

**InGaAsP/InP ÇOKLU KUANTUM KUYULU
ÇATI DALGA KILAVUZLU LAZER DİYOTLARIN
FABRİKASYONU VE LAZER DİYOT PARAMETRE ANALİZİ**

Aylin BENGİ

**DOKTORA TEZİ
FİZİK**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ARALIK 2009
ANKARA**

Aylin BENGİ tarafından hazırlanan ” InGaAsP/InP ÇOKLU KUANTUM KUYULU ÇATI DALGA KILAVUZLU LAZER DİYOTLARIN FABRİKASYONU VE LAZER DİYOT PARAMETRE ANALİZİ ” adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

(Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı)

Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV

.....

(Tez Danışmanı, Fizik Anabilim Dalı)

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile FİZİK Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Nizami HASANLI

.....

(Fizik Anabilim Dalı, ODTÜ)

Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

.....

(Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi)

Prof. Dr. Bora ALKAN

.....

(Fizik Müh. Anabilim Dalı, Ankara Üniversitesi)

Prof. Dr. Mehmet KASAP

.....

(Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi)

Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL

.....

(Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi)

Tarih : 15.12.2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Aylin BENGİ

**InGaAsP/InP ÇOKLU KUANTUM KUYULU
ÇATI DALGA KILAVUZLU LAZER DİYOTLARIN
FABRİKASYONU VE LAZER DİYOT PARAMETRE ANALİZİ
(Doktora Tezi)**

Aylin BENGİ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Aralık 2009**

ÖZET

Bu çalışmada kullanılan 1,3 ve 1,55 μm ışıma dalgaboylu $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ çoklu kuantum kuyulu lazer diyot yapıları metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) tekniğiyle büyütüldü. Büyütülen yapıların çatı dalga kılavuzlu Fabry-Perot lazer diyot fabrikasyonu farklı tipteki pasivasyon tabakaları (SiO_2 ve SiN_x) kullanılarak fotolitografi sistemi yardımıyla yapıldı. Lazer diyot parametre analizleri sonucunda, SiO_2 pasivasyon tabakalı lazerin daha düşük eşik akımına, diferansiyel dirence ve daha yüksek çıkış gücüne sahip olduğu görüldü. p-InGaAs kontak tabakalı lazer diyotlar için omik kontakların geliştirilmesi amacıyla Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu yapıldı. Bilgimiz dahilinde, p-InGaAs tabakası için altın içeren ve içermeyen nadir bulunur metal silikat omik kontaklar ilk defa oluşturularak, kontakların analizi TLM kullanılarak gerçekleştirildi. Yapılan analizler sonucunda, elde edilen karakteristik kontak direncinin günümüz optoelektronik aygıtlarının sahip olduğu karakteristik kontak direnci ile aynı mertebede olduğu görüldü.

Bilim Kodu : 202.1.147
Anahtar Kelimeler : InGaAsP/InP, lazer diyot, çatı dalga kılavuzu, kuantum kuyusu, fotolitografi, MOCVD
Sayfa Adedi : 127
Tez Yöneticileri : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Prof. Dr. Tofig MAMMADOV

**THE FABRICATION OF InGaAsP/InP MULTI QUANTUM WELL
RIDGE WAVEGUIDE LASER DIODES and
THE ANALYSIS OF LAZER DIODE PARAMETERS
(Ph.D. Thesis)**

Aylin BENGİ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
December 2009**

ABSTRACT

The 1,3 and 1,5 μm emission wavelength $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}/\text{InP}$ multi quantum well (MQW) laser diode structures used in this work were grown using metal organic chemical vapor deposition (MOCVD) technique. The fabrication of ridge waveguide Fabry-Perot laser diodes with different passivation layers (SiO_2 and SiN_x) were made using photolithography system. The laser parameter analysing results shows that the laser diode with SiO_2 passivation layer has lower threshold current, differential resistance and higher output power. To improve the ohmic contact properties the Transmission Line Model (TLM) samples were fabricated. According to our knowledge, the Au and non-Au based rare earth metal silicate ohmic contacts were formed for the first time and the analyzing of ohmic contacts were performed using TLM. As a result, the obtained specific contact resistivities were found in the same order of nowadays optoelectronic device's contact resistivities.

Science Code : 202.1.147

Key Words : InGaAsP/InP, laser diode, ridge waveguide, quantum well, photolithography, MOCVD

Page Number : 127

**Advisers : Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK
Prof. Dr. Tofig MAMMADOV**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımda direktörü olduğu Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma Laboratuvarı'nda bana her türlü imkanı sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK'e ve benden hiçbir zaman gülüyüzünü ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Tofiq MAMMADOV'a teşekkürü bir borç bilirim.

Çalışmalarımda bana sonsuz desteği olan ve Gwangju Fen ve Teknoloji Enstitüsü İletişim ve Kominikasyon Bölümü Optoelektronik Laboratuvarı'nın tüm imkanlarını sunan değerli hocam Prof. Dr. Yong-Tak Lee'ye ve çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Sung-Joon Jang ve Chan-Il Yeo'ya teşekkür ederim.

Doktora eğitimim boyunca bana yardımcı olan özellikle değerli hocam Doç. Dr. Şemsettin ALTINDAL'a ve tüm arkadaşlarıma emekleri ve gülüyüzleri için teşekkür ederim.

Doktora çalışmamı, bana inanan, her zaman güvenen, bir gün bile bana olan maddi ve manevi desteklerinden vazgeçmeyen, çok sevdiğim annem Aynur BENĞİ ve babam Osman BENĞİ'ye ithaf ediyorum. Sizi çok seviyorum ve benim için yapmış olduğunuz her şey için çok teşekkür ediyorum.

Bu tez 2001K120590 no'lu "İleri Araştırma ve Eğitim Programları" isimli DPT ve 108T018 no'lu "Kızılötesi AlGaAs Lazer Diyot Malzemelerinin Epitaksiyel Üretimi ve Karakterizasyonu" isimli TÜBİTAK projeleri ile desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR	xv
1. GİRİŞ	1
2. YARIİLETKEN LAZERLER	9
2.1. Lazerlerin Çalışma Prensipleri	9
2.1.1. Kendiliğinden ve uyarılmış salınım	9
2.1.2. Nüfus terslenmesi	13
2.1.3. Optik geri besleme	21
2.2. Yarıiletken Lazer Diyotlar	24
2.2.1. Lazer diyot malzemeleri	24
2.2.2. Lazer diyot üretimi	25
2.2.3. Lazer diyotların geleceği	25
2.3. Yarıiletken Tekli-yapılar	26
2.3.1. p-n eklemler	26
2.4. Yarıiletken Çoklu-yapılar	28
2.4.1. Tekli çoklu-yapılar	29

Sayfa

2.4.2. Çiftli çoklu-yapılar	33
2.4.3. Çiftli çoklu-yapıların geliştirilmesi	38
2.5. Yarıiletken Kuantum Kuyular	42
3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER	49
3.1. Fotolitografi	49
3.2. Temel Fotolitografi İşlemleri	53
3.2.1. Numune temizliği	53
3.2.2. Fotorezistin yüzeye kaplanması	53
3.2.3. Yumuşak ısıtma	56
3.2.4. Pozlama	56
3.2.5. Desenin terslenmesi	57
3.2.6. Sert ısıtma	58
3.2.7. Desenin geliştirilmesi	58
3.2.8. Fotorezistin kaldırılması	58
3.3. Çatı Dalga Kılavuzlu Lazer Diyotların Fabrikasyonu	59
3.3.1. InGaAsP/InP lazer diyot yapısı	59
3.3.2. SiO ₂ ve SiN _x tabakalarının büyütülmesi	61
3.3.3. Fotolitografi yardımıyla çatı dalga kılavuzunun oluşturulması	61
3.3.4. Aşındırma ile çatı dalga kılavuzunun oluşturulması	63
3.3.5. Pasivasyon	67
3.3.6. Çatı dalga kılavuzunun açılması	69
3.3.7. Metalizasyon	72

Sayfa

3.3.8. Çatı dalga kılavuzlu lazer diyot fabrikasyon adımlarının özeti	77
3.4. Lazer Diyot Parametre Analizi.....	77
3.4.1. Akım-gerilim (I-V) karakteristikleri	79
3.4.2. Akım-güç (I-P) karakteristikleri.....	79
3.5. Metal-Yarıiletken Kontaklar	80
3.5.1. Ohmik kontaklar	81
3.6. Ohmik Kontak Parametrelerinin Analizi	86
3.6.1. Transmisyon çizgi modeli (TLM).....	87
3.7. TLM Numunelerinin Fabrikasyonu	88
3.8. TLM Numunelerinin Fabrikasyon Adımlarının Özeti	93
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	95
4.1. Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri	95
4.1.1. Diferansiyel direnç	96
4.2. Akım-Güç (I-P) Karakteristikleri.....	98
4.2.1. Eşik akımı	99
4.2.2. Diferansiyel kuantum verimi.....	101
4.2.3. İç kuantum verimi ve iç optik kayıp	102
4.3. Sıcaklığa Bağlı Akım-Güç (I-P-T) Karakteristikleri.....	105
4.3.1. Karakteristik sıcaklık	106
4.4. Farklı Pasivasyon Tabakalarının Lazer Diyot Parametrelerine Etkisi	108
4.5. p-InGaAs Tabakası İçin Ohmik Kontak Parametrelerinin Karşılaştırılması.	111
4.5.1. Geleneksel ohmik kontaklar.....	112
4.5.2. Nadir bulunur metal silikat ohmik kontaklar	113

Sayfa

5. SONUÇLAR	116
KAYNAKLAR	118
ÖZGEÇMİŞ	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Sıklıkla kullanılan lazer diyotların ışıma dalga boyları ve kullanım alanları.....	6
Çizelge 3.1. Litografi çeşitleri.....	49
Çizelge 3.2. Omik kontak malzeme parametreleri.....	90
Çizelge 4.1. Çeşitli dalga boylarındaki ve kavite uzunluklarındaki InGaAsP/InP lazer diyotlar için diferansiyel kuantum verimi	112
Çizelge 4.2. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı omik kontak parametreleri	112
Çizelge 4.3. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı karakteristik kontak direnci değerleri.....	113
Çizelge 4.4. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı omik kontak parametreleri	114
Çizelge 4.5. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı karakteristik kontak direnci değerleri.....	114

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Lazer çeşitlerinin yıllara göre pazar payları.....	1
Şekil 1.2. Lazer diyotların kullanım alanları.....	5
Şekil 1.3. Kullanım alanları ve pazar payları.....	6
Şekil 2.1. İki enerji seviyeli sistemde foton-sistem etkileşimi (B_{12} uyarılmış soğurmayı, A_{12} kendiliğinden salınımı, ve B_{21} uyarılmış salınımı göstermektedir)	10
Şekil 2.2. İki enerjili sistemde, (a) nüfus terslenmesi olmadığı ve (b) nüfus terslenmesi olduğu durumlar için Boltzmann istatistiğine göre nüfus dağılımları	14
Şekil 2.3. Üç seviyeli lazer sistemi	17
Şekil 2.4. Dört seviyeli lazer sistemi.....	20
Şekil 2.5. Fabry-Perot rezonatörlerinde faz rezonans koşulu	21
Şekil 2.6. Fabry-Perot rezonatörlerinde genlik rezonans koşulu	22
Şekil 2.7. Yarıiletken lazer malzemeleri ve lazer ışıma dalgaboyları.....	24
Şekil 2.8. Eklem oluşumundan sonra yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-band diyagramı	27
Şekil 2.9. p-n eklemlerde yeniden birleşme mekanizması.....	27
Şekil 2.10. Farklı yarıiletkenler için yasak band aralığı ve örgü sabiti.....	28
Şekil 2.11. GaAs/AlGaAs tekli çoklu-yapısı için (a) termal denge durumunda ve (b) doğru beslem altında band diyagramı	28
Şekil 2.12. GaAs/AlGaAs tekli çoklu-yapısı için enerji-band diyagramı.....	30
Şekil 2.13. Çiftli çoklu-yapıda taşıyıcı hapislenmesi.....	34
Şekil 2.14. Optik dalganın aktif tabakada hapislenmesi	34
Şekil 2.15. Snell yasası (a) normal yansıma, (b) tam yansıma durumu	35

Şekil	Sayfa
Şekil 2.16. a) tekli-yapı, (b) tekli çoklu-yapı ve (c) çiftli çoklu-yapıların enerji, kırma indis ve şiddet karşılaştırması.....	37
Şekil 2.17. a) Ayrı hapislemeli ve (b) geniş-optik-kaviteli çoklu-yapılar için enerji-band diyagramı	39
Şekil 2.18. (a) Tekli ve (b) çoklu kuantum kuyulu eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapı için enerji-band diyagramları ve kırma indisleri	40
Şekil 2.19. Çatı dalga kılavuzlu çoklu-yapı	42
Şekil 2.20. GaAs/AlGaAs tekli kuantum kuyusu için enerji-band diyagramı	43
Şekil 2.21. Kuantum kuyusu için izinli enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonları	45
Şekil 2.22. (a) Üç-boyutlu ve (c) iki-boyutlu durum yoğunluğu	47
Şekil 3.1. Fotolitografi işlemi.....	50
Şekil 3.2. Pozlama sistemleri	50
Şekil 3.3. Çizgi ve alan genişliği.....	51
Şekil 3.4. DRAM yarı çizgi genişliğinin yıllara göre değişimi ve gerekli olan pozlama sistemi dalgaboyları.....	52
Şekil 3.5. DNQ sistemi	54
Şekil 3.6. Pozitif ve negatif fotorezist için desenin geliştirilmesi.....	54
Şekil 3.7. Fotorezist tabaka kalınlığının dönme hızına bağlı değişimi	55
Şekil 3.8. Desen terslenmesi işlemi	57
Şekil 3.9. Fotorezistin kaldırılması işlemi	59
Şekil 3.10. 1,3 µm dalgaboylu InGaAsP/InP MQW GRINSCH yapısı (Aktif bölge 80 Å kalınlığında 8 adet $\text{In}_{0.897}\text{Ga}_{0.103}\text{As}_{0.471}\text{P}_{0.529}$ kuantum kuyusu ve 100 Å kalınlığında 9 adet $\text{In}_{0.860}\text{Ga}_{0.140}\text{As}_{0.305}\text{P}_{0.695}$ engeldendirilmektedir	60

Şekil	Sayfa
Şekil 3.11. 1,55 µm dalgaboylu InGaAsP/InP MQW GRINSCH yapısı (Aktif bölge 70 Å kalınlığında 8 adet $\text{In}_{0.783}\text{Ga}_{0.217}\text{As}_{0.745}\text{P}_{0.255}$ kuantum kuyusu ve 65 Å kalınlığında 9 adet $\text{In}_{0.793}\text{Ga}_{0.207}\text{As}_{0.449}\text{P}_{0.551}$ engelden oluşmaktadır	60
Şekil 3.12. 1.pozitif çatı dalga kılavuzu maskesi	62
Şekil 3.13. 2. negatif metal ped maskesi	73
Şekil 3.14. Fabrikasyon adımları: (1)Numunenin şematik diyagramı, (2) SiO_2 tabakasının büyütülmesi, (3) HMDS ve PR kaplanması, (4) 1. pozitif çatı dalga kılavuzu deseninin transferi ve desenin geliştirilmesi (önden ve üstten görünüş), (5) SiO_2 , InGaAs ve InP tabakalarının kuru aşındırılması, (6) InGaAs ve InP tabakalarının ıslak aşındırılması, (7) SiO_2 tabakasının aşındırılması, (8) Çatı dalga kılavuzunun açılması, (9) 2. negatif metal ped maskesinin transferi, (10) 2.metal ped deseninin geliştirilmesi, (11) istenmeyen fotoresist tabakasının kaldırılması.....	76
Şekil 3.15. LIV ölçüm sisteminin şematik diyagramı.....	78
Şekil 3.16. Metal ve yarıiletken malzemeler kontak yapılmadan önce Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları	81
Şekil 3.17. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için termal denge enerji–bant diyagramı.....	82
Şekil 3.18. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizmaları: (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c)Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) doğal bölgede deşik enjeksiyonu	84
Şekil 3.19. Omik kontaklar için: a) düşük engel yüksekliği ve b) yüksek katkı yoğunluğu.....	85
Şekil 3.20. TLM maskesinin şematik gösterimi (Metal pedler artan aralıkla birbirinden ayrılmıştır)	88
Şekil 3.21. Ölçülen dirence karşı (R), kontaklar arasındaki uzaklığın (L) grafığı	88

Şekil	Sayfa
Şekil 3.22. TLM numunesi fabrikasyon adımları: (1) p-InGaAs kontak tabakası, (2) HMDS ve PR kaplanması, (3) negatif metal ped maskesi, (4) pozlama ve desenin geliştirilmesi, (5) metalizasyon ve fotorezistin kaldırılması, (6) SiO ₂ tabakasının büyütülmesi, (7) HDMS ve PR kaplanması, (8) pozitif mesa desen maskesi, (9) pozlama ve desenin geliştirilmesi, (10) SiO ₂ tabakasının aşındırılması, (11) InGaAs tabakasının aşındırılması, (12) SiO ₂ tabakasının aşındırılması	94
Şekil 4.1. 1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği	96
Şekil 4.2. 1,55 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği	97
Şekil 4.3. 1,55 µm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği	98
Şekil 4.4. 1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği	99
Şekil 4.5. 1,55 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği	100
Şekil 4.6. 1,55 µm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği	101
Şekil 4.7. 1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği	104
Şekil 4.8. 1,55 µm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontağa sahip lazer diyot için kavite uzunluğu- diferansiyel kuantum veriminin tersi grafiği	104
Şekil 4.9. Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklığa bağlı akım-güç grafiği	105
Şekil 4.10. Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklığa bağlı akım-güç grafiği	106
Şekil 4.11. Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafiği	107
Şekil 4.12. Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafiği	107

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-gerilim grafiği.....	109
Şekil 4.14. Farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-güç grafiği.....	110
Şekil 4.15. Geleneksel omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı karakteristik kontak direnci grafiği	113
Şekil 4.16. Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı karakteristik kontak direnci grafiği.....	113

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
a	Örgü sabiti
$\alpha_o(v_s)$	Soğurma katsayısı
α	Optik kayıp
α_i	Aktif bölgedeki optik kayıp
Δa	Örgü uyumsuzluğu
α_m	Yan yüzler nedeniyle meydana gelen optik kayıp
σ_{21}	Işıklı geçiş etkin kesiti
A_{21}	Kendiliğinden salınım için Einstein katsayısı
b_{min}	Minimum desen boyutu
B_{12}	Uyarılmış soğurma için Einstein katsayısı
B_{21}	Uyarılmış salınım için Einstein katsayısı
c	Işık hızı
d	Aktif tabakanın kalınlığı
D_{e2}	Bariyer bölgesine (p-AlGaAs) elektron difüzyon katsayısı
d_v	Enerji seviyesi band genişliği
d_{PR}	Fotoresist tabakasının kalınlığı
E_1	Taban enerji seviyesi
E_2	Üst (uyarılmış) enerji seviyesi
E_{c1}	GaAs için iletkenlik bandı minimumu
E_{c2}	AlGaAs için iletkenlik bandı minimumu
ΔE_g	Toplam band ofseti
E_{g1}	GaAs için yasak band aralığı enerjisi
E_{g2}	AlGaAs için yasak band aralığı enerjisi
Φ_{Bn}	Engel yüksekliği
Φ_m	Metal için iş fonksiyonu

Simgeler	Açıklama
Φ_s	Yarıiletken için iş fonksiyonu
g	Yükseltme kazanç faktörü
g_1	Taban enerji seviyesinin dejenereliği
g_2	Üst enerji seviyesinin dejenereliği
$g(v_s, v_o)$	Enerji seviyesi yarı genişliği
$g^{2D}(E)$	Durum yoğunluğu
Γ	Genlikteki kayıp
H	Toplam enerji operatörü
I_{th}	Eşik akımı
J	Akım yoğunluğu
J_{diff}	Difüzyon akım yoğunluğu
J_{th}	Eşik akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
k_z	z-doğrultusundaki dalga vektörü
χ_s	Elektron ilgisi
L	Aynalar arası mesafe
L_t	Transfer uzunluğu
L_c	Kavite uzunluğu
L_{e2}	Bariyer bölgesine elektron difüzyon uzaklığı
λ	Pozlama sisteminin dalgaboyu
m^*	Elektronun etkin kütlesi
m_{e1}^*	GaAs için elektron etkin kütlesi
m_{e2}^*	AlGaAs için elektron etkin kütlesi
n	Kazanç bölgesinin kırma indisi
n_1	Taban enerji seviyesi için nüfus yoğunluğu
n_2	Üst enerji seviyesi için nüfus yoğunluğu
n_t	p-GaAs tabakasına enjekte edilen taşıyıcıların yoğunluğu
N_1	Taban enerji seviyesinin nüfusu
N_2	Üst enerji seviyesinin nüfusu
N_3	Pompalama bandının nüfusu

Simgeler	Açıklama
η_Q	Kuantum verimi
N_A	Alıcı yoğunluğu
N_A^-	İyonize olmuş alıcı yoğunluğu
N_{c2}	Etkin durum yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
N_D^+	İyonize olmuş verici yoğunluğu
N_{v2}	p-AlGaAs bariyer tabakasının değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu
N^{2D}	Birim kesit alanı başına toplam durumların sayısı
Δn_r	Çatı yüklenmesi
N_{ph}	Foton yoğunluğu
η_d	Diferansiyel kuantum verimi
η_i	İç kuantum verimidir
P	Momentum işlemcisi
r_c	Karakteristik kontak direnci
R_c	Kontak direnci
R_s	Tabaka direnci
ϕ	Foton yoğunluğu
Ψ_n	Dalga fonksiyonu
s	Maske-altaş mesafesi
T	Sıcaklık
T_o	Çalışma sıcaklığı
τ_{21}	Lazer seviyesinde bulunan atomların yaşam süresi
τ_{32}	Pompalama bandında bulunan atomların yaşam süresi
τ_{ph}	Foton ömür süresi
θ_i	Gelme açısı
θ_r	Yansıma açısı
θ_c	Kritik açı
$\rho(\nu)$	Radyasyon yoğunluğu

Simgeler	Açıklama
V	Aktif bölgenin hacmi
v_g	Işık grup hızı
v_o	Enerji ayırım noktası
v_s	Merkez frekansı
V_i	Bükülme potansiyel engeli
W	Tüketim bölgesi genişliği

Kısaltmalar	Açıklama
BH	Örtülü çoklu-yapı
CVD	Kimyasal buhar biriktirmesi
DBR	Dağınık Bragg yansıtıcısı
DFB	Dağınık geri beslemeli
FP	Fabry-Perot
GRINSCH	Eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapı
LD	Lazer diyot
LED	Işık yayan diyot
LOCH	Geniş-optik-kaviteli çoklu-yapı
LPE	Buhar faz epitaksi
MBE	Moleküler demet epitaksi
MOCVD	Metal-organik kimyasal buhar biriktirmesi
MOVPE	Metal organik buhar faz epitaksi
MQW	Çoklu kuantum kuyu
RWG	Çatı dalga kılavuzu
RWGH	Çatı dalga kılavuzlu çoklu-yapı
SH	Tekli çoklu-yapı
SQ	Tekli kuantum kuyu
TAE	Termiyonik alan emisyonu
TE	Termiyonik emisyon
TLM	Transmisyon çizgi modeli
QD	Kuantum nokta
QW	Kuantum kuyusu
QWR	Kuantumtel

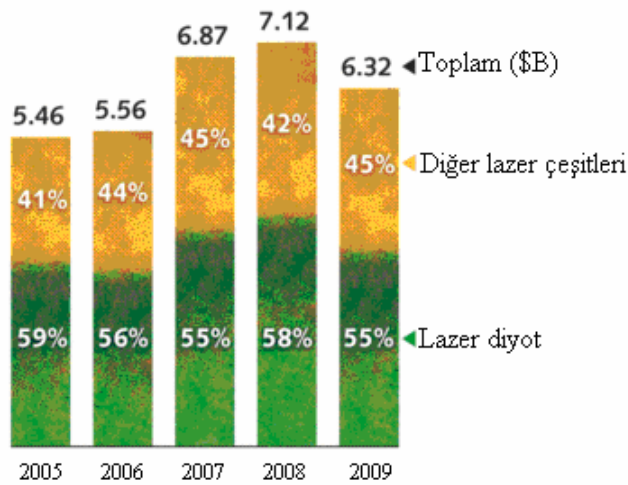
1. GİRİŞ

Lazer kelime anlamıyla “ışmanın uyarılmış salınımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi, (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, LASER)” anlamına gelmektedir. Uyarılmış ışımaya kavramı ilk defa 1917 yılında A. Einstein tarafından önerilmiş ve bu fikir ilk defa 1951 yılında C.H. Townes tarafından mazerlerin (ışmanın uyarılmış salınımıyla mikrodalganın kuvvetlendirilmesi) geliştirilmesi için kullanılmıştır.

Lazer kaynakları katı sıvı ve gaz olmak üzere üç çeşittir:

1. *Katı lazerler:* Katı lazerler zenginleştirilmiş yalıtkan lazerler ve yarıiletken lazerler olmak üzere iki çeşittir. En çok kullanılan zenginleştirilmiş yalıtkan lazerler yapay yakut lazer ve Nd:YAG lazerlerdir. Yarıiletken lazerler ise uygulamada en çok kullanılan ve satılan lazerlerdir.
2. *Gaz lazerler:* Atom, iyon ve molekül lazerler olmak üzere üç çeşittir. En bilinen türleri Ar, CO₂, He-Cd lazerlerdir.
3. *Sıvı lazerler:* Boya lazerlerdir.

Şekil 1.1’de lazerler için son beş yılı kapsayan pazar payları verilmiştir [1].



Şekil 1.1. Lazer çeşitlerinin yıllara göre pazar payları

Lazer diyotların tarihsel gelişimi

1960 yılında T. Maimann tarafından 694 nm ışıma dalgaboylu yakut lazer geliştirilmiştir [2]. İlk lazerin geliştirilmesinden sonra, lazerlere olan ilgi ve çalışmalar hızla artmıştır.

1961 yılında N. Basov ve arkadaşları [3] p-n eklem boyunca enjekte edilen taşıyıcıların yeniden birleşmesiyle yarıiletkenlerde uyarılmış ışımanın olabileceği fikrini ortaya atmış ve böylece düşük sıcaklıklarda başarılı şekilde çalışan ilk tekli-eklem (p-n eklem) lazer diyot 1962 yılında üretilmiştir. Üretilen ilk yarıiletken lazer diyotlar p-n ekleminden oluşan, bir kaç yüz mikron kalınlığındaki GaAs tabanlı lazerlerdi [4,5]. Bu türdeki lazerlerde, optik geri besleme günümüzde halen kullanılmakta olan birbirine paralel iki yansıtıcı yüzeyden oluşan Fabry-Perot rezonatörleriyle sağlanmaktaydı [6]. p-n ekleminden oluşan lazer diyotlarda, eşik akım yoğunluğu 50 kA/cm^2 'den daha büyüktü. Bunun nedeni ise, zayıf dikey (ekleme dik doğrultuda) optik hapisleme ve kazanç bölgesini çevreleyen yüksek kayıplı GaAs tabakalarının varlığıydı. Tekli-yapı lazerlerde, kazanç bölgesi p-n eklem p- tarafında oluşan ince ışık yayan 3-5 μm kalınlığındaki bölgeydi. Tabakalar arasındaki kırılma indisi farkı çok az olduğu için, sadece zayıf kırılma indisi-kılavuzlaması meydana gelmekteydi. Bu sebepten dolayı, ışınım yüksek kayıplı GaAs tabakası tarafından çevrelenen kazanç bölgesini içerisinde yayılmakta, bu davranış da eşik akım yoğunluğunun artmasına sebep olmaktaydı [7].

1963 yılında H. Kroemer, Zh.I. Alferov ve R.F. Kazarinov [8,9] ilk çoklu-yapı (H) fikrini ortaya attılar. Bu fikirden yaklaşık üç yıl sonra, 1967 yılında, J. M. Woodall ve arkadaşları ilk GaAs ve AlGaAs yarıiletkenlerinden oluşan tekli çoklu-yapıyı (SH) ürettiler. 1969 yılında I. Hayashi ve M. B. Panish tarafından, p-n eklemlerin dezavantajlarının giderilmesi için GaAs ve $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 'dan oluşan tekli çoklu-eklemliler geliştirildi [10,11]. Çoklu-eklemliler lazerlerin kullanımıyla taşıyıcı ve foton hapislenmeleri sağlandığı için oda sıcaklığındaki eşik akım yoğunlukları tekli eklemlere göre daha düşüktür ($\sim 10 \text{ kA/cm}^2$).

Tekli çoklu-eklemli lazer diyotlarda eşik akım değerinin azalmasına rağmen, spektral ve uzaysal çıkış karakteristikleri kararsızdır. Bu sorununun üstesinden gelebilmek için 1970 yılında Zh.I. Alferov, M.B. Panish ve I. Hayashi oda sıcaklığında çalışan ilk çiftli çoklu-yapıyı ($\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As-GaAs-Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$) üretmişlerdir [12,13]. Çiftli çoklu-yapılarda (DHs), düşük yasak band aralıklı yarıiletken yüksek yasak band aralıklı yarıiletken tabakalarının arasına yerleştirilmektedir. Bu iki çoklu-yapı taşıyıcıları kalınlığı 0,1-0,5 μm aralığında değişen aktif bölgeye hapisleyerek nüfus terslenmesinin oluşmasını sağlar ve aynı zamanda optik dalga kılavuzu olarak davranır. Çiftli çoklu-yapılarda oluşan yüksek kırılma indisi basamağı sayesinde (%6-%9) yaratılan fotonların, uyarılmış ışımanın olduğu kazanç bölgesine yatay hapislenmesi sağlanır. Buna ek olarak, hapisleme tabakalarının ışıma dalgaboyundaki soğurması az olduğu için, optik kayıpta azdır. Böylece, çiftli çoklu-yapılarda tekli-yapılardan daha düşük eşik akım yoğunluğu ($J_{\text{th}} < 1500 \text{ A/cm}^2$) elde edilmiştir [7] .

1970'lerde optik geri beslemeyi sağlayan birbirine paralel ayna yüzeylerin geliştirilmesiyle, eşik akım yoğunluğu değerlerinin azalması sağlanmıştır. Yine aynı yıllarda çatı dalga kılavuzlu (RWGH) ve örtülü (BH) çoklu-yapı lazerler geliştirilmiştir. Bu gelişmelerle, yatay taşıyıcı hapislenmesinin iyileştirilmesine ek olarak, yaratılan fotonların kazanç bölgesine yatay hapislenmesi de sağlanmıştır. Böylece, daha yüksek yatay mod kontrolü ve daha düşük eşik akım yoğunlukları elde edilmektedir. Çatı dalga kılavuzlu ve örtülü çoklu-yapı lazerlerin bulunmasına paralel olarak dağınık geri beslemeli lazer diyotlar da geliştirilmiştir [14,15]. Bu türdeki lazerin geliştirilmesinin amacı yüksek hız modülasyonlarında dikey, yatay ve boyuna modların kontrol edilebilmesidir.

Çoklu-yapılarda kuantum kuyularının (QW) kullanımı ilk defa 1974 yılında L. L. Chang, L. Esaki ve R. Tsu tarafından gerçekleştirilmiştir [16]. 1977 yılında ise R. D. Dupuis, P.D. Dapkus ve N. Holonyak tarafından ilk kuantum kuyulu yarıiletken lazer diyot geliştirilmiştir [17]. Elektron-deşik çiftleri için hapisleme bölgesinin kuantum kuyu bölgesindeki küçük bir hacime indirgenmesiyle eşik akım yoğunluğu değeri oldukça azaltılmıştır ($J_{\text{th}} \sim 500 \text{ A/cm}^2$) [18]. Buna ek olarak, kuyu genişliğinin ve

bariyer yüksekliğinin değiştirilmesiyle ışınım dalga boyunun istenildiği gibi ayarlanması sağlanmıştır.

1980'lerin sonunda lazer performansının artırılması için gergin kuantum kuyulu lazerler geliştirilmiştir [19]. Böylece eşik akım yoğunluğu değerleri, $J_{th} \sim 65 \text{ A/cm}^2$ kadar küçük değerlere ulaşmıştır [20]. Lazer diyot yapılarında meydana gelen bu gelişmeler, buhar faz epitaksi (LPE), metal-organik kimyasal buhar biriktirmesi (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) gibi tabaka kalınlıklarının ve kompozisyonlarının büyük bir doğrulukla kontrol edilebildiği büyütme sistemlerinin gelişmesi sonucunda meydana gelmiştir.

1990'lı yıllarda ise gergin kuantum kuyulu lazerler ile ilgili araştırmalar devam etmiştir ve kuantum tel (QWR) ve kuantum nokta (QD) lazerler geliştirilmiştir [21]. Bunlara ek olarak, yüzeyden ışık yayan lazerler [22] ve mikrodisk lazerler [23] geliştirilmiştir.

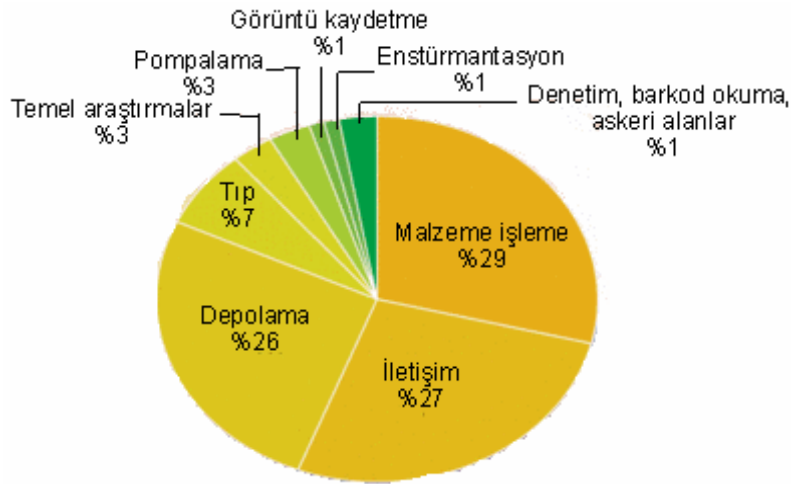
Yarıiletken lazer diyotların uygulamaları

Yarıiletken lazer diyotların kullanıldığı en önemli sahalardan birisi optik-fiber iletişimidir [7,24-26]. Optik-fiber iletişiminde ilk başlarda GaAs lazerler yerel alan iletişimlerinde kullanılmaktaydı. Günümüzde ise optik iletişim sistemlerinde, yüksek dalga boyu bölgesinde çalışan düşük eşik akım değerlerine sahip ve düşük maliyetli optik kaynaklar kullanılmaktadır [7]. Optik kaynak olarak, 1,3-1,55 μm dalga boyu aralığında çalışan $\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ tabanlı yarıiletken lazer diyotlar tercih edilmektedir.

Optik iletişimde kullanılması için geliştirilen lazer diyotların geniş band modilasyonuna, dar band genişliğine, düşük gürültüye, yüksek güvenilirliğe ve performansa sahip olması gerektiği için üretilen lazer diyotlarında band yapıları geliştirilerek, klasik p-n eklem lazer diyot yapıları yerine dağınk geri beslemeli (DFB), dağınk Bragg yansıtıcı (DBR) ve kuantum kuyulu lazer diyotlar

kullanılmaktadır. Multimedya dünyasının gelişimiyle düşük maliyetli iletişim lazerleri geliştirilmiştir.

Lazer diyotların diğer önemli uygulama alanı ise optik disk hafızalarıdır (ODM). İletişim uygulamalarından farklı olarak, kullanılan lazerlerin düşük gürültülü ve yüksek kararlılıkta ayrıca yüksek yoğunlukta bilgi kaydı için kısa dalga boylarında olması ve üretim maliyetininde düşük olması gerekmektedir. $Al_xGa_{1-x}As$ lazerler ilk defa evlerde kullanılan kompakt disklerde (CD) kullanılmıştır. DVD sistemlerinde ise $(Al_{1-x}Ga_x)_yIn_{1-y}P$ lazerler kullanılmaktadır. Mor lazerler yüksek çözünürlüklü DVD'lerde (HDDVD) ve mavi-ışık (B-R) teknolojisinde ve görünür bölgede ışıma yapan lazer diyotlar, özellikle kırmızı ve yeşil, yaygın olarak lazer göstericilerde kullanılmaktadır. Lazer yazıcılar, tarayıcılar ve barkod okuyucularda lazer diyotların diğer uygulama alanlarıdır. Bu uygulama alanlarına ek olarak tıp (cerrahi bilimleri, dişçilik ve eczacılık) ve askeri alanlarda da kullanılmaktadır. Şekil 1.2'de lazer diyotların kullanım alanları verilmiştir [1].



Şekil 1.2. Lazer diyotların kullanım alanları

Lazer diyotların kullanım alanları ve pazar payları Şekil 1.3'de [27], sıklıkla kullanılan lazer diyotların ışıma dalga boyları ve kullanım amaçları Tablo 1.1'de verilmiştir.

Dalgaboyu	Yıl	Malzeme işleme	Tıp	Enstümantasyon	Temel araştırmalar	İletişim	Optik depolama	Eğilence	Görüntü kaydetme	Denetim, ölçüm ve kontrol	Barkod okuma	Sensör	Diğer	Katı lazer pompalama	
<700 nm	2007	0	0	0	0	0	1,234,800	9,000	5,450	11,910	13,600	0	0	30	1,274,790
	2008	0	150	0	0	0	1,377,647	6,400	5,450	12,070	8,600	0	0	105	1,410,422
750-980 nm <100 mW	2007	0	0	0	0	0	364,180	0	13,070	0	0	29,852	79,425	0	486,527
	2008	0	0	0	0	0	312,492	0	13,580	0	0	35,823	96,380	0	458,275
750-980 nm 100 mW-10 W	2007	0	7,000	0	0	119,030	0	0	11,650	0	0	0	1,600	72,560	211,840
	2008	0	6,500	0	0	113,850	0	0	11,300	0	0	0	1,680	101,436	234,766
750-980 nm >10 W	2007	10,850	45,800	0	2,000	0	0	0	11,000	0	0	2,000	9,000	48,500	130,150
	2008	11,100	47,850	0	2,000	0	0	0	11,200	0	0	2,000	9,000	50,125	133,075
900-1550 nm	2007	0	1,850	0	0	1,519,030	0	0	0	0	0	0	15,525	0	1,536,505
	2008	0	2,600	0	0	1,749,030	0	0	0	0	0	0	18,552	0	1,770,182
>1550 nm	2007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Toplam (\$)	2007	15,850	62,900	0	2,000	1,738,060	1,598,980	9,000	41,170	11,910	13,600	31,852	110,250	171,090	3,806,562
	2008	16,350	66,325	0	2,000	1,862,880	1,690,139	6,400	41,530	12,070	8,600	37,823	130,812	205,416	4,080,345

Şekil 1.3. Lazer diyotların kullanım alanları ve pazar payları [27]

Çizelge 1.1. Sıklıkla kullanılan lazer diyotların ışınım dalgaboyları ve kullanım alanları

Dalgaboyu (nm)	Kullanım alanı
375	Tıp, ışık mikroskopu
405	InGaN mavi-mor lazer, mavi-ışık disk, HD DVD
473	Mavi-parlak lazer gösterici
485	Florasın boyaları uyarmak için
532	Parlak-yeşil lazer göstericiler, 1064 nm morötesi lazerler
635	Parlak-kırmızı lazer göstericilerde
650	DVD yazıcılarda, lazer göstericilerde
670	Kırmızı lazer göstericilerde
785	CD yazıcılarda
808	Nd:YAG lazerlerde, yüksek güçte lazerlerde
848	Lazer farelerde
980	Optik yükselticilerde, Yb:YAG lazerlerde
1064	Optik-fiber iletişimde
1310	Optik-fiber iletişimde
1480	Optik yükselticilerde
1550	Optik-fiber iletişimde
1625	Optik-fiber iletişimde

InGaAsP/InP malzemelerinin özellikleri ve uygulama alanları

Son yıllarda 1,3-1,55 μm dalgaboyu aralığında çalışan lazer diyotların kullanıldığı en önemli sahalardan birisi optik iletişimdir. Yerel iletişim ağlarında, fiberlerde düşük dispersiyon ve kayıba sahip olması nedeniyle 1,3 μm dalgaboylu lazer diyotlar kullanılmaktadır [28-32].

Geleneksel olarak kullanılan AlGaInAs/GaAs ve InGaAsP/InP sistemleri karşılaştırıldığında, InGaAsP/InP sistemleri sıcaklık özelliklerinin daha zayıf olması ve elektron hapsleme özelliğinin daha düşük olmasına karşın, yüksek dalgaboyu ve kararlılığından dolayı daha çok tercih edilmektedir [32-34]. InGaAsP/InP sistemlerindeki düşük iletkenlik band ofseti nedeniyle, eşik akımı değerleri daha yüksek ve çıkış gücü değerleri ise daha düşüktür. InP tabanlı sistemlerde bu sorunların üstesinden gelinebilmesi ve lazer diyot parametrelerinin iyileştirilmesi için gerginliğe sahip olan çoklu kuantum kuyular ve eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapılar kullanılmaktadır [35-38].

