

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FEMTOSANİYE LAZER İLE İŞLENEN YAPILARIN KATIHAL
LAZERLERDE UYGULAMALARI VE ÜST ÇEVİRİM POMPALI $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$
LAZERLERİ**

DOKTORA TEZİ

Yağız MOROVA

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

MAYIS 2021

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**FEMTOSANİYE LAZER İLE İŞLENEN YAPILARIN KATIHAL
LAZERLERDE UYGULAMALARI VE ÜST ÇEVİRİM POMPALI $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$
LAZERLERİ**

DOKTORA TEZİ

**Yağız MOROVA
(509142117)**

Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Fizik Mühendisliği Programı

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Seda AKSOY ESİNOĞLU
Eş Danışman: Prof. Dr. Alphan SENNAROĞLU**

MAYIS 2021

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 509142117 numaralı Doktora Öğrencisi Yağız MOROVA, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “FEMTOSANİYE LAZER İLE İŞLENEN YAPILARIN KATIHAL LAZERLERDE UYGULAMALARI VE ÜST ÇEVİRİM POMPALI $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ LAZERLERİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Seda AKSOY ESİNOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Eş Danışman : **Prof. Dr. Alphan SENNAROĞLU**
Koç Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Gönül ERYÜREK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Burçin ÜNLÜ
Boğaziçi Üniversitesi

Doç. Dr. Hakan KARAAĞAÇ
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Elif KAÇAR
Kocaeli Üniversitesi

Doç. Dr. Onur FERHANOĞLU
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : 14 Nisan 2021
Savunma Tarihi : 7 Mayıs 2021





Eşim Berna Morova'ya,



ÖNSÖZ

Öncelikle verdikleri destek ile bu tez çalışmasını mümkün kılan tez danışmanlarım Doç. Dr. Seda AKSOY ESİNOĞLU ve Prof. Dr. Alphan SENNAROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım. Üretim ve öğrenmenin eş zamanlı yürüdüğü doktora eğitimim süresince bana kattıklarını her zaman minnetle anacağım.

Bu tez içeriğini oluşturan deneysel çalışmaların büyük bir kısmı Koç Üniversitesi, Lazer Araştırma Laboratuvarı (LRL) ve Koç Üniversitesi Yüzey Uygulama ve Araştırma Merkezi (KUYTAM) altyapısı kullanılarak yapılmıştır. Bu sebeple Prof. Dr. Alphan SENNAROĞLU'na LRL ekibinin bir parçası olmama fırsat verdiği için ayrıca teşekkür ederim. Kendisiyle çalıştığım dört senelik süre zarfında iş disiplini, üretme motivasyonu, bilimsel merak ve etik konularında bana kattıkları meslek hayatım boyunca rehber olacaktır.

Ayrıca tez izleme komitesi üyeleri Prof. Dr. Gönül ERYÜREK, Prof. Dr. Burçin ÜNLÜ ve Doç. Dr. Hakan KARAAĞAÇ'a tezin gelişimine sundukları destekleri ile daha kapsamlı bir tez içeriği oluşmasına sundukları katkı için teşekkür ederim.

LRL'de beraber çalışma fırsatı bulduğum değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Işın BAYLAM, Dr. Ferda CANBAZ, Dr. Can CİHAN, Dr. İsmail YORULMAZ, Dr. Abdullah MUTİ ve Gökhan TANISALI'ya destekleri ve geçirdiğimiz tüm güzel zamanlar için teşekkür ederim. Ayrıca şu anda LRL ekibinde çalışmaya devam eden Minahil KHAN ve Eylül Nihan KAMUN'a teşekkür ederim.

KUYTAM ekibinden Dr. Barış YAĞCI'ya SEM görüntülerinin alınmasında ve Dr. Hadi JAHANGİRİ'ye lazer kristallerinin parlatılmasında verdikleri destekten ötürü ayrıca teşekkür ederim.

Nanoparçacık karakterizasyonu deneylerindeki desteği için Prof. Dr. Ferid SALEHLİ'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmasını bilimsel araştırma projeleri kapsamında desteklemeleri nedeniyle İTÜ BAP Birimi'ne (ID: 41314) ve TÜBİTAK'a (114F185, 117F464 ve 118F058) teşekkürlerimi sunarım.

Attığım her adımda yanımda olan değerli aileme; babam Oğuz MOROVA'ya, annem Meral MOROVA'ya, ablam Gizem MOROVA'ya, ve yeğenim Masal YÜCEL'e çok teşekkür ederim.

Ama en önemlisi, en zor zamanlarda bile verdiği destek ve sevgisiyle mutluluk ve motivasyon kaynağım olan kıymetli eşim Dr. Berna MOROVA'ya teşekkür ederim.

Mayıs 2021

Yağız MOROVA
(Fizikçi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Lazerlere Genel Bir Bakış	2
1.2 Katıhal Lazerler	8
1.2.1 Kip kilitli lazerler	9
1.3 Lazer Karakterizasyon Yöntemleri	13
2. FEMTOSANİYE LAZER İLE ÜRETİLEN ZEBRA DESENİ KİP KİLİTLEYİCİ	21
2.1 Giriş	21
2.2 Femtosaniye Lazer ile Mikro İşleme Yöntemi Kullanılarak Zebra Desenli Grafen Yapıların Oluşturulması	23
2.3 ZeGSA Yapılarının Cr^{4+} :Forsterite Lazeri ile Kip Kilitleme Performansının İncelenmesi	26
2.4 Sonuç	35
3. FEMTOSANİYE LAZER İLE MİKRO YAPILANDIRILMIŞ Tm^{3+} : BaY_2F_8 DALGA KILAVUZU LAZERİ	37
3.1 Giriş	37
3.2 Femtosaniye Lazer ile Dalga Kılavuzu Yazım Yöntemi ve Yazım Tipleri	39
3.3 Femtosaniye Lazer Kullanılarak Geliştirilen Dalga Kılavuzu Çalışmalarının Literatür Özeti	42
3.4 Silika İçerisine Femtosaniye Lazer Kullanılarak Yazılan Dalga Kılavuzları	43
3.5 Tm^{3+} : BaY_2F_8 Lazer Aktif Ortamı İçerisine Femtosaniye Lazer Kullanılarak Dalga Kılavuzu Yazılması	46
3.6 Tm^{3+} : BaY_2F_8 Lazer Aktif Ortamında $\sim 1.9 \mu\text{m}$ Dalgaboyunda Çalışan Dalga Kılavuzu Lazerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu	47
3.7 Sonuç	53
4. FEMTOSANİYE LAZER KULLANILARAK CeO_2 NANOPARÇACIK ÜRETİMİ	55
4.1 Giriş	55
4.2 CeO_2 Malzemesi Hakkında Literatürde Yer Alan Çalışmalar	56
4.3 Sıvı İçerisinde Femtosaniye Lazer ile Nanoparçacık Sentezi ve Karakterizasyonu	57

4.4 Kimyasal Çöktürme Yöntemi ile CeO ₂ Nanoparçacıkların Üretimi ve Karakterizasyonu	60
4.5 Sonuç	65
5. ÜST ÇEVİRİM POMPALI Tm³⁺:KY₃F₁₀ LAZERİ.....	67
5.1 Giriş	67
5.2 Tm ³⁺ :KY ₃ F ₁₀ Kristalinin 1064 nm Dalgaboyundaki Doğrusal Olmayan Soğurma Özelliklerinin Deneyisel Olarak İncelenmesi	69
5.3 Üst Çevrim Pompa ile Tm ³⁺ :KY ₃ F ₁₀ Lazerinin 2.3 µm Dalgaboyunda Operasyonu ve Karakterizasyonu	71
5.4 Uzunluğu 2.8 mm Olan Tm ³⁺ :KY ₃ F ₁₀ Kristalinin 2.3 µm Dalgaboyundaki Lazer Düzenegi ve Karakterizasyonu	75
5.5 Üst Çevrim Popalı Tm ³⁺ :KY ₃ F ₁₀ Lazerinin 1.9 µm Dalgaboyunda Çalıştırılması	77
5.5.1 Giriş.....	77
5.5.2 Üst çevrim pompa ile Tm ³⁺ :KY ₃ F ₁₀ lazerinin 1.9 µm dalgaboyunda operasyonu ve karakterizasyonu.....	78
5.6 Sonuç	83
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	85
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ	97

KISALTMALAR

ZeGSA	: Zebra Desenli Grafen Doyabilen Soğurucu (Zebra Patterned Graphene Saturable Absorber)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
DLS	: Dinamik Işık Saçılması (Dynamic Light Scattering)
LIGO	: Lazer İnterferometrik Yerçekimi Dalgaları Gözlemevi (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory)
OC	: Çıkış Aynası (Output Coupler)
CW	: Sürekli Dalga (Continuous Wave)
SESAM	: Yarıiletken Doyabilen Soğurucu Ayna (Semiconductor Saturable Absorber Mirror)
SHG	: İkinci Harmonik Üretimi (Second Harmonic Generation)
RF	: Radyo Frekansı
GSA	: Grafen Doyabilen Soğurucu (Graphene Saturable Absorber) / Temel Seviye Soğurması (Ground State Absorption)
CVD	: Kimyasal Buhar Birikimi (Chemical Vapor Deposition)
HR	: Yüksek Yansıtıcı (High Reflector)
LIDAR	: Lazer Mesafe Algılayıcı (Laser Imaging Detection and Ranging)
UV	: Mor Ötesi (Ultraviolet)
CMOS	: Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (Complementary Metal Oxide Semiconductor)
DMS	: Seyreltik Manyetik Yarıiletken (Diluted Magnetic Semiconductors)
DMSO	: Seyreltik Manyetik Yarıiletken Oksit (Diluted Magnetic Semiconductor Oxides)
LED	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
FET	: Alan Etkili Transistör (Field Effect Transistor)
MOSFET	: Metal-Oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistör (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
SOFC	: Katı Oksit Yakıt Hücreleri (Solid Oxide Fuel Cell)
RTFM	: Oda Sıcaklığı Ferromanyetizması (Room Temperature Ferromagnetism)
YSZ	: İttriyum Katkılanmış Kararlı Zirkonya (Yttria Stabilized Zirconia)
EDX	: Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi
AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
NP	: Nanoparçacık
ESA	: Uyarılı Seviye Soğurması (Excited State Absorption)
NR	: Işımasız Geçiş (Nonradiative Decay)
BTP	: Çift Kırınımlı Dalga Boyu Ayarlayıcı Levha (Birefringent Tuning Plate)



SEMBOLLER

h	: Planck sabiti
ν	: Dalga frekansı
E_n	: n. enerji seviyesi
t	: Zaman bileşeni
N	: Molekül sayısı
N_n	: n. seviyedeki nüfus
A	: Kendiliğinden ışıma oranı / Einstein'ın A sabiti
τ_{sp}	: Kendiliğinden ışıma ömrü
τ_{nr}	: Işınımsız geçiş ömrü
W_{21}	: Uyarılı ışıma geçiş oranı
F	: Foton akısı
σ_{21}	: Uyarılı ışıma arakesiti
W_{12}	: Soğurma oranı
σ_{12}	: Soğurma arakesiti
I	: Işık şiddeti
B_{12}	: Einstein'ın B sabiti
g_n	: n. enerji seviyesinin yozlaşma sayısı
$\gamma(\nu)_{th}$	: Eşik kazanç katsayısı
α_L	: Rezonatör kaynaklı kayıplar
R_1, R_2	: Aynaların lazer dalgaboyundaki yansıtıcılıkları
d_g	: Kazanç ortamının uzunluğu
P_{th}	: Pompa eşik gücü
$h\nu_p$	: Pompa foton enerjisi
w_L, w_p	: Lazer ve pompa spot genişlikleri
L	: Rezonatör kayıpları
T	: Çıkış aynasının geçirgenliği
η_a	: Soğurma yüzdesi
σ_e	: Işıma arakesiti
τ_f	: Floresans yaşam süresi
$E(t)$	: Zamana bağlı elektrik alan
x, y, z	: Eksensel mesafe bileşenleri
M	: Kip sayısı
ω_0	: Referans açısal momentum değeri
ω_F	: Komşu iki kip arasındaki açısal momentum farkı
q	: Kip numarası
$\phi(t)$	: Zamana bağlı faz
T_R	: Tekrarlama periyodu
c	: Işığın boşluktaki hızı
L	: Kavite boyu
f_{rep}, f_{tekrar}	: Tekrarlama frekansı
τ_{darbe}, τ_p	: Darbe süresi

$\Delta\nu$	: Kazanç ortamının spektral genişliği
E_{darbe}	: Darbe enerjisi
P_{tepe}	: Tepe gücü
$P_{çıkış}$	: Çıkış gücü
z_0	: Rayleigh mesafesi
w_0	: Minimum spot genişliği
n_0	: Kazanç ortamının kırılma indisi
λ	: Dalgaboyu
η	: Lazer çalışma verimi
η_0	: Pompa ve lazer ışınlarının kazanç ortamındaki örtüşme miktarı
λ_p	: Pompa dalgaboyu
λ_L	: Lazer dalgaboyu
P_{pompa}	: Pompa gücü
$A(\tau)$	: Şiddet otokorelasyon fonksiyonu
τ_{AC}	: Otokorelasyon sinyal genişliği
ω	: Lazer frekansı
m_e	: Elektronun efektif kütlesi
n	: Ortamın doğrusal kırılma indisi
e	: Elektronun yükü
ϵ_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
E_g	: Dielektrik malzemenin bant aralığı
γ	: Keldysh parametresi
I_n	: Net akı
F_p	: Darbe ışık akısı
v	: Tarama hızı
Δn	: Kırılma indisi farkı
ϵ	: Dielektrik sabiti
ϵ'	: Bağıl dielektrik sabiti
ϵ''	: Sanal geçirgenlik
δ	: Faz açısı
η_U	: Üst çevrim verimi

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Farklı ZeGSA bölgelerinde elde edilen grafen miktarları.....	26
Çizelge 2.2 : Farklı ZeGSA bölgelerine ait grafen kaynaklı kayıp yüzdeleri.	28
Çizelge 5.1 : η_U değerinin hesaplanmasında kullanılan deneysel lazer parametreleri.	75





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : E_1 ve E_2 enerjilerine sahip iki seviyeli sistemde soğurma (a), kendiliğinden ışıma (b) ve uyarılı ışıma mekanizmaları.	3
Şekil 1.2 : (a) Üç seviyeli ve (b) dört seviyeli lazer sistemlerinin enerji seviye diyagramları.	6
Şekil 1.3 : Tam yansıtıcı ayna (M1), kazanç ortamı, pompa ve çıkış aynası (M2) içeren iki aynalı lazer tasarımı.	7
Şekil 1.4 : 800 nm dalgaboyuna ve 1 m kavite uzunluğundaki bir lazerde (a) $M=20$ ve (b) $M=100$ değerleri için verilen kip kilitli (mavi) ve sürekli dalga (kırmızı) lazer çıkışının zamana göre şiddet profili.	11
Şekil 1.5 : Kip kitleme için kullanılan, kazanç ortamı ve doyabilen soğurucu içeren iki aynalı rezonatör.	12
Şekil 1.6 : Cr^{4+} :YAG lazeri ile alınmış örnek verim eğrisi grafiği.	15
Şekil 1.7 : Cr^{4+} :YAG lazeri ile alınmış örnek optik spektrum verisi.	15
Şekil 1.8 : Cr^{4+} :YAG lazeri ile alınmış örnek akort verisi.	16
Şekil 1.9 : Findley-Clay analizi ile tam tur kavite kaybının hesaplanmasında kullanılan OC geçirgenliğine karşılık pompa eşik gücü verisi.	16
Şekil 1.10 : Darbe süresi ölçümünde kullanılan şiddet otokorelatör deney düzeneği.	17
Şekil 1.11 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazer ile alınmış örnek bir şiddet otokorelasyon sinyali.	18
Şekil 1.12 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazeri ile alınmış örnek bir RF spekturum verisi.	19
Şekil 1.13 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazeri ile alınmış örnek bir darbe dizisi verisi.	19
Şekil 2.1 : ZeGSA geliştirilmesinde kullanılan femtosaniye lazer mikro işleme düzeneği (üst) ve düzenek fotoğrafları (alt).	24
Şekil 2.2 : (a) ZeGSA yapısının temsili çizimi ve (b) sırasıyla %81 ve %62 grafen doluluk oranına sahip bölgelerin mikroskop görüntüsü.	25
Şekil 2.3 : Tüm ZeGSA bölgelerinin konfokal mikroskop ile elde edilen farklı büyütme kullanılarak alınmış mikroskop görüntüleri.	25
Şekil 2.4 : ZeGSA'nın kip kitleme performansının incelendiği Cr^{4+} :forsterite lazeri.	26
Şekil 2.5 : (a) ZeGSA'nın kip kitleme performansının incelendiği Cr^{4+} :forsterite lazerinin fotoğrafı. (b) Lazer karakterizasyonunda kullanılan ölçüm cihazlarının fotoğrafı.	27
Şekil 2.6 : Yalnızca infrasil alttaş dahil edilmiş Cr^{4+} :forsterite lazerinin OC geçirgenliğinin fonksiyonu olarak ölçülen giriş pompa eşik güçleri. ...	28
Şekil 2.7 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde ZeGSA'nın farklı bölgelerinden ölçülen ve grafen kaynaklı kayıplara karşılık gelen sürekli dalga çıkış güçleri.	29

Şekil 2.8 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %4.14 kayba sahip GSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	31
Şekil 2.9 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %0.21 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	31
Şekil 2.10 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %3.12 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	32
Şekil 2.11 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %2.83 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	32
Şekil 2.12 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %0.65 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	33
Şekil 2.13 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %1.39 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	33
Şekil 2.14 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %1.15 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.	34
Şekil 2.15 : GSA ile (a) mikrosaniye, (b) milisaniye ve %32 grafen doluluk oranına sahip ZeGSA ile (c) mikrosaniye, (d) milisaniye zaman mertebesinde alınmış darbe katarı verisi.	34
Şekil 2.16 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde (a) kip kilitli çıkış gücünün ve (b) darbe süresinin grafen kaynaklı kayıplara bağlı değişimi.	35
Şekil 3.1 : Femtosaniye lazer ile mikro işleme sırasındaki örnek oryantasyonuna göre yazım tipleri. (a) Enine yazma ve (b) boyuna yazma.	41
Şekil 3.2 : (a) Tip 1, (b) Tip 2, (c) Tip 3 ve (d) Tip 4 dalga kılavuzları.	42
Şekil 3.3 : (a) Dalga kılavuzu yazım deneylerinde kullanılan femtosaniye lazer ve mikro-işleme tezgahı. İçerisine 632 nm'deki ışık (b) eşlenmiş ve (c) eşlenmemiş silika dalga kılavuzu. (d) Dalga kılavuzu karakterizasyon düzeneği. Silika dalga kılavuzunun optik mikroskop altındaki (e) üstten ve (f) kesit görüntüsü.	45
Şekil 3.4 : Tm^{3+} : BaY_2F_8 yazılan Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzlarının optik mikroskop görüntüleri.	47
Şekil 3.5 : Sürekli dalga Ti^{3+} :safir lazer düzeneğinin fotoğrafı.	48
Şekil 3.6 : SF_{14} prizma çifti kullanılarak dalgaboyu ayarlanan, sürekli-dalga Ti^{3+} :safir lazerinin (a) şematik gösterimi ve (b) Tm^{3+} : BaY_2F_8 kristali için rezonant optik spektrum verisi.	48
Şekil 3.7 : Tm^{3+} : BaY_2F_8 dalga kılavuzu (a) eşleme düzeneği, Tip 3 dalga kılavuzuna ışın (b) eşlendiği ve (c) eşlenmediği durumlardaki dalga kılavuzu çıkışları.	49

Şekil 3.8 : (a) $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazeri deney düzeneği. (b) M1 ve M2 aynaları arasına yerleştirilmiş ve 781 nm’de ışın eşlenmiş $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali.	50
Şekil 3.9 : $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzuna lazer düzeneğinin farklı açılardan çekilmiş detaylı fotoğrafları.	51
Şekil 3.10 : (a) İkinci konfigürasyon $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazer düzeneği, (b) lazer çıkışı hüzmeye profili, (c) optik spektrum verisi.	51
Şekil 3.11 : Üçüncü konfigürasyon $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu (a) lazer düzeneği ve (b) güç verim eğrisi.	52
Şekil 4.1 : Femtosaniye lazer ile nanoparçacık sentezi deney düzeneği (a) çizimi ve (b,c) fotoğrafları.	58
Şekil 4.2 : İzopropil alkol içerisindeki fs lazer ile üretilmiş CeO_2 nanoparçacık çözeltisi fotoğrafı.	59
Şekil 4.3 : Femtosaniye lazer ile üretilen CeO_2 nanoparçacıklarının SEM görüntüleri.	59
Şekil 4.4 : Femtosaniye lazer ile üretilen CeO_2 nanoparçacıkların DLS ölçümü ile kaydedilmiş boyut dağılımı.	60
Şekil 4.5 : CeO_2 ve $\text{Ce}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{O}_2$ örneklerine ait X-ışını toz kırınım desenleri.	61
Şekil 4.6 : $\text{Ce}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{O}_2$ nanoparçacıklarının (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX sonucu.	62
Şekil 4.7 : CeO_2 polikristal toz, CeO_2 ve $\text{Ce}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{O}_2$ nanoparçacıklarının dielektrik sabitinin frekans ile değişimi grafikleri.	64
Şekil 4.8 : CeO_2 polikristal toz ve CeO_2 nanoparçacıklarında dielektrik sabitinin oda sıcaklığında frekans ile değişimi grafikleri.	65
Şekil 5.1 : Üst çevrim pompalama yöntemi ile 1064 nm’deki olası soğurma ve 1.9 μm ve 2.3 μm ’deki ışıma enerji geçişlerini gösteren Tm^{3+} iyonu enerji seviyeleri diyagramı.	68
Şekil 5.2 : Giriş gücünün fonksiyonu olarak 2 mm boyundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm’deki soğurma verisi.	69
Şekil 5.3 : 2.8 mm uzunluğundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm’de alınan (a) z-tarama deney düzeneği ve (b) soğurma verisi.	70
Şekil 5.4 : Pisa Üniversitesi Fizik bölümünde Prof. Dr. Mouro Tonelli tarafından büyütülen %8 atomik katkılı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali ham fotoğrafı.	71
Şekil 5.5 : 1064 nm’de pompalanan üst çevrim pompalı 2.3 μm civarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri deney düzeneği.	72
Şekil 5.6 : X-kovuk lazer tasarımına sahip üst çevrim pompalı 2.3 μm civarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri deney düzeneğini üstten (a), yandan (b) ve tüm kovuğu kapsayacak şekilde gösteren (c) fotoğrafları.	72
Şekil 5.7 : 1064 nm’de pompalanan üst çevrim pompalı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin (a) optik spektrum ölçümü, (b) %1 ve %3 OC ile alınmış verim eğrisi ve dalgaboyuna karşılık çıkış gücü eğrisi, çıkış hüzmeye profilinin (c) iki ve (d) üç boyutlu görüntüsü.	74
Şekil 5.8 : 2.36 W sabit pompa giriş gücünde $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin kavite içi lazer gücüne bağlı olarak ölçülen 1064 nm’de soğurma yüzdesi.	75
Şekil 5.9 : Z kovuk mimarisinde 2.8 mm uzunluğuna sahip %8 atomik katkılı KY_3F_{10} kristali ile 1064 nm üst çevrim pompalı 2.3 μm lazeri deney düzeneği.	76
Şekil 5.10 : Z kovuk mimarisinde 2.8 mm uzunluğuna sahip %8 atomik katkılı KY_3F_{10} kristali ile 1064 nm üst çevrim pompalı 2.3 μm lazeri	

karakterizasyonu. (a) Optik spektrum ölçümü, (b) lazer güç verim eğrisi.	77
Şekil 5.11 : 1064 nm’de pompalanan üst dönüşüm pompalı 1.9 µm civarında çalışan $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ lazeri deney düzeneği.....	78
Şekil 5.12 : 1064 nm’de pompalanan üst dönüşüm pompalı $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ lazerinin farklı OC değerleri için çalışma dalgaboyları.	79
Şekil 5.13 : (a) 300-3000 nm aralığında (solda) ve 1800-2000 nm aralığında (sağda) kaydedilen OC geçirgenlikleri. (b) %0 geçirgenlik sağlamak için kullanılan iki HR’nin geçirgenlik spektrum ölçümü. (c) %2.3 geçirgenliğe sahip OC ile alınan geçirgenlik ölçümü. (d) %5.5 geçirgenliğe sahip OC ile alınan geçirgenlik ölçümü.	80
Şekil 5.14 : 1064 nm’de pompalanan üst dönüşüm pompalı $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ lazerinin çıkış gücünün farklı OC değerleri için giriş gücüne bağlı değişimi.	81
Şekil 5.15 : $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ kristalinin 1.9 µm lazer çıkışı için 1064 nm’deki soğurmasının kavite içi gücüne göre değişimi.	81
Şekil 5.16 : CaF_2 ve suprasil prizmalar kullanılarak dalgaboyu ayarlanabilen 1.9 µm civarındaki $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ lazerinin akort eğrisi.	82
Şekil 5.17 : Pompa eşik gücünün OC geçirgenliğine bağlı değişimi.	83

FEMTOSANİYE LAZER İLE İŞLENEN YAPILARIN KATIHAL LAZERLERDE UYGULAMALARI VE ÜST ÇEVİRİM POMPALI Tm³⁺:KY₃F₁₀ LAZERLERİ

ÖZET

Bu tez çalışması ile yakın ve orta kızılaltı bölgede çalışan özgün katihal lazerlerin geliştirilmesi amaçlanmış ve iki farklı deneysel yaklaşım uygulanmıştır. Bunlardan ilkinde femtosaniye lazer ile işlenen yapılar katihal lazer tasarımlarında kullanılmıştır. Diğer yaklaşımda ise üst çevrim pompalama yöntemi kullanılarak Tm³⁺:KY₃F₁₀ lazeri iki farklı dalgaboyunda çalıştırılmıştır.

Tezin ilk bölümünde, deneysel çalışmalarda kullanılan terimlerin ve kavramların tanıtılması hedeflenmiştir. Bu kapsamda lazer konseptine ait temel teorik altyapı ve deneysel karakterizasyon yöntemleri ile ilgili genel bilgiler sunulmuştur.

Tezin ikinci bölümünde, grafen doyabilen soğurucunun femtosaniye lazer ile mikro şeritler oluşturacak şekilde yüzeyden kaldırılmasıyla elde edilen zebra desenli grafen doyabilen soğurucunun, üretimi ve bir test lazer kavitesi içerisinde kip kilitleyici olarak kullanılması sunulmuştur. Grafen doyabilen soğurucular, sahip oldukları avantajlı optik özellikler sayesinde lazer sistemlerinde yakın kızılaltı ve orta kızılaltı bölgelerini de kapayan geniş bir optik spektrum aralığında kip kilitleyici olarak kullanılmaktadırlar. Ancak sahip oldukları %2.3 küçük sinyal soğurması, bu kip kilitleyicileri kayba duyarlı düşük optik kazançlı lazer sistemleri için elverişsiz kılmaktadır. Bu kaybın azaltılmasına yönelik kimyasal katkılama, grafen tabanlı kapasitör, süper kapasitör yapıları gibi farklı deneysel yaklaşımlar literatürde gösterilmiştir. Bu yaklaşımlar genel olarak iyi sonuçlar vermesine rağmen, kimyasal katkılama yönteminde sabit Fermi seviyesi kayması, kapasitör yapılarda dielektrik bozulma riski, süper kapasitör yapılarda ise grafen doyabilen soğurucunun spektral operasyon aralığının daralması bu sistemlerin dezavantajları olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle bahsi geçen dezavantajları aşan ve aynı zamanda grafenin özgün özelliklerini taşıyan bir doyabilen soğurucu geliştirilmesi ihtiyacı doğmuştur. Bu kapsamda tezin ikinci bölümünde sunulan çalışmada infrasil alttaş üzerine kaplanmış tek katmanlı grafen, femtosaniye lazer ile işlenerek zebra desenli grafen doyabilen soğurucu üretilmiştir. Bu üretim süreci seçici aşındırma (ablasyon) yöntemine dayanmaktadır. Bu yöntemde lazer hüzmelerinin gücü grafenin aşınma eşiğinden yüksek, alttaş olan infrasilin aşınma eşiğinden düşük tutularak grafenin alttaşa zarar vermeden yüzeyden kaldırılması amaçlanır. Bunun için 120 fs darbe süresine sahip, 1 kHz tekrarlama frekansında ve 800 nm dalgaboyundaki Ti:safir lazeri, 20X büyütmeye sahip bir objektif ile örnek yüzeyine odaklanmış ve tek katmanlı grafen yüzeyden aşındırılarak grafen mikro şeritlerden oluşan altı farklı bölge elde edilmiştir. Her bölgede yüzeyden kaldırılan şeritler arasındaki mesafe değiştirilerek farklı grafen miktarlarına sahip bölgeler elde edilmiştir. Femtosaniye lazer ile mikro işlemenin ardından geliştirilen grafen yapısı, test lazeri olarak seçilen Cr⁺⁴:forsterite lazeri içerisine eklenmiş ve kip kilitleme performansı incelenmiştir. Yapılan deney

sonucunda mikro işlemeye tabi tutulmamış bölgedeki grafen kaynaklı kayıp %4.14 olarak ölçülürken en düşük grafen kaybına sahip bölgenin kaybı ise %0.21 olarak hesaplanmıştır. Bu sayede grafen kaynaklı kayıplarda belirgin bir azalma tespit edilmiştir. Ayrıca aşındırılmamış bölgede elde edilen kip kilitleme performansı incelendiğinde, 6.3 W sabit giriş gücünde 68 mW çıkış gücü elde edilirken, %0.21 grafen kaybı olan bölgede aynı giriş gücünde elde edilen çıkış gücü 114 mW olarak ölçülmüştür. Darbe süreleri karşılaştırıldığında ise 62 fs'den 48 fs'ye düşüş gözlenmiştir. Bu sonuçlar, kaybı azaltılmış zebra desenli grafen doyabilen soğurucunun geleneksel grafen doyabilen soğurucuya göre lazer performansındaki belirgin iyileşmeyi göstermektedir.

Tezin üçüncü bölümünde, femtosaniye lazer ile mikro işleme yöntemi kullanılarak dalga kılavuzu lazer geliştirilmesi ve karakterizasyonu sunulmuştur. Yapılan çalışmada, $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristaline ilk defa femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazılmış ve bu kristalin lazer olarak çalıştırılması gösterilmiştir. Dalga kılavuzları, 800 nm merkez dalgaboyunda 120 fs darbe süresinde ve 1 kHz tekrarlama frekansındaki lazer hüzmeleri 40X objektif kullanılarak %8 (atomik) Tm^{3+} iyonu katkılanmış baryum yitrium florür (BaY_2F_8) kristaline, yüzeyin 100 μm altında sıkıştırılmış kılıf (depressed cladding) biçiminde yazılmıştır. 7 mm uzunluğunda 28 çizgi çizilerek yaklaşık 30 μm çapında silindirik formda sıkıştırılmış kılıf dalga kılavuzu oluşturulmuştur. Dalga kılavuzu yazımını takiben ışık eşleme deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde dalga kılavuzuna, sürekli dalga formunda akort edilebilir Ti:safir lazeri, 3 cm odak uzaklığına sahip bir mercekle eşlenmiştir. Eşlenen lazerin ilerleme kayıpları hesap edilirken soğurma etkisini minimize etmek amacıyla Ti:safir lazerinin dalgaboyu, $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristalinin soğurma bandı dışına alınarak 731 nm'ye ayarlanmıştır. Yapılan ölçümlerde üretilen dalga kılavuzunun ilerleme kaybının 0.32 dB/cm olduğu tespit edilmiştir. Optik eşleme deneylerini takiben pompa lazeri, 781 nm olan rezonant soğurma dalgaboyuna ayarlanmıştır ve elde edilen dalga kılavuzu, lazer rezonatörü içerisine eklenerek 1858 nm merkez dalgaboyuna sahip sürekli dalga lazer operasyonu gösterilmiştir. Geliştirilen dalga kılavuzu lazerinin, %2 çıkış aynası ile %3.3, %6 çıkış aynası ile %6.5 güç performansı veriminde çalıştığı tespit edilmiştir. Elde edilen en yüksek güç ise 553 mW giriş gücüne karşılık 34 mW olarak ölçülmüştür. En düşük eşik pompa gücü ise %2 çıkış aynası ile 23 mW olarak ölçülmüştür.

Tezin dördüncü bölümünde, CeO_2 nanoparçacıkların femtosaniye lazer ile işleme yöntemi ve kimyasal çökeltme yöntemi kullanılarak üretilmesi ve karakterizasyonu sunulmuştur. Lazer ile işleme yönteminde CeO_2 pelet bir petri kabının içine yerleştirilerek yüzeyi yaklaşık 5 mm geçecek şekilde izopropil alkol ile doldurulmuştur. Hazırlanan örneğin yüzeyine 800 nm dalgaboyunda 1 kHz tekrarlama frekansında 120 fs darbeler üreten Ti:safir lazer hüzmeleri, 50 mm odak uzaklığına sahip bir mercekle odaklanmıştır. 5 mm uzunluğundaki çizigilerin 20 μm aralıklarla yan yana çizilmesi ile 5 mm x 5 mm alanındaki bir bölge lazer ile taranmıştır. Lazer taraması sırasında yüzeyden kopan CeO_2 nanoparçacıklar izopropanol içerisinde toplanmıştır. Elde edilen parçacıklar taramalı elektron mikroskobu ile incelenerek 20 nm - 1 μm aralığında üretildiği görülmüştür. Ayrıca dinamik ışık saçılması ölçümü ile üretilen parçacıkların ortalama 333 nm çapına sahip oldukları görülmüştür. 30 dk süren bir işlem sonucunda mikro gram mertebesinde nanoparçacık üretilmiştir. Özellikle dielektrik özellikleri inceleyebilmek için parçacık üretim miktarı kimyasal çökeltme yöntemi kullanılarak artırılmıştır. Bu yöntem ile elde edilen parçacıkların boyutları 100 nm'nin altında olup CeO_2 nanoparçacıklarının dielektrik sabiti oda sıcaklığında

25 olarak bulunmuştur. Üretilen ve ticari olarak satın alınan iki CeO_2 'nin dielektrik ölçümleri karşılaştırılmış ve CeO_2 nanoparçacıkların dielektrik katsayısı daha yüksek bulunmuştur. Ayrıca Fe katkılı CeO_2 nanoparçacıkları üretilmiş ve karakterize edilmiştir.

Tezin beşinci bölümünde, literatürde ilk defa, 1064 nm dalgaboyunda üst çevrim pompalama yöntemi ile pompalanmış $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin 1.9 μm ve 2.3 μm dalgaboylarında çalıştırılması sunulmuştur. Florür tabanlı lazer kristallerinin kızılaltı bölgedeki lazer operasyonları, düşük fonon enerjileri, geniş spektral bölgedeki yüksek geçirgenlikleri gibi özellikleri nedeni ile birçok araştırma grubu tarafından incelenmiştir. Bu çalışmalarda genel olarak florür tabanlı lazer kristali grubunun bir üyesi olan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali, konvensiyonel pompalama yöntemi olan 800 nm civarında doğrudan pompalanarak lazer olarak çalıştırılmıştır. Ancak bu kristalin 1064 nm dalgaboyuna sahip Yb:fiber lazeri ile üstçevrim pompalama yöntemi kullanılarak 1.9 μm ve 2.3 μm dalgaboyunda çalıştırılması ilk kez tez kapsamında yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında öncelikle %8 (atomik) Tm^{+3} iyonu katkılanmış KY_3F_{10} kristalinin 1064 nm'de doğrusal olmayan soğurma özellikleri incelenmiştir. 2.8 mm uzunluğundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm'deki temel seviye soğurmasının %2 olmasına rağmen pompa lazer şiddetinin artmasını takiben uyarılı seviye soğurmasının devreye girmesiyle %38 değerine ulaştığı görülmüştür. Ardından sırası ile x-kavite ve z-kavite mimarileri ile çalıştırılan 1.9 μm ve 2.3 μm lazerlerinin güç performansları incelenmiştir. 1.9 μm operasyonunda %2.3 çıkış aynası ile 1.9 W giriş gücünde en yüksek 142 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Ayrıca kavite içerisine eklenen CaF_2 ve suprasil prizmalar ile lazer dalgaboyunun 1849 nm - 1994 nm aralığında ayarlanabildiği gösterilmiştir. Bu konfigürasyon için en yüksek güç performans verimi, %5.5 çıkış aynası ile, soğurulan giriş gücüne göre %29 olarak elde edilmiştir. 2.3 μm deneylerinde ise z-kavite kullanılarak 1.6 W giriş gücünde %3 çıkış aynası kullanılarak, soğurulan pompa gücüne göre %36 verimle en yüksek 130 mW çıkış gücü elde edilmiştir.

Tezin son bölümü olan sonuçlar bölümünde tez dahilinde yapılan deneysel çalışmaların sonuçları özetlenerek ileriye dönük potansiyel uygulamalarından bahsedilmiştir.



SOLID-STATE LASER APPLICATIONS OF FEMTOSECOND LASER WRITTEN STRUCTURES AND UPCONVERSION PUMPED $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ LASERS

SUMMARY

In this thesis, two experimental approaches were performed to develop novel solid state lasers operating in the near infrared and mid-infrared regions. The first part of the thesis presents femtosecond laser micro machining studies including structuring of graphene saturable absorber and $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ crystal to employ these materials in solid state laser architectures. The second part of the thesis provides detailed investigation of 1064 nm upconversion pumping of $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ laser operation near 1.9 μm and 2.3 μm with an Yb: fiber laser.

Femtosecond lasers have been utilized in various applications including industrial and medical applications, scientific researches, imaging, and material processing, thanks to their intense short pulses. Micromachining of materials is another important application of femtosecond lasers for development of optical and electronic devices. Femtosecond laser micromachining method is based on micro structuring of materials with tightly focused femtosecond laser pulses that can modify the structure locally at the focal point in micro scale. This application has been widely used in the field of surface modification to develop new electro-optical devices such as plasmonic sensors, solar cells, opto-fluidic chips etc. This method has also been utilized in 3D processing to produce micro-structured optical devices inside bulk dielectric materials including waveguides, beam splitters, volume diffraction gratings. This thesis includes novel devices and results which were produced with femtosecond laser micro structured devices. Another practical application of the femtosecond laser ablation is nanoparticle generation in liquid. In this thesis, the first study has been performed with a graphene saturable absorber. By using femtosecond laser micromachining, graphene saturable absorber was selectively ablated from infrasil substrate in the form of micro arrays and utilized as loss adjustable zebra patterned graphene saturable absorber (ZeGSA) mode locker to generate femtosecond laser pulses at the wavelength of 1250 nm. As a second application, depressed cladding waveguides were written inside a highly doped $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ laser active medium and waveguide laser operation at the wavelength of 1.9 μm was reported for the first time. In addition to these femtosecond laser micromachining studies, nanoparticle generation of CeO_2 was also reported. The rest of the thesis focuses on nonlinear absorption features and the first lasing operation of upconversion pumped $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ crystal at 1.9 μm and 2.3 μm with 1064 nm Yb: fiber laser.

In the first chapter, general concept of theoretical laser background and experimental approaches for laser characterization were given. Especially, generalized terms of interaction between light and materials that have quantized energy levels including absorption, spontaneous emission, and stimulated emission were discussed by using rate equations. Afterwards, energy level diagrams of two level and three level lasers

were given with their rate equations. Requirements of lasing were explained in terms of pump threshold and positive feedback. After the general definition of lasing, solid state lasers have been introduced which was related the major part of the experimental studies performed in this thesis study. Optical components and basic laser resonator design were also given in this chapter for continuous and pulsed lasers. Since the experimental studies include femtosecond laser micromachining of materials and ultra-short pulse generation with zebra patterned graphene saturable absorber, operation of saturable absorbers, mode-locking of lasers and mode-locked laser parameters were introduced in this chapter. After stating the theoretical background behind the concept of lasers, experimental characterisation methods implemented during the experiments were thoroughly introduced. These experimental methods present the ways of collecting data including determination of laser slope efficiency, optical spectrum, tuning data, intracavity loss analysis continuous wave and pulsed laser characterization. Further experimental measurements were also introduced including, pulse train, radio frequency spectrum and autocorrelation measurements for characterization of the mode locked lasers. Finally, this introduction chapter presents the novel aspects of the thesis and gives information about the motivation behind these experimental studies and results.

In the second chapter, a novel device was reported based on micro-structured graphene, referred to as zebra-patterned graphene saturable absorber (ZeGSA), which can be used as a saturable absorber with adjustable loss to initiate femtosecond pulse generation. Laser micromachining, a monolayer graphene saturable absorber in the form of zebra stripes with varying duty cycle were employed in order to adjust the absorption and hence its insertion loss when it is placed inside a laser cavity. Graphene saturable absorbers have been utilized for mode-locking and ultrashort pulse generation thanks to their favorable optical properties. However, the small signal roundtrip loss of graphene is close to 5%, causing degradation in power performance especially in low gain lasers. To overcome this issue, previous studies have been performed to control the loss level of graphene by using chemical doping, capacitor structures and, super capacitor structures. These approaches work successfully. However, they also have drawbacks including irreversible fixed fermi level shift, in the case of chemical doping. And the risk of dielectric breakdown, in the case of solid-state graphene capacitors, since tens of volts are needed to bias the device. Also, the decrease of the saturable absorption bandwidth in the case of super capacitor structures due to Pauli blocking. The approach described in this thesis provides a method to adjust the loss level of graphene while maintaining its full spectral operating range. The second chapter of this thesis focuses on the details of the micromachining to form zebra stripes in graphene and application of the device to laser mode-locking near the wavelength of 1250 nm. In order to obtain zebra patterned graphene, selective femtosecond ablation method was employed by using an amplified 1 kHz Ti:Sapphire laser with a pulse duration of 120 fs. Thus, graphene stripes were ablated successfully without damaging the infrasil substrate. Six different regions with different duty cycle were inscribed by using this method. We have also used the unpatterned portion of the graphene to compare the performance of conventional monolayer graphene and the zebra patterned graphene. A Cr^{4+} :forsterite laser was used to test the performance of the ZeGSA. By using stripes with a different duty cycle, the loss of the graphene structure could be varied in the range of 0.21 to 3.1%, providing improvement in the power performance during cw operation. As well as a notable improvement in pulse duration and pulse energy during mode locked operation. In particular, at the pump power of 6.3 W, the duration of the femtosecond pulses could be reduced from 62 fs

to 48 fs with a corresponding improvement in the average output power from 68 mW to 114 mW. These studies provide a proof-of-principle demonstration of the great potential of the ZeGSA as an efficient laser mode locker with adjustable loss, and it could play a crucial role in the improvement of power and pulse width performance of passively mode-locked lasers over a wide spectral range.

In the third chapter, the development of the femtosecond laser written waveguide $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ laser was reported for the first time. Recently, waveguide lasers have attracted great attention, since they can be operated at low threshold pump powers in comparison with solid-state bulk lasers, they possess compact resonator designs, and they are compatible with fiber-optic systems. Depressed cladding waveguide was written inside the bulk $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ crystal using an amplified Ti:Sapphire laser which generates 120 fs pulses with the repetition rate of 1 kHz. The direct writing laser was focused 200 μm below the surface with 40X objective having the numerical aperture value of 0.65. At the end of the writing process, femtosecond laser written depressed cladding waveguide was obtained with 28 straight lines located in the form of circle having the diameter of 30 μm and length of 7 mm. To investigate the coupling properties of the waveguide, a continuous wave Ti:Sapphire laser was coupled to waveguide with a converging lens having a focal length of 30 mm. To analyse the propagation loss of the waveguide, Ti:Sapphire laser was tuned to non-resonant wavelength to (731 nm) avoid the absorption. Thus, from the analysis of the incident and transmitted powers, propagation loss of the femtosecond laser written waveguide was estimated as 0.32 dB/cm. After the determination of the propagation loss input laser tuned to resonant wavelength (781 nm) for lasing experiments. Laser setup was constructed by placing a high reflector and output coupler. Lasing operation was observed with two output coupler having transmission of 2% and 6% at the laser wavelength. From the optical spectrum measurements, the free running wavelength of the laser was obtained as 1858 nm. With 6% output coupler, as high as 34 mW output power was obtained at incident pump power of 553 mW. For 2% output coupler, the threshold pump power was measured as 23 mW. These results show that femtosecond laser written $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ waveguide laser can be employed in infrared laser applications due to their favorable features such as compact design, low laser threshold.

