



**HİBRİT SİLİSYUM / III-V
YARIİLETKEN LAZERLER**

Hilal Kübra SAĞLAM

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Bilim Dalı
Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK
2017
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİBRİT SİLİSYUM / III-V YARIİLETKEN LAZERLER

Hilal Kübra SAĞLAM

**ELEKTRİK - ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Elektronik Bilim Dalı**

**ERZURUM
2017**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü
TEZ ONAY FORMU



HİBRİT SİLİSYUM / III-V YARIİLETKEN LAZERLER

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Hilal Kübra SAĞLAM tarafından hazırlanan bu çalışma, 21/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Elektronik Bilim Dalı'nda yüksek lisans tezi olarak **oybirliği (3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

İmza :

Üye : Doç. Dr. Bülent ÇAVUŞOĞLU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Çağlar DUMAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun 22/06/2017 tarih ve 25/43 nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİBRİT SİLİSYUM/III-V YARIİLETKEN LAZERLER

Hilal Kübra SAĞLAM

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Elektronik Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Bu tezde son yıllarda popüler olan hibrit yarıiletken lazerlerin modelleme çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yarıiletken lazerler üstün performanslarından, akımla doğrudan modüle edilebilmelerinden ve kompakt olmalarından dolayı optik haberleşme sistemlerinde sıklıkla tercih edilmektedir. Elektriksel ara bağlantılar, haberleşme sistemlerinde hız ve zayıflama sorununa sebep olduğu için bu ara bağlantılardan ziyade günümüzde tamamen optik iletişim sistemleri kullanılmaktadır.

Bu çalışmada silisyum malzeme üzerine büyütülen fotonik yapıların ışık kalitesinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla, LaserMOD ticari yazılım programı kullanılarak modelleme yapılmıştır. Ritz metodu kullanılarak 1300 nm dalgaboyuna sahip InGaAsP/InP malzeme simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonda tasarlanan lazerin optik çıkış gücü ve kazancı analiz edilmiştir.

2017, 80 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yarıiletken Lazerler, Silisyum Fotonik, Fotonik Tümleşik Devreler, SOI, Hibrit Entegrasyon

ABSTRACT

Master Thesis

HYBRID SILICON/III-V SEMICONDUCTOR LASERS

Hilal Kübra SAĞLAM

Atatürk University
Faculty of Engineering
Department of Electrical-Electronics Engineering
Department of Electronics

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

In this thesis, modeling studies of hybrid semiconductor lasers, popular in recent years, have been carried out. Semiconductor lasers are often preferred in optical communication systems due to their superior performance, direct modulation with the current, and compactness. Since electrical interconnection causes the problem of speed and attenuation in communication systems, optical interconnection systems are mostly used in these systems.

In this study, it is aimed to investigate the quality of light output in photonic structures grown on silicon substrate. Modelling was carried out using LaserMOD commercial software program. InGaAsP / InP material simulation with a wavelength of 1300 nm was performed using the Ritz method. The optical output power and gain of the designed laser are analyzed.

2017, 80 pages

Keywords: Semiconductor Lasers, Silicon Photonics, Photonic Integrated Circuits, SOI, Hybrid Integration

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez danışmanlığımı yürüten ve hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK'a, çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübelerini paylaşan Sayın Yrd. Doç. Dr. Çağlar DUMAN'a teşekkür ederim.

Gerek eğitim hayatım boyunca gerekse diğer zamanlarda beni destekleyen değerli aileme teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Hilal Kübra SAĞLAM

Haziran, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Motivasyon.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Lazerler.....	3
2.2. Lazerlerin Çalışma Prensipleri	4
2.2.1. Tersinir popülasyon (Optik kazanç)	4
2.2.2. Optik geri besleme.....	6
2.3. Işıma Çeşitleri ve Soğurma	8
2.3.1. Uyarılmış soğurma (Stimulated Absorption)	8
2.3.2. Kendiliğinden ışıma (Spontaneous emission)	8
2.3.3. Uyarılmış ışıma (Stimulated emission)	9
2.4. Yarıiletken Lazerler (Diyot Lazerler).....	10
2.5. Fotonikte Silisyumun Önemi.....	12
2.6. Hibrit Silisyum III-V Yarıiletken Lazerler.....	18
2.6.1. Entegrasyon çeşitleri	24
2.6.1.a. Flip-chip teknolojisi.....	24
2.6.1.b. Monolitik entegrasyon.....	25
2.6.1.c. Heterojen entegrasyon	27
2.6.2. Yapıştırma teknikleri	28
2.6.2.a. Moleküler yapıştırma.....	28
2.6.2.b. Yapışkan yapıştırma	29
2.6.2.c. Metal yapıştırma	29
2.7. Fabry-Perot Lazerler.....	30

2.8. SOI Lazerler	33
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	36
3.1. LaserMOD	36
3.2. Simülasyonda Kullanılan Lazer Modelleri.....	38
3.2.1. Fabry-Perot.....	38
3.2.2. Silicon on Insulator (SOI)	40
3.3. 1300 nm InGaAsP Tasarımı	41
3.3.1. Taban (Si/SiO ₂)	43
3.3.2. Alt kaplama tabakası (InP)	45
3.3.3. SCH (InGaAsP).....	45
3.3.4. Bariyer ve QW (InGaAsP)	46
3.3.4. Üst kaplama tabakası (InP).....	47
3.3.5. Aşındırma durdurma tabakası (InGaAsP)	48
3.3.6. Kplama tabakası (InP)	49
3.3.7. Kontak tabakası (InGaAs).....	49
3.3.8. Oksit tabakalar ve Elektrotlar.....	50
3.4. Simülasyon Parametreleri.....	51
3.4.1. Bias tablosu	51
3.4.2. Kazanç hesabı.....	52
3.5. Rayleigh-Ritz İterasyon Metodu	53
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	58
4.1. Mesh	58
4.2. Profil.....	59
4.3. Mod	61
4.4. Malzeme Kazancı	63
4.5. Işık-Akım-Gerilim Eğrisi	64
4.6. Optik Spektrum	65
4.7. Modal Kazanç.....	67
4.8. Kendiliğinden Işıma (Spontane Emisyon)	68
4.9. Yakın Alan (Near Field).....	68
4.10. Uzak Alan (Far Field).....	71
4.11. Geçici Cevap (Transient Response)	73

4.12. Frekans Cevabı (Frequency Response)	74
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	75
KAYNAKLAR	77
ÖZGEÇMİŞ	81



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

f_v	Valans Bandı Fermi-Dirac Dağılımı
$ M ^2$	Momentum Matris Elemanı,
c	Işığın Boşluktaki Hızı
c	Işık Hızı
e	Elektron Yüğü
E	İki Seviye Arası Fark
E_1	Alt Seviye Enerjisi
E_2	Üst Seviye Enerjisi
E_g	Yasak Enerji Aralığı
E_x	Aktif Ortamdaki İlk Enine Modun Yayılımında Sahip Olduğı Elektriksel Alan Yoğunluğu
f_c	İletim Bandı Fermi-Dirac Dağılımı
GaAs	Galyum Arsenit
Ge	Germanyum
g_m	Malzeme Kazancı
g_{mod}	Modal Kazanç
h	Planck Sabiti
InGaAs	İndiyum Galyum Arsenit
InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenit Fosfat
InP	İndiyum Fosfat
InP	İndiyum Fosfat
L	Aynalar Arası Uzaklık
m_0	Serbest Elektron Kütlesi
m_c	İletim Bandı Elektron Kütlesi
m_{hh}	Valans Bandı Yoğun Boşluk Etkin Kütlesi
m_n	Tam Değer Alan Dalgaboyu Parametresi
n	Kazanç Bölgesi Kırılma İndisi

N	Taşıyıcı Yoğunluğu
n_a	Kırılma İndisi
Si	Silisyum
SiO ₂	Silisyum Dioksit
α	Birim Uzunluk Başına Efektif Kayıp
Γ	Optik Hapsolma Faktörü
ϵ_0	Vakum Geçirgenliği
λ	Dalgaboyu
ν	Frekans
ν	Frekans

Kısaltmalar

BCB	Benzosiklobüten
BOX	Gömülü Oksit Tabaka
BPM	Kiriş Yayılım Yöntemi
CMOS	Bütünleyici Metal Oksit Yarıiletken
DBR	Dağıtılmış Bragg Reflektör
DFB	Dağıtımli Geri Bildirim
DVS	Divinilsiloksan
FEM	Sonlu Element Metodu
FP	Fabry-Perot
FTTH	Eve Kadar Fiber
GUI	Grafiksel Kullanıcı Yüzü
IoT	Nesnelerin İnterneti
LASER	Uyartılmış Radyasyon Işıma İle Işık Güçlendirilmesi
LED	Işık Yayan Diyot
LSI	Geniş Ölçekli Tümleşim
MASER	Uyartılmış Radyasyon Işıma İle Mikrodalga Yükseltilmesi
MQW	Çoklu Kuantum Kuyusu
MZM	Mach-Zehnder Modülatörü

NEP	Doğrusal Olmayan Özdeğer Problemleri
PB	Paket Engelleyici
PD	Fotonik Cihaz
PhC	Fotonik Kristal
PIC	Fotonik Tümlüşik Devre
QW	Kuantum Kuyuları
RIA	Rasyonel Enterpolasyon Yaklaşımı
RIN	Bağıl Yoğunluklu Gürültü
RO	Gevşeme Osilasyonu
SAMB	Seçici Alan Metal Yapıştırma
SCH	Ayrık Sınırlandırılmış Hetero-Yapı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SOA	Yarıiletken Optik Yükselteç
SOI	Yalıtkan Üzeri Silikon
SSC	Benek Boyutlu Dönüştürücü
TeC	Sıcaklık Kontrolü
VCSEL	Dikey Boşluğu Yüzeye Yayan Lazer
VOA	Değişken Optik Zayıflatıcı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Silisyum enerji diyagramı.....	2
Şekil 2.1. Dört seviyeli bir sistemde enerji popülasyonu	5
Şekil 2.2. Fabry-perot rezonatör şeması	7
Şekil 2.3. Uyarılmış soğurma	8
Şekil 2.4. Kendiliğinden ışıma.....	9
Şekil 2.5. Uyarılmış ışıma.....	9
Şekil 2.6. Yoğun şekilde zenginleştirilmiş p-n eklemi	11
Şekil 2.7. (a)-(c) III-V dalga kılavuzuna ince silikon bağlamak için geleneksel aşındırma işlemi (d)-(e) Önerilen büyütme işlemi.....	14
Şekil 2.8. Optik mod bindirilmiş Fabry-Perot lazer yapısının şematik gösterimi	31
Şekil 2.9. Ters çevrilmiş adyabatik konik bir yaklaşım için optik kuplaj şeması.....	32
Şekil 2.10. Üst aktif dalga kılavuzundan alt silikon dalga kılavuzuna süpermodun transferini gösteren bir koniğin üstten ve yandan görüşleri	32
Şekil 3.1. Lazer yapısı seçimi	37
Şekil 3.2. Çizim seçenekleri.....	38
Şekil 3.3. Örnek Fabry-Perot lazer çizimi	39
Şekil 3.4. Örnek SOI lazer çizimi	40
Şekil 3.5. InGaAsP/InP hibrit lazer yapısı	42
Şekil 3.6. SOI yapı içermeyen InGaAsP/InP lazer yapısı.....	42
Şekil 3.7. SiO ₂ taban bileşeninin özellikleri	43
Şekil 3.8. Si taban bileşeninin özellikleri.....	43
Şekil 3.9. Si sırt(ridge) taban bileşeninin özellikleri	44
Şekil 3.10. Üst SiO ₂ taban bileşenlerinin özellikleri.....	44
Şekil 3.11. Alt kaplama tabaka özellikleri	45
Şekil 3.12. Alt SCH tabaka özellikleri.....	46
Şekil 3.13. Üst SCH tabaka özellikleri	46
Şekil 3.14. Bariyer tabaka özellikleri.....	47
Şekil 3.15. QW tabaka özellikleri	47
Şekil 3.16. Üst kaplama tabaka özellikleri	48

Şekil 3.17. Aşındırma durdurma tabaka özellikleri	48
Şekil 3.18. Kaplama tabaka özellikleri	49
Şekil 3.19. Kontak tabaka özellikleri.....	50
Şekil 3.20. Oksit tabakaların özellikleri.....	50
Şekil 3.21. Elektrotların özellikleri.....	51
Şekil 3.22. Işık-Akım-Gerilim grafiği için bias değerleri belirlenmesi	51
Şekil 3.23. Geçici cevap ve Frekans cevabı için bias değerlerinin belirlenmesi	52
Şekil 3.24. Kazanç hesabı için parametrelerin belirlenmesi	53
Şekil 4.1. Lazerin örgü yapısı	58
Şekil 4.2. MQW örgü yapısı	58
Şekil 4.3. Lazer kesiti.....	59
Şekil 4.4. Dikey kesit profili	59
Şekil 4.5. Dikey kesit profilde MQW yapının belirtilmesi.....	60
Şekil 4.6. Yatay kesit profili	60
Şekil 4.7. Lazerin mod yayılımı.....	61
Şekil 4.8. Lazerin sırt(ridge) bölgesinde mod yayılımı	62
Şekil 4.9. Modun yatay kesit görüntüsü	62
Şekil 4.10. Malzeme kazanç eğrisi	63
Şekil 4.11. Hibrit lazerin ışık-akım-gerilim eğrisi.....	64
Şekil 4.12. SOI yapı içermeyen lazerin ışık-akım-gerilim eğrisi.....	65
Şekil 4.13. Hibrit lazerin optik spektrumu.....	66
Şekil 4.14. SOI yapı içermeyen lazerin optik spektrumu	66
Şekil 4.15. Modal kazanç eğrisi.....	67
Şekil 4.16. Kendiliğinden ışıma(Spontane emisyon) eğrisi.....	68
Şekil 4.17. Hibrit lazerin yakın alan(Near field) spektrumu.....	69
Şekil 4.18. Yakın alan spektrumu dikey kesiti	70
Şekil 4.19. SOI yapı içermeyen lazerin yakın alan spektrumu	70
Şekil 4.20. Hibrit lazerin uzak alan (Far field) spektrumu	71
Şekil 4.21. Uzak alan spektrumu dikey kesiti.....	72
Şekil 4.23. Geçici (Tranzient) cevap.....	73
Şekil 4.24. Sistemin frekans cevabı	74

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. InGaAsP/InP lazer yapısı.....	41
--	----



1. GİRİŞ

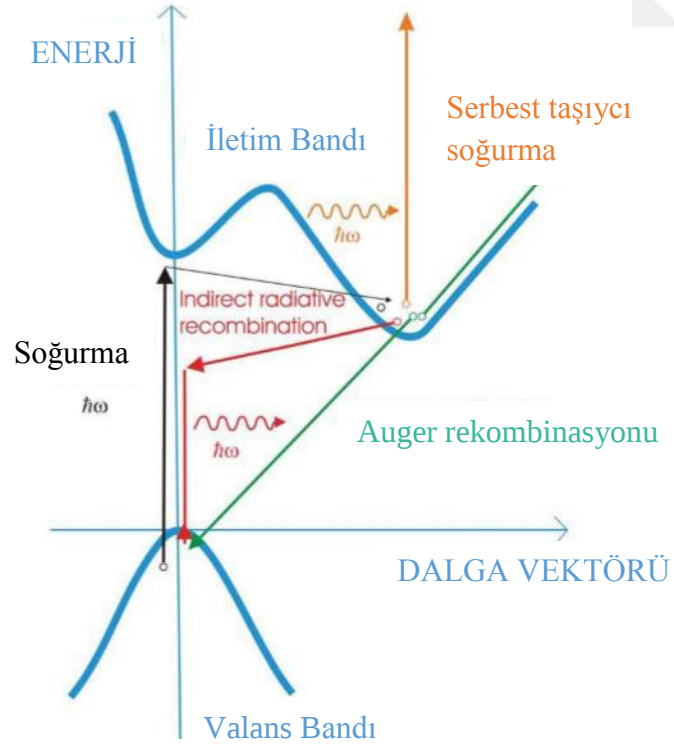
Bir mikroelettronik çipe fotonik bir entegre devre eklenebileceği düşünöldüğünde, son derece düşük bir maliyetle milyarlarca elektronik fotonik entegre cihaz imal edilebilir. Son on yılda, silikon fotonığın hızlı bir şekilde geliştiği bilinmektedir. Birçok araştırma kurumu bu teknolojiye yatırım yapmış, üniversiteler ve araştırma merkezleri ile işbirliği içinde önemli araştırma projeleri başlatılmıştır. Silikon fotonik, silikon üretim standartları ve fotonik arasındaki buluşma noktası olmayı hedeflemektedir. Düşük maliyetli silikon üretimini fotonığa uyarlayarak farklı fotonik yapı taşları, yonga üzerindeki bir silisyum ağıta entegre edilebilir. Böylece fotonik devre ve mikro elektronik devreyi içeren tek bir çip gerçekleştirmek mümkün olabilir.

1.1. Motivasyon

Mikroelettronik açıdan bakıldığında silikon fotonik, mikroişlemci ve bilgisayar hızını artırmak için kullanılan ve optik iletişim imkanı sağlayan bir teknolojidir. Mikroelettronik endüstrisi, çip içi bağlantıların sınırlamasını çözmelidir. Telekomünikasyon şirketleri, her geçen gün artan data (haberleşme ve internet için) ihtiyacını karşılamak için fotonik cihazların üretim maliyetlerini azaltmalıdır.

INTEL ve IBM gibi uluslararası şirketler, olgunlaşmış silisyum teknolojisinden ve fotonığın yüksek hızından istifade etmek için, mikroelettronik devreler üzerine fotonik ağıtlar entegre ederek yeni hibrit mimariler önermişlerdir. En büyük iletişim endüstrileri arasında Alcatel-Lucent ve NTT gibi şirketler de gelişen bu yeni alan içinde yer almak ve hibrit teknolojiyi telekomünikasyon sektörüne entegre etmek için çalışmalar yürütmektedirler. Muhtemelen önümüzdeki birkaç yıl içerisinde bu teknolojiyi temel alan bazı ürünler piyasaya sürülecektir. Mikroelettronik ve fotonik entegrasyonun başarısı için temel bileşenlerden oluşan küçük bir dizi optik işlevsellik sağlanmalı ve entegrasyon için bir hibrit yonga geliştirilmelidir.

Yalıtkan üzeri silisyum yongalar üzerine gerçekleştirilen dalga kılavuzları, dizi dalga kılavuzu ızgaraları, dikey kuplörler, kutup rotatörleri, filtreler vb. pasif cihazlar iyi bir performans sergilemektedirler. 40 Gbit Si modülatörler, pin ve çığ fotodetektörleri gibi aktif aygıtlar geleneksel optik teknolojilere kıyasla yakın ve bazen daha iyi performans göstermektedirler. Bununla birlikte, fotoniklerin CMOS üzerinde yaygınlaşmış bir endüstriyel seviyeye getirilmesinden önce çözülmesi gereken birçok zorluk vardır. Silikon fotonik için yapı taşları arasında eksik olan unsur, yüksek performanslı ve düşük maliyetli bir lazer kaynağının olmayışıdır. Bir lazerin doğrudan silikon üzerinde gerçekleştirilmesi, silikonun özellikle fiziksel özelliklerinden dolayı zordur. Silikonun elektronik bant yapısı, uyarılmış emisyonu verimli bir şekilde elde etmek için doğrudan bir bant aralığı sunmamaktadır. Bu kısıtlılığın üstesinden gelmek için, III-V yarıiletkenlerin yalıtkan üzeri silisyum yonga levhasının üzerine heterojen entegrasyonu önerilmiştir. Silisyumun basitleştirilmiş enerji diyagramı Şekil 1.1’de gösterilmektedir (Lamponi 2013).



Şekil 1.1. Silisyum enerji diyagramı (Lamponi 2013)

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Lazerler

İlk olarak 1917 yılında Albert Einstein tarafından uyartılmış ışımının varlığı öne sürülmüştür. Landenburg (1928) uyartılmış ışımının varlığını ve negatif soğurmayı kanıtlamıştır. Gazların katılara göre daha iyi enerji seviyelerine sahip olması ve yayılma şartlarının daha uygun olması nedeniyle ilk araştırmalar gaz lazerler üzerine yapılmıştır. Javan, Bennett ve Herriot (1951) kızıl ötesi bölgede çalışan helyum – neon lazerini keşfetmişlerdir. Uyartılmış ışım ile mikrodalga yükseltici anlamına gelen MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) C. H. Townes tarafından 1953 yılında keşfedilmiştir. Dicke (1954) bir ters toplanma meydana getirmek için kısa bir uyarma darbesi kullanma teorisini ortaya atmıştır. Gould (1957) lazer yapısının bir parçası olan Fabry-Perot kaviteyi tasarlamıştır. Daha sonra T.H. Maiman tarafından 1960 yılında keşfedilen LASER (Light Amplification of Stimulated Emission by Radiation) ise uyarılmış radyasyon salınımıyla ışığın güçlendirilmesi anlamına gelmektedir. Maiman, optik frekansta lazer operasyonunu gerçekleştirmiştir ve yakut lazerinin varlığını kanıtlamıştır. Hall tarafından 1962 yılında yarıiletken lazerin keşfi gerçekleştirilmiştir. Bu keşiften sonra lazer kullanımında oldukça önemli gelişmeler olmuştur.

Lazer ışığı, diğer tüm ışık kaynaklarından farklı olarak;

- Faz uyumlu (koheran)
- Tek renkli (monokromatik)
- Düzgün ve yoğundur.

2.2. Lazerlerin Çalışma Prensipleri

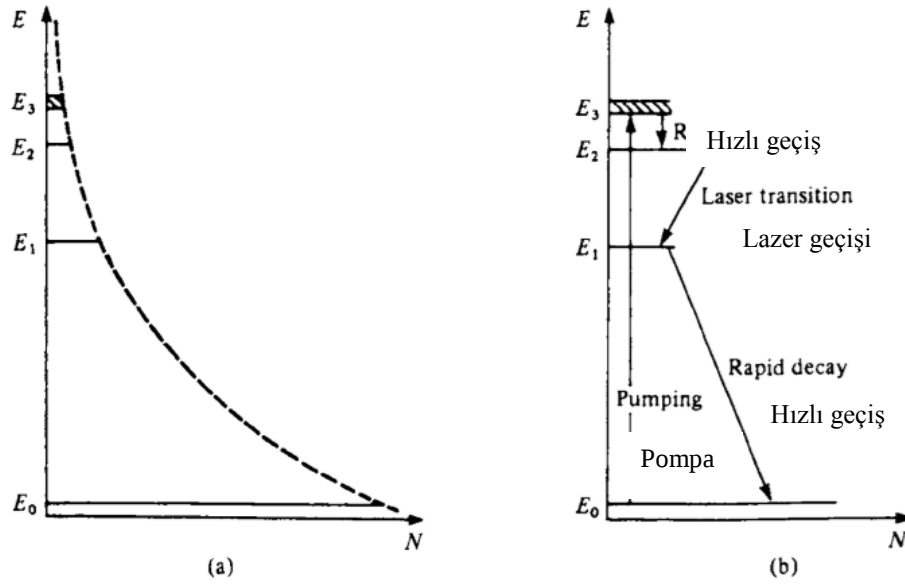
Lazerin temeli atom veya molekül enerji düzeyleri arasındaki elektron geçişleri ile oluşan ışık fotonlarına dayanır.

Lazer aslında bir osilatördür. Koheran ışımada elde etmek için kullanılır ve optik frekanslarda çalışır. Lazer osilasyonunun gerçekleşmesi için aşağıdaki şartların sağlanması gerekmektedir.

- 1) Tersinir Popülasyon (Optik Kazanç)
- 2) Optik Geri Besleme

2.2.1. Tersinir popülasyon (Optik kazanç)

Elektronlar yapıları gereği iletim bandından valans bandına inme eğilimindedirler. Bu nedenle denge durumunda valans bandındaki elektron sayısı iletim bandındaki elektron sayısından fazladır. Ancak tersinir popülasyon için güçlendirilmiş radyasyon yoluyla uyarılmış ışımada olması gerekir. Uyarılmış ışımada ise iletim bandındaki elektron sayısının valans bandındaki elektron sayısından fazla olması durumunda gerçekleşir. Sonuç olarak herhangi bir anda, iletim bandındaki elektron sayısının valans bandındaki elektron sayısından fazla olması durumuna tersinir popülasyon denir. Şekil 2.1’de dört seviyeli bir sistemin enerji popülasyonu gösterilmiştir (Wilson and Hawkes 1998).



Şekil 2.1. Dört seviyeli bir sistemde enerji popülasyonu
(a) pompalama öncesi (b) pompalama sonrası (Wilson and Hawkes 1998)

Yarıiletken lazerlerde optik kazancın gerçekleşmesi için optik dalganın büyük bir kısmının aktif bölgede olması gerekir. Çünkü sadece bu bölgede uyarılmış ışıma katkıda bulunulur. Optik kazancın sağlanması için tersinir popülasyon gereklidir. Lazerlerdeki temel hedeflerden biri eşik akımının düşük olmasıdır. Aktif bölge kalınlığı, eşik akımı ile doğru orantılı olduğu için bu kalınlık azaldığı takdirde eşik akımı da azalır. Ancak belli bir değerden sonra optik sınırlama azalacağı için eşik akımı artar. Ayrıca aktif bölge çok ince tabakalardan oluşmuşsa eşik akımı küçük değerlerde seyreder. Kimyasal, elektriksel veya optik pompalama tersinir popülasyon için kullanılabilir. Optik kazanç, lazerin dalgaboyu, spektral genişlik, eşik akımı ve verim gibi önemli karakteristik özellikleri için belirleyicidir.

Optik kazanç, yarıiletken lazerlerde materyal kazanç (g_m) ya da modal kazanç olarak da adlandırılır (g_{mod}). Bu iki kavram, $g_{mod} = \Gamma g_m$ formülüyle birbirleriyle ilişkilendirilir. Γ optik hapsolme faktörüdür. Fakat birim uzunluk başına net kazanç $g_{mod} = \Gamma g_m - \alpha$ şeklindedir. α , birim uzunluk başına efektif kayıptır. İşlem kolaylığı açısından $g_{mod} = g$ olarak kullanılacaktır. Optik kazanç teorik olarak çok uzun matematiksel hesaplamalar sonucu elde edilir. Modal kazancı, lazerin kazanç özelliklerini açıklayan materyal

kazancıyla ve bunların optik alanla örtüşmesini açıklayan optik hapsolma faktörüyle birbirlerinden ayırmak mümkün değildir. Yarıiletken lazerlerde materyal kazancın matematiksel hesabı oldukça karmaşıktır. Altındağ (2011)'ın bildirdiğine göre Mikkelsen (1994) materyal kazancı aşağıdaki gibi açıklamıştır:

$$g_m(\nu, N) = \frac{e^2 |M|^2}{4\pi^2 \epsilon_0 m_0^2 c n_a \nu} \left(\frac{8\pi^2 m_c m_{hh}}{h^2 (m_c + m_{hh})} \right)^{\frac{3}{2}} \times (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} [f_c(\nu) + f_v(\nu) - 1]$$

Burada; N taşıyıcı yoğunluğu, ν frekans, e elektron yükü, h Planck sabiti, ϵ_0 vakum geçirgenliği, m_0 serbest elektron kütlesi, m_c iletim bandı elektron kütlesi, m_{hh} valans bandında heavy hole etkin kütlesi, c boşlukta ışığın hızı, n_a kırılma indisi, $|M|^2$ momentum matris elemanı, E_g yasak enerji aralığı, f_c ve f_v sırasıyla iletim ve valans bandları için FermiDirac dağılımlarıdır.

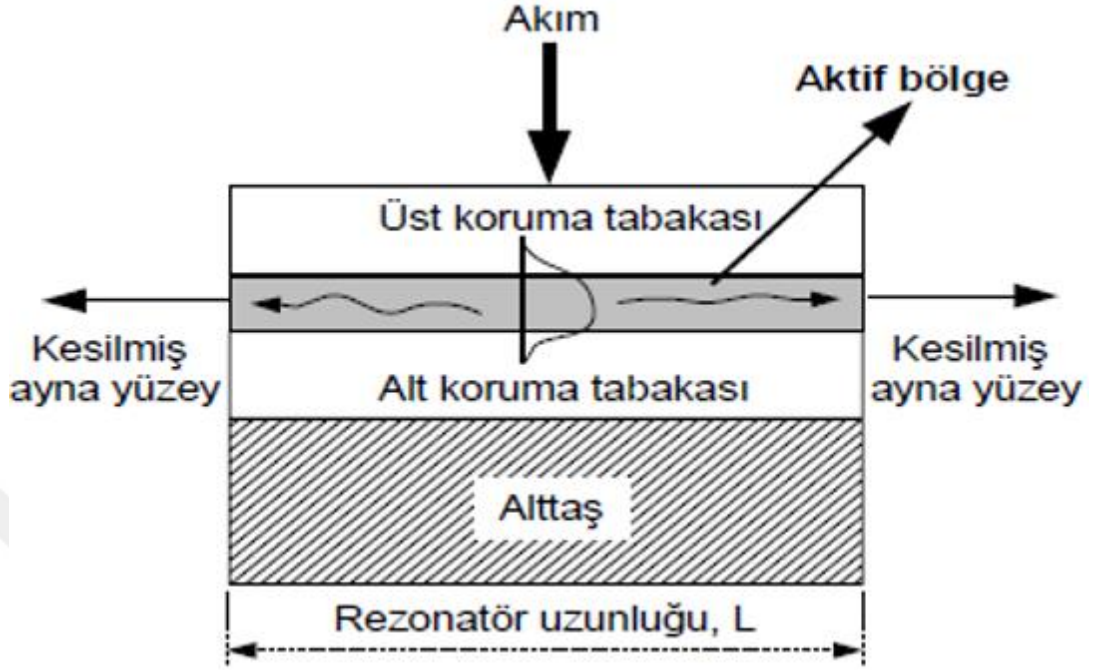
Optik hapsolma faktörü de aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\Gamma = \frac{\int_{-L_x/2}^{L_x/2} |E_x|^2 dx}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_x|^2 dx}$$

E_x aktif ortamdaki ilk enine modun yayılımında sahip olduğu elektriksel alan yoğunluğudur. Yani, bu formül aktif katmanı sınırlayan enerji modunun kesitidir.