Bu tez çalışmasında, çatı dalga kılavuzlu (RWG) Fabry-Perot (FP) lazer diyotların (LD) fabrikasyonu için metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) yöntemi ile büyütülmüş 1,3 ve 1,55 μm ışıma dalgaboylu InP tabanlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ çoklu kuantum kuyulu (MQW) eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapılar (GRINSCHs) kullanıldı. Çoklu-yapıların çatı dalga kılavuzlu Fabry-Perot lazer diyot fabrikasyonu, Gwangju Fen ve Teknoloji Enstitüsü (GIST), İletişim ve Kominikasyon Bölümü (DIC), Optoelektronik Laboratuvarı bünyesinde yer alan fotolitografi ve fabrikasyon sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi. Fabrikasyonu tamamlanan lazer diyotların, aygıt parametre analizleri yine aynı laboratuvar bünyesinde yer alan aygıt parametre analiz sistemleri kullanılarak gerçekleştirildi.

p-InGaAs kontak tabakasına sahip lazer diyotlar için aygıt parametrelerini etkileyen en önemli parametrelerden biri olan omik kontakların geliştirilmesi amacıyla yine aynı laboratuvar bünyesinde yer alan sistemler kullanılarak Transmisyon Çizgi

Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu gerçekleştirildi ve kontak parametreleri incelendi.

Bu tez çalışması aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Birinci bölümde lazer diyotların tarihçesi, kullanım alanları ve tez çalışmasında kullanılan InGaAsP/InP sistemleri için literatür bilgisi verildi. İkinci bölümde, lazerlerin çalışma prensipleri, lazer diyot malzemelerinin özellikleri, lazer diyotların geleceğı, lazer yapılarının fiziğı ve lazer eřitleri hakkında bilgiler verildi. nc bölümde, yapılan lazer diyot fabrikasyonlarının daha iyi anlaşılabilmesi için fotolitografi ve temel fotolitografi işlemleri hakkında bilgi verilerek çatı dalga kılavuzlu lazer diyot fabrikasyonları adım adım gösterildi. Daha sonra fabrikasyonu tamamlanan lazer diyotların aygıt parametre analizinin yapılması için kullanılan sistemler, hesaplanan ve bulunan aygıt parametrelerinin teorisi ayrıntılı olarak açıklandı. Bu çalışmalara ek olarak lazerlerin performansını etkileyen en önemli parametre olan omik kontakların teorisi ve analizi hakkında bilgiler verildi. Dördüncü bölümde, fabrikasyonu yapılan lazer diyotların aygıt parametre ve omik kontakların, kontak parametre analizleri sonucunda elde edilen sonuçlar tartışıldı Beřinci bölümde, elde edilen lazer diyot ve omik kontak parametre analizlerinin sonuçları değıerlendirildi.

2. YARIİLETKEN LAZERLER

Önceki bölümde detaylı olarak açıklandığı gibi lazer kelimesi “*ışımının uyarılmış salınımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi*” anlamına gelmektedir. Işımanın uyarılmış salınımıyla ışığın kuvvetlendirmesi kendiliğinden gerçekleşen bir olay olmadığı için, bu özelliği gösteren malzemelere ve sistemlere ihtiyaç vardır [39].

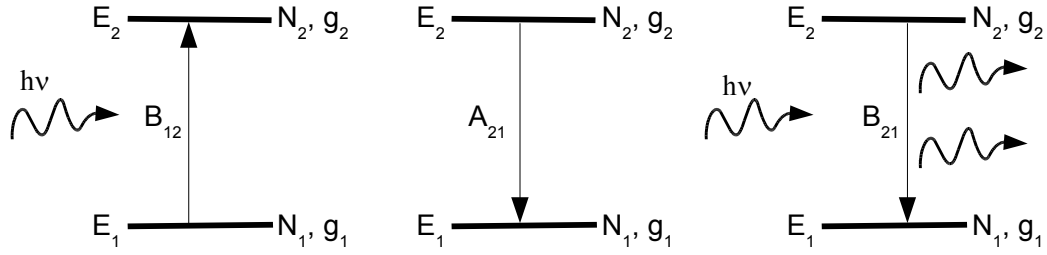
2.1. Lazerlerin Çalışma Prensipleri

Lazerlerin ana çalışma prensibi, aldıkları enerjiyle taban enerji seviyesinden uyarılmış enerji seviyesine çıkan elektronların, sisteme uygulanan bir etki sonucunda (optik, elektriksel vb.) taban enerji seviyesine dönerlerken ışıma yapmalarına dayanmaktadır. Diğer bir deyişle, elektronlarda depolanan fazla enerji uyarılmış ışıma sonucunda salınır. Beyaz ışıktan ve güneş ışığında meydana gelen kendiliğinden salınım mekanizmasından farklı bir mekanizmaya sahip oldukları için lazer ışığı diğer ışık kaynaklarından daha farklı özellikler göstermektedir.

Radyasyon yayılımı (foton yayılımı) uyarılmış salınım nedeniyle aynı anda gerçekleştiği için, lazer ışıması koherenttir ve yayıldığı mesafeye bağlı olarak şiddetinde bir değişim olmaz. Buna ek olarak, ışıma diğer ışık kaynaklarının tersine tek dalgaboyludur.

2.1.1. Kendiliğinden ve uyarılmış salınım

Kendiliğinden salınım kavramını açıklamak için öncelikle iki enerji seviyeli bir sistemi (E_1 , E_2 ve $E_2 > E_1$) ele alalım (Şekil 2.1) ve enerji seviyelerindeki elektron nüfusunun N_1 ve N_2 , enerji seviyesi dejeneriliğinin ise g_1 ve g_2 olduğunu varsayalım:



Şekil 2.1. İki enerji seviyeli sistemde foton-sistem etkileşimi (B_{12} uyarılmış soğurmayı, A_{21} kendiliğinden salınımı, ve B_{21} uyarılmış salınımı göstermektedir)

Termal denge durumunda, enerji seviyelerinde dejenerelik olmadığı durumlarda enerji seviyelerindeki elektron nüfusu Boltzmann eşitliği ile verilir [40].

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right) \quad (2.1)$$

Oda sıcaklığında (≈ 300 K), kT termal enerjisi çok küçük olduğu için, üst enerji seviyesinde (E_2) bulunan elektronların sayısı taban durumuna (E_1) göre oldukça küçüktür; yani termal denge durumunda elektronlar taban durumunda yer almaktadır. O halde, iki seviyeli bir sistemde toplam elektron nüfusu sabittir ve

$$N_1 + N_2 = N_t \quad (2.2)$$

ile verilir.

Alt seviyede yer alan elektronun $h\nu \geq E_2 - E_1$ enerjisine sahip bir foton soğurarak üst enerji seviyesine geçmesi veya tam tersi, üst enerji seviyesinde yer alan elektronun $h\nu \geq E_2 - E_1$ enerjisine sahip bir foton salarak alt enerji seviyesine geçmesi olasıdır. Fotonla malzemenin etkileşimi uyarılmış soğurma, kendiliğinden salınım ve uyarılmış salınım olmak üzere üç farklı mekanizma ile açıklanır.

Uyarılmış soğurma

Alt seviyede yer alan elektron $h\nu \geq E_2 - E_1$ enerjisine sahip bir foton soğurduğu zaman üst enerji seviyesine çıkar (Şekil 2.1(a)). Sisteme etkiyen elektromanyetik dalganın, taban durumunda bulunan elektron nüfusuna etkisi

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -B_{12}\rho(\nu)N_1 \quad (2.3)$$

ile verilir. Burada, B_{12} Einstein katsayısıdır ve birimi $\text{cm}^3\text{s}^{-2}\text{J}^{-1}$, dir. B_{12} , yukarı yönde geçiş olasılığını ifade eder. $\rho(\nu)$ ise radyasyon yoğunluğudur.

Kendiliğinden salınım

Uyarılmış soğurma mekanizması sonucunda üst seviyeye çıkan elektron, bir süre sonra ($\approx 10^{-9}$ s) hiç bir dış etki olmaksızın, radyasyon salarak kendiliğinden taban durumuna döner (Şekil 2.1(b)). Üst enerji seviye nüfusunun değişimi

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -A_{21}N_2 \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada, A_{21} Einstein katsayısıdır ve birimi s^{-1} 'dir. Üst enerji seviyesinden taban durumuna geçiş olasılığını ifade eder.

Kendiliğinden salınımda, uyarılmış soğurmanın aksine ortamda elektromanyetik dalganın bulunması gerekmez. Geçiş mekanizması tamamen tesadüfi olduğu geçiş olasılığı uyarılmış üst seviyede bulunan elektronların yaşam süresine (τ_{21})

$$\tau_{21} = A_{21}^{-1} \quad (2.5)$$

eşitliği ile bağlıdır.

Uyarılmış salınım

Taban durumunda yer alırken, fotonla etkileşerek üst enerji seviyesine uyarılan elektron, ortamda bulunan uygun frekanslı elektromanyetik dalga ile etkileşir. Elektromanyetik uyarma nedeniyle, elektron foton salınımı yaparak taban durumuna dönmeye zorlanır (Şekil 2.1(c)). Salınan foton ile sistemi uyaran foton eş fazlı ve aynı enerjili olduğu için, açığa çıkan radyasyon gelen ve salınan fotonun toplamıdır. Bu şekilde, salınan fotonun genliği artırılmış olur. Üst enerji seviye nüfusunun değişimi

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = -B_{21}\rho(\nu)N_2 \quad (2.6)$$

ile verilir. Burada, B_{21} Einstein katsayısıdır ve uyarılmış salınım mekanizmasında üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçiş olasılığını ifade eder.

Sistemde yer alan elektron sayısı sabit olduğu için (Eş.2.2), üst enerji seviyesindeki değişim, taban enerji seviyesindeki değişime eşittir ve şu şekilde ifade edilir:

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = -\frac{\partial N_2}{\partial t} \quad (2.7)$$

Termal denge durumunda, Eş.2.7

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = \frac{\partial N_2}{\partial t} = 0 \quad (2.8)$$

ile verilir. Eş.2.3, 4 ve 5, Eş.2.8’de yerlerine konulup, eşitlik düzenlenirse radyasyon yoğunluğu

$$B_{12}\rho(\nu)N_1 = A_{21}N_2 + B_{21}\rho(\nu)N_2 \quad (2.9)$$

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{g_1}{g_2} \left(\frac{B_{12}}{B_{21}} \right) \exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

olarak elde edilir. Bu ifade yeniden düzenlenerek, Einstein katsayıları

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi\nu^2 h \nu}{c^3} \quad (2.10)$$

ve

$$B_{21} = \frac{g_1 B_{12}}{g_2} \quad (2.11)$$

olarak elde edilir. Eş.2.11 ele alınırsa, dejenereliğin olmadığı iki seviyeli bir sistemde $g_1=g_2$ olacağı için, uyarılmış salınım olasılığı, uyarılmış soğurma olasılığına eşittir ($B_{21}=B_{12}$).

2.1.2. Nüfus terslenmesi

Bölüm 2.2.1’de detaylı olarak açıklandığı gibi lazer olayının gerçekleşmesi için sistemde uyarılmış salınımın baskın olması gerekmektedir. Uyarılmış salınımın gerçekleşmesi için de, üst enerji seviyesinden taban durumuna sürekli olarak bir elektron geçişi olmalıdır. Eş.2.1 ile verilen Boltzmann eşitliği incelendiğinde termal denge durumunda, üst enerji seviyesinde çok az sayıda elektron olduğu ve elektronların her zaman minimum enerjili durum olan taban durumunda bulunma isteğinde olduğu görülmektedir. O halde E_1 ve E_2 enerji seviyeli sistemde, herhangi bir andaki seviye nüfus farkı $N_1-N_2>0$ şeklinde ifade edilir (Şekil 2.2(a)).

Nüfus terslenmesini açıklamak için öncelikle soğurma mekanizmasının incelenmesi gerekmektedir. Daha önceki bölümlerde, enerji seviyeleri arasındaki farkın $h\nu$ büyüklüğünde keskin bir enerji farkı olduğu varsayılmıştı. Fakat, bundan sonraki incelemelerde sistemdeki enerji seviyelerinin $g(\nu_s, \nu_o)$ yarıgenişliğinde, $d\nu$ band genişliğinde, enerji ayrımının ν_o noktasında ve merkez frekansının ν_s noktasında olduğu çizgi-geçiş genişlemesine sahip olduğu (linewidth-broadened) varsayılacaktır. Bu şartlar altında, $\rho(\nu)$ enerji yoğunluklu bir radyasyonun dx kalınlıklı bir malzeme tarafından soğurulduğunu ve uyarılmış salınım olayının gerçekleştiğini varsayalım. Eş. 2.9, 10 ve 11, gelen radyasyon terimini içerecek şekilde düzenlenirse,

$$-\frac{\partial N_1}{\partial t} = \rho(\nu) B_{21} \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) \quad (2.12)$$

elde edilir. ν_s frekanslı ve $d\nu$ band genişlikli fotonla etkileşime girebilecek elektronların sayısı

$$\left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) g(\nu_s, \nu_o) d\nu \quad (2.13)$$

ile ifade edilir. E_1 seviyesindeki net N_1 elektron nüfusunun değişimi bulunmak istendiğinde Eş.2.13 bağıntısının her iki tarafı $h\nu$ ile çarpılarak

$$-\frac{\partial}{\partial t} [\rho(\nu_s) d\nu] = \rho(\nu_s) d\nu B_{21} h\nu g(\nu_s, \nu_o) \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right) \quad (2.14)$$

$$-\frac{\partial \rho(\nu_s)}{\partial t} = \rho(\nu_s) B_{21} h\nu_s g(\nu_s, \nu_o) \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right)$$

elde edilir. Burada n_1 ve n_2 , sırasıyla taban seviyesi ve üst seviye için nüfus yoğunluklarıdır. Malzemeye gelen radyasyon, dx kalınlıklı malzemede

$dt=dx/c=(n_o/c_o)dx$ zamanında yol alacaktır. O halde radyasyonun x mesafesinden $x+dx$ mesafesine ilerlerken, enerjisindeki azalma

$$-\frac{\partial \rho(v_s)}{\partial x} = \rho(v_s) B_{21} h v_s g(v_s, v_o) \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right) \frac{1}{c} \quad (2.15)$$

olur ve bu ifadenin integrali alınır,

$$\frac{\rho(v_s)}{\rho(v_o)} = \exp \left[-B_{21} h v_s g(v_s, v_o) \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right) \frac{x}{c} \right] \quad (2.16)$$

elde edilir. Burada üstel kısım içerisinde yer alan zamandan bağımsız kısım soğurma katsayısı, $\alpha_o(v_s)$, ifadesini verir.

$$\alpha_o(v_s) = \frac{B_{21} h v_s g(v_s, v_o)}{c} \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right) \quad (2.17)$$

İfadede yer alan ilk kısım üst enerji seviyesinden taban seviyeye ışımalı geçiş etkin kesitini, σ_{21} , ifade eder. O halde, ışımalı geçiş etkin kesiti ve soğurma katsayısı sırasıyla Eş.2.18 ve 19 ile şu şekilde verilir.

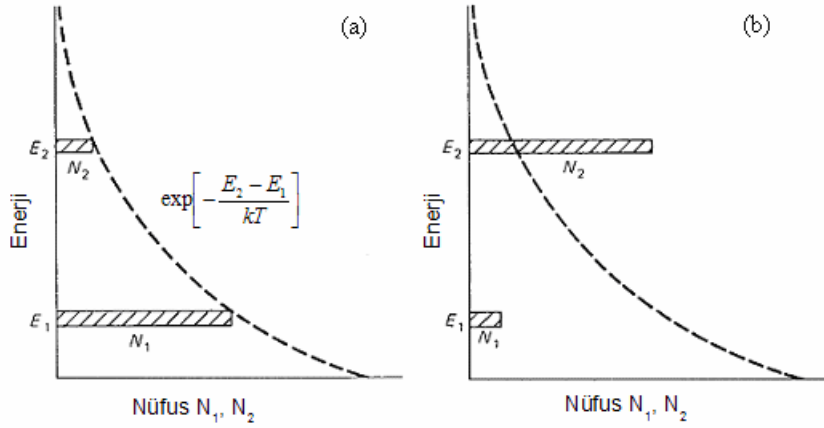
$$\sigma_{21}(v_s) = \frac{B_{21} h v_s g(v_s, v_o)}{c} \quad (2.18)$$

$$\alpha_o(v_s) = \left(\frac{g_2}{g_1} n_1 - n_2 \right) \sigma_{21} \quad (2.19)$$

Elde edilen Eş.2.18 ve 19 kullanılarak Eş.2.16 düzenlenirse,

$$\rho(v_s) = \rho_o(v_s) \exp[-\alpha_o(v_s)x] \quad (2.20)$$

elde edilir [40].



Şekil 2.2. İki enerjili sistemde, (a) nüfus terslenmesi olmadığı ve (b) nüfus terslenmesi olduğu durumlar için Boltzmann istatistiğine göre nüfus dağılımları

Eş.2.19, 20 ve Şekil 2.2 incelendiğinde şu sonuçlar elde edilir:

1. Termal denge durumunda ($n_1 g_2 > n_2 g_1$), Eş.2.19'dan rahatlıkla görüldüğü gibi soğurma pozitifdir ve gelen foton malzeme tarafından soğurulur.
2. Malzemeye gelen fotonun enerjisi mesafeye bağlı olarak üstel olarak azalır.
3. Soğurmanın en fazla olduğu durum, tüm elektronların taban seviyesinde olduğu durumdur.
4. Enerji durumlarında eşit nüfusun bulunması durumunda ($n_1 g_2 = n_2 g_1$), soğurma gerçekleşmez ve malzeme gelen fotona karşı geçirgen olarak davranır.
5. Üst enerji seviyesindeki nüfus yoğunluğunun, taban seviyesinden daha fazla olması durumunda (Şekil 2.2(b)) ise soğurma katsayısının değeri negatif olur. Artık uyarılmış soğurma mekanizması yerini uyarılmış salınım mekanizmasına bırakır. Bu sayede gelen radyasyon kuvvenlendirilmiş olur.

Lazerlerde uyarılmış salınım mekanizmasının sürekli olması için, üst seviye nüfusunun sürekli olarak alt seviye nüfusundan fazla olması gerekmektedir. Bu sebeple, lazer ortamına sürekli bir enerjinin verilerek taban durumunda bulunan elektronların üst enerji seviyesine uyarılması gerekmektedir. Lazer ortamına enerji aktarılması işlemine “*pompalama*” adı verilmektedir. Pompalama işlemi elektriksel

yayınlarlar ($N_3 \ll N_1$). Lazer seviyesinden, taban seviyesine olan bu geçiş, lazer olayını sağlayan geçiştir.

Lazer ışıması, lazer seviyesi ile taban seviyesi arasında gerçekleştiği için, üç seviyeli sistemlerde verim oldukça düşüktür. Bu türdeki sistemlerde, kuantum verimi (η_Q) Eş.2.21 ile verilir.

$$\eta_Q = \left(1 + \frac{\tau_{32}}{\tau_{31}} \right)^{-1} \leq 1 \quad (2.21)$$

Eş.2.18’de verilen ışımalı geçiş etkin kesiti, Einstein katsayısını verecek şekilde düzenlenirse:

$$B_{21} = \frac{\sigma(\nu)c}{h\nu g(\nu)} \quad (2.22)$$

elde edilir. Elde edilen bu ifade birim frekanstaki enerji yoğunluğu $\rho(\nu)$

$$\rho(\nu) = h\nu g(\nu)\phi \quad (2.23)$$

ve birim hacimdeki foton yoğunluğu ϕ değerlerini içerecek şekilde düzenlenirse,

$$B_{21}\rho(\nu) = c\rho\sigma(\nu) \quad (2.24)$$

elde edilir.

Lazer sisteminde, elektronların birinci ya da ikinci seviyede olduğunu varsayalım. Elektron nüfus yoğunluğundaki değişim, (n_1 nüfus yoğunluğundaki değişim)=(net uyarılmış salınım)+(optik pompalama) olarak düşünülebilir.

Bu varsayım matematiksel olarak ifade edilirse toplam nüfus yoğunluğu,

$$n_{tot} = n_1 + n_2 \quad (2.25)$$

ifadesi ile, her bir seviyedeki nüfus yoğunluğu değişimi

$$\frac{\partial n_2}{\partial t} = -\frac{\partial n_1}{\partial t} \quad (2.26)$$

ifadesi ile ve birinci seviyedeki nüfus yoğunluğu değişimi ise

$$\frac{\partial n_1}{\partial t} = \left[\left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) c \sigma \phi \right] + \left(\frac{n_2}{\tau_{21}} \right) - W_p n_1 \quad (2.27)$$

eşitlikleri ile verilir. Eşitliğin sağında yer alan net uyarılmış salınım ifadesindeki ilk kısım, terslenmiş nüfus yoğunluğudur (n):

$$n = \left(n_2 - \frac{g_2}{g_1} n_1 \right) \quad (2.28)$$

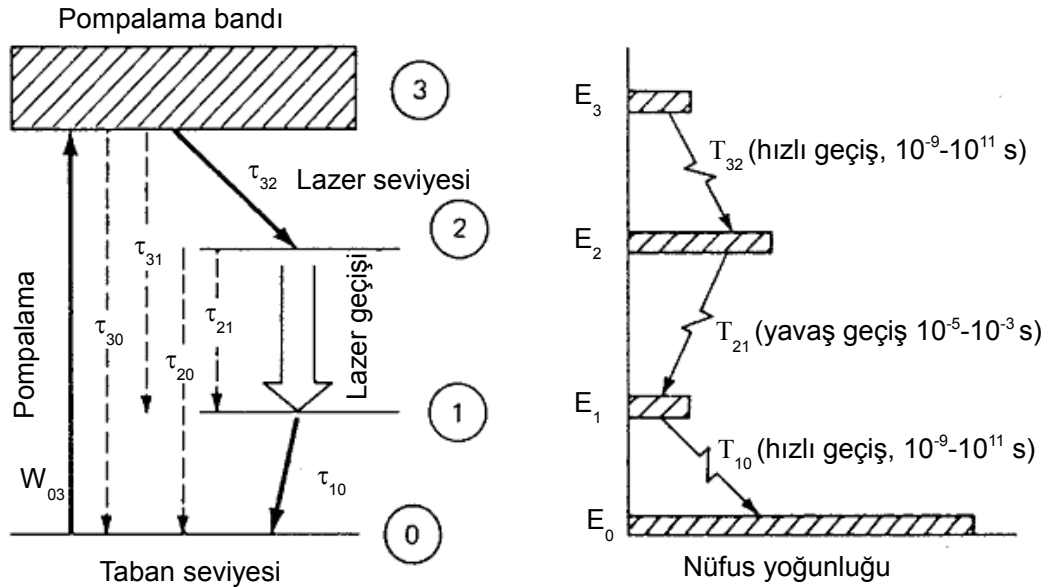
Birinci ve ikinci seviyelerdeki (n_1 ve n_2) nüfus yoğunluklarının ayrı ayrı bulunabilmesi için Eş.2.26, 27 ve 28 birleştirilmelidir. İşlemler yapıldıktan sonra n_1 ve n_2 nicelikleri için elde edilen ifadeler sırasıyla şu şekilde verilir:

$$n_1 = \frac{n_{tot} - n}{1 + \frac{g_2}{g_1}} \quad (2.29)$$

$$n_2 = \frac{n + \left(\frac{g_2}{g_1} \right) n_{tot}}{1 + \frac{g_2}{g_1}} \quad (2.30)$$

Dört seviyeli lazer sistemi

Şekil 2.4’de dört seviyeli lazer sistemi gösterilmiştir. Üç enerjili lazer sistemine benzer şekilde başlangıçta (pompalama olmadan önce) tüm elektronlar taban durumundadır (0 seviyesi). Pompalama işleminden sonra, taban durumundaki elektronlar (0 seviyesi), pompalama bandına (3 seviyesi) uyarılırlar. Uyarılmış durumda olan bu elektronların çoğu, ani bir ışımasız geçişle (foton yayınlamadan), lazer seviyesine (2 seviyesi) geçerler ($\tau_{32} \ll \tau_{21}$ ve $N_3 \ll N_2$).



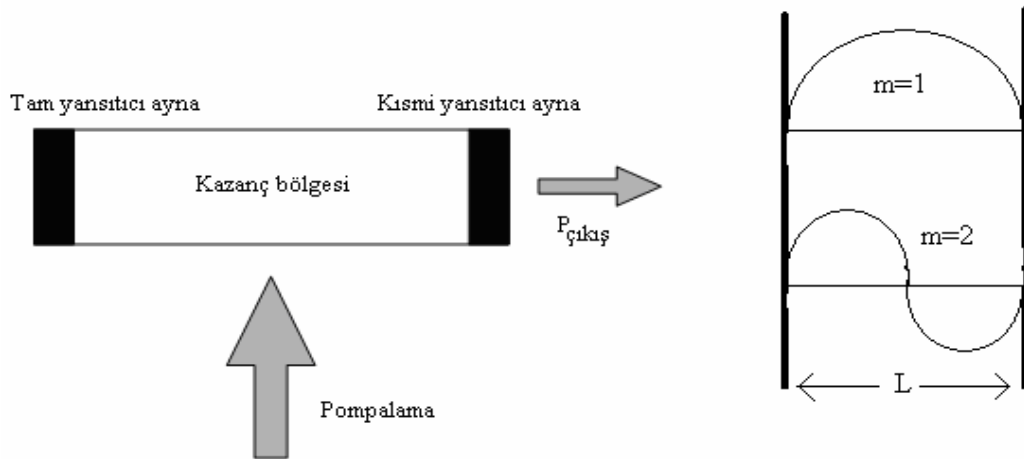
Şekil 2.4. Dört seviyeli lazer sistemi

Lazer seviyesi yarı kararlı bir seviyedir ve nüfus terslenmesi ikinci seviye ile birinci seviye arasında gerçekleşir. Lazer seviyesi yarı kararlı bir seviye olması nedeniyle, buradaki taşıyıcıların ömür süreleri diğer seviyelerdekilerden daha fazla olduğu için, bu seviye bir bakıma elektronlar için depo görevi görür. İkinci seviyeden birinci seviyeye geçiş ışımalı geçiştir ve lazer olayı bu geçiş sırasında meydana gelir. Foton yayınlamaya ikinci seviyeden birinci seviyeye geçen elektronların yaşam süreleri çok kısa olduğu için, birinci seviyeden ışımasız geçiş yaparak hemen taban durumuna dönerler.

2.1.3. Optik geri besleme

Lazerlerde nüfus terslenmesinin sağlanarak uyarılmış ışımının gerçekleşmesinden sonra, açığa çıkan ışımının (fotonların) demet halinde toplanması, yönlendirilmesi ve kuvvetlendirilmesi gerekmektedir. Bu sebepten dolayı, nüfus terslenmesinin sağlandığı lazer ortamındaki ışımının toplanması için optik rezonatörler (optik kaviteler) kullanılır. Optik rezonatörler sayesinde lazer ortamında geri besleme sağlanmış olur.

En basit optik rezonatör Fabry-Perot rezonatörüdür (Şekil 2.5). Fabry-Perot rezonatörü dışında, halka, küresel ve elipsoyidal geometrilerdeki rezonatörler de mevcuttur.



Şekil 2.5. Fabry-Perot rezonatörlerinde faz rezonans koşulu [41]

Şekil 2.6'dan rahatlıkla görüldüğü gibi kazanç bölgesi birbirine paralel iki ayna arasına yerleştirilmiştir. Kazanç bölgesinde oluşan fotonlar, birbirine paralel aynalar arasında ilerlerler. Eğer aynalar arası mesafe (L), Eş.2.31'de verildiği gibi elektromanyetik dalganın dalgaboyunun yarısının tam katları ise,

$$L = m \frac{\lambda}{2n} = m \frac{c}{2n\nu} \quad (2.31)$$

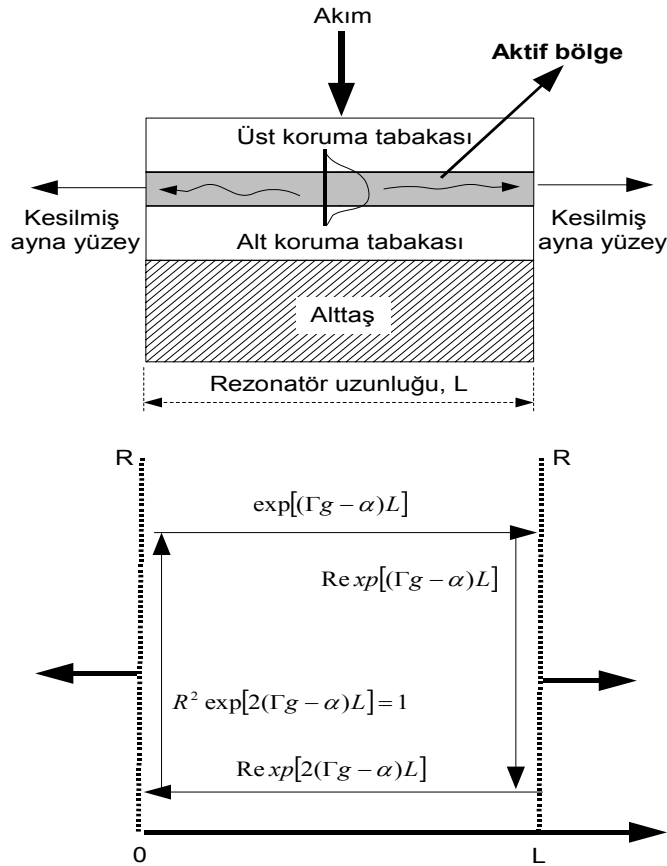
faz rezonans koşulu sağlanacak ve bu bölgede bulunan fotonlar güçlendirilecektir. Bu ifade, pozitif geri besleme koşuludur. Ancak, bu rezonans koşulunu sağlayan elektromanyetik dalga rezonansa girer.

Eş.2.31 düzenlenerek boyuna rezonans modlarının frekansı,

$$\nu = m \frac{c}{2nL} \quad (2.32)$$

olarak bulunur. Burada, c ışık hızı, n ise kazanç bölgesinin kırılma indisidir.

Fabry-Perot rezonatörleri, (001) yönelimli lazer diyotun (110) veya $(\bar{1}10)$ düzlemleri doğrultusunda kesilmesiyle elde edilir [42]. Bu kesilim sonucunda, $R=0,3\sim 0,4$ yansıtma oranına sahip, birbirine paralel aynalar elde edilir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Fabry-Perot rezonatörlerinde genlik rezonans koşulu [41]

Fabry-Perot rezonatöründe yer alan elektromanyetik dalganın hareketetine sol taraftan başladığını varsayalım. Bu dalganın, tam bir tur attıktan sonra, tekrar soldaki aynaya varması durumunda, genlik rezonans koşulu

$$R^2 \exp[2(\Gamma g - \alpha)L] = 1 \quad (2.33)$$

ile verilir. Burada, g yükseltme kazanç faktörünü, Γ aktif bölgedeki elektromanyetik dalganın koruma bölgelerine sızması sonucunda genlikteki kaybı, α soğurma ve saçılma mekanizmaları nedeniyle optik kaybı göstermektedir.

Bu eşitlik, her bir tam tur sonucunda kazancın kayıba eşit olduğunu ifade etmektedir. Şekil 2.6’de verilen DH lazerlerde net kazanç $(\Gamma g - \alpha)$ ile ifade edilir [43-47]. Eş 2.33 genlikte bir kayıp olmadığı, elektromanyetik dalganın tamamen hapsedildiği ($\Gamma=1$) varsayılarak düzenlenirse, kazanç (eşik kazancı):

$$g = \alpha + \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{1}{R^2}\right) \quad (2.34)$$

şeklinde elde edilir ve bu ifade ayna ve optik kayıpları gidermek için ne kadarlık bir kazancın gerekli olduğunu belirtir. Lazer kazanç bölgesinde, kayıpları gidermek için yeterli güç olmadığı durumlarda, kazanç uygulanan akımla lineer olarak artar [7].

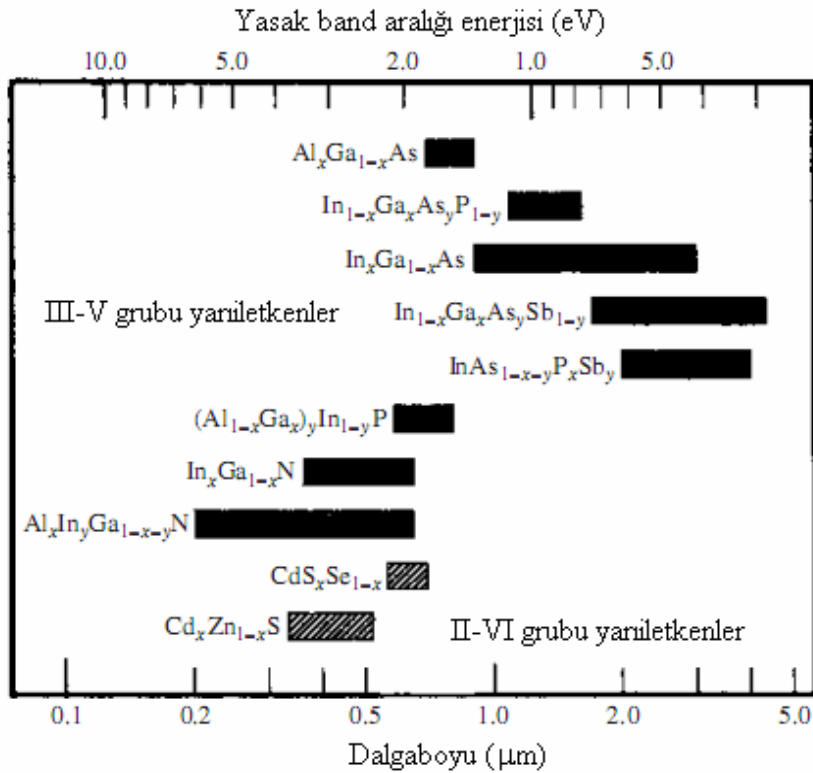
Tam bir tur sonucunda kazanç, kayıpları giderecek miktarda olduğu andaki akım değeri “*eşik akımı*” olarak adlandırılır. Bu akım değerinden itibaren, uyarılmış salınım kendiliğinden salınım ile tetiklenmiş olur ve lazer olayı başlar. Malzeme kazancı dalgaboyu bağımlı olduğu için, rezonans koşulu sadece en yüksek kazançla sahip olan dalgaboyu için sağlanır. Bu sebepten dolayı lazer tek dalgaboyludur, çünkü diğer boyuna rezonans dalga boyları kayıpları yenecek kazançla sahip değildir. Bu boyuna modlar, “*yan modlar*” olarak adlandırılır.

2.2. Yarıiletken Lazer Diyotlar

2.2.1. Lazer diyot malzemeleri

Yarıiletken lazer malzemelerinin seçiminde dikkat edilmesi gereken bir çok nokta vardır. Bunlar şu şekilde açıklanabilir:

1. *İstenilen ışıma dalgaboyuna uygun malzemenin seçilmesi:* Lazer diyot büyütülmesinde kullanılacak yarıiletken malzemelerin yasak bant aralığı enerjileri, ışıma dalgaboyunu belirlemektedir. Şekil 2.7’de yarıiletken lazer malzemeleri ve lazer ışıma dalgaboyları gösterilmektedir [44].



Şekil 2.7. Yarıiletken lazer malzemeleri ve lazer ışıma dalgaboyları

2. *Yarıiletkenin direk bant aralıklı olması:* Kullanılacak olan yarıiletkenin GaAs, InP gibi direkt yasak band aralıklı yarıiletken olmasıdır. Direkt yasak band aralıklı yarıiletkenlerde, banddan banda geçiş için gerekli olan enerji ve

momentum korunumu sağlandığı için, iletkenlik bandındaki elektronlar ile değerlik bandındakideşiklerin birleşme ihtimali, dolayısıyla geçişin ışımalı geçiş olma ihtimali yüksektir.

3. *İyi kalitede büyütölmüş malzemelerin kullanılması:* Tabakalı büyütme için kullanılacak alttaşın ve büyütölen aktif tabakanın örgü sabitleri (a) arasındaki (Δa) örgü uyumsuzluğu $\Delta a/a < 1\%$ olmalı. Aksi takdirde, kristalde meydana gelecek kusurlar ışıma karakteristiklerini kötüleştirecektir.

2.2.2. Lazer diyot üretimi

Yarıiletken lazer diyot üretimi, içerdığı kompleks yapılar (kuantum kuyusu, çoklu yapı) nedeniyle oldukça önemlidir. Lazer diyot tabakalarının büyütölməsi sırasında tabakaların alaşım kompozisyonunun, kalınlığının ve katkı miktarlarının büyük bir doğrulukla kontrolü mükemmel kalitede ve verimde lazer diyot üretimi için en önemli noktadır [44]. İlk lazer diyotların üretimi için sıvı faz tabakalı büyütme tekniğı kullanılmaktaydı. Uzun yıllar bu tekniğın kullanılmasıından sonra metal organik buhar faz tabakalı büyütme (MOVPE), metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve moleküler demet tabakalı (MBE) büyütme teknikleri geliştirilmiştir. Geliştirilen bu teknikler sayesinde, atomik boyutta tabaka kalınlıkları ve alaşım kompozisyon oranları kontrol edilebilmektedir.

2.2.3. Lazer diyotların geleceğı

Yarıiletken lazer diyotlar kullanım özelliklerine göre bir çok avantaja sahiptir. Bu avantajlar [44]:

1. *Lazer diyotların boyutu:* Lazerlerin büyük bir kısmı boyut olarak küçük ve oldukça hafiftir. Günümüzde, lazer diyot çip boyutları 1 mm^3 'den daha küçüktür.
2. *Enjeksiyon ile uyarma:* Lazerler bir kaç miliamper büyüklüğündeki akım enjeksiyonu ile çalışır. Bir kaç voltluk güç kaynağı dışında, çalışması için başka sistemler gerekmemektedir.

3. *Oda sıcaklığında çalışma:* Lazerlerin çoğu oda sıcaklığında ve oda sıcaklığı civarındaki sıcaklıklarda sürekli olarak osilasyon yapabilirler.
4. *Geniş dalgaboyu aralığı:* Lazer diyot malzemesinin uygun olarak seçilmesiyle lazer ışımasının dalgaboyu, kızılötesinden görünür bölgeye kadar değişmektedir.

2.3. Yarıiletken Tekli-yapılar

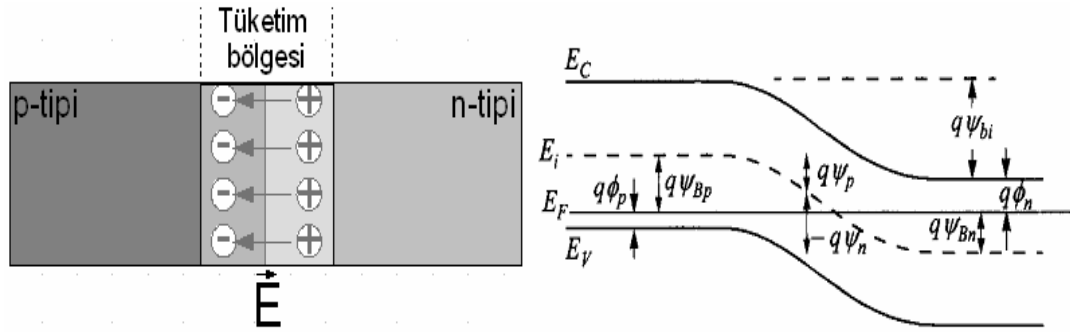
Lazer diyot çeşitleri içerisinde en basit yapıda olanı dejenere p-n ekleminden oluşan lazer diyotlardır. Bu tipteki lazerlerde, yüksek konsantrasyonlardaki elektron ve deşik enjeksiyonunun sağlanması için uygulanan ileri beslem gerilimi yüksektir. Lazerlere olan ihtiyaçlar arttıkça p-n eklem lazer diyotların yerini yüksek verimliliğe ve güce sahip olan çoklu-yapılı lazer diyotlar almıştır.

2.3.1. p-n eklemeler

p-n eklemeler, ana taşıyıcılarının elektronlar olduğu n-tipi ve ana taşıyıcılarının deşikler olduğu p-tipi yarıiletkenlerin birleştirilmesiyle (üst üste büyütülmeleriyle) oluşan yapılardır. p-n eklemeler difüzyon ile [48,49], iyon ekimi ile ve ince film büyütme teknikleri (CVD ya da MBE) ile oluşturulur.