In the fourth chapter of the thesis, nanoparticle generation of CeO_2 material with femtosecond laser ablation is presented. CeO_2 nanoparticles have various applications in the fields of electronics, automotive, construction and renewable energy. Because of its diverse applications, synthesis of CeO_2 nanoparticles attracts a great deal of attention. Numerous techniques such as hydrothermal, solvothermal, aqueous precipitation, reversed micelles, thermal decomposition and flame spray methods have been reported to synthesize CeO_2 nanoparticles. One of the alternative and effortless way compared to these methods of producing nanoparticles is femtosecond laser nanoparticle generation. With this motivation, CeO_2 nanoparticles were generated using femtosecond laser ablation and investigated in detail within this thesis. In the experiments, a CeO_2 pellet was placed inside a petri dish and immersed in isopropanol up to approximately 5 mm above the surface. Incident Ti:Sapphire laser pulses having 120 fs duration with the repetition rate of 1 kHz at the wavelength of 800 nm, was focused to the pellet surface with a converging lens of 50 mm focal length. The surface of the target material was scanned with tightly focused laser beam by 5-mm-long lines separated with 20 μm . 250 lines were inscribed to scan the 5 mm x 5 mm area on the surface. Thus, CeO_2 nanoparticles were generated in isopropanol. To determine the

feature size of the generated nanoparticles, two sets of measurement were performed. The nanoparticles were investigated under a scanning electron microscope (SEM), revealing the size of the particles are varying between 20 nm and 1 μm . For further investigation, the dynamic light scattering (DLS) measurement were performed and the size distribution was obtained with the average nanoparticle diameter of 333 nm. In this method, nanoparticles were produced in micro-gram scale after 30 minutes process. To enhance the amount of the produced nanoparticles, chemical precipitation method was employed. In this case, the sizes of the CeO_2 nanoparticles were below 100 nm and the dielectric constant of the nanoparticles was obtained as 25. The measured dielectric constant of CeO_2 nanoparticles was compared with commercially available CeO_2 samples and the results revealed that the dielectric constant of nanoparticles are greater than the commercial samples. In addition, Fe doped CeO_2 nanoparticles were generated and characterized in the context of this thesis.

In the fifth chapter, 1.9 μm and 2.3 μm lasing operations of upconversion pumped $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ laser with an Yb: fiber laser at 1064 nm were reported. Development of novel thulium ion doped 1.9 μm and 2.3 μm lasers has drawn a great deal of attention, due to several potential applications such as vibrational spectroscopy, high harmonic generation, biomedical optics and, gas sensing. In particular, various studies have been performed by several research groups to explore continuous wave and pulsed operations of 1.9 μm and 2.3 μm thulium lasers in novel host materials and with different pumping mechanisms. In this thesis these interesting absorption features of 8 at.% $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ crystals at 1064 nm, and lasing characteristics of upconversion pumped infrared $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lasers at the wavelength of 1.9 μm and 2.3 μm were investigated. Upconversion pumping of the highly doped $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ crystal involves a cascade of absorptions from the Tm^{3+} ion energy levels of $^3\text{H}_6$ to $^3\text{H}_5$ followed by $^3\text{F}_4$ to $^3\text{F}_{2,3}$ levels. Then, 2.3 μm lasing occurs between $^3\text{H}_4$ and $^3\text{H}_5$ levels and 1.9 μm lasing occurs between $^3\text{F}_4$ - $^3\text{H}_6$ levels. To experimentally determine this nonlinear absorption behavior of the $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ crystal at 1064 nm, power transmission and z-scan measurements were performed. These measurements show that the absorption of the $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ crystal increases with incident pump power intensity at 1064 nm and in the case of 2 mm long crystal, beyond the incident pump power of 500 mW corresponding to absorbed pump intensity of 49 kW/cm^2 , the crystal absorption reached 25%. Similar behavior was also obtained with 2.8 mm long crystal. The z-scan data show that the absorption of the crystal increased from 2% to 38% when the pump focus point position reaches the center of the crystal due to the excited state absorption. After the absorption characterization measurements, the lasing performance were investigated. Two different sets of cavity optics were used to investigate lasing at 1.9 μm and 2.3 μm , corresponding to the laser transitions $^3\text{F}_4$ - $^3\text{H}_6$ and $^3\text{H}_4$ - $^3\text{H}_5$, respectively. In the case of the $^3\text{F}_4$ - $^3\text{H}_6$ laser transition, an x cavity laser oscillator was constructed with a 2.3% output coupler and as high as 142 mW of output power was obtained at an incident pump power of 1.9 W at 1064 nm. Tunable laser operation could be obtained between 1849 and 1994 nm by using CaF_2 and suprasil prisms. The highest slope efficiency of 29% with respect to average absorbed pump power was obtained with a 5.5% output coupler. For the case of 1.9 μm lasing, it was further demonstrated that the nonlinear absorption of the crystal at 1064 nm depends on the intracavity laser intensity as well as the pump intensity. The $^3\text{H}_4$ - $^3\text{H}_5$ laser transition was also investigated with the same crystal in a z-cavity configuration under upconversion pumping, giving as high as 130 mW of output power at the central wavelength of 2344 nm with 1.6 W of incident pump power.

In the last chapter, the results of the experimental studies conducted in this thesis were summarized and possible future applications were discussed in detail.





1. GİRİŞ

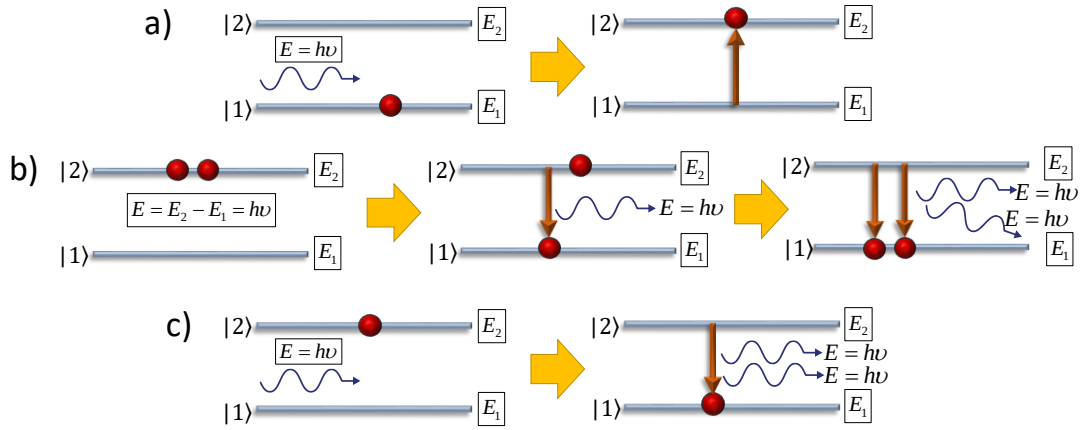
Işığın doğası ve çevresiyle etkileşimi, pozitif bilimlerin doğuşundan itibaren bilim insanlarının en çok ilgisini çeken konulardan biri olmuştur. Işığın doğasıyla ilgili yapılan teorik ve deneysel çalışmalar optik, elektro manyetik teori, kuantum mekaniği gibi kuramsal çalışmaların geliştirilmesinde önemli bir rol oynarken diğer taraftan teleskop, mikroskop gibi teknolojik gelişmelerin de ivmelenen bir hızla artmasını sağlamıştır. Bu ilerlemelerin en önemli örneklerinden birisi de lazerlerdir. Albert Einstein'ın 1917'de yayınlamış olduğu "Işınının Kuantum Teorisi" [1] adlı çalışması lazer fikrinin geliştirilmesi için atılan ilk adım niteliği taşımaktadır. Einstein'ın yayınladığı çalışma, soğurma ve kendiliğinden ışıma mekanizmaları ile beraber uyarılı ışımayı tanımlamıştır ve lazer fikrinin temelini oluşturmuştur. Einstein'ın makalesinde uyarılı ışımının kullanılabileceği herhangi bir uygulama önerisinin bulunmamasına rağmen, 1954 yılında Charles H. Townes Einstein'ın fikrinden yola çıkarak amonyak gazı üzerinde yaptığı çalışmalarda nüfus tersinimi elde ederek mikrodalga frekanslarında uyarılı ışımayı deneysel olarak göstermiştir ve üretilen cihazı "maser" olarak isimlendirmiştir [2]. Townes bu çalışma ile birlikte 1964 yılında Nobel ödülü almıştır. Bu gelişmeyi takiben 1960 yılında ilk lazer olan flaş lambası ile pompalanan ve 694 nm dalgaboyunda çalışan yakut lazeri Theodore H. Maiman tarafından raporlanmıştır. 1916'da Einstein'ın önerisi olan uyarılı ışıma temel alınarak geliştirilen lazerlerin, yine kendi geliştirmiş olduğu ve deneysel tespitin zor olduğu konusunda fikir beyan ettiği bir teori olan kütle çekim dalgalarının tespiti amacıyla yapılmış LIGO deneyinde 2016 yılında kullanılması bilim tarihine düşülen önemli bir not olmuştur. Maiman'ın geliştirmiş olduğu ilk katıhal lazeri olan yakut lazerinin ardından takip eden yıllar içerisinde sıvı ve gaz gibi farklı ortamlarda da lazer ışınımı sağlanmıştır [3]. Elektromanyetik spektrumun farklı bölgelerinde ve farklı güçlerde üretilmeye başlanan lazerler, bilimsel ve teknolojik alanlarda malzeme işleme, spektroskopik ölçümler, medikal uygulamalar, haberleşme ve daha birçok uygulama alanında başarıyla kullanılmışlardır. Lazerler sahip olduğu ışıma karakteristikleri açısından dört önemli özelliğe sahiptirler. Bu özellikler tek renklilik, uzaysal ve zamansal ahenk, tek

yönlülük ve parlaklık olarak sıralanabilir [4]. Sahip olduğu bu özgün özellikler sayesinde lazerlerin uygulama alanları da kısa bir sürede gelişmiştir. Bu nedenle farklı spektral bölgelerde, farklı güçlerde ve çalışma rejimlerinde lazerlerin geliştirilmesi ve en iyileştirilmesi ilk lazerin geliştirildiği günden beri bilim insanları için motivasyon kaynağı olmuştur. Yakın tarihte şahit olduğumuz üzere, 2018 yılında güçlendirilmiş ultra kısa darbeli lazerlerin üretimine yaptıkları katkılar sayesinde Gerard Morou ve Donna Stickland Nobel Fizik Ödülünü paylaşmışlardır. Bütün bu gelişmeler, bu tezin de önemli bir kısmını oluşturan, özgün lazerlerin geliştirilmesi ve uygulamalarının günümüzdeki önemini ve gelecekteki potansiyelini vurgulamaktadır.

Lazerler ve uygulamaları ile ilgili bilgi havuzunun derinleştirilmesinin yanı sıra bilimsel ve teknolojik gelişmelere katkıda bulunulması amacıyla bu tez çalışması hazırlanmıştır. Bu kapsamda femtosaniye lazer ile mikro boyutlarda malzeme işlenmesi, lazer ile işlenen ortamların kullanım alanları ve özgün pompalama yöntemleri ile kızıl altı bölgede lazerlerin üretilmesi ve karakterizasyonu ile ilgili çalışmalar sunulmuştur. Bu doğrultuda, lazer konsepti ile ilgili temel teorik ve deneysel kavramlar tezin genelinde kullanılacak terimler ve ölçüm yöntemlerinin açıklanması amacıyla giriş bölümü hazırlanmıştır.

1.1 Lazerlere Genel Bir Bakış

Bir aktif ortam kullanılarak lazer ışınması elde edilmesi için iki önemli unsur vardır. Bunlardan ilki optik kazanç, diğeri ise pozitif geri beslemedir [5]. Lazerler ile elde edilen optik kazanç 1916 yılında Einstein'ın önerdiği uyarılı ışınma mekanizmasına dayanmaktadır. Uyarılı ışınma haricinde ışık ile kesikli enerji seviyelerine sahip sistemlerin incelendiği diğeri iki önemli mekanizma, soğurma ve kendiliğinden ışınma olarak sayılabilir. Soğurma mekanizmasının açıklanması için Şekil 1(a)'da verilen $|1\rangle$ ve $|2\rangle$ ile gösterilmiş, E_1 ve E_2 kesikli enerji seviyelerine sahip atomik bir sistem gösterilmiştir. Burada birinci seviye olan temel seviyede olan bir atomun, h plank sabiti olmak üzere, enerjisi $h\nu = E_2 - E_1$ olan bir fotonu soğurarak $|2\rangle$ seviyesine çıktığı görülmektedir ve bu mekanizma soğurma olarak isimlendirilir.



Şekil 1.1 : E_1 ve E_2 enerjilerine sahip iki seviyeli sistemde soğurma (a), kendiliğinden ışıma (b) ve uyarılı ışıma mekanizmaları.

İkinci mekanizma ise kendiliğinden ışımadır. Bu ışıma türü Şekil 1(b)'de görüldüğü gibi başlangıç durumunda uyarılı seviye olan $|2\rangle$ seviyesinde olan bir atom $|1\rangle$ seviyesine düşerek iki seviyenin enerji farkı olan, $h\nu = E_2 - E_1$ enerjisine sahip bir foton salar. Bu durumda ikinci seviyede iki farklı atom olduğu varsayılırsa, bu atomların $|1\rangle$ seviyesine geçerken salacakları fotonların enerjileri aynı olsa da polarizasyonları ve yönleri aynı olmayacaktır. Ayrıca başlangıç durumunda uyarılı durumda olan bir atom kendisini çevreleyen sisteme enerjisini aktararak, ışıma yapmadan da temel seviyeye inebilir. Bu geçiş türüne ise ışımasız geçiş denilmektedir. Bir diğer ışıma mekanizması ise Şekil 1(c) de verilen uyarılı ışımadır. Bu ışıma türünde uyarılı seviyede olan atom, enerjisi $h\nu = E_2 - E_1$ olan bir foton sisteme gönderildiğinde $|1\rangle$ seviyesine düşer ve bir foton salar. Uyarılı ışıma ile üretilen fotonun sisteme gönderilen fotonun kopyası olması bu ışıma türünün en önemli özelliğidir. Bir diğer deyişle, etkileşim sonrası ortaya çıkan iki fotonun enerjileri, polarizasyonları, yönelimleri aynıdır ve eşevreli olarak ilerlerler. Burada verilen soğurma ve ışıma mekanizmalarının modellenmesinde nüfus yoğunluğu hız denklemleri kullanılır. Bu denklemler birim hacimde, t anındaki bir enerji seviyesindeki atom veya molekül sayısının (N) zamana göre değişimi üzerinden tanımlanır [5]. Şekil 1.1'de verilen iki seviyeli bir sistemde kendiliğinden ışıma için hız denklemi (1.1) eşitliği ile verilmektedir.

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{sp} = -AN_2 \quad (1.1)$$

Burada denklemin sol tarafındaki terim ikinci seviyedeki nüfusun (N_2) uyarılı ışıma etkisi ile zaman içerisindeki azalmasına karşılık gelmektedir. Bu nedenle eşitliğin sağ tarafı negatiftir. Denklemin sağ tarafında ise A sabiti kendiliğinden ışıma oranı ya da Einstein'ın A sabiti olarak adlandırılır. A sabitinin çarpmaya göre tersi ise kendiliğinden ışıma ömrüne (τ_{sp}) karşılık gelmektedir. Benzer şekilde ışımasız geçiş için hız denklemi, (τ_{nr}) ışıınımsız geçiş ömrü olmak üzere,

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{nr} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}} \quad (1.2)$$

denklemini ile verilir. Uyarılmış ışıma için hız denklemi (1.3) aşağıdaki gibi verilir.

$$\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{st} = -W_{21}N_2 \quad (1.3)$$

Burada W_{21} uyarılmış ışıma geçiş oranını vermektedir. F foton akısı ve σ_{21} uyarılmış ışıma arakesiti olmak üzere,

$$W_{21} = \sigma_{21}F \quad (1.4)$$

denklemini ile verilir. Benzer bir şekilde soğurma için hız denklemi,

$$\left(\frac{dN_1}{dt} \right)_a = -W_{12}N_1 \quad (1.5)$$

eşitliği ile birinci seviyeden ikinci seviyeye soğurma nedeniyle gerçekleşen geçişi ifade eder. W_{12} soğurma oranı ise, F foton akısı, ve σ_{12} soğurma arakesiti cinsinden,

$$W_{12} = \sigma_{12}F \quad (1.6)$$

denklemini ile verilir. Bu denklemde foton akısı ışık şiddetinin (I) foton enerjisine ($h\nu$) oranı olarak yazılabilir ve

$$F = I / h\nu \quad (1.7)$$

eşitliği ile ifade edilir. Bu durumda birinci seviyeden ikinci seviyeye geçiş için tanımlı soğurma oranı W_{12} ,

$$W_{12} = \sigma_{12} F = B_{12} I \quad (1.8)$$

biçiminde yazılabilir. Buradan görüldüğü gibi gelen ışık şiddeti soğurma miktarında etkin bir parametredir ve bu denklemde B_{12} ,

$$B_{12} = \sigma_{12} / h\nu \quad (1.9)$$

olarak tanımlanır ve Einstein'ın B sabiti olarak isimlendirir. Einstein yapmış olduğu çalışmada dejenere olmayan iki seviyeli bir sistem için $W_{12} = W_{21}$ ve $\sigma_{12} = \sigma_{21}$ olduğunu göstermiştir [1]. Eğer seviyeler, $|1\rangle$ seviyesi için g_1 katlı yozlaşmaya ve $|2\rangle$ seviyesi için g_2 katlı yozlaşmaya sahipse, ilgili denklemler, $g_1 W_{12} = g_2 W_{21}$ ve $g_1 \sigma_{12} = g_2 \sigma_{21}$ halini almaktadırlar.

Hız denklemleri bu şekilde verilen iki seviyeli bir sisteme enerjisi, iki seviye arasındaki enerji farkına sahip, F akısındaki fotonlar z yönünde ilerleyecek şekilde gönderilirse, birim mesafedeki akı değişimi, soğurulan ve uyarılı ışıma sonucunda üretilen fotonların farkı olarak,

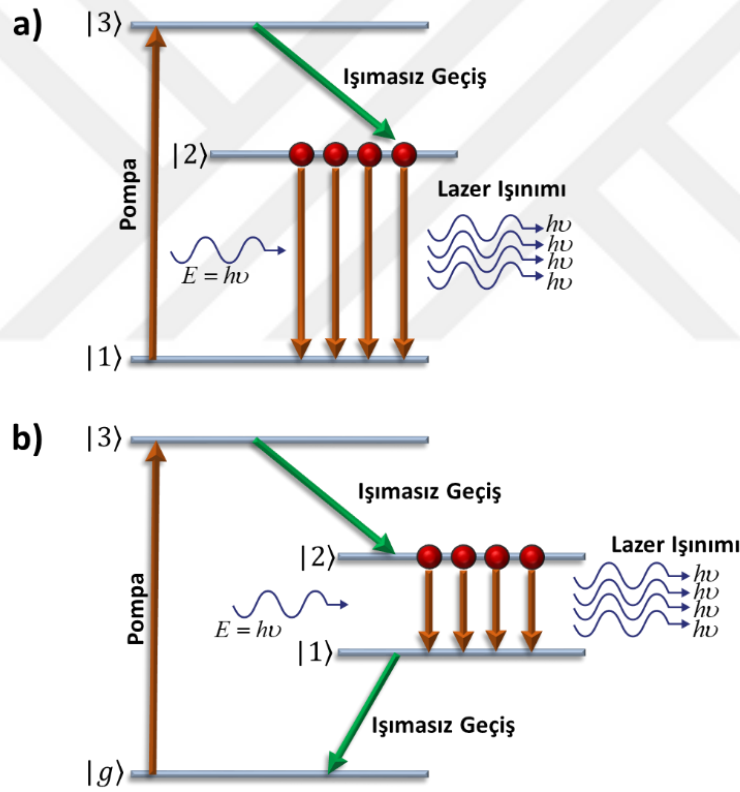
$$\frac{dF}{dz} = \sigma_{21} F N_2 - \sigma_{12} F N_1 = \sigma_{21} F \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) \quad (1.10)$$

şeklinde yazılabilir. Burada kendiliğinden ışımanın ihmal edilmesinin nedeni uyarılmış ışımanın her yönde olması nedeniyle uyarılmış ışımaya katkısı bulunmamasıdır. Bu durumda sistemden optik kazanç elde edilme şartı dF/dz teriminin sıfırdan büyük olmasıdır. Bir diğer deyişle uyarılı ışıma sonucu optik kazanç elde edilebilmesinin koşulu,

$$N_2 > \frac{g_2}{g_1} N_1 \quad (1.11)$$

olarak yazılabilir [5]. Denklem (1.11) ile verilen üst seviyedeki nüfus yoğunluğunun alt seviyedeki nüfus yoğunluğuna göre yüksek olması durumu nüfus tersinimi olarak isimlendirilir. Nüfus tersiniminin sağlanabildiği ortamlar da aktif malzeme olarak adlandırılır [5]. İki seviyeli sistemlerde bu koşulun sağlanması Maxwell-Boltzman istatistiğine göre termal denge durumunda mümkün değildir ve iki seviyeli sistemlerde

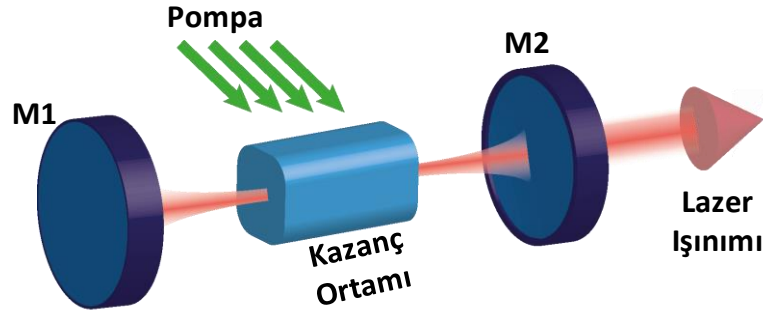
temel seviyedeki nüfus yoğunluğunun uyarılı seviyeye göre çok daha yüksek olması nedeniyle genellikle soğurucu özellik gösterirler. Bunun bir sonucu olarak lazer operasyonlarında iki veya üç seviyeli sistemler kullanılır. Üç seviyeli sistemlerde pompa ile uyarılan atomlar veya moleküller, temel seviyeden üçüncü seviyeye çıkarak ışımasız geçiş ile ikinci seviyeye geçerler ve nüfus tersinimi seviye $|2\rangle$ 'de gerçekleşir. Ardından temel seviyeye uyarılı ışımaya geçerek lazer operasyonu sağlanır (Şekil 1.2(a)). Dört seviyeli sistemlerde ise sistem temel seviyeden $|3\rangle$ seviyesine çıktıktan sonra, ışımasız geçiş ile seviye $|2\rangle$ 'ye hızlıca düşer, ardından lazer ışınımı $|2\rangle$ ve $|1\rangle$ seviyeleri arasında gerçekleşir. Seviye $|1\rangle$ 'e inen atomlar tekrar ışımasız geçiş yaparak temel seviyeye geri dönerler Şekil 1.2 (b).



Şekil 1.2 : (a) Üç seviyeli ve (b) dört seviyeli lazer sistemlerinin enerji seviye diyagramları.

Lazer ışınımının elde edilmesinde lazer aktif ortamının yanı sıra bir diğer gereksinim pozitif geri beslemedir. Optik kazanç ortamı ile elde edilen fotonların sisteme geri gönderilmesi ile kazanç operasyonunun sürekliliği sağlanır. Lazer sistemlerinde bu geri besleme yüksek yansıtıcı aynalar sayesinde sağlanmaktadır. Lazer ışınımı

sağlanması için gerekli olan aktif ortam ve aynalardan oluşan bir temsili rezonatör çizimi Şekil 1.3 ile verilmiştir.



Şekil 1.3 : Tam yansıtıcı ayna (M1), kazanç ortamı, pompa ve çıkış aynası (M2) içeren iki aynalı lazer tasarımı.

Şekil 1.3’den görüleceği üzere lazer ışınımı elde edilmesi için bir kazanç ortamına, bu ortam kullanılarak optik kazanç sağlanabilmesi için nüfus tersinimi sağlayacak bir aktif ortama, geri besleme için M1 yüksek yansıtıcı aynaya ve çıkış gücünün elde edileceği, lazer dalgaboyunda kısmi geçirgenliğe sahip M2 çıkış aynasına (output coupler (OC)) gerek vardır. Burada verilen sistem iki aynalı bir rezonatörü temsil etmektedir ve bu tip bir sistemde lazer operasyonunun görülmesi için optik kazancın kavite içi kayıpları aşması gerekmektedir. Bu koşulun sağlandığı eşik kazanç katsayısı $\gamma(\nu)_{th}$,

$$\gamma(\nu)_{th} = \alpha_L + \frac{\ln[1/R_1 R_2]}{2d_g} \quad (1.12)$$

ifadesi ile verilir. Burada α_L rezonatör kaynaklı kayıplara, R_1 ve R_2 aynaların lazer dalgaboyundaki yansıtıcılıklarına ve d_g kazanç ortamının uzunluğuna karşılık gelmektedir. Kazanç katsayısının, eşik kazanç katsayısına ulaşması ve takiben lazer operasyonunun elde edilmesi için sistem uygun bir pompa kaynağıyla yeterli bir güçte pompalanmalıdır. Lazer operasyonunun sağlandığı en küçük pompa gücü, pompa eşik gücü (P_{th}) olarak adlandırılır ve

$$P_{th} = \frac{\pi}{4} \frac{h\nu_p}{\sigma_e \tau_f} \frac{w_p^2 + w_L^2}{\eta_a} (L + T) \quad (1.13)$$

ifadesi ile hesaplanır. Bu denklemde $h\nu_p$ pompa foton enerjisini, w_L ve w_p sırasıyla lazer ve pompa spot genişliklerini, L rezonatör kayıplarını, T çıkış aynasının geçirgenliğini, η_a soğurma yüzdesini, σ_e ışına arakesitini, τ_f ise floresans yaşam süresini ifade etmektedir.

1.2 Katıhal Lazerler

Lazerler, kazanç ortamlarının yapısına göre katıhal lazerler, boya lazerleri, gaz lazerleri, yarı iletken lazerleri olarak sınıflandırılabilirler. Katıhal lazerlerde, kazanç ortamlarının üretilmesinde genellikle kristal, cam veya seramik konaklar içerisine katkılanmış ışıyabilen iyonlar olan Pr, Nd, Eu, Ho, Er, Tm, Yb gibi nadir toprak elementleri veya Ti, Cr, Fe gibi geçiş metalleri kullanılmaktadır. Nadir toprak elementlerinin sahip oldukları elektron konfigürasyonunda lazer aktif $4f$ elektronu, kendisini çevreleyen $5s$ ve $5p$ kabuklarının çaplarının büyüklüğü nedeniyle elektrostatik olarak kalkanlanmaktadır [6, 7]. Lazer aktif elektronun çevresindeki konağın örüntü titreşimlerinden izole edilmesi sayesinde optik soğurma ve ışımaya karakteristiklerinin konak malzemeye olan bağılıklarını azaltmaktadır [6]. Diğer taraftan ilk katı hal lazer olan yakut lazerinin de ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) dahil olduğu nadir toprak elementlerinin katkılı olduğu lazer aktif ortamları olan Ti:safir ($\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$), Cr^{4+} :forsterit, $\text{Fe}^{3+}:\text{ZnSE}$ gibi lazerler dalgaboyu ayarlanabilir, sürekli dalga, Q-anahtarlama veya kip kilitli çalışma rejimlerinde bir çok araştırmacı tarafından raporlanmıştır. Bu tez dahilinde kullanılan lazer aktif ortamları da katıhal kazanç ortamlarıdır. Tez dahilinde yapılan çalışmalarda Cr^{4+} katkılı forsterite kristali, Tm^{3+} katkılı KY_3F_{10} ve BaY_2F_8 lazer aktif ortamları üzerinde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca 120 fs darbe süreli Ti:safir lazeri de femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazımı, grafen doyabilen soğurucu işleme ve nanoparçacık üretiminde kullanılmıştır.

Lazerleri sınıflandırmanın bir diğer yolu ise lazer çıkış güçlerinin zamana bağlı değişimine göre ayırmaktır. Bu yöntemle sınıflandırılan lazerler sürekli dalga, darbeli ve kip kilitli lazerler olarak kategorize edilmektedir. Çıkış gücü zamanla değişmeyen lazerler, sürekli dalga (continuous wave (CW)) lazerler olarak isimlendirilirler. Çıkış gücünün zamana göre periyodik bir yapı izlediği durumlara iki örnek verilebilir. İlki, Q-anahtarlama veya kazanç anahtarlama ile elde edilen darbeli lazerler, ikincisi ise

Kerr odaklama veya doyabilen soğurucular gibi pasif kip kilitleme yöntemleri ya da aktif modülatörler kullanılarak çalıştırılan kip kilitli lazerlerdir. Q-anahtarlama ile lazer kavitesinin Q parametresinin değiştirilmesi ile nanosaniye mertebesinde darbeler elde edilmektedir [8]. Burada amaç lazer kavitesinin içerisinde genellikle bir kayıp mekanizmasıyla enerjinin aktif ortamda depolanmasını ve kaybın azalmasıyla depolanan enerjinin kısa bir lazer darbesi şeklinde salınmasını sağlamaktır. Q-anahtarlama yöntemlerine örnek olarak, akusto-optik, elektro-optik, mekanik ve doyabilen soğurucu ile Q-anahtarlama örnek verilebilir. Diğer bir lazer türü olan kip kilitli lazerler ise aktif veya pasif kip kilitleyicilerin kullanılmasıyla pikosaniye, femtosaniye süresinde darbeler üretebilmektedirler. Kip kilitli lazerler tez içeriğinde hem lazer ile malzeme işleme hem de ultra kısa darbe üretimi gibi alanlarda doğrudan kullanılması nedeniyle bir sonraki alt başlıkta ayrıca açıklanmıştır.

1.2.1 Kip kilitli lazerler

Pikosaniye altında ve femtosaniye mertebesinde üretilen lazer darbeleri ultra kısa darbeler olarak isimlendirilirler. Bu zaman mertebesinde darbe süresine sahip lazer darbeleri üretilmesinde kip kilitleme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ile üretilen ultra kısa darbe sürelerine sahip lazerler ise kip kilitli lazer olarak isimlendirilmektedir. Kip kilitleme operasyonu ilk kez Hargrove ve arkadaşları tarafından 1964 yılında He-Ne lazeri üzerinde gösterilmiştir ve günümüze kadar birçok çalışmada ultra kısa darbe üretimi için kullanılmıştır [9]. Bu yöntemde çıkış gücünde meydana gelen modülasyon lazer kavitesi içerisinde geniş bir bant genişliğinde desteklenen aynı fazda salınan boyuna kiplerin süperpozisyonu ile meydana gelmektedir ve kip kilitli bir lazerin elektrik alanı kendisini oluşturan kiplerin toplamı şeklinde,

$$E(t) = \sum_{q=0}^{M-1} E_q e^{i(\omega_0 + q\omega_F)t + i\varphi(t)} \quad (1.14)$$

ifadesi ile verilir [6, 8]. Burada $E(t)$ zamana bağlı elektrik alanı, M kip sayısını, ω_0 referans açısal momentum değerini, ω_F komşu iki kip arasındaki açısal momentum farkını, q kaçınıcı kip olduğunu, $\varphi(t)$ ise faz terimini ifade etmektedir. Denklem 1.14'ün analizinden, kip kilitlemenin gerçekleşmesi için φ teriminin sabit olması gerekliliği anlaşılmaktadır. Diğer bir deyişle rastlantısal fazlarda salınan kipler ile kip kilitleme mümkün olmamaktadır. Bu durumda, faz terimi sıfır alındığında ve salınan

kiplerin genliklerinin eşit olduğu (E_0) durumda denklem (1.14), geometrik seriye açıldığında denklem (1.15)'e dönüşmektedir ve

$$E(t) = E_0 e^{i\omega_0 t} \frac{\sin(M\omega_F t / 2)}{\sin(\omega_F t / 2)} \quad (1.15)$$

denklemini elde edilmektedir. Lazerin şiddeti elektrik alan profilinin mutlak karesi ile ($|E(t)|^2$) doğru orantılıdır. Şekil 1.4'te, denklem (1.15) kullanılarak, dalga boyu 800 nm ve 1 m kavite uzunluğundaki bir lazer için $M=20$ ve $M=100$ değerleri için hesaplanan şiddet profilleri verilmiştir.

Burada $E_0 = 1$ (a.u.) alınmıştır. Şekil 1.4'te görüldüğü üzere kilitlenen kip sayısının artmasıyla şiddet, dolayısıyla tepe gücü artarken darbe süresi ise azalmaktadır. Burada iki tepe arasındaki zaman farkı tekrarlama periyodu (T_R) olarak verilir ve c ışığın boşluktaki hızı ve L kavite boyu olmak üzere,

$$T_R = \frac{2L}{c} = \frac{1}{f_{rep}} \quad (1.16)$$

ile hesaplanır. Denklem (1.16)'daki f_{rep} ise tekrarlama frekansı olarak isimlendirilir.

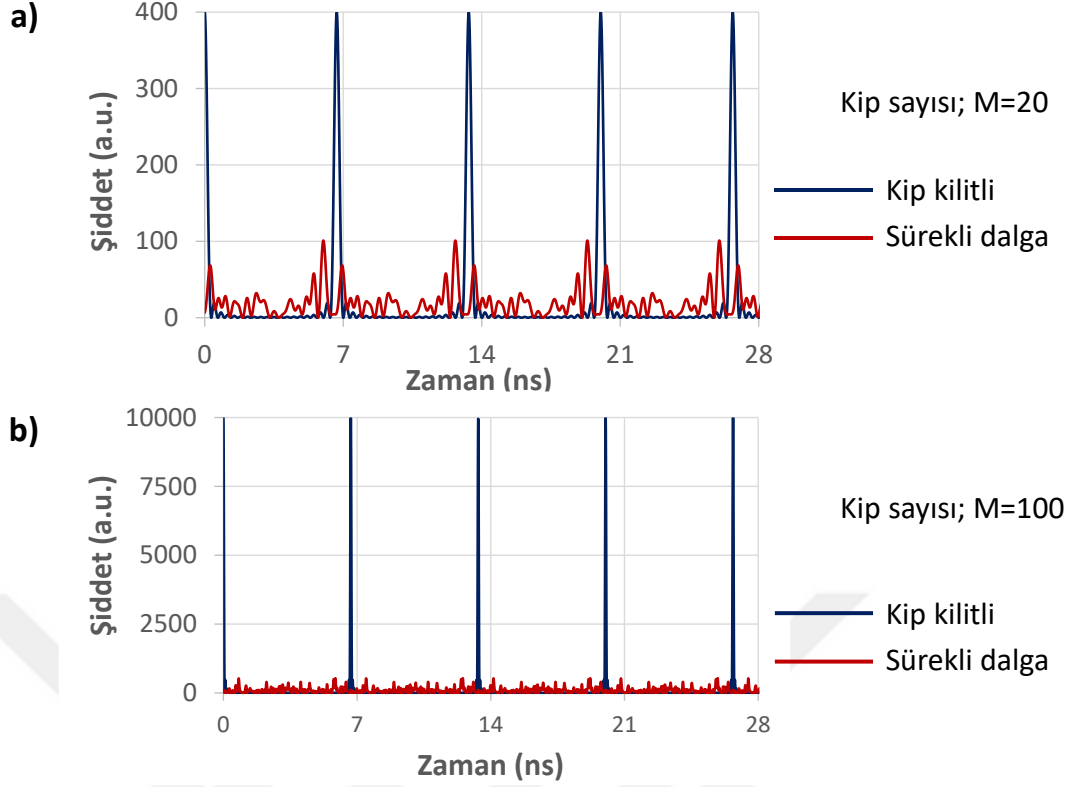
Darbe süresi (τ_{darbe}) ise,

$$\tau_{darbe} = \frac{T_R}{M} \quad (1.17)$$

ile verilir. Ayrıca darbe süresi Fourier dönüşümü üzerinden frekansın spektral genişliğine doğrudan bağlıdır. Kazanç ortamının spektral genişliği ($\Delta\nu$) ile darbe süresi arasında,

$$\Delta\nu \approx \frac{1}{\tau_{darbe}} \quad (1.18)$$

bağıntısı vardır.



Şekil 1.4 : 800 nm dalgaboyuna ve 1 m kavite uzunluğundaki bir lazerde (a) $M=20$ ve (b) $M=100$ değerleri için verilen kip kilitli (mavi) ve sürekli dalga (kırmızı) lazer çıkışının zamana göre şiddet profili.

Buradaki analizden de görüleceği üzere yüksek tepe gücüne sahip darbelerin üretilmesi, enerjinin küçük zaman paketlerine sıkıştırılması ile sağlanmaktadır. Kip kilitli lazerlerde tepe gücü E_{darbe} darbe enerjisi olmak üzere,

$$P_{tepe} = \frac{E_{darbe}}{\tau_{darbe}} \quad (1.19)$$

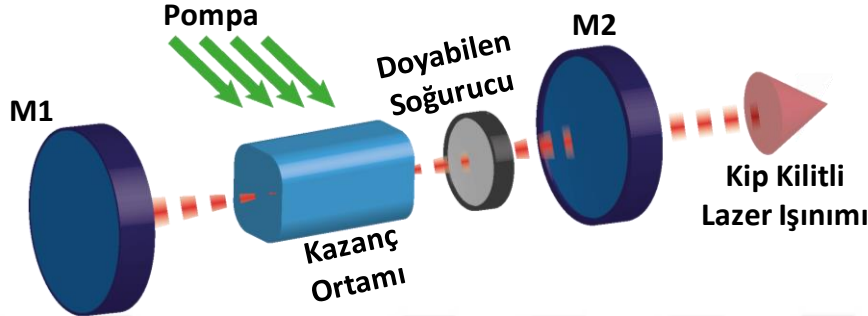
ile verilir. Denklem (1.19)'dan görüldüğü üzere darbe süresinin azalması ile tepe gücü artmaktadır. Darbe enerjisi ise çıkış gücü ($P_{çıkış}$) ve tekrarlama frekansına (f_{tekrar}) bağlıdır ve

$$E_{darbe} = \frac{P_{çıkış}}{f_{tekrar}} \quad (1.20)$$

denklemini ile verilir.

Kip kilitli lazerler aktif mod kitleme ve pasif mod kitleme olarak iki sınıfta incelenmektedir. Aktif mod kitleme durumunda lazer kavitesi içerisine genellikle

haricen kontrol edilen akustik kayıp modülatörü veya elektro-optik faz modülatörü gibi modülatörler eklenirken, pasif kip kilitlemede ise yarıiletken doyabilen soğurucu ayna (Semiconductor Saturable Absorber Mirror, SESAM), karbon nanotüp doyabilen soğurucu ve grafen doyabilen soğurucu gibi pasif kip kilitleyiciler eklenmektedir (Şekil 1.5).



Şekil 1.5 : Kip kilitleme için kullanılan, kazanç ortamı ve doyabilen soğurucu içeren iki aynalı rezonatör.

Doyabilen soğurucular, sahip oldukları soğurma değeri, karşılaştıkları ışığın şiddetine göre değişen optik elemanlardır. Bu pasif kip kilitleyiciler ışık şiddetinin artışı ile sahip oldukları geçirgenliklerinin artması sayesinde lazer kavitesi içerisindeki kaybın modülasyonuna neden olmaktadır. Bu sayede kısa darbe sürelerini destekleyen lazer kavitelerinde, doyabilen soğurucu yüksek tepe güçlerine sahip şiddetli lazer darbelerini destekleyerek lazerin kip kilitli rejimde çalışmasını sağlamaktadır. Bir diğer deyişle lazer, yüksek kayıp gördüğü sürekli dalga rejiminde çalışmak yerine daha az kayba uğrayacağı şiddetli lazer darbeleri üreterek kip kilitli rejimde çalışmaktadır. Doyabilen soğurucuların optik kayıpta meydana getirebildikleri maksimum değişim modülasyon derinliği olarak isimlendirilir. Doyabilen soğurucuların bir diğer önemli parametresi sönüm süresidir. Şiddetli lazer darbesi ile doyuma ulaşan soğurucunun, doyumdan önceki duruma geri dönmesi için gerekli süreye sönüm süresi ismi verilmektedir. Sönüm süresinin kip kilitli lazerlerde yüksek hızlı olması beklenirken, Q-anahtarlama operasyonlarında yavaş olması gerekmektedir [8]. Bir diğer önemli özellik ise spektral genişliktir ve doyabilen soğurucunun kip kilitleme operasyonunu desteklediği spektral aralığa karşılık gelmektedir. Tez dahilinde kip kilitleme deneylerinde kullanılan grafen doyabilen soğurucular, geniş spektral genişlikleri, kısa sönüm süreleri gibi optik özellikleri sayesinde femtosaniye lazer geliştirilmesinde sıklıkla kullanılırlar.

Tez süresince yapılan çalışmalarda femtosaniye lazer ile işleme yöntemiyle elde edilen ve mikro grafen şeritlerinden oluşan, kaybı ayarlanabilir, zebra desenli grafen doyabilen soğurucu ilk defa üretilmiştir ve Cr^{4+} :forsterite lazeri kavitesi içerisinde kip kilitleyici olarak kullanılarak 1 kHz tekrarlama frekansında 42 fs darbeler üretilmiştir.

1.3 Lazer Karakterizasyon Yöntemleri

Geliştirilen özgün katıhal lazerlerin güç verimi, hüzme profil analizi, spektral özellikleri, dalgaboyu ayarlanabilirliği, çıkış gücünün zamana göre değişimi gibi özelliklerinin belirlenmesi lazer karakterizasyonu konusunda önem arz etmektedir. Bu bölümde katıhal lazerler ile ilgili temel bilgi ve terimler verilerek deneysel yaklaşımlar ve ilintili terimler konusunda giriş yapılması hedeflenmiştir.

Lazerlerde hüzme demeti, genellikle Gaussian şiddet profiline ve enine salınan elektrik alana sahip elektromagnetik dalgalardan oluşmaktadır. Gaussian hüzme profiline sahip lazer hüzmeleri ilerlerken spot genişlikleri mesafe ile değişmektedir. Bu tip ışın demetlerinin spot genişliklerinin kök iki katına çıktığı mesafe Rayleigh mesafesi (z_0) olarak isimlendirilir ve

$$z_0 = \frac{n_0 \pi w_0^2}{\lambda} \quad (1.21)$$

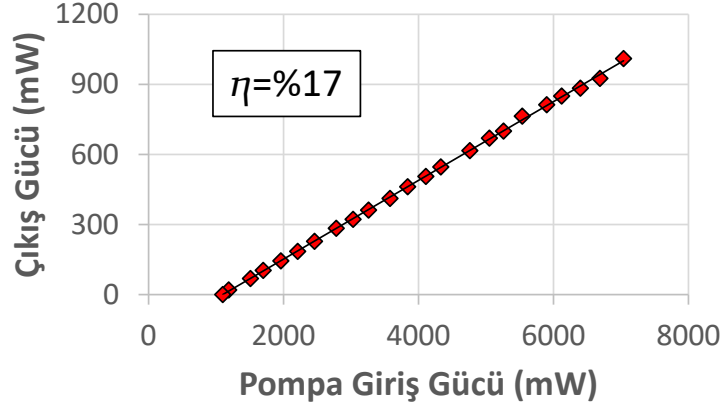
denklemini ifade edilir. Burada (w_0) spot genişliğinin minimum olduğu ve bu dağılımın düzlem dalga oluşturduğu konumdaki spot genişliğini vermektedir. n_0 , kazanç ortamının kırılma indisi, λ ise lazerin dalgaboyudur. Optik pompa kaynaklı bir katıhal kitle lazerlerinin optimum pompa eşik gücüyle çalıştırılabilmesi için pompa ışın demetinin Rayleigh mesafesi ile kazanç ortamının boyunun uyumlu olması gerekmektedir. Bu sayede pompa kaynağının odaklı kalabildiği mesafe boyuca aktif ortamından optik kazanç elde edilebilmektedir. Kazanç ortamının uzunluğu d_g olarak kabul edilirse, ışın demetinin kazanç ortamını en iyi şekilde dolduran spot genişliği,

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda d_g}{2\pi n_0}} \quad (1.22)$$

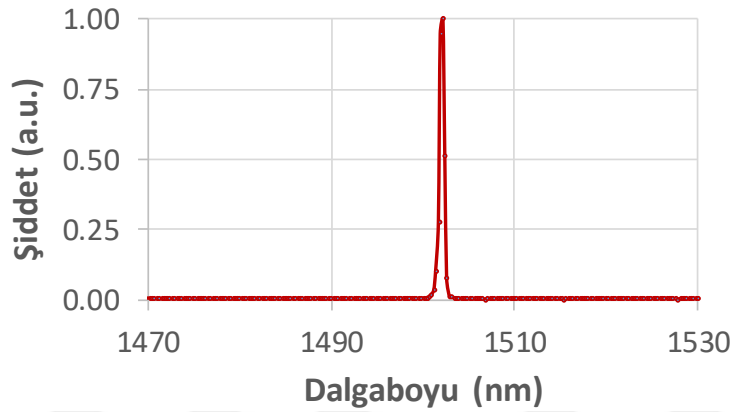
denklemleri ile verilmektedir ve lazerin güç performansını doğrudan etkilemektedir. Lazerlerin güç performansını belirleyen ifade, lazerin verimi olarak adlandırılır ve ideal durumda dört seviyeli bir lazerin çalışma verimi (η),

$$\eta = \eta_a \eta_o \frac{\lambda_p}{\lambda_L} \frac{T}{T + L} \quad (1.23)$$

denklemleriyle ifade edilir [6]. Bu denklemde, η_o , pompa ve lazer ışın demetlerinin kazanç ortamı içerisindeki örtüşme miktarı ($\eta_o = 0$ örtüşme yok, $\eta_o = 1$ tam örtüşme), λ_p ve λ_L ise pompa ve lazer dalga boylarıdır. Denklem (1.23)'teki bütün parametreler sabit tutulduğunda ve farklı geçirgenlik yüzdelere sahip çıkış aynaları (T) kullanılarak pompa eşik değerleri ölçüldüğünde, lazer dalga boyundaki bir çevrim toplam kavite içi kayıp miktarı (L) hesaplanabilir. Verimin alabileceği değerin en yüksek olduğu duruma kuantum verimi adı verilir. Bu durumda pompa ve lazer ışın demetlerinin tamamen örtüştürüldüğü ve toplam malzeme kayıplarının sıfıra indirildiği varsayılır. Bu durumda lazerden elde edilebilecek verim, pompa dalga boyunun lazer dalga boyuna olan oranı şeklinde hesaplanabilir. Kuantum verim, her soğurulan pompa fotonu için bir lazer fotonu üretildiğini gösteren, elde edilebilecek en ideal verimdir. Bir lazerin verimi deneysel olarak ise verim eğrisi ile elde edilir. Bu yöntemde pompa kaynağının gücü adım adım değiştirilerek lazer çıkış gücü güç ölçer ile kaydedilmektedir. Elde edilen verinin eğimi sayesinde lazerin verimi $\eta = \Delta P_{\text{çıkış}} / \Delta P_{\text{pompa}}$ ile hesaplanmaktadır. Şekil 1.6'da $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ lazeri ile alınmış örnek bir verim eğrisi grafiği verilmiştir. Deneysel veriye doğrusal fit yapıldığında elde edilen doğrunun eğiminden giriş gücüne göre verim eğrisi %17 olarak bulunmuştur. Şekil 1.7'de ise $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ lazeri kullanılarak elde edilen örnek bir optik spektrum verisi sunulmuştur. Lazer çıkışı geniş bant yansıtıcılığa sahip aynalarla optik spektrometreye yönlendirilerek optik spektrum verisi bir diğer deyişle dalga boyu kaydedilmektedir. Şekil 1.7'den görüleceği üzere $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ lazerinin dalga boyu 1502 nm olarak ölçülmüştür.