2.2.2. Optik geri besleme

Bir lazerde tersinir popülasyon söz konusuysa uyartılmış ışığa gerçekleşmiş demektir. Uyartılmış ışığa sonucu açığa çıkan fotonlar belirli bir yönde bir demet halinde toplanır ve güçlendirilir. Bu işlemler için optik rezonatör gerekir. Lazerdeki rezonatörler ile optik geri besleme sağlanır. En basit optik rezonatör Fabry-Perot rezonatörüdür (Şekil 2.2). Bu rezonatörlerde kazanç bölgesi birbirine paralel iki ayna arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 2.2. Fabry-perot rezonatör şeması (Babaoğlu 2011)

Kazanç bölgesinde oluşan fotonlar, birbirine paralel aynalar arasında ilerlerler. Eğer aynalar arası mesafe (L), elektromanyetik dalganın dalgaboyunun yarısının tam katları ise,

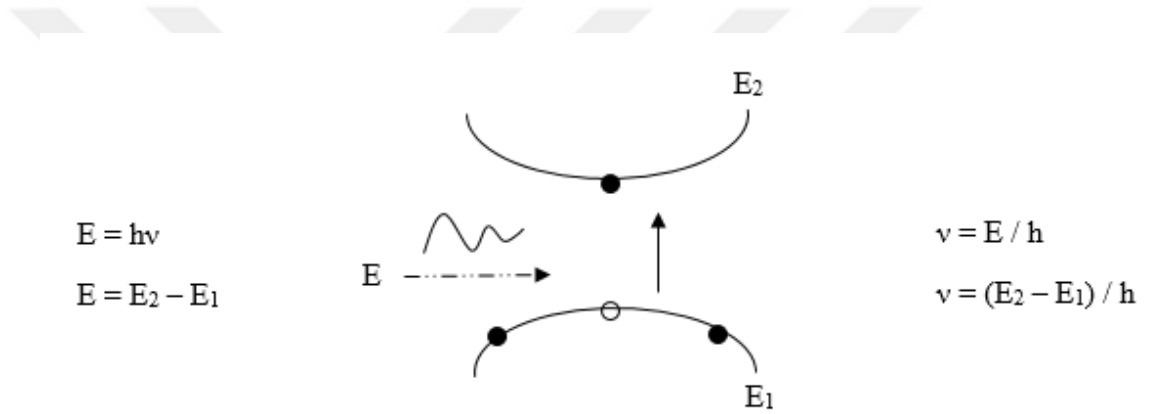
$$L = \frac{m_1 \lambda}{2n} = \frac{m_1 c}{2n\nu}$$

faz koşulu sağlanacak ve bu bölgede bulunan fotonlar güçlendirilecektir. Burada, λ dalgaboyu, c ışık hızı, n ise kazanç bölgesinin kırılma indisi, ν frekans, m_n ($n=1,2,3...$) tam değer alan dalgaboyu parametresidir. Bu ifade, pozitif geri besleme koşuludur. Lazerde ışımanın başlaması için, lazer kazanç bölgesinde kazancın kayıplardan büyük olduğu andaki akım değeri “eşik akımı” olarak adlandırılır. Eşik akımı değerinden itibaren, uyartılmış ışımaya tetiklenmiş olur ve lazer olayı başlar. Malzeme kazancı dalgaboyu bağımlı olduğu için, rezonans koşulu sadece en yüksek kazançla sahip olan dalgaboyu için sağlanır.

2.3. Işıma Çeşitleri ve Soğurma

2.3.1. Uyarılmış soğurma (Stimulated Absorption)

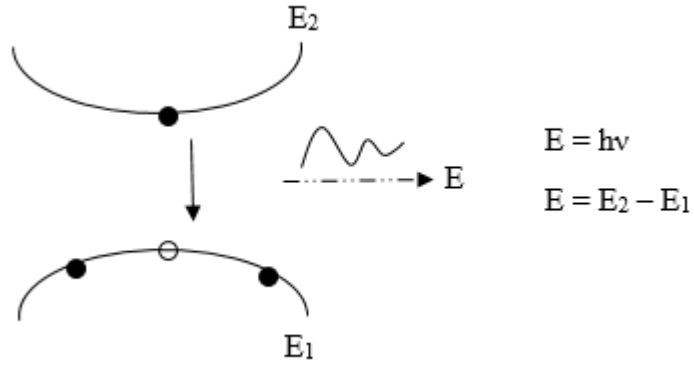
Belli bir frekansı olan elektromanyetik dalganın (foton) enerjisi elektron tarafından soğrulur ve elektron bir üst enerji bandına çıkar. Ancak fotonun enerjisi, iki enerji düzeyi arası farka eşit veya bu farktan büyük ise soğrulur. Şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Uyarılmış soğurma

2.3.2. Kendiliğinden ışıma (Spontaneous emission)

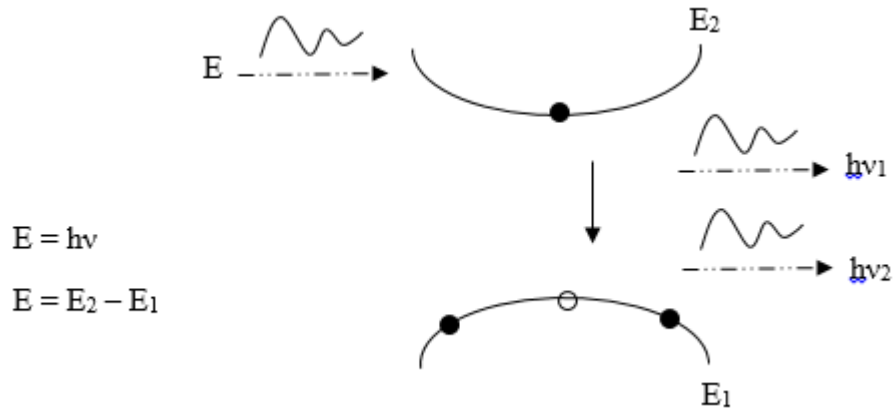
Elektron önceden uyarılarak aldığı enerjiyi kaybederek iletim bandından valans banda iner. Açığa çıkan enerji elektromanyetik dalga (foton) olarak ortama yayılır. Salınan fotonun yönü rastgele olduğu için lazerin değil LED'in çalışma prensibini açıklar. Şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Kendiliğinden ışıma

2.3.3. Uyarılmış ışıma (Stimulated emission)

Yüksek seviyede bulunan elektron, foton zorlanması ile bir alt enerji bandına iner. Uyarma, genellikle optiksel veya elektriksel olarak yapılır. Salınan fotonun yönü ve fazı alt banda geçişte rol alan foton ile aynı olduğu için bu, lazer çalışmasının ana prensibini teşkil eder. Şematik gösterimi aşağıda verilmiştir (Şekil 2.4).



Şekil 2.5. Uyarılmış ışıma

2.4. Yarıiletken Lazerler (Diyot Lazerler)

Yarıiletken lazerler ilk olarak 1962 de GaAs p-n eklemi formunda keşfedildi. Ayrıca ilk yarıiletken lazer homoelekman lazerdir. Daha sonra heteroelekman lazer, QW lazer, DFB lazer ve VCSEL lazerler geliştirilmiştir. Bu gelişmeler verimliliğin artmasına ve dalgalıboyunun ayarlanabilmesine olanak tanımıştır. Yarıiletken lazerler;

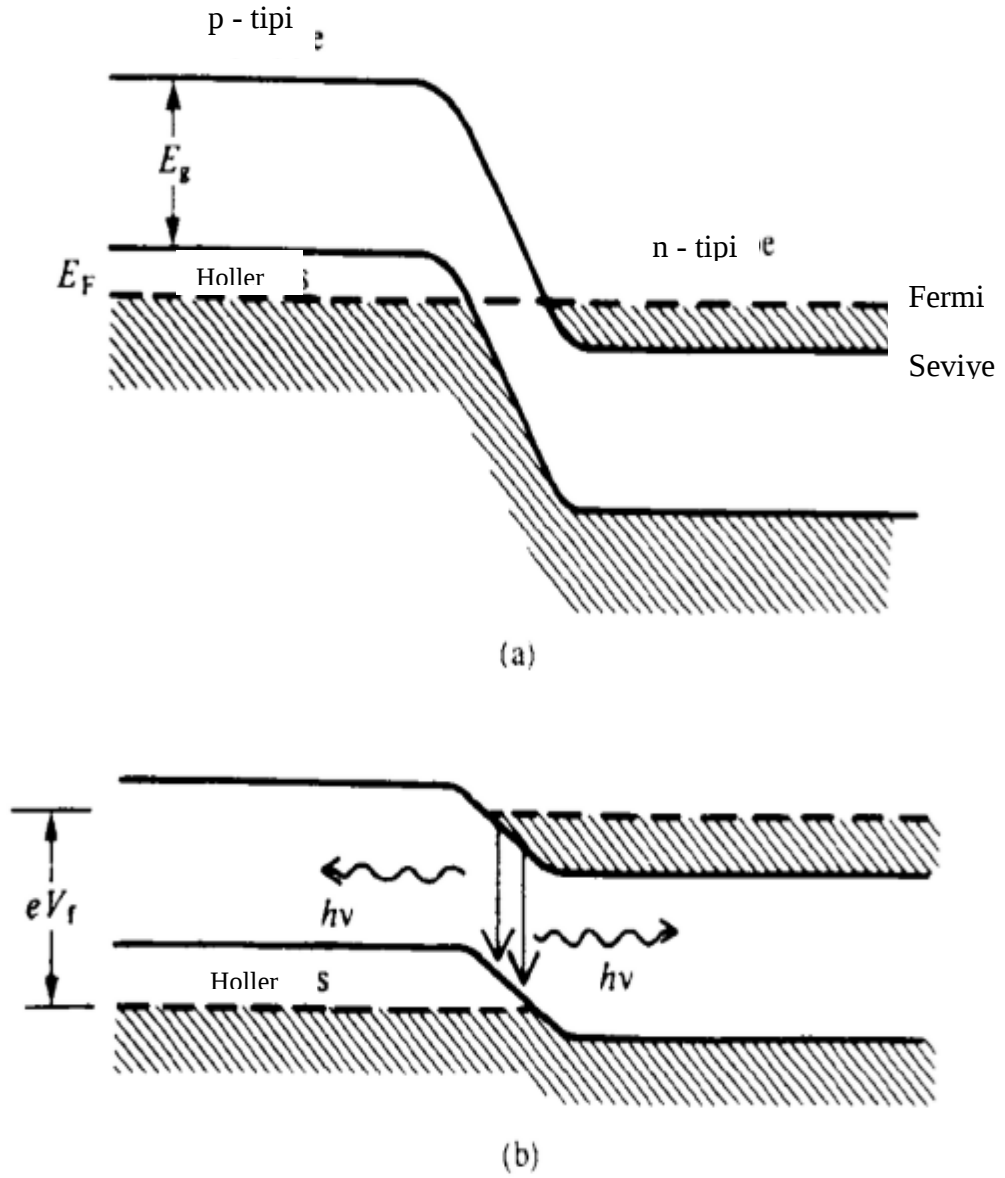
- Kompakt olmaları kolay entegrasyon sağlar.
- Elektrik enerjisini %50'nin üstünde bir verimle ışığa dönüştürür.
- Maliyeti düşüktür ve seri üretim imkanı sunar.
- Pompalama akımının doğrudan modülasyonu sayesinde 20 GHz üzeri frekanslarda modülasyon gerçekleştirir.
- Kayıp azdır ve düşük dispersiyona sahiptir. Çıkış ışın çapının ve dalgalıboyunun ayarlanabilir olmasından dolayı fiber kabloya kolayca monte edilebilir.
- Düşük elektrik akımlarıyla pompalanabilirler.
- Entegre optoelektronik devre tasarımında tercih edilirler.

Bununla birlikte, son yıllarda önemi oldukça artan yarıiletken lazerlerin ihtiyaçlarımıza cevap verebilmesi için bazı ölçütler vardır.

- Uygun dalgalıboyuna sahip olmalıdırlar. Değişken bant aralıklı yarıiletkenler elde edilebildiği için istenilen dalgalıboyuna sahip yarıiletkenler büyütülebilir.
- Taşıyıcı enjeksiyonu için uygun bir p-n yapısı oluşturulmalıdır (Erol ve Balkan 2013)

Yarıiletken lazerlerde bir p – n eklemi, aktif ortamı oluşturur. Böylece lazer ışını elde etmede sağlanması gereken diğer şartlar, iyon nüfus terslenmesi ve optik geri beslemedir. Uyarılmış salınma elde etmek için, birçok elektron ve boşlukların bir arada bulunduğu bir bölge oluşturma zorunluluğu vardır. Bu, katkılandırılmış n ve p tipi maddelerden oluşan bir ekleme, iletim yönünde gerilim uygulanmasıyla elde edilir.

Böylece p-n tipi eklemde Fermi seviyesi değerklik bandının içinde bulunur. İletim yönünde kutuplanmış bir p-n eklemının enerji band diyagramı Şekil 2.5’de gösterilmiştir (Wilson and Hawkes 1998).



Şekil 2.6. Yoğun şekilde zenginleştirilmiş p-n eklemi

(a) denge ve (b) pozitif yönde (kesikli çizgiler (a) dengede ve (b) pozitif yönde gerilim uygulandığındaki Fermi seviyesini gösterir) (Wilson and Hawkes 1998)

Yarıiletken lazerler, fiberoptik haberleşme sistemlerinde, CD-DVD okuyucu ve yazıcılarında, askeri ve medikal uygulamalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle

fiber optik ve tümleşik optik sistemler için en önemli ışık kaynaklarından. Bu durum yarıiletken lazerlerin yüksek verimli, kolaylıkla modüle edilebilir ve kompakt boyutlarda oluşundan kaynaklanır. Fiber dispersiyonu ve kayıpları 1.3 μm ve 1.55 μm dalgaboyundaki dalgalar için oldukça düşüktür. Bu nedenle bu dalgaboyunda çalışan yarıiletken lazerler özellikle fiber optik haberleşme sistemlerinde ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır (Çakmak ve Duman 2011).

Tek bir fiber kablo, bakır kablolarla karşılaştırıldığında 1000 kat daha fazla bilgi taşıyabilmekte ve bakır hat için 1,92 km olan tekrarlama (zayıflayan sinyali yükseltme) mesafesi fiber hat için 99 km olmaktadır. Ayrıca geniş bant internet haberleşmesine de imkân tanıyan fiber optik haberleşme için yarıiletken lazerler verici tarafının vazgeçilmez optoelektronik aygıtları olmuştur (Çakmak ve Duman 2012).

2.5. Fotonikte Silisyumun Önemi

Silisyumun ilk keşfi 1824 yılında Berzelius tarafından gerçekleştirilmiştir. Keşfedilmesiyle beraber endüstrinin hammaddesi olmuştur. Silikon yeryüzünde en çok bulunan elementlerden biridir. Yarıiletken özelliğe sahip oluşu ve transistör, diyot gibi aygıtların yapımında kullanılabilmesi entegre devrelerin ve bilgisayar çiplerinin silikon teknolojisi üzerine inşa edilmesini sağlamıştır.

Silisyum kumda özellikle de deniz kumunda bolca bulunmaktadır. Silisyum doğada silikat asidi ve tuzları halinde bulunur. Yerkabuğunun yaklaşık %25,7 si bu elementten oluşur. Oksijenden sonra bileşikleri halinde en fazla bulunan elementtir. Silisyum dioksit (SiO_2) doğada kum ve kuartz şeklinde bulunur.

Silisyum, elektron yapısı ve kimyasal özellik bakımından elmas yapıdadır. Elmas yapıda olmasına rağmen silisyumun yasak enerji aralığı (E_g) elmasa göre çok daha düşüktür. Silikonun önemli bir özelliği oda sıcaklığında az sayıda elektronlarının valans bandından iletkenlik bandına geçmesidir (Pişkin 2014).

Silikon fotonik son yıllarda büyük ilgi gören bir alan olmuştur. Entegre fotonik bileşenlerin bir elektronik platformunda gerçekleştirilebilmesi için Si alt tabakası içeren ve elektrikle pompalanan bir lazere ihtiyaç duyulmaktadır. III-V bileşiklerinin kullanılması, bu tür cihazların doğrudan Si elektronik platformda büyütülmesine imkan sağlamıştır (Lee *et al.* 2012).

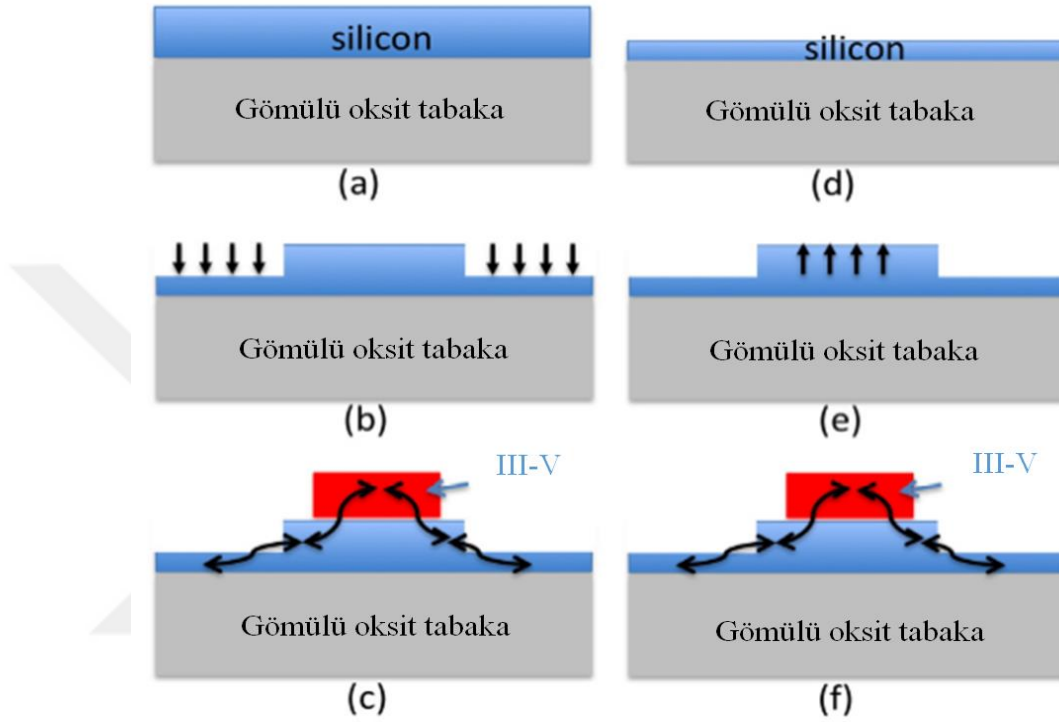
Son on yılda silikon, entegre fotonik bileşenler ve devreler için mevcut en önemli malzeme sistemlerinden biri haline gelmiştir. CMOS teknolojisinden de yararlanılarak yaygın imalat alanı oluşmuştur. Si-SiO₂ arasındaki yüksek kırılma indisi farkı ile pasif optik bileşenlerin yanı sıra yüksek hız modülatörlerin ve dedektörlerin boyutunun düşürülmesini ve entegrasyonunu mümkün kılmaktadır. Ne yazık ki silikonun indirekt bir bant aralığı vardır, bu da bir lazer malzemesi olarak kullanılmasını mümkün kılmamaktadır (Koninck *et al.* 2013).

Gerçekten de, sadece bir on yıllık gelişme ile silikon fotonik birçok gösterilen büyük ölçekli fotonik entegrasyon devreleri ile dikkat çekici entegrasyon kabiliyeti sergilemiştir. Silikon dalga kılavuzlarının lazer boşluklarının bir parçası olduğu hibrit silikon / III-V lazerleri uygulamak için başlangıç silikon kalınlığının ~ 400 nm'den daha büyük olması gerekir. Bu lazerler, daha ince silikon kalınlığında inşa edilmiş diğer fotonik devrelerle entegre edilmesi gerekiyorsa, tipik olarak kalın silikon kalınlığına sahip bir yonga, InP tabanlı kazanım maddesine bağlanmak için kullanılır. Daha sonra Şekil 2.6(a) - (c)'de gösterilen lazer dışı devreler için ince bir silikon kalınlığına kadar aşındırılır.

Bununla birlikte, bu entegrasyon yaklaşımının bazı dezavantajları vardır:

- 1) Aşındırma işlemi önemli dalgakılavuzu kayıplarını indükleyebilecek yüzey pürüzlülüğünü getirir,
- 2) Aşındırma işlemi sonuçtaki ince silisyumda geniş kalınlık değişikliklerine neden olur, bu filtreler, kuplörler, vb. hassas optik cihazları elde etmek için daha sorunludur.

Bu problemleri çözmek için Şekil 2.6(d) - (f)'de açıklanan yeni bir entegrasyon yaklaşımı gösterilmektedir. Bu öneride, başlangıç silikon kalınlığı, lazer olmayan devreler için gerekli olan silisyum kalınlığıdır.



Şekil 2.7. (a)-(c) III-V dalga kılavuzuna ince silikon bağlamak için geleneksel aşındırma işlemi (d)-(e) Önerilen büyütme işlemi (Dong *et al.* 2014)

Bu, iyi kontrol edilen kalınlık ve pürüzsüzlük ile hassas silikon üst katmanların kullanılmasına olanak tanır. III-V dalga kılavuzlarının silikon dalga kılavuzlarına bağlanması gereken bölgede, silisyum dalga kılavuzunun istenilen indisini elde etmek için seçilen bölgedeki silisyumun toplam kalınlığını arttırmak amacıyla epitaksiyel büyüme veya diğer çökelme teknikleri ile kontrollü bir silisyum tabakası (veya diğer yüksek indisli materyaller) oluşturulur (Dong *et al.* 2014).

Si fotonik teknolojisi kullanılarak üretilen optik bağlantılar, geniş bant genişliği, düşük gecikme süresi, düşük güç tüketimi ve düşük karşılıklı etkileşim gibi optik sinyallere özgü özelliklerinden dolayı LSI çiplerinde bant içi bağlantılarda bant genişliği darboğazlarıyla uğraşmak için umut vaat eden bir araçtır (Hatori *et al.* 2014).

Bununla birlikte silikon fotonik, fotonik bileşenlerin büyük hacimli üretim uyumluluğu ile fotonik devrelere geniş ölçekli entegrasyonunu sağlayan bir teknolojidir. Mach-Zehnder modülatörü (MZM), halka rezonatör yapısı veya pin taşıyıcı enjeksiyon yapılarına dayanan değişken optik zayıflatıcı (VOA) gibi hızlı PB için temel yapı taşları olarak çeşitli silikon fotonik cihazlar geliştirilmiştir (Valicourt *et al.* 2014).

Günümüzde, silikon fotonikte lazer kaynağı için çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır:

- 1) Harici lazer kaynağı: Klasik bir III-V lazer kaynağı kullanılmakta ve yayılan güç bir optik fiber ya da butt-kuplajı vasıtasıyla silikon çipe aktarılır.
- 2) III-V yonganın yapıştırılması: III-V yonga işlenmiş Si yonga üzerine birleştirilir, toplu olarak işlenir ve silikon dalga kılavuzlarına hizalanır.
- 3) Silikon alt tabaka üzerinde epitaksiyel olarak büyütülen Germanyum: Si lazerler üzerindeki ilk olarak elektrikle pompalanan Germanyum, oldukça (strained and heavy doped) gerilmiş ve yoğun katkılı Ge malzemeler kullanılarak gösterilir.
- 4) Silisyum hetero-epitaksi üzerinde III-V: silikon lazerler üzerinde yine ilk III-V, bazı tampon katmanlar kullanılarak gösterilir.

Birinci yaklaşım ticari ürünlerde uygulanır ancak her bir lazer kaynağının bir silikon dalga kılavuzu veya bir optik fiberle hizalanması gerektiğinden yüksek maliyetli olmaktadır. Dahası, silikon tabanlı PIC'lerin karmaşıklığı arttıkça, lazerlere değil, PIC içindeki kayıpları telafi eden entegre yarıiletken optik yükselteçlere (SOA) de ihtiyaç duyulacaktır. SOA'lar için, PIC'lerdeki yansımaları en aza indirmek önemlidir. Böylece yansımalar tarafından üretilen dalgalanma 1 dB'yi aşmayacaktır.

III-V yongaların yapıştırılmasını içeren ikinci yaklaşım çok umut vericidir. Oldukça etkili ışık yayılımını ve GaAs, InP gibi bazı doğrudan aralıklı III-V yarıiletken malzemelerin modülasyon özelliklerini kullanır. Bu yaklaşımda lazerler, SOA'lar ve elektro-soğurma modülatörleri gibi tüm aktif bileşenler toplu olarak işlenerek düşük maliyetli ve yüksek hacimli üretim sağlayabilmektedir. Dahası, aktif dalga

kılavuzlarının pasif devrelere hizalanması yalnızca litografi cihazlarının rezolüsyonuyla sınırlanmaktadır.

Üçüncü ve dördüncü yaklaşımlar yoğun bir şekilde kullanılmakla birlikte, pratik uygulamalar için yeteri kadar yaygınlaşmamıştır (Duan *et al.* 2015).

Entegre ışık kaynakları ve amplifikatörlü silikon tabanlı fotonik entegre devreler (PIC), optik iletişim ağlarındaki pek çok uygulamada umut vadetmektedir. Hibrit III-V / silikon lazerler ve yarıiletken optik yükselteçler (SOA), karmaşık PIC'lere entegre edilebilir ve günümüzde mevcut optik ağlarda kullanılan ağ ekipmanı oluşturmak için pahalı ekipmanların yerini alabilir (Kaspar *et al.* 2015).

Silikon fotonik optik iletişim, optik sinyal işleme ve algılama gibi alanlarda da giderek artan bir ilgi meydana getirmiştir. İletişim sistemleri için veri hızları ve gömülü sistemler için entegrasyon gereksinimleri artmaktadır. Optik işlevlerin bir mikroelettronik çip üzerine entegrasyonu, fotonik ve elektronik devrelerin performanslarını artırma olasılığı ile birlikte birçok yenilikçi perspektif getirir. Dahası, aynı çipte elektronik ve fotonik devreler arasındaki yakınsaklık, sinyal işleme işleminin alıcıya ve göndericiye daha yakın bir yerde yapılmasını sağlayacaktır. Bu, devrenin boyutunun önemli ölçüde azalmasına neden olacak ve verilerin iletilmesi için yeni yollar bulunmasına izin vererek performansın önemli ölçüde iyileşmesini sağlayacaktır (Schires *et al.* 2016).

Telekom ve veri iletişim sektöründe de daha yüksek bant genişliği ve düşük gecikme talebinin artması, elektrik bağlantılarının yerini alan optik bağlantıları gerektirmektedir. Çeşitli optik bağlantı platformları arasında silikon fotonik, yaygınlaşmış CMOS teknolojisini kullanarak yüksek performanslı ve ticari olarak uygulanabilir bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Işık kaynağı, optik bir bağlantı için bit başına enerjiye sahiptir. Silikon fotonik bağlantı güç bütçesi için yapılan son analizler, enerji tasarruflu ışık kaynaklarında 20 Gbps üzeri hıza sahip bağlantılar için bir ihtiyaca dikkat çekmektedir. Pratik sistemlerde lazerlerin kullanılması için bir diğer önemli şart düşük gürültü

performansdır. Yüksek hızlı veri iletişim sistemi için, güç dalgalanması veya dalgaboyu kayması genellikle mod atlamaya neden olur ve veri bağlantısında önemli sembol hataları ile sonuçlanabilir. Özellikle III-V / Si hibrit lazerinde, iki heterojen malzemedeki termo-optik katsayıların uyumsuzluğu, termal olarak uçucu bir ortamda mod atlamayı daha da kötüleştirebilir. Bu nedenle hibrit bir lazerin, ticari bir sistemde pratik kullanım için dengeli ve düşük bağıl yoğunluklu gürültü (RIN) çalışmasını sağlamak için bir dengeleme mekanizması gerekir. Modül sıcaklık kontrolü(TeC) kullanan yüksek hızlı veri iletişimi uygulamalarında enerji etkinliği dikkate alınmadığı için bias akımı veya ortam sıcaklığı gibi çeşitli dış koşullardaki değişiklikler üzerinde mod-sıçramasız çalışma sağlamak önemlidir. Bu nedenle entegre ve düşük güçlü dalgaboyu dengelemesi, çip hibrit lazer için istenen bir durumdur (Lee *et al.* 2016).

Silikon fotonik, varolan kitlesel üretilebilir üretim prosesleriyle uyumluluğundan ötürü, yüksek performanslı düşük güçlü çipli iletişim sistemleri için fotonik ve elektroniklerin entegrasyonunda belirgin bir ivme kazanmaktadır. Silikon fotonik platformda bileşik yarıiletken malzemeleri entegrasyonu için basit bir çözüm sağlayabilir. Ancak, aktif yarıiletken optoelektronik aygıtların minyatürleştirilmesi için mikrometre boyutlara inildiğinden objeyi hassas bir şekilde tutmak ve yerleştirmek her zaman kolay değildir. Örneğin, bir mikrometredeki transfer baskının nispeten büyük yanlış hizalama toleransları, dalga kılavuzlarında kabul edilemez optik kuplaj kayıplarına neden olabilir. Aktarım ve montaj işlemleri sırasında kaçınılmaz olan fiziksel temaslar, temas bölgelerinde zararlı hasarlara ve kontaminasyona neden olabilir. Seçme ve yerleştirme yaklaşımı için bir başka strateji, akışkan ortamlardaki nesneye herhangi bir fiziksel temas olmadan manipülasyon mekanizmalarını kullanmaktır. Bilinen örnekler arasında optik cımbızlama (optical tweezing) ve konveksiyona dayalı mikropartikül manipülasyonu bulunmaktadır. Doğru yakalama, ayırma ve mikroskop nesnelerinin birikimi(accurate capture, separation, and accumulation of microscale objects) için uygun bir yol sunar; aynı zamanda düzensiz elektrik alan gradyanları oluşturmak için ek iletken elektrot yapıları gerektirir. Elektromanyetik radyasyon basıncına dayanan optik cımbız, doğruluğu ve nispeten basit yapılandırmaları için potansiyel bir manipülasyon aracı olarak da dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, optik cımbız manipülasyon

tekniklerinin temel dezavantajı, küçük nesneler için bile yüksek optik güçlerin genellikle gerekli olması ve bu nesnelerin radyasyona veya termal hasarlara neden olabilmesidir. Dahası, büyük temas alanlarına sahip düz bir yüzeye yerleştirilen mikroskop nesneleri, bu gibi optik cımbız teknikleriyle tutmak ve işlemek zordur. Çünkü Van der Waals ve sürtünme kuvveti genellikle optik radyasyon basıncından çok daha güçlüdür (Jung *et al.* 2016).

2.6. Hibrit Silisyum III-V Yarıiletken Lazerler

Hibrit teknoloji, silisyumun CMOS uyumluluğu ile III-V malzemelerin optoelektronik özelliklerini bir araya getirdiğinden tümleşik fotonik devreler için son derece umut verici bir çözümdür. Malaguti *et al.* (2014) tarafından bildirildiğine göre; Campenhout *et al.* (2007) lazerlerin, Park *et al.* (2007) yükselteçlerin ve Thourhout *et al.* (2010) optik flip-flopların hibrit teknoloji sayesinde geliştirildiğini, Notomi (2010) ise fotonik kristallerin (PhC) yüksek yoğunluklu fotonik entegre devreler için umut verici yapı taşları olduğunu ileri sürmüştür.

