



**1550nm DALGABOYUNDAKİ DÜZ VE KONİK SIRT
DALGA KILAVUZLU KUANTUM KUYU
YARIİLETKEN LAZERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI
VE MODELLENMESİ**

Kamer Özge ARSLAN

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK**

**2019
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**1550nm DALGABOYUNDAKİ DÜZ VE KONİK SIRT DALGA KILAVUZLU
KUANTUM KUYU YARIİLETKEN LAZERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI VE
MODELLENMESİ**

Kamer Özge ARSLAN

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Anabilim Dalı: Elektrik Elektronik Mühendisliği

Erzurum

2019

Her hakkı saklıdır

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

1550nm DALGABOYUNDAKİ DÜZ VE KONİK SIRT DALGA KILAVUZLU
KUANTUM KUYU YARIİLETKEN LAZERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI VE
MODELLENMESİ

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında, Kamer Özge ARSLAN tarafından hazırlanan bu çalışma 20 / 05 / 2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **Oy birliği ile (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK *İmza* :

Üye : Prof. Dr. Tevhit KARACALI *İmza* :

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN *İmza* :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Doç. Dr. Arzu GÖRMEZ
Enstitü Müdürü

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

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

16 / 05 / 2019

Kamer Özge ARSLAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

1550nm DALGABOYUNDAKİ DÜZ VE KONİK SIRT DALGA KILAVUZLU KUANTUM KUYU YARIİLETKEN LAZERLERİN KARŞILAŞTIRILMASI VE MODELLENMESİ

Kamer Özge ARSLAN

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Bu tezde kuantum kuyu (Quantum Well-QW) düz ve konik sırt dalga kılavuzlu yarıiletken lazerlerin modellemeleri ve karşılaştırmalı sonuçları üzerine çalışılmıştır.

Haberleşme sistemlerinin daha hızlı, daha güvenilir olması ve veri iletimindeki zayıflamaların azaltılmasında başarılı olmasından dolayı optik haberleşme sistemlerinin kullanımı artmıştır. Böylece hem verimli ve düşük maliyetli olmaları hem de yüksek performansları, güvenilirliği ve kompakt olmalarından dolayı yarıiletken lazerler optik haberleşme sistemlerinde geniş kullanım alanı bulmaktadır.

Bu çalışmada optik haberleşmede zayıflamanın en az olduğu 1550 nm dalgaboyunda yarıiletken lazerlerin güç çıkış karakteristikleri ve veriminin iyileştirilmesi üzerine yapılan dalga kılavuzu modelleri incelenmiştir. Bu sebepten İki farklı tasarım olan düz ve konik sırt dalga kılavuzları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla MATLAB yazılımı kullanılarak düz ve konik dalga kılavuzlu yarıiletken lazerlerin karakterizasyonu, sürekli durum karakteristikleri ve boylamsal mod spektrumları, dalga kılavuzu temelli yarıiletken lazer simülasyonları ile elde edilmiştir.

2019, 65 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Yarıiletken Lazerler, Konik Dalga Kılavuzlu Lazerler, Düz Dalga Kılavuzlu Lazerler, Lazer Diyotlar

ABSTRACT

MS. Thesis

COMPARISON AND MODELING OF STRAIGHT AND TAPERED RIDGE WAVEGUIDE QUANTUM WELL SEMICONDUCTOR LASERS at 1550nm WAVELENGTH

Kamer Özge ARSLAN

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronic Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

In this thesis, the modeling and comparative results of quantum well straight and tapered ridge waveguide semiconductor lasers have been studied.

The use of optical communication systems has increased because communication systems are faster, more reliable and more successful to reduce the attenuation of data transmission. Thus, semiconductor lasers have found wide application in optical communication systems due to their compactness, high performance, reliability, power efficiency and low cost they have higher power and low cost and high performance and compactness. In this study, power output characteristics of semiconductor lasers at 1550 nm, in which attenuation is the lowest value of 0,1-0,2 dB/km, and modeling of waveguides have been investigated. Therefore, two different designs, straight and tapered ridge waveguides, have been compared.

Consequently, the characterization of the straight and tapered waveguide semiconductor lasers, continuous wave (CW) characteristics and longitudinal mode spectra have been obtained by waveguide based semiconductor laser simulations using MATLAB.

2019, 65 pages

Keywords: Semiconductor laser, Tapered waveguide lasers, Straight waveguide lasers, Laser diodes

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın hazırlanmasında yardımını, desteğini ve hoőgörösünü esirgemeyen, bilgisi, tecrübesi ve çalışma anlayıőıyla her zaman ışık tutan değerli tez danıőmanım Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK' a saygılarımı ve teőekkürlerimi sunarım.

Çalıőmanın hazırlanması esnasında yine desteklerini esirgemeyen çok kıymetli hocalarım Prof. Dr. A. Fatih YETİM ve Doç. Dr. Tuba YETİM' e, ayrıca bilgi ve deneyimlerinden çokça faydalandığım saygıdeğer hocam Dr. Öğr. Üyesi aęlar DUMAN' a, ekip arkadaşlarım Kerem TURALIOĞLU, Ahmet Serdar KOPAR' a ve elbette Merve TAFTALI' ya içtenlikle teşekkür ederim.

Aynı zamanda azim ve desteği ile yanımda olan çalıőmalarımızı beraber sürdürdüğümüz arkadaşım Rukiye AKSAKAL' a ve her daim yanımda olan canım aileme teşekkür ederim.

Kamer Özge ARSLAN
Mayıs / 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ÖZETLERİ	12
2.1.Lazerler	12
2.2. Yarıiletken Lazerler	14
2.3. Yarıiletken Lazerlerin Çalışma Prensibi	16
2.4. Yarıiletken Lazerlerin Sınıflandırılması	19
2.4.1. Yarıiletken Lazerlerin Yapısal Sınıflandırılması	19
2.4.2. Yarıiletken Lazerlerin Taşıyıcı Hapsetme Mekanizmalarına Göre Sınıflandırılması.....	20
2.4.3. Yarıiletken Lazerlerin Aktif Tabaka Kalınlıklarına Göre Sınıflandırılması	24
3.MATERYAL ve YÖNTEM	29
3.1. Oran Denklemleri (Rate Equations).....	29
3.1.1 Yarıiletken Bir Lazerin Geçici Durum Karakteristikleri	31
3.1.2 Yarıiletken Bir Lazerin Sürekli Durum Karakteristikleri	32
3.2. Konik Sırt Dalga Kılavuzu Yapısı	33
3.3. Uzaysal Boşluk Yanması	35
3.4. Sonlu Farklar Metodu	36
3.5. MATLAB Yazılımı.....	39
4.ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	42
4.1. Düz ve Konik Sırt Dalga Kılavuzlu Yarıiletken Lazerlerin Sürekli Durum Karakteristikleri.....	42
5.SONUÇ ve ÖNERİLER	59
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a	Kazanç sabiti
p	Momentum
P	Foton sayısı
\dot{P}	Foton sayısının türevi
G	Uyarılmış emisyon kazancı
γ	Foton zayıflama oranı
R_{sp}	Kendiliğinden emisyon oranı
N	Elektron sayısı
\dot{N}	Elektron sayısının türevi
N_{th}	Eşik Taşıyıcı Popülasyonu
I	Lazere uygulanan akım
γ_e	Taşıyıcı rekombinasyon oranı
q	Elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
Anr	Işınımsal olmayan rekombinasyon katsayısı
B	Işınımsal rekombinasyon katsayısı
C	Auger rekombinasyon katsayısı
n_0	Taşıyıcı yoğunluğu
c	Işık hızı
h	Planck sabiti
I	Akım
L	Kavite boyu
W	Şerit genişliği
d	Aktif tabaka kalınlığı
N	Elektron sayısı
n	Kırılma indisi
n_0	Taşıyıcı yoğunluğu
q	Elektron yükü
r_1	Işık yayan yüzey yansıtıcılığı
B_{sp}	Kendiliğinden emisyon oranı

Γ	Mod hapsedme faktörü
θ	Koniklik açısı
V	Aktif tabaka hacmi
g_G	Kazanç sabiti
τ_e	Taşıyıcı yaşam süresi
μ_g	Grup kırılma indisi
α_{int}	Dahili kayıplar
α_m	Ayna kayıpları
τ_p	Foton yaşam süresi
$\bar{\mu}$	Etkin kırılma indisi
V_g	Lazer modlarının grup hızı
λ	Dalgaboyu
β_c	Çizgi genişliği iyileştirme faktörü

Kısaltmalar

LSHB	Boyuna uzaysal boşluk yanması
SHB	Uzaysal boşluk yanması
QW	Kuantum çukur
BPM	Işın yayma yöntemi
CW	Sürekli dalga
SMSR	Yan mod bastırma oranı
MASER	Uyartılmış ışın ile mikrodalga yükseltici
VCSEL	Dik kaviteli yüzey yayımlı lazerler
FDM	Sonlu farklar metodu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.(a) Soğurma, (b) Spontane emisyon ve (c) Uyarılmış emisyon durumları için enerji seviyelerinin gösterimi.....	12
Şekil 2.2. Lazer rezonatör yapısı.....	13
Şekil 2.3. Fabry-Perot lazer diyotunun şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.4. Zenginleştirilmiş bir p-n eklemının (a) denge ve (b)ileri kutuplaşma durumu.....	17
Şekil 2.5. AlGaAs/GaAs türdeş olmayan eklem materyal yapısı	18
Şekil 2.6. Çift türdeş olmayan eklem yapıllı lazer diyot için foton gömülümü	18
Şekil 2.7. Yüzey yayıllımlı lazer yapısı	19
Şekil 2.8. Kenar yayıllımlı lazer yapısı	20
Şekil 2.9. Geniş alan lazer yapısı	21
Şekil 2.10. Kazanç kılavuzlu lazer yapısı	22
Şekil 2.11. İndis kılavuzlu (sırt dalga kılavuzlu) lazer yapısı	23
Şekil 2.12. Külçe lazer geometrisi	24
Şekil 2.13. Kuantum çukur geometrisi.....	25
Şekil 2.14. (a) Tekli, (b) çoklu kuantum çukur yapısı	26
Şekil 2.15. Kuantum tel yarıiletken yapısı.....	26
Şekil 2.16. Kuantum nokta yarıiletken yapısı	27
Şekil 2.17. Külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta için dalgaboyu-kazanç grafiği	28
Şekil 3.1. (a) Kazanç kılavuzlu ve (b) indis kılavuzlu konik sırt dalga kılavuzu yapısı.....	34
Şekil 3.2. Sonlu farklar metodunun şematik diyagramı	37
Şekil 3.3. LSHB etkisini azaltan MATLAB algoritması	40
Şekil 3.4. LSHB etkisinin görüldüğü MATLAB algoritması	41
Şekil 4.1. $L=1200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip lazer yapıları (a) Düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) Konik sırt dalga kılavuzu yapısı	44
Şekil 4.2. Düz sırt dalga kılavuzlu lazerler için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (N-I), (b) foton yoğunluğu-akım (P-I), (c) çıkış gücü- akım (L-I) grafikleri.....	45
Şekil 4.3. Konik sırt dalga kılavuzlu lazerler için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (N-I), (b) foton yoğunluğu-akım (P-I), (c) çıkış gücü- akım (L-I) grafikleri.....	46
Şekil 4.4. Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için taşıyıcı yoğunluğu-akım (N-I) grafiği	47
Şekil 4.5. Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için foton yoğunluğu-akım (P-I) grafiği	48

Şekil 4.6 Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için çıkış gücü-akım (L-I) grafiği.....	48
Şekil 4.7 L=2700µm kavite uzunluğuna sahip (a) düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) konik sırt dalga kılavuzu yapıları	49
Şekil 4.8. L=2700µm konik ve düz sırt dalga kılavuzları için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (b) foton yoğunluğu-akım (c) çıkış gücü-akım grafikleri	50
Şekil 4.9. L=3200µm kavite uzunluğuna sahip (a) düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) konik sırt dalga kılavuzu yapıları	51
Şekil 4.10. L=3200µm konik ve düz sırt dalga kılavuzları için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (b) foton yoğunluğu-akım (c) çıkış gücü-akım grafikleri	52
Şekil 4.11. L=1200µm kavite uzunluğuna sahip, 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) Düz sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi, (b) Konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi	54
Şekil 4.12. L=1200µm kavite uzunluğuna sahip, 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) Düz sırt dalga kılavuzlu lazer için Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü, (b) Konik sırt dalga kılavuzlu lazer için Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü.....	55
Şekil 4.13.1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) L=2700µm kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi, (b) L=3200µm kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi.	57
Şekil 4.14. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) L=2700µm kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının (b) L=3200µm kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü.	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan konik ve düz sırt dalga kılavuzlu lazerler için boyut parametreleri	42
Çizelge 4.2. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan lazerler için tipik parametreler.....	43



1. GİRİŞ

Lazerler, günümüzde çok geniş kullanım yelpazesine sahip bir ışık kaynağıdır. İlk icadından bu güne kadar yapılan çalışmalarda görülmüştür ki lazere olan ilgi, ilerleyen teknolojik faaliyetler ile birlikte gün yüzüne çıkmış ve lazerlerin birçok alanda (sanayi, tıp, savunma, haberleşme vb.) kullanılmasıyla birlikte 21. yüzyılın vazgeçilmez teknolojileri arasında yerini almayı başarmıştır. Lazer üretimindeki amaç, yüksek güçlü ve tek bir frekansa (monokromatik) sahip olan lazer ışınları elde etmektir. Bu bağlamda lazer türleri içinde yarıiletken lazerler en yaygın kullanılan lazer türü olarak karşımıza çıkmıştır.

'Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation' ifadesinin baş harfleri kullanılarak oluşturulan LASER kelimesinin temelleri, ilk kez Einstein tarafından 1917 yılında bir fotonun bir elektronu uyararak üst enerji seviyesinden alt enerji seviyesine geçirebileceğinden bahsetmesi üzerine atılmıştır. Lazerin gerçekleştirilmesi için çalışmalar ise 1958 yılında Schawlow ve Townes tarafından başlatılmıştır ancak 1960 yılında yakut lazerinin keşfi ile ilk lazer üretilebilmiştir. Uyarılmış emisyonun yarıiletkenlerde de gerçekleştirilebileceği fikrinden sonra ise ilk yarıiletken lazer 1962 yılında Basov ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir.

İlk yarıiletken lazerler oda sıcaklığında çalıştırılmayan GaAs ve GaAsP yapılarından oluşturulan lazerlerdir. 1963 yılında türdeş olmayan yapıya sahip lazerlerin bu problemi ortadan kaldıracığı düşünülmüş, 1969 yılında ise ilk türdeş olmayan yarıiletken lazer keşfedilerek oda sıcaklığında fakat darbeli modda çalıştırılabilmektedir. Bu dönemde çift türdeş olmayan bir lazer yapısı kullanılarak oda sıcaklığında çalıştırılmış, 1970 yılında ise yine oda sıcaklığında sürekli dalga modunda çalışabilen lazerler üretilmiştir. (Agrawal and Dutta 1993). Bu gelişme, yarıiletken lazerler için bir dönüm noktası olmuş ve çift türdeş olmayan lazer yapısındaki büyük problem olan yüksek eşik akımını düşürmek üzerine çalışmalara başlanmıştır. Aktif tabaka kalınlığının azaltılması ile eşik akımının düşürülebileceği görüldükten sonra yarıiletken lazerler, birçok uygulamada kullanışlı ve kompakt ışık kaynakları durumuna gelmiştir (Agrawal and Dutta 1993).

1. GİRİŞ

Lazer ışığının çok dar bir spot genişliğine sahip olması, tek renkli ve faz uyumlu olması lazerin en önemli özellikleridir. Lazerin dar spot genişliğine sahip olması, metallerin kesim işlemlerinde, lazer yazıcıların çok ince desenler oluştururken bile yüksek hızlı ve kaliteli baskılar ortaya çıkarmasında, barkod ve CD okumada çok önemli yere sahiptir. Lazerlerin tek renkli ışığa sahip olması, tıpta cerrahi alanlardaki kullanımı ile ilişkilendirilir ki bu durumda kullanılan lazerin dalgaboyu ayarlanarak sadece istenilen dokuya etki edilebilmektedir. Kanserli dokulara müdahale edilirken sağlıklı dokulara zarar verilmemesi bunun için iyi bir örnektir (Hitz et al. 1994). Farklı malzemelerden oluşturulabilen lazerler aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir.

Katı hal lazerleri: İlk üretilen yakut lazeri buna örnektir. Kristal yapıya sahip katılaştırılmış bir aktif ortamdan oluşur. Yüksek güçlere sahip lazer çeşididir. Günümüzde sıklıkla kullanılan Nd:YAG lazeri, hem darbeli hem de sürekli dalga modunda çalışan ve çok modlu çıkış üretebilen lazer çeşididir (Okur 2000).

Gaz lazerler: Aktif ortamı çeşitli gazlarla sağlanan lazer çeşididir. Helyum-Neon, argon, karbondioksit ve azot lazerleri bu tür lazerlere örnek teşkil etmektedir. Bu tür lazerler geniş dalgaboyu aralıklarında çalışırlar. Ayrıca hem darbeli modda hem de sürekli dalga modunda ışık çıkışı sağlarlar (Okur 2000).

Sıvı (boya) lazerler: Aktif ortamları sıvı malzemeden oluşan bu lazerlerin en çok kullanılan türü boya lazerleridir ve aktif ortamı, organik bir çözücü içindeki organik boyanın seyreltilmiş bir çözeltisinden oluşturulmuştur. Bunlar mor ötesi ve kızılötesi aralıklarında ışık yayan lazerlerdir. Geniş alandaki dalgaboyları hassas şekilde ayarlanabilmiştir (Okur 2000).

Kimyasal lazerler: Aktif ortamında bir gaz meydana getirilerek kimyasal reaksiyonlar sayesinde pompalanması sağlanmıştır. Bu kimyasal pompalama ekzotermik bir kimyasal reaksiyon sonucu elde edilmiştir. HF/DF lazerleri kimyasal lazerler için bir örnektir (Bloembergen et al. 1987).

1. GİRİŞ

Biyolojik lazerler: İlk biyolojik lazer 2011 yılında, yeşil floresant kullanılarak elde edilmiştir. Hücreler nanosaniyeler mertebesindeki ışınlarla uyarılarak mikro kavite olarak görev yaptığı görülmüştür. Bu sayede lazer çıkışı meydana getirilebilmiştir (Gather and Yun 2011).

Serbest Elektron Lazerleri: Elektromanyetik radyasyonu enine bir manyetik alandan geçen elektron demetleri ile yükselten bu lazerler, kısa dalgaboylarında ve yüksek enerji seviyelerinde çalışabilmektedir. Yayılan radyasyonun dalgaboyunun elektron enerjileri ile değiştirilmesi amaçlanarak lazer dalgaboyunun ayarlanabilirliği sağlanmıştır (Robertson and Sprangle 1989).

Fiber Lazerler: İlk olarak 1960'lı yıllarda geliştirilen fiber lazerler, birkaç miliwattlardan kilowattlar seviyesine kadar enerjiye sahip -nadir toprak elementleriyle katkılandırılmış- lazerlerdir (Limpert et al. 2007).

Yarıiletken Lazerler: Yarıiletken lazerler, bir p-n eklemine ileri yönde kutuplanması ile oluşturulmuştur. Bu kutuplama ile tersinir popülasyonun artması sağlanmıştır ve kristal düzlem boyunca kırılarak geri beslenmesi yoluyla, tek renkli ve aynı fazdaki ışık çıkışı elde edilmiştir.

Yarıiletken lazerler yüksek verimlilik özelliklerinden, küçük boyutlara sahip, uzun ömürlü ve ucuz olmalarından dolayı sıklıkla tercih edilirler. Ayrıca uygulanan enjeksiyon akımı ile doğrudan modüle edilebilmeleri lazerin kullanımını açısından büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu üstünlüklerinden dolayı yarıiletken lazerler, tıp alanında birçok hastalığın tanı ve tedavisinde, savunma sanayisinde lazer silahların üretimi, imha etme, hedef saptama ve mesafe ölçme gibi amaçlarla kullanılırlar. Bunun yanı sıra, iletişim ve haberleşmede fiber optik kablolarla uzak mesafelere veri taşınmasını sağlayarak aynı frekansta birden fazla kişinin birbiriyle bağlantı kurmasına olanak sağlamışlardır.

Yarıiletken lazerler günümüzde optik haberleşme için 1300nm ve 1550nm dalgaboylarında kullanılırlar. Bu dalgaboyları, fiber optik kabloda ışınların zayıflamasının en az olduğu dalgaboylarıdır. Bilginin ışık vasıtası ile taşındığı fiber

1. GİRİŞ

optik kablo sistemlerinde lazer bant genişliğinin yüksek olması ve spektral saflığının fazla olması önemli ve istenen bir durumdur (Çakmak 2000).

Yarıiletken lazerler kendi aralarında da sınıflandırılarak çeşitli iyileştirmeler üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar üzerine birçok üstün özelliğe sahip olan çift türdeş olmayan yarıiletken lazerler üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yapıda farklı tabakalar arasında kalan aktif bölgenin yasak enerji aralığı daha yüksek seçilmiştir. Böylece aktif bölgedeki elektron ve boşlukların burada hapsolarak taşıyıcı gömülümü sağlanmış olur. Ayrıca kullanılan yarıiletken malzemenin kırılma indisi dış tabakalardan daha büyük seçilmiştir. Bu durumda oluşan fotonlar aktif tabaka dışına çıkamaz ve foton gömülümü de sağlanmış olur. Böylece uyarılmış emisyon oranı da artırılmış olur(Okur 2000).

Lazerin aktif tabaka kalınlığının azaltılması ile düşük eşik akımına sahip lazer çıkışı elde edilebilir. Aktif tabaka kalınlığı çok küçük değerler aldığıında kuantum boyutlar ortaya çıkar ve taşıyıcılar kuantum çukur diye adlandırılan küçük boyutlarda hapsedilirler. Bu tür lazerler sayesinde hem küçük boyutlu hem de düşük eşik akımına sahip lazerler üretilebilmiştir. Tekli kuantum çukur lazerler nüfus tersinmesini daha kolay bir şekilde sağlarlar. Kuantum çukurlar birden fazla kullanıldığında çoklu kuantum çukur olarak adlandırılır ve kuantum çukur lazerlerin kazanç katsayısını oldukça artırdığından tekli kuantum çukur lazerlere oranla tercih sebebi olmuştur (Çakmak 2000).

Dalga kılavuzu geometrisinde değişiklikler yapılarak daha düşük eşik akımına sahip ve yüksek güçlü lazerler elde etmek için çalışmalar yapılmıştır. Başlangıçta yoğunlukla sırt dalga kılavuzlu lazerler üzerine çalışmalar yapılmış olsa da dalga kılavuzu geometrisi değiştirilerek konik sırt dalga kılavuzlu lazerlerde beklenen performansa yaklaşıldığı görülmüştür. Bu lazerlerin teorisi ve modellenmesi üzerine yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmektedir.

Mikulla et al. (1998), konik lazer osilatörlerinin ve amplifikatörlerin ışın kalitesinin modal optik kazanç üzerine olan bağımlılığını ilk kez deneysel ve teorik olarak göstererek yüksek ve düşük modlu kazanç yapılarına sahip konik cihazları çıkış

gücü ve ışın kalitesi açısından karşılaştırmışlardır. Yüksek çıkış güçlerinde düşük modlu kazanç yapılı konik cihazların ışın kalitesinin yüksek modal kazançlı cihazların ışın kalitesinden daha iyi olduğunu göstermişlerdir. Işın kalitesi, konik lazer osilatörleri ve konik kuvvetlendiriciler için hem $M2 < 3$ ışın kalite faktörünün hem de 2W sürekli dalgadan (CW) daha yüksek güç seviyelerine kadar neredeyse değişmeden kaldığını göstermişlerdir.

Williams et al. (1999), yüksek güçte düşük sapmalı, ve odak noktasındaki kaymanın en az olduğu konik dalga kılavuzu lazer dizisinin tasarımını göstermişlerdir. İki boyutlu ışın yayılma modelini ilk kez, çıkış ışını üzerindeki ana dalga kılavuzu etkilerinin detaylı bir değerlendirmesini yapmak amacıyla tam termal ve uzaysal açıklamaları içeren bir konik dalga kılavuzu lazeri optimize etmek için kullanmışlardır. Bu sayede uzak alan performansının sınırlarının ele alınması ve deneysel verilerle karşılaştırılması sağlanmıştır. Elde edilen simülasyonları, yerel sıcaklığın yükselişinin uzaysal boşluk yanmasının rolünü izole etmek ve darbeleri koşullar altında uzak alan evriminin deneysel olarak doğrulanmasını sağlamak için kullanılmışlardır. Yerel indisi, yerel taşıyıcı yoğunluğu ile tanımlayarak, herhangi bir yerel sıcaklık artışı ile doğrudan etkilenmesinin yanı sıra uzaysal boşluk yanmasına da eğilimli olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun, simülasyonların uzak alan modelinde daralmaya olanak sağladığını göstermişlerdir.

W. M. Wong et al. (2000), iletim hattı lazer modellemesine dayalı hem konik lazer osilatör hem de lazer amplifikatör yapıları için yeni bir dinamik model önermişlerdir. Bu modeli hesaplama verimliliğini artırmak için yarı-analitik şekilde tasarlamışlardır. Konik yapıyı, etkili indis metodu kullanarak bir boyuta indirgemiş ve yanal boşluk yanması denklemlerinin, şekilden bağımsız olan model için verimi artırdığını gözlemlemişlerdir. Bu nedenle modeli, fotonik sistem tasarımcıları için çekici bir araç olan yarı-analitik bir model olarak ortaya çıkarmışlardır. Yanal taşıyıcı difüzyon ve kazanma doygunluğu etkilerini oran denklemlerine dahil etmiş ve temel moddan yüksek dereceli modlara güç aktarımını hesaba katmak için mod dönüşümünü de hesaplamışlardır. Bu modeli kullanarak darbe enerjisinin ve yansıtıcılığın, konik amplifikatör yapılarında pikosaniye darbe amplifikasyonunun dinamikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir.

1. GİRİŞ

Kelemen et al. (2002), kolay ve düşük maliyetli üretim için, konik kazanç bölümlerine dayalı cihazların en umut verici adaylar olduğunu belirtmişlerdir. Düşük modal kazançta sahip 940nm'de ışık yayan tek kuantum kuyulu, yanal tasarımı konik bir kazanç kılavuzu ve toplam uzunluğu 2mm ile 3mm arasında olan bir sırt-dalga kılavuzu bölümünden oluşan InGaAs / AlGaAs çoklu tabaka yapısını, moleküler ışın epitaksi ile büyütmüşlerdir. Konik yapının uzunluğu yüksek çıkış gücünü belirlerken, yüksek parlaklık için yeterli uzunlukta bir sırt-dalga kılavuzu yapısının gerekliliğinden bahsetmiş ve bu sebeple sırt dalga kılavuzunu 500 mikron uzunluğunda seçmişlerdir. Sürekli dalga modunda ve oda sıcaklığında 5,3W'a kadar optik çıkış gücü elde etmiş, eşik akım yoğunluğunun, 200A/cm² ve 650A/cm² arasındaki değerlerle konik uzunluğa bağlı olduğunu gözlemlemişlerdir. $M^2=1,3$ olarak elde etmiş, bu değer yaklaşık 2,2W'a kadar sabit kaldığını ve daha yüksek optik çıkış gücünde, M^2 değerinin hızlı bir şekilde arttığını göstermişlerdir. Bu tür cihazların ömrünün oda sıcaklığında saatten fazla olabileceğini öngörmüşlerdir.

Sumpf et al. (2003), farklı rezonatör geometrilerine sahip yüksek parlaklıkta konik lazer diyotlar üreterek analiz etmişlerdir. Cihazlar indis kılavuzlu düz bir bölüm ve kazanç kılavuzlu konik bölümden oluşan, düz bölümün uzunluğunun uzaysal mod filtrelemesi üzerindeki etkisini incelemek üzere, toplam lazer uzunlukları $L= 2$ ve 4 mm ve sırt dalga kılavuzu uzunlukları $LRW = 750$ ve $1000\mu\text{m}$, konik açıları $\theta_{TR} = 4^\circ$ ve şerit genişliği $W= 3\mu\text{m}$ olan lazerler üzerinde karşılaştırma yapmışlardır. Güç-voltaj-akım özelliklerini, uzak alan ve M^2 ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Deneylerden, küçük bir sırt dalga kılavuzu uzunluğuna sahip olan lazerlerin, büyük olana kıyasla daha yüksek çıkış gücüne ulaştığını gözlemlemişlerdir. Işın kalitesiyle ilgili olarak, LRW uzunluğunun verimli uzaysal mod filtrelemesini sağlamak için minimum bir değeri aşması gerektiğini göstermişlerdir. Maksimum çıkış gücü ve mükemmel ışın kalitesi için optimize edilmiş cihazların $P = 2W$ çıkış gücüne ve M^2 ölçümü 2,1'den küçük bir ışın yayma faktörüne ulaştığını gözlemlemişlerdir.

Sujecki et al. (2003), 732nm'de ışık yayan yüksek güçlü konik yarıiletken lazerlerde ışık üretme işlemine eşlik eden doğrusal olmayan olguları, simülasyon ve deney kombinasyonunu kullanarak incelemişlerdir. Optik pompalama, elektriksel aşırı pompalama, filamantasyon ve uzaysal boşluk yanmasının konik lazerlerin yüksek çıkış

1. GİRİŞ

güçlerinde çalışmasını etkileyen doğrusal olmayan durumlar olduğunu göstermişlerdir. Çalıştığı konik lazerin simülasyon modelinde, kavite içindeki optik yayılımın analizi için geniş açılı sonlu fark ışın yayma yöntemini kullanarak optik pompalama etkisinin, çıkış ışını kalitesi üzerindeki en büyük etkiye sahip olduğunu elde etmişlerdir.

Hettrick et al. (2004), 250 μ m'ye varan genişliklerdeki lineer ve parabolik konik dalga kılavuzlu lazerlerin performanslarını deneysel olarak karşılaştırmıştır. Doğrusal dalga kılavuzları, incelenen maksimum konik genişlik aralığı için dalga kılavuzunun yayılım kaybına karşı yaklaşık olarak 1dB kadar küçük bir ek kayıp gösterirken, aynı uzunluktaki parabolik dalga kılavuzlarının performansta önemli bir azalma gösterdiğini elde etmişlerdir.

Kallenbach et al. (2005), 1,4 – 1,5 μ m dalgaboyundaki yüksek güçlü uzaysal tek modlu diyot lazerler, Raman ve nadir toprak katkılı fiber amplifikatörlerin yanı sıra malzeme işleme ve göz emniyetli dalgaboylarında Işık Algılama ve Mesafelendirme (LIDAR) cihazları için pompa lazerleri olarak kullanımı açısından ilgi odağı olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca yüksek güçlü cihazları gerçekleştirmenin en uygun maliyetli yolunun, konik rezonatör konsepti olduğunu da belirtmişlerdir. Kuantum kuyu sayısındaki ve dalga kılavuzu katman kalınlığındaki değişikliklerle geniş alan lazerlerinden, logaritmik kazanç modeli için parametreler elde etmişlerdir. 2 boyutlu ışın yayma yöntemi (BPM) simülasyonlarının uygulanmasıyla optimize edilmiş bir rezonatör geometrisi elde etmişlerdir. 500 μ m sırt kısım ardından 6° açığa sahip 2000 μ m konik kısımdan oluşan bir cihaz için ölçüm ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmış ve sürekli dalga (CW) çıkış gücünün 1,5W'tan fazla olduğunu belirtmişlerdir. 0,7W tek mod gücü ve 42dB'lik bir yan mod bastırma oranı (SMSR) elde etmişlerdir. Darbeli ölçümlerde, 5MW / cm²'den daha fazla bir güç kararlılığı ortaya koyduğunu ve 1W çıkış gücündeki sürekli akım yaşlandırma testlerinden, yaklaşık 6000 saatlik bir ömre sahip olduğunu göstermişlerdir.

Dittmar et al. (2006), indis kılavuzlu bir sırt dalga kılavuzu bölümü ve kazanç kılavuzlu bir konik kısımdan oluşan 808nm dalgaboyuna sahip konik lazerler üreterek karakterize etmişlerdir. Işın yayılma oranını 4,4W'ta $M^2 = 1,9$ olarak elde etmişlerdir. Ayrıca, 3,9W'ta çok düşük bir ışın yayılma oranı olan $M^2 = 1,3$ 'e ulaşmıştır. 808nm'de,

1. GİRİŞ

daha önce hiç bildirilmeyen $460\text{MW.cm}^{-2}\text{sr}^{-1}$ gibi yüksek bir parlaklık düzeyine ulaşarak konik lazer diyotların yeni uygulamalarına doğru bir adım olabileceğini belirtmişlerdir.

Borruelet et al. (2008), kazanç kılavuzlu konik lazerlerin temel çalışma prensiplerini simülasyonlarla detaylı olarak incelemişlerdir. Uzaysal boşluk yanmasından kaynaklanan taşıyıcı kaynaklı lens etkisini cihazın performansını sınırlayan ana mekanizma olarak tanımlamışlardır. Sırt dalga kılavuzu bölümünün kırılma indisi, konik bölümün açısı ve uzunluğu, ışın filtresinin kullanımı gibi tasarım parametrelerinin maksimum çıkış gücü ve ışın parlaklığı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir.

Buna göre:

- Etkin modal filtreleme sağlamak için ışın deflektörü kullanılması şiddetle önerilmektedir. Işın deflektörünün bulunmaması durumunda, sırt dalga kılavuzu bölümünün uzunluğu çok daha uzun olmalıdır ki bu da cihazın toplam uzunluğunu artırmaktadır.
- Konik kesit uzunluğu, çıkış gücünü artırmak için pratik nedenlerle verilen sınırlama göz ardı edilmeden mümkün olduğu kadar uzun olmalıdır.
- Belirli bir sırt dalga kılavuzu tasarımı için elektrot açısının seçimi, optimize edilecek çıkış parametresine bağlıdır:

(a) çıkış gücünü en üst düzeye çıkarmak için, elektrot açısının $1/e^2$ deki serbest kırılma açısından biraz daha yüksek olması gerekir.

(b) parlaklığı en üst düzeye çıkarmak ve ışın kalitesini artırmak için, elektrot açısının $1/e^2$ deki serbest kırılma açısından daha düşük olması gerekir. Gibi sonuçlara ulaşmışlardır.

Odriozola et al. (2008), 1060nm'de yayılan yüksek parlaklık kazançlı kılavuzlu konik lazerlerin gelişmiş tasarımlarını üretmek için, ayrı kontaklara ve düşük ön yüzey yansımaya sahip cihazlarda yüksek modülasyon etkinliğini öngören sayısal simülasyonlar kullanmışlardır. Bu şekilde üretilen geniş alan lazerlerinde yüksek dahili kuantum verimi, ortak kontaklı konik lazerlerde iyi ışık kalitesi ile 3W çıkış gücü ve ayrı kontaklı konik lazerlerde 20W/A'ya kadar modülasyon verimliliği göstermiştir.

Odriozola et al. (2009), 980nm konik lazerlerin sırt dalga kılavuzu ve konik kısımlar için ışın özelliklerini simülasyonlar ve deneysel sonuçlar arasındaki bir karşılaştırma ile analiz etmişlerdir. Işın kalitesinde, konik kısma göre sırt dalga kılavuzu bölümünün daha güçlü bir şekilde pompalanmasıyla gözlenen gelişmenin yani iyileşmenin genel bir kural olmaktan çok cihazın geometrisinin detaylarına bağlı olduğunu göstermiştir.

Esquivias et al. (2010), konik yarıiletken lazerlerin hem yüksek güç hem de iyi ışın kalitesi gösterdiğini ve yüksek parlaklıkta optik kaynaklar talep eden uygulamalar için birincil öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. 1060nm'lik konik lazerlerdeki deney sonuçları simetrik cihazlarla karşılaştırıldığında, kendi kendine odaklanma eğilimindeki azalma nedeniyle ışın kalitesinde bir iyileşme olduğunu simülasyonlar ile doğrulamış, termal etkilerin, taşıyıcıların neden olduğu olumsuz etkileri azalttığını göstermiştir. Sonuçların analizi, radyal olmayan rekombinasyonun neden olduğu lokal ısının, negatif termal mercekle etkisinden sorumlu olduğunu ve asimetric epitaksiyel tasarıma dayalı cihazların yüksek modülasyon verimliliği elde etmek için daha uygun olduğunu göstermiştir.

Jensen et al. (2011), bir InGaAs tek kuantum kuyulu 1060nm dış kaviteli konik diyot lazerinden 1018nm-1093nm arasında geniş bir ayar aralığı ve 2,5W'tan daha fazla bir çıkış gücü elde etmişlerdir. Bu 75nm'lik geniş ayar aralığının, kullanılan dalga boyu aralığındaki bir dış kaviteli konik diyot lazer sisteminden elde edilen en geniş ayar aralığı olduğunu rapor etmişlerdir.

1. GİRİŞ

Tijero et al. (2015), konik açının $1,57\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip konik yarıiletken optik amplifikatörlerin performansındaki rolünü, kendinden tutarlı bir sabit durum elektro optik ve termal simülatörlü simülasyonlarla analiz etmişlerdir. Taşıyıcı merceklemenin neden olduğu kendi kendine odaklamanın serbest kırınım açısından biraz daha yüksek konik açılı cihazlar için daha yüksek çıkış gücüne sahip olduğunu ve böylece bu cihazlarla ışın kalitesinde daha yüksek bir güce erişilebileceğini göstermişlerdir. Bu durumun, taşıyıcı cihazın geometrisine ve eşit enjeksiyon koşullarında termal merceklenme etkilerine bağlı olmasından kaynaklandığını rapor etmişlerdir.

Swertfeger et al. (2017), iki boyutlu kazanç profilinin yüksek güçlü konik yarıiletken optik amplifikatörlerde ve entegre MOPA cihazlarında doğrudan gözlenmesini sağlayan yeni bir deneysel yaklaşımı rapor etmişlerdir. Foton, taşıyıcı ve konik amplifikatör içindeki kazanç dağılımlarını, kavitenin içindeki kendiliğinden emisyon profiline doğrudan bakarak ölçülebilen doyma etkilerini iki boyutlu bir simülasyon ile göstermişlerdir. Cihazın arkasında yerleşik bir pencereye sahip olan konik lazerler üreterek ve değişen enjeksiyon seviyelerinde işlem gören kendiliğinden emisyon profilini ölçmek için bir SWIR mikroskop kamera kullanarak uyarılmış emisyonla bağlı kazanç doyumunun etkisini açıkça gözlemlemişlerdir. Bu çalışma ile ilk kez, yarıiletken bir optik amplifikatörde kazanç doyma etkisinin doğrudan gözlemlenmesi ve haritalandırılması sağlanmıştır.

Li et al. (2018), lazer ışını kalitesini iyileştirmek ve yüksek parlaklıkta bir optik çıkış üretmek için kullanılacak bir konik lazerin optik özelliklerini simüle etmişlerdir. Bir konik lazer üreterek sırt dalga kılavuzunun ve konik dalga kılavuzunun birleşiminden dolayı yüksek parlaklıkta bir güç elde edildiğini deneysel olarak da göstermişlerdir. Dikey ve yanal doğrultuda ışın kalite faktörünü (M^2), sırasıyla 1,42 ve 2,21 olarak ölçmüşlerdir. Konik dalga kılavuzu için $8\mu\text{m}$ genişlik ve 6° açı seçerek $1000\mu\text{m}$ sırt kısmı ve $3000\mu\text{m}$ 'lik konik kısım ile 976nm 'de 8W 'lık bir konik lazer kaynağı elde etmişlerdir.

Meinecke et al. (2019), üç bölümlü konik bir yarıiletken kuantum nokta lazerin darbeli emisyon dinamiklerini deneysel ve teorik olarak araştırmışlardır. Lazer çıkışı, tepe gücü, darbe genişliği, zamanlama titreşimi ve genlik kararlılığı açısından karakterize ederek bir dizi darbe performansı elde etmişlerdir. Darbe üretme mekanizmasının yanı sıra, geometrik tasarımın darbeli emisyon üzerindeki etkisinin incelenmesi için de bir model üretmişlerdir. Cihazın performansından sorumlu olan ve cihazın geometrisine özgü olan bir darbe kısaltma mekanizması tespit etmişlerdir. Yüksek güçlü pasif mod kilitli kuantum nokta yarıiletken lazerlerin tasarımı için konik dalga kılavuzlarının, gelecekteki kılavuzlar olarak görev yapabileceğini rapor etmişlerdir.

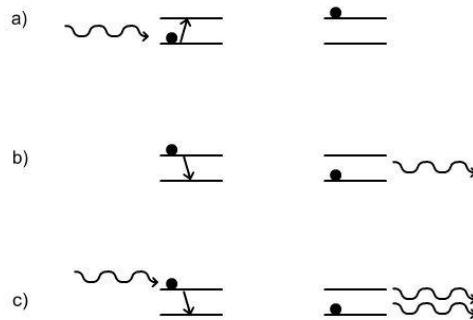
Daha önce yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre, konik dalga kılavuzlu lazer yapıları, yüksek güç ve yüksek verim elde etmek amacıyla çeşitli lazer yapıları için önemli bir seçenek olmuştur. Bu çalışmada konik sırt dalga kılavuzlu lazer yapıları ile düz sırt dalga kılavuzlu lazer yapıları karşılaştırılmıştır. MATLAB yazılımı ile modellenerek taşıyıcı yoğunluğu-akım (N-I), foton yoğunluğu-akım (P-I) ve çıkış gücü-akım (L-I) grafikleri ve lazerlerin spektral özellikleri simüle edilmiştir. Elde edilen sonuçlar ile lazerin çeşitli fiziksel özelliklerinin lazerlerin çalışması üzerine etkileri incelenmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1.Lazerler

Elektromanyetik dalgalar, foton diye adlandırılan enerji paketleri sayesinde ilerlerler. Foton, ışığı oluşturan en küçük parçacıktır ve durgun kütlesi sıfırdır. Fiziksel hiç bir büyüklüğü yoktur ve parçalardan oluşan bir içyapıya sahip olmadığından parçalarına ayrılamaz. Işık hızıyla ilerler, etkileşime parçacık olarak girer ancak dalga olarak yayılırlar. Kütlesi sıfır olduğu halde diğer parçacıklar gibi kütle çekiminden etkilenebilirler ve polarizasyonu belirleyen bir açısal momentuma sahiptirler (Çetinkaya 2006).

Bir atomun yörüngesinde bulunan elektronlar, ortama dahil edilen bir foton ile uyarılırsa, fotonun enerjisi elektrona aktarılarak ilgili elektron daha üst bir enerji düzeyine çıkarılabilir ve böylece soğurma olayı gerçekleşmiş olur (Şekil 2.1 a). Bu foton enerjisine sahip elektron, tekrar eski enerji seviyesine atlamak isteyecek ve enerjisini ortama geri vermek suretiyle bir adet foton ortaya çıkararak bir alt seviyeye geri dönecektir ki bu da emisyon (ışınım) olarak adlandırılır (Şekil 2.1 b). Bu emisyon sırasında, aynı enerji seviyesine sahip başka bir foton da elektron ile etkileşime girerse ortaya çıkan fotonlar birbirleriyle aynı fazda ve aynı frekansta olurlar. Bu emisyon türüne ise uyartılmış emisyon denir (Şekil 2.1 c) (Çetinkaya 2006). Lazer ışığı meydana getirmek için istenen durum uyartılmış emisyon durumudur.

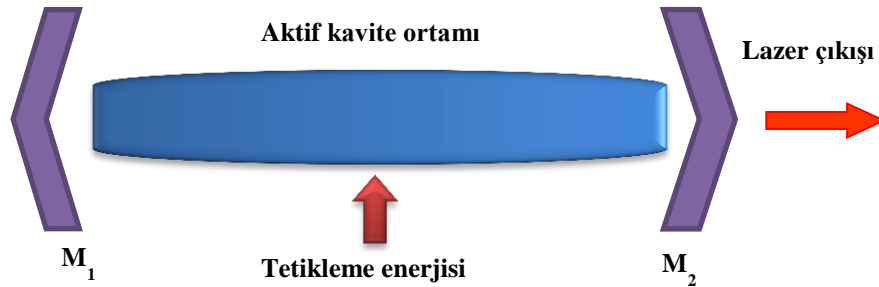


Şekil 2.1. (a) Soğurma, (b) spontane emisyon ve (c) uyartılmış emisyon durumları için enerji seviyelerinin gösterimi (Çetinkaya,2006).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Uyartılmış emisyonun varlığından ilk kez Albert Einstein tarafından 1917 yılında bahsedilmiş, 1928 yılında ise Landenburg tarafından negatif soğurma ile birlikte kanıtlanmıştır. Başlangıçta gaz lazerleri üzerine yapılan çalışmalardan sonra 1953 yılında MASER (uyartılmış ışımaya ile mikrodalga yükseltici) keşfedilmiştir. Devam eden süreçte uyarım darbesinin kullanımı ile tersinir popülasyon teorisi Dicke tarafından 1954 yılında ve Fabry-Perot lazer kavitesi ise 1957 yılında Gould tarafından ortaya atılmıştır. 1960 yılında ise uyartılmış radyasyon salınımıyla ışığın güçlendirilmesi anlamına gelen LASER (Light Amplification of Stimulated Emission by Radiation) kelimesi kullanılmaya başlanmış ve ilk yakut lazerinin temelleri atılarak varlığı ispat edilmiştir (Sağlam 2017).

Lazerin çalışması için gerekli tasarım, biri tam yansıtıcılıkta diğeri ise kısmi yansıtıcılıkta olan iki ayna arasındaki bir aktif kavite ortamı ile oluşturulur. Kavite ortamına dışardan bir enerji verilerek başlangıç tetiklemesi meydana getirilir ve foton yayılımı sağlanır. Açığa çıkan fotonlar kavitede yer alan iki ayna arasında geri beslenerek yükseltilir ve birbirleriyle aynı faza geçerler. Yükseltelen fotonlar belirli bir eşik şiddetine eriştikten sonra kısmi yansıtıcılı aynadan dış ortama çıkarak lazer ışınımı oluşturulur (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. Lazer rezonatör yapısı

Bir ışık kaynağının lazer olarak çalışabilmesi için optik kazanç (tersinir popülasyon) ve optik geri besleme şartlarını sağlaması gerekir. Bir atomun, iletim bandındaki elektron sayısının valans banttaki elektron sayısından fazla olması durumuna tersinir popülasyon denir ve bu durum uyartılmış emisyon olayı ile gerçekleştirilir. Optik geri besleme ise lazer rezonatörleriyle sağlanır. Karşılıklı iki

2. KAYNAK ÖZETLERİ

yansıtıcı yüzey arasında hareket eden fotonların aynı fazda üst üste bindirilmesiyle ışığın yükseltilmesi durumudur.

Lazerler diğer ışık kaynaklarına göre önemli farklılıklara sahiptir. Bunlar;

- Fotonların faz uyumlu olarak hareket etmeleri sebebiyle tek bir fazda ışık çıkışının olması
- Monokromatik olarak çalışarak sadece tek renkli ışık çıkışına izin vermesi (tek bir frekansta veya dalgaboyunda ışık yayması)
- Yoğun, güçlü ve düzgün bir ışık çıkışına sahip olmasıdır.

Lazerler katı hal lazerleri, sıvı lazerler, gaz lazerleri, fiber lazerler, serbest elektron lazerleri, kimyasal lazerler, plazma lazerleri, X-ışını lazerleri ve yarıiletken lazerler olarak sınıflandırılırlar. Bu tezde optik haberleşme sistemlerinde, medikal uygulamalarda, optik yazıcı ve kaydedicilerde sıklıkla kullanılan birçok özelliği bakımından üstünlükleri bulunan yarıiletken lazerler üzerine çalışılmıştır.

2.2. Yarıiletken Lazerler

1961 yılında yarıiletkenlerde uyartılmış emisyonun bir p-n eklemi boyunca katılan taşıyıcıların yeniden birleşmesiyle oluşabileceği fikri Basov ve arkadaşları tarafından ortaya atılmış ve düşük sıcaklıklarda çalışan ilk p-n eklem diyot lazeri 1962 yılında üretilmiştir (Bengi 2009).

İlk p-n eklemli yarıiletken lazerler GaAs tabanlı olarak üretilmiştir ve çalışması klasik lazer prensibini barındıran Fabry-Perot rezonatörleriyle sağlanmıştır (Born and Wolf 1980). Başlangıçta tek eklemli yarıiletken lazerlerde eşik akımının yüksek olması sorunu ile karşılaşmış, bunun nedeni olarak zayıf bir optik hapsedmeye ve kazanç bölgesinde yüksek kayıplara sebep olan GaAs tabakalarının varlığı gösterilmiştir. Bu tür lazerlerde kazanç bölümü eklemin p tarafındaki ışık yayan ince tabakadan meydana gelmektedir ve tabakalar arasındaki kırılma indisi farkı çok az olduğundan sadece zayıf kırılma indisi kılavuzlaması oluşturulabilmiştir. Bu durumda yayılan ışın, kayıpların

2. KAYNAK ÖZETLERİ

fazla olduğu GaAs tabakası ile kaplı kazanç bölgesinde ortaya çıkarak eşik akım yoğunluğunun artmasına sebep olmuştur (Morthier and VankWikelberge 1997).

Bu durumun önlenmesi amacıyla çoklu eklem lazerlerinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar başlatılmış, ilk çoklu yapı olan AlGaAs-GaAs lazer yapısı 1969 yılında I. Hayashi ve M. B. Panish tarafından oluşturulmuştur. Böylece türdeş p-n eklemli lazerlere göre eşik akımı daha düşük olan çok eklemli lazerlerin kullanımına başlanmıştır.

1970'lerde lazerler üzerine iyileştirme çalışmalarına devam edilmiş bu bağlamda sırt dalga kılavuzları ve gömülü (buried) çoklu lazer yapıları ile daha yüksek yatay mod kontrolü sağlanarak daha düşük eşik akımlarına ulaşılmıştır. Ayrıca dağınık geri beslemeli diyot lazerler geliştirilmiş, böylece yatay, dikey ve boyuna modların yüksek hızlarda modüle edilebilmesine olanak sağlanmıştır (Bengi 2009).

1977 yılında ilk kez kuantum kuyuların kullanılmasıyla oluşturulan yarıiletken lazerler geliştirilmiş, elektron-boşluk çiftlerini hapsetme bölgelerinin kuantum kuyu içine çekilmesi ile eşik akımı azaltılmıştır. Ayrıca kuyuların genişliklerinin ve bariyer boyutlarının değiştirilmesi ile dalgaboyu modülasyonu sağlanabilmiştir (Tsang 1981).

Bu önemli gelişmelerden sonra yarıiletken lazerlerin üstünlükleri anlaşılmış ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan bazıları 800nm dalgaboyu civarındaki optik yazıcı, okuyucu ve veri kaydetme sistemleri, savunma sanayisi ve medikal uygulamalardır. Bunlara ek olarak yarıiletken lazerler, yüksek performanslı ve yüksek spektral saflıkta olduğu için yüksek bant genişliklerine sahip optik haberleşme sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadırlar (Çakmak 2000; Soibel et al. 2010).

Optik haberleşme için kullanılan 1300nm ile 1550nm dalga boylarındaki lazerler, dar bir bant genişliğine, yüksek güvenilirliğe, düşük gürültüye ve düşük zayıflamaya sahip olması gerektiğinden tek eklemli diyot lazerler yerine çok eklemli, kuantum kuyulu, dağınık geri beslemeli ve bragg aynalı lazerler kullanılmaktadır.

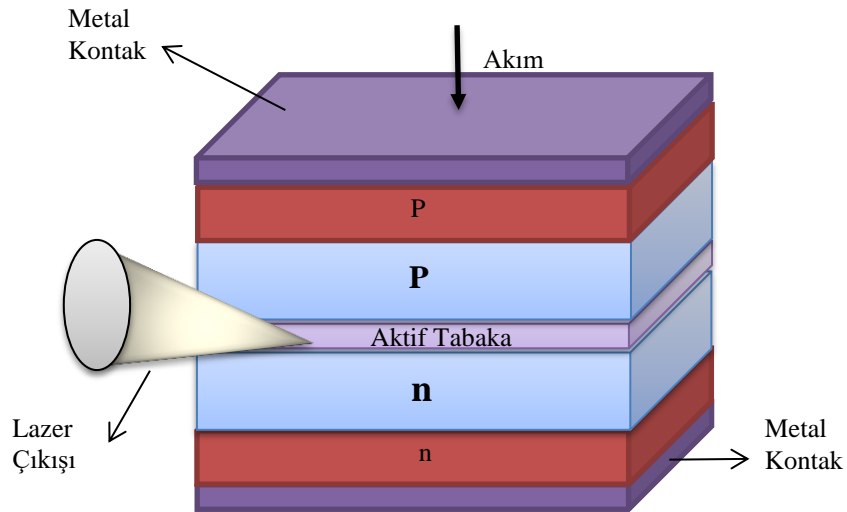
2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yarıiletken lazerler başlangıçta türdeş eklem lazer yapısına sahipken sonraları türdeş olmayan eklem, kuantum kuyu, kuantum tel ve kuantum nokta lazerler, VCSEL ve DFB, DBR lazerlerin üretimine başlanmıştır. Bu gelişmeler sayesinde daha yüksek verimli lazerler ortaya çıkmıştır. Yarıiletken lazerler;

- Seri üretime uygun olmasıyla birlikte maliyetinin düşük olmasından
- Yüksek bir verim ile çalıştığından (yaklaşık %60)
- Küçük boyutlu ve entegrasyon için uyumlu olmasından
- Kayıplarının ve ışın dispersiyonunun düşük olmasından
- Düşük akımlarla pompalanabilmelerinden
- Haberleşme sistemleri için fiber optik kablo ile uyumlu olmasından dolayı sıklıkla tercih edilmektedir (Erol ve Balkan 2013).

2.3. Yarıiletken Lazerlerin Çalışma Prensibi

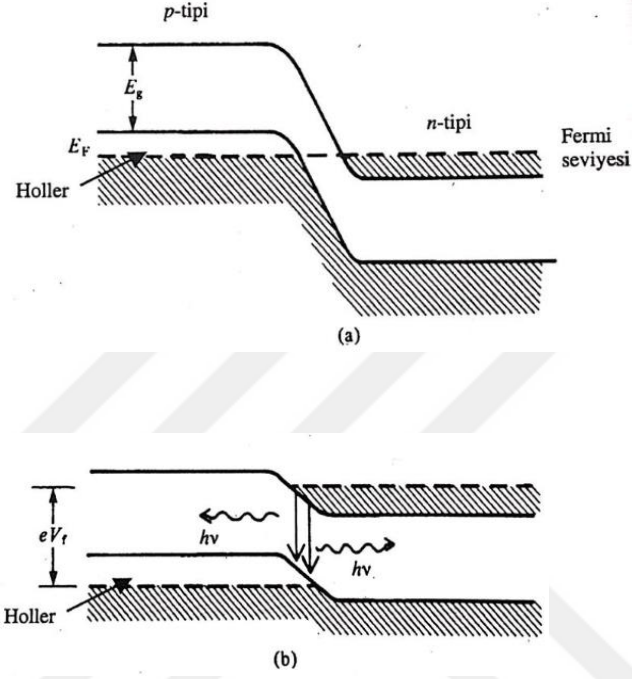
Yarıiletken lazer kabaca p-n eklemi arasında kalmış bir aktif tabakadan oluşan ve ileri yönde kutuplama ile çalışan bir diyot sistemidir (Şekil 2.3). İleri kutuplama durumunda elektronlar ve boşluklar eklem doğru hareket ederler ve eklem bölgesinde birleşerek uyarılmış emisyon başlatırlar (Wilson and Hawkes 2000).



Şekil 2.3. Fabry-Perot lazer diyotün şematik gösterimi

2. KAYNAK ÖZETLERİ

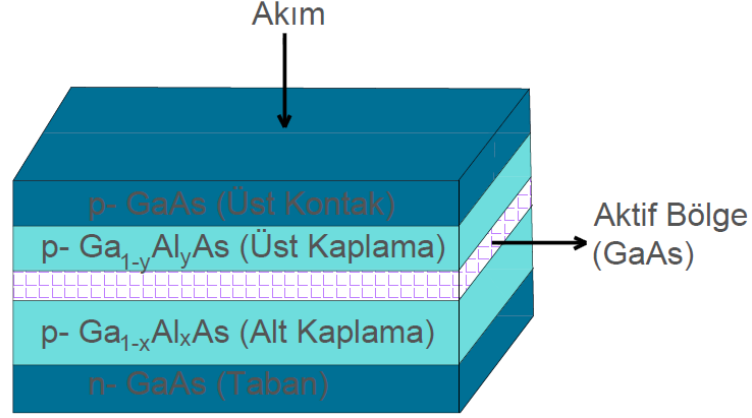
Başlangıçta p ve n türü maddeler denge halinde değildir yani Quasi-fermi seviyeleri birbiriyle uyumlu değildir. Fermi seviyesi n tipi maddelerde iletim bandında bulunurken, p tipi maddelerde valans bantta bulunur. Bu tür bir eklem için denge durumu ve ileri kutuplama durumu Şekil 2.4' te gösterilmiştir (Wilson and Hawkes 2000).



Şekil 2.4. Zenginleştirilmiş bir p-n eklemine ait (a) denge ve (b) ileri kutuplama durumu (Wilson and Hawkes 2000).

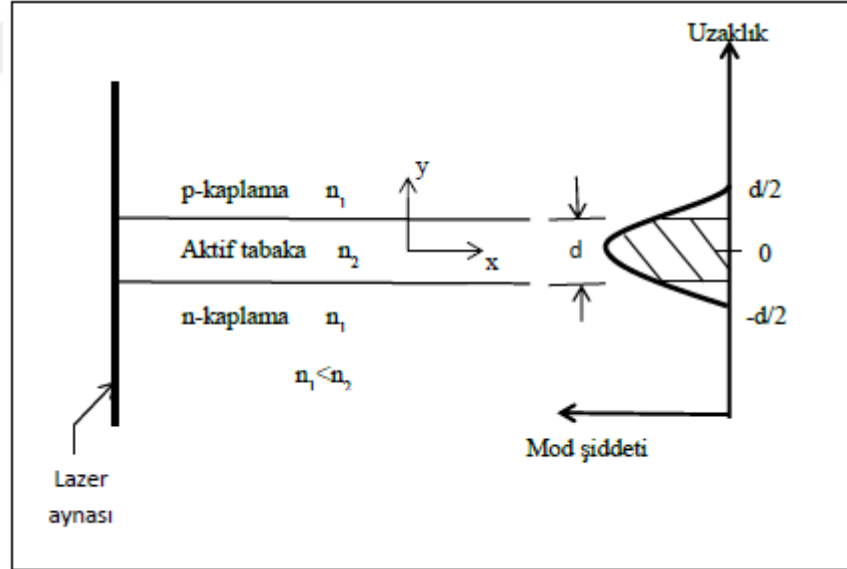
Tek bir yarıiletkenin farklı katkılanmış bölgeleri arasında kalan bir eklemden bahsediliyorsa bu tek tip eklem (homoecklem), farklı yarıiletkenlerin arasına yerleştirilmiş bir eklemden bahsediliyorsa bu da türdeş olmayan eklem olarak adlandırılır.

Türdeş eklem yapısında elektronlar p tarafına geçerek boşluklarla rekombine olurlar ve böylece eklem civarında oluşturulan boşaltılmış bölgede bir elektrik alan oluşur. Bu tip lazerlerde foton gömülümü ve taşıyıcı gömülümü yapılması, eşik akımının yüksek olmasından dolayı zordur (Kotan 2008). Çift türdeş olmayan eklem yapılarında aktif tabaka, iki tabaka arasında kalır ve bant aralıklarının farklılığından faydalanılarak taşıyıcı hapsedme durumu söz konusu olur (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. AlGaAs/GaAs türdeş olmayan eklem materyal yapısı

Çift türdeş olmayan eklem yapılarında kaplama tabakalarının kırılma indisi, aktif tabakanın kırılma indisinden daha düşük seçilmek suretiyle dalga kılavuzu içinde foton gömülümü sağlanabilmektedir (Şekil 2.6) (Singh 1995).



Şekil 2.6. Çift türdeş olmayan eklem yapıları lazer diyot için foton gömülümü (Agrawal and Dutta 1993).

Uzun mesafeli fiber optik haberleşme için aktif bölgesi $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$ tabanlı sistemler kullanılır. Bu çalışmaya konu olan 1550nm dalgaboyu için $In_{0,58}Ga_{0,42}As_{0,9}P_{0,1}$ oranlarına sahip yapı kullanılmıştır. Fiber optik haberleşmede bu dalgaboyunda

0,1dB/km gibi küçük zayıflamalar olduğu için 1550nm dalgaboyunun önemi büyüktür.

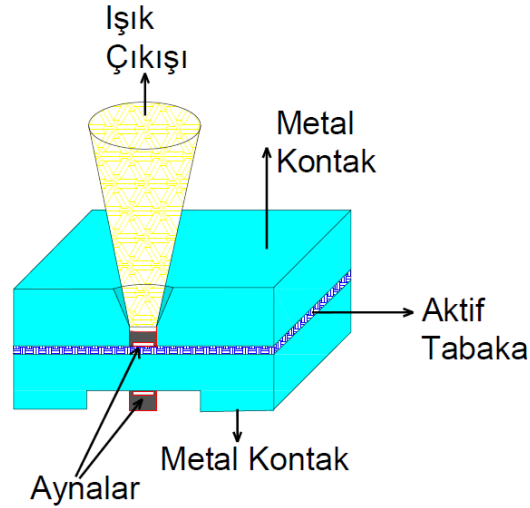
2.4. Yarıiletken Lazerlerin Sınıflandırılması

Yarıiletken lazerler, yapılarına göre ve aktif tabaka kalınlıklarına göre sınıflandırılabilirler.

2.4.1. Yarıiletken Lazerlerin Yapısal Sınıflandırılması

Yarıiletken lazerler ışın yayma bölgelerine göre kenardan ve yüzeyden yayımlı lazerler olarak ikiye ayrılırlar.

- Yüzey yayımlı lazerlerde, geribesleme mekanizması lazerin üst ve alt tabakasındaki aynalar ile sağlanır. VCSEL'ler (dik kaviteli yüzey yayımlı lazerler) bu tür lazerler için örnek teşkil eder. Tipik bir VCSEL'de kavite uzunluğu $10\mu\text{m}$ dolaylarında olduğundan aynalardaki yansımalar artar ve bu yüzden ayna kayıpları yükselerek lazerin eşik akımını artırır. Bu kayıpları önlemek amacıyla bu lazerler DBR rezonatör şeklinde üretilebilir (Singh 1995). Şekil 2.7'de yüzey yayımlı bir lazer yapısı gösterilmiştir.

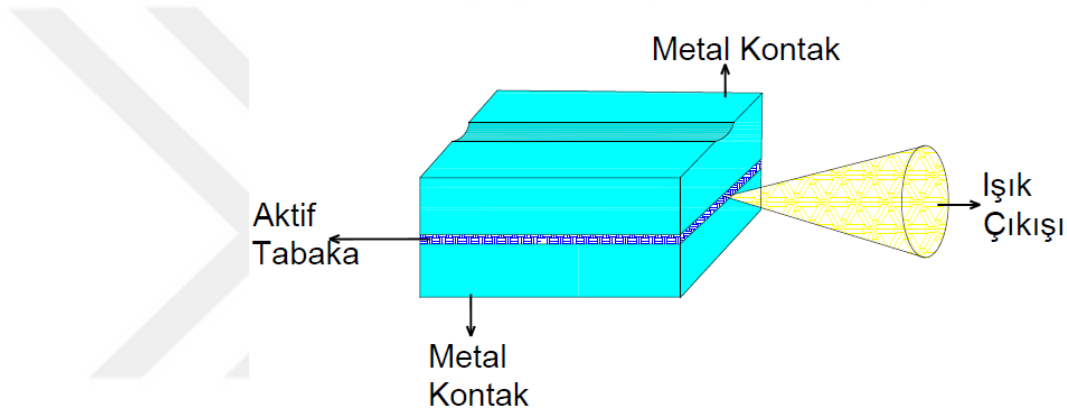


Şekil 2.7 Yüzey yayımlı lazer yapısı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

- Kenar yayımlı lazerler ise türdeş, türdeş olmayan ve çift türdeş olmayan lazerler olarak sınıflandırılırlar. Türdeş (homostructure) yarıiletken lazerler eşik akımları yüksek olduğundan pek tercih edilmez. Bu tür lazerlerde foton gömülümü ve taşıyıcı gömülümü zayıftır. Buna karşılık olarak çift türdeş olmayan (double heterostructure) lazerler, yüksek bir gömülüm kapasitesine sahip olduğundan eşik akım değeri düşük ve çıkış gücü yüksek olan lazerlerdir (Çakmak 2000).

Çoklu tip eklem yapısında kırılan yüzler aktif bölgeden daha düşük bir kırılma indisine sahip olduğundan, p-n eklemine dikey şekilde bir optik gömülüm sağlanmıştır. Şekil 2.8’de kenar yayımlı bir lazer yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.8 Kenar yayımlı lazer yapısı

2.4.2. Yarıiletken Lazerlerin Taşıyıcı Hapsetme Mekanizmalarına Göre Sınıflandırılması

Yarıiletken lazerler, optik veya taşıyıcı hapsetme mekanizmalarına göre de sınıflandırılabilir. Yanal gömülüm sağlanarak lazer verimi artırılabilir ve ışık yayılımı kontrol altına alınabilir. Optik gömülüm için ise kırılma indisi farkı oluşturularak veya dalga kılavuzu geometrisi değiştirilerek bu durum sağlanır (Duman 2008).

Bunun için geliştirilen yarıiletken lazer çeşitleri;

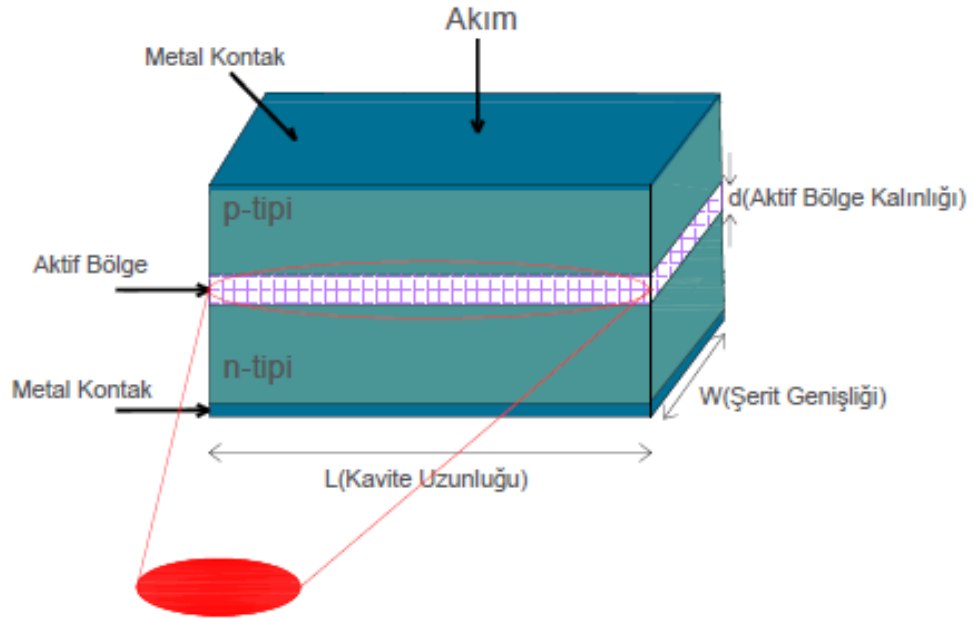
- Geniş alan (broad area) lazerler,
- Kazanç Kılavuzlu (gain guided) lazerler,
- İndis Kılavuzlu (index guided) lazerlerdir (Saleh and Teich 1991).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yanal hapsetme mekanizması;

- Sürekli modda çalışan lazerlerin düşük eşik akımına sahip olması,
- Tek mod oluşumunun sağlanması,
- Eşik akımının düşürülmesi,
- Çalışma sırasındaki soğutma ihtiyacının azaltılması ve lazerin yüksek sıcaklıklarda çalışmasına izin vermesi açısından önemlidir (Duman 2014).

Geniş alan lazerler: Herhangi bir yanal mekanizmaya sahip olmayan bu lazerler akım gömülümü sağlayamaz. Bu tür lazerlerde ışık çıkışı tüm aktif bölge boyunca olmaktadır. Geniş alan lazerlerde eşik akımı L uzunluğuna bağlıdır. Kavite uzunlukları fazladır ve bu durum eşik akımının yüksek olmasına sebep olur. Ayrıca kazanç da düşüktür. Eşik akım yoğunluğunun azaltılmasına aktif bölgedeki p katkısının artırılması ile çözüm bulunabilir. Böylece taşıyıcı yoğunluğu da artırılmış olur (Kotan 2008).

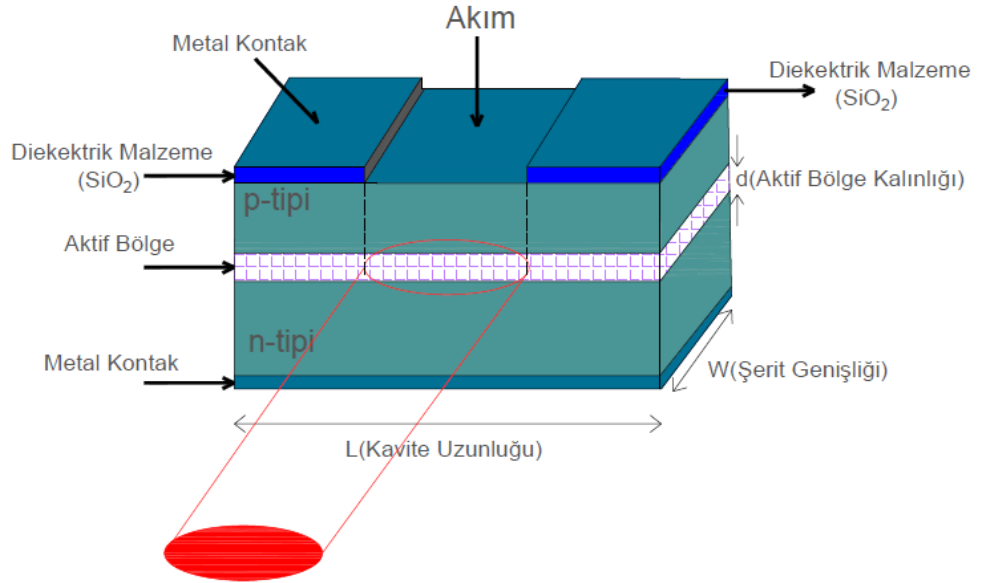


Şekil 2.9 Geniş Alan Lazer Yapısı

Yarıiletken lazerler yanal hapsetme mekanizmalarına göre kazanç kılavuzlu ve indis kılavuzlu olmak üzere ikiye ayrılır.

Kazanç kılavuzlu lazerler: Lazere uygulanan yanal akım, aktif tabakadaki küçük bir bölgede sınırlandırılır. Akımın geçeceği bölge sınırlandırıldığında ışıma yapacak olan bölge de sınırlandırılmış olur. Bu bölgede taşıyıcı sayısı fazladır ve ışığın geçtiği bölgenin kırılma indisi değişerek doğal bir dalga kılavuzu oluşur. Enine modlar eklem yüzeyinde optik kazanç dağılımının etkisiyle oluşturulur. Lazerin kılavuzlanmamış olması nedeniyle 100mA ile 150mA dolaylarında yüksek sayılabilecek bir eşik akımına sahiptir ve kuantum verimliliği de düşüktür. Ancak geniş alan lazerler ile karşılaştırıldığında eşik akım değeri düşük sayılabilir. Soğutma problemi kısmi olarak çözülmüş olup daha uzun ömürlü bir kullanıma sahiptir.

Burada lazer karakteristiğinin belirlenmesi, p-n eklemi boyunca optik mod dağılımlarının optik kazanca bağlı olmasından dolayı eklem yüzeyindeki taşıyıcı dağılımı ile belirlenir. Bu sebepten kazanç kılavuzlu lazerler diye adlandırılır (Kotan 2008). Şekil 2.10'da kazanç kılavuzlu bir lazer yapısı gösterilmiştir.



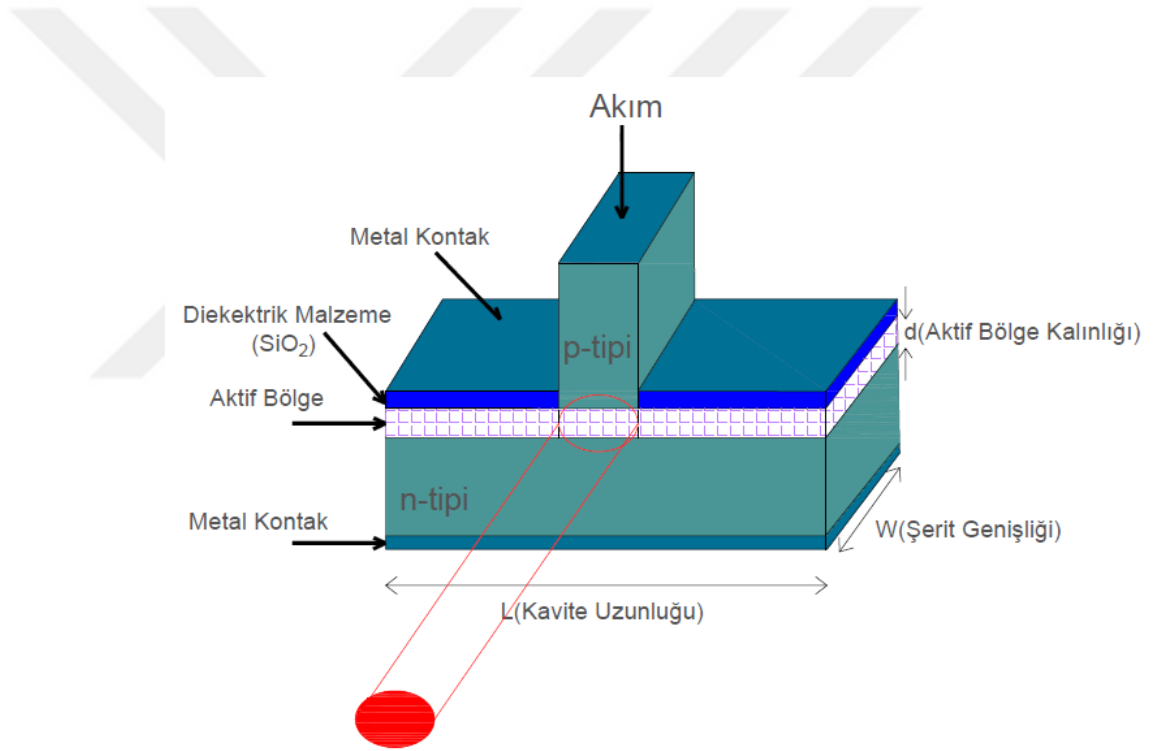
Şekil 2.10 Kazanç kılavuzlu lazer yapısı

İndis kılavuzlu lazerler: Optik gömülüm için yanal kırılma indisi farkından yararlanılarak foton çıkışını aktif bölgenin sınırlandırılmış bir kısmında tutarlar. Kazanç kılavuzlu lazerlere ek olarak yanal indis basamaklarının oluşumu sayesinde optik mod gömülümü sağlar. İndis kılavuzlu lazerler uzun dalgaboylarında bile üstün performans

2. KAYNAK ÖZETLERİ

gösterirler (Vasil'ev 1995). Eşik akımları küçüktür ve verimleri yüksektir. Zayıf ve kuvvetli indis kılavuzlu lazerler olmak üzere ikiye ayrılırlar. İndis kılavuzlu lazerler üretim açısından kazanç kılavuzlu lazerlere göre daha zor üretiliyor olsa da üstünlükleri sayesinde daha fazla tercih edilirler. Eşik akımı kazanç kılavuzlu lazerlerde 100mA-150mA olurken, indis kılavuzlu lazerlerde bu değerler 10mA-15mA civarına kadar indirilmiştir.

Zayıf indis kılavuzlu lazerlere örnek olarak sırt dalga kılavuzlu lazerler verilebilir (Agrawal and Dutta 1993). Kuvvetli indis kılavuzlu lazerlerde ise aktif bölgenin kırılma indisi oldukça düşüktür ve yanal indis farkı 0,2 civarındadır. Şekil 2.11'de İndis kılavuzlu bir lazer yapısı gösterilmiştir.



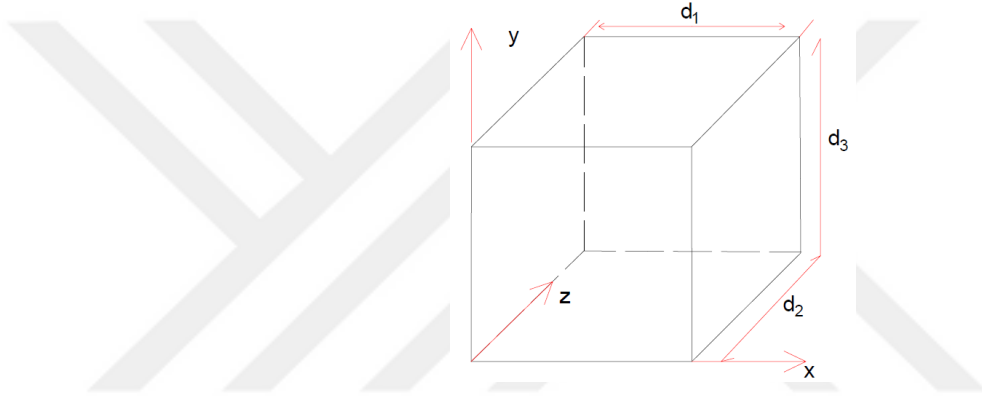
Şekil 2.11. İndis kılavuzlu (sırt dalga kılavuzlu) lazer yapısı

Bu tez çalışmasında inceleyeceğimiz lazer türü sırt dalga kılavuzlu lazerdir.

2.4.3. Yarıiletken Lazerlerin Aktif Tabaka Kalınlıklarına Göre Sınıflandırılması

Aktif tabakalarının kalınlıklarına göre lazerler, külçe (bulk), kuantum çukur (Quantum well), kuantum tel (quantum wire) ve kuantum nokta (quantum dot) lazerler olarak sınıflandırılabilirler.

Külçe (bulk) lazerler: Aktif tabaka kalınlığı külçe lazerlerde genellikle 0,1-0,3 μm civarındadır. Şekil 2.12’de bir külçe lazer geometrisi gösterilmiştir. Bu durumda d_1 , d_2 ve d_3 boyutları de Broglie dalgaboyunun üzerindedir. Aktif tabaka için herhangi bir sınırlama söz konusu değildir.



Şekil 2.12. Külçe lazer geometrisi

De Broglie dalga boyu aşağıdaki şekilde formüle edilir;

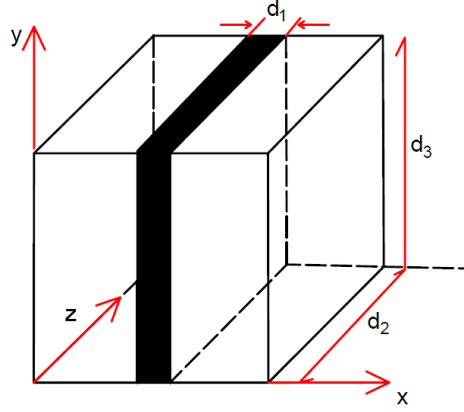
$$p = \frac{h}{\lambda_B} \Rightarrow \lambda_B = \frac{h}{p} = \frac{h}{m \cdot v} \quad (2.1)$$

↙
↘
↙
↘

Momentum plank sabiti kütle hız

Kuantum çukur (quantum well) lazerler: Aktif tabaka kalınlığı de Broglie dalgaboyundan küçük olduğu zaman külçe lazerler için geçerli olan enerji-momentum ilişkisi artık geçerliliğini kaybeder. Aktif tabaka kalınlığının bir tek boyutta de Broglie dalgaboyu civarında olması durumunda kuantum çukur lazerler elde edilir. Elde edilen bu yapı ile elektronlar ve boşluklar tek yönlü olarak hapsedilir (Vasil’ev 1995).

Kuantum çukur lazerlerde bir elektronun davranışı yaklaşık olarak, sonsuz derinliğe sahip olduğu düşünülen tek boyutlu bir potansiyel çukurdaki elektron ile ifade edilebilir. Bu ortam 3 boyutlu bir sonsuz dikdörtgen kuantum çukurdur. Şekil 2.13’de bir kuantum çukur yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Kuantum çukur geometrisi

Kuantum çukur lazerlerde aktif tabaka kalınlığı azaltılmıştır ve $d_1 \ll d_2, d_3$ olduğundan aktif tabaka x eksenine doğrultusunda sınırlanmıştır. Bu sebeple taşıyıcılar y, z düzleminde külçe yarıiletkenmiş gibi davranırlar. Kuantum çukur lazerler için enerji-momentum ilişkisi aşağıdaki gibi gösterilir.

$$E = E_c + E_{q1} + \frac{\hbar^2 k_2^2}{2m_c} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_c} \quad (2.2)$$

↓
Kuantum çukur durumu

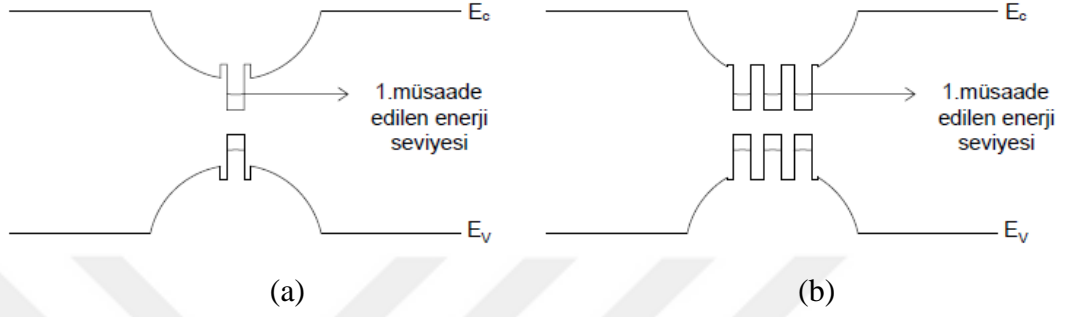
Burada,

$$E_{q1} = \frac{\hbar^2 (n_1 \pi / d_1)^2}{2m_c} \quad (2.3)$$

Kuantum çukur lazerlerin külçe (bulk) olanlara göre avantajları şunlardır:

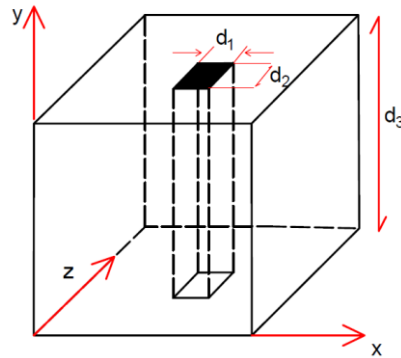
- Taşıyıcı yoğunluğunun artması ile optik kazanç da artar.
- Bir kuantum çukur lazerin kendiliğinden emisyonu külçe lazerlere göre daha az olduğundan enjeksiyon akımı ile dalgaboyunun değişim oranı daha düşüktür.
- Daha düşük eşik akımına sahiptir.

Çoklu kuantum çukur yapılarında bu durum, tekli kuantum çukurlu lazerlere göre daha avantajlı hale gelir. Tekli kuantum çukur yapılarıdaki dar hapsedme mekanizması çoklu kuantum çukur lazerlerde olmayacağından çıkış gücü de artırılmış olur (Çakmak 2000). Şekil 2.14’de tekli ve çoklu kuantum çukur yarıiletken yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.14. (a) Tekli (b) çoklu kuantum çukur yapısı

Kuantum tel (quantum wire) lazerler: Kuantum tel lazerler iki boyutta de Broglie dalga boyunun altındaki hapsedilme mekanizmasına sahiptir. Bu durumda aktif tabaka kalınlığı d_1 , $d_2 \ll d_3$ olduğundan aktif tabaka x ve z eksenini doğrultusunda sınırlanmıştır. Yarıiletken bir mazeme daha büyük bir yasak bant aralığına sahip bir malzeme ile çevrelenir veya ince bir dikdörtgen tel şeklini alırsa kuantum tel olarak adlandırılır. Bu tel potansiyel bir çukur gibi davranarak elektron ve boşlukları iki boyutta hapseder. Şekil 2.15’de kuantum tel yarıiletken yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Kuantum tel yarıiletken yapısı

2. KAYNAK ÖZETLERİ

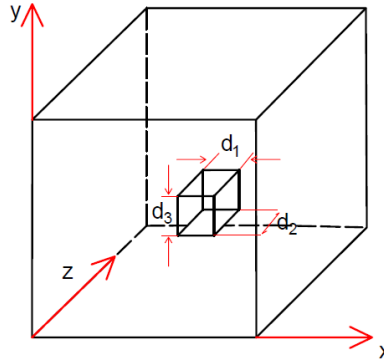
Bunun için kesit alanının (d_1 , d_2) enerji-momentum ilişkisi aşağıdaki gibi gösterilir.

$$E = E_c + E_{q1} + E_{q2} + \frac{\hbar^2 k_3^2}{2m_c} \quad (2.4)$$

Burada,

$$E_{q1} = \frac{\hbar^2 (n_1 \pi / d_1)^2}{2m_c} \quad , \quad E_{q2} = \frac{\hbar^2 (n_2 \pi / d_2)^2}{2m_c} \quad (2.5)$$

Kuantum nokta (quantum dot) lazerler: Kuantum nokta lazerlerde yarıiletkenler tüm boyutlarda da Broglie dalga boyunun altında olduğundan elektronlar üç yönde de dar bir bölgede hapsedilirler. Şekil 2.16. kuantum nokta yapısını göstermektedir.



Şekil 2.16. Kuantum nokta yarıiletken yapısı

Noktasal bir hacme hapsedilen elektronlar için enerji-momentum durumu aşağıdaki gibi gösterilir.

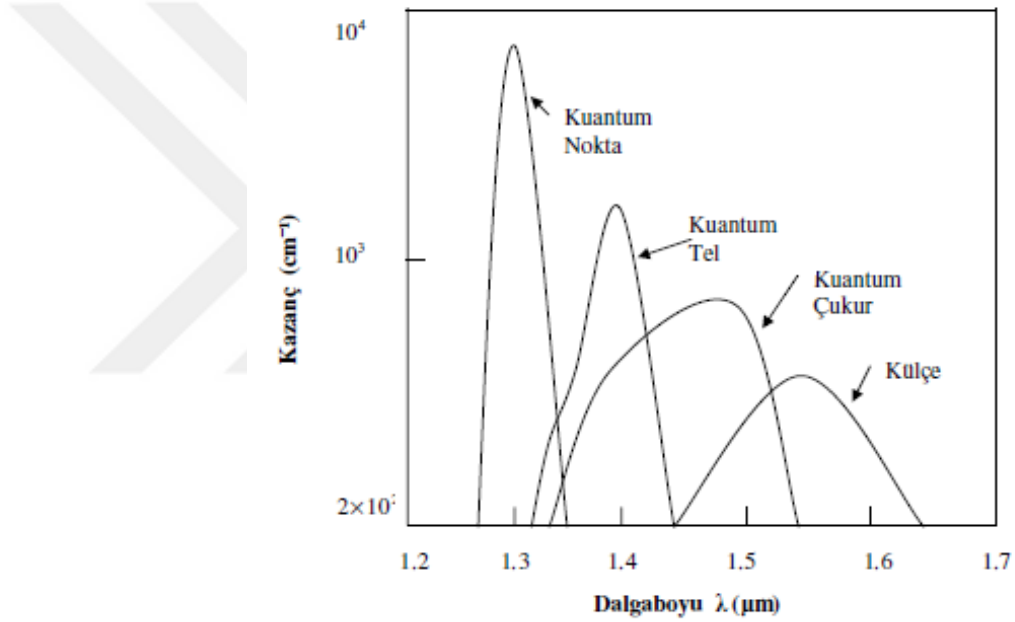
$$E = E_c + E_{q1} + E_{q2} + E_{q3} \quad (2.6)$$

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Burada,

$$E_{q1} = \frac{\hbar^2(n_1 \pi/d_1)^2}{2m_c} , E_{q2} = \frac{\hbar^2(n_2 \pi/d_2)^2}{2m_c} , E_{q3} = \frac{\hbar^2(n_3 \pi/d_3)^2}{2m_c} \quad (2.7)$$

Külçe yarıiletkenlerden kuantum nokta yarıiletkenlere doğru gidildikçe kazançta artış görülür. Aynı şekilde kazanç bant genişliği de külçe yarıiletkenden kuantum nokta yarıiletkene doğru gidildikçe azalır. Şekil 2.17’de dalgaboyu yayılımına karşın kazanç faktörü grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.17 Külçe, kuantum çukur, kuantum tel ve kuantum nokta için Dalgaboyu-Kazanç grafiği (Kotan 2008).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Oran Denklemleri (Rate Equations)

Yarıiletken bir lazerin statik, dinamik ve spektral özellikleri oran denklemleri diye adlandırılan dalga denklemleri ile tanımlanır. Oran denklemleri kısaca elektronlar ve fotonlar arasında gerçekleşen enerji transfer oranıdır denebilir (Çakmak 2000). Foton ve elektronlar için oran denklemleri, (3.1) ve (3.3) denklemleri ile gösterilir.

$$\dot{P} = (G - \gamma)P + R_{sp} = GP - P/\tau_p + R_{sp} \quad (3.1)$$

Bu eşitliğe göre;

P → Foton sayısı

\dot{P} → Foton sayısının türevi

G → Uyarılmış emisyon kazancı

γ → $1/\tau_p$ → Foton zayıflama oranı

R_{sp} → Kendiliğinden emisyon oranı

(3.1) denklemindeki ilk terim olan GP uyarılmış emisyonu gösterirken, ikinci terim olan P/τ_p foton yaşam süresi ile karakterize edilen kayıpları gösterir.

R_{sp} ifadesi denklem (3.2)'de olduğu gibidir.

$$R_{sp} = \beta_{sp}N^2B/V \quad (3.2)$$

Burada β_{sp} kendiliğinden emisyon faktörüdür ve V lazerin aktif hacmini simgeler. N elektron sayısını gösterirken B değeri uyarılmış rekombinasyon katsayısını ifade eder.

Elektron oran denklemi, denklem (3.3) ile gösterilir.

$$\dot{N} = I/q - \gamma_e N - GP \quad (3.3)$$

Bu eşitliğe göre;

$N \rightarrow$ Elektron sayısı

$\dot{N} \rightarrow$ Elektron sayısının türevi

$I \rightarrow$ Lazere uygulanan akım

$\gamma_e \rightarrow$ Taşıyıcı rekombinasyon oranı

$q \rightarrow$ Elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

Elektron oran denklemindeki ilk terim olan I/q aktif bölgeye pompalanan akım oranını ifade ederken ikinci terim $\gamma_e N$ kendiliğinden emisyon oranını ve son terim GP ise uyarılmış emisyon oranını gösterir.

Taşıyıcı rekombinasyon oranı γ_e ise denklem (3.4) deki gibi ifade edilir.

$$\gamma_e = A_{nr} + Bn + Cn^2 \quad (3.4)$$

Burada A_{nr} uyarılmamış rekombinasyon oranını, B uyarılmış rekombinasyon katsayısını ve C Auger rekombinasyon katsayısını gösterirken n taşıyıcı yoğunluğunu simgeler.

Lazerin net kazancı olan G denklem (3.5) ile ifade edilir.

$$G = \Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g \quad (3.5)$$

Kazanç eşitliğine göre;

$\Gamma \rightarrow$ Mod hapsetme faktörü

$c \rightarrow$ Işık hızı

$a \rightarrow$ Kazanç sabiti

$n_0 \rightarrow$ Taşıyıcı yoğunluğu

$\mu_g \rightarrow$ Grup kırılma indisi

Oran denklemleri kullanılarak bir lazerin geçici ve sürekli durum karakteristikleri elde edilebilir. Geçici durum karakteristikleri zamana bağlı değişimleri gösterirken, sürekli durum karakteristikleri akıma bağlı olarak değişir.

3.1.1 Yarıiletken Bir Lazerin Geçici Durum Karakteristikleri

Yarıiletken bir lazere bir akım darbesi uygulandığında, sürekli duruma geçene kadar birkaç nanosaniye civarında bir gecikme oluşur. Bu gecikme uygulanan akıma ve diğer tüm lazer parametrelerine bağlı olarak değişir (Çakmak 2000).

Geçici durum için taşıyıcı rekombinasyon oranı, denklem (3.6)'da olduğu gibidir.

$$\gamma_e = 1/\tau_e \quad (3.6)$$

Burada τ_e taşıyıcı yaşam süresini simgeler. Bu durumda foton ve elektron oran denklemleri aşağıdaki gibi düzenlenerek lazerin hız denklemleri elde edilir.

$$\dot{P} = [\Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g]P - P/\tau_p + \beta_{sp}BN^2/V \quad (3.7)$$

$$\dot{N} = I/q - N/\tau_e - [\Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g]P \quad (3.8)$$

Yarıiletken lazerin çıkış gücü denklem (3.9) ile elde edilir.

$$P_{out} = hc\nu_g\alpha_m P/2 \quad (3.9)$$

Bu oran denklemleri kullanılarak taşıyıcı sayısının, foton sayısının ve lazer çıkış gücünün zamana bağlı değişimleri elde edilir.

3.1.2 Yarıiletken Bir Lazerin Sürekli Durum Karakteristikleri

Geçici durum sona erdikten sonra lazer, sürekli duruma geçiş yapar. Aynı elektron ve foton denklemleri bu durum için de geçerli olup, tüm türevlerin sıfıra eşitlenmesi ile sürekli durum karakteristikleri elde edilir. İki sürekli durum özelliği olan L-I (çıkış gücü-akım) değişimi ve boylamsal mod spektrumu bir lazeri karakterize etmekte önemli yere sahiptir. Foton ve elektron oran denklemlerinde türevlerin sıfıra eşitlendiği durumda oran denklemleri aşağıdaki şekliyle gösterilir.

$$0 = (G - \gamma)P + R_{sp} \Rightarrow P = R_{sp}/(\gamma - G) \quad (3.10)$$

$$0 = \frac{I}{q} - \gamma_e N - GP \Rightarrow \frac{I}{q} = \gamma_e N - GP \quad (3.11)$$

Sürekli durum karakteristikleri için taşıyıcı rekombinasyon oranı, denklem (3.12) ile ifade edilir.

$$\gamma_e = A_{nr} + Bn + Cn^2 \quad (3.12)$$

Denklemler düzenlenirse;

$$I/q = (A_{nr} + BN/V + CN^2/V^2)N - [(\Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g)(\beta_{sp}BN^2/V)(\tau_p^{-1} - \Gamma ca((N/V - n_0)/\mu_g))] \quad (3.13)$$

$$P = [\beta_{sp}[I/q - \Gamma ca(N/V - n_0)P]^2 B/(\gamma_e^2 V)]/[\tau_p^{-1} - \Gamma ca(N/V - n_0)/\mu_g] \quad (3.14)$$

Çıkış gücü oran denklemi ise sürekli durumda da denklem (3.9)'da olduğu gibidir. Bu oran denklemleri kullanılarak taşıyıcı sayısının, foton sayısının ve lazer çıkış gücünün akıma bağlı değişimleri elde edilir.

Bir yarıiletken lazeri karakterize etmekte kullanılan diğer sürekli durum analizi ise boylamsal mod spektrumudur. Boylamsal modların sayısı ve şiddetleri gibi spektral özellikleri için kullanılan oran denklemleri çoklu mod oran denklemleri olarak adlandırılır. Bu denklemler indis kılavuzlu lazerleri analiz etmede kullanılabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{dP_m}{dt} = (G_m - \gamma_m)P_m + R_{sp}(\omega_m) \quad (3.15)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{q} - \gamma_e N - \sum_m G_m P_m \quad (3.16)$$

Burada m indisi boylamsal modu ifade eder. Kazanç spektrumu $G_m = G(\omega_m)$ olarak kullanılır. Eşik akımı civarındaki bir akım şiddetinde modlardaki güç artar. Eşik akımının üzerinde bir akım şiddetinde ise ana mod artarken yan modlardaki güç doyuma giderek azalır. Yan moddaki doyum gücü kendiliğinden emisyon faktörü olan β_{sp} ile doğru orantılı olarak değişir.

3.2. Konik Sırt Dalga Kılavuzu Yapısı

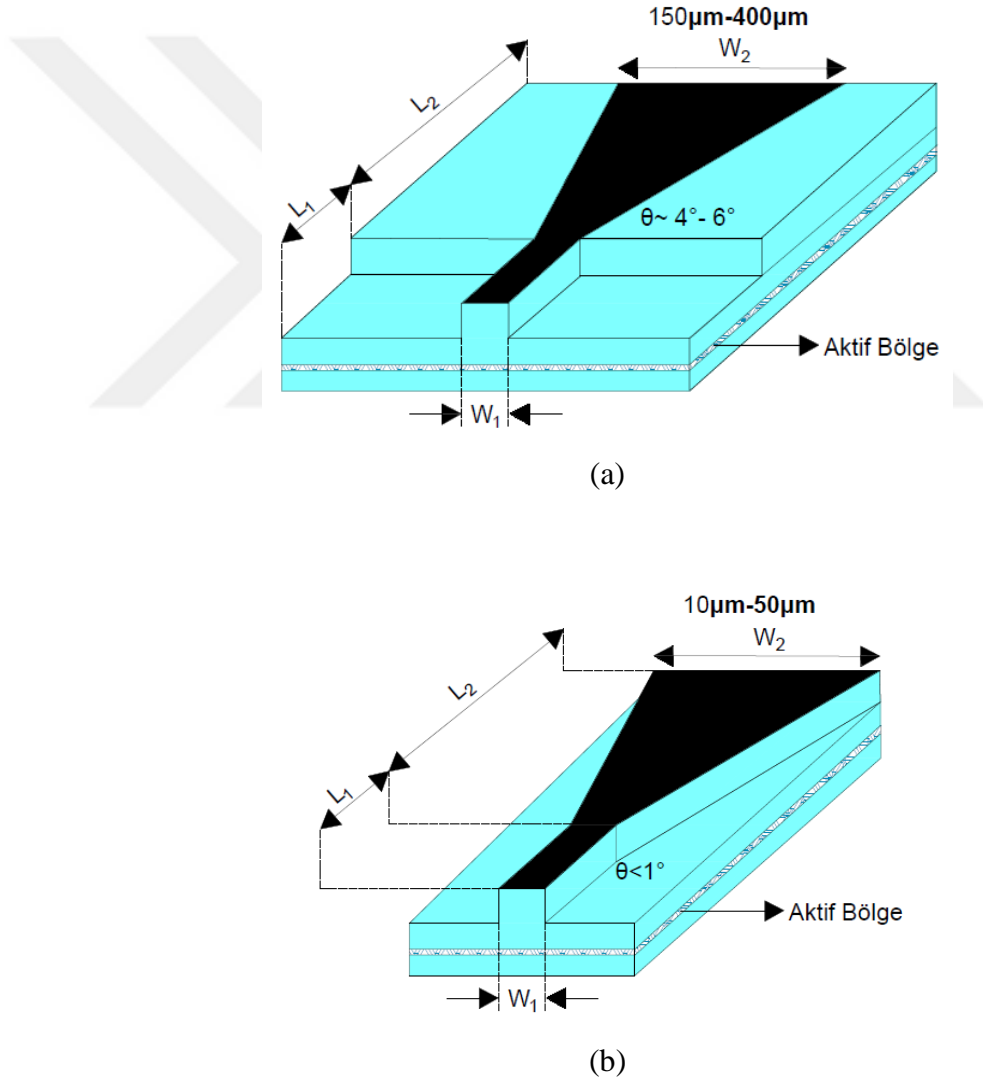
Işık yayan düzensiz kaviteli lazer olarak da adlandırılan konik yapılı lazerler, yüksek güçte ve yüksek parlaklıkta yarıiletken bir kaynak elde etmek için önerilen birçok farklı tasarımdan biridir (Borruelet et al. 2004). Yapımını kolay ve maliyeti de ucuz olduğundan sıklıkla tercih edilir.

Konik lazerler bir düz sırt dalga kılavuzu ve bir konik bölümden oluşur. Düz bölüm, konik bölüme açılan tek bir uzaysal modu sağlarken geriye doğru yansıyan dalgayı da filtrelemeye yarar. Konik amplifikatör bölümü, optik güç yoğunluğunu

3. MATERYAL ve YÖNTEM

azaltmak için optik ışının kademeli olarak genişlemesini sağlar. Nispeten düşük bir optik yoğunluk, uzaysal boşluk yanması (SHB) etkisine bağlı olarak doğrusal olmayan yayılımların etkisini azaltır ve lazer yüzeyindeki optik hasarı da en aza indirir. (Borruelet al. 2004) (Sujecki et al. 2003).

Bugüne kadar farklı konik bölümler için iki farklı tasarım gerçekleştirilmiştir. Bunlar, serbest kırınım açısına yakın bir konik açığa sahip kazanç kılavuzlu konik lazerler ve küçük açılı dar indis kılavuzlu konik lazerler. Şekil 3.1. konik dalga kılavuzlu lazer yapılarını göstermektedir.



Şekil 3.1. (a) Kazanç kılavuzlu ve (b) indis kılavuzlu konik sırt dalga kılavuzu yapısı

Her iki yapıda da kendi kendine odaklanma ve doğrusal olmayan etkilerden kaynaklanan ışın bozulması, yüksek güçteki sınırlayıcı faktör olarak gösterilir. Bunun önüne geçebilmek için hem epitaksiyel yapının hem de geometrinin kesit uzunlukları ve koniklik açısı uygun şekilde tasarlanmalıdır (Borruelet al. 2004).

Konik yarıiletken lazerler için uygun şartlar sağlanarak, hem yüksek verimli hem de kendi kendine odaklanma ve SHB sırasında meydana gelen optik, elektronik ve termal işlemler arasındaki karmaşık etkileşimlerin en aza indirildiği tasarımlar gerçekleştirilebilir. (Sujecki et al. 2003).

Uzaysal boşluk yanmasının etkilerini büyük oranda azaltan konik lazerlerde, genel oran denklemleri kullanılamaz. Böyle bir durum için SHB etkilerini de göz önüne alan farklı dalga denklemleri kullanılmalıdır.

3.3. Uzaysal Boşluk Yanması

Tüm yarıiletken lazer türlerinde, kavitedeki kalıcı ışık yoğunluğu lazer eksenine boyunca aynı değildir. Spesifik olarak, foton yoğunluğu ne kadar yüksek olursa, taşıyıcı yoğunluğu ve optik kazanç o kadar küçük olur. Bu nedenle, homojen olmayan ışık yoğunluğu, taşıyıcı yoğunluğunun düzgün olmayan bir şekilde dağılmasına yol açar ve düzgün olmayan optik kazanç sağlar. Bu etkiye boyuna uzaysal boşluk yanması (LSHB) denir. Başka bir deyişle LSHB etkisi altındaki eşik akımından büyük bir enjeksiyon akımı için, yarıiletken lazerlerin kazancı ve taşıyıcı yoğunluğu doygun değildir. Bu fiziksel etki, klasik oran denklemlerinde dikkate alınmamıştır ve alternatif bir fiziksel tanım gereklidir (Hao 2014).

Bu çalışmada hesaplama yapılırken, yarıiletken lazer oran denklemlerinde belirli bir konumdaki foton sayısının homojen olmamasından dolayı, taşıyıcı yoğunluğu ve optik kazancın da buna bağlı olarak düzgün olmama durumu göz önüne alınmıştır. Bu bağlamda lazer modellemesi, belirli bir konum için geçerli durumları elde etmek amacıyla sonlu bir fark yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yüzden Newton-Raphson metodu sonlu farklar metodu ile birleştirilerek kullanılmıştır.

Lazer ışığının yayılmasının ardından optik güç, denklem (3.17)'de olduğu gibi gösterilir.

$$P_2 = P_1 \exp(\Delta z G_{th}) \quad (3.17)$$

Kavite içindeki toplam optik güç, ileri ve geri yansıyan güçlerin toplamı olarak kabul edilir. Yüzde değişim ise aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$\%değişim = \frac{P_{max} - P_{min}}{P_{max}} \quad (3.18)$$

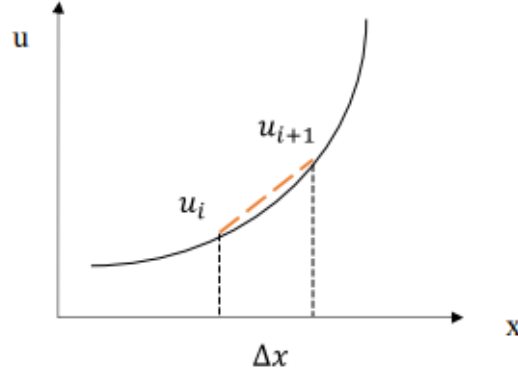
Yüksek güçlü yarıiletken lazerlerin yüzeyleri genellikle asimetrik yansıtıcılarla kaplanır: bir yüksek yansıtıcı (HR) ve bir kısmi yansıtıcı (PR). Bu yöntem ışıma verimini artırmak ve çıkış gücünü bir yönde maksimuma çıkarmak için tasarlanmıştır (Pleumeekers 1998). Fakat asimetrik yansımalar homojen olmayan bir ışık yoğunluğu dağılımına ve dolayısıyla daha güçlü LSHB etkisine neden olmaktadır.

3.4. Sonlu Farklar Metodu

Standart oran denklemleri, uzunlamasına doğrultu boyunca, yerel taşıyıcı yoğunluğu $N(z)$, yerel foton yoğunluğu $P(z)$ ve uzunlamasına pozisyon z ile değişen yerel kazanç $G(z)$ ile mekansal olarak değişen özellikleri yansıtacak şekilde düzenlenmelidir. Bu nedenle, pozisyona bağlı, birleşik diferansiyel oran denklemleri sayısal analiz teknikleri kullanılarak çözülmelidir. Sonlu farklar metodu (FDM), birleştirilmiş diferansiyel denklemleri çözmek için uygun olan temel bir tekniktir.

Sonlu farklar yöntemi bir ızgara üzerinde bir fonksiyonun ayrıklaştırılmasına dayanır ve Denklem (3.19)'da gösterildiği gibi türevlere yaklaşılarak çözümleri diferansiyel denklemlere yaklaştırır. Şekil 3.2. sonlu farklar metodunun şematik bir diyagramını gösterir (Hao 2014).

$$\frac{\partial u}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{\Delta x} \quad (3.19)$$



Şekil 3.2. Sonlu farklar metodunun şematik diyagramı (Hao 2014).

Konik sırt dalga kılavuzlu lazerin modellenmesi için kavite uzunluğu küçük parçalara bölünerek her bir konum için oran denklemlerinin ayrı ayrı hesaplanması gerekmektedir. Bu sayede dalga kılavuzunun LSHB etkisini azalttığı öngörülen, daha düşük bir eşik akımına sahip ve daha yüksek çıkış gücü elde edilen lazer yapısı modellenmiş olacaktır.

Kararlı hal için değiştirilmiş uzaysal değişkenlik oran denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$0 = \frac{\eta_i l}{qV} - \frac{N(z)}{\tau} - v_g G(z)[P^+(z) + P^-(z)] \quad (3.20)$$

$$\frac{dP^+(z)}{dz} = (\Gamma G(z) - \alpha_i)P^+(z) \quad (3.21)$$

$$\frac{dP^-(z)}{dz} = -(\Gamma G(z) - \alpha_i)P^-(z) \quad (3.22)$$

Genel oran denklemleri ile karşılaştırıldığında taşıyıcı yoğunluğu, foton yoğunluğu ve optik kazanç yerine, pozisyona bağlı fonksiyonlar yazılır. $P^+(z)$ ve $P^-(z)$ sırasıyla ileri ve geri foton yoğunluklarını simgeler. Toplam yerel kazanç ise ileri ve geri foton yoğunluğunun toplamı olarak kabul edilir (Hao 2014).

$$P(z) = P^+(z) + P^-(z) \quad (3.23)$$

Düşük ve yüksek yansıtıcılı yüzeyler için yansımaya sınır koşulları sırasıyla denklem (3.24) ve (3.25)'de verilmiştir. Lazer kavite uzunluğu L kabul edilmiştir.

$$P^+(0) = R_{PR}P^-(0) \quad (3.24)$$

$$P^-(L) = R_{HR}P^+(0) \quad (3.25)$$

Denklem (3.26)'de sınır koşulları ile birleştirilmiş oran denklemini gösterilmektedir.

$$\frac{1}{L} \int_0^L \Gamma G(z) dz = G_{th} = \alpha_i + \alpha_m = \alpha_i + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_{PR}R_{HR}} \right) \quad (3.26)$$

Bu noktadan sonra sonlu farklar metodu kullanılarak ileri yönlü lokal foton yoğunluğunun önceki değerlerine göre tüm değerler belirlenebilir. Düşük yansıtıcılı yüzeyde $P^+(z=0)$ olduğu düşünülerek ilk foton yoğunluğu değeri elde edildikten sonra kavite boyunca tüm konumlardaki foton yoğunlukları hesaplanabilir (Hao 2014).

$$P^+(z+1) = P^+(z)[1 + dz(\Gamma g(z) - \alpha_i)] \quad (3.27)$$

Burada dz ızgara uzunluğunu simgeler. $P^+(z=0)$ tahmini ise genel oran denklemlerindeki foton yoğunluğu denklemi ile elde edilir. Yüksek yansıtıcılı yüzey için sınır koşulu hata değeri sıfıra yakın olana kadar başlangıç değerini kontrol eder. Hata denklemi (3.28)'de gösterilmiştir.

$$hata = \frac{R_{HR}P^+(L) - P^-(L)}{P^-(L)} \quad (3.28)$$

Newton-Raphson metodunda $f(x)$ bir fonksiyon olmak üzere;

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (3.29)$$

(3.29) denklemini Sonlu Farklar Metodu ile birleştirildiğinde denklem (3.30) elde edilir.

$$x_{n+1} = x_n - f(x_n) \frac{x_n - x_{n+1}}{f(x_n) - f(x_{n+1})} \quad (3.30)$$

3.5. MATLAB Yazılımı

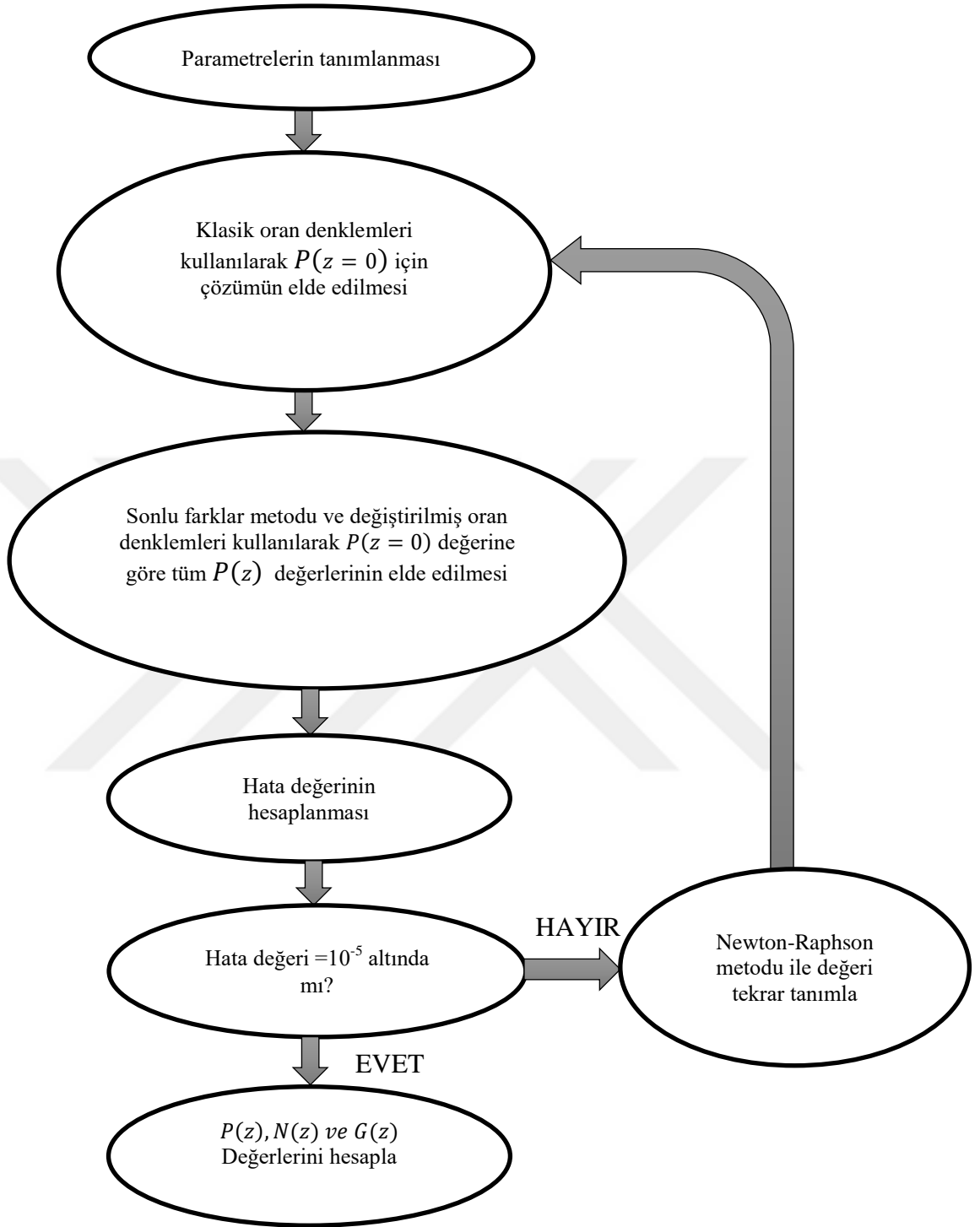
MATLAB programının karmaşık denklemleri ve klasik algoritmaları birkaç basit komut ile çözebilmesi, yarıiletken lazerlerin modellenmesi için hızlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. MATLAB, diğer programlama dillerine göre programı yorumlayarak çalıştırır. Böylece program, hataların hızlıca göz önüne alınarak çözüm sürecinde zaman tasarrufu sağlamış olur (Arifoğlu 2016).

MATLAB yazılımının üstünlükleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

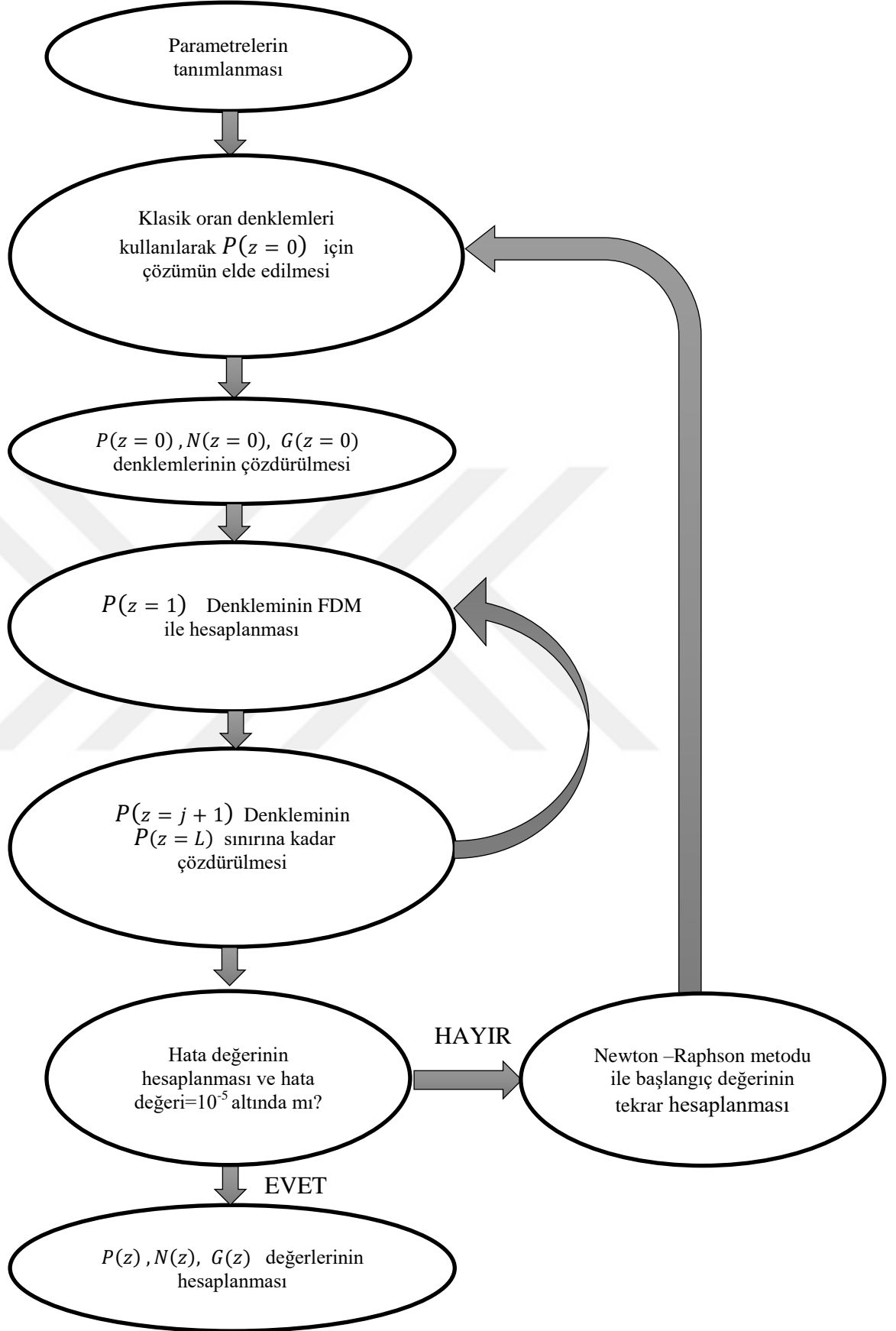
- Lineer cebir, optimizasyon, filtreleme, Fourier dönüşüm analizleri ve istatistik gibi matematiksel fonksiyonları kolaylıkla ve kısa sürede hesaplayabilir.
- İki veya üç boyutlu grafiksel tasarımlar elde edilebilir.
- Öğrenim açısından kolay bir ara yüze ve programlama diline sahiptir (Duman 2008).

Düz sırt dalga kılavuzlu ve konik sırt dalga kılavuzlu lazer yapıları için oran denklemleri bölüm 3.1 ve 3.4'te ele alınmıştır. Buradan sonra MATLAB yazılımı kullanılarak oran denklemleri çözdürülecek, geçici durum karakteristikleri elde edilecektir. Elde edilen grafikler sayesinde konik ve düz sırt dalga kılavuzu yapılarının birbirlerine olan avantaj ve dezavantajları karşılaştırılacaktır.

MATLAB için kullanılan algoritma aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 3.3. LSHB etkisini azaltan MATLAB algoritması



Şekil3.4. LSHB etkisinin görüldüğü MATLAB algoritması

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Düz ve Konik Sırt Dalga Kılavuzlu Yarıiletken Lazerlerin Sürekli Durum Karakteristikleri

MATLAB yazılımı yardımıyla hazırlanan bir simülasyon ile yarıiletken lazerlere uygulanan enjeksiyon akımına karşılık, taşıyıcı sayısı, foton sayısı ve çıkış gücü değişimi olarak bilinen N-I, P-I ve L-I grafikleri elde edilmiştir. Grafikler elde edilirken, bölüm 3'te bahsedilen klasik oran denklemleri ve uzaysal boşluk yanmasının etkisini gösteren konuma bağlı olarak değiştirilmiş oran denklemleri kullanılmıştır. Bunların yanı sıra lazer modellemesi için gerekli parametreler Çizelge 4.1 ve 4.2' de gösterilmiştir.

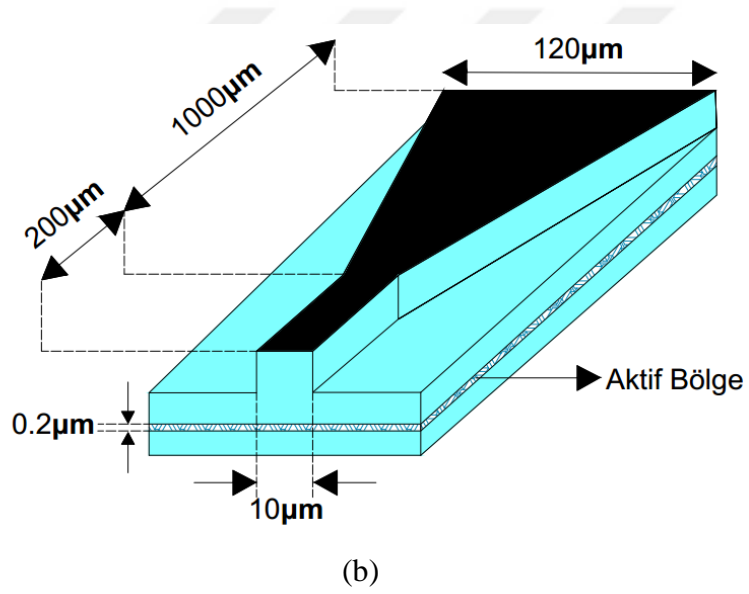
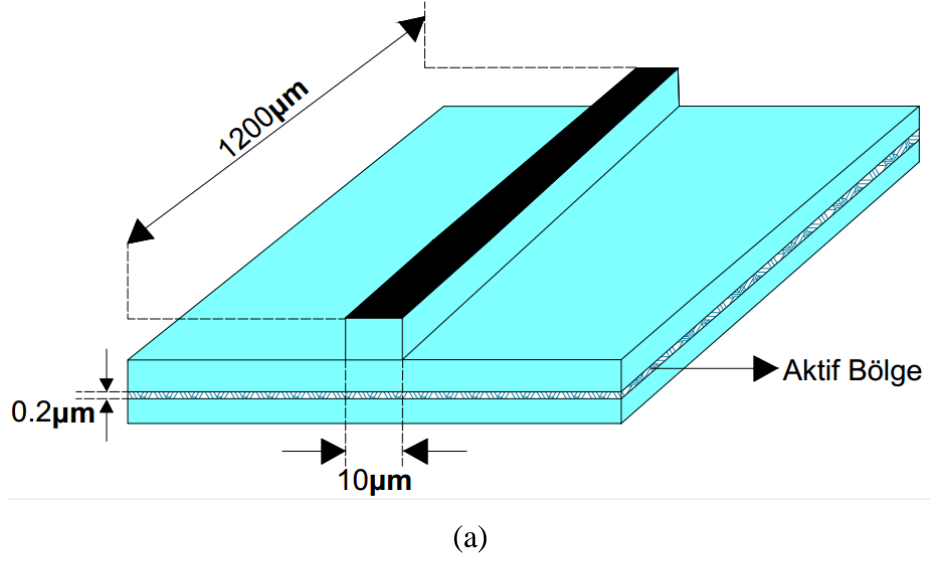
Çizelge 4.1. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan konik ve düz sırt dalga kılavuzlu lazerler için boyut parametreleri.

Parametre	Sembol	Konik Sırt Dalga Kılavuzu	Düz Sırt Dalga Kılavuzu
Tüm Kavite Uzunluğu	L	1200 μ m	1200 μ m
Düz Kısımın Kavite Uzunluğu	L1	200 μ m	1200 μ m
Konik Kısımın Kavite Uzunluğu	L2	1000 μ m	-
Giriş Şerit Genişliği	W1	10 μ m	10 μ m
Çıkış Şerit Genişliği	W2	120 μ m	-
Aktif Tabaka Kalınlığı	d	0.2 μ m	0.2 μ m
Koniklik Açısı	θ	6°	-

Çizelge 4.2. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan lazerler için tipik parametreler (Çakmak 2012).

Parametre	Sembol	Değer
Işık Hızı	c	3×10^8 m/s
Planck Sabiti	h	$6,626 \times 10^{-34}$ Js
Elektron Yüğü	q	$1,6 \times 10^{-19}$ C
Kendiliğinden Emisyon Sabiti	β_{sp}	10^{-3}
Foton Hapsetme Faktörü	r	0,3
Grup Kırılma İndisi	μ_g	4
Çizgi Genişliği İyileştirme Faktörü	β_c	5
Ayna Kayıpları	α_m	45cm^{-1}
Dahili Kayıplar	α_{int}	40cm^{-1}
Kazanç Sabiti	a	$2,5 \times 10^{-16} \text{cm}^2$
Saydamlık Taşıyıcı Yoğunluğu	n_0	10^{18}cm^{-3}
Işınımsal Olmayan Rekombinasyon Katsayısı	A_{nr}	10^8s^{-1}
Işınımsal Rekombinasyon Katsayısı	B	$10^{-10} \text{cm}^{-3}/\text{s}$
Auger Rekombinasyon Katsayısı	C	$3 \times 10^{-29} \text{cm}^6/\text{s}$
Eşik Taşıyıcı Popülasyonu	N_{th}	$2,14 \times 10^8$
Eşik Taşıyıcı Yaşam Süresi	τ_e	2,2ns
Foton Yaşam Süresi	τ_p	1,6ps
Işık Yayan Yüzey Yansıtıcılığı	r_l	0,33
Dalgaboyu	λ	1550nm

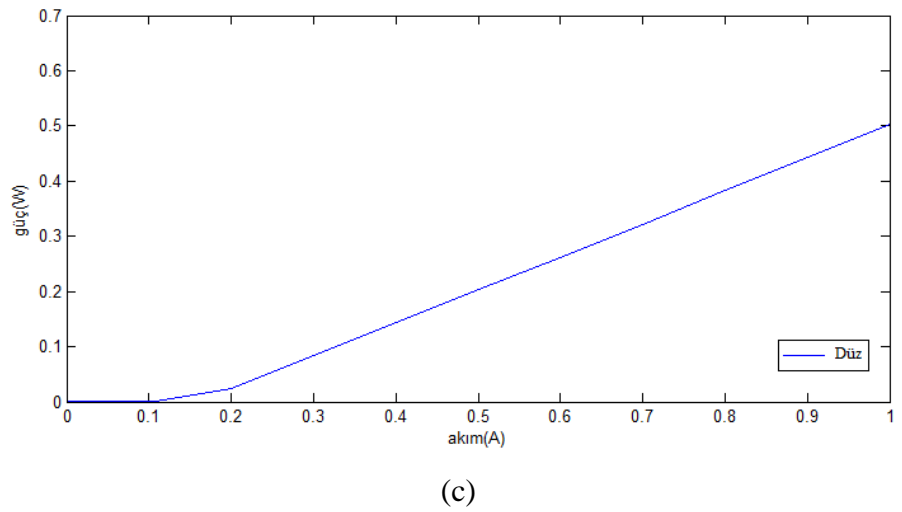
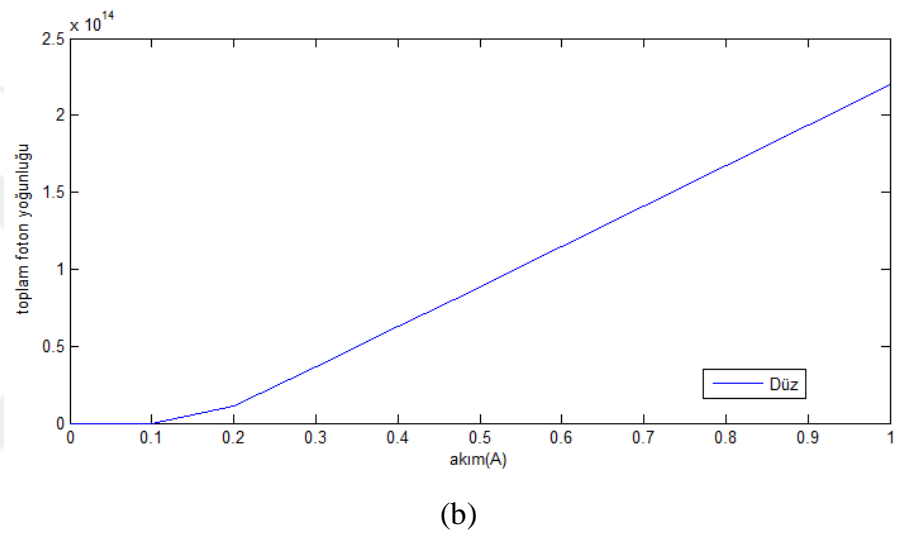
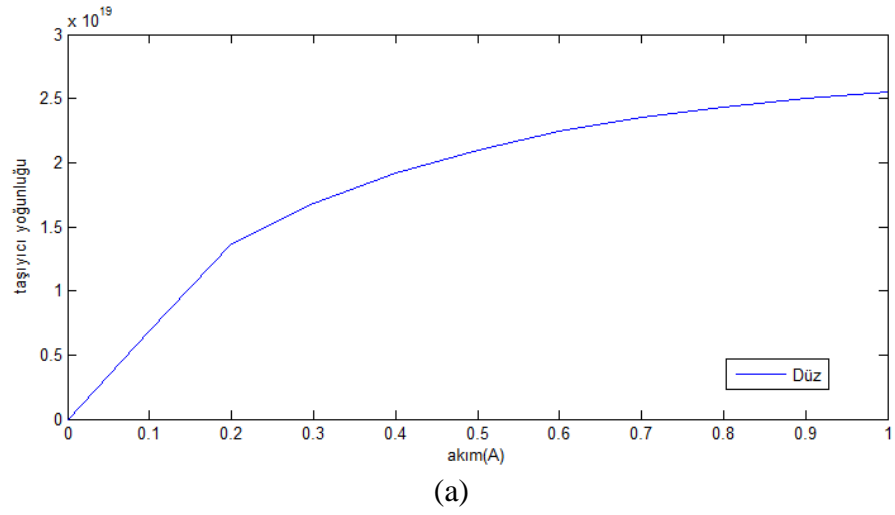
Şekil 4.1’de karşılaştırılan lazer yapıları gösterilmiştir.



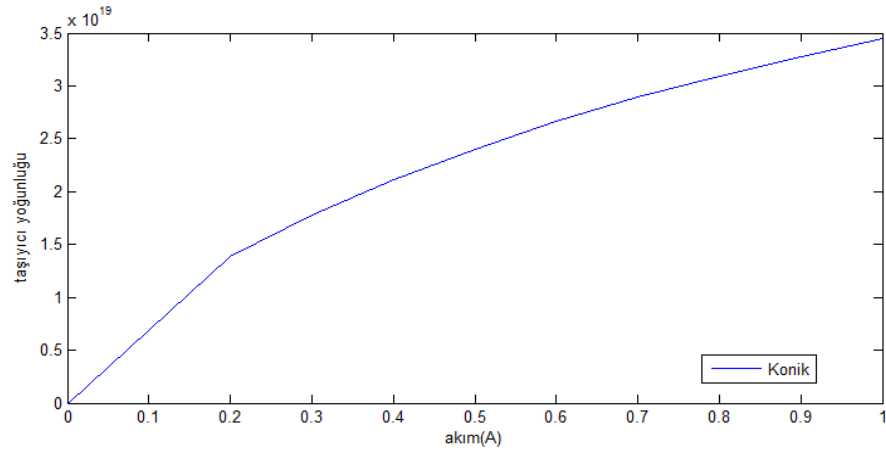
Şekil 4.1. $L=1200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip lazer yapıları (a) Düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) Konik sırt dalga kılavuzu yapısı

Verilen çizelgeler ve lazer yapıları ile simüle edilen lazerler için Şekil.4.2 ve Şekil 4.3'te sürekli durum karakteristikleri gösterilmiştir.

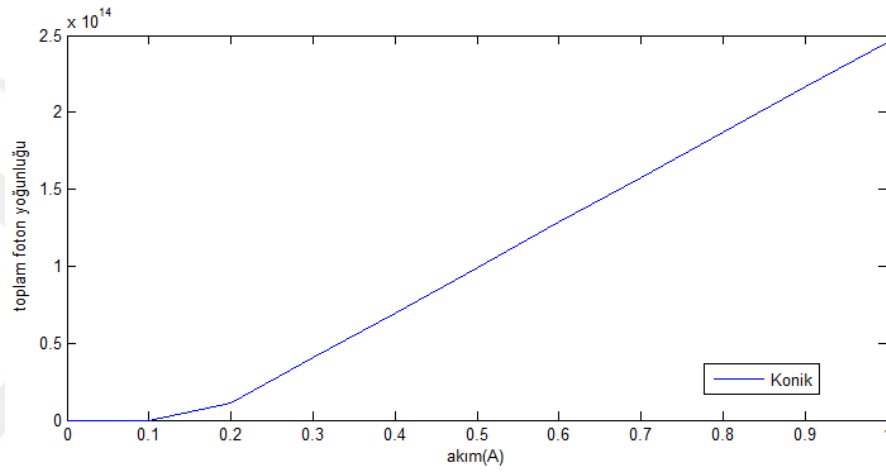
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



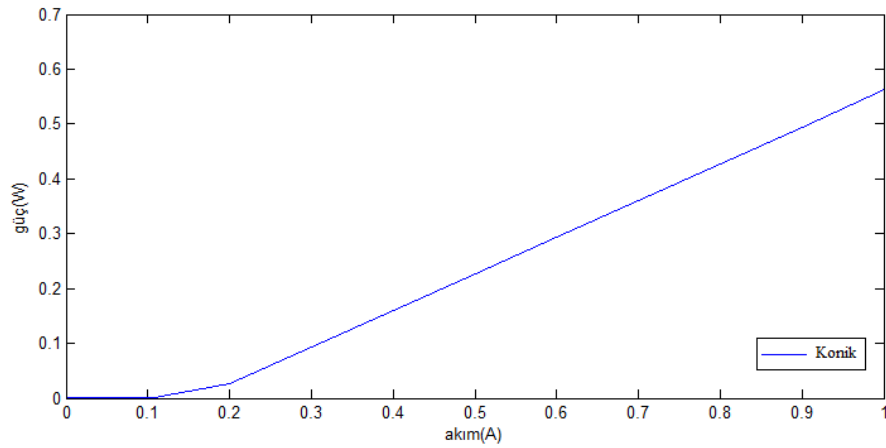
Şekil 4.2. Düz sırt dalga kılavuzlu lazer için (a) Taşıyıcı yoğunluğu-akım(N-I), (b) Foton yoğunluğu-akım(P-I), (c) Çıkış gücü-akım(L-I) grafikleri.



(a)



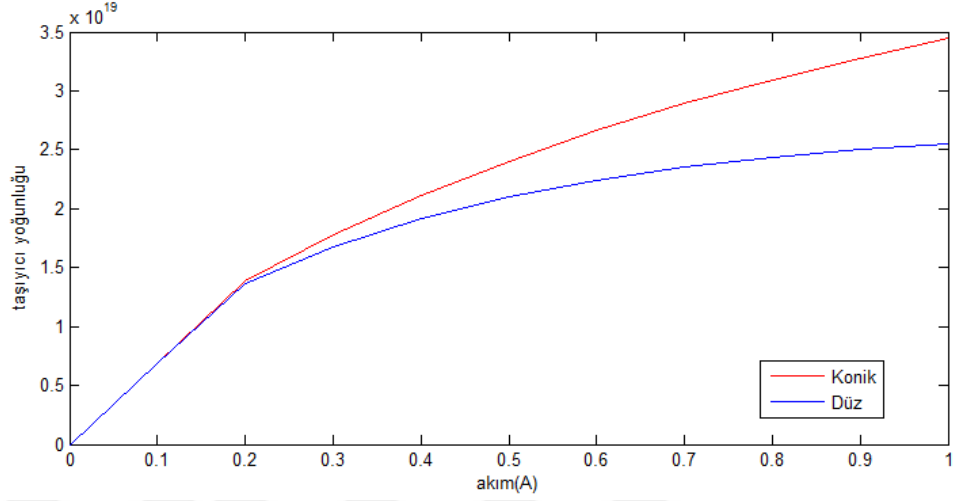
(b)



(c)

Şekil 4.3. Konik sırt dalga kılavuzlu lazer için (a) Taşıyıcı yoğunluğu-akım(N-I), (b) Foton yoğunluğu-akım(P-I), (c) Çıkış gücü-akım(L-I) grafikleri.

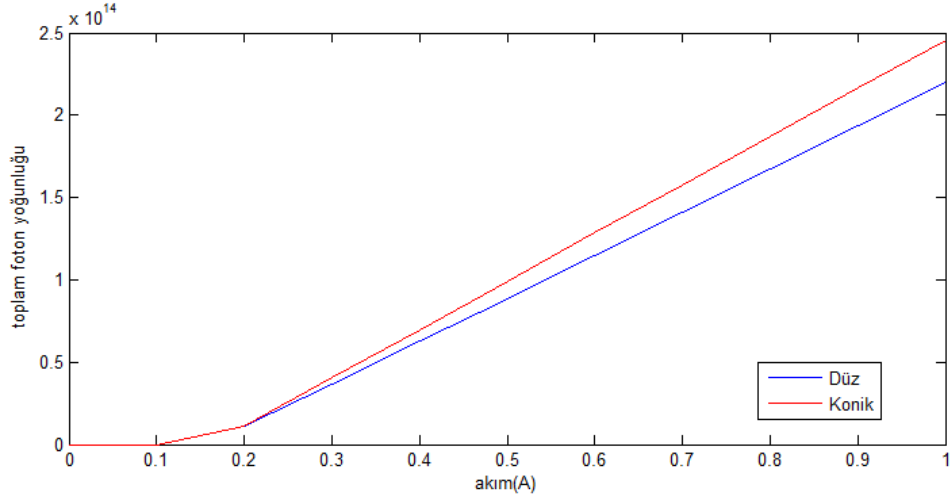
Elde edilen sürekli durum karakteristikleri konik ve düz sırt dalga kılavuzları için LSHB etkisi göz önüne alınarak simüle edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Elde edilen karşılaştırma grafikleri Şekil 4.4, Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 'da gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için taşıyıcı yoğunluğu-akım (N-I) değişimi

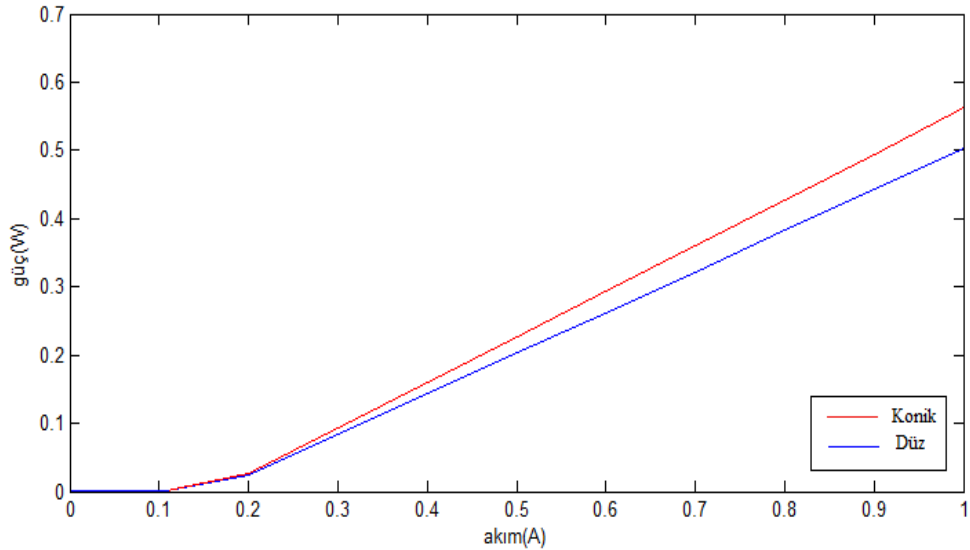
Şekil4.4'te görüldüğü üzere konik sırt dalga kılavuzlu lazer, taşıyıcı yoğunluğu açısından düz sırt dalga kılavuzuna göre daha yüksek bir değer almıştır. Eşik akım değerine kadar hızla artmaya devam eden taşıyıcı yoğunluğu, eşik akımından sonra küçük bir eğim değişimi yaşayarak sabit bir değere (doyuma) yaklaşmaya başlamıştır. LSHB etkisi taşıyıcı yoğunluğu üzerinde etki göstermiyor gibi görünse de grafikte görülen -düz ve konik yapılar arasındaki- yoğunluk farkına, LSHB'den kaynaklanan termal etkilerin sebep olduğu düşünülmektedir.

Daha önce belirtildiği gibi LSHB etkisi, lazer yüzeylerine yakın foton yoğunluklarını baskılar. Buradan yola çıkılarak çıkış optik gücünün azalması yüzeylerdeki foton yoğunluklarıyla hesaplanabilir.



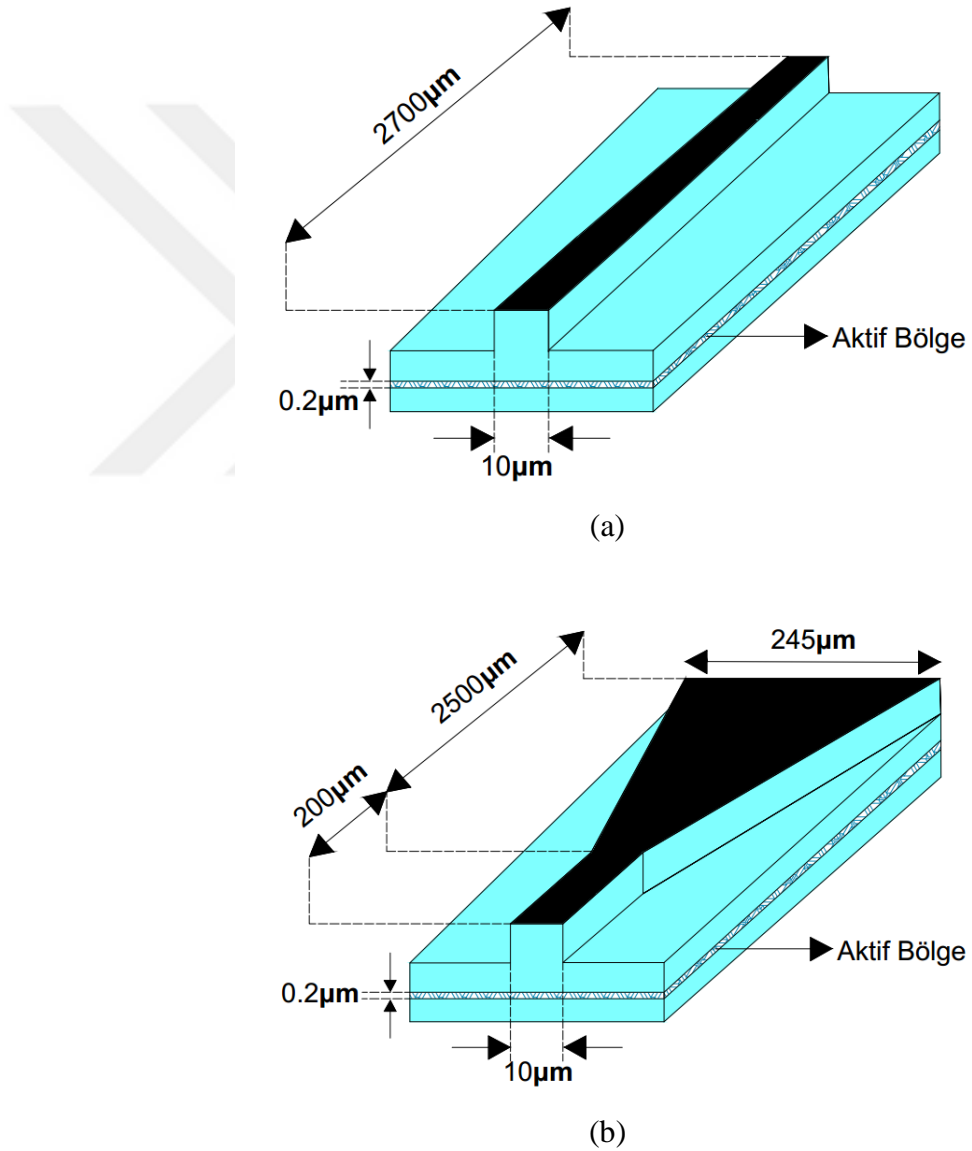
Şekil 4.5. Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için foton yoğunluğu-akım (P-I) değişimi

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere konik sırt dalga kılavuzlu lazer, taşıyıcı yoğunluğu açısından düz sırt dalga kılavuzuna göre daha yüksek bir değer almıştır. Grafik incelendiğinde eşik değerine kadar yaklaşık olarak sıfır olan foton yoğunluğu her iki lazer yapısı için de eşik değerinden sonra hızla artmaya devam etmiştir. Ancak düz sırt dalga kılavuzlu lazerlerde LSHB etkisinden kaynaklanan foton baskılanması durumundan dolayı foton yoğunluğu konik yapıda daha yüksektir.

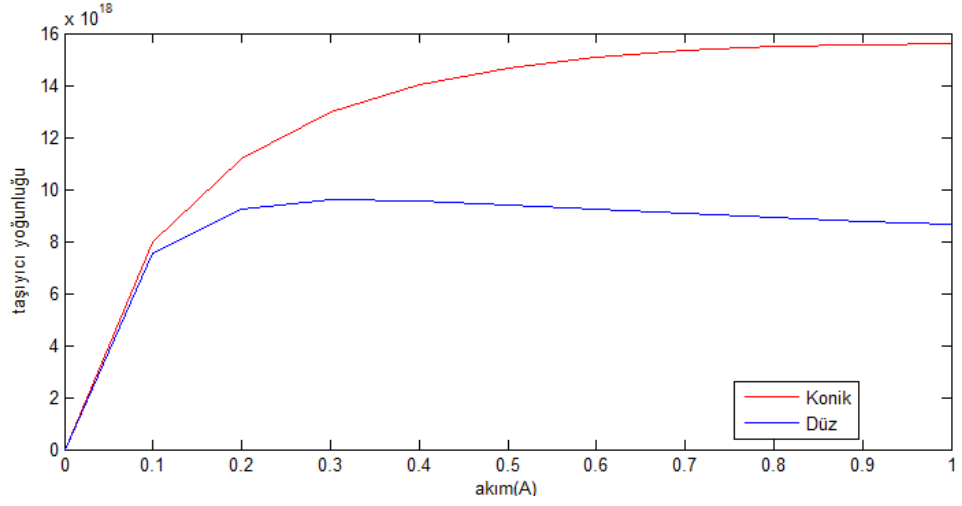


Şekil 4.6. Konik ve düz sırt dalga kılavuzları için çıkış gücü-akım(L-I) değişimi

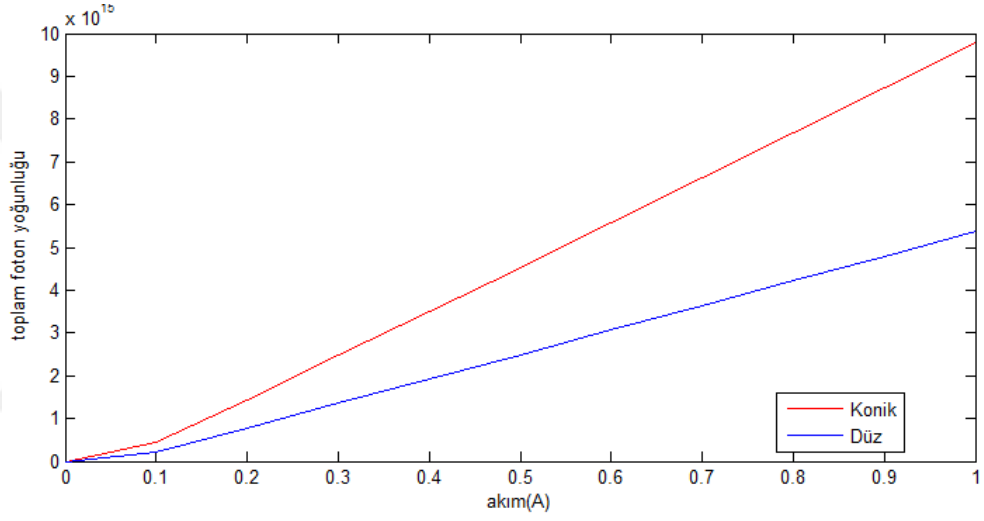
Şekil 4.6’da görüldüğü üzere konik sırt dalga kılavuzlu lazer 0,58W civarında bir çıkış gücü değeri alırken, düz sırt dalga kılavuzu lazeri 0,5W’lık bir çıkış gücü değeri almıştır. Foton yoğunluğunda görülen farkın çıkış gücünde de etkili olduğu gözlemlenmiştir. Yine eşik değerine kadar sıfır civarında olan çıkış gücü eşik akımından sonra hızla artmaya başlamıştır. Tek modlu bir lazer salınımının sırt dalga kılavuzu içerisinde meydana geldiği bilinmektedir. Konik bölüm doygunluk yoğunluğunun üzerinde çalışarak gelen sinyali verimli bir şekilde yükseltir ve çıkış gücünün artmasına sebep olur.



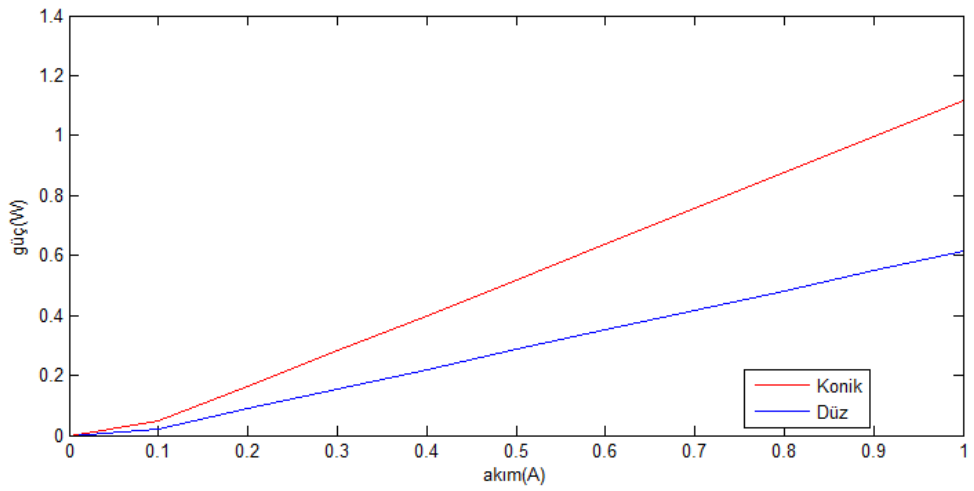
Şekil 4.7. $L=2700\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip (a) düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) konik sırt dalga kılavuzu yapıları



(a)

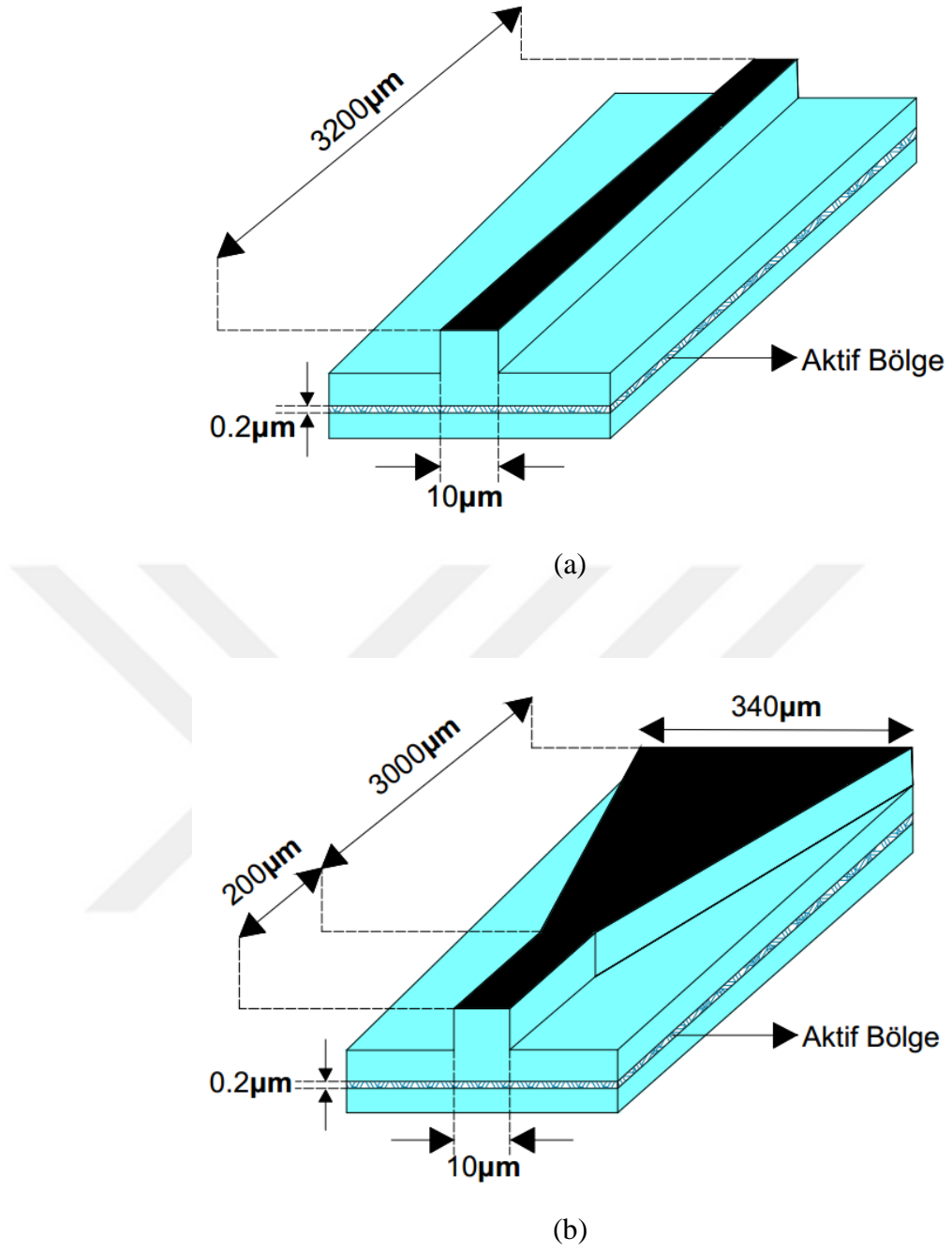


(b)



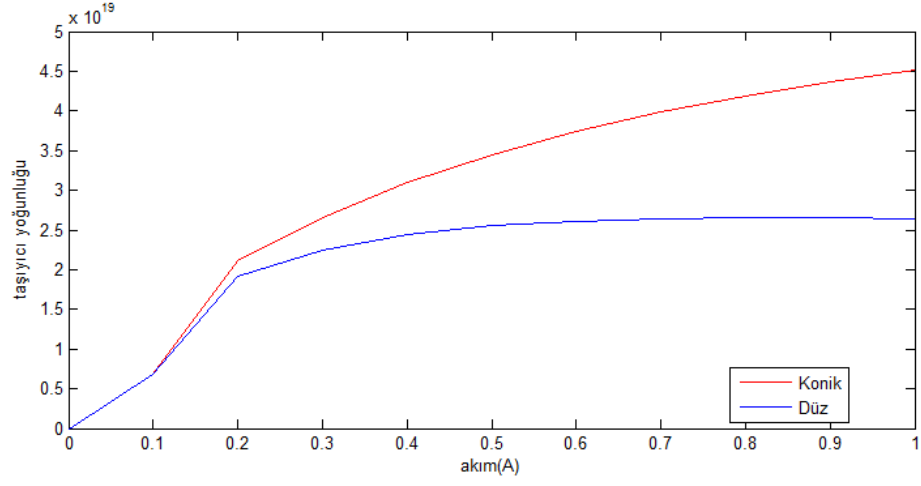
(c)

Şekil 4.8 $L=2700\mu\text{m}$ konik ve düz sırt dalga kılavuzları için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (b) foton yoğunluğu-akım (c) çıkış gücü-akım grafikleri

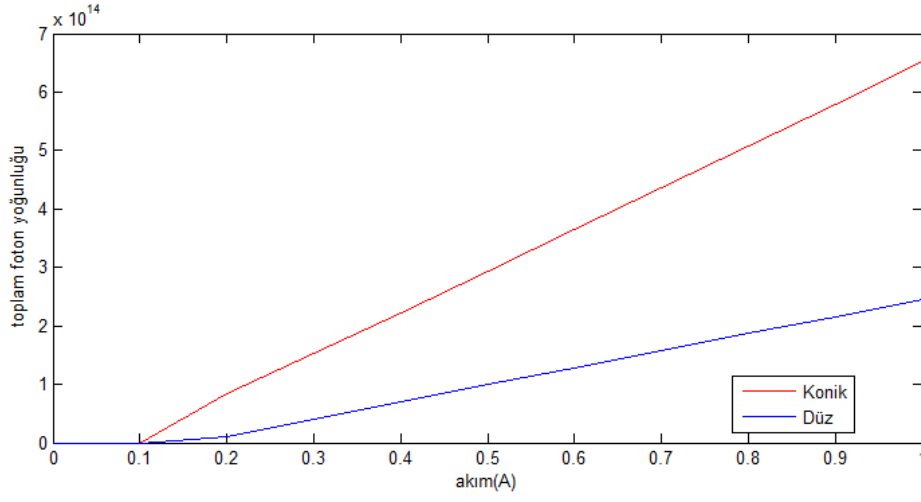


Şekil 4.9. 7 $L=3200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip (a) düz sırt dalga kılavuzu yapısı (b) konik sırt dalga kılavuzu yapıları

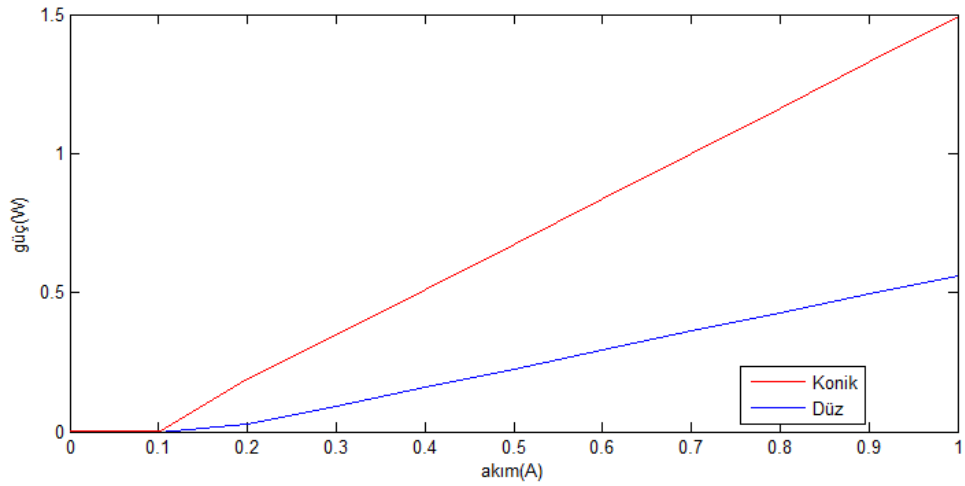
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



(a)



(b)



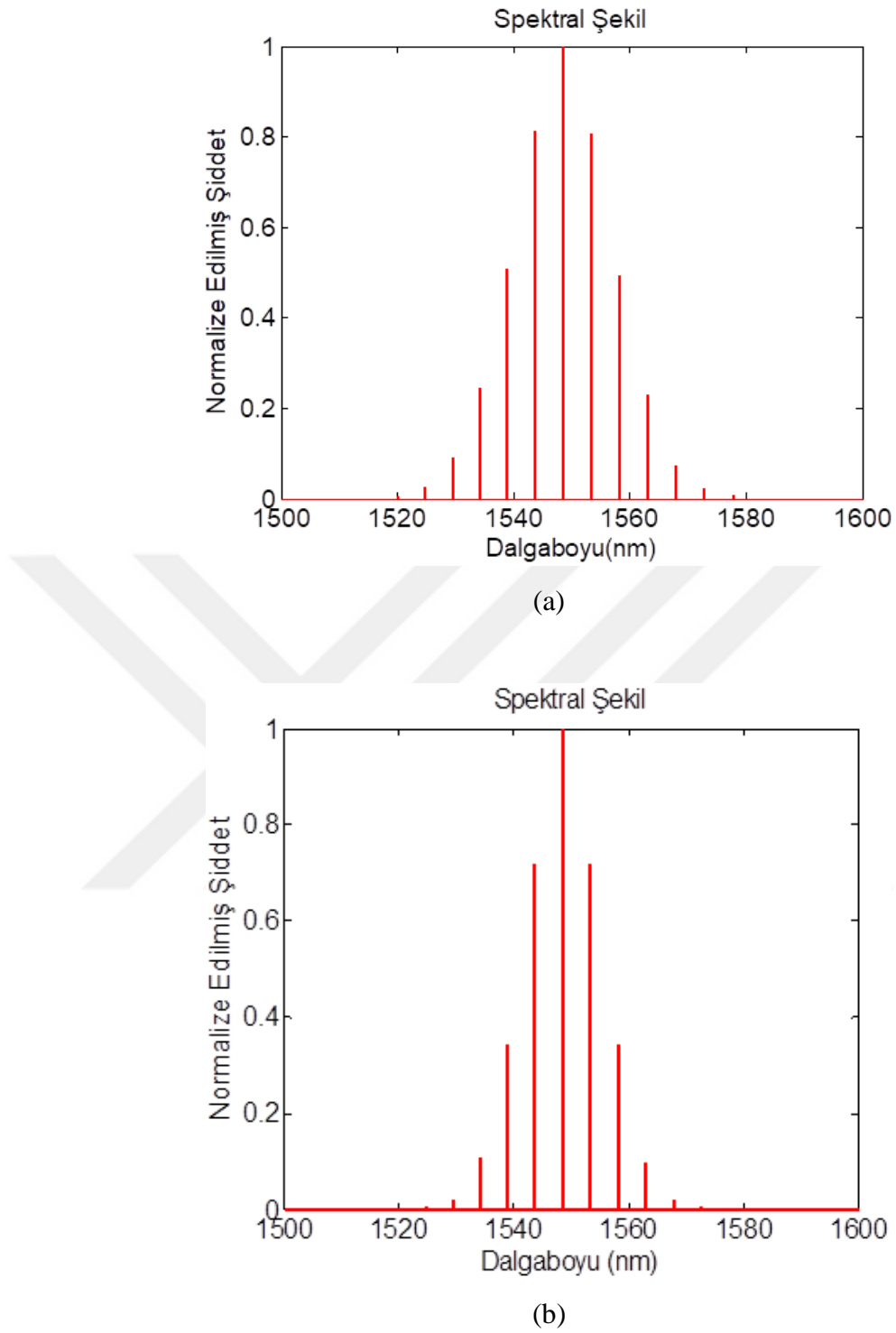
(c)

Şekil 4.10. $L=3200\mu\text{m}$ konik ve düz sırt dalga kılavuzları için (a) taşıyıcı yoğunluğu-akım (b) foton yoğunluğu-akım (c) çıkış gücü-akım grafikleri

Őekil 4.7’de verilen $L=2700\mu\text{m}$, Őekil 4.9’da verilen $L=3200\mu\text{m}$ kavite uzunluklarına sahip dűz ve konik dalga kılavuzu yapıları karşılaŐtırılarak sűrekli durum karakteristikleri Őekil 4.8 ve Őekil 4.10’da elde edilmiŐtir. Elde edilen grafiklere gűre konik uzunluęunun artmasıyla birlikte dűz ve konik dalga kılavuzlu yapılarda çıkıŐ gűçleri arasındaki farkın da arttıęı gűzlemlenmiŐtir. Konik uzunluęu $2500\mu\text{m}$ olan konik dalga kılavuzu yapısı için çıkıŐ gűcű $1,1\text{W}$ elde edilirken dűz dalga kılavuzu için $0,61\text{W}$ olduęu gűzlemlenmiŐtir. Aynı Őekilde konik uzunluęu $3000\mu\text{m}$ olan konik dalga kılavuzu yapısı için çıkıŐ gűcű $1,5\text{W}$ elde edilirken dűz dalga kılavuzu için $0,51\text{W}$ olduęu gűzlemlenmiŐtir.

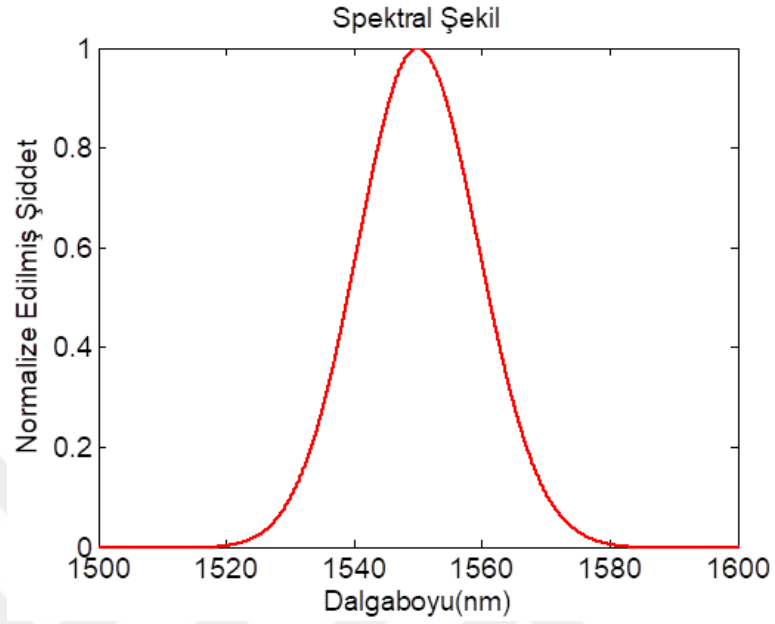
Bu veriler geçmiŐ yıllarda yapılan çalıŐmaları destekler niteliktedir. Konik uzunluęu arttıa çıkıŐ gűcűnűn de arttıęı gűrűlműŐtir.

IŐık ıkıŐı, cihazın enine kesit alanında geniŐlemekte serbest olduęundan, tepe yoęunluęunu geleneksel dűz sırt dalga kılavuzu lazerine gűre çok daha dűŐűk tutar. Dięer bir deyiŐle konik dalga kılavuzlu lazerlerde yanal modlar dűz olana gűre daha fazla bastırılır ve merkezi mod daha baskın olur. Bu durum lazer çıkıŐının spektral deęiŐimini ve Gaussian daęılımının Fourier dűnűŐűmű grafikleriyle Őekil 4.11 ve 4.12’de gűsterilmiŐtir.

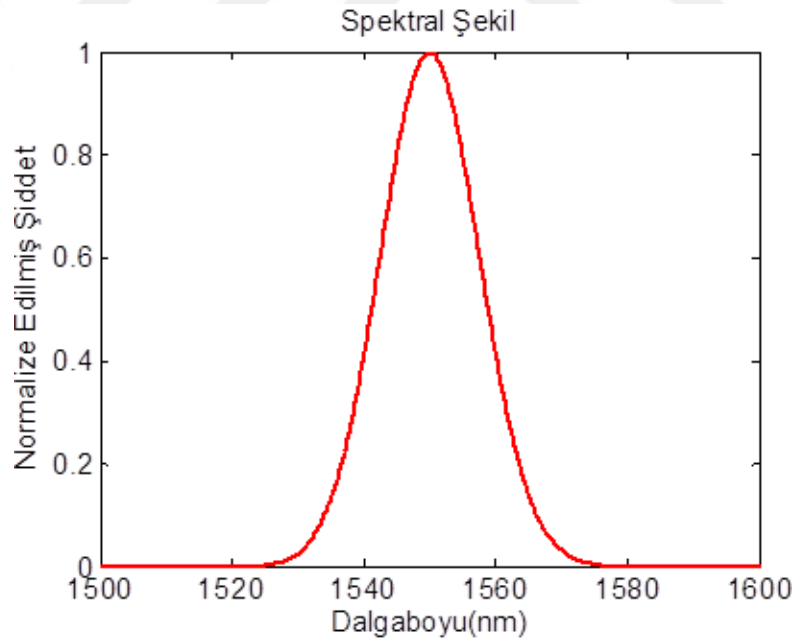


Şekil 4.11. $L=1200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip, 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) Düz sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi, (b) Konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi.

Şekil 4.11’de verilen değişimlerin zarfları yani spektrumları Gaussian dağılımların Fourier dönüşümleri alınarak elde edilmiştir.



(a)



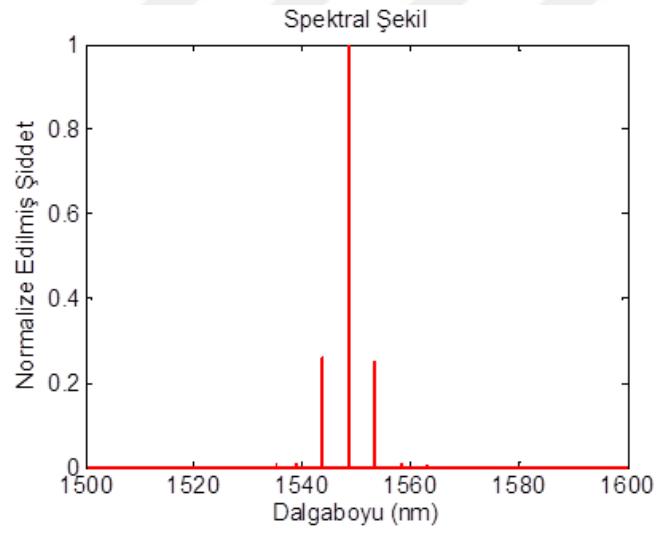
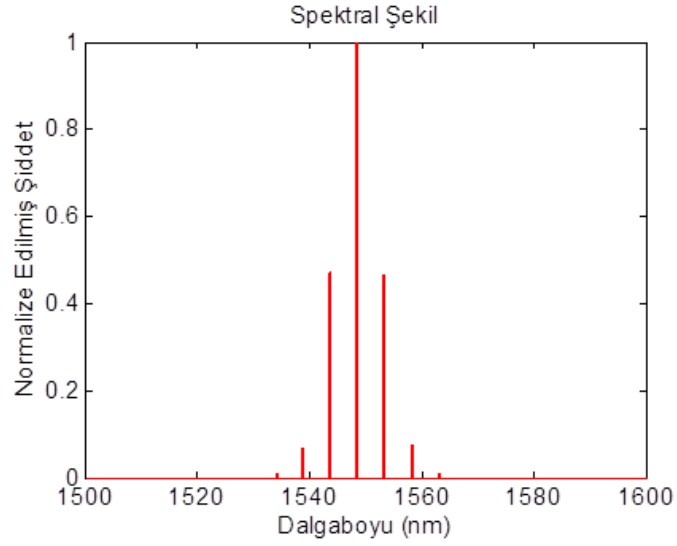
(b)

Şekil 4.12. $L=1200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip, 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) Düz sırt dalga kılavuzlu lazer için Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü, (b) Konik sırt dalga kılavuzlu lazer için Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü.

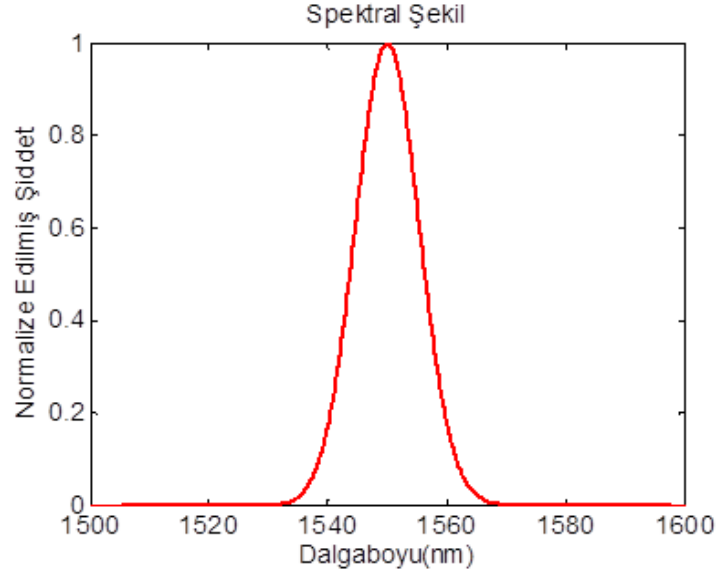
Şekil 4.12’de g6r6ld6đ6 6zere konik sırt dalga kılavuzlu lazerlerde 6ıkıŐının spektrumu (Gaussian dağılıminin Fourier d6n6Ő6m6) daha dar bir spektral geniŐliđe sahiptir. Yarıiletken lazerlerde elde edilmek istenen spektral Őeklin Dirac-delta fonksiyonuna yakın olması istenir. Bu durumda konik dalga kılavuzlu lazerlerin -lazer 6ıkıŐının 6ok daha dar spektral geniŐliđe sahip olması a6ısından- 6ok daha başarılı olduğu s6ylenebilir.

Buna ek olarak konik uzunluğu fazla olan lazer yapıları i6in bu fark daha a6ık g6r6lebilir.

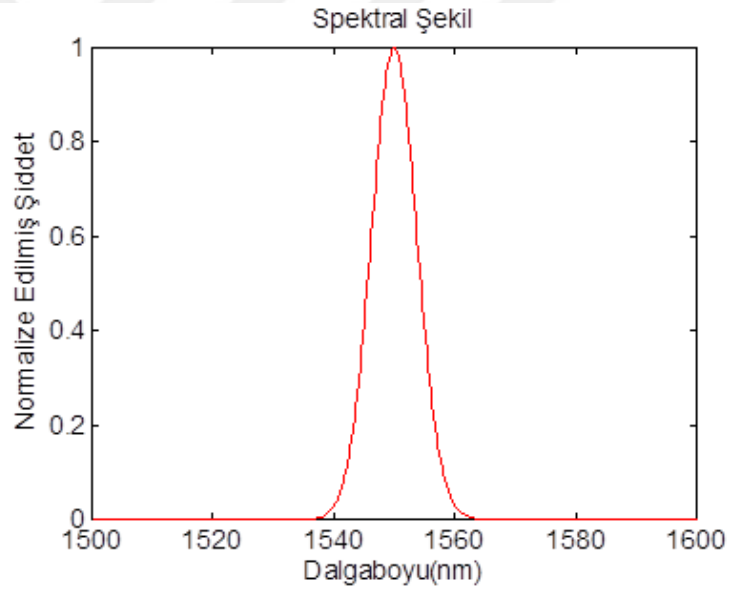




Şekil 4.13. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) $L=2700\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi, (b) $L=3200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının spektral değişimi.



(a)



(b)

Şekil 4.14. 1550nm dalgaboyunda yayılım yapan (a) $L=2700\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının (b) $L=3200\mu\text{m}$ kavite uzunluğuna sahip konik sırt dalga kılavuzlu lazer çıkışının Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü.

Konik uzunluk arttıkça spektral genişliğin daha dar bir değer aldığı, bu durumda spot genişliğinin de daralmış olduğu grafiklerden elde edilmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada fiber optik haberleşme dalgaboyu olan 1550nm’de yayılım yapan düz ve konik sırt dalga kılavuzlu diyot lazerler için MATLAB yazılımı ile modelleme yapılmıştır. Bu modelleme, sonlu farklar metodu ile Newton-Raphson metodunun birleştirilmesinden oluşan bir denklem takımı kullanılarak MATLAB yazılımı ile düz ve konik dalga kılavuzlu yarıiletken lazerlerin karakterizasyonu, sürekli durum karakteristikleri, boylamsal mod spektrumları karşılaştırmalı olarak elde edilmiştir.

Toplam kavite uzunlukları $L=1200\mu\text{m}$ şerit genişlikleri düz sırt dalga kılavuzu için $W=10\mu\text{m}$ ve konik sırt dalga kılavuzu için $W1=10\mu\text{m}$, $W2=120\mu\text{m}$, aktif tabaka kalınlıkları $d=0,2\mu\text{m}$ olan 1550nm dalgaboyunda çalışan (AlGaInAs/InP) lazerler, çoklu kuantum katmanlı ve çift türdeş olmayan heteroeklem yapılardan oluşmuştur.

Lazerler sürekli modda çalışırken elde edilen taşıyıcı yoğunluğuna, toplam foton yoğunluğuna ve çıkış gücüne dalga kılavuzu yapısının etkileri incelenmiştir. Işık çıkışının spektral şekli ve kazanç bant genişlikleri karşılaştırılmıştır.

Elde edilen sonuçlara göre boyuna uzaysal boşluk yanması (LSHB) etkilerinin, kavite içerisindeki foton yoğunluğunu olumsuz olarak etkilediği, her iki ışık yayan yüzeydeki foton yoğunluğunu baskıladığından çıkış gücünü de azalttığı görülmüştür. LSHB etkileri dalga kılavuzunun konik kısmı ile azaltılan konik sırt dalga kılavuzlu lazerler için çıkış gücünün daha yüksek olduğu modelleme sonuçları ile elde edilmiştir. Ayrıca konik kısmın uzunluğu arttıkça çıkış güçleri arasındaki farkın arttığı ve spektral genişliklerin azaldığı görülmüştür. Buna ek olarak ideal bir konik dalga kılavuzunda, düz sırt bölgesinden çıkan optik modun, konik bölgeye girdikten sonra konik uzunluğu boyunca yayıldığı ve kırınım nedeniyle genişleyerek modu yükselttiği belirtilmiştir.

Yarıiletken lazerlerde spektral saflığın önemli bir ölçütü spektral genişliktir. Konik dalga kılavuzu için spektral genişliğin daha dar olması saflığın da daha iyi olduğunu gösterir. Ayrıca LSHB etkisinin ortaya çıkardığı yüksek termal etkilerden dolayı taşıyıcı yoğunluğu da olumsuz etkilenmektedir. LSHB etkisi konik dalga

kılavuzlu lazerlerde daha düşük olduğundan bu lazerlerin taşıyıcı yoğunluğunun daha yüksek değerler aldığı rapor edilmiştir.

Sabit bir koniklik açısı için, konik kısım ne kadar uzun olursa mod o kadar genişler ve çıkış gücü de o kadar yüksek olur. Bu konu üzerine Marc T. Klemen ve arkadaşları, 2002 yılında yaptıkları deneysel çalışmalar ışığında cihazların yeterli bir çıkış gücüne ve ışın kalitesine ulaşabilmesi için 2000 μ m veya daha uzun bir konik kısım içermesi gerektiğini rapor etmişlerdir. Elde edilen modellemeler doğrultusunda geçmiş çalışmaları doğrular nitelikte sonuçlar elde edilmiştir. Farklı konik uzunlukları üzerinden konik sırt dalga kılavuzunun daha yüksek çıkış gücüne ve daha dar bir spektral şekle sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Yeterli kavite uzunluğu üzerinden yapılan çalışmalarda, konik lazerlerin düz sırt dalgakılavuzu lazerlerine göre daha yüksek ışın kalitesi ile birlikte birkaç kat daha yüksek çıkış gücü gösterebileceği görülmüştür. Bu durum, parlaklığın iki ya da daha fazla bir oranda artmasına neden olarak konik lazerleri fiber bağlantılar için daha uygulanabilir kılmaktadır.

Özetle, dalga kılavuzu yapısının yarıiletken lazerler için karakteristik bir önemi olduğu yapılan çalışmalar ile elde edilmiştir. Geleneksel sırt dalga kılavuzu yapısında boyuna uzaysal boşluk yanmasının çıkış gücü üzerindeki olumsuz etkisinin, konik sırt dalga kılavuzları ile azaltılabileceği görülmüştür. Ayrıca modellemelerde termal etkiler de göz önünde bulundurulduğundan sadece foton yoğunluğunun değil, taşıyıcı yoğunluğunun da boyuna uzaysal boşluk yanmasından etkilenebileceği düşünülmektedir. Konik sırt dalga kılavuzları ile yüksek parlaklıkta ve yüksek spektral saflıkta lazer çıkışları elde edilebileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak, konik dalga kılavuzunun fiber optik haberleşme sistemlerinde kullanılması uygun bir lazer dalga kılavuzu çeşidi olduğu düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Agrawal, G. P. and Dutta, N. K., 1993. Semiconductor Lasers. Van Nostrand Reinhold, 616 p, New York.
- Arifoglu, U., 2016. MATLAB 9.1 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları. Alfa Basım Yayım Dağıtım Ltd. Sti., 917, İstanbul.
- Bengi, A., 2009. InGaAsP/InP Çoklu Kuantum Kuyulu Çatı Dalga Kılavuzlu Lazer Diyotların Fabrikasyonu ve Lazer Diyot Parametre Analizi. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bloembergen, N., Salpeter, E. E., Patel, C. K. N., Sessler, A. M., Avizonis, P., Sullivan, J. D., Clern, R. G., Wyant, J. C., Hertzberg, A., Yariv, A., Johnson, T. H., Zare, R. N., Marshall, T., Glass, A. J., Miller, R. B., Hebel, L. C and Morrow, W. E., 1987. Report to The American Physical Society of the Study group on Science and Thechnology of Directed Energy Weapons. Reviews of Modern Physics.
- Born, M.ve Wolf, E., "Principles of Optics", 6th ed., Pergamon Press, Oxford, Chapter 7.6.2 (1980).
- Borruel, L., Sujecki, S., Moreno, P., Wykesa, J., Krakowski, M., Sumpf, B., Sewell, P., Auzanneau, S.C., Wenzel, H., Rodriguez, D., Benson, TM, Larkins, EC, Esquivias, I., 2004. Quasi-3-D Simulation of High-Brightness Tapered Lasers *IEEE J. Quantum Electron.* , vol. 40, hayır. 5, sayfa 463-471.
- Borruel, L., Odriozola, H., Tijero, J.M.G., Esquivias, I., Sujecki, S., Larkins, E.C., 2008, Design Strategies to Increase The Brightness of Gain Guided Tapered Lasers. *Optical and Quantum Electronics* 35. 40:175–189.
- Çakmak, B., 2000. Fabrication and Characterisation of InP and GaAs Based Optoelectronic Components, Ph.D. Thesis, Department of Electrical and Electronic Engineering University of Bristol, Bristol.
- Çakmak, B., Duman, Ç., 2012. Uzun Dalgaboylu Ve Konik Yapılı Yarıiletken Lazerlerin Üretimi, Deneysel Ve Teorik Olarak İncelenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. Cilt 27, No 3, 623-630, 2012.
- Çetinkaya, H., 2006. Lidar İçin Optik Sistem Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Dittmar, F., Sumpf, B., Fricke, J., Erbert, G., Trankle, G., 2006. High-Power 808-nm Tapered Diode Lasers With Nearly Diffraction-Limited Beam Quality of $M^2=1,9$ at $P=4,4$ W. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 18, 601-603.

- Duman, Ç. 2008. 1300 nm Dalgaboylu Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi ve Karakteristiklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Duman, Ç. 2014. Kip (Mod) Kilitlemeli Ve Q-Anahtarlmalı Diyot Lazer Üretimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Erol, A. ve Balkan, N., 2013. Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, 355 s.
- Esquivias, I., Odriozola, H., Tijero, J.M.G., Borruel, L., Minguez, A.M., Michel, N., Calligaro, M., Lecomte, M., Parillaud, O., Krakowski, M. 2010. Simulation of High Brightness Tapered Lasers. Proc. of SPIE Vol. 7616 76161E-1.
- Gather, M. C. and Yun, S. H., 2011. Single-Cell Biological Lasers. Nature Photonics, 5, 406-410.
- Hao, T. 2014. Calculation and Experimental Verification of Longitudinal Spatial Hole Burning in High-Power Semiconductor Lasers. Graduate Theses, Rose-Hulman Institute of Technology. Terre Haute, IN.
- Hettrick, S. J., Wang, J., Li, C., Wilkinson, J. S. and Shepherd D. P., 2004. An Experimental Comparison of Linear and Parabolic Tapered Waveguide Lasers and a Demonstration of Broad-Stripe Diode Pumping. Journal Of Lightwave Technology, Vol. 22, NO. 3.
- Hitz, B., Ewing, J. J. and Hecht, J., 1994. Introduction to Laser Technology. IEEE Press, 288 p, New York.
- Jensen, O.B., Sumpf B., Elbert, G., Petersen, P.M., 2011. Widely Tunable High Power Tapered Diode Laser at 1060 nm. IEEE Photonics Technology Letters. PTL-23521-2011.
- Kallenbach, S., Kelemen, M. T., Aidam, R., Lösch, R., Kaufel, G., Mikulla, M. and Weimann, G. 2005. High-Power High-Brightness Ridge-Waveguide Tapered Diode Lasers at 14xxnm. Proceedings of SPIE Vol. 5738. 406-415.
- Kelemen, M.T., Rinner, F., Rogg, J., Wiedmann, N., Kiefer, R., Walther, M., Mikulla, M., Weimann, G., 2002. High-power high-brightness ridge-waveguide tapered diode lasers at 940 nm. Proceedings of SPIE Vol. 4648. 75-81.
- Kotan, H.İ., 2008. 980 nm Yarıiletken Lazerlerin Modellenmesi. . Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Li, J., Qui, Y., Cao, Y., Qin, W., Liu, Y., Zeng, X., Xie, W., Yan, A., Wang, Z. 2018. Numerical Simulation and Experiment of High Brightness Tapered Lasers. Optik 158 502–507.

- Limpert, J., Röser, F., Klingebiel, S., Schreiber, T., Wirth, C., Peschel, T., Eberhardt, R. and Tünnermann, A., 2007. The Rising Power of Fiber Lasers and Amplifiers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13 (3), 537-545.
- Meinecke, S., Drzewietzki, L., Weber, C., Lingnau, B., Breuer, S., Lüdge, K. 2019. Ultra-short pulse Generation in a three section tapered passively Mode-Locked Quantum-Dot semiconductor Laser. *Scientific Reports*. 9:1783.
- Mikulla, M., Chazan, P., Schmitt, A., Morgott, S., Wetzel, M., Walther, A., Kiefer, R., Pletschen, W., Braunstein J. ve Weimann, G. 1998. High-Brightness Tapered Semiconductor Laser Oscillators and Amplifiers with Low-Modal Gain Epilayer-Structures. *IEEE Photonics Technol. Lett.* 10 , 654.
- Morthier, G. ve Vankwikelberge, P. 1997. Handbook of Distributed Feedback Laser Diodes , *Artech House Inc.*, London, 2-4.
- Odriozola, H., Tijero, J.M.G., Esquivas, I., Borruel, L., Minguez, A.M., Michel, N. Calligaro, M., Lecomte, M., Parillaud, O., Ruiz, M., Krakowski, M. 2008. Design of 1060 nm tapered lasers with separate contacts. *Optical and Quantum Electronics* 3540:1123–1127.
- Odriozola, H., Tijero, J.M.G., Borruel, L., Esquivas, I., Wenzel, H., Dittmar, F., Paschke, K., SumPf, B., Erbert, G. 2009. Beam Properties of 980-nm Tapered Lasers With Separate Contacts: Experiments and Simulations. *IEEE Journal Of Quantum Electronics*, Vol. 45, 42-50.
- Okur, İ., 2000. Optoelektronik. Değişim Yayınları, 518 s, Türkiye.
- Pleumeekers, J. L., Dupertuis, M. A., Hessler, T., Selbmann, P. E., Haacke, S. and Deveaud. B. 1998. Longitudinal spatial hole burning and associated nonlinear gain in gainclamped semiconductor optical amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, Vol. 34.
- Robertson, C.W. and Sprangle, P., 1989. A review of Free-Electron Lasers. *Physics of Fluids*, 1 (1), 3-42.
- Sağlam, H. K., 2017. Hibrit Silisyum/ III-V Yarıiletken Lazerler. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Saleh, B. E. A. and Teich, M. C., 1991. Fundamentals of Photonics. Wiley series in Pure and Applied Optics, 966, Canada.
- Singh, J., 1995. Semiconductor Optoelectronics Physics and Technology. McGraw Hill, 725 p, New York.
- Soibel, A., Wright, M.W., Farr, W.H., Keo, S.A., Hill, Cory J., Yang, R.Q., Liu, H.C., 2010. Midinfrared interband cascade laser for free space optical communication. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22 (2), 121-123.

- Sujecki, S. , Borruel, L. , Wykes, J. ., Moreno, P, Sumpf, B. , Sewell, P. , Wenzel, H. , Benson, T. M. , Erbert, G. , Esquivias, I. , Larkins, E. C. 2003. Nonlinear properties of tapered laser cavities. *IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron.*, vol. 9, 823-834.
- Sumpf,B., Hülsewede, R., Erbert, G., Dzionk, C., Fricke, J., Knauer, A., Pittroff, W., Ressel, P., Sebastian, J. and Trankle, G. 2003. High Brightness 735 nm Tapered Lasers Optimisation of The Laser Geometry. *Optical and Quantum Electronics* 35:521–532.
- Swertfeger, R.B., Beil, J.a., Misak, S.M., Thomas, J., Campbell, J., Renner, D., Mashanovitch, M., Leisher, P.O. 2017. Direct Observation of the 2D Gain Profile in High Power Tapered Semiconductor Optical Amplifiers. In *Proceedings of the 5th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*. 114-121.
- Tijero, J.M.G., Borruel, L., Vilera,M., Serrano, A.P., Esquivias,I. 2015. Analysis of The Performance of Tapered Semiconductor Optical Amplifiers: Role of The Taper Angle. *Optical and Quantum Electronics* 47:1437–1442.
- Tsang, W. T., 1981. A graded-index waveguide separate confinement laser with very low threshold and a narrow Gaussian beam, *Appl. Phys. Lett.*, 39:134-137.
- Vasil'ev, P., 1995. *Ultrafast Diode Lasers Fundamentals and Applications*. Artech House, 271, London.
- Williams, K. A., Penty, R. V., White, I. H., Robbins, D. J. , Wilson, F. J., Lewandowski, J. J. and Nayar B. K. 1999. Design of High-Brightness Tapered Laser Arrays. *IEEE Journal Of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 5, 822-831.
- Wilson,J. and Hawkes, J. 2000. *Optoelektronics*. Çeviri Dr. İbrahim Okur, Değişim yayınları, 518 s.
- Wong, W. M., Student Member, IEEE, and Hooshang Ghafouri-Shiraz. 2000. Dynamic Model of Tapered Semiconductor Lasers and Amplifiers Based on Transmission-Line Laser Modeling. *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics*, Vol. 6. 585-593.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Kamer Özge ARSLAN
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.10.1991/Erzurum
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +90530 941 2591
e-mail : kamer.arslan70@erzurum.edu.tr

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	2019
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2014
Lise	Mecidiye Anadolu Lisesi	2009

Uluslararası Kongre Sunum

Transient And Steady-State Modelling of AlGaInAs/InP Semiconductor Lasers At 1550 nm Wavelength,2018, **Arslan Kamer Özge**, Aksakal Rukiye, Çakmak Bülent, 2nd International Congress on Semiconductor Materials Devices(ICSMD)