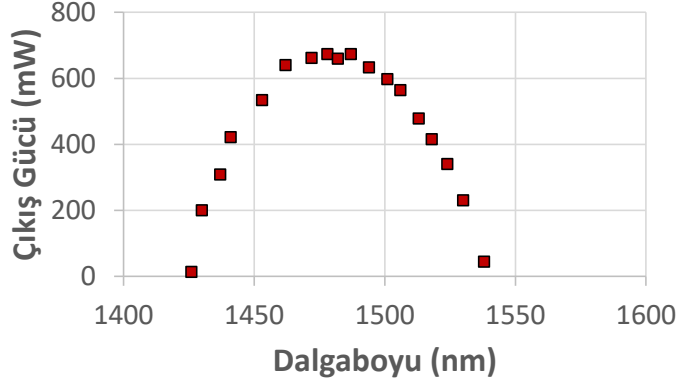
Şekil 1.6 : Cr⁴⁺:YAG lazeri ile alınmış örnek verim eğrisi grafiği.



Şekil 1.7 : Cr⁴⁺:YAG lazeri ile alınmış örnek optik spektrum verisi.

Dalgaboyu ayarlanabilir lazerlerde bir diğer karakteristik veri akort (tuning) verisidir. Burada amaç dalgaboyu ayarlanabilen bir lazerin dalgaboyu değiştirilerek ilgili dalgaboyunda elde edilen gücün kaydedilmesidir. Bir lazerin akort verisi, ışıınım yaptığı bant genişliğine ve kullanılan lazer tasarımındaki optiklerin desteklediği spektral genişliğe bağlıdır. Cr⁴⁺:YAG lazer ile alınmış örnek bir akort verisi Şekil 1.8’de verilmiştir. Akort verisinin alınmasında, genellikle kavite içerisine prizma, kırınım ağı veya çift kırınımlı akort levhası eklenmektedir. Bu optik elementlerin sağladığı dalgaboyu seçiciliği sayesinde kavite içerisinde rezonans sağlanacak dalgaboyu seçilebilmektedir.

Kavite içi kayıpların hesaplanmasında kullanılan analizlerden bir diğeri Findley-Clay analizidir.

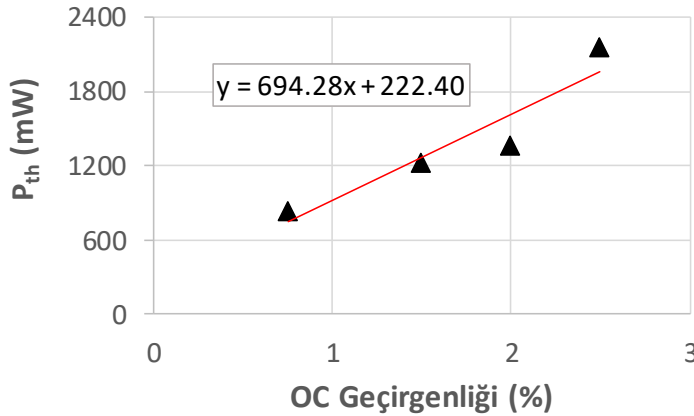


Şekil 1.8 : Cr⁴⁺:YAG lazeri ile alınmış örnek akort verisi.

Bu analiz yönteminde ideal dört seviyeli lazerler için pompa eşik gücü A sabit bir sayı olmak üzere,

$$P_{th} = A(T + L) \quad (1.24)$$

eşitliği ile verilir [10, 11]. Denklem (1.24)'ten görüldüğü üzere pompa eşik P_{th} gücü, çıkış aynasının geçirgenliğine bağlılığı doğrusaldır. Bu sayede farklı geçirgenliklerle sahip çıkış aynaları ile alınmış pompa eşik güçleri verisi sayesinde L değeri hesaplanabilmektedir. Burada L değeri elde edilen doğrusal denklemdeki AL değerinin doğrusal denklemin eğimi olan A değerine bölünmesi ile elde edilir. Bu analizde kullanılmak üzere Cr⁴⁺:YAG lazeri ile alınmış örnek bir pompa eşik gücüne karşılık çıkış aynası verisi Şekil 1.9 ile verilmiştir.

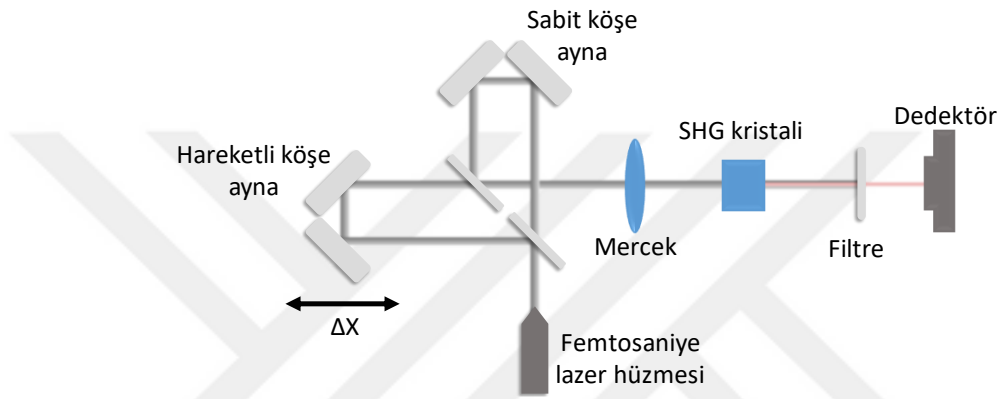


Şekil 1.9 : Findley-Clay analizi ile tam tur kavite kaybının hesaplanmasında kullanılan OC geçirgenliğine karşılık pompa eşik gücü verisi.

Şekil 1.9'dan görüldüğü üzere elde edilen veriye yapılan doğrusal fit ile eğim 694.28, artık sayı (intersept) ise 222.40 olarak elde edilmiştir bu durumda tam tur kayıp değeri (222.40/694.28) değerinden %0.32 olarak hesaplanmaktadır.

Yukarıda verilen analizler sürekli dalga ve darbeli lazerlerde ortak olarak kullanılan karakterizasyon yöntemleridir. Bu yöntemlere ek olarak darbeli lazerlerin darbe süreleri, tekrarlama frekansları gibi özelliklerinin karakterizasyonunda kullanılan deneysel yöntemler bulunmaktadır.

Darbe süresi tayini için kullanılan önemli yöntemlerden bir tanesi otokorelatörlerdir. Bu tez içeriğinde geliştirilen femtosaniye Cr^{4+} :forsterite lazerinin de darbe süresinin ölçümünde şiddet otokorelatörü kullanılmıştır. Bu ölçüm yönteminin temeli Şekil 1.10'da verilen Michelson interferometresi düzeneğine dayanmaktadır.



Şekil 1.10 : Darbe süresi ölçümünde kullanılan şiddet otokorelatör deney düzeneği.

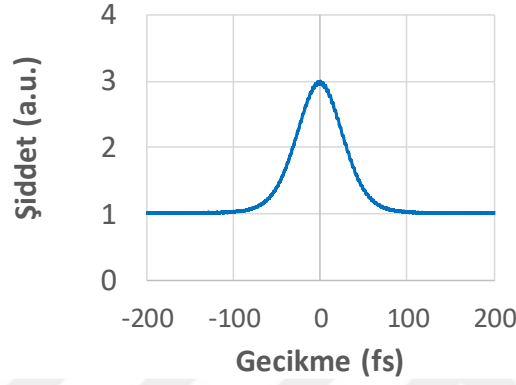
Bu düzende ultra kısa lazer darbesi bir hüzme bölücü kullanılarak ikiye ayrılmaktadır. Hareketli bir ayna Δx kadar ötelenerek kullanılarak iki hüzme arasında τ kadar bir zaman farkı oluşturulmaktadır. Bu zaman farkı c boşluktaki ışık hızı olmak üzere,

$$\tau = 2\Delta x / c \quad (1.25)$$

olarak verilir. Denklem (1.25)'ten hesaplanabileceği üzere, bölünmüş hüzmeler arasında pikosaniye ve femtosaniye mertebesinde gecikmeler için mikrometre mertebesinde ötelenme gerekmektedir. Bu mertebelerde ötelenmeler hassas doğrusal konumlandırıcılar ile mümkündür. Otokorelasyon ölçümünde, aralarına gecikme verilmiş hüzmeler tekrar birleştirilerek doğrusal olmayan özelliğe sahip bir kristale odaklanarak gönderilirler. Kristal içerisinde üst üste gelmeleriyle elde edilen ikinci harmonik üretimi (second harmonic generation (SHG)) sinyalinin analizinden darbe süresi hesaplanabilmektedir. Bu durumda aralarında τ kadar gecikme bulunan hüzmelerin oluşturduğu şiddet otokorelasyon fonksiyonu,

$$A(\tau) = \frac{3\tau(\cosh \tau - \sinh \tau)}{\sinh^3 \tau} \quad (1.26)$$

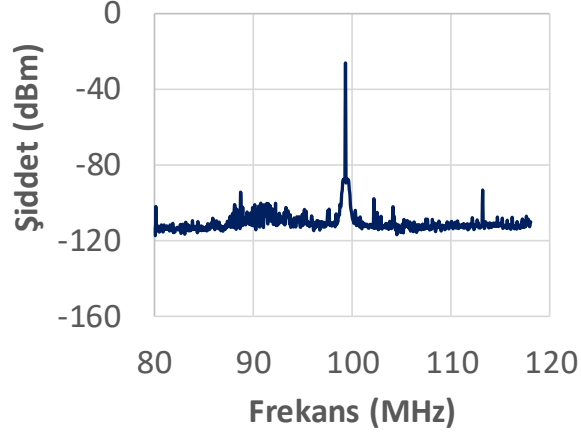
ile verilmektedir [12]. Burada $A(\tau)$ otokorelasyon fonksiyonu olarak isimlendirilir. Bu fonksiyon ile, kip kilitleme sayesinde üretilen SHG sinyalinin tepe noktasının zeminine oranı 3 olarak hesaplanır. Elde edilen kip kilitli lazer hüzmesinin sech^2 darbe profiline sahip olduğu yaklaşımla, darbe genişliği $\tau_p = \tau_{AC} \times 1.54$ eşitliği ile hesaplanır [6, 12]. Örnek bir otokorelasyon sinyali Şekil 1.11’de verilmiştir.



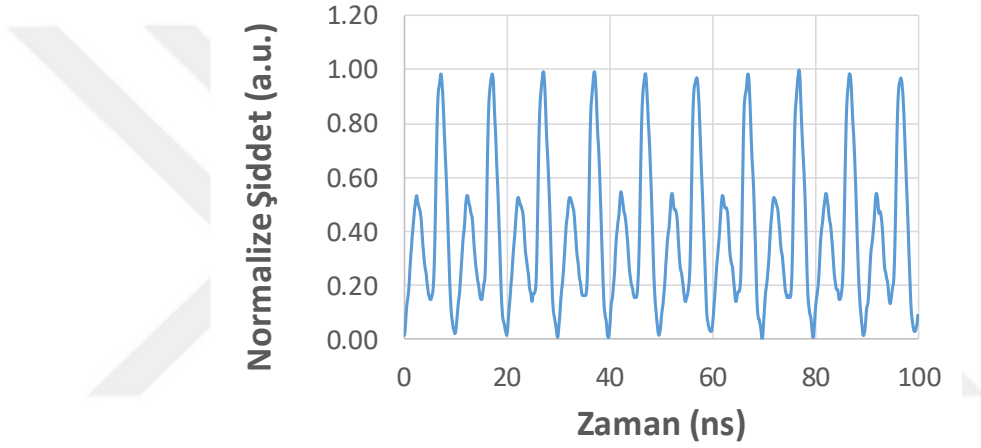
Şekil 1.11 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazer ile alınmış örnek bir şiddet otokorelasyon sinyali.

Kip kilitli lazerlerde bir diğer önemli parametre tekrarlama frekansıdır. Tekrarlama frekansı (f_{rep}) denklem (1.16)’da verildiği üzere ışık hızının, lazer darbesinin kavite içerisinde bir tam turda aldığı mesafeye, bir diğer deyişle ışık hızının kavite boyunun iki katına bölümü ile elde edilir. Kavite boyunun 1-100 m aralığında olduğu durumlardaki tekrarlama frekansı MHz mertebelerine karşılık gelmektedir. Bu sayede radyo frekansı (RF) spektrum analizörleri ile darbelerin hangi tekrarlama frekansında üretildikleri bilgisi ölçülebilmektedir. Şekil 1.12’de tekrarlama frekansı yaklaşık 100 MHz olan bir darbeli lazerin örnek RF spektrum verisi sunulmuştur. Elde edilen sinyalin gürültü seviyesinden yükseldikçe kip kilitleme kalitesi artmaktadır.

Bu yöntemlere ek olarak, femtosaniye lazer darbelerinin zaman içerisindeki evrimini gösteren bir diğer ölçüm yöntemi hızlı tepki sürelerine sahip dedektörler ile alınan darbe dizisi verisidir. Örnek darbe dizisi verisi Şekil 1.13’te sunulmuştur.



Şekil 1.12 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazeri ile alınmış örnek bir RF spekturum verisi.



Şekil 1.13 : Kip-kilitli Cr^{4+} :forsterite lazeri ile alınmış örnek bir darbe dizisi verisi.

Tez dahilinde farklı çalışma rejimlerinde, çeşitli katkı konak kombinasyonlarındaki lazer aktif ortamlarla deneysel çalışmalar yürütülmüş ve yukarıda verilen deneysel yöntemleri de içeren ileri karakterizasyon yöntemleri ile irdelenmiştir. Bu sayede özellikle özgün katıhal lazerlerin geliştirilmesi ve katıhal lazerler uygulamaları konularında araştırmalar yapılmıştır.



2. FEMTOSANİYE LAZER İLE ÜRETİLEN ZEBRA DESENLİ KİP KİLİTLEYİCİ

2.1 Giriş

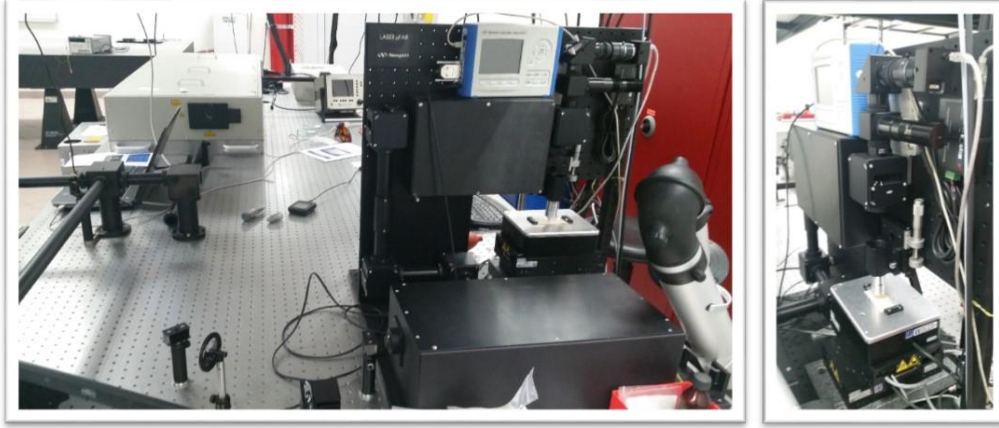
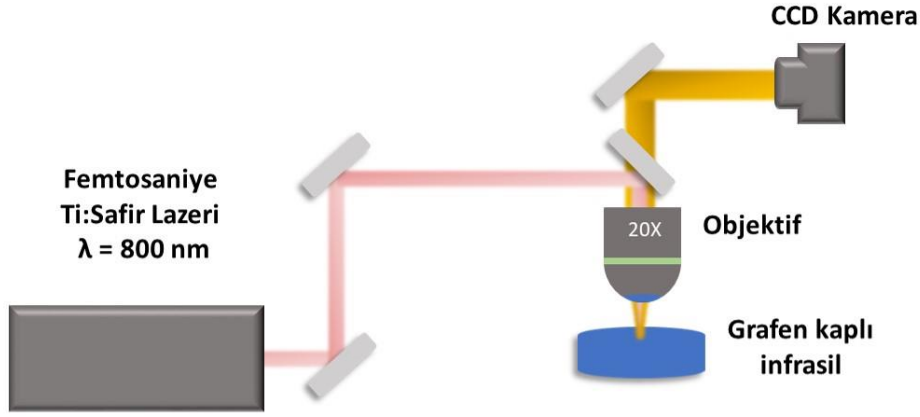
Grafen doyabilen soğurucular geniş spektral soğurma aralıkları, pikosaniye zaman aralığındaki düşük sönüm süreleri ve düşük doyum akıları gibi özellikleri sayesinde günümüzde lazerlerin kip-kilitli ve Q-anahtarlama rejimlerinde çalıştırılmasında 750 nm'den 4400 nm'ye kadar geniş bir aralıkta kullanılmaktadırlar [13-17]. Ancak bu avantajlı özelliklerinin yanında tek atomik katmana sahip grafenin tek geçişteki küçük sinyal soğurmasının %2.3 değerinde olması kritik bir dezavantajdır. Grafenin sahip olduğu bu soğurma miktarı, bir lazer kavitesinin içerisinde bir turunda %4.6 değerine tekabül etmektedir. Lazer kavitesi dahilindeki tüm kayıp parametreleri ve OC geçirgenlik değerleri ihmal edildiğinde dahi lazer operasyonunun sağlanabilmesi için optik kazancın %4.6'lık kaybı aşması gerekmektedir. Bir diğer deyişle, grafen doyabilen soğurucular lazer çalıştırma eşiği üzerinde olumsuz rol oynayarak en düşük pompa eşik gücünün yükselmesinde önemli bir faktördür. Bunun sonucu olarak özellikle düşük kazançla sahip lazer aktif ortamlarının operasyonunda elverişsizliğe neden olmaktadır ve güç performanslarını olumsuz etkilemektedir. Grafenin neden olduğu bu soğurma seviyesinin azaltılması için kimyasal katkılama [18], grafen tabanlı katı hal kapasitör yapıları [19-21] ve grafen tabanlı süper kapasitör yapıları [22-24] gibi çeşitli yaklaşımlar sunulmuştur. Ancak önerilen bu yaklaşımlar da bazı dezavantajları beraberinde getirmektedirler. Kimyasal katkılama yönteminde sabit Fermi seviyesi kayması gibi bir dezavantajı varken, grafen tabanlı katıhal kapasitör yapılarında ise sisteme uygulanan bias voltaj değerinin onlarca volt mertebesinde olması dielektrik bozulma (dielectric breakdown) riskini doğurmaktadır. Her ne kadar grafen tabanlı süper kapasitör yapıların, bu dezavantajları başarıyla aşarak 800 nm ile 1250 nm dalgaboyu aralığında kaybı ayarlanabilir doyabilen soğurucu olarak kullanılabildiği gösterilse de bu sistemin de iki önemli dezavantajı bulunmaktadır. Bunlardan ilki, süperkapasitör yapısı oluşturulurken sistemin düşük bias geriliminde çalıştırılması amacıyla iletken plakalar arasında bir elektrolit sıvı kullanılmasıdır. Bu

sınının 1.7 μm dalgaboyu üzerinde meydana getirdiği soğurma kayıpları nedeniyle grafenin tüm soğurma aralığı kullanılamamaktadır. İkinci dezavantaj ise uygulanan bias voltajının yükseltilmesi ile doyabilen soğurma dalgaboyu aralığının Pauli bloklaması nedeniyle azaldığı gösterilmiştir [21]. Yapılan bu çalışmada 1 V değerine sahip bir bias geriliminin grafenin doyabilen soğurucu olarak çalışabildiği dalgaboyu aralığını 630 nm ile 1100 nm arasında sınırlandırdığı gösterilmiştir. Buradan anlaşılabileceği üzere grafen tabanlı süper kapasitörler kaybı ayarlanabilir doyabilen soğurucuların üretilmesi konusunda önemli bir gelişme kaydedilmesini sağlasa da limitli bir dalgaboyu bölgesinde çalışıyor olması aşılması gereken önemli bir bilimsel problemdir. Bütün bu gelişmeler ışığında, grafenin tüm soğurma spektrumunu kullanabilen, kaybı ayarlanabilir bir doyabilen soğurucu cihazın geliştirilmesi gerekliliği ortaya çıkmıştır. Tez çalışmasının bu bölümünde yukarıda verilen sorunların aşılması için geliştirdiğimiz, femtosaniye lazer ile mikroişlemeye tabi tutulan kaybı ayarlanabilir grafen tabanlı doyabilen soğurucu sunulmuştur. Günümüze kadar, femtosaniye lazer ile tek katmanlı grafenin modifiye edilebileceğinin gösterilmesi ile beraber femtosaniye lazer ile farklı desenlerde mikro yapıların oluşturulması amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmalar genellikle grafenin kesilmesi, nano ölçekte işlenmesi veya yüksek tekrarlama frekanslı lazerlerin grafen işlemedeki etkilerinin incelenmesi gibi ultrahızlı lazerlerin grafen işleme karakteristiklerine odaklanmaktadır [25-29]. Tez çalışmasıyla femtosaniye lazer ile işlenmiş tek katmanlı grafenin, lazerlerde önemli bir uygulama alanı olan kip kilitleyici olarak daha verimli şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Burada, tek katmanlı grafen, fs lazer ile kaplı olduğu alttaştan mikron mertebesinde farklı periyodlarda şeritler oluşturacak şekilde kaldırılarak grafen doluluk oranı azaltılmış bölgeler oluşturulmuş ve ZeGSA (Zebra Patterned Graphene Saturable Absorber) olarak literatüre katılmıştır [30]. Elde edilen grafen şeritlerin genişlikleri ve periyodu işleme parametreleriyle belirlenerek, grafen soğurma miktarının tek geçişte %2.3 ile %0.21 arasında değiştirilebildiği gösterilmiştir. Grafen miktarı femtosaniye lazer ile azaltılmış ZeGSA yapıların kip kilitleme performansının incelenmesi amacıyla 1250 nm merkez dalgaboyunda çalışan bir Cr^{4+} :forsterite lazeri kullanılmıştır. Bu amaçla infrasil alttaş üzerine kaplanmış tek katmanlı grafen üzerinde altı ayrı ZeGSA bölge oluşturulmuş, bu bölgelerin kaviteye kattıkları kayıplar hesaplanmış ve kip kilitleme karakteristikleri incelenmiştir. Ayrıca ZeGSA yapıların grafen doyabilen soğurucu (GSA) ile karşılaştırılması amacıyla lazer ile modifiye edilmemiş bölgenin de kip

kilitleme karakterizasyonu yapılmıştır. Bu sayede elde edilen ZeGSA cihaz mimarisinin standart GSA yapılara göre geniş bir spektrum aralığında daha yüksek güç ve düşük darbe süresi elde edilebilen doyabilen soğurucu yapılar olduğu gösterilmiştir.

2.2 Femtosaniye Lazer ile Mikro İşleme Yöntemi Kullanılarak Zebra Desenli Grafen Yapıların Oluşturulması

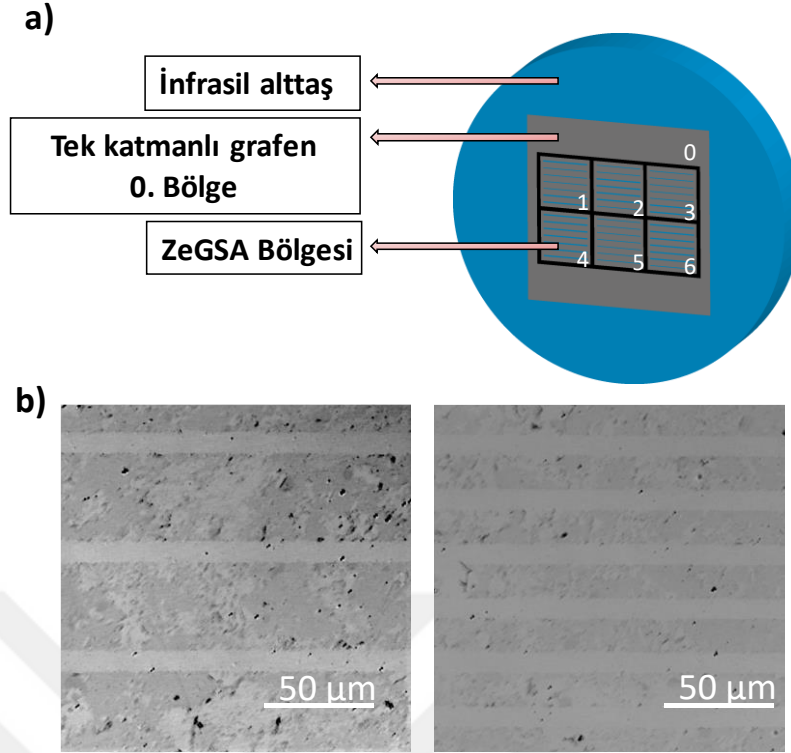
Yaptığımız deneylerde, ZeGSA yapıların geliştirilmesinde infrasil alttaş üzerine kimyasal buhar biriktirme (chemical vapor deposition, CVD) yöntemi ile büyütülmüş tek katman grafen kullanılmıştır. Femtosaniye lazer ile mikro işleme yönteminde lazer aşındırmasının sağlanması için 120 fs darbe süresi ve 1 kHz tekraralama frekansına sahip 800 nm dalgaboyunda Ti:safir lazer sistemi kullanılmıştır (Şekil 2.1). Lazer yazım parametreleri seçilirken seçici aşındırma yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde uygulanan lazer akısının, grafenin lazer aşınma eşiğinden yüksek, alttaşın aşınma eşiğinden ise düşük olması hedeflenmektedir. Burada amaç, alttaşa herhangi bir zarar vermeden grafenin yüzeyden kaldırılmasıdır. Bu amaçla 800 nm dalgaboyuna sahip femtosaniye lazer hüzmesi 20X büyütme ve 0.40 numerik açıklığa sahip bir objektif ile örnek üzerine odaklanmıştır. Öncelikle giriş gücü ayarı yapılarak infrasilin yüzeydeki aşınma eşik gücü, 290 μW olarak hesaplanmıştır. Infrasile zarar vermeden grafen katmanının kaldırılabilmesi amacıyla bu güç %10 miktarında azaltılmış ve grafen işlemede kullanılan akı 2.6 J/cm² olarak hesaplanmıştır. Yapılan işlem sırasında grafen şeritlerin elde edilmesi amacıyla grafen yüzeyine odaklanan lazer hüzmesi bilgisayar kontrollü, üç boyutlu tezgah ile 100 $\mu\text{m/s}$ hızla hareket ettirilerek farklı periyoda sahip ZeGSA bölgeleri oluşturulmuştur. Burada elde edilen grafensiz şeritlerin genişliği ortalama 9.3 μm olarak hesaplanmıştır. Grafenli bölgenin genişliği ise iki grafensiz bölgenin arasındaki mesafenin değişmesiyle belirlenmiştir. Bu sayede periyodu, grafensiz ve grafenli bölgenin genişliklerinin toplamı olacak şekilde periyodik bir yapı elde edilmiştir.



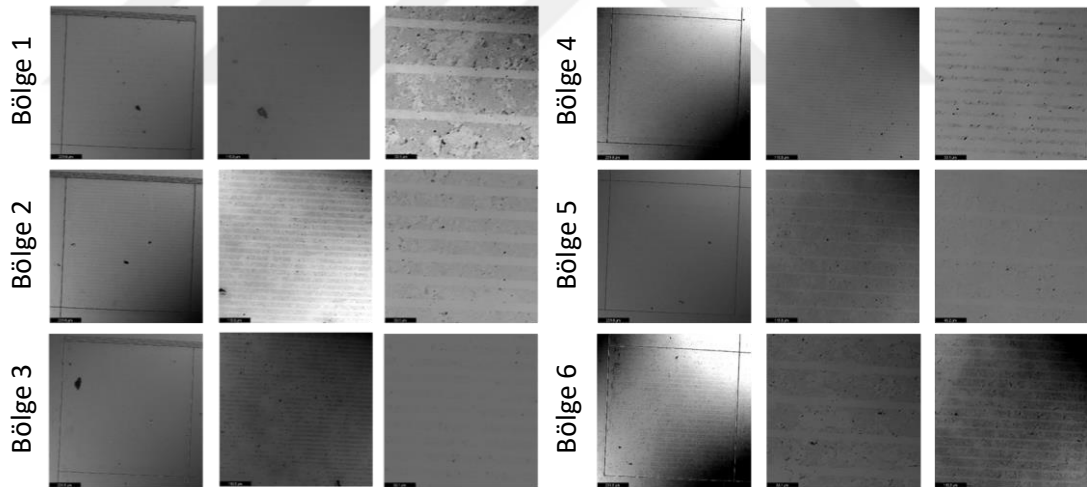
Şekil 2.1 : ZeGSA geliştirilmesinde kullanılan femtosaniye lazer mikro işleme düzeneği (üst) ve düzenek fotoğrafları (alt).

Üretilen ZeGSA yapıların, grafenin soğurma seviyesini değiştirmedeki kabiliyetinin incelenmesi amacıyla periyot değiştirilerek altı farklı bölge elde edilmiştir. Her bir bölge, etrafına çizilen 1 mm x 1 mm boyutuna sahip bir kare ile sınırlandırılmıştır. Bu kare bölgelerin sınırları, infrasilin aşınma eşiğinin üzerindeki lazer gücü ile alttaş üzerinde hasar oluşturacak şekilde çizilmiştir. Bu kare desen sayesinde elde edilen bölgelerin testi sırasında lazer hüzmelerinin hangi bölgeden geçtiğinin tespiti kolaylaşmıştır. Lazer ile grafen işleme sonuçlarının incelenmesi amacıyla işlem sonrasında örnek, konfokal mikroskop ile incelenmiştir. Elde edilen mikroskop görüntüleri Şekil 2.2(b)'de verilmiştir.

Mikroskop görüntülerinden açıkça görüldüğü üzere grafen kaplama alttaşa herhangi bir zarar verilmeden yüzeyden lazer ile kaldırılmıştır. Tüm bölgelerden alınan mikroskop görüntüleri ise Şekil 2.3'te verilmiştir.



Şekil 2.2 : (a) ZeGSA yapısının temsili çizimi ve (b) sırasıyla %81 ve %62 grafen doluluk oranına sahip bölgelerin mikroskop görüntüsü.



Şekil 2.3 : Tüm ZeGSA bölgelerinin konfokal mikroskop ile elde edilen farklı büyütme kullanılarak alınmış mikroskop görüntüleri.

Her bir ZeGSA bölgesinin grafen miktarlarının hesaplanması için mikroskop görüntülerinden alınan ölçümler kullanılmıştır. Bu ölçümler ile elde edilen grafen miktarları Çizelge 2.1’de verilmiştir.

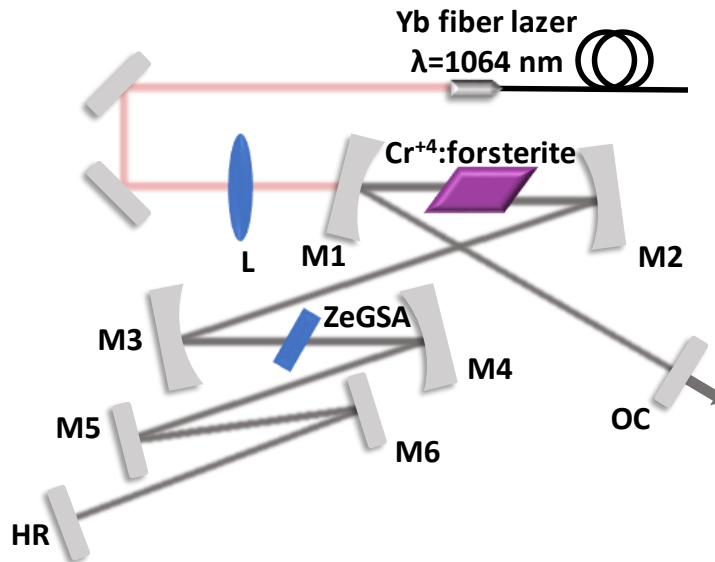
Mikro işleme deneylerinin tamamlanmasının ardından üretilen ZeGSA bölgeleri kip-kitleme deneylerinde Cr^{4+} :forsterite lazeri ile test edilmişlerdir.

Çizelge 2.1 : Farklı ZeGSA bölgelerinde elde edilen grafen miktarları.

ZeGSA Bölgesi	Grafen Miktarı (%)
0	100
1	81
2	62
3	52
4	32
5	85
6	76

2.3 ZeGSA Yapılarının Cr^{4+} :Forsterite Lazeri ile Kip Kilitleme Performansının İncelenmesi

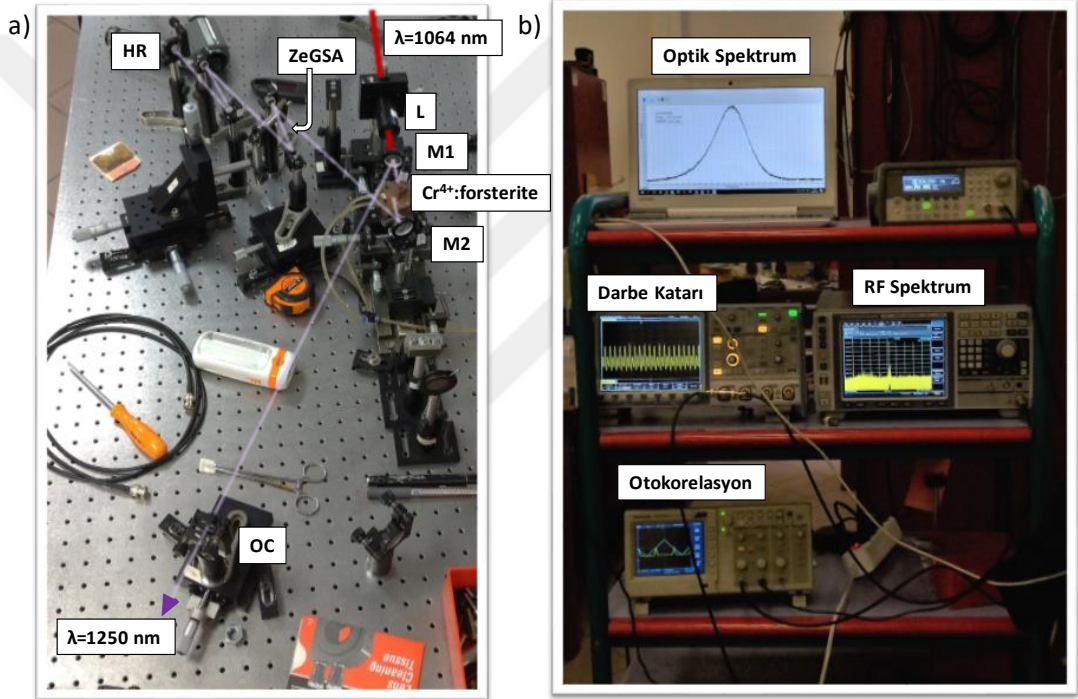
Femtosaniye lazer ile işlenen ZeGSA örneğinin kip-kilitleme performansı 1250 nm merkez dalgaboyunda çalışan Cr^{4+} :forsterite lazeri ile değerlendirilmiştir. Şekil 2.4 ile verilen test lazerinin kurulması için aktif ortam olarak kullanılan 20 mm boyunda Brewster kesimli Cr^{4+} :forsterite kristali, 100 mm eğrilik yarıçapına sahip çukur aynaların (M1-M2) arasına yerleştirilmiş ve 1064 nm dalgaboyuna sahip Yb:fiber lazer hüzmelerinin 100 mm odak uzunluğuna sahip bir mercek (L) ile odaklanmasıyla pompalanmıştır.



Şekil 2.4 : ZeGSA'nın kip kilitleme performansının incelendiği Cr^{4+} :forsterite lazeri.

X-kovuk lazer mimarisiyle tasarlanan bu lazerin yüksek yansıtıcı koluna iki çukur ayna daha eklenerek ZeGSA'nın ekleneceği bir hüزمة beli elde edilmiştir. Son olarak, yüksek yansıtıcıdan (high reflector (HR)) önce iki düz yüksek yansıtıcı ayna (M5-M6) daha eklenerek grup gecikme dağılımı ayarı yapılmıştır. Son olarak x-kovuk

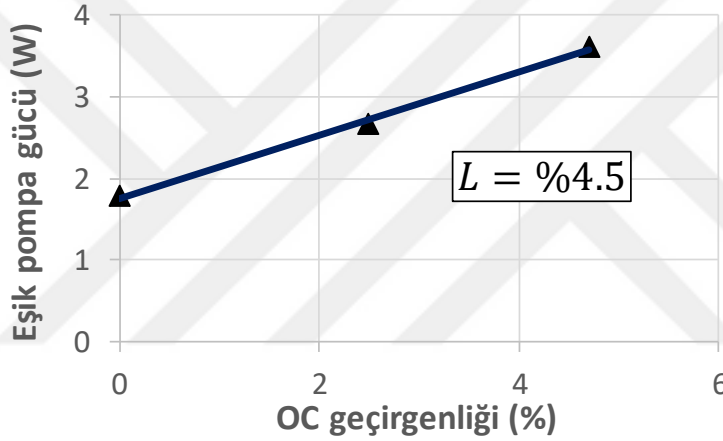
yapısına sahip lazerin diğer koluna, lazer dalgaboyunda %2.5 geçirgenliğe sahip bir OC konularak lazer çıkışı elde edilmiştir. Yaptığımız hesaplamada kavite içerisindeki bir tam turdaki net grup gecikme dispersiyonu -675 fs^2 olarak hesaplanmıştır. Bununla beraber ABCD matris yöntemi kullanılarak, ZeGSA örnek üzerine düşen hüzmeye çapının $68 \mu\text{m}$ olduğu bulunmuştur. Bu değer grafenin kaldırıldığı bölgenin genişliğinin yaklaşık yedi katıdır. Bunun bir sonucu olarak hüzmeye ZeGSA üzerinde bir konumlandırıcıyla tarandığında, ZeGSA bölgesi değiştirilmediği sürece pozisyonunun belirgin bir etkisi gözlenmemiştir. Deney düzeneğinin fotoğrafı ve kip kilitli Cr^{4+} :forsterite karakterizasyonunda kullanılan ölçüm cihazlarının fotoğrafı Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 : (a) ZeGSA'nın kip kitleme performansının incelendiği Cr^{4+} :forsterite lazerinin fotoğrafı. (b) Lazer karakterizasyonunda kullanılan ölçüm cihazlarının fotoğrafı.

Rezonatör kayıplarının ve ZeGSA yapısındaki tüm bölgelerinin kayıplarının belirlenmesi için Findlay-Clay analizi kullanılmıştır [10]. Öncelikle, infrasilin kovuk kaybının hesaplanması için ZeGSA örneği üç boyutlu konumlandırıcı ile grafen olmayan bir bölgeye hareket ettirilmiştir. Bu durumda lazerin gelen eşik pompa gücü %0, %2.5 ve %4.7 oranlarında geçirgenliğe sahip üç farklı OC ile ölçülmüştür. Buna karşılık gelen eşik pompa güçleri sırasıyla 1.77, 2.67 ve 3.60 W olarak ölçülmüştür. Farklı geçirgenliklerde elde edilen lazer pompa eşik güç değerleri Şekil 2.6'da verilmiştir. Buradan, grafensiz infrasil örneğin bir çevrimdeki kovuk kaybı yaklaşık

%4.49 olarak hesaplanmıştır. Kayıp ölçümlerinin ikinci aşamasında, grafen kaynaklı kayıplar hesaplanmıştır. Bunun için örnek tamamen grafen kaplı bölgeye hareket ettirilmiş ve yukarıda açıklanan aynı yöntemle lazer ile işlenmemiş grafenin kaybı da %4.14 olarak hesaplanmıştır. Burada hesaplanan kayıp oranının beklenen %4.6'lık kayıp oranından farklı olması, grafen kaplamadaki kusurlardan kaynaklanmaktadır. Bu kusurlar Şekil 2.2 (b) ve Şekil 2.3'te verilen mikroskop görüntülerinde belirgin olarak gözükmemektedir. İşlenmiş bölgelerin kaybının hesaplanması için ZeGSA örneği mikro işlemeye tabi tutulmuş altı farklı bölgeye hareket ettirilmiş ve gelen eşik pompa güçleri her bir bölge için ölçülmüştür. Bu sayede mikro-işlenmiş bölgelerin kayıpları hesaplanmış ve %3.12 ile %0.21 arasında değerler elde edilmiştir. Elde edilen tüm kayıp değerleri Çizelge 2.2'de verilmiştir.



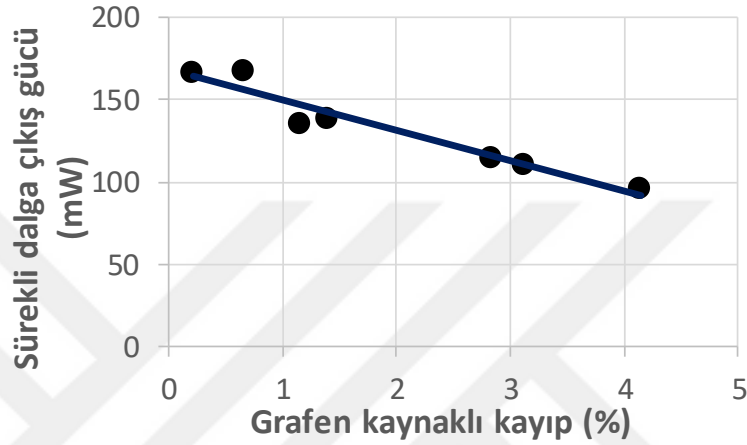
Şekil 2.6 : Yalnızca infrasil alttaş dahil edilmiş Cr^{4+} :forsterite lazerinin OC geçirgenliğinin fonksiyonu olarak ölçülen giriş pompa eşik güçleri.

Çizelge 2.2 : Farklı ZeGSA bölgelerine ait grafen kaynaklı kayıp yüzdeleri.

ZeGSA bölgesi	Grafen Kaynaklı Kayıp (%)
0	4.14
1	3.12
2	2.83
3	0.65
4	0.21
5	1.39
6	1.15

İşlenmiş bölgelerin sürekli dalga rejimindeki performansına etkisinin incelenmesi için, gelen pompa lazer gücü 6.29 W'ta sabit tutulmuş ve her bir bölgeye ait lazer çıkış güçleri %2 geçiriciliğe sahip bir OC ile kaydedilmiştir.