Yine Malaguti *et al.* (2014)'nin bildirdiğine göre optik iletişim için son derece kompakt PhC mikrokavite filtreleri şu şekildedir: Damla filtreler(drop filters) (Qiang *et al.* 2007), kanal damla filtreleri(channel drop filters) (Niemi *et al.* 2006; Wang and Chen 2010; Nguyen *et al.* 2013), bant geçiren filtreler(band pass filters) (Chao *et al.* 2007). Son zamanlarda ise optik anahtarlamalar, SOI PhC nanokavite üzerindeki bir InP ve SOI dalga kılavuzlarının üstündeki PhC nanolazerin entegrasyonu kullanılarak gösterilmiş ve bu durum hibrit teknolojinin potansiyelini nanofotonik bileşenlerin üretimi için doğrulamaktadır (Halioua *et al.* 2011).

Bir silikon çip ile lazer entegrasyonunu gerçekleştirmenin en kolay yolu, aynı modülde silikon çip ile hazır ambalajlanmış III-V lazerin kopyalanmasıdır. Bileşenler tek modlu optik fiber kullanılarak birbirine bağlanır. Böyle bir yaklaşımın avantajları, üst seviye bir III-V lazerin silikon çipten ayrı olarak sıcaklık kontrollü olabilmesi ve iki bileşenin verimi ayrı olarak optimize edilebilmesidir. Bu opsiyonun dezavantajları, bir önceki

bölüme entegrasyon için ayrı bileşenlerin kullanımı için tartışılan noktalardır: modülün geniş ayak izi, kuplaj kaybı nedeniyle bozulmuş performans, her bir sarım noktasındaki yansıma, daha az ölçeklenebilirlik ve birden fazla paketleme aşamasından yüksek maliyet. Bu özellikler, bu yaklaşımı düşük maliyetli uygulamalar için daha az çekici kılmaktadır.

Geniş kafes uyumsuzluğu ve genişleme katsayısındaki büyük fark, yerinden oynama ve performans ve güvenilirliği sınırlayan büyük şekil değiştirme ile sonuçlanır. Silisyum ile karşılaştırıldığında, GaAs ve InP'nin sırasıyla %4.1 ve %8.1 orantısız uyumsuzlukları ve sırasıyla %120 ve %77 termal genişleme katsayısı uyumsuzlukları bulunmaktadır. Gelecekteki pratik uygulama için güvenilirlik hâlâ büyük bir sorun olarak durmaktadır.

Bu bağlamda, yonga yapıştırma, şekillendirilmemiş bir InP kalıbının bir SOI çipine birleştirilmesini ve onu entegre lazerin imalatı için daha da işlenmesini içerir. Lazer entegrasyon akışını yeniden düzenleyerek ve lazer işlemi öncesinde yapıştırarak, yapışma yanlış hizalanmasına karşı tolerans kazanır. Büyük bağlantının hizalanmasındaki tolerans, bu mimarinin, yüksek kanal sayısı ile düşük maliyetli ve yüksek hacimli uygulamalar için uygun olduğu anlamına gelir. Buna karşın, lazer ile silikon dalga kılavuzu arasındaki asgari bağlantı kaybı kendisini güç tasarrufu gerektiren uygulamalara borçludur. SOI alt tabakasında oluşturulan bir silikon dalga kılavuzu üzerinde bir III-V çoklu kuantum kuyusu (MQW) epitaksiyel katman yapısından oluşur. III-V tabakaları başlangıçta düşük sıcaklıkta bir yonga yapıştırma işlemi vasıtasıyla silikon dalga kılavuzlarına aktarılmadan önce III-V alt tabakalarında büyütülür. Hibrit dalga kılavuzundaki optik mod özellikleri, dalga kılavuzu boyutlarıyla ayarlanabilir. Genel olarak, silikon dalga kılavuzu genişledikçe, kazanma bölgesine daha az bağlantı ile mod silikon bölgeye çekilir. Bu dalga kılavuzu mimarisinin daha ayrıntılı mod özellikleri başka yerlerde bulunabilir. Bir hibrit dalga kılavuzu ile bir pasif silikon dalga kılavuzu arasındaki geçişler, bağlanma kaybını ve yansımayı azaltmak için önemlidir. Tek bir III-V bant aralığına dayalı ayrı optik bileşenler bu platformda başarılı bir şekilde sergilendiğinde, bu yaklaşım için en büyük zorluklardan biri, yüksek fotonik entegrasyon için gerekli olan çoklu III-V malzeme bant aralıklarının nasıl

üretileceğidir. Geniş band genişliği, geniş spektral bant genişliği lazer dizileri, elektro-absorpsiyon modüle lazerler ve çok kesitli ayarlanabilir lazerler gibi gelişmiş PIC'ler için kritik önem taşır. III-V PIC'lerde yaygın olarak kullanılan, alt eklem büyümesi, seçici alan büyümesi, asimetrik ikiz dalga kılavuzu entegrasyonu ve ofset QW entegrasyon yaklaşımları gibi III-V entegrasyon teknolojileri mevcuttur. Ne yazık ki, genellikle yüksek bir yeniden sıcaklık artışı gerektirir. Muhtemeldir ki tekli kalıp yapıştırma yaklaşımını, tek bir SOI paftada birden fazla III-V kalıp yapıştırma mümkündür. Bunun sakıncası, InP ölümü küçülürken, kalıp kenarında yanıl aşındırma nedeniyle kaybedilen kalıp oranının artması ve daha büyük ve daha pahalı III-V kalıbının bağlanmasına ihtiyaç duyulmasıdır (Park *et al.* 2011).

III-V PD'ler yüzlerce gigahertz rejiminde çalışma bant genişliği göstermiştir. Diyot lazerler ve yarıiletken optik amplifikatörler (SOA'lar) son zamanlarda yaygın olarak mevcut olan çeşitli III-V malzeme sistemleri olmuştur. Ayrıca tek modlu veya ayarlanabilir kaynakların gerekli olduğu verimli ve düşük maliyetli sistemler için ilk tercih olmuştur. Hibrit silikon III-V dalga kılavuzları; kazanç, yüksek hızlı modülasyon veya fotodeteksiyon gibi III-V epitaksiyel tabaka işlevselliğine sahiptir. Aktif III-V bileşenleri, litografik hassasiyet ve hizalama doğruluğu ile imal edilebilmekte böylece büyük ölçekli entegrasyon sağlanmaktadır. Bu, III-V üretim işlemi prensipte SOI CMOS üretim prosesi ile tamamen uyumlu olduğu anlamına gelir. Hibrit silikon platformu, CMOS işlemenin ve SOI fotoniklerin vade ve ölçeğini temel III-V işlevselliği ile birleştirmiştir. Bu nedenle onlarca ila yüzlerce entegre bileşenin bulunduğu orta ölçekli fotonik entegrasyon için benzersizdir. Fotonik entegrasyon mantığı çok yönlüdür. Entegrasyon, boyut, ağırlık ve güç tüketiminde bir azalma sağlar; verim ve güvenilirliği artırır ve düşük maliyetle büyük hacimli üretim yapılmasını sağlar. Optik ve elektriksel arayüzler en aza indirildiğinden paketleme maliyetleri azaltılır. Telekomünikasyon ve ara bağlantıları, bant genişliği ve enerji tasarruflu çalışma sebebiyle fotonik entegrasyon için uygundur. Fakat fotonik entegrasyon diğer alanlarda da belli bir potansiyele sahiptir ve ciddi bir etki oluşturmuştur. Bakımı yapılan tıbbi cihazlar, kompakt enstrümantasyon, spektroskopik (biyomedikal) görüntüleme

çözümleri ve yüksek doğruluk metrolojisinin hepsi fotonik entegrasyondan faydalanacaktır (Heck *et al.* 2013).

Bununla birlikte, birçok uygulamada, genel güç tüketimini azaltmak için lazer eşik akımının azaltılması büyük önem taşır. Eşik akımını azaltmanın bir yolu, lazerin fiziksel boyutunu küçültmektir. Bu türden örnekler, III-V mikrodisk lazerler, doğrusal III-V fotonik kristal boşluk lazerleri ve fotonik kristal ayna VCSEL'lerdir (Koninck *et al.* 2013).

Hibrit silikon fotonik, CMOS gibi yaygınlaşmış silikon teknolojilerinin avantajlarını III-V bileşiklerinin işlevselliği ile birleştirir. Optik özelliklerin ısı emici ve elektriksel iletkenlik avantajları, yarıiletken lazerler(diyot lazerler) veya yarıiletken optik yükselteçler gibi yeni elektro-optik cihazların geliştirilmesine olanak sağlar. Malzeme özellikleri daha güçlü bir şekilde kontrol edilirse entegre yapılar iyi soğutmayı sağlayan optik cihazların uygulanması için daha iyi optimize edilebilir. Bu bağlamda, elektronik mikroskop karakterizasyonunun (SEM) yetersiz olduğu, gömülü nanoyapıların optik özelliklerine sahip olma ihtiyacı vardır. Dahası dalga kılavuz karmaşıklıkları, yapıların modlarına eleştirel biçimde bağlı olabilir ve iç kılavuz ışığına dayanan bir ölçüme bir avantaj sağlar. Bu gerçekleştirmeler için, optik bileşenlerin tercih edilen bir düzenlemesinde, daha kolay işlenmiş SOI yonga içinde optik özelliklerin oluşturulması için hava hollerinden yapılmış nano boyutta yapılandırılmış malzemelerin bir silikon matriste oluşturulması gerekir (Bougot-Robin *et al.* 2014).

SOI yongaların özellikleri, heterojen materyallerin farklı tabakalardaki farklı işlevleri ile entegrasyonuna olanak sağlar. Özellikle, III-V bileşik yarıiletkenleri, düşük gürültülü ve yüksek hızlı tek bir çip üzerinde elektronik ve fotonik bileşenler için çok cazip olmaktadır. Epitaksi veya birleştirme tekniklerine alternatif olarak, iyon implantasyonu ve bunu takiben ısıtılma işlemi tabii tutulması, III-V yarıiletkenlerin silikon ile birleştirilmesi için önemli bir yaklaşım sunmaktadır (Prucnal *et al.* 2014).

Silikon alt tabaka kullanımı avantajlıdır çünkü silikon yarıiletken elektronikler için temel malzemedir. III-V materyalleri lazerler ve LED'ler gibi optoelektronik cihazları için önemlidir, ancak örgü uyumsuzluğuna ve III-V'nin polar polar olmayan doğasına bağlı olarak Si üzerinde doğrudan büyütme zordur. CMOS üretim teknolojilerini kullanan fotonik entegre devrelerin gerçekleşmesi için III-V yarıiletken bileşik ışık kaynaklarının silikon ile entegrasyonu tercih edilir. Spesifik olarak, erişim ağları veya süper bilgisayarlarda ve veri merkezlerinde özellikle veri bağlantıları gibi büyük hacimli pazarlarda yüksek hızlı iletişim bağlantılarını gerçekleştirmek için, örneğin tutarlı iletişim sistemlerini uygulamak için düşük maliyetli çok fonksiyonlu optoelektronik entegre devrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu talep için silikona dayalı bir teknoloji platformu anahtar olacaktır (Benyoucef *et al.* 2014).

Bununla birlikte, endirekt bant aralığı nedeniyle yüksek etkili lazerlerin veya sadece silisyumdan oluşan optik amplifikatörlerin gerçekleştirilmesi zordur. Bu nedenle heterojen yapıştırma teknolojileri ile III-V/Si hibrit entegrasyonu, silikon tabanlı PIC'ler üzerindeki optik aktif cihazlar için entegrasyon yöntemi olarak dikkat çekmektedir (Suzuki *et al.* 2014).

Hibrit lazer, III-V epitaksiyel yongaların SOI yongalara entegrasyonu ve bunu takiben cihazın yapısını tanımlamak için standart fotolitografi ve aşındırma işlemleri ile oluşturulur. Büyük ölçekte düşük maliyetli entegrasyonun ve serbest uyum gereksinimlerinin avantajları, platform için uygun bir aday olmasını sağlar. Platformda gelecek vadeden ve güvenilir bir aday olmak için mükemmel gürültü performansına sahip bir hibrit lazer tasarlanmalıdır.

Gürültü kaynaklarından biri olarak bağıl yoğunluk gürültüsü (RIN-relative intensity noise), cihazların yoğunluk kararlılığı için önemli bir göstergedir. Düşük bir RIN, optik veri iletişiminde düşük bir hata oranı ile sonuçlanır. RIN spektrumundan türetilen gevşeme osilasyonu (RO-relaxation oscillation) frekansı, teorik olarak cihazın maksimum modülasyon bant genişliğini gösterir. RIN analiziyle ilgili birçok çalışma vardır. Örneğin, çoklu kuantum kuyu (MQW) lazerlerinin bağıl yoğunluk gürültüsünde

kuantum kuyularının sayısının yanı sıra ilgili diferansiyel kazanç etkisi araştırılmıştır. MQW lazerlerinin iç frekans tepkisinin incelenmesine yönelik birçok çalışma olmasına rağmen, yeni geliştirilen silikon hibrit lazerlerde bu tür dinamikler veya deney raporları hakkında ayrıntılı bir çalışma bulunmamaktadır.

Hibrit lazerde, iki dalga kılavuzu birbirine yakından yerleştirilir: ilki kazanç sağlayan III-V bölgesi ve ikincisi ışığı platformdan sonraki aygıtlara ileten SOI bölgesi. Bu nedenle boşluk modu profili, iki boyutlu enine düzlemde tanımlanmalıdır. Bildiğimiz kadarıyla dalga kılavuzu boyutu, hibrit lazerlerdeki birleştirilmiş mod profilini güçlü bir şekilde etkileyebilir. Mod dağılımının MQW lazerlerdeki bir lazer RIN üzerinde büyük bir etkisi olduğu için, hibrit bir lazerin tipik MQW lazerden farklı bir RIN karakteristiği olduğu tahmin edilmektedir. Bu nedenle iki boyutlu profiller de dahil olmak üzere hibrit lazerlerde RIN üzerine bir çalışma gereklidir.

Silikon hibrit lazer, optik kazanç sağlayan üst aktif III-V dalga kılavuzunu ve SOI üzerindeki diğer bileşenlere ışığı ileten altta bir pasif SOI dalga kılavuzu olan dikey olarak birleşmiş dalga kılavuzu yapısıdır. SOI dalga kılavuzu, Si sırtı(ridge), gömülü oksit (BOX-buried oxide) tabakası ve Si alt tabakadan oluşur. III-V ve SOI dalga kılavuzları evanescently(geçici) homojen genişlik ile birleştiğinde tasarlandığında, SOI'da daha yüksek bir sınırlama, III-V aktif bölgede daha düşük bir sınırlama nedeniyle daha yüksek eşik akım yoğunluğuna neden olacaktır. Eşik performansını iyileştirmek için konik tasarım kullanılabilir.

Tek bir enine mod uyarıldığında hibrit lazerin RIN spektrumu RO frekansında daha büyük bir zirve değeri, ancak aynı sırt genişliğine sahip MQW lazerden daha düşük bir RO frekansı gösterir. İki enine mod uyarıldığında lazer sistemi iki RO frekansı gösterir. Bu durumda, hibrit lazer, RO frekansında daha düşük bir pik değeri ve MQW lazerinden daha yüksek bir RO frekansı gösterir. Bununla birlikte, modelin daha da geliştirilebileceği bazı yönleri hala bulunmaktadır. Daha doğru hesaplamalar için dikkate alınması gereken en önemli hususlar kazanç doyumu (gain saturation) ve ısı etkisi (heat effect) içermesidir. Kazanç doyumunun olmayışı RO frekansını, ısı etkisinin

olmayışı ise sabit yapı parametrelerini ve gürültü taban seviyesini tahmin etmeyi gerektirecektir (Hu *et al.* 2014).

2.6.1. Entegrasyon çeşitleri

2.6.1.a. Flip-chip teknolojisi

Lazerler, yalıtkan üzeri bir silikon (SOI) alt tabakaya doğrudan yapıştırmaya izin verir. Flip-chip, yaygın bir teknolojidir; ancak bir çip üzeri dalga kılavuzu içindeki aktif bir bileşenden ışığı birleştirmek için hassas bir hizalama gereklidir. Zaman alan işlem ve düşük entegrasyon yoğunluğu, yüksek imalat maliyetlerine yol açar. Bu yöntem Luxtera tarafından tasarlanan ve üretilen aktif kablolar olan ilk silikon fotonik üründe kullanılmıştır (Lamponi 2013).

III-V lazerlerin bir silikon fotonik çip üzerine entegrasyonuna yönelik bir başka yaklaşım, III-V lazerin silikon fotonik çipine flip-çip bağlanması gibi kalıp seviyesi entegrasyonudur. Bu yaklaşımla ilgili bir husus, açısal boyutlarda hizalama doğruluğudur. Tipik olarak, düşük eşleşme kaybı için alt mikron doğrulukları gereklidir, ancak optimum yerleşim doğrulukları ± 1 μm civarında sınırlanarak düşük eşleşme etkinliklerine neden olur. İleri teknoloji pick-and-place araçları gerekliliği, bu yaklaşımı hem masraflı hem de zaman alıcı hale getirerek, teknolojiyi geniş kanal sayılarına ölçeklenebilir bir şekilde ölçeklendirmenin getirdiği zorluklara neden olmaktadır. Son olarak, dalga kılavuzu yüzeyinin lazerin çıkışına yakın olması lazer kararlılığı ile ilgili endişeler yaratabilir. Artı tarafta, bu yaklaşım lazer ve silikon fotonik işlem birbirinden bağımsız olarak yüksek verim için optimize edilebildiğinden, daha önce tartışılana benzer bir verim avantajı ile küçük bir ayak izi (foot print) oluşturabilir. Bu yaklaşım geleneksel bir paketleme tekniği kullandığı için bir lazerin silikon fotonik ile entegrasyonu için cazip fakat kısa vadeli bir stratejidir. Bununla birlikte, mikron altı yerleşim çözünürlüğüne ihtiyaç duyması, daha büyük kanal sayıları için kullanımını ve lazerden dalga kılavuzuna (birincil yerleşim doğruluğunu varsayarak ek 3 dB kaybı) bağlantı kaybını aşmak için gereken ek sürücü gücünü sınırlar (Park *et al.* 2011).

Kaplamasız LSI çipler ise flip-chip yapıştırma ile taban üzerine monte edilir ve PD'lere ve optik modülatörlere elektriksel olarak bağlanır. Bu sistem, yüksek optik çıkış gücü ile çalışabilen küçük, çok kanallı, yüksek yoğunluklu bir ışık kaynağına ihtiyaç duyar. Silisyumda ışık emisyon mekanizması olmadığından, Si taban üzerinde böyle bir işlemi yapabilen ışık kaynakları oluşturmak için araştırmalar yapılmıştır. Butt-coupling planı, flip-chip bonding ve pasif hizalama teknolojisi kullanmayı gerektirirken, daha yüksek optik çıkış gücü ve daha düşük güç tüketimi sağlamaktadır (Hatori *et al.* 2014).

SAMB yöntemi ile SOI dalga kılavuzu üzerine flip-chip ile bağlandığı yeni bir yapı sunulmaktadır. Bu yeni hibrit lazer, SAMB yönteminin avantajlarını ve BRS lazerlerin düşük eşik değeri, yüksek termal performans ve iyi optik alan ve taşıyıcı konfigürasyonunu bir araya getirmektedir (Yuan *et al.* 2015).

2.6.1.b. Monolitik entegrasyon

Silikon bir taban üzerinde hetero-epitaksiyel büyütme ile III-V materyalinin entegrasyonudur. Bu teknik pek çok entegre cihaza ve yonga ölçekli bir işleme olanak sağlar, ancak çökmüş tabaklarda ölçülen büyük kayma(dislokasyon) yoğunluğu, elektro-optik özellikleri bozar ve önemli bir sınırlamaya da sebep olur (Lamponi 2013).

Yeni nesil yüksek performanslı mikroelektronik aygıtlar için kilit kilometre taşı, III-V bileşik yarıiletken malzemelerin silikon teknolojisi ile monolitik entegrasyonudur. Farklı fonksiyonel III-V optoelektronik elemanların tek bir yonga üzerine yerleştirilmesi, silikon teknolojisinde küçülme sınırının üstesinden gelebilen performans ilerlemesini mümkün kılmaktadır. Sonuç olarak hibrit silikon platformu; lazerler, amplifikatörler, fotodetektörler vb. fabrikasyonunu mümkün kılmaktadır. Mükemmel optik özellikler ve yüksek taşıyıcı hareketliliği ile karakterize edilen doğrudan bant aralığına sahip III-V yarıiletkenleri, silikon esaslı mikroelektronik hibrit için en iyi adaydır. III-V bileşik yarıiletkenleri içeren hibrit alt tabakalar, yüksek hızlı ve düşük güçte CMOS uygulamaları için silikonsuz transistör kanal malzemeleri olarak büyük bir potansiyele sahiptir. III-V yarıiletkenlerinin silisyum ile birleşmesi, silikon üzerindeki

çok tabakalı yapıların hetero-epitaksiyel büyümesine veya çeşitli yonga yapıştırma tekniklerine dayanır. Bu tür yapılarla desteklenen aygıtlar, III-V yarıiletkenlerin yüksek taşıyıcı mobilitesini ve yüksek parlaklık verimliliğini iyi geliştirilmiş silikon teknolojisi ile birleştirmektedir. Bu hibrit sistemlerin seri üretime karşı önündeki en büyük engel; Silisyum üzerindeki III-V yarıiletkenlerinin doğrudan büyütme zorluklarıyla ilgilidir ki bunlar polar / polar olmayan yüzey uyuşmazlığı, büyük örgü uyuşmazlığı ve III-V materyalleri ile Si'nin termal genleşme katsayıları arasındaki farklardır. III-V yarıiletkenler ya direkt olarak silikon üzerinde büyütülür ya da çip-yonga yapıştırması kullanılarak silikon yongalara birleştirilir (Prucnal *et al.* 2014).

Işık kaynakları, silisyum taban üzerine emisyon malzemesinin direkt büyütülmesi ile monolitik olarak imal edilebilir. Bir III / V aktif bölgesinin, silisyum ya da yalıtkan üzeri silisyum yonga üzerine yapıştırılması ve SSC'ler(spot-size converters) yardımıyla lazer yüzü ile silisyum dalga kılavuzunu birbirine yapıştırılarak bir hibrit entegre ışık kaynağı imal edilmesi sonrasında lazer yapıları oluşturulabilir (Hatori *et al.* 2014).

III-V yarıiletkenlerde son zamanlarda kaydedilen ilerlemeler, geniş bir uygulama yelpazesine uygulanabilen olası fotonik entegre devreleri (PIC) içermektedir. Pasif (izolatörler, sirkülatörler, bağlayıcılar vb.) ve aktif bileşenlerin (aktif izolatörler, lazerler, modülatörler, yükselticiler ve foto dedektörleri) sıkça kullanılan monolitik entegrasyonu, devrelerdeki bileşenlerin artmasına neden olur. Böylece devreler karmaşık bir hal alır. Son çalışmalar Si üzerindeki III-V katmanlarının epitaksiyel büyümesi üzerinde önemli adımlar içerir (Schires *et al.* 2016).

Ancak, çoklu yarıiletken malzemeler arasındaki kafes sabitleri ve termal genişleme katsayılarındaki büyük uyuşmazlıklar nedeniyle, bileşik yonga tabakalarının silikon alt tabaka üzerindeki geniş alanlı epitaksiyel büyümesi yakın gelecekte kesintisiz monolitik entegrasyon açısından pratik sınırlamalara sahip olabilir. Yonga ölçekli yapıştırma, tipik olarak atomik ölçeğe kadar mükemmel temizlik ve yüzey düzgünlüğü gerektirir ve bu da geniş alanlı yüzeyler için yüksek bir verimle elde edilmesi zordur. Bu kadar katı

şartlar nedeniyle, hala süreç seviyesinde güvenilirlik ve imalat maliyetinde çeşitli pratik sorunlar vardır (Jung *et al.* 2016).

Ayrıca küçük ayak izi(foot print) ve düşük enerji tüketimi için monolitik entegrasyonun dezavantajları mevcuttur. III-V / Si hibrit entegrasyonu ile çip lazer kaynaklarını geliştirmek için önemli çaba sarf edilmiştir. Birçok grup bireysel III-V ve yalıtkan üzeri silisyum (SOI) yongadan kenardan kenara veya dikey konfigürasyon yoluyla entegrasyonu göstermiştir (Lee *et al.* 2016).

2.6.1.c. Heterojen entegrasyon

III-V materyallerin kalıp veya yonga bağlanması ile heterojen entegrasyonudur. Bir III-V yığın, orijinal büyütme alt katmanından yapıştırma teknikleri ile bir SOI yongaya aktarılır. Daha sonra, III-V lazer diyotları, yonga ölçekli işleme kullanarak SOI yonga üzerinde imal edilir. Bu teknik, yüksek yoğunlukta bir entegrasyon, toplu işleme ve yüksek kaliteli III-V katmanlarının kullanılmasına izin verir. Lazer yapısı, altındaki bir silikon dalga kılavuzuna ışığın doğrudan birleşmesini sağlamak için tasarlanabilir (Lamponi 2013).

İndiyum fosfit (InP) gibi III / V malzemelerin heterojen entegrasyonu, SOI platformuna yüksek hızlı ve etkin III / V tabanlı fotonik bileşenler takımına erişim olanağı tanır. Bu InP tabanlı bileşenler, yaklaşık 1 V-mm efektifliklerde 40-80 Gb / s aralıkta ve 100 Gb / sn'nin çok üzerinde bit hızlarına sahip EAM'lar ile çalışan elektrorefraktif modülatörler içerir (Heck *et al.* 2013).

Bununla birlikte, birçok çalışmaya rağmen, doğrudan silikon malzemeden verimli ışık emisyonu, silikonun endirekt bant aralığından kaynaklanan düşük radyasyon rekombinasyon hızı nedeniyle başarılmamıştır. Bu nedenle III-V bileşik yarıiletken ışık kaynaklarının silikon fotonik çiplere hibrit / heterojen entegrasyonu, çip ölçekli optik bağlantı sistemlerinin pratikte uygulanması için büyük ilgi uyandırmıştır. Temsilci örnekler, silikon üzerine bileşik yarıiletkeninin hetero-epitaksiyel direkt büyütmeyi ve

yonga düzeyinde yapıştırma içerir. Heterojen olarak entegre edilmiş elektronik ve fotonik devreler için bariz bir alternatif yaklaşım, örneğin mikro tutacak veya pul yardımcı transfer baskı(micro-grippers or stamp-assisted transfer printing) ile toplama ve yerleştirme(pick-up and placement) teknikleri olarak adlandırılmaktadır (Jung *et al.* 2016).

2.6.2. Yapıştırma teknikleri

III-V yığın (kalıp ve yonga içeren), hassas hizalama toleransları olmaksızın bir SOI yonga üzerine birleştirilebilir. Pürüzlü III-V materyallerin her yere bağlanmasına gerek olmadığı, ancak ihtiyaç duyulduklarında bağlanabilmesinden dolayı kalıp-yonga yapıştırma ile entegrasyon işlemi maliyetlerini daha da düşürülebilir. Literatürde ağırlıklı olarak kullanılan üç yapıştırma çeşidi; moleküler yapıştırma, yapışkan yapıştırma ve metal yapıştırma.

2.6.2.a. Moleküler yapıştırma

Moleküler bağlanma, iki oksitlenmiş ve hidrofilik yüzey arasındaki Van Der Waals etkileşimlerine dayanmaktadır. Yapışma tabakası kalınlığı on nanometrenin altına düşürülebilir. Bu nedenle yüzeyler arasında çok yakın bir teması ihtiyaç vardır ve yapışma kalitesi yüzey pürüzlülüğü ve parçacıklara karşı çok hassastır. Yapışma tabakası kalınlığı birkaç nanometre ve birkaç yüz nanometre arasında değişebilir (Lamponi 2013).

Heck *et al.* (2013), hibrit silikon platform heterojen bir şekilde III / V işlevselliğini SOI platformunda moleküler yonga yapıştırma vasıtasıyla bütünleştirdiğini ileri sürmüştür.

Klasik olarak, III-V materyalinin Si üzerine entegrasyonu, kafes uyumsuzluğuna uyum sağlamak için ya benzosiklobüten(BCB) ya da kalın / ince oksit gibi bir polimer katmanı kullanılarak moleküler birleştirme ile yonga yapıştırma yoluyla gerçekleştirilir.

Bu ara tabaka, elektrik iletiminin yanı sıra termal iletkenlik açısından da sorun oluşturur (Bougot-Robin *et al.* 2014).

2.6.2.b. Yapışkan yapıştırma

Yapışkan bağlar, yapıştırma aracı olarak termoset polimer divinilsiloksan benzosiklotbütin (DVS-BCB) kullanır. DVS-BCB, yüzey pürüzlülüğünü telafi edebilir, bu nedenle bağlanma toleransları moleküler yapıştırma ile karşılaştırıldığında rahattır. Bununla birlikte, yapışma tabakası kalınlığı elli nanometrenin altında kolayca düşürülemez ve DVS-BCB'de termal iletkenlik silisyumdan daha düşüktür (Lamponi 2013).

Örnekler arasında, dielektrik polimer divinilsiloksan-benzosiklobuten (DVS-BCB) kullanılarak yapışkan yapıştırma ve bir ara katman eklemeyen plazma ışınlamayla doğrudan bağlanma yer alır. Hibrit cihazları imal etmek için genellikle küçük bir yongayla (örneğin birkaç santimetre ölçülerinde) yonga düzlemi yapıştırma veya seçici bağlar kullanılır. Bu durumda istenmeyen III-V katmanlı bölgeleri kaldırılmalı ve Si dalga kılavuzlarını oluşturmak için PIC'ler açığa çıkarılmalıdır. Bununla birlikte, PIC'lerdeki III-V katmanlarını çıkardıktan sonra Si dalga kılavuzunun yayılma kaybının, bağlanma öncesinden daha yüksek olduğu bilinmektedir. Detaylar henüz araştırılmamış olsa da saçılma ve absorpsiyon kaybındaki artışların nedenleri olduğu düşünülmektedir (Suzuki *et al.* 2014).