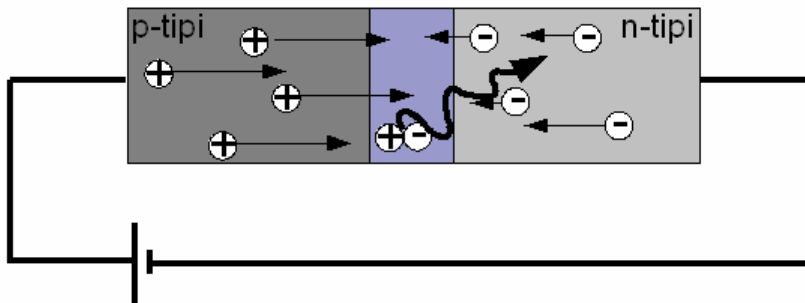
p ve n-tipi yarıiletkenler birleştirildiğinde, eklemdeki yüksek taşıyıcı konsantrasyon gradienti, taşıyıcı difüzyonuna neden olur. p- tarafında yer alan deşikler n- tarafına, n- tarafında yer alan elektronlarda p- tarafına nüfuz eder ve p- tarafına geçen elektronlar deşiklerle yeniden birleşir. Deşikler p- tarafından ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş alıcı iyonlar (N_A^-) dengelenmemiş olarak kalırlar. Deşikler hareketli iken, vericiler yarıiletken örgüde sabittirler. Benzer şekilde, elektronlar n- tarafından ayrıldıkça, eklem yakınındaki iyonize olmuş verici iyonlar (N_D^+) dengelenmemiş olarak kalır. Sonuç olarak, eklem p- tarafı yakınında negatif ve n- tarafı yakınında pozitif uzay yükü tabakası oluşur ve bir engel potansiyeli [48] meydana gelir. Bu uzay yükü bölgesi (tüketim bölgesi, hareketli taşıyıcı yoğunluğunun sıfır olduğu bölge, pozitif yükten negatif yüke doğru bir elektrik alan yaratır [49,50] ve bu

elektrik alan, her bir yük taşıyıcı tipi için difüzyon akımına zıt doğrultuda yönelmiştir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Eklem oluşumundan sonra yük taşıyıcılarının hareketi ve enerji-band diyagramı

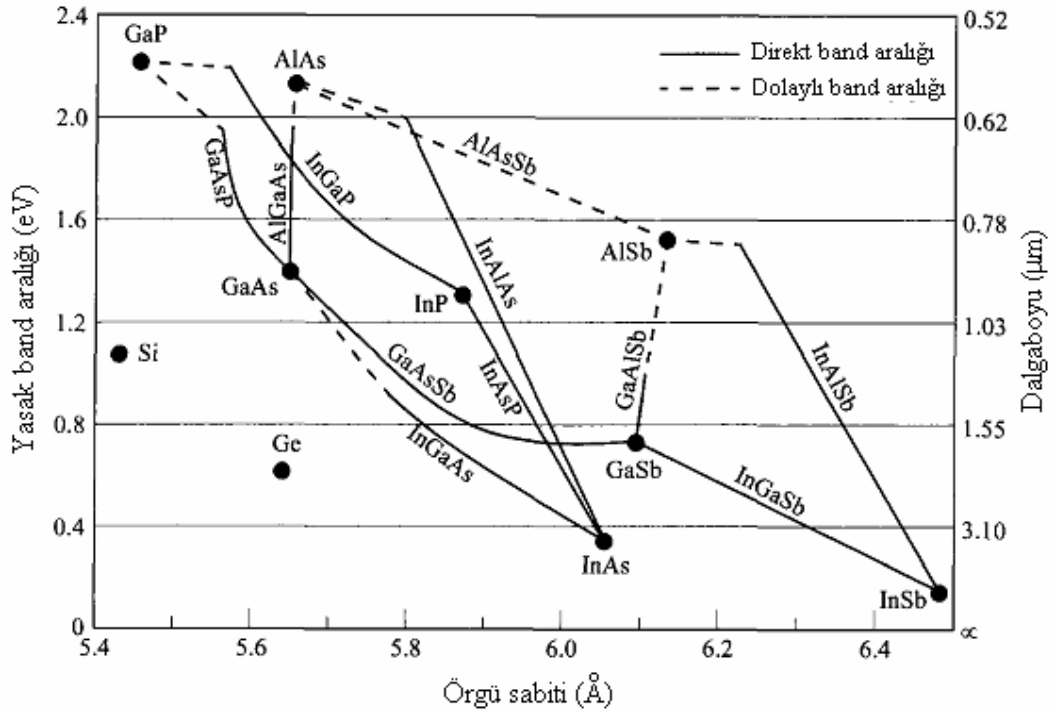
p-n eklemeye uygulanan gerilim, elektronların vedeşiklerin difüzyon akımı ile sürüklenme akımı arasındaki dengeyi bozar. Doğru beslemde (p- tarafına pozitif, n- tarafına negatif gerilimin uygulanması) uygulanan gerilim, tüketim bölgesi boyunca elektostatik potansiyeli azaltır. Sürüklenme akımı, difüzyon akımına göre azalır. p- tarafından, n- tarafına doğru artmışdeşik difüzyonu ve n- tarafından p- tarafına doru elektron difüzyonu vardır. Böylece azınlık taşıyıcı enjeksiyonu meydana gelir yani,deşikler n- tarafına doğru itelenirken, elektronlar p- tarafına doğru itelenir. Eklem yakınlarında karşılaşan elektronlar vedeşikler yeniden birleşirler (Şekil 2.9). Yeniden birleşme sonucunda, eklemenden foton salınır. Bu mekanizma kendiliğinden ışık yayan diyetotların (LED) ve lazerlerin temelini oluşturur.



Şekil 2.9. p-n eklemlerde yeniden birleşme mekanizması

2.4. Yarıiletken Çoklu-yapılar

Yarıiletken çoklu-yapılar, farklı tipteki iki yarıiletkenin üst üste büyütülmesi ile oluşmaktadır. Bu türdeki yapıların başarısı tabakalı büyütme tekniklerinin gelişimiyle orantılıdır. Çoklu-yapıların mükemmel kalitede tabakalı olarak büyütülmesi için en önemli nokta kullanılacak malzemelerin kristal yapılarının ve örgü uzunluklarının birbirlerine yakın olmasıdır. Şekil 2.10'da farklı yarıiletkenler için yasak band aralığı ve örgü sabiti verilmiştir.

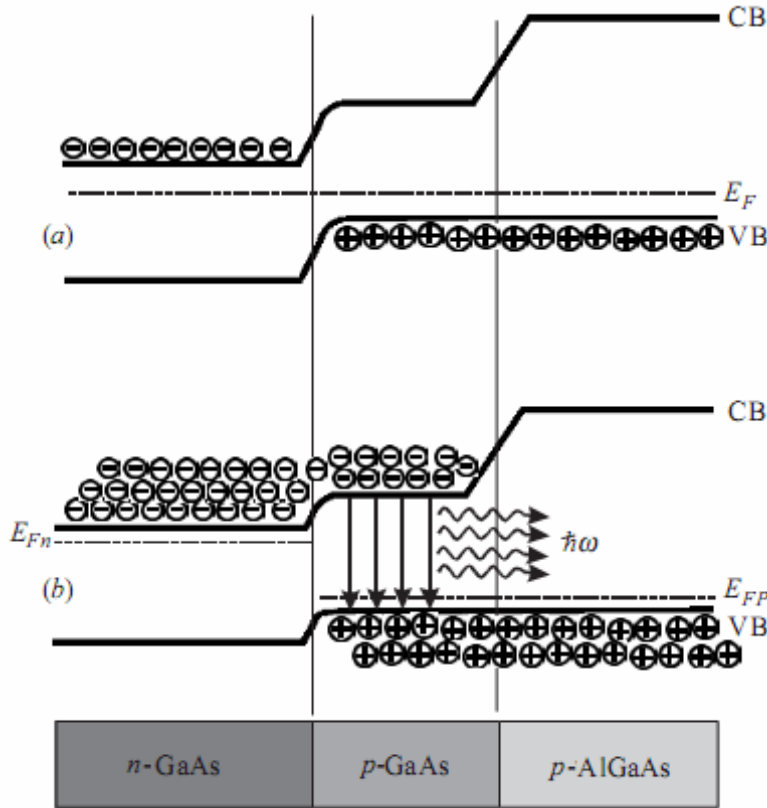


Şekil 2.10. Farklı yarıiletkenler için yasak band aralığı ve örgü sabiti

Örgü sabiti uyumuna ek olarak, tabakaların kalınlık ve alaşım kompozisyon kontrolünün büyük bir doğrulukla yapılması gerekmektedir. Bu sebeplerden dolayı, çoklu-yapıların büyütülmesi için MBE, metal organik moleküler demet tabakalı büyütme (MOMBE) ve MOCVD yöntemleri gibi gelişmiş büyütme teknikleri kullanılır.

2.4.1. Tekli çoklu-yapılar

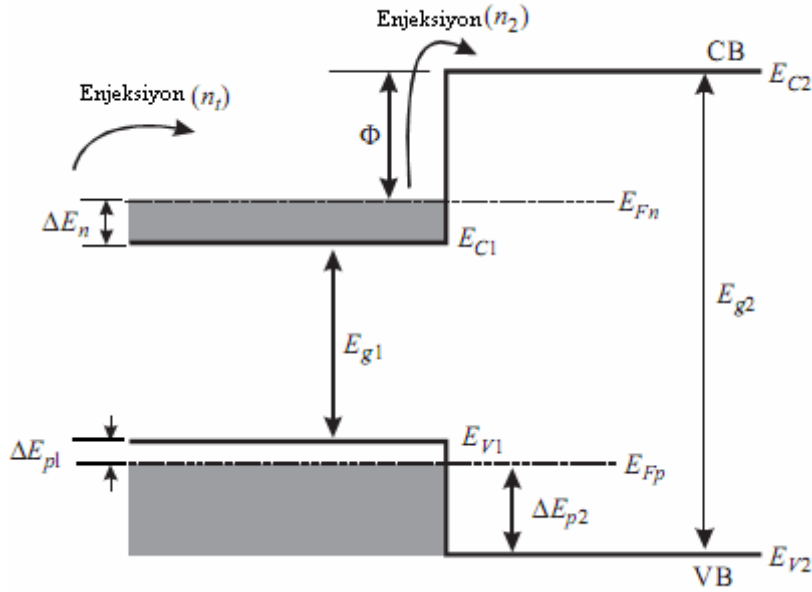
Son yıllarda lazer yapılarında tekli çoklu-yapılar (SHs) ve özellikle de çiftli çoklu-yapılar (DHs) sıklıkla kullanılmaktadır. Basit bir örnek olarak Şekil 2.11’de GaAs/AlGaAs tekli çoklu-yapısı gösterilmektedir [51].



Şekil 2.11. GaAs/AlGaAs tekli çoklu-yapısı için (a) termal denge durumunda ve (b) doğru beslem altında band diyagramı

Eşik akım yoğunluğunun (J_{th}) türetilmesi

Yarıiletkenlerde lazer olayının başladığı minimum akım yoğunluğu değeri “*eşik akım yoğunluğu, J_{th}* ” olarak adlandırılır. Eşik akım yoğunluğunun türetilmesi için, Şekil 2.11’de verilen tekli çoklu-yapı kullanılacaktır. Bu yapıya ait enerji-band diyagramı Şekil 2.12’de verilmiştir [51].



Şekil 2.12. GaAs/AlGaAs tekli çoklu-yapısı için enerji-band diyagramı

Şekil 2.12’de verilen GaAs/AlGaAs SH enerji-band diyagramına göre, etkin hapisleme engeli (Φ)

$$\Phi = \Delta E_g - \Delta E_n - \Delta E_{p1} - \Delta E_{p2} \quad (2.35)$$

ile verilir. Burada ΔE_g toplam band ofsetidir ve $\Delta E_g = E_{g2} - E_{g1}$ ile ifade edilir. Denge durumunda, eşik akım yoğunluğu

$$J_{th} = J_{inj} + J_{diff} = \frac{en_t d}{\tau} + \frac{eD_{e2}n_2}{L_{e2}} \quad (2.36)$$

ile verilir. Burada, n_t , d , D_{e2} , L_{e2} ve n_2 sırasıyla, p-GaAs tabakasına enjekte edilen taşıyıcıların yoğunluğu, aktif tabakanın kalınlığı, engel bölgesine (p-AlGaAs) elektron difüzyon katsayısı, engel bölgesine elektron difüzyon uzaklığı ve engele enjekte edilen azınlık taşıyıcı yoğunluğudur. n_t ve n_2 taşıyıcı yoğunlukları Fermi-Dirac dağılımı ile verilir.

$$n_t = \frac{4\pi}{h^3} (2m_{e1}^*)^{3/2} \int_{E_{c1}}^{\infty} \frac{\sqrt{E - E_{c1}}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{Fn}}{k_B T}\right)} dE \quad (2.37)$$

$$n_2 = \frac{4\pi}{h^3} (2m_{e2}^*)^{3/2} \int_{E_{c2}}^{\infty} \frac{\sqrt{E - E_{c2}}}{1 + \exp\left(\frac{E - E_{Fn}}{k_B T}\right)} dE$$

Burada E_{c1} , E_{c2} ve m_{e1}^* ve m_{e2}^* sırasıyla GaAs ve AlGaAs için iletkenlik bandı minimumları ve elektron etkin kütleleridir. $(E_{c2} - E_{Fn}) \gg k_B T$ durumunda, Fermi-Dirac dağılımı Boltzmann dağılımı ile verilir. Eş.2.37 ile verilen engele enjekte edilen azınlık taşıyıcı yoğunluğu (n_2) ifadesi düzenlenirse,

$$n_2 = N_{c2} \exp\left(-\frac{E_{c2} - E_{Fn}}{k_B T}\right) \quad (2.38)$$

elde edilir. Burada N_{c2} etkin durum yoğunluğudur.

Difüzyon akım yoğunluğu (kaçak akım yoğunluğu), Eş.2.39 ile verilir.

$$J_{diff} = \frac{eD_{e2}n_2}{L_{e2}} = \frac{eD_{e2}}{L_{e2}} N_{c2} \exp\left(-\frac{\Phi}{k_B T}\right) \quad (2.39)$$

Eş.2.35 ifadesi, Eş.2.39'da yerine koyulursa,

$$J_{diff} = \frac{eD_{e2}n_2}{L_{e2}} = \frac{eD_{e2}}{L_{e2}} N_{c2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g - \Delta E_n - \Delta E_{p1} - \Delta E_{p2}}{k_B T}\right) \quad (2.40)$$

elde edilir. Yüksek enjeksiyon oranı için $\Delta E_{p1} \approx 0$ olarak kabul edilirse, engel bölgesindeki çoğunluk taşıyıcıları Eş.2.41 ile verilir.

$$p_2 = N_{v2} \exp\left(-\frac{\Delta E_{p2}}{k_B T}\right) \quad (2.41)$$

Burada, N_{v2} p-AlGaAs engel tabakasının değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur. Eş. 2.40 ve 41 birleştirilirse, difüzyon yoğunluğu

$$J_{diff} \approx \frac{eD_{e2}N_{c2}}{L_{e2}} \frac{N_{v2}}{p_2} \exp\left(-\frac{\Delta E_g - \Delta E_n}{k_B T}\right) \quad (2.42)$$

ile verilir. Difüzyon akım yoğunluğu ihmal edilirse, Eş.2.36 ile verilen eşik akım yoğunluğu

$$J_{th} = \frac{en_t d}{\tau} \quad (2.43)$$

ile verilir [52].

Lazer çıkış gücü (P_{out}) ve iç kuantum verimi (η_i)

Lazer çıkış gücü, P_{out} , N_{ph} foton yoğunluğu ile ilişkilidir:

$$P_{out} = V\eta\omega_g\alpha_m N_{ph} \quad (2.44)$$

Burada V , ω_g ve α_m sırasıyla aktif bölgenin hacmi, ışık grup hızı ve yan yüzler nedeniyle meydana gelen optik kayıptır. Foton yoğunluğu, N_{ph}

$$N_{ph} = \eta_i \frac{J - J_{th}}{eD} \tau_{ph} \quad (2.45)$$

ile verilir. Burada, J ve η_i sırasıyla akım yoğunluğu ($J > J_{th}$) ve iç kuantum verimidir. τ_{ph} ise foton ömür süresidir ve Eş. 2.46 ile verilir.

$$\tau_{ph} = \frac{1}{\nu_g (\alpha_m + \alpha_i)} \quad (2.46)$$

Burada, α_i aktif bölgedeki optik kayıptır. Eş 2.44, 45 ve 46 birleştirilirse, çıkış gücü

$$P_{out} = \frac{\eta_w}{e} \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \alpha_i} \eta_i (I - I_{th}) \quad (2.47)$$

Diferansiyel kuantum verimi (η_d), uygulanan enjeksiyon akımına karşı ışıktaki artışı ifade etmektedir ve Eş.2.48 ile verilir [51].

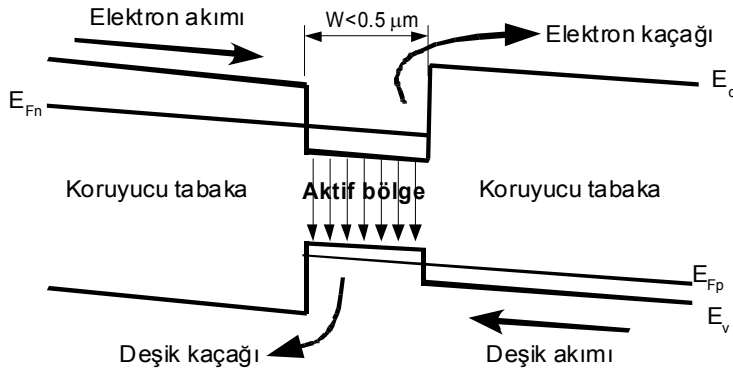
$$\eta_d = \frac{e}{\eta_w} \frac{P_{out}}{d(I - I_{th})} = \eta_i \frac{\alpha_m}{\alpha_i + \alpha_m} \quad (2.48)$$

2.4.2. Çiftli çoklu-yapılar

Çiftli çoklu-yapılar (DHs), sağladığı avantajlardan dolayı lazer olayı için gerekli olan akım miktarını azaltırlar ve lazerin performansını artırır [44]. Bu avantajlara ek olarak, DHs aktif bölgede elektron ve deşik kuantum kuyularının oluşturulması için de kullanılırlar. Çiftli çoklu-yapıların en önemli avantajları:

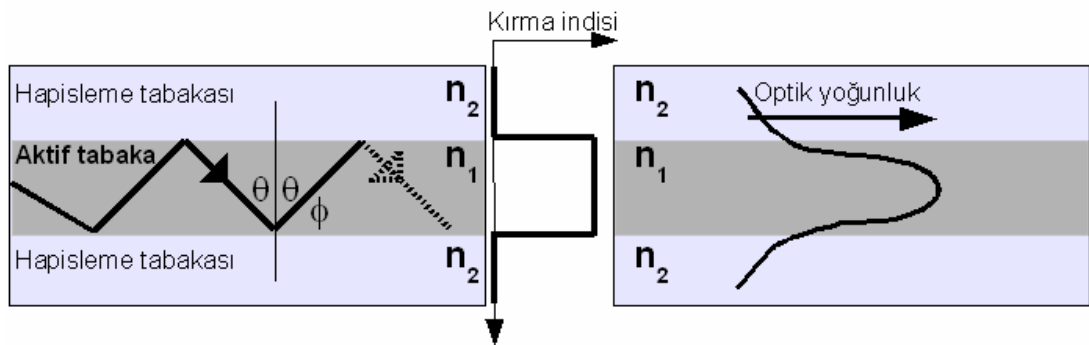
1. *Taşıyıcı hapislemesi:* Bant aralığı enerjilerindeki fark, elektron potansiyel engelini artmasına sebep olur. Böylece enjekte edilen taşıyıcılar eklemlerden sızmadan, aktif bölge içinde hapislenirler (Şekil 2.13) [47]. Bu sayede, çok küçük bir enjekte akımı ile ($\sim 1 \text{ kA/cm}^2$), lazerin çalışması için gerekli olan nüfus terslenmesi sağlanmış olur.
2. *Optik dalgakılavuzluğu:* Yüksek yasak bant aralığı enerjili koruyucu tabakalar hemen hemen optik dalga boyları için şeffaftır ve bu tabakaların kırılma indisi aktif tabakaninkinden daha küçüktür. Böylece, aktif tabakada oluşan ışıma, aktif tabaka-koruyucu tabaka arayüzeylerinden tam yansımaya uğrayarak, yüksek kırılma indisli aktif tabaka içinde hapislenir ve aktif tabaka düzlemi boyunca

yayılır. Aktif tabaka düzlemi boyunca ışımının yayılması “*kılavuzlu mod*” olarak adlandırılır. Şekil 2.14’de optik dalganın aktif tabakada hapislenmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Çiftli çoklu-yapıda taşıyıcı hapislenmesi

Şekil 2.13’de verildiği gibi deşikler sağ taraftan ve elektronlar ise sol taraftan akmaktadır. Bandlarda meydana gelen bükülme, uygulanan doğru beslemenden dolayıdır. Engel üzerinden olan elektron ve deşik kaçak akımları, oda sıcaklığında ihmal edilebilir. Yaklaşık $\sim 1 \text{ kA/cm}^2$ mertebesinde olan akım yoğunluğu 10^{18} cm^{-3} ‘den daha fazla elektron yoğunluğu sağlamaktadır [53].



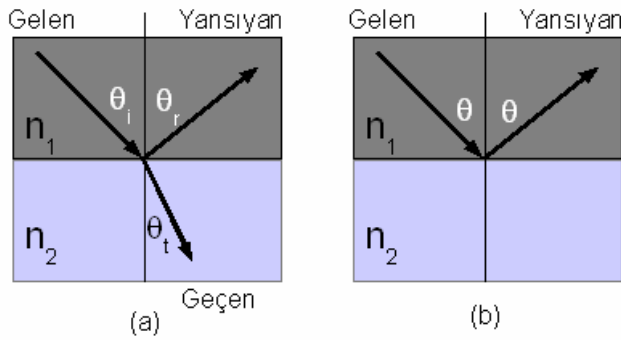
Şekil 2.14. Optik dalganın aktif tabakada hapislenmesi

Yarıiletkenin alaşım kompozisyonunun değiştirilerek yasak band aralığı enerjisi artarken, kırılma indisi azalır. Şekil 2.14’de verildiği gibi hapisleme tabakalarının kırılma indisi aktif tabakanın (kazanç tabakası) kırılma indisinden daha küçüktür.

Aktif tabaka, kırılma indisi farkından dolayı dalga kılavuzu gibi davrandığı için ışınım aktif bölgede hapislenir.

Snell Yasası

Işının aktif bölgede hapislenmesi için gerekli olan tam yansıma kuralları Snell yasası ile verilir [53]. Snell yasasına göre, elektromanyetik dalga bir ortamdan (n_1) diğer bir ortama geçerken (n_2), hızı her iki ortamda farklı olduğu için kırılmaya uğrar. Dalganın bir kısmı n_1 kırılma indisli ortamdan yansırken bir kısmı da n_2 kırılma indisli ortama geçer (Şekil 2.15(a)).



Şekil 2.15. Snell yasası (a) normal yansıma, (b) tam yansıma durumu

Snell yasasına göre yansıma ve kırılma,

$$\sin \theta_i = \sin \theta_r = \left(\frac{n_2}{n_1} \right) \sin \theta_t \quad (2.49)$$

ile verilir.

Eşitlikten de görüldüğü gibi, gelme ve yansıma açıları birbirine eşittir ve n_2 kırılma indisli ortama geçen dalganın kırılma açısı, gelme açısına ve birinci ve ikinci ortamların kırılma indislerine bağlıdır. İkinci ortamın kırılma indisinin, birinci ortamın kırılma indisinden daha büyük ($\theta_i = \theta_r = (n_2/n_1) < 1$) olduğu durumu ele alalım (Şekil 2.15(b)).

Eğer gelme açısı, θ_i ,

$$\theta_c = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1} \sin \theta_i\right) = \sin^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1} \sin(90^\circ)\right) \quad (2.50)$$

ile verilen kritik açıdan daha büyükse ($\theta_i > \theta_c$), Snell yasası düzenlenerek

$$\sin \theta > \sin \theta_c = \left(\frac{n_2}{n_1}\right) = 1 - \frac{\Delta n}{n_1} = 1 - \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.51)$$

elde edilir. Eş.2.51 ile verilen tam yansıma durumunda, birinci ortamda yer alan elektromanyetik dalga, birinci-ikinci ortam arayüzeyinden tam yansımaya uğrayarak, birinci ortama geri döner. Tam yansıma kuralı, Şekil 2.14’de verilen optik hapislemenin de temelini oluşturmaktadır. Şekilden görüldüğü gibi, aktif tabakada oluşan ışınım, tam yansımaya uğrayarak, yine aktif tabakada hapislenir ve aynı zamanda da yönlendirilir.

Hapisleme faktörü

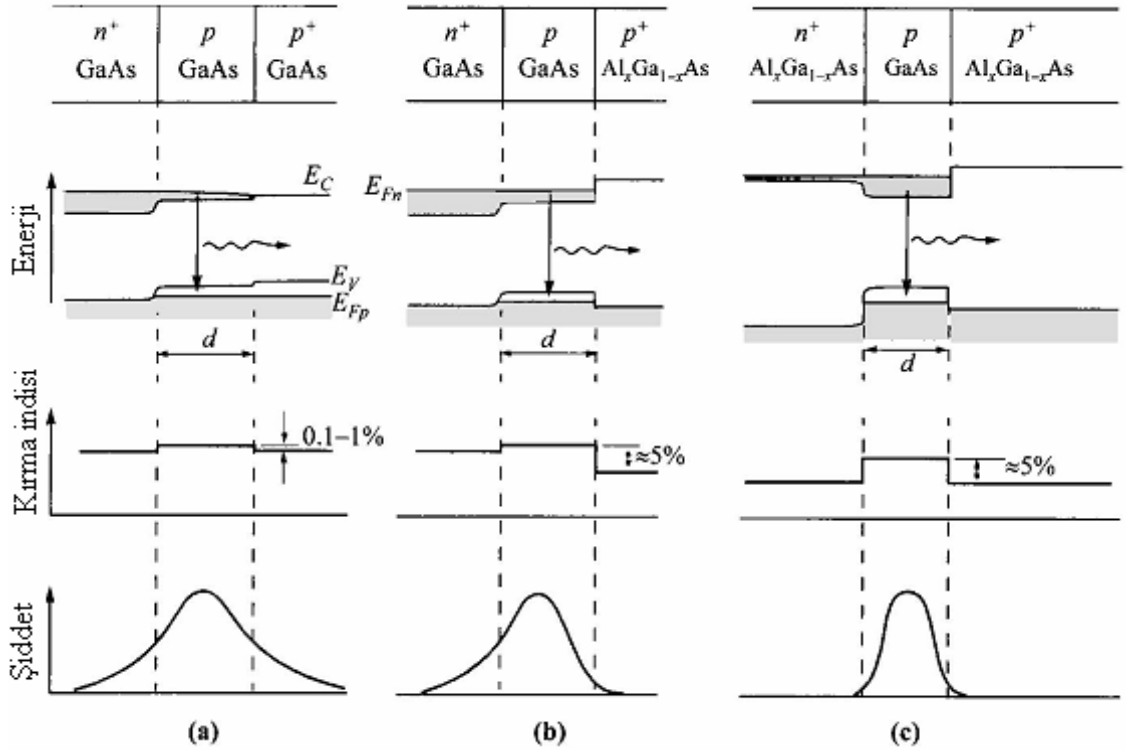
Hapisleme faktörü, hacim içerisinde hapislenen güç oranını simgeler ve aygıtın performansını belirtir. $\vec{r}$ noktasındaki optik güç yoğunluğunun, $P(\vec{r})$ ile verildiğini varsayalım. O halde, hapisleme faktörü:

$$\Gamma = \frac{\int_V P(\vec{r}) dV}{\int_{Tümuzay} P(\vec{r}) dV} \quad (2.52)$$

Bu eşitliğin anlamı, aktif bölgedeki mod gücünün toplam mod gücüne oranıdır [47]. Optoelektronikte karşılaşılan iki farklı hapisleme faktörü vardır. Birincisi dalgakılavuzu merkezinde (V_c) hapislenen optik gücün yüzdesini ölçer, diğeri ise aktif bölgede (V_a) örneğin kuantum kuyularında hapislenen optik gücün yüzdesini

ölçer. Aktif bölgede yeniden birleşme yapacak elektronlar ve deşikler yer alır. Lazerlerde, aktif bölge daha fazla ışık üretimi için optik modla etkileşmelidir. Elektiksel ya da optik pompalama ile aktif bölgeye elektron ve deşik aktarılır. Aktarılan bu taşıyıcılar aktif bölgede birleşerek foton yayımlanmasını sağlarlar. Merkez ile ardışık tabakalar arasındaki kırılma indisi farkı, aktif bölgeye optik modun hapislenme oranını belirler [52].

Şekil 2.16'da tekli-yapı, tekli çoklu-yapı ve çiftli çoklu-yapıların karşılaştırması verilmiştir [49].



Şekil 2.16. (a) tekli-yapı, (b) tekli çoklu-yapı ve (c) çiftli çoklu-yapıların enerji, kırılma indisi ve şiddet karşılaştırması

Şekilden de rahatlıkla görüldüğü gibi, tekli çoklu-yapıda, optik mod sadece eklem bölgesinde hapislenir. Çiftli çoklu-yapıda ise taşıyıcılar ve optik mod, d genişliğindeki aktif bölgede hapislenir [50]. Taşıyıcıların ve optik modun hapislenmesi uyarılmış ışımaya miktarını artırır ve eşik akım değerini azaltır.

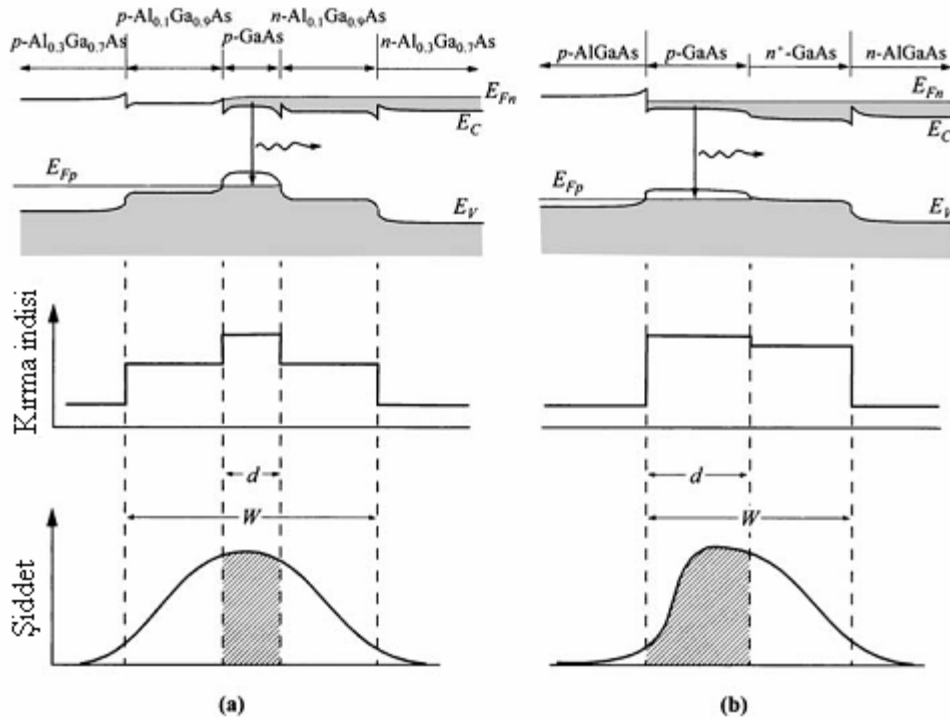
2.4.3. Çiftli çoklu-yapıların geliştirilmesi

Çiftli çoklu-yapılarda taşıyıcı ve optik hapislemeler, ekleme dik düzlemde gerçekleşir. Bu yüzden, bu türdeki hapislemeler “*dikey hapisleme*” olarak adlandırılır. Eşik akım yoğunluğunun azaltılması ve optik mod hapislemesinin artırılması için tekli kuantum kuyulu (SQW), çoklu kuantum kuyulu (MQW), ayrı hapislemeli (SCHs), eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli (GRINSCHs) ve geniş-optik-kaviteli (LOCHs) çoklu-yapılar (Şekil 2.17) geliştirilmiştir [49]. Kuantum kuyulu çoklu-yapılar Bölüm 2.6’da ayrıntılı şekilde anlatılacaktır.

Ayrı hapislemeli (SCHs) ve geniş-optik-kaviteli (LOCHs) çoklu-yapılar

Şekil 2.17’de ayrı hapislemeli ve geniş-optik-kaviteli çoklu-yapılar için enerji-band diyagramları verilmiştir. Şekil 2.17(a)’da verilen ayrı hapislemeli çoklu-yapı incelendiğinde GaAs ve AlGaAs yarıiletkenleri arasındaki yasak band aralığı enerjisi farkı yeterli olduğu için taşıyıcılar aktif bölgede hapislenmiştir (p-GaAs). Fakat, kırılma indisi farkı yeterli olmadığı için, aktif bölgede (yüksek kazançlı bölge) oluşan ışınım (optik mod) aktif bölgenin sağında ve solunda yer alan hapisleme tabakalarına sızmıştır. Yapıda yer alan $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ - $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ tabakaları arasındaki kırılma indisi farkı yeterli olduğu için, optik mod W genişliğinde hapislenmiştir.

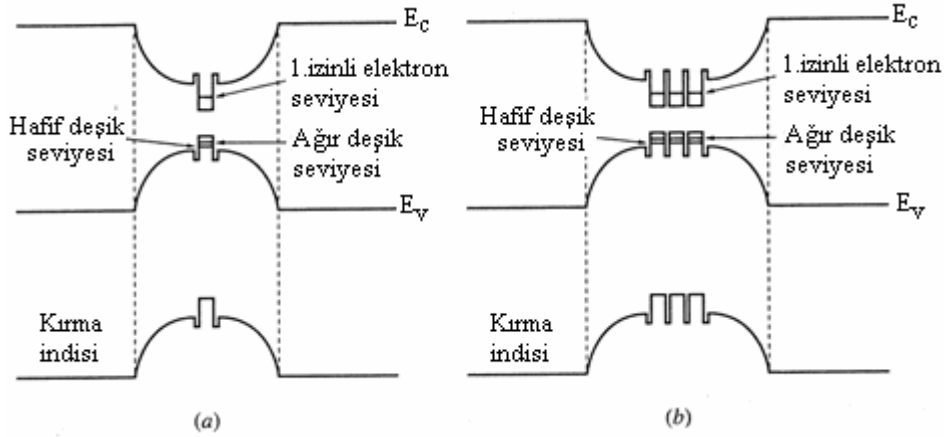
Geniş-optik-kaviteli çoklu-yapılarda p-n eklem çoklu-yapı arasına yerleştirilmiştir ve p-GaAs tabakası aktif bölgeyi oluşturmaktadır. p-GaAs/p-AlGaAs çoklu yapısı taşıyıcı ve optik hapislemeyi sağlarken, n-GaAs/n-AlGaAs çoklu-yapısı ise sadece optik hapislemeyi sağlar [49].



Şekil 2.17. (a) Ayrı hapisleme ve (b) geniş-optik-kaviteli çoklu-yapılar için enerji-band diyagramı

Eğimli kırılma indisli-ayrı hapisleme çoklu-yapılar (GRINSCHs)

Bu türdeki lazerlerin verimi ve performansı tekli yapılardan ve çoklu-yapılardan daha iyidir. Yapısı hemen hemen ayrı hapisleme çoklu-yapılara benzemesine karşın, aktif bölgenin üstünde ve altında yer alan hapisleme tabakalarının (koruyucu tabakaların) kırılma indisi, ayrı hapisleme çoklu-yapılardan farklı olarak tüm tabaka boyunca aynı değildir, dereceli olarak değişmektedir (Şekil 2.18). GRINSCH lazerlerde, aktif bölgenin oluşturulması için çok ince ($L < 20$ nm) çoklu-yapılar (kuantum kuyu) kullanılmaktadır.



Şekil 2.18. (a) Tekli ve (b) çoklu kuantum kuyulu eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapı için enerji-band diyagramları ve kırılma indisleri

Optik modun ve taşıyıcıların, eklem boyunca da yönlendirilmesi ve hapislenmesi gerekmektedir. Eklem düzlemi boyunca gerçekleşen taşıyıcı ve optik hapislemeler, “yatay hapisleme” olarak adlandırılır. Lazerlerde yüksek eşik akımına, kararlı olmayan modların ve lineer olmayan akım-gerilim karakteristiklerinin oluşmasına neden olan, akımın malzeme içinde yayılması ve optik hapislemenin zayıf olması gibi problemleri önlemek için dalga kılavuzu tasarımının büyük önemi vardır. Dalgakılavuzu, yapısı itibariyle yatay düzlemde malzemenin kırılma indisinin azalmasıyla elde edilir. En çok kullanılan dalga kılavuzlu lazer diyotlar, örtülü çoklu-yapılı (BH) ve çatı dalga kılavuzlu çoklu-yapılı (RWGH) lazer diyotlardır [53].

Çatı dalga kılavuzlu çoklu-yapılar

Çiftli çoklu-yapılarda, hapisleme ekleme dik düzlemde gerçekleşen dikey hapislemedir. Aktif bölgenin hacmini azaltmak (eşik akım değerini azaltmak) için yatay taşıyıcı hapislemesine de ihtiyaç vardır. En basit yaklaşım, lazer kavitesi boyunca akım enjeksiyonunu dar bir kanalda sınırlandırmaktır. Bu yaklaşımla ilgili bazı problemler vardır:

1. *Taşıyıcı hapislemesi:* Halen çok iyi tanımlanmış bir taşıyıcı hapisleme mekanizması yoktur. Hapisleme tabakasında meydana gelen akım yayılması ve aktif tabakadaki taşıyıcı difüzyonu nedeniyle taşıyıcılar enjekte edildikleri

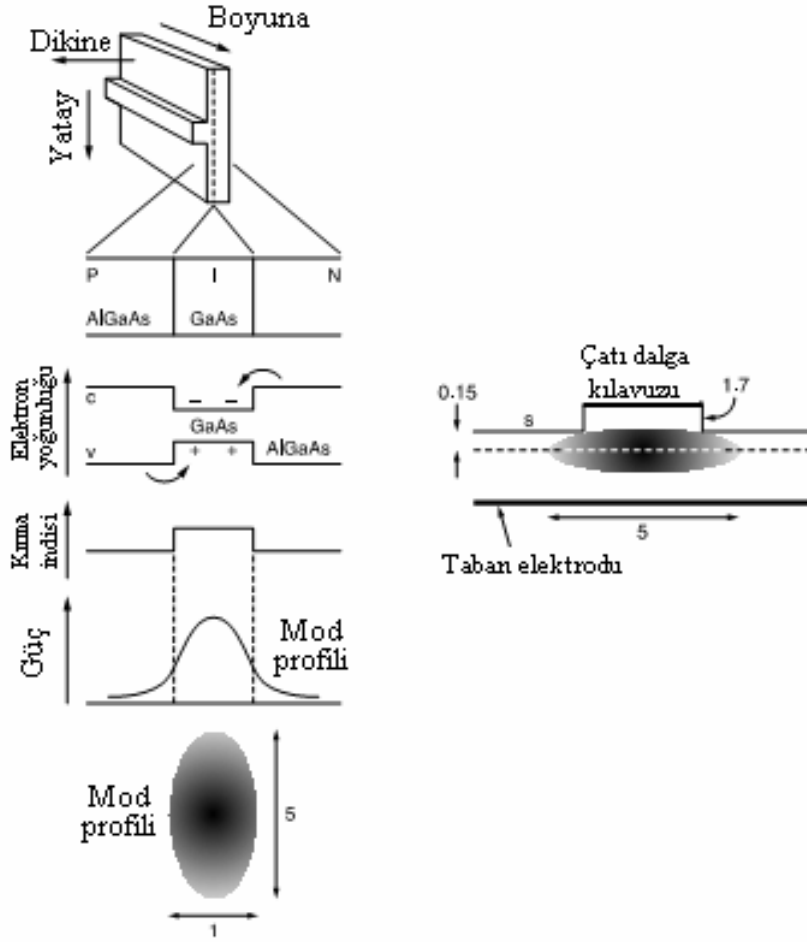
kanaldan (kılavuzdan) daha geniş bir alana yayılarak aktif bölgenin hacminin artmasına neden olurlar

2. *Optik dalgakılavuzluğu*: Halen çok iyi tanımlanmış bir yatay optik dalga kılavuzu yoktur.

Bu problemler çatı dalga kılavuzu kullanılarak kısmi şekilde çözümlenmektedir. Akım, dar kanala enjekte edilir ve kanal dışındaki hapisleme tabakasının kalınlığı azaldığı için akım yayılmasında azalmaktadır. Ek olarak, çatının olması zayıf yatay optik dalga kılavuzu yaratır, böylece optik hapisleme özellikleri artar [54].

Şekil 2.19’da çatı dalga kılavuzu verilmiştir. Dalga kılavuzu enine ve boyuna dalga kılavuzlama mekanizması göstermektedir. Enine doğrultu göz önünde bulundurulursa, dalga kılavuzunun kırılma indisi, çevresinin kırılma indisinden daha büyüktür. Çatı dalga kılavuzu optik modu yatay doğrultuda hapisler. Genellikle çatının, dolayısıyla da demetin genişliği 5 μm ve çatının alt noktası ile aktif bölge arasındaki mesafe 100-150 nm’dir.

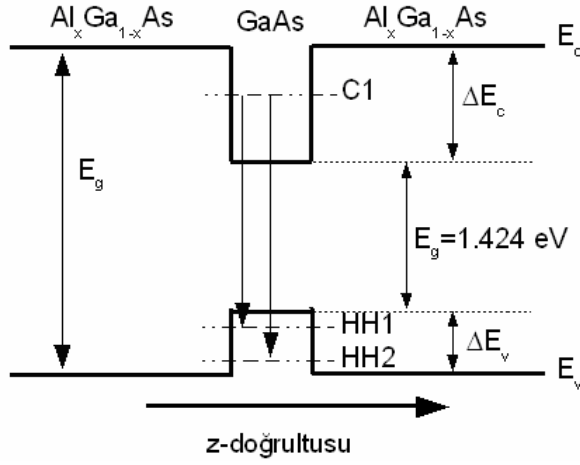
Çatı dalgakılavuzu boyunca ilerleyen optik mod AlGaAs-hava arayüzeyinden dışarı sızar. AlGaAs tabakasının efektif kırılma indisi hesaplanırken, hesaplamalara havanın kırılma indiside katıldığı için, AlGaAs tabakasının hesaplanan efektif kırılma indisi AlGaAs tabakasının kırılma indisinden daha küçüktür. Yatay kırılma indisi farkının azalmasından dolayı, yatay hapisleme zayıf olur ve bu nedenle modun dışarı sızan kısmı mikron uzunluklara varabilir. Daha iyi yatay hapislemenin sağlanması için gömülü çoklu yapılar (BHs) kullanılmaktadır. Bu tür yapılarda yüksek kırılma indisli aktif tabaka, kırılma indisi daha düşük olan tabakalar arasında yer alır. Aktif tabakanın, dört tarafının düşük kırılma indisli malzeme ile optik mod merkezde yoğunlaşır ve dört tarafında düşük kırılma indisine sahip malzeme yer alır çevrilmesi nedeniyle optik mod merkezde hapislenir [41].



Şekil 2.19. Çatı dalga kılavuzlu çoklu-yapı

2.5. Yarıiletken Kuantum Kuyular

Çoklu-yapıların kalınlığı, elektronların de Broglie dalgaboyu mertebesinde olduğunda ($d < 20$ nm) kuantum etkileri ortaya çıkar ve artık enerji seviyeleri sürekli olmak yerine kesiklidir. Bu türdeki çoklu-yapılar “*kuantum kuyuları*” olarak adlandırılır [53]. Kuantum kuyularının oluşması için çift çoklu-yapı veya üç yarıiletken tabaka gerekmektedir [49]. Kuantum kuyuları, yasak band aralığı enerjisi ve tabaka kalınlığı daha fazla olan iki yarıiletken tabakanın arasına yasak band aralığı enerjisi ve tabaka kalınlığı daha küçük olan bir yarıiletken tabakanın yerleştirilmesiyle elde edilir (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. GaAs/AlGaAs tekli kuantum kuyusu için enerji-band diyagramı

Kuantum kuyularının özelliklerinin daha iyi anlaşılabilmesi ve düşük-boyutlu sistemlerin tanımlanabilmesi için yük taşıyıcılarının serbestlik derecesinden ve hapislenme doğrultularından bahsedilmesi gerekmektedir. Örneğin, hacimsel yarıiletkenlerde, yük taşıyıcılar üç-boyutta hareket etmektedirler ve herhangi bir hapislenme durumu söz konusu değildir. Bu yüzden, hacimsel yarıiletkenler “*üç-boyutlu sistemler*” olarak adlandırılır. Kuantum kuyularında ise, yük taşıyıcılar iki-boyutta hareket ederler ve hapislenme tek-boyuttadır (hapislenme doğrultusu, büyüme doğrultusudur). Kuantum kuyuları, bu özelliklerinden dolayı, “*iki-boyutlu sistemler*” olarak adlandırılır. Kuantum teller ise tek-boyutlu sistemlerdir. Çünkü, yük taşıyıcılar tek-boyutta hareket ederler ve iki-boyutta hapislenmişlerdir [45,51].

Kuyu içerisindeki izinli alt-bandların bulunması

Kuantum kuyuları içerisinde yer alan izinli alt-bandların bulunabilmesi için, parçacığın L genişliğindeki sonsuz kuyuda bulunduğunu düşünelim. Kuyu içerisinde yer alan parçacığın kuyuda bulunabileceği izinli enerji seviyelerinin bulunabilmesi için Eş.2.53 ile verilen zamandan bağımsız Schrödinger denklemi çözülmelidir.

$$H\Psi_n = E_n \Psi_n \quad (2.53)$$

Burada H kinetik (T) ve potansiyel (V) enerjinin toplamını veren operatördür. Kuyu içerisinde potansiyel enerji, $V=0$ 'dır. Kinetik enerji, T ise Eş.2.54 ile verilir.

$$T = \frac{p^2}{2m^*} \quad (2.54)$$

Burada m^* elektronun etkin kütesidir. P momentum işlemcisidir ve iki-boyutta hareket eden parçacık için,

$$p = -i\hbar\nabla \quad (2.55)$$

ile verilir. Eş.2.53 düzenlenip yeniden yazılırsa,

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi_n(z)}{\partial z^2} = E_n \Psi_n \quad (2.56)$$

elde edilir. Eş.2.56 düzenlendiğinde,

$$k \cong \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (2.57)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi_n(z)}{\partial z^2} = -k^2 \Psi_n$$

elde edilir. Bu eşitlik için,

$$\Psi_n(z) = A_n \sin k_n z + B_n \cos k_n z \quad (2.58)$$

çözümü önerilir. Engel yükseklikleri sonsuz olarak kabul edildiğinde, Eş.2.58 denklemi için sınır şartları,

$$\Psi_n(0) = \Psi_n(L) = 0 \quad (2.59)$$

ile verilir. Bu şartları kullanarak Eş.2.58 çözüldüğünde,

$$\Psi_n(z) = A_n \sin k_n z$$

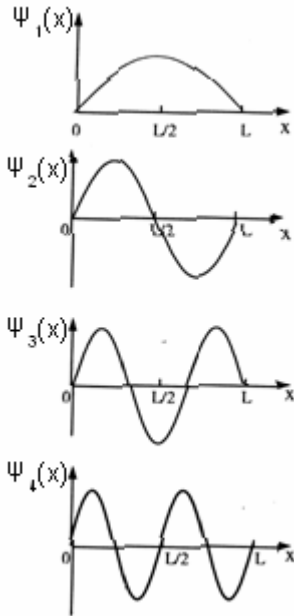
$$kL = 0, \pm\pi, \pm2\pi, \dots$$

$$k_n = \frac{n\pi}{L} \quad (2.60)$$

$$A_n = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

$$\Psi_n(z) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L} z\right)$$

elde edilir [51]. Eş.2.60 için bulunan dalga fonksiyonları Şekil 2.21’de verilmiştir.



Şekil 2.21. Kuantum kuyusu için izinli enerji seviyeleri ve dalga fonksiyonları [55]

Bulunan dalga fonksiyonları Eş.2.57 ifadesinde yerine koyulursa,

$$E_n = \frac{\eta^2}{2m^*} k_z^2 = \frac{\eta^2}{2m^*} \left(\frac{n\pi}{L} \right)^2 \quad (2.61)$$

elde edilir. Burada n, kuantum sayısı, k_z ise z-doğrultusundaki dalga vektörüdür. Schrödinger denklemi x ve y-doğrultularında serbestçe hareket eden parçacık için benzer şekilde çözülürse,

$$E_n = \frac{\eta^2}{2m^*} (k_x^2 + k_y^2) = \frac{\pi^2 \eta^2}{2m^*} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} \right) \quad (2.62)$$

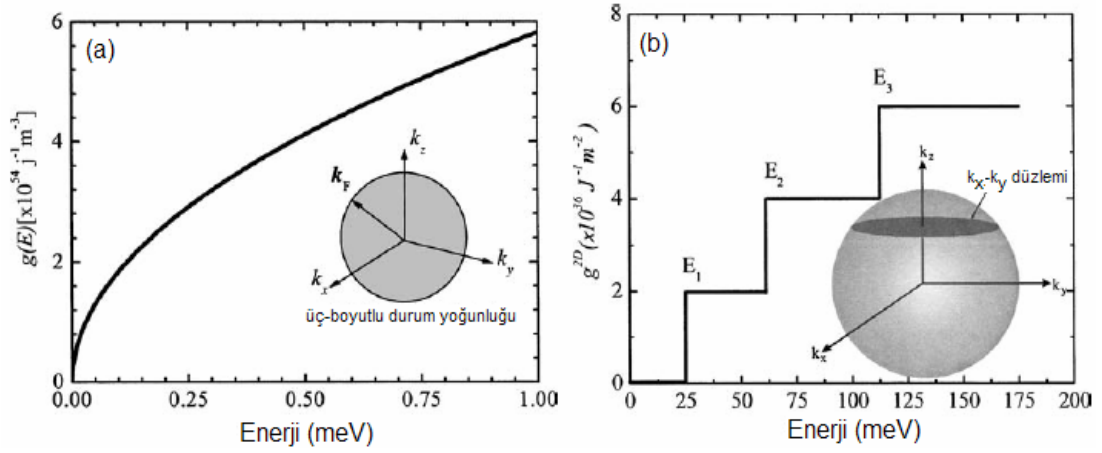
elde edilir. Eğer seçilen kuyuda, $L_x=L_y=L$ alınırsa, iki-boyutta hareket eden parçacığın toplam enerjisi,

$$E_n = \frac{\pi^2 \eta^2}{2m^* L^2} (n_x^2 + n_y^2) = \frac{\pi^2}{2m^*} k_{xy}^2 \quad (2.63)$$

ile verilir. Sistemde yer alan parçacıklar arasındaki, enerji ve momentum dağılımını anlayabilmek için, ilgilenilen sistemde bu parçacıkların yer alabileceği kaç tane uygun durumun olduğu (durum yoğunluğu) bilinmelidir [51].

Durum yoğunluğunun bulunması

Kuantum kuyularında, elektronlar ve deşikler k_x - k_y düzlemine hapislenmişlerdir ve hareketleri ise büyütmeye doğrultusunda, (reel uzayda z-düzleminde, momentum uzayında k_z düzleminde) sınırlandırılmıştır. Kuantum kuyularındaki durum yoğunluğu da k_x - k_y düzleminde sınırlandırılmıştır.



Şekil 2.22. (a) Üç-boyutlu ve (c) iki-boyutlu durum yoğunluğu [51]

Şekilden görüldüğü gibi hacimsel yarıiletkenlerde durum yoğunluğu süreklilik göstermekte ve üstel olarak artmaktadır. Kuantum kuyusunda yer alan izinli enerji seviyelerine (E_1, E_2, E_3) ait durum yoğunlukları, iki boyutta sabit olmasına karşın, kuantum kuyusu için basamak fonksiyonu şeklindedir.

Birim kesit alanı başına toplam durumların sayısı (N^{2D}) şu şekilde verilir:

$$N^{2D} = 2\pi k^2 \frac{1}{(2\pi/L^2)} \frac{1}{L^2} = 2 \frac{\pi k^2}{(2\pi)^2} \quad (2.64)$$

Burada 2 katsayısı, yukarı ve aşağı yönde spin yönelimini, L^2 reel uzaydaki alanı, $(2\pi/L^2)$ ise k -uzayındaki birim hücrenin alanını ifade eder.

Durum yoğunluğu,

$$g^{2D}(E) = \frac{\partial N^{2D}}{\partial E} = \frac{\partial N^{2D}}{\partial k} \frac{\partial k}{\partial E} \quad (2.65)$$

ile verilir. Eş.2.64 ile verilen birim kesit alanı başına toplam durumların sayısı Eş.2.65’de yerine yazılırsa, durum yoğunluğu:

$$g^{2D}(E) = \frac{k}{2\pi} \left(\frac{2m^*}{\hbar^2} \right)^{1/2} E^{-1/2} = \frac{m^*}{\pi \hbar^2} = \text{sabit} \quad (2.66)$$

Şekil 2.22'den ve Eş.2.66'dan görüldüğü gibi, durum yoğunluğu iki-boyutta sabittir.

Kuantum kuyulu lazer diyotların çalışma prensibi, aktif bölgeyi oluşturan kuantum kuyularında yer alan alt bandlar arası elektron ve deşik geçişleri sırasında meydana gelen elektron-deşik yeniden birleşmesi sonucunda foton salınmasına dayanmaktadır. Kuantum kuyulu lazerlerin bir çok avantajı vardır:

1. *Düşük eşik akımı:* Kuantum kuyularının kullanımıyla aktif bölgenin hacmi azalmaktadır. Böylece nüfus terslenmesi için gerekli olan akım enjeksiyonu ve buna bağlı olarak da eşik akımı azalmaktadır.
2. *Yüksek kuantum verimi:* Kuyularda iki-boyutta taşıyıcı hapislenmesi olduğu için, aktif bölgeden taşıyıcı kaçışı minimumdur.
3. *Yüksek çıkış gücü:* Kuyularda iki-boyutta taşıyıcı hapislenmesi olduğu için, elektron-deşik yeniden birleşme ihtimali artmaktadır.
4. *Sıcaklık bağımlılığı:* Sıcaklığın artmasıyla taşıyıcıların termal enerjisi artar. Fakat, kuyularda yer alan taşıyıcılar iki-boyutta hapislendikleri için, kuyu bölgesinden engel tabakalarına sızma ve engellerin üzerinden kuyudan dışarı doğru akma olasılığı çok azdır.
5. *Dalgaboyu ayarlaması:* Bölüm 2.5'de ayrıntılı şekilde verildiği gibi, kuyu genişliğinin değişmesiyle kuyu içerisinde yer alan izinli alt-bandlarında enerji değerleri değişmektedir.

3. KULLANILAN YÖNTEMLER VE DENEYSEL SİSTEMLER

Bu tez çalışmasında incelenen 1,3 ve 1,55 μm ışıma dalgaboylu InP tabanlı $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$ çoklu kuantum kuyulu (MQW) eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli hetero-yapılar (GRINSCHs) metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) sistemi ile büyütüldü. MOCVD yöntemi ile büyütülen farklı dalgaboylarındaki bu numunelerin çatı dalga kılavuzlu (RWG) Fabry-Perot (FP) lazer diyot (LD) ve Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numune fabrikasyonları fotolitografi yöntemi kullanılarak gerçekleştirildi. Fabrikasyonu tamamlanan lazer diyotların parametre analizleri (L-I-P) yapılarak, lazer diyotlar için büyük öneme sahip olan eşik akımı ve çıkış gücü değerleri gibi lazer parametreleri elde edildi. Fabrikasyonu tamamlanan Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin ise akım-gerilim ölçümleri yapılarak, omik kontak parametreleri elde edildi.

3.1. Fotolitografi

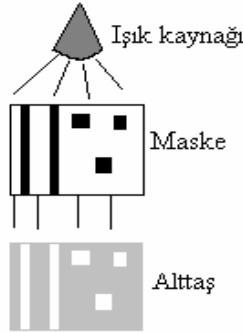
Litografi ismi Yunanca olan *Lithos* (Taş) ve *Grapho* (yazmak) kelimelerinin birleşiminden oluşmaktadır ve tamamıyla pürüzsüz bir yüzeye bir taş ya da plaka yardımıyla desenin basılması işlemidir. Litografi işleminde desenin yüzeye aktarılması işlemine “*pozlama*” denmekte ve bu işlem için bir radyasyon kaynağı kullanılmaktadır [56,57]. Litografi çeşitleri pozlama sisteminde (maske hizalama, mask aligner) kullanılan radyasyon kaynağına göre değişmektedir. Çizelge 3.1’de litografi çeşitleri ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 3.1. Litografi çeşitleri

Pozlama Metodu	Radyasyon kaynağı	Litografi Çeşiti
Işık	$\lambda=157\text{-}436\text{ nm}$	Fotolitografi
X-ışınları	$\lambda=0.4\text{-}5\text{ nm}$	X-ışını Litografi
Elektronlar	$E=10\text{-}100\text{ keV}$	Elektron demet litografi
İyonlar	$E=50\text{-}200\text{ keV}$	İyon demet litografi

Fotolitografi (optik litografi), alttaş yüzeyine ultra küçük boyuttaki desenlerin basılması işlemidir ve fotomaskedeki (maske) geometrik desenin, alttaş yüzeyindeki

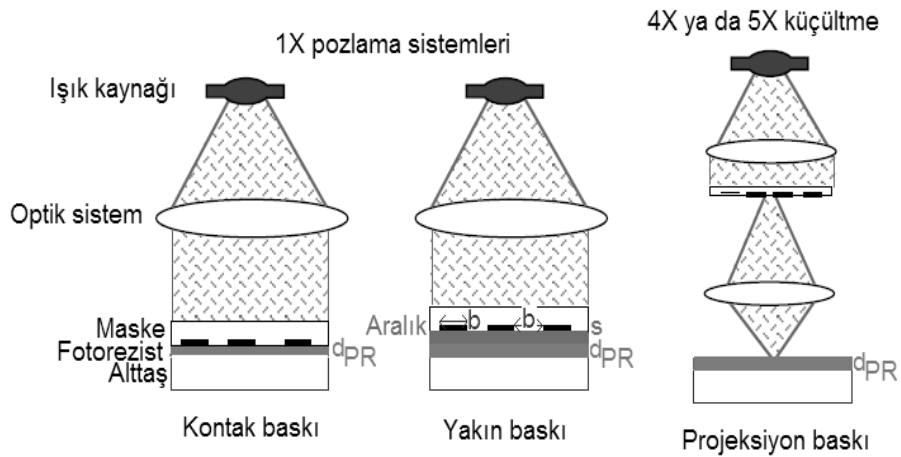
ışığa duyarlı polimerik tabaka (fotorezist) üzerine aktarılması için morötesi (UV) ışık kullanılmaktadır [56,57]. Şekil 3.1’de fotolitografi işlemi verilmiştir.



Şekil 3.1. Fotolitografi işlemi

Fotolitografi işlemlerinde kullanılan pozlama sistemleri maske-alttaş (fotorezist) mesafesine göre üç grupta incelenebilir:

Eğer maske ile attaş arasında herhangi bir açıklık (s) yoksa (maske alttaşa direk temas ediyorsa) bu tipteki pozlama sistemleri “*kontak baskı*” olarak adlandırılır. Maske ile alttaş arasında belirli bir açıklık ($3\ \mu\text{m} < s < 50\ \mu\text{m}$) varsa, bu tipteki pozlama sistemleri maskedeki desenin birebir ($\times 1$) ya da belirli oranda küçültülerek ($\times 4$ ya da $\times 5$) alttaş yüzeyine aktarılmasına göre sırasıyla “*yakın baskı*” ve “*projeksiyon baskı*” olarak adlandırılır [56,57]. Şekil 3.2.’de pozlama sistemleri verilmiştir.



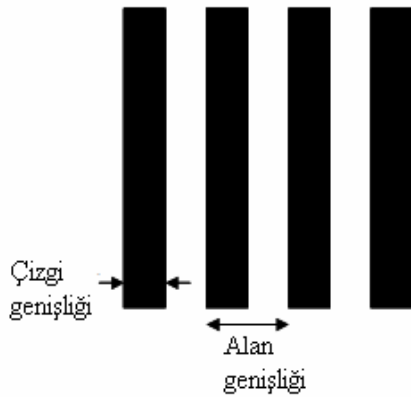
Şekil 3.2. Pozlama sistemleri

Kontak ve yakın baskı sistemleri kullanılarak elde edilen desen için çözünürlük (minimum desen boyutu)

$$b_{\min} = \frac{3}{2} \sqrt{\lambda \left(s + \frac{d_{PR}}{2} \right)} \quad (3.1)$$

ile verilir. Burada $b_{\min}$, λ , s ve d_{PR} sırasıyla minimum desen boyutu, pozlama sisteminin dalgaboyu, maske-alttaş mesafesi ve fotorezist tabakasının kalınlığıdır. Kontak pozlama sisteminde $s=0$ ve yakın pozlama sisteminde örnek olması açısından $s=3 \mu\text{m}$, her iki sistem içinde $\lambda=405 \text{ nm}$ ve $d_{PR}=1 \mu\text{m}$ olarak alınır ve Eş.3.2 kullanılarak hesaplama yapılırsa kontak ve pozlama sistemleri için $b_{\min}$ değeri sırasıyla $0,68$ ve $1,79 \mu\text{m}$ olarak bulunur.

Kontak baskı sistemlerinin ve litografi metodlarının seçiminde en önemli etken istenilen desenin küçüklüğü ya da diğer bir deyişle çözünürlüğüdür. Bu tür pozlama işlemlerinde iki tip çözünürlükten bahsedilebilir. Birinci tip çözünürlük desenin çizgi genişliğidir (CD) ve üretilecek aygıtın boyutlarını ve çalışma hızını etkileyen parametredir, ikinci tip çözünürlük ise çizgi genişliği ile iki çizgi arasındaki uzaklığın toplamı olan alan genişliğidir ve üretilen cihazların hangi sıklıkta paketlenilebileceğini gösterir. Şekil 3.3’de ise çizgi ve alan genişliği gösterilmiştir.

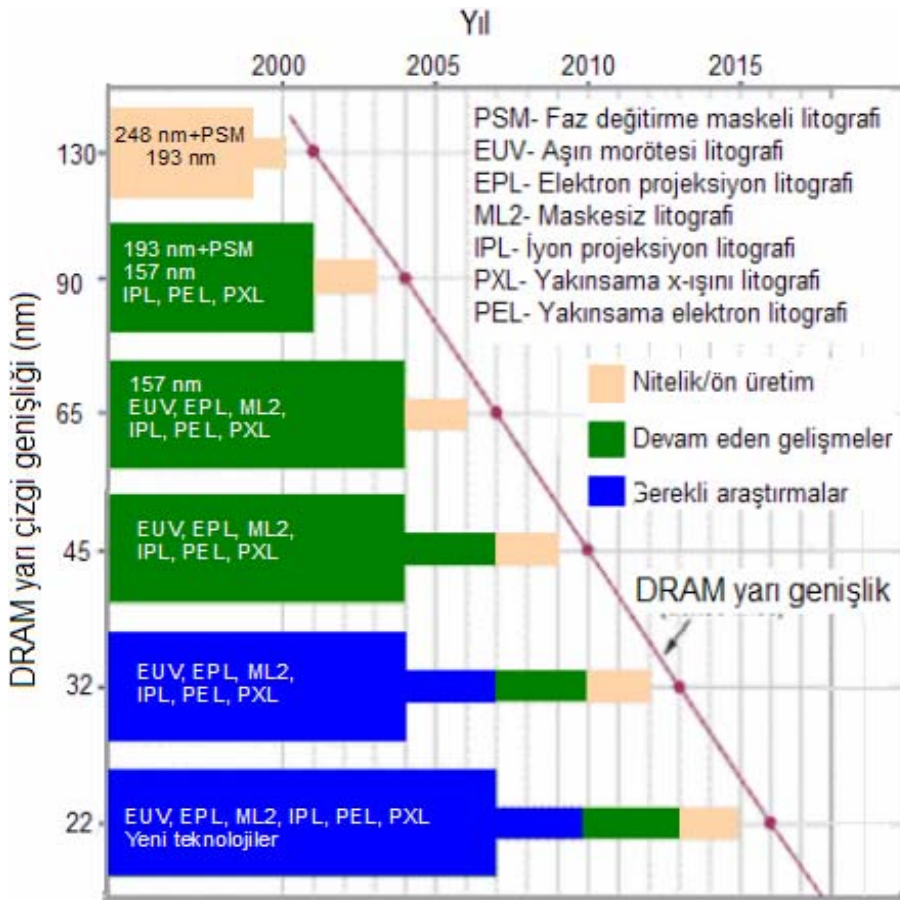


Şekil 3.3. Çizgi ve alan genişliği

Çözünürlük (minimum çizgi genişliği) kavramını açıklamak için Eş.3.2 kullanılır:

$$\text{çözünürlük} = k_{alan} \frac{\lambda}{NA} \quad (3.2)$$

Burada λ pozlama sisteminin dalgaboyunu ve k_{alan} sisteme ait bir özelliği göstermekte olup değeri 0,4-1,0 aralığında değişmektedir. NA pozlama sisteminde yer alan optik lensin diyafram açıklığıdır ve değeri 0,35-1,3 aralığında değişmektedir. Eş 3.2'den rahatlıkla görüldüğü gibi minimum aygıt boyutuna ulaşılabilmesi için pozlama sisteminde kullanılan ışık kaynağının dalgaboyunun küçültülmesi gerekmektedir. Şekil 3.4'de dinamik rastgele erişimli bellek (DRAM) yarı çizgi genişliğinin yıllara göre değişimi ve gerekli olan pozlama sistemi dalgaboyları gösterilmiştir [58,59].



Şekil 3.4. DRAM yarı çizgi genişliğinin yıllara göre değişimi ve gerekli olan pozlama sistemi dalgaboyları

3.2. Temel Fotolitografi İşlemleri

Temel fotolitografi işlemleri, alttaşın fabrikasyona hazırlanma işleminden, fabrikasyon işlemlerinin bitmesine kadar olan fabrikasyon adımlarını kapsamaktadır. Özetlenecek olunursa bu işlemler alttaş yüzeyine fotorezistin kaplanması, foto maskedeki desenin pozlama sistemi yardımıyla fotorezist yüzeyine (alttaş yüzeyine) transfer edilmesi, desenin geliştirilmesi, desenin aşındırma sistemi yardımıyla ortaya çıkartılması ve omik kontakların yapılması olarak sıralanabilir. Aşağıdaki bölümlerde fotolitografi işlemleri ayrıntılı olarak verilmektedir.

3.2.1. Numune temizliği

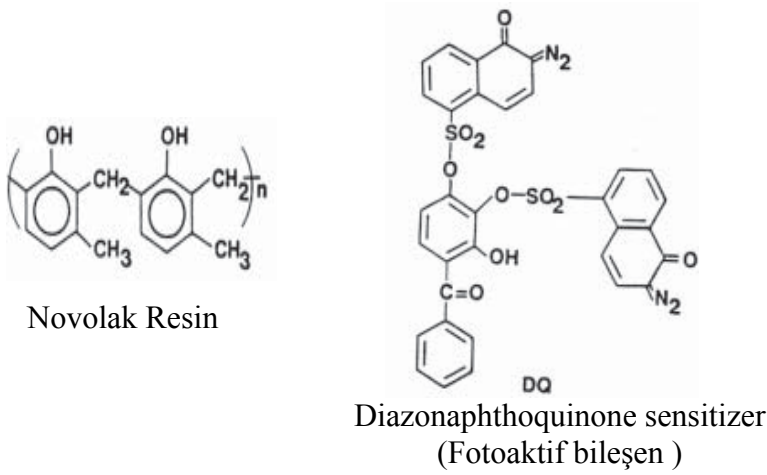
Fabrikasyonu yapılacak olan numunelerin yüzeyindeki organik kirlerin temizlenmesi için genellikle yarıiletkenlerin temizliğinde klasik olarak kullanılan temizlik işlemi uygulanır. Bu işlemde, numune ultrasonik banyo içerisinde sırasıyla aseton ve metanol kullanılarak yıkanır, deiyonize su (DIH_2O) yardımıyla durulanır ve kuru azot ile kurutulur.

3.2.2. Fotorezistin yüzeye kaplanması

Fotorezist (PR) ışığa duyarlı olan polimerik bir malzemedir ve yapısı üç grupta incelenebilir [56,57,60]:

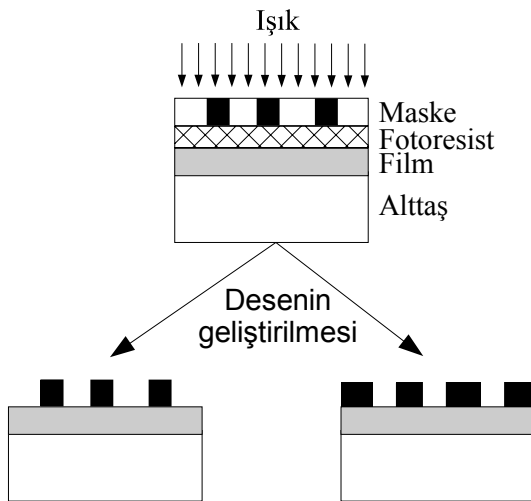
- Polimer (pozlama işlemi ile yapısını değiştirir)
- Fotoaktif (ışığa hassaslaştırıcı) bileşen (kimyasal reaksiyonu kontrol eder)
- Uçucu çözücü (viskoziteyi kontrol eder).

Işığa duyarlı olan bu polimerik malzeme pozitif (DNQ sistemi) ve negatif olmak üzere iki çeşittir. Şekil 3.5’de pozitif fotorezistin kimyasal yapısı verilmektedir.



Şekil 3.5. DNQ sistemi.

Fotorezistler iki çeşit olmasına karşın, elde edilen çözünürlüğün negatif fotorezist kullanımında pozitif PR kullanımına göre daha kötü olması ve içerdiği çözücünün organik bazlı (zehirli) olması gibi dezavantajları nedeniyle, sıklıkla pozitif PR kullanılır. Fotorezistler arasındaki uygulama farkı ise şu şekilde açıklanabilir: pozitif fotorezistlerde UV ışık gören kısımlar kimyasal yapısını değiştirir. Kimyasal yapısı değişen fotorezist, fotorezistler için üretilmiş geliştirici solüsyon içerisinde çözünür. Bu sayede ışık gören kısımlar alttaş yüzeyinden kaldırılmış olur ve geriye sadece ışık görmeyen kısımlar kalır. Negatif fotorezistlerde ise durum tam tersidir [60]. Her iki tipteki fotorezist için desenin geliştirilmesini açıklayan şematik diagram Şekil 3.6'da verilmektedir.

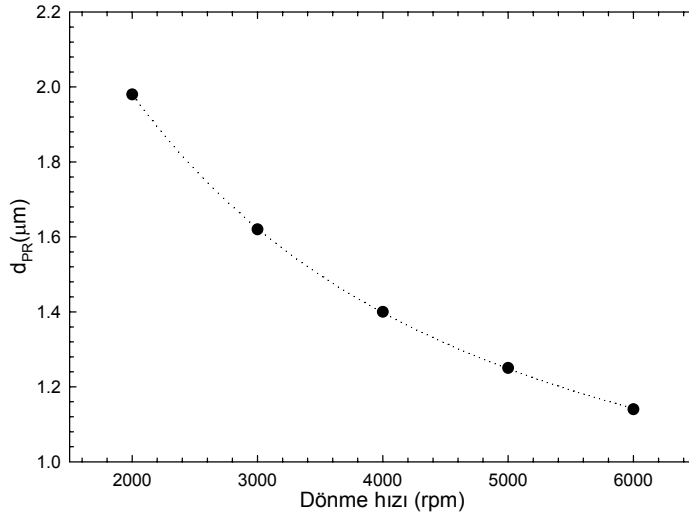


Şekil 3.6. Pozitif ve negatif fotorezist için desenin geliştirilmesi

Pozitif ve negatif fotorezistlerin seçiminde fotorezistlerin farklı vizkoziteye ve soğurma dalgaboyuna sahip olmasından dolayı fabrikasyonu yapılacak olan aygıt tipi ve kullanılacak olan pozlama sistemi büyük önem taşımaktadır. Fabrikasyon işlemlerinde aşındırılması istenmeyen kısımların korunması için maske görevi de gören fotorezistlerin aşındırma işleminden etkilenecek yüzeyden tamamen aşındırılmaması için uygun kalınlığa sahip olan fotorezistler kullanılmalıdır. Bu yüzden fotorezist seçiminde, tabaka kalınlığıyla doğrudan ilişkili olan viskozite parametresi göz önünde bulundurulmalıdır. Fotorezistin yüzeye kaplanması için döner kaplama sistemi kullanılmaktadır. Döner kaplama sisteminin dönme hızına bağlı olarak fotorezist tabakasının kalınlığı [61].

$$d_{PR} = \frac{sabit}{\sqrt{\text{dönme hızı}}} \quad (3.3)$$

Şekil 3.7’de örnek olarak Clairant Az5214E nolu fotorezist için dönme hızına bağlı olarak, kaplanan fotorezist tabakasının kalınlığı verilmektedir [62].



Şekil 3.7. Fotorezist tabaka kalınlığının dönme hızına bağlı değişimi.

Şekilden de rahatlıkla görüldüğü gibi, dönme hızı arttıkça fotorezist tabaka kalınlığı üstel olarak azalmaktadır. Kontak pozlama sistemlerinde, sistemler değiştikçe kullanılan dalgaboyları da değişmektedir. Örneğin, üniversitelerde araştırma amaçlı

kullanımlarda sıklıkla tercih edilen Karl Suss firmasına ait kontak pozlama sistemlerinde MJB3 modelinde 363 nm dalgaboylu UV kaynak yer alırken, MJB4 modelinde 405 nm dalgaboylu kaynak yer almaktadır. Pozlama sistemlerinde yer alan kaynak dalgaboyları farkından dolayı, kullanılacak fotorezistlerde sisteme uygun olarak seçilmelidir. Örneğin sıklıkla kullanılan Clairant Az5214E nolu fotorezist için soğurma aralığı 310-420 nm'dir.

3.2.3. Yumuşak ısıtma

Yumuşak ısıtma işlemi fotorezistin yüzeye kaplanma işleminden sonra gerçekleştirilir. Bu işlemden sonra pozlama işlemi yapılacağı için “*ön ısıtma*” olarak adlandırılır. Bu işlemin amacı fotorezist içerisinde yer alan çözücü kısmın buharlaştırılmasıdır. Bilindiği üzere çözücü kısım, fotorezistin çözücü solüsyon içindeki çözünme hızını etkilemektedir [56,57].

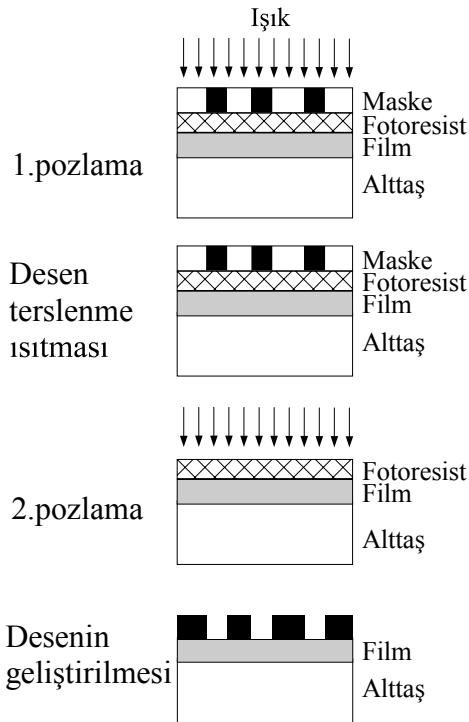
Fotorezist kaplı numunenin ısıtılması için fırın ya da ısıtma tablası kullanılır. Fakat, ısıtma tablasındaki işlemde buharlaşma alt yüzeyden üst yüzeye doğru olduğu için, daha çok tercih edilir. Fırın kullanımında sıcaklık genellikle 90 °C ve süre ise 30 dk'dır. Isıtma tablasında ise aynı sıcaklıkta 1, 2 dk'lık bir ısıtma yeterli olmaktadır [61].

3.2.4. Pozlama

Alttaş üzerine fotorezistin (pozitif veya negatif) kaplanması ve yumuşak ısıtma işlemlerinin tamamlanmasından sonra sıra pozlama işlemindedir. Bu işlemde foto maske üzerindeki desen, maske hizalama sistemi (pozlama sistemi) kullanılarak fotorezist üzerine transfer edilir. Desen transfer işleminin şematik diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir. Pozlama işleminde en önemli parametreler pozlama sisteminin kaynak enerjisi ve pozlama süresidir. Fotorezistin pozlama sistemine göre seçilmesine karşın, pozlama süresi fotorezist türüne göre değişiklik göstermektedir.

3.2.5. Desenin terslenmesi

Desen terslenme işlemi (IR) pozitif fotorezistlere negatif fotorezist özelliği kazandırmak için yapılır (Şekil 3.8). Bazı fotorezistler (örneğin Az5214E) özel yapısından dolayı IR işlemi uygulanarak negatif PR olarak kullanılır. Böylece, negatif fotorezistlerin dezavantajlarından kaçınılmış olunur. Bu işlemde, sırasıyla döner kaplama sistemi yardımıyla özel yapıya sahip pozitif PR malzeme yüzeyine kaplanır ve yumuşak ısıtma yapılır. Isıtma işlemi bittikten sonra, maske hizalama sistemi kullanılarak numunenin pozlama işlemi yapılır [56,57,62]. Sonra desen terslenme ısıtması yapılır. Bu işlem için genellikle 120 °C’de yapılan 1 dk’lık bir ısıtma yeterlidir. Isıtma işlemi sonucunda PR yapısını değiştirerek negatif PR özelliği kazanır. Sonra numune yine maske hizalama sistemi kullanılarak pozlanır. Fakat bu işlemde, artık fotomaske kullanılmaz. İkinci pozlama işlemi de bittikten sonra numunenin sert ısıtması yapılır ve numune fotorezist çözücü solüsyon ile banyo edilerek desen geliştirilir.



Şekil 3.8. Desen terslenmesi işlemi

3.2.6. Sert ısıtma

Pozlama işleminden sonra numune fırın ya da ısıtma tablası kullanılarak ısıtılır. Isıtma işlemi pozlamadan sonra yapıldığı için “pozlama sonrası ısıtma (PEB)” olarak da adlandırılır. İşlemin amacı, fotorezistin sertleşerek kuru aşındırma işleminde aşındırılması istenmeyen kısımların korunması için maske görevi görmesini ve fotorezistin kararlı hale gelmesini sağlamaktır. İşlem sıcaklığı ve süresi yumuşak ısıtmaya göre daha fazladır (genellikle 110 °C ve 3 dk’dır).

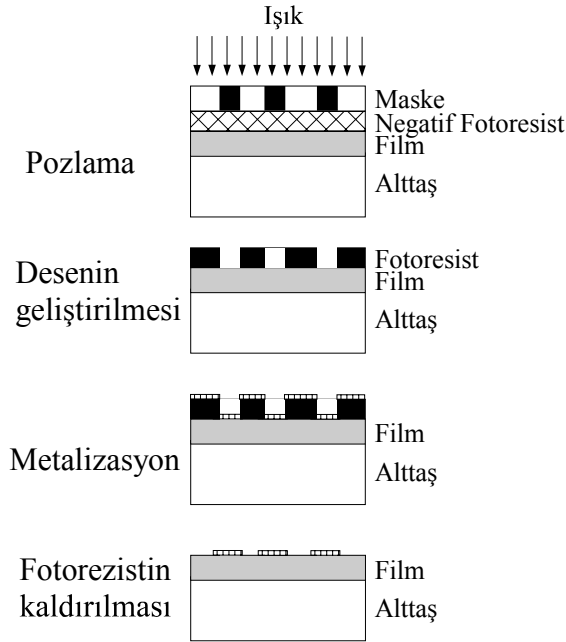
3.2.7. Desenin geliştirilmesi

Pozlama işleminin tamamlanmasından sonra fotorezist ile kaplı olan numune fotorezist çözücü solüsyon (desen geliştirici) ile banyo edilir. Bu işlem sonucunda fotorezistin çeşidine göre UV ışık gören/görmeyen fotorezist kısımlar numune yüzeyinden kaldırılır ve böylece maskedeki desen numune yüzeyine aktarılmış olur (Şekil 3.6).

3.2.8. Fotorezistin kaldırılması

Fotorezistin kaldırılma işlemi genellikle istenilen metalizasyon deseninin elde edilmesi için kullanılır (Şekil 3.9). Desenin geliştirilmesinden sonra yüzey metal ile kaplanır.

Metalizasyon işleminden sonra malzeme yüzeyinde yer alan fotorezist aseton ile ya da fotorezist kaldırma solüsyonu ile aşındırılarak istenmeyen metal kısımların kaldırılması sağlanır.



Şekil 3.9. Fotorezistin kaldırılması işlemi

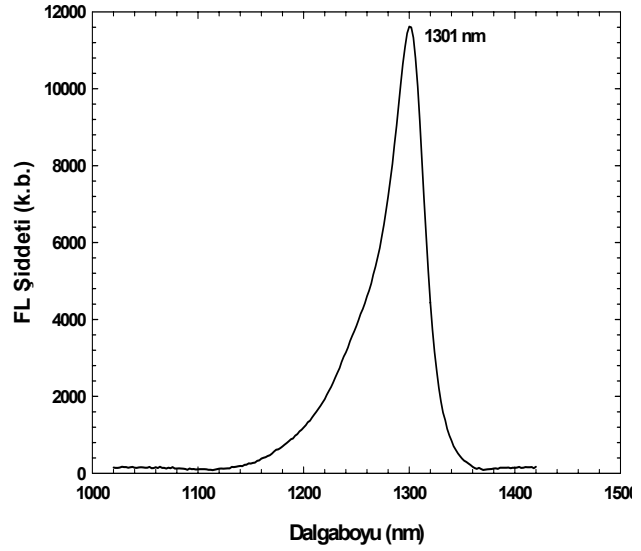
3.3. Çatı Dalga Kılavuzlu Lazer Diyotların Fabrikasyonu

Çatı dalga kılavuzunun (RWG) fabrikasyon adımları plazma kuvvetlendirilmiş kimyasal buhar biriktirme (PECVD) sistemi kullanılarak SiO_2 ve SiN_x tabakalarının büyütülmesi, fotolitografi yardımıyla çatı dalga kılavuzunun oluşturulması, SiO_2 tabakasının reaktif iyonla aşındırma (RIE) sistemi kullanılarak aşındırılması, InP tabakasının RIE sistemi kullanılarak aşındırılması ve InP ve InGaAs tabakalarının ıslak aşındırılması şeklinde özetlenebilir.

3.3.1. InGaAsP/InP lazer diyot yapısı

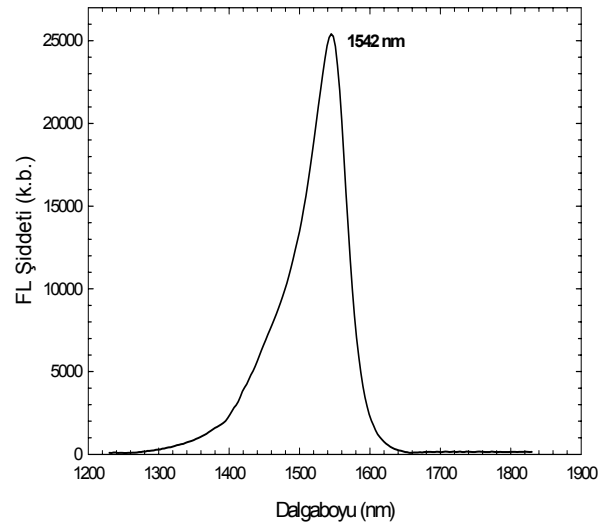
Çatı dalga kılavuzlu (RWG) Fabry-Perot (FP) lazer diyotların fabrikasyonu için metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) sistemi kullanılarak büyütülen farklı dalgaboylarındaki InGaAsP/InP çoklu kuantum kuyulu (MQW) eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapılar (GRINSCHs) kullanıldı. Yapıların fotoluminesans (PL) analizleri yapılarak ışıma dalgaboyları tayin edildi. Şekil 3.10 ve 11'de yapıların şematik gösterimleri ve PL spektrumları verildi.

p-InGaAs kontak tabakası 3500
p-InP Hapisleme tabakası 1.4 μm
In_{0.793}Ga_{0.207}As_{0.449}P_{0.551} 200 Å
p-InP Ara tabaka 500 Å
In_{0.931}Ga_{0.069}As_{0.150}P_{0.850} 250 Å
In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.229}P_{0.771} 250 Å
In_{0.860}Ga_{0.140}As_{0.305}P_{0.695} 250 Å
AKTİF BÖLGE (8 QW)
In_{0.860}Ga_{0.140}As_{0.305}P_{0.695} 250 Å
In_{0.895}Ga_{0.105}As_{0.229}P_{0.771} 250 Å
In_{0.931}Ga_{0.069}As_{0.150}P_{0.850} 250 Å
n-InP Tampon tabaka 800 Å
n-InP Alttaş 500 μm



Şekil 3.10. 1,3 μm dalgaboylu InGaAsP/InP MQW GRINSCH yapısı (Aktif bölge 80 Å kalınlığında 8 adet In_{0.897}Ga_{0.103}As_{0.471}P_{0.529} kuantum kuyusu ve 100 Å kalınlığında 9 adet In_{0.860}Ga_{0.140}As_{0.305}P_{0.695} engelden oluşmaktadır)

p-InGaAs kontak tabakası 3500
p-InP Hapisleme tabakası 1.4 μm
In_{0.793}Ga_{0.207}As_{0.449}P_{0.551} 200 Å
p-InP Ara tabaka 500 Å
In_{0.931}Ga_{0.069}As_{0.150}P_{0.850} 250 Å
In_{0.860}Ga_{0.140}As_{0.305}P_{0.695} 250 Å
In_{0.793}Ga_{0.207}As_{0.449}P_{0.551} 250 Å
AKTİF BÖLGE (8 QW)
In_{0.793}Ga_{0.207}As_{0.449}P_{0.551} 250 Å
In_{0.860}Ga_{0.140}As_{0.305}P_{0.695} 250 Å
In_{0.931}Ga_{0.069}As_{0.150}P_{0.850} 250 Å
n-InP Tampon tabaka 800 Å
n-InP Alttaş 500 μm



Şekil 3.10. 1,55 μm dalgaboylu InGaAsP/InP MQW GRINSCH yapısı (Aktif bölge 70 Å kalınlığında 8 adet In_{0.783}Ga_{0.217}As_{0.745}P_{0.255} kuantum kuyusu ve 65 Å kalınlığında 9 adet In_{0.793}Ga_{0.207}As_{0.449}P_{0.551} engelden oluşmaktadır)

3.3.2. SiO₂ ve SiN_x tabakalarının büyüütülmesi

PECVD sistemi kullanılarak SiO₂ tabakası InGaAsP/InP numunesinin yüzeyine büyüütüldü. Büyütülen bu dielektrik tabakalar InP ve InGaAs tabakalarının kuru ve ıslak aşındırılması işlemlerinde aşındırılması istenmeyen kısımların korunması için maske görevi görmektedir [63].

SiO₂ tabakasının büyüütülmesi için Oxford Instruments Plasmalab 80 Plus PECVD sistemi kullanıldı. Büyütme parametreleri şu şekildedir:

- İşlem basıncı: 1000 mTorr
- Gaz akış oranları: SiH₄ (100 sccm) ve N₂O (800 sccm)
- RF gücü: 20 W
- RF frekansı: 13,56 MHz
- İşlem sıcaklığı: 300 °C
- Tabaka kalınlığı: 5000 Å
- Büyütme hızı: 790 Å/min
- Büyütme süresi: 6,5 dk

3.3.3. Fotolitografi yardımıyla çatı dalga kılavuzunun oluşturulması

Fotorezistin yüzeye kaplanması

Fotomaskedeki çatı dalga kılavuzu deseninin malzeme yüzeyine transferi için, öncelikle InGaAsP/InP numunesinin yüzeyi Hana 100M döner kaplama sistemi kullanılarak hekzametildisilazan (HMDS) ile kaplandı. Bu işlemin amacı fotorezistin malzeme yüzeyine tutunmasını artırmaktır. Daha sonra HMDS ile kaplanmış olan numune yine aynı sistem yardımıyla Clairant firmasına ait Az5214E nolu fotorezist ile kaplandı [62].

HMDS ve PR kaplanması için gerekli olan döner kaplama sistemi parametreleri şu şekildedir:

- HMDS için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 20s
- Fotorezist için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 30 s

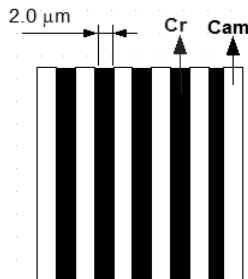
Yumuşak ısıtma

HMDS ve fotorezistin yüzeye kaplanma işlemleri bittikten sonra ısıtma tablası kullanılarak numune ısıtıldı [62]. Isıtma tablası parametreleri:

- Isıtma tablası sıcaklığı: 90 °C
- İşlem süresi: 1,5 dk

Pozlama işlemi

Isıtma işlemi bittikten sonra 2 µm genişliğindeki çatı dalga kılavuzu deseninin transfer edilebilmesi için 1. pozitif çatı dalga kılavuzu maskesi (Şekil 3.12) ve 363 nm dalgaboylu (civa lambası i-çizgisi) Karl Suss MJB3 maske hizalama sistemi kullanıldı.



Şekil 3.12. 1. pozitif çatı dalga kılavuzu maskesi

Maske hizalama sistemine yerleştirilen numune, hizalama işlemleri yapıldıktan sonra 7 s boyunca UV ışığa tabi tutuldu.

Desenin geliştirilmesi

Pozlama işlemi bittikten sonra desenin geliştirilmesi için numune yine Clairant firmasına ait Az300 MIF nolu desen geliştirici çözelti ile banyo edildi.

Sert ısıtma

Desen geliştirilmesi işlemi bittikten sonra, yine ısıtma tablası kullanılarak sert ısıtma işlemi yapıldı. Isıtma tablası parametreleri:

- Isıtma tablası sıcaklığı: 120 °C
- İşlem süresi: 3 dk

3.3.4. Aşındırma ile çatı dalga kılavuzunun oluşturulması

Çatı dalga kılavuzunun oluşturulması için reaktif iyonla aşındırma (RIE) sisteminde öncelikle SiO₂ tabakasının aşındırma işlemi yapılarak, SiO₂ çatı dalga kılavuzu maskesi elde edildi. SiO₂ maskesinin elde edilmesinden sonra, hemen altında yer alan InGaAs ve InP tabakalarının aşındırma işlemi gerçekleştirildi. Çatı dalga kılavuzunun oluşturulmasından sonra ıslak aşındırma işlemi yapılarak çatı dalga kılavuzu yan yüzey açısı azaltıldı (yan yüzeyler dikleştirildi) [63,64].

SiO₂ çatı dalga kılavuzu maskesinin oluşturulması

RIE sistemi kullanılarak SiO₂ tabakası, çatı dalga kılavuzu deseninde aşındırıldı. Sistem parametreleri:

- İşlem basıncı: 30 mTorr

- Gaz akış oranı: CF_4/O_2 (50 sccm)
- RF gücü: 100 W
- Tabaka kalınlığı: 5000 Å
- Aşındırma hızı: 50 nm/dk
- Aşındırma süresi: 10,5 dk

InGaAs ve InP tabakalarının aşındırılması

InGaAs ve InP tabakalarının RIE sistemi yardımıyla aşındırılması için Cl_2/Ar ve CH_4/H_2 gaz karışımları kullanıldı. CH_4/H_2 gaz karışımı kullanıldığında, bu gaz karışımının InP tabakası ile etkileşime girmesi nedeniyle yüzeyde istenmeyen polimer yapısı oluşur [45,64,65]. Yüzeydeki pürüzlülüğü artıran bu polimer oluşumunun temizlenmesi için, aşındırma işleminden sonra numune yine aynı sistemde O_2 gazı kullanılarak temizlenir.

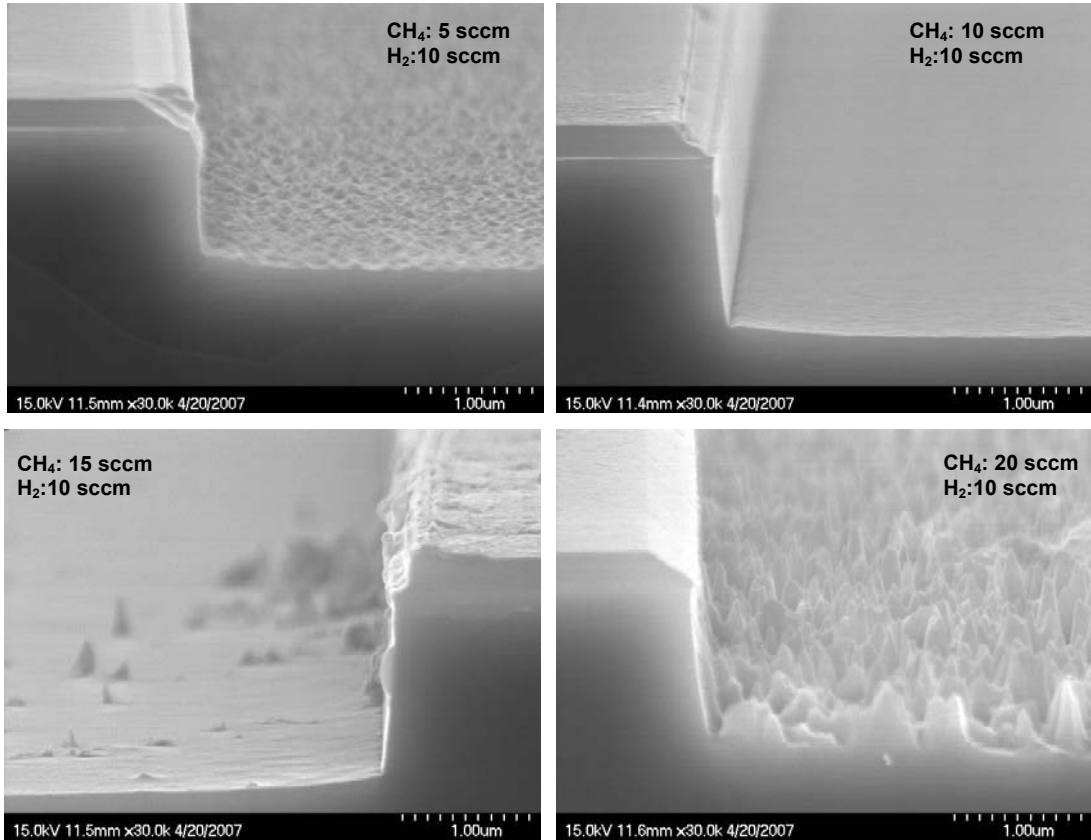
Çatı dalga kılavuzunun aşındırma ile oluşturulması işleminde yüzeyde herhangi bir pürüzlülüğün olmaması için aşındırma gazları farklı oranlarda karıştırılarak bir çok deneme yapılarak, taramalı elektron mikroskobu (scanning electron microscope, SEM) görüntüleri alındı.

Resim 3.1 ve 2’de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde, CH_4/H_2 gaz karışım oranının 10/10 sccm olduğu durumda çatı dalga kılavuzu yan yüzeylerinin ve numune yüzeyinin (InP tabakası), en az pürüzlülükte olduğu görülmektedir. InP tabakasının RIE sistemi ile aşındırma ve O_2 ile temizlenme parametreleri:

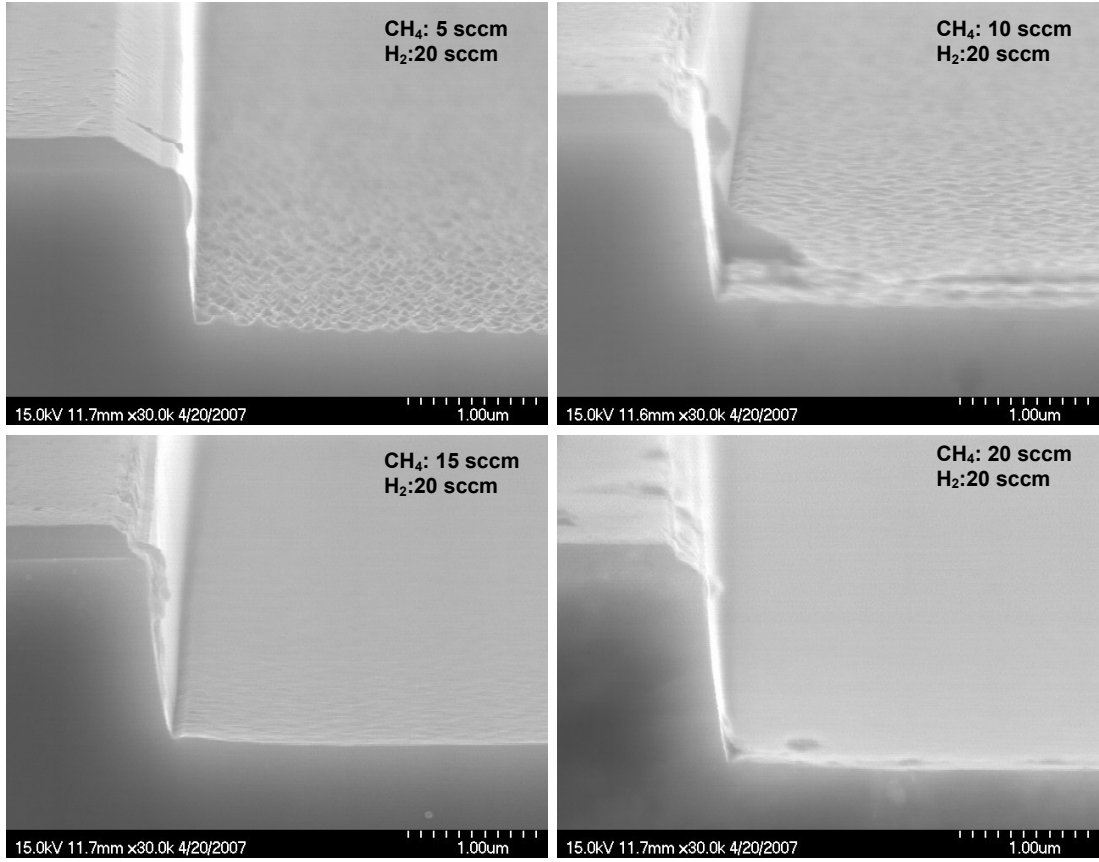
- İşlem basıncı
 - o InGaAs ve InP aşındırması için: 30 mTorr
 - o O_2 temizliği için: 100 mTorr
- Gaz akış oranı
 - o InGaAs ve InP aşındırması için: CH_4 (10 sccm) / H_2 (10 sccm)
 - o O_2 temizliği için: 50 sccm

- RF gücü: 150 W
 - o InP aşındırması için: 150 W
 - o O₂ temizliği için: 50 W
- O₂ temizliği için: 50 sccm
- Hedeflenen aşındırma kalınlığı: 1,78 μm
- Aşındırma hızı: 52 nm/dk
- Aşındırma süresi: 15 dk (InGaAs ve InP tabakaları için) + 10 dk (temizlik için) + 15 dk (InGaAs ve InP tabakaları için) + 10 dk (temizlik için)

InGaAs ve InP tabakalarının aşındırma işlemi bittikten sonra, çatı dalga kılavuzu yüksekliği alpha-step profilometresi yardımıyla 1,98 μm olarak ölçüldü. Bu kalınlık çatı dalga kılavuzu+SiO₂ tabaka kalınlığıdır.



Resim 3.1. InP RIE aşındırması için SEM görüntüleri. H₂ gaz akışı sabit tutularak (10 sccm), CH₄ gaz akışı (5, 10, 15, 20 sccm) değiştirildi



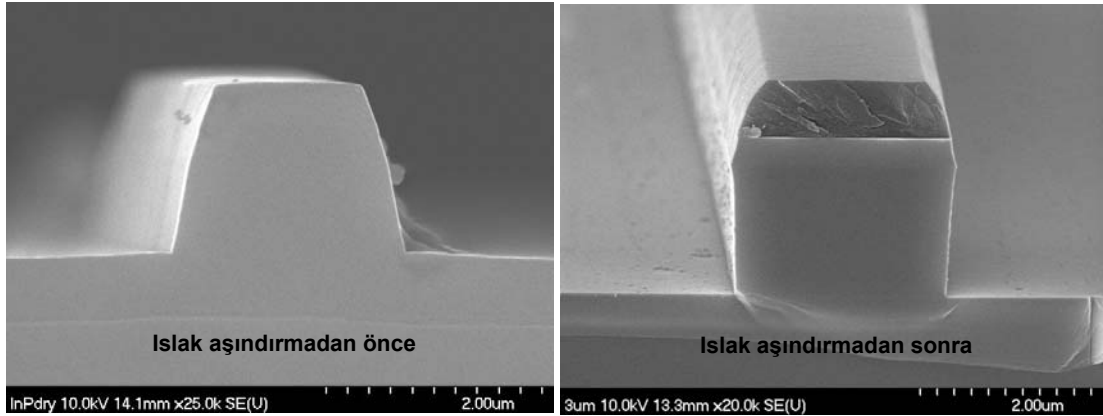
Resim 3.2. InP RIE aşındırması için SEM görüntüleri. H₂ gaz akışı sabit tutularak (20 sccm), CH₄ gaz akışı (5, 10, 15, 20 sccm) değiştirildi

Islak aşındırma

Bu işlem yardımıyla çatı dalga kılavuzu yan yüzey açısının azaltılması (yan yüzeylerin dikleştirilmesi) ve 1,78 μm 'luk kılavuz yüksekliğine ulaşılması amaçlandı. Islak aşındırma parametreleri:

- Aşındırıcı: HCl:H₃PO₄ (1:3)
- Aşındırma süresi: 40 s

Islak aşındırma işleminden önce ve sonra çekilen SEM görüntülerinden (Resim 3.3), çatı dalga kılavuzunun yan duvar açısındaki dikleşme rahatlıkla görülmektedir.



Resim 3.3. Islak aşındırma için SEM görüntüsü

Bu işlemten sonra çatı dalga kılavuzu yüksekliği alpha-step profilometresi yardımıyla 2,01 μm olarak ölçüldü. Bu kalınlık çatı dalga kılavuzu+SiO₂ tabaka (250-270 nm) kalınlığıdır.

SiO₂ tabakasının aşındırılması

Yapılan kuru ve ıslak aşındırma işlemleri sonucunda yüzeyde yaklaşık 250-270 nm kalınlığında SiO₂ tabakası bulunmaktadır. Çatı dalga kılavuzu yüksekliğinin tam olarak ölçülebilmesi için, oksit tabakanın aşındırılması gerekmektedir. Aşındırma işlemi için tampon oksit aşındırıcı (BOE) kullanılmıştır. İşlem parametreleri:

- Aşındırıcı: BOE
- Aşındırma süresi: 3 dk

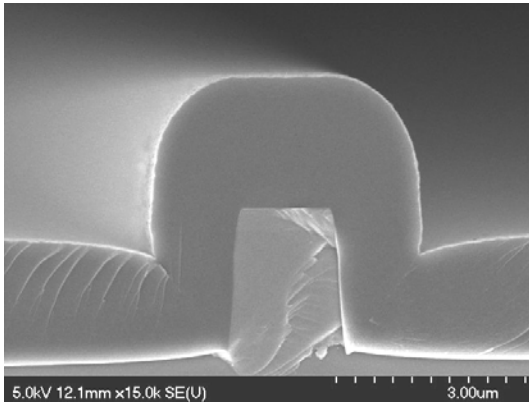
3.3.5. Pasivasyon

Çatı dalga kılavuzlu lazer diyotlarda, aygıtta uygulanan akım dalga kılavuzundan alttaşa doğru akmakta ve optik mod kılavuz boyunca ilerlemektedir. Bu sebeplerden dolayı, dalga kılavuzunda içerden dışarıya doğru olan kaçak akımlarını önlemek, uygulanan akımın dalga kılavuzuna dik bir hat boyunca akmasını sağlamak ve dalga kılavuzunun optik özelliklerini iyileştirmek için SiO₂ veya SiN_x pasivasyon

tabakaları kullanılır. PECVD sistemi kullanılarak büyütülen SiO_2 veya SiN_x pasivasyon tabakaları için sistem parametreleri:

- İşlem basıncı: 1000 mTorr
- Tabaka kalınlığı: 5000 Å
- Gaz akış oranları:
 - o SiO_2 için: SiH_4 (100 sccm) ve N_2O (800 sccm)
 - o SiN_x için: SiH_4 (300 sccm), N_2 (600 sccm) ve NH_3 (20 sccm)
- RF gücü: 20 W
- RF frekansı: 13.56 MHz
- İşlem sıcaklığı: 300 °C
- Tabaka kalınlığı: 1,78 µm
- Büyütme hızı:
 - o SiO_2 için: 790 Å/min
 - o SiN_x için: 375 Å/min
- Büyütme süresi:
 - o SiO_2 için: 23 dk
 - o SiN_x için: 48 dk

SiO_2 pasivasyon işlemi bittikten sonra elde edilen yapının SEM görüntüleri Resim 3.4’de verildi.



Resim 3.4. SiO_2 pasivasyonu
3.3.6. Çatı dalga kılavuzunun açılması

Pasivasyon işlemleri bittikten sonra, metalizasyon işlemi için çatı dalga kılavuzu açılmalı (kılavuz üzerindeki SiO₂ tabakasının aşındırılması), fotolitografi ile metal ped deseni numune yüzeyine transfer edilmeli ve daha sonra metalizasyon işlemi yapılmalıdır.

Fotorezistin yüzeye kaplanması

Öncelikle numune yüzeyi dönerek kaplama sistemi yardımıyla sırasıyla HMDS ve seyreltilmiş Az5214E nolu fotorezist ile kaplandı. Bilindiği üzere, dielektrik tabakanın RIE sisteminde aşındırılması sırasında istenmeyerek te olsa fotorezistinde bir kısmı aşındırılmaktadır. Seyreltilmiş PR kullanıldığında, PR kalınlığı tüm yüzey boyunca homojen olmaz. Kılavuz üzerinde en az kalınlıktadır. Böylece, aşındırma işleminde kılavuz üzerindeki ince PR hemen aşındırılarak, altındaki dielektrik tabakanında aşındırılması ve işlem sırasında yüzeydeki dielektrik tabakanın PR tarafından korunması sağlanır. Bu işlem için HMDS ve PR kaplama parametreleri:

- HMDS için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 20s
- Seyreltilmiş fotorezist için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 30 s

Sert ısıtma

Yüzeyin HMDS ve PR ile kaplanmasından sonra, numune sert ısıtma işlemine tabi tutularak fotorezistin aşındırma için maske görevi görmesi sağlandı. Isıtma işlemi için ısıtma tablası kullanılarak numune 120 °C’de 3 dk boyunca ısıtıldı.

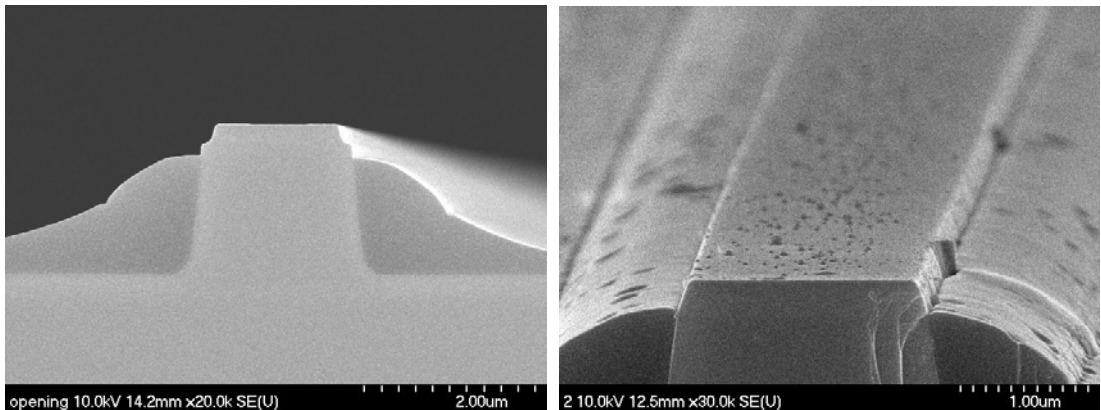
Çatı dalga kılavuzunun açılması

Fabrikasyon işlemleri içerisinde en önemli adım çatı dalga kılavuzunun açılmasıdır. RIE sistemi kullanılarak gerçekleştirilen bu işlemde, InGaAs kontak tabakası zarar görebilir. Bunun sonucunda, yüzey pürüzlülüğü artması nedeniyle kontak direnci artacağı için aygıt performansı azalır.

Çatı dalga kılavuzu üzerinde yer alan SiO₂ tabakasının kaldırılması (çatı dalga kılavuzu açılması) için yine RIE sistemi kullanıldı. Sistem parametreleri:

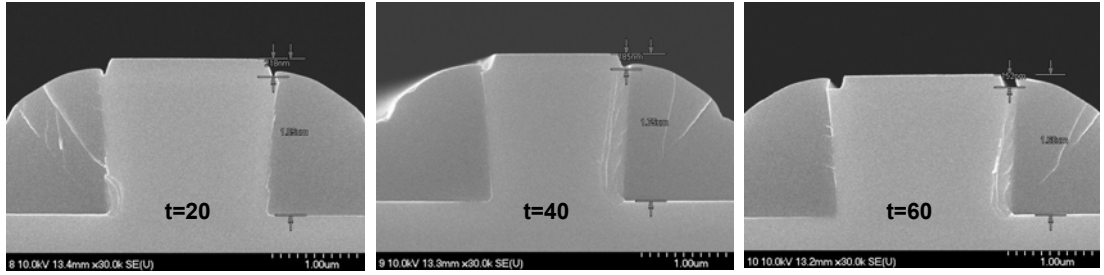
- İşlem basıncı: 30 mTorr
- Gaz akış oranı: CF₄/O₂ (50 sccm)
- RF gücü: 100 W
- Hedeflenen kalınlık: 1,75 μ m
- Aşındırma hızı: 50 nm/dk
- Aşındırma süresi: 41 dk

Resim 3.5’de çatı dalga kılavuzu açıldıktan sonra yapının durumunu gösteren SEM görüntüleri verilmiştir. InGaAs kontak tabakasında meydana gelen aşındırma hasarları açıkta görülmektedir.



Resim 3.5. Çatı dalga kılavuzunun açılması işlemi için SEM görüntüsü

InGaAs tabakasının yüzey pürüzlülüğünün azaltılması için, kılavuz açıldıktan sonra ıslak aşındırma işlemi uygulandı. Islak aşındırma işlemi için $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:25) karışımı kullanıldı. Aşındırma süresinin doğru olarak ayarlanabilmesi için, farklı süreler kullanılarak InGaAs tabakası aşındırıldı. Yapıların SEM görüntüleri elde edildi ve aygıt fabrikasyonu tamamlanarak aygıt parametreleri analiz edildi. Resim 3.6’da SEM görüntüleri verilmektedir.



Resim 3.6. InGaAs kontak tabakası için ıslak aşındırma SEM görüntüleri

Yapılan analizler sonucunda elde edilen ıslak aşındırma parametreleri şu şekildedir:

- Aşındırıcı: $\text{H}_3\text{PO}_4:\text{H}_2\text{O}_2:\text{H}_2\text{O}$ (1:1:25)
- Aşındırma süresi: 20 s

Numune temizliği

Numunelerin yüzeyindeki organik ve aşındırma sonucu yüzeyde kalan kirlerin temizlenmesi için klasik olarak kullanılan temizlik işlemi uygulanır. İşlem parametreleri:

- Aseton (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Metanol (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Deiyonize su (DIH_2O)

3.3.7. Metalizasyon

Numunenin temizliği bittikten sonra sıra metal ped maskesinin fotolitografi yardımıyla numune yüzeyine transfer edilmesindedir.

Fotorezistin yüzeye kaplanması

Dönerek kaplama sistemi yardımıyla, numune yüzeyi HMDS ve Az5214E nolu fotorezist ile kaplandı. İşlem parametreleri:

- HMDS için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 20s
- Fotorezist için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 30 s

Yumuşak ısıtma

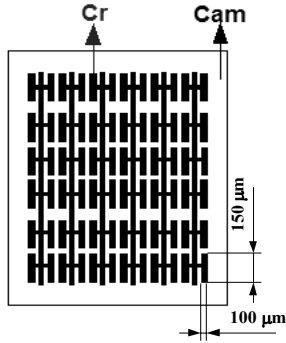
HMDS ve fotorezistin yüzeye kaplanma işlemleri bittikten sonra ısıtma tablası kullanılarak numune ısıtıldı. Isıtma tablası parametreleri:

- Isıtma tablası sıcaklığı: 90 °C
- İşlem süresi: 1,5 dk

Pozlama ve desen terslenmesi işlemleri

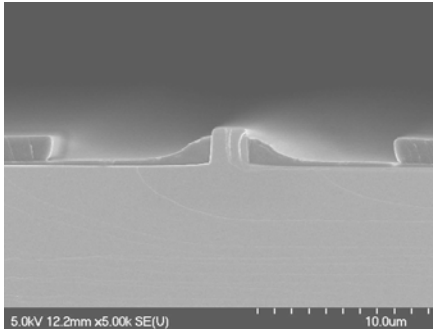
Isıtma işlemi bittikten sonra metal ped deseninin transfer edilebilmesi için 2. negatif metal ped maskesi (Şekil 3.13) ve Karl Suss MJB3 maske hizalama sistemi kullanıldı. Metal ped maskesinin sistemde ayarlanma işlemleri bittikten sonra

numune 7 s boyunca UV radyasyona tabi tutuldu. Pozlama işlemi bittikten sonra desen terslenmesi için, numune 120 °C’de 1 dk ısıtıldı.



Şekil 3.13. 2. negatif metal ped maskesi

Isıtma işleminden sonra numune maske kullanılmadan tekrar 12 s boyunca pozlandı. Böylece, pozitif fotorezistimiz negatif fotorezist özelliği kazanmış oldu. Bu işleme ait SEM görüntüsü Resim 3.7’de verildi.



Resim 3.7. Desen terslenmesi için SEM görüntüsü

Desenin geliştirilmesi

Pozlama işlemi bittikten sonra desenin geliştirilmesi için numune yine Clairant firmasına ait Az300 MIF nolu desen geliştirici solüsyon ile 55 s banyo edildi.

p-tipi metalizasyon

Metal ped deseninin numune yüzeyine transfer edilmesinden sonra, sıra p-tipi omik

kontakların oluşturulmasındadır. Metalizasyon işlemi için elektron demet evaporasyon sistemi kullanıldı. Metalizasyon için kullanılan metal türleri ve tabaka kalınlıkları şu şekildedir:

- Metal türü: Ti/Pt/Au
 - o Büyütme hızı: 1/2/5 Å
 - o Tabaka kalınlığı: 200/300/2500 Å
- Metal türü: Pt/Ti/Pt/Au
 - o Büyütme hızı: 1/2/2/5 Å
 - o Tabaka kalınlığı: 200/300/300/2000 Å

Fotorezistin kaldırılması

İstenmeyen kısımlardaki metal kaplamanın kaldırılması için fotorezist kaldırılma işlemi uygulandı. Bu işlemde istenmeyen fotorezist kısımlar kaldırılarak, fotorezistin üzerinde kaplanmış olan metal kısımlarda kaldırılmış oldu. İşlem parametreleri:

- Aseton (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Metanol
- Deiyonize su (DIH₂O)

Numunenin inceltilmesi

Aygıt direncinin azaltılması ve numunenin daha rahat kesilmesi için numune inceltir. İnceltme işlemi sonucunda toplam numune kalınlığı 110 µm'dur.

n-tipi metalizasyon

Alttaşın inceltilmesinden sonra n-tipi metalizasyon işlemi elektron demet evaporasyon sistemi kullanılarak yapıldı. Metalizasyon için kullanılan metal türü, kalınlığı ve büyütme hızı şu şekildedir:

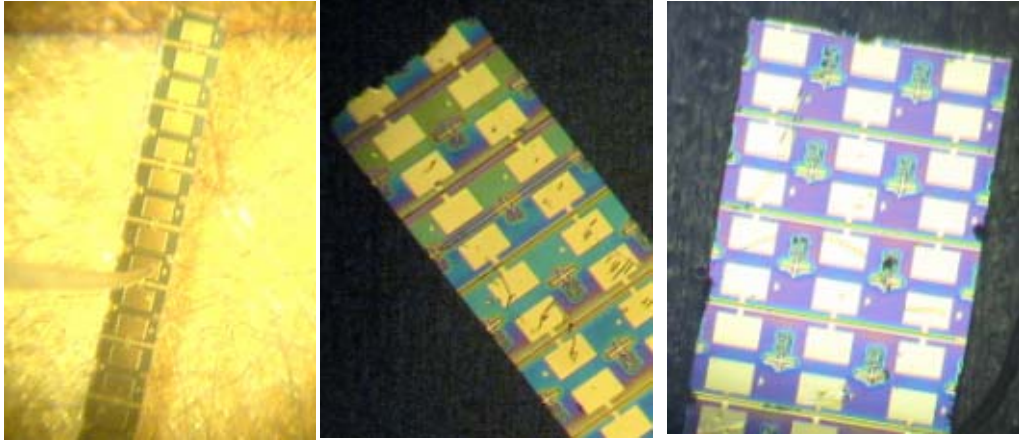
- Metal türü: Ti/Au
 - o Büyütme hızı: 2/5 Å
 - o Tabaka kalınlığı: 200/2000 Å

Hızlı tavlama sistemi kullanılarak omik kontakların oluşturulması

Metalizasyon işlemi biten numunelerin, ısıtma işlemleri azot (N_2) akışı altında hızlı tavlama sistemi (RTA) kullanılarak gerçekleştirildi. İşlem parametreleri:

- N_2 gaz akışı: 10 sccm
- Sıcaklık: 400 °C
- Süre: 25 s

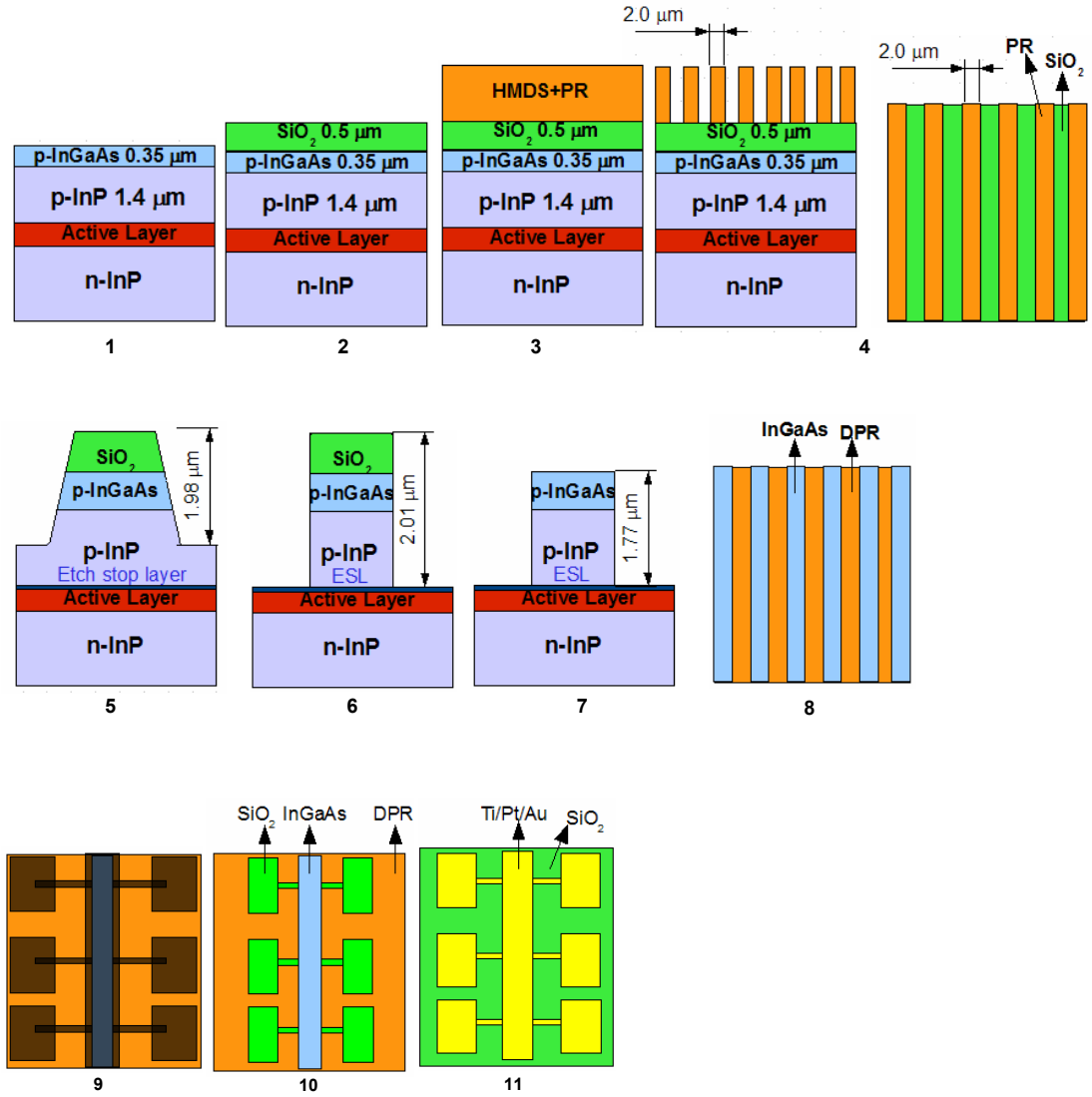
Fabrikasyon işlemleri bittikten sonra, lazer diyotların aygıt parametre analizinin yapılabilmesi için lazer diyotlar farklı kavite uzunluklarına (L_c) sahip olacak şekilde kesildi. Resim 3.8’de farklı kavite uzunluklu lazer diyotlar verilmiştir.



Resim 3.8. Farklı kavite uzunluklarına (L_c) sahip lazer diyotlar (sırasıyla $L_c=300$, 600 ve 900 μm)

3.3.8. Çatı dalga kılavuzlu lazer diyot fabrikasyon adımlarının özeti

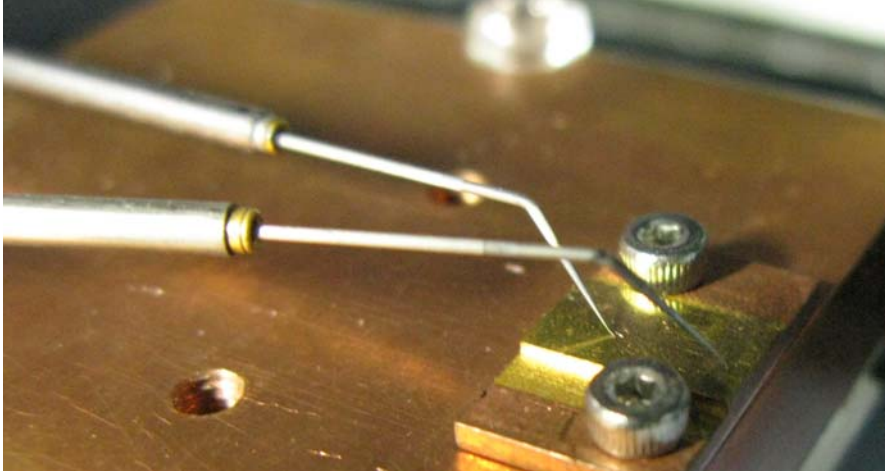
Çatı dalga kılavuzlu lazer diyot fabrikasyon adımlarının şematik diyagramı Şekil 3.14’de verilmiştir.



Şekil 3.14. Fabrikasyon adımları: (1)Numunenin şematik diyagramı, (2) SiO₂ tabakasının büyüülmesi, (3) HMDS ve PR kaplanması, (4) 1. pozitif çatı dalga kılavuzu deseninin transferi ve desenin geliştirilmesi (önden ve üstten görünüş), (5) SiO₂, InGaAs ve InP tabakalarının kuru aşındırılması, (6) InGaAs ve InP tabakalarının ıslak aşındırılması, (7) SiO₂ tabakasının aşındırılması, (8) Çatı dalga kılavuzunun açılması, (9) 2. negatif metal ped maskesinin transferi, (10) 2. metal ped deseninin geliştirilmesi, (11) istenmeyen fotorezist tabakasının kaldırılması

3.4. Lazer Diyot Parametre Analizi

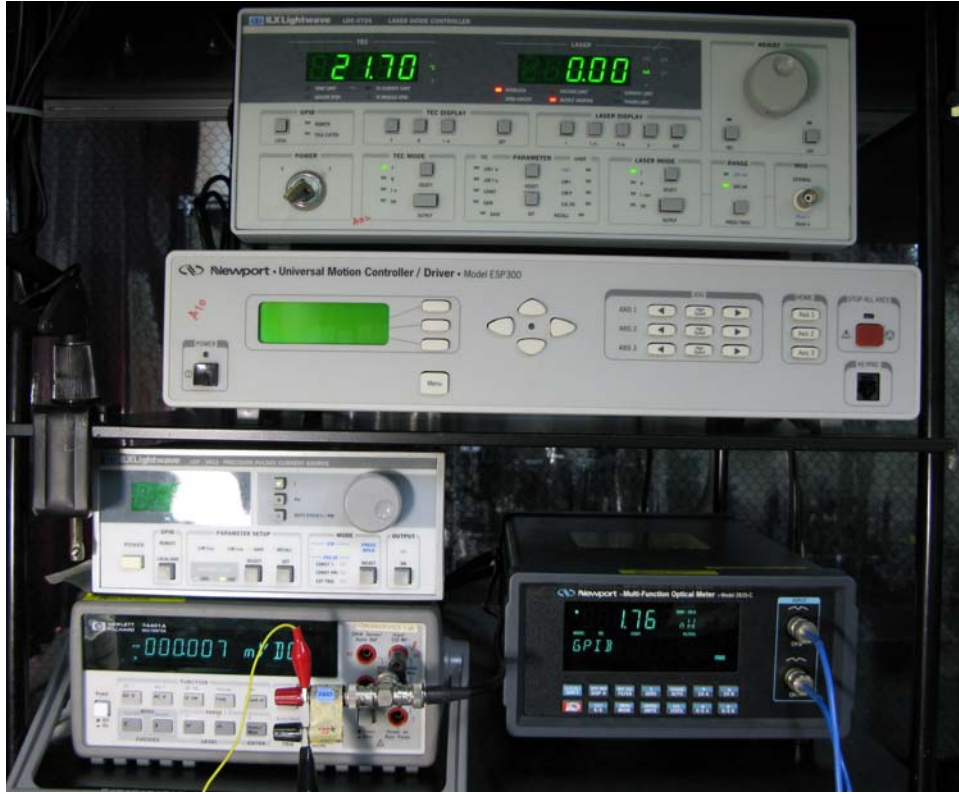
Bu tez çalışmasında fabrikasyonu yapılan InGaAsP/InP çatı dalga kılavuzlu lazer diyotların aygıt parametre analizi (LIV) ILX Lightware LDC lazer diyot kontrolcüsü, ILX Lightware LDP 3811 akım kaynağı, HP Multimeter 34401A gerilim kaynağı, Newport Multi Function Optical Meter 2835-C güç ölçer ve küresel fotodedektör kullanılarak gerçekleştirildi. Resim 3.9, 3.10 ve 3.11’de sırasıyla ısı tablası, küresel fotodedektör ve güç-akım-gerilim (LIV) sistemi verilmiştir. Şekil 3.15’de ise ölçüm sisteminin şematik diyagramı verilmiştir.



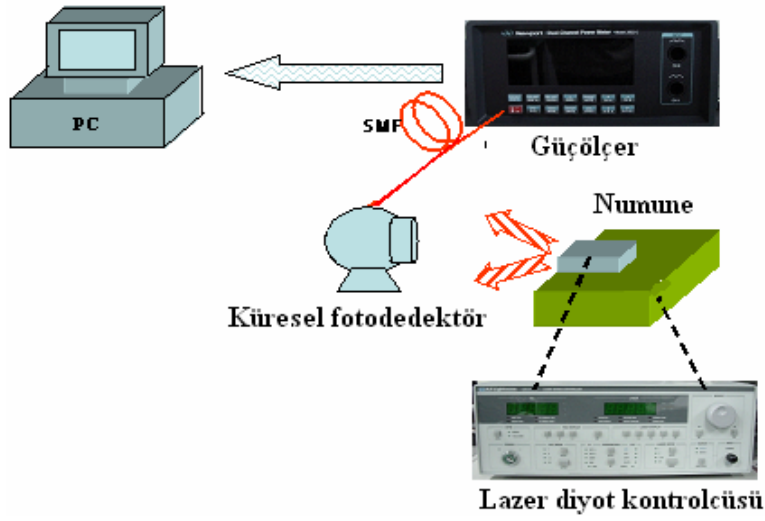
Resim 3.9. Isı tablası



Resim 3.10. Küresel fotodedektör



Resim 3.11. LIV sistemi



Şekil 3.15. LIV ölçüm sisteminin şematik diyagramı

3.4.1. Akım-gerilim (I-V) karakteristikleri

Lazer diyotların akım-gerilim karakteristikleri kullanılarak diferansiyel direnç (R_s) değeri elde edilir.

Diferansiyel direnç (R_s)

Diferansiyel direnç (seri direnç) fabrikasyonu yapılan aygıtın toplam direncidir. Akım-gerilim grafiği kullanılarak, eğrinin eğiminden R_s elde edilir.

3.4.2. Akım-güç (I-P) karakteristikleri

Lazer diyotların akım-güç karakteristikleri kullanılarak, eşik akımı (I_{th}), diferansiyel kuantum verimi (η_d), iç kuantum verimi (η_i), soğurma katsayısı (α_i) ve karakteristik sıcaklık (T_0) parametreleri elde edilir [7,66].

Eşik Akımı (I_{th})

Belirli akım değerinden sonra, lazer diyot lazer moduna geçer, yani uyarılmış emisyon, kendiliğinden emisyonu göre daha baskın duruma gelir. Uyarılmış emisyon geçişinin başladığı (lazer olayının başladığı) akım değeri eşik akımıdır [52]. I-P grafiğinde, eğimin aniden arttığı nokta I_{th} değerini verir.

Diferansiyel kuantum verimi (η_d)

Akımdaki artış için ışıktaki artış oranıdır. Diğer bir deyişle, çıkan fotonların (çıkış gücü), enjekte edilen elektronlara (akım) oranıdır [51]. I-P eğrisinin eğimi alınır ve daha sonra Eş.3.4'de bu eğim değeri kullanılarak diferansiyel kuantum verimi hesaplanır.

$$\eta_d = \frac{q}{h\nu} \frac{dP}{dI} \quad (3.4)$$

Burada q elektron yükünü, h Planck sabitini, v lazerin dalgaboyunu ve dP/dI ise I-P eğrisinin eğimini göstermektedir.

İç kuantum verimi (η_i)

Işımalı yeniden birleşmeye katılan enjekte edilen taşıyıcıların (akım) miktarıdır. Hesaplanan diferansiyel kuantum verimi değerlerinin tersi kullanılarak, kavite uzunluğuna karşı (L) ters diferansiyel kuantum verimi (η_d^{-1}) grafiği çizilir. Eğrinin y-eksenini kestiği nokta η_i^{-1} değerini verir. Daha sonra Eş.3.5 kullanılarak iç optik kayıp (α_i) hesaplanır.

$$\eta_d^{-1} = \eta_i^{-1} \left[1 + \alpha_i \frac{L}{\ln(1/R)} \right] \quad (3.5)$$

Burada, R lazer ışığının çıktığı lazer ön ve arka duvarlarının yansıtma oranıdır ve $R \sim 0,3$ olarak alınır.

Karakteristik sıcaklık (T_o)

Lazer diyotun en verimli olarak çalıştığı sıcaklıktır. Ölçümler sıcaklığa bağlı alınır ve Eş.3.6 kullanılırsa, lazerin çalışma sıcaklığı elde edilir.

$$I_{th}(T) = I_o \exp\left(\frac{T}{T_o}\right) \quad (3.6)$$

3.5. Metal-Yarıiletken Kontaklar

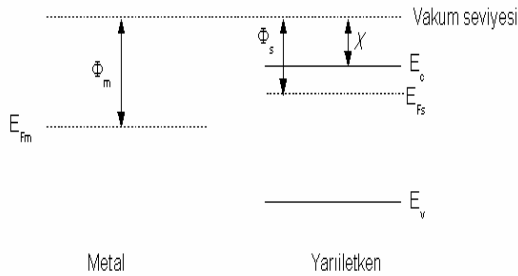
Metal ve yarıiletken malzemeler kontak edildiğinde, metal ile yarıiletkenin Fermi seviyeleri arasındaki farkın dengelenebilmesi için bantlarda bir miktar bükülme, yani yük taşıyıcı geçişi (difüzyon) meydana gelir [67,68]. Elektronların metal-yarıiletken

eklem boyunca akışı, p-n eklemlerde meydana gelen yük transferine benzerdir. Bu tipteki eklemler, “*metal kontak*” olarak adlandırılırlar [69].

Metal ve yarıiletken malzemelerin Fermi seviyelerinin aynı hizada olmasından ve tüketim bölgesinin ortaya çıkmasından dolayı bantlarda bükülme meydana gelir ve bu bükülme potansiyel engeli V_i ile ilişkilidir. Schottky-Mott modeline göre potansiyel engel (kontak potansiyeli), iki malzemenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşmaktadır [70] ve şu şekilde verilir:

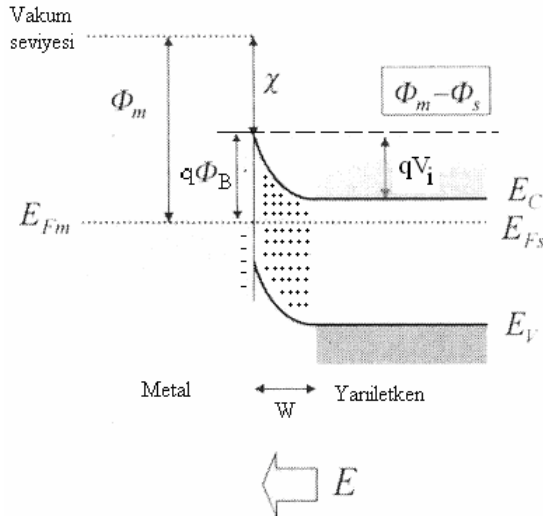
$$qV_i = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (3.7)$$

Burada qV_i yarıiletkenden metale akan elektronların sahip olması gereken enerjidir (engel yüksekliği). İş fonksiyonu, bir elektronu Fermi seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji, yani vakum seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Metal için iş fonksiyonu $q\Phi_m$ (eV) ile verilir ve yarıiletkenin iş fonksiyonuna, $q\Phi_s = q(\chi_s + \Phi_n)$ eşittir [49]. $q\chi_s$ terimi elektron ilgisidir ve iletkenlik bandının tabanındaki bir elektronu vakum seviyesine çıkarmak için gerekli olan enerji miktarı olarak tanımlanır. Vakum seviyesi ise, metalin tam dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesidir (katının dışında durgun olan bir elektronun enerjisini temsil eden uzay seviyesi) ve referans seviyesi olarak kabul edilir. $q\Phi_n$ ise iletkenlik bandı kenarı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Şekil 3.16’da metal ve yarıiletken malzemeler kontak edilmeden önce enerji-bant diyagramları gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Metal ve yarıiletken malzemeler kontak yapılmadan önce Fermi enerjileri ve iş fonksiyonları.

Metal/yarıiletken (MS) kontak yapıldığında, malzemelerin iş fonksiyonlarına göre kontaklar doğrultucu veya omik kontak olmak üzere ikiye ayrılır. Metal/n-tipi yarıiletken kontak yapıldığını varsayalım. Eğer $\Phi_m > \Phi_s$ durumu söz konusu ise yani iletkenlik bandındaki elektronlar metaldeki elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiplerse, elektron akışı, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesine eşit olana kadar devam eder. Metale geçen elektronlar yarıiletkende pozitif yüklü verici safsızlık atomları bırakırlar ve böylece yarıiletkenin arayüzeye yakın bölgesinde serbest elektron konsantrasyonu (hareketli yükler) azalır. İletkenlik bant kenarı E_c ile Fermi seviyesi E_{Fs} arasındaki fark, azalan elektron konsantrasyonu ile arttığı ve termal dengede E_{Fs} tamamen serbest kaldığı için iletkenlik ve değerlik bant kenarları yukarıya doğru bükülür (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için termal denge enerji –bant diyagramı.

Yarıiletkenin iletkenlik bandından metale geçen elektronlar nedeniyle, yarıiletkende metale yakın arayüzeyde elektronlardan arınmış pozitif yüklü uzay yükü bölgesi meydana gelir. Bu tüketim bölgesinin (arınmış bölge) genişliği W 'dır [71]. Tükenmiş yüklerin büyüklüğüne eşit miktardaki elektron yükü metal-yarıiletken arayüzeyinde metal tarafında görülür. Bu yük çok ince bir tabakada yer alır. Bu şekildeki bir dağılım “yük tabakası” olarak adlandırılır.

Engel genişliği yani tüketim tabakası genişliği azaldıkça, metal yüzeyindeki negatif yükte artar. Eşit miktarda pozitif yükte yarıiletken yüzeyinde yer almalıdır. Düşük

taşıyıcı yoğunluğu nedeniyle, bu pozitif yük yarıiletken yüzeyi kenarında tüm engel bölgesine yayılır. Eğer bu engel genişliği, atomlar arası uzaklık mertebesinde ise, engel elektronlar için şeffaf olur [49]. Böylece engel yüksekliği için limit koşul elde edilir:

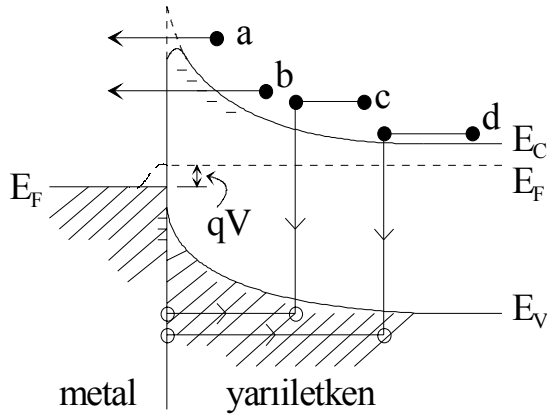
$$q\Phi_{Bn} = q(\Phi_m - \chi_s) \quad (3.8)$$

Kısaca engel yüksekliği, yarıiletkenin iş fonksiyonu ile elektron ilgisi arasındaki farktır. n-tipi yarıiletken ve p-tipi yarıiletken malzeme ile metal malzeme kontak edildiğinde, engel yüksekliği sırasıyla şu şekilde verilir:

$$\begin{aligned} q\Phi_{Bn} &= q(\Phi_m - \chi_s) \\ q\Phi_{Bp} &= E_g - q(\Phi_m - \chi_s) \end{aligned} \quad (3.9)$$

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi, azınlık taşıyıcıların iletimi sağladığı p-n eklemlerin aksine, çoğunluk taşıyıcılar ile sağlanır [49]. Doğru beslem altında MS kontaklarda kullanılan temel akım-iletim mekanizmaları (Şekil 3.18) şunlardır [49,67,70]:

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme (Alan Emisyonu (AE))
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu



Şekil 3.18. Metal/n-tipi yarıiletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizmaları: (a) potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) elektronların kuantum mekaniksel tünellemesi, (c)Uzay yük bölgesinde birleşme, (d) doğal bölgededeşik enjeksiyonu

3.5.1. Omik kontaklar

Omik kontak, yarıiletkenin hacimsel (gövde) direncine göre ya da yarıiletkenin dağılık direncine göre ihmal edilebilir derecede küçük dirence sahip olan kontaklıdır. Yarıiletkenlerde omik kontak kullanılmasının asıl amacı, elektrik akımının her iki yönde (yarıiletkene doğru ya da dışarıya doğru) akmasına izin vermektir. Kontak şu özelliklere sahip olmalıdır [63]:

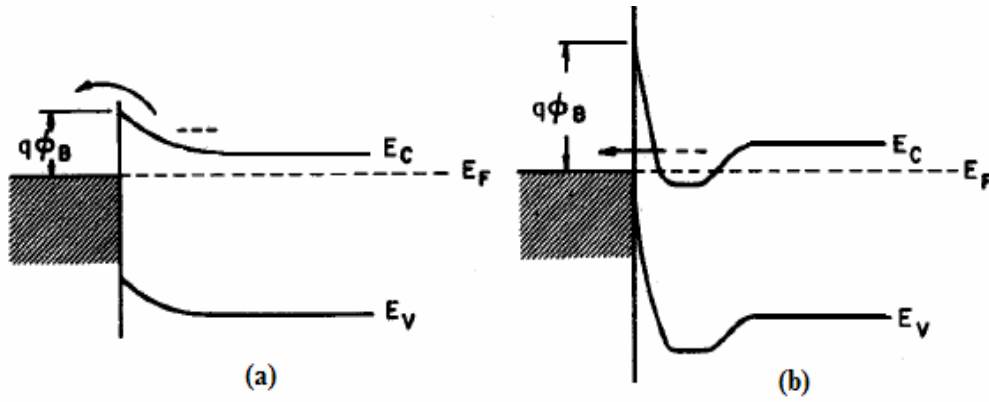
- lineer akım-gerilim karakteristiği
- zaman ve sıcaklık kararlılığı
- mümkün olduğunca küçük direnç

Kontak direncini karakterize eden en önemli parametre karakteristik kontak direncidir ve r_c ile sembolize edilir. r_c , kontakta dik olarak akan akım için birim alan başına kontak direncidir (R_c). Birimi $\Omega \cdot \text{cm}^2$ 'dir ve kısaca şu şekilde verilir:

$$r_c = R_c A \quad (3.10)$$

Günümüzde oldukça geniş uygulama alanları olan optik ve elektronik aygıtların üretiminde omik kontakların önemi oldukça fazladır. Üretilen aygıtın yüksek güçte ve frekanslarda çalışması, yaşam süresi gibi aygıt parametrelerini etkileyen en önemli parametrelerden biride kontak özellikleri yani diğer bir deyişle karakteristik kontak direncidir. Günümüzde, üretilen cihazlarda karakteristik kontak direncinin $1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ değerinden daha düşük olması amaçlanmaktadır [63].

MS kontaklarda katkı konsantrasyonu düşük ise baskın olan akım-iletim mekanizması Termiyonik Emisyon (TE) (Şekil 3.18(a)), yüksek ise Termiyonik Alan Emisyonu (TAE), kuantum mekaniksel tünellemedir (Şekil 3.18(b)). Termiyonik emisyon, doğrultucu kontaklarda, termiyonik alan emisyonu ise omik kontaklarda baskın olan bir mekanizmadır. Şekil 3.19'da düşük karakteristik kontak direnci (r_c) elde edilmesi için gerekli olan düşük engel yüksekliği ve yüksek katkı yoğunluğu durumları için enerji band diagramı verilmektedir.



Şekil 3.19. Omik kontaklar için: a) düşük engel yüksekliği ve b) yüksek katkı yoğunluğu

Omik kontaklarda TAE mekanizmasının baskın olabilmesi için yarıiletken yüksek katkılı olmalıdır, diğer bir deyişle yarıiletkendeki katkı konsantrasyonu artırılmalıdır. Yarıiletkendeki katkı miktarı arttıkça, engel yüksekliği azalır ve tünelleme meydana gelmeye başlar [49,63]. Tünelleme mekanizması için akım yoğunluğu Eş.3.11 ile verilir [49,63,72]:

$$J \approx \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{E_{oo}}\right)$$

$$E_{oo} = \frac{qh}{4\pi} \sqrt{\frac{N}{\epsilon m^*}}$$
(3.11)

Burada E_{oo} tünelleme enerjisi, N katkı konsantrasyonu, m^* etkin elektron kütlesi ve ϵ ise yarıiletkenin dielektrik sabitidir

Termiyonik emisyon (düşük katkı yoğunluğu) ve termiyonik alan emisyonu (yüksek katkı yoğunluğu) için verilen eşitlikler kontak direncini içerecek şekilde düzenlenerek şu şekilde verilir:

Düşük katkı yoğunluğu: $R_c \approx \frac{k}{qA^*T} \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{kT}\right)$ (3.12)

Yüksek katkı yoğunluğu: $R_c \approx \exp\left(\frac{q\Phi_{Bn}}{E_{oo}}\right) = \exp\left[\frac{2\sqrt{\epsilon m^*}}{\eta} \left(\frac{\Phi_{Bn}}{\sqrt{N}}\right)\right]$ (3.13)

Eş.3.9'dan görüldüğü üzere, kontak direnci R_c , katkı konsantrasyonunun kareköküyle doğru orantılı olarak azalmaktadır. O halde, omik kontak elde etmek için yapılması gereken yarıiletken yüzeyinin yüksek yoğunlukta katkılanmasıdır.

Bu amaca ulaşabilmek için, yarıiletken yüzey metal ile kaplanır ve ısı tavlama yöntemi sayesinde taşıyıcıların difüzyonu (yarıiletkenin metal ile kontak edildiği yüzeyde, yarıiletkenle doğru alaşım oluşumu) gerçekleştirilir. Taşıyıcı difüzyonu sayesinde yarıiletken yüzeyinin yüksek yoğunlukta katkılanmasını sağlar.

3.6. Omik Kontak Parametrelerinin Analizi

Kontak direnci (R_c) ve diğer kontak parametrelerinin ölçülmesi için kullanılan model kısaca şu şekilde özetlenebilir:

Elektriksel olarak iletken yarıiletken tabaka, yalıtkan alttaş ile omik metalizasyon tabakası arasında yer alır. Bu iletken tabakanın, metalizasyonun yatay boyutlarına göre oldukça ince olduğu kabul edilir. Direnç yani karakteristik kontak direnci, iletken tabaka ile metalizasyon arasında akan akım ile ilişkilidir [63].

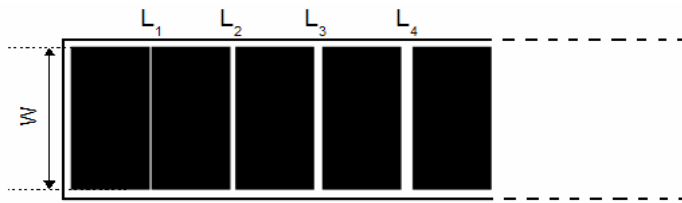
Kontak parametrelerinin elde edilmesi için kullanılan yöntemler şunlardır:

- Rezistör Network Modeli (RNM)
- Diferansiyel Model (DM)
- Transmisyon Çizgi Modeli (TLM)
- Sonlu Uzunluk Modeli (FLM)

3.6.1. Transmisyon çizgi modeli (TLM)

Burada göz önünde bulundurulması gereken en önemli kavram tabaka direncidir. Alaşım işlemi (ısı tavlama) sonucunda, kontakların altında yer alan yarıiletken tabakanın tabaka direnci R_{sh1} ile omik kontaklar arasında kalan yarıiletken malzemenin tabaka direnci R_{sh2} farklı olacaktır.

TLM ölçümlerinin yapılabilmesi için, fotolitografi yardımıyla TLM numune fabrikasyonu yapıldı. Fabrikasyonda kullanılan TLM maskesinin şematik diyagramı Şekil 3.20’de verildi.

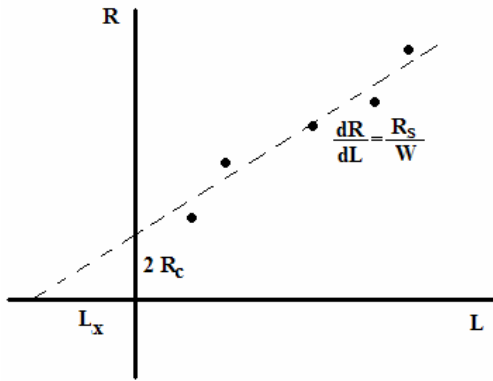


Şekil 3.20. TLM maskesinin şematik gösterimi (Metal pedler artan aralıkla birbirinden ayrılmıştır)

Şekilde yer alan iki metal ped arasında ölçülen direnç (R), iki kontak direnci ile kontaklar arasındaki yarıiletkenin direncinin toplamıdır. O halde:

$$R = 2R_c + \frac{R_{sh2}}{W} L \quad (3.14)$$

Ölçülen dirence karşı (R), kontaklar arasındaki uzaklığın (L) grafiği Şekil 3.21’de verildi.



Şekil 3.21. Ölçülen dirence karşı (R), kontaklar arasındaki uzaklığın (L) grafiği

Burada $R_{sh1}=R_{sh2}=R_s$ olarak kabul edilir. L_x , transfer uzunluğu L_t ile ilişkilidir. Transfer uzunluğu, akımın kontakdan içeri ya da dışarı yönlü akması için gerekli olan yatay uzaklıktır ve karakteristik kontak direncine şu şekilde bağlıdır:

$$r_c = R_s L_t^2 \quad (3.15)$$

$R=f(L)$ grafiği çizildiğinde, eğrinin y-eksenini kestiği nokta kontak direncinin iki katını, x-eksenini kestiği nokta transfer uzunluğunu ve grafiğin eğiminde tabaka direncini verir. Grafikten elde edilen değerler ve Eş.3.15 kullanılarak, karakteristik kontak direnci (r_c), hesaplanır.

3.7. Transmisyon Çizgi Modeli Numunelerinin Fabrikasyonu

Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu için lazer diyot fabrikasyonunda kullanılan 1,55 μm dalgaboylu InGaAsP/InP yapısı (Şekil 3.12)

kullanıldı. Şekilden de görüldüğü gibi, kontak tabakası p-tipi yoğun katkılı ($p_{Be}=2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) InGaAs tabakasıdır.

TLM numunesi için fabrikasyon adımları şu şekildedir:

Malzemenin temizlenmesi

Numunenin yüzeyindeki organik kirlerin temizlenmesi için klasik temizlik işlemi uygulandı. İşlem parametreleri:

- Aseton (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Metanol (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Deiyonize su (DIH_2O)

Fotorezistin yüzeye kaplanması

InGaAsP/InP numunesinin yüzeyi Hana 100M döner kaplama sistemi kullanılarak HMDS ve Clairant firmasına ait Az5214E nolu fotorezist ile kaplandı. İşlem parametreleri:

- HMDS için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 20s
- Fotorezist için:
 - o dönme hızı: 5000 rpm
 - o kaplama süresi: 30 s

Yumuşak ısıtma

HMDS ve fotorezistin yüzeye kaplanma işlemleri bittikten sonra ısıtma tablası kullanılarak numune ısıtıldı. Isıtma tablası parametreleri:

- Isıtma tablası sıcaklığı: 90 °C
- İşlem süresi: 1,5 dk

Pozlama ve desen terslenmesi işlemleri

Numune yüzeyine metal ped deseninin transfer edilebilmesi için Karl Suss MJB3 maske hizalama sistemi kullanıldı. Numune 7 s boyunca UV radyasyona tabi tutuldu. Pozlama işlemi bittikten sonra desen terslenmesi için, numune 120 °C’de 1 dk ısıtıldı. Isıtma işleminden sonra numune maske kullanmadan tekrar 12 s boyunca pozlandı.

Desenin geliştirilmesi

Pozlama işlemi bittikten sonra desenin geliştirilmesi için numune yine Clairant firmasına ait Az300 MIF nolu desen geliştirici solüsyon ile 50 s banyo edildi.

p-tipi metalizasyon

Metal ped deseninin numune yüzeyine transfer edilmesinden sonra, sıra p-tipi omik kontakların oluşturulmasındadır. Metalizasyon işlemi için elektron demet evaporasyon sistemi kullanıldı. Metalizasyon için kullanılan metal türleri ve kalınlıkları Çizelge 3.2’de verimiştir.

Çizelge 3.2. Omik kontak malzeme parametreleri

Kontak malzemesi	Metal kaplama hızı (Å/s)	Metal tabakanın kalınlığı (Å)
Pd/Ir/Au	1/1/5	50/150/2000
Ti/Pt/Au	1/2/5	200/300/2500
Pt/Ti/Pt/Au	1/2/2/5	200/300/300/2000
Gd/Si/Ti/Au	1/1/2/5	200/200/300/2000
Gd/Si/Pt/Au	1/1/2/5	200/200/300/2000
Gd/Si/Pt	1/1/5	200/200/2000

Fotorezistin kaldırılması

İstenmeyen kısımlardaki metal kaplamanın kaldırılması için fotorezist kaldırılma işlemi uygulandı. İşlem parametreleri:

- Aseton (5 dk, ultrasonik banyoda)
- Metanol
- Deiyonize su (DIH₂O)

SiO₂ tabakasının büyütülmesi

PECVD sistemi kullanılarak 5000 Å kalınlığındaki SiO₂ tabakası numune yüzeyinde büyütüldü. Büyütme parametreleri şu şekildedir:

- İşlem basıncı: 1000 mTorr
- Gaz akış oranları: SiH₄ (100 sccm) ve N₂O (800 sccm)
- RF gücü: 20 W
- RF frekansı: 13.56 MHz
- Tabaka kalınlığı: 5000 Å
- Büyütme hızı: 790 Å/min
- Büyütme süresi: 6,5 dk

Fotorezistin yüzeye kaplanması

SiO₂ tabakasının büyütülmesinden sonra, yüzey tekrar HMDS ve PR ile kaplandı (işlem daha önceki PR kaplama işlemiyle aynıdır).

Yumuşak ısıtma

Fotorezistin kaplanma işlemi bittikten sonra numune yumuşak ısıtma işlemine tabi tutuldu (işlem daha önceki yumuşak ısıtma işlemiyle aynıdır).

Pozlama

Mesa deseninin transferi için numune 7 s boyunca UV radyasyona tabi tutuldu.

Desenin geliştirilmesi

Numune Az300 MIF nolu desen geliştirici solüsyon ile 52 s banyo edildi.

Sert ısıtma

Isıtma tablası parametreleri:

- Isıtma tablası sıcaklığı: 120 °C
- İşlem süresi: 3 dk

SiO₂ tabakasının aşındırılması

SiO₂ tabakası RIE sistemi kullanılarak aşındırıldı. Sistem parametreleri:

- İşlem basıncı: 30 mTorr
- Gaz akış oranı: CF₄/O₂ (50 sccm)
- RF gücü: 100 W
- Hedef kalınlığı: 5000 Å
- Aşındırma hızı: 50 nm/dk
- Aşındırma süresi: 10,5 dk

InGaAs tabakasının aşındırılması

InGaAs tabakasının aşındırma işlemi, metal pedler arasındaki izolasyonu sağlamak için yapıldı. Aşındırma işlemi sonucunda akımın akması için belirli kalınlıktaki InGaAs tabakasının bulunması gerekmektedir. İşlem parametreleri:

- İşlem basıncı: 30 mTorr
- Gaz akış oranı: CH₄ (10 sccm) / H₂ (10 sccm)
- RF gücü: 150 W
- Hedeflenen aşındırma kalınlığı: 0,2 µm
- Aşındırma hızı: 52 nm/dk
- Aşındırma süresi: 4 dk

SiO₂ tabakasının aşındırılması

Yüzeyde bulunan SiO₂ tabakasının tamamen aşındırılması için BOE çözeltisi kullanılmıştır. İşlem parametreleri:

- Aşındırıcı: BOE
- Aşındırma süresi: 3 dk

Isıl tavlama

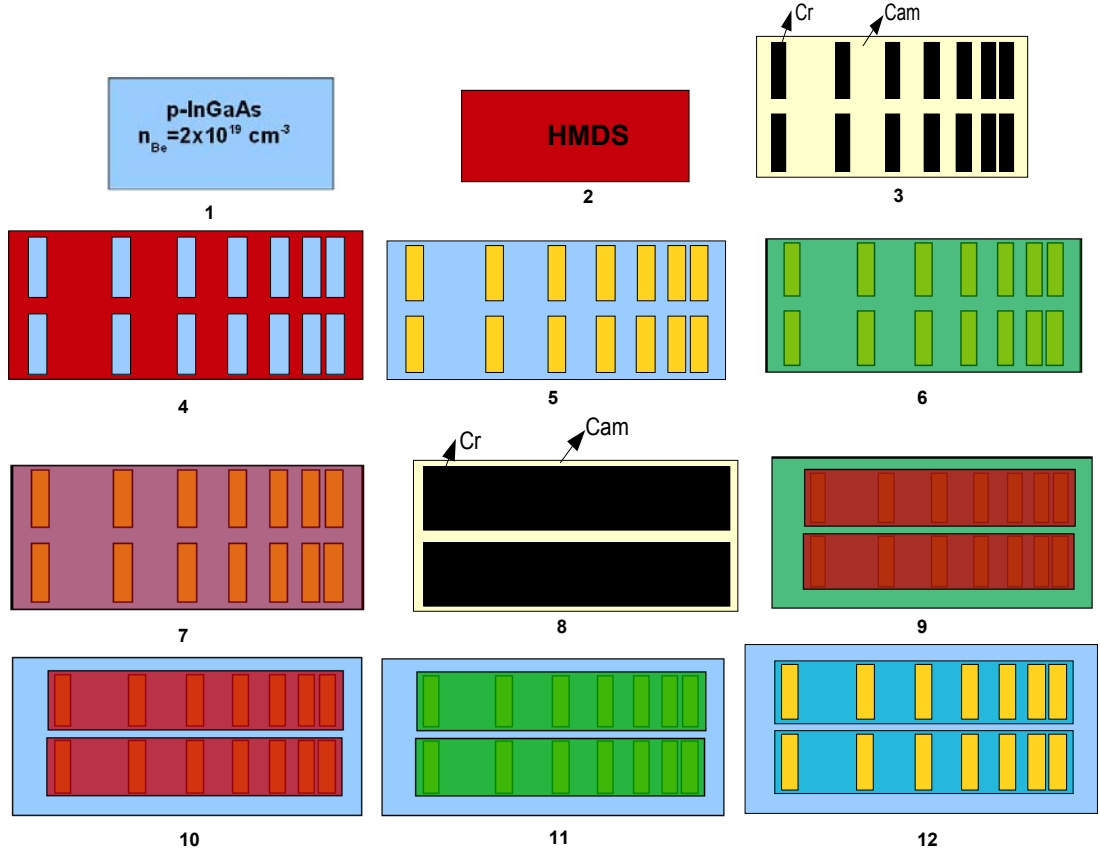
TLM numunelerinin fabrikasyon işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler tavlama koşullarının optimize edilebilmesi için birçok parçaya kesildi. Her bir parça RTA sistemi kullanılarak farklı sıcaklıklarda ve sürelerde tavllanır.

Direncin Ölçülmesi

Tavlama işlemi tamamlandıktan sonra, farklı koşullara sahip olan kontakların toplam direnci HP 4155A yarıiletken parametre analizörü kullanılarak ölçüldü ve Eş.3.13 ve 14 kullanılarak karakteristik kontak direnci değerleri hesaplandı.

3.8. Transmisyon Çizgi Modeli Numunelerinin Fabrikasyon Adımlarının Özeti

Transmisyon çizgi modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyon adımlarının şematik diyagramı Şekil 3.22’de verildi.



Şekil 3.22. TLM numunesi fabrikasyon adımları: (1) p-InGaAs kontak tabakası, (2) HMDS ve PR kaplanması, (3) negatif metal ped maskesi, (4) pozlama ve desenin geliştirilmesi, (5) metalizasyon ve fotorezistin kaldırılması (6) SiO_2 tabakasının büyütülmesi, (7) HDMS ve PR kaplanması, (8) pozitif mesa desen maskesi, (9) pozlama ve desenin geliştirilmesi, (10) SiO_2 tabakasının aşındırılması, (11) InGaAs tabakasının aşındırılması, (12) SiO_2 tabakasının aşındırılması.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışmasında çatı dalga kılavuzlu Fabry-Perot lazer diyotların fabrikasyonu için metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) sistemi ile büyütülmüş olan 1,3 ve 1,55 μm ışıma dalgaboylu InP tabanlı InGaAsP çoklu kuantum kuyulu (MQW) eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapılar (GRINSCHs) kullanıldı. Fabrikasyonu tamamlanan lazer diyotların akım-gerilim ve akım-çıkış gücü ölçümleri yapılarak lazer diyotlar için aygıt performansını belirleyen diferansiyel direnç, eşik akımı, diferansiyel kuantum verimi, iç kuantum verimi, iç kayıp ve lazerin çalışma sıcaklığı parametreleri elde edildi.

Lazer diyot parametre analizine ek olarak, lazer diyotların performansını önemli ölçüde etkileyen omik kontakların analizinin gerçekleştirilebilmesi için yine aynı numuneler kullanılarak farklı metalizasyon koşullarına sahip olan Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu yapıldı. TLM numunelerinin akım-gerilim ölçümleri yapıldı ve Transmisyon Çizgi Modeli kullanılarak omik kontaklar için en önemli kontak parametresi olan karakteristik kontak direnci hesaplandı.

4.1. Akım-Gerilim (I-V) Karakteristikleri

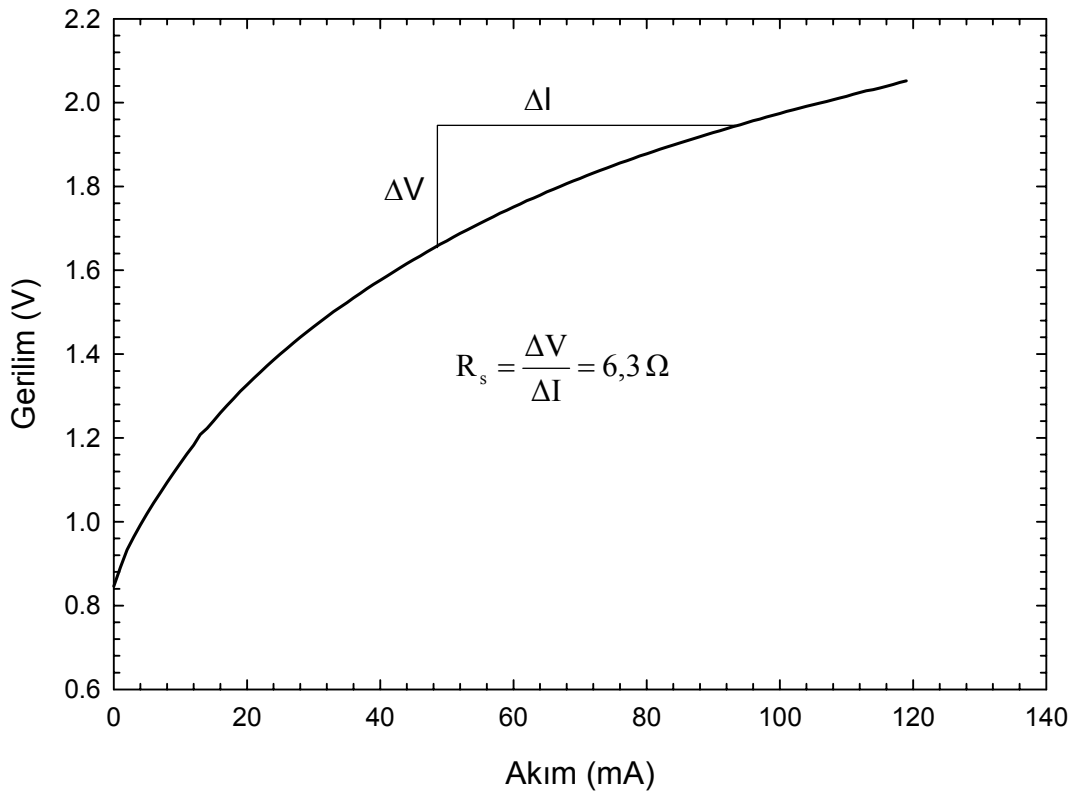
Fabrikasyonu yapılan çatı dalga kılavuzlu lazer diyotlar üç grupta incelenebilir. 1. grup, 1,3 μm ışıma dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontağa sahip olan 600 μm kavite uzunluklu lazer diyot, 2. grup 1,55 μm ışıma dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontağa sahip olan 300, 400, 500 ve 600 μm kavite uzunluklu lazer diyot ve son grup ise yine aynı ışıma dalgaboylu fakat Pt/Ti/Pt/Au omik kontağa sahip olan 300, 400, 500 ve 600 μm kavite uzunluklu lazer diyottur.

4.1.1. Diferansiyel direnç

Akım-gerilim (I-V) ölçümleri diyot özelliklerini ve elde edilen diferansiyel dirençte (R_s) aygıtın elektronik özelliklerini belirler. Eğer aygıtın üretimi başarılı ise, içerdği tipik p-n ekleminden dolayı, klasik diyot akım-gerilim eğrisi vermesi beklenir [39].

1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontağa sahip lazer diyot

600 µm kavite uzunluğuna sahip 1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği Şekil 4.1’de verildi.

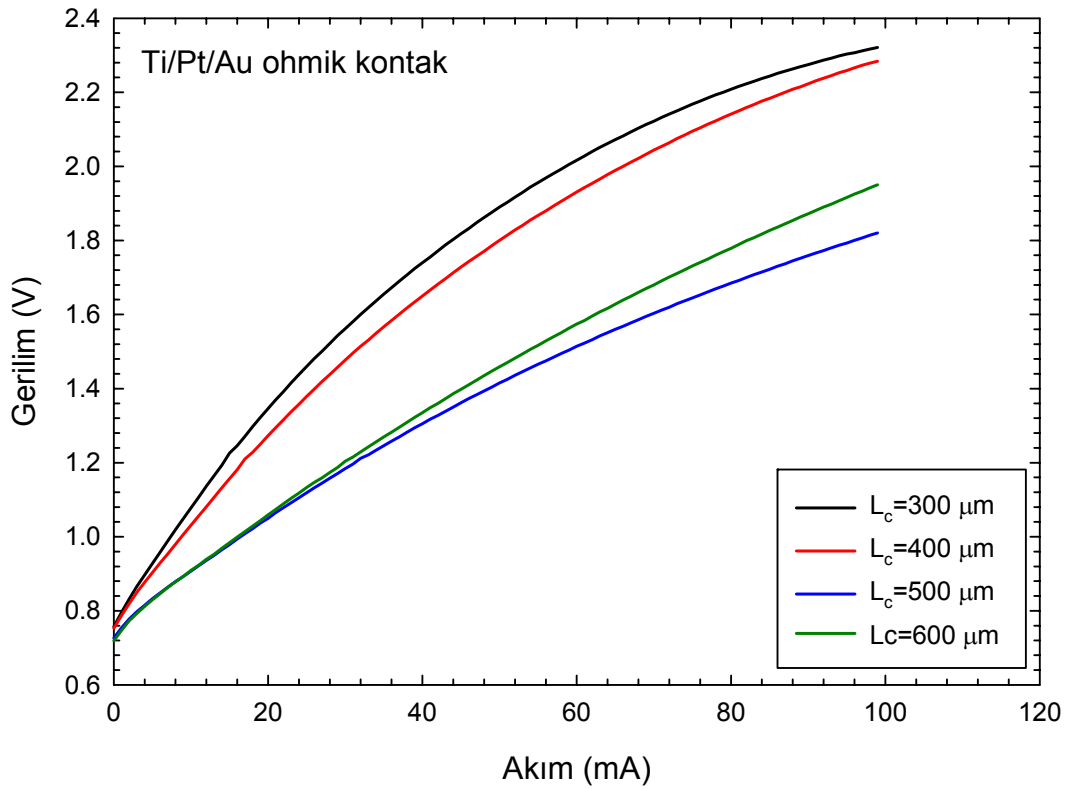


Şekil 4.1. 1,3 µm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği

İncelenen lazer diyot için diferansiyel direncin hesaplanması örnek teşkil etmesi için Şekil 4.1 üzerinde gösterilmiştir. Diferansiyel direnç değeri $R_s=6,3 \Omega$ olarak bulundu.

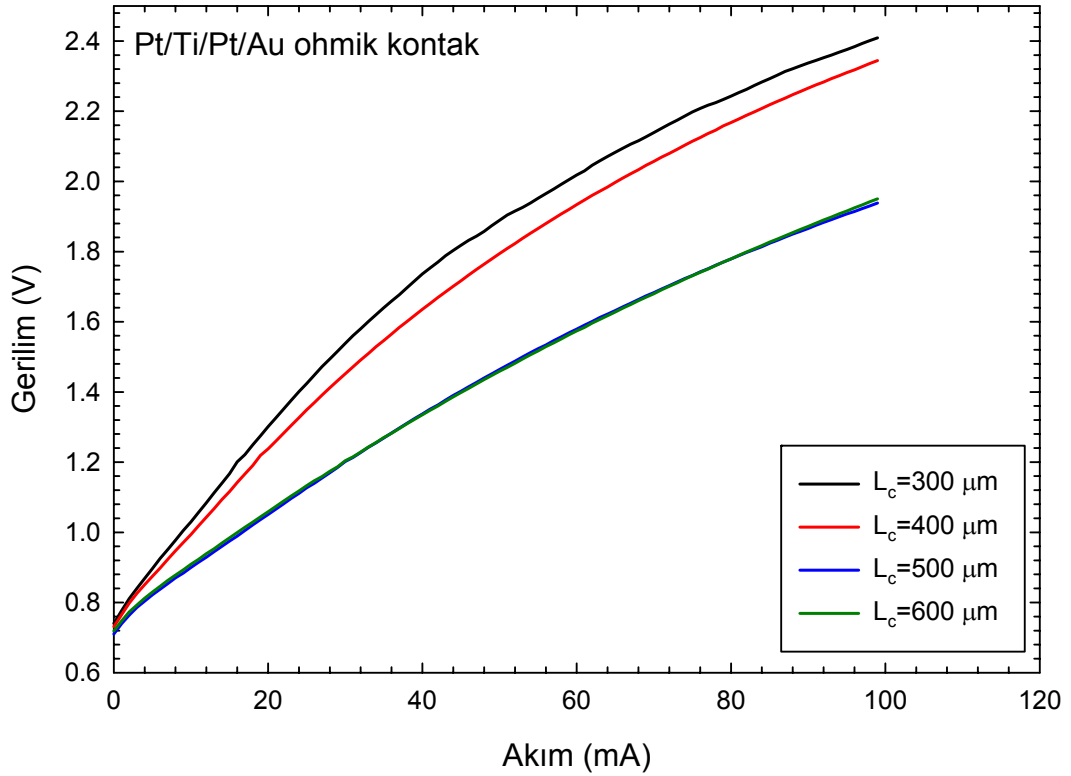
1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklara sahip lazer diyotlar

Farklı kavite uzunluğundaki 1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklara sahip olan lazer diyotlar için akım-gerilim grafikleri Şekil 4.2 ve 4.3’de verildi.



Şekil 4.2. 1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği

Farklı kavite uzunluğuna sahip ($L_c = 300, 400, 500$ ve $600 \mu\text{m}$) 1,55 μm ışıma dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için diferansiyel direnç sırasıyla 14,2, 13,0, 9,8 ve 11,2 Ω olarak bulundu.



Şekil 4.3. 1,55 μm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-gerilim grafiği

Farklı kavite uzunluğuna sahip ($L_c=300, 400, 500$ ve $600 \mu m$) 1,55 μm ışıma dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için diferansiyel direnç sırasıyla 13,4, 12,9, 11,5 ve 11,5 Ω olarak bulundu.

Farklı dalgaboylarındaki InGaAsP/InP çatı dalga kılavuzlu lazer diyotlar için diferansiyel direnç değerleri 6,3-14,2 Ω aralığında değişmektedir. Bulunan diferansiyel direnç değerleri literatürle uyumludur.

4.2. Akım-Güç (I-P) Karakteristikleri

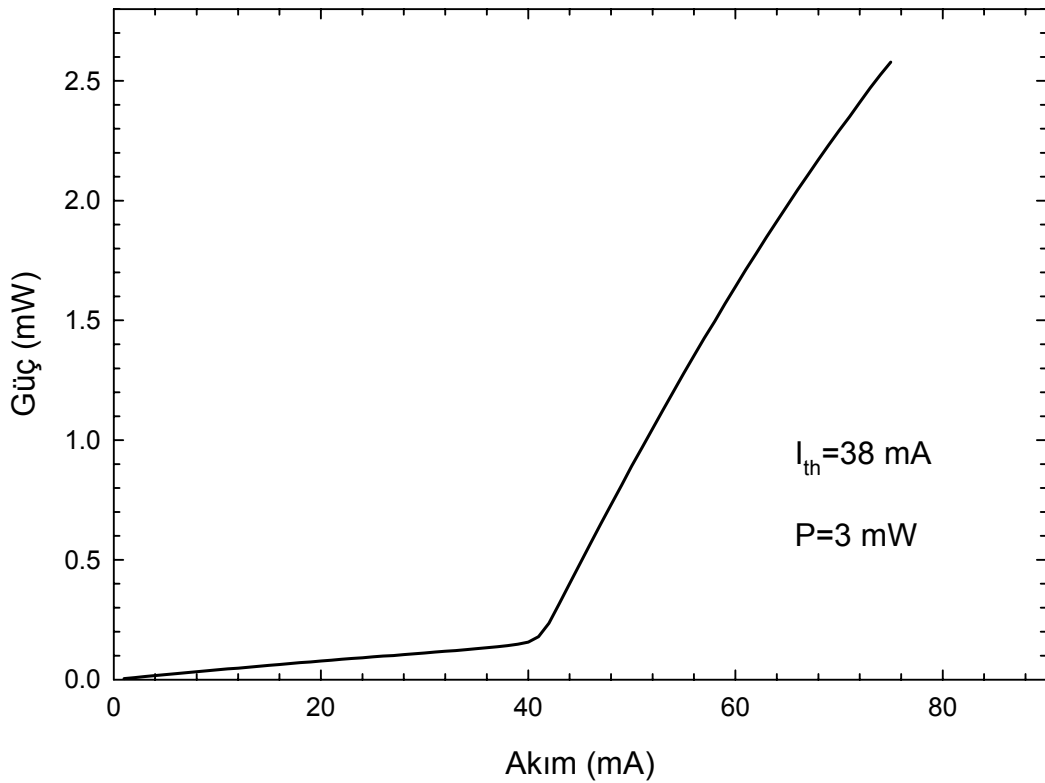
Akım-güç (I-P) ölçümleri yardımıyla lazer diyotların iç verimlilik, diferansiyel kuantum verimi, soğurma katsayısı ve karakteristik sıcaklık parametreleri elde edilir. Bu parametreler yardımıyla, fabrikasyon için kullanılan malzemenin kalitesi, fabrikasyonu yapılan lazer diyotların kalitesi ve kullanılabilirliği hakkında bilgi sahibi olunur [39].

4.2.1. Eşik akımı

Lazer diyotlara akım uygulandığında, lazer kendiliğinden salınım ile ışıyım yapmaktadır. Uygulanan akım değeri artırıldığında, aktif bölgedeki kazanç değeri artar (kazanç>kayıp) ve lazer diyotta uyarılmış salınım baskın hale gelir. Bu geçiş, I-P eğrisinin eğiminde keskin bir artışa sebep olur.

1,3 μ m dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontağa sahip lazer diyot

600 μ m kavite uzunluğuna sahip 1,3 μ m ışıma dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği Şekil 4.4’de verildi.

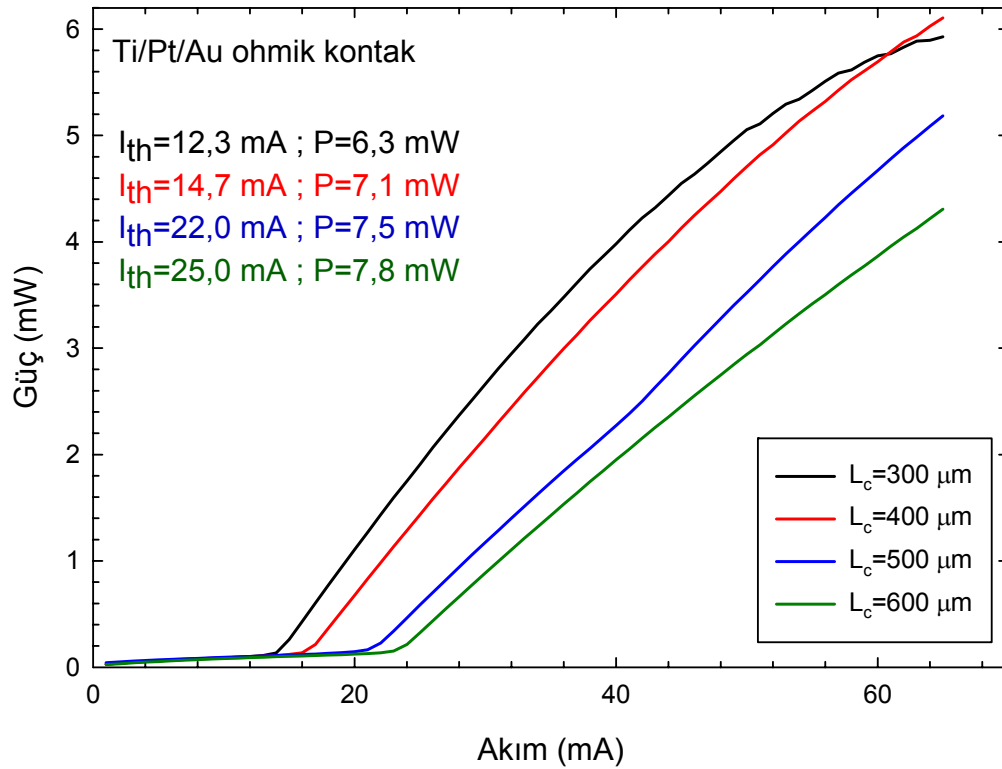


Şekil 4.4. 1,3 μ m dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği

Şekil 4.4’den görüldüğü üzere 1,3 μ m ışıma dalgaboylu lazer diyot için eşik akım değeri 38 mA’dır.

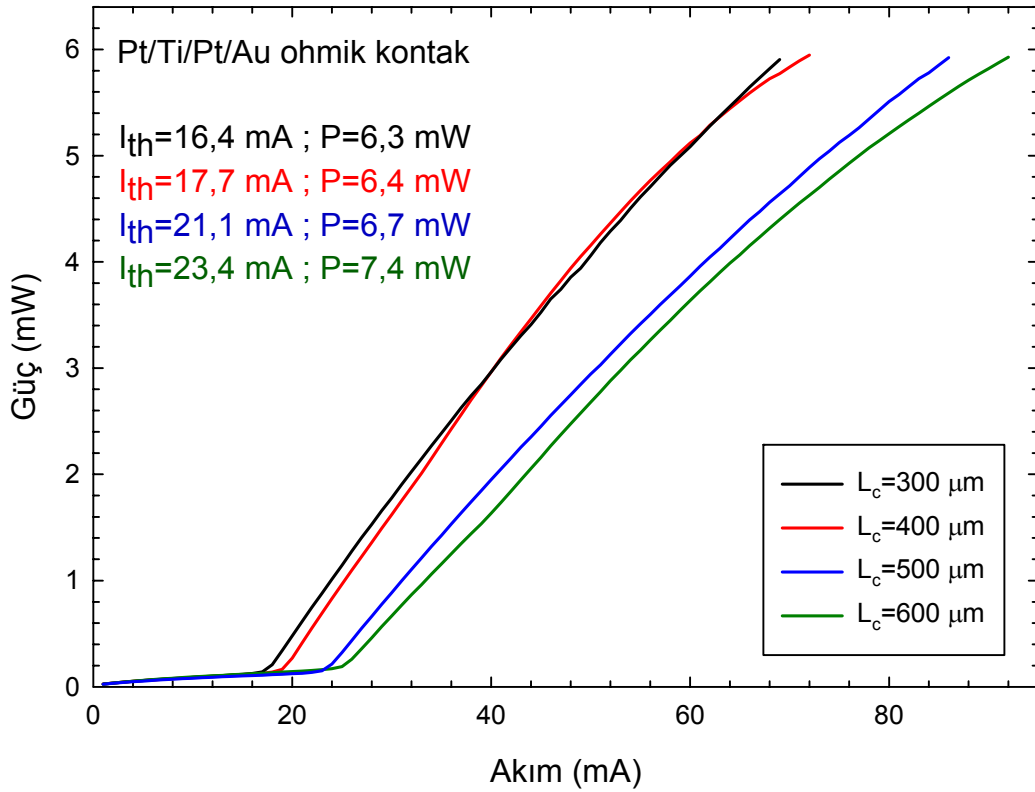
1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklara sahip lazer diyotlar

Farklı kavite uzunluğundaki 1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklara sahip olan lazer diyotlar için akım-güç grafikleri Şekil 4.5 ve 4.5'de verildi.



Şekil 4.5. 1,55 μm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği

Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için eşik akım değerleri sırasıyla 12,3, 14,7, 22,0 ve 25,0 mA olarak bulundu. Şekilden de görüldüğü gibi kavite uzunluğu arttıkça, beklendiği gibi eşik akım değerleri de artmaktadır. Bu davranış kavite uzunluğunun artmasıyla, aktif bölge hacminin ve optik kaybın artmasına atfedilir.



Şekil 4.6. 1,55 μm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için akım-güç grafiği

1,55 μm ışınım dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için eşik akım değerleri sırasıyla 16,4, 17,7, 21,1 ve 23,4 mA olarak bulundu. Şekilden de görüldüğü gibi kavite uzunluğu arttıkça, beklendiği gibi eşik akım değerleri de artmaktadır. Bu davranış kavite uzunluğunun artmasıyla, aktif bölge hacminin ve optik kaybın artmasına atfedilir.

4.2.2. Diferansiyel kuantum verimi

Diferansiyel kuantum verimi (η_d), lazer diyota enjekte edilen elektronlara karşı (uygulanan akıma karşı) p-n eklemde yaratılan fotonların (lazer ışımasını sağlayan) oranıdır. Çeşitli dalgaboylarındaki ve kavite uzunluklarındaki InGaAsP/InP lazer diyotlar için Eş.3.3 kullanılarak hesaplanan diferansiyel kuantum verimleri Çizelge 4.1’de verildi.

Çizelge 4.1. Çeşitli dalgaboylarındaki ve kavite uzunluklarındaki InGaAsP/InP lazer diyotlar için diferansiyel kuantum verimi

Lazer diyot türü (kontak türü)	L_c (μm)	η_d (%)
1,3 μm (Ti/Pt/Au)	600	15
1,55 μm (Ti/Pt/Au)	300	36
	400	33
	500	29
	600	26
1,55 μm (Pt/Ti/Pt/Au)	300	33
	400	30
	500	26
	600	24

Çizelge 4.1’den görüldüğü gibi lazer diyotlar için diferansiyel kuantum verimi kavite uzunluğuna bağlı olarak %15-%36 aralığında değişmektedir. Bulunan bu değerler InGaAsP/InP lazer diyotlar için verilen literatür sonuçlarıyla uyumludur.

4.2.3. İç kuantum verimi ve iç optik kayıp

Işımalı yeniden birleşme mekanizmasına katılan enjekte edilen taşıyıcıların oranının (iç kuantum verimi, η_i) hesaplanabilmesi için tek bir lazer diyotun yeterliliğinin aksine farklı kavite uzunluğundaki birçok lazer diyotun kullanılması gerekmektedir. Bunun sebebi ise şu şekilde açıklanabilir: lazer diyotlarda diferansiyel kuantum verimi Eş.4.1 ile verilir:

$$\eta_d = \frac{\eta_i \alpha_m}{\langle \alpha_i \rangle + \alpha_m} \quad (4.1)$$

Burada α_i iç optik kayıptır. α_m ise lazer ışığının çıktığı ön ve arka duvarlardaki toplam kayıptır ve

$$\alpha_m = \frac{1}{L} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \quad (4.2)$$

ile verilir. Bu ifadede R lazer ışığının çıktığı lazer ön ve arka duvarlarının yansıtma oranıdır ve $R \sim 0,30$ olarak alınır.

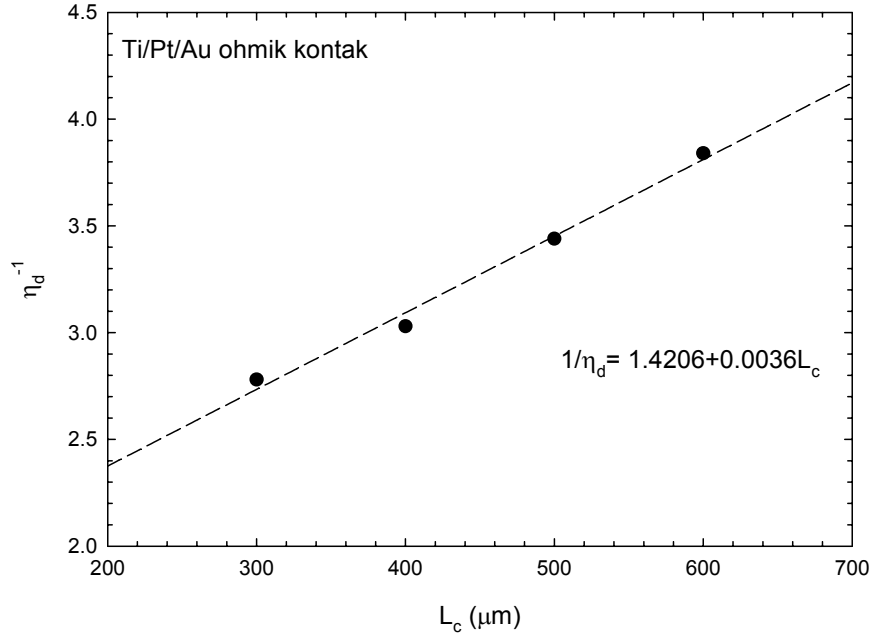
Eş.4.2 ile verilen eşitlik, Eş.4.1’de yerine yazılır ve elde edilen ifade düzenlenirse Eş.4.3 elde edilir.

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{L}{\eta_i} \frac{\langle \alpha_i \rangle}{\ln\left(\frac{1}{R}\right)} + \frac{1}{\eta_i} \quad (4.3)$$

Eş.4.3 ile verilen ifadenin tersi alındığında, Eş.3.5 ile verilen

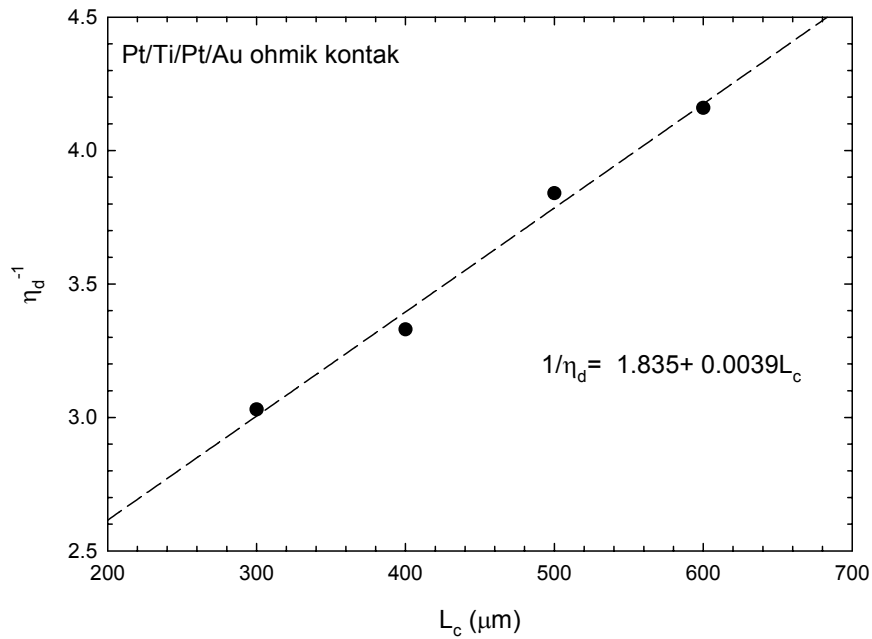
$$\eta_d^{-1} = \eta_i^{-1} \left[1 + \alpha_i \frac{L}{\ln(1/R)} \right]$$

ifadesi elde edilmiş olunur. Yukarıdaki eşitlikten de rahatlıkla görüldüğü gibi, iç kuantum veriminin (η_i) ve iç optik kaybın (α_i) hesaplanabilmesi için bilinmeyen sayısı iki olduğu için birden fazla kavite uzunluğu kullanılarak, kavite uzunluğuna (L_c) bağlı olarak diferansiyel kuantum veriminin tersinin (η_d^{-1}) grafiği çizilmelidir. Grafiğin eğimi iç optik kaybı, y-ekseninin kestiği nokta ise iç kuantum veriminin tersini verir. Şekil 4.7 ve 4.8’de farklı omik kontaklara sahip 1,55 μm ışıma dalgaboylu lazer diyotlar için kavite uzunluğu-diferansiyel kuantum veriminin tersi grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.7. 1,55 mm dalgaboylu Ti/Pt/Au omik kontağa sahip lazer diyot için kavite uzunluğu-diferansiyel kuantum veriminin tersi grafiği

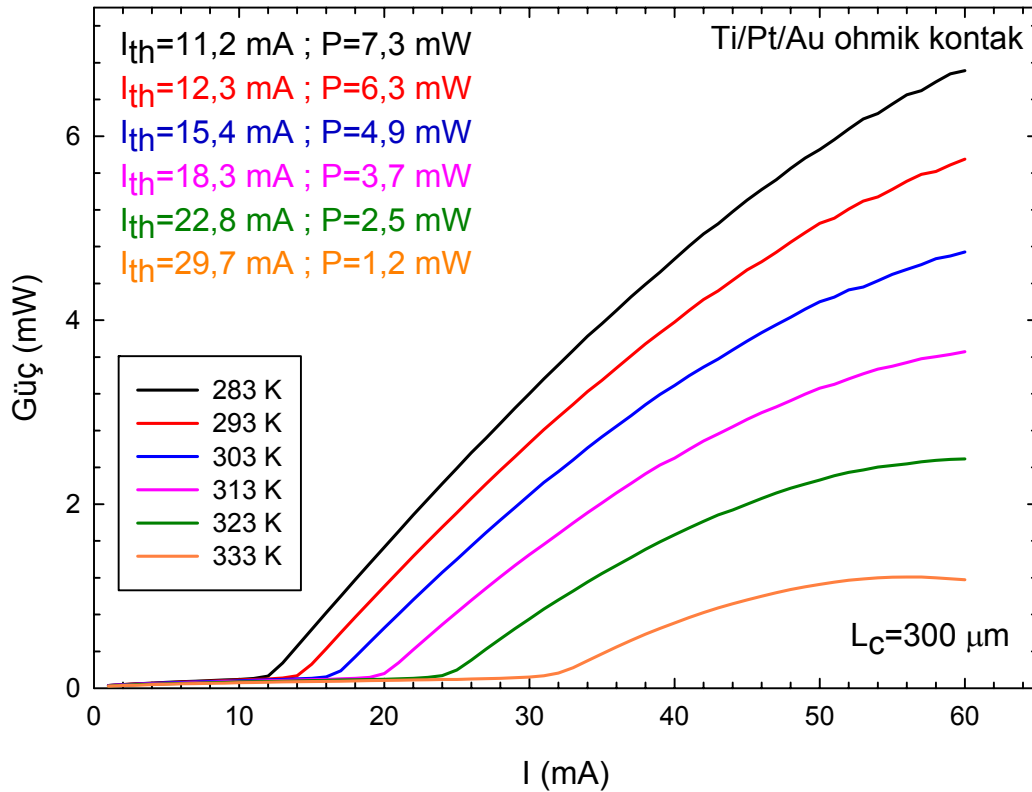
Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklara sahip lazer diyotlar için iç kuantum verimi sırasıyla, $\eta_i = \%70$ ve $\%55$, iç optik kayıp sırasıyla $\alpha_i = 30$ ve 26 cm^{-1} olarak bulundu.



Şekil 4.8. 1,55 mm dalgaboylu Pt/Ti/Pt/Au omik kontağa sahip lazer diyot için kavite uzunluğu-diferansiyel kuantum veriminin tersi grafiği

4.3. Sıcaklığa Bağlı Akım-Güç (I-P-T) Karakteristikleri

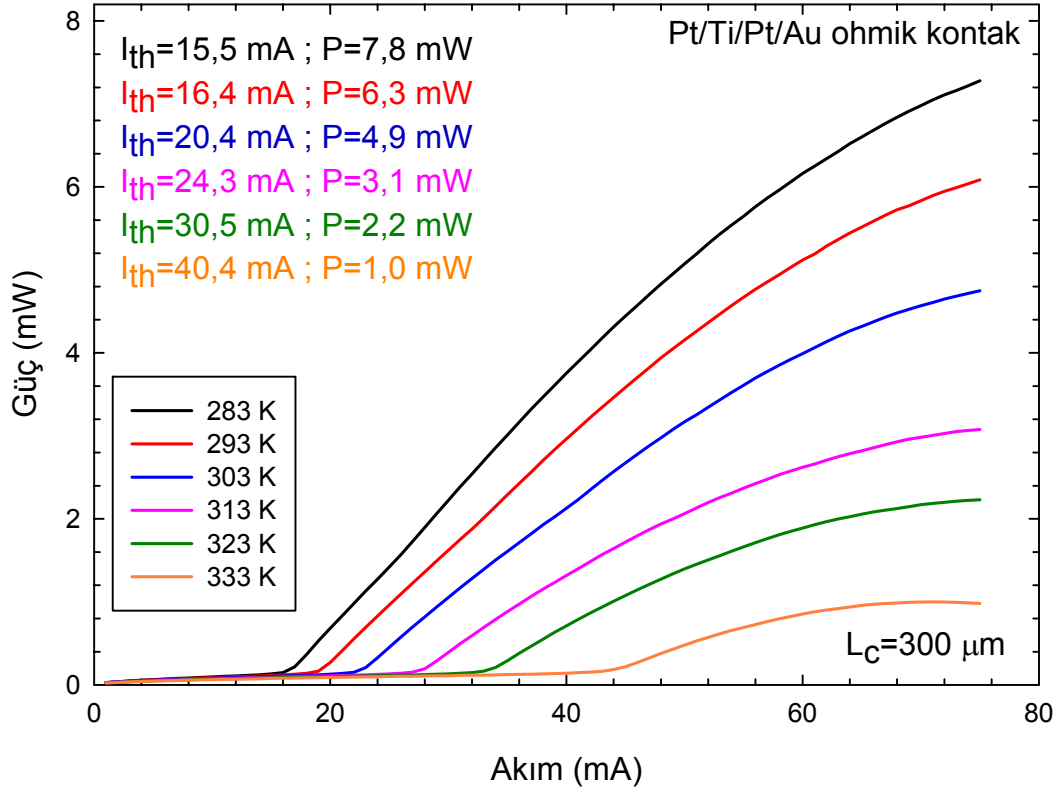
Lazer diyotların eşik akımının ve çıkış gücünün sıcaklığa bağlı olarak değişimini incelemek ve lazer diyotların çalışma sıcaklığını bulmak için farklı omik kontaklara sahip olan (Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au) 300 μm kavite uzunluklu lazer diyotların akım-güç karakteristikleri 10-60 $^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında ölçüldü ve sonuçlar Şekil 4.9 ve 10'da verildi.



Şekil 4.9. Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklığa bağlı akım-güç grafiği

Şekil 4.9 ve 4.10'dan görüldüğü üzere her iki lazer diyot içinde sıcaklık arttığında eşik akımı artmakta ve çıkış gücü azalmaktadır. Lazer diyotun sıcaklığı arttıkça, elektron ve deşiklerin dağılımı yüksek enerjilere doğru genişler. Bunun sonucu olarak enjekte edilen taşıyıcıların büyük bölümü aktif bölgeyi geçerek koruyucu tabakaya ya da kontak tabakasına ulaşırlar. Meydana gelen bu kaçak akımı nedeniyle, aktif bölgede meydana gelen elektron-deşik yeniden birleşme mekanizması azalır. Buna ek olarak, daha enerjik hale gelen elektronların yeniden

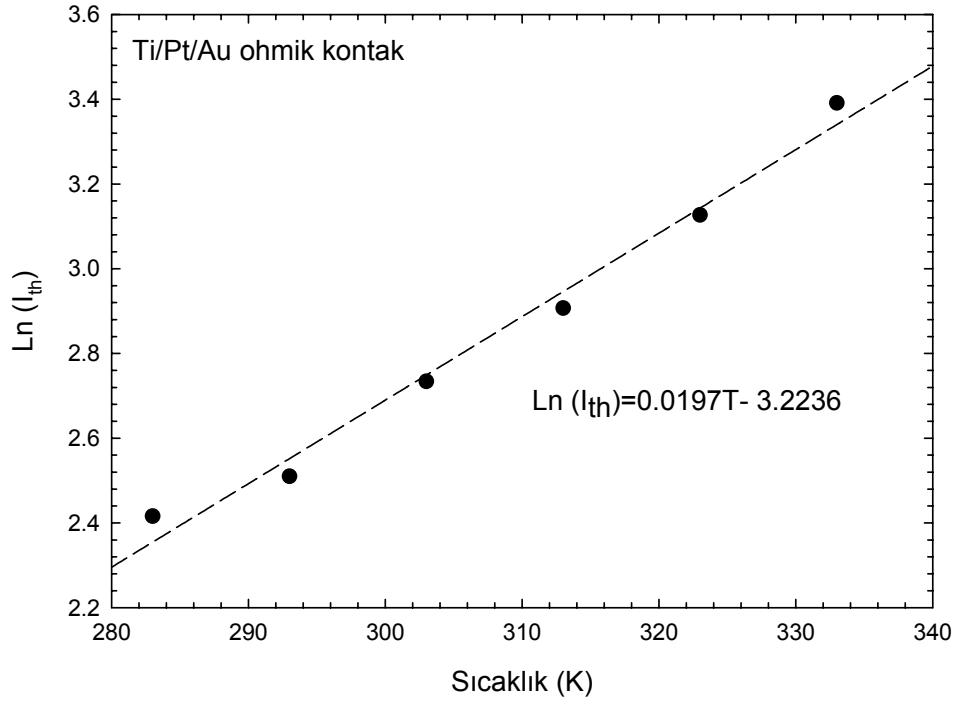
birleşme mekanizması yerine Auger mekanizmasını tercih etmeleri de eşik akımının artmasına ve çıkış gücünün azalmasına neden olur [42].



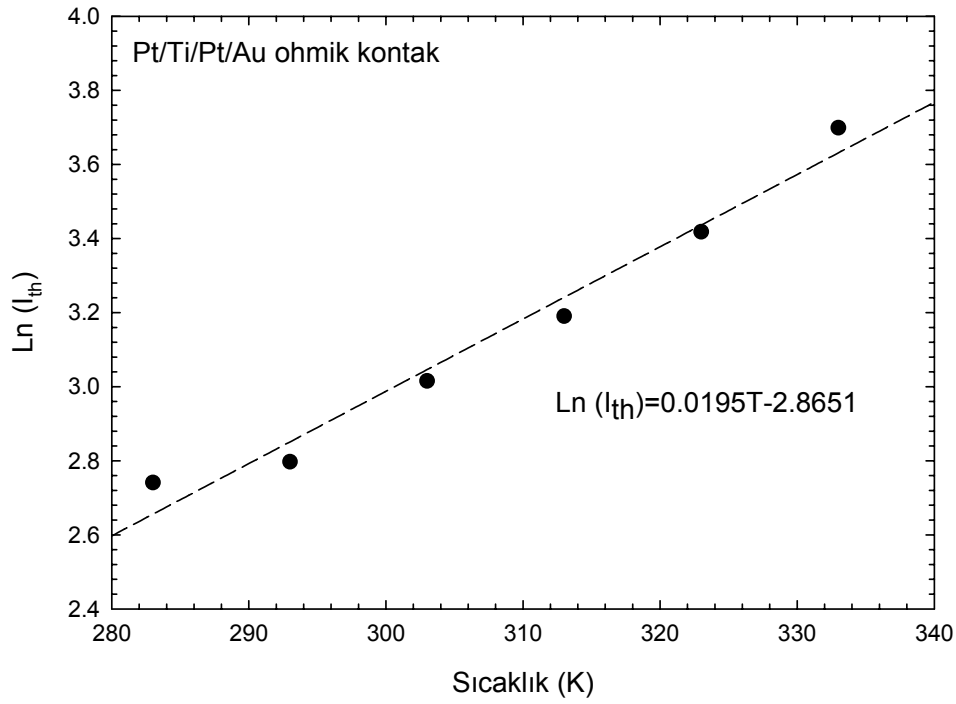
Şekil 4.10. Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklığa bağlı akım-güç grafiği

4.3.1. Karakteristik sıcaklık

Karakteristik sıcaklık (T_0), lazer diyotların en verimli olarak çalıştığı sıcaklıktır. InGaAsP/InP sistemleri için karakteristik sıcaklık değerleri 50-70 K aralığında değişmektedir [7, 42]. İncelenen lazer diyotlar için sıcaklığa bağlı logaritmik eşik akımı grafiği Şekil 4.11 ve 4.12’de verildi. Sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafikleri kullanılarak, Eş.3.5’e göre eğrilerin eğiminden karakteristik sıcaklık değerleri bulundu.



Şekil 4.11. Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafiği



Şekil 4.12. Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyot için sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafiği

Şekil 4.11 ve 4.12’de verilen sıcaklık-logaritmik eşik akımı grafiklerinden görüldüğü üzere Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklı lazer diyotlar için karakteristik sıcaklık değerleri, $T_0=51$ K olarak bulunmuştur. Bulunan bu değerler literatür ile uyumludur.

4.4. Farklı Pasivasyon Tabakalarının Lazer Diyot Parametrelerine Etkisi

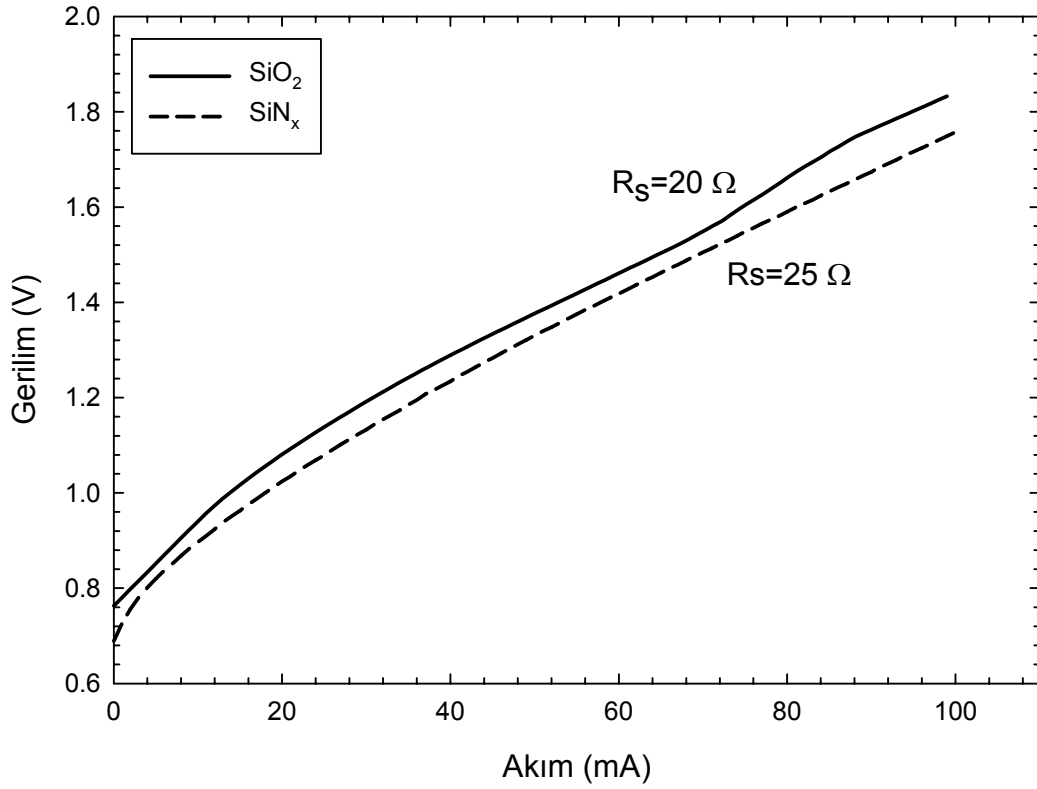
Bölüm 1’de ayrıntılı olarak açıklandığı gibi lazer diyotların kullanıldığı en önemli sahalardan birisi optik iletişimidir. Yerel iletişim ağlarında, fiberlerde düşük dispersiyon ve kayıba sahip olması nedeniyle $1,3\ \mu\text{m}$ ışımalı dalgaboylu lazer diyotlar kullanılmaktadır [28-32].

Lazer diyotların iyileştirilmesi (eşik akımının azaltılması ve çıkış gücünün artırılması) için çoklu kuantum kuyularının ve eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapıların kullanımına ek olarak optik hapislemenin iyileştirilmesi için farklı pasivasyon tabakalarıda kullanılmaktadır [33,73-76].

Bu çalışmada yapısı Şekil 3.10’da verilen $1,3\ \mu\text{m}$ ışıma dalgaboylu lazer diyot kullanıldı. Yapı iki eş parçaya bölünerek, SiO_2 ve SiN_x pasivasyon tabakalarına sahip çatı dalga kılavuzlu lazer diyot fabrikasyonu yapıldı. Fabrikasyon detayları Bölüm 3.3’de ayrıntılı olarak verildi.

Pasivasyon tabakalarının büyütülmesinden sonra, dielektrik tabakalarının kırılma indislerinin bulunması için spektroskopik elipsometri ölçümleri yapıldı. Yapılan ölçümler sonucunda pasivasyon tabakalarının $1,3\ \mu\text{m}$ ışıma dalgaboyundaki kırılma indisleri sırasıyla, $n_{\text{SiO}_2}=1,46$ ve $n_{\text{SiN}_x}=2,05$ olarak bulundu. Fabrikasyon işlemleri tamamlandıktan sonra elde edilen lazer diyotlar $600\ \mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip olacak şekilde kesildi ve lazer diyot parametre analizi yapıldı (LIV). Parametre analizi, Bölüm 3.4’de detaylı olarak verilmiştir.

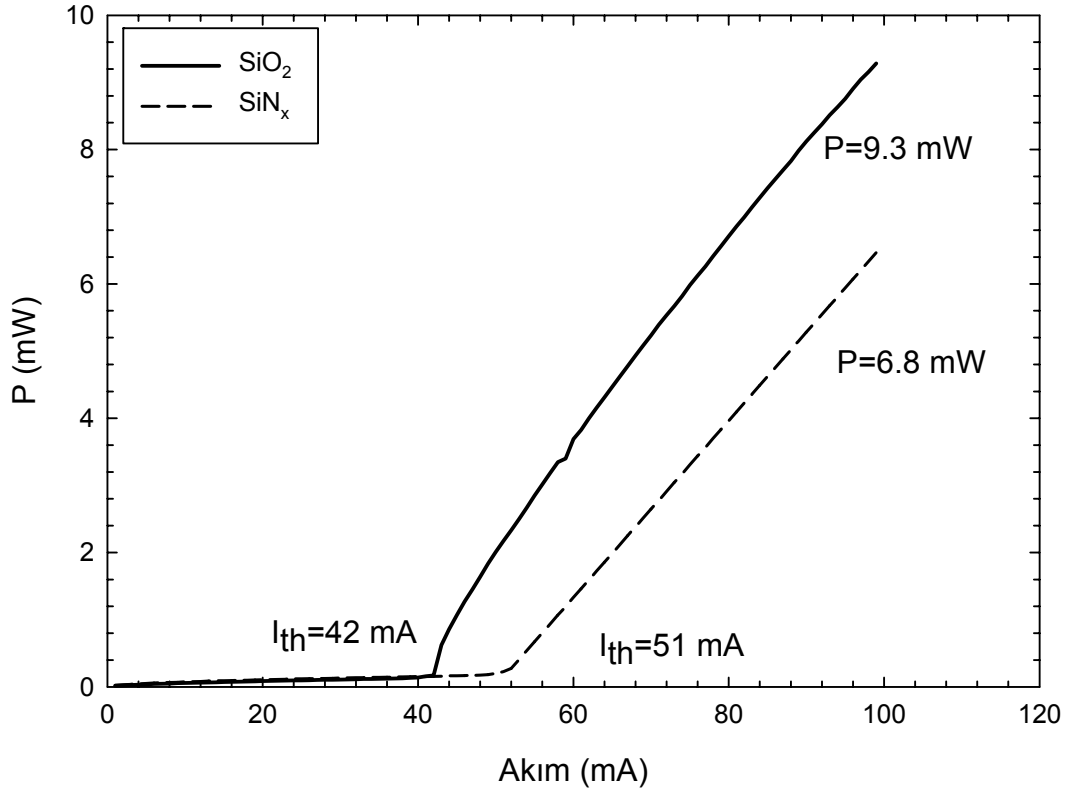
Yapılan akım-gerilim ölçümleri sonucunda her iki lazer diyot için diferansiyel direnç değerleri elde edildi. Farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-gerilim grafiği Şekil 4.13’de verildi.



Şekil 4.13. Farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-gerilim grafiği

Şekil 4.13’e göre SiO₂ ve SiN_x pasivasyon tabakalı lazer diyotların diferansiyel direnci sırasıyla 20 ve 25 Ω olarak bulundu. Akım-gerilim eğrisi yüksek seri dirençten etkilenecek, Şekil 4.13’de görüldüğü gibi lineerlikten uzaklaşır [76]. Yüksek R_s lazer diyotun aktif bölgesinden ya da GRINSCH içeren dalga kılavuzu tabakalarından kaynaklanabilir ve taşıyıcı yakalanma etkin kesirinin azalması yani iç verimin azalması ile sonuçlanır [76].

Şekil 4.14’de farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-güç grafiği verildi. Grafikten yararlanılarak eşik akımı, I_{th} ve çıkış gücü, P , değerleri elde edildi.



Şekil 4.14. Farklı pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için akım-güç grafiği

Şekil 4.14'den görüldüğü üzere SiO₂ ve SiN_x pasivasyon tabakalarına sahip olan lazer diyotlar için eşik akımı değerleri sırasıyla 42 ve 51 mA, çıkış gücü ise sırasıyla 9,3 ve 6,8 mW olarak elde edildi. I-P eğrilerinin eğiminden yararlanılarak Eş.3.3 yardımıyla diferansiyel kuantum verimleri hesaplandı. Diferansiyel kuantum verimleri SiO₂ ve SiN_x pasivasyon tabakalı lazer diyotlar için sırasıyla %32 ve %28 olarak bulundu.

Pasivasyon tabakaları karşılaştırıldığında, SiO₂ tabakasının SiN_x pasivasyon tabakasına göre daha düşük eşik akımı ve düşük diferansiyel direnç ve daha yüksek çıkış gücüne sahip olması nedeniyle daha başarılı olduğu görüldü. Bu davranış çatı yüklenmesine (Δn_r) atfedilir [33]. SiO₂ tabakasının kırma indisinin daha düşük olması ($n_{\text{SiO}_2}=1,46$ and $n_{\text{Si}_3\text{N}_4}=2,05$) nedeniyle, yani Δn_r değerinin artmasıyla (yüksek yatay kırılma indisi farkı nedeniyle), optik hapisleme daha kuvvetli olur. Bu da eşik akımının azalmasına ve çıkış gücünün artmasına neden olur [33]. Pasivasyon

özelliğinin daha iyi olması, ara durumlar nedeniyle taşıyıcı yeniden birleşme mekanizmasını artırır yani taşıyıcıların termal kaçışını azaltır [74-76].

4.5. p-InGaAs Tabakası İçin Omik Kontak Parametrelerinin Karşılaştırılması

InP tabanlı InGaAs lazer diyotlar yüksek elektron doyum hızı ve elektron mobilitesi nedeniyle optik iletişim sistemleri için oldukça önemlidir [77]. InGaAs kontak tabakalı aygıtlar için düşük Schottky engel yüksekliği nedeniyle altın içeren geleneksel Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au omik kontaklar sıklıkla kullanılmaktadır [78].

Yüksek güç ve frekansta çalışan optoelektronik aygıtların üretilebilmesi için en önemli parametrelerden birisi de aygıtın seri direncinin azaltılmasıdır. Aygıtlarda yüksek seri dirençten kaynaklanan yüksek eşik akımı, parazitik kapasitans ve ısınma problemlerinin azaltılması ve aygıt veriminin artırılması için farklı omik kontakların geliştirilmesi gerekmektedir [77-85]. Günümüzde, üretilen cihazlarda karakteristik kontak direncinin (r_c) $1 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$ değerinden daha düşük olması amaçlanmaktadır [77-85]. Geleneksel omik kontaklara ek olarak geçiş metal silikatları yarıiletken endüstrisindeki öneminden dolayı çok uzun yıllardır çalışılmaktadır. Fakat, günümüze kadar olan araştırmalarda bu konuda yapılan çalışmalar oldukça azdır. Son zamanlarda, metal silikat omik kontaklar [86] ya da Gadolinyum (Gd) gibi nadir bulunur metal silikat omik kontaklar düşük Schottky engel yüksekliği, karakteristik kontak direnci ve metalizasyon sıcaklığı gibi özelliklerinden dolayı önem kazanmaktadır [87-90]. Bu çalışmalara ek olarak, altın (Au) içermeyen omik kontaklara olan ilgi ve araştırmalar altın kullanımının sebep olduğu alaşım topakları, bozuk yüzey morfolojisi ve ışımasız yeniden birleşme merkezlerinin oluşumu gibi dezavantajlara sahip olmadıkları için gittikçe artmaktadır [78,80,91,92].

Yapılan bu çalışmada, p-tipi InGaAs kontak tabakasına sahip olan 1,3-1,55 μm ışıma dalgaboylu lazer diyotlar için yeni omik kontakların bulunması ve geliştirilmesi amaçlandı. Bu amaçla öncelikle Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu yapıldı. Fabrikasyon detayları Bölüm 3.7’de verilmiştir. Fabrikasyonu tamamlanan numunelerin akım-gerilim ölçümleri yapıldı. Elde edilen toplam direnç

verileri kullanılarak TLM'den yararlanılarak tabaka direnci ve karakteristik kontak direnci gibi omik kontak parametreleri hesaplandı [17-20]. p-InGaAs tabakası için geliştirilen altın içeren ve içermeyen nadir bulunur metal silikat omik kontaklar literatürde ilk defa çalışılmıştır.

4.5.1. Geleneksel omik kontaklar

Geleneksel omik kontaklara ait omik kontak malzeme parametreleri Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu kontaklar için Eş.3.13 ve 14'e göre hesaplanan kontak direnci (R_c), tabaka direnci (R_s) ve transfer uzunluğu (L_t) değerleri Çizelge 4.2'de, karakteristik kontak direnci değerleri ise Çizelge 4.3'de verildi.

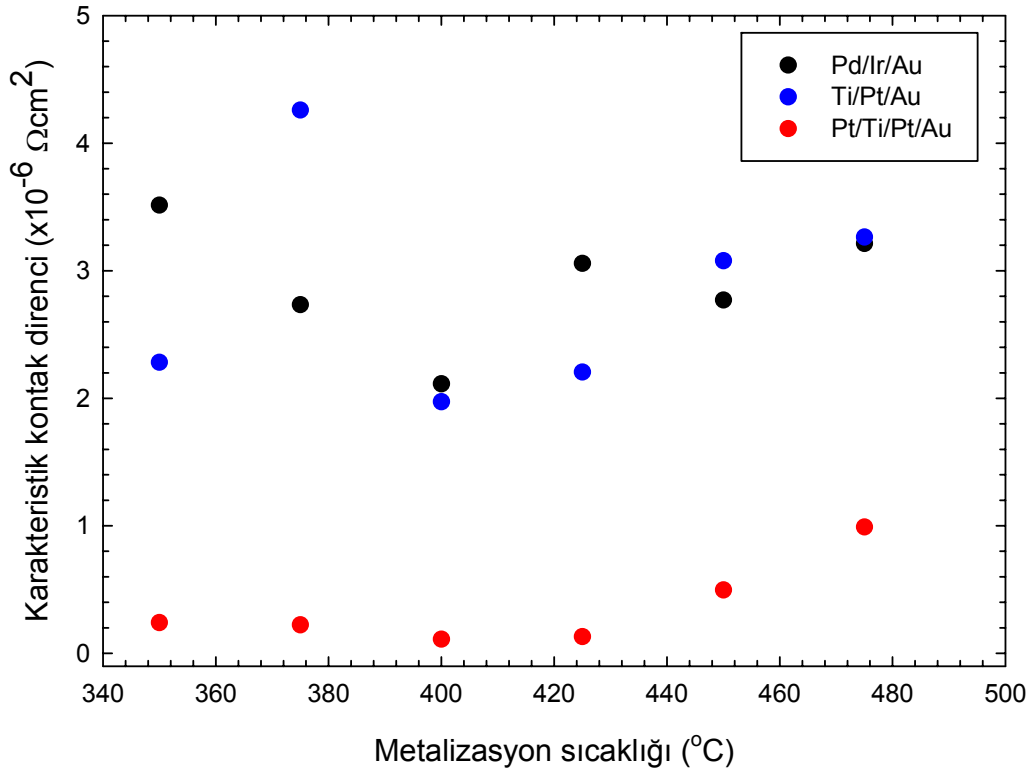
Çizelge 4.2. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı omik kontak parametreleri

Kontak Malzemesi	Pd/Ir/Au			Ti/Pt/Au			Pt/Ti/Pt/Au		
Sıcaklık (°C)	R_c (Ω)	R_s (Ω)	L_t (μm)	R_c (Ω)	R_s (Ω)	L_t (μm)	R_c (Ω)	R_s (Ω)	L_t (μm)
350	1,061	128,195	1,656	0,809	114,747	1,410	0,292	141,180	0,414
375	0,933	127,458	1,465	1,116	117,100	1,907	0,089	142,763	0,125
400	0,828	129,717	1,276	0,764	118,469	1,290	0,195	136,587	0,285
425	0,975	124,602	1,565	0,815	120,580	1,353	0,210	134,196	0,313
450	0,932	125,335	1,487	0,919	110,114	1,669	0,375	113,300	0,663
475	0,977	118,727	1,645	0,939	108,133	1,737	0,553	123,700	0,895

Çizelge 4.3. Geleneksel omik kontaklar için sıcaklığa bağlı karakteristik kontak direnci değerleri

Kontak Malzemesi	r_c [$\times 10^{-6} \Omega cm^2$]					
Tavlama sıcaklığı (°C)	350	375	400	425	450	475
Pd/Ir/Au	3,514	2,734	2,113	3,058	2,77	3,213
Ti/Pt/Au	2,282	4,260	1,972	2,206	3,077	3,264
Pt/Ti/Pt/Au	0,241	0,223	0,111	0,131	0,497	0,990

Şekil 4.15’de geleneksel omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı, karakteristik kontak direnci grafiği verildi.



Şekil 4.15. Geleneksel omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı karakteristik kontak direnci grafiği

Şekil 4.15 ve Çizelge 4.3 incelendiğinde, geleneksel omik kontaklar içerisinde 400 °C’de metalizasyon işlemi (ısı tavlama) gerçekleştirilen Pt/Ti/Pt/Au omik kontakın en düşük karakteristik kontak direncine, $r_c=0,111 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$, sahip olduğu görüldü.

4.5.2. Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar

Altın içeren (Gd/Si/Ti/Au ve Gd/Si/Pt/Au) ve içermeyen (Gd/Si/Pt) nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için omik kontak malzeme parametreleri Çizelge 3,2’de verildi. Metal silikat omik kontaklar için Eş.3.13 ve 14’e göre hesaplanan kontak direnci (R_c), tabaka direnci (R_s) ve transfer uzunluğu (L_t) değerleri ise Çizelge 4.4’de, karakteristik kontak direnci değerleri ise Çizelge 4.5’de verildi.

Çizelge 4.4 Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için sıcaklığa bağlı omik kontak parametreleri

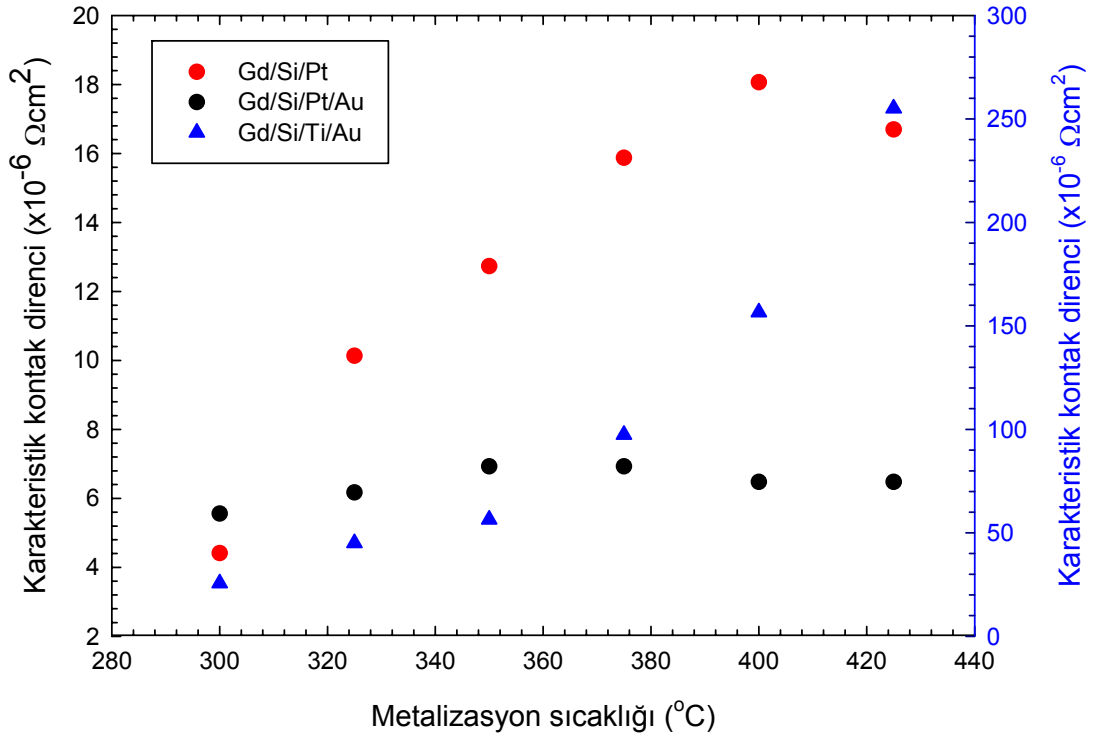
Kontak Malzemesi	Gd/Si/Pt			Gd/Si/Pt/Au			Gd/Si/Ti/Au		
Sıcaklık (°C)	R _c (Ω)	R _s (Ω)	Lt (μm)	R _c (Ω)	R _s (Ω)	Lt (μm)	R _c (Ω)	R _s (Ω)	Lt (μm)
300	1,277	147,988	1,726	1,170	98,511	2,375	3,201	159,182	4,021
325	1,912	144,358	2,649	1,210	95,025	2,547	3,969	139,657	5,683
350	2,143	144,266	2,971	1,234	87,931	2,806	4,374	135,697	6,447
375	2,352	139,431	3,374	1,234	87,931	2,806	5,482	123,432	8,883
400	2,412	128,800	3,745	1,127	78,349	2,876	4,536	116,353	7,798
425	2,371	134,667	3,521	1,127	78,349	2,876	8,490	112,968	15,030

Çizelge 4.5. Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için sıcaklığa bağlı karakteristik kontak direnci değerleri

Kontak Malzemesi	r _c [x10 ⁻⁶ Ωcm ⁻²]					
Tavlama sıcaklığı (°C)	300	325	350	375	400	425
Gd/Si/Ti/Au	25,739	45,108	56,407	97,390	156,600	255,194
Gd/Si/Pt/Au	5,558	6,166	6,924	6,9245	6,4806	6,480
Gd/Si/Pt	4,410	10,132	12,733	15,871	18,062	16,697

Çizelge 4.5’de verilen üç farklı tipteki kantağı difüzyon engeline (Pt) sahip olup olmamasına göre karşılaştırdığımızda, Pt tabakası içermeyen Gd/Si/Ti/Au omik kantağın en kötü durumda olduğunu görülmektedir, Bu davranış altının yarıiletken difüzyon etmesi nedeniyle alaşım topraklarının ve aygıt performansını kötüleştiren ışımasız yeniden birleşme merkezlerinin oluşumuna atfedilir [78,91,92].

Altın-içeren (Gd/Si/Ti/Au ve Gd/Si/Pt/Au) ve içermeyen (Gd/Si/Pt) nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı karakteristik kontak direnci grafiği Şekil 4.16’da verildi.



Şekil 4.16. Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar için metalizasyon sıcaklığına bağlı karakteristik kontak direnci grafiği

Nadir bulunur metal silikat omik kontaklar karakteristik kontak dirençlerine göre karşılaştırıldığında 300 °C’de 1 dk süreyle tavlanan Au-içermeyen Gd/Si/Pt omik kontakın en düşük karakteristik kontak direncine, $4,410 \times 10^{-6} \Omega \text{cm}^2$, sahip olduğu görüldü.

Au içeren kontakların devrelerdeki gürültüyü azaltması ve termal olarak kararlı olması gibi avantajları olmasına karşın, yüksek maliyet, düşük güvenilirlik ve yüksek sıcaklıklarda düşük kararlılık ve derin alaşım topakları gibi birçok dezavantajları vardır [78-80,85]. Bununla birlikte, omik kontak oluşum sıcaklığının düşük olması, büyütme sıcaklıkları düşük olan malzemelerde tavlama sonucunda meydana gelebilecek olan malzeme bozulmalarını minimuma indirmesi Au-içeren kontakların avantajı olarak değerlendirilebilir.

5. SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışmasında, lazer fabrikasyonu için metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) sistemi ile büyütülmüş olan 1,3 ve 1,55 μm ışıma dalgaboylu InP tabanlı InGaAsP çoklu kuantum kuyulu (MQW) eğimli kırılma indisli-ayrı hapislemeli çoklu-yapılar (GRINSCHs) kullanıldı.

Farklı ışıma dalgaboyundaki çoklu-yapılar kullanılarak, fotolitografi yardımıyla çatı dalga kılavuzlu Fabry-Perot lazer diyot fabrikasyonu yapıldı. Fabrikasyonların tamamlanmasından sonra, lazer diyotların performansını gösteren en önemli parametreler olan diferansiyel direnç (R_s), eşik akımı (I_{th}), iç kuantum verimi (η_i), diferansiyel kuantum verimi (η_d), çıkış gücü (P) ve çalışma sıcaklığı (T_o) parametrelerinin bulunabilmesi için lazer diyot parametre analizleri (akım-gerilim ve akım-güç) gerçekleştirildi.

Yapılan parametre analizleri sonucunda farklı ışıma dalgaboylarındaki ve kavite uzunluklarındaki lazer diyotlar için diferansiyel direncin (R_s) değerlerinin 6,3-14,2 Ω aralığında, eşik akımının (I_{th}) 12,3-38,0 mA aralığında, diferansiyel kuantum veriminin (η_d) %15-33 aralığında, iç kuantum veriminin (η_i) %55-70 aralığında, iç optik kaybın (α_i) 26-30 cm^{-1} aralığında ve çalışma sıcaklığının da (T_o), 51 K olduğu bulundu.

Parametre analizlerinin tamamlanmasından sonra pasivasyon özelliklerinin lazer diyot üzerindeki etkilerini incelemek için farklı pasivasyon tabakalarına (SiO_2 ve SiN_x) sahip olan lazer diyot fabrikasyonları yapıldı. Fabrikasyonların tamamlanmasından sonra akım-gerilim ve akım-güç ölçümleri yapılarak aygıt parametre analizi gerçekleştirildi. Elde edilen aygıt parametre analizi sonuçları incelendiğinde, SiO_2 pasivasyon tabakalı lazer diyotun diferansiyel direnç ve eşik akımı değerlerinin daha az olduğu, çıkış gücünün ise daha fazla olduğu görüldü. Bu davranış, SiO_2 tabakasının kırılma indisinin daha düşük olması ($n_{\text{SiO}_2}=1,46$ and $n_{\text{SiN}_x}=2,05$), nedeniyle yani Δn_r değerinin artmasıyla (yüksek yatay kırılma indisi

farkı nedeniyle) optik hapislemenin daha kuvvetli olmasına (çatı yüklenmesine) atfedildi.

Bu çalışmalara ek olarak, p-tipi InGaAs kontak tabakasına sahip olan 1,3-1,55 μm ışına dalgaboylu lazer diyotlar için yeni omik kontakların bulunması ve geliştirilmesi için çalışmalar yapıldı. Bu amaçla öncelikle Transmisyon Çizgi Modeli (TLM) numunelerinin fabrikasyonu gerçekleştirildi. Omik kontak parametrelerinin incelenmesi için geleneksel (Pd/Ir/Au , Ti/Pt/Au ve Pt/Ti/Pt/Au) ve altın içeren ve içermeyen nadir bulunur metal silikat (Gd/Si/Ti/Au, Gd/Si/Pt/Au ve Gd/Si/Pt) omik kontaklar yapıldı. Kontak özelliklerini belirleyen en önemli parametre olan karakteristik kontak direnci (r_c) ve kontak direnci (R_c), tabaka direnci (R_s) ve transfer uzunluğu (L_t) gibi diğer kontak parametrelerinin hesaplanabilmesi için TLM kullanıldı. Bu modele göre yapılan analizler sonucunda, Pt/Ti/Pt/Au geleneksel omik kontakın en düşük karakteristik kontak direncine sahip olduğu görüldü. Bilgimiz dahilinde, ilk defa bizim tarafımızdan p-InGaAs kontak tabakası için denenilen altın içermeyen Gd/Si/Pt nadir bulunur metal silikat kontakın karakteristik kontak direncinin ($r_c=4.410 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$) günümüz optoelektronik aygıt omik kontaklarının sahip olduğu karakteristik kontak direnci ($r_c \sim 1 \times 10^{-6} \Omega\text{cm}^2$) ile aynı mertebede olduğu görüldü. Buna ek olarak, Au içeren kontakların devrelerdeki gürültü azaltması ve termal olarak kararlı olması gibi avantajları olmasına karşın, yüksek maliyet, düşük güvenilirlik ve yüksek sıcaklıklarda düşük kararlılık ve derin alaşım topakları gibi birçok dezavantajlarından da kaçınılmış olundu.

KAYNAKLAR

1. Overton, G. and Anderson S.G., "Laser marketplace 2009: Photonics enters a period of high anxiety", *The Laser Focus World 2009 Annual Review and Forecast of the Laser Marketplac*, 1-30 (2009).
2. Maimann, T. H., "Stimulated optical emission in fluorescent solids", *Phys. Rev.*, 123:1145-1150 (1961).
3. Basov, N. G., Kroklin, O. N., Popov, Y. M., "Production of negative temperature states in p-n junctions of degenerate semiconductors", *Sov. Phys. JETP*, 13:1320-1323 (1961).
4. Hall, R. N., Fenner, G. E., Kingsley, J. D., Soltys, T. J., Carlson, R. O., "Coherent light emission from GaAs p-n junctions", *Phys. Rev. Lett.*, 9:366-368 (1962).
5. Holonyak, N. ve Bevacqua, S. F., "Coherent visible light emission from GaAsP junctions", *Appl. Phys. Lett.*, 1:82-85 (1962).
6. Born, M. ve Wolf, E., "Principles of Optics", 6th ed., *Pergamon Press*, Oxford, Bölüm 7.6.2 (1980).
7. Morthier, G. ve Vankwikelberge, P., "Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes", *Artech House Inc.*, London, 2-4 (1997).
8. Kroemer, H., "A proposed class of heterojunction lasers", *Proc. IEEE*, 51:1782-1783 (1963).
9. Alferov, Zh.I. ve Kazarinov, R. F., "Semiconductor laser with electrical pumping", *USSR Patent* 181737 (1963).
10. Hayashi, I., Panish, M. B., Foy, P. W., "A low threshold room temperature injection laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, 5:211-212 (1969).
11. Hayashi, I. ve Panish, M. B., "GaAs-Ga_xAl_{1-x}As heterojunction lasers which exhibit low threshold room temperature operation", *J. Appl. Phys.*, 41:150-153 (1970).
12. Hayashi, I., Panish, M. B., Foy, P. W., Sumski, S., "Junction lasers which operate continuously at room temperature", *Appl. Phys. Lett.*, 17: 109-111 (1970).
13. Alferov, Zh. I., Andreev, V. M., Portnoi E. L., Trukan, M. K., "AlAs-GaAs heterojunction injection lasers with a low room temperature threshold", *Sov. Phys. Semicond.*, 3:1107-1110 (1970)

14. Nakamura, M., Yariv, A., Yen, H. W., Somekh, S., Garvin, H. L., "Optically pumped GaAs surface laser with corrugation feedback", *Appl. Phys. Lett.*, 22: 515-516 (1973).
15. Kogelnik, H. ve Shank, C. V., "Coupled wave theory of distributed feedback lasers", *J. Appl. Phys.*, 43(5): 2327-2335 (1972).
16. Cheng, L.L., Esaki, L. ve Tsu R., "Resonant tunneling in semiconductor double barriers", *Appl. Phys. Lett.*, 24: 593-595 (1974).
17. Dupuis, R. D., Dapkus, P. D., Holonyak, N., Rezek, E. A., Chin, R., "Room temperature laser operation of quantum well $\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$ -GaAs laser diodes grown by metal organic chemical vapor deposition", *Appl. Phys. Lett.*, 32:295-297 (1978).
18. Tsang, W. T., "A graded-index waveguide separate confinement laser with very low threshold and a narrow Gaussian beam", *Appl. Phys. Lett.*, 39:134-137 (1981).
19. Adams, A. R., "Band-structure engineering for low threshold high-efficiency semiconductor lasers", *Electron. Lett.*, 22:249-250 (1986).
20. Choi, H. K. ve Wang, C. A., "InGaAs/AlGaAs strained quantum well diode lasers with extremely low threshold current density and high efficiency", *Appl. Phys. Lett.*, 57:321-323 (1990).
21. Arakawa, Y. ve Yariv, A., "Quantum well lasers-gain, spectra, dynamics", *IEEE J. Quantum Electron.*, QE-22:1887-1899 (1986).
22. Iga, K., Ishikawa, S., Ohkouchi, S., Nishimura, T., "Room temperature pulsed oscillation of GaAlAs/GaAs surface emitting junction laser", *IEEE J. Quantum Electron.*, 21:663-668 (1985).
23. McCall, S. L., Levi, A. F. J., Slusher, R. E., Pearton S.J., Logan, R. A., "Whispering-gallery mode microdisk lasers", *Appl. Phys. Lett.*, 60:289-291 (1992).
24. Carrol, J., Whiteway, J., Plumb, D., "Distributed Feedback Semiconductor Laser", *SPIE Optical Engineering Press*, UK, 1-3 (1998).
25. Kasukawa, A., Namegaya, T. Iwai, N., Yamanaka, N., Ikegami, Y., Tsukjii, N., "Extremely high power 1,48 mm GaInAsP/InP GRIN-SCH strained MQW lasers", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 6:4-6 (1994).
26. Thijs, P. J. A. ve Dongen T. V., "High quantum efficiency, high power, modulation doped GaInAs strained layer quantum well laser diodes emitting 1.5 mm", *Electron. Lett.*, 25:1735-1737 (1989).

27. Kincade, K.ve Anderson, S. G., "Laser marketplace 2008:Innovation opens the door for next wave of success", *The Laser Focus World 2008 Annual Review and Forecast of the Laser Marketplace*, 1-15 (2008).
28. Leshko, A. Yu., Lyutetskiĭ, A. V., Pikhtin, N. A., Slipchenko, S. O., Sokolova, Z. N., Fetisova, N. V., Golikova, E. G., Ryaboshan, Yu. A., Tarasov, I. S., "High power single-mode ($\lambda=1,3\ 1,6\ \mu\text{m}$) laser diodes based on quantum well InGaAsP/InP heterostructures", *Semiconductors*, 11:1308-1311 (2002).
29. Oh, S. H., Kim, K. S., Kwon, O. K., Oh, K. R., "InGaAsP/InP buried ridge waveguide laser: a new waveguide structure with an improved lateral single mode property," *ETRI J.*, 30: 480–482 (2008).
30. Selmic, S. R., Chou, T. M., Sih, J., Kirk, J. B., Mantie, A., Butler, J. K., Bour, D., Evans, G., "Design and characterization of 1.3- μm AlGaInAs–InP multiple-quantum-well lasers" *IEEE J. Select. Topics Quantum Electron*", *IEEE J. Sel. Top. Quant.*, 7: 340-349 (2001).
31. Oe, K., Ando, S., Sugiyama, K., "1.3 μm CW Operation of GaInAsP/InP DH Diode Lasers at Room Temperature ", *Japan J. Appl. Phys.*, 7: 1273-1274 (1977).
32. Takemasa, K., Munakata, T., Kobayashi, M., Wada, H., Kamijoh, T., "High-temperature operation of 1.3 μm AlGaInAs strained quantum well lasers", *Electronics Letters*, 34: 1231-1234 (1998).
33. Kaminow, I. P., Nahory, R. E., Stulz, L. W., Dewinter, J. C., "Performance of an Improved InGaAsP Ridge Waveguide Laser at 1-3 μm ", *Electronic Letters*, 17: 318-320 (1981).
34. Zah, C-E., Bhat, R., Pathak, B. N., Favire, F., Lin, W., Wang, M. C., Andreadakis, N. C., Hwang, D. M., Koza, M. A., Lee, T-P., Wang, Z., Darby, D., Flanders, D., Hsieh, J. J., "High-performance uncooled 1.3- μm $\text{Al}_x\text{Ga}_y\text{In}_{1-x-y}\text{As/InP}$ strained-layer quantum-well lasers for subscriber loop applications", *IEEE J. Quantum Elect.*, 30(2):511-523 (1994).
35. Temkin, H., Logan, R. A., Ek, T. T., "InGaAs/InP distributed feedback quantum-well lasers", *Proc. SPIE Laser Diode Technology and Applications III*, 1418:88-98 (1991).
36. Namegaya, T., Matsumoto, N., Yamanaka, N., Iwai, N., Nakayama, H., Kasukawa, A., "Effects of well number in 1.3- μm GaInAsP/InP GRIN-SCH strained-layer quantum-well lasers", *IEEE J. Quantum Elect.*, 30(2):578-584 (1994).

37. Han, I. K., Cho, S. H., Heim, P. J. S., Woo, D. H., Kim, S. H., Song, J. H., Johnson, F. G., Dagenais, M., "Dependence of the light-current characteristics of 1.55- μm broad-area lasers on different p-doping profiles", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 12(3):251-253 (2000).
38. Garbuzov, D., Xu, L., Forrest, S.R., Menna, R., Martinelli, R., Connolly, J.C., "1.5 μm wavelength, SCH-MQW InGaAsP/InP broadened-waveguide laser diodes with low internal loss and high output power", *IET Electron. Lett.*, 32(18):1717-1719 (1996).
39. Sağol, B. E., "Fabrication and characterization of semiconductor double quantum well diode lasers", *Bilkent Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-5, 7-24, 55-62 (1998).
40. Koechner, W. Ve Bass, M., "Solid-state lasers:A graduate text", *Springer*, USA, 15-20, 25-38 (2002).
41. Parker, M. A., "Physics of Optoelectronics", Thompson, B. J., *CRC Press*, FL, 2-10, 21-26, 31-34, (2004).
42. Singh, J., "Semiconductor Optoelectronics", Director, S. W., *McGraw-Hill*, NY, 521 (1995).
43. Singh, J., "Electronic and Optoelectronic Properties of Semiconductor Structures", *Cambridge*, 388-389 (2003).
44. Suhara, T., "Semiconductor Laser Fundamentals", *Marcel Dekker*, 12-25, 46, 50-53, 155 (2004).
45. "InP and Related Compounds: Materials, Applications and Devices", Manasreh, M. O., *Gordon and Breach Science Publishers*, 361-365 (2000).
46. Burt, M. G., "Linewidth enhancement factor for quantum-well lasers", *Electron. Lett.*, 20:27-29 (1984).
47. Ye, C., "Tunable External Cavity Diode Lasers", *World Scientific Publishing*, Singapore, 11-15, 17, 23-25 (2004).
48. Frosch, C. J. Ve Drrick, L., "Surface protection and selective masking during diffusion in Silicon", *J. Electrochem. Soc.*, 104:547-552 (1957).
49. Sze, S. M., "Semiconductor Devices, Physics and Technology", *John Wiley&Sons*, USA, 85-127 (2002).
50. Hecht, J. "Understanding lasers: An entry level guide", *IEEE Press*, NJ, 272-276, 281-283 (1991).

51. Manasreh, O., "Semiconductor Heterojunctions and Nanostructures", **McGraw-Hill**, NY, 166, 503-510 (2005).
52. Nag, B. R., "Physics of Quantum Well Devices", **Kluwer Academic Publishers**, Calcutta, 205-207 (2000).
53. Morthier, G., Vankwikelberge, P., " Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes", **Artech House Inc.**, Boston, London, 6-10 (1997).
54. "Handbook of Optoelectronics Volume 1", Dakin, J. P., Brown, R. G. W., **CRC Press**, FL, 389-390 (2006).
55. Apaydın, F., "Kuantum Fiziği", **Hacettepe Üniversitesi Yayınları**, Ankara, 131 (2004).
56. Madou, M., "Fundamentals of Microfabrication", **CRC Press**, USA, 1-32 (2002).
57. May, G. S., Spanos C. J., "Fundamentals of Semiconductor Manufacturing and Process Control ", **John Wiley&Sons**, NJ, 60-70 (2006).
58. "Lasers light the way to ever-shrinking chips", Lerner E. J., **Laser Focus World**, 38(7): 1-11 (2002).
59. "Lithography", **International Technology Roadmap for Semiconductors 2007 Edition, ITRS**, 1-14 (2007).
60. Dill, F.H., "Optical lithography", **IEEE Trans. on Elect. Dev.**, 22(7):440-444 (1975).
61. "AZ Photoresists", **Clairant**, 1-3 (2007).
62. "AZ 5214 E Image Reversal Photoresist", **Clairant**, 1-4 (2007).
63. Williams, R. "Modern GaAs Processing Methods", **Artech House**, Boston, 173-188 (1990).
64. Franssila, S., "Introduction to Microfabrication", **Jonh Wiley&Sons**, West Sussex, England, 49-59, 99-103, 107-110, 120-130 (2004).
65. Yu, J. S. ve Lee Y. T., "Parametric reactive ion etching of InP using Cl₂ and CH₄ gases: effects of H₂ and Ar addition", **Semicond. Sci. Technol.**, 17:230-236 (2002).
66. Chuang, S. L., "Physics of optoelectronic devices", **A Wiley Interscience**, 394-404 (1995).

67. Rhoderick, E. H. ve Williams, R. H., “Metal-Semiconductor Contacts”, **Oxford**, 150-167 (1988).
68. Bengi, A., “Al_xGa_{1-x}As/GaAs Nanoyapılarının MBE yöntemi ile büyütülmesi ve elektrofiziksel özellikleri”, Yüksek lisans, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 58-71 (2005).
69. Razeghi, M., “Fundamentals of Solid State Engineering”, **Kluwer Academic Publishers**, 338-344 (2002).
70. Sharma, B. L., “Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junction and Their Application”, **Plenum**, New York, 151-155 (1984).
71. Colinge, J. P. ve Colinge, C. A., “Physics of Semiconductor Devices”, **Kluwer Academic Publishers**, 139-150 (2002).
72. Bengi, A., Altındal, S., Özçelik, S., Agaliyeva, S.T., Mammadov, T. S., “[Analysis of temperature dependent electrical characteristics of Au/n-GaAs/GaAs structures in a wide temperature range](#)”, **Vacuum**, 83(2):276-281 (2008).
73. Liang, D., Wang, J., Hall, D. C., “High-efficiency native-oxide-passivated high-index-contrast ridge waveguide lasers”, **Electronics Letters**, 6:349-350 (2006).
74. W. D. Goodhue, **United State Patents**, US 6,933,244 B2 (2005).
75. P. Abraham, **United State Patents**, US 7,378,681 B2 (2008).
76. Tansu N., Mawst, L. J., “High-performance strain-compensated InGaAs-GaAsP-GaAs ($\lambda=1.17\ \mu\text{m}$) quantum well diode lasers”, **IEEE Photon. Technol. Lett.**, , 13: 179-181 (2001).
77. Kim, I. H., “Comparison of Pd/Ge/Pd/Ti/Au and Pd/Ge/Ti/Pt ohmic contacts to n-type InGaAs”, **Mater Lett.**, 57: 4033-4039 (2003).
78. Szerling, A., Karbownik, P., Laszcz, A., Kosiel, K., Bubajski, M., “Low-resistance p-type ohmic contacts for high-power InGaAs/GaAs-980 nm CW semiconductor lasers”, **Vacuum**, 82: 977-981 (2008).
79. Baca, A. G., Ren, F., Zopler, J.C., Briggs, R.D., Pearton, S. J., “A survey of ohmic contacts to III-V compound semiconductors”, **Thin Solid Films**, 308: 599-606 (1997).
80. Park, M. H., Wang, L.C., Cheng, J.Y., Palmstrom, C.J., “Low resistance ohmic contact scheme ($\sim \mu\Omega\ \text{cm}^2$) to p-InP”, **Appl. Phys. Lett.**, 70: 99-101 (1997).

81. Kim, I. H., "Pd/Ge/Ti/Pt/Au ohmic contact to n-type InGaAs", *Mater Lett.*, 54: 323-327 (2002).
82. Lim, J-W., Mun, J-K, Lee, J-J, "Investigation of the properties of Pd/Ge/Au/Pd/Au ohmic contacts to n-GaAs formed with different ambients", *Appl. Surf. Sci.*, 148: 34-41 (1999).
83. Jang, J. H., Kim, S., Adesida, I., "Electrical characteristics of Ir /Au and Pd /Ir / Au ohmic contacts on p-InGaAs", *Electron. Lett.*, 40: 77-78 (2004).
84. Stareev, G., Künzel, H., Dortmann, G., "A controllable mechanism of forming extremely low-resistance nonalloyed ohmic contacts to group III-V compound semiconductor", *J. Appl. Phys.*, 74:7344-7356 (1993).
85. Malina, V., Hajkova, H., Zelinka, J., Dapor, M., Micheli, V., "Non-alloyed Ti/Au ohmic contacts to p-type InGaAsP", *Thin Solid Films*, 223: 146-153 (1993).
86. Osburn, C.M., Tsai, J.Y., Sun, J., "Metal silicides: Active elements of ULSI contacts", *J. Electron. Mater.*, 25: 1725-1739 (1996).
87. Eizenberg, M., Thompson, R. D., Tu, K. N., "A study of vanadium as diffusion barrier between aluminum and gadolinium silicide contacts", *J. Appl. Phys.*, 53: 6891-6897 (1982).
88. Dozsa, L., Horvath, Zs. J., Molnar, G.L., Peto, G., Dimitriadis, C.A., Papadimitriou L., Brini J., Kamarinos G., "Electrical and low frequency noise properties of Gd and GdCo silicide contacts on n-type Si", *Semicond. Sci. Tech.*, 15: 653-657 (2000).
89. Ikeda, K., Yamashita, Y., *U.S. Patent No. 6936487 B2* (2005).
90. Hogg, S., Vantomme, A., and Wu, M.F., "Growth and electrical characterization of GdSi_{1.7} epilayers formed by channeled ion beam synthesis" *J. Appl. Phys.*, 91: 3664-3668 (2002).
91. Chen, J. S., Kolawa, E., Nicolet, M. A., Ruiz, R. P., "Ohmic contacts to n-GaAs with a Pt/Ge/Au contacting layer and a Ta-Si-N barrier: electrical and metallurgical characteristics", *J. Appl. Phys.*, 75: 7373-7381 (1994).
92. Ivey, D.G., "Platinum Metals in Ohmic Contacts to III-V Semiconductors" *Platinum Metals Rev.*, 43: 2-12 (1999).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı :BENGİ, Aylin
Uyruğu :T.C.
Doğum tarihi ve yeri: 24.10.1978 / Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : (0532) 356 45 44
e-posta : aylinbengi@gmail.com

Eğitim Bilgileri

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	G.Ü./ İleri Teknolojiler	2005
Lisans	H.Ü. / Fizik Mühendisliği	2002
Lise	Özel Arı Fen Lisesi	1996

Araştırma Tecrübesi

Tarih	Yer	Görev
2004 – 2009	G.Ü. Fizik Bölümü	Yüksek lisans ve doktora çalışmaları süresince 2001K120590 nolu DPT projesi kapsamında kurulan Yarıiletken Teknolojileri İleri Araştırma laboratuvarı (STARLAB) kurulumunda görevli öğrenci araştırmacı
2008-2009	G.Ü. Fizik Bölümü	108T018 nolu TUBITAK projesi kapsamında lazer diyot yapılarının MBE sistemi ile büyütülmesi, büyütülen yapıların lazer diyot

		fabrikasyonunun ve aygıt karakterizasyonunun yapılmasıyla görevli öğrenci araştırmacı.
2008-2009	G.Ü. Fizik Bölümü	Gazi STARLAB (Türkiye) ve AI Cuza Üniversitesi (Romanya)'nin yürüttüğü TBAG-U/220 (107A584) projesinde TiO ₂ numunelerin optik karakterizasyonlarını yapmakla görevli öğrenci araştırmacı
2008-2009	G.Ü. Fizik Bölümü	2214 nolu TUBİTAK yurt dışı araştırma burs programı kapsamında Gwangju Fen ve Teknoloji Enstitüsü, İletişim ve Kominikasyon Bölümü'nde farklı dalga boylu kuantum kuyulu lazer diyot yapılarının MBE sistemi ile büyütülmesi, fabrikasyonunun ve aygıt karakterizasyonunun yapılması ile görevli ziyaretçi araştırmacı.
2006-2008	G.Ü. Fizik Bölümü	105A005 no'lu "Füze İkaz Sistemi Geliştirilmesi Projesi" isimli TUBİTAK projesi kapsamında üretilen GaN temelli yapıların optik karakterizasyonlarını yapmakla görevli öğrenci araştırmacı.

Yabancı Dil

İngilizce

Tezle İlgili Yayınlar

SCI-indexli makaleler

1. A. Bengi, S.J. Jang, C.I. Yeo, T. Mammadov, S. Özçelik, Y.T. Lee, “A Comparative Study On Ridge Waveguide Laser Diodes with SiO₂ and SiN_x Passivation Layers”, *Surface and Interface Analysis*, kabul edildi
2. A. Bengi, S.J. Jang, C.I. Yeo, T. Mammadov, S. Özçelik, Y.T. Lee, ” Au and non-Au based rare earth metal-silicate ohmic contacts to p-InGaAs”, *Thin Solid Films*, gönderildi.

Uluslararası seminerlerde sunulmuş bildiriler

3. A. Bengi, S.J. Jang, C.I. Yeo, T. Mammadov, S. Özçelik, Y.T. Lee, “A Comparative Study On Ridge Waveguide Laser Diodes with SiO₂ and SiN_x Passivation Layers”, *ECASIA-09 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis*, Antalya, Turkey (Ekim 2009).

Ulusal seminerlerde sunulmuş bildiriler

4. A. Bengi, S.J. Jang, C.I. Yeo, T. Mammadov, S. Özçelik, Y.T. Lee, “p-InGaAs Tabakası İçin Au-içeren ve –içermeyen Nadir Bulunur Metal silikat Ohmik Kontaklar”, *16. Yoğun Madde Fiziği-Ankara Toplantısı*, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye (Kasım 2009).