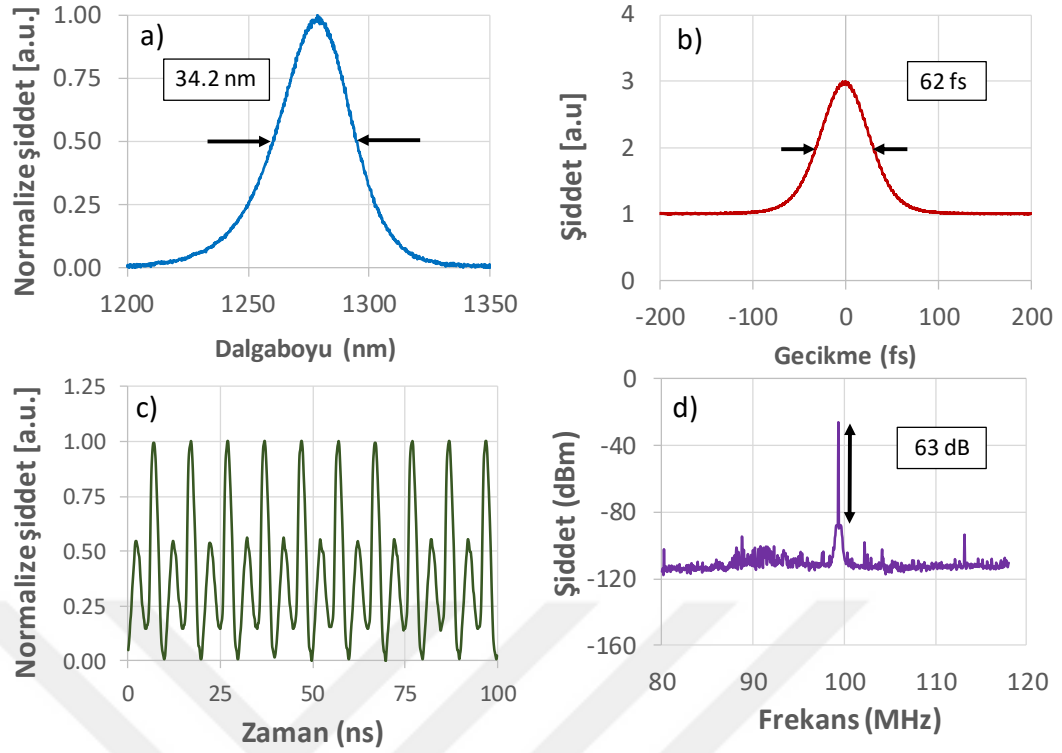
Şekil 2.7, sürekli dalga lazer çıkış gücünün her bir ZeGSA bölgesindeki grafen kayıplarına bağlı değişimini göstermektedir. Burada lazerin karşılaştığı grafen miktarının azaltılmasıyla, grafen kaynaklı kaybın %0.21'e kadar düşürülebildiği gösterilmiştir. Bununla beraber, sürekli dalga çıkış gücünün işlenmemiş grafen bölgesine ait lazer çıkış gücü 95 mW'tan 165 mW'a kadar artmıştır. ZeGSA sayesinde CW çıkış gücünde elde edilen iyileşme, farklı bölgelerde güç değerleri ölçülerek Şekil 2.7'te sunulmuştur.



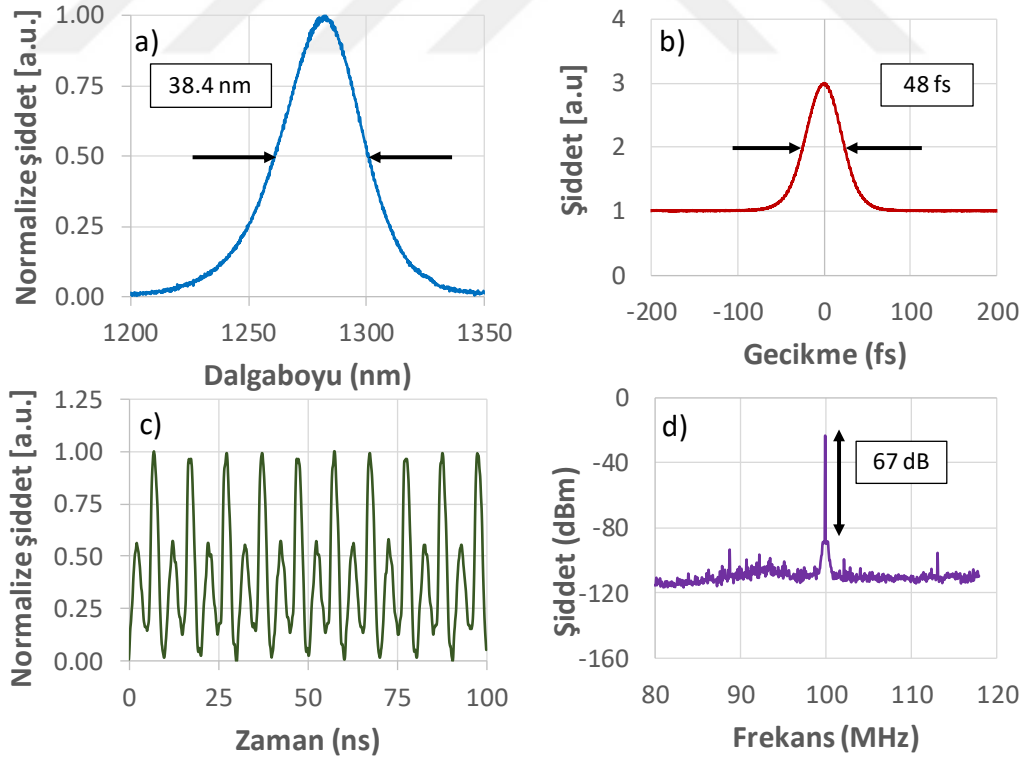
Şekil 2.7 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde ZeGSA'nın farklı bölgelerinden ölçülen ve grafen kaynaklı kayıplara karşılık gelen sürekli dalga çıkış güçleri.

Sürekli dalga karakterizasyonunu takiben, ZeGSA'nın kip kitleme performansı incelenmiştir. Öncelikle ZeGSA örneği üç boyutlu tezgah ile hareket ettirilerek, femtosaniye lazer ile işleme tabi tutulmamış bölgeye (%100 grafene sahip bölge) yerleştirilmiştir ve OC'nin ötelenmesi ile kip kilitli rejimde çalıştırılmıştır. Bu bölgede yapılan ölçümlerle grafen doyabilen soğurucunun (GSA) kip kitleme karakteristikleri kaydedilmiştir. Ardından, ZeGSA hareket ettirilerek altı farklı bölgenin altısında da kip kilitli lazer operasyonu sağlanmıştır. Bu durumda kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin, GSA ve ZeGSA bölgelerinin dahil olduğu yedi bölgede kip kilitli çıkış gücü, optik spektrum, otokorelasyon ve RF spektrum ölçümleri yapılarak karakterize edilmişlerdir. GSA ile alınan ölçümlerde 6.29 W giriş gücünde 62 fs darbe süresine ve 68 mW çıkış gücüne sahip 100 MHz tekrarlama frekansında darbeler üretilmiştir. Yapılan RF spektrum ölçümünde taşıyıcı darbe katarı frekansında elde edilen sinyalin gürültü seviyesinin 63 dB üzerinde olduğu görülmüştür. Darbelerin, zaman bant genişliği çarpımı da 0.39 olarak hesaplanmıştır. GSA ile elde edilen kip kitleme karakterizasyon verisi Şekil 2.8'de verilmiştir. En yüksek gücün ve en kısa darbenin elde edildiği 32% grafene sahip olan ZeGSA bölgesinden elde edilen sonuçlarda ise

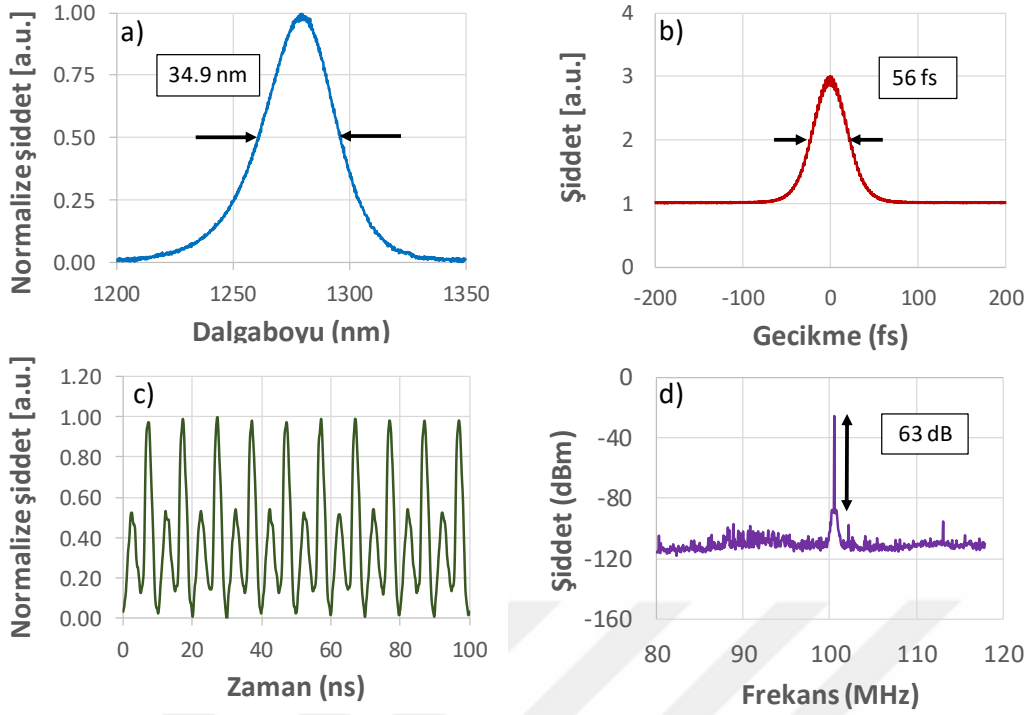
6.29 W giriş gücünde Cr^{4+} :forsterite lazerinin çıkış gücünün 114 mW değerine yükseldiği ve darbe süresinin 48 fs değerine düştüğü görülmüştür. Bu sayede çıkış gücünün yaklaşık iki katına çıktığı ve darbe süresinin ise kısalarak darbe tepe gücünü arttırdığı tespit edilmiştir. %32 değeri ile en düşük grafen ZeGSA bölgesine karşılık gelen, %0.21 grafen kaybının olduğu bu bölge ile yapılan mod kitli lazer karakterizasyon verisi Şekil 2.9’da verilmiştir. Diğer ZeGSA bölgeleri için ölçülen kip kilitleme sonuçları %81, %62 %52, %85 ve %76 grafen doluluk oranları için sırasıyla Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil 2.14’te raporlanmıştır. Yaptığımız deneylerde gözlenen kip kitlemenin tamamen ZeGSA kaynaklı olduğundan emin olunması amacı ile Şekil 2.4’te verilen deney düzeneğindeki M1 ve M2 aynalarının konumları Kerr lens kip kitleme bölgesinde olmayacak şekilde ayarlanmıştır. Ayrıca önceki çalışmalarda grafen doyabilen soğurucunun modülasyon derinliği %22 olarak verilmiştir [14]. Bu çalışmadan yola çıkarak elde ettiğimiz ZeGSA bölgelerinin kovuk içersindeki tam bir turdaki modülasyon derinlikleri 0.046% ile 0.9% arasında olduğu hesaplanmıştır. Femtosaniye işleme yöntemiyle elde edilen tüm ZeGSA bölgelerinde kip kilitleme elde edilmesine rağmen modülasyon derinliğinin %0.046 değerine düştüğü durumda stabil bir kip kilitleme operasyonunun sağlanması için hassas diğer ZeGSA bölgelerine nazaran daha hassas odaklama ve hizalama yapılması gerekliliği görülmüştür. Doyabilen soğurucu ile kip kilitleme deneylerinde önemli bir diğer parametre ise kavite içi akıdır. ABCD matris yöntemi kullanılarak ZeGSA üzerindeki spot yarıçapı 34 μm olarak elde edilmiştir ve bu değerden kovuk içi akısının 1256 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ olarak elde edilen bu akının en düşük grafen miktarı olan %32 grafen doluluk oranına ve %0.046 modülasyon derinliğine sahip bölgede bile kip kilitleme başlatıcısı olarak kullanılmasına yeterli olduğu deneysel olarak gösterilmiştir.



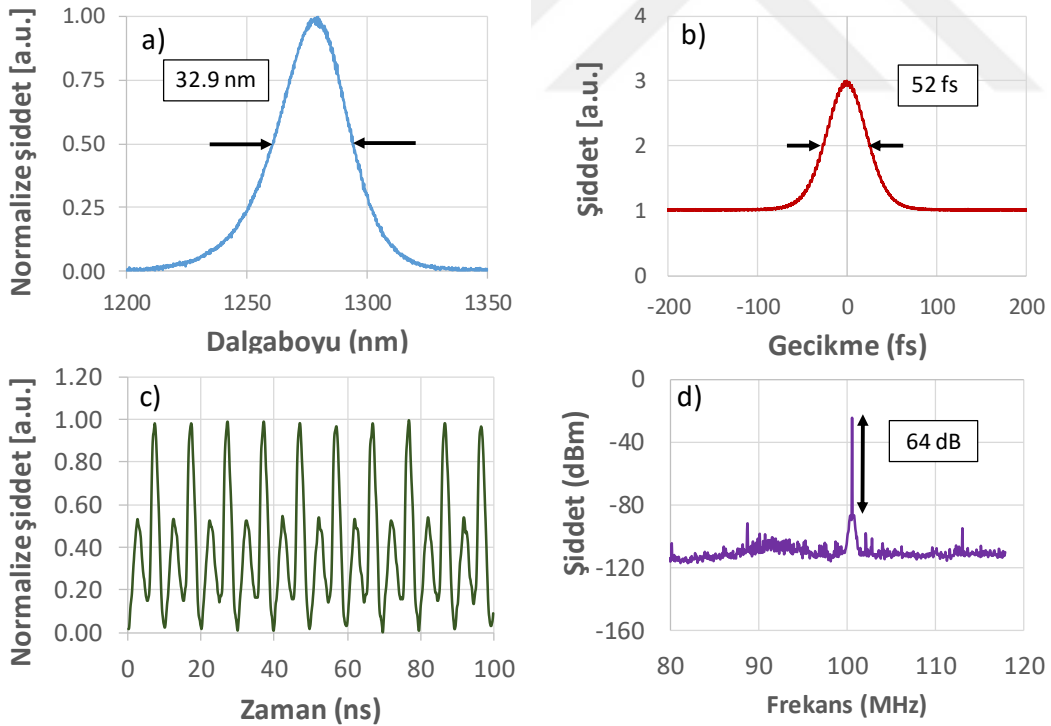
Şekil 2.8 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %4.14 kayıba sahip GSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.



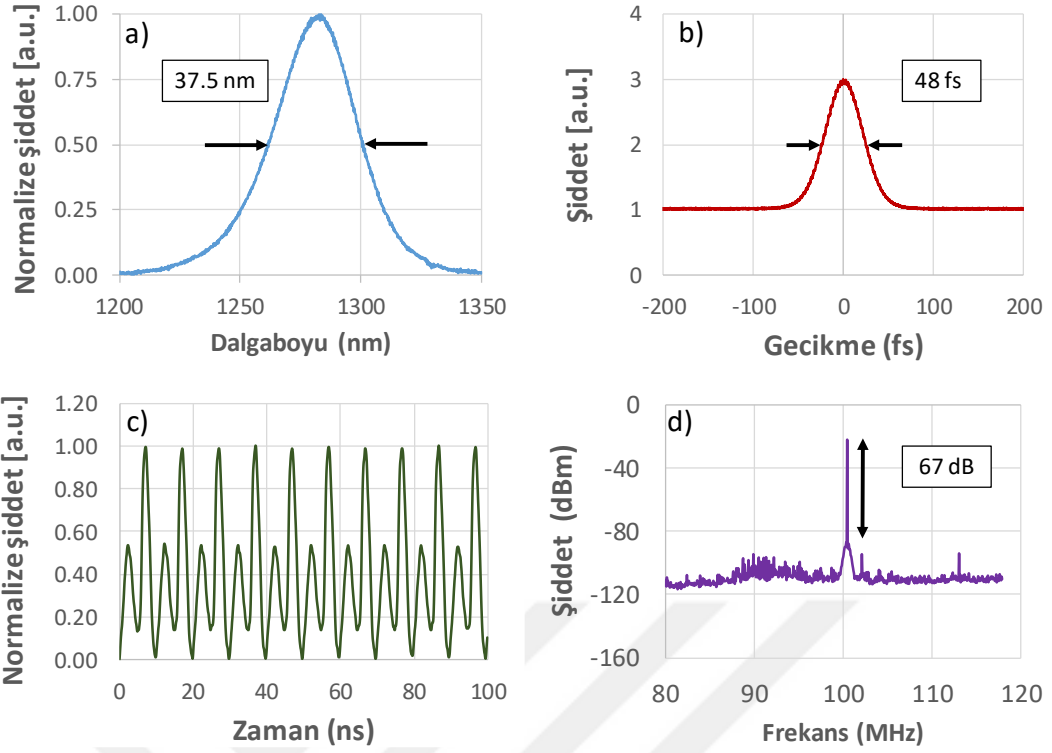
Şekil 2.9 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %0.21 kayıba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.



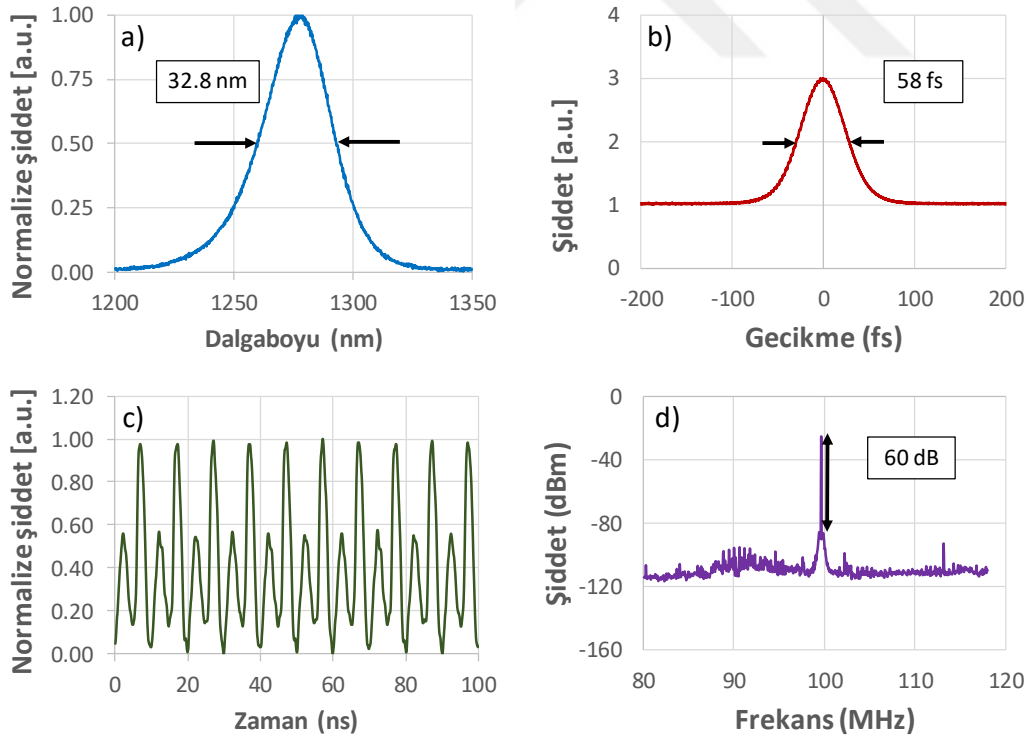
Şekil 2.10 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %3.12 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.



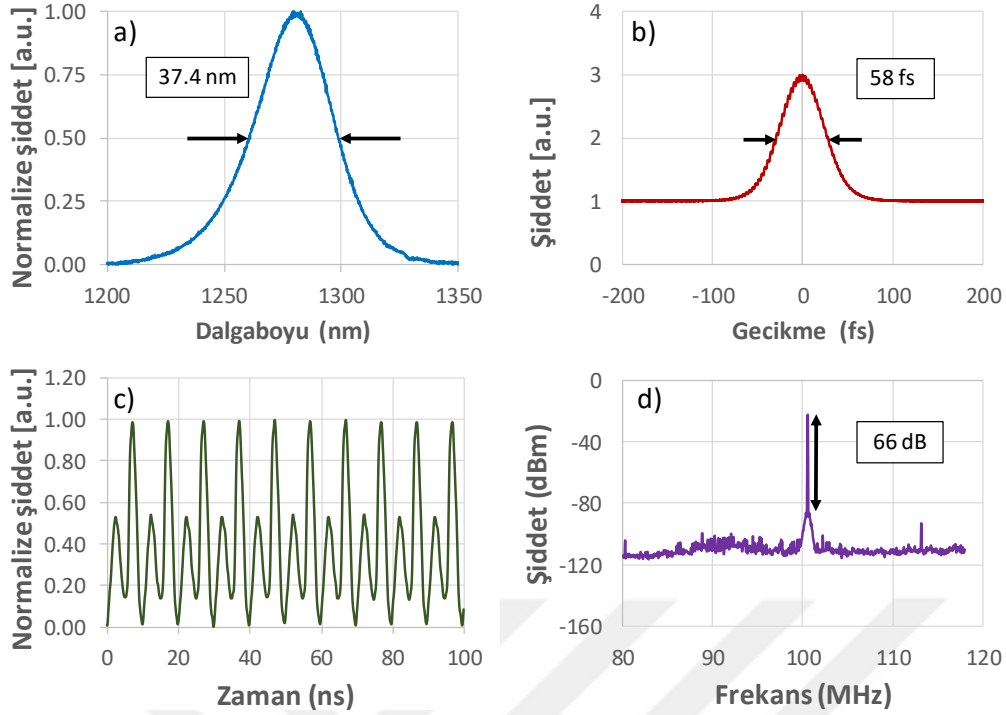
Şekil 2.11 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %2.83 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.



Şekil 2.12 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %0.65 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.

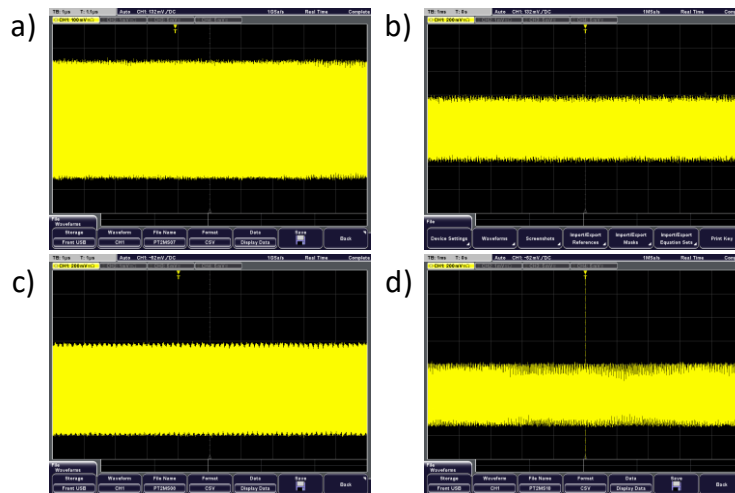


Şekil 2.13 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %1.39 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.



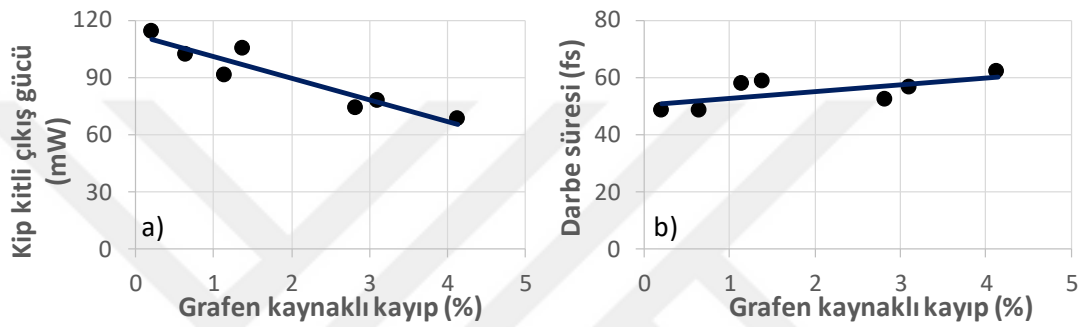
Şekil 2.14 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde %1.15 kayba sahip ZeGSA kullanılarak çalıştırılan kip kiliti Cr^{4+} :forsterite lazerinin ölçülen (a) optik spektrum, (b) otokorelasyon, (c) darbe katarı ve (d) RF spektrum verisi.

ZeGSA kip kitleyicinin karakterizasyonu dahilinde yaptığımız deneylerde, kip kilitli darbe katarı verisi nanosaniye mertebesinde milisaniye mertebesine kadar incelendiğinde herhangi bir Q-anahtarlama kararsızlığı olmadığı görülmüştür. Mikrosaniye ve milisaniye zaman mertebesinde alınmış darbe katarı verisi Şekil 2.15'te verilmiştir.



Şekil 2.15 : GSA ile (a) mikrosaniye, (b) milisaniye ve %32 grafen doluluk oranına sahip ZeGSA ile (c) mikrosaniye, (d) milisaniye zaman mertebesinde alınmış darbe katarı verisi.

Her bir ZeGSA bölgesinin kip kitleme karakterizasyonun yapılmasının yanı sıra bu bölgelerdeki farklı grafen doluluk oranlarında elde edilen kip kilitli rejimdeki 6.29 W giriş gücünde pompalanan Cr^{4+} :forsterite lazerinin çıkış güçleri kaydedilmiştir. Elde edilen bu çıkış güçleri grafen kaynaklı kovuk içi kaybın fonksiyonu olarak Şekil 2.16(a)'da verilmiştir. Ayrıca bu güçle karşılık gelen darbe süreleri de Şekil 2.16(b)'de raporlanmıştır. Bu iki şekilden görüldüğü üzere grafen kaynaklı kayıp %4.14 değerinden %0.21 değerinde düşürüldüğünde kip kilitli çıkış gücü 68 mW'tan 114 mW'a yükselmiştir. Bununla beraber ilgili darbe süreleri ise 62 fs'den 48 fs'ye düşmüştür.



Şekil 2.16 : 6.29 W değerindeki sabit giriş gücünde (a) kip kilitli çıkış gücünün ve (b) darbe süresinin grafen kaynaklı kayıplara bağlı değişimi.

2.4 Sonuç

Tezin bu bölümünde, özgün bir cihaz olan femtosaniye lazer ile mikro işleme yöntemi ile üretilmiş ZeGSA kaybı ayarlanabilen bir lazer kip kilitleyici olarak kullanılabileceği gösterilmiştir. Zebra desenli mikro yapılar infrasil alttaş üzerine kaplanmış tek katmanlı grafen kaplamasının, şeritler oluşturacak şekilde seçici femtosaniye lazer ablasyonu yöntemiyle yüzeyden uzaklaştırılmasıyla üretilmiştir. Yüzeyde kalan grafen şeritlerinin genişlikleri ve dolayısıyla grafen doluluk oranı ayarlanarak grafen kaynaklı kayıpların azalması sağlanmıştır. Üretilen ZeGSA yapısının kip kitleme performansı 1250 nm civarında çalışan bir Cr^{4+} :forsterite lazeri kullanılarak test edilmiş ve kip kilitleyici olarak çalıştığı gösterilmiştir. GSA ile ZeGSA karşılaştırıldığında kip kilitli Cr^{4+} :forsterite lazerinin performansının iyileştiği gözlenmiştir. Bu bağlamda 1064 nm'de 6.29 W sabit sürekli dalga giriş gücü ile pompalanan Cr^{4+} :forsterite lazerinin kip kilitli çıkış gücünün 68 mW'tan 114 mW'a çıktığı ve ölçülen darbe süresinin ise 62 fs'den 48 fs'ye düştüğü kaydedilmiştir. Bu

gelişmeler ile  zg n ZeGSA cihazının geniş bir spektral aralıktaki verimli bir kipi kilitleyici olarak ultra hızlı darbe üretiminde kullanılabileceği öngörülmektedir.



3. FEMTOSANİYE LAZER İLE MİKRO YAPILANDIRILMIŞ $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ DALGA KILAVUZU LAZERİ

3.1 Giriş

Katıhal lazerleri, aktif kazanç ortamı olarak, ışıyabilen iyon katkılanmış kristal, seramik veya camların kullanıldığı bir lazer tipidir. Bu lazerler sağlık sektörü, savunma sanayi, endüstri, bilimsel araştırmalar vb. birçok alanda kullanılmakta ve teknolojik gelişmelerle birlikte hayatlarımıza daha fazla etki etmektedir. Dalga kılavuzu lazerleri ise katıhal lazerleri içerisinde önemli bir yere sahiptir ve son yıllarda yükselen bir ivme ile dünyanın birçok yerinde farklı yöntemlerle geliştirilmektedir. Kompakt boyutları, görece düşük pompa eşik güçleri, fiber optik tabanlı optik sistemlerle uyumluluk, kırınım sınırı ötesinde optik kazanç elde etme özelliklerine sahip lazer tasarımı gibi özellikleriyle geleneksel katıhal lazerlere göre avantajlara sahiptirler. Bu nedenle femtosaniye lazer ile mikro işleme yöntemi kullanılarak elde edilen dalga kılavuzu lazerlerin geliştirilmesi, hem femtosaniye lazer ile saydam malzeme etkileşimiyle ilgili mevcut literatürü geliştirerek temel bilimlere katkıda bulunmakta hem de yeni cihaz tasarımları ile teknolojik gelişmelerin önünü açmaktadır.

Femtosaniye lazer ile monolit bir saydam malzeme içerisinde mikro işleme yapılırken dalga boyu, darbe süresi, darbe enerjisi, hüzmelin şiddeti, tarama hızı, uzay-zaman bağlaşımı ve hatta bazı durumlarda tarama yönü bile etki göstermektedir. Bu değişkenlerin farklı kombinasyonları için saydam malzeme içerisinde kırılma indisi değişikliği, nano çatlakların oluştuğu boşluklu yapılar ve hasarlar oluşabilmektedir. Bu tez kapsamında femtosaniye lazer ile doğrudan yazma yöntemi kullanılarak $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali içerisine dalga kılavuzu yazılması ve elde edilen yapının bir lazer aktif ortamı olarak kullanılarak kızılaltı bölgede çalışan ($1.9 \mu\text{m}$) kompakt dalga kılavuzu lazeri üretilmesi hedeflenmiştir.

Dalgaboyu $1.4 \mu\text{m}$ 'den yüksek olan lazerler genellikle "eye-safe" (göz için güvenli) olarak adlandırılırlar [31]. Orta kızılaltı civarındaki lazerler kornea tarafından yüksek

oranda soğurulduğu için retinaya ulaşamadıklarından dolayı aynı güçteki 1 μm civarında çalışan lazerlere göre göz sağlığı için daha güvenlidirler. 2 μm civarında çalışan Tm katkılı lazerler göze etkilerinin, görünür ve yakın kızılaltı bölgede çalışan lazerlere göre daha zararsız olmaları nedeniyle LIDAR uygulamalarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte hava tahminleri, fırtına takibi gibi gaz algılama konularında da sıklıkla kullanılmaktadır. Ayrıca bu dalgaboyu bölgesi, su tarafından yüksek oranda soğurulduğu için birçok sert ve yumuşak dokuya müdahale edilebilmektedir ve tanı, tedavi, cerrahi gibi medikal uygulamalarda kullanılmaktadır [32-34]. Bu uygulamaların yanında bu tip lazerlerle malzeme işleme yapılabilmektedir. Plastik kesimi, kaynak, işaretleme, delme, plastik şekillendirme, kaplama kaldırma gibi birçok malzeme işleme uygulamalarında kullanılmaktadırlar [35]. Bu dalgaboylarında çalışacak lazerlerin dalga kılavuzu lazerler olarak tasarlanması ile daha kompakt yapıda, kullanımı kolay, taşınabilir, düşük pompa eşik gücüne sahip fotonik sistemler üretilebileceği öngörülmüştür.

1996 yılında ilk olarak cam içerisine femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazılmasının gösterilmesi ile beraber bu alanda birçok çalışma raporlanmıştır [36]. Bu tip dalga kılavuzları yalnızca dalga kılavuzu lazerler için değil aynı zamanda fiber eşleyiciler, telekom uygulamaları gibi birçok alanda kullanılmaktadır.

Dalga kılavuzu lazerleri, fiber lazerleri kapsayan ve katıhal kitle lazerlerin kazanç ortamları kullanılarak üretilen lazerlerdir. Dalga kılavuzu lazerlerinde, katı kitle içerisinde oluşturulmuş bir kılavuzunun lazer aktif ortam olarak kullanılması amaçlanır. Bu kılavuzlama, bölgesel kırınım indeksi farkı sonucu ortaya çıkmakta ve aralarında bu tezde kullanılan femtosaniye lazerle işleme yöntemi dahil, farklı yöntemlerle elde edilebilmektedir. Katıhal dalga kılavuzu lazerleri, lazerler arasında önemli bir yere sahiptir ve öne çıkan avantajları:

- Kırınım sınırının (diffraction limit) ötesinde uzunluklara sahip kazanç ortamlarının kullanılabilmesi,
- Katıhal kitle lazerlerine kıyasla daha düşük pompa eşik değerlerinde çalıştırılabilmeleri,
- Fiber-optik sistemlerle uyumlu hale getirilebilmeleri,
- Kitle lazerlere kıyasla daha kompakt rezonatör tasarımları,

- Benzer malzemelerden fiber lazeri üretilmesi için gereken parametrelerin daha belirsiz olması,
- Fiber lazerler kadar uzun olmamalarından dolayı, doğrusal olmayan optik etkilere daha az maruz kalmaları

şeklinde sıralanabilir. Yukarıda vurgulanan avantajları nedeniyle, yüksek verimli, düşük pompa eşik değerlerinde çalışan, kompakt rezonatör tasarımlarına sahip dalga kılavuzu lazerlerinin geliştirilmesine olan ilgi, son yıllarda büyük bir hızla artmaktadır.

3.2 Femtosaniye Lazer ile Dalga Kılavuzu Yazım Yöntemi ve Yazım Tipleri

Femtosaniye lazer ile monolit dielektrik malzeme içerisinde mikro işleme yapılırken, dalgaboyu, darbe süresi, darbe enerjisi, hüzmelerin şiddeti, tarama hızı, uzay-zaman bağlaşımı (spatio-temporal couplings) ve hatta bazı durumlarda tarama yönü bile etki göstermektedir [37]. Bu değişkenlerin farklı kombinasyonları için, saydam malzeme içerisinde kırılma indisi değişikliği, eriyip katılma, nano çatlakların oluşturduğu boşluklu yapılar ve hasarlar sonucunda oluşabilmektedir. Yapılan morfolojik değişikliğe göre dalga kılavuzları, mikro kanallar, hüzmeye bölücüler, optik eşleyiciler gibi cihaz tasarımları yapılabilmektedir.

Femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazımında, ultrahızlı lazerle saydam malzeme etkileşimi üç aşamada ele alınmaktadır: (i) serbest elektron plazma yapısının oluşumu, (ii) enerjinin malzemeye aktarılması ve (iii) malzemenin modifikasyonu. Femtosaniye lazer hüzmeleri bir dielektrik malzeme içerisine odaklandığı zaman çoklu-foton iyonizasyonu, tünelleme foto-iyonizasyonu veya ikisinin bir arada etkin olduğu durumlar meydana gelebilmektedir. Hangi iyonizasyonun baskın olacağı Keldysh parametresi ile verilmektedir. ω , lazer frekansı I , ışık şiddeti, m_e , elektronun efektif kütlesi, n , ortamın doğrusal kırılma indisi, c , ışık hızı, e , elektronun yükü ϵ_0 , boşluğun elektriksel geçirgenliği ve E_g , dielektrik malzemenin bant aralığı (band-gap) olmak üzere, Keldysh parametresi (γ),

$$\gamma = \frac{\omega}{e} \sqrt{\frac{m_e c n \epsilon_0 E_g}{I}} \quad (3.1)$$

yukarıdaki denklem ile ifade edilebilir [38]. Burada, γ değerinin 1.5'den çok büyük olduğu durumlarda çoklu-foton iyonizasyonu, çok küçük olduğu durumlarda ise

tünelleme iyonizasyonu baskın olmaktadır. γ 'nın 1.5 civarı olduğu durumlarda ise iki süreç birlikte işlemektedir. Femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazımında bu değerin 1'e yakın olması gerekmektedir [39]. Bu analitik yaklaşım, yazım parametrelerinin belirlenmesinde oldukça önemlidir. Bunlarla beraber çığ iyonizasyonu (avalanche ionization) olarak bilinen bir diğer plazma üretim süreci de saydam malzeme işlemede etkili olmaktadır. Ayrıca femtosaniye lazer ile dalga kılavuzu yazımında, lazerin gücü, objektifin numerik açıklığı, tarama hızı gibi parametreler de lazer akısı üzerinde etkilidir. Bu parametrelerin birer değişken olduğu lazer net akısı (net fluence, I_n),

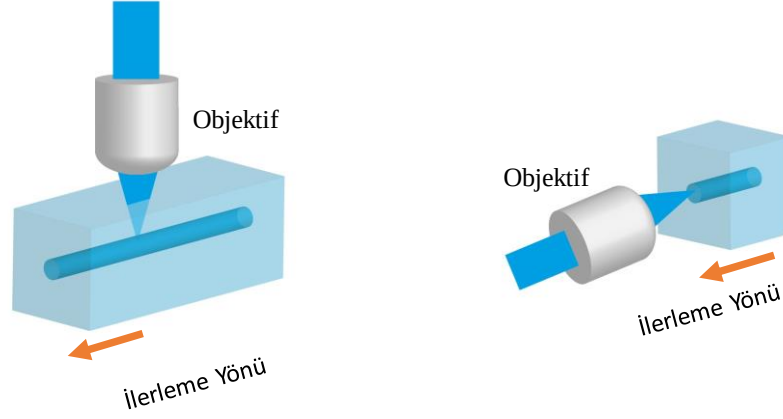
$$I_n = \frac{2w_0 f_{tekrar} F_p}{v} \quad (3.2)$$

denklemleri ile verilmektedir ve kırılma indisi değişikliğinde kritik rol oynamaktadır [40].

Yukarıdaki denklemde, w_0 , ışın demeti belinin yarıçapı, f_{tekrar} , lazer darbelerinin tekrar frekansı, F_p , bir darbenin sahip olduğu ışık akısı, v ise tarama hızıdır. Dalga kılavuzu yazımı için gereken eşik akı, cam tabanlı malzemeler için yaklaşık 10^{13} W/cm²'dir [39]. Bu eşiğin üzerinde, ışık akısını arttırarak tarama hızı azaltılabilir ya da hızın arttırılması ve enerjinin azaltılması ile en uygun değerler bulunarak kırılma indisi değişikliği sağlanabilmektedir. Çok yüksek net akı, düzensiz ve hasarlı modifikasyonlara neden olarak dalga kılavuzu kalitesini bozmaktadır.

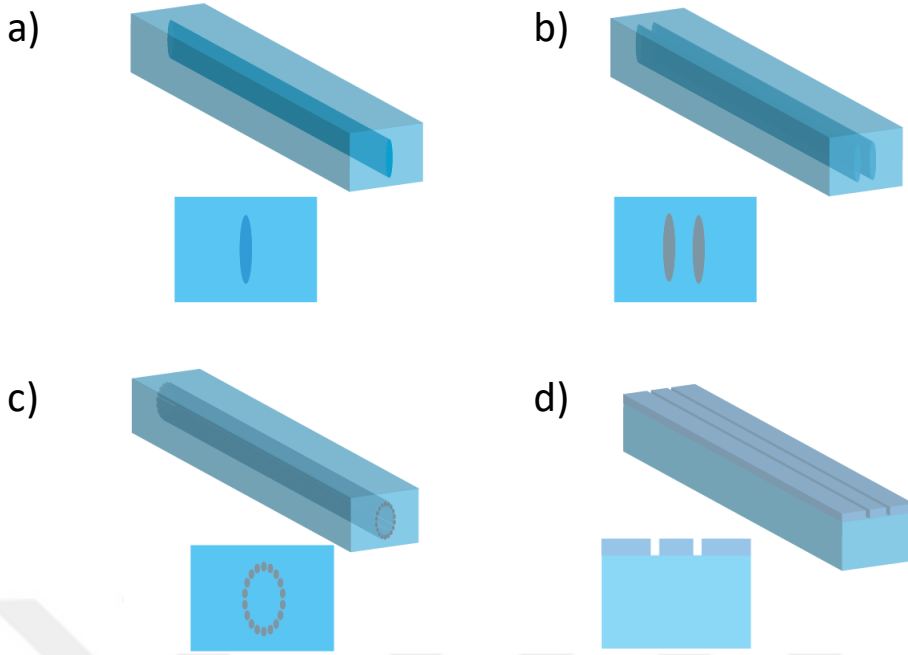
Cam içerisine femtosaniye lazer hüzmeleri ile yazılan ilk dalga kılavuzu, 1996 yılında K. Hirao ve ekibinin yaptığı çalışmada gösterilmiştir [36]. Daha sonra bu tekniğin kullanılması ile literatürde önemli çalışmalar yapılmıştır [37]. Bu yöntemde, örneğin doğrultusunun lazer ışığının optik eksenine göre dik veya paralel olmasına göre isimlendirme yapılmaktadır. Enine yazmada lazer ışığının eksenine ve tarama doğrultusu birbirlerine dik iken, boyuna yazmada paraleldir (Şekil 3.1).

Bir diğer isimlendirme, femtosaniye lazer ile saydam malzeme etkileşiminden sonra meydana gelen modifikasyona göre yapılmaktadır ve dörde ayrılmaktadır. Dört tipte de temel yaklaşım aynıdır. Objektif ile içerisine lazer hüzmeleri odaklanan kitle, üç boyutlu bir konumlandırıcı tarafından hareket ettirilerek, lazer odağı ile etkileşen saydam malzemenin kırılma indisinin değiştirilmesi amaçlanır.



Şekil 3.1 : Femtosaniye lazer ile mikro işleme sırasındaki örnek oryantasyonuna göre yazım tipleri. (a) Enine yazma ve (b) boyuna yazma.

Farklı kristal, seramik ve camlar için, femtosaniye lazer ile malzeme etkileşimi farklı etkiler gösterebilmektedir. Kullanılacak saydam malzemenin femtosaniye lazer ile etkileşimine göre, kitle içerisinde pozitif ya da negatif kırılma indeksi değişikliği gerçekleşebilir. Bu kırılma indisi değişikliği sayesinde, çekirdek (core) ve kaplama (cladding) konfigürasyonları yaratılabilir ve dolayısıyla da dalga kılavuzu elde edilebilir. Odaklanan lazer hüzmesinin saydam malzeme içerisinde modifiye ettiği bölgenin kırılma indisinin, işlenmeyen bölgenin kırılma indisinden büyük olması durumunda tip 1 dalga kılavuzları üretilir. Bu durumda, modifiye edilen bölge dalga kılavuzunun çekirdeği, işlenmeyen bölge ise kaplaması olarak davranmaktadır. Tip 1 dalga kılavuzlarında, modifiye edilen bölgenin kırılma indisi ile modifiye edilmeyen bölgenin kırılma indisi farkı sıfırdan büyük olduğundan, $\Delta n > 0$ olarak tanımlanır (Şekil 3.2(a)). $\Delta n < 0$ durumunda ise, Tip 2 ve Tip 3 olmak üzere iki çeşit yazım tekniği bulunmaktadır. Tip 2 dalga kılavuzu, literatürde gerilim-tetiklemeli (stress-induced) dalga kılavuzu olarak bilinmektedir. Tip 2 durumunda, elektromanyetik dalganın ilerleyeceği bölge işlem görmemiştir. Bu bölgenin yanlarına çizilen iki hat sayesinde, ışık modifiye edilmemiş bölgeye hapsedilir (Şekil 3.2(b)). Tip 3 dalga kılavuzunda ise, dalga kılavuzunun çekirdeğinin çevresini saracak bir modifiye bölge amaçlanır (Şekil 3.2(c)). Tip 4 dalga kılavuzu yazımında ise, kanalın etrafındaki bölge lazer tarafından tamamen kaldırılır ve kaplama ortamının hava olması sayesinde, hüzmenin modifiye edilmeyen bölgeye hapsedilmesi sağlanır (Şekil 3.2(d)).



Şekil 3.2 : (a) Tip 1, (b) Tip 2, (c) Tip 3 ve (d) Tip 4 dalga kılavuzları.