2.6.2.c. Metal yapıştırma

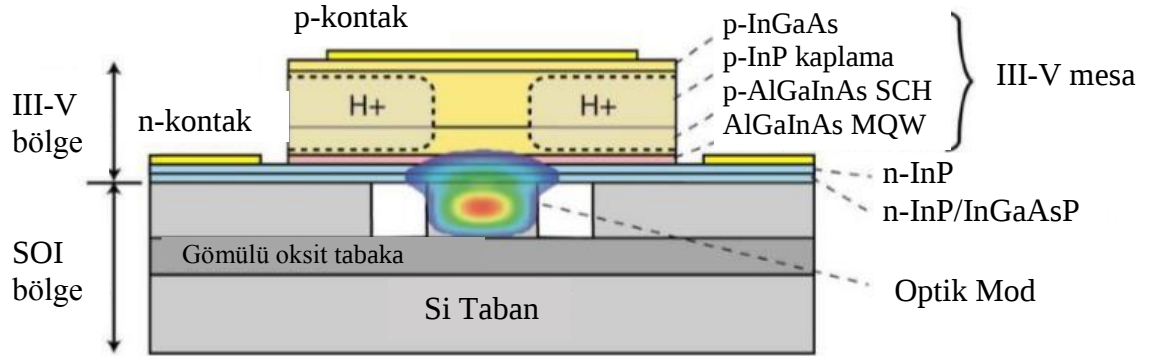
Metal yapıştırma; düşük bağlanma sıcaklığı, yüksek termal iletkenlik, kritik temizlik gereksinimleri ve silikon ile bağlı tabakalar arasında potansiyel olarak iletken bir arayüz ile karakterizedir. Bununla birlikte, güçlü ışık soğurması nedeniyle, yapıştırma metalleri ışık yayılım alanından uzak tutulmalıdır. Hibrit silikon lazerler tüm bu teknikler kullanılarak elde edilmiştir. Bu konudaki yayınlanan çalışmaların büyük bir çoğunluğu,

heterojen entegrasyonu gerçekleştirmek için moleküler bağ ve DVS-BCB bağı kullanmaktadır (Lamponi 2013).

SAMB yöntemi ile, yapıştırma metali tarafından ışık emilimini önlemek için optik bağlantı alanı ve metal birleştirme alanı yanal olarak ayrılır. Aynı zamanda, bu yöntem metal yapıştırmanın şu avantajlarını taşımaktadır: sıkı temizleme gerekliliği olmaması, üstün elektriksel özellikler ve termal iletkenlik. Doğrudan yonga yapıştırma ve BCB yapıştırma yöntemiyle karşılaştırıldığında, SAMB yönteminin avantajı mükemmel esnekliktir. Çeşitli ebatlarda veya farklı yapılara sahip farklı türdeki lazer yongaları, bir SOI alt tabakasının istenen herhangi bir yerine yapıştırılabilir. Tabanın diğer kısımlarının, Si pasif cihazların imalatı için dokunulmadan bırakılabilmesi, Si fotonikte SAMB yönteminin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. SAMB yöntemi, amplifikatörler ve dedektörler gibi diğer Si hibrit fotonik cihazlarının üretimi için de kullanılmaktadır (Yuan *et al.* 2015).

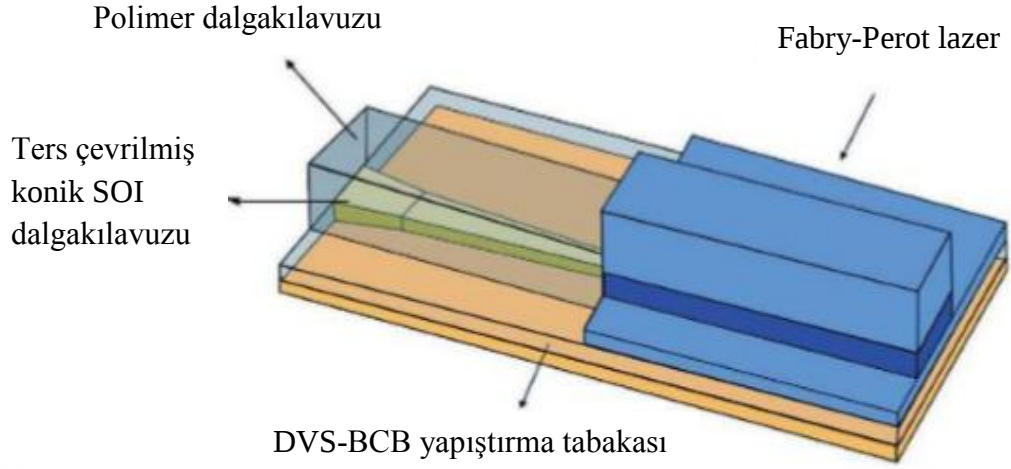
2.7. Fabry-Perot Lazerler

Fabry-Perot lazerler daha karmaşık lazer tasarımlarına doğru başlangıç noktasıdır. Son yıllarda çeşitli Fabry-Perot hibrit lazerler geliştirilmiştir. Daha önce anlatılan bütün yapıştırma teknikleri kullanılmıştır. Optik mod çoğunlukla Silikon dalga kılavuzunda sınırlıdır. Yanal akım sızıntısını önlemek için mesanın her iki yanında bir H + proton implantasyonu gereklidir. Lazer yapısının şematik bir görünümü Şekil 2.7'de verilmiştir. Bununla birlikte, çoklu kuantum kuyusu optik sınırlaması düşük olduğundan, bu cihazların lazer eşiği oldukça yüksektir ve güç tüketimi, standart III-V lazerler performansından uzaktır. Dahası, yapışma tabakası son derece ince olduğundan, bu teknik partikül kirliliğine, epitaksi pürüzlülüğüne ve yonga yayına karşı özellikle hassastır.



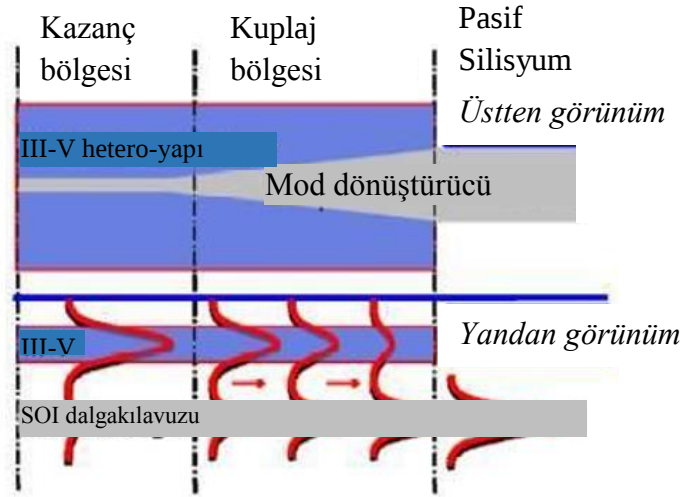
Şekil 2.8. Optik mod bindirilmiş Fabry-Perot lazer yapısının şematik gösterimi (Lamponi 2013)

Hibrit silikon lazerlerin öncülerinden olan UCSB ve INTEL grupları geçici kuplaja dayalı bir lazer yapısı geliştirmiştir. Dünyadaki CALTEC, IMEC gibi diğer gruplar bu tasarım konseptini küçük uyarlamalarla kullandı. IMEC, farklı bir kavram geliştirilmiştir. Bu durumda, optik mod bir III-V düz dalga kılavuzu ile sınırlanmış olup, bu dalga kılavuzunun her iki ucunda bir adyabatik bağlayıcı optik modu alttaki bir silikon dalga kılavuzuna aktarmaktadır. III-V dalga kılavuzu, elektrikle pompalanır ve yapıya kazanç sağlar. Optik geribesleme ise silikon dalga kılavuzu tarafından sağlanır. Optik geribesleme, yarılmış ya da aşındırılmış bir yüzey ya da geniş bir optik bant genişliği Bragg ızgarasıyla sağlanır. Bu mimari silikon lazerlerde doğal düşük kuantum kuyuları örtüşme sorununun üstesinden gelir. Tam aktarım, daha küçük bir enjeksiyon akımı için daha büyük bir kazanç ve teorik olarak daha düşük bir eşik ve güç tüketimi ile sonuçlanır. Bir IMEC konfigürasyonunda lazer diyodu bir polimer dalga kılavuzuna bağlanır ve ardından optik mod yavaş yavaş SOI dalga kılavuzu moduna dönüştürülür. Bu bağlantı düzeni Şekil 2.8'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.9. Ters çevrilmiş adyabatik konik bir yaklaşım için optik kuplaj şeması (Lamponi 2013)

LETI yapılandırmasında adyabatik koniklik, silikon dalga kılavuzunun içinde bulunur. Silikon dalga kılavuzunun genişliği arttıkça optik mod Şekil 2.9'da gösterildiği gibi bir dalga kılavuzundan adyabatik olarak aktarılır.



Şekil 2.10. Üst aktif dalga kılavuzundan alt silikon dalga kılavuzuna süpermodun transferini gösteren bir koniğin üstten ve yandan görünüşleri (Lamponi 2013)

Tüm Fabry-Perot hibrit lazerleri ve daha genel olarak SOI üzerindeki her türlü hibrit lazer, saf III-V yarıiletkenlerde elde edilen en iyi performansın haricinde bir termal

davranış sergilemektedir. Bu, yapıştırma tabakasının (hem DVS-BCB hem de SiO₂) düşük ısı iletkenliğinden ve SOI dalga kılavuzu alt tabakasında 2 µm kalınlığa gömülü oksit katmanının varlığından kaynaklanan, bağlanmış lazer diyotlarının yüksek termal direnciyle ilgilidir. Kaldırma (Lift-off) ile yapılan altın esaslı metalizasyon katmanları genellikle InP teknolojisinde kullanılır. Yine de, altın silikonda derin bir doping seviyesi görevi görür ve bu nedenle bir mikroelettriğin temiz odasında kesinlikle bulunmaz. Hem n-InP hem de p-InGaAs katmanlarında CMOS uyumlu, altın içermeyen ohmik kontaklar, mikroelettronik standardı ile elde edilir. Bu gelişmeler silikon üzerinde bir Fabry-Perot lazerin imal edilmesine yol açmıştır. Son olarak, Fabry-Perot lazerin iki ana kategorisi sunulmuştur. İlki, oldukça yaygınlaşmış olan silikon ve III-V arasındaki yapıştırmaya dayanan, ancak performans ve imalat sınırlamaları olan kategoridir. Diğerisi ise daha yeni olan ama potansiyel olarak daha iyi sonuçlar verebilen optik modun tamamen aktarılmasına dayanmaktadır (Lamponi 2013).

2.8. SOI Lazerler

Orta ve büyük ölçekli entegrasyon imkanı sunması, yalıtkan üzeri silikon (SOI) platformundaki silikon fotoniklerin araştırılması için büyük bir tetikleyicidir. SOI üretim altyapısı CMOS teknolojisi ile uyumludur. Yaygınlaştığı için sağlam, yüksek verimli ve tekrarlanabilir teknoloji sayesinde iyi performans sağlamaktadır. SOI platformundaki fotonik entegre devreler (PIC) büyük (200 mm) çaplı yongalarda gerçekleştirilebilir, bu avantaj düşük maliyetli ve yüksek hacimlere izin verir. SOI tabanlı PIC'ler telekomünikasyon platformunda 1,3 ve 1,55 µm'lik dalgaboylarında çalışırlar. Bu yüzden başlıca uygulama alanları telekomünikasyon ve ara bağlantılardır. SOI platformu; filtre, multiplexer, demultiplexer, bölücü, modülatör ve fotodetektör(PD'ler) gibi neredeyse bütün fotoniklere imkan sunar (Heck *et al.* 2013).

Yüksek çözünürlüklü mobil video akışı, “Nesnelerin İnterneti”(IoT) olayı ve hızlı bulut bilgi işlem gibi teknolojiler yüksek hızlı sistemler dolayısıyla yüksek bant genişlikleri gerektirmektedir. Bakır yollardan ziyade optik ara bağlantılar, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi, düşük enerji tüketimi ve ölçeklenebilirlik için önemli bir

potansiyele sahiptir. Yeni fiber teknolojileri (çok çekirdekli ve boşluklu çekirdekli fiber), tek bir fiberde toplam 100 Tb / s data iletim hızına ulaşmıştır. Dahası, çeşitli çoklayıcı teknolojileri bant genişliği kapasitesinin artırılmasında kullanılmaktadır. Bununla birlikte, optik/elektrik ve elektrik/optik dönüştürücü, lazerler, modülatörler, dedektörler, yükselteçler ve çoklayıcılar gibi birden fazla bileşenin entegrasyonuna dayanır. Örneğin, tek bir 40 kanallı WDM sistemi, 100'den fazla aygıt, bileşen ve yaklaşık 300 fiber bağlantısı içermektedir. Bu nedenle çeşitli kayıplar oluşarak tüketimi önemli ölçüde artırabilmekte ve bu sistemler için yüksek bakım maliyetlerine yol açabilmektedir. Büyük data hacimlerine yanıt olarak artan bağlantıların sayısı artacağından mimari ve ergonomik olarak elverişsiz hale gelecektir. Açıkçası, bu eksikliklerin üstesinden gelmek için verimli, ölçeklenebilir ve çok fonksiyonlu entegre sistemler için yeni entegrasyon platformları geliştirilmelidir. Bu tür entegre sistemleri etkinleştirmek için gerekli temel unsurlardan biri ultra kompakt, enerji açısından verimli ve dayanıklı yakın kızılötesi lazer kaynağıdır. Nihai minyatürleştirme arayışında, silikon üzerinde epitaksiyel olarak büyümüş bir nanolazer, bir III-V / Si fotonik kristal nanolazer ve silikon üzerinde yongaya bağlı nanolazer içeren çeşitli dalgaboylu lazerler üretilmiştir (Bondarenko *et al.* 2015).

Son yıllar yalıtkan üzeri silikon (SOI) platformunda silikon optoelektronik entegre cihazların geliştirilmesine tanık olmuştur. SOI ve üzerindeki optik bağlantılar, elektriksel bağlantıların sınırlamalarını aşmak için gerçekçi bir aday olarak kabul edilmektedir. Ne yazık ki, endirekt bant aralığı nedeniyle silikon, optik bağlantıların ana zorunluluğu olan etkili ışık yayılımı sağlayamamaktadır. Yapıştırma teknolojisi, bu zorluğu gidermek için umut verici bir teknolojidir. Çeşitli yapıştırma yöntemleri benimsenmiştir ve son teknolojiye sahip hibrit lazerler üzerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Fabry-Perot, dağıtılmış Bragg reflektör (DBR) ve dağıtılmış-geri beslemeli (DFB) lazerler doğrudan yönlendirmeli yapıştırma yöntemi ile başarıyla gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte, bu yöntem kritik temizlik gereksinimi gerektirir. Divinylsiloxane-Benzocyclobutene (DVS-BCB) yapıştırma yaygın olarak kullanılan bir diğer yapıştırma yöntemidir. Bununla birlikte, DVS-BCB yapıştırma tabakası zayıf termal özelliklere ve konik yapılanmaya neden olur ve işlem karmaşıklığı artar.

Silisyum üzerindeki III-V yarıiletkenlerinin epitaksiyel büyümesi konusunda önemli sonuçlar elde edilmiştir. Silikon alt tabaka üzerinde büyütülmüş GaAs tabanlı yüksek performanslı 1.3 μm InAs kuantum lazerleri geliştirilmiştir. Ayrıca, doğrudan silikon alt tabaka üzerine büyütülmüş lazerler, etkili dalga kılavuzu eşlemesi için SOI yongalara bağlanabilir. Bununla birlikte, InP ve silisyumun örgü(kafes) uyumsuzluğu nedeniyle, silikon alt tabaka üzerinde büyütülen yüksek performanslı 1.55 μm kuantum nokta lazerlere ulaşamamıştır. Şu anda yapıştırma yöntemine dayandırılan 1.55 μm InP / Si hibrit lazer, halen silisyum tabanlı lazer kaynağı ve PIC için uygun bir adaydır (Yuan *et al.* 2015).



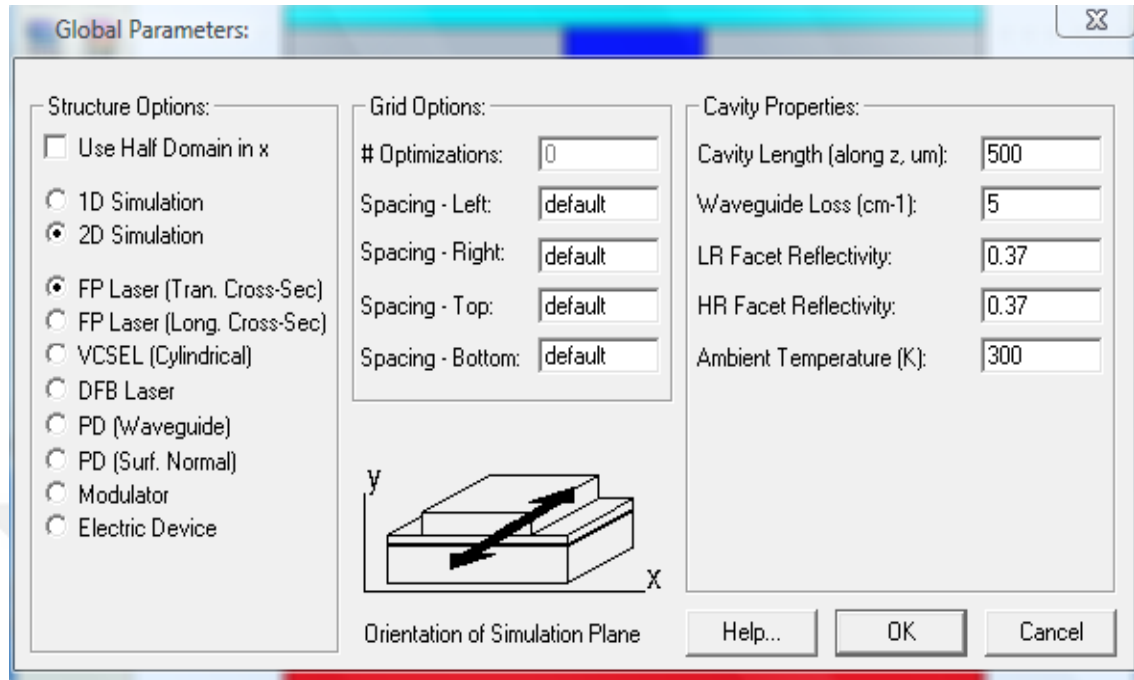
3. MATERYAL ve YÖNTEM

1300 nm dalgaboylu InGaAsP lazer yapısını simüle etmek için LaserMOD (RSoft firması) ticari yazılımını kullandık.

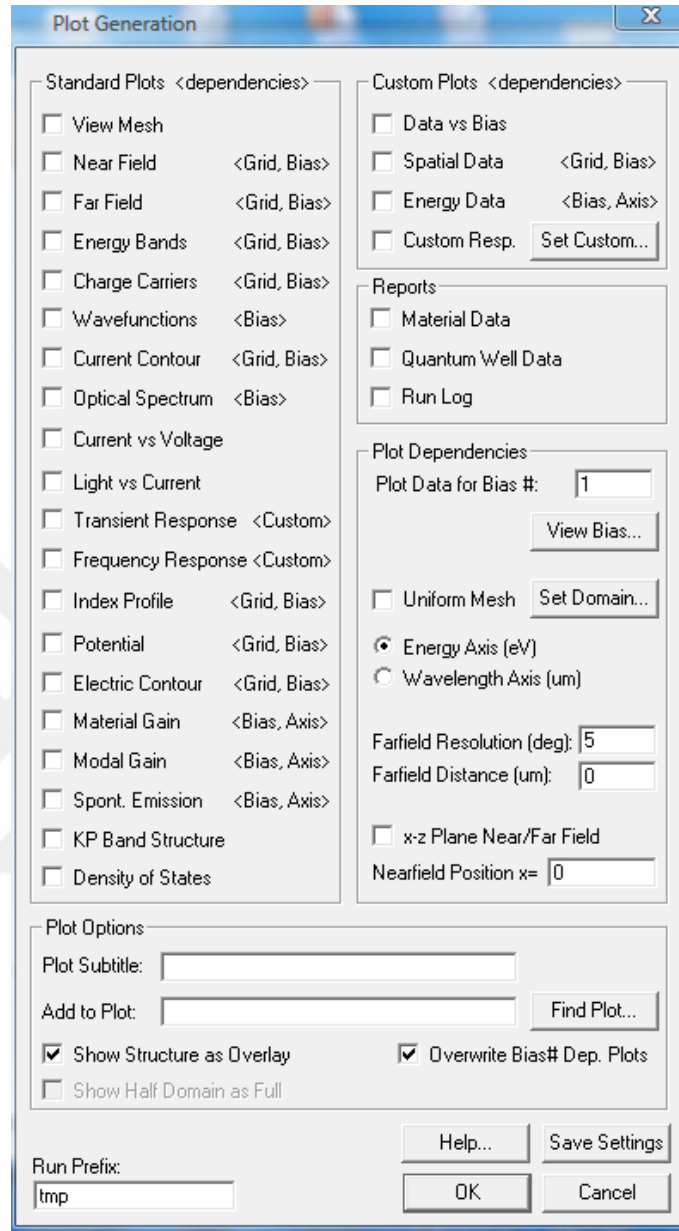
3.1. LaserMOD

LaserMOD yarıiletken lazerlerin ve aktif fotonik yapıların tasarımı ve simülasyonu için entegre bir yazılım paketidir. Mevcut versiyon, Fabry-Perot (FP) kenar emitörleri, dikey boşluk yüzeyli lazerler (VCSEL), dağıtılmış geri besleme lazerleri (DFB) ve dedektör uygulamalarını barındırır. LaserMOD, malzeme kütüphaneleri, kazanç ve mod hesaplama yardımcı programları, simülasyon motoru, standart ve özel çizim üretme yardımcı programları ve çok yönlü grafik görüntüleme programları ile tamamen entegre bir platformdur. Fabry-Perot lazer yapısı kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.1’de gösterilen seçimler yapılarak lazer tanımlanmıştır. Daha sonra Şekil 3.2’deki seçenekler kullanılarak bazı çizimler gerçekleştirilmiştir.

LaserMOD TM, yarıiletken lazerlerin optik ve elektronik özelliklerini simüle etmek için kullanılan fotonik bir cihaz tasarım aracıdır. LaserMOD, tutarlı elektro-termik taşıma ve optik alan yayılımı çözümünü sağlayan, güçlü, sağlam bir simülasyon motoruyla pazardaki en kullanışlı, kullanıcı dostu ve öğrenmesi kolay GUI’yi birleştirir. Cihaz uygulamaları şu anda Fabry-Perot tipi ve dikey yüzey yayıcı (VCSEL) lazerler gibi kenar yayıcıları içermektedir. Devam etmekte olan geliştirme çabalarından kaynaklanan bu aracın gelecek bültenleri, DFB, SOA ve PBG boşluk tabanlı lazerleri ele alacaktır. RSoft Design Group'un diğer bileşen tasarımı ürünleri ile birlikte LaserMOD, optoelektronik entegre devreler için tasarım ihtiyacını karşılamak için iyi konumlandırılmıştır.



Şekil 3.1. Lazer yapısı seçimi



Şekil 3.2. Çizim seçenekleri

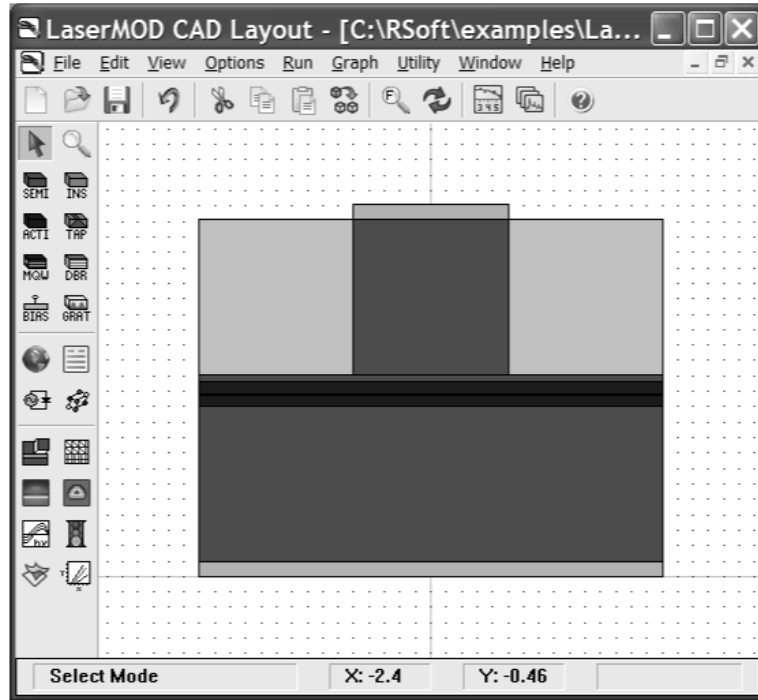
3.2. Simülasyonda Kullanılan Lazer Modelleri

3.2.1. Fabry-Perot

Fabry-Perot lazerler için şu anda LaserMOD'da üç mod çözücü bulunmaktadır. Birincisi, Ritz altuzay yinelemesine dayanan bir skaler Helmholtz denklemi doğrudan

matris yöntemi, ikincisi, dalga kılavuzu kesişiminin skaler veya vektör modlarını hesaplayabilen bir BPM (Kiriş Yayılım Yöntemi) tabanlı mod çözücü ve üçüncüsü, FEM (Sonlu Element Metodu) 2D FP lazerler içindir.

Ritz yineleme yöntemi, taşıma sorunu için belirtilen şekilde düzgün olmayan ağ kullanır. Altta yatan indis profili için enterpolasyon sorunları önlenir iken, modu çözmek için düzensiz ağ üzerinde ek kısıtlamalar uygulanabilir. Fabry-Perot lazerler için, lazer frekansı tepe kazancının konumu tarafından belirlenecektir. Yazılımdaki örnek çizim Şekil 3.3’de gösterilmiştir.

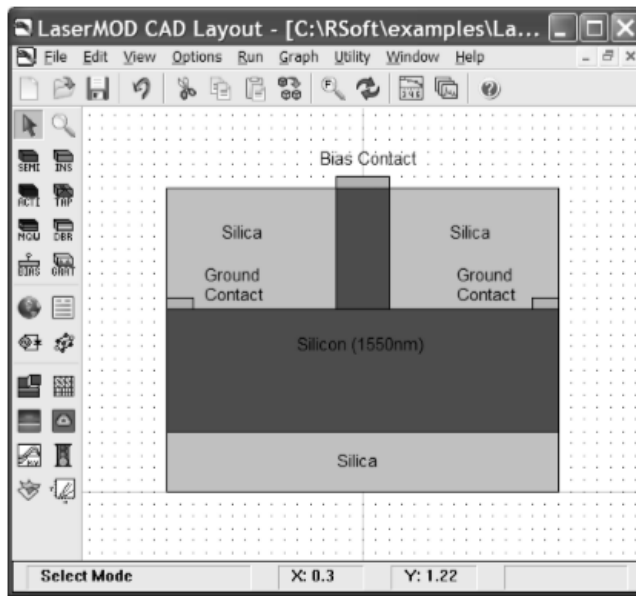


Şekil 3.3. Örnek Fabry-Perot lazer çizimi

3.2.2. Silicon on Insulator (SOI)

SOI yapının kullanım gerekçeleri aşağıda belirtilmiştir:

- Silikon fotonik, elektronikle monolitik entegrasyonun avantajına sahip olduğu için dikkat çekmiştir.
- Modülatörler optik iletişim sistemlerinin kilit bileşenleri olup, III-V yarıiletken bileşiklerden imal edilerek uygulanırlar.
- Silikon modülatörler, serbest taşıyıcı soğurma ile ilişkili endeks değişimini kullanmaktadır, ancak yavaş çalışma hızlarında olmaları dezavantajdır.
- Fizik tabanlı simülasyon, bu tür cihazların performansını artırmada yardımcı olabilir.
- Taşıyıcıların taşınması, yarıiletken sistemler ile çalışılırken termo-optik etkilerin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesini sağlar. Kullanılan yapı, yalıtkan üzeri silikon (SOI)'de uygulanan üst ve yan ohmik kontaktları olan basit bir sırt(ridge) dalga kılavuzu olacaktır. Cihazın çalışması 1300nm'dedir. Cihaz kesitini düzenledikten sonra uygun bias parametreleri ile simülasyon gerçekleştirilmiştir. Yazılımdaki örnek çizim ise Şekil 3.4'de gösterilmiştir.



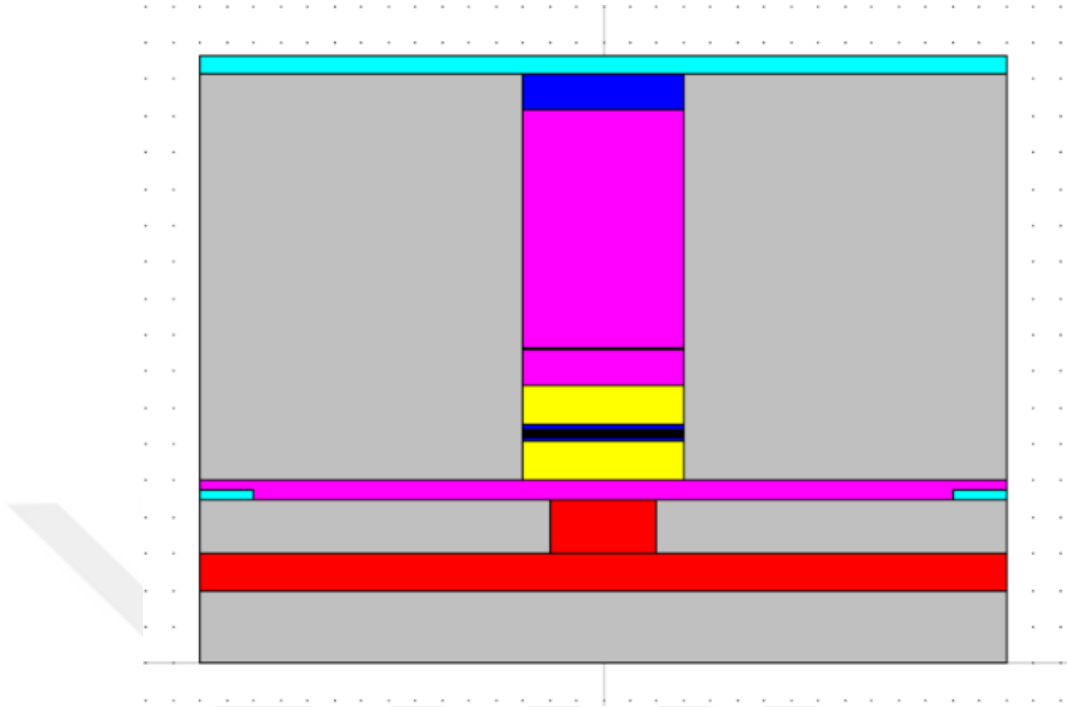
Şekil 3.4. Örnek SOI lazer çizimi

3.3. 1300 nm InGaAsP Tasarımı

Çizelge 3.1. InGaAsP/InP lazer yapısı

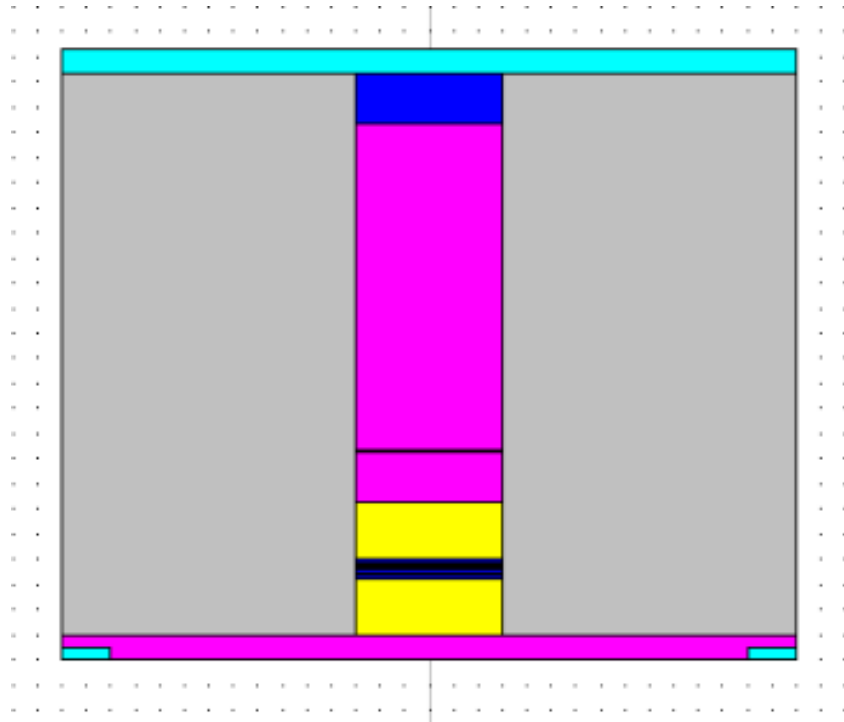
Tabaka no	Tabaka adı	Malzeme	Mol oranı (x,y)	Kalınlık (μm)	ND, NA (cm-3)	Tip
12	Kontak tabakası	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$	0.53	0.2	2×10^{19}	p+
11	Kaplam a tabakası	InP	-	1.3	5×10^{17}	p
10	Aşındırma durdurma tabakası	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.85$ $y=0.32$	0.008	2.5×10^{17}	p
9	Üst kaplama tabakası	InP	-	0.2	2.5×10^{17}	p
8	SCH	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.88$ $y=0.24$	0.22	-	-
7	Bariyer	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.85$ $y=0.32$	0.02	-	-
6x2	QW	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.67$ $y=0.69$	0.008	-	-
5x2	Bariyer	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.85$ $y=0.32$	0.01	-	-
4	QW	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.67$ $y=0.69$	0.008	-	-
3	Bariyer	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.85$ $y=0.32$	0.02	-	-
2	SCH	$\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}_y\text{P}_{1-y}$	$x=0.88$ $y=0.24$	0.22	-	-
1	Alt kaplama tabakası	InP	-	0.1	8×10^{17}	n
0	Taban	Si/SiO ₂	-	0.9	-	-

Çizelge 3.1'deki parametreler kullanılarak Şekil 3.5'deki InGaAsP/InP hibrit lazer tasarımı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.5. InGaAsP/InP hibrit lazer yapısı

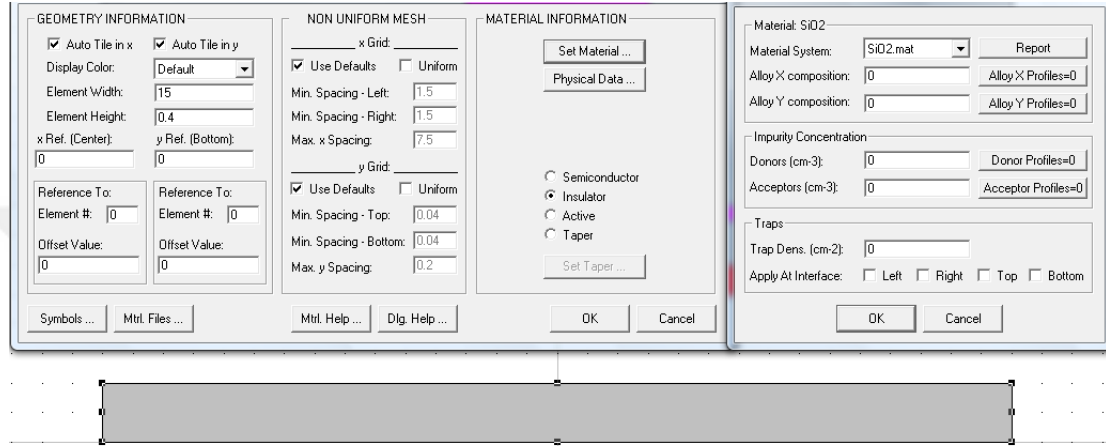
Bazı karşılaştırmalar yapmak amacıyla Şekil 3.6'daki silisyum taban içermeyen yapı kullanılmıştır.



Şekil 3.6. SOI yapı içermeyen InGaAsP/InP lazer yapısı

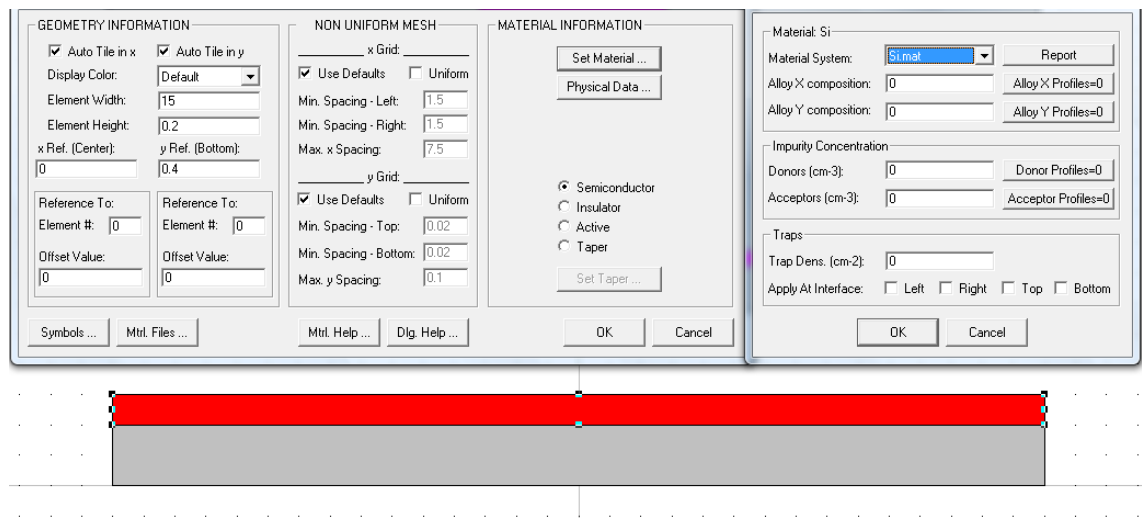
3.3.1. Taban (Si/SiO₂)

SOI yapı tasarımı için programın örnek tasarımında olduğu gibi taban bölümünün ilk tabakasını SiO₂ seçilmiştir. SiO₂ parametreleri Şekil 3.7’de verilmiştir.



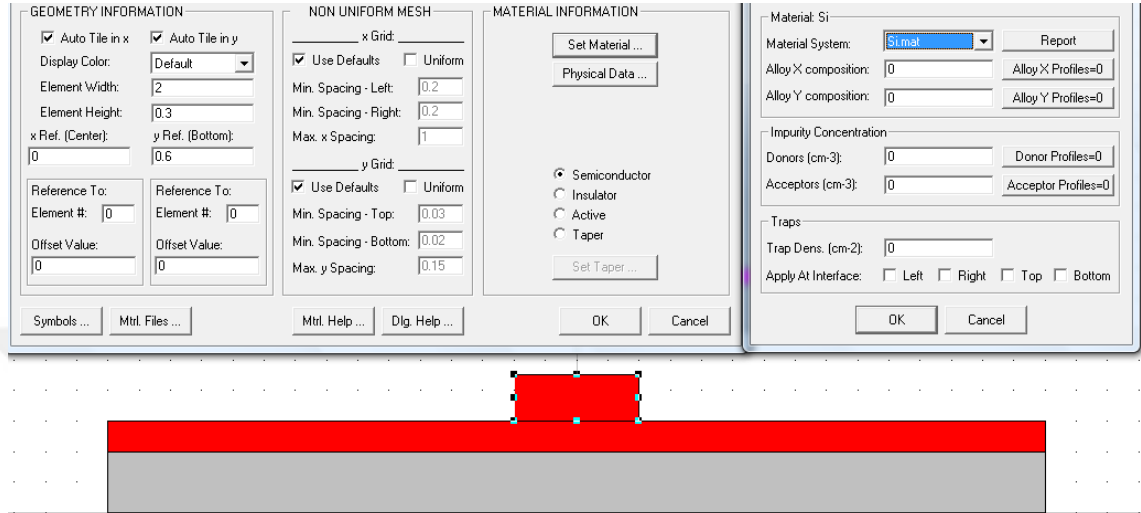
Şekil 3.7. SiO₂ taban bileşeninin özellikleri

SiO₂ tabakasının üzerine yarıiletken olarak Si tabaka ekliyoruz. Si parametreleri Şekil 3.8’de verilmiştir.



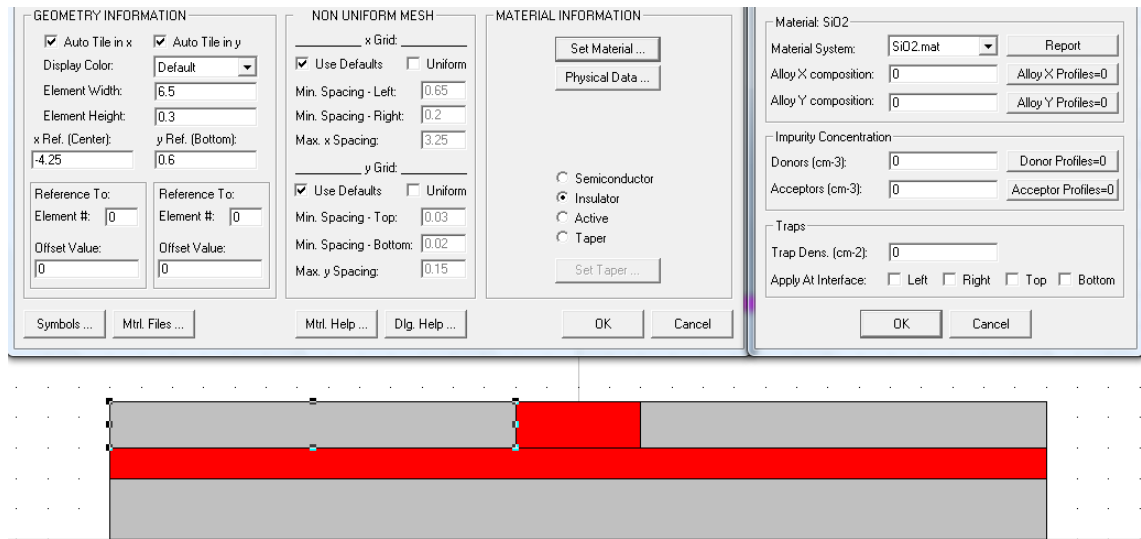
Şekil 3.8. Si taban bileşeninin özellikleri

Si tabakanın üzerine sırt (ridge) bölgesi için tekrar Si seçilip, taban bölümünü SiO_2 yalıtkanlarla tamamlanmıştır. Si sırt (ridge) parametreleri Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Si sırt(ridge) taban bileşeninin özellikleri

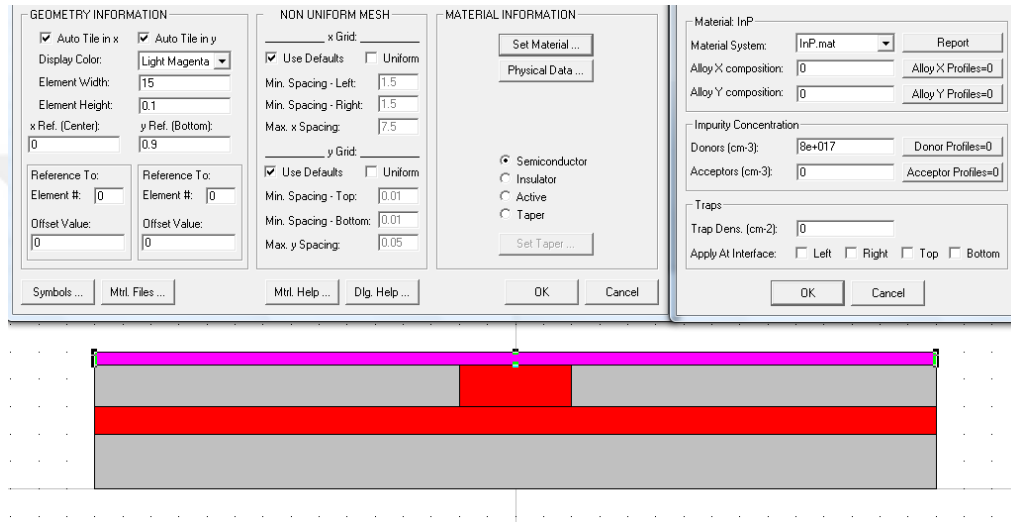
Taban bileşenlerinden üst taraftaki SiO_2 tabakaların parametreleri Şekil 3.10’da verilmiştir.



Şekil 3.10. Üst SiO_2 taban bileşenlerinin özellikleri

3.3.2. Alt kaplama tabakası (InP)

Tabanın üzerine Çizelge 3.2’de verilen kalınlık ve katkı derişimine uygun olarak InP tabaka seçilmiştir. N-tipi katkılama söz konusu olduğu için donör yoğunluğunu 8×10^{17} giriyoruz. InP parametreleri Şekil 3.11’de verilmiştir.

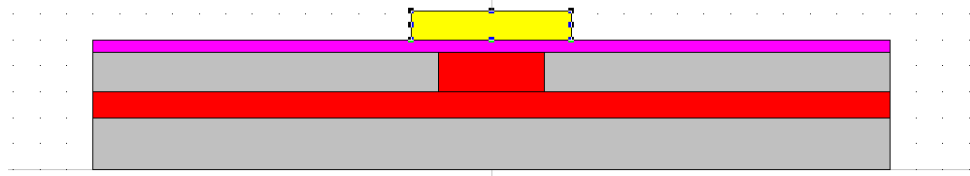


Şekil 3.11. Alt kaplama tabaka özellikleri

3.3.3. SCH (InGaAsP)

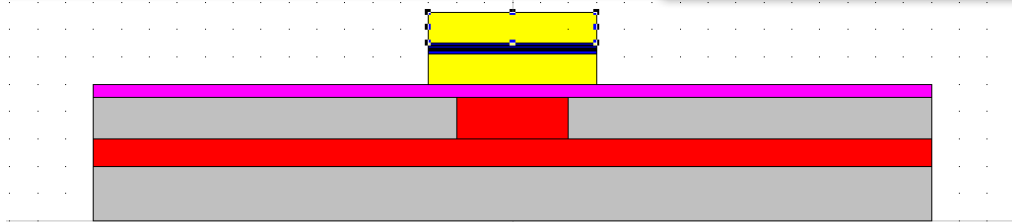
SCH ve bariyer tabakalarının mol oranları farklıdır, ancak yazılım SCH ve bariyer mol oranlarını farklı değerde tanımlamamıza izin vermez. Bu nedenle SCH tabakaları, MQW yapısından bağımsız aktif tabaka olarak seçilmiştir. Çizelge 3.1’de yer alan mol oranlarını tanımlanmıştır. MQW yapının en alt ve en üst kısmını oluşturan InGaAsP parametreleri sırasıyla Şekil 3.12’de ve Şekil 3.13’de verilmiştir.

GEOMETRY INFORMATION		NON UNIFORM MESH		MATERIAL INFORMATION	
☒ Auto Tile in x	☒ Auto Tile in y	x Grid:		Material: Ga(0.12)In(0.88)As(0.24)P(0.76)	
Display Color: Yellow		☒ Use Defaults	☐ Uniform	Material System: GaInAsP.mat Report	
Element Width: 3		Min. Spacing - Left: 0.3		Alloy X composition: 0.12 Alloy X Profiles=0	
Element Height: 0.22		Min. Spacing - Right: 0.3		Alloy Y composition: 0.24 Alloy Y Profiles=0	
x Ref. (Center): 0	y Ref. (Bottom): 1	Max. x Spacing: 1.5		Impurity Concentration:	
Reference To: Element #: 0	Reference To: Element #: 0	y Grid:		Donors (cm-3): 0 Donor Profiles=0	
Offset Value: 0	Offset Value: 0	☒ Use Defaults	☐ Uniform	Acceptors (cm-3): 0 Acceptor Profiles=0	
		Min. Spacing - Top: 0.022		Traps	
		Min. Spacing - Bottom: 0.01		Trap Dens. (cm-2): 0	
		Max. y Spacing: 0.11		Apply At Interface: ☐ Left ☐ Right ☐ Top ☐ Bottom	
Symbols ... Mtl. Files ...		Mtl. Help ... Dlg. Help ...		OK Cancel	



Şekil 3.12. Alt SCH tabaka özellikleri

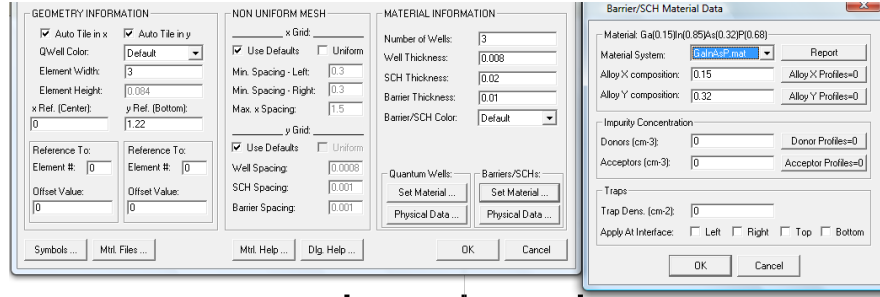
GEOMETRY INFORMATION		NON UNIFORM MESH		MATERIAL INFORMATION	
☒ Auto Tile in x	☒ Auto Tile in y	x Grid:		Material: Ga(0.12)In(0.88)As(0.24)P(0.76)	
Display Color: Yellow		☒ Use Defaults	☐ Uniform	Material System: GaInAsP.mat Report	
Element Width: 3		Min. Spacing - Left: 0.3		Alloy X composition: 0.12 Alloy X Profiles=0	
Element Height: 0.22		Min. Spacing - Right: 0.3		Alloy Y composition: 0.24 Alloy Y Profiles=0	
x Ref. (Center): 0	y Ref. (Bottom): 1.304	Max. x Spacing: 1.5		Impurity Concentration:	
Reference To: Element #: 0	Reference To: Element #: 0	y Grid:		Donors (cm-3): 0 Donor Profiles=0	
Offset Value: 0	Offset Value: 0	☒ Use Defaults	☐ Uniform	Acceptors (cm-3): 0 Acceptor Profiles=0	
		Min. Spacing - Top: 0.022		Traps	
		Min. Spacing - Bottom: 0.001		Trap Dens. (cm-2): 0	
		Max. y Spacing: 0.11		Apply At Interface: ☐ Left ☐ Right ☐ Top ☐ Bottom	
Symbols ... Mtl. Files ...		Mtl. Help ... Dlg. Help ...		OK Cancel	



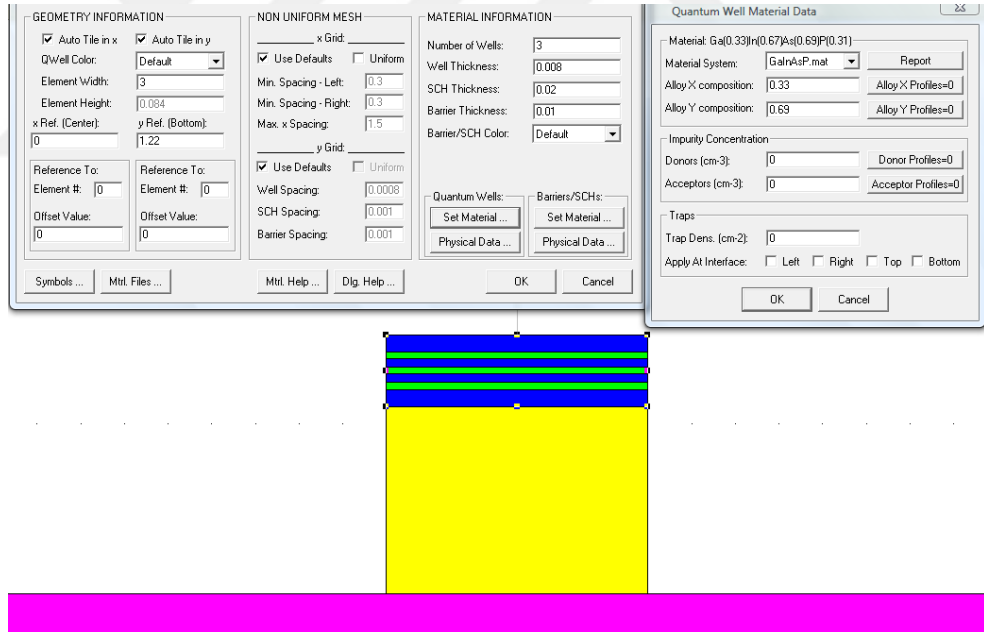
Şekil 3.13. Üst SCH tabaka özellikleri

3.3.4. Bariyer ve QW (InGaAsP)

Çizelge 3.1'deki mol oranlarını tanımlanmıştır. Bariyer ile QW yapının mol oranları farklıdır ve yazılım bu oranları birbirinden farklı tanımlamamıza imkan sunar. Bariyer ve QW parametreleri sırasıyla Şekil 3.14'de ve 3.15'de verilmiştir.



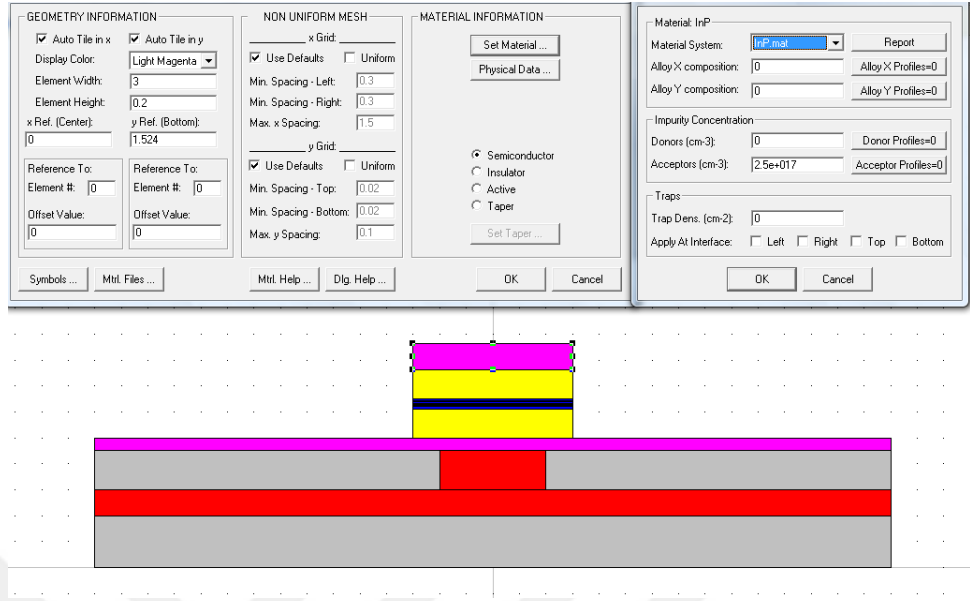
Şekil 3.14. Bariyer tabaka özellikleri



Şekil 3.15. QW tabaka özellikleri

3.3.4. Üst kaplama tabakası (InP)

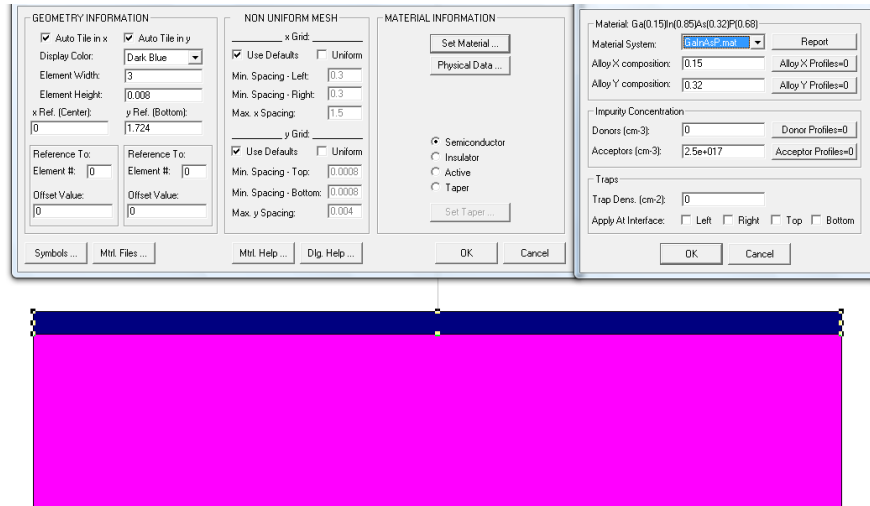
P-tipi katkılama söz konusu olduğu için akseptör yoğunluğunu 2.5×10^{17} olarak tanımlanmıştır. InP parametreleri Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Üst kaplama tabaka özellikleri

3.3.5. Aşındırma durdurma tabakası (InGaAsP)

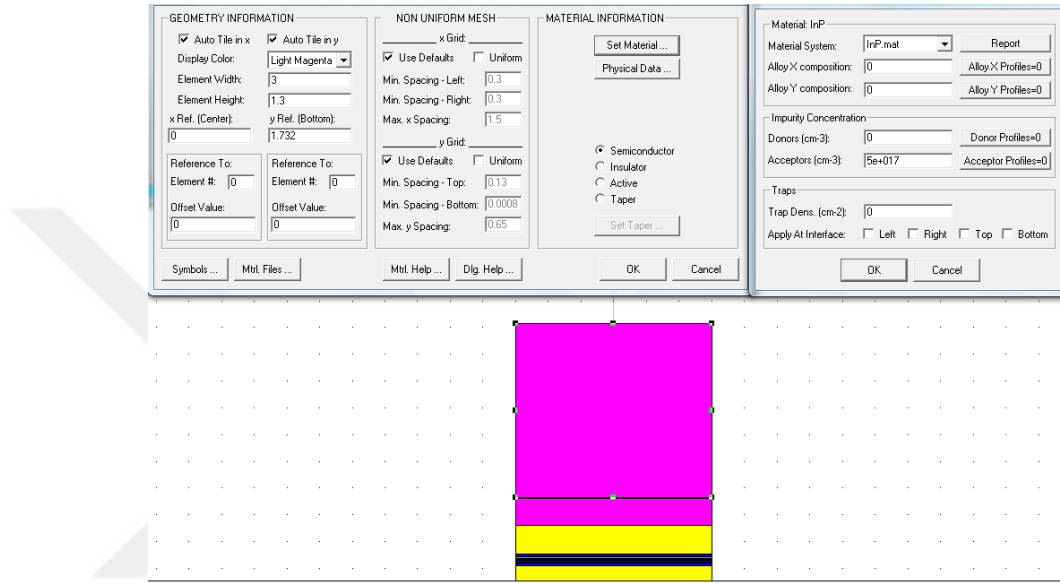
Çizelge 3.1'e uygun parametreler tanımlanmıştır. InGaAsP parametreleri Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Aşındırma durdurma tabaka özellikleri

3.3.6. Kaplama tabakası (InP)

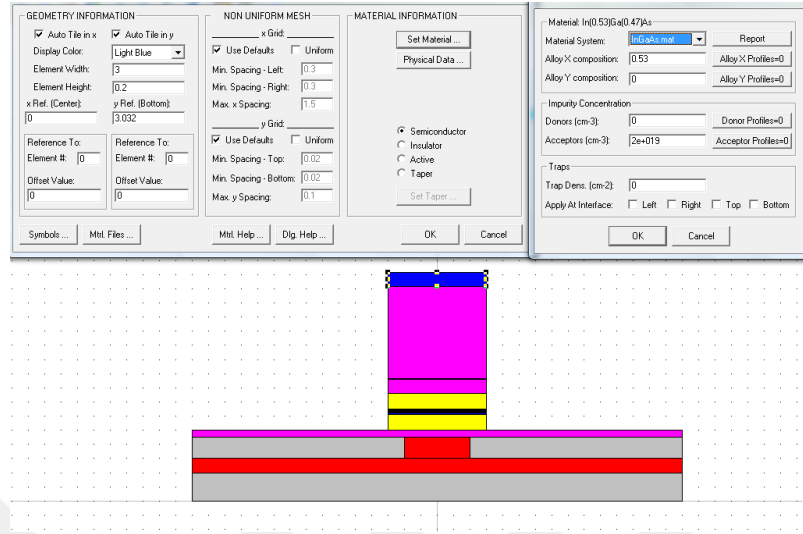
Çizelge 3.1'e uygun parametreleri tanımlanmıştır. InP parametreleri Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Kaplama tabaka özellikleri

3.3.7. Kontak tabakası (InGaAs)

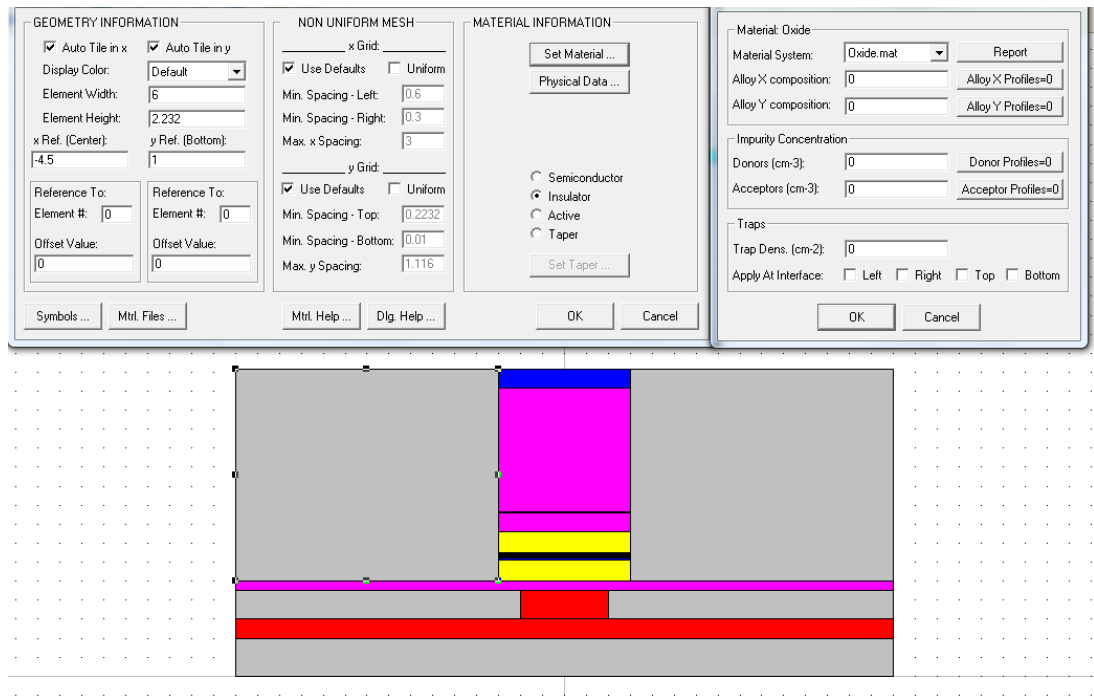
Çizelge 3.1'e uygun parametreleri tanımlanmıştır. InGaAs parametreleri Şekil 3.19'da verilmiştir.



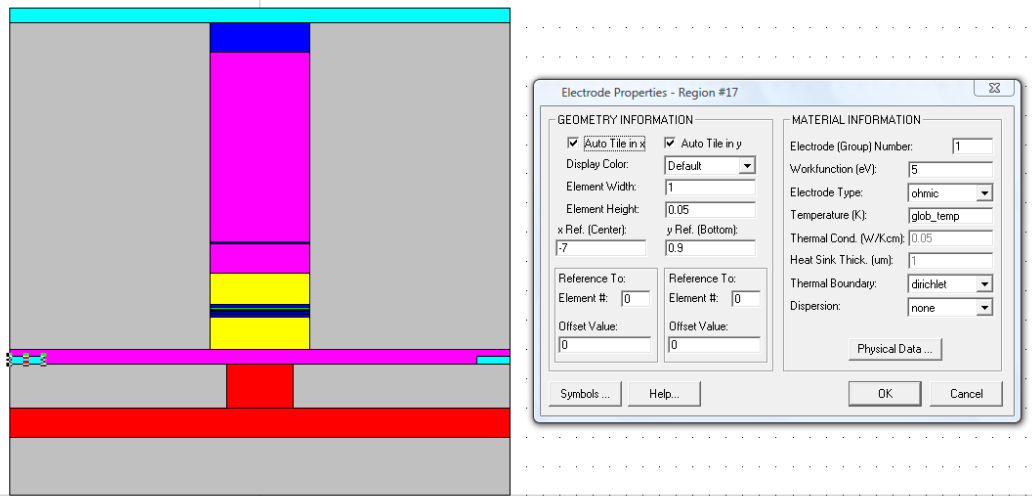
Şekil 3.19. Kontakt tabaka özellikleri

3.3.8. Oksit tabakalar ve Elektrotlar

Son olarak oksit tabakalar ve elektrotları eklenerek lazer yapısı tamamlanmıştır. Oksit tabaka ve elektrot parametreleri sırasıyla Şekil 3.20’de ve Şekil 3.21’de verilmiştir.



Şekil 3.20. Oksit tabakaların özellikleri

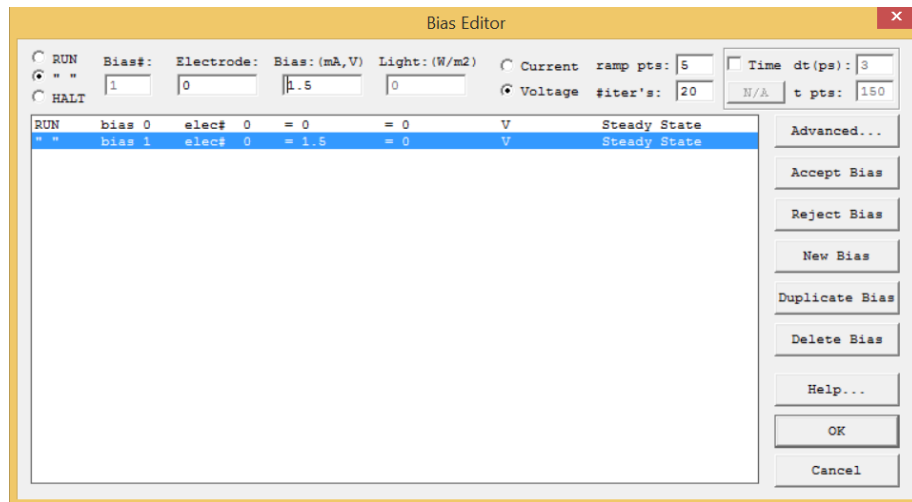


Şekil 3.21. Elektrotların özellikleri

3.4. Simülasyon Parametreleri

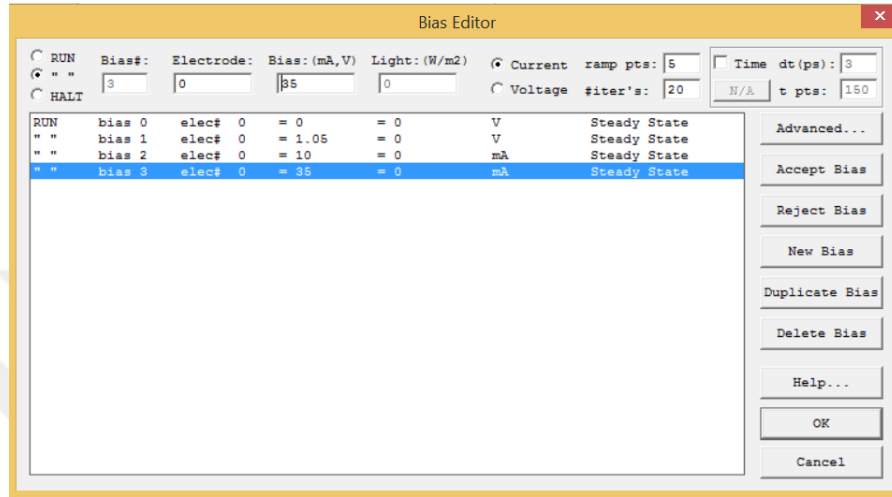
3.4.1. Bias tablosu

Işık-Akım-Gerilim grafiği için bias tablosuna gerekli parametreler Şekil 3.22'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.22. Işık-Akım-Gerilim grafiği için bias değerleri belirlenmesi

Işık-Akım-Gerilim grafiğini çizdirdikten sonra Geçici(Tranzient) cevap ve Frekans cevabını elde etmek için pulse oluşturmak gerekir. Bu işlem için gerekli akım ve gerilim değerleri Şekil 3.23'deki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.23. Geçici cevap ve Frekans cevabı için bias değerlerinin belirlenmesi

3.4.2. Kazanç hesabı

300 ile 500 K arasındaki kazancı belirlemek için en düşük yoğunluğu 1×10^{10} ve en yüksek yoğunluğu 7×10^{12} olarak seçilmiştir (Şekil 3.24).

Simulation Parameters: Gain Calculation

Sweep Options:

☒ Sweep over Density Min. Density (cm-2): 1e+010

☐ Sweep over Temperature Max. Density (cm-2): 7e+012

Points in Sweep: 5 Min. Temp. (K): 300

Region # (Q'W Active): 8 Max. Temp. (K): 500

* Pre-Process KP uses Max. Density and Ambient Temp (Global Dialog)

KP Options:

☒ TE Polarization ☐ Look-Up Table Gain Model

☐ TM Polarization

Available Databases: [Si]

Available Broadening (meV): 0

Available Engy Shifts (meV): 0

Run Prefix: tmp

Help... Save Settings

OK Cancel

Şekil 3.24. Kazanç hesabı için parametrelerin belirlenmesi

3.5. Rayleigh-Ritz İterasyon Metodu

Doğrusal olmayan özdeğer (eigenvalue) problemlerinin (NEP) sayısal çözümü hesaplama biliminde ve mühendislikte sıkça kullanılmaktadır. Mevcut yöntemlerin çoğunun uygulanabilirliği; matris yapıları, öz çözümlerin (eigensolutions) özellikleri, problemlerin boyutları gereği sınırlandırılmıştır. Bu sınırlamaları kaldırmayı ve büyük ölçekli mühendislik uygulamaları için sağlam ve evrensel NEP çözümleri geliştirmek için iki farklı yenilik söz konusudur. Birincisi, holomorfik matris fonksiyonları için Keldysh teoremine dayalı rasyonel bir enterpolasyon yaklaşımıdır (RIA). İkincisi RIA'yı kullanarak bir çözen örnekleme kümesi sunan Rayleigh-Ritz yöntemidir. Sağlam eigen çözüme (eigensolver) dayanan çözen örnekleme küme tabanlı Rayleigh-Ritz (Resolvent Sampling Rayleigh-Ritz) yöntemi, özellikle NEP'ler için geliştirilmiştir (Xiao *et al.* 2016).

Ritz tekniğinin temel işlem adımları aşağıda gösterilmektedir (Yahnioğlu):

1.Fonksiyonelde bilinmeyen fonksiyon baz fonksiyonları yardımıyla seri formda yazılır.

$$u(x) = \sum_{i=1}^N u_i \phi_i(x)$$

2.En son ifadede, bilinmeyenlere göre türev alınır sıfıra eşitlenir. $i=1,2,3,...,N$

$$\frac{\partial J[u(x)]}{\partial u_i} = 0$$

$$\begin{cases} \nabla^2 u = f, \Omega \text{ 'da} \\ u = 0, \partial\Omega \text{ üzerinde} \end{cases}$$

Probleminin çözümünü Rayleigh-Ritz metodu ile yapılmıştır. Ω sabit olmak şartıyla V iç çarpım uzayında u fonksiyonları V nin elemanlarıdır. u_{xx} ve u_{yy} , Ω bölgesinde süreklidir, Ω sınırında ise $u_{xy}=0$ 'dır (Kahya 2007).

f 'nin'de Ω bölgesinde sürekli olduğu kabul edilirse, V uzayında problemin çözümü gerçekleştirilebilir. V deki iç çarpım ifade edilmiştir.

$$\langle u, v \rangle = \iint_{\Omega} u(x, y) v(x, y) dx dy$$

- ∇^2 operatörü, V iç-çarpım uzayında self-adjoint ve pozitif tanımlıdır.

Self-adjoint (simetrik) olma denklemi aşağıda verilmiştir:

$$\langle -\nabla^2 u, v \rangle = \langle u, \nabla^2 v \rangle$$

Bu denklemin ispatı için,

$$\iint_{\Omega} (P_x Q_y) dx dy = \int_{\partial\Omega} (P dy - Q dx)$$

Green Teoremi ve $\partial\Omega$ da $u = 0$ ve $v = 0$ bilgileri kullanılarak aşağıdaki hesaplamalar yapılabilir.

$$\begin{aligned} \langle \nabla^2 u, v \rangle &= \iint_{\Omega} (u_{xx} + u_{yy})v dx dy \\ &= \iint_{\Omega} [(u_x v)_x + (u_y v)_y - u_x v_x - u_y v_y] dx dy \\ &= \int_{\partial\Omega} (u_x v dy - u_y v dx) - \iint_{\Omega} (u_x v_x + u_y v_y) dx dy \\ &= - \iint_{\Omega} (u_x v_x + u_y v_y) dx dy \end{aligned}$$

Bu hesaplamalardaki son ifade u ve v nin simetrikliğini sağladığı için,

$$\langle \nabla^2 u, v \rangle = \langle u, \nabla^2 v \rangle$$

$u \in V$ ve $u \neq 0$ ise

$$\langle -\nabla^2 u, u \rangle > 0$$

Çünkü $-\nabla^2$ nin pozitif tanımlıdır.

Hesaplamalara göre;

$$\langle -\nabla^2 u, u \rangle = \iint_{\Omega} [u_x^2 + u_y^2] dx dy$$

dir. Bu integralin değeri negatif olamayacağı için tek sorun $u = 0$ olup olmadığıdır. İntegralin değeri 0 ise, Ω da $u_x=u_y=0$ olur.

Bu yüzden, u hem yalnız x 'in hem de yalnız y 'nin bir fonksiyonudur. Dolayısıyla u , Ω da sabit olmalıdır. Ayrıca u , V nin elemanı olduğundan $\partial \Omega$ da sıfır olmalıdır. O halde $u=0$ 'dır.

$-\nabla^2$ operatörü V de pozitif tanımlı ve simetrik şartını sağlarsa şu şekilde bir iç çarpım tanımlanabilir:

$$[u, v] \equiv \langle -\nabla^2 u, v \rangle = \iint_{\Omega} (u_x v_x + u_y v_y) dx dy$$

Bu iç çarpım V uzayında yeni bir norm oluşturur.

$$\|u\| = [u, u]^{1/2}$$

Rayleigh-Ritz metodunda, V de temel fonksiyonlar $u_1, u_2, \dots, u_n$ olarak tanımlanır.

$$u = \sum_{j=1}^n c_j u_j$$

nin $\|\cdot\|$ normunda optimum sonuç için gereken $c_1, c_2, \dots, c_n$ katsayıları belirlenmek istenir. İç çarpım uzayının mekanizmasının uygun olmasından dolayı, normal denklemleri, c_j katsayılarının belirleyicisidirler. Bundan dolayı, u 'nun doğru çözüm olması durumunda, diklik koşulundan

$$u - \sum_{j=1}^n c_j u_j \perp u_i \quad (1 \leq i \leq n)$$

$$\sum_{j=1}^n c_j [u_j, u_i] = [u, u_i] \quad (1 \leq i \leq n)$$

olur. Sadeleştirmeler sonucu

$$[u, u_i] = \langle -\nabla^2 u, u_i \rangle = \langle -f, u_i \rangle \quad (1 \leq i \leq n)$$

En son oluşan normal denklemler kümesi,

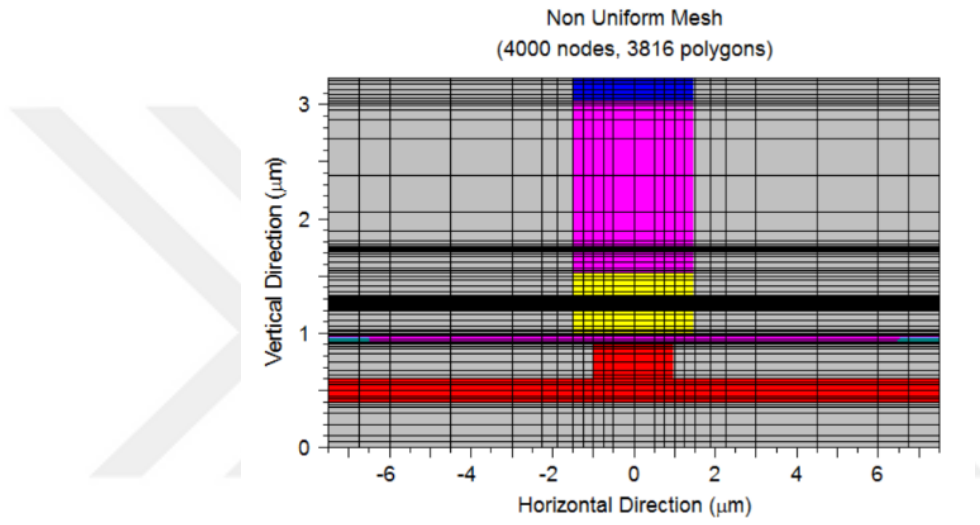
$$\sum_{j=1}^n c_j [u_j, u_i] = -\langle f, u_i \rangle \quad (1 \leq i \leq n)$$

Dikkat edilecek olursa bilinmeyen fonksiyon u , sistem içinde bulunmamaktadır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

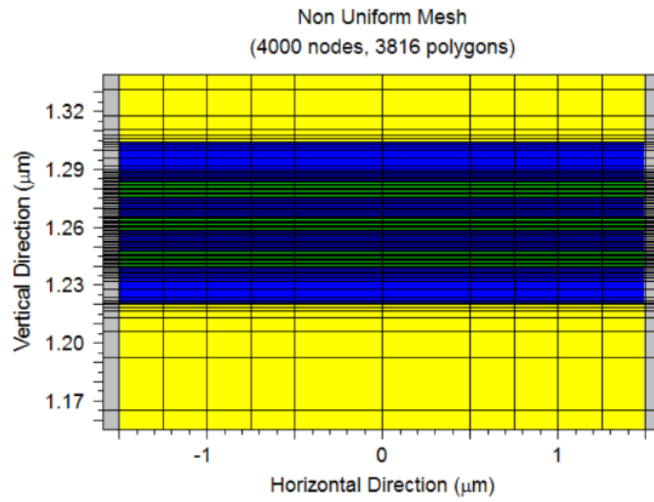
4.1. Mesh

Tasarladığımız lazerin örgü (kafes) yapısı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Lazerin örgü yapısı

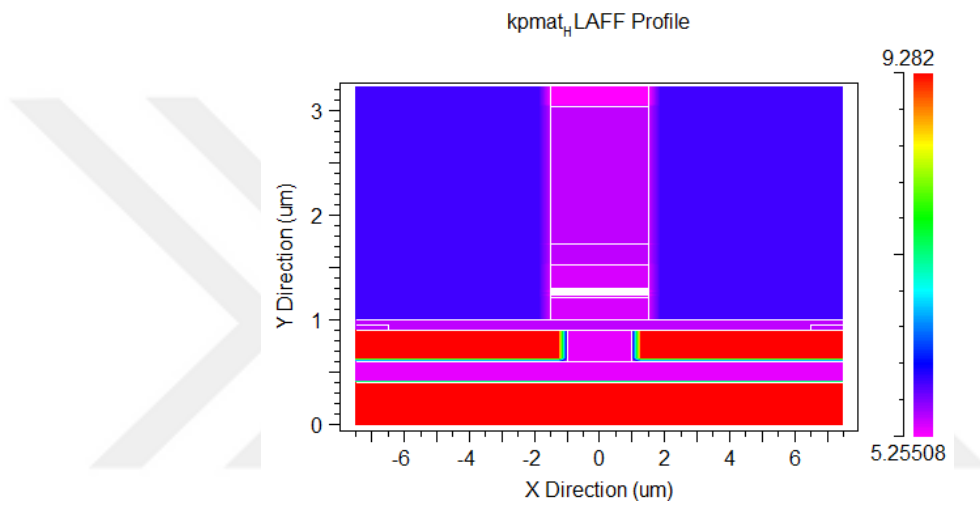
Lazerin MQW bölgesindeki SCH, bariyer ve QW örgüleri Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



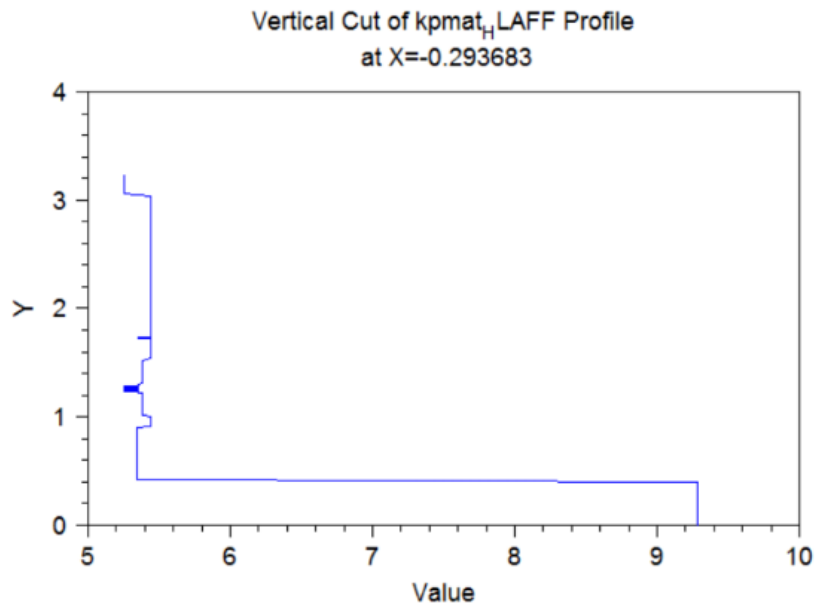
Şekil 4.2. MQW örgü yapısı

4.2. Profil

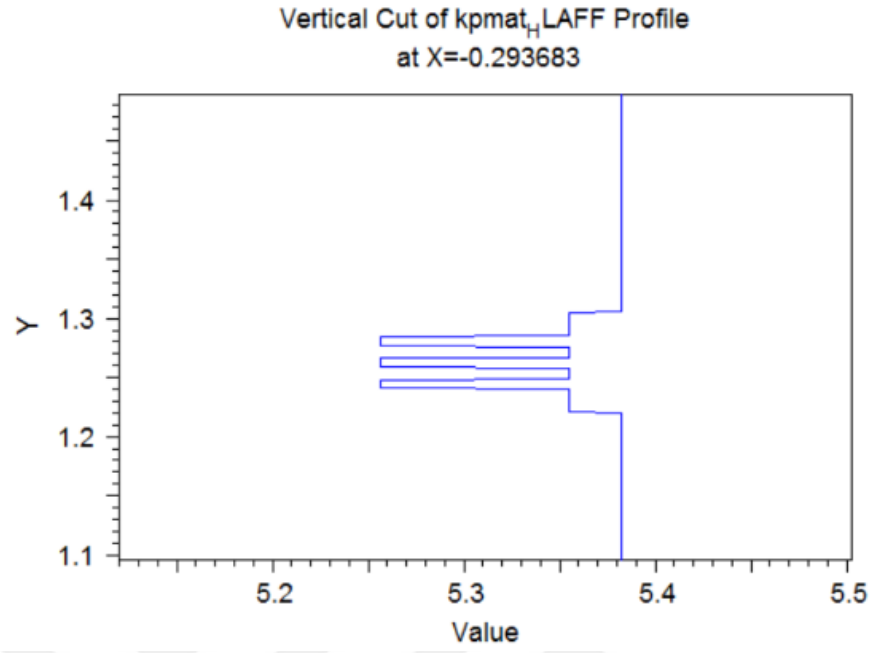
Birkaç parametre profili oluşturulabilir. Bunlar x, y alaşımı, net doping ve indis profilleridir. Böylece kuantum kuyuları(QW) çözümlenebilir. Lazerin kesiti Şekil 4.3’de gösterilmektedir. Dikey ve yatay kesit ise sırasıyla Şekil 4.4 ve Şekil 4.6’da gösterilmiştir. Yine MQW yapının dikey kesiti Şekil 4.5’de gösterilmiştir.



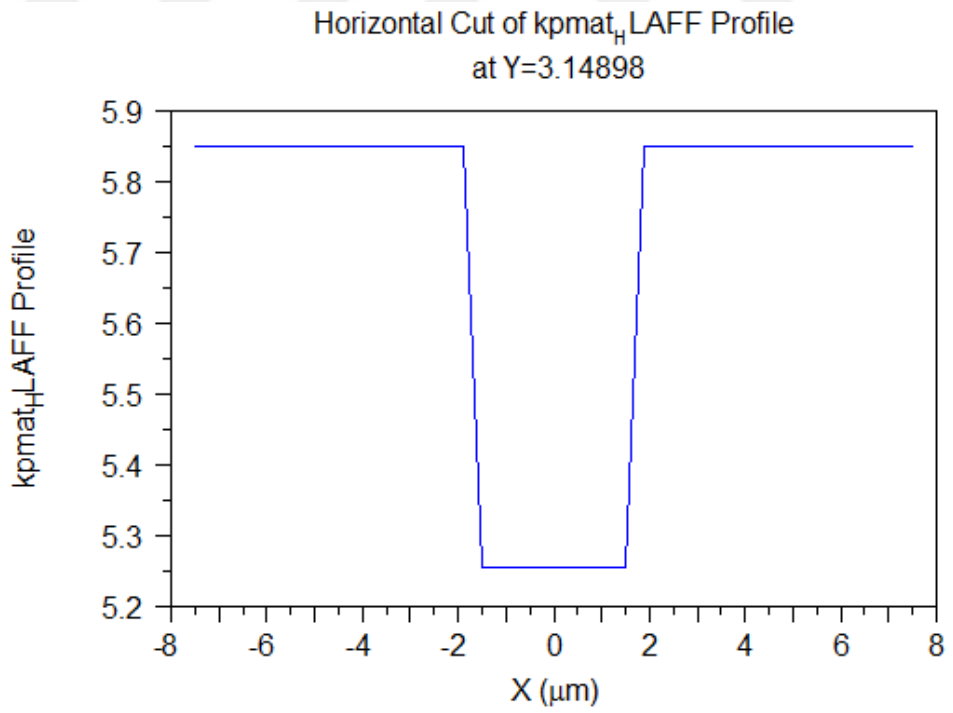
Şekil 4.3. Lazer kesiti



Şekil 4.4. Dikey kesit profili



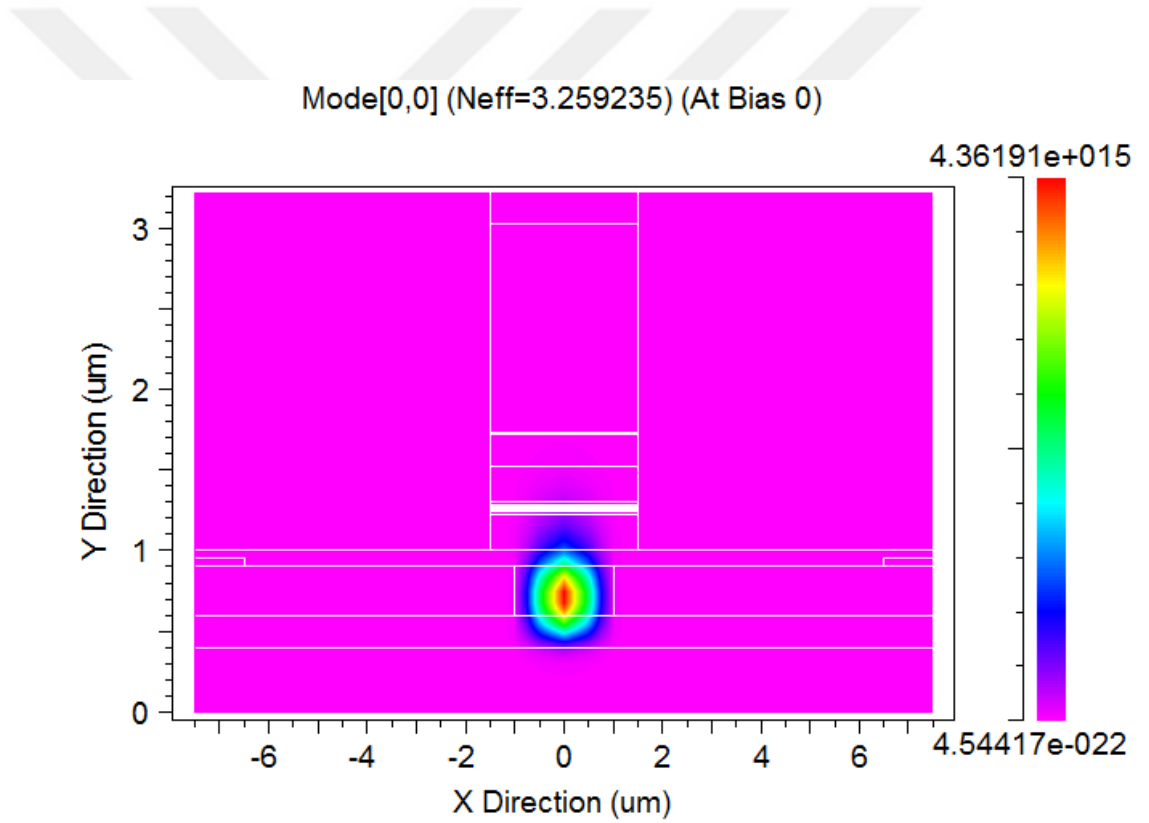
Şekil 4.5. Dikey kesit profilde MQW yapının belirtilmesi



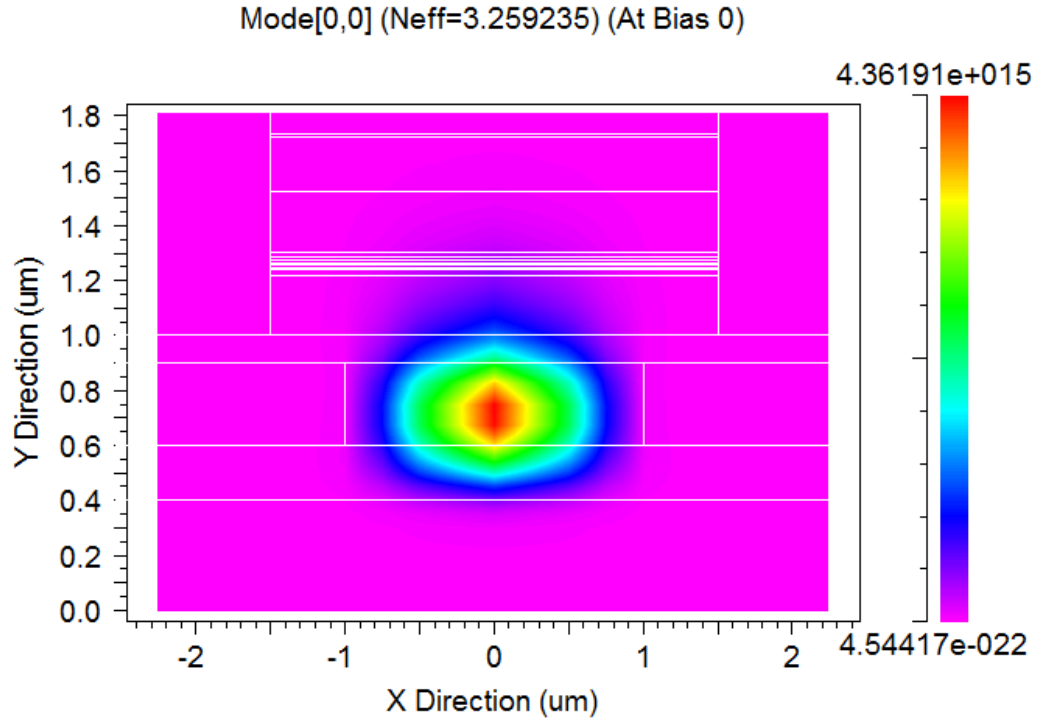
Şekil 4.6. Yatay kesit profili

4.3. Mod

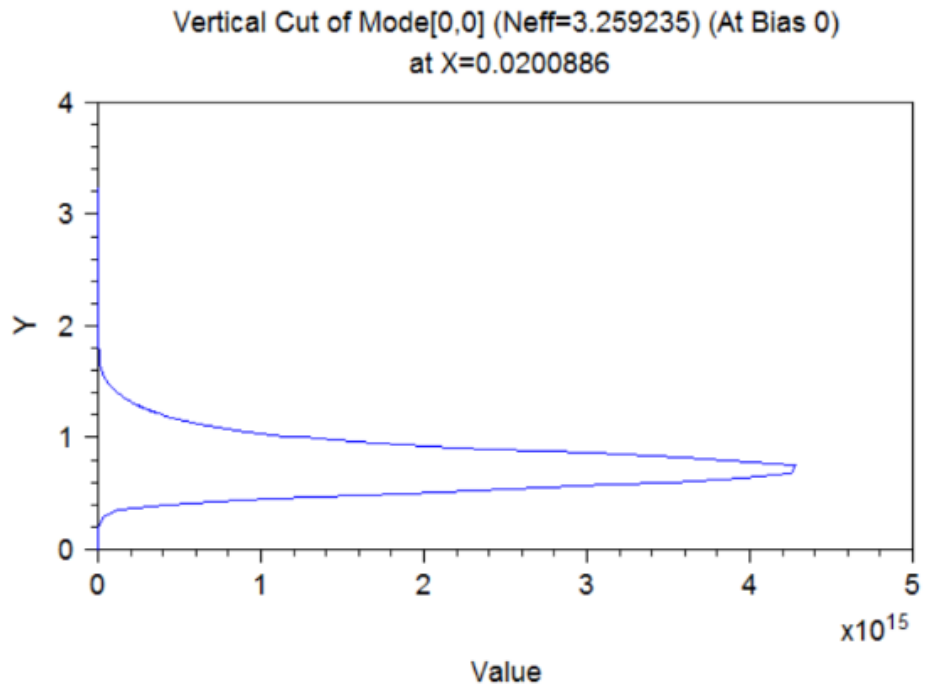
Lazer oluşmadan önce yapının optik modda olması gerekir. İndis yönlendirici lazerler söz konusu olduğunda, dalga kılavuzunu iyileştirmek için lazer yapısını değiştirmek gerekebilir. İndis değişikliklerinin veya taşıyıcı yoğunluğunun etkilerini incelemek için her bias değeri için mod hesaplanır. Izgara üzerinde bir değişiklik yapılırsa, mod yeniden hesaplanmalıdır. Şekil 4.7’de modun Si sırt(ridge) bölgesinde oluştuğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.8’de modun MQW bölgeyi de kapsadığı gözlemlenmiştir. Ayrıca Şekil 4.9’da modun yatay kesiti gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Lazerin mod yayılımı



Şekil 4.8. Lazerin sırt(ridge) bölgesinde mod yayılımı



Şekil 4.9. Modun yatay kesit görüntüsü

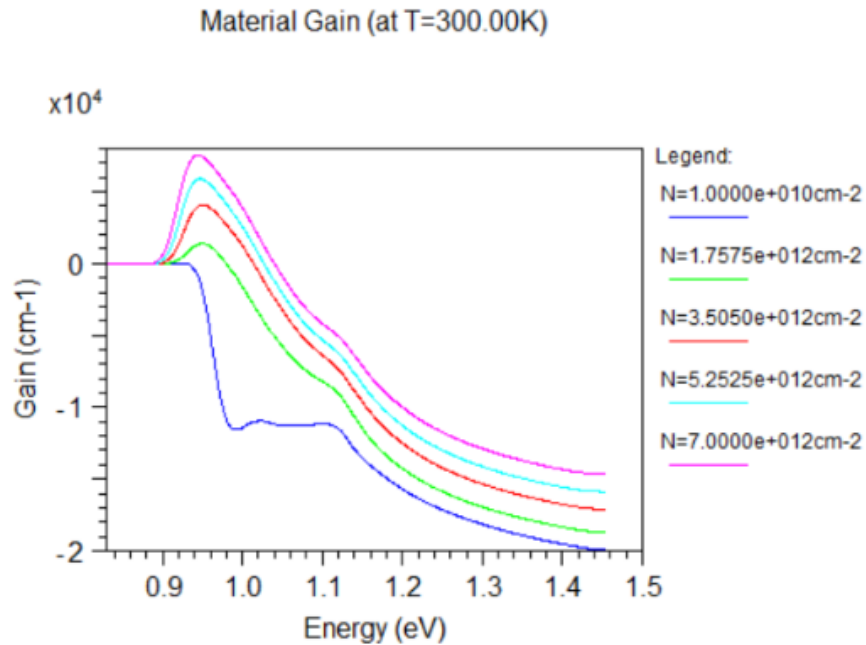
4.4. Malzeme Kazancı

Yarıiletken lazer dalga kılavuzlarında, uyarılmış emisyonu bağli olarak optik malzeme kazancı vardır. Malzeme kazancı, optik kazanç spektrumunun zirve değeri olarak tanımlanır. Kazanç FP gibi lazerlerin optik spektrumunun belirlenmesinde önemli rol oynar (Nguyen *et al.* 1995).

Malzeme kazancı;

$$G = \Gamma g - \alpha$$

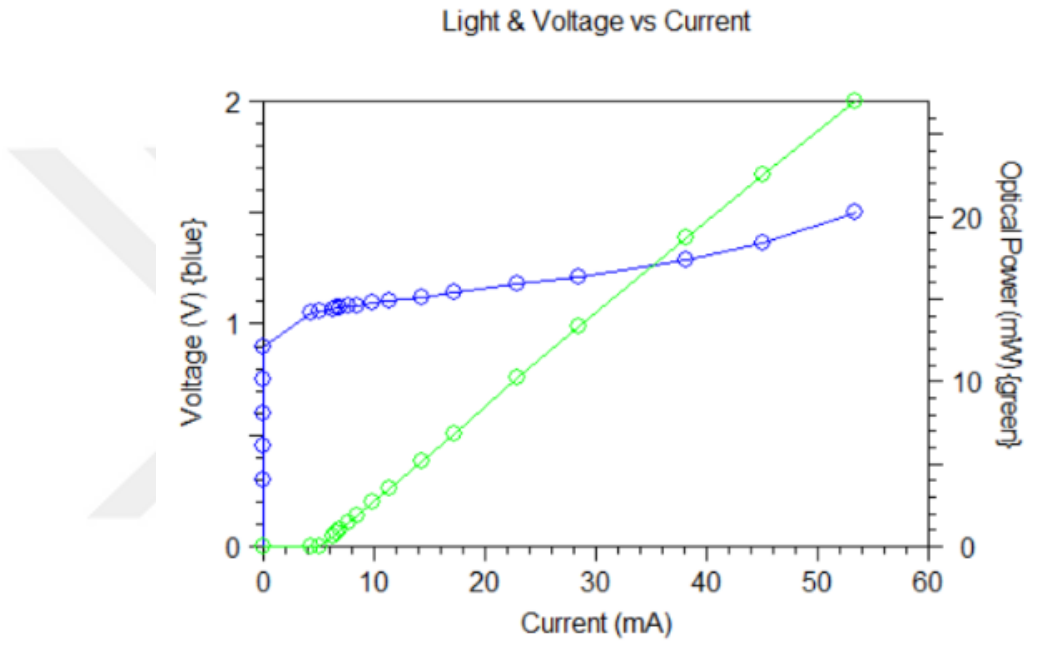
arasındaki ilişkiyi kullanarak modal kazanım dönüşümü ile elde edilebilir. G modal kazanç katsayısı, α iç kayıp katsayısı ve g malzeme kazancıdır. Aslında modal kazanç, kuantum kuyusunsaki elektron zarf fonksiyonu ve optik mod arasındaki zayıf örtüşmeyi de hesaba katan malzeme kazancıdır. Şekil 4.10'da 10^{10} dan 7×10^{12} ye kadar farklı taşıyıcı yoğunluğu değeri için malzeme kazancı gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Malzeme kazanç eğrisi

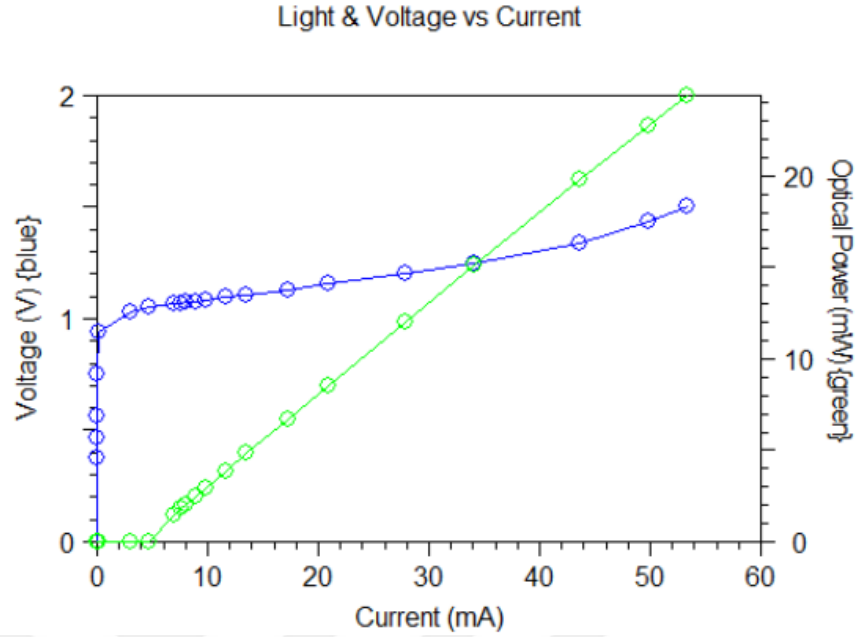
4.5. Işık-Akım-Gerilim Eğrisi

Hibrit lazerin Şekil 3.22'deki bias değerleri kullanılarak 0V-1.5V gerilimler için Işık-Akım-Gerilim (LIV) eğrisi Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Akım değeri 53.38 mA, optik güç 26.99 mW'tır.



Şekil 4.11. Hibrit lazerin ışık-akım-gerilim eğrisi

SOI yapı içermeyen InGaAsP/InP lazerin Işık-Akım-Gerilim eğrisi ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir. Yine 0-1.5V gerilim değerleri için akım 53.25 mA, optik güç 24.37 mW'tır. SOI yapı barındıran hibrit lazerde daha yüksek bir optik güç söz konusudur.



Şekil 4.12. SOI yapı içermeyen lazerin ışık-akım-gerilim eğrisi

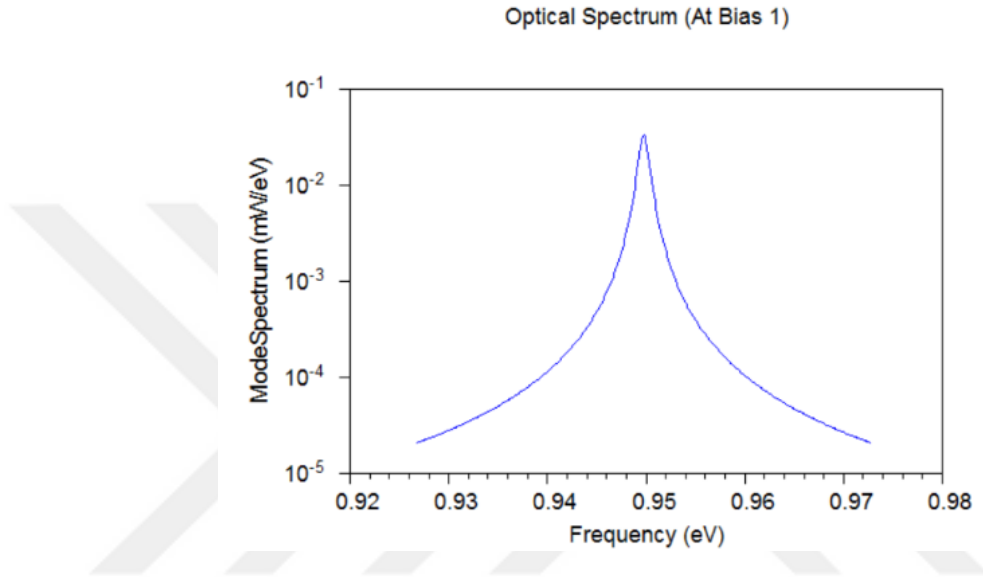
4.6. Optik Spektrum

Bir ışının optik spektrumu, optik enerjinin veya gücün farklı dalgalıboyları üzerinden dağılımı hakkında bilgi içerir. Genellikle, güç tayfı yoğunluğunun dalgalıboyunun veya optik frekansın bir fonksiyonu olarak çizildiği bir diyagram şeklinde sunulmuştur. Optik spektrum, elektrik alanının Fourier dönüşümü ile de ilgilidir, ancak ikincisi çoğu durumda doğrudan erişilebilir değildir. Bu nedenle optik alanın Fourier spektrumu olarak da bilinir. Optik spektrumlar fotografik ve fotoelektrik araçlarla kaydedilir.

Görünüşlerine göre optik spektrumlar; çizgi, bant veya sürekli spektrum olarak sınıflandırılır. Çizgi spektrumu λ 'ın ayrı değerlerine karşılık gelen ayrı spektral çizgilerden oluşur. Doğruyu söylemek gerekirse, tek bir spektral çizgi tek bir λ değerine karşılık gelmez. Bunun yerine, bir çizgi her zaman dar bir λ aralığına karşılık gelen sonlu bir genişliğe sahiptir. Bant spektrumu, her biri belli bir λ aralığını kapsayan ayrı bantlardan oluşur. Sürekli spektrumlar ise geniş bir λ aralığını kapsar. Optik spektrumlar, atomların, moleküllerin, katıların ve sıvıların enerji seviyeleri arasındaki

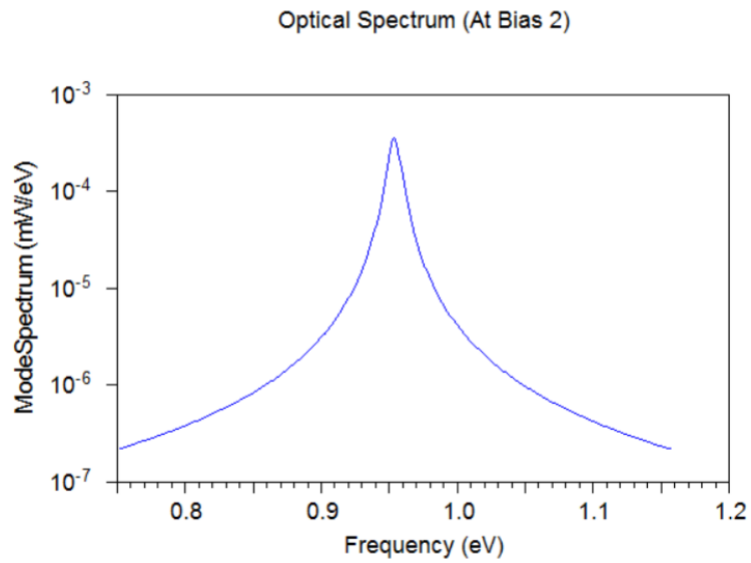
kuantum geçişlerinin sonucudur. Optik spektrumlar ayrıca maddelerin yapısını ve bileşimini araştırmak için yaygın olarak kullanılmaktadır (Paschotta).

Hibrit lazerin Bias 1 deki optik spektrumu Şekil 4.13’de gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Hibrit lazerin optik spektrumu

SOI içermeyen InGaAsP/InP lazer yapısı için Bias 2 deki optik spektrum Şekil 4.14’de gösterilmiştir.



Şekil 4.14. SOI yapı içermeyen lazerin optik spektrumu

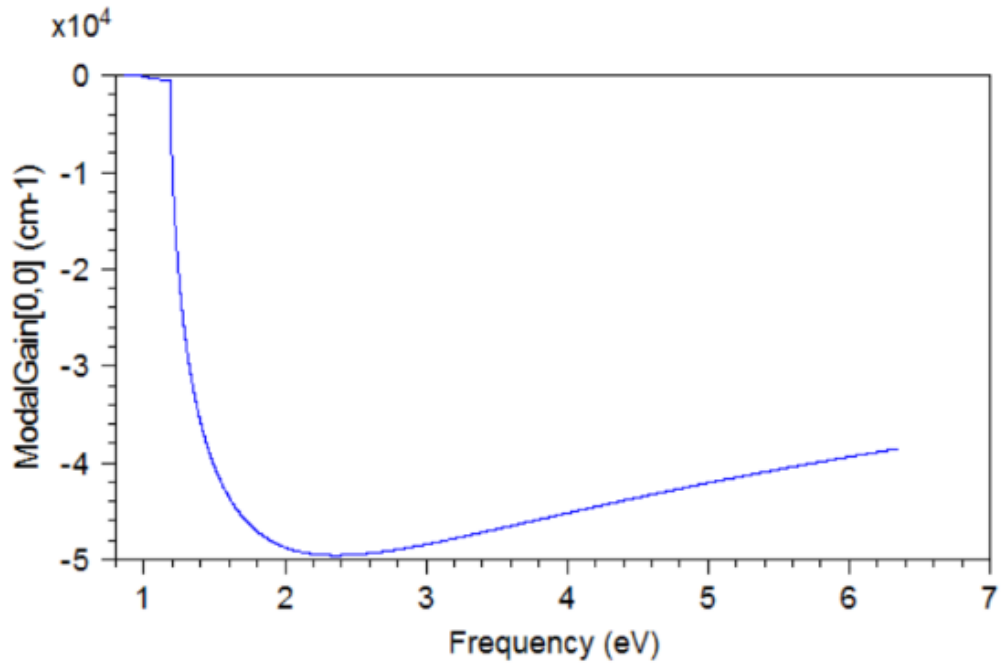
4.7. Modal Kazanç

Yarıiletken bir lazer diyotunun analizi, lasing modunda sınırlı olan ışığın amplifikasyonunu nicelik olarak belirten modal kazanç hakkında ayrıntılı bilgi gerektirir. Bir lazer diyodu, reflektiviteleri R1 ve R2 olan aynalar arasındaki bölge ve bir kuantum kuyusu olan kazanç ortamından oluşur. Modal kazanç, kazanç ortamı ve sınırlama faktörü olarak adlandırdığımız optik mod arasındaki örtüşmeyle çarpılmasıyla elde edilen ortamın kazancına bağlıdır (Jiang).

Optik mod, kendiliğinden yayılımdan kaynaklanır ve dalga kılavuzu tarafından boşluk ile sınırlandırılır. Bu optik mod kazanç aracı ile büyütülür ve aynalar tarafından kısmen yansıtılır. Modal kazancı bulmak için, bir tanesi, foton emisyonunun yanı sıra absorpsiyonun, süreçte yer alan tüm parçacıkların enerji ve momentumunu koruması gerekliliğiyle başlar. Enerjinin korunumu, foton enerjisinin elektron ve delik enerjisi arasındaki farka eşit olmasını gerektirir (Zeghbroeck 2011).

Bias 1 deki modal kazanç Şekil 4.15’de gösterilmiştir.

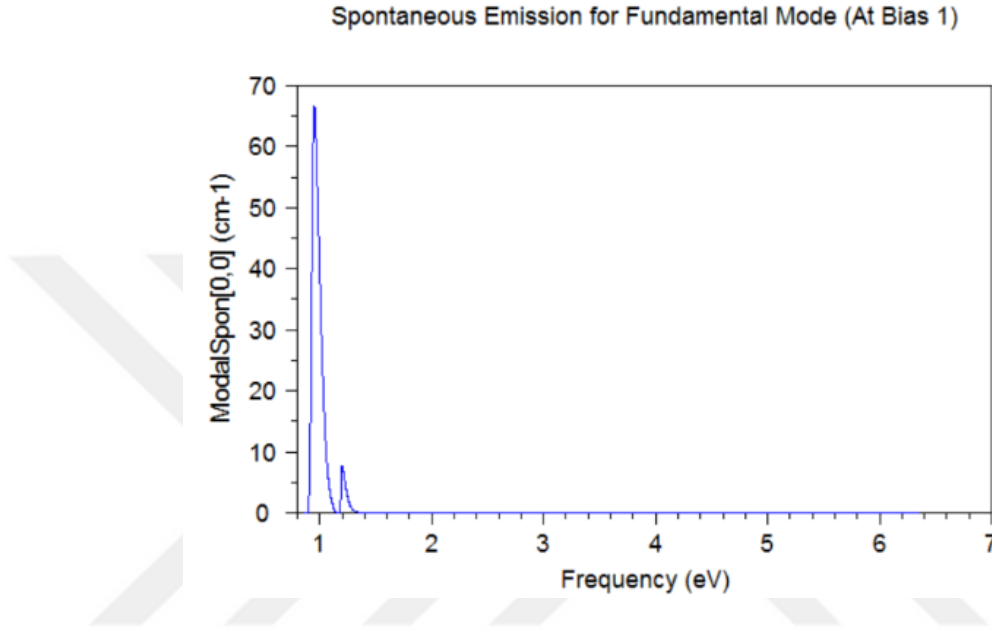
Modal Gain for Fundamental Mode (At Bias 1)



Şekil 4.15. Modal kazanç eğrisi

4.8. Kendiliğinden Işıma (Spontane Emisyon)

Bias 1 deki kendiliğinden ışıma Şekil 4.16’da gösterilmiştir.

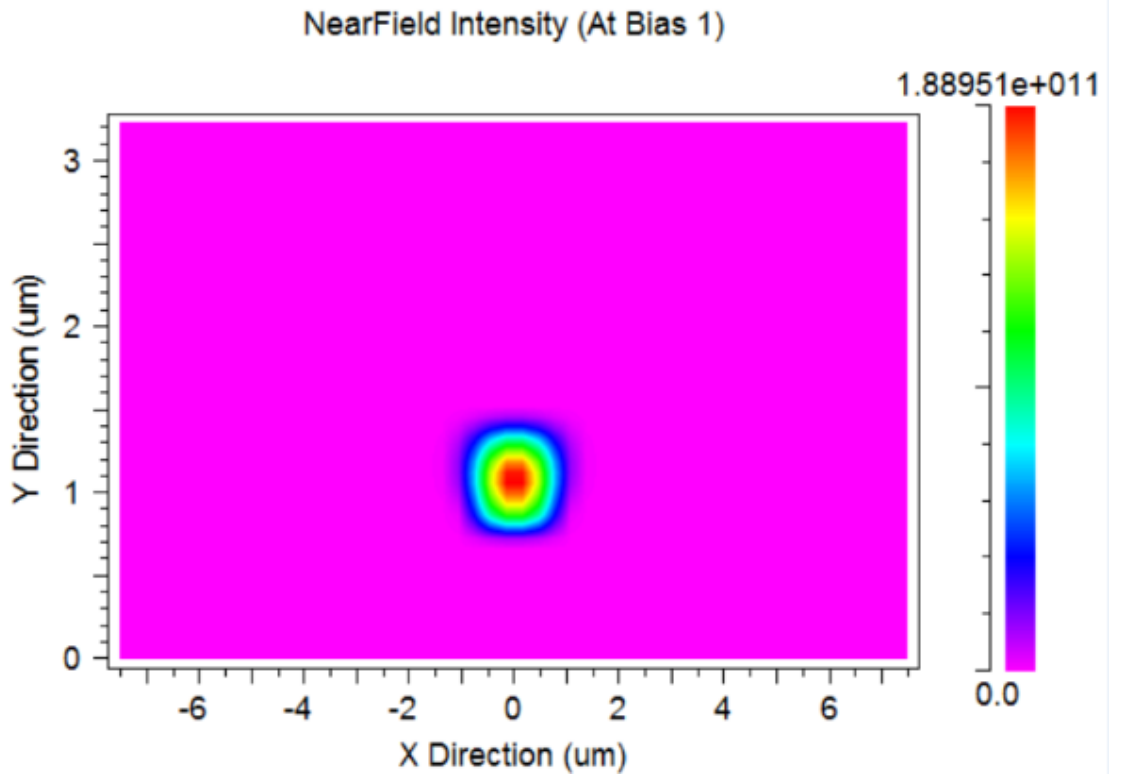


Şekil 4.16. Kendiliğinden ışıma(Spontane emisyon) eğrisi

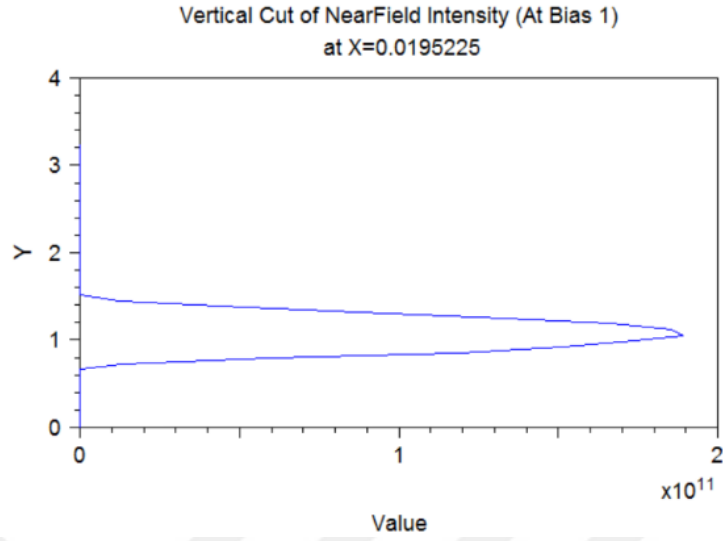
4.9. Yakın Alan (Near Field)

Optik yakın alanlar, nanometrik parçacıkların yüzeyinde uzamsal olarak lokalize alanlardır. Gelen ışıkla nanometrik malzemeyi uyandırdığımızda ortaya çıkar. Bununla birlikte ışık-madde etkileşiminin bir sonucu olarak, taneciğin yüzeyinde bir optik lokalize alan üretilir. Bu lokalize alana optik yakın-alan adı verilir. Optik yakın alan tanecik civarındadır. Elektrik alan çizgileri, optik yakın alanda oluşur. Elektrik dipol momentleri bu elektrik alan çizgileri ile bağlanır. Bu çizgiler mümkün olan en kısa yörüngeye sahip olma eğilimindedir. Aynı dielektrik yüzeylerinden ikisi yakın mesafeye getirildiğinde veya mesafenin baskın radyasyonla yayılmış dalgaboyundan daha az olduğu yakın alana getirildiğinde, yüzey dalgaları etkileşime girer ve yüzeyden yüzeye aktarılır (Webb 2008).

Bir elektrik dipol momentinden yayılırlar ve bir diğerinde son bulurlar. Optik alanların çok ince olmasının nedeni budur. Enerji, optik yakın alan etkileşimi ile bir kuantum noktadan diğerine aktarılabilir. Bu şekilde iki yüzey diğer yüzeylerle etkileşime girer ve enerji bir plakadan diğerine yüksek oranlarda transfer edilebilir. Bu aktarılan enerji foto-detektör ile algılanabilir. Bununla birlikte, enerji seviyeleri rezonansa girdiğinden, iki rezonans enerji seviyesi arasında bir beslenme işlemi ve geri enerji transferi olmalıdır. Düşük ışık tüketimi, yüksek verimlilik ve küçük boyutlar için nanofotonik cihazların tasarlanması ve işletilmesi için optik yakın alanların kullanılması önerilmektedir (Amirahmadvov 2012). Hibrit lazerin Bias 1 deki yakın alan spektrumu Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Şekil 4.18’de ise spektrumun dikey kesiti gösterilmiştir.

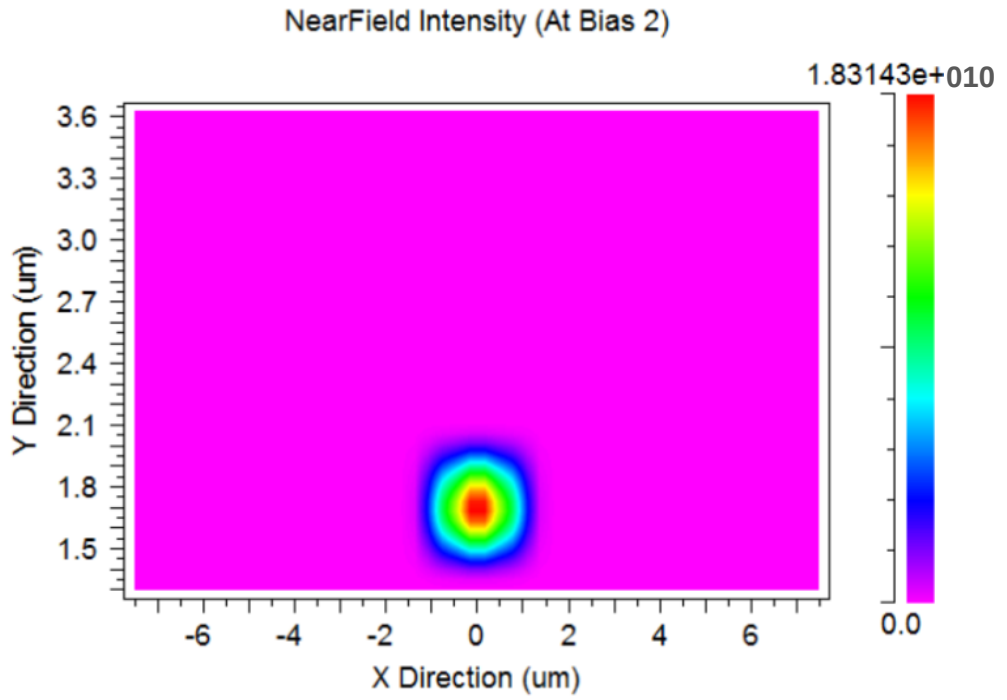


Şekil 4.17. Hibrit lazerin yakın alan(Near field) spektrumu



Şekil 4.18. Yakın alan spektrumu dikey kesiti

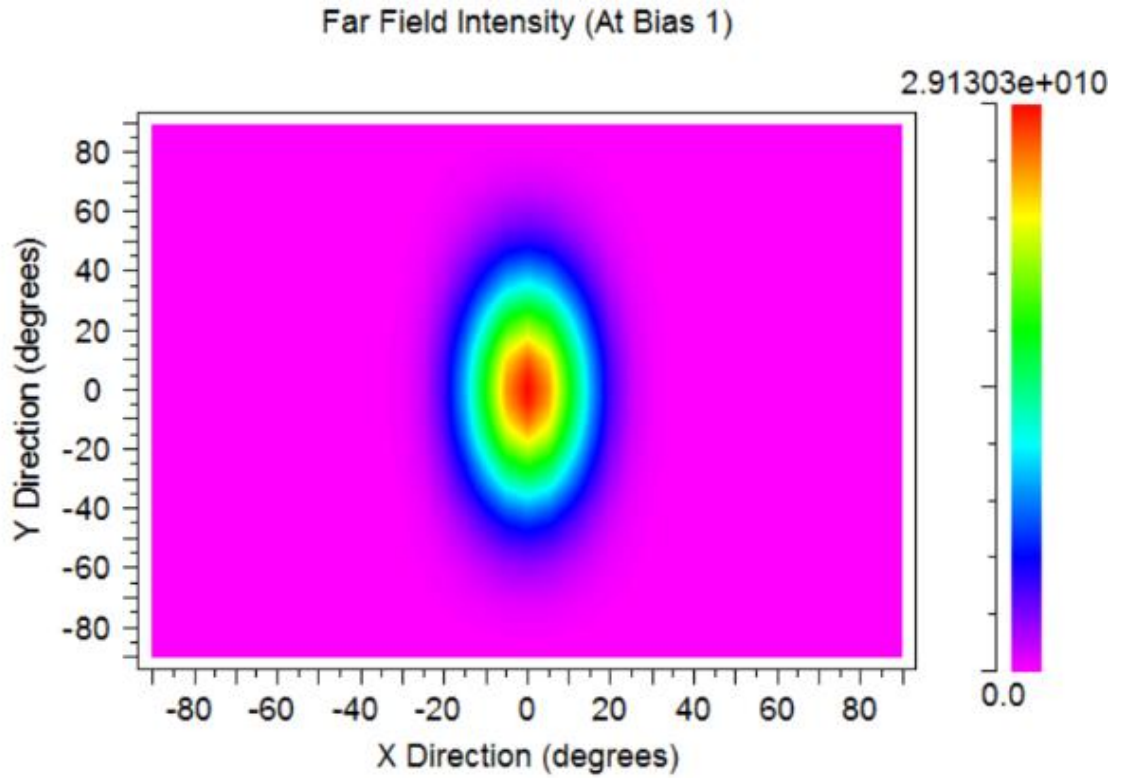
SOI içermeyen InGaAsP/InP lazer yapısı için Bias 2 deki yakın alan spektrumu Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



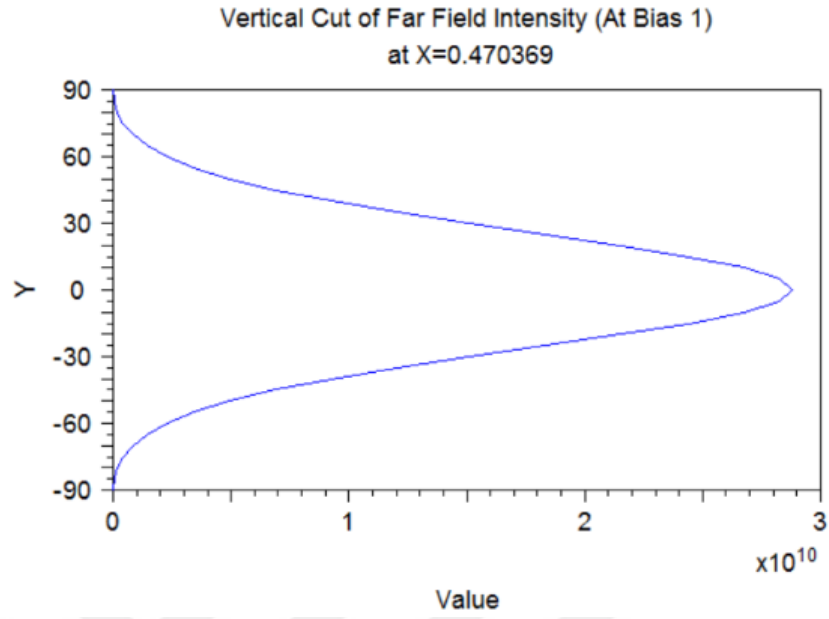
Şekil 4.19. SOI yapı içermeyen lazerin yakın alan spektrumu

4.10. Uzak Alan (Far Field)

Tanecik yüzeyinden dağılmış olan ışık, uzak alan ışığını ifade eder. Dağınık ışık, uzak alan ışığına ve uzak alana doğru olan yayılımlara yönelimlidir. Kapalı bir halka oluşturan diğer kuvvet çizgileri uzak alana karşılık gelir (Amirahmadov 2012). Hibrit lazerin Bias 1 deki uzak alan spektrumu Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekil 4.21’de ise spektrumun dikey kesiti gösterilmiştir.

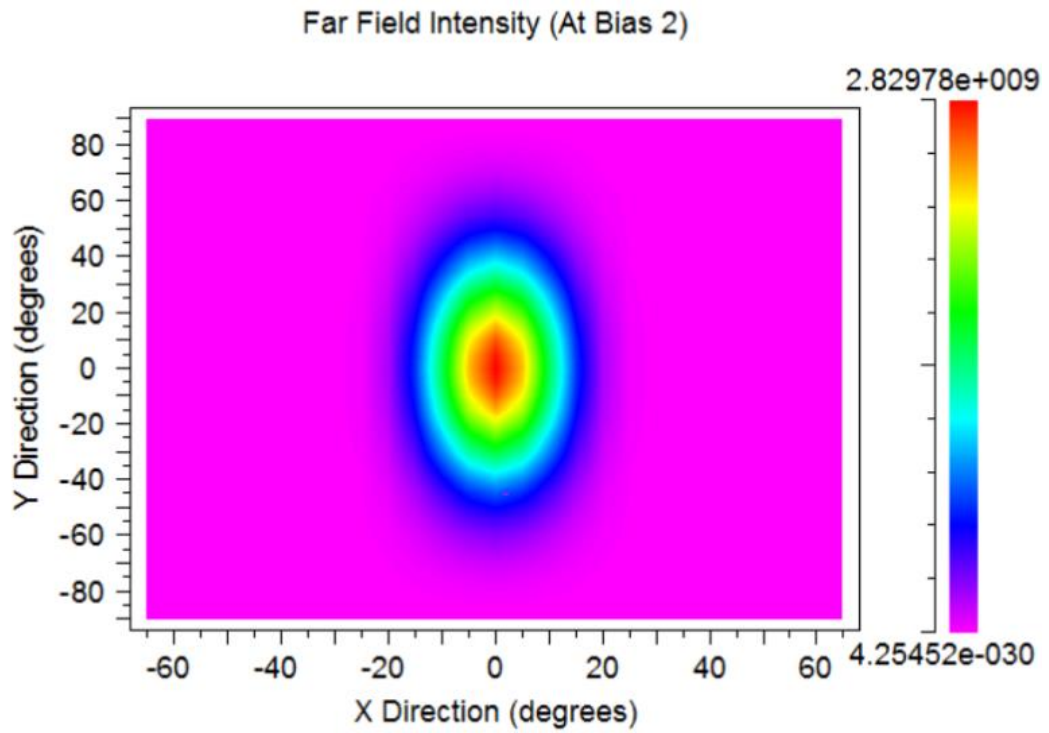


Şekil 4.20. Hibrit lazerin uzak alan (Far field) spektrumu



Şekil 4.21. Uzak alan spektrumu dikey kesiti

SOI içermeyen InGaAsP/InP lazer yapısı için Bias 2 deki uzak alan spektrumu Şekil 4.22’de gösterilmiştir.

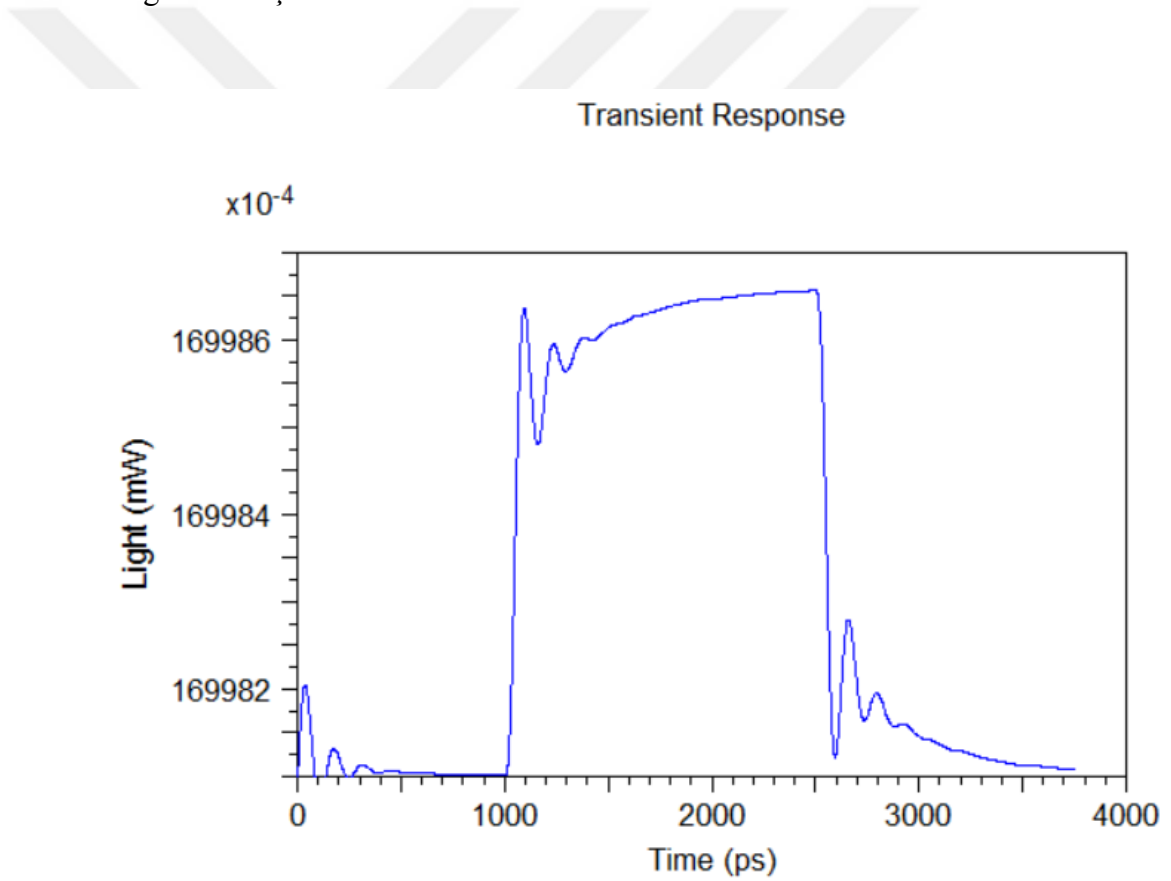


Şekil 4.22. SOI yapı içermeyen lazerin uzak alan spektrumu

4.11. Geçici Cevap (Transient Response)

Bir sisteme uygulanan birim basamak girişi değiştiğinde kararlılığı bozulur ve sistem çıkışı da değişmeye başlar. Bir süre sonra tekrar kararlı duruma geçer. Başlangıçtaki kararlı durum değerinden yeni kararlı durum değerini sağlayana kadar geçen süre geçici cevap olarak adlandırılır (Cansever).

Şekil 3.23'deki bias değerleri kullanılarak elde edilen, sistemin geçici cevabı Şekil 4.23'da gösterilmiştir.

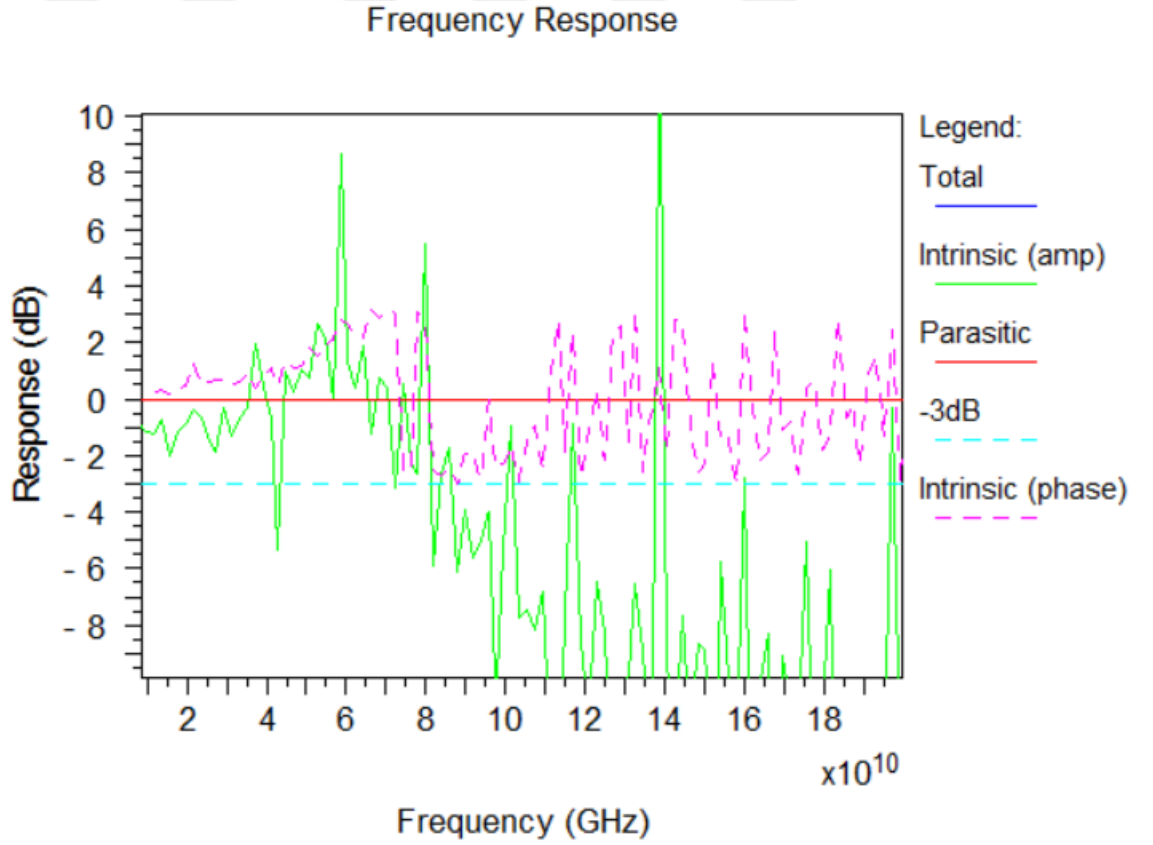


Şekil 4.23. Geçici (Tranzient) cevap

4.12. Frekans Cevabı (Frequency Response)

Aynı sisteme sinüzoidal bir gerilim uygulandığında çıkış belli bir süre sonra genliği ve fazı sabit olan, frekansı da giriş frekansına eşit olan bir sinüzoidal gerilim olur. Frekans cevabı, giriş geriliminin sinüzoidal olması durumunda sürekli rejimin incelenmesi olayıdır (Taşaltın).

Şekil 3.23'deki bias değerleri kullanılarak elde edilen, sistemin frekans cevabı Şekil 4.24'de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Sistemin frekans cevabı

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Gelişen teknolojiye doğru malzeme seçimi ile hem verimi artırabilir hem de maliyeti düşürebiliriz. Bunun için doğada bulunan elementlere çeşitli manipölasyonlar uygulanarak verimli malzemeler elde edilebilir. Böylece herhangi bir malzemenin doğal halinde sahip olduğu dezavantajlardan da kurtulmamız mümkün olacaktır. Bu değişiklikleri hayata geçirmezsek, elimizde hazır halde bulunan malzemelerle yapılacak bilimsel çalışmalar ya bizi hedeflerimize ulaştıramayacak ya da teknolojinin gerisinde bırakacaktır. Yarıiletken lazer teknolojisinde de bazı iyileştirmeleri sağlamak amacıyla silikon malzemedan yararlanılmıştır.

Silikon üzerindeki entegre yarıiletken lazerler, yüksek bant genişlikli optik iletişim için birbirine bağlanan düşük maliyetli silikon fotonik entegre devreleri etkinleştirmek için en önemli cihazlardan biridir. Çip boyutunun azaltılması da fotonik entegrasyonun ekonomik avantajını artırmaktadır. Bu yüzden minyatürleştirme arayışında III-V / Si hibrit yapılar önem arz etmektedir.

Bu tezde lazerlerin ve yarıiletken lazerlerin çalışma prensipleri hakkında kısaca bilgi verildikten sonra Hibrit Silisyum/III-V Yarıiletken Lazerler tanıtılmıştır.

Bu tezin amacı, hibrit Si/III-V lazerlerin modellenmesidir. Modellemede LaserMOD simülasyon programı kullanılarak farklı bias noktaları için Işık-Akım-Gerilim, Optik Spektrum, Modal Kazanç, Yakın Alan (Near Field) ve Uzak Alan (Far Field) sonuçları incelenmiştir. Pulse uygulandığında elde edilen Tranzient ve Frekans Yanıtları gösterilmiştir.

Simülasyonda Fabry-Perot ve SOI lazer türleri kullanılarak tasarım yapılmıştır. Tasarım için InGaAsP/InP yapısı seçilmiştir. InGaAsP/InP yapısındaki farklı katmanlar için n-tipi ve p-tipi katkılama yapılarak simülasyon gerçekleştirildi. Simülasyon sonucu elektriksel ve optik özellikler incelendi.

SOI (Silicon on Insulator) yapıyı gerçekleştirmek için taban tabakalarını SiO_2 ve Si seçtik. Dielektrik (SiO_2) üzerine ilk olarak Si kaplandı ve daha sonra yine Si sırt (ridge) oluşturuldu. Sırt bölgesinin kenarları da yalıtkanla kaplanarak taban yapısı bu şekilde tamamlandı. FP (Fabry-Perot) yapıyı gerçekleştirmek için ise Çizelge 3.1’de verilen materyalin katkılama tipi, kalınlık, taşıyıcı yoğunluğu ve mol oranlarına bağlı kalınarak FP lazer yapısı gerçekleştirilmiş oldu.

İlk olarak 0-1.5 V gerilim değerleri için iki adet bias noktası belirlendi. Bu bias noktalarını baz alan Işık-Akım-Gerilim grafiğinde akım 53.38 mA ve optik güç 26.99 mW olarak elde edilmiştir. Daha sonra 0-1.05 V gerilim değerleri için iki bias noktası ve 10-35 mA akım değerleri için de iki olmak üzere dört adet bias noktası belirlendi. Bu noktalara göre simüle edilen Işık-Akım-Gerilim grafiğinde ise gerilim 1.26 V ve optik güç 17 mW’tır. Frekans yanıtında görüleceği üzere yaklaşık 8GHz’e kadar çıkış elde edilmiştir. 1300nm merkezi dalgaboyunda çıkış elde edilmiştir. SOI yapı kullanılmadan sadece InGaAsP/InP lazer için simülasyon yapıldığında ise daha düşük bir optik güç çıkışı elde edilmiştir. Gerilim değeri aynı tutularak 0-1.5V olarak belirlenmiştir. Bu değerler için akım 53.25 mA, optik güç ise 24.37 mW olarak ölçülmüştür.

Lee *et al.* (2012) yaptığı çalışmada yaklaşık 10 GHz’e kadar çıkış ve yine yaklaşık 25 mW optik güç elde etmiştir. Duan *et al.* (2015) yaptığı çalışmada, 125-150 mA arası değişen ön gerilim için yaklaşık 7GHz çıkış elde etmiştir. Valicourt *et al.* (2014) yaptığı çalışmada, 100 mA ön gerilimde 1-3dB optik kazanç elde etmiştir.

Literatürdeki bu sonuçlarla karşılaştırıldığı zaman bizim hibrit lazer yapılarından karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmiştir.

KAYNAKLAR

- Altındağ, T., 2011. Yarıiletken Lazerlerde Optik Kazancın Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi Kullanılarak Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Amirahmadov, T., 2012. Optical Near Field Interaction Of Spherical Quantum Dots. Master Thesis, Department Of Physics And The Graduate School Of Engineering And Science Of Bilkent University, Ankara.
- Babaoğlu, M., 2011. Az Miktarda Azot Eklenmiş Uzun Dalgaboylu Yüzey Işınması Yapan Lazer Yapılar. Yüksek Lisans Tezi, Kilis 7 Aralık Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kilis.
- Benyoucef, M., Alzoubi, T., Reithmaier, J.P., Wu, M., Trampert, A., 2014. Nanostructured Hybrid Material Based On Highly Mismatched III-V Nanocrystals Fully Embedded in Silicon. *Physica Status Solidi Applications and Materials Science*, 211 (No. 4, 817-822). DOI: 10.1002/pssa.201330395
- Bondarenko, O., Fang, C., Vallini, F., Smalley J.S.T., Fainman, Y., 2015. Extremely Compact Hybrid III-V/SOI Lasers: Design and Fabrication Approaches. *Optics Express*, Vol. 23 (No. 3, 2696-2712). DOI: 10.1364/OE.23.002696
- Bougot-Robin, K., Pang, C., Pommarède, X., Itawi, A., Talneau, A., Hugonin, J.P., Benisty, H., 2014. Embedded Effective-Index-Material in Oxide-Free Hybrid Silicon Photonics Characterized by Prism Deviation. *Journal Of Lightwave Technology*, Vol. 32 (No. 19, 3283-3289). DOI: 10.1109/JLT.2014.2341833
- Cansever, G.. Sistem Modellerinin Zaman Cevabı ve Performans Kriterleri. Yıldız Teknik Üniversitesi. Alınmıştır: <http://www.yildiz.edu.tr/~cansever/oto/D6-7-8.pdf>
- Çakmak, B. ve Duman, Ç., 2011. Uzun Dalgaboylu Yarıiletken Lazerlerin Kavite Uzunluklarının Bazı Lazer Çıkış Karakteristiklerine Etkisi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
- Çakmak, B. ve Duman, Ç., 2012. Uzun Dalgaboylu Ve Konik Yapılı Yarıiletken Lazerlerin Üretimi, Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, Cilt 27 (No 3, 623-630).
- Dong, P., Hu, T., Liow, T., Chen, Y., Xie, C., Luo, X., Lo, G., Kopf, R., Tate, A., 2014. Novel Integration Technique for Silicon/III-V Hybrid Laser. *Optics Express*, Vol. 22 (No. 22, 26861-26868). DOI:10.1364/OE.22.026854
- Duan, G., Olivier, S., Malhouitre, S., Accard, A., Kaspar, P., Valicourt, G., Levaufre, G., Girard, N., Liepvre, A., Shen, A., Make, D., Lelarge, F., Jany, C., Ribaud, K., Mallecot, F., Charbonnier, P., Gariah, H., Kopp, C., Gentner, J., 2015. New Advances on Heterogeneous Integration of III-V on Silicon. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 33 (No. 5, 976-983). DOI: 10.1109/JLT.2014.2376174
- Erol, A. ve Balkan, N., 2013. Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, 355 s.
- Hatori, N., Shimizu, T., Okano, M., Ishizaka, M., Yamamoto, T., Urino, Y., Mori, M., Nakamura, T., Arakawa, Y., 2014. A Hybrid Integrated Light Source on a

- Silicon Platform Using a Trident Spot-Size Converter. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 32 (No. 7, 1329-1336). DOI: 10.1109/JLT.2014.2304305
- Heck, M.J.R., Bauters, J.F., Davenport, M.L., Doylend, J.K., Jain, S., Kurczveil, G., Srinivasan, S., Tang, Y., Bowers, J.E., 2013. Hybrid Silicon Photonic Integrated Circuit Technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 19 (No. 4, 6100117). DOI: 10.1109/JSTQE.2012.2235413
- Hu, X.N., Liu, T., Cao, Y.L., Meng, B., Wang, H., Ng, G.I., Luo, X.S., Liow, T.S., Song, J.F., Lo, G.Q., Wang, Q.J., 2014. Relative Intensity Noise of Silicon Hybrid Laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 50 (No. 6, 466-473). DOI: 10.1109/JQE.2014.2315212
- Jiang, L. Optical (Modal, Differential) Gain. Electrical Engineering Department Southern Methodist University. Retrieved from https://lyle.smu.edu/ee/smuphotonics/Gain/CoursePresentationFall03/Optical_Gain_0830_llj.pdf
- Jung, Y., Shim, J., Kwon, K., You, J., Choi, K., Yu, K., 2016. Hybrid Integration Of III-V Semiconductor Lasers on Silicon Waveguides Using Optofluidic Microbubble Manipulation. *Scientific Reports* (6:29841). DOI: 10.1038/srep29841
- Kahya, D., 2007. Isı Denklemi İçin Yaklaşım Teorisi Yöntemleri. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Kaspar, P., Valicourt, G., Brenot, R., Mestre, M.A., Jennevé, P., Accard, A., Make, D., Lelarge, F., Duan, G., Pavarelli, N., Rensing, M., Eason, C., O'Brien, P., Olivier, S., Malhouitre, S., Kopp, C., Jany, C., Menezo, S., 2015. Hybrid III-V/Silicon SOA in Optical Network Based on Advanced Modulation Formats. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 27 (No. 22, 2383-2386). DOI: 10.1109/LPT.2015.2466543
- Koninck, Y., Roelkens, G., Baets, R., 2013. Design of a Hybrid III-V-on-Silicon Microlaser With Resonant Cavity Mirrors. *IEEE Photonics Journal*, Vol. 5 (No. 2, 2700413). DOI:10.1109/JPHOT.2013.2259586 1943-0655
- Lamponi, M., 2013. Hybrid III-V on Silicon Lasers for Telecommunication Applications. Doctorate Thesis, Université Paris Sud, Paris.
- Lee, A., Liu, H., Seeds, A., 2012. Semiconductor III-V Lasers Monolithically Grown on Si Substrates. *Semiconductor Science And Technology*, 28 (2013) 015027 (11pp DOI: 10.1088/0268-1242/28/1/015027
- Lee, J., Lee, D.Y., Shubin, I., Bovington, J., Djordjevic, S.S., Lin, S., Luo, Y., Yao, J., Cunningham, J.E., Raj, K., Krishnamoorthy, A.V., Zheng, X., 2016. III-V/Si Hybrid Laser Stabilization Using Micro-Ring Feedback Control. *IEEE Photonics Journal*, Vol. 8 (No. 5, 1503507). DOI: 10.1109/JPHOT.2016.2601447 1943-0655
- Malaguti, S., Bellanca, G., Bazin, A., Raineri, F., Raj, R., Trillo, S., 2014. Hybrid III-V Semiconductor/Silicon Three-Port Filter on 1D-Phc Wire. *Opt Quant Electron* (47:1949–1963). DOI: 10.1007/s11082-014-0062-5
- Nguyen, L.V.T., Lowery A.J., Gurney, P.C.R., Novak, D., Murtonen, C.N., 1995. Efficient Material-Gain Models for the Transmission-Line Laser Model. *International Journal of Numerical Modelling: Electronic Network, Devices and Fields*, Vol. 8 (315-330) Retrieved from

- http://www.readcube.com/articles/10.1002/jnm.1660080502?r3_referer=wol&tracking_action=preview_click&show_checkout=1&purchase_referrer=www.google.com.tr&purchase_site_license=LICENSE_DENIED
- Park, H., Sysak, M.N., Chen, H., Fang, A.W., Liang, D., Liao, L., Koch, B.R., Bovington, J., Tang, Y., Wong, K., Jacob-Mitos, M., Jones, R., Bowers, J.E., 2011. Device and Integration Technology for Silicon Photonic Transmitters. *IEEE Journal Of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 17 (No. 3, 671-688). DOI: 10.1109/JSTQE.2011.2106112
- Paschotta, R. *Encyclopedia of Laser Physics and Technology*. Retrieved from https://www.rp-photonics.com/optical_spectrum.html
- Pişkin, E., 2014. GaAsP/GaP Yarıiletken Yapılarının Si Üzerine Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.
- Prucnal, S., Zhou, S., Ou, X., Facsko, S., Liedke, M.O., Bregolin, F., Liedke, B., Grebing, J., Fritzsche, M., Hübner, R., Mücklich, A., Rebohle, L., Helm, M., Turek, M., Drozdziel, A., Skorupa, W., 2014. III-V/Si on Silicon-On-Insulator Platform for Hybrid Nanoelectronics. *Journal of Applied Physics* (115, 074306). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4865875>
- Schires, K., Girard, N., Baili, G., Duan, G., Gomez, S., Grillot, F., 2016. Dynamics of Hybrid III-V Silicon Semiconductor Lasers for Integrated Photonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 22 (No. 6, 1800107). DOI: 10.1109/JSTQE.2016.2565462
- Suzuki, J., Hayashi, Y., Kuno, Y., Kang, J., Amemiya, T., Nishiyama, N., Arai, S., 2014. Surface Assessment After Removing III-V Layer On III-V/Silicon-On-Insulator Wafer Fabricated by Plasma Activated Bonding. *Japanese Journal of Applied Physics*, 53 (118003). <http://dx.doi.org/10.7567/JJAP.53.118003>
- Taşaltın, R. Kontrol Ders Notu1. Harran Üniversitesi. Alınmıştır: http://eng.harran.edu.tr/~rtasaltin/dersler/elektrik/kontrol/ders_notu1/rlocus_nyquist/00_421_freq_resp.pdf
- Valicourt, G., Moroz, N. D., Jennevé, P., Vacondio, F., Duan, G. H., Jany, C., Lelievre, A., Accard, A., Antona, J.C., 2014. A Next-Generation Optical Packet-Switching Node Based on Hybrid III-V/Silicon Optical Gates. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 26 (No. 7, 678-681). DOI: 10.1109/LPT.2014.2301799
- Webb, K.D., 2008. Measurement Of Near-Field Radiative Heat Transfer Between Plane Parallel Plates At Nano-Scale Gaps. Master Thesis, Mechanical Engineering, Kettering University.
- Wilson J. and Hawkes J., 1998. *Optoelectronics An Introduction*. Prentice Hall, 559 pages, University of Northumbria at Newcastle.
- Xiao, J., Zhang, C., Huang, T., Sakurai, T., 2016. Solving Large-Scale Nonlinear Eigenvalue Problems by Rational Interpolation and Resolvent Sampling Based Rayleigh-Ritz Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 110 (776-800). DOI: 10.1002/nme.5441
- Yahnioglu, N. Sonlu Elemanlar Yöntemi. Yıldız Teknik Üniversitesi, www.yildiz.edu.tr/~nazmiye/3-%20hafta%20sunu.ppt (16.05.2017)
- Yuan, L., Tao, L., Chen, W., Li, Y., Lu, D., Liang, S., Yu, H., Ran, G., Pan, J., Wang, W., 2015. A Buried Ridge Stripe Structure InGaAsP-Si Hybrid Laser. *IEEE*

Photonics Technology Letters, Vol. 27 (No. 4, 352-355). DOI:
10.1109/LPT.2014.2372892

Zeghbroeck, B.V., 2011. Principles of Semiconductor Devices. Retrieved from
https://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/chapter4/pdf/ch4_10.pdf



ÖZGEÇMİŞ

1992 yılında Erzurum’da doğdu. İlk ve ortaöğretimini Erzurum’da tamamladı. Lise eğitimini Erzurum İbrahim Hakkı Fen Lisesi’nde tamamladı. Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği’nden 2015 yılında mezun oldu. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Elektronik Bilim Dalı’nda Tezli Yüksek Lisans eğitime başladı. 2016 yılında ise Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Enerji Mühendisliği İşletim ve Teknolojileri Anabilim Dalı, Enerji Mühendisliği İşletim ve Teknolojileri Bilim Dalı’nda Tezli Yüksek Lisans eğitime başladı. İngilizce bilmektedir.