



**1550 nm DALGABOYLU PASİF MOD
KİLİTLİ BİR YARIİLETKEN LAZERİN
MODELLENMESİ VE İNCELENMESİ**

Rukiye AKSAKAL

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

**2019
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**1550 nm DALGABOYLU PASİF MOD KİLİTLİ BİR YARIİLETKEN LAZERİN
MODELLENMESİ VE İNCELENMESİ**

Rukiye AKSAKAL

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

**1550 nm DALGABOYLU PASİF MOD KİLİTLİ BİR YARIİLETKEN LAZERİN
MODELLENMESİ VE İNCELENMESİ**

Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK danışmanlığında Rukiye AKSAKAL 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** 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.

20 / 05 / 2019

Rukiye AKSAKAL

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

1550 nm DALGABOYLU PASİF MOD KİLİTLİ BİR YARIİLETKEN LAZERİN MODELLENMESİ VE İNCELENMESİ

Rukiye AKSAKAL

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

Bu çalışmada 1550 nm dalgaboylu pasif mod kilitli bir yarıiletken lazerin modellenmesi ve incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Pasif mod kilitli yarıiletken lazerin iletim yönünde kutuplanan bölümü kazanç bölümü olarak, ters kutuplu gerilimle sürülen bölümü ise soğurma bölümü olarak adlandırılır. Yapılan modellemede tek veya iki kazanç bölümlü ve soğurma bölümünden oluşan pasif mod kilitli yarıiletken lazerin karşılaştırmalı güç-zaman, foton yoğunluğu-zaman, taşıyıcı yoğunluğu-zaman değişimleri ve darbe genişlikleri elde edildi. İki kazanç bölümüne sahip yarıiletken lazerde foton yoğunluğu ve taşıyıcı yoğunluğunun fazla olması nedeniyle gücün daha yüksek olduğu ve darbe genişliğinin daha az olduğu gözlemlenmiştir. İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerin kazanç bölümünün farklı uzunlukları için karşılaştırmalı sonuçlar elde edildi. Ayrıca soğurma bölümünün kazanç bölümleri arasında ve son kısımda olması durumları ayrı ayrı incelendi. Soğurma bölümü kazanç bölümleri arasındayken gücün daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir çünkü soğurma bölümü darbenin daralmasına ve darbenin maksimum noktasında kayıplara neden olur. Bunlara ilave olarak güç ve darbe genişliğinin kazanç bölümüne uygulanan akımın ve soğurma bölümüne uygulanan gerilimin farklı değerleri için karşılaştırmalı sonuçlar elde edildi. Soğurma bölgesine uygulanan gerilim arttıkça taşıyıcıların yaşam süresi azaldığı için gücün arttığı gözlemlenmiştir. Son olarak soğurma bölümünün farklı uzunlukları için darbe genişlikleri hesaplandı ve güç-zaman grafiğinde etkisi gösterildi. Burada soğurma bölgesi uzunluğu arttıkça kayıp arttığı için gücün ve darbe genişliğinin azaldığı gözlemlenmiştir.

2019, 52 sayfa

Anahtar Kelimeler: Yarıiletken lazer, mod kitleme, kısa süreli optik darbe üretimi, pasif mod kitleme

ABSTRACT

MS. Thesis

MODELLING AND EXAMINATION OF 1550 nm WAVELENGTH PASSIVELY MODE LOCKED A SEMICONDUCTOR LASER

Rukiye AKSAKAL

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

Supervisor: Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK

In this study, modelling and experimental study of a 1550 nm wavelength passively mode locked semiconductor laser has been carried out. Forward biased section of the passively mode locked semiconductor laser is called gain section while reverse biased section is called absorption section. In the modelling, variations of power-time, photon density-time, carrier density-time and pulse width of the passively mode locked semiconductor laser consisting of one or two gain sections and one absorption section are comparatively obtained. The semiconductor laser with two gain sections has higher power and shorter pulse width due to higher photon density and carrier density. Comparative results are obtained within the different lengths of the gain section of the passively mode locked semiconductor laser with two gain sections. In addition, the results are examined while the absorption section is located for both between the gain sections and in the far end. Power is observed to be higher when the absorber section is between the gain sections, because the absorption section causes narrowing of the pulse and loss of the peak. Comparative results of the power and pulse width are obtained for the different values of the current applied to the gain section and for the voltage applied to the absorption section. As the voltage applied to the absorption section increases, the power increases as the carriers lifetime decreases. Finally, the pulse width is calculated for the different lengths of the absorption section and the effect is shown on the power-time graph. It is observed that as the absorption section length increases, the power decreases because the loss and the pulse width increase.

2019, 52 page

Keywords: Semiconductor laser, mode locked, ultrashort pulse generation, passively mode locked

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam süresince bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, her daim vakit ayıran değerli hocam Sayın Prof. Dr. Bülent ÇAKMAK' a sabrı ve nezaketi için çok teşekkür ediyorum ve saygılarımı sunuyorum.

Bu tez çalışmasına katkılarından dolayı Sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağlar DUMAN' a ve arkadaşım Kamer Özge ARSLAN' a teşekkür ediyorum.

Her an ilgi ve destekleriyle yanımda olan kıymetli aileme teşekkür ediyorum.

Rukiye AKSAKAL
Mayıs / 2019

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	i
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Önceki Çalışmalar.....	3
2. KAYNAK ÖZETLERİ	6
2.1 Yarıiletken Lazerin Tanımı.....	6
2.2 Yarıiletken Lazer Rezonatörleri.....	8
2.2.1 Fabry-Perot Lazerler.....	8
2.2.2 Harici Kavite.....	10
2.3 Çok Bölümlü Yarıiletken Lazerler.....	11
2.3.1 Kazanç Bölümü.....	12
2.3.2 Soğurma Bölümü.....	12
2.3.3 Darbe Şekillendirme Mekanizması.....	13
2.4 Ultrakısa Darbe Üretim Teknikleri.....	13
2.4.1 Kazanç Anahtarlama.....	13
2.4.2 Q- Anahtarlama.....	15
2.4.3 Mod Kilitleme Tekniği.....	17
2.4.3.a Aktif mod kilitli yarıiletken lazerler.....	18
2.4.3.b Pasif mod kilitli yarıiletken lazerler.....	19
2.4.3.c Hibrit mod kilitli yarıiletken lazerler.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM	22

3.1 Materyal	22
3.1.1 İlerleyen Dalga Denklemleri	22
3.1.2 Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin Basit Modellemesi	26
3.2 Yöntem.....	27
3.2.1 Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin MATLAB İle Modellenmesi	27
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	28
4.1 Mod Kilitli Lazerin Basit Modelleme Sonuçları.....	28
4.2 Tek ve İki Kazanç Bölümlü Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin Karşılaştırmalı Sonuçları	31
4.3 İki Kazanç Bölümlü Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin Farklı Uzunluklar İçin Karşılaştırmalı Sonuçları.....	34
4.4 Akım ve Gerilim Değişiminin Çıkış Gücü ve Darbe Genişliğine Etkisi	41
4.5 Soğurma Bölgesi Uzunluğunun Çıkış Gücü ve Darbe Genişliğine Etkisi.....	44
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	46
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİŞ.....	52

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
a	Kazanç sabiti
Anr	Işınımsal olmayan rekombinasyon katsayısı
B	Işınımsal rekombinasyon katsayısı
C	Auger rekombinasyon katsayısı
c	Işık hızı
d	Aktif tabaka kalınlığı
G	Kazanç
h	Planck sabiti
I	Akım
L	Kavite boyu
m	Modülasyon derinliği, mod numarası
N	Elektron sayısı
n	Kırılma indisi
n_t	Taşıyıcı yoğunluğu
P	Foton sayısı
q	Elektron yükü
R	Yüzey yansıtıcılığı
B_{sp}	Kendiliğinden emisyon oranı
Γ	Hapsetme faktörü
V	Aktif tabaka hacmi
w	Aktif tabaka genişliği
ν	Frekans
K	Petermann faktörü
g_G	Kazanç sabiti
ω	Açısal frekans
α	Kayıp
f	Faz açısı
t	Zaman
τ_e	Taşıyıcı yaşam süresi

μ_g	Grup kırılma indisi
a_{int}	Dahili kayıplar
a_m	Yüz kayıpları
τ_p	Foton yaşam süresi
$\bar{\mu}$	Etkin kırılma indisi
α_H	Çizgi genişliği geliştirme faktörü
v_g	Lazer modlarının grup hızı
λ	Dalgaboyu

Kısaltmalar

FP	Fabry-Perot
DBR	Dağıtılmış Bragg Yansıtıcı
DFB	Dağıtılmış Geri Beslemeli

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2. 1 İleri yönde kutuplanmış p-n eklem yapısı (Basu 2015).....	6
Şekil 2. 2 a) türdeş yapılı lazer b) türdeş olmayan yapılı lazer	7
Şekil 2. 3 Türdeş olmayan yapıda taşıyıcı ve optik hapsedilme mekanizması	8
Şekil 2. 4 a) Fabry-Perot kavitede modların şekillenmesi b) Kavitede oluşan modlar (Kasap 1999)	8
Şekil 2. 5 Fabry-Perot kavitede oluşan modlar	9
Şekil 2. 6 a) Harici kaviteye sahip lazer yapısı b) Harici kavite varken oluşan yan modlar	10
Şekil 2. 7 Çok bölümlü yarıiletken lazer.....	11
Şekil 2. 8 Kazanç ve soğurmanın taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi (Vasil'ev 1995)	12
Şekil 2. 9 Darbe şekillendirme mekanizması a) soğurma bölümü b) kazanç bölümü(Lau 2000)	13
Şekil 2. 10 Kazanç anahtarlama tekniği.....	14
Şekil 2. 11 Kazanç anahtarlama metodunda lazer akımıyla, taşıyıcı yoğunluğunun ve çıkış gücünün değişimi.....	15
Şekil 2. 12 Q-anahtarlama tekniği.....	15
Şekil 2. 13 Q-anahtarlama şematik diyagramı	16
Şekil 2. 14 Mod kilitli lazerde kazanç, kayıp ve optik güç etkisi (Pusino 2014).....	17
Şekil 2. 15 Aktif mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı.....	18
Şekil 2. 16 (a) İdeal darbe katarı (b) genlik titreşimli darbe katarı (c) zamanlama titreşimli darbe katarı (Lau 2000)	19
Şekil 2. 17 Pasif mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı	20
Şekil 2. 18 Hibrit mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı.....	21
Şekil 4.1 (a) Gaussian dağılımı (b) Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü (c) kavitedeki boylamsal modlar (d) lazer çıkışı spektral şekli	28
Şekil 4. 2 a) Modların kilitlenmemiş hali b) modların kilitlenmiş hali.....	29
Şekil 4. 3 a) Tek kazanç bölümlü modelleme b) İki kazanç bölümlü modelleme	31
Şekil 4. 4 a) Tek kazanç bölümlü ve iki kazanç bölümlü lazerin güç-zaman grafiği	32
Şekil 4. 5 a) Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin foton yoğunluğu-zaman grafiği.....	32
Şekil 4. 6 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin karşılaştırmalı taşıyıcı yoğunluğu	33

Şekil 4. 7 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin darbe genişliği	34
Şekil 4. 8 Farklı kazanç uzunlukları ve soğurma bölümünün farklı yeri için modelleme	36
Şekil 4. 9 Lkazanç ₁ =130 µm Lkazanç ₂ =130 µm ve Lkazanç ₁ =80 µm Lkazanç ₂ =180 µm için güç-zaman grafiği	36
Şekil 4. 10 Lkazanç ₁ =130 µm Lkazanç ₂ =130 µm ve Lkazanç ₁ =80 µm Lkazanç ₂ =180 µm için foton yoğunluğu-zaman grafiği	37
Şekil 4. 11 Lkazanç ₁ =130 µm Lkazanç ₂ =130 µm ve Lkazanç ₁ =80 µm Lkazanç ₂ =180 µm için taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği	37
Şekil 4. 12 Lkazanç ₁ =130 µm Lkazanç ₂ =130 µm ve Lkazanç ₁ =80 µm Lkazanç ₂ =180 µm için darbe genişliği	38
Şekil 4. 13 Lkazanç ₁ =180 µm Lkazanç ₂ =80 µm ve Lkazanç ₁ =80 µm Lkazanç ₂ =180 µm için karşılaştırmalı güç-zaman grafiği	39
Şekil 4. 14 Lkazanç ₁ =80µm Lkazanç ₂ =180 µm ve Lkazanç ₁ =180 µm Lkazanç ₂ =80 µm için taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği	39
Şekil 4. 15 İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yariletken lazerde soğurma bölümü son kısımdayken ve kazanç bölümleri arasındayken karşılaştırılması (a) güç-zaman grafiği (b) foton yoğunluğu-zaman grafiği (c) taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği	41
Şekil 4. 16 Soğurma bölümüne uygulanan -0,5V gerilimle, güç-zaman grafiği.....	42
Şekil 4. 17 Soğurma bölümüne uygulanan -1 V gerilimle, güç-zaman grafiği	42
Şekil 4. 18 Kazanç bölümüne uygulanan 120mA akımla , güç-zaman grafiği.....	43
Şekil 4. 19 Kazanç bölümüne uygulanan 150mA akımla , güç-zaman grafiği.....	43
Şekil 4. 20 Soğurma bölgesi uzunluğu= 45µm ve uygulanan akım I=120mA	44
Şekil 4. 21 Soğurma bölgesi uzunluğu= 30µm ve uygulanan akım I=150mA	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1.....	30
------------------	----



1. GİRİŞ

İnsanlar için iletişim ve haberleşmede temel amaç, iletmek istedikleri mesajları en güvenli ve en hızlı şekilde ulaştırmaktır. Bu amaçla tarih boyunca çeşitli şekilde gelişime açık iletişim araçları kullanmışlardır. Bu iletişim araçlarından biri de mesajların optoelektronik (ışık ve elektronik) yolla iletilmesidir. Optik haberleşme sistemlerinin gelişimiyle birlikte optik yükselteçler, fiber optik kablolar ve detektörler için daha fazla talep oluşmuştur. Fiber optik ile verilerin hızlı ve güvenilir bir biçimde her yere iletilmesi sağlanmıştır. Fiber optik ile iletilen ışık dalgaları, ilk zamanlarda birkaç metre sonra anlaşılacak kadar zayıflamaya uğramıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte bu zayıflama uzun dalga boylu olarak 1300 nm’de 0,5dB/km olarak elde edilirken 1550 nm’de 0,2dB/km zayıflama elde edilmiştir.

1960 yılında Theodore Maimann tarafından keşfedilen ilk katı hal lazeri ve aynı yıl Ali Javan tarafından keşfedilen ilk Helium Neon lazerin keşfi optik iletişime oldukça ilgi uyandırdı. 1962 yılında yarıiletken lazerin keşfi ile lazer, optik iletişim için ışık kaynağı olarak kullanılmaya başlandı. Lazer ışığının diğer ışık kaynaklarına göre daha dar olmasıyla, tek dalga boyuna sahip yani tek renk içermesiyle (monokromatik) ve lazer ışığını oluşturan dalgaların faz uyumlu olmasıyla diğer ışık kaynaklarından ayrılır. Yarıiletken lazerler ise diğer lazerlere göre, yüksek verimlilik, küçük boyutlu olması, düşük güçte elektriksel olarak doğrudan pompalanması, gigahertz seviyelerinde modüle edilebilmeleri, düşük maliyetle seri üretiminin yapılabilmesi, oda sıcaklığında çalışabilmesi, ultra kısa darbe üretmesi ve yüksek bant genişliği avantajlarına sahiptir. Bu avantajlardan dolayı uzun mesafede zayıflamanın az olduğu 1550 nm dalgaboylu yarıiletken lazerler optik haberleşme için tercih edilmektedir. Kısa mesafelerde ise daha düşük dalga boylu yarıiletken lazerler tercih edilmektedir. Optik haberleşme sistemleri yanı sıra yarıiletken lazerler, katıhal lazer sürücüleri, medikal uygulamalar, optik bilgi kaydedici ve okuyucu sistemler, savunma sistemleri gibi alanlarda da yaygın kullanıma sahiptir.

Yarıiletken lazerlerin fiber optik haberleşme sistemlerinde önemli bir kaynak olmasının nedenlerinden biri de çok kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbelerle bilgi aktarımını sağlayarak iletilen bilgide bozulmanın en az düzeyde olmasıdır.

1. GİRİŞ

Yarıiletken lazerlerden çok kısa süreli ve yüksek güçlü optik darbelerin üretimi için kazanç anahtarlama, Q-anahtarlama ve mod-kilitleme teknikleri kullanılır.

Kazanç anahtarlama; harici kavite gerektirmeyen basit ve ilgi çekici bir kısa süreli darbe üretme tekniğidir. Yarıiletken lazere uygulanan akımla oluşturulan kazanç bölgesinde eşik akımını geçmesiyle lazer çıkışında darbeler oluşur. Oluşan bu darbelerin tekrarlama oranı, lazerde gidiş dönüş süresi ile sınırlı değildir. Kazanç anahtarlama tekniğinde soğurma bölgesi olmadığından diğer çok kısa süreli darbe üretim tekniklerine göre, daha geniş kazanç bant genişliğine sahiptir. Lazerin GHz'ler mertebesindeki bir frekansa sahip büyük bir AC sinyalle modüle edilmesi de kazanç anahtarlama optik darbeler oluşmasına neden olur. Bununla birlikte, gigahertz tekrarlama oranlarındaki kazanç anahtarlama darbeler maksimum güçte bozulmalara maruz kalmaktadır (Çakmak 2000).

Q-anahtarlama; yarıiletken lazerlerden çok kısa süreli darbeler üretmek için bir başka popüler tekniktir. Kazanç anahtarlama tekniğine göre, lazer kavitesine soğurucu eklenerek daha kısa süreli ve daha yüksek güçlü optik darbeler elde edilir. Bu teknikte tersinir popülasyon esnasında lazer kayıplarının artırılması ile lazer çıkışı engellenir. Lazer çıkışı, tersinir popülasyon yüksek bir değere ulaştığında kavite kalitesi (Q) artırılarak başlatılır (Okur 2000). Başlangıçta lazer çıkışı engellendiği için yüksek güçlü ve kısa süreli optik darbeler elde edilir.

Mod kilitleme; literatürde en kısa süreli optik darbe üretilmesini sağlayan ve yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Burada temel unsur lazer kavitesinde oluşan tüm modların aynı fazda olmasıdır. Bu teknikte modlar arasındaki frekans aralığının eşit olması istenir ve bu yüzden lazer kavitesinin kazancı veya kaybı modüle edilir. Böylece tekrarlama oranı lazer kavitesinde gidiş-geliş zamanına eşit zaman aralıklı darbeler üretilir. Mod kilitli lazer üretimi için üç yöntem vardır. Bunlar aktif mod kilitleme, pasif mod kilitleme ve hibrit mod kilitleme tekniğidir. Aktif mod kilitleme kazancın veya kaybın, periyodu kavitede ışığın gidiş-geliş zamanına eşit RF sinyali ve DC akımla modülasyonu ile elde edilir. Aygıttan çok kısa süreli optik darbeler elde etmek için elektriksel modülasyon darbeleri dar olmalı ve aygıtın net kazanç bölgesinin kısa bir zamanda oluşması için yüksek genlikte olmalıdır (Derickson 1992). Öte yandan pasif

mod kilitleme tekniğinde ise lazerin kazanç bölümü iletim yönünde DC akımla sürülürken, soğurma bölümü ters kutuplu DC gerilim ile sürülür. Kayıp, optik darbenin tepe noktası yakınları haricinde her yerde kazançtan büyüktür. Bu durum, soğurucunun toparlanma süresinin çok hızlı olması ile sağlanır. Böylece optik darbenin sadece tepe kısmı yükseltilmiş ve diğer kısımları zayıflatılmış olur (Çakmak 2000).

Yukarıda sözü edilen mod kilitleme türlerine ek olarak lazerin kazanç bölümüne DC ve RF elektrik akımlarının birlikte uygulanması ile hibrit mod kilitleme tekniği elde edilir yani hibrit mod kilitleme tekniği aktif ve pasif mod kilitleme tekniklerinin bir birleşimidir.

1.1 Önceki Çalışmalar

Mod kilitleme bir lazerden ultrakısa darbe üretimine izin veren tekniktir (Siegman 1986). Aşağıda mod kilitleme yöntemi ile ilgili olarak literatürdeki bazı çalışmalardan örnekler verilmiştir.

Silberberg et al. (1984) yaptıkları çalışmada harici bir rezonatörde doyurulabilir bir soğurucu olarak bir GaAs / GaAlAs çoklu kuantum kuyulu bir numune kullanarak ve GaAs lazerini pasif modda kilitleyerek tekrarlama hızı 1 GHz ve çıkış gücü 1mW olan 1,6 ps süreli kısa darbeler elde etmişlerdir.

Ziel et al. (1985) tarafından sunulan çalışmada, pasif mod kilitleme tekniğiyle pikosaniye altında optik darbeler elde edilebileceği gösterilmiştir.

Kuznetsov et al. (1987) tarafından yapılan çalışmada, dahili bir kavite yansıma önleyici ile kaplanması suretiyle pasif mod kilitli InGaAsP yarıiletken lazerlerin 0,6–3,0 GHz frekansında 30–70 ps darbe yaydığı açıklanmıştır.

Bowers et al. (1989) aktif mod kilitli yarıiletken lazerde ilerleyen dalga denklemleri kullanılarak elektron ve foton yoğunluklarını incelediler. Ayrıca mod kilitli yarıiletken lazerlerde elde edilebilecek minimum darbe genişliklerinde bir sınırlamanın, kazanç doygunluğundan dolayı dinamik bozulma olacağı gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Tucker et al. (1989) sundukları çalışmada, 1,5 μm dalga boyunda çalışan aktif mod kilitlemeli lazerden 40 GHz'e kadar tekrarlama hızlarında 4 ps'lik sürelerle darbe elde edilmiştir. Bunun o yıla kadar aktif mod kilitli bir lazerle elde edilen en yüksek tekrarlama oranı olduğu açıklanmıştır.

Salvatore et al. (1993) tarafından dalgaboyu ayarlanabilir pasif mod kilitli yarıiletken lazerden pikosaniyeden daha düşük darbe üretimi gösterilmiştir. Minimum darbe genişliği 260 fs, çıkış gücü 50 mW ve tekrarlama oranı 603 MHz olarak elde edilmiştir.

Arahira et al (1994) 38,8 GHz'lik temel tekrarlama oranının yanı sıra, kazanç bölümünün kutuplanma durumuna bağlı olarak 400 GHz, 800 GHz ve 1,54 THz harmonikleri gözlemlemiştir. Bu çalışmanın pasif mod kitleme ile terahertz oranlı optik darbe üretiminin ilk gösterimi olduğu bildirilmiştir.

Williams et al. (2004), uzun dalgaboylu mod kilitli yarıiletken lazerlerde ilerleyen dalga modeli ile lazer çıkışını, darbe süresini ve tekrarlama oranını bildirdiler.

Ahmad et al. (2008) tarafından yapılan çalışmada 1,55 μm dalgaboyunda ilk kez dahili gerilme olmadan lazerden 5,8 ps kadar kısa darbe genişliği ve 212 mW güç elde edildiği açıklanmıştır.

Hou et al. (2010) 1,55 μm AlGaInAs gerilmiş kuantum-kuyulu materyale dayanan ikiz derinlemesine oyulmuş kavite içi yansımalar tarafından oluşturulan bir bileşik kaviteyi içeren bir monolitik yarıiletken lazerden harmonik mod-kilitli çalışmanın ilk gösterimi sunulmuştur. 1,67 ps'lik bir darbe süresi ve 160 GHz tekrarlama hızına sahip olduğu gösterilmiştir.

Rosales et al. (2011) tarafından 1,55 μm InP tabanlı 300 GHz tekrarlama oranıyla ps altı darbe üretimine sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde tek bölümlü ve standart iki bölümlü lazerlerin karşılaştırması ilk kez verilmiştir.

1. GİRİŞ

Javaloyes et al (2013) tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda, dispersiyonun doyurulabilir soğurucunun frekans alanındaki etkilerinin yanı sıra, yükselteç bölümlerinin kazanç tepe noktası ve doyurulabilir soğurucunun soğurma kenarı arasındaki dinamik bozulma ile ilgisini göstermiştir.

Simos et al. (2018), birleştirilen iki adet 40 GHz yarıiletken pasif mod kilitli lazerin çalışması, sonlu bir zaman bölgesi etki alanı altında ilerleyen dalga modeli kullanılarak incelemiştir. Lazerler arasındaki optik mesafe kavite uzunluklarının tam sayı katları civarında olduğunda, lazerlerin yüksek bir senkronizasyon derecesi ile çalışabileceği gösterilmiştir.

Xu et al. (2018) tarafından yapılan çalışmayla mod kilitli lazerin zaman domeninde kayma (timing jitter) gürültüsü, 100 kHz ile 10 GHz frekans aralığında birkaç pikosaniyeden (3,83 ps) birkaç femtosaniye düşürülebileceği gösterilmiştir. Hesaplamalar, zaman domeninde kaymanın faz farkına karşı duyarsız olduğunu gösterirken kuplaj katsayısının zaman domeninde kayma üzerinde güçlü bir etkisinin olduğu açıklanmıştır.

Alloush et al. (2018), pasif mod kilitlemede bant genişliğinin artırıldığını ve 216 fs darbe genişliğiyle ultrakısa darbe üretimine ulaşıldığını bildirmiştir.

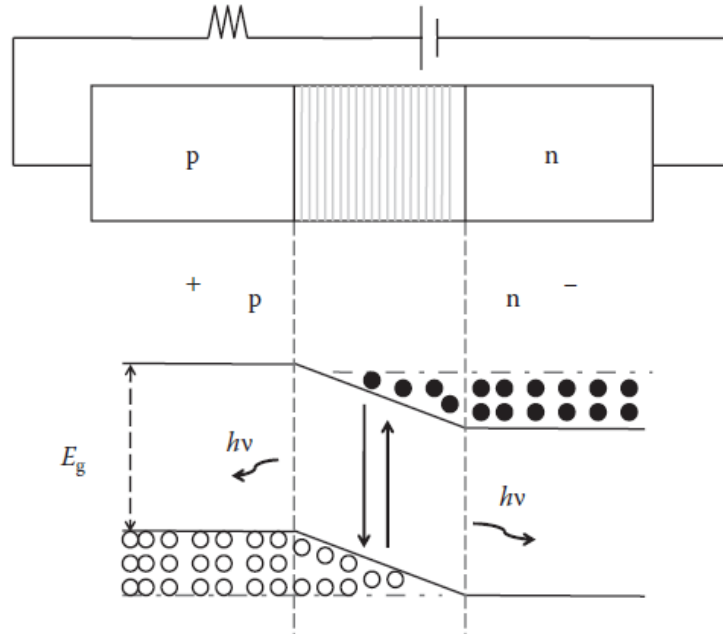
Meinecke et al. (2019) tarafından yapılan çalışmada, kazanç bölümlerinden biri konik yapıya sahip olan iki kazanç bölümü ve bir soğurma bölümünden oluşan üç bölümlü kuantum noktalı (QD) pasif mod kilitli yarıiletken lazer; çıkış gücü, darbe genişliği ve genlik kararlılığı açısından karakterize edilmiştir.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

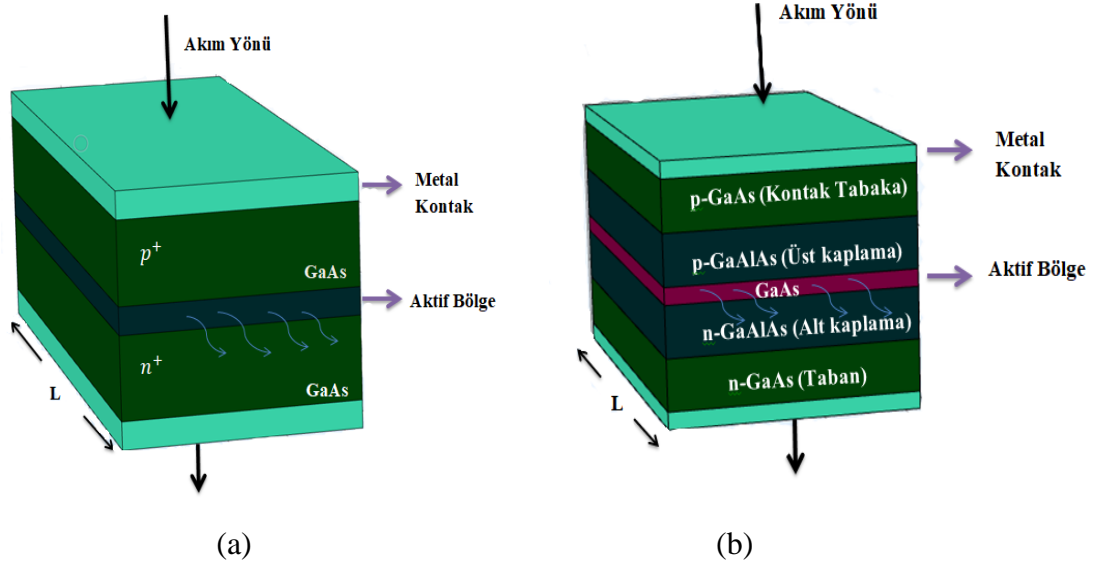
2.1 Yarıiletken Lazerin Tanımı

Yarıiletkenin elektriksel ve optiksel özellikleri katkılama ile değiştirilebilir. Yarıiletken, fazla değerlilik elektronlu katkılayıcılar (donors-vericiler) örneğin grup V elementleri (P, As gibi) ile katkılandırıldığı zaman n-tipi yarıiletken elde edilir. P-tipi yarıiletken ise değerlilik elektronu az olan grup III elementleri (B, In, Ga, Al gibi) ile katkılandırıldığında (acceptors-alıcılar) elde edilir.

Bir p-n ekleminden (Şekil2.1) lazer ışığını elde etmemiz için gerekli şartlardan birincisi nüfus tersinmesi yani p-n eklemının iletim yönünde kutuplanması ile elde edilen kazanç ve diğeri yarıiletkenin kristal boyunca kırılmasıyla elde edilen yansıtıcı yüzeylerle yani aynalar yardımıyla oluşan optik geri beslemedir. Elde edilen lazer ışığını oluşturan dalgalar aynı fazda ve tek dalga boyuna sahiptir.



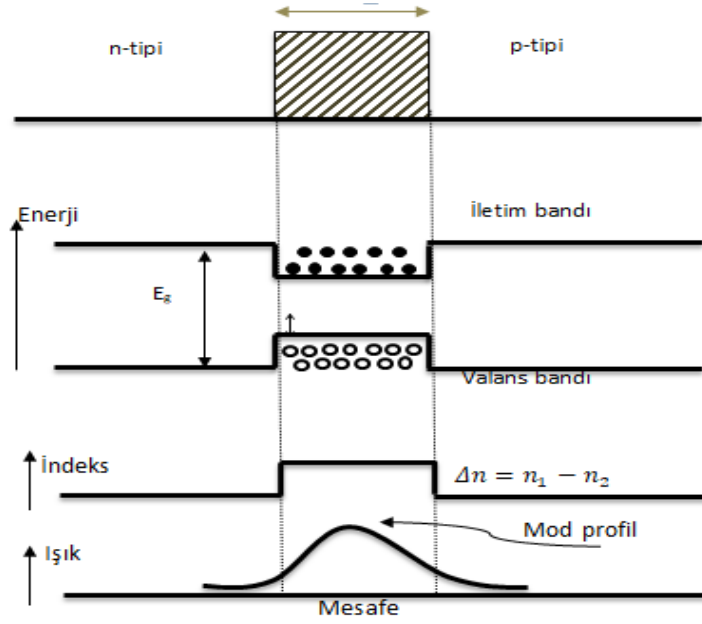
Şekil 2. 1 İleri yönde kutuplanmış p-n eklem yapısı (Basu 2015).



Şekil 2. 2 a) türdeş yapıli lazer b) türdeş olmayan yapıli lazer.

Şekil 2.2 (a)'da gösterildiği gibi farklı katkılanmış bölgeler arasında oluşan p-n eklemi tek tip eklem yani türdeş yapıli olarak adlandırılır ve bu aktif bölgeyi oluşturur. Lazer ışığını oluşturacak elektron ve boşluk birleşmesi lazere uygulanacak ileri yönde akımla burada gerçekleşir. Oda sıcaklığında çalışmak için yetersizdirler ve eşik akımları çok yüksektir.

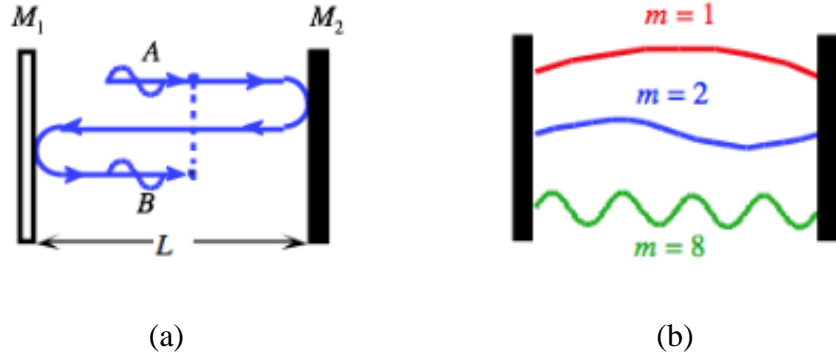
Optik ve taşıyıcı gömülmesini sağlayamadığından 1970 yılında çok eklemli lazer geliştirilerek bu sorun aşılmıştır. Farklı yarıiletken malzemeler arasındaki eklemler ise çoklu tip (heterostructure) eklemli yapı olarak isimlendirilir. Şekil 2.2 (b)'de gösterilen yapıda daha düşük bant aralıklı GaAs daha yüksek bant aralığına sahip iki AlGaAs yapısıyla çevrelenmiştir. GaAs ve AlGaAs arasındaki bant aralığı farkı GaAs katmanında iletim ve değerlilik bant aralığında elektron ve boşluklara bariyer olarak davranan basamaklar oluşturur ve taşıyıcı hapsedilmesi gerçekleşmiş olur. GaAs yani aktif bölgenin kırılma indisi, etrafındaki AlGaAs katmanlarının kırılma indisinden daha büyük olduğundan oluşan fotonlar aktif bölgeye hapsedilir ve böylece optik hapsedilme gerçekleştirilir. Şekil 2.3'de gösterilen mekanizmayla taşıyıcı ve optik hapsedilme avantajıyla türdeş olmayan eklemli lazerlerden daha yüksek verim elde edilmesi sağlanır. Bu tür eklemler bipolar, FET transistörler ile lazer ve dedektörlerde kullanılmaktadır.



Şekil 2. 3 Tırdeş olmayan yapıda taşıyıcı ve optik hapsedilme mekanizması (Çakmak 2018).

2.2 Yarıiletken Lazer Rezonatörleri

2.2.1 Fabry-Perot Lazerler



Şekil 2. 4 a) Fabry-Perot kavitede modların şekillenmesi b) Kavitede oluşan modlar (Kasap 1999).

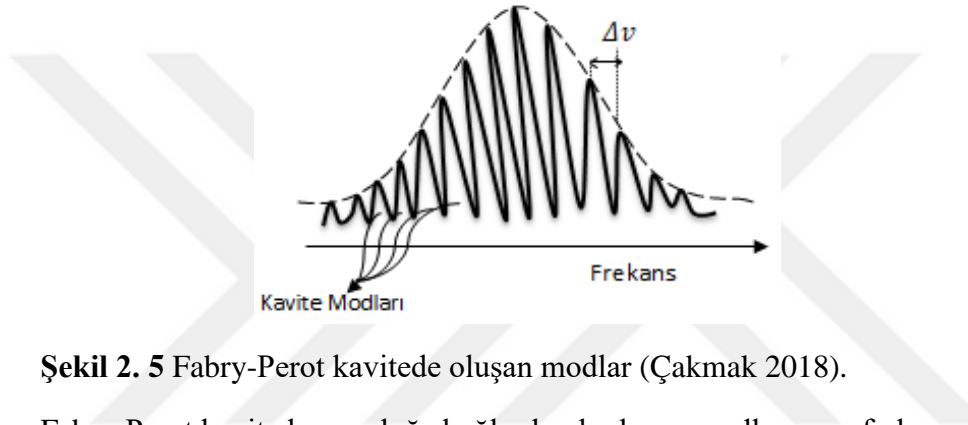
En basit optik rezonatör olan Fabry-Perot, Şekil 2.4 de gösterildiği gibi aygıtın her iki ucunda kısmi ayna görevi gören yüzeylerin arasına kazanç bölümünün yerleştirilmesiyle elde edilir. Fotonların birbirine paralel aynalar arasında gidiş-dönüş yaparak çoklu yansımalar yaptığı bir kavitedir. Her gidiş-dönüşte fotonların bir kısmı kaviteyi ışık çıkışı olarak terk eder. Eğer aynalar arası mesafe L , dalgaboyunun yarısının

2. KAYNAK ÖZETLERİ

tam katsayısı kavite sınırları içindeyse rezonans şartı sağlanmış olur. Rezonans durumunda ise kavite içinde duran dalgalar aynı fazda olur ve dalga genliği artar. Yani lazer ortamı yükselteç olarak davranır.

$$L = \frac{k\lambda_0}{2n} \quad (2.1)$$

Burada L kavite uzunluğu, k boylamsal mod sayısı, λ_0 serbest uzay dalgaboyu ve n kavitenin kırılma indisidir.



Şekil 2. 5 Fabry-Perot kavitede oluşan modlar (Çakmak 2018).

Fabry-Perot kavitede uzunluğa bağlı olarak oluşan modlar arası frekans aralığı,

$$\Delta\nu = \frac{c}{2n_g L} \quad (2.2)$$

İle ifade edilirken, modlar arasındaki mesafe ise,

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2n_g L} \quad (2.3)$$

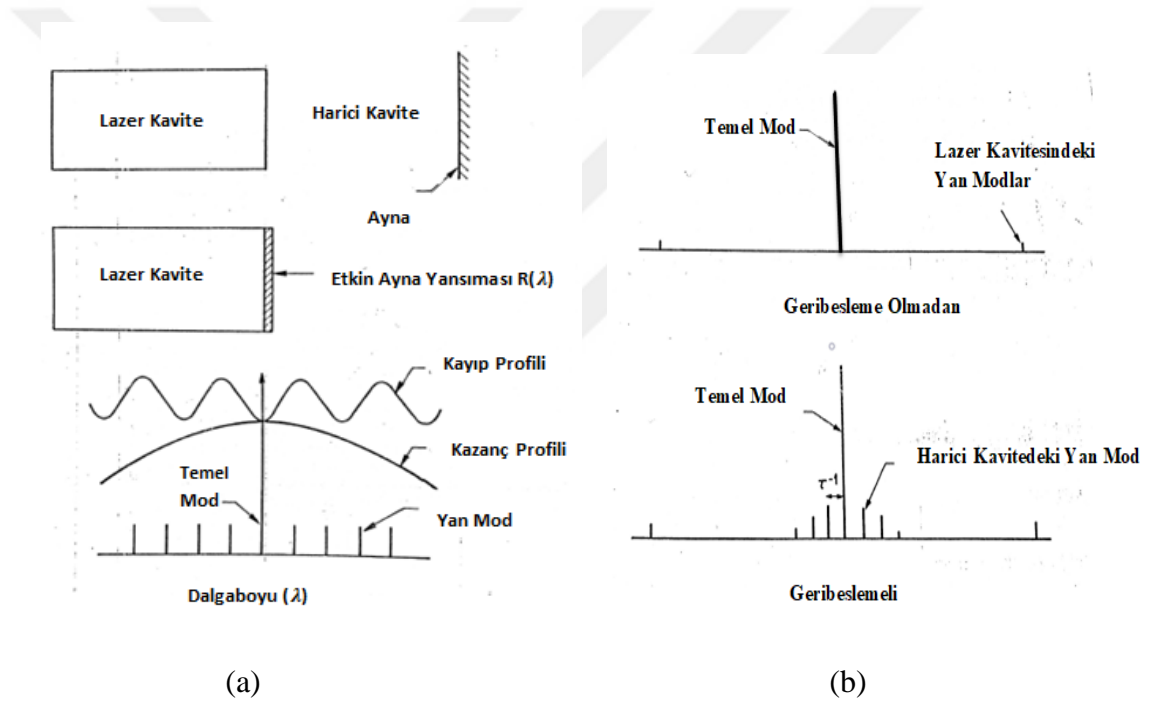
ifade edilir.

DFB lazerlerin fabrikasyon işlemleri F-P fabrikasyon işlemlerinden çok daha karışıktır. Çünkü fabrikasyon, temel lazer yapısının büyütülmesi, bir ızgara yapımı ve üst tabakanın tekrar büyütülmesi gibi işlemler içerir. Optik dalganın ızgara ile kuvvetli bir şekilde etkileşebilmesi için, ızgaralama aktif bölgeye mümkün olduğu kadar yakın

2. KAYNAK ÖZETLERİ

bir şekilde oluşturulmalıdır. DFB lazerlerin fabrikasyonunda karşılaşılan zorluklardan dolayı maliyeti bir F-P lazerin fabrikasyonundan daha fazladır. F-P ve DFB yapılar arasındaki temel fark, ışımının meydana geldiği yer olan aktif tabakanın tasarımında yatmaktadır. DFB lazerlerin aksine, DBR lazer diyotlar Bragg yansıtıcı olarak adlandırılan bir ızgara kullanır. Bölgenin son kısımlarındaki kıvrımlar frekans seçici aynalar olarak davranır ve Bragg yansıtıcı ile geri besleme olayı meydana gelir. Dar çizgi genişliğine sahip tek mod DFB ve DBR lazerler, dalgaboyu bölümlü çoğullama ve kohorent dedeksiyon uygulamaları için kullanılabilir (Cakmak 2000).

2.2.2 Harici Kavite



Şekil 2. 6 a) Harici kaviteye sahip lazer yapısı b) Harici kavite varken oluşan yan modlar (Yariv and Yeh 2007).

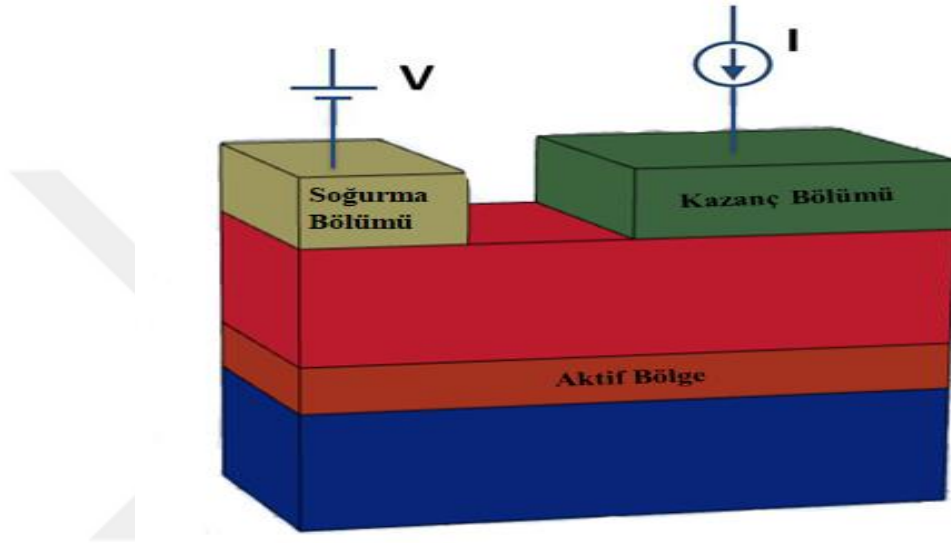
Yarıiletken lazerlerde kavite uzunlukları çok kısa olduğundan, modlar arası frekans yüksektir. Bu nedenle dış kavite kullanılarak ışığın kavitedeki gidiş-geliş zamanı artırılır. Böylece modlar arası frekans farkı Şekil 2.6 (b)'de görüldüğü gibi azaltılır.

Şekil 2.6'da harici kaviteyle oluşan boylamsal modlar gösterilmiştir. Şekil 2.6(a)'da en üstteki çizimde harici kaviteli yapı gösterilmiştir. Ortadaki çizim harici

2. KAYNAK ÖZETLERİ

kavitenin etkisinin, yüzeyin etkin yansıtıcılığının dalgaboyuna bağımlı olduğunun ifadesidir. Alttaki çizim kazanç profiline bindirilmiş olan periyodik kayıp profilini göstermektedir. Temel mod en düşük kayıplı maksimum kazanç en yakın Fabry-Perot moddur. Diğer FP modlar nispeten daha yüksek kayıpları nedeniyle bastırılmış yan mod haline gelir.

2.3 Çok Bölümlü Yarıiletken Lazerler



Şekil 2. 7 Çok bölümlü yarıiletken lazer.

Çok bölmeli (kontaklı) lazerlerde, farklı işlevli birkaç bölüm kavite üzerinde üretilir. Çok kontaklı yarıiletken lazerlerin farklı bölümlerine farklı akımlar uygulanarak bu bölmelerde taşıyıcı konsantrasyonlarının farklı olması sağlanabilir (Duman 2014). Çok bölmeli lazerler tek bölmeli yarıiletken lazerlere göre daha kısa darbeler üretir (Derickson et al. 1992).

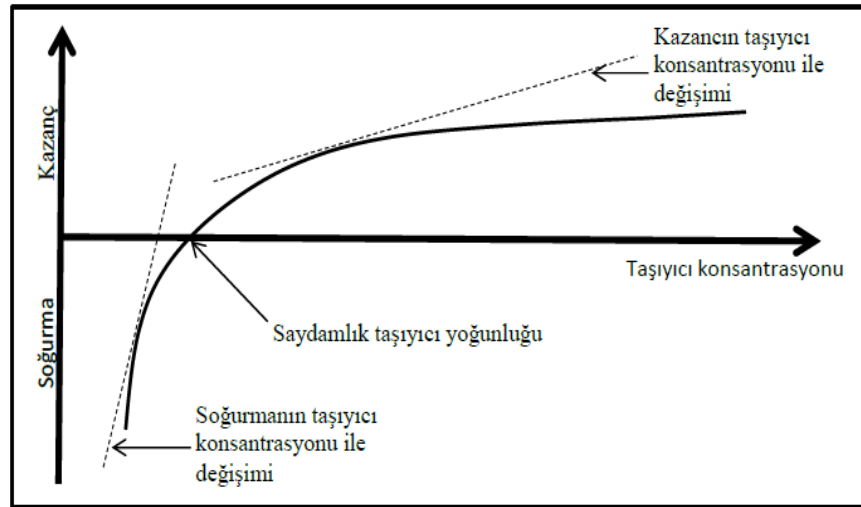
Çok kontaklı lazerler; aktif ve pasif Q-anahtarlama, mod kilitleme, dalgaboyu ayarlamalı yapılar, optik zaman bölmeli anahtarlama, optik dalgaboyu bölmeli anahtarlama gibi çalışma rejimlerine sahiptirler (Vasil'ev 1995). Yarıiletken lazerlerin lineer olmayan özelliklerinden yararlanan bu fonksiyonel aygıtların haberleşme ve sinyal işleme sistemlerinde anahtar cihazlar olması kaçınılmazdır (Kawaguchi 1993).

2.3.1 Kazanç Bölümü

Lazerlerin bölümlerinden biri olan Şekil 2.7’de gösterildiği gibi kazanç bölümü iletim yönünde kutuplanır ve bu bölüm kavitedeki fotonlar için yükselteç gibi davranır.

2.3.2 Soğurma Bölümü

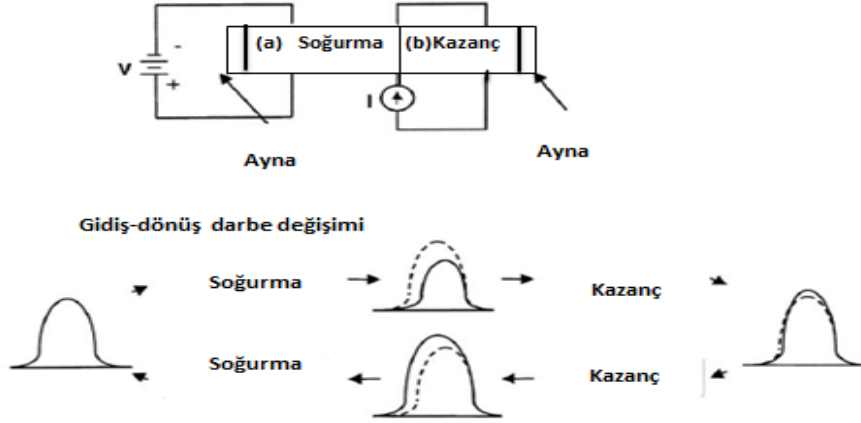
Çok kontaklı yarıiletken lazerin gerilim uygulanmayan ya da Şekil 2.7’de gösterildiği gibi tıkama yönünde gerilim uygulanan kısmı ise bir doyumlu soğurucu gibi davranır ve soğurma bölümü olarak adlandırılır. Soğurma bölümü ters kutuplanarak taşıyıcıların daha hızlı süpürülmesi sağlanır. Soğurma bölümü darbenin daralmasına ve tepe noktasında kayıplara neden olur. Darbe genişliği soğurma bölgesinin uzunluğunun azalmasıyla azalır ve soğurma bölgesindeki taşıyıcıların süpürülme süresi azalır. Böylece, darbe süresi sınırlandırılır. Ultrakısa darbeler için 20-80 μ m mertebesinde soğurucu uzunlukları kullanılır (Arahira et al. 2001).



Şekil 2. 8 Kazanç ve soğurmanın taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi (Vasil'ev 1995).

Şekil 2.8’de kazanç ve soğurmanın taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi gösterilmektedir. Bu eğrinin özelliği taşıyıcı yoğunluğunun artışı ile eğiminin azalmasıdır. Bu durum soğurucunun doyumlu olduğunu gösterir ve soğurmanın taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişim hızının, kazancın taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişim hızından daha yüksek olduğu görülmektedir (Duman 2014). Kesikli çizgilerle gösterilen doğrular kazanç ve soğurmanın taşıyıcı yoğunluğuna bağlılıklarını göstermektedir (Vasil'ev 1993).

2.3.3 Darbe Şekillendirme Mekanizması



Şekil 2. 9 Darbe şekillendirme mekanizması a) soğurma bölümü b) kazanç bölümü (Lau 2000).

Pasif mod kilitli bir lazerde, Şekil 2.9’da gösterildiği gibi soğurucuda darbe daralmasının ve kazanç bölümünde darbe genişlemesinin rekabeti, darbenin lazer boyunca ilerlediği ve orijinal pozisyonuna ve yönüne tam olarak aynı şekilde geri döndüğü sürekli bir gidiş-geliş durumuna yol açar. Darbe soğurucuya girdiğinde, fotonlar valans elektronlar tarafından soğurulup iletim bandında serbest taşıyıcılar oluşturulur. Darbe soğruldukça soğurma büyüklüğü azalır. Sonuç olarak ön kenar arka kenardan daha fazla zayıflatılır. Darbe, kazanç bölgesinden geçerken daha fazla taşıyıcı, uyarılmış emisyonla birleşir ve kazanç düşmeye devam eder, böylece darbenin ön kenarında kazanç arka kenarına göre daha yüksek bir yükseltme yapar.

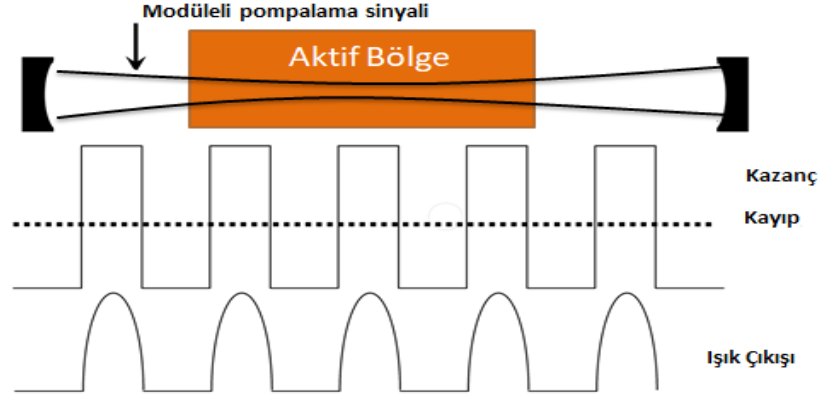
2.4 Ultrakısa Darbe Üretim Teknikleri

Yarıiletken lazerlerin çok kısa süreli ve güçlü optik darbeler üretmesi için kazanç anahtarlama, Q-anahtarlama ve mod kitleme metotları kullanılabilir.

2.4.1 Kazanç Anahtarlama

Harici kavite gerektirmeyen basit ve ilgi çekici bir kısa darbe üretme tekniğidir. Yarıiletken lazere uygulanan akımla birlikte kazancın kaybı yendiği durumlarda lazer çıkışında optik darbeler oluşur. Oluşan bu darbelerin tekrarlama oranı, lazerde gidiş dönüş süresi ile sınırlı değildir. Kazanç anahtarlama tekniğinde soğurma bölgesi olmadığından diğer çok kısa süreli darbe üretim tekniklerine göre, daha geniş kazanç

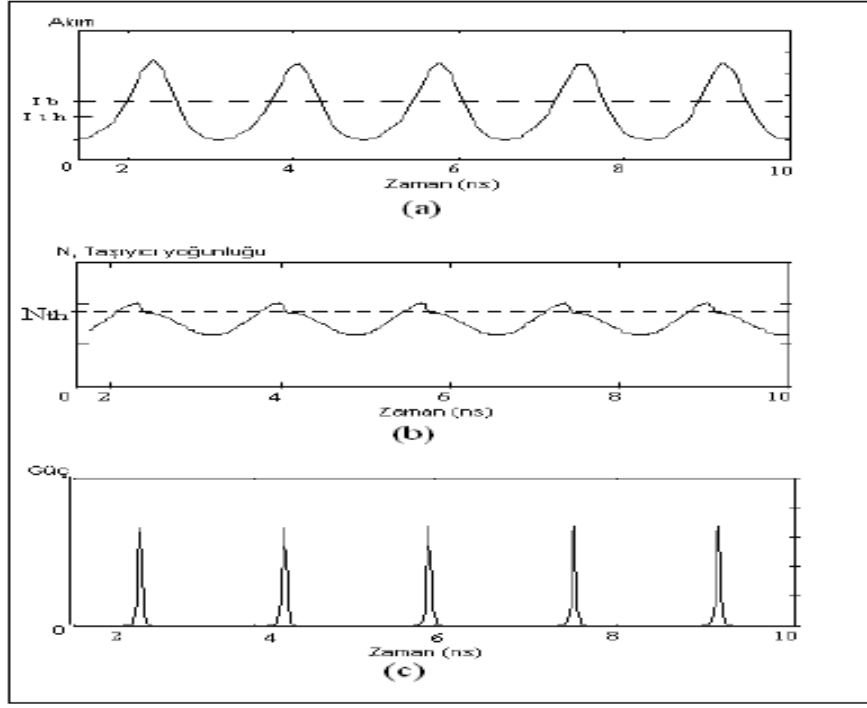
bant genişliğine sahiptir. Lazerin GHz'ler mertebesindeki bir frekansa sahip büyük bir AC sinyalle modüle edilmesi de kazanç anahtarlamalı optik darbeler oluşmasına neden olur. Bununla birlikte, gigahertz tekrarlama oranlarındaki kazanç anahtarlamalı darbeler maksimum güçte bozulmalara maruz kalır (Çakmak 2000).



Şekil 2. 10 Kazanç anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).

Şekil 2.11'de (Duman 2014) gösterildiği gibi lazere darbeli bir akımla birlikte doğru akım da uygulanmaktadır. Bu doğru akım, lazerin eşik akım değerine yakın seçilir. Lazere uygulanan doğru akımın lazer eşik akımının altında olması durumunda ışık çıkışı alternatif akımın, lazer eşik akım değerini aşması ile oluşur. Yani Şekil 2.10'da görüldüğü gibi darbeli akımla sürülerek darbenin yükselen kenarı boyunca (on durumunda) ışık çıkışı elde edilir. Lazere uygulanan alternatif modülasyon akımının artışı ile lazer çıkışındaki optik darbelerin süreleri azalır. Kazanç anahtarlama ile üretilen GHz mertebesinde tekrarlama oranına sahip optik darbeler, hem çok kısa süreli değillerdir hem de tipik tepe güçleri 10mW-100mW aralığındadır (Vasil'ev 1993).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

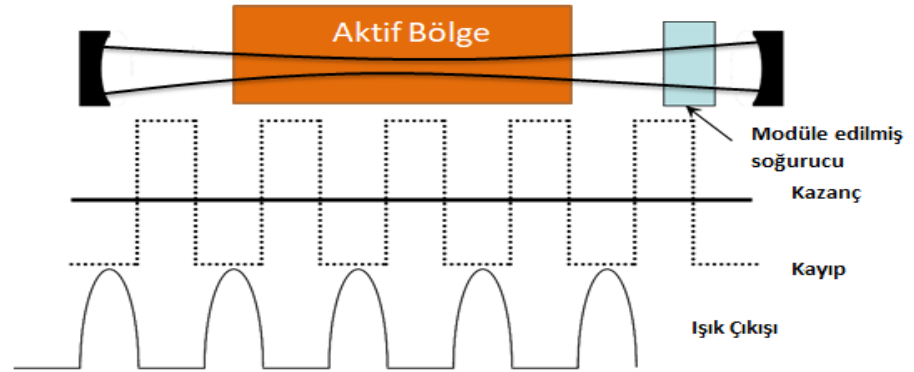


Şekil 2. 11 Kazanç anahtarlama metodunda lazer akımıyla, taşıyıcı yoğunluğunun ve çıkış gücünün değişimi

- (a) Akımın zamanla değişimi (b) Taşıyıcı yoğunluğunun zamanla değişimi (c) Çıkış gücünün zamanla değişimi

2.4.2 Q-Anahtarlama

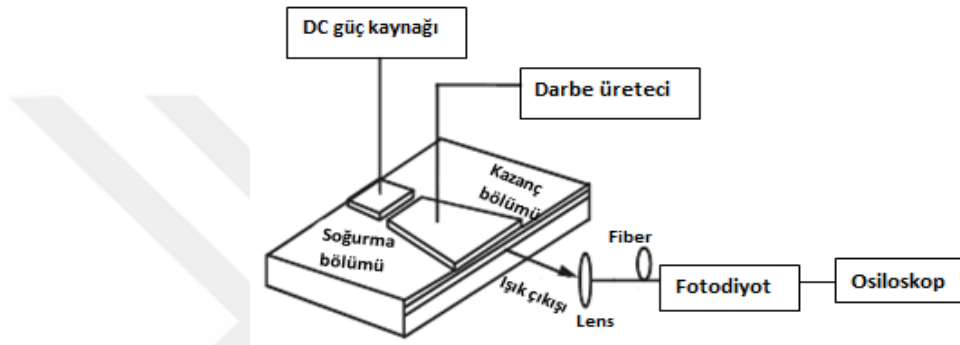
Q-anahtarlama metodu çok kısa süreli ve yüksek enerjili optik darbelerin elde edilmesinde sıkça kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte Şekil 2.12’de görüldüğü gibi tersinir popülasyon esnasında lazer kayıplarının artırılması ile lazer çıkışı engellenir.



Şekil 2. 12 Q-anahtarlama tekniği (Çakmak 2018).

Lazer çıkışı, tersinir popülasyon yüksek bir değere ulaştığında kavite kalitesi (Q) artırılarak başlatılır (Okur 2000).

Foton popülasyonunun yani optik şiddetin hızla artmasıyla, taşıyıcı yoğunluğu hızla eşik değerinin altına düşer. Böylece çok kısa süreli optik darbe elde edilir. Lazer çıkışı başlayınca kadar geçen sürede biriken tüm nüfus tersinmesinin tek bir optik darbeye dönüşmesi, yüksek güçlü optik darbeler elde edilmesini sağlar (Çakmak 2000).

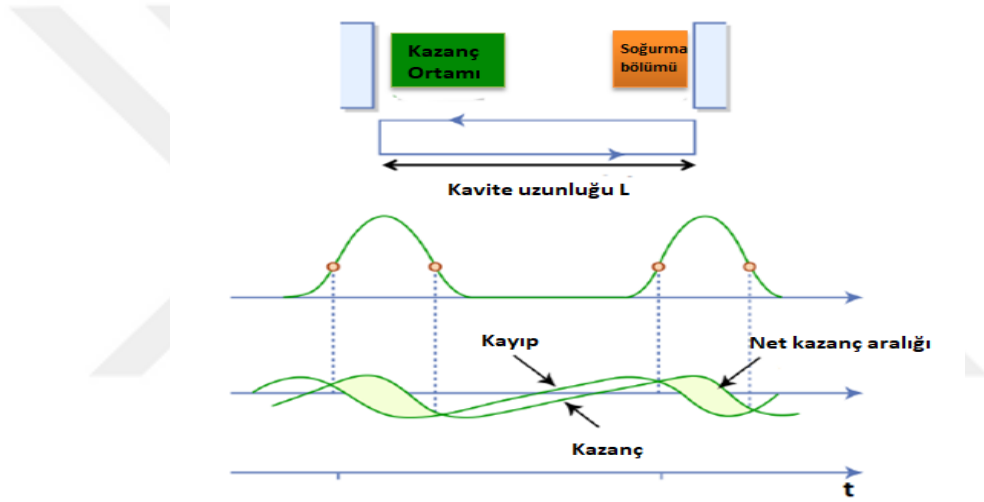


Şekil 2.13 Q-anahtarlama şematik diyagramı (Çakmak et al. 2011).

Aktif Q-anahtarlama harici kaynaklara ihtiyaç duyulduğundan, bu teknik çok fazla tercih edilmez. Bundan ziyade pasif Q-anahtarlama metodu sıkça kullanılır. Pasif Q-anahtarlama, pikosaniye süreli ve yüksek güçlü optik darbeler elde etmek için kullanılan en basit tekniklerden biridir. Şekil 2.13'de görüldüğü gibi pasif Q-anahtarlama kazanç bölümüne darbe üreticiyle akım uygulanırken soğurma bölümüne DC güç kaynağı ile negatif gerilim uygulanır. Ayrıca, lazerin kazanç bölümüne uygulanan elektriksel darbelerin süresinin azaltılmasıyla daha simetrik Q-anahtarlama darbeler elde edildiği de gösterilmiştir (Çakmak et al. 2011). Q-anahtarlama optik darbeler elde etmek için kaybın taşıyıcı yoğunluğu ile değişiminin, kazancın taşıyıcı yoğunluğu ile değişiminden çok daha hızlı olması gerekir. Ayrıca kazanç bölümündeki taşıyıcı yaşam süresinin, soğurma bölümündeki taşıyıcı yaşam süresinden büyük olması gerekir (Çakmak 2000).

2.4.3 Mod Kilitleme Tekniği

En kısa süreli darbe üretim tekniği mod kilitleme tekniğidir. Mod kilitleme tekniğinde kavite içinde oluşan modların faz kilitlemesi yoluyla darbeler üretilir ve bu teknik kavite uzunluğu tarafından belirlenen tekrarlama frekansında osilasyona izin verir. Şekil 2.14’de kavite uzunluğuna bağlı olarak gidiş dönüş yapan modların kazanç ve soğurma bölümüne bağlı olarak darbe oluşumu gösterilmiştir. Oluşan darbelerin tekrarlama oranlarını arttırmak için, optik kavitedeki kazanç ve soğurma bölümünün toparlanma süresinin hızlı olması gerekir.



Şekil 2. 14 Mod kilitli lazerde kazanç, kayıp ve optik güç etkisi (Pusino 2014).

Bu hızlı toparlanma süresinin mod kilitli yarıiletken lazerler için birkaç önemli etkisi vardır. Soğurma toparlanma hızı, pasif mod kilitli bir yarıiletken lazerde ulaşılabilir tekrarlama oranı için bir üst sınır belirlediği için, ölçülen toparlanma süresi, çok yüksek frekanslı mod kilitlemenin (örneğin, 100 GHz) mümkün olduğu anlamına gelir. Ayrıca doyumlu soğurucunun çok hızlı toparlanma süresine sahip olması, kusurlu yansıma önleyici kaplamaların neden olduğu çoklu darbe oluşumunu bastırmak için kullanılabilir (Derickson et. al 1992). Soğurma bölümünün toparlanma hızı, kazanç bölümünün toparlanma hızından daha yüksek ise optik darbenin tepe kısmı haricinde her yerde lazer kayıpları, kazançtan daha yüksek olur. Böylece optik darbenin sadece tepe kısmı yükseltilerek ve diğer kısımları zayıflatılarak darbe süresi kısaltılmış olur.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Yarıiletken lazerlerin kavite uzunlukları çok kısa olduğundan, modlar arası frekans aralığı genellikle 100GHz'den yüksektir. Bu nedenle harici kavite kullanılarak mod kilitli lazerlerde ışığın kavitedeki gidiş-geliş zamanı artırılır ve modlar arasındaki frekans farkı azaltılır. Bu amaçla tüm mod kitleme tekniklerinde yarıiletken lazerler harici lens ve bir geri besleme aynası içerirler (Duman 2014). Lazerde oluşan modlar arasındaki frekans farkı,

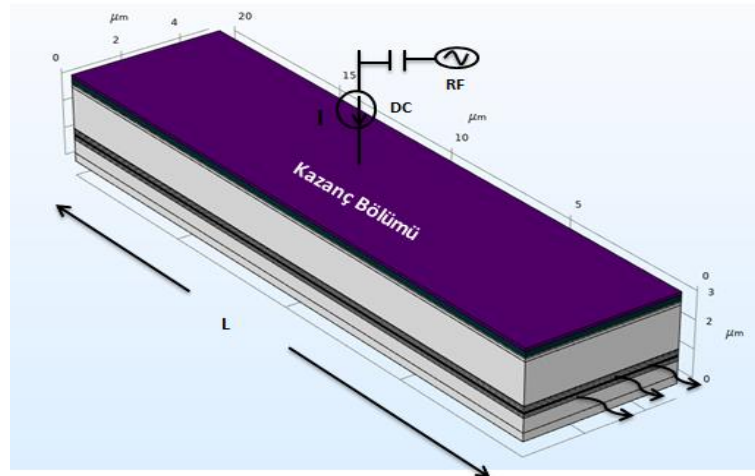
$$\vartheta = \frac{c}{2L} \quad (2.4)$$

ile ifade edilirken darbeler arası zaman ,

$$T = \frac{2L}{c} \quad (2.5)$$

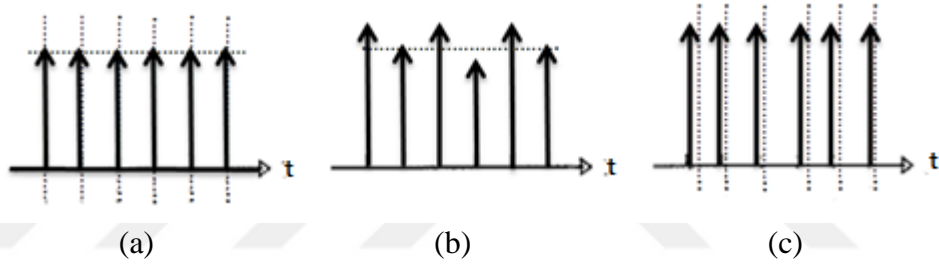
ifade edilir. Burada c kavitedeki ışığın hızını, L kavite boyunu ve ν komşu modlar arasındaki frekans aralığını göstermektedir (Okur 2000). Mod kilitli yarıiletken lazerler kendi içinde üç bölüme ayrılır.

2.4.3.a Aktif mod kilitli yarıiletken lazerler



Şekil 2. 15 Aktif mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı.

Bu teknikte Şekil 2.15'deki gibi lazerin kazanç bölümü lazer kavitesinde gidiş dönüş süresine yaklaşık olarak eşit olan yüksek frekanslı elektriksel darbelerle ve DC akımla modüle edilir. Elektriksel modülasyon zaman domeninde kaymayı (timing jitter) azaltmak ve optik darbeleri senkronize etmek için kullanılır. Aygıttan çok kısa optik darbeler elde etmek için elektriksel modülasyon darbeleri dar olmalı ve aygıtın net kazanç bölgesinin kısa bir zamanda oluşması için yüksek genlikte olmalıdır (Derickson et al. 1992). Zaman domeninde kaymanın az olduğu darbeler istendiğinde aktif mod kilitleme tekniğinden yararlanır. Bunun nedeni, RF modülasyon kaynağının aynı zamanda darbe periyodunda kararlılık oluşturmada işlev görmesidir. RF kaynağı, doğası gereği kendiliğinden gürültülü olmasına rağmen, darbe periyodunu daha etkili bir şekilde stabilize eder. Pasif mod kilitleme böyle dengeleyici bir kaynağa sahip değildir ve bu nedenle çok daha yüksek zaman domeninde kaymaya sahiptir (Lau 2000).



Şekil 2. 16 (a) İdeal darbe katarı (b) genlik titreşimli darbe katarı (c) zaman domeninde kaymalı (timing jitter) darbe katarı (Lau 2000).

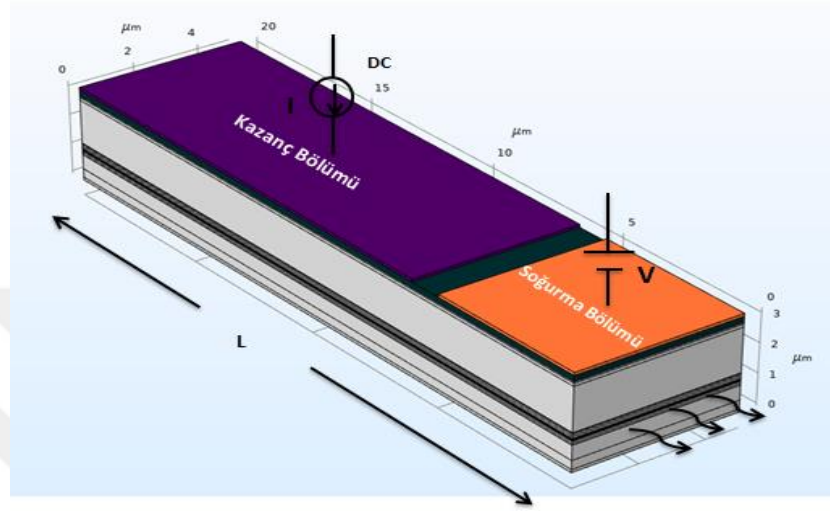
Harici kaviteli yarıiletken lazerlerde aktif mod kilitleme nispeten daha kolaydır ve kavite uzunluğuna bağlı olarak birkaç GHz tekrarlama oranına sahip darbe katarı sağlar. Aktif mod kilitleme tekniğindeki eksiklik, lazer çıkışından elde edilen darbelerin diğer mod kilitleme tekniklerine göre daha uzun olmasıdır.

2.4.3.b Pasif mod kilitli yarıiletken lazerler

Pasif mod kilitleme tekniği kısa süreli optik darbe üretmek için birçok lazer sisteminde kullanılır. Şekil 2.17'de lazerin uzun bölümü kazanç elde etmek için ileri yönde kutuplanırken, lazerin ters kutuplanmış kısa bölümü soğurma bölümüdür. Soğurma bölümünün ters kutuplanması taşıyıcıların daha hızlı süpürülmesini sağlarken toparlanma süresini de kısaltmaya yarar (Pusino 2014). Pasif mod kilitlemede gerekli olan en önemli unsur uygun soğurucu kısmıdır. Yarıiletken lazerlerde kullanılan

2. KAYNAK ÖZETLERİ

doymulu soğurucu yavaş doymulu soğurucudur (Haus 1975). Bunun anlamı bir optik darbenin ön kenarının soğrulduğu ve optik darbenin arka kenarının ise optik darbenin soğurma bölümünden geçişi sırasında zayıflamadığı anlamına gelir; böylece mod-kilitli lazer kavitesi optik darbede net bir daralmaya neden olur.

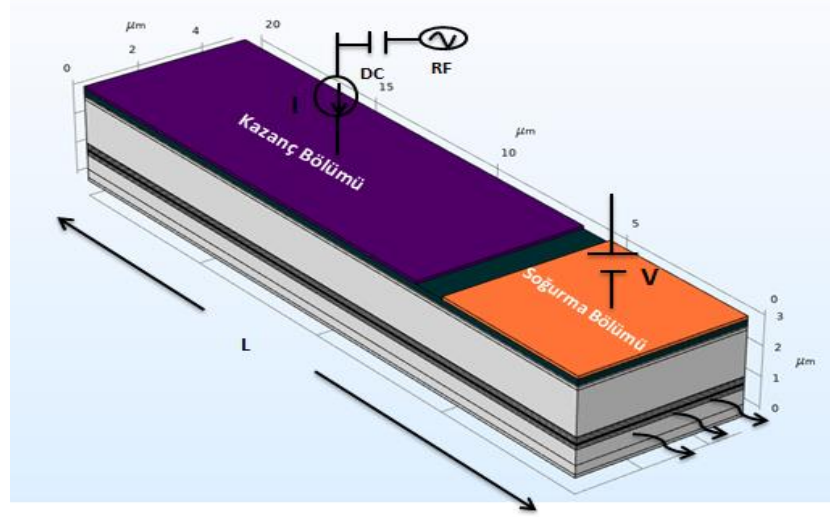


Şekil 2.17 Pasif mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı.

Pasif mod kilitleme için soğurucu bölümün daha kısa olması, kazanç bölümünden daha yüksek kayba sahip olması anlamına gelir yani kazançtan daha hızlı doyurulabilir. Bununla birlikte doymulu soğurucuda taşıyıcı yoğunluğu seviyesi kazanç bölümünden daha küçük olduğu için yarıiletkenlerde doymulu soğurucular kazanç bölgelerinden daha düşük doyma enerjisine sahiptir ve yapılan çalışmalarda darbe sürelerinin soğurucu doymuluğundaki azalmayla azalacağını göstermektedir (Vasil'ev 1995). Başarılı pasif mod kilitlemesi için, doyurulabilir soğurucu, kazanç ortamının kazancından daha düşük bir enerjide doyurulmalıdır (Derickson et al. 1992).

2.4.3.c Hibrit mod kilitli yarıiletken lazerler

Şekil 2.18'de görüldüğü gibi hibrit mod kilitleme, aktif ve pasif mod kilitlemenin bir birleşimidir. Lazerin kazanç bölümüne DC ve RF elektrik akımları birlikte uygulanırken soğurma bölümüne ters kutuplanmış gerilimin uygulanmasıyla hibrit mod kilitli yarıiletken lazer yapısı oluşur.



Şekil 2. 18 Hibrit mod kilitli yarıiletken lazerin yapısı.

Çok bölümlü harici kaviteli mod kilitli yarıiletken lazerler için darbe genişlikleri, aktif, pasif veya hibrit mod kitleme teknikleri için tipik olarak 1-3 ps aralığındadır. Genel olarak hibrit ve pasif mod kitleme teknikleri kullanarak kısa optik darbeler elde etmek daha kolaydır (Derickson et al. 1992).

Çarpışan mod kitleme metodunda ise ters yönde ilerleyen iki optik darbe, lazerin orta bölümünde bulunan soğurucu bölümünde etkileşime sokulur. Tüm bölümlerde hem DC hem RF kontaklar bulunur (Fan et al. 2000). Bu sayede doyum modülasyonu oluşur ve optik darbelerin lazer içindeki gidiş-geliş zamanının yarısı kadar periyoda sahip daha kısa darbeler elde edilir (Çakmak 2000).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1 Materyal

Mod kitleme tekniği optik darbenin bir dalga kılavuzu ortamı boyunca yayılması olarak tanımlanmaktadır (Avrutin et al. 2000). Bu yayılan kısa süreli optik darbelerin analizleri için hem konuma hem zamana bağımlı modelleme tekniklerine ihtiyaç duyulur. Bu amaçla, lazer dalga kılavuzundaki optik alanı ileri ve geri yönde yayılan dalgaların birleşimi olarak ele alan ilerleyen dalga denklemleri kullanılabilir (Williams et al. 2004).

3.1.1 İlerleyen Dalga Denklemleri

Dalgaların z eksenini doğrultusunda yayıldığı kabul edilirse ileri ve geri yönde yayılan dalgaların zamana ve konuma bağımlı ilerleyen dalga denklemleri,

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial F(t,z)}{\partial t} + \frac{\partial F(t,z)}{\partial z} = (g - i\delta - \alpha_i)F(t,z) + i\kappa R(t,z) + s_f(z,t) \quad (3.1)$$

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial R(t,z)}{\partial t} - \frac{\partial R(t,z)}{\partial z} = (g - i\delta - \alpha_i)R(t,z) + i\kappa F(t,z) + s_r(z,t) \quad (3.2)$$

ile ifade edilir. Bu ifade yalnızca yayılma doğrultusundaki dalgaları ele almakta, x ve y eksenleri doğrultusundaki enine alan bileşenlerini ihmal etmektedir (Williams et al. 2004). Burada $F(t,z)$ ileri yönde $R(t,z)$ ise geri yönde yayılan dalgaları ifade eder. Denklemlerde v_g lazer kavitesindeki darbelerin grup hızını, taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olan g lokal kazancı, δ merkez frekanstan kayma miktarını ifade eder. g ve δ değişkendir ve kutuplama şartlarından etkilenirler. Lazerin soğurma bölümü için çözümlenirken g , $-g$ ile değiştirilir. κ ise bağlaşma (coupling) parametresini ifade ederken $s_f(z,t)$ ve $s_r(z,t)$ ise lazer ortamındaki spontane emisyon gürültüsünü ifade eder. δ merkez frekanstan kayma miktarının ifadesi ise şöyledir:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (\eta_{eff}(t,z) - \eta_0) \quad (3.3)$$

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu ifadede λ_0 lazerin merkez dalgaboyunu, η_{eff} etkin kırılma indisini ve η_0 ise $N(t,z)=n_t$ durumundaki kırılma indisini ifade eder. Burada η_{eff} etkin kırılma indisi ise,

$$\eta_{eff}(t, z) = \eta_0 - \frac{\lambda_0}{4\pi} \Gamma \alpha_H g_G [N(t, z) - n_t] \quad (3.4)$$

ile ifade edilir. Bu ifadede α_H çizgi genişliği iyileştirme faktörünü gösterir. Denklem 3.1 ve 3.2 deki $s_f(z,t)$ ve $s_r(z,t)$ gürültü terimlerinin rastgele olasılıklı olması gerekir. Gauss dağılımlı ve aşağıdaki korelasyonu sağlayan kompleks ifadeler, gürültü terimi olarak kullanılabilir (Duman 2014). Simülasyon gerçekleştirilirken ileri ve geri yönlerde yayılan dalgalar için gürültü terimlerinin aynı olduğu düşünülebilir.

$$\langle s(t, z) s(t, z') \rangle = 0 \quad (3.5)$$

$$\langle s(t, z) s^*(t, z') \rangle = \sqrt{(\beta K B N^2) / v_g L} \quad (3.6)$$

Bu ifadede β spontane emisyon faktörünü, K Petermann faktörünü, B ışınımsal rekombinasyon sabitini, N elektron taşıyıcı yoğunluğunu ve L kavite boyunu belirtir.

Foton yoğunluğunun zamana ve konuma bağlı ifadesi $P(t,z)$ ise,

$$P(t, z) = |F(t, z)|^2 + |R(t, z)|^2 \quad (3.3)$$

ile ifade edilir.

Kazanç ve soğurma bölümlerindeki lokal kazanç ve soğurma, taşıyıcı ve foton yoğunluğuna bağlı olarak sırasıyla aşağıdaki ifadeler ile verilebilir:

$$g(N) = \frac{\Gamma g_G [n_t - N(t, z)]}{2(1 + \varepsilon_g P(t, z))} \quad (3.4)$$

$$g(N) = \frac{\Gamma g_A [N(t, z) - n_t]}{2(1 + \varepsilon_A P(t, z))} \quad (3.5)$$

Bu ifadelerde Γ hapsedilme faktörünü, $g_{G/A}$ diferansiyel kazanç sabitini, n_t transparan taşıyıcı yoğunluğunu, $\varepsilon_{G/A}$ kazanç bastırma oranını ve P foton yoğunluğunu göstermektedir.

İlerleyen dalga denklemlerine ek olarak taşıyıcı oran denklemlerinin tanımlanması gerekir. Kazanç ve soğurma bölümleri için taşıyıcı oran denklemleri sırasıyla,

$$\frac{\partial N(t, z)}{\partial t} = \frac{I}{eV} - \frac{N(t, z)}{\tau_G} - \frac{2v_g P(t, z)g}{\Gamma} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial N(t, z)}{\partial t} = -\frac{N(t, z)}{\tau_A} + \frac{2v_g P(t, z)g}{\Gamma} \quad (3.7)$$

ile ifade edilir. Burada I lazerin kazanç bölümüne uygulanan akımı, e elektron yükünü, V aktif tabaka hacmini, $\tau_{G/A}$ ise kazanç ve soğurma bölümlerindeki taşıyıcı yaşam süresini gösterir. Lazerin kazanç bölümündeki taşıyıcı yaşam süresi,

$$\tau_G = (A + BN(t, z) + CN(t, z)^2)^{-1} \quad (3.8)$$

ifadesiyle hesaplanır. Bu ifadeye A ışınımsal olmayan taşıyıcı rekombinasyon sabitini ve C Auger taşıyıcı rekombinasyon sabitini belirtir (Adams et al. 1987; Zhang et al. 1994; Zhu et al. 1997; Avrutin et al. 2000; Williams et al. 2004; Zatni et al. 2004).

Denklem 3.1 ve 3.2’i nümerik olarak çözebilmek için lazerin çok küçük segmentlere ayrıldığı düşünülebilir. Bu durumda her bir segmentteki alan değerleri bir önceki segmentteki ve zamandaki alan değerine bağlı olarak hesaplanabilir (Duman 2014). Buna göre Denklem 3.1 ve 3.2’deki kısmi türevler zaman alanında birinci dereceden fark yaklaşımı ile aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\frac{\partial F(t, z)}{\partial t} = \frac{F(t - \Delta t, z) - F(t, z)}{\Delta t} \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial F(t, z)}{\partial z} = \frac{F(t, z + \Delta z) - F(t, z)}{\Delta z} \quad (3.10)$$

$$\frac{\partial R(t, z)}{\partial t} = \frac{R(t - \Delta t, z) - R(t, z)}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial R(t, z)}{\partial z} = \frac{R(t, z) - R(t, z - \Delta z)}{\Delta z} \quad (3.12)$$

Bu ifadelerde Δz ve Δt sırasıyla simülasyonda kullanılan birim uzunluk ve zaman basamağını gösterir ve aralarında,

$$\Delta z = v_g \Delta t \quad (3.13)$$

bağıntısı vardır. Bu bağıntılar kullanılarak Denklem 3.1 ve Denklem 3.2 yeniden düzenlenip yazılırsa aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$F(t + \Delta t, z + \Delta z) - F(t, z) = \Delta z[(g - i\delta - \alpha_i)F(t, z) + ikR(t, z) + s_f]e^{i\theta} \quad (3.14)$$

$$R(t + \Delta t, z - \Delta z) - R(t, z) = \Delta z[(g - i\delta - \alpha_i)R(t, z) + ikF(t, z) + s_r]e^{i\theta} \quad (3.15)$$

Burada θ ileri ve geri yönde yayılan dalgaların uğrayacağı faz kaymasını gösterir. Çalışılan lazer yapısı Fabry-Perot kavite olduğu için simülasyon boyunca $\theta=0$ seçilebilir. İleri ve geri yönde yayılan dalgaların lazerin yansıtıcı kenarlarına ulaşmaları durumundaki şartları sağlaması gerekir.

$$F(t, 0) = R_L R(t, 0) \quad (3.16)$$

$$R(t, L) = R_R F(t, L) \quad (3.17)$$

Denklem 3.16 ve Denklem 3.17 'deki $F(t,0)$, $R(t,0)$ terimleri lazerin en soldaki segmentinde oluşan alan bileşenlerini ve $F(t,L)$, $R(t,L)$ terimleri ise lazerin en sağdaki segmentinde oluşan alan bileşenlerini gösterir. Ayrıca R_L ve R_R ayna yansıtıcılıklarıdır (Zhang et al. 1994; Zatni et al. 2004).

Kazanç ve soğurma bölümlerine sahip olan pasif mod kilitli yarıiletken lazerin modellenmesi için yukarıda verilen denklemler kullanılır.

3.1.2 Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin Basit Modellemesi

Fabry-Perot yarıiletken lazer osilasyonu, kazanç sabitinin kayıp sabitinden büyük olduğu frekanslarda oluşur. Fabry-Perot lazer çok geniş kazanç bant genişliğine sahip olduğu için kavite içerisinde birçok boylamsal mod oluşur. Oluşan bu boylamsal modlar, Denklem 2.1'de gösterildiği gibi L aynalar arası mesafeye, k boylamsal mod sayısına, λ_0 serbest uzay dalgaboyuna ve n kavitenin kırılma indisine bağlı olan şartı sağlar. Ayrıca kazanç bant genişliği içindeki lazerden yayılan ışığın spektral şekli, boylamsal modların frekansı ile belirlenebilir.

Mod kilitli yarıiletken lazerin kolay bir şekilde anlaşılabilmesi için Gaussian dağılımı ve Fourier dönüşümü kullanılabilir ([http:// en. pudn. com/ Download /item /id/2768473](http://en.pudn.com/Download/item/id/2768473)). Denklem 3.19'daki ifadeyle oluşturulan Gaussian eğrisi, Fourier dönüşümü yardımıyla zaman alanından frekans alanına dönüştürülerek oluşturulan rastgele sıralı modların Gaussian dağılımı ile birleştirilmesiyle spektral şekli oluşturulabilir.

$$f(\sigma, t) = e^{-\left(\frac{t}{\sigma\sqrt{\log(2)/2}}\right)^2} \quad (3.19)$$

Burada σ standart sapmayı, t belli bir zaman aralığını ifade eder.

3.2 Yöntem

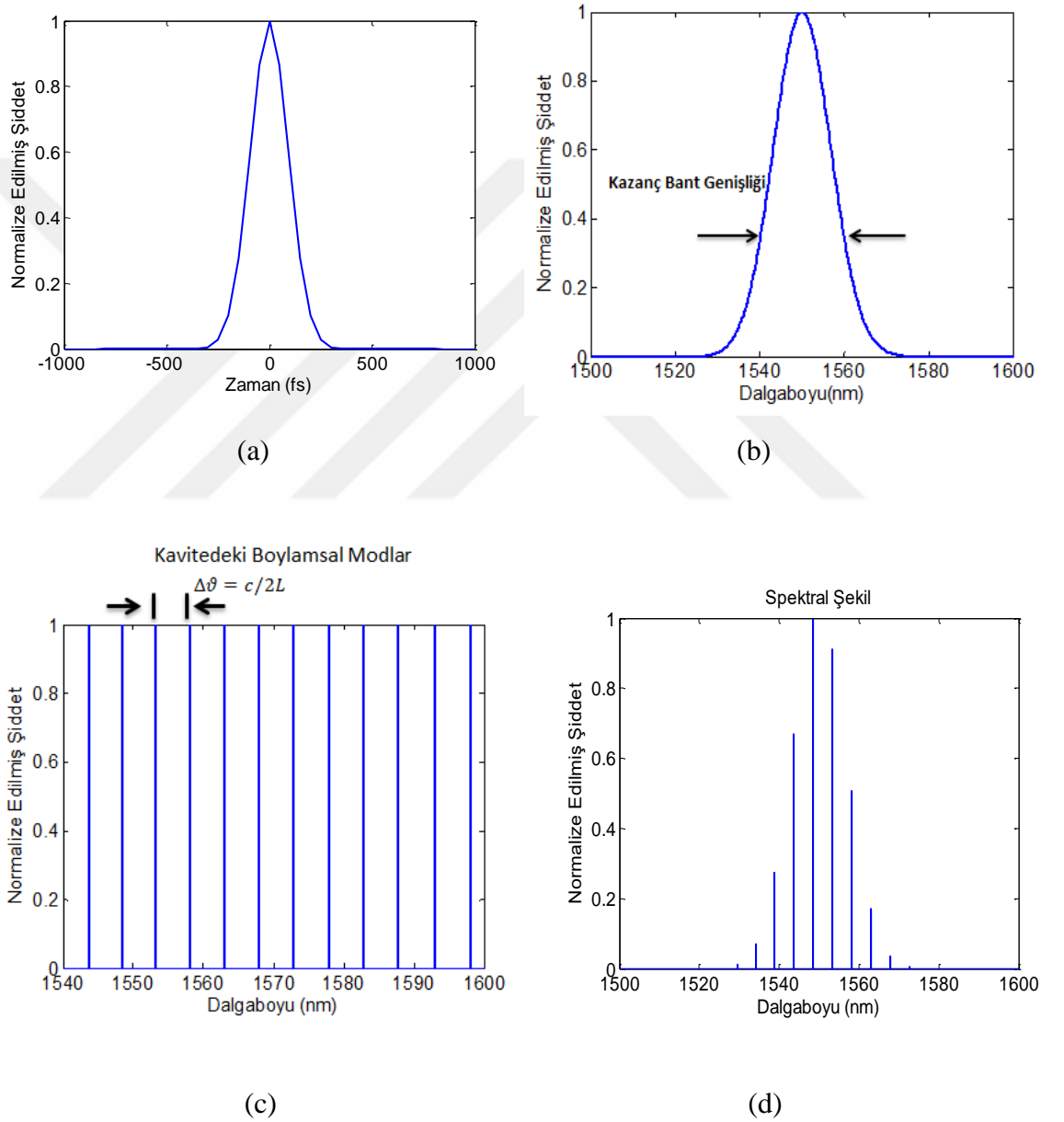
3.2.1 Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin MATLAB İle Modellenmesi

Kazanç bölümü ve soğurma bölümünden oluşan pasif mod kilitli yarıiletken lazer ilerleyen dalga denklemleri kullanılarak MATLAB yazılımı ile modellendi. İlerleyen dalga denklemleri kullanılarak foton yoğunluğu hesaplanır. Denklem 3.6 ve Denklem 3.7 ile ifade edilen taşıyıcı oran denklemleri, hesaplanan foton yoğunluğu da kullanılarak birinci dereceden Newton-Raphson veya Runge-Kutta teknikleri ile çözüldü (Williams et al. 2004). Kısmi türevle zaman domeninde birinci dereceden fark yaklaşımı ile belli aralıklar tanımlanarak lazerin kazanç bölümleri ve soğurma bölümleri oluşturuldu ve Denklem 3.14 ve Denklem 3.15 MATLAB yazılımıyla çözdürüldü. İki ve tek kazanç bölümlü ve tek soğurma bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerin güç-zaman, foton yoğunluğu-zaman, taşıyıcılığı yoğunluğu-zaman ve darbe genişlikleri karşılaştırmalı olarak elde edildi. MATLAB yazılımıyla kazanç ve soğurma bölümlerinin farklı uzunlukları için birbirleriyle karşılaştırılmalı sonuçları elde edildi. Ayrıca soğurma bölümüne uygulanan akım ve kazanç bölümüne uygulanan akımın farklı değerleri için, çıkış gücü ve darbe genişliğine etkisi bu yöntemle incelendi.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

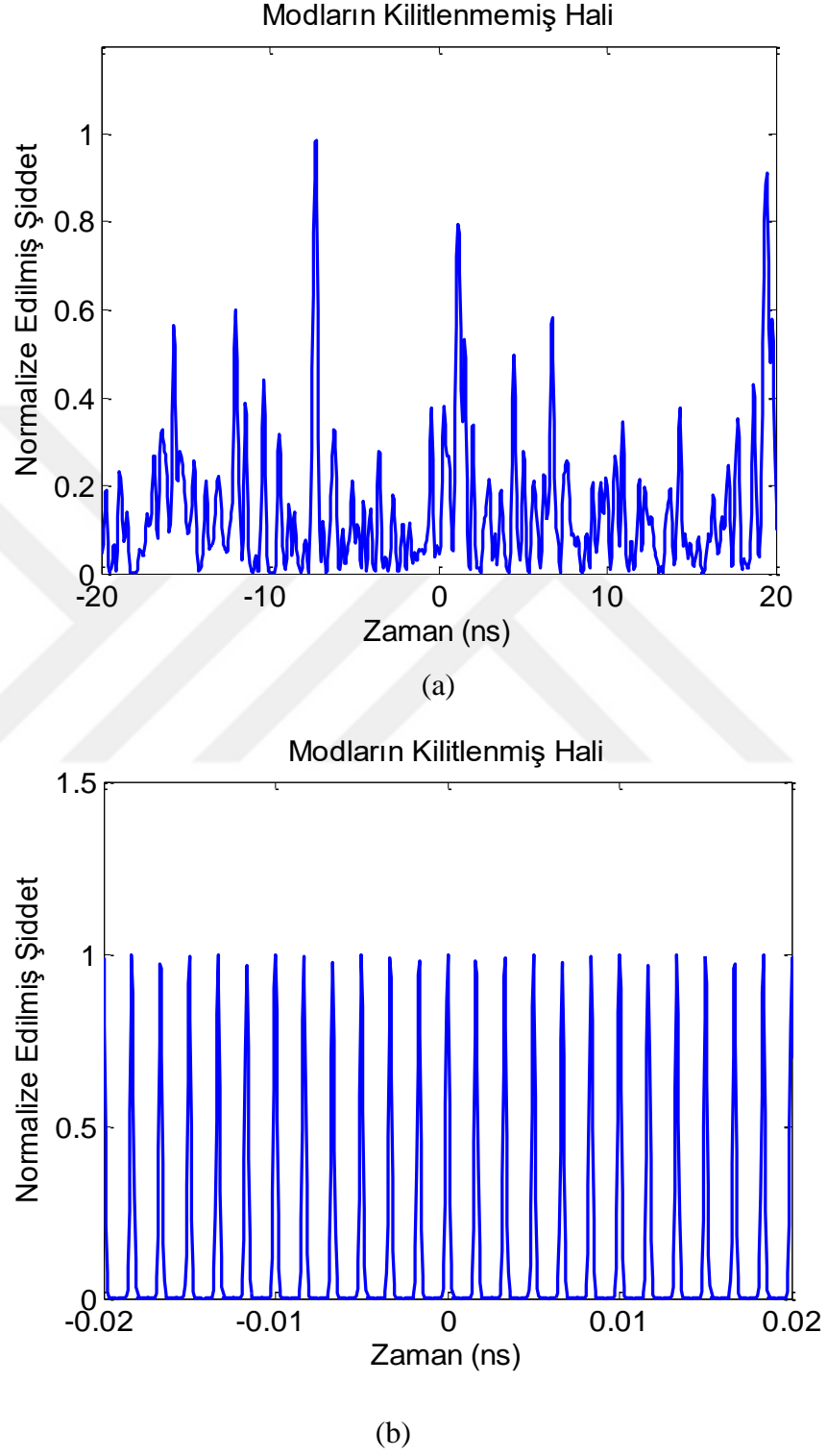
4.1 Mod Kilitli Lazerin Modelleme Sonuçları

Mod kilitli yarıiletken lazerin MATLAB’de Gaussian dağılımı ve Fourier dönüşümü yardımıyla modellenmesi Şekil 4.1’de gösterilmektedir.



Şekil 4.1 (a) Gaussian dağılımı (b) Gaussian dağılımının Fourier dönüşümü (c) kavitedeki boylamsal modlar (d) lazer çıkışı spektral şekli.

Aynı yazılımda lazer çıkışında modların kilitlenmemiş ve kilitlenmemiş hali ise Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 2 a) Modların kilitlenmemiş hali b) modların kilitlenmemiş hali

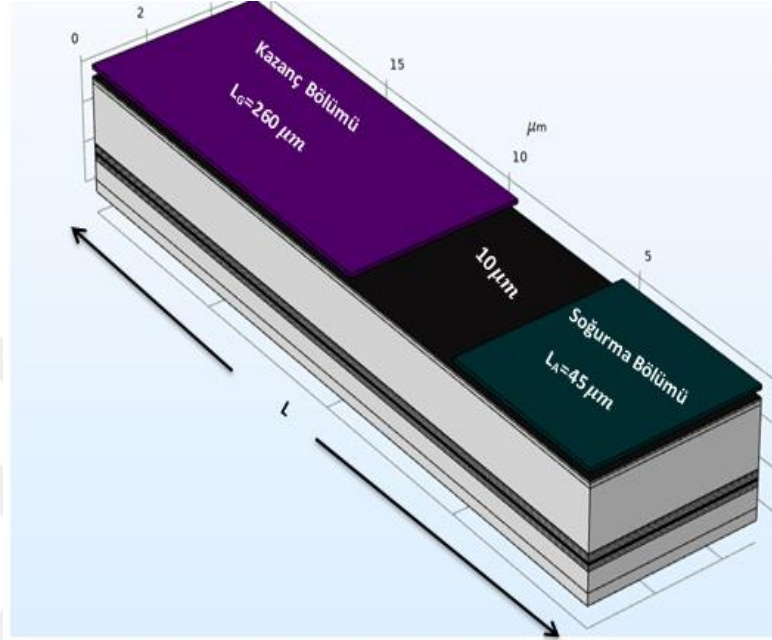
Fabry-Perot lazer kavitesinin uzunluğuna bağlı olarak gidiş-dönüş frekansı ile belirlenen bir frekans aralığında oluşan modlar Şekil 4.1 (b)'de görüldüğü gibidir. Lazerin aktif bölgesinin kazanç bant genişliğinden dolayı, bu modlardan sadece bir veya birkaçı lazer kararlı durumdayken eşik üstünde var olurlar. Tipik olarak, bu modların fazı Şekil 4.2 (a)'da görüldüğü gibi düzenli değildir. Bu, zamanla rastgele dağıtılan ancak optik ışığın yüksek frekansından dolayı nispeten sabit olan bir lazer çıktısı üretir. Bu modların fazları Şekil 4.2 (b)'de görüldüğü gibi birbirine kilitlendiklerinde o zaman ışığın çıkışı bir darbe katarı olur. Frekans alanında oluşan darbelerin zaman alanındaki değişimi ters Fourier dönüşümü ile elde edilebilir. Şekil 4.2 (b)'deki gibi zaman alanındaki ani yükselmeler optik darbelere karşılık gelir.

Çizelge 4.1 Simülasyon parametreleri

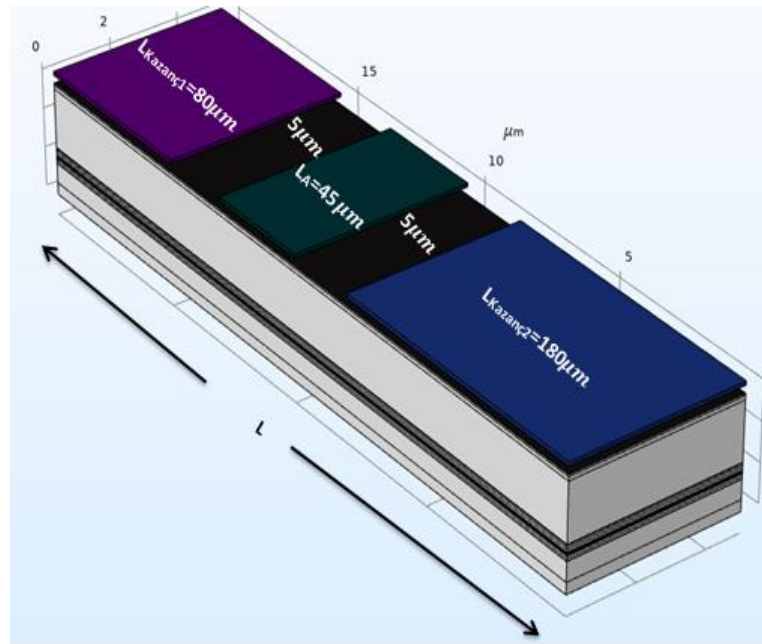
PARAMETRE	SEMBOL	DEĞER
Planck sabiti	h	6.626×10^{-34}
Işık hızı	c	3×10^8 m/s
Elektron yükü	q	1.6×10^{-19} C
Spontane emisyon faktörü	β_{sp}	10^{-3}
Kazanç bölümünün uzunluğu	L_G	260 μm
Soğurma bölümünün uzunluğu	L_A	45 μm
Aktif bölge genişliği	w	5 μm
Aktif bölge kalınlığı	d	0.2 μm
Hapsetme faktörü	Γ	0.3
Petermann faktörü	K	1
Etkin kırılma indisi	$\bar{\mu}$	3.4
Grup kırılma indisi	μ_g	4
Çizgi genişliği geliştirme faktörü	β_c	3.2
Dahili kayıplar	α_{int}	40 cm^{-1}
Kazanç sabiti	g_G	$3 \times 10^{-20} \text{m}^{-1}$
Taşıyıcı yoğunluğu	n_t	$2 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$
Işınımsal olmayan taşıyıcı rekombinasyon sabiti	A_{nr}	10^8s^{-1}
Işınımsal rekombinasyon sabiti	B	$10^{-10} \text{cm}^3/\text{s}$
Auger taşıyıcı rekombinasyon sabiti	C	$3 \times 10^{-29} \text{cm}^6/\text{s}$
Foton yaşam süresi	τ_p	10 ps
Dalgaboyu	λ	1550 nm

4.2 Tek ve İki Kazanç Bölümlü Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerlerin Karşılaştırmalı Sonuçları

Pasif mod kilitli yarıiletken lazerin farklı konfigürasyonları Şekil 4.3'de verilmektedir.

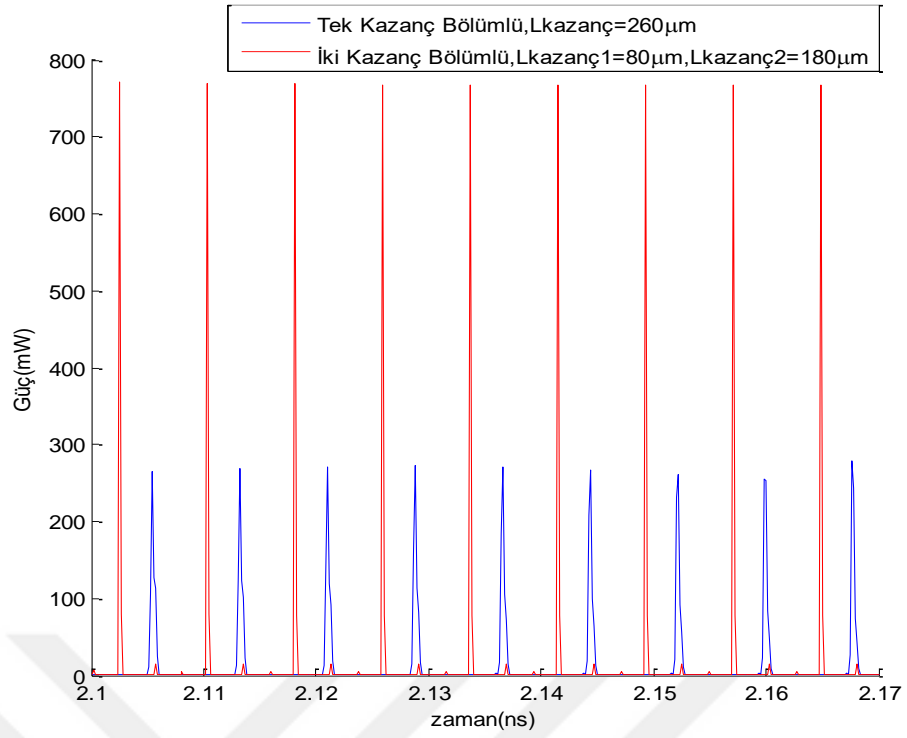


(a)

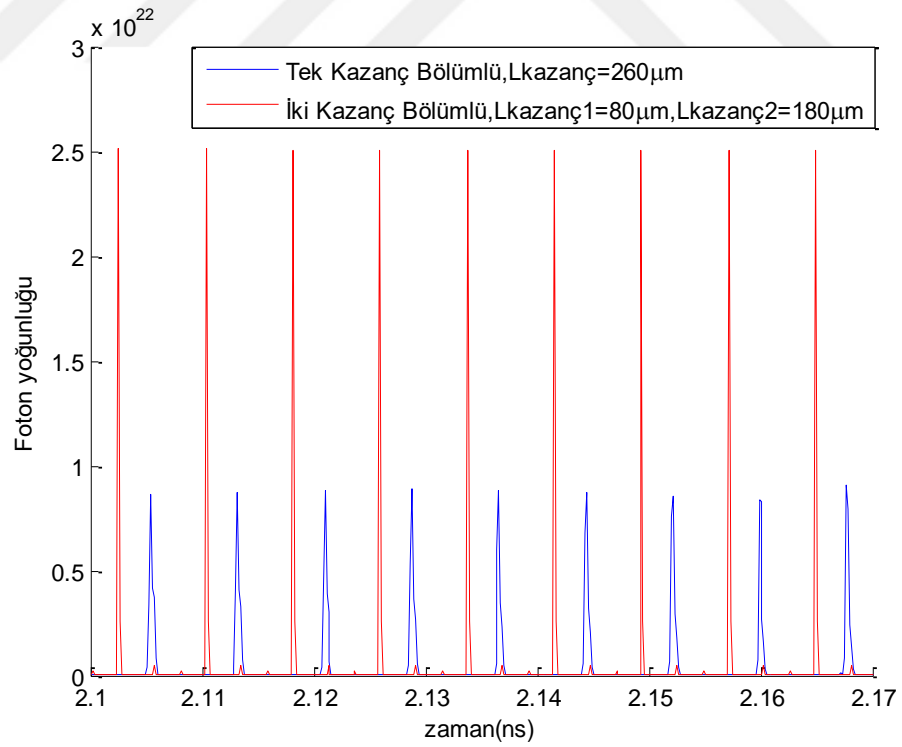


(b)

Şekil 4. 3 a) Tek ve b) İki kazanç bölmeli diyot lazerlerin şematığı.

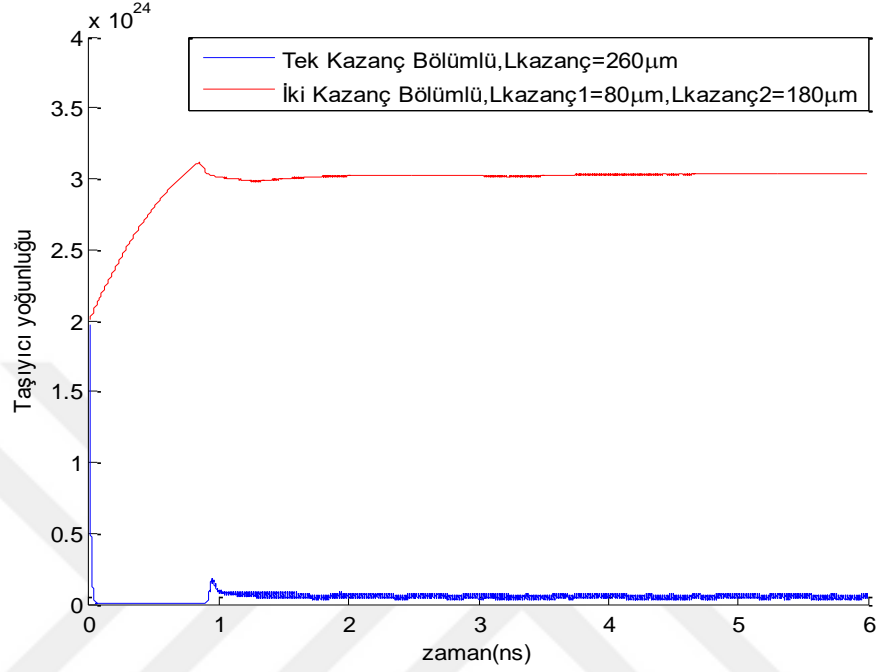


Şekil 4. 4 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin güç-zaman grafiği.



Şekil 4. 5 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin foton yoğunluğu-zaman grafiği.

Çizelge 4.1'deki parametreler kullanılarak ve lazerin kazanç bölümüne 120mA, soğurma bölümüne -0,5V gerilim uygulanarak MATLAB'de karşılaştırmalı sonuçlar elde edildi.

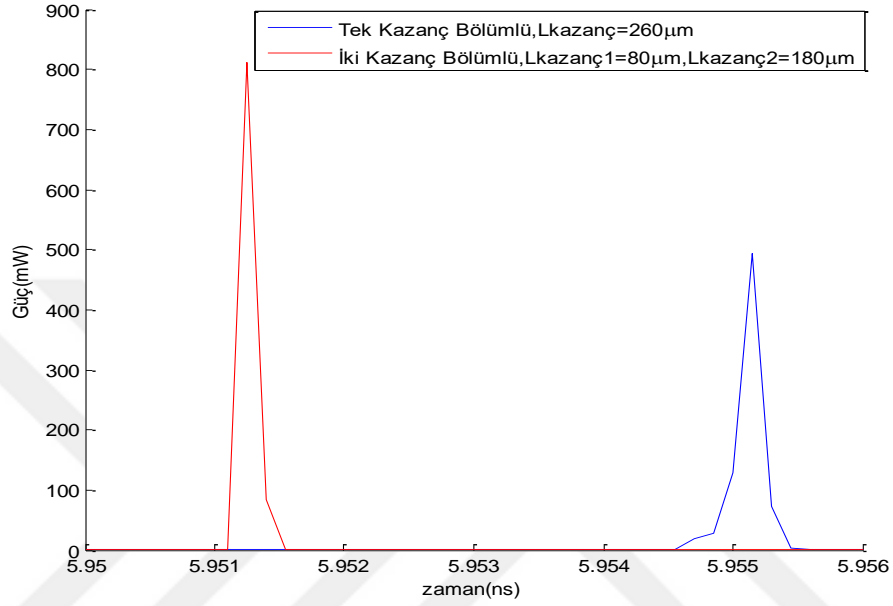


Şekil 4. 6 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin taşıyıcı yoğunluğunun değişimi.

İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde tek kazanç bölümüne sahip olan yarıiletken lazere göre daha fazla güç çıkışı elde edilmiştir (Şekil 4.4). Bunun nedeni Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da görüldüğü gibi iki kazanç bölümlü pasif mod kilitli yarıiletken lazerde taşıyıcı yoğunluğunun ve foton yoğunluğunun daha fazla olmasıdır. Böylece kazanç bölümlerinde oluşan taşıyıcılar uyarılmış emisyonla tek kazançlı yarıiletken lazere göre daha fazla rekombinasyon oluştururlar ve güç çıkışı artar.

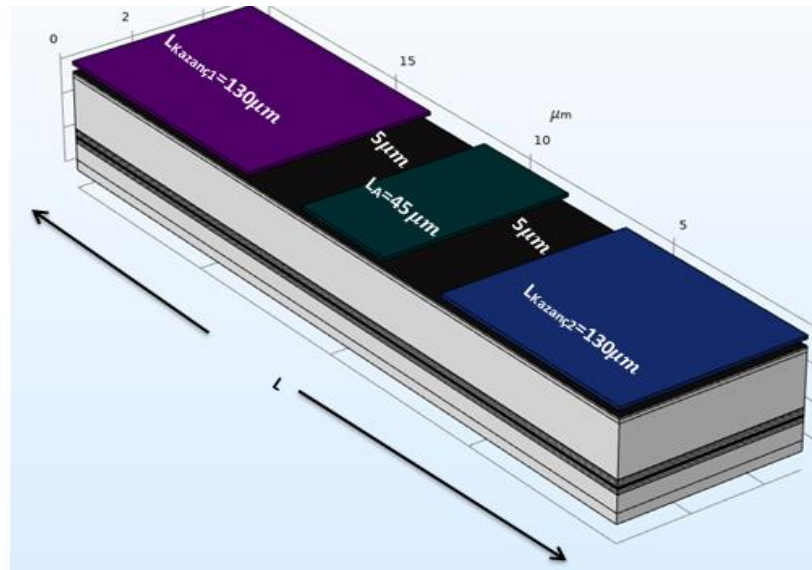
Şekil 4.7'de tek ve iki kazanç bölümlü lazerin darbe genişliği karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. 260 µm kazanç uzunluğuna sahip tek kazançlı yarıiletken lazerin darbe genişliği 1,83 ps iken iki kazanç bölümüne sahip yarıiletken lazerde darbe genişliği 1,57 ps olarak elde edilmiştir. İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde ters kutuplanmış soğurma bölümünde taşıyıcıların daha hızlı süpürülmesinden dolayı daralan darbenin tekrar kazanç bölümüne girmesiyle darbede

yükseltme işleminin gerçekleşmiş olduğu ve bu nedenle de darbe genişliğinin tek kazançlı lazer yapısına göre daha dar olarak elde edildiği düşünülmektedir. Burada soğurma bölümünden sonra oluşturulan ikinci bir kazanç bölümüne sahip yarıiletken lazerde kazanç bölümünün yükselteç olarak davrandığını görülmektedir.

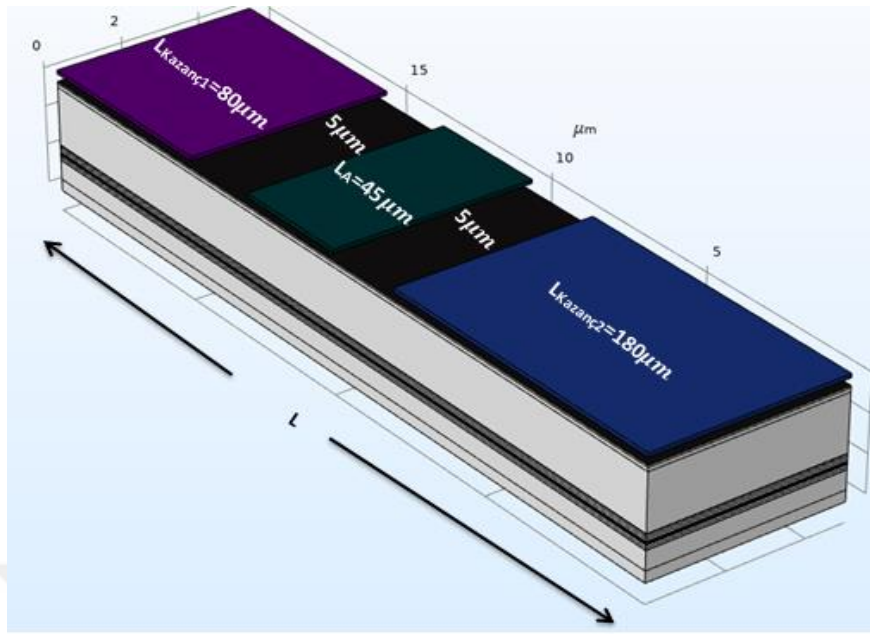


Şekil 4. 7 Tek ve iki kazanç bölümlü lazerin darbe genişliği grafiği.

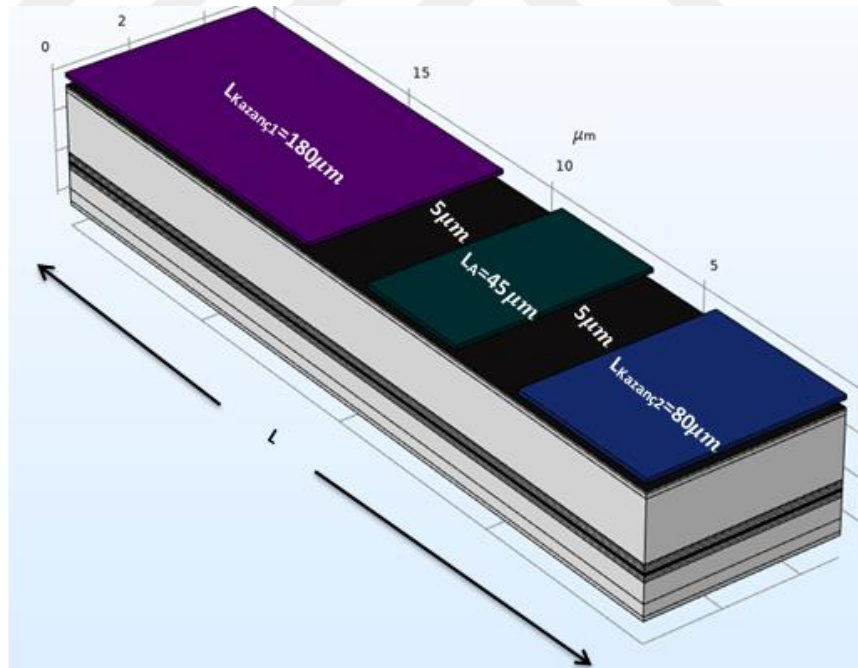
4.3 İki Kazanç Bölümlü Pasif Mod Kilitli Yarıiletken Lazerin Farklı Uzunluklar İçin Karşılaştırmalı Sonuçları



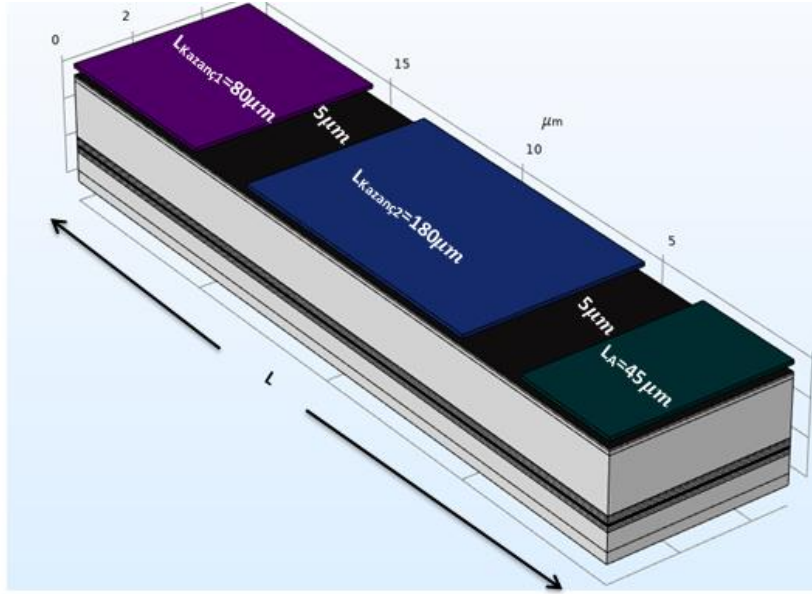
(a)



(b)



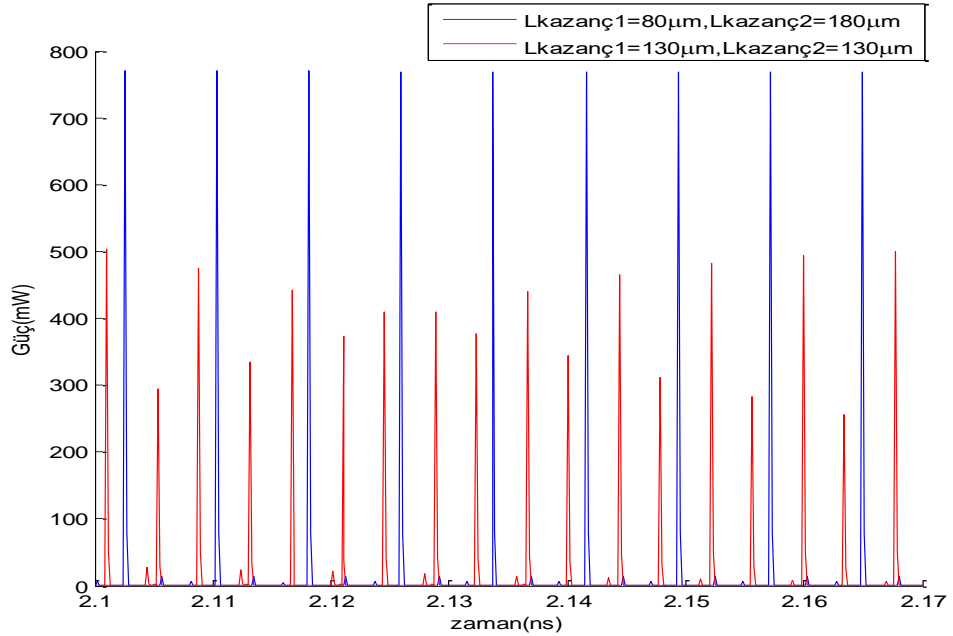
(c)



(d)

Şekil 4. 8 Farklı kazanç uzunluklarına sahip olan yarıiletken lazerler (a, b ve c şekillerinde soğurma bölümü ortada iken d’de son kısımda bulunmaktadır).

Tüm konfigürasyonlarda $L_A=45 \mu\text{m}$ iken, Şekil 4.8 (a)’da $L_{\text{kazanç}1}=130 \mu\text{m}$, $L_{\text{kazanç}2}=130 \mu\text{m}$; Şekil 4.8 (b)’de $L_{\text{kazanç}1}=80 \mu\text{m}$, $L_{\text{kazanç}2}=180 \mu\text{m}$ uzunluklar için elde edilen sonuçlar aşağıda gösterilmektedir.

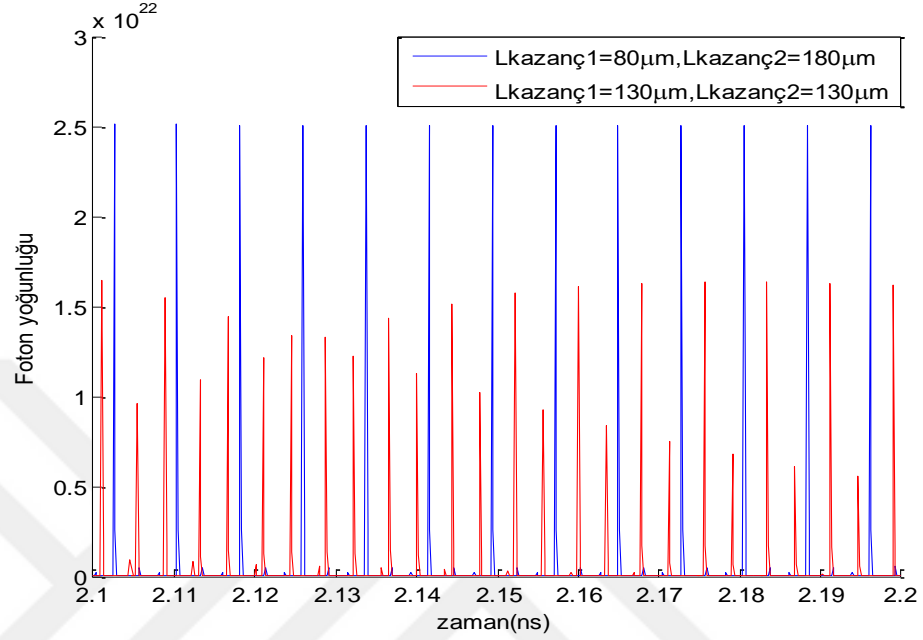


Şekil 4. 9 $L_{\text{kazanç}1}=130 \mu\text{m}$, $L_{\text{kazanç}2}=130 \mu\text{m}$ ve $L_{\text{kazanç}1}=80 \mu\text{m}$, $L_{\text{kazanç}2}=180 \mu\text{m}$ için güç-zaman değişimi.

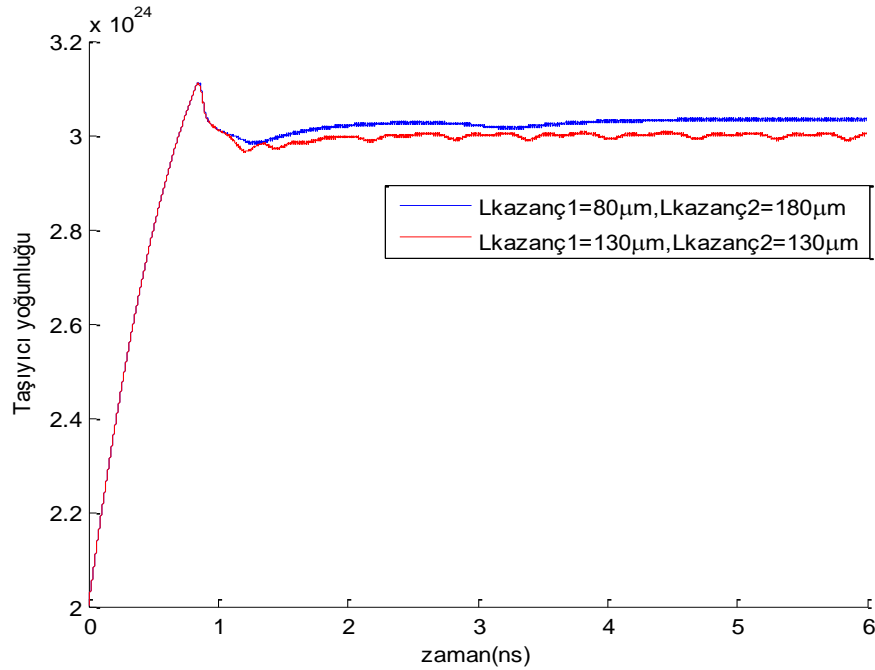
Şekil 4.9’da $L_{\text{kazanç}1}$ ve $L_{\text{kazanç}2}$ uzunlukları eşit alınarak ve alınmayarak lazer yapısının çıkış güçleri karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Burada kazanç

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

uzunlukları eşit olmayan yarıiletken lazerin çıkış gücünün daha fazla olduğu görülmektedir. Kazanç uzunlukları eşit alındığında çıkışta oluşan darbeler kararsız olmakta ve salınımlar oluşmaktadır.

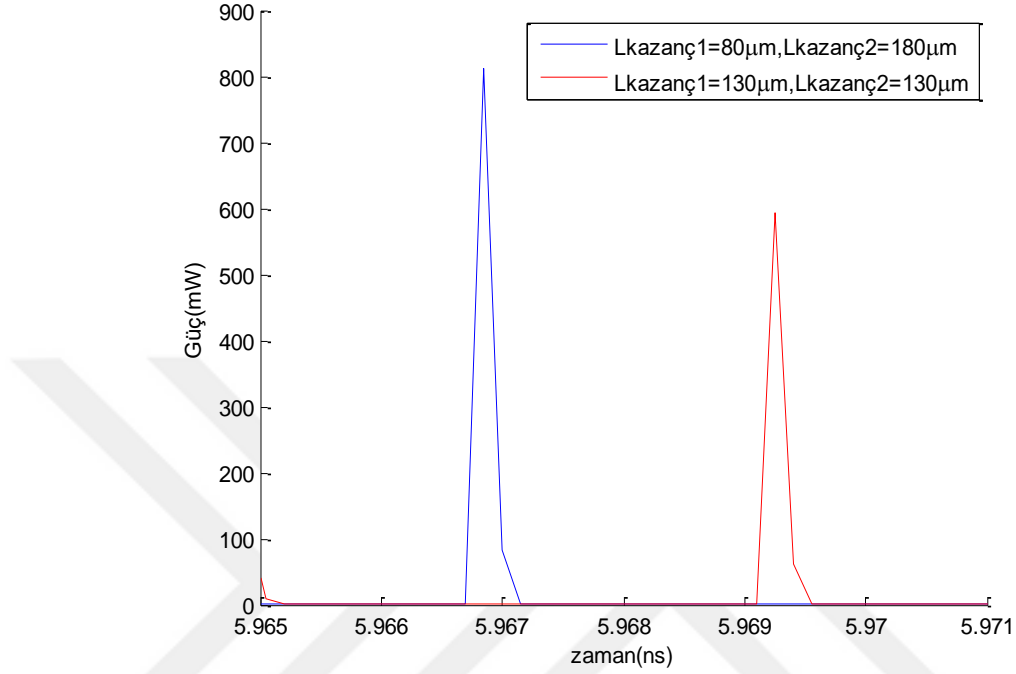


Şekil 4. 10 $L_{kazanç1}=130 \mu m$, $L_{kazanç2}=130 \mu m$ ve $L_{kazanç1}=80 \mu m$, $L_{kazanç2}=180 \mu m$ için foton yoğunluğu-zaman değişimi.



Şekil 4. 11 $L_{kazanç1}=130 \mu m$, $L_{kazanç2}=130 \mu m$ ve $L_{kazanç1}=80 \mu m$, $L_{kazanç2}=180 \mu m$ için taşıyıcı yoğunluğu-zaman değişimi.

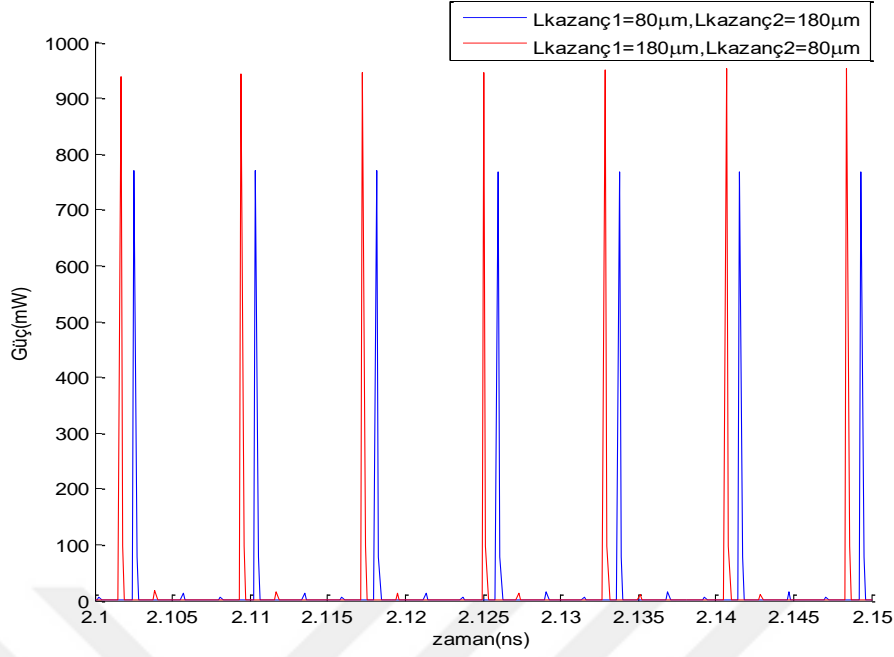
Şekil 4.10'daki foton yoğunluğu-zaman grafiği ve Şekil 4.11'de taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiğinde kazanç uzunlukları eşit olmayan yarıiletken lazerin değerleri daha yüksek olduğu için, gücü daha yüksektir.



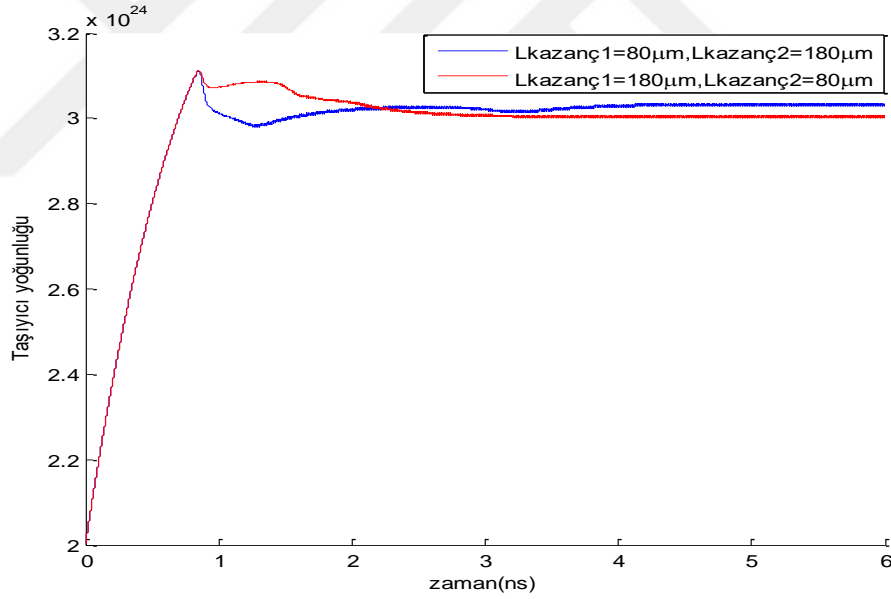
Şekil 4. 12 $L_{kazanç1}=130\mu m$, $L_{kazanç2}=130\mu m$ ve $L_{kazanç1}=80\mu m$, $L_{kazanç2}=180\mu m$ için darbe genişliği-zaman değişimi.

Şekil 4.12'de iki kazanç bölümlü lazerlerin darbe genişlikleri gösterilmiştir. $L_{kazanç1}=130\mu m$ $L_{kazanç2}=130\mu m$ kazanç uzunluğuna sahip yarıiletken lazer ile $L_{kazanç1}=80\mu m$ $L_{kazanç2}=180\mu m$ yarıiletken lazerden elde edilen darbe genişlikleri 1,57 ps olarak hesaplanmıştır.

Şekil 4.8 (b) ($L_{kazanç1}=80\mu m$, $L_{kazanç2}=180\mu m$) ve Şekil 4.8 (c)'de ($L_{kazanç1}=180\mu m$, $L_{kazanç2}=80\mu m$) verilen lazer konfigürasyonları için elde edilen güç-zaman ve taşıyıcı yoğunluğu-zaman değişimleri sırasıyla Şekil 4.13 ve 4.14'de gösterilmiştir. Burada, birinci kazanç bölümünün uzunluğu daha uzun olan lazerin (Şekil 4.8 (c)'de verilen konfigürasyon) çıkış gücü daha fazladır. Çünkü başlangıçta daha fazla taşıyıcı aktif bölgeye enjekte edilmektedir. $L_{kazanç1}=130\mu m$ $L_{kazanç2}=130\mu m$ kazanç uzunluğuna sahip yarıiletken lazer ile $L_{kazanç1}=80\mu m$ $L_{kazanç2}=180\mu m$ yarıiletken lazerden elde edilen darbe genişlikleri 1,57 ps olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.13 $L_{kazanç1}=180 \mu m$ $L_{kazanç2}=80 \mu m$ ve $L_{kazanç1}=80 \mu m$ $L_{kazanç2}=180 \mu m$ için karşılaştırmalı güç-zaman değişimleri.

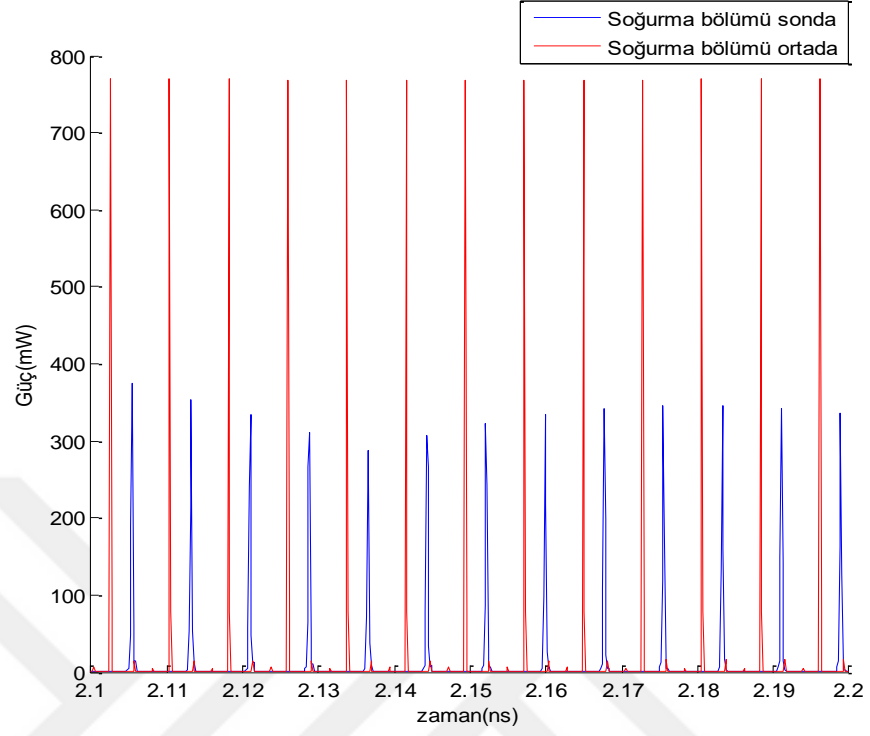


Şekil 4.14 $L_{kazanç1}=180 \mu m$ $L_{kazanç2}=80 \mu m$ ve $L_{kazanç1}=80 \mu m$ $L_{kazanç2}=180 \mu m$ için taşıyıcı yoğunluğu-zaman değişimi.

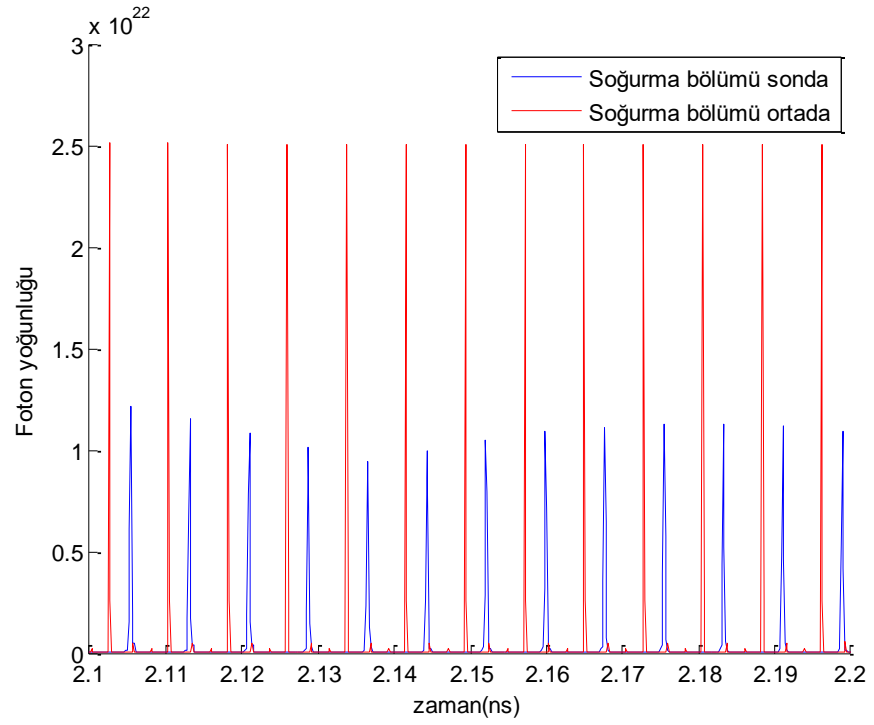
Soğurma bölümü en sonda (Şekil 4.7 (d)) ve iki kazanç bölümünün arasında (Şekil 4.7(c)) iken ($L_{kazanç1}=80 \mu m$ ve $L_{kazanç2}=180 \mu m$) iki bölümlü pasif mod kilitli yarıiletken lazerin karşılaştırmalı sonuçları ise Şekil 4.15 (a)'da güç-zaman, 4.15 (b)'de foton yoğunluğu-zaman ve 4.15 (c)'de taşıyıcı yoğunluğu-zaman değişimleri şeklinde gösterilmiştir. Soğurma bölümü sonda olan yarıiletken lazer yapısında değerler daha

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

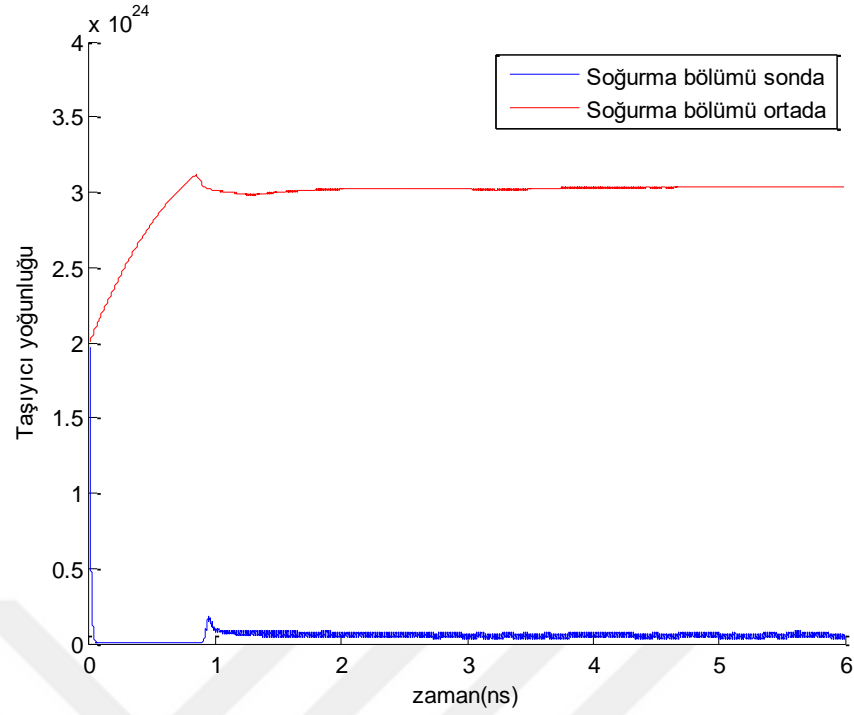
düşüktür. Çünkü soğurma bölümünün oluşan darbeleri zayıflatarak çıkış gücünü azalttığı öngörülmektedir.



(a)



(b)

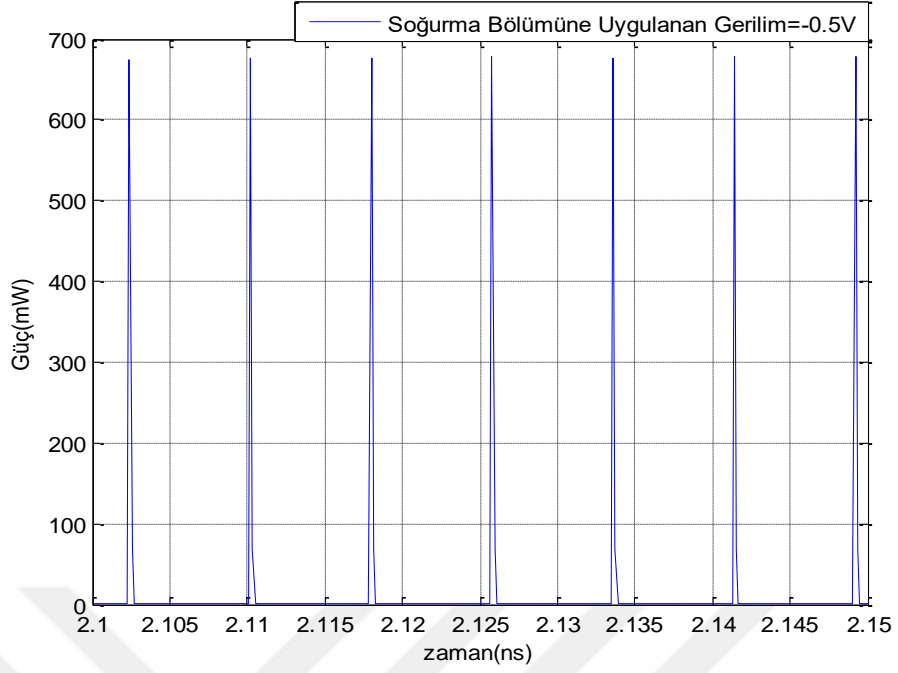


(c)

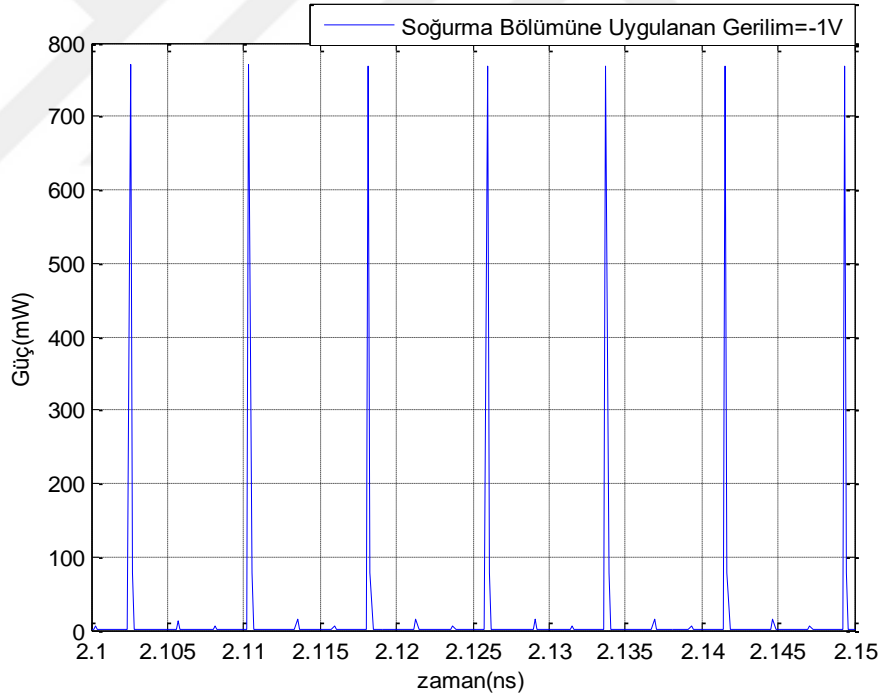
Şekil 4. 15 İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde soğurma bölümü son kısımdayken ve kazanç bölümleri arasındayken karşılaştırılması (a) güç-zaman grafiği (b) foton yoğunluğu-zaman grafiği (c) taşıyıcı yoğunluğu-zaman grafiği.

4.4 Akım ve Gerilim Değişiminin Çıkış Gücü ve Darbe Genişliğine Etkisi

Soğurma bölümüne uygulanan gerilim Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de olduğu gibi ters yönde artırıldıkça, taşıyıcıların süpürülme süresi azalmakta ve güç artmaktadır; bununla birlikte yan modlar oluşmaktadır. Darbe genişliği, -0,5V’da 1,57 ps iken -1V’da 0,14 ps olarak hesaplanmıştır. Yan modlar oluşmasına rağmen darbe genişliğinin azaldığı görülmüştür. Negatif yüksek gerilimde soğurma hızı artar ve soğurucunun toparlanma hızı azalır. Bunun sonucunda soğurucunun doyuma ulaşma süresi geciktirilir ve darbe genişliği azalır.



Şekil 4. 16 Soğurma bölümüne uygulanan -0,5V gerilimde güç-zaman grafiği.

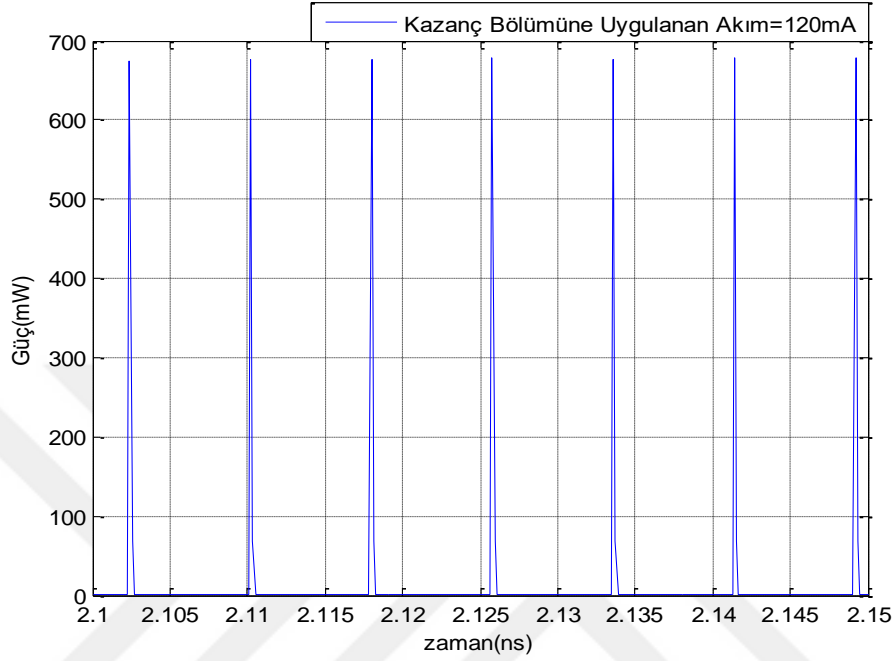


Şekil 4. 17 Soğurma bölümüne uygulanan -1 V gerilimde güç-zaman grafiği.

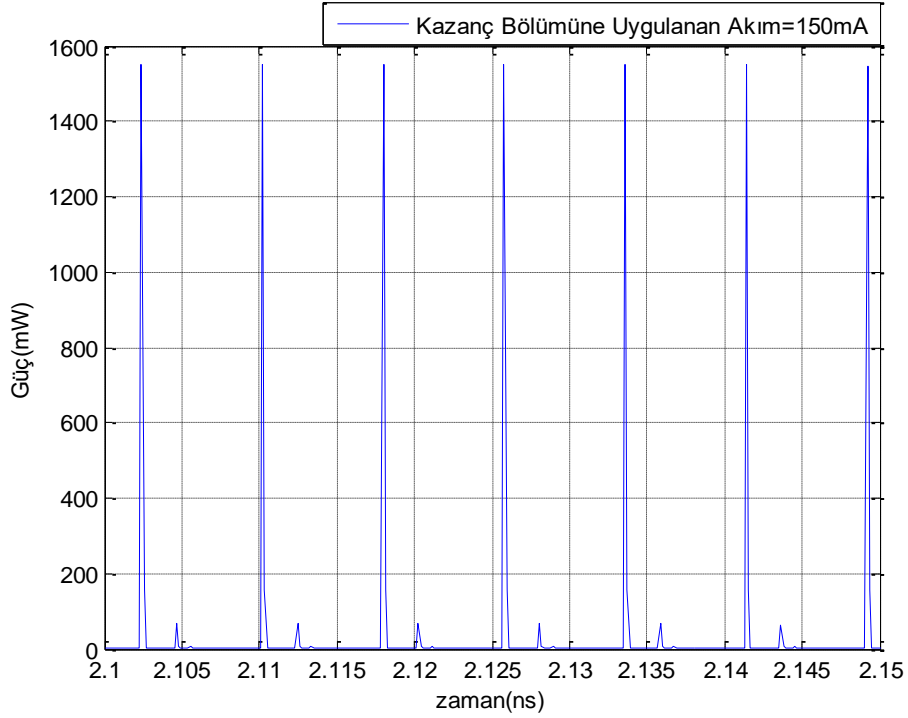
Kazanç bölümüne uygulanan akım artırıldıkça taşıyıcı sayısı artmakta ve böylece güç de artmakta; ancak bununla birlikte yan modlar oluşmaktadır (Şekil 4.18 ve 4.19). Darbe genişliği 120 mA'de 1,57 ps iken 150 mA'de 5,36 ps olarak hesaplanmıştır.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Eğer akım daha çok arttırılırsa modların kilitlemesi için gerilim de arttırılmalıdır. Çünkü ters kutuplu gerilimin artırılmasıyla soğurma bölümünde taşıyıcı süpürülmesi daha hızlı gerçekleşmektedir.



Şekil 4. 18 Kazanç bölümüne uygulanan 120 mA akımda güç-zaman grafiği.

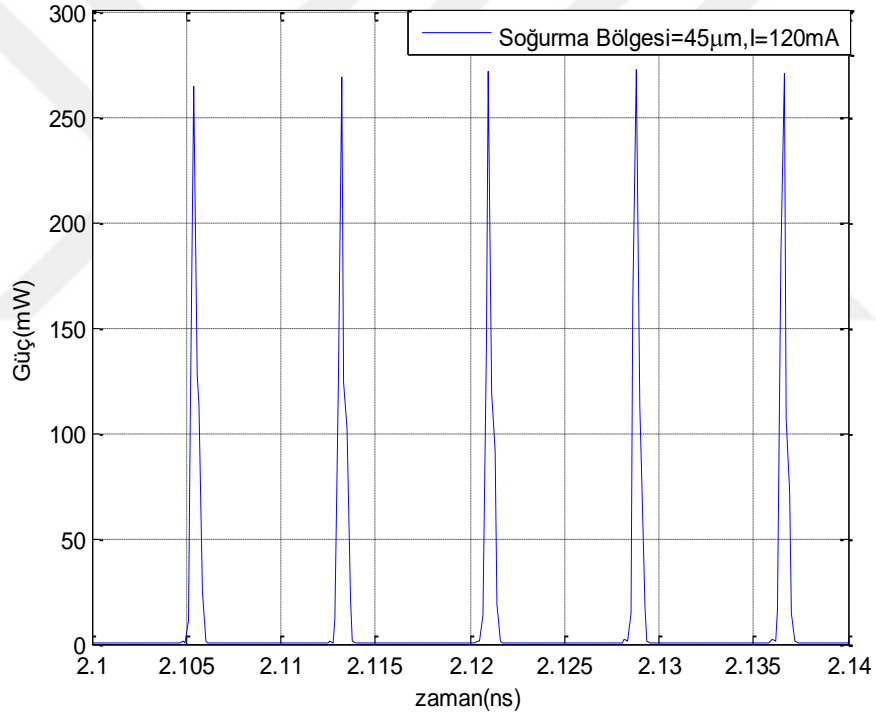


Şekil 4. 19 Kazanç bölümüne uygulanan 150mA akımda güç-zaman grafiği.

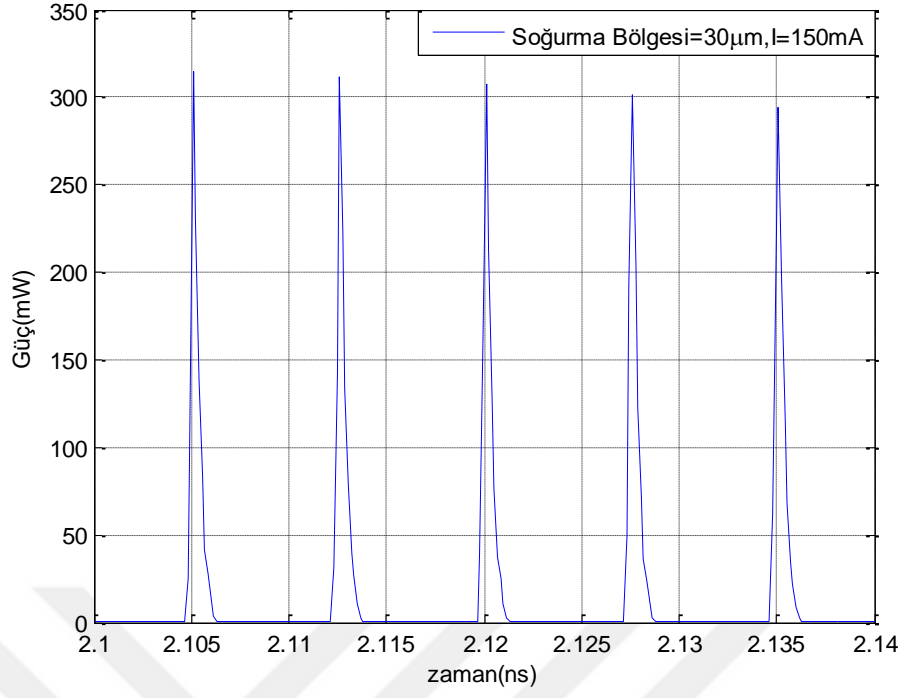
4.5 Soğurma Bölgesi Uzunluğunun Çıkış Gücü ve Darbe Genişliğine Etkisi

Soğurma bölgesi uzunluğu arttıkça soğurma miktarı artmakta ve darbe genişliği azalmaktadır. Akım 120 mA ve soğurma bölgesinin uzunluğu $L_A=30\mu m$ iken darbe genişliği 52 ps ve $L_A=45\mu m$ iken darbe süresi 1,83 ps olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi akım 150 mA ve $L_A=30\mu m$ iken darbe genişliği de 5,04 ps olarak ölçülmüştür. Soğurma bölgesi uzunluğu azaldıkça darbe genişliğinin arttığı gözlenmekte olup eğer uzunluk azaltılırken akım da artırılırsa darbe genişliği azalmakta ve güç artmaktadır.



Şekil 4. 20 Soğurma bölgesi uzunluğu= 45µm ve uygulanan akım I=120mA iken güç-zaman değişimi.



Şekil 4. 21 Soğurma bölgesi uzunluğu= 30µm ve uygulanan akım I=150mA iken güç-zaman değişimi.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada 1550 nm dalgaboylu pasif mod kilitli yarıiletken lazerin ilerleyen dalga denklemlerini kullanarak MATLAB'da modellenmesi yapılmıştır. Bu modellemede yarıiletken lazerin çıkış gücü, foton yoğunluğu, taşıyıcı yoğunluğu ve darbe genişliği hesaplanmış ve çeşitli durumlara göre karşılaştırmalı sonuçları elde edilmiştir.

Pasif mod kilitli yarıiletken lazerin kazanç bölümü tek ve iki bölümlü olarak tasarlanmış ve karşılaştırmalı sonuçlar elde edilmiştir. İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde tek kazanç bölümüne sahip olan yarıiletken lazere göre daha fazla güç çıkışı elde edilmiştir. Bunun nedeni iki kazanç bölümlü pasif mod kilitli yarıiletken lazerde taşıyıcı yoğunluğu ve foton yoğunluğunun daha fazla olmasıdır. Böylece kazanç bölümlerinde oluşan taşıyıcılar uyarılmış emisyonla tek kazançlı yarıiletken lazere göre daha fazla rekombinasyon oluşturmakta ve güç çıkışı artmaktadır. İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerde ters kutuplanmış soğurma bölümünde taşıyıcıların daha hızlı süpürülmesinden dolayı daralan darbenin tekrar kazanç bölümüne girmesiyle darbeye yükseltme işlemi gerçekleşmiş ve darbe genişliği tek kazançlı lazer yapısına göre daha dar olarak elde edilmiştir. Burada soğurma bölümünden sonra oluşturulan ikinci bir kazanç bölümüne sahip yarıiletken lazerde kazanç bölümünün yükselteç olarak davrandığını görülmüştür.

İki kazanç bölümüne sahip pasif mod kilitli yarıiletken lazerin farklı kazanç bölümü uzunlukları için karşılaştırmalı sonuçları da elde edilmiştir. Kazanç uzunlukları eşit olmayan yarıiletken lazerin eşit olana göre çıkış gücünün daha fazla olduğu görülmüştür. Kazanç uzunlukları eşit alındığında çıkışta oluşan darbeler kararsız olmuştur. Kazanç uzunlukları eşit olmayan yarıiletken lazerlerde taşıyıcı ve foton yoğunlukları daha yüksek olduğu için çıkış gücü de daha yüksek olmaktadır. Bu lazerlerde darbe genişliği analizi de yapılmış ve darbe genişliklerinin değeri aynı elde edilmiştir.

İki kazanç bölümüne sahip yarıiletken lazerlerde de güç çıkışı ve darbe genişliği hesaplamaları da gerçekleştirilmiştir. Birinci kazanç bölümü uzunluğu daha uzun olan

lazerin çıkış gücünün daha fazla olduğu tespit edilmiştir çünkü başlangıçta daha fazla taşıyıcı aktif bölgeye pompalanmıştır. Bununla birlikte darbe genişlikleri yaklaşık olarak aynı hesaplandı. Ancak ikinci kazanç uzunluğu daha uzun olan yarıiletken lazerde yan modlar oluştuğu görüldü. Bunun nedeni ise kazanç bölgesinin darbenin genişlemesine neden olmasıdır.

Soğurma bölümü en sonda ve iki kazanç bölümünün arasında iken iki bölümlü pasif mod kilitli yarıiletken lazerlerin karşılaştırmalı sonuçları da incelenmiştir. Soğurma bölümü ortada olan yarıiletken lazer yapısında değerler daha yüksektir. Çünkü soğurma bölümü oluşan darbeleri zayıflatarak çıkış gücünü azaltmaktadır. Ortada olan soğurma bölümünden sonra tekrar kazanç bölümünün olmasıyla taşıyıcı sayısı ve foton yoğunluğu artmakta ve darbeler yükseltilerek çıkış gücü artırılmaktadır.

Soğurma bölümüne uygulanan gerilim ters yönde artırıldıkça, taşıyıcıların yaşam süresi azalmakta ve güç artmaktadır. Bununla birlikte yan modlar da oluşmaktadır. Darbe genişliğinin gerilim arttıkça azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni ise ters yüksek gerilimde soğurma hızının artması ve bu nedenle soğurucunun toparlanma hızının azalmasıdır. Bunun sonucunda da lazerden elde edilen darbe genişliği azalmaktadır.

Kazanç bölümüne uygulanan akım arttıkça taşıyıcı sayısı artmakta ve böylece güç artmaktadır. Bununla birlikte yan modlar oluşmaktadır. Darbe genişliğinin ise akım arttıkça azaldığı görülmüştür. Eğer akım daha çok artırılırsa modların kilitlenmesi için gerilim de arttırılmalıdır. Çünkü ters kutuplu gerilimin artırılmasıyla soğurma bölümünde taşıyıcı süpürülmesi daha hızlı gerçekleşmektedir.

Soğurma bölgesi uzunluğu arttıkça darbe genişliği azalır. Eğer soğurma bölgesinin uzunluğu azaltılırsa darbenin genişlememesi için akım artırılmalıdır. Çünkü soğurma bölgesi uzunluğu azaldıkça darbe genişliği arttığından, uzunluk azaltıldığında akımın artışıyla darbe genişliği azalmakta ve güç artmaktadır.

KAYNAKLAR

- Adams, M. J., Steventon, A. G., Delvin, W. J., Henning, I. D. 1987. Semiconductor Lasers for Long-Wavelength Optical-Fibre Communications Systems. Short Run Press Ltd., 123 p, England.
- Ahmad F.R. , Rana F. 2008 .Passively Mode-Locked High-Power (210 mW) Semiconductor Lasers at 1.55- μm Wavelength. IEEE Photonics Technology Letters ,20(3), 190-192.
- Alloush M.A., Pilny R.H., Brenner C., Klehr A., Knigge A., Tränkle G., Hofmann M.R. 2018. Passive,active, and hybrid mode-locking in a self-optimized ultrafast diode laser. Novel In-plane Semiconductor Lasers XVII. San Francisco, California, United States, (DOI: 10.1117/12.2290086).
- Arahira S., Oshiba S., Matsui Y., Kunii T. and Ogawa Y. 1994. Terahertz-rate optical pulse generation from a passively mode-locked semiconductor laser diode. Optics Letter ,19(11), 834-836.
- Arahira S, Katoh Y and Ogawa Y. 2001. Generation and stabilization of ultrafast optical pulse trains with monolithic mode-locked laser diodes .Opt. Quantum Electron. 33(7-10),691- 707.
- Avrutin, E.A., Marsh, J.H. and Portnoi, E.L. 2000. Monolithic and multi-gigahertz mode-locked semiconductor lasers: Constructions, experiments, models and applications. IEE Proceedinds-Optoelectronics, 147 (4), 251-278.
- Basu P.K.2015 Semiconductor Laser Theory s.89,India
- Bowers ,J.E., P.A.Morton, A.Mar, and S.W.Corzine. 1989 .Actively Mode-Locked Semiconductor Lasers. Ieee Journal Of Quantum Electronics, 25(6), 1426-1439.
- Cakmak, B. 2000. Fabrication and Characterisation of InP and GaAs Based Optoelectronic Components. Ph.D. Thesis,Department of Electrical And Electronic Engineering University of Bristol, Bristol, United Kingdom.
- Cakmak, B., Karacalı T., Biber M. 2011 .Investigation of Q-switched InP-based 1550 nm Semiconductor Lasers. Optics & Laser Technology,44(5), 1593-1597
- Cakmak, B. 2018 .Yarıiletken Lazerler (Basılmamış) Ders Notları,196
- Derickson D.J., Helkey R.J., Mar A., Karin J.R.,. Wasserbauer J.G., and Bowers J.E. 1992. Short Pulse Generation Using Multisegment Mode-Locked Semiconductor Lasers. IEEE Journal Of Quantum Electronics, 28(10), 2186-2202.

- Duman, Ç. 2014. Kip (Mod) Kilitlemeli Ve Q-Anahtarlamalı Diyot Lazer Üretimi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- Fan H., Wu, C., El-Aasser, M., Dutta, N. K., Koren, U., and Piccirilli, A. B. 2000. Colliding Pulse Mode-Locked Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 12(8), 972-973.
- Haus, H. A. 1975. Theory of mode-locking with a slow saturable absorber. *IEEE J. Quantum Electron.*, 11(9), 736-746,
- Hou L., Stolarz P., Dylewicz R., Haji M., Javaloyes J., Qiu B., Bryce C. 2010. 160-GHz Passively Mode-Locked AlGaInAs 1.55- μm Strained Quantum-Well Compound Cavity Laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 22(10), 727-729.
- Javaloyes J., Balle S., Avrutin E.A., Tandoi, Stolarz P., Sorel M., Ironside C.N., Marsh J. 2013. Dynamics of semiconductor passively mode-locked lasers: Experiment and theory. 15th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), (DOI: 10.1109/ICTON.2013.6602707).
- Kasap S.O. 1999. *Optoelectronics* (Prentice Hall).
- Kawaguchi, H. 1993. Progress in optical functional devices using two-section laser diodes/amplifiers. *Optoelectronics*, 140 (1), 3-15.
- Kuznetsov, M., Tsang, D.Z., Walpole, J.N., Liao, Z.L., Ippen, E.P. 1987. Multistable mode locking of InGaAsP semiconductor lasers. *Applied Physics Letters* October, 51(12), 895 – 897
- Lau, E.K. 2000. Analysis of 1.55 μm Semiconductor Lasers for Modelocked Operation. Ph.D. Thesis Massachusetts Institute of Technology Department of Electrical Engineering and Computer Science, Cambridge
- 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
- Okur, İ. 2000. *Optoelektronik*. Değişim Yayınları, 518 s, Türkiye.
- Pusino, V. 2013. High Power, High Frequency Mode – Locked Semiconductor Lasers. Ph.D. Thesis Electronics and Nanoscale Group School of Engineering University of Glasgow, Scotland
- Rosales R., Merghem K., Martinez A., Akrouf A., Tourenç J.P., Accard A., Lelarge F., Ramdane A. 2011. InAs/InP Quantum-Dot Passively Mode Locked Lasers for 1.55 μm Applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics* 17(5), 1292-1301.

- Salvatore R.A., T. Schrans; Yariv A. 1993. Wavelength tunable source of subpicosecond pulses from CW passively mode-locked two-section multiple-quantum-well laser. 5(7). 756 - 758.
- Siegman, A.E. 1986 Lasers. Mill Valley :University Science Books .
- Silberberg Y., Smith P. W., Eilenberger D. J., Miller D. A. B., Gossard A. C., and Wiegmann W. 1984. Passive mode locking of a semiconductor diode laser. 9(11), 507-509.
- Simos I.H., Simos C. 2018. Synchronization Dynamics of Mutually Injected Passively Mode-Locked Semiconductor Lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol.54(6).
- Tucker R. S. Koren U., Raybon G., Miller B. I., Koch T. L., Eisenstein G. 1989. 40 GHz active mode-locking in a 1.5 μm monolithic extended-cavity laser. Electron. Lett. 25, (10), 621.
- Vasil'ev, P.P. 1993. High-power high-frequency picosecond pulse generation by passively Q-switched 1.55 μm diode lasers. IEEE Journal of Quantum Electronics, 29 (6), 1687-1692.
- Vasil'ev, P.P. 1995. Ultrafast Diode Lasers Fundamentals and Applications. Artech House, 271 p, London.
- Williams, K.A., Thompson, M.G. and White, I.H. 2004. Long-wavelength monolithic mode-locked diode lasers. New Journal of Physics, 6 (1), 1-30.
- Xu, Yu-lan., Lin, Zhong-Xi., Lin, Qi., Chen, Jing-yuan., Su, Hui. 2018. Timing Jitter in Pulsed Injection Locking of a Passively Mode-locked Semiconductor Laser. Acta Photonica Sinica, 47(9).
- Yariv, A., Yeh, Pochi. 2007. Photonics, Oxford yayınları
- Zhang, L.M., Yu, S.F., Nowell, M.C., Marcenac, D.D., Carroll, J.E. and Plumb, R.G.S. 1994. Dynamic analysis of radiation and side-mode suppression in a second-order DFB laser using time-domain large-signal traveling wave model. IEEE Journal of Quantum Electronics, 30 (6), 1389-1395.
- Zhu, B., White, I.H., Penty, A., Wonfor, A., Lach, E. And Summers, H.D. 1997. Theoretical analysis of timing jitter in monolithic multisection mode-locked DBR laser diodes. IEEE Journal of Quantum Electronics, 33 (7), 1216-1220.
- Zatni, A., Khatip, D., Bour, M., Bihan, J.L.B. and Elhaziti, M. 2004. Analysis of the spectral stability of the phase shift DFB laser (3PS-DFB). Annals of Telecommunications, 3 (9), 1031-1044.
- Ziel van der, Vol J.P. 1985. 22B in Semiconductors and Semimetals, ed.by W.T.Tsang. New York:Academic Press

Anonim, 2015. Web Sitesi: [http:// en. pudn. com/ Download /item /id/276847](http://en.pudn.com/Download/item/id/276847), Eriřim Tarihi:20.01.2019



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı-Soyadı : Rukiye AKSAKAL
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 30.10.1994/Erzurum
Medeni Hali : Bekar
Telefon : +9 05344153223
e-mail : rukiyeaksakal.ra@gmail.com

Eğitim

Derece	Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Erzurum Teknik Üniversitesi	(2019-Halen)
Lisans	Atatürk Üniversitesi	2017
Lise	Mecidiye Anadolu Lisesi	2012

Uluslararası Kongre Sunum

Uluslararası Tam Metin Bildiri

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)