmak and White 2001). Bu nedenle, kuru aşındırma, tüm yapı boyunca tekdüze ve anizotropik (dikey) aşındırma profilleri oluşturmak için vazgeçilmez hale gelmiştir; çünkü anizotropi, aşındırmaya maruz kalan lazer yüzeyleri gibi uygulamalarda büyük önem taşır. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünün desenler arasında kısa devrelere yol açabileceği ve bu durumun lazerlerin çalışmasını engelleyebileceği göz önünde bulundurulduğunda, pürüzsüz yapıların sağlanması gerekmektedir (Cakmak 2002).

InP tabanlı cihazların üretiminde çeşitli kuru aşındırma teknikleri başarıyla uygulanmıştır. Bu yöntemler arasında reaktif iyon aşındırma (RIE) ve endüktif olarak kuplajlanmış plazma (ICP) teknikleri, diğer alternatif yöntemlere kıyasla üstün anizotropi ve iyileştirilmiş yüzey morfolojisi sunmaktadır (Cakmak et al. 2013). ICP-RIE reaktörü, her iki RF jeneratöründen gelen RF gücünün kontrol edilmesine olanak tanır. Plazma akışını etkileyen RF gücüne endüktif güç (P_{ICP}), plazma iyonlarını hızlandırarak aşındırılan malzemenin polarizasyon voltajını oluşturan RF gücüne ise RF bias gücü (P_{RIE}) denir. Her iki kaynaktan sağlanan güç, aşındırma hızını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır (Racka-Szmidt et al. 2022).

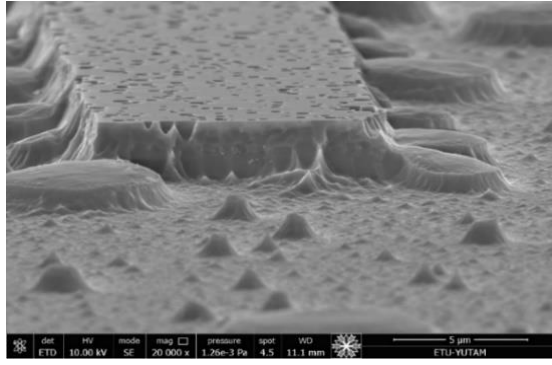
InP ve ilgili malzemelerin kuru aşındırması, yüksek derecede anizotropik aşındırma gerektiren yeni cihaz yapılarında artan bir ilgi görmektedir (Yoshikawa 1992).

InP tabanlı yapıların reaktif iyon aşındırması (RIE), korozif ve toksik olmayan hidrokarbon kimyasallarının kullanıldığı çeşitli çalışmalarda gösterilmiştir. Cl_2 bazlı halojen kimyasallara kıyasla, CH_4/H_2 gaz karışımları kalıntısız ve dikey morfolojiler elde edilmesini sağlamaktadır (Niggebrügge et al. 1986; Matsui et al. 1988; Allen and Silverberg 1991; McNabb et al. 1991; Schramm et al. 1997; Nunoya 2001).

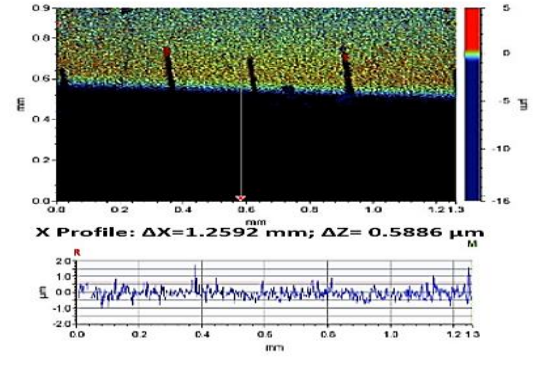
Bir diğer yaygın olarak kullanılan kuru aşındırma tekniği, CH_4/H_2 gaz karışımları ile birlikte Cl_2 bazlı kimyasalların kullanıldığı ICP yöntemidir (Hommel et al. 1991; Lee et al. 1996). Bu yöntemde dik yan duvarlar, substratın ısıtılmasıyla elde edilebilmektedir (Coldren et al. 1980; Donnelly et al. 1982; Tadokkorro et al. 1988; Mutoh et al. 1990). Literatürde, flor bazlı gaz karışımları kullanılarak yapılan ICP-RIE tabanlı kuru aşındırma yöntemine de değinilmiştir. Ancak flor bazlı plazmanın neden olduğu hasar oldukça yüksek olduğundan, bu hasarların çok yüksek sıcaklıklarda bile tamamen giderilemediği belirtilmektedir (Scofield et al. 1998; Kim et al. 2004; Kathalingam et al. 2011).

Bu tez çalışmasında, pürüzsüz yüzey ve dik (anizotropik) yan duvar yapıları elde etmek amacıyla CH_4/H_2 , $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$, Cl_2/H_2 ve Cl_2 gaz karışımlarının akış hızları optimize edilerek InP tabanlı malzemelerin kuru aşındırma işlemi yapılmıştır. Aşındırılan yapıların anizotropisi ve yüzey/yan duvar pürüzlülüğü, taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve 3D profilometre kullanılarak analiz edilmiştir. Aşındırma sonuçlarının nicel karakterizasyonu, pürüzlülük ortalaması (R_a), yan duvar açısı ve aşındırma oranı değerlerinin elde edilmesi üzerinden gerçekleştirilmektedir.

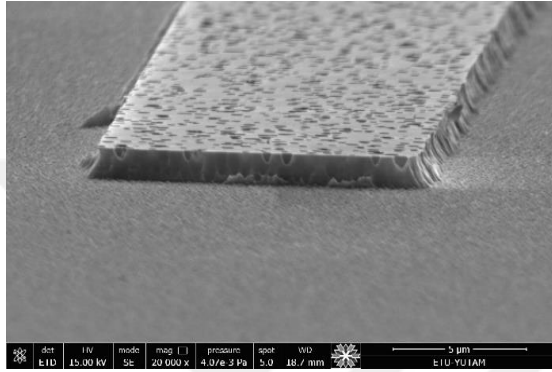
Tüm deneysel işlemlerde ICP gücü 400 W, RF gücü ise 150 W olarak belirlendi. Aşındırılmış yapıların SEM ve 3D profil görüntüleri Şekil 3.26 (a) ve (b)'de CH_4/H_2 gaz karışımları (16/28 sccm) ve Şekil 3.26 (c) ve (d)'de 16/32 sccm için elde edilmiştir.



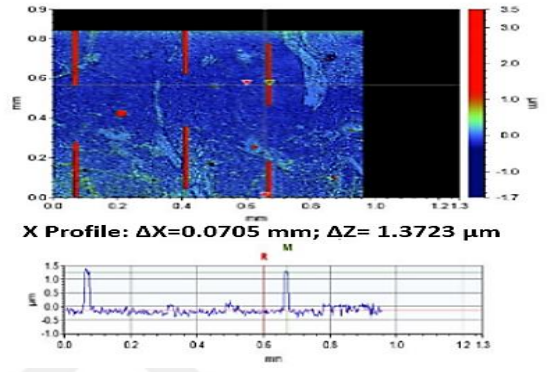
(a)



(b)



(c)

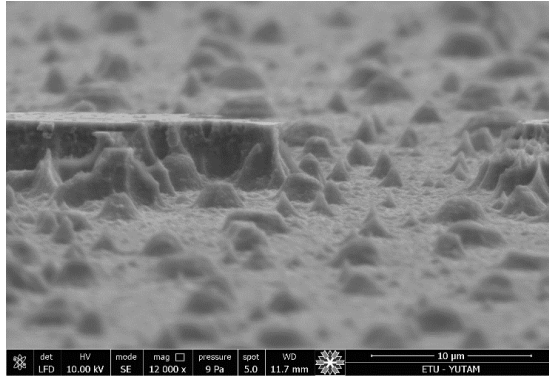


(d)

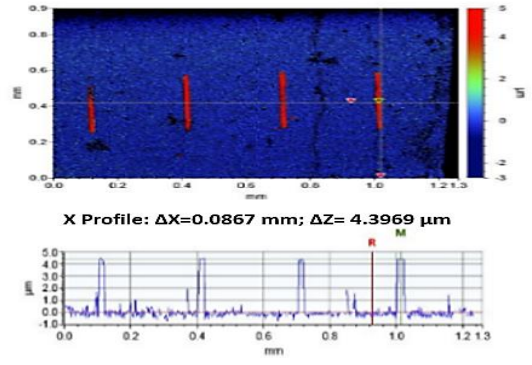
Şekil 3.26. İki farklı deney sonucuna ait SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2=16/28$ sccm, $R_a=0,293 \mu\text{m}$ ve (c, d) $\text{CH}_4/\text{H}_2=16/32$ sccm $R_a=0,182 \mu\text{m}$.

CH_4/H_2 akış hızı 16/28 sccm olduğunda, R_a değerinin $0,293 \mu\text{m}$ olduğu yani yüzey pürüzlülüğünün oldukça yüksek olduğu görülmektedir. H_2 akış hızı 32 sccm'ye çıkarıldığında (Şekil 3.27(c)) yüzey pürüzlülüğünün $R_a=0,182 \mu\text{m}$ 'ye düştüğü gözlemlendi. Ancak her iki durumda da yan duvar profilleri oldukça pürüzlüdür. Profilometreden elde edilen aşındırma profilleri Şekil 3.26 (b) ve (d)'de verilmektedir. Şekil 3.26 (b) ve (d)'deki alt şekiller ise yapıların aşındırma derinliğini göstermektedir.

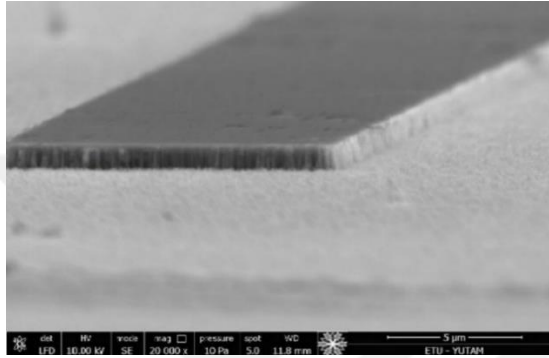
Şekil 3.27 (a) ve (b)'de CH_4/H_2 akış hızı 10/20 sccm olduğunda R_a değerinin $0,282 \mu\text{m}$ olduğu görülmektedir. CH_4/H_2 'nin gaz akış hızı iki katına çıkarılarak 20/40 sccm yapıldığında, Şekil 3.27 (c) ve (d)'de gösterildiği gibi $R_a=0,187 \mu\text{m}$ ve aşındırma hızı 101 nm/dk olarak elde edilmiş ve yüzey pürüzlülüğü önemli ölçüde azalmıştır. Bu da aşındırma oranından ödün vermeden düzgün yüzeyler elde edilebildiğini göstermektedir.



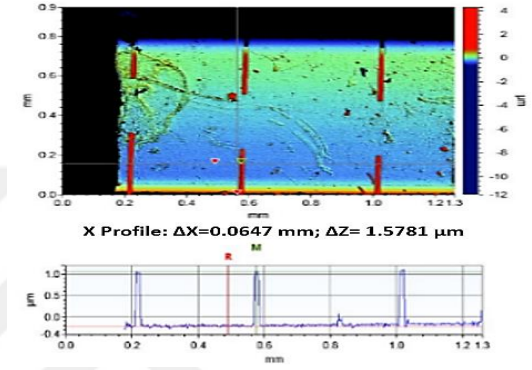
(a)



(b)



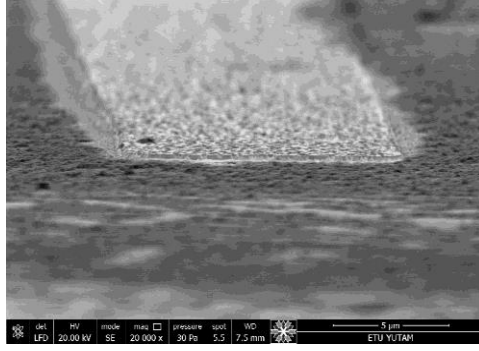
(c)



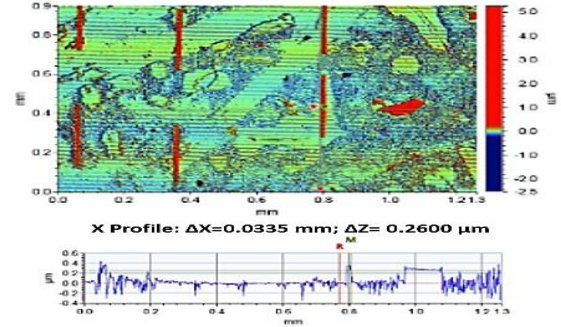
(d)

Şekil 3.27. İki farklı deney sonucuna ait SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 10/20$ sccm, $R_a = 0,282 \mu\text{m}$ ve (c, d) $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 20/40$ sccm, $R_a = 0,187 \mu\text{m}$.

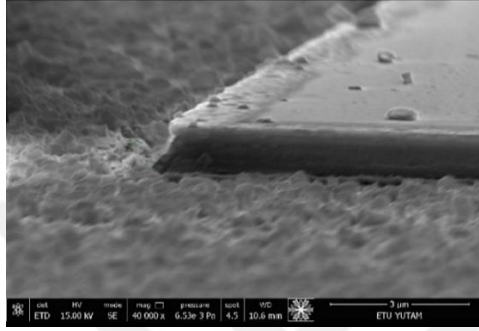
Şekil 3.28’de farklı akış hızları için $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ gazlarının kullanıldığı SEM ve profilometre görüntüleri gösterilmektedir. CH_4/H_2 gaz akış hızları 16/32 sccm’de sabit tutulurken Cl_2 gaz akışı 5 ile 20 sccm arasında değiştirilmiştir. Şekil 3.28(a)’da görüldüğü gibi, $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 16/32/5$ sccm gaz karışımı için Cl_2 gaz oranının 5 sccm gibi düşük bir değere sahip olmasından dolayı yüzeyde herhangi bir aşınma gerçekleşmemiştir.