3.3 Femtosaniye Lazer Kullanılarak Geliştirilen Dalga Kılavuzu Çalışmalarının Literatür Özeti

Potansiyel uygulamalarının öneminden dolayı literatürde femtosaniye lazerler kullanılarak üretilen dalga kılavuzları üzerine birçok çalışma bulunmaktadır. Chen tarafından 2014 yılında yayınlanan makalesinde [41], femtosaniye lazerle yazım tekniği kullanılarak geliştirilmiş çeşitli dalga kılavuzları anlatılmaktadır. Bu dalga kılavuzları arasında, yüksek verimle 1064 nm’de çalıştırılan seramik- ve kristal-tabanlı Nd^{3+} :YAG, kristal-tabanlı Nd^{3+} :vanadate, 2 μm civarında çalışan Tm^{3+} :YAG, 1 μm civarında çalışan Yb^{3+} katkılı kristal-tabanlı dalga kılavuzları, dalgaboyu 700-870 nm aralığında ayarlanabilen Ti^{3+} :safir dalga kılavuzu gibi önemli çalışmalar yer almaktadır. Ayrıca, femtosaniye lazer ile geliştirilen ve ikinci harmonik sinyali üretiminde kullanılan, BiB_3O_6 , LiNbO_3 , KTP (Potasyum Titanil Fosfat) gibi dalga kılavuzları da aynı makalede anlatılmaktadır. Bu çalışmaların haricinde, son yıllarda, elmas- ve silikon-tabanlı dalga kılavuzları [42, 43], Nd^{3+} katkılı safir dalga kılavuzu [44], Tm^{3+} : Lu_2O_3 seramik dalga kılavuzu [45], 1.5 μm civarında incelenen tellürit camları ve 4 μm civarında çalışan $\text{Fe}:\text{ZnSe}$ dalga kılavuzu da [46] literatürde gösterilmiştir. 1.3 μm dalgaboyu civarında ısıyabilen dalga kılavuzu lazerine örnek olarak ise sadece bir çalışma bulunmaktadır [47]. Bu çalışmalara ek olarak son zamanlarda yapılmış 2 μm civarında çalışan Tm^{3+} : $\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$ ve $\text{Ho}:\text{KGd}(\text{WO}_4)_2$

dalga kılavuzu lazerleri sunulmuştur [48-51]. Yakın zamanda elde edilen 2 µm civarında çalışan Tm³⁺ katkılı femtosaniye lazer ile yazılmış dalga kılavuzu lazerleri, konunun yükselen ilgi ile incelendiğini gösterir niteliktedir. Bu gelişmeler ışığında özgün lazer aktif ortamları ile dalga kılavuzu lazerlerinin geliştirilmesi, bu alandaki literatürün geliştirilmesi konusunda önem arz etmektedir. Tez kapsamında yapılan çalışmalarda ilk kez dalga kılavuzu lazer olarak çalıştırılan Tm³⁺:BaY₂F₈ lazeri deneysel olarak başarıyla gösterilmiştir. Bu lazer aynı zamanda Türkiye’de geliştirilen, femtosaniye lazer ile yazılmış ilk dalga kılavuzu lazeri niteliği taşımaktadır. Lazer aktif ortamına yazılan dalgakılavuzu çalışmalarından önce yazım parametrelerinin belirlenmesi amacıyla silika üzerinde dalgakılavuzu yazımı çalışmaları yürütülmüştür. Silika ile gerçekleştirilen çalışmalarla belirlenen parametreler, malzeme değişikliği söz konusu olduğunda tamamen değişecek olmasına rağmen genel yaklaşımın belirlenmesi ve lazer aktif ortamları gibi kıymetli malzemelere zarar verilmemesi açısından önem taşımaktadır. Bu nedenle öncelikle silika malzeme üzerinde yazım parametreleri belirlenmiş, eşleme düzeneği kurulumu bu örnekler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar bir sonraki alt başlıkta sunulmuştur.

3.4 Silika İçerisine Femtosaniye Lazer Kullanılarak Yazılan Dalga Kılavuzları

Lazer aktif ortamlarına dalga kılavuzu yazımından önce öncül çalışmalar yapılması amacıyla test ortamı olan silika (fused silica) malzemesi içerisinde farklı tarama hızları ve lazer güçleri kullanılarak dalga kılavuzları yazılmış ve He-Ne lazeri ile ışık eşlenmesi verimleri incelenmiştir. Bu deneylerde, 26 x 24 x 1 mm³ boyutlarında silika örnek (Crystran, FSUVP26-24-1 UV) kullanılmıştır.

Yazım sırasında lazer hüzmesi örnek yüzeyinden 500 µm derine 10X (nümerik açıklık = 0.25) büyütmeye sahip objektif ile odaklanmıştır. Enine yazım tekniği kullanılarak farklı tarama hızları ve lazer güçleri ile Tip 1 dalga kılavuzları üretilmiştir. Dalga kılavuzlarının karakterizasyonu, hüzme kalitesinin yüksek olması ve yaygın olarak kullanılan görünür bölge kameraları ile çalışmaya olanak sağlaması nedeni ile He-Ne (632 nm) lazeri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

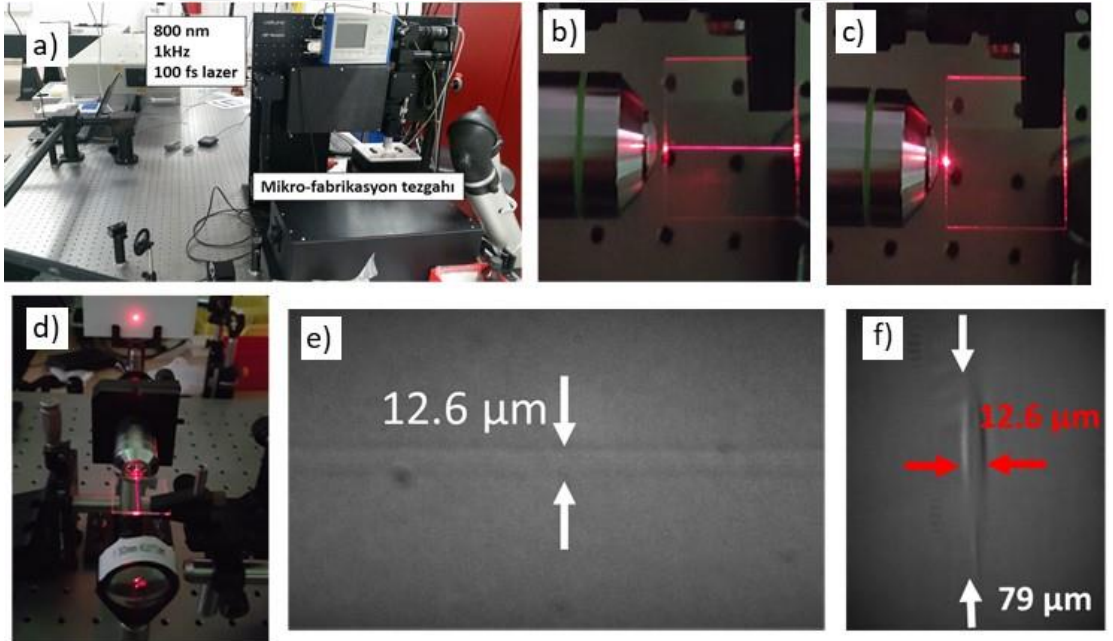
Dalga kılavuzu verimlerine etki eden en önemli parametre, kullanılan lazerin gücüne, objektifin özelliklerine ve yazım hızına bağlı olarak tanımlanan lazer akısıdır (Denklem 3.2). Gerçekleştirdiğimiz ön çalışmalarda lazer akısının silika-tabanlı dalga kılavuzları üzerindeki etkisi, Koç Üniversitesi altyapısında yer alan yazım hızı ve lazer

gücü ayarlanabilen mikro-işleme tezgahı kullanılarak (Şekil 3.3(a)) incelenmiştir. Yazım için kullanılan lazerin sahip olduğu darbe tekrar frekansı (1 kHz) nedeniyle ardışık iki darbe arasındaki süre 1 ms'dir ve yekpare (uniform) kılavuzları elde edebilmek için yazım hızının iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle örnek üzerinde darbelerin birbirleri ile örtüşerek düzgün bir yapı oluşturabilmesi için 10 $\mu\text{m/s}$ ile 80 $\mu\text{m/s}$ aralığındaki yazım hızları tercih edilmiştir. Gerçekleştirdiğimiz deneylerde lazer gücünün dalga kılavuzu yazımına etkisi de incelenerek, silika örneğe hasar vermeden modifikasyon elde edebilmek için gerekli olan güç eşiği belirlenmiştir. 1 mW ortalama güç ile dalga kılavuzu yazılamazken, 4 mW güçle yazılan dalga kılavuzlarının diğer güçlerde yazılanlara göre düşük verimli oldukları görülmüştür. Sonuç olarak, 1 mW'lık ortalama gücün modifikasyon eşik enerjisine yetmediği, 4 mW ortalama gücün ise hasar eşiğine karşılık geldiği gözlenmiştir. Ayrıca, ara değerler olarak 2 ve 3 mW güçler denenmiştir ve her defasında yazım hızı 10 $\mu\text{m/s}$ artırılarak, 10 $\mu\text{m/s}$ 'den 80 $\mu\text{m/s}$ 'ye kadar farklı hızlar kullanılarak dalga kılavuzları yazılmıştır. 2, 3 ve 4 mW ortalama güçler ile yazılan dalga kılavuzlarında farklı verimlerde kılavuzlanma gözlenmiştir. Şekil 3.3(b) ve (c)'de sırasıyla eşleme olan ve olmayan durumlar için silikanın fotoğrafı verilmiştir.

Mikroskop görüntülerinden görüleceği üzere (Şekil 3.3(e,f)), geliştirilen dalga kılavuzlarının kesitleri eliptiktir. Bu eliptiklik lazer hüzmesinin odaktaki profilinden kaynaklanmaktadır. Geliştirilen dalga kılavuzlarının kesitleri eliptik olduğu için kılavuza eşlenen ışığın polarizasyonu verimi etkilemektedir. Bu nedenle, verim ölçümleri sırasında He-Ne lazerinin polarizasyonu, demet bölücü küp (beam splitter cube) ve yarı-dalga plakası (half-wave plate) kullanılarak en iyi eşleme elde edilecek şekilde ayarlanmıştır. Şekil 3.3 (d)'de eşleme deneylerinde kullanılan düzeneğin fotoğrafı verilmiştir. Dalga kılavuzuna eşlenen lazer gücünün ayarlanabilmesi için, ayarlanabilir yoğunluk filtresi (variable neutral density filter) kullanılmıştır. He-Ne lazerini dalga kılavuzuna eşleyebilmek için 30 mm odak uzaklığına sahip bir lens kullanılmıştır. Dalga kılavuzu çıkışına 20X (nümerik açıklık = 0.40) büyütmeye sahip bir objektif konumlandırılarak, kılavuzlanan ışığın doğrusal hizalanması (collimation) sağlanmıştır. Bu deneyler esnasında, silika dalga kılavuzu ve 20X objektif, mikrometreleri manuel olarak kontrol edilebilen üç boyutlu (xyz) konumlandırıcılara yerleştirilmiştir. Eşlenen lazer hüzmesinin gücü, dalga kılavuzu öncesinde ve objektif sonrasında ölçülmüştür. Elde ettiğimiz en verimli silika dalga kılavuzu, 632 nm için

1.49 dB/cm’lik ilerleme kaybına (Fresnel kayıpları çıkarıldığında) sahiptir. Silika için Keldysh parametresi ise, Denklem 3.9 kullanılarak 0.34 olarak hesaplanmıştır. Literatürde, farklı yazım parametreleriyle işlenen silika için elde edilen Keldysh parametresi değerinin 0.45 civarında olduğu ve lazer yazım parametrelerinin uygun kombinasyonu sağlandığında, Tip 1 dalga kılavuzu oluşturulabildiği gösterilmiştir [52].

Tip 1 dalga kılavuzlarında ışığın eşlenerek ilerlediği bölgenin lazer tarafından modifiye edilen bölge olması nedeniyle ilerleme kayıpları yüksektir. Bu nedenle dalga kılavuzu lazerlerde genellikle Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzları tercih edilmektedir. Lazer verimi, denklem (1.23)’te verildiği üzere kavite içi kayıplarla ters orantılıdır. Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzları kullanıldığında eşlenen ışığın lazer ile modifiye edilmemiş alanda ilerlemesi nedeniyle 1 dB/cm mertebesinin altındaki ilerleme kayıplarıyla lazer operasyonu elde edilebilmektedir. Bu doğrultuda, tez dahilinde yapılan çalışmalarda lazer aktif ortamı içerisine Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzları yazılmıştır.

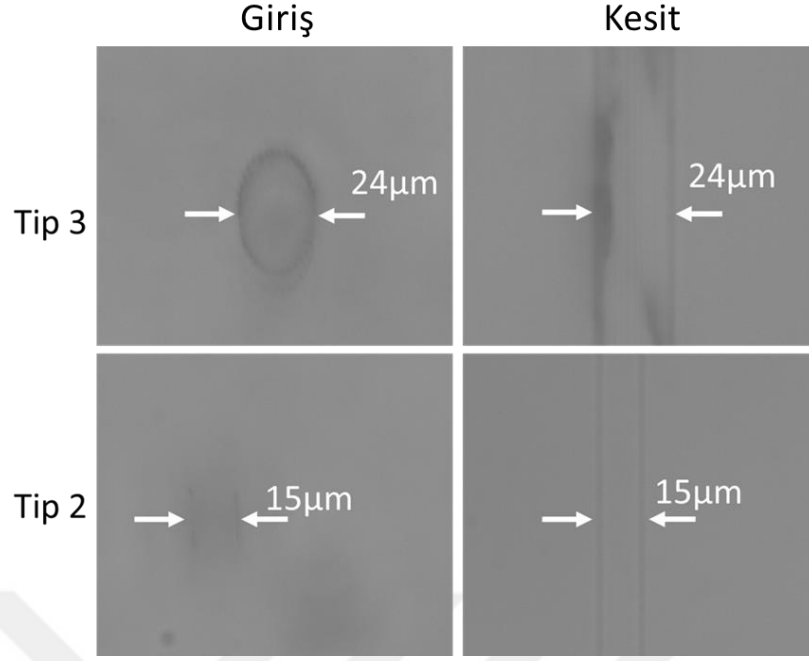


Şekil 3.3 : (a) Dalga kılavuzu yazım deneylerinde kullanılan femtosaniye lazer ve mikro-işleme tezgahı. İçerisine 632 nm’deki ışık (b) eşlenmiş ve (c) eşlenmemiş silika dalga kılavuzu. (d) Dalga kılavuzu karakterizasyon düzeneği. Silika dalga kılavuzunun optik mikroskop altındaki (e) üstten ve (f) kesit görüntüsü.

3.5 $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ Lazer Aktif Ortamı İçerisine Femtosaniye Lazer

Kullanılarak Dalga Kılavuzu Yazılması

Florür tabanlı lazer aktif ortamlarına bir örnek olan $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali, sahip olduğu düşük fonon enerjisi (400 cm^{-1} 'den düşük) ve geniş spektral geçirgenliği (200 nm-9 μm) sebebi ile kızıl altı lazerlerin geliştirilmesinde lazer aktif ortamı olarak yaygın olarak kullanılmaktadır [53]. Bu alanda yapılan çalışmalarda 2 μm ve 2.3 μm civarında dalgaboyu ayarlanabilen, sürekli dalga ve darbeli rejimlerde çalışan lazerler gösterilmiştir [54-57]. Ancak $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristalinin dalga kılavuzu lazer olarak geliştirilmesi ilk defa bu tez dahilinde yapılan çalışmalar ile gösterilmiştir. Bu kapsamda, femtosaniye lazer ile yazılmış $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalgakılavuzu lazerinin geliştirilmesi için, 7 mm uzunluğa sahip normal kesim %8 (at.) Tm^{3+} iyonu katkılı baryum yitrium florür kristali kullanılmıştır. $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali Koç Üniversitesi KUYTAM altyapısındaki lazer laboratuvarında bulunan 120 fs darbe süresine sahip, 800 nm merkez dalgaboyunda ve 1 kHz tekrarlama frekansındaki Ti:safir lazer ile işlenerek Tip 2 ve Tip 3 dalgakılavuzları yazılmıştır. Dalga kılavuzu yazımı sırasında, $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ örneği Newport μFAB düzeneği dahilindeki bilgisayar kontrollü üç boyutlu konumlandırıcı üzerine yerleştirilmiştir. Ortalama 1 mW gücündeki Ti:safir lazeri 40X objektif ile odaklanmıştır. Örnek, 50 $\mu\text{m/s}$ hızda hareket ettirilerek yüzeyinin 250 μm altında dalga kılavuzu üretilmiştir. Kullanılan deney düzeneği Şekil 2.1'de verilen düzenekle aynıdır. Yazılan Tip 2 dalga kılavuzunda iki çizgi arası 15 μm tutulurken Tip 3 dalga kılavuzunda ise kaplama (cladding) yarıçapı 24 μm ve çizgi sayısı 36 olacak şekilde hazırlanmıştır. Üretilen dalga kılavuzları incelendiğinde kristal yüzeyine zarar vermeden yüzeyden 250 μm derinlikte yazılabildiği görülmüştür. Şekil 3.4'te yazılan Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzlarının mikroskop görüntüleri verilmektedir. Bununla beraber Tip 3 dalga kılavuzunun kesit görüntüsünden üst üste binen modifiye bölgelerin kısmi mikro çatlaklara neden olduğu görülmüştür. Bu etkinin azaltılması için çizgi sayısı periyodik olarak azaltılmış, yazım hızı arttırılarak 200 $\mu\text{m/s}$ 'ye çıkarılmış, derinlik 100 μm 'a indirilmiş ve dalga kılavuzu çapı ise 30 μm 'ye çıkarılmıştır. Bu sayede mikro çatlak bölgelerin azaltılması ve ilerleme kaybına olan etkisinin en düşük seviyeye indirilmesi hedeflenmiştir.

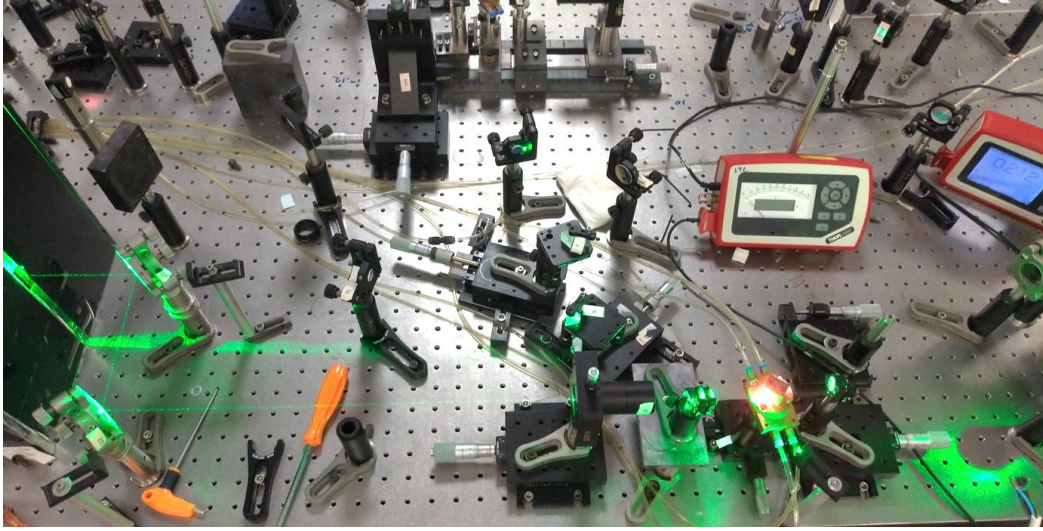


Şekil 3.4 : $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ yazılan Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzlarının optik mikroskop görüntüleri.

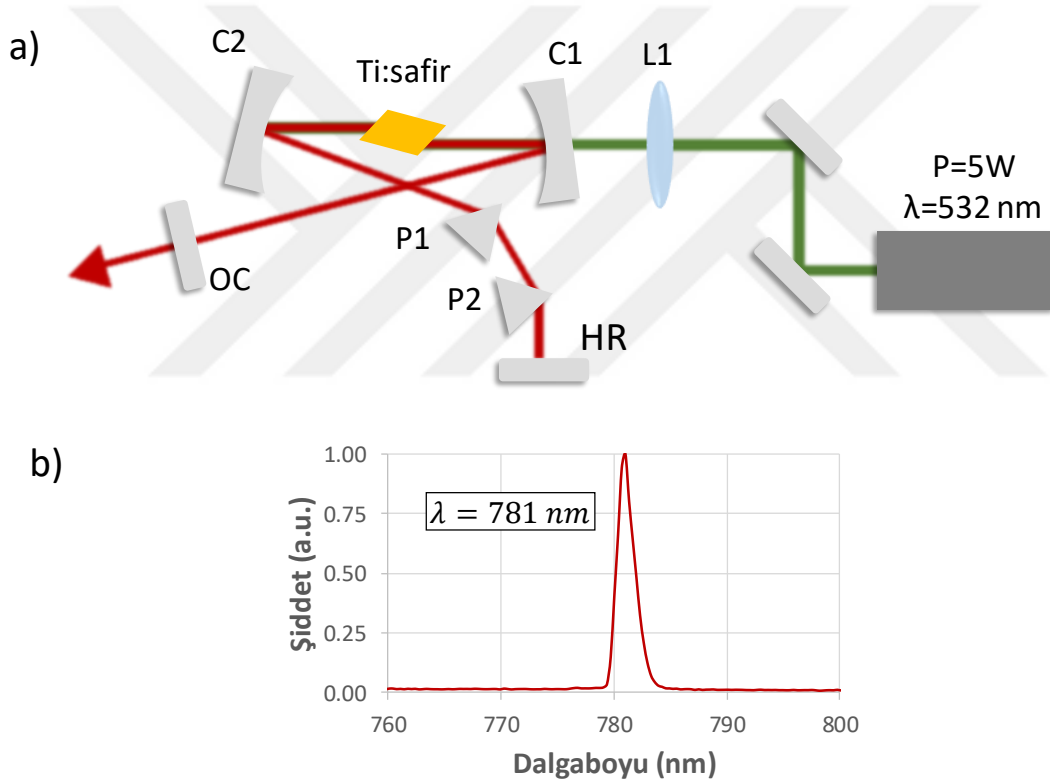
Femtosaniye lazer ile $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ aktif ortamının içerisine yazılan dalga kılavuzlarına ışık eşlenmesi ve dalga kılavuzu lazer olarak çalıştırılması için eşleme düzeneği ve lazer rezonatör düzeneği kurulmuştur. Yapılan deneylerde femtosaniye lazer ile yazılan dalga kılavuzu $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ lazeri başarıyla geliştirilmiş ve karakterizasyonu yapılmıştır.

3.6 $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ Lazer Aktif Ortamında $\sim 1.9 \mu\text{m}$ Dalgaboyunda Çalışan Dalga Kılavuzu Lazerinin Geliştirilmesi ve Karakterizasyonu

$\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristalinin uyarılması için pompa kaynağı olarak 800 nm civarında çalışan, dalgaboyu ayarlanabilir, sürekli-dalga pompa lazeri kullanılmalıdır. Bu hedef doğrultusunda, sürekli-dalga Ti:safir lazeri kurulmuştur. Şekil 3.5, Laser Quantum marka, OPUS model 5 W çıkış gücüne sahip, 532 nm lazer ile uyarılan ve prizma çifti kullanılarak dalgaboyu ayarlanabilen sürekli-dalga Ti:safir lazerinin fotoğrafını göstermektedir. Şekil 3.6(a) ise bu düzeneğin şematik çizimini ve Şekil 3.6(b), Ti:safir lazerinin $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali için rezonant optik spektrum verisini göstermektedir. Optik spektrum verisinden görüleceği üzere $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristalinin en yüksek soğurmaya sahip olduğu dalgaboyu 781 nm olarak tespit edilmiştir.



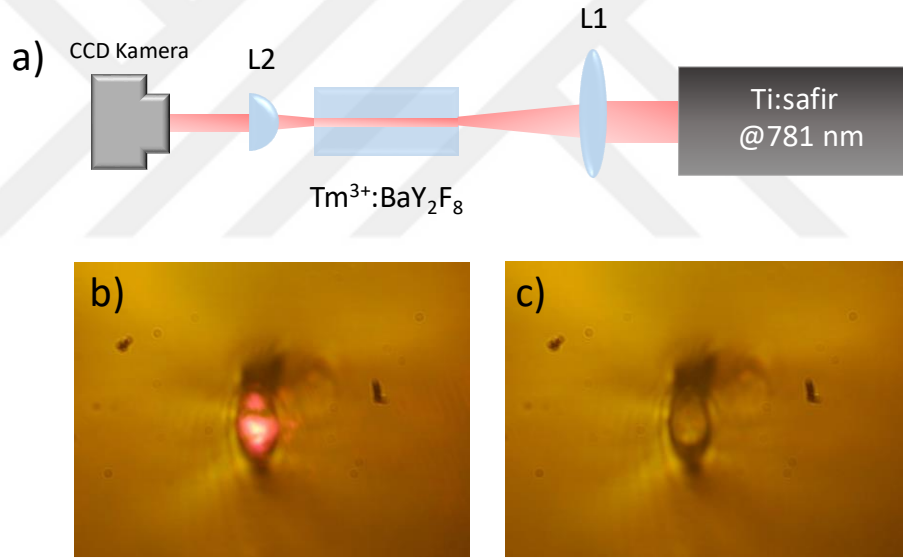
Şekil 3.5 : Sürekli dalga Ti^{3+} :safir lazer düzeneğinin fotoğrafı.



Şekil 3.6 : SF_{14} prizma çifti kullanılarak dalgaboyu ayarlanan, sürekli-dalga Ti^{3+} :safir lazerinin (a) şematik gösterimi ve (b) Tm^{3+} : BaY_2F_8 kristali için rezonant optik spektrum verisi.

Şekil 3.6’da gösterilen sürekli-dalga Ti :safir lazer düzeneğinin rezonatöründe kullanılan çıkış aynasının 800 nm civarındaki geçirgenliği %15’dir. Kullanılan Ti :safir kristali Brewster açısında kesilmiş olup, 20 mm uzunluğundadır. Sürekli-dalga, 532 nm pompa lazeri kristal içerisine odak uzunluğu 10 cm olan bir lens (L) ile odaklanmıştır. C1 ve C2 çukur aynalarının odak uzunlukları ise 10 cm’dir. Kurulan Ti :safir lazerinin dalga kılavuzuna eşlenmesi amacıyla Şekil 3.7’deki eşleme düzeneği

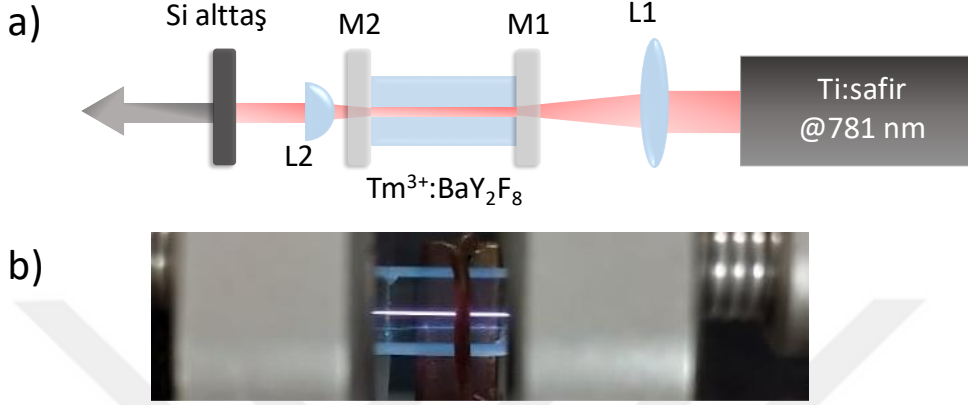
hazırlanmıştır. Burada L1 merceği 3 cm odak uzaklığına sahip bir ince kenarlı mercektir. L2 ise 8 mm efektif odak uzaklığına sahip bir asferik lenstir. Dalga kılavuzuna başarıyla ışık eşlenmesinin kontrolü için çıkış görüntüsü bir CCD kamera ile kaydedilmiştir. Burada $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali üç boyutlu bir konumlandırıcı ile hareket ettirilerek dalga kılavuzu çıkış profili gözlenmiştir. Eşleme olmadığı durumda dalga kılavuzu çıkışı Şekil 3.7(c) şeklinde gözlenirken, eşleme olduğu durumda (Şekil 3.7(b)) dalga kılavuzu merkezinde eşlenmiş lazer hüzmesi çıkışı elde edilmiştir. Üretilen dalga kılavuzunun ilerleme kaybının ayarlanması amacıyla Ti:safir lazerinin dalgaboyu $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristalinin soğurma bandı dışına akort edilerek 731 nm dalgaboyuna ayarlanmıştır. Işık eşlenmiş ve ışık eşlenmemiş durumdaki kristal içerisinden geçen güçler tespit edilerek ilerleme kaybı hesabında kullanılmıştır. Bu güç ölçümü sonucunda üretilen dalga kılavuzunun ilerleme kaybının 0.32 dB/cm olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3.7 : $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu (a) eşleme düzeneği, Tip 3 dalga kılavuzuna ışın (b) eşlendiği ve (c) eşlenmediği durumlardaki dalga kılavuzu çıkışları.

Elde edilen dalga kılavuzlarının lazer olarak çalıştırılması amacıyla Şekil 3.8(a)'da verilen lazer rezonatör düzeneği kurulmuştur. $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazer mimarisi için Şekil 3.6'da verilen Ti:safir pompa lazeri 781 nm dalgaboyuna ayarlanmıştır. Ardından 3 cm odak uzunluğuna sahip bir odaklama merceği (L1) ile, 1.9 μm dalgaboyunda yüksek yansıtıcılığa sahip bir düz aynadan (M1) geçirilerek dalga kılavuzu girişine odaklanmıştır. Dalga kılavuzundan çıkan pompa lazeri, %2 geçirgenliğe sahip M2 çıkış aynasına yönlendirilmiş ve çıkışta ıraksayarak ilerleyen hüzme, 8 mm efektif odak uzaklığına sahip mercek (L2) ile toplanmıştır. L2

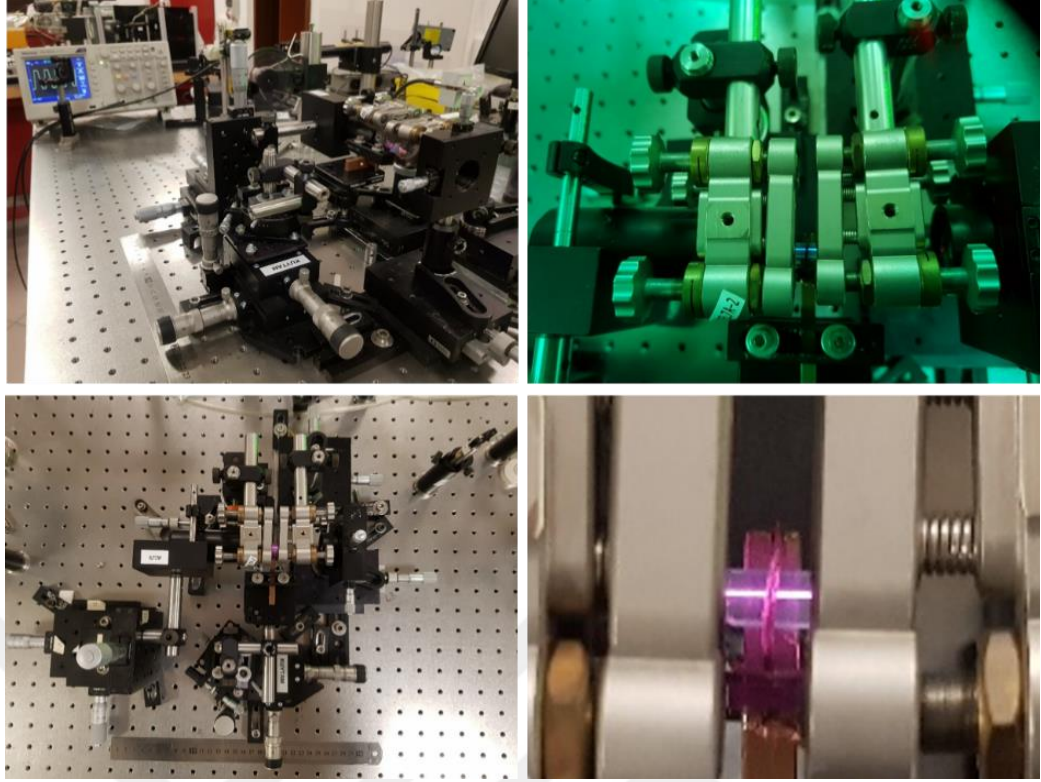
merceğinden sonra yerleştirilen Si alttaşı ile pompa lazeri kesilerek yalnızca 1.9 μm 'deki $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ lazer çıkışı elde edilmiştir. Burada kullanılan Si alttaştın 1.9 μm 'deki geçirgenliği UV-Shimadzu cihazı ile ölçülmüş ve $T=\%54$ değeri elde edilmiştir. Şekil 3.8(b)'de M1 ve M2 aynaları arasındaki kristalin, dalga kılavuzu eşlenmesinin elde edildiği durumdaki fotoğrafı verilmiştir.



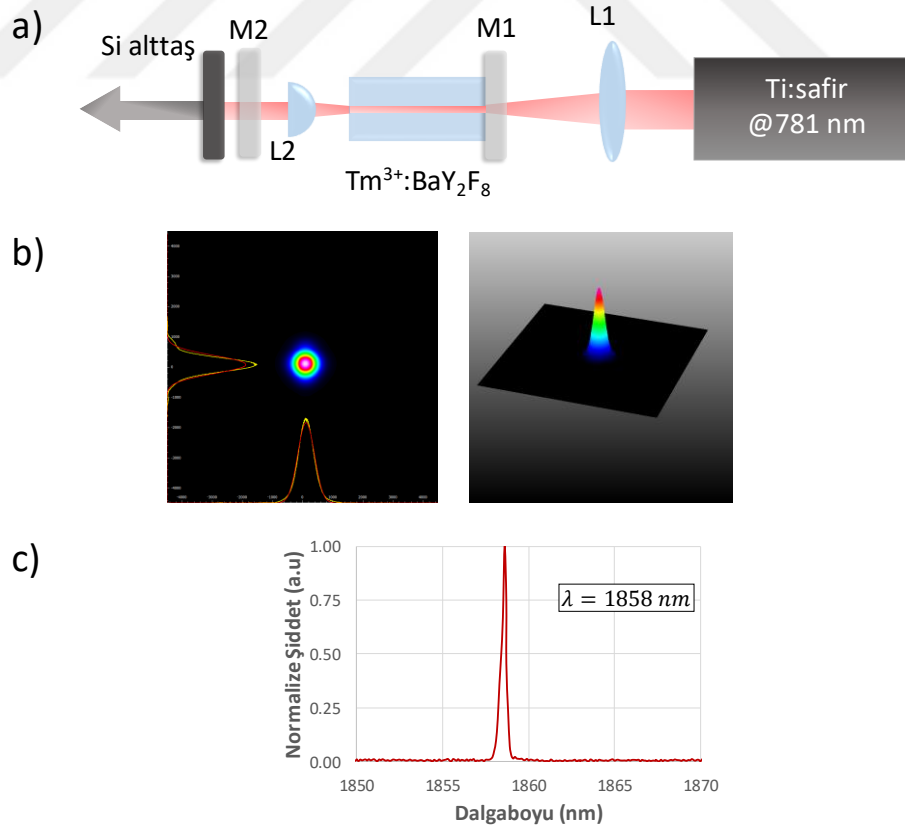
Şekil 3.8 : (a) $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazeri deney düzeneği. (b) M1 ve M2 aynaları arasına yerleştirilmiş ve 781 nm'de ışın eşlenmiş $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ kristali.

Yaptığımız deneylerde, eşleme veriminin artırılması için optik elementlerin ve kristalin yüksek hassasiyet ile hizalandırılması amacıyla lazer mimarisindeki her bir bileşen hassas konumlandırıcılara yerleştirilerek lazer operasyonu sağlanmıştır. Ayrıca, kristalin soğumasına destek olması için kristal, bakır bir platforma konumlandırılmıştır. Elde edilen dalga kılavuzu lazeri düzeneğinin detaylı fotoğrafları Şekil 3.9'da sunulmuştur.

Şekil 3.8(a)'da verilen düzenek kullanılarak 36 çizgi sayısına sahip 24 μm çapındaki dalga kılavuzu kullanılarak elde edilen lazer çıkışı APE spektrometre ile incelenmiş ve dalgaboyu 1858 nm olarak ölçülmüştür. Bu lazer konfigürasyonunda çıkış gücü 1 mW altı bir mertebede kaldığı için kesin değeri ölçülemedi. Bu sonuçlar doğrultusunda yapılan iyileştirmelerle çizgi sayısı 28 olan 30 μm çapa sahip dalga kılavuzları üretilmiş ve kavite mimarisinde değişiklikler yapılarak eşleme kayıplarının azaltılması hedeflenmiştir. Yapılan iyileştirmeler sonucunda 6 mW gücünde çıkış gücü elde edilmiştir. 28 çizgiden daha az sayıyla çizilen dalga kılavuzlarında ise yeterli kırılma indisi dağılımı gözlenememesi nedeniyle lazer operasyonu sağlanamamıştır. 6 mW lazer çıkışı elde edilen lazer konfigürasyonu ve sonuçları Şekil 3.10'da verilmiştir.

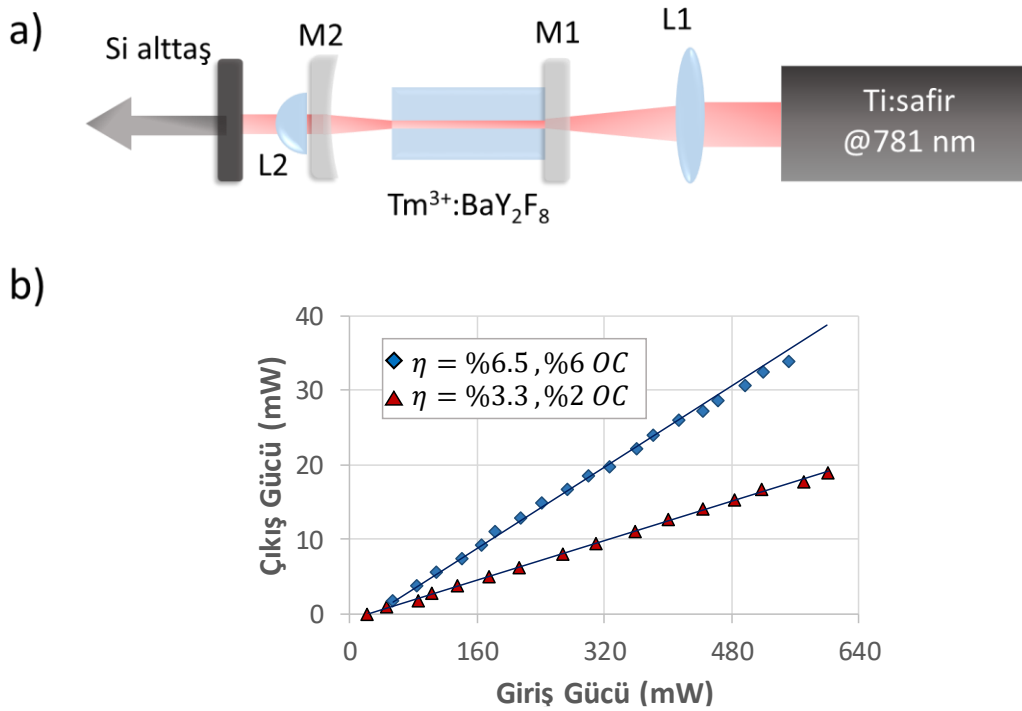


Şekil 3.9 : $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzuna lazer düzeneğinin farklı açılardan çekilmiş detaylı fotoğrafları.



Şekil 3.10 : (a) İkinci konfigürasyon $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazer düzeneği, (b) lazer çıkışı hüzme profili, (c) optik spektrum verisi.

Lazer operasyonu sağlanan iki konfigürasyon karşılaştırıldığında, ikinci konfigürasyonda azaltılan dalga kılavuzu çizgisi sayısı, dalga kılavuzu çapı değişikliği ve lazer tasarımındaki değişiklik sayesinde lazer çıkış gücünün 6 mW'a yükseldiği, pompa eşik gücünün ise 300 mW değerinden 178 mW değerine düştüğü görülmüştür. Tip 2 dalga kılavuzunda ise ışık eşlenmesi görülmesine rağmen lazer operasyonu görülmemiştir. Tip 2 dalga kılavuzlarının iletim veriminin Tip 3 dalga kılavuzlarına göre düşük olduğu gözlenmiştir. Bunun nedeni dalga kılavuzu merkezi etrafında oluşan kırılma indisi dağılımının Tip 3 dalga kılavuzuna göre daha düşük olması ve eşleme optiklerinin uyumsuzluğu şeklinde yorumlanmıştır. Şekil 3.10'da verilen sistemde kristalden sonra konulan mercek sayesinde (L2) dalga kılavuzundan ayrılan ışığın ıraksamadan ilerlemesi sağlanmıştır. Bunun sonucu olarak optik hizalama daha rahat yapılmış ve eşleme kayıplarının iyileştirilmesi ile 6 mW maksimum güç, %2 OC ile elde edilmiştir. Diğer taraftan sisteme eklenen merceğin kavite içerisinde konumlandırılması nedeniyle lazer kayıplarında artış söz konusu olmuştur. Bu nedenle üçüncü konfigürasyon kurularak hem kayıpların azaltılması hem de optik hizalamanın iyileştirilmesi ile lazer çıkış gücünün artırılması hedeflenmiştir. Son konfigürasyonda düz OC, eğrilik yarıçapı 100 mm olan bir çukur OC ile değiştirilmiştir. Üçüncü konfigürasyon Şekil 3.11(a)'da verilmiştir.



Şekil 3.11 : Üçüncü konfigürasyon $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu (a) lazer düzeneği ve (b) güç verim eğrisi.

Üçüncü lazer mimarisi ile %2 OC ile en yüksek 19 mW, 6% OC ile 34 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Bu güçler için gerekli giriş pompa gücü sırasıyla 602 mW ve 553 mW olarak ölçülmüştür. Elde edilen güç verimleri ise %2 OC için %3.3, %6 OC için ise 6.5 olarak elde edilmiştir. Bu lazer konfigürasyonunda eşik pompa gücünün %2 ve %6 çıkış aynaları için sırasıyla 23 mW ve 25 mW değerlerine düştüğü kaydedilmiştir.

3.7 Sonuç

Yapılan çalışmalar sonucunda 800 nm dalgaboyuna, 1 kHz tekrarlama frekansına ve 120 fs darbe süresine sahip femtosaniye Ti:safir lazer kullanılarak silika cam içerisine yüzeyden 500 μm derinlikte Tip 1 dalga kılavuzu başarıyla yazılmıştır. Elde edilen mikroskop görüntülerinde, yazılan dalga kılavuzunun ara kesitinin eliptik bir şekilde olduğu, boyutlarının yatay ekseninde 12 μm , dikey ekseninde ise 79 μm olduğu belirlenmiştir. Dalga kılavuzu boyu ise cam örneğin boyu olan 2.4 cm'dir. Farklı hızlar ile yazılan dalga kılavuzları ile eşleme deneyleri yapılmış ve en iyi dalga kılavuzu Fresnell kayıplarının dahil edilmediği durumda 632 nm He-Ne lazer için 1.49 dB/cm olduğu kaydedilmiştir.

Silika ile yapılan deneyleri takiben, florür tabanlı bir lazer aktif ortamı olan %8 (atomik) Tm^{3+} iyonu katkılanmış BaY_2F_8 kristali içerisine 800 nm dalgaboyuna, 1 kHz tekrarlama frekansına ve 120 fs darbe süresine sahip femtosaniye Ti:safir lazer kullanılarak Tip 2 ve Tip 3 dalga kılavuzları yazılmıştır. Üretilen dalga kılavuzlarına sürekli dalga akort edilebilir Ti:safir pompa lazeri eşlenmiştir. Tip 3 dalga kılavuzunda 731 nm dalgaboyunda 0.32 dB/cm mertebesinde ilerleme kaybı olan dalga kılavuzu yazılmıştır. Ardından pompa lazeri rezonant dalgaboyu olan 781 nm'ye ayarlanarak üç farklı lazer rezonatörü konfigürasyonunda lazer operasyonu elde edilmiştir ve sırasıyla 602 mW ve 553 mW giriş güçlerine karşılık 1858 nm dalgaboyunda %2 OC ile en yüksek 19 mW, %6 OC ile en yüksek 34 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Ayrıca lazer operasyonunun pompa eşik gücünün 23 mW'a kadar düşürülebildiği kaydedilmiştir. Elde edilen bu sonuç ile beraber ilk kez Tm^{3+} : BaY_2F_8 kristalinin dalga kılavuzu lazeri olarak çalıştırılması gösterilmiştir. Bu çalışmada yazım parametrelerinin, eşleme ve rezonatör optiklerinin iyileştirilmesi ile daha yüksek güç alınmasının mümkün olduğu görülmüştür. Bu özgün kristal ile üretilen dalga kılavuzu lazerin literatüre getireceği katkı ile beraber konuyla ilgili yapılacak gelecekteki çalışmaların ilk adımı olması öngörülmektedir. Elde edilen çıkış gücü ve düşük pompa

eşik gücü sayesinde bu dalga kılavuzunun, doyabilen soğurucular kullanılarak Q-anahtarlama operasyonunun da mümkün olduğu ve darbeli Tm^{3+} : BaY_2F_8 dalga kılavuzu lazerinin geliştirilmesi için potansiyelin olduğu görülmektedir.



4. FEMTOSANİYE LAZER KULLANILARAK CeO₂ NANOPARÇACIK ÜRETİMİ

4.1 Giriş

Modern teknolojinin gelişmesiyle birlikte yarıiletken malzeme biliminde yapılan çalışmalar da hız kazanmaktadır. Günlük hayatımıza kolaylıklar getiren birçok malzeme üretilmektedir. Bu malzemeler bilginin depolanmasında, çeşitli dedektörlerde, birleşik devrelerde, elektronik cihazlarda karşımıza çıkmaktadır. Gelişen toplumun zamanla ihtiyaçlarındaki çeşitlilik yarıiletken tabanlı cihazların çok fonksiyonlu olması gerekliliğini doğurmuştur. Bu ihtiyaçlara yönelik olarak son yıllarda seyreltik manyetik yarıiletken (Diluted Magnetic Semiconductors, DMS) veya seyreltik manyetik yarıiletken oksit (Diluted Magnetic Semiconductor Oxides, DMSO) grupları üzerine yapılan çalışmalar yoğunlaşmıştır.

DMS'ler manyetik olmayan yarıiletkenler ile manyetik elementler arasında yeni nesil bir yarıiletken grubudur. Bu grup, ZnO, ZnS, GaAs, GaP, GaN, InAs, CeO₂, TiO₂ v.b. yarı iletkenlerin belirli miktarda geçiş elementi (Mn, Fe, Co, Cr, Ni v.b.) veya nadir toprak elementi (Gd, Sm, Pr, La, Nd v.b.) katkılanması ile elde edilmektedir. 1980'lerden bu yana çalışılan bu tip yarıiletkenlerde temel prensip, yarıiletkenlerde spin polarize olmuş yük taşıyıcıları üretmektir. Spin polarize yük taşıyıcıları ise değişken bir ön gerilim aracılığıyla, yarıiletkendeki iletim elektronlarının katkı elementinin atomlarının manyetik momentiyile etkileşmesi sonucu oluşur. Bu özellik sayesinde ultra-hızlı optik anahtarlar, optik yalıtıcılar, hafıza aygıtları, kalıcı bellekler, manyetik detektörler, spin-ışık yayan diyotlar (spin-LED) ve spin-alan etkili transistörler (spin-FET) gibi spintronik aygıtlarda DMS'ler kullanılmaktadır.

Spintronik aygıtların en önemli avantajları, yüksek hızlı, yüksek verimli, durağan ve spinlerin işlenmesi için daha az enerji harcamaları olarak sıralanabilir. DMS'lerin bir diğer önemli özelliği olan ferromanyetiklik, yarıiletken örgüdeki iletkin yük taşıyıcılarıyla, manyetik geçiş elementinin d-kabuğu elektron spinlerinin etkileşmesi yoluyla gerçekleşmektedir. Dolayısıyla iletim elektronları azaltılarak ferromanyetik

düzen değiştirilebilir. Bu özellik giriş kontrollü ferromanyetizma ya da optik değişimli ferromanyetizma gibi yeni durumların oluşmasına sebep olur.

Mikroelektronik alanındaki gelişmelerdeki önemli bir etken birleşik devrelerdeki bileşenlerin boyutlarının küçülmesidir. Metal-oksit yarıiletken alan etkili transistörlerde (MOSFET), öncelikle kapı uzunluğunun azaltılması ve buna bağlı olarak diğer boyutların da küçülmesi teknolojik olarak bazı problemleri ortaya çıkarmaktadır. Transistörlerin boyutu küçüldükçe, SiO₂'e alternatif olarak kanal uzunluğunu ve gate dielektrik kalınlığını azaltacak yeni malzemelerin bulunması için çalışmalar başlamıştır. Kapı dielektrik malzemesinin kalınlığı birkaç atom seviyesine yaklaşıldıkça (< 2 nm) elektron tünelleme olayı sebebi ile akım kaçakları oluşmakta, bozulma (breakdown) voltajı düşmekte ve çalışma voltaj aralığı azalmaktadır. Bu tip transistörlerde güç kayıpları büyük sorun oluşturmaktadır. Bu sorunu aşabilmek için dielektrik malzeme kalınlığının ve bağlı dielektrik sabitinin artması gerekmektedir. Çözüm olarak önerilen ise yüksek dielektrik sabite sahip yeni malzemelerin SiO₂-gatelerin yerini almasıdır. Si-tabanlı dielektrik malzemeler SiO₂, Si₃N₄, SiO_xN_y olduğu düşünülürse dielektrik sabitin $\epsilon > 7$ olması gerekmektedir (Hava için $\epsilon = 1$, ve ferroelektrik malzemelerde $\epsilon = 24700$ olarak bilinmektedir). Yüksek dielektrik sabitli malzemeler arasında HfO₂, ZrO₂, TiO₂, CeO₂ gibi DMSO tipi oksitler bulunmaktadır.

4.2 CeO₂ Malzemesi Hakkında Literatürde Yer Alan Çalışmalar

CeO₂ teknolojik açıdan birçok kullanım alanına sahip, çok fonksiyonlu bir malzemedir. Dielektrik sabiti yüksektir (~27). Katalizör, UV soğurucu olması yanında uygulamalarda gaz sensörlerinde, katı oksit yakıt pillerinde (çalışma sıcaklığı 600-1000 K arası), oksijen depolama cihazlarında kullanılmaktadır [58-62]. Genellikle otomotiv alanında katalitik dönüştürücü olarak kullanılırlar. Yüzeyine kaplanan metal parçacıkların da katalitik özelliklerini geliştirirler [63]. Yüzey merkezli kübik kristal yapısı, bant aralığının yaklaşık 3.3 eV oluşu ve örgü parametresinin Si ile uyumlu oluşu elektronik cihazlar için CeO₂'yi Si yerini alabilecek güçlü bir aday yapmaktadır. Ayrıca yüksek dielektrik sabiti ile MOSFET cihazlardaki kaçak akım problemini de çözmeye adaydır. Örneğin, SiO₂'li MOSFET'lerde kalınlık 3.5 nm ve kapı gerilimi 1 V olduğunda, kaçak akım 10-12 A/cm² iken kalınlık 1.5 nm'ye düştüğünde kaçak akım 13 kat artarak 10 A/cm²'ye yükselmektedir. Günümüzdeki hızla gelişen akıllı telefon,

bilgisayar pazarı için kaçak akımın azaltılması en önemli isteklerin başında gelmektedir. CeO_2 tabanlı katı elektrolitlerin iyonik iletkenlikleri YSZ'den daha büyük oldukları için katı oksit yakıt hücrelerinde (SOFC) kullanımı yaygınlaşabilir [64].

Saf CeO_2 nanoparçacıkları oda sıcaklığında koersif alanı 20 Oe civarında olacak şekilde zayıf ferromanyetik özellik gösterirler. [65]. Oksijen boşlukları Ce iyonlarının f elektronlarında spin polarizasyonuna sebep olmaktadır [66]. Parçacık büyüklüğü azaldıkça CeO_2 örgü parametreleri büyümektedir. Bunun sebebi Ce^{+3} iyonlarının Ce^{+4} iyonları ile yer değiştirmesi ve bunun sonucunda oluşması muhtemel oksijen boşluk yoğunluğunun artmasıdır.

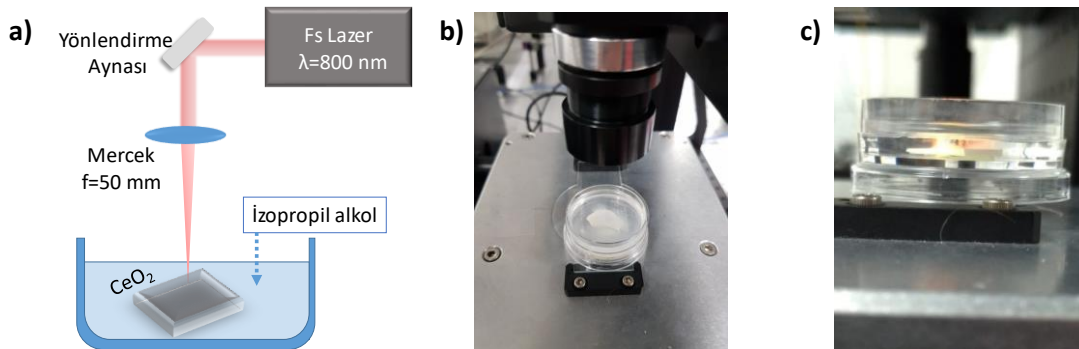
Geçiş metali (Fe, Co, Ni, Y ve Cu) katkılanmış nanomalzemelerde gözlenen manyetik momentler, p-tipi serbest taşıyıcıların yarattığı dolaylı değiş-tokuş etkileşimleri sebebiyle gözlenir. Co katkılanmış CeO_2 sekizyüzlü nanoparçacıklarda, nano çubuklarda oda sıcaklığı ferromanyetizması (Room Temperature Ferromagnetism, RTFM) gözlenmiştir [67-69]. Ni katkılanmış CeO_2 nanoparçacıkların oda sıcaklığında ferromanyetik olduğu gözlenmiştir [70, 71]. Fe katkılı CeO_2 nanoparçacıkları sol-gel yöntemi ile üretilmiş olup, RTFM gözlenmiştir. Ayrıca katıhal reaksiyonu yöntemi ile üretilmiş Fe katkılanmış CeO_2 polikristal malzemesinde dielektrik sabitin arttığı ve aynı zamanda THz bölgesinde ışığa karşı şeffaf özellik gösterdiği gözlenmiştir. Bu yönüyle mükemmel bir THz optik malzeme olarak kullanılabileceği bildirilmiştir [72]. $\text{Ce}_{1-x}\text{Cu}_x\text{O}_2$ katı-hal reaksiyonu yöntemi ile üretilmiş ve Cu eklendiği durumlarda sıcaklıkla dielektrik sabitin arttığı görülmüştür [73]. Y katkılanmış CeO_2 seramikleri ve nanoparçacıkları üzerinde yapılan yüksek sıcaklık (700-900 °C) iletkenlik ölçümlerinde toplam iletkenliğin arttığı gözlenmiştir [74].

4.3 Sıvı İçerisinde Femtosaniye Lazer ile Nanoparçacık Sentezi ve Karakterizasyonu

Bütün bu yapılan çalışmalar ışığında CeO_2 nanoparçacıkların üretimi ve karakterizasyonu bu bilimsel alanın ilerlemesi ve bilgi dağarcığının geliştirilmesi için önem arz etmektedir. CeO_2 nanoparçacıklarının üretilmesinde önemli yöntemlerden bir tanesi sıvı içerisindeki malzemenin femtosaniye lazer ile yüzeyin işlenmesi sonucu doğrudan nanoparçacık üretimidir. Femtosaniye lazerler sahip oldukları kısa darbe

süreleri sayesinde yüksek tepe güçlerine ulaşarak yapı içerisindeki bağları kopararak nano boyutta parçacıkların oluşmasını sağlamaktadır.

Lazer tabanlı nanoparçacık sentezinde, darbeli bir lazer hüzmesi odaklayıcı optik kullanılarak bir çözücü içerisindeki hedef malzemenin üzerine odaklanır ve darbe enerjisi malzemeden parçacık kopartma eşiğinin üzerinde olacak şekilde ayarlanır. Kitle yüzeyinden ayrılan malzeme, çözücü içerisinde nano boyutlarda şekillenir. Nanoparçacık üretiminin sürekliliğinin sağlanması amacıyla örnek üç boyutlu bilgisayar kontrollü bir tezgah üzerine yerleştirilerek belirli aralıklarla taranarak sıvı içerisindeki nanoparçacık yoğunluğu artırılır. Tez dahilinde yapılan çalışmalarda bu yöntem kullanılarak CeO_2 malzemesi izopropil alkol içerisinde femtosaniye lazer ile işlenerek nanoparçacık üretimi hedeflenmiştir. Yapılan nanoparçacık sentezi deneylerinde 800 nm dalgaboyunda 120 fs darbe süresine ve 1 kHz tekrarlama frekansına sahip Ti:safir lazer kullanılmıştır. Lazer çıkışı, mikro işleme tezgahına aynalar ile yönlendirilmiş ve odak uzaklığı 5 cm olan bir mercekle CeO_2 örneği üzerine odaklanmıştır. Lazer odağının konumu, merceğin pozisyonu ayarlanarak örneğin yüzeyi ile örtüşecek şekilde ayarlanmıştır. Örnek üzerinde lazer ile taranacak alan 5 mm x 5 mm olarak seçilmiştir. Lazer hüzmesi örnek üzerinde doğrusal hareket ettirilerek ablasyonun şeritler halinde olması sağlanmıştır. Kullanılan deney setinde iki şerit arası 20 μm olarak seçilmiştir ve toplamda 250 şerit çizilmiştir. Lazer ortalama gücü 20 mW'a ayarlanmış ve örnek 1 mm/s tarama hızında taranarak hedeflenen bölgeden parçacık kopartılması sağlanmıştır. Deney düzeneğinin temsili çizimi ve fotoğrafı Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 : Femtosaniye lazer ile nanoparçacık sentezi deney düzeneği (a) çizimi ve (b,c) fotoğrafları.

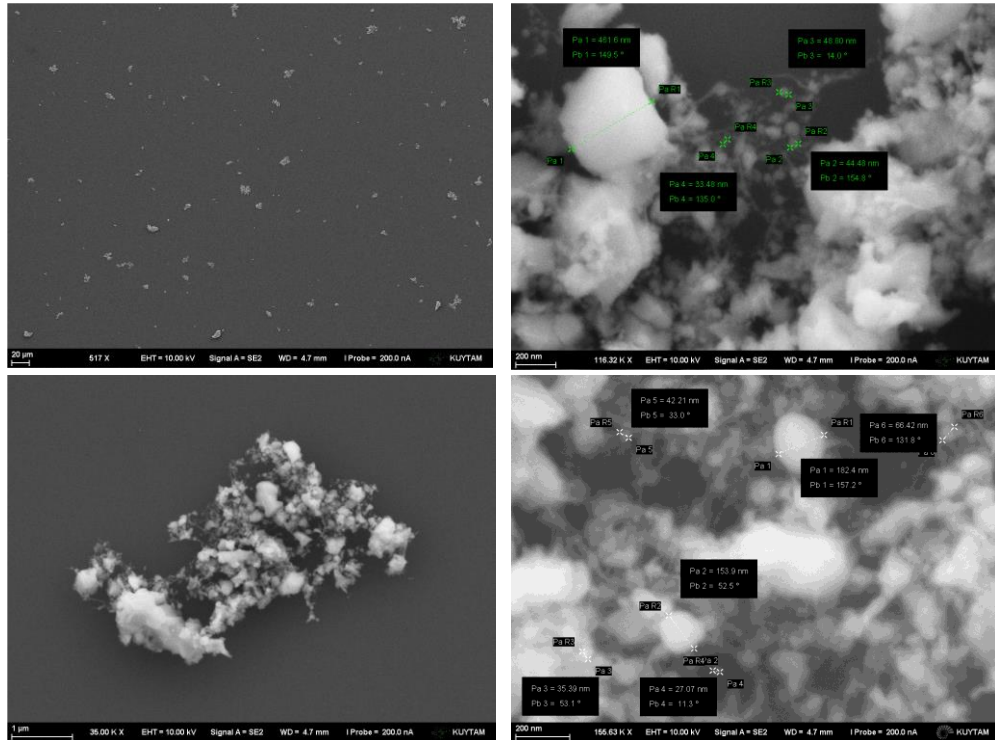
Deney sırasında Şekil 4.1(b)'de görüleceği üzere sentezlenen CeO_2 nanoparçacıklarının izopropil alkol içerisindeki yoğunluğunun artması ile beraber

sıvının renginin değiştiği gözlemlenmiştir. Deneyin tamamlanması ile beraber kap içerisinde biriken nanoparacak çözeltisi pipet yardımı ile petri kabından alınarak küçük bir cam şişe içerisine alınmıştır. Elde edilen nanoparacak çözeltisinin fotoğrafı şekil 4.2 ‘de verilmiştir.



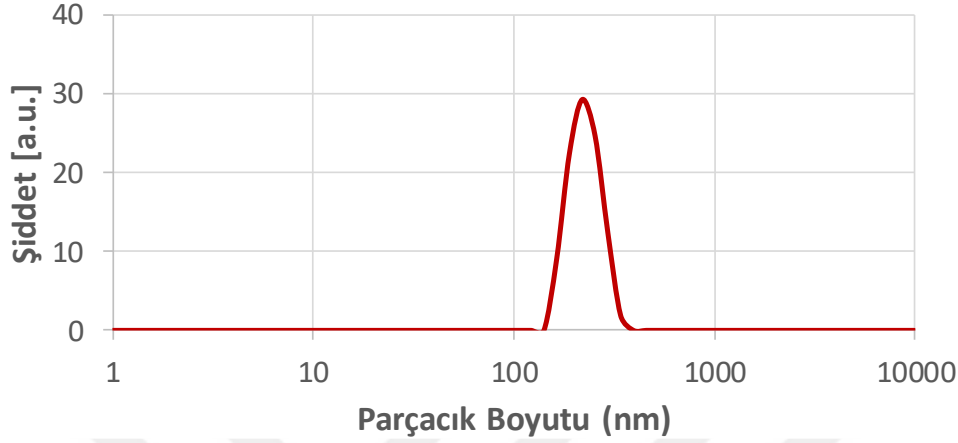
şekil 4.2 : İzopropil alkol içerisindeki fs lazer ile üretilmiş CeO₂ nanoparacak çözeltisi fotoğrafı.

Nanoparacakların femtosaniye lazer kullanılarak üretilmesinin ardından boyutlarının analizi için öncelikle taramalı elektron mikroskop (SEM) görüntüsü (şekil 4.3) alınmıştır. Ardından dinamik ışık saçılması (dynamic light scattering (DLS)) ölçüm yöntemi kullanılarak üretilen paracak boyutları ve dağılımı ölçölmüştür. SEM görüntüleri incelendiğinde farklı boyutlardaki nanoparacakların topaklandığı görölmüştür. Yapılan ölçömlerde en küçük nanoparçacığın çapının yaklaşık 20 nm, en büyüğünün ise yaklaşık 1 μm olduğu gözlenmiştir.



şekil 4.3 : Femtosaniye lazer ile üretilen CeO₂ nanoparacaklarının SEM görüntüleri.

Parçacık boyut dağılımının net bir analizinin yapılması amacıyla Zetasizer cihazı ile DLS ölçümü yapılarak parçacık boyu ortalaması ve dağılımı çıkartılmıştır. Bu ölçümden alınan sonuca göre ortalama parçacık çapı 333 nm olarak ölçülmüştür. Elde edilen parçacık boyu histogramı Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.4 : Femtosaniye lazer ile üretilen CeO₂ nanoparçacıkların DLS ölçümü ile kaydedilmiş boyut dağılımı.

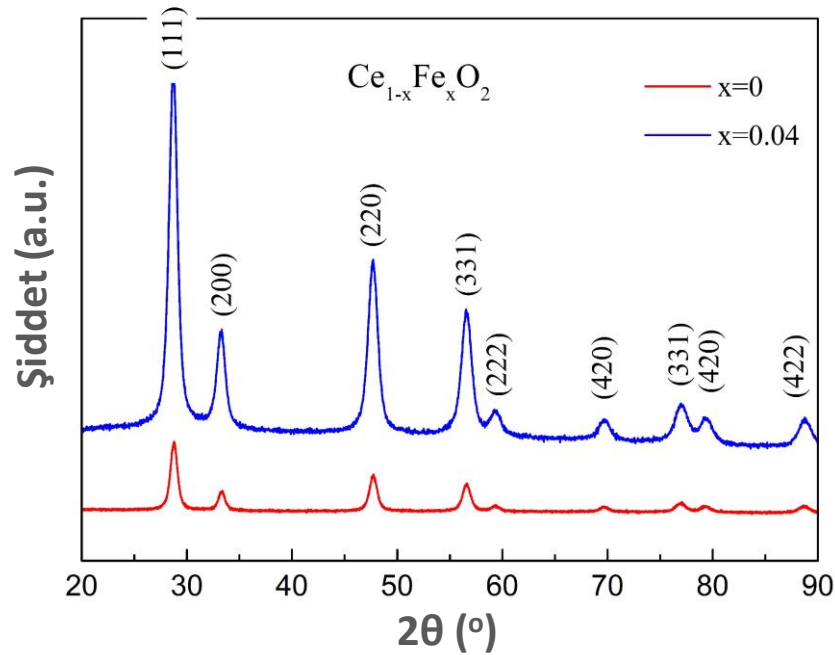
Femtoseküler lazer ile nanoparçacık üretimi kimyasal içermeyen çevreci üretim yöntemi olarak kullanılsa da üretilen parçacıkların boyutlarındaki geniş dağılım, birim zaman içerisinde üretilen parçacık miktarı lazer-hedef malzeme sisteminin parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Üretilen nanoparçacık miktarının daha fazla olması sebebi ile kimyasal çöktürme tekniği ikincil yöntem olarak kullanılmıştır. Nanoparçacık sentez yöntemi olarak kullanılan kimyasal çöktürme, önemli bir alternatif nanoparçacık üretimi yöntemidir. Bu amaçla kimyasal yollarla üretilen CeO₂ nanoparçacıkları ile ilgili yöntem ve sonuçlar bir sonraki alt başlıkta verilmiştir.

4.4 Kimyasal Çöktürme Yöntemi ile CeO₂ Nanoparçacıkların Üretimi ve Karakterizasyonu

Femtoseküler lazer ile nanoparçacık üretimine ek olarak bir diğer nanoparçacık üretim yöntemi olan kimyasal çöktürme yöntemi kullanılarak da nanoparçacık sentezi sağlanmıştır. Ayrıca bu yöntem kullanılarak elde edilen nanoparçacık miktarının yüksek olması sayesinde örnekler pelet formunda şekillendirilerek dielektrik ölçümlerinin yapılması mümkün olmuştur. Örneklerin hazırlanması amacıyla öncelikle CeO₂ nanoparçacıklarının üretiminde, 0.06 M'lik seryum nitrat çözeltisi saf

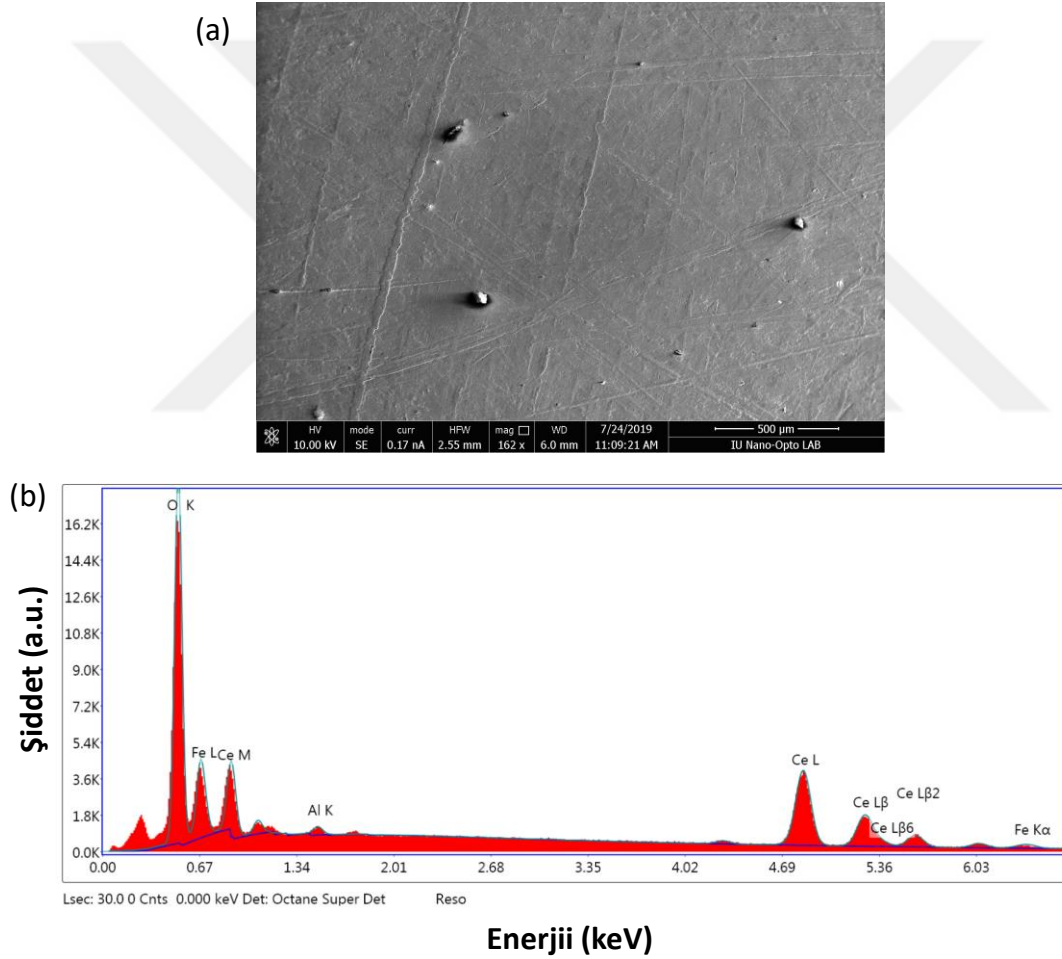
su kullanılarak hazırlanmış ve manyetik karıştırıcıda 30 dk karıştırılmıştır. pH değeri 4.5 civarında olan bu çözeltiye pH değeri 10 olana kadar sabit karıştırma altında amonyum çözeltisi eklenmiştir. Bu noktada beher içerisinde çökelmenin başladığı gözlenmiştir. Üç saat manyetik karıştırıcıda bırakılarak kâğıt filtre ile çökelmiş kısım süzölmüş ve 5-6 defa etanol/saf su kullanılarak yıkanmıştır. Filtre kâğıdında biriken çökelti 24 saat etüvde bekletilerek kurutulmuştur. Çökelti havana aktararak iyice ezilmiş ve seramik pota içinde normal atmosferde 600 °C’de 5 saat boyunca fırında tavlannmıştır.

Fe katkılı CeO₂ üretimi için ise aynı yöntem kullanılmıştır. Başlangıçta seryum nitrat çözeltisine, demir nitrat çözeltisi damlatılarak eklenmiştir. Elde edilen nanoparçacıkların X-ışını toz kırınım desenleri Şekil 4.5’te görölmektedir. Tüm ölçümler 20-90° aralığında ölçölmüş olup tek fazlı kristal yapıda olduğu görölmektedir. CeO₂ ve Fe katkılı CeO₂’nin örgü parametreleri sırasıyla 0.5389 nm ve 0.5390 nm olarak bulunmuştur. Fe katkılanmış CeO₂ örnekte örgü parametresi biraz büyüktür, bu sebeple Fe katkıldığında Ce⁴⁺ (iyon çapı 0.097 nm) iyonları ile Ce³⁺(iyon çapı 0.114 nm) iyonları yer değıştirmiş ve bunun sonucunda muhtemel oksijen boşluk yoğunluğu değışmiştir diyebiliriz. Üretilen örneklerin kristalite büyüklükleri X-ışını deseni ile Scherrer formölü kullanılarak bulunmuş olup CeO₂ için ortalama 9 nm iken Fe katkılı CeO₂ için 7 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.5 : CeO₂ ve Ce_{0.96}Fe_{0.04}O₂ örneklerine ait X-ışını toz kırınım desenleri.

CeO₂ ve Fe katkılı CeO₂ nanoparçacıklarının peletleri 0.8 ton altında 10 mm çap ve ~1 mm kalınlıkta hazırlanmıştır. Hazırlanan Ce_{0.96}Fe_{0.04}O₂ örneğine ait pelet yüzeyinden alınan SEM görüntüsü ile Enerji Dağılım X-Işını Spektrometresi'nde (EDX) elementer analiz sonucu Şekil 4.6'da görülmektedir. Büyük bir alan kullanılarak yapılan EDX analiz sonucunda Ce, Fe ve O elementleri dışında herhangi bir safsızlığa rastlanmamıştır. Fe miktarının %4 olması sebebiyle elde edilen atomik % miktarının hata payı yüksek (± 7.17) çıkmıştır. Ancak oksijen miktarı ihmal edilerek yapılan EDX sonucunda stokiometrinin Ce_{0.95}Fe_{0.05} (+O₂) olduğu görülmektedir. Bu da istenilen stokiometrinin sağlandığını göstermektedir. EDX deseninde gözlenen Al safsızlığı cihaz kaynaklıdır.



Şekil 4.6 : Ce_{0.96}Fe_{0.04}O₂ nanoparçacıklarının (a) SEM görüntüsü ve (b) EDX sonucu.

Manyetik metal katkılanmış CeO₂ tipi DMS oksitlerde nano-boyutta üretilen malzemelerin dielektrik sabitin büyük ve oda sıcaklığında ferromanyetik olması spintronik cihazlar tarafından aranan özellikleri bir araya getirmektedir. Bu sebeple oda sıcaklığında zayıf ferromanyetik özellik gösteren CeO₂ ve Ce_{0.96}Fe_{0.04}O₂

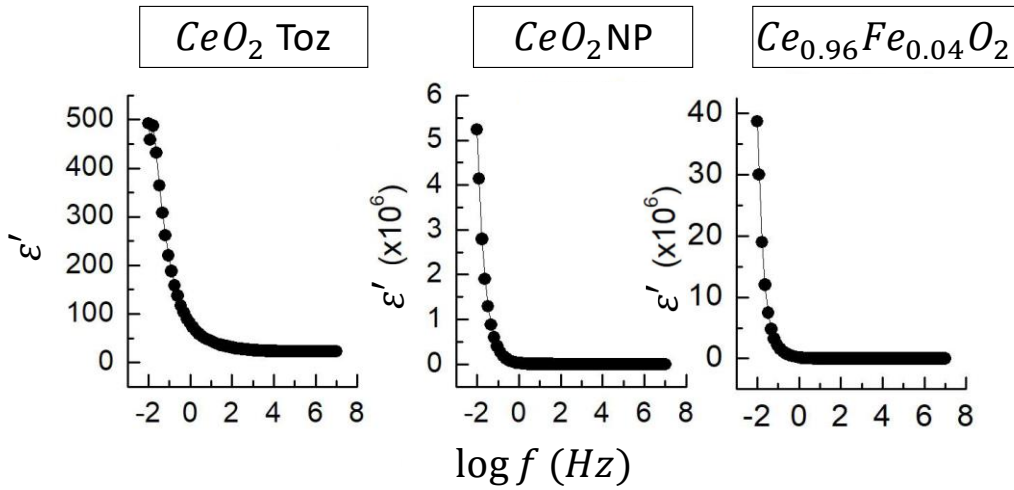
nanoparçacıklarına ek olarak kıyaslama yapabilmek için ticari olarak satın alınmış CeO_2 toz numunesi de (Aldrich Chemistry, saflık %99.9, parçacık büyüklüğü 5 μm 'den küçük) dielektrik ölçümlerde kullanılmıştır. Aynı koşullarda peletler hazırlanmıştır. Bir AC alan altındaki dielektrik sabit,

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (4.1)$$

olarak verilmektedir. ε' gerçek geçirgenlik veya bağıl dielektrik sabitini, ε'' ise sanal geçirgenlik veya dielektrik kayıp değerini vermektedir. Kayıp faktörü, $\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$ olarak verilir ve buradaki δ faz açısını ya da kayıp açısını verir. Dielektrik malzemelerde 4 tür kayıp bileşeni bulunmaktadır.

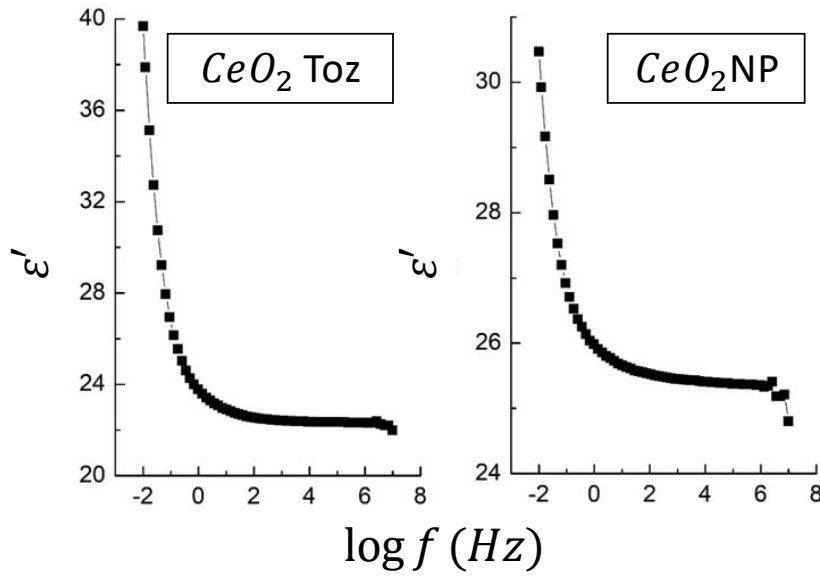
- İletim Kaybı: Alana maruz kalan malzemenin ara kesit yüzeylerinde yük dengesi kurulana kadar ortaya çıkan kayıplardır. Kaçak akımların yol açtığı kayıptır, yalıtkan malzemenin direncinden ve üzerinden geçen akımdan kaynaklanır.
- Histeresis Kaybı: Genellikle mükemmel bir yalıtkan dielektrik kaybı fazla bir malzeme ile birlikte kullanılır. Birbirine temas eden birden fazla yalıtkan malzemenin elektrik alan altında dielektrikler arası yük dengesi kurulana kadar gerçekleşen yük hareketine bağlı kayıplardır.
- Polarizasyon Kaybı: AC gerilim altında dipol moleküllerin kutuplarının uygulanan alanın zıt kutbuna doğru yönelme hareketinden meydana gelen kayıplardır.
- İyonlaşma Kaybı: Yalıtkan bir ortamda kısmi boşalmaların yol açtığı kayıptır. İyonizasyon gerilimine ulaşıncaya boşalmaların sayısı ve büyüklüğüne bağlı olarak kayıplar artar. Bu tip kayıpları belirlemek amacıyla gerilim değeri değiştirilir.

Oda sıcaklığında frekansa bağlı dielektrik sabit ölçüm grafikleri Şekil 4.7'de görülmektedir. Tüm ölçümlerde dielektrik sabitin (ε') düşük frekanslarda ($0 < f < 1$ Hz) yüksek değere sahip olduğu ve frekans yükseldikçe dielektrik sabitin düştüğü görülmektedir. Bu davranış seramiklerin doğal davranışıdır. Düşük frekanslardaki yüksek dielektrik sabit ara yüzey veya uzay yükü polarizasyonundan kaynaklanmaktadır. Yüksek frekanslarda azalarak sabit bir değere ulaşır. Elde edilen sonuçlar yapılan çalışmalarla benzerlik göstermektedir.



Şekil 4.7 : CeO_2 polikristal toz, CeO_2 ve $Ce_{0.96}Fe_{0.04}O_2$ nanoparçacıklarının dielektrik sabitinin frekans ile değişimi grafikleri.

CeO_2 nanoparçacık seramiklerinde ara yüz polarizasyonu veya uzay yükü polarizasyonu, nanoparçacıkların büyük yüzey/hacim oranı sebebiyle oluşan yapısal homojensizlik sebebiyle oluşmaktadır. Harici elektrik alan arayüzeydeki kusurlar boyunca uzay yüklerinin hareket etmesini ve hapsolmesini sağlar. Bu durum dipol momentlerin oluşumuna yol açar. Uzay yükü polarizasyonu düşük frekanslarda etkindir ve örneklerin dielektrik davranışını açıklamak için Maxwell-Wagner dielektrik dağınım teorisi uygulanabilir. Bu nedenle grain sınırları etkisi düşük frekanslarda daha belirgin olur. Grain sınırında, elektronların/boşlukların pozitif ve negatif kusur merkezleri arasında atlaması dielektrik kutuplaşmayı düşük frekanslarda oluşturabilir. Yüksek frekanslarda dipollerin dönme yer değiştirmesi oryantasyonel kutuplaşma ile sonuçlanır ve elektrik dipoller uygulanan elektrik alanın gerisinde kalmaya başlarlar. Böylece dipoller hızlı elektrik alan değişimleriyle baş edemeyerek dielektrik sabitin yüksek frekanslarda eksponensiyel olarak azalmasına sebep olurlar. Yüksek sıcaklıklarda bu sebeple sabit bir dielektrik sabiti elde edilir. CeO_2 ve $Ce_{0.96}Fe_{0.04}O_2$ nanoparçacıklarının sonuçlarına baktığımızda düşük frekans dielektrik katsayısının çok yüksek mertebede olduğu (10^6) görülmektedir. Bunun sebebi hazırladığımız pelletlerin tavllanmış olmasına rağmen ortamdaki nemden etkilenmeleridir. 1400 °C’de sinterlenmiş CeO_2 toz ve CeO_2 nanoparçacıklarının dielektrik ölçümleri Şekil 4.8’de görülmektedir. 1 Hz’in üstündeki frekanslarda CeO_2 nanoparçacıklarının dielektrik sabitin ise 25 civarında olduğu görülmüştür. Bu değer literatür ile uyumludur.



Şekil 4.8 : CeO_2 polikristal toz ve CeO_2 nanoparçacıklarında dielektrik sabitinin oda sıcaklığında frekans ile değişimi grafikleri.

4.5 Sonuç

Literatürde Si yerine alternatif olarak önerilen önemli malzemelerden biri olan CeO_2 malzemesi, gaz algılama, katı oksit yakıt pilleri, oksijen depolama cihazları gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Özellikle nanoparçacık formunda benzersiz özellikler sergilemektedir. Bu nedenle CeO_2 nanoparçacık üretiminde farklı yöntemlerin geliştirilmesi ve mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi önem arz etmektedir. Bu kapsamda yaygın olarak kullanılan kimyasal sentez yöntemlerine alternatif olarak femtosaniye lazer işleme yöntemiyle CeO_2 nanoparçacık üretimi hedeflenmiştir. Bunun için 800 nm dalgaboyunda 1 kHz tekrarlama frekansında 120 fs darbe süresine sahip Ti:safir lazer kullanılarak femtosaniye lazer işleme yöntemi ile CeO_2 nanoparçacıkların üretilmesi sağlanmıştır. Ortalama gücü 20 mW olan femtosaniye lazer CeO_2 palet üzerine doğrudan odaklanmış ve örnek 1 mm/s hızla hareket ettirilerek geniş bir alan taranmıştır. Bu tarama sırasında yüzeyden kopan parçalar izopropil alkol içerisinde biriktirilmiştir. Üretilen parçaların boyut analizinin gerçekleştirilmesi için öncelikle SEM görüntüleri alınmıştır. Burada parçacık boyutları incelendiğinde en küçük 20 nm, en büyük 1 μm civarında parçacıklar üretildiği tespit edilmiştir. Parçacık boyutundaki genel dağılımın görülebilmesi için ise DLS ölçümü gerçekleştirilmiş ve parçacık boyutunun ortalama 333 nm olduğu tespit edilmiştir.

Femtosaniye lazer ile üretilen nanoparçacıkların boyutlarının yazım parametrelerine önemli ölçüde bağlı olduğu öngörülmektedir. Bu kapsamda farklı yazım parametreleri

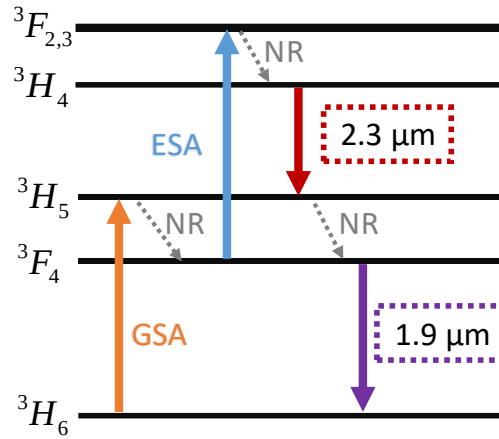
ile farklı nanoparçacık dağılımları elde edilebilir. Bu yönteme ek olarak kimyasal çöktürme yöntemi ile de CeO_2 ve Fe katkılı CeO_2 nanoparçacıkları üretilmiş ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir. Elde edilen nanoparçacıkların yapısal karakterizasyonu için X-ışını toz difraktometre ölçümleri gerçekleştirilmiş ve tek fazlı kristal yapıda olduğu görülmüştür. Ayrıca kimyasal çöktürme metodu ile üretilen CeO_2 ve Fe katkılı CeO_2 nanoparçacık peletlerinin yüzey görüntüleri SEM kullanılarak kaydedilmiş ve EDX elementer analiz sonuçları sunulmuştur. Yapılan analizler sonucunda Ce, Fe ve O elementleri dışında herhangi bir safsızlığa rastlanmamıştır. Son olarak CeO_2 polikristal toz, CeO_2 ve $\text{Ce}_{0.96}\text{Fe}_{0.04}\text{O}_2$ nanoparçacıklarının dielektrik sabitinin frekans ile değişimi incelenmiş ve literatürle uyumlu olduğu gösterilmiştir.

5. ÜST ÇEVİRİM POMPALI $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ LAZERİ

5.1 Giriş

Son yıllarda, Tm^{3+} iyonunun $^3\text{H}_4$ - $^3\text{H}_5$ geçişine karşılık gelen 2.3 μm dalgaboyundaki lazerlerin geliştirilmesi konusunda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. 2.3 μm lazer ışığının elde edilmesinde, Tm^{3+} katkılı yeni konak malzemelerin kullanılması [75-77], önceden incelenen konak malzemelerde lazer performansının eniyileştirilmesi [78], Q-anahtarlama ve kip kilitleme yöntemleri ile darbeli çalışma rejiminin incelenmesi ve özgün üst çevrim pompalama mekanizmalarının kullanılması [79, 80] gibi farklı yönlerde araştırmalar yapılmıştır. Özellikle $\text{Tm}^{3+}:\text{YLF}$ kristalinin 1 μm ve 1.45 μm dalgaboylarındaki lazerler ile üst çevrim pompalama yöntemi ile uyarılarak 2.3 μm civarında lazer operasyonunun elde edilmesi [80] bu alana yeni bir bakış açısı getirmiştir. Bu gelişme ile birlikte farklı kazanç ortamlarının da bu yöntem ile çalıştırılıp çalıştırılamayacağı veya yaygın olarak kullanılan ticari pompa lazerlerinin üst çevrim pompa lazeri olarak kullanılıp kullanılamayacağı soruları doğmuştur. Tezin beşinci bölümünde bu soruların cevabı niteliğinde elde edilen deneysel sonuçlar paylaşılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada üst çevrim pompalama mekanizması kullanılarak $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin lazer olarak çalıştırılması gösterilmiştir. Yapılan çalışma ile yaygın olarak kullanılan 1064 nm dalga boyuna sahip iterbiyum fiber lazeri ile üst çevrim pompalama yöntemi kullanılarak 2.3 μm dalgaboylarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri geliştirilmiştir. Literatürde Tm^{3+} iyonunun üst çevrim enerji transfer mekanizmaları daha önce incelenmiştir [79, 81-83]. Dalgaboyu 1 μm civarında olan pompa kaynağı ile uyarılan yüksek iyon katkı oranına sahip Tm^{3+} iyonu, sıralı bir soğurma sürecinden geçmektedir. Şekil 5.1'de görüleceği üzere 1064 nm dalgaboyuna sahip fotonların enerjisi temel seviye olan $^3\text{H}_6$ seviyesindeki iyonların üst seviye olan $^3\text{F}_{2,3}$ seviyesine çıkarılması için yeterli değildir. Bu durumda bir başka soğurma mekanizması olan uyarılı seviye soğurulması, ilgili iyonların $^3\text{F}_{2,3}$ seviyesine taşınmasında rol oynamaktadır. Bu geçişin gerçekleşmesi için 1064 nm dalgaboyundaki pompa kaynağı, Tm^{3+} iyonlarını öncelikle $^3\text{H}_6$ seviyesinden $^3\text{H}_5$ seviyesine taşımaktadır. Bu geçiş temel seviye soğurması (GSA) olarak adlandırılır.

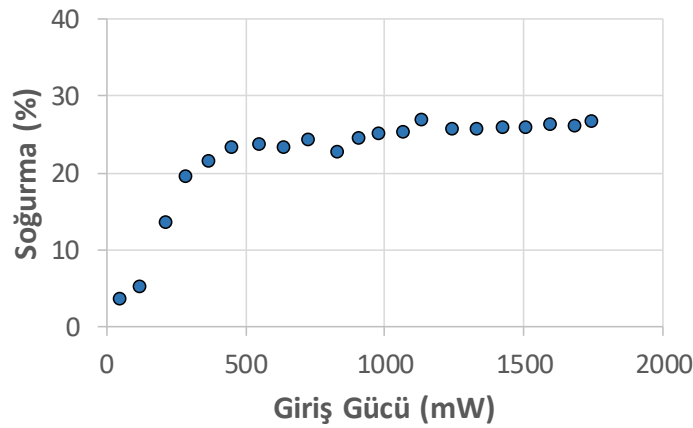
Ardından iyonlar ışımasız geçiş yaparak 3F_4 seviyesine geri inmektedirler. Bu seviyedeki iyonların uyarılı seviye soğurulması (ESA) gerçekleştirilmesiyle $^3F_{2,3}$ seviyesine çıkmaktadırlar. Bir diğer uyarılı ışımanın ardından Tm^{3+} iyonları lazer üst seviyesi olan 3H_4 seviyesine ışımasız geçiş (NR) ile inerek bu seviyede nüfus tersinimi meydana getirir. Ardından 3H_4 seviyesinden 3H_5 seviyesine uyarılı ışıma meydana gelerek 2.3 μm geçişi mümkün olur. Bu enerji transfer mekanizması kullanılarak, yaygın kullanım alanına sahip 1 μm dalgaboyunda bir pompa lazer kaynağı ile 2.3 μm 'de lazer ışıınının deneysel olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Yaptığımız deneylerde $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ kristali, x-kovuk mimarisi ile tasarlanmış lazerin aktif ortamı olarak kullanılmış ve 1064 nm dalgaboyundaki iterbiyum fiber lazer ile üst çevrim pompalama mekanizması sayesinde 2.3 μm dalgaboyundaki operasyonu sağlanmıştır. Elde edilen en yüksek güç soğurulan pompa gücünün 604 mW olduğu durumda, sürekli dalga rejiminde ve %3 OC ile 124 mW olarak kaydedilmiştir. Ayrıca geliştirilen lazerin 2268 nm ile 2373 nm dalga boyları arasında dalgaboyu ayarlanabilir olduğu gösterilmiştir. Deneylerde %1 ve %3 geçirgenliğe sahip OC'ler ile lazer operasyonu gözlenmiştir. Bu OC'ler ile alınan verim eğrisi değerleri kullanılarak yapılan hesaplarda kavite içi kayıplar ve kuantum kusurlar (quantum defects) ihmal edildiğinde, soğurulan 1064 nm'deki fotonların neredeyse tamamının 2.3 μm lazer fotonuna çevrildiği görülmüştür.



Şekil 5.1 : Üst çevrim pompalama yöntemi ile 1064 nm'deki olası soğurma ve 1.9 μm ve 2.3 μm 'deki ışıma enerji geçişlerini gösteren Tm^{3+} iyonu enerji seviyeleri diyagramı.

5.2 $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ Kristalinin 1064 nm Dalgaboyundaki Doğrusal Olmayan Soğurma Özelliklerinin DeneySEL Olarak İncelenmesi

Üst çevrim pompalama yönteminin deneySEL olarak incelenmesi için %8 (atomik) Tm^{3+} iyonu katkılanmış 2 mm ve 2.8 mm uzunluğa sahip iki farklı KY_3F_{10} kristali kullanılmıştır. İlk olarak kristalin soğurma özellikleri incelenmiştir. Sonrasında kristal lazer aktif ortamı olarak kullanılmış ve bu şekilde elde edilen lazerin karakterizasyon sonuçları raporlanmıştır. Yüksek miktarda katkılanmış $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin doğrusal olmayan soğurma özelliklerinin incelenmesi için iki farklı deney yapılmıştır. İlk deneyde, öncelikle 2 mm uzunluğunda %8 Tm^{3+} katkılı KY_3F_{10} kristaline, 1064 nm merkez dalga boyuna sahip iterbiyum fiber lazeri (IPG Lasers) gelme açısı Brewster açısı olacak şekilde yönlendirilmiş ve odak uzaklığı 75 mm olan bir mercek ile odaklanmıştır. Yönlendirilen lazer hüzmesinin şiddeti belirli aralıklarla arttırılarak kristalden geçen güç ölçülmüştür. Giriş ve çıkış gücünün hesaba katılmasıyla kristalin bir geçişteki soğurması hesaplanmıştır ve elde edilen sonuç Şekil 5.2’de verilmiştir. Şekil 5.2’de görüldüğü üzere, giriş gücünün arttırılması ile kristalin soğurmasında keskin bir artış görülmektedir ve 500 mW güç değerinin üzerinde ise %25 soğurma değerinde yakın değerlerde seyrettiği kaydedilmiştir. ABCD matris metodu kullanılarak kristal içerisindeki spot genişliği 18 μm olarak hesaplanmıştır. Bu değer kullanılarak 500 mW’lık giriş gücünün 49 kW/cm^2 ’lik bir pompa şiddetine karşılık geldiği hesaplanmıştır.



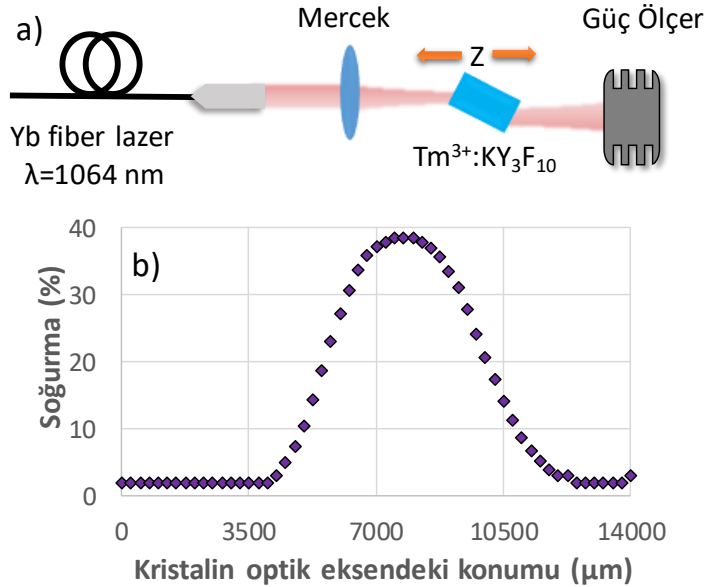
Şekil 5.2 : Giriş gücünün fonksiyonu olarak 2 mm boyundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm’deki soğurma verisi.

Yapılan ikinci deneyde ise Şekil 5.3(a)’da verilen deneySEL düzenek kullanılarak Z-tarama (Z-scan) yapılmış ve kristalin soğurma miktarı belirlenmiştir. Bu deneyde 2.8 mm uzunluğunda %8 Tm^{3+} iyonu katkılı KY_3F_{10} kristali kullanılmıştır. 1064 nm’deki

iterbiyum fiber lazeri 1040 mW gücünde sabit tutularak 100 mm odak uzaklığına sahip bir mercek ile Brewster açısında yerleştirilen kristalin içerisine odaklanmıştır. Kristal, optik eksen yönünde belirli aralıklarla ilerletilerek kristalden geçen güç ($P_{\text{çıkış}}$) kaydedilmiştir. Denklem (5.1) kullanılarak kristalin optik eksenindeki farklı pozisyonları için soğurma yüzdesi hesaplanmıştır.

$$A(\%) = \left(1 - \frac{P_{\text{giriş}}}{P_{\text{çıkış}}} \right) \times 100 \quad (5.1)$$

Giriş ve çıkış güçleri kullanılarak soğurma verisi elde edilmiş ve Şekil 5.3(b)'de verilmiştir. Bu veri, soğurma miktarının kristalin optik eksenindeki konumuna bağlılığını göstermektedir. Kristal optik eksen boyunca hareket ettirilirken kritik bir değere kadar doğrusal soğurma yaparak 1064 nm dalgaboyundaki gelen lazer hüzmesini yalnızca %2-%3 aralığında soğurmaktadır. Kristal odak noktasına yaklaşırken uyarılı seviye soğurması yaparak 1064 nm'deki soğurmasının belirgin bir oranda arttığı gözlenmiştir. Bu artış, odak noktasına yaklaştıkça spot genişliğinin küçülmesi nedeniyle hüzme şiddetinin artmasından kaynaklanmaktadır ve Şekil 5.3(b)'de gözlenen davranışı destekler niteliktedir. Kristalin merkezinin lazer hüzmesinin odağı ile üst üste gelmesi durumunda ise kristal en yüksek soğurma değerine ulaşarak %38 değerini almaktadır.



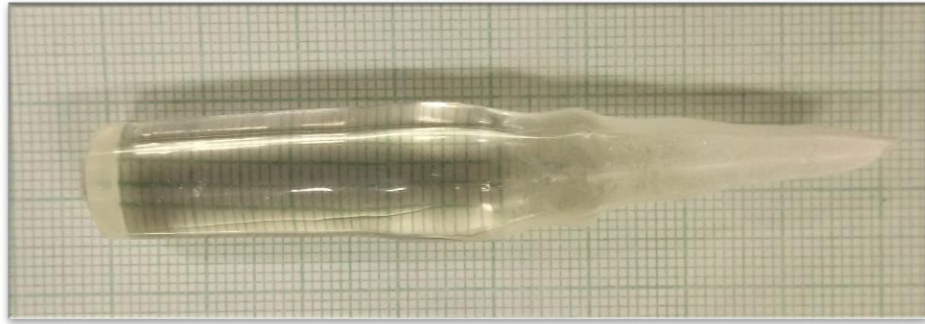
Şekil 5.3 : 2.8 mm uzunluğundaki Tm³⁺:KY₃F₁₀ kristalinin 1064 nm'de alınan (a) z-tarama deney düzeneği ve (b) soğurma verisi.

Yapılan bu deneysel analizler, yüksek miktarda katkılanan Tm³⁺:KY₃F₁₀ kristalinin 1064 nm'deki temel seviye soğurmasının %2 civarında olduğunu göstermiştir. Diğer

tarafından, Tm^{3+} iyonunun üst çevrim pompalama mekanizmasına izin veren enerji seviyeleri sayesinde, yüksek şiddete sahip gelen pompa gücünün uyarılmış seviye soğurmasını tetikleyerek soğurmada belirgin bir artış sağlanabileceği gösterilmiştir. Elde edilen bu soğurma miktarı, 1064 nm lazer ile pompalanan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin lazer aktif ortamı olarak kullanılması için elverişli hale getirmektedir.

5.3 Üst Çevrim Pompa ile $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ Lazerinin 2.3 μm Dalgaboyunda Operasyonu ve Karakterizasyonu

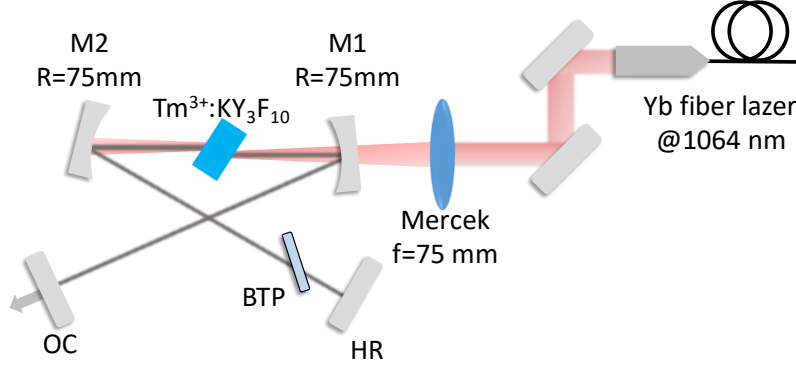
Bu bölümde, sürekli dalga rejiminde çalışan ve üst çevrim pompalama yöntemi ile çalıştırdığımız 1064 nm iterbiyum fiber lazer ile pompalanan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin 2.3 μm dalga boyundaki operasyonu sunulmuştur. İlgili dalgaboyunda lazer ışınımı Tm^{3+} iyonunun $^3\text{H}_4$ - $^3\text{H}_5$ geçişi ile meydana gelmektedir. Bu lazer geçişinin sağlanması için Şekil 5.1’de verildiği üzere, 1064 nm dalgaboyuna sahip fotonlar temel seviye soğurmasını takiben uyarılı seviye soğurması yaparak $^3\text{F}_{2,3}$ seviyelerine gelmektedir. Ardından, ışımasız hızlı geçiş yaparak $^3\text{H}_5$ seviyesine gelmektedir ve uyarılmış ışıma yaparak 2.3 μm ışımasını yapmaktadır. Düzenekte kullanılan 2 mm %8 atomik katkı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali Pisa Üniversitesi’nde Fizik Bölümü’nde Prof. Dr. Mouro Tonelli tarafından Czochralski fırınında 1mm/s çekme hızı ve 5 rpm dönme hızıyla ve büyütülmüştür. Üretilen kristalin kesilip parlatılmadan önceki ham hali (boule) Şekil 5.4’te verilmiştir.



Şekil 5.4 : Pisa Üniversitesi Fizik bölümünde Prof. Dr. Mouro Tonelli tarafından büyütülen %8 atomik katkı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali ham fotoğrafı.

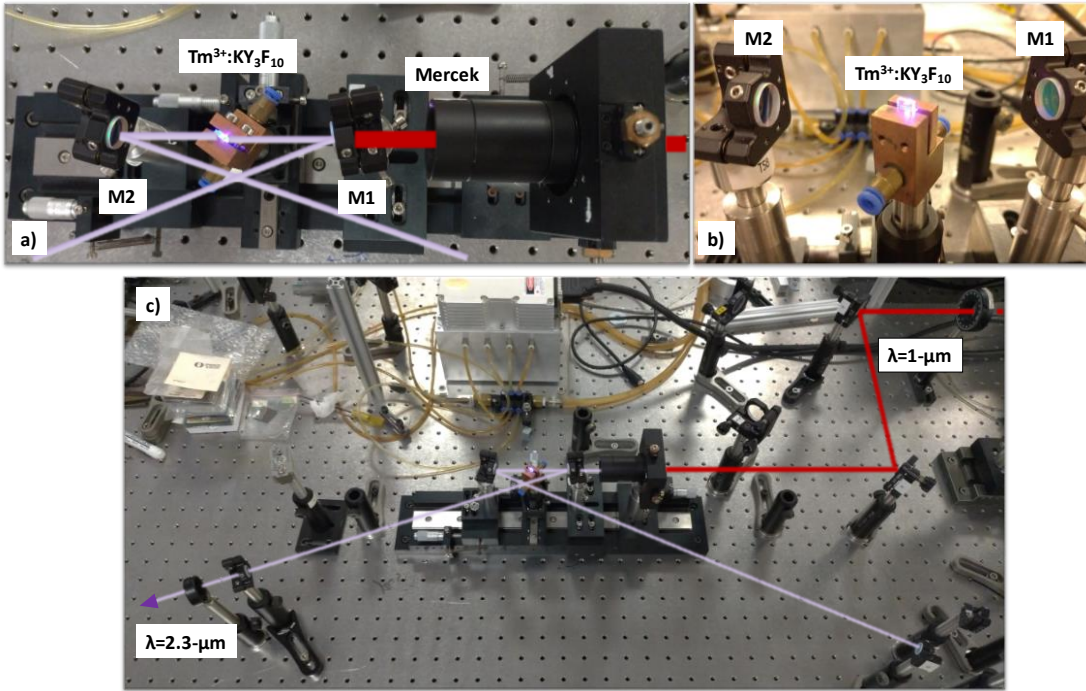
2.3 μm lazer operasyonu sağlanması için Şekil 5.5’te verilen deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinde, 2 mm uzunluğuna sahip %8 Tm^{3+} iyonu katkı KY_3F_{10} kristali Brewster açısında, 75 mm eğrilik yarıçapına sahip M1 ve M2 çukur aynaları arasına yerleştirilmiştir. 1064 nm dalgaboyuna sahip iterbiyum fiber pompa

kaynağı 75 mm odak uzaklığına sahip bir mercek ile kristalin içerisine odaklanarak kristalin uyarılması sağlanmıştır (Şekil 5.5).



Şekil 5.5 : 1064 nm’de pompalanan üst çevrim pompalı 2.3 μm civarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri deney düzeneği.

X-kovuk lazer tasarımına sahip düzenek yüksek yansıtıcılı bir son ayna (HR) ve OC’den oluşmaktadır. Kullanılan kovuk aynaları 2200-2500 nm arasında yüksek yansıtıcılığa sahip olan dielektrik kaplamaları olan aynalardan seçilmiştir. Bu sayede 1.9 μm ’de ışıması baskılanarak lazer 2.3 μm ’de çalışmaya zorlanmıştır. Şekil 5.6 kullanılan deney düzeneğinin fotoğraflarını göstermektedir. Bu fotoğraflarda ilerleyen lazer hüzmeleri 1064 nm için kırmızı ve 2.3 μm için lila renkleriyle temsili olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : X-kovuk lazer tasarımına sahip üst çevrim pompalı 2.3 μm civarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri deney düzeneğini üstten (a), yandan (b) ve tüm kovuğu kapsayacak şekilde gösteren (c) fotoğrafları.

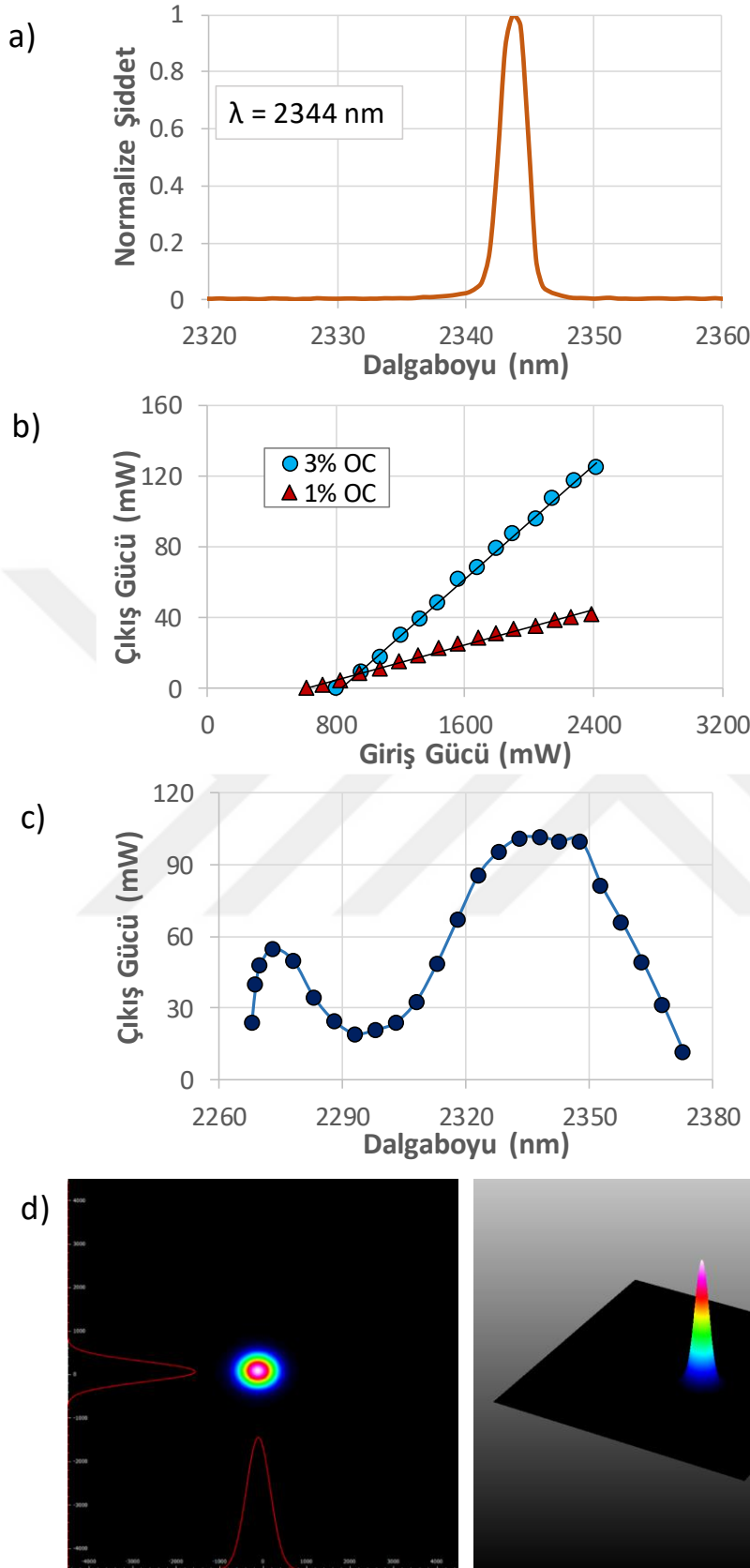
Bu düzeneğe ek olarak Brewster açısında konulan bir çift kırınımlı dalga boyu ayarlayıcı levha (birefringent tuning plate- BTP) ile lazerin dalgaboyu ayarlanabilir çalıştırılışı gösterilmiştir. BTP kullanılarak alınan ölçümlerde Şekil 5.7(c)'de verildiği üzere 2268 nm ve 2373 nm aralığında lazer ışıını elde edilebilmiştir. Son olarak lazerin çıkış profili, Thorlabs marka hüzme profil ölçeri 2.36 W (BP209-IR2 m) sabit giriş gücünde kaydedilmiştir ve profil görüntüsü Şekil 5.7(d)' de verilmiştir. Profil ölçer OC'dan sonra farklı mesafelere konulmuş ve alınan verilerle lazerin M^2 değeri 1.2 olarak hesaplanmıştır.

Üst çevrim pompalama veriminin hesaplanması için dört seviyeli lazer verimi hesabında kullanılan genel formüle üst çevrim verimi eklenerek aşağıdaki formül (5.2) kullanılmıştır.

$$\eta = \eta_U \eta_a \frac{\lambda_p}{\lambda_L} \frac{T}{T + L} \quad (5.2)$$

Burada η güç eğrisi verimi, η_a pompa soğurma verimi, λ_p pompa dalgaboyu, λ_L lazer dalga boyu, T OC geçirgenlik değeri, η_U kovuk içi pasif kayıplara karşılık gelmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta η değerinin ideal bir dört seviye lazerin eğim verimliliği ile benzer bir yapıda olmasıdır [11]. Bu eşitliğe 1064 nm fotonlarının soğurularak 2.3 μm lazer fotonlarına hangi verimle çevrildiği değerini veren üst çevrim verimi (η_U) parametresi eklenerek bu değer hesaplanması amaçlanmıştır. Burada η_U değerinin hesaplanması için öncelikle L değerinin belirlenmesi gerekmektedir. L değeri, farklı T değerlerine karşılık gelen ölçülmüş lazer eşik güçleri kullanılarak Findley-Clay analizi ile belirlenmiştir [10]. Bu ölçümler Şekil 5.8'de verilmiştir ve L değeri %2.38 olarak bulunmuştur. Ölçülen bu değerlerle birlikte η_U değerinin hesaplanmasında kullanılan deneysel lazer parametreleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1'de verilen değişkenler kullanıldığında η_U değeri, %3 OC için 1.25 ve %1 OC için 0.72 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin ortalaması 0.98'dir. Bu değer, üst çevrim ile soğurulan 1064 nm dalgaboyundaki pompa fotonlarının neredeyse tamamının 2.3 μm lazer dalgaboyundaki fotonlara çevrilebildiğini göstermektedir.



Şekil 5.7 : 1064 nm’de pompalanan üst çevrim pompalı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin (a) optik spektrum ölçümü, (b) %1 ve %3 OC ile alınmış verim eğrisi ve dalgaboyuna karşılık çıkış gücü eğrisi, çıkış hüzme profilinin (c) iki ve (d) üç boyutlu görüntüsü.

Çizelge 5.1 : η_U değerinin hesaplanmasında kullanılan deneysel lazer parametreleri.

η	η_a	λ_p (nm)	λ_L (nm)	L (%)	T (%)
0.080	0.25	1064	2344	2.4	3
0.025	0.25	1064	2344	2.4	1

Kovuk parametreleri ile ilgili yapılan bir diğer karakterizasyon ise kovuk içi enerjinin $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm'deki soğurmasının üzerinde etkisinin olup olmadığının deneysel olarak incelenmesidir. Bu deneyde kristal üzerine gelen pompa gücü 2.36 W değerinde sabit tutularak %3 OC geçirgenliği kullanılan kavitede HR aynasının hizalanmasının belirli aralıklarla değiştirilmiştir. Bu sayede kavite içi gücü düşürülmüş ve kristalin bu güce karşılık gelen soğurma değeri kaydedilmiştir. Şekil 5.8'de görüldüğü üzere kristalin 1064 nm'de soğurma yüzdesi 4.58 W kavite içi gücüne kadar neredeyse sabit kalmıştır.

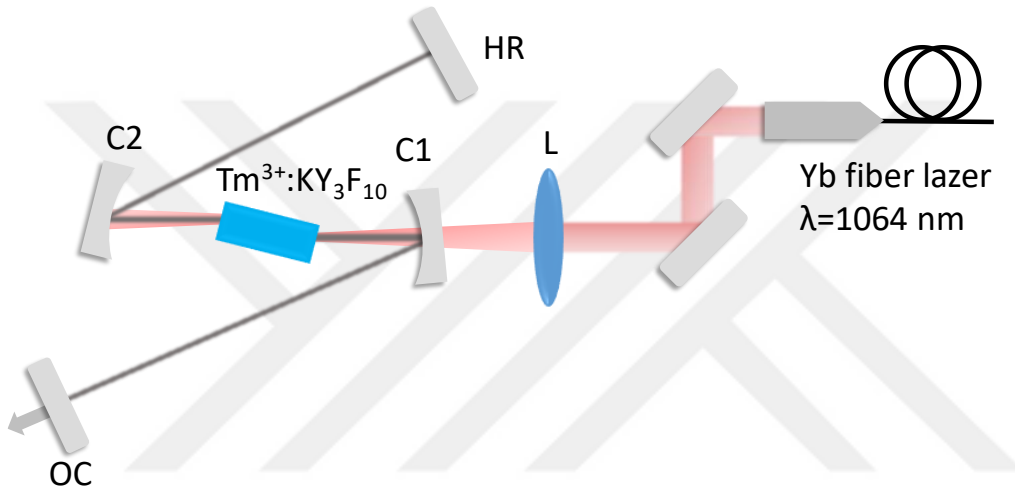


Şekil 5.8 : 2.36 W sabit pompa giriş gücünde $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin kavite içi lazer gücüne bağlı olarak ölçülen 1064 nm'de soğurma yüzdesi.

5.4 Uzunluğu 2.8 mm Olan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ Kristalinin 2.3 μm Dalgaboyundaki Lazer Düzenegi ve Karakterizasyonu

2 mm uzunluğundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali ile yaptığımız deneylerin sonucunda kristalin soğurma miktarının 1064 nm'de 500 mW giriş gücüne kadar arttığını, ardından %25 değerinde sabitlendiği görülmüştür. Kristal soğurmasının artırılması için kullanılacak yöntemlerden bir diğeri daha uzun kristal kullanılmasıdır. Burada kristal soğurmasının artırılması ile lazer performansının iyileşeceği öngörülmüştür. Kullandığımız kristalin 1064 nm dalgaboyundaki soğurması Şekil 5.3(b) verisi kullanılarak %38 olarak hesaplanmıştır. Bu önermenin incelenmesi için görece daha

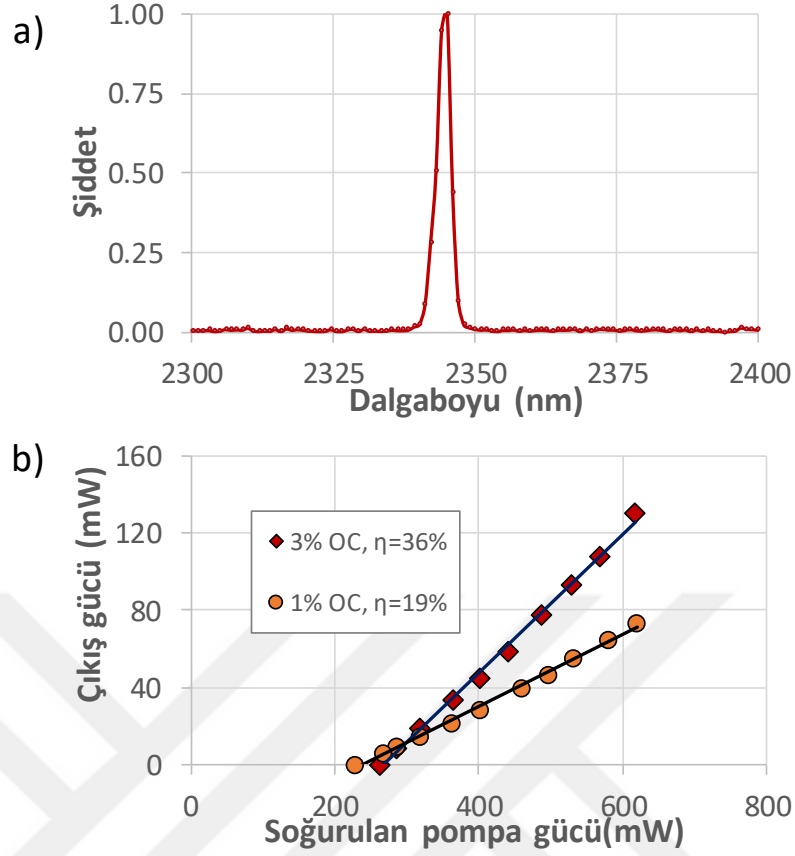
uzun bir kristal olan 2.8 mm uzunluğuna sahip %8 atomik Tm^{3+} katkılı KY_3F_{10} kristali ile 1064 nm üst çevrim pompalı 2.3 μm lazeri kurulmuştur. Şekil 5.9, kullanılan deneysel düzeneği göstermektedir. Bu deneyde bakır kristal tutucusunun x-kavite formunda HR kolunu bloklamaması nedeniyle z-kavite lazer mimarisi tercih edilmiştir. Burada 1064 nm dalgaboyundaki Yb fiber lazeri, 2.8 mm uzunluğunda Brewster açısında yerleştirilen $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin içerisine 100 mm odak uzunluğuna sahip bir lens ile odaklanmıştır. Ardından 2.3 μm dalgaboyunda yüksek yansıtıcılığı olan, 75 mm eğrilik yarıçapına sahip çukur aynalar ile beraber bir düz HR ve bir düz OC ile kavite tamamlanmıştır.



Şekil 5.9 : Z kovuk mimarisinde 2.8 mm uzunluğuna sahip %8 atomik katkılı KY_3F_{10} kristali ile 1064 nm üst çevrim pompalı 2.3 μm lazeri deney düzeneği.

Deneysel düzeneğin kurulumunun ardından lazer performansının incelenmesi amacıyla optik spektrum verisi ve güç verim eğrisi ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde kurulan lazerin dalgaboyu 2345 nm olarak kaydedilmiştir. Bununla beraber soğurulan güce göre lazer verimi ise %3 OC için %36 ve %1 OC için %19 olarak bulunmuştur (Şekil 5.10).

Yapılan bu ölçümle, görece uzun bir kristalle, daha yüksek soğurma yüzdesi elde edilmesi sayesinde lazer çalışma performansında iyileşme gözlenmiştir.



Şekil 5.10 : Z kovuk mimarisinde 2.8 mm uzunluğuna sahip %8 atomik katkılı KY_3F_{10} kristali ile 1064 nm üst çevrim pompalı 2.3 μm lazeri karakterizasyonu. (a) Optik spektrum ölçümü, (b) lazer güç verim eğrisi.

5.5 Üst Çevrim Popalı $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ Lazerinin 1.9 μm Dalgaboyunda Çalıştırılması

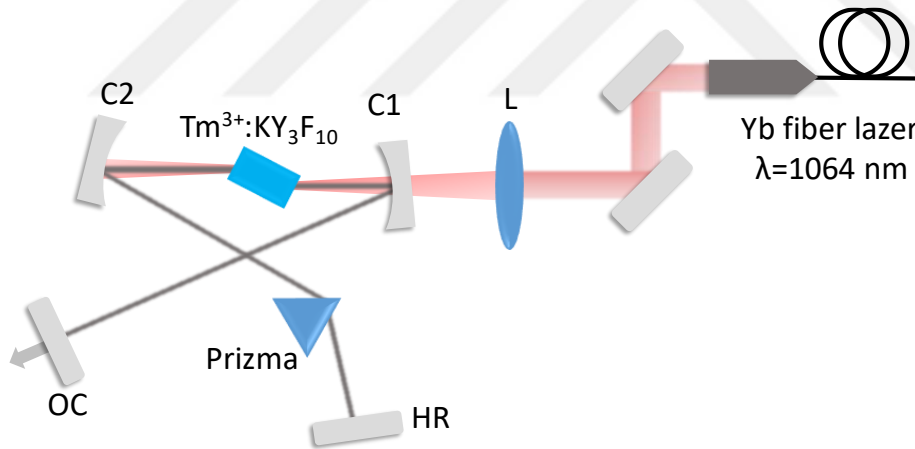
5.5.1 Giriş

Tm^{3+} iyonları 2.3 μm dalgaboyunda çalışan lazerlerin yanı sıra 2 μm civarında çalışan lazerlerin de geliştirilmesinde sıklıkla kullanılan nadir toprak elementlerindendir. Hem 2 μm hem de 2.3 μm civarında çalışam Tm^{3+} lazerler, cam [76, 84, 85], kristal [48, 75, 77, 79, 86-89], seramik [90-92] gibi bir konak malzemede doku tedavileri [93], foto akustik iletişim [94], vibrasyonel spektroskopisi [95] ve lineer olmayan optik [96] gibi uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Bunlara ek olarak, düşük fonon enerjileri ve geniş bir spektral bölgede yüksek geçirgenlikleri sayesinde florür tabanlı kristaller de Tm^{3+} iyonu katkılanarak lazer tasarımlarında aktif olarak kullanılmaktadırlar. Tm^{3+} katkılı potasyum yitrium florür (KY_3F_{10}) kristalinin 2.3 μm dalgaboyuna karşılık gelen $^3H_4-^3H_5$ ve 2 μm dalgaboyuna karşılık gelen $^3F_4-^3H_6$ geçişiyle eldilen lazerlerin uyarımında, konvansiyonel pompa kaynağı olarak 800 nm dalgaboyunda çıkışı olan

lazerlerin kullanımı raporlanmıştır [75, 79, 83, 97]. Ayrıca tez çalışmasının bir önceki bölümünde anlatıldığı üzere, florür tabanlı bir lazer aktif ortamı olan Tm^{3+} katkı potasyum yitrium florür (KY_3F_{10}) kristalinin 2.3 μm lazer operasyonu 1064 nm dalgaboyundaki Yb fiber ile üstçevrim pompalama mekanizması kullanılarak çalıştırılması sunulmuştur [98]. Bu bölümde ise aynı üst çevrim pompalama mekanizması kullanılarak $^3\text{F}_4\text{-}^3\text{H}_6$ geçişiyle elde edilen 1.9 μm civarındaki lazer operasyonu ve karakterizasyonu anlatılmıştır. 1064 nm ile üst çevrim pompalama yöntemi sayesinde elde edilen lazer operasyonu enerji transfer mekanizması Şekil 5.1’de verilmiştir.

5.5.2 Üst çevrim pompa ile $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin 1.9 μm dalgaboyunda operasyonu ve karakterizasyonu

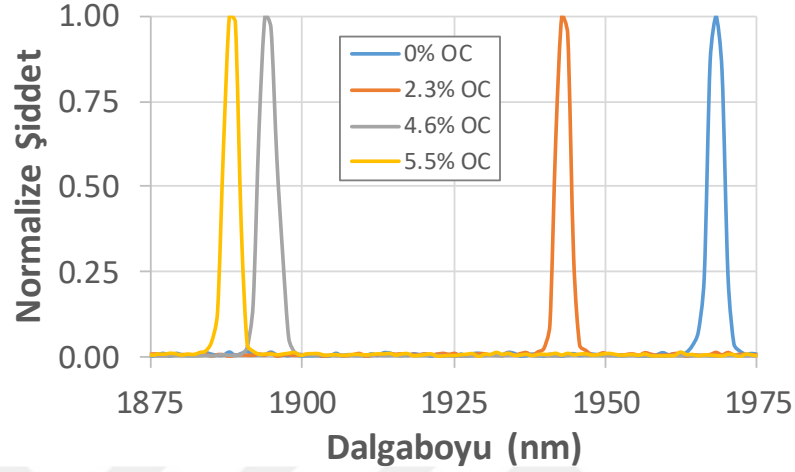
Bölüm 5.1 ve 5.2’de incelenen 1064 nm dalgaboyundaki doğrusal olmayan soğurma özellikleri verilmiş olan 2.8 mm uzunluğundaki %8 Tm^{3+} katkı KY_3F_{10} kristalinin, iterbiyum fiber lazerle üst çevrim pompalama yöntemi kullanılarak 1.9 μm ’de lazer operasyonunun sağlanması için Şekil 5.11’de verilen deneysel düzenek kurulmuştur.



Şekil 5.11 : 1064 nm’de pompalanan üst dönüşüm pompalı 1.9 μm civarında çalışan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri deney düzeneği.

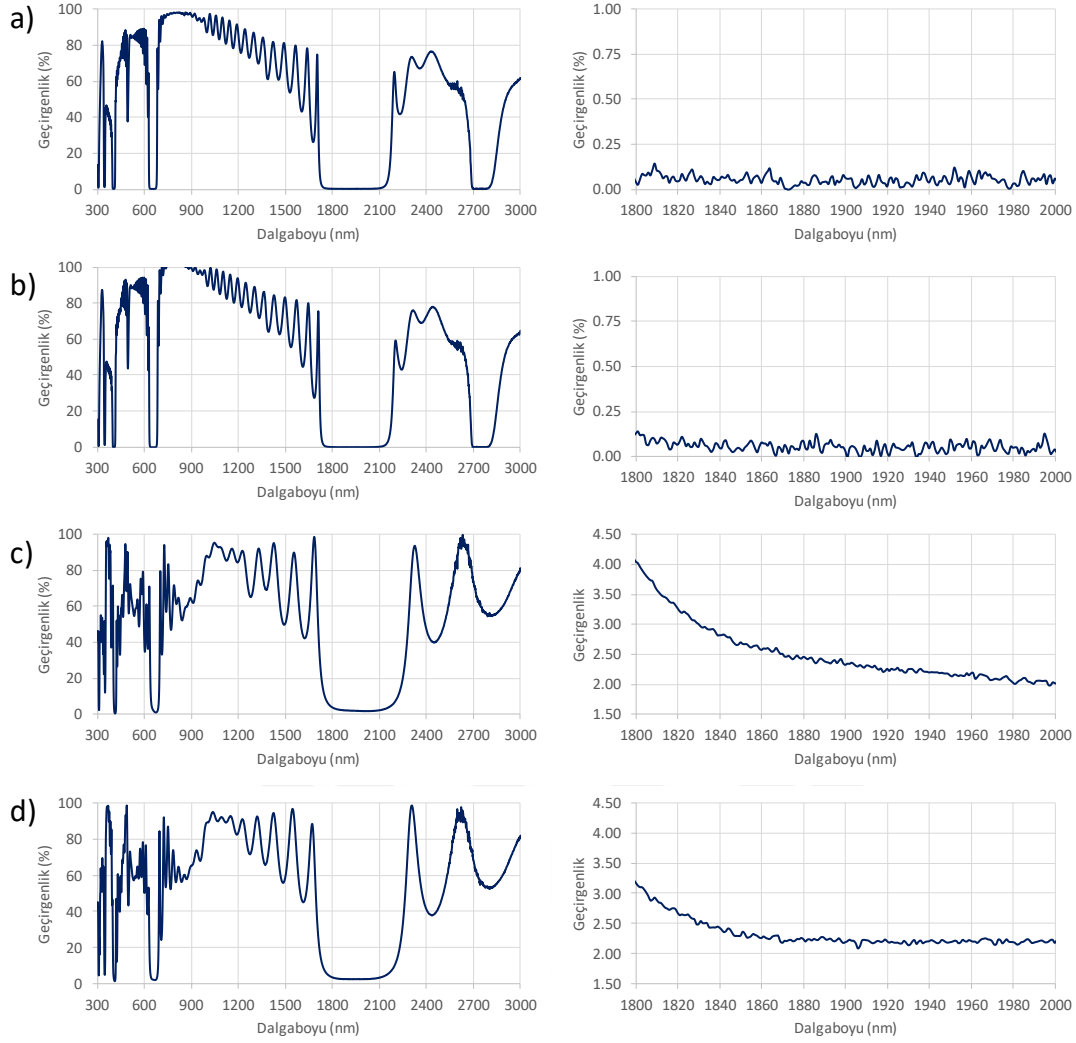
1064 nm merkez dalga boyuna sahip iterbiyum fiber lazeri 100 mm odak uzaklığına sahip bir yakınsak mercek (L), Brewster açısında yerleştirilen kristalin içerisine yerleştirilmiştir. Astigmatizmi dengelenmiş X-kavite tasarımına sahip lazer rezonatörünün oluşturulması için kristalin iki tarafına 100 mm eğrilik yarıçapına sahip 1800-2050 nm dalgaboyları arasında yüksek yansıtıcılığı olan aynalar yerleştirilmiştir. Aynı dalgaboylarında yüksek yansıtıcılığa sahip bir düz ayna ve OC kullanılarak rezonatör tamamlanmıştır. Deneylerde dört farklı geçirgenliğe sahip OC

kullanılmıştır. Kullanılan OC'ler lazerin çalışma dalga boyunda %0 (HR), %2.3, %4.6, ve %5.5 geçirgenliğe sahiptir. Yapılan deneylerde farklı OC geçirgenlik değerlerine karşılık 1.9 μm civarında farklı dalga boylarında lazer operasyonu gözlenmiştir. Bu farklı OC'lere ait lazer hüzmeleri spektrometre ile ölçülerek dalga boyları ölçülmüş ve Şekil 5.12'te verilmiştir.



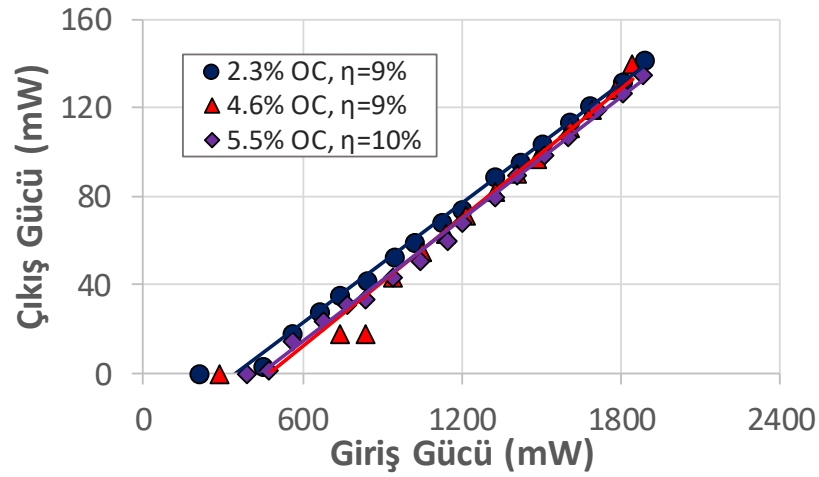
Şekil 5.12 : 1064 nm'de pompalanan üst dönüşüm pompalı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin farklı OC değerleri için çalışma dalga boyları.

Yapılan ölçüme göre %0, %2.3, %4.6, ve %5.5 geçirgenliklere sahip, 1064 nm'de pompalanan üst dönüşüm pompalı $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin çalışma dalga boyu sırasıyla 1968 nm, 1943 nm, 1894 nm ve 1889 nm olarak ölçülmüştür. Burada %0 geçirgenlik elde etmek için OC bir HR ile değiştirilmiştir ve %4.6 OC elde etmek için iki lazer koluna da %2.3 geçirgenliğe sahip OC konulmuştur. Kullanılan her bir OC, lazer operasyonunu farklı bir dalga boyunda sağladığı için bu OC'lerin geçirgenleri hassas bir spektroskopik ölçümle (Uv-Shimadzu - 3101pc) gerçekleştirilmiş ve Şekil 5.13'te verilmiştir.



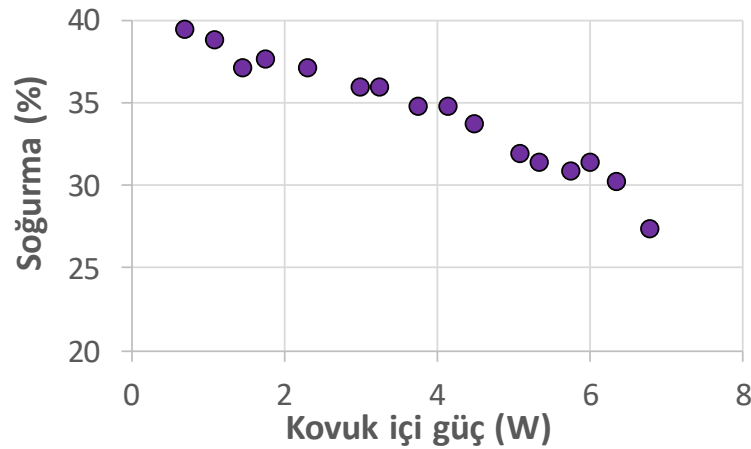
Şekil 5.13 : (a) 300-3000 nm aralığında (solda) ve 1800-2000 nm aralığında (sağda) kaydedilen OC geçirgenlikleri. (b) %0 geçirgenlik sağlamak için kullanılan iki HR'nin geçirgenlik spektrum ölçümü. (c) %2.3 geçirgenliğe sahip OC ile alınan geçirgenlik ölçümü. (d) %5.5 geçirgenliğe sahip OC ile alınan geçirgenlik ölçümü.

Optik spektrum ölçümünü takiben lazer güç performansı ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler sonucunda elde edilebilen en yüksek çıkış gücü %2.3 geçirgenliğe sahip OC ile 142 mW olarak kaydedilmiştir. Farklı OC değerleri kullanılarak elde edilen çıkış güçleri, giriş gücünün fonksiyonu olarak Şekil 5.14'te verilmiştir. Bu ölçümden görüldüğü üzere en yüksek güç verimi %5.5 geçirgenliğe sahip OC ile $\eta = \%10$ olarak ölçülmüştür. Diğer OC'ler olan %2.3 ve %4.6 geçirgenliklerde ise verim $\eta = \%9$ olarak kaydedilmiştir.



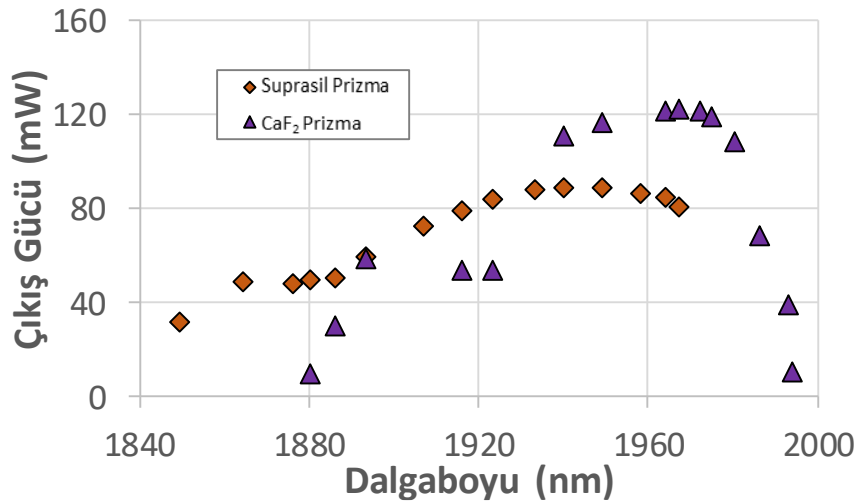
Şekil 5.14 : 1064 nm’de pompalanan üst dönüşüm pompalı $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ lazerinin çıkış gücünün farklı OC değerleri için giriş gücüne bağlı değişimi.

Şekil 5.14’te elde edilen verim değerleri farklı giriş güçlerine karşılık gelen çıkış güçlerinin ölçülmesiyle elde edilmiştir. Bu verim değerlerinin soğurulan pompalama gücüne göre hesaplanabilmesi için kristalin soğurmasını hesaba katmak gerekmektedir. Ancak bu soğurma değerlerinin belirlenmesi için, 1.9 μm ışımasının neden olduğu kavite içi gücün kristalin soğurmasına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu deneyde lazer çıkış gücü, kavite içi HR’nin kontrollü olarak optik hizasının bozulmasıyla azaltılmıştır. Bu çıkış güçlerine karşılık gelen soğurma değerlerinin hesaplanması için Şekil 5.11’te verilen C2 aynasından sonra geçen pompa-lazer hüzmesinin gücü ölçülmüştür. Yine aynı şekilde verilen L, C1 ve C2 optik elemanlarının pompa dalgaboyunda olan 1064 nm’de geçirgenlikleri hesaba katılarak farklı kavite içi güçlerdeki soğurması hesaplanmış ve Şekil 5.15’te verilmiştir.



Şekil 5.15 : $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ kristalinin 1.9 μm lazer çıkışı için 1064 nm’deki soğurmasının kavite içi gücüne göre değişimi.

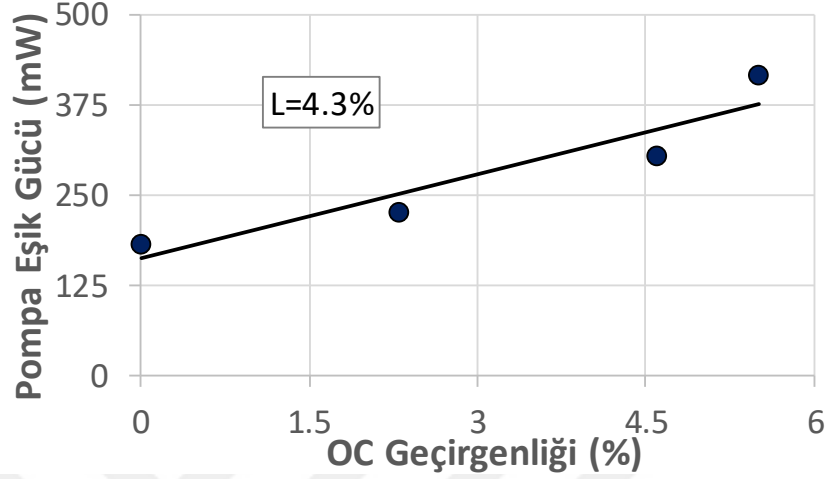
Şekil 5.15'ten görüleceği üzere 1.9 μm 'deki kovuk içi enerjisi arttıkça kristal soğurmasında azalma tespit edilmiştir ve kovuk içi gücüne göre soğurma değerlerinin %27 ile %39 arasında değiştiği gözlenmiştir. Kovuk içi gücüne göre kristalin 1064 nm dalgaboyundaki fotonların soğurulmasında görülen azalmanın nedeni, $^3\text{F}_4$ seviyesindeki popülasyonun 1.9 μm geçişi nedeniyle azalması ve uyarılı seviye soğurmasının verimini düşürmesidir. Bu nedenle 1064 nm'deki kristalin soğurma miktarı 1.9 μm ışımalarının şiddetiyle azalmaktadır. Elde edilen bu sonuç ile birlikte soğurulan pompa gücüne göre güç verimini hesaplayabilmek için etkin soğurma değeri hesaplanmıştır. Bu değer Şekil 5.15 ile verilen soğurma değerlerinin ortalaması alınarak %34 olarak hesaplanmıştır. Bu yaklaşım kullanılarak lazerin soğurulan pompa gücüne göre verimi, %4.6, %5.5 ve %2.3 OC değerleri için sırasıyla %29, %27 ve %26 olarak hesaplanmıştır. Bu verilerin yanında ayrıca 1064 nm'de üst dönüşüm ile pompalanan $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin $^3\text{F}_4-^3\text{H}_6$ seviyeler arası geçiştten elde edilir lazer operasyonunun dalgaboyu ayarlanabilirliği incelenmiştir. Bu deneyde lazerin HR koluna supresil ve CaF_2 prizmaları ayrı ayrı eklenerek dalgaboyu ayarlanabilirliği incelenmiş ve sonuçlar Şekil 5.16'da verilmiştir. Deney sonucunda suprasil prizma ile 1849 nm ile 1967 nm dalgaboyu aralığında, CaF_2 prizma ile ise 1880 nm ile 1994 nm aralığında dalgaboyu ayarlanabildiği gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : CaF_2 ve suprasil prizmalar kullanılarak dalgaboyu ayarlanabilen 1.9 μm civarındaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin akort eğrisi.

Bir diğer önemli kavite parametresi olan kovuk içi kayıplar farklı OC değerlerinde ölçülen pompa eşik güçleri kullanılarak Findley-Clay analizi ile %4.3 olarak hesaplanmıştır [10]. Elde edilen bu kayıp değeri yüzey yansımaları ve saçılmalarının yanı sıra seviyeler arası geçişlerde meydana gelen kuantum kusurlarından (kuantum

defect) kaynaklanmaktadır. Bununla beraber bu analiz yapılırken farklı OC değerlerinde elde edilen lazer ışınımının farklı dalgalıboylarında çalışması ihmal edilmiştir. Farklı OC değerleri ile elde edilen pompa eşik güçleri Şekil 5.17’de verilmiştir.



Şekil 5.17 : Pompa eşik gücünün OC geçirgenliğine bağlı değişimi.

5.6 Sonuç

Sonuç olarak, tezin bu bölümünde sunulan çalışma ile yaygın kullanıma sahip 1 μm dalgalıboyuna sahip Yb fiber lazerlerin $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin 2.3 μm ’deki operasyonunda üst dönüşüm pompa kaynağı olarak kullanılabildiği deneysel olarak gösterilmiştir. 2 mm uzunluğundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali ile kaydedilen deneysel sonuçlar, soğurulan pompa miktarı ele alındığında lazerin %32’lik bir verime sahip olduğunu göstermiştir. Bunlara ek olarak yaptığımız analizle, rezonatör kayıpları ve kuantum kusurları ihmal edildiğinde 1064 nm dalgalıboyunda soğurulan tüm fotonların neredeyse tamamının 2.3 μm ’de lazer fotonlarına çevrilebildiği sonucu çıkartılmıştır. Bununla beraber aynı katkılama özelliklerine sahip 2.8 mm uzunluğundaki $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristali ile yapılan deneylerde, kristalin boyunun arttırılması ile daha verimli lazer çalışma performansı sağlanabileceği gösterilmiştir. Görece uzun kristal ile yapılan çalışmalarda soğurma değerinin %38 civarında olduğu ve en yüksek %36 verim alınabildiği görülmüştür. Ayrıca Tm^{3+} iyonunun soğurma karakteristikleri ve kristal yapısı ele alınarak aynı sistemi daha yüksek bir verimle çalıştırmak için üst dönüşüm rezonans dalgalıboyu 1 μm civarında belirlenerek fiber Bragg kırınım ağırları sayesinde iterbiyum fiber lazer rezonans dalga boyunda çalışacak şekilde ayarlanabilir. Tez ile verilen 2.3 μm ’de çalışan bu lazer; spektroskopi [95], X-ışını

retimi [96] ve biyomedikal optik [93] gibi alanlarda kullanılarak bilimsel ve teknolojik gelişmelerde rol alabileceği öngörülmektedir.

zet olarak, bu çalışmada x-kavite lazer rezonatörü tasarımına sahip, 1064 nm ile üst dönüşüm pompalama yöntemiyle $Tm^{3+}:KY_3F_{10}$ kristalinin 3F_4 ve 3H_6 seviyeleri arasındaki geçiş kullanılarak, 1.9 μm dalga boyunda çalıştırılması gösterilmiştir. Geliştirilen lazerden %5.5 OC ile en yüksek 142 mW güç çıkışı elde edilmiş ve %5.5 OC ile soğurulan pompa gücüne göre en yüksek %29 güç verimi elde edilmiştir. Lazerin dalgaboyu ayarlanabilirliğinin incelenmesi için suprasil ve kalsiyum florür prizmalar HR koluna konumlandırılmıştır. Kullanılan prizmalar sayesinde 1849 nm ile 1994 nm aralığında lazer operasyonu elde edilmiştir. Geliştirilen lazerin su tarafından yüksek soğurma değerine sahip olması, 1.9 μm 'de geliştirilen bu lazerin biyomedikal optik, görüntüleme sistemleri gibi uygulamalarda kullanılmasının yanı sıra farklı lazer sistemlerinde pompa lazeri olarak kullanılması gibi potansiyel uygulama alanlarında kendisine yer bulması mümkündür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Lazerler, geliştirildikleri ilk günden itibaren hem hayatımızı kolaylaştıracak gelişmelerin önünü açmış hem de bilimsel problemlere alternatif çözümler üreterek evreni anlamamızda insanlığa ışık tutmuş cihazlardır. Thederore Maiman'ın geliştirdiği ilk lazer olan yakut lazerden günümüze kadar, binlerce farklı lazer tipi raporlanmış ve hala büyük bir ilgiyle özgün lazer tiplerinin geliştirilmesi için çalışmalar dünya çapında devam etmektedir. Lazerlerin geniş uygulama alanları göz önüne alındığında geleceğin teknolojisinin önemli bir parçası olarak günlük hayatımızda olduğu kadar gelişmiş teknolojik araçların bir parçası olarak da güncelliğini koruyacaktır. Bu bağlamda, lazerler ve lazer uygulamaları konusunda çalışan araştırmacıların ve mühendislerin atılan her bir adımda ve gösterilen ilerlemede ortaya koydukları çabalar fotonik alanındaki gelişmeleri dolayısıyla bilimde sağlanan önemli gelişmeleri tetiklemektedir. Yazılan bu tez ile özgün katıhal lazerlerin geliştirilmesi amacıyla deneysel çalışmalar yürütülmüştür. Bu amaç doğrultusunda, dört farklı çalışma yapılmıştır. İlk çalışmada, femtosaniye lazer ile mikro işleme yöntemiyle ilk kez üretilen zebra desenli grafen doyabilen soğurucu ultra kısa darbe üretiminde kip kilitleyici olarak kullanılmıştır. İkinci çalışmada femtosaniye lazer ile yazılmış $\text{Tm}^{3+}:\text{BaY}_2\text{F}_8$ dalga kılavuzu lazeri ilk kez çalıştırılmış ve karakterize edilmiştir. Üçüncü çalışmada, alternatif bir nanoparçacık üretim yöntemi olan femtosaniye lazerler ile CeO_2 nanoparçacıklarının üretimi sunulmuştur. Dördüncü ve son çalışmada ise $1\ \mu\text{m}$ civarında üst çevrim pompalama yöntemi ile $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazeri ilk defa $1.9\ \mu\text{m}$ ve $2.3\ \mu\text{m}$ dalgaboylarında çalıştırılması gösterilmiştir.

Bu tez çalışması sonucunda tek katmanlı grafen, femtosaniye lazer ile işlenerek kısmi olarak yüzeyden kaldırılmış ve elde edilen bu yapı ilk kez bir lazer kavitesi içerisinde kaybı ayarlanabilir bir kip kilitleyici olarak kullanılmıştır. Yapılan çalışmada kavite içerisindeki lazer hüzmelerinin karşılaştığı grafen miktarı azaltılarak kavite içi kayıpların düşürülmesi sağlanmıştır. Bu sayede tam turda %4.14 olarak hesaplanan grafen kaynaklı kayıplar %0.21'e indirilerek $\text{Cr}^{4+}:\text{forsterite}$ lazerinin çalışma performansı standart grafen doyabilen soğurucu ile karşılaştırıldığında neredeyse iki katına çıkmıştır. Bu sonuç, geniş bir spektral aralıkta çalışma imkanı sunan grafen

doyabilen soğurucunun sahip olduğu tek geçiş küçük sinyal soğurmasından (%2.3) kaynaklanan dezavantajı ortadan kaldırarak bu doyabilen soğurucunun düşük kazançla sahip lazer aktif ortamlarıyla da kullanılabileceğini göstermektedir. Kullanılan test lazeri olan Cr^{4+} :forsterite lazerinin çıkış gücü, 6.3 W sabit giriş gücünde, GSA için 68 mW olarak ölçülmüşken, ZeGSA için 114 mW olarak elde edilmiştir. Ayrıca bu iki doyabilen soğurucunun darbe süreleri karşılaştırıldığında GSA için en kısa 62 fs'de darbeler üretilebiliyorken, ZeGSA ile 48 fs darbe süresi elde edilmiştir. Darbe süresinin kısılması darbe tepe enerjisini artırdığından lazer performansını iyileştirmiştir. Elde edilen bu sonuç ile geliştirilen ZeGSA'nın geniş bir spektral bölgede kip kilitleyici olarak ultra kısa darbe üretiminde kullanımının mümkün olduğu kanısına varılmıştır. Bu cihazın farklı geometriler ile mikro işlemeye tabi tutularak yeni tipte grafen doyabilen soğurucuların geliştirilmesi olasıdır. Ayrıca kip kilitleme özelliklerinin fiziksel olarak modellenmesi ile hüzmünün ZeGSA üzerindeki pozisyon bağıllığı, modülasyon derinliği ve doyabilme şiddeti gibi parametrelerinin analitik olarak incelenmesi de bu alanda yapılabilecek potansiyel çalışmaları ve bilimsel problemleri de beraberinde getirmektedir. İlk defa bu tez kapsamındaki çalışmalarla geliştirilen ZeGSA cihazı deneysel ve teorik alanlarda geliştirilmeye açık bir fikir olarak literatüre kazandırılmıştır.

Yapılan ikinci çalışmada, femtosaniye lazer ile mikro işleme yöntemi kullanılarak ilk defa Tm^{3+} : BaY_2F_8 kristalinin içerisine dalga kılavuzu yazılmıştır. Ayrıca bir lazer aktif ortam olan Tm^{3+} : BaY_2F_8 kristaline yazılan dalga kılavuzları sayesinde, femtosaniye lazer ile yazılan ilk Tm^{3+} : BaY_2F_8 dalga kılavuzu lazeri bu tez ile gösterilmiştir. Üretilen dalga kılavuzu 1.9 μm dalga boyunda %2 ve %6 geçirgenliğe sahip OC'ler ile çalıştırılmıştır. Dalga kılavuzu lazeri 553 mW gücündeki 781 nm dalgaboyunda Ti:safir lazer ile pompalandığında elde edilen en yüksek çıkış gücü 34 mW olarak ölçülmüştür. Geliştirilen bu dalgakılavuzu kompakt boyutları ve düşük pompa eşik gücü (23 mW) ile küçük boyutlardaki diyot lazerlerle pompalanarak ufak boyutlardaki bir kutu içerisinde (örnek 5 cm x 5cm) 1.9 μm dalgaboyunda çalışan bir kızıl altı lazer kaynağı olarak kullanılabilir. Ayrıca düşük pompa eşik gücü kavite içi doyabilen soğurucu kayıplarını aşabilme potansiyeline sahiptir ve bu sayede Q-anahtarlamalı rejimde çalıştırılarak nanosaniye, pikosaniye mertebesinde darbeler üretebilmesi mümkün gözükmemektedir. Bu rejimde çalışan 1.9 μm dalgaboyundaki Tm^{3+} : BaY_2F_8

dalgakılavuzu lazeri su tarafından yüksek soğurmaya maruz kalacağından doku görüntüleme gibi medikal uygulamalarda kullanılma ihtimali vardır.

Femtosaniye lazer ile malzeme işlenmesi konusunda tezde sunulan önceki çalışmaların haricinde, özgün dielektrik özelliklere sahip olan CeO_2 malzemesi ile nanoparçacık üretimi tezde sunulmuştur. Bu kapsamda CeO_2 peleti izopropil alkol içerisinde sıkı odaklanmış femtosaniye lazer hüzmesine maruz bırakılarak yüzeyden koparma sağlanmış ve sıvı içerisinde nanoparçacıkların biriktiği gözlenmiştir. Üretilen nanoparçacıklar SEM mikroskobu kullanılarak görüntülenmiş ve parçacık boyutu ölçümleri yapılmıştır. Bu kapsamda yapılan ölçümlerde elde edilen en küçük CeO_2 nanoparçacığının 20 nm çapında olduğu görülmüştür. Ortalama parçacık boyutu 333 nm olarak belirlenmiştir. Otomotiv ve elektronik sektöründe uygulama alanları olan CeO_2 malzemesinin çevreci bir nanoparçacık sentezi yöntemi olan femtosaniye lazer ile izopropil alkol içerisinde üretimi bu tez çerçevesinde ilk kez gerçekleşmiştir. Üretilen nanoparçacık miktarı lazer frekansının, akı, yüzey ve sıvı arası yüksekliği gibi parametrelere bağlıdır. Daha fazla nanoparçacık üretimi için kimyasal çöktürme yöntemiyle de CeO_2 üretimi yapılmış ve karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Ayrıca Fe katkılı CeO_2 nanoparçacıklar da üretilmiş ve ticari olarak satın alınan CeO_2 tozunun dielektrik özellikleri ile karşılaştırılmıştır. Kimyasal yöntem ile üretilen CeO_2 ve Fe katkılı CeO_2 nanoparçacıkların pelet haline getirilmiş ve bu peletlerin X-ışını kırınım ölçümü ile yapısal karakterizasyonu yapılmıştır. Ayrıca CeO_2 ve Fe katkılı CeO_2 peletlerinin yüzey görüntüleri SEM ölçümü ile kaydedilmiştir. Yapılan EDX analizi ile hazırlanan peletlerde safsızlık olmadığı gözlenmiştir. Bu ölçümlere ek olarak, kimyasal yolla üretilen CeO_2 peletlerin dielektrik katsayısı incelenmiş ve literatür ile uyumlu bulunmuştur. İzopropil alkol içinde lazer kopartma yöntemi ile üretilen nanoparçacıkların miktarı dielektrik ölçümlerin yapılması için pelet hazırlamaya uygun olmamıştır.

Tez çalışmasının bir diğer önemli sonucu ise yaygın kullanımı olan 1 μm civarında çalışan iterbiyum fiber lazerin üst çevrim pompa kaynağı olarak $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ lazerinin 1.9 μm ve 2.3 μm dalgaboylarındaki lazer operasyonunda ilk kez kullanılmasıdır. Yapılan deneylerde 1.9 μm dalgaboyunda 1.9 W giriş gücünde en yüksek 142 mW çıkış gücü elde edilirken, 2.3 μm dalgaboyunda 1.6 W giriş gücünde 130 mW çıkış gücü ölçülmüştür. 1.9 μm ve 2.3 μm dalgaboylarındaki lazer kaynakları deri aşındırma, foto-akustik iletişim, vibrasyonel spektroskopi ve harmonik üretimi

gibi araştırma alanlarında sıklıkla kullanılan lazerlerdir. Tez sonucunda geliştirilen bu lazerin bahsi geçen uygulama alanlarında kullanılması muhtemeldir. Ayrıca tez dahilinde yapılan deneylerde $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ kristalinin 1064 nm'deki soğurma davranışları incelendiğinde, tez dahilinde kullanılan kristallerden daha uzun kristal kullanılmasıyla daha yüksek soğurma yüzdeleri elde edilmesi mümkündür. Bu sayede Watt mertebesinde laser çıkış güçleri raporlanan üst çevrim pompalama yöntemiyle elde edilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] **Einstein, A.** (1917). On the Quantum Theory of Radiation, *Physikalische Zeitschrift*, 18, 121-8.
- [2] **Gordon, J. P., Zeiger, H. J. ve Townes, C. H.** (1955). The Maser New Type of Microwave Amplifier, Frequency Standard, and Spectrometer, *Physical Review*, 99, 1264-74.
- [3] **Maiman, T. H.** (1960). Stimulated Optical Radiation in Ruby, *Nature*, 187, 493-4.
- [4] **Svelto, O. ve Hanna, D. C.** (2010). *Properties of Laser Beams*. New York: Springer. 475-504 pp.
- [5] **Svelto, O. ve Hanna, D. C.** (2010). *Introductory Concepts*. New York: Springer. 1-15 pp.
- [6] **Sennaroglu, A.** (2010)). Photonics and laser engineering : principles, devices, and applications, *McGraw-Hill, New York*,
- [7] **Luo, Z. ve Huang, Y.** (2020). Physics of Solid-State Laser Materials, *Springer Series in Materials Science*,
- [8] **Svelto, O. ve Hanna, D. C.** (2010). *Transient Laser Behavior*. New York: Springer. 313-73 pp.
- [9] **Hargrove, L. E., Fork, R. L. ve Pollack, M. A.** (1964). Locking of He-Ne Laser Modes Induced by Synchronous Intracavity Modulation, *Applied Physics Letters*, 5, 4-5.
- [10] **Findlay, D. ve Clay, R. A.** (1966). The measurement of internal losses in 4-level lasers, *Physics Letters*, 20, 277-8.
- [11] **Sennaroglu, A.** (2019). Classification of power-degrading mechanisms in an optically pumped four-level laser: an analytical approach, *Journal of the Optical Society of America B*, 36, 2202-9.
- [12] **Diels, J.-C. ve Rudolph, W.** (2006). In *Ultrashort Laser Pulse Phenomena (Second Edition)*, pp. xvii-xxi. Burlington, Academic Press.
- [13] **Cihan, C., Kocabas, C., Demirbas, U. ve Sennaroglu, A.** (2018). Graphene mode-locked femtosecond Alexandrite laser, *Optics Letters*, 43, 3969-72.
- [14] **Cho, W. B., Kim, J. W., Lee, H. W., Bae, S., Hong, B. H., Choi, S. Y., ... Rotermund, F.** (2011). High-quality, large-area monolayer graphene for efficient bulk laser mode-locking near 1.25 μm , *Optics Letters*, 36, 4089-91.

- [15] **Pushkin, A. V., Migal, E. A., Tokita, S., Korostelin, Y. V. ve Potemkin, F. V.** (2020). Femtosecond graphene mode-locked Fe:ZnSe laser at 4.4 μm , *Optics Letters*, 45, 738-41.
- [16] **Novoselov, K. S., Fal'ko, V. I., Colombo, L., Gellert, P. R., Schwab, M. G. ve Kim, K.** (2012). A roadmap for graphene, *Nature*, 490, 192-200.
- [17] **Bonaccorso, F., Sun, Z., Hasan, T. ve Ferrari, A. C.** (2010). Graphene photonics and optoelectronics, *Nature Photonics*, 4, 611-22.
- [18] **Liu, H., Liu, Y. ve Zhu, D.** (2011). Chemical doping of graphene, *Journal of Materials Chemistry*, 21, 3335-45.
- [19] **Lee, C. C., Suzuki, S., Xie, W. ve Schibli, T. R.** (2012). Broadband graphene electro-optic modulators with sub-wavelength thickness, *Optics Express*, 20, 5264-9.
- [20] **Lee, C. C., Mohr, C., Bethge, J., Suzuki, S., Fermann, M. E., Hartl, I. ve Schibli, T. R.** (2012). Frequency comb stabilization with bandwidth beyond the limit of gain lifetime by an intracavity graphene electro-optic modulator, *Optics Letters*, 37, 3084-6.
- [21] **Baylam, I., Cizmeciyan, M. N., Kakenov, N., Kocabas, C. ve Sennaroglu, A.** (2019). Ultrafast spectroscopy of voltage reconfigurable graphene saturable absorbers in the visible and near infrared, *2D Materials*, 6, 035013.
- [22] **Baylam, I., Cizmeciyan, M. N., Ozharar, S., Polat, E. O., Kocabas, C. ve Sennaroglu, A.** (2014). Femtosecond pulse generation with voltage-controlled graphene saturable absorber, *Optics Letters*, 39, 5180-3.
- [23] **Baylam, I., Balci, O., Kakenov, N., Kocabas, C. ve Sennaroglu, A.** (2016). Graphene-gold supercapacitor as a voltage controlled saturable absorber for femtosecond pulse generation, *Optics Letters*, 41, 910-3.
- [24] **Baylam, I., Ozharar, S., Kakenov, N., Kocabas, C. ve Sennaroglu, A.** (2017). Femtosecond pulse generation from a Ti^{3+} :sapphire laser near 800 nm with voltage reconfigurable graphene saturable absorbers, *Optics Letters*, 42, 1404-7.
- [25] **Currie, M., Caldwell, J. D., Bezares, F. J., Robinson, J., Anderson, T., Chun, H. ve Tadjer, M.** (2011). Quantifying pulsed laser induced damage to graphene, *Applied Physics Letters*, 99, 211909.
- [26] **Zhang, W., Li, L., Wang, Z. B., Pena, A. A., Whitehead, D. J., Zhong, M. L., ... Zhu, H. W.** (2012). Ti:sapphire femtosecond laser direct micro-cutting and profiling of graphene, *Applied Physics A*, 109, 291-7.
- [27] **Kalita, G., Qi, L., Namba, Y., Wakita, K. ve Umeno, M.** (2011). Femtosecond laser induced micropatterning of graphene film, *Materials Letters*, 65, 1569-72.
- [28] **Sahin, R., Simsek, E. ve Akturk, S.** (2014). Nanoscale patterning of graphene through femtosecond laser ablation, *Applied Physics Letters*, 104, 053118.

- [29] **Vasquez, A., Samolis, P., Zeng, J. ve Sander, M. Y.** (2019). Micro-structuring, ablation, and defect generation in graphene with femtosecond pulses, *OSA Continuum*, 2, 2925-34.
- [30] **Morova, Y., Eun Bae, J., Rotermund, F. ve Sennaroglu, A.** (2020). Laser-micromachined zebra-patterned graphene as a mode locker with adjustable loss, *Optics Letters*, 45, 1826-9.
- [31] **Franks, J.** (1991). What is eye safe?, *Optics, Electro-Optics, and Laser Applications in Science and Engineering, Proc. SPIE 1419*, United States: Los Angeles, CA, April 1.
- [32] **Ha, L., Jaspan, M., Welford, D., Evers, M., Kositratna, G., Casper, M. J., ... Birngruber, R.** (2020). First Assessment of a Carbon Monoxide Laser and a Thulium Fiber Laser for Fractional Ablation of Skin, *Lasers in Surgery and Medicine*, 52, 788-98.
- [33] **Xia, S.-J.** (2009). Two-micron (thulium) laser resection of the prostate-tangerine technique: a new method for BPH treatment, *Asian journal of andrology*, 11, 277-81.
- [34] **Fried, N. M. ve Murray, K. E.** (2005). High-Power Thulium Fiber Laser Ablation of Urinary Tissues at 1.94 μm , *Journal of Endourology*, 19, 25-31.
- [35] **Mingareev, I., Shah, L., Richardson, M. ve Ramme, M.** (2018). In *Advances in Laser Materials Processing (Second Edition)*, ed. J Lawrence, pp. 541-70, Woodhead Publishing.
- [36] **Davis, K. M., Miura, K., Sugimoto, N. ve Hirao, K.** (1996). Writing waveguides in glass with a femtosecond laser, *Optics Letters*, 21, 1729-31.
- [37] **Gross, S. ve Withford, M. J.** (2015). Ultrafast-laser-inscribed 3D integrated photonics: challenges and emerging applications, *Nanophotonics*, 4, 332-52.
- [38] **Keldysh, L. V.** (1965). Ionization in the field of a strong electromagnetic wave, *Soviet Physics JETP*, 20, 1307.
- [39] **Osellame, R., Cerullo, G. ve Ramponi, R.** (2012). Femtosecond Laser Micromachining, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 123
- [40] **Sabapathy, T., Sivakumar, G., Ayiriveetil, A., Kar, A. K. ve Asokan, S.** (2012). Effect of Net-Fluence on waveguide formation in ultrafast laser inscribed chalcogenide glass. *International Conference on Fibre Optics and Photonics*, India: Chennai, December 9–12.
- [41] **Chen, F. ve Aldana, J. R. V.** (2014). Optical waveguides in crystalline dielectric materials produced by femtosecond-laser micromachining, *Laser & Photonics Reviews*, 8, 251-75.
- [42] **Pavlov, I., Tokel, O., Pavlova, S., Kadan, V., Makey, G., Turnali, A., ... Ilday, F. O.** (2017). Femtosecond laser written waveguides deep inside silicon, *Optics Letters*, 42, 3028-31.
- [43] **Hadden, J. P., Sotillo, B., Bharadwaj, V., Rampini, S., Bosia, F., Picollo, F., ... Eaton, S. M.** (2017). Bulk diamond optical waveguides fabricated

by focused femtosecond laser pulses, *Laser 3d Manufacturing Iv*, 10095

- [44] **Waeselmann, S. H., Ruter, C. E., Kip, D., Krznel, C. ve Huber, G.** (2017). Nd: sapphire channel waveguide laser, *Optical Materials Express*, 7, 2361-7.
- [45] **Morris, J., Stevenson, N. K., Bookey, H. T., Kar, A. K., Brown, C. T. A., Hopkins, J. M., ... Lagatsky, A. A.** (2017). 1.9 μm waveguide laser fabricated by ultrafast laser inscription in Tm:Lu₂O₃ ceramic, *Optics Express*, 25, 14910-7.
- [46] **Lancaster, A., Cook, G., McDaniel, S. A., Evans, J., Berry, P. A., Shephard, J. D. ve Kar, A. K.** (2015). Mid-infrared laser emission from Fe: ZnSe cladding waveguides, *Applied Physics Letters*, 107
- [47] **Tan, Y., Jia, Y. C., Chen, F., de Aldana, J. R. V. ve Jaque, D.** (2011). Simultaneous dual-wavelength lasers at 1064 and 1342 nm in femtosecond-laser-written Nd:YVO₄ channel waveguides, *Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics*, 28, 1607-10.
- [48] **Kifle, E., Loiko, P., Guillemot, L., Doualan, J.-L., Starecki, F., Braud, A., ... Camy, P.** (2020). Watt-level diode-pumped thulium lasers around 2.3 μm , *Applied Optics*, 59, 7530-9.
- [49] **Kifle, E., Loiko, P., de Aldana, J. R. V., Romero, C., Rodenas, A., Zakharov, V., ... Mateos, X.** (2019). Fs-laser-written thulium waveguide lasers Q-switched by graphene and MoS₂, *Optics Express*, 27, 8745-55.
- [50] **Kifle, E., Loiko, P., Romero, C., De Aldana, J. R. V., Rodenas, A., Zakharov, V., ... Mateos, X.** (2019). Femtosecond-laser-written Ho:KGd(WO₄)₂ waveguide laser at 2.1 μm , *Optics Letters*, 44, 1738-41.
- [51] **Kifle, E., Loiko, P., de Aldana, J. R. V., Romero, C., Rodenas, A., Choi, S. Y., ... Mateos, X.** (2018). Passively Q-switched femtosecond-laser-written thulium waveguide laser based on evanescent field interaction with carbon nanotubes, *Photonics Research*, 6, 971-80.
- [52] **Streltsov, A. M. ve Borrelli, N. F.** (2002). Study of femtosecond-laser-written waveguides in glasses, *Journal of the Optical Society of America B*, 19, 2496-504.
- [53] **Toncelli, A., Tonelli, M., Cassanho, A. ve Jenssen, H. P.** (1999). Spectroscopy and dynamic measurements of a Tm,Dy:BaY₂F₈ crystal, *Journal of Luminescence*, 82, 291-8.
- [54] **Muti, A., Baylam, I., Tonelli, M. ve Sennaroglu, A.** (2020). Tunable continuous-wave laser operation of Tm³⁺:BaY₂F₈ near 2.3 μm , *Optics Letters*, 45, 4104-7.
- [55] **Cornacchia, F., Toncelli, A. ve Tonelli, M.** (2009). 2- μm lasers with fluoride crystals: Research and development, *Progress in Quantum Electronics*, 33, 61-109.
- [56] **Cornacchia, F., Parisi, D., Bernardini, C., Toncelli, A. ve Tonelli, M.** (2004). Efficient, diode-pumped Tm³⁺:BaY₂F₈ vibronic laser, *Optics Express*, 12, 1982-9.

- [57] Coluccelli, N., Galzerano, G., Laporta, P., Parisi, D., Toncelli, A. ve Tonelli, M. (2006). Room-temperature Q-switched Tm:BaY₂F₈ laser pumped by CW diode laser, *Optics Express*, 14, 1518-23.
- [58] Zamiri, R., Abbastabar Ahangar, H., Kaushal, A., Zakaria, A., Zamiri, G., Tobaldi, D. ve Ferreira, J. M. F. (2015). Dielectrical Properties of CeO₂ Nanoparticles at Different Temperatures, *PLOS ONE*, 10, e0122989.
- [59] Rangel, R., Mercado, G. J. L., Bartolo-Pérez, P. ve García, R. (2012). Nanostructured-[CeO₂, La₂O₃, C]/TiO₂ Catalysts for Lignin Photodegradation, *Science of Advanced Materials*, 4, 573-8.
- [60] Rahemi, N., Haghighi, M., Babaluo, A. A., Jafari, M. F. ve Estifae, P. (2013). CO₂ reforming of CH₄ over CeO₂-doped Ni/Al₂O₃ nanocatalyst treated by non-thermal plasma, *J Nanosci Nanotechnol*, 13, 4896-908.
- [61] Cheng, G., Xiong, J. ve Stadler, F. J. (2013). A facile polyol-mediated approach to tunable CeO₂ microcrystals and their photocatalytic activity, *Powder Technology*, 249, 89-94.
- [62] Zhu, Y., Quan, X., Chen, F., Fan, X. ve Feng, Y. (2012). CeO₂/TiO₂ Coated Ceramic Membrane with Catalytic Ozonation Capability for Treatment of Tetracycline in Drinking Water, *Science of Advanced Materials*, 4, 1191-9.
- [63] Rodriguez, J. A., Wang, X., Liu, P., Wen, W., Hanson, J. C., Hrbek, J., ... Evans, J. (2007). Gold nanoparticles on ceria: importance of O vacancies in the activation of gold, *Topics in Catalysis*, 44, 73-81.
- [64] Zhang, T. S., Ma, J., Luo, L. H. ve Chan, S. H. (2006). Preparation and properties of dense Ce_{0.9}Gd_{0.1}O_{2-δ} ceramics for use as electrolytes in IT-SOFCs, *Journal of Alloys and Compounds*, 422, 46-52.
- [65] Sundaresan, A., Bhargavi, R., Rangarajan, N., Siddesh, U. ve Rao, C. N. R. (2006). Ferromagnetism as a universal feature of nanoparticles of the otherwise nonmagnetic oxides, *Physical Review B*, 74, 161306.
- [66] Ge, M. Y., Wang, H., Liu, E. Z., Liu, J. F., Jiang, J. Z., Li, Y. K., ... Li, H. Y. (2008). On the origin of ferromagnetism in CeO₂ nanocubes, *Applied Physics Letters*, 93, 062505.
- [67] Tiwari, A., Bhosle, V. M., Ramachandran, S., Sudhakar, N., Narayan, J., Budak, S. ve Gupta, A. (2006). Ferromagnetism in Co doped CeO₂: Observation of a giant magnetic moment with a high Curie temperature, *Applied Physics Letters*, 88, 142511.
- [68] Xu, H. F. ve Li, H. (2015). The effect of CO-doped on the room-temperature ferromagnetism of CeO₂ nanorods, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 377, 272-5.
- [69] Wu, T. S., Li, H. D., Chen, Y. W., Chen, S. F., Su, Y. S., Chu, C. H., ... Soo, Y. L. (2015). Unconventional interplay between heterovalent dopant elements: Switch-and-modulator band-gap engineering in (Y, Co)-Codoped CeO₂ nanocrystals, *Scientific Reports*, 5, 15415.

- [70] **Kumar, S., Kim, Y. J., Koo, B. H. ve Lee, C. G.** (2010). Structural and magnetic properties of Ni doped CeO₂ nanoparticles, *J Nanosci Nanotechnol*, 10, 7204-7.
- [71] **Bear, J. C., McNaughter, P. D., Southern, P., O'Brien, P. ve Dunnill, C. W.** (2015). Nickel-Doped Ceria Nanoparticles: The Effect of Annealing on Room Temperature Ferromagnetism, *Crystals*, 5, 312-26.
- [72] **Qi-Ye, W., Huai-Wu, Z., Qing-Hui, Y., Sheng, L., De-Gang, X. ve Jian-Quan, Y.** (2009). Fe-Doped Polycrystalline CeO₂ as Terahertz Optical Material, *Chinese Physics Letters*, 26, 047803.
- [73] **Kumar, P., Chand, F., Kumar, P., Meena, R. C., Kumar, A. ve Asokan, K.** (2016). Structural and dielectric properties of Cu doped CeO₂, *AIP Conference Proceedings*, 1728, 020299.
- [74] **Ruiz-Trejo, E., Benitez-Rico, A., Gomez-Reynoso, S. ve Angeles-Rosas, M.** (2007). Nanoparticles and nanograin-sized Y-doped CeO₂ ceramics, *Journal of the Electrochemical Society*, 154, A258-A62.
- [75] **Muti, A., Tonelli, M., Petrov, V. ve Sennaroglu, A.** (2019). Continuous-wave mid-infrared laser operation of Tm³⁺:KY₃F₁₀ at 2.3 μ m, *Opt Lett*, 44, 3242-5.
- [76] **Denker, B., Dorofeev, V., Galagan, B., Korostelin, Y., Kozlovsky, V., Motorin, S. ve Sverchkov, S.** (2018). Short pulse formation in a 2.3 μ m Tm-doped tellurite glass laser by an Fe²⁺:ZnS saturable absorber, *Laser Physics Letters*, 15, 105801.
- [77] **Muti, A., Baylam, I., Tonelli, M. ve Sennaroglu, A.** (2020). Tunable continuous-wave laser operation of Tm³⁺:BaY₂F₈ near 2.3 μ m, *Optics Letters*, 45, 4104-7.
- [78] **Yorulmaz, I. ve Sennaroglu, A.** (2018). Low-Threshold Diode-Pumped 2.3 μ m Tm³⁺:YLF Lasers, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24, 1-7.
- [79] **Guillemot, L., Loiko, P., Soulard, R., Braud, A., Doualan, J.-L., Hideur, A. ve Camy, P.** (2020). Close look on cubic Tm:KY₃F₁₀ crystal for highly efficient lasing on the ³H₄ $\rightarrow$ ³H₅ transition, *Optics Express*, 28, 3451-63.
- [80] **Guillemot, L., Loiko, P., Soulard, R., Braud, A., Doualan, J.-L., Hideur, A., ... Camy, P.** (2019). Thulium laser at $\sim$ 2.3 μ m based on upconversion pumping, *Optics Letters*, 44, 4071-4.
- [81] **Guillemot, L., Loiko, P., Soulard, R., Braud, A., Doualan, J. L., Hideur, A., ... Camy, P.** (2019). Thulium laser at approximately 2.3 μ m based on upconversion pumping, *Opt Lett*, 44, 4071-4.
- [82] **Gao, D., Tian, D., Chong, B., Li, L. ve Zhang, X.** (2016). Spectral tuning via multi-phonon-assisted stokes and anti-stokes excitations in LaF₃: Tm³⁺ nanoparticles, *Journal of Alloys and Compounds*, 678, 212-8.
- [83] **Chen, M., Loiko, P., Serres, J. M., Veronesi, S., Tonelli, M., Aguiló, M., ... Mateos, X.** (2020). Fluorite-type Tm³⁺:KY₃F₁₀: A promising crystal for watt-level lasers at $\sim$ 1.9 μ m, *Journal of Alloys and Compounds*, 813, 152176.

- [84] **Richards, B., Jha, A., Tsang, Y., Binks, D., Lousteau, J., Fusari, F., ... Sibbett, W.** (2010). Tellurite glass lasers operating close to $2\mu\text{m}$, *Laser Physics Letters*, 7, 177-93.
- [85] **Jackson, S. D. ve King, T. A.** (1998). High-power diode-cladding-pumped Tm-doped silica fiber laser, *Optics Letters*, 23, 1462-4.
- [86] **Stevenson, N. K., Brown, C. T. A., Hopkins, J. M., Dawson, M. D., Kränkel, C. ve Lagatsky, A. A.** (2018). Diode-pumped femtosecond Tm³⁺-doped LuScO₃ laser near $2.1\mu\text{m}$, *Optics Letters*, 43, 1287-90.
- [87] **Muti, A., Canbaz, F., Tonelli, M., Eun Bae, J., Rotermund, F., Petrov, V. ve Sennaroglu, A.** (2020). Graphene mode-locked operation of Tm³⁺:YLiF₄ and Tm³⁺:KY₃F₁₀ lasers near $2.3\mu\text{m}$, *Optics Letters*, 45, 656-9.
- [88] **Guillemot, L., Loiko, P., Braud, A., Doualan, J.-L., Hideur, A., Koselja, M., ... ve Camy, P.** (2019). Continuous-wave Tm:YAlO₃ laser at $2.3\mu\text{m}$, *Optics Letters*, 44, 5077-80.
- [89] **Loiko, P., Kifle, E., Guillemot, L., Doualan, J.-L., Starecki, F., Braud, A., ... Camy, P.** (2021). Highly efficient $2.3\mu\text{m}$ thulium lasers based on a high-phonon-energy crystal: evidence of vibronic-assisted emissions, *Journal of the Optical Society of America B*, 38, 482-95.
- [90] **Baylam, I., Canbaz, F. ve Sennaroglu, A.** (2018). Dual-Wavelength Temporal Dynamics of a Gain-Switched $2\mu\text{m}$ Tm³⁺:Lu₂O₃ Ceramic Laser, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24, 1-8.
- [91] **Ueda, K., Bisson, J. F., Yagi, H., Takaichi, K., Shirakawa, A., Yanagitani, T. ve Kaminskii, A. A.** (2005). Scalable ceramic lasers, *Laser Physics*, 15, 927-38.
- [92] **Antipov, O. L., Novikov, A. A., Zakharov, N. G. ve Zinoviev, A. P.** (2012). Optical properties and efficient laser oscillation at 2066 nm of novel Tm:Lu₂O₃ ceramics, *Optical Materials Express*, 2, 183-9.
- [93] **Ha, L., Jaspán, M., Welford, D., Evers, M., Kositratna, G., Casper, M. J., ... Birngruber, R.** (2020). First Assessment of a Carbon Monoxide Laser and a Thulium Fiber Laser for Fractional Ablation of Skin, 52, 788-98.
- [94] **Sullenberger, R. M., Kaushik, S. ve Wynn, C. M.** (2019). Photoacoustic communications: delivering audible signals via absorption of light by atmospheric H₂O, *Optics Letters*, 44, 622-5.
- [95] **Lanin, A. A., Voronin, A. A., Fedotov, A. B. ve Zheltikov, A. M.** (2014). Time-domain spectroscopy in the mid-infrared, *Scientific Reports*, 4, 6670.
- [96] **Chang, Z., Rundquist, A., Wang, H., Murnane, M. M. ve Kapteyn, H. C.** (1997). Generation of Coherent Soft X Rays at 2.7 nm Using High Harmonics, *Physical Review Letters*, 79, 2967-70.
- [97] **Braud, A., Tigreat, P. Y., Doualan, J. L. ve Moncorgé, R.** (2001). Spectroscopy and cw operation of a $1.85\mu\text{m}$ Tm:KY₃F₁₀ laser, *Applied Physics B*, 72, 909-12.

- [98] **Morova, Y., Tonelli, M., Petrov, V. ve Sennaroglu, A.** (2020). Upconversion pumping of a 2.3 μm $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ laser with a 1064 nm ytterbium fiber laser, *Optics Letters*, 45, 931-4.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yağız Morova

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Kocaeli Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik
- **Yüksek Lisans** : 2015, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fizik Mühendisliği
Anabilim Dalı, Fizik Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2018-2021 – Araştırma Görevlisi, İTÜ Fizik Mühendisliği Bölümü
- 2017-2021 – Ziyaretçi Araştırmacı, Koç Üniversitesi, Lazer Araştırma Laboratuvarı

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Morova Y.**, Bae J. E., Rotermund F., and Sennaroglu A. 2020. Laser-micromachined zebra-patterned graphene as a mode locker with adjustable loss, *Optics Letters* 45, 1826-1829.
- **Morova Y.**, Tonelli M., Petrov V., and Sennaroglu A. 2020. Upconversion pumping of a 2.3 μm $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ laser with a 1064 nm ytterbium fiber laser *Optics Letters* 45, 931-934
- **Morova Y.**, Serin O., Bae J. E., Rotermund F., and Sennaroglu A. 2020. Femtosecond Pulse Generation Using Laser Written Zebra Patterned Graphene with Adjustable Loss," in *Laser Congress 2020* (ASSL, LAC), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020), paper JTh2A.28.
- **Morova Y.**, Tonelli M., Petrov V., and Sennaroglu A. 2020. Tunable Continuous-Wave 2.3- μm $\text{Tm}^{3+}:\text{KY}_3\text{F}_{10}$ Laser Upconversion Pumped with an Ytterbium Fiber Laser. in *Laser Congress 2020* (ASSL, LAC), OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2020), paper ATu2A.4.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- Rashid Z., Coskun U. C., **Morova Y.**, Morova B., Bozkurt A. A., Erten