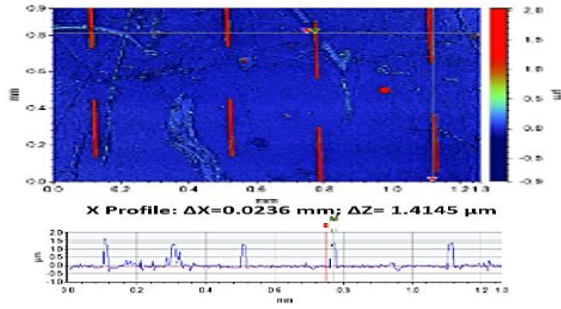
(a)



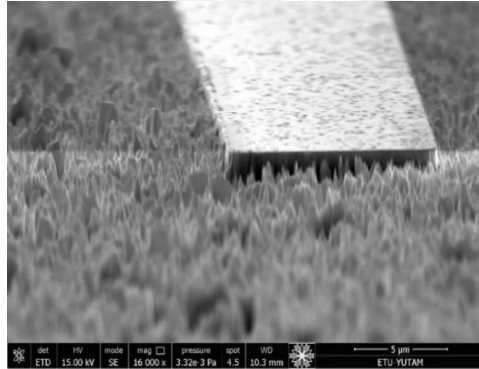
(b)



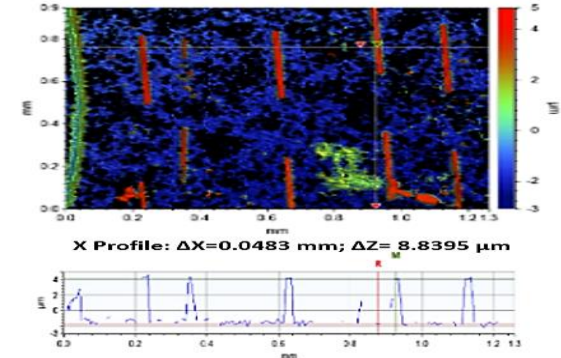
(c)



(d)



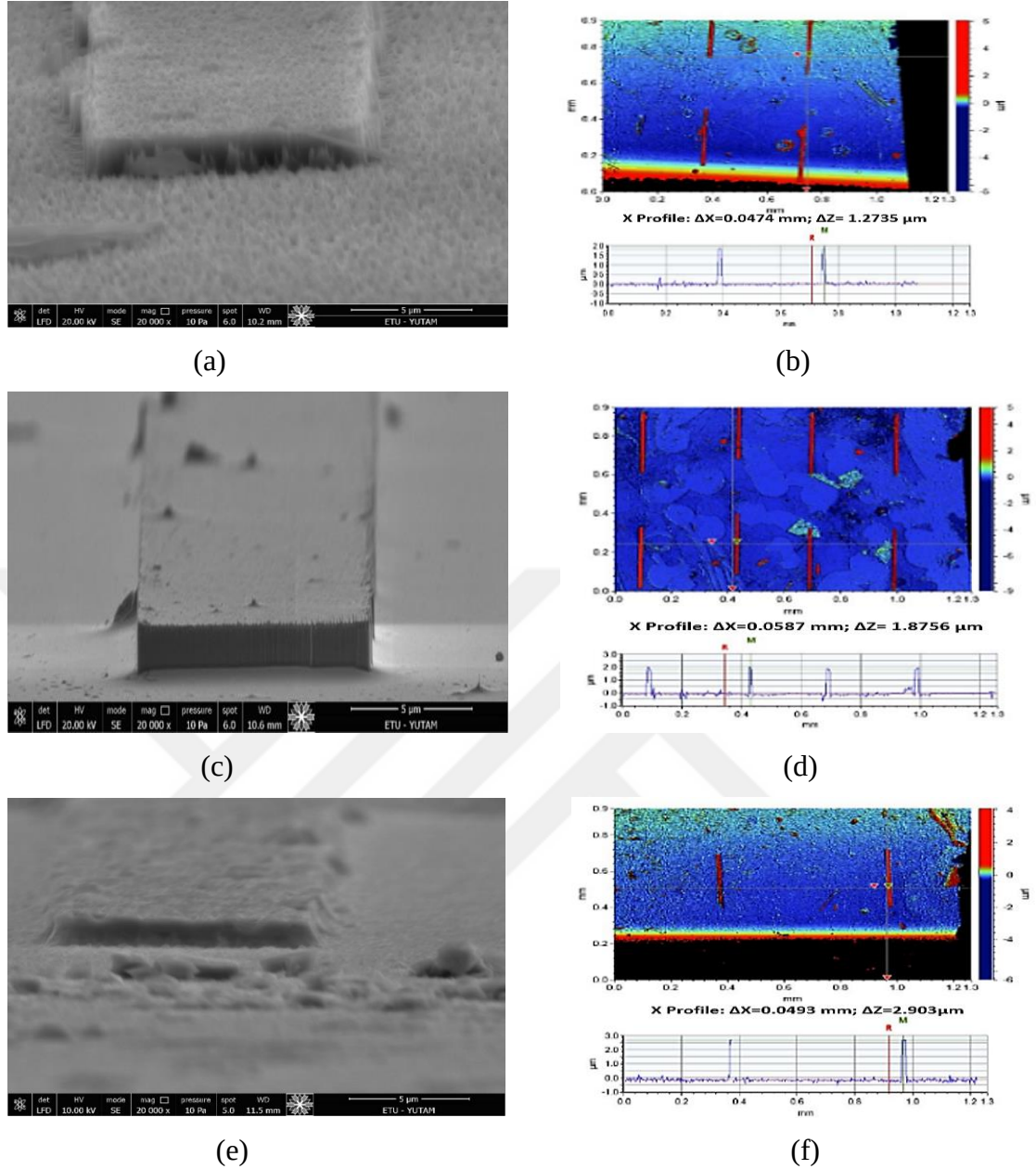
(e)



(f)

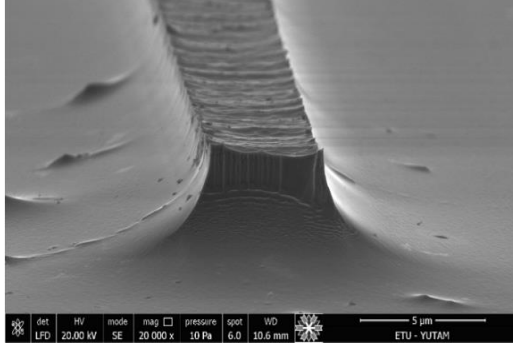
Şekil 3.28. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 16/32/5$ sccm, $R_a = 0,205 \mu\text{m}$ (c,d) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 16/32/10$ sccm, $R_a = 0,176 \mu\text{m}$ ve (e,f) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 16/32/20$ sccm, $R_a = 2,02 \mu\text{m}$.

En düşük yüzey pürüzlülüğü, $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 16/32/5$ sccm gaz karışımı için (burada Cl_2 akış hızı 5 sccm'den 10 sccm'e çıkarılmıştır) elde edilmiş olup R_a değeri $0,176 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür (Şekil 3.28(c)). Aşındırma oranı ise 150 nm/dk olarak elde edilmiştir.

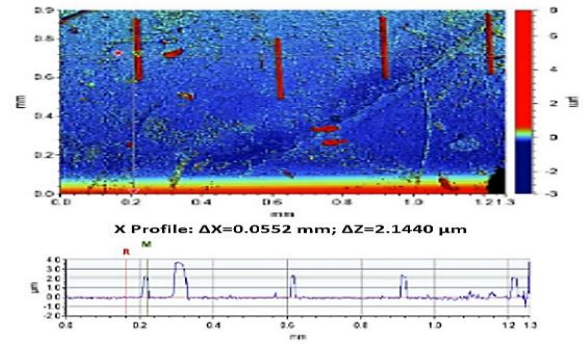


Şekil 3.29. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2=10/20/4$ sccm, $R_a=0,201$ µm, (c,d) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2=10/20/6$ sccm, $R_a=0,137$ µm (e, f) ve $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2=10/20/10$ sccm, $R_a=0,218$ µm.

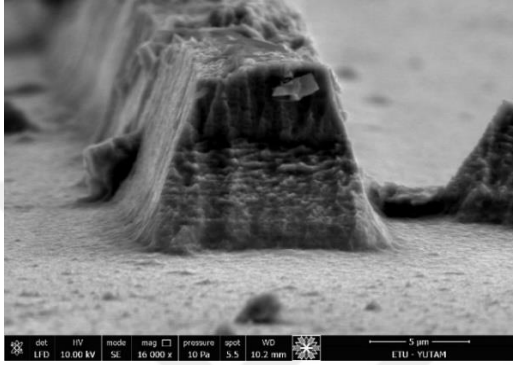
Daha kaliteli aşındırma sonuçları Şekil 3.29’da gösterilmektedir. Burada CH_4/H_2 gaz karışımları 16/32 sccm’den 10/20 sccm’ye düşürülürken Cl_2 gazı 4 ile 10 sccm arasında değiştirilmiştir. Şekil 3.29 (c) ve (d)’deki SEM resminde ve X profilinde görüldüğü gibi ($\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2=10/20/6$ sccm’de) ortalama yüzey pürüzlülüğü $R_a=0.137$ µm olarak elde edilmiştir. Bu değer tüm aşındırma deneylerinde elde edilen en düşük değerdir. Aşındırma oranı (etch rate) tüm aşındırma işlemleri içinde en yüksek 240 nm/dk olarak elde edilmiştir.



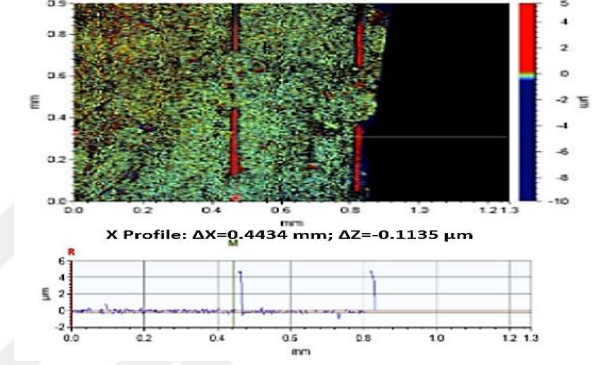
(a)



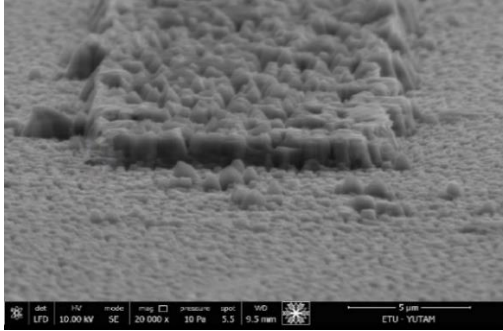
(b)



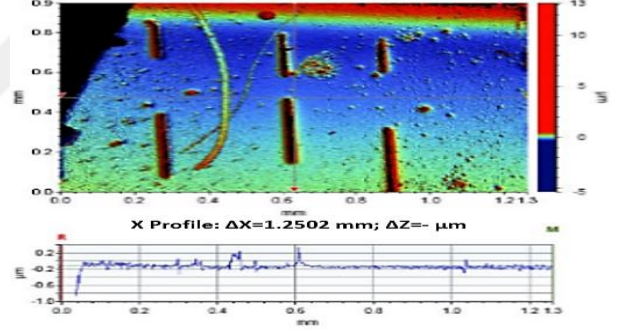
(c)



(d)



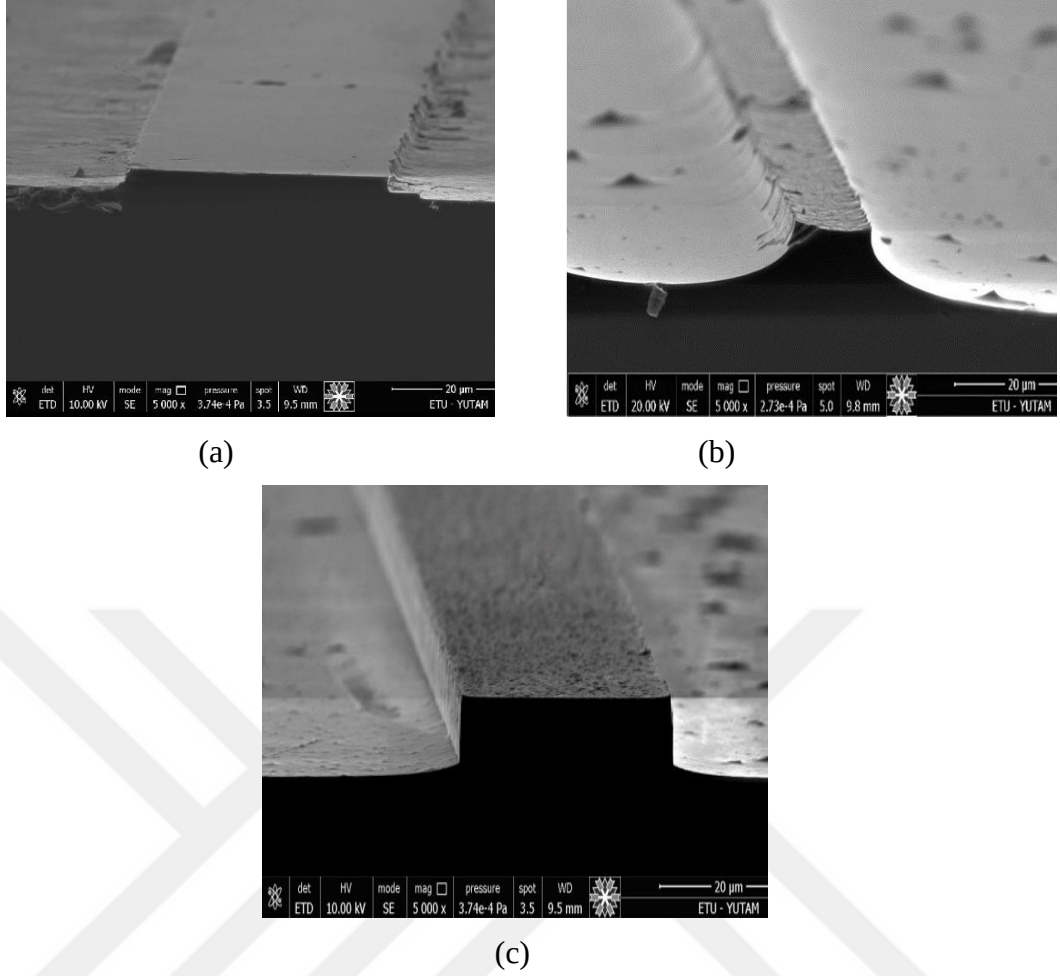
(e)



(f)

Şekil 3.30. Üç farklı deneysel sonuç için SEM, 3D profilometre görüntüleri ve pürüzlülük ortalamaları: (a, b) $H_2/Cl_2=10/18$ sccm, $Ra=0,292 \mu m$, (c, d) $H_2/Cl_2=8/20$ sccm, $Ra=0,266 \mu m$ ve (e, f) $Cl_2=18$ sccm, $Ra=0,349 \mu m$.

Aşındırma işlemi ayrıca H_2/Cl_2 gaz karışımları kullanılarak da gerçekleştirilmiş olup sonuçlar Şekil 3.30'da gösterilmiştir. Bu gaz akış hızları arasında en iyi yüzey düzgünlüğü, Şekil 3.30(a)'da gösterildiği gibi $H_2/Cl_2=10/18$ sccm ile elde edilmiştir. Ancak yan duvar profili hem anizotropik değildir hem de aşındırma tam olarak gerçekleşmemiştir. Şekil 3.30(b)'de Ra değeri $0,292 \mu m$ olarak ölçülmüştür. Yalnızca Cl_2 kullanımı, Şekil 3.30 (e) ve (f)'de gösterildiği gibi InP 'ı aşındırmamıştır. Bu, beklenen bir sonuçtur çünkü InP 'ı aşındırmak için H_2 gazına da ihtiyaç vardır.



Şekil 3.31. ICP-RIE ile aşındırılan InP numunelerin profil görüntüleri: (a) $\text{CH}_4/\text{H}_2 = 20/40$ sccm, (b) $\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 10/18$ sccm ve (c) $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2 = 10/20/6$ sccm.

Aşındırılmış yapıların enine kesitlerinin yan duvar profilleri, Şekil 3.31’de gösterilmektedir. Yan duvar açıları CH_4/H_2 (20/40 sccm), H_2/Cl_2 (10/18 sccm) ve $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ (10/20/6 sccm) için sırasıyla 84° , 72° ve $\sim 90^\circ$ olarak ölçülmüş olup Şekil 3.31 (a), (b) ve (c)’de gösterilmektedir. Şekil 3.31(c)’de gösterildiği gibi, en pürüzsüz yüzey ($R_a = 0,137 \mu\text{m}$) ve en dik (anizotropik) profil ($\sim 90^\circ$), $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ (10/20/6 sccm) gaz karışımı kullanılarak elde edilmiştir. Literatürde ICP işleminde, dik yan duvarların alt tabakanın ısıtılmasıyla elde edilebileceği söylene de (Donnelly et al. 1981), bizim çalışmamızda ısıtma olmadan oldukça anizotropik yan duvar profilleri elde edilmiştir.

Uygulanan gaz oranlarına göre elde edilen sonuçlar (gaz akış oranları, eğim açısı, ortalama pürüzlülük (R_a) ve aşındırma oranı Çizelge 3.7’de gösterilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere farklı gaz karışım oranları için, 940 nm/dk gibi çok yüksek aşındırma oranları veya $0.059 \mu\text{m}$ gibi düşük pürüzlülük değerleri elde edilmiş olmakla birlikte, üç

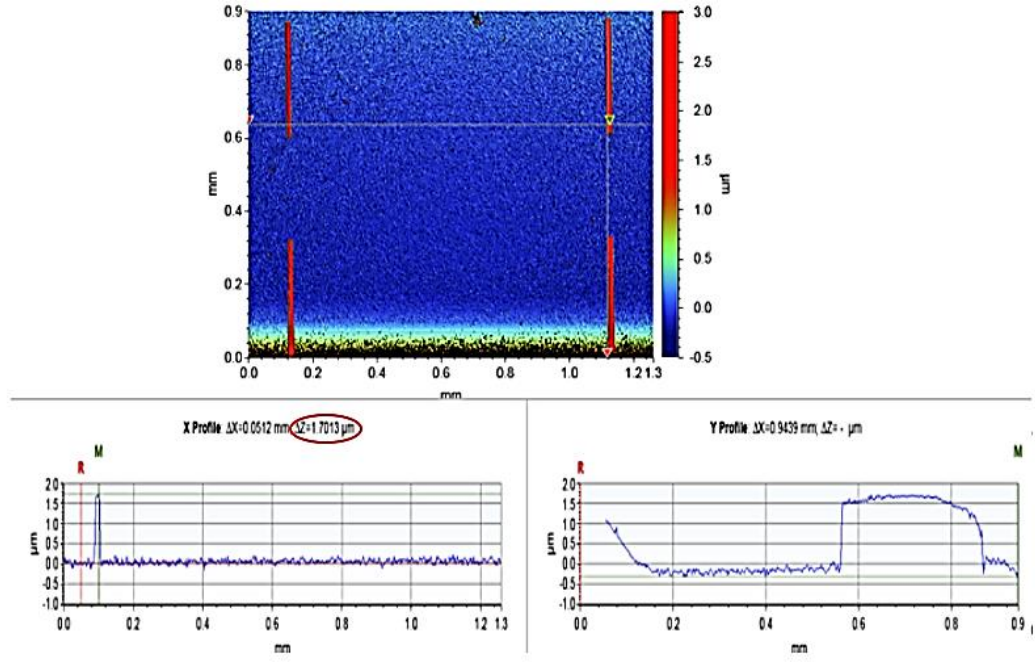
3. MATERYAL ve YÖNTEM

parametreyi birlikte (profil dikliği, ortalama pürüzlülük ve aşındırma oranı) göz önüne aldığımızda en optimum sonuç, yukarıda da ifade edildiği gibi CH₄/H₂/Cl₂ (10/20/6 sccm) gaz karışımı için elde edilmiş olup çizelgede kırmızı kalın karakterlerle gösterilmiştir.

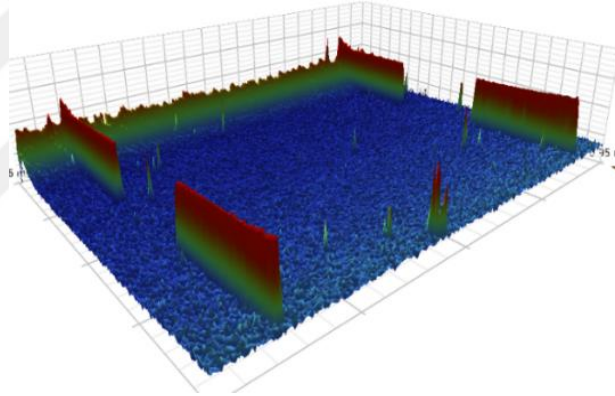
Çizelge 3.7. CH₄, H₂, Cl₂ gaz akış oranları ve elde edilen sonuçlar

H ₂ (sccm)	CH ₄ (sccm)	Cl ₂ (sccm)	Profil Dikliği	Ra (Ortalama pürüzlülük)	Aşındırma Oranı (nm/dk)
28	16	-	-	0,293 µm	100
32	16	-	59°	0,182 µm	75
32	16	5	69°	0,205 µm	12
32	16	10	53°	0,176 µm	150
32	16	20	-	2,02 µm	600
20	10	-	-	0,282 µm	235
20	10	4	86°	0,201 µm	180
20	10	6	90°	0,137 µm	240
20	10	8	79°	0,206 µm	80
20	10	10	61°	0,218 µm	55
20	10	16	-	0,168 µm	38
20	10	30	-	0,075 µm	60
40	20	-	84°	0,187 µm	101
40	20	10	-	0,172 µm	28
40	20	16	-	0,059 µm	50
10	10	10	-	0,239 µm	24
12	10	11	-	-	0.2
10	-	16	-	0,221 µm	210
10	-	18	72°	0,292 µm	460
8	-	20	74°	0,266 µm	940
-	20	16	69°	0,216 µm	400
-	-	18	-	0,349 µm	150

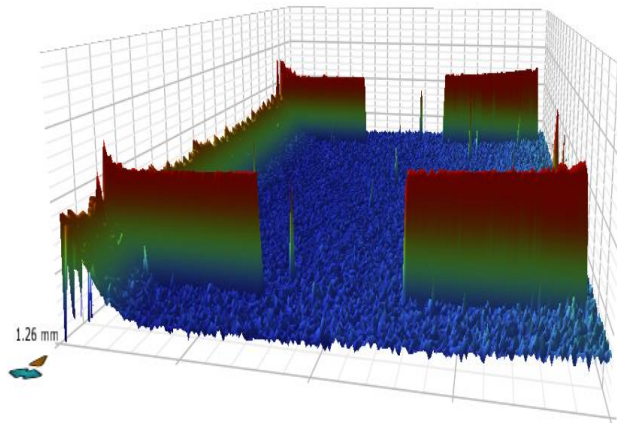
InP aşındırmasında en optimum sonuçlar belirlendikten sonra, Şekil 3.32’de gösterildiği gibi AlGaInAs/InP çoklu tabaka malzeme yapısı, aktif tabaka kalınlığına kadar 1,7 µm aşındırılmıştır. Şekil 3.33’te ise, InGaAsP/InP malzemesi aktif tabaka kalınlığına kadar 1,5 µm aşındırılmıştır.



(a)

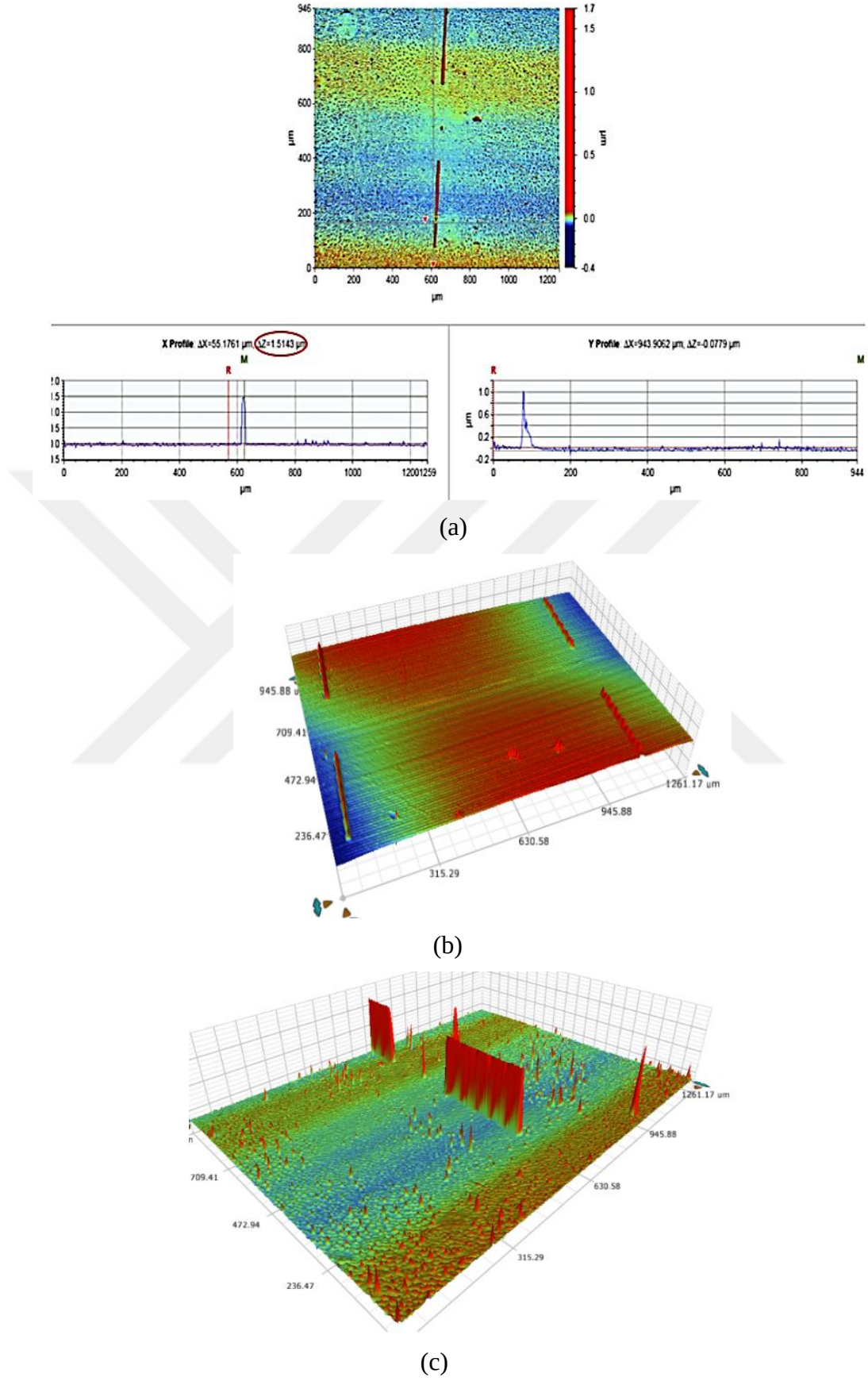


(b)



(c)

Şekil 3.32. AlGaInAs/InP lazer için 1,7 μm aşınma profilometre görüntüleri.

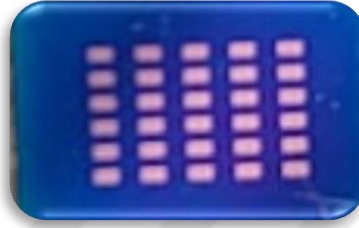


Şekil 3.33. InGaAsP/InP lazer için 1,5 μm aşınma profilometre görüntüleri.

Son olarak numuneler üzerinde oluşabilecek polimer tabakasından kurtulmak için Çizelge 3.5'te verilen parametrelere bağlı olarak O₂ plazma ile hassas temizlik yapılmıştır.

3.6. P ve N Kontak Kaplama

Şekil 3.34'te p tarafı 20 nm Ti (titanyum) ve 150 nm Au (altın) kaplanan lazer aygıtlar gösterilmektedir.



Şekil 3.34. Numunenin p tarafı, Ti/Au (20nm/150nm) kaplandı.

Şekil 3.35'te numuneleri inceltme işlemi gösterilmiştir. Bu işlem sırasında, numuneler S1805 fotorezisti kullanılarak p taraflarından cama yapıştırıldı ve 600 saniye 150°C'de sıcak tabakta (hot plate) bekletildi. Numunelerin n tarafları alüminyum toz kullanılarak inceltildi. Ardından bu numuneler üçer dakika metanol, aseton ve isopropanol içinde bekletildi, DI su ile yıkandı ve azot gazı ile kurutuldu.



Şekil 3.35. Numunenin n tarafını inceltme (polishing) işlemi.

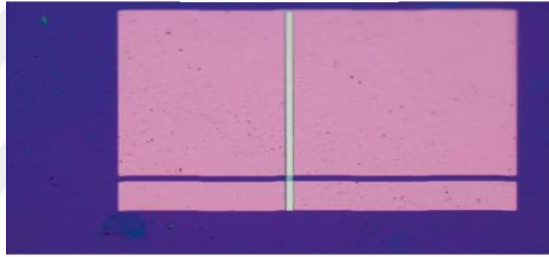
Numunenin n tarafına Şekil 3.36'daki gibi Au/Ge/Au/Ni/Au (14 nm/ 4 nm/14 nm /11 nm/ 200 nm) kaplama yapılmıştır. Alaşımlar, en düşük omik kontak direncini elde etmek için en uygun yapıdadır.



Şekil 3.36. Numunenin n tarafına metal alaşım kaplama işlemi: Au/Ge/Au/Ni/Au (14nm/14nm/14nm/11nm/200nm).

3.7 Hızlı Termal Tavlama

Numunelerin tavlamadan önceki yüzeyi Şekil 3.37’de gösterilmiştir.



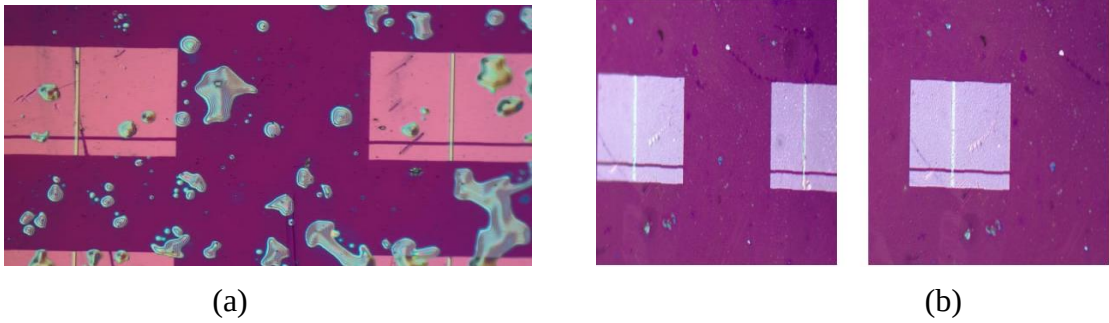
Şekil 3.37. Tavlamadan önce yüzeyin optik mikroskop görüntüsü.

Numuneler, Çizelge 3.8’de gösterildiği gibi iki farklı reçete kullanılarak tavlannmıştır.

Çizelge 3.8. Tavlama için iki farklı reçete

Reçete 1	Reçete 2
- Sıcaklık 1 dakikada 350°C’ye yükseltildi - Numune, 350°C’de 30 s bekletildi - Sıcaklık 30 s içinde 400°C’ye yükseltildi - Numune, 400°C’de 60 s bekletildi	- Numune, 450 °C’de 90 s tavlandı

Çizelge 3.8’de verilen reçeteler kullanılarak elde edilen tavlama sonuçlarının optik mikroskop görüntüleri Şekil 3.38’de gösterilmiş olup en iyi tavlama sonuçları reçete 2 için elde edilmiştir.



Şekil 3.38. Tavlamadan sonra optik mikroskop görüntüleri: (a) reçete 1 ve (b) reçete 2.

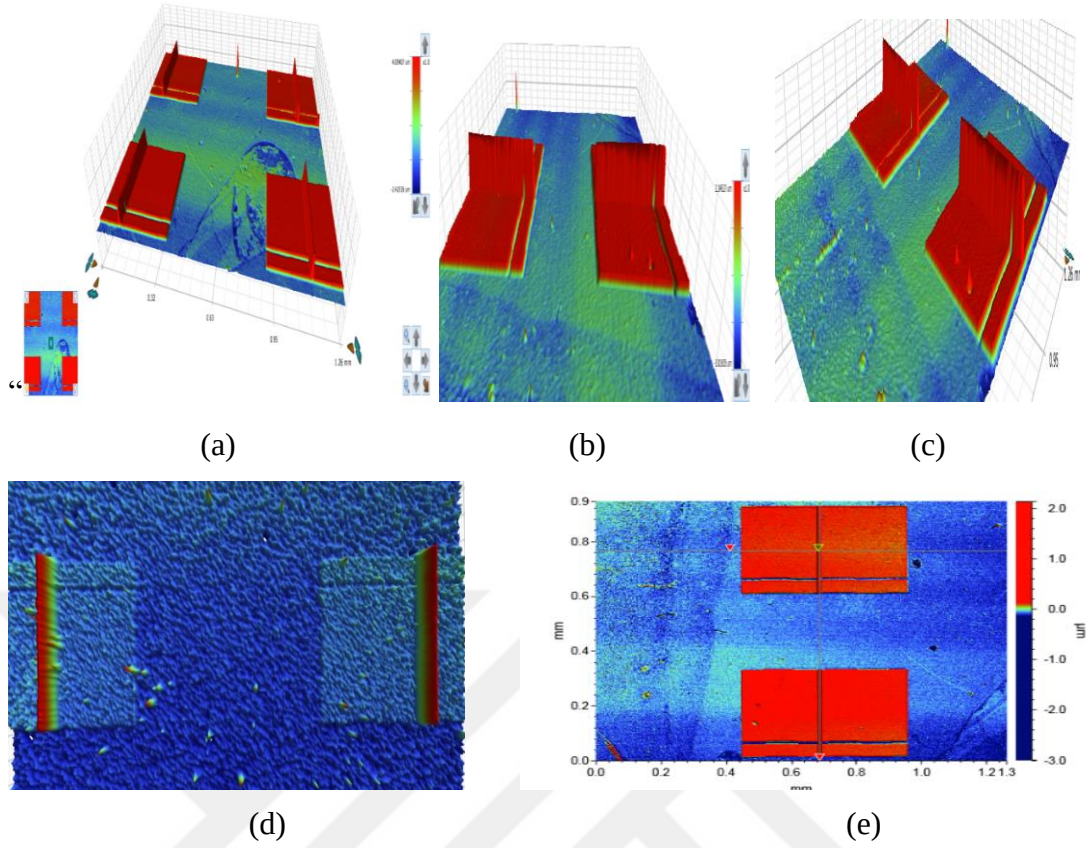
3.8. Tek Kazançlı Lazerin Optik Mikroskop ve 3D Profilometre Görüntüleri

Şekil 3.39’da tek kazançlı lazerlerin optik mikroskop görüntüleri (farklı lensler için) verilmiştir.



Şekil 3.39. Tek kazançlı lazerler için optik mikroskop görüntüleri.

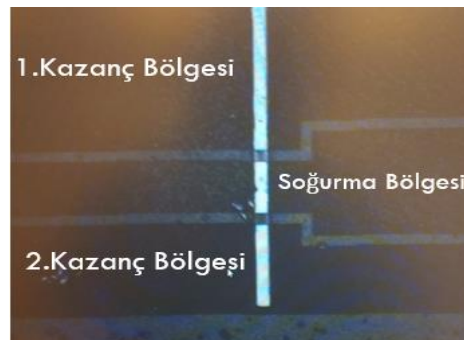
Tek kazançlı lazerler için 3D profilometre görüntüleri farklı konumlara göre Şekil 3.40’da verilmiştir. Burada verilen 3D resimler, (a) yukarıdan, (b) yandan, (c) sol üstten, (d) üç boyutlu yukarıdan ve (e) iki boyutlu yukarıdan görüntülerdir.



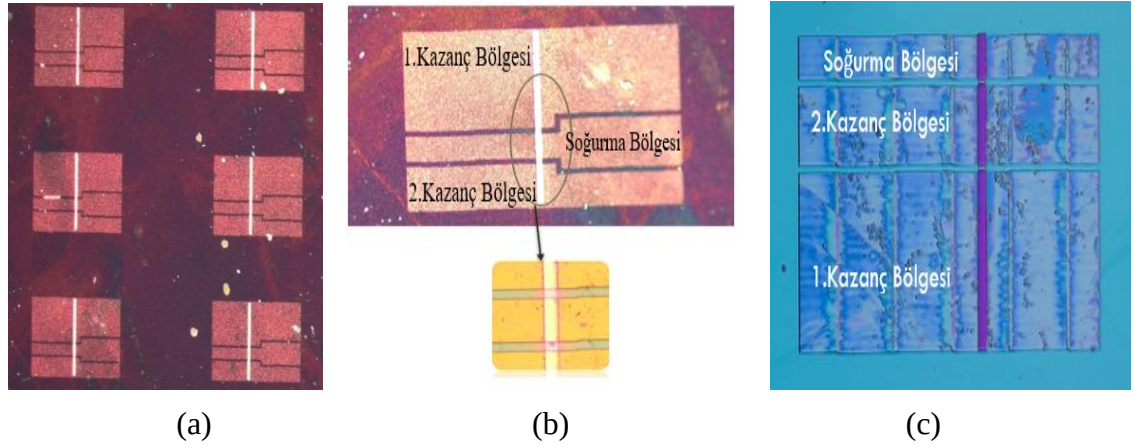
Şekil 3.40. Tek kazançlı lazerler için 3D profilometre görüntüleri: (a) yukarıdan, (b) yandan, (c) sol üstten, (d) üç boyutlu yukarıdan ve (e) iki boyutlu yukarıdan.

3.9. İki Kazançlı Lazerin Optik Mikroskop ve 3D profilometre görüntüleri

Şekil 3.41’de iki kazançlı lazer maskeleme cihazı görüntüsü ve Şekil 3.42’de optik mikroskopta farklı uzaklıklardaki görüntüler gösterilmiştir. Soğurma bölümü ortadayken Şekil 3.42(a)’da mikroskobun 10x büyütmesindeki ve (b)’de ise 25x büyütmedeki görüntüler verilmiştir. Şekil 3.42(c)’de ise soğurma bölümü sondayken lazerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

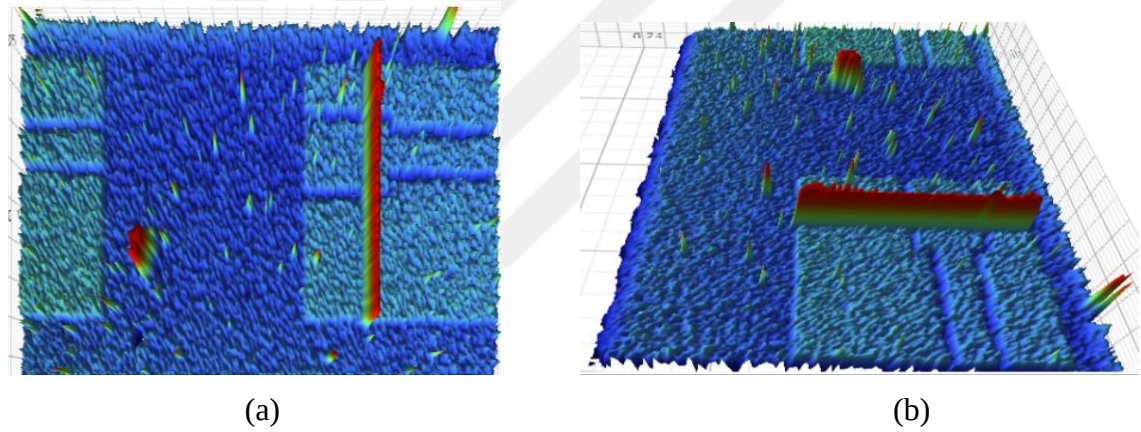


Şekil 3.41. İki kazançlı lazer maskeleme cihazı görüntüsü.



Şekil 3.42. İki kazançlı lazerlerin optik mikroskop görüntüleri (a) 10x odaklı lensde (b) 25x odaklı lensde (c) soğurma bölümü sondayken.

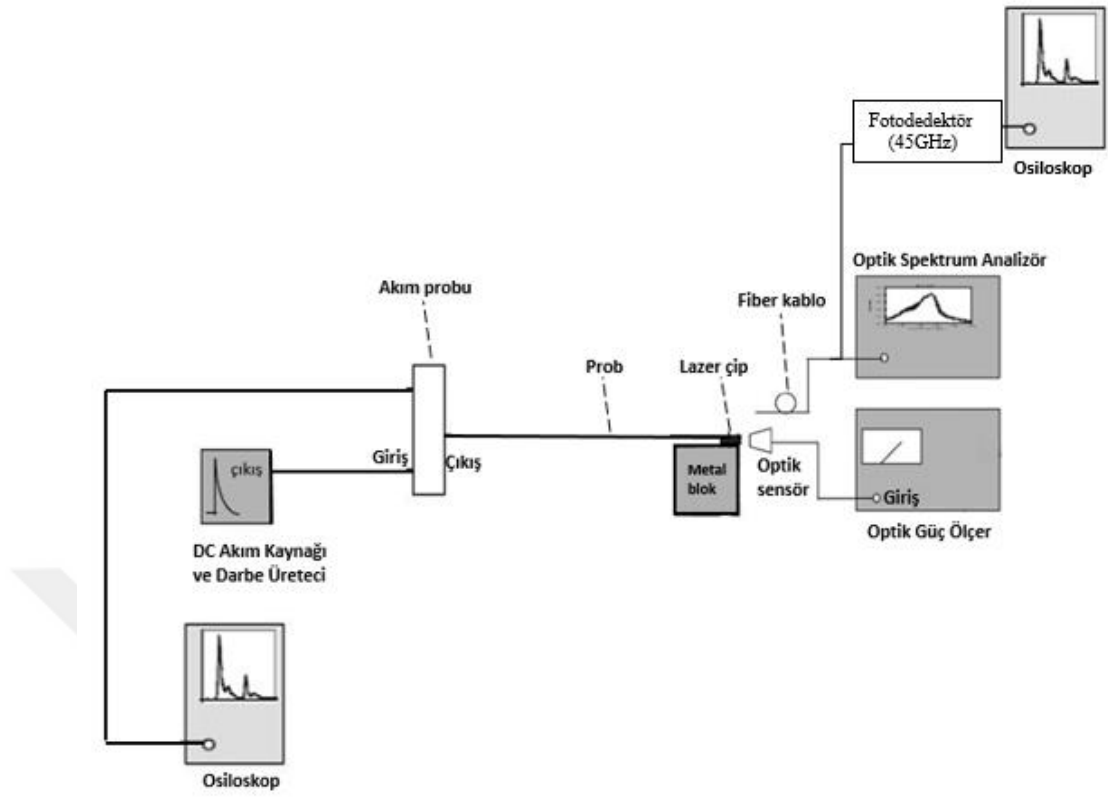
Şekil 3.43'te iki kazançlı lazerin 3D profilometre görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.43. İki kazançlı lazerin 3D profilometrede farklı konumlardaki görüntüleri: (a) üstten görünüşü ve (b) yandan görünüş.

3.10. Lazer Ölçüm Düzenegi

Üretilen numunelerin ölçüm karakteristiklerinin belirlenmesi için deney düzeneğinin şematiği Şekil 3.44'te verilmiştir. Burada gösterilen optik güç ölçer Şekil 3.45'te, optik spektrum analizör Şekil 3.46'da, akım ve gerilim kaynakları Şekil 3.47'de gösterilmiştir. Yarı iletken lazerlerden optik darbe elde edebilmek için fiber optik kablo ile kullandığımız New Focus marka fotodedektör Şekil 3.48'de gösterilmiştir. Bu ölçüm düzeneğinde, fiber optik kablo ile optik spektrum analizörü cihazından ölçüm alındıktan sonra, fiber optik kablo ile fotodedektör aracılığıyla osiloskopta optik darbeler elde edilmiştir.



Şekil 3.44. Lazer ölçüm şematifi.



(a)



(b)

Şekil 3.45. (a) Optik güç ölçer sensörü ve (b) optik güç ölçer.



Fiber kablo girişi

Şekil 3.46. Optik spektrum analizör.

3. MATERYAL ve YÖNTEM



(a)



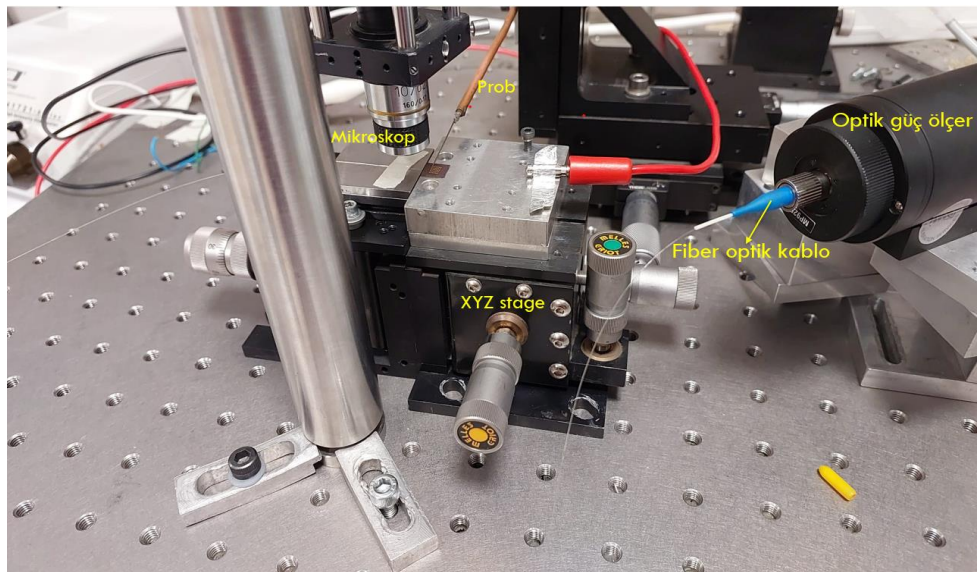
(b)

Şekil 3.47. Ölçüm sisteminde kullanılan; (a) akım kaynağı ve (b) gerilim kaynağı.

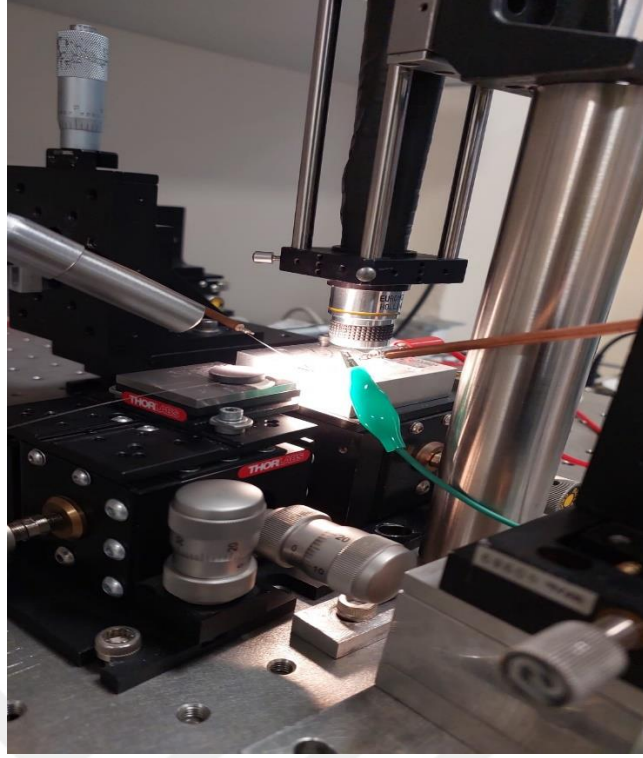


Şekil 3.48. Kullandığımız New Focus marka fotodedektör.

Optik masada kurulan lazer ölçüm düzeneği Şekil 3.49’da gösterilmiştir.

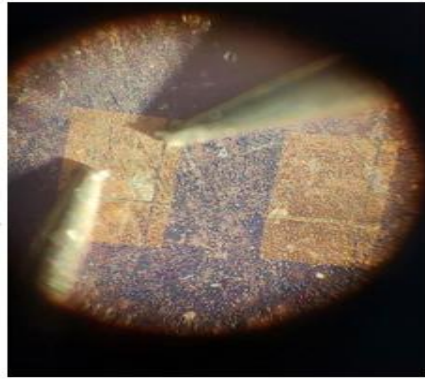


Şekil 3.49. Lazer ölçüm düzeneği.

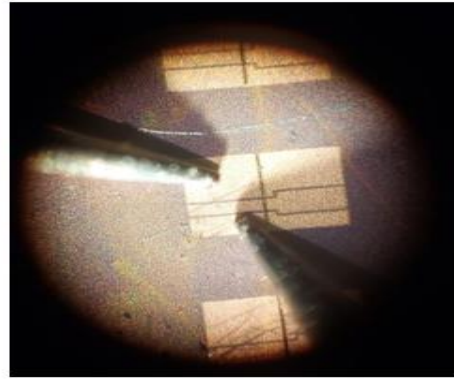


Şekil 3.50. Ölçüm alınırken lazer ölçüm düzeneği.

Şekil 3.50’de ölçüm alınırken lazer ölçüm düzeneği gösterilmiştir. Şekil 3.51’de ise deney düzeneğindeki mikroskop ile kazanç ve soğurma bölümlerine temas ettirilen akım ve gerilim problemleri gösterilmiştir.



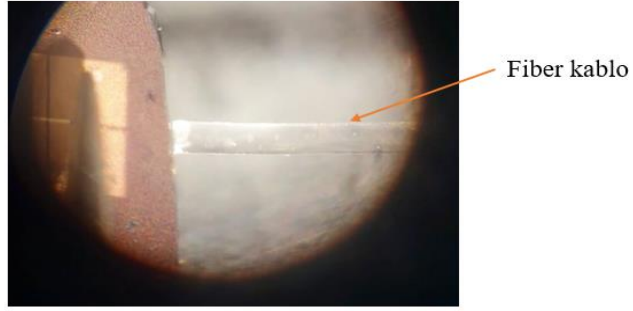
Tek Kazançlı Lazer



İki Kazançlı Lazer

Şekil 3.51. Lazerin kazanç ve soğurma bölümlerine temas ettirilen prob görüntüleri.

Şekil 3.52’de ise optik spektrum analizörden ölçüm alabilmek için fiber optik kablunun mikroskop altında lazere odaklanma görüntüsü verilmiştir.



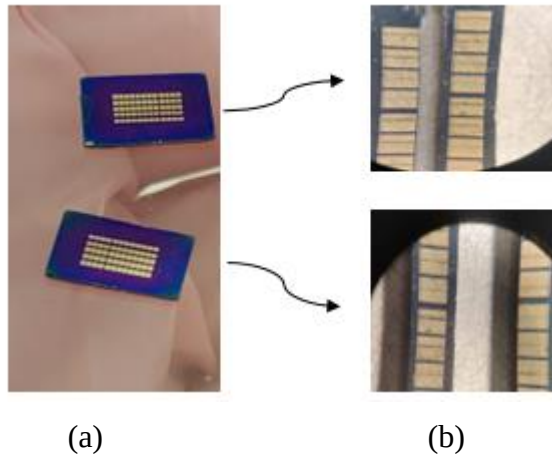
Şekil 3.52. Fiber optik kablo ile optik spektrum ölçüm.

3.11. Lazerlerin Kesilmesi (Cleavage)

Fabrikasyon işlemi tamamlanan yarı iletken lazerleri Şekil 3.53'teki çizici (scriber) cihazı ile çizilip kırılarak ölçüm için hazırlanmıştır.



Şekil 3.53. Lazerlerin kesilmesi için kullanılan çizici (scriber) cihazı.

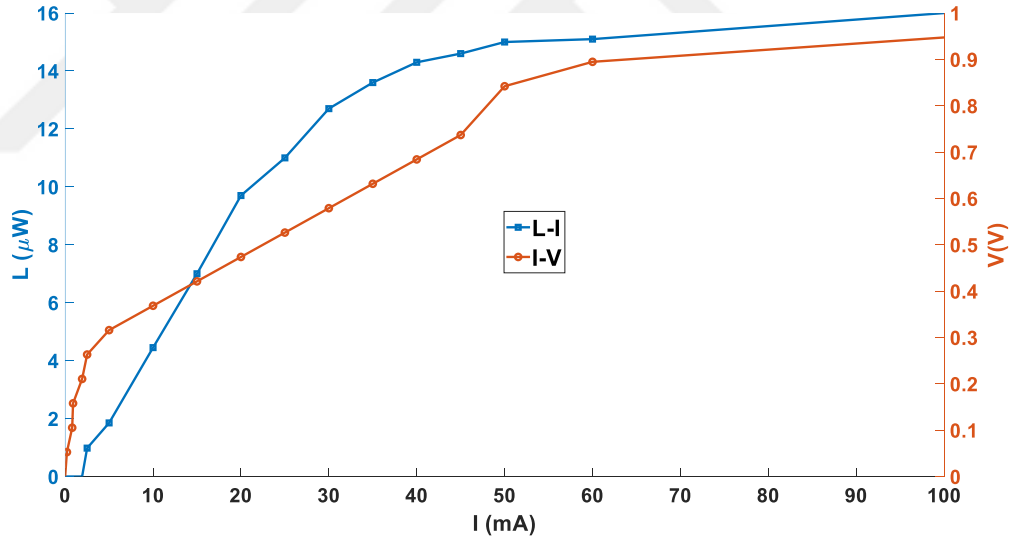


Şekil 3.54. (a) Fabrikasyonu tamamlanan lazerler ve (b) çizip kırıdığımız lazerler.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

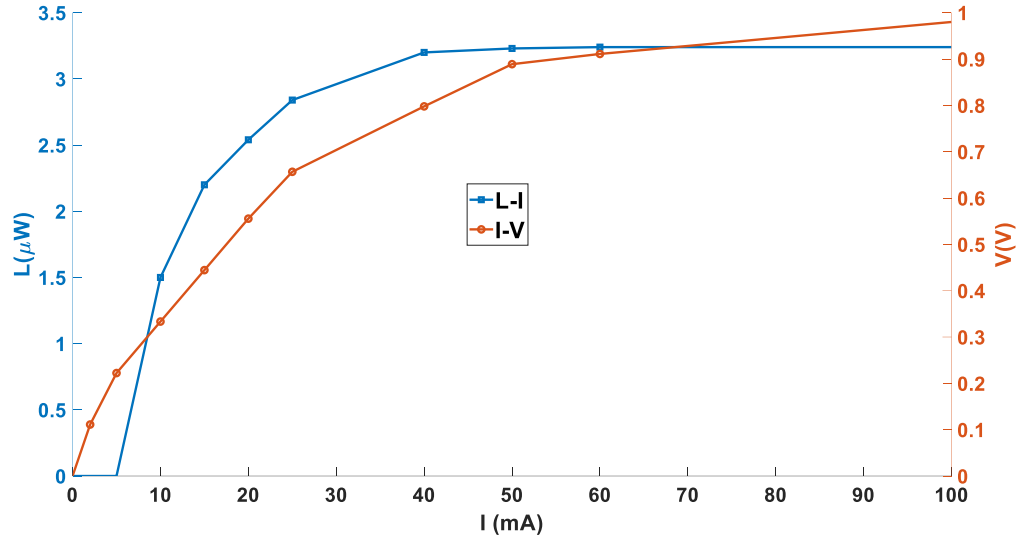
4.1. 1350 nm (ATRK) ve 1550 nm (IEGENS) Lazerlerin I-V ve L-I Karakterizasyon Sonuçları

1350 nm dalga boylu toplam kavite uzunluğu 500 μm 'den küçük olan (toplam kavite uzunluğu=315 μm) lazerlerimizin InGaAsP (ATRK) lazerlerin çıkış gücü-akım (L-I) değişimi ve akım-gerilim (I-V) grafiği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. CW (DC) çalışma şartı altında ölçümler gerçekleştirilmiştir. Soğutucu kullanılmayan sürekli dalga (CW) çalışma şartında, aşırı ısınma etkilerini önlemek amacıyla akım değeri 60 mA ile sınırlandırılmıştır. Bu değerin üzerindeki akımlarda ısınma etkilerinden dolayı çıkış gücü doyuma ulaşmıştır. Eşik akımı yaklaşık 2 mA'dir. Çıkış gücü 16 μW olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.1. 1350 nm lazerler için L-I-V karakteristiği

1550 nm dalgaboylu toplam kavite uzunluğu 500 μm 'den küçük olan lazerlerimizin InGaAsP (ATRK) lazerlerin çıkış gücü-akım değişimi ve akım-gerilim grafiği Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Eşik akımı yaklaşık 5 mA'dir. Çıkış gücü 3 μW 'dır.



Şekil 4.2. 1550 nm lazerler için L-I-V karakteristiği

Çıkış gücü sınırlı olmasına rağmen, eşik akımı gözlemlendiği için lazer karakteristiği taşıdığı ifade edilebilir. Akım-gerilim (I-V) karakteristiğinde, lazerin akımı belirli bir seviyeye kadar yavaş artarken, bu değer in ötesinde hızla yükselmektedir; bu da beklenen bir özellik olarak eklemlerin sağlamlığını destekler niteliktedir.

4.2. İki Bölümlü ve Üç Bölümlü Lazerlerin Pasif Mod Kilitleme Spektrum Sonuçları

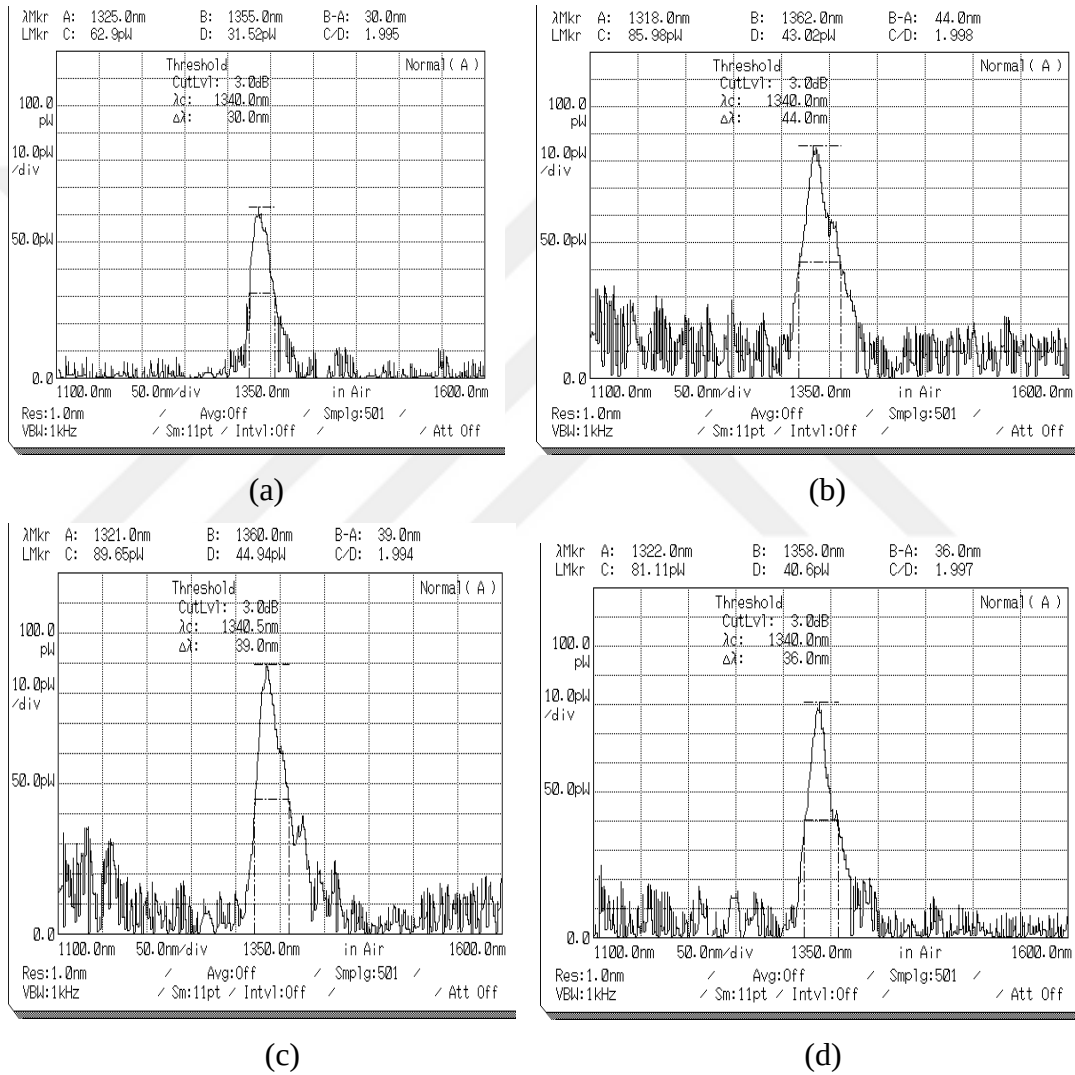
Fabrikasyonu tamamlanan 1350 nm (ATRK) ve 1550 nm (IEGENS) iki bölümlü (tek kazanç ve soğurma bölümlü) ve üç bölümlü (iki kazanç ve soğurma bölümlü) lazerlerin spektrum ölçümleri kazanç bölümüne uygulanan DC akım ve soğurma bölümüne uygulanan ters kutuplama gerilimi uygulanarak fiber kablo yardımıyla Şekil 3.46'da gösterilen optik spektrum analizör kullanılarak elde edilmiştir.

4.2.1. 1350 nm (ATRK) iki bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları

İki bölümlü lazerlerden (toplam kavite uzunluğu <500 µm) kazanç bölümüne DC akım ve soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi uygulanmıştır. Kazanç ve soğurma bölümleri arasındaki dirençler ölçülmüştür ve 255 kΩ - 35 MΩ değerleri elde edilmiştir. Bu farklılığın nedeni, ayırma işlemi sırasında ayırma bölgesinde metalin tam olarak çıkarılmamış olmasından kaynaklanıyor olmasıdır. Elde edilen spektrum sonuçları Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.3(a)'da ve (b)'de kazanç bölümüne uygulanan akım iki

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

katına çıkarılmıştır ve görüldüğü gibi hem güç çıkışı hem de fwhm'deki (yarı maksimumdaki tam genişlik) spektral genişlik 30 nm'den 44 nm'ye çıkmıştır. Şekil 4.3(c)'de soğurma bölümüne -0,5 V ters kutuplama gerilimi uygulanarak spektral genişlik 39 nm'ye düşmüştür. Uygulanan ters gerilim Şekil 4.3(d) görüldüğü gibi -1,5 V'a düşürüldüğünde hem spektral genişlik hem de çıkış gücü (c)'ye göre azalmıştır. Böylece kazanç bölümünde yükseltme ve soğurma bölümünde daraltma etkisi gözlemlenerek spektral genişliğin ve çıkış gücünün ayarlanabilirliği gözlemlenmiştir.



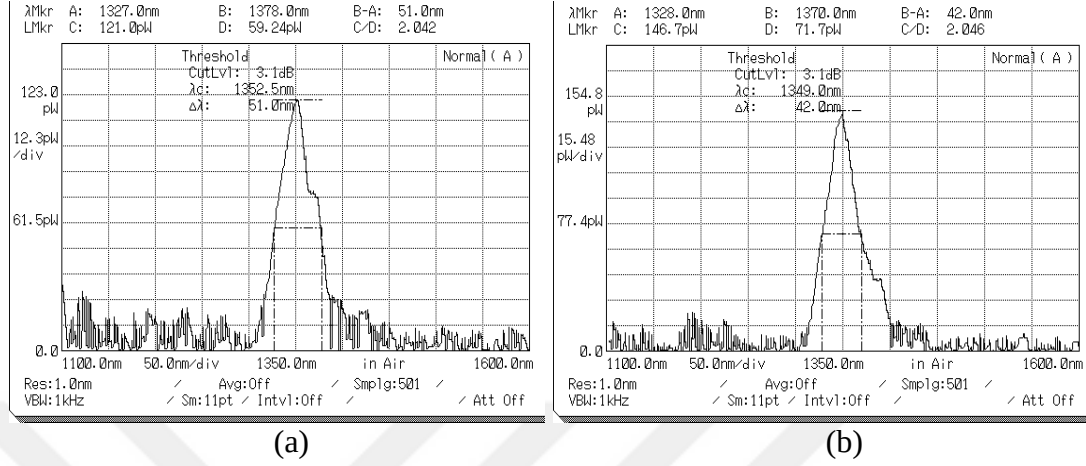
Şekil 4.3. Tek kazançlı iki bölmeli 1350 nm lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA, b) I=40 mA, c) I=40 mA, V=-0.5 V ve d) I=40 mA, V=-1.5 V.

4.2.2. 1350 nm (ATRK) üç bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları

Üç bölümlü ve soğurma bölümü sonda olan lazerlerin optik spektrum sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Şekil 4.4(a)'da kazanç bölümlerine 20 mA'lık akım

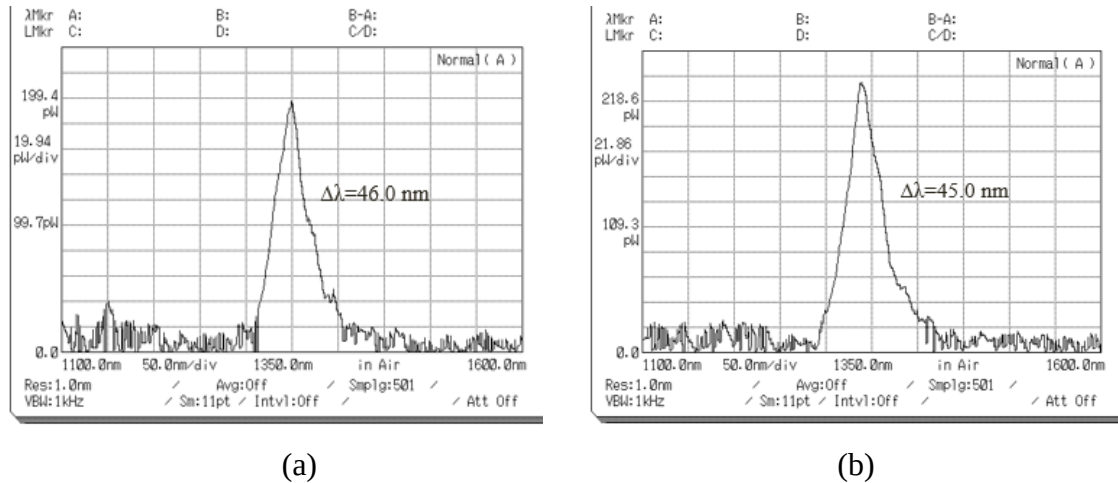
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

uygulanmıştır. Yarı maksimumdaki tam genişlik (fwhm) değeri 51 nm'dir. Şekil 4.4(b)'de akım ve gerilim değerleri artırılarak fwhm değeri 42 nm olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.4. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü sonda) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) $I=20$ mA ve b) $I=40$ mA, $V=-1.5$ V.

Şekil 4.5'te, soğurma bölümü iki kazanç bölümü arasında olan lazerlerin pasif mod kilitleme sonucu elde edilen spektrum sonuçları gösterilmiştir. Şekil 4.5(a)'da kazanç bölümlerine 20 mA akım uygulandığında fwhm 46 nm olarak elde edilirken ve Şekil 4.5(b)'de görüldüğü gibi fwhm değeri 45 nm elde edilmiştir.

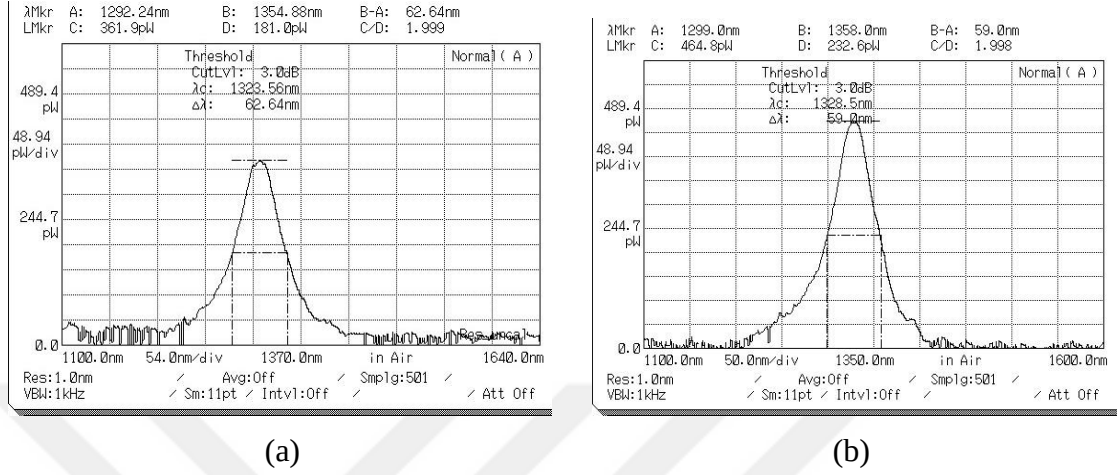


Şekil 4.5. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) lazerlerin spektrum sonuçları a) $I=20$ mA ve b) $I=40$ mA, $V=-1.5$ V.

1350 nm üç bölümlü ve soğurma bölümü ortada olan lazerlerin optik spektrum sonuçları, 40 mA ve 60 mA akım değerleri için elde edilmiş ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

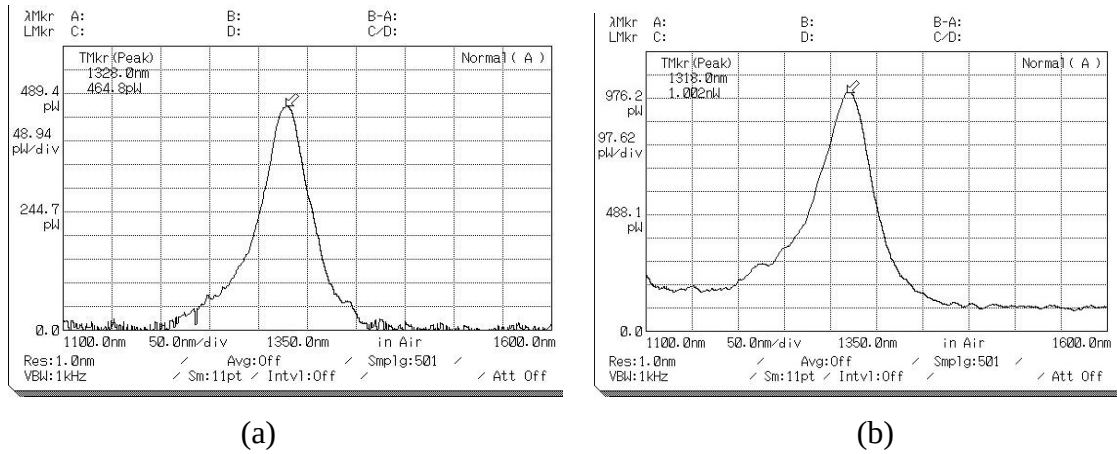
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Akım arttığında ($I=60$ mA) çıkış gücü artmıştır ve -1.5 V'luk ters kutuplama gerilimi uygulandığında fwhm değeri 62 nm'den (Şekil 4.6(a)), 59 nm'ye düşmüştür (Şekil 4.6(b)).



Şekil 4.6. 1350 nm üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) olan lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) $I=40$ mA ve b) $I=60$ mA, $V=-1.5$ V.

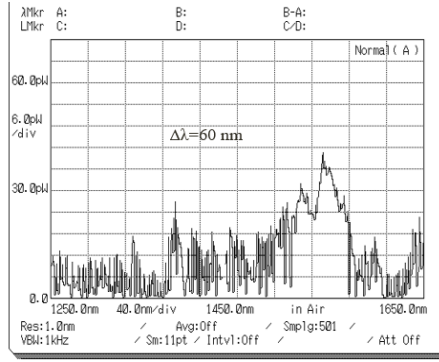
Ters kutuplama gerilimi $V=-1.5$ V'da sabit tutularak 60 mA ve 80 mA değerlerinde optik spektrum sonuçları elde edilmiştir (Şekil 4.7). Akım 60 mA'den 80 mA'e çıkarıldığında çıkış gücü artmakla birlikte fwhm spektral genişliğinin 59 nm'den 77 nm'ye yükseldiği görülmüştür. Uygulanan akım ve ters gerilim değerlerinin daha fazla artırılması durumunda lazerlerin kontaklarında deformasyonlar meydana geldiği ve lazerlerin çalışmaz hale geldiği görülmüştür.



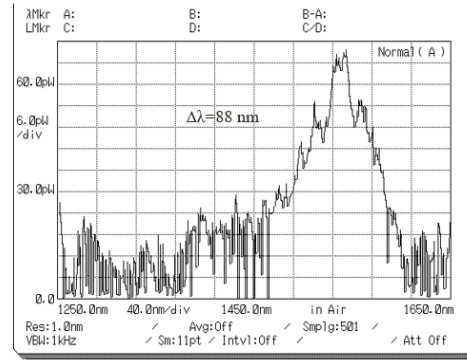
Şekil 4.7. 1350 nm iki kazançlı üç bölümlü soğurma bölümü ortada olan lazerlerin spektrum sonuçları a) $I=60$ mA, $V=-1.5$ V ve b) $I=80$ mA, $V=-1.5$ V.

4.2.3. 1550 nm (IEGENS) iki bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları

Fabrikasyonu tamamlanan 1550 nm dalga boyulu (IEGENS) lazerlerin spektrum ölçüm sonuçları Şekil 4.8’de verilmiştir. DC akım 20 mA’dan 40 mA’ye çıkarıldığında çıkış gücü artmakla birlikte spektral genişliğin (fwhm) 60 nm’den 88 nm’ye çıktığı görülmüştür.



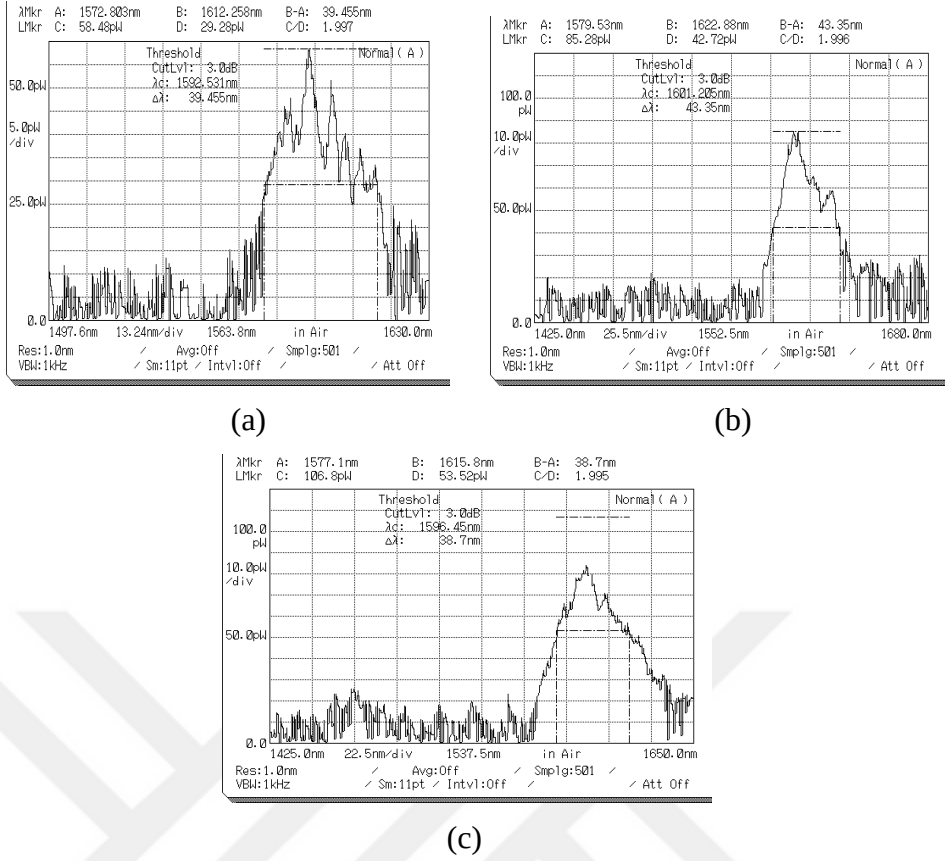
(a)



(b)

Şekil 4.8. 1550 nm iki bölümlü (tek kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) I=20 mA ve b) I=40 mA.

İki bölümlü (tek kazanç ve soğurucu) lazerlerin kazanç bölümüne uygulanan akım arttıkça Şekil 4.9’da gösterildiği gibi, spektral genişliğin fwhm değeri 39 nm’den 43 nm’ye çıkmıştır (Şekil 4.9(a) ve (b)). Soğurma bölgesine -1,5 V ters kutuplama gerilimi uygulanarak fwhm değeri 38 nm’ye düşmüştür (Şekil 4.9(c)).

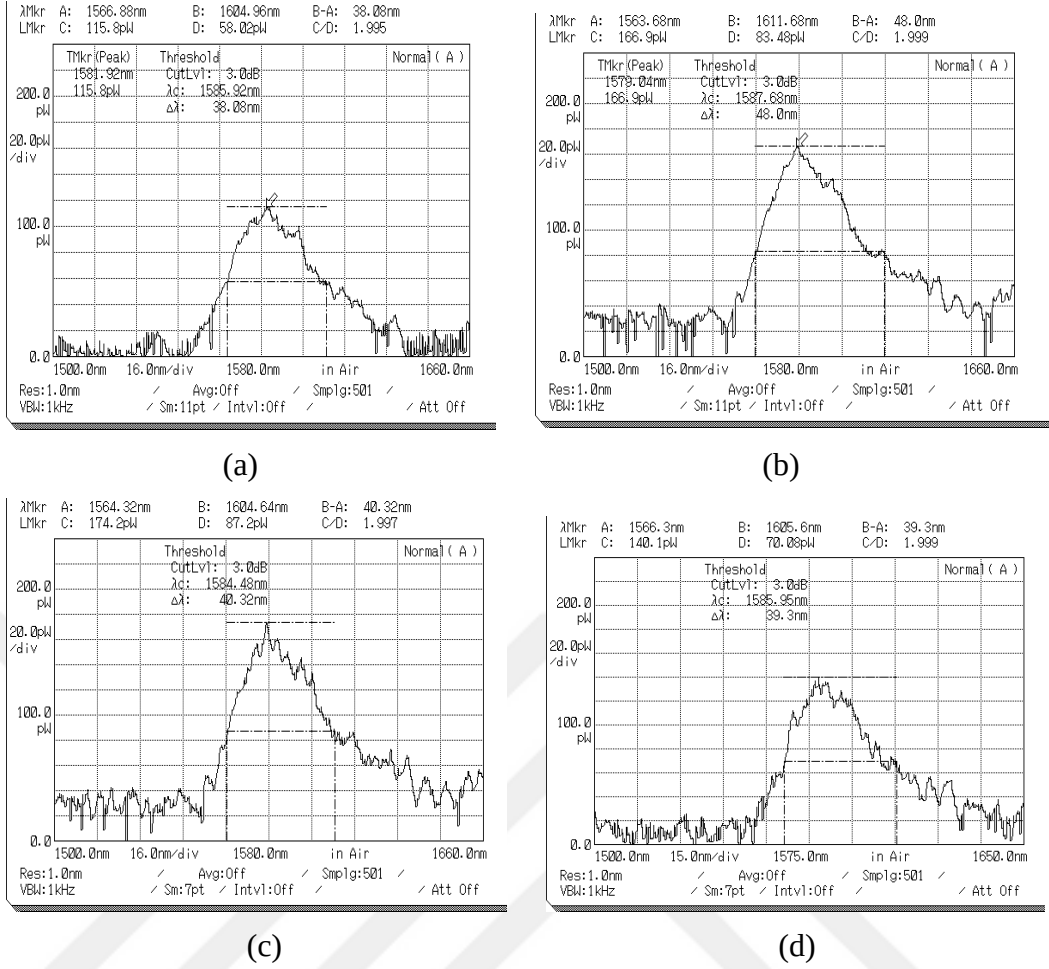


Şekil 4.9. 1550 nm iki bölümlü (tek kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) $I=20$ mA, b) $I=40$ mA ve c) $I=40$ mA, $V=-1.5$ V.

4.2.4. 1550 nm (IEGENS) üç bölümlü lazerlerin pasif mod kilitleme spektrum sonuçları

1550 nm dalga boyunda (IEGENS), üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) lazerlerin optik spektrum sonuçları Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Şekil 4.10(a) ve (b)'de kazanç bölümlerine uygulanan akım arttıkça fwhm değeri 38 nm'den 48 nm'ye çıkarken çıkış gücü de artmıştır. Şekil 4.10 (c) ve (d)'de gösterildiği gibi akım sabit tutularak ters kutuplu gerilimi -0,5 V'dan -1,5 V'a düşürülmüştür. Böylece çıkış gücünde azalma olmasına rağmen fwhm değerinin de 40 nm'den 39 nm'ye düştüğü görülmüştür.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

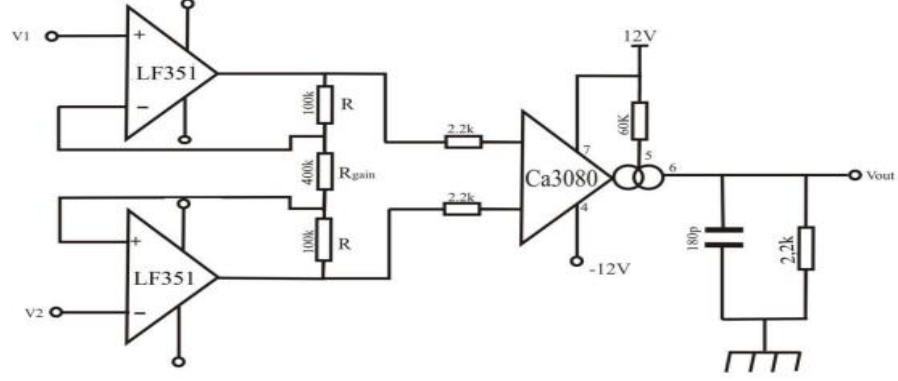


Şekil 4.10. 1550 nm üç bölümlü (iki kazanç ve soğurucu) lazerlerin optik spektrum sonuçları: a) $I=20$ mA, b) $I=40$ mA, c) $I=40$ mA, $V=-0.5$ V ve d) $I=40$ mA, $V=-1.5$ V.

4.3. Pasif Mod Kilitleme ile Elde Edilen Optik Darbe Sonuçları

Üretilen lazerlerden optik spektrum sonuçlarını elde ettikten sonra fiber optik kabloyu Şekil 3.48’de gösterildiği gibi 45 GHz’lik fotodedektöre doğrudan bağladığımızda osiloskoptan sinyal elde edilemedi. Fotodedektör çıkışında elde edilen sinyalin genlik değerinin çok düşük olduğu tespit edildiğinden Şekil 4.11’de gösterildiği gibi bir enstrümantasyon yükselteç devresi kullanılmıştır. Enstrümantasyon yükselteci, hassas ölçümler için düşük gürültüyle sinyalin genliğini yükselten ve yüksek giriş empedansı sayesinde kaybı azaltan devrelerdir. Böylece enstrümantasyon yükselteç devresi ile yükseltme işlemi yapılarak osiloskoptan çıkış sinyali alınmaya çalışılmıştır. Pasif mod kilitleme tekniği ile osiloskoptan çıkış alınamadığından kazanç bölümüne RF sinyali ve soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi uygulayarak hibrit mod kilitleme

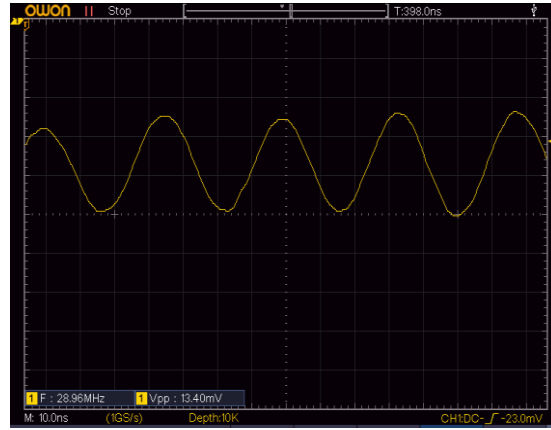
ile osiloskoptan optik darbeler elde edilmiştir. Çıkış gücü daha yüksek olduğu için 1350 nm dalgaboylu lazerler optik darbe elde etmek için kullanılmıştır.



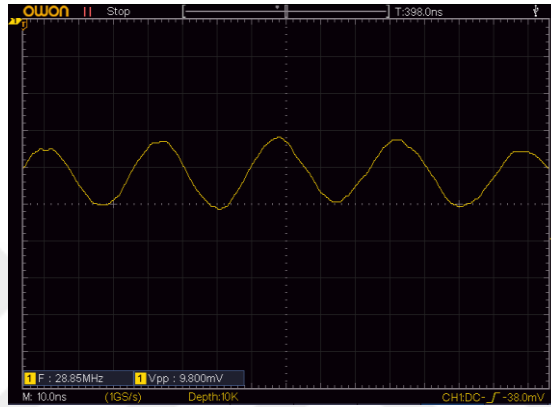
Şekil 4.11. Enstrümantasyon yükselteci devre şeması (Kaleli, 2009).

4.3.1. İki bölümlü lazerlerden elde edilen optik darbeler

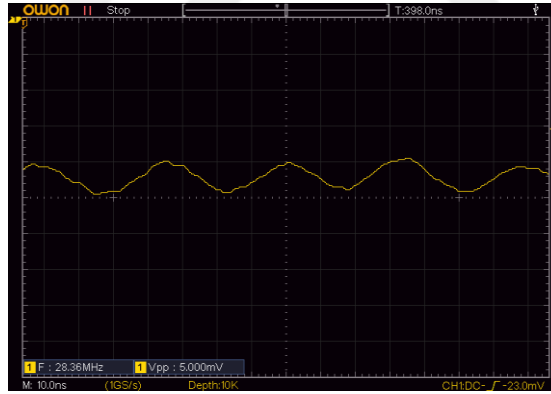
İki bölümlü lazerlerde, kazanç bölümüne 20 mA DC akım ile birlikte darbe genişliği 100 μ s olan 2 kHz'lik sinyal uygulanırken soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi uygulanmıştır. Fiber kablo ile fotodedektör bağlantısı yapılarak fotodedektör çıkışı enstrümantasyon yükseltecinin girişine bağlanarak yükseltecin çıkışı osiloskoba bağlanmış ve optik darbeler (Şekil 4.12). Burada, -0,5 V, -1 V ve -1,5 V'luk ters gerilim değerleri için optik darbeler elde edilmiştir. Şekil 4.12 (a) ve (b)'de görüldüğü gibi gerilim değeri -0,5 V'dan -1 V'a düşürüldüğünde çıkış gücünün azaldığı ve darbe genişliğinin 11,6 ns'den 10,8 ns'ye düştüğü görülmüştür. Ters kutuplama gerilimi -1,5 V'a düşürüldüğünde darbelerin genliği azalmış ve bozulmaya başlamıştır. Darbelerin tekrarlama oranı 28 MHz olarak elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

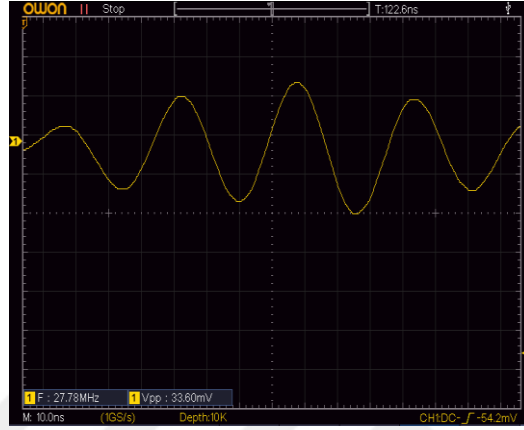
Şekil 4.12. İki bölümlü (tek kazançlı ve soğuruculu) lazerlerden farklı ters kutuplama gerilimleri (V) için elde edilen optik darbeler: a) $V=-0.5$ V, b) $V=-1$ V ve c) $V=-1.5$ V.

4.3.2. Üç bölümlü lazerlerden elde edilen optik darbeler

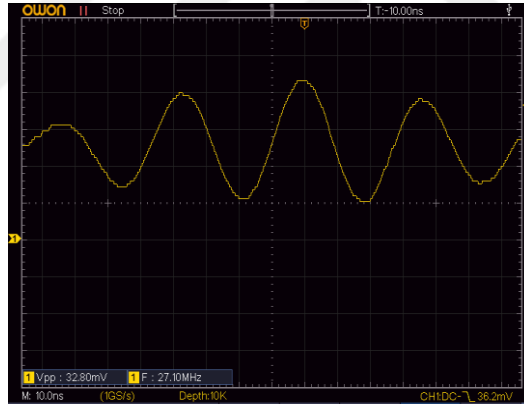
Üç bölümlü (iki kazanç bölümü ve soğurma bölümü ortada) olan lazerlerde, kazanç bölümlerine 20 mA DC akım ile birlikte darbe genişliği 100 μ s olan 2 kHz'lik sinyal uygulanırken soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi uygulanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

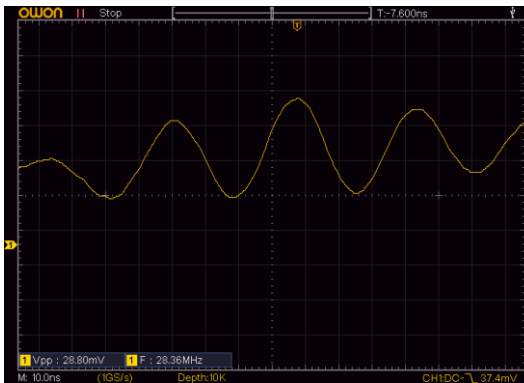
Uygulanan ters kutuplama gerilimi, -0,5 V'dan -1,5 V'a kadar düşürüldüğünde elde edilen optik darbeler Şekil 4.13'te gösterilmiştir. $V=-0,5$ V iken (Şekil 4.13(a)) darbe genişliği 11,2 ns olarak elde edilmiş olup $V=-1,5$ V iken darbe genişliği, Şekil 4.13(c)'de gösterildiği gibi 10,2 ns'ye düşmüştür. Bununla birlikte çıkış gücü de düşmüştür. Darbelerin tekrarlama oranı 27-28 MHz'dir.



(a)



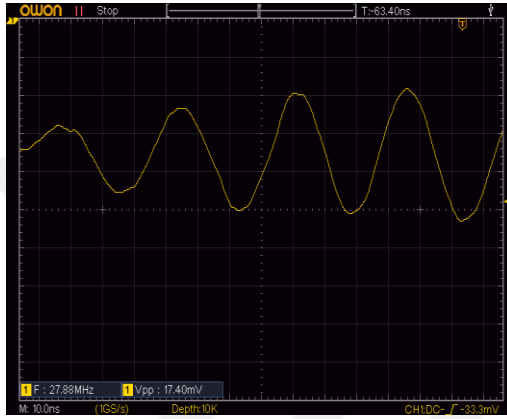
(b)



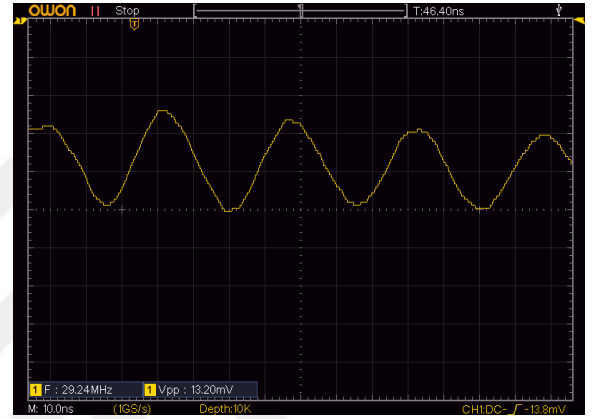
(c)

Şekil 4.13. Üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü ortada) lazerlerde farklı ters kutuplama gerilimleri (V) için elde edilen optik darbeler: a) $V=-0.5$ V, b) $V=-1$ V ve c) $V=-1.5$ V.

Üç bölümlü lazerlerin (iki kazançlı ve soğurma bölümü sonda) kazanç bölümlerine 20 mA DC akım ile birlikte darbe genişliği 100 μ s olan 2 kHz'lik sinyal uygulanırken soğurma bölümüne ters kutuplama gerilimi uygulandığında elde edilen optik darbeler Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Uygulanan gerilim azaldıkça darbenin genliği düşmüş olmakla birlikte tek kazançlı lazerlere göre hâlâ daha yüksektir. Bununla birlikte darbe genişliği soğurma bölümü ortada olan lazerlere ($\tau=10,2$ ns) göre daha yüksektir ($\tau=10,6$ ns).



(a)



(b)

Şekil 4.14. Üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümü sonda) lazerlerde farklı ters kutuplama gerilimleri (V) için elde edilen optik darbeler: a) $V=-0.5$ V ve b) $V=-1.5$ V.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Toplam kavite uzunluğu $<500\ \mu\text{m}$ olan iki bölümlü (tek kazançlı ve soğurma bölümlü) ve üç bölümlü (iki kazançlı ve soğurma bölümlü) ATRK (1350 nm) ve IEGENS (1550 nm) dalga boylu diyot lazerlerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Lazer fabrikasyonu, Üniversitemiz bünyesinde yer alan Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezinde (YÜTAM) 1000 sınıfı Temiz Oda'da gerçekleştirilmiş olup karakterizasyon ölçümleri yine aynı merkezde bulunan Nano Aygıt Karakterizasyon Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Üretilen lazerler, temel olarak çoklu fotolitografi işlemleri, kuru aşındırma (dry etching), çok bölümlü kontak tasarımı ve metal kaplama işlemlerinden oluşmaktadır. Yarı iletken lazerlerin üretiminde üç farklı fotolitografi işlemi için üç farklı maske tasarlanmıştır. Sırt dalga kılavuzunun oluşturulması birinci fotolitografiyle, kontak pencerenin açılması ikinci fotolitografiyle ve kazanç/soğurma bölgelerinin şekillendirilmesi (kontakların ayrılması) üçüncü fotolitografiyle gerçekleştirilmiştir. ICP-RIE aşındırmada, en düzgün yüzey ve yan duvar yapıları $P_{\text{ICP}}=400\ \text{W}$ ve $P_{\text{RIE}}=150\ \text{W}$ güçlerinde, 15 mTorr'da ve $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Cl}_2$ gaz akış oranlarının 10/20/6 sccm olduğu değerlerde elde edilmiştir. Bu durumda 240 nm/dk'lık aşındırma hızına ulaşılmıştır. Ayrıca, en düşük yüzey pürüzlülüğü (R_a) değeri ve yan duvar açısı, sırasıyla $0,137\ \mu\text{m}$ ve $\sim 90^\circ$ olarak ölçülmüştür.

Üretilen yarı iletken lazerlerin çıkış gücü-akım (L-I) ve akım-gerilim (I-V) karakterizasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. 1350 nm dalgaboyundaki lazerlerin çıkış gücü $16\ \mu\text{W}$ ve eşik akımı 2 mA olarak elde edilirken, 1550 nm dalga boylu lazerlerin çıkış gücü $3\ \mu\text{W}$ ve eşik akımı 5 mA olarak ölçülmüştür. ATRK numuneleriyle üretilen lazerlerin merkezi dalga boyu 1350 nm, IEGENS numuneleriyle üretilenlerin ise 1550-1590 nm olarak belirlenmiştir. Tasarımda hedeflenen 1350 nm ve 1500 nm dalga boylarından yapılan spektrum ölçümlerinde gözlemlenen kaymaların, üretim sürecindeki toleranslardan kaynaklandığı öngörülmektedir. Alınan spektrum ölçümleri sonucunda iki kazançlı lazerlerin tek kazançlı lazerlere göre çıkış gücünün daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca iki kazançlı lazerlerden soğurma bölümü ortada yani iki kazanç bölümü arasında olan lazerlerin çıkış gücünün soğurma bölümü sonda olan lazerlere göre daha yüksek olduğu deneysel ölçümlerde tespit edilmiştir. Kazanç bölümlerine uygulanan akım arttıkça, optik spektrumun yarı yükseklikteki tam genişliğinin (fwhm) değeri

artmaktadır. Öte yandan, ters kutuplama gerilimi artırıldıkça fwhm değeri azalmaktadır. Yarı iletken lazerlerde spektral genişliğin düşük olması lazerin saflığının yüksek olduğu anlamına geldiğinden spektral genişliğin mümkün olduğu kadar düşük olması istenmektedir. 1350 nm dalga boylu lazerlerde, $I=40$ mA ve $V=-1,5$ V iken, tek kazançlı lazerlerde spektral genişlik değeri 36 nm ölçülürken, üç bölümlü (iki kazanç ve soğurucu sonda) lazerlerde 42 nm, yine üç bölümlü fakat soğurucunun ortada olduğu lazerlerde 45 nm elde edilmiştir. 1550 nm dalga boylu lazerlerde $I=40$ mA ve $V=-1,5$ V'luk şartlar altında, tek kazançlı lazerlerde spektral genişlik değeri 38,7 nm ölçülürken üç bölümlü (iki kazanç ve soğurucu ortada) lazerlerde 39,3 nm ölçülmüştür.

İki bölümlü ve üç bölümlü lazerlerden Q-anahtarlanmış pasif mod kilitleme (hibrit mod kilitleme) ile optik darbeler de elde edilmiştir. Kazanç bölümlerine 20 mA DC akım ile birlikte darbe genişliği 100 μ s olan 2 kHz'lik sinyal uygulanırken, soğurma bölümüne 0 ile -1,5 V aralığında ters kutuplama gerilimi uygulanmıştır. Kazanç bölümüne uygulanan akım ve soğurma bölümüne uygulanan ters kutuplama gerilimi her iki tür lazer için sabit tutulup darbe genlikleri ve süreleri incelenmiştir. Üç bölümlü lazerlerden soğurma bölümü ortada (iki kazanç bölümü arasında) olan lazerlerden elde edilen darbelerin genlikleri iki bölümlü lazerlere göre daha yüksektir ve darbe genişlikleri daha dardır. Bu durumda 10,2 ns'lik optik darbeler elde edilmiştir. Bununla birlikte soğurma bölümü sonda olan lazerlerin genlikleri yani çıkış güçleri tek kazançlı lazerlere göre daha yüksektir. Bununla birlikte darbe genişliği soğurma bölümü ortada olan lazerlere göre daha yüksektir ve 10,6 ns olarak elde edilmiştir.

Sonuç olarak, doktora çalışmamızda InP tabanlı 1350 nm (InGaAsP/InP) ve 1550 nm (AlGaInAs/InP) yarı iletken lazerler üretilmiş ve karakterizasyon ölçümleri ile birlikte mod kilitleme tekniği kullanılarak optik darbeler elde edilmiştir. 1350 nm ve özellikle 1550 nm yarı iletken lazerler, oldukça düşük kayıplara (0,2 dB/km) sahip olmalarından dolayı, fiber optik haberleşme sistemlerinde yaygın olarak kullanılma potansiyeline sahiptir.

Önümüzdeki süreçte, üretilen lazerlerden daha yüksek optik güç çıkışları ve daha kısa süreli mod kilitli optik darbeler elde etmek için, fabrikasyon işlemleri sırasında özellikle kontak sayısının artırılması ve çok bölümlü lazerlerde oluşturulan kazanç

bölümlerinin her birine farklı akımlar uygulanması öngörülmektedir. Ayrıca, karakterizasyon işlemleri sırasında 50 GHz'lik dijital osiloskop kullanılarak optik darbelerin analizinin daha hassas (ps veya fs mertebesinde) bir şekilde yapılabileceği düşünülmektedir. Bu işlemler, lazerlerin modelleme çalışmaları ile de desteklenerek gerçekleştirilecektir.



KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P. and Dutta, N. K. 1993. Semiconductor lasers. Van Nostrand Reinhold. 616, New York.
- Akahane, K., Matsumoto, A., Umezawa, T. and Yamamoto, N. 2021. High-frequency short-pulse generation with a highly stacked InAs quantum dot mode-locked laser diode. Japanese Journal of Applied Physics, 60.
- Aksakal, R., Duman, C. and Cakmak, B. 2020. Numerical investigation of 1550 nm passively mode-locked diode lasers with different gain and absorber configurations. Laser Physics, 30.
- Allen, S. and Silverberg, P. 1991. Methane-hydrogen III-V metal-organic reactive ion etching. Semiconductor Science and Technology, 6, 287-289.
- Alloush, M. A., Pilny, R. H., Brenner, C., Klehr, A., Knigge, A., Tränkle, G. and Hofmann, M. R. 2018. Passive, active, and hybrid mode-locking in a self-optimized ultrafast diode laser. Novel In-plane Semiconductor Lasers XVII. San Francisco, California, United States.
- Arahira, S., Oshiba, S., Matsui, Y., Kunii, T. and Ogawa, Y. 1994. Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode. Optics Letter, 19(11), 834-836.
- Arahira, S., Katoh, Y. and Ogawa, Y. 2001. Generation and stabilization of ultrafast optical pulse trains with monolithic mode-locked laser diodes. Optical and Quantum Electronics, 33(7-10), 691- 707.
- Bajek, D. J. 2016, High-speed optical sampling techniques enabled by ultrafast semiconductor lasers. Ph.D. Thesis, University of Dundee.
- Basu, P. K. 2015. Semiconductor laser theory. 89, India.
- Cakmak, B. 2000. Fabrication and characterisation of InP and GaAs based optoelectronic components. Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Bristol, Bristol.
- Cakmak, B. and White, I. H. 2001. Ion beam and chemically assisted ion beam etching of InP with anisotropic and smooth surfaces. Semiconductor Science and Technology, 16, 930.

- Çakmak, B. 2002. Fabrication and characterization of dry and wet etched InGaAs/InGaAsP/InP long wavelength semiconductor lasers. *Optics Express*, 10(13), 530-535.
- Çakmak, B., Karacalı, T. and Biber M. 2011. Investigation of Q-switched InP-based 1550 nm semiconductor lasers. *Optics & Laser Technology*, 44(5), 1593-1597.
- Çakmak, B., Biber, M., Karacalı, T. and Duman, C. 2013. A comparative study of fabrication of long wavelength diode lasers using $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{O}_2$ and H_2/CH_4 . *Optics and Photonics Journal*, 3.
- Çakmak, B. 2018. Yarı iletken Lazerler (Basılmamış) Ders Notları, 196.
- Chen, Y. K., Wu, M. C., Tanbun-Ek, T., Logan, R. A., Chin, M.A., 1991. Subpicosecond monolithic colliding-pulse mode-locked multiple quantum well lasers. *Applied Physics Letters*, 58.
- Coldren, L. A., Kçİga, M. B. I. and Rentacher, J. A. 1980. *Applied Physics Letters*. 37, 681.
- Derickson, D. J., Helkey, R. J., Mar, A., Karin, J. R., Wasserbauer, J. G. and Bowers, J. E. 1992. Short pulse generation using multisegment mode-locked semiconductor lasers. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 28(10), 2186-2202.
- Donnelly, V. M., Flamm, D. L., Tu, C. W. and Ibbotson, D. E. 1982. *Journal of The Electrochemical Society*, 129, 2533.
- Duman, Ç. 2014. kip (mod) kilitlemeli ve Q-anahtarlamalı diyot lazer üretimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
- Dumke, W. P. 1962. Interband transitions and maser action. *Physical Review*, 127 (5), 1559-1563.
- Fan H., Wu, C., El-Aasser, M., Dutta, N. K., Koren, U., and Piccirilli, A. B. 2000. Colliding Pulse Mode-Locked Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*. 12(8), 972-973.
- Gordon, R. (2008). *Lasers and Electro-Optics: Fundamentals and Engineering*. Wiley.
- Gutiérrez, M., Reyes, D. F., Araujo, D., Landesman, J. P. and Pargon, E. 2020. Analysis by HR-STEM of the strain generation in InP after SiN_x deposition and ICP etching. *Journal of Electronic Materials*, 49, 5226–5231.

- Gordon, C. D., Cumbajin, M., Carpintero, G., Bente, E. and Javaloyes, J. 2018, Absorber length optimization of on-chip colliding pulse mode-locked semiconductor laser. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24, 1-8.
- Guilet, S., Bouchoule, S., Jany, C., Corr, C. S. and Chabert, P. 2006. Optimization of a $\text{Cl}_2\text{-H}_2$ inductively coupled plasma etching process adapted to nonthermalized InP wafers for the realization of deep ridge heterostructures. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 24, 2381–2387.
- Hou, L., Stolarz, P., Dylewicz, R., Haji, M., Javaloyes, J., Qiu, B. A. and Bryce C. 2010. 160-GHz passively mode-locked AlGaInAs 1.55- μm strained quantum-well compound cavity laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(10), 727-729.
- Hargrove, L.E., Fork, R.L. and Pollack, M.A. 1964. Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation. *Applied Physics Letters*, 5(1), 4-5.
- Hänninen, T. (2012). *Laser Fundamentals*. Academic Press.
- Haus, H. A. 1975. Theory of mode-locking with a slow saturable absorber. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 11(9), 736-746.
- Hazan, J., Tondini, S., Nassar, A., Williams, K. A. and Bente, E. A. J. M. 2024. Two-section passively Mode-locked laser as a test for amplification and absorption parameters of a quantum well based InP optical amplifier at 1300 nm. *IEEE Journal of Quantum Electronics*.
- Hou, L., Stolarz, P., Dylewicz, R., Haji, M., Javaloyes, J., Qiu, B. A. and Bryce, C., 2010. 160-GHz passively mode-locked AlGaInAs 1.55- μm strained quantum-well compound cavity laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22, 727-729.
- Hou, L., Avrutin, E. A., Haji, M., Dylewicz, R., Bryce, A. C. and Marsh, J. H. 2013. 160 GHz passively mode-locked AlGaInAs 1.55 μm strained quantum-well lasers with deeply etched intracavity mirrors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 19, 1100409.
- Hommel, J., Moser, M., Geiger, M., Scholz, F. and Schwiser, H. 1991. Investigations of dry etching in AlGaInP/GaInP using $\text{CCl}_2\text{F}_2/\text{Ar}$ reactive ion etching and Ar ion beam etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 9(6), 3526-3529.
- Javan, A., Bennett, W. R. Jr. and Herriott, D. R. 1961. Population inversion and continuous optical MASER oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6 (3), 106-110.

- Janjua, B., Iu, M. I., Yan, Z., Charles, P., Chen, E. and Helmy, A. S., 2021. Approaching 200 fs, using dispersion engineering, in passively mode-locked Bragg waveguide laser structures. Conference on Lasers and Electro-Optics.
- Janjua, B., Stirling, T. J., Iu, M. L., Yan, Z. and Helmy, A. S. 2023. High peak power ultrashort pulsed passively q-switched mode-locked bragg laser diode. IEEE Photonics Technology Letters, 35(17), 943-946.
- Kaleli, A. R. 2009. Düşük seviyeli sinyallerin ölçümünde lock-in tekniği ve kimyasal sensör ile ölçüm uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Atatürk Üniversitesi.
- Kawaguchi, H. 1993. Progress in optical functional devices using two-section laser diodes/amplifiers. Optoelectronics, 140 (1), 3-15.
- Kathalingam, A., Kim, M., Chae, Y., Sudhakar, S., Mahalingam, T. and Rhee, J. 2011. Self assembled micro masking effect in the fabrication of SiC nanopillars by ICP-RIE dry etching. Applied Surface Science, 257(9), 3850-3855.
- Kim, D. W., Lee, H. Y., Park, B. J., Kim, H. S., Sung, Y. J., Chae, S. H., Ko, Y. W. and Yeom, G. Y. 2004. Thin Solid Films. 100.
- Lau, E.K. 2000. Analysis of 1.55 μ m Semiconductor Lasers for Modelocked Operation. Ph.D. Thesis Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science , Cambridge.
- Lee, J. W., Hong, J., Abernathy, C. R., Lambers, E. S., Pearton, S. J., Hobson, W. S. and Ren, F. 1996. Cl₂/Ar plasma etching of binary, ternary, and quaternary In-based compound semiconductors. Journal of Vacuum Science & Technology B, 14(4), 2567-2573.
- Liu, S., Davenport, M. and Bowers, J. E. 2020. Hybrid mode-locked 20 ghz colliding pulse Si/III-V laser with 890 fs pulsewidth. 2020 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), San Jose, CA, USA, 1-2.
- Liu, Y., Ebadi, K., Sunnetcioglu, A. K., Gundogdu, S., Sengul, S., Zhao, Y., Lan, Y., Zhao, Y., Yang, G. and Demir, A. 2022. Elimination of catastrophic optical mirror damage in continuous-wave high-power laser diodes using multi-section waveguides. Optics Express, 30, 31539-31549.
- Malherbe, J. B. and Barnard, W. O. 1991. Surface Science, 255, 309.
- Matsui, T., Sugimoto, H., Ohishi, T. and Ogata, H. 1988. Electronics Letters, 24, 798.

- Matsutani, A., Ohtsuki, H., Muta, S., Koyama, F. and Igal, K. 2001. Mass effect of etching gases in vertical and smooth dry etching of InP. *Japanese Journal of Applied Physics*, 40, 1528.
- Maiman, T. H., 1960. Stimulated optical radiation in ruby. *Nature*, 187, 493-494.
- Marsh, J. H., Hou, L., 2017. Mode-locked laser diodes and their monolithic integration. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 23,1-11.
- Mcnabb, J. W., Craighead, H. G., Temkin, H. and Logan, R. A. 1991. Anisotropic reactive ion etching of inp in methane/hydrogen based plasmas. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 9(6), 3535-3537.
- Mutoh, K., Nakazima, M. and Mihara, M. 1990. *Japanese Journal of Applied Physics*. 29, 1022.
- Niggebrügge, U., Klug, M. and Garus, G. 1986. *Institute of Physics Conference Series*, 79(6) 367.
- Nunoya, N., Makamura, M., Morshed, M., Tamura, S. and Arai, S. 2001. High-performance 1,55 μm wavelength GaInAsP-InP distributed-feedback lasers with wirelike active regions. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*. 7, 249-258.
- Okoye, K. E. and Yamada, H. 2010. Transition radiation x-ray laser based on stimulated processes at the boundary between two dielectric media. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, 46 (9), 1342-1349.
- Okur, İ. 2000. *Optoelektronik. Değişim Yayınları*, 518 s, Türkiye.
- Oubensaid, E. H., Blein, B., Vilquin, B., Bartenlian, B., Lecoœur, P., Aubert, J. and Schwebel, C. 2011. Dry etching of magnetic tunnel junctions monitored by spectroscopic reflectance. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 278-286.
- Portnoi, E. L., Chelnokov, A.V. 1990. Passive mode-locking in a short cavity laser. *Proc. Dig. 12th IEEE Semiconductor Conf.*, Davos, Switzerland, 140–141.
- Pusino, V. 2013. High power, high frequency mode-locked semiconductor lasers. Ph.D. Thesis Electronics and Nanoscale Group School of Engineering University of Glasgow, Scotland.
- Qin, B., Zhang, R., Qiu, B., Zhang, B. and Luo, C. 2024. Theoretical analysis of passively mode-locked semiconductor ring lasers. *Optics Express*, 32(14), 24358-24371.

- Racka-Szmidt, K., Stonio, B., Zelazko, J., Filipiak, M. and Sochacki, M. A. 2022. Review: Inductively coupled plasma reactive ion etching of silicon carbide. *Materials*, 15, 123.
- Rosales, R., Merghem, K., Martinez, A., Akrou, A., Tourrenc, J. P., Accard, A., Lelarge, F., Ramdane, A. 2011. InAs/InP quantum-dot passively mode locked lasers for 1,55 μm applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 17(5), 1292-1301.
- Saleh, B. E. A. and Teich M. C. 2007. *Fundamentals of photonics*. A John Wiley & Sons Inc. Publication, 1177, New Jersey, USA.
- Schramm, J. E. Babic, D. I., Hu, E. L., Bowers, J. E. and Merz, J. L. 1997. Fabrication of high-aspect-ratio InP based vertical-cavity laser mirrors using $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{O}_2/\text{Ar}$ reactive ion etching. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 15, 2031- 2036.
- Scofield, J. D., Bletzing, P. and Ganguly, B. N. 1998. *Applied Physics Letters*, 73(1), 76.
- Silberberg, Y., Smith, P. W., Eilenberger, D. J., Miller, D. A. B., Gossard, A. C., and Wiegmann, W. 1984. Passive mode locking of a semiconductor diode laser. 9(11), 507-509.
- Simos, I.H. and Simos, C. 2018. Synchronization dynamics of mutually injected passively mode-locked semiconductor lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 54(6).
- Stolarz, P. M., Javaloyes, J., Mezosi, G., Hou, L., Ironside, C. N., Sorel, M., and Balle, S. 2011. Spectral dynamical behavior in passively mode-locked semiconductor lasers. *IEEE Photonics Journal*, 3(6), 1067-1082.
- Sun, D., Wang, H., Yang, Q., Zhang, R., Zhao, L. and Lu, D. 2022. 100-GHz 200-fs pulse generation with 1.5 watt peak power using a colliding-pulse mode-locked laser diode, 27th OptoElectronics and Communications Conference (OECC) and 2022 International Conference on Photonics in Switching and Computing (PSC) 1-3.
- Tadokkorro, T., Koyama, F. and Iga, K. 1988. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27, 389.
- Thompson, M. G., Rae, A. R., Xia, M., Pentty, R. V. And White, I. H., 2009. InGaAs quantum-dot mode-locked laser diodes. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 15, 661-672.
- Vasil'ev, P. P. 1995. *Ultrafast diode lasers fundamentals and applications*. Artech House, 27, London.

- Vasco, J. P. and Hughes S. 2017. Anderson localization in disordered LN photonic crystal slab cavities. *ACS Photonics*.
- Wang, H., Lu, D., Zhang, R. and Zhao, L. 2021. Photonic terahertz carrier generation using an optical feedback mode-lock laser diode. *IEEE Photonics Journal*, 13(3), 1-6.
- Wohlfeil, S., Christopher, H., Fricke, J., Wenzel, H., Knigge, A. and Tränkle, G. 2023. Picosecond pulses with 40 W peak power from a passively mode-locked tapered quantum well laser, *Electronics Letters* February, 59(4).
- Williams, K.A., Thompson, M.G. and White, I.H. 2004. Long-wavelength monolithic mode-locked diode lasers. *New Journal of Physics*, 6 (1), 1-30.
- Yoshikawa, T., Kohmoto, S., Ozaki, M., Hamao, N., Sugimoto, Y., Sugimoto, M. and Asakawa, K. 1992. Smooth and vertical InP reactive ion beam etching with Cl₂ ecr plasma. *Japanese Journal of Applied Physics*, 31.
- Ziel van der, J.P. 1985. 22B in *Semiconductors and semimetals*, ed.by W.T.Tsang. New York: Academic Press.
- Zhao, J., Kleijn, E., Williams, P. J., Smit, M. K. and Leijtens X. J. M. 2011. On-chip laser with multimode interference reflectors realized in a generic integration platform. *Compound Semiconductor Week (CSW/IPRM), 2011 and 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials*, 1–4.
- Zhao, W., Guo, L., Wang, H., Chen, G., Lu, D. and Zhao, L. 2018. Research on the influence of the saturable absorber on the performance of mode-locked semiconductor lasers, *Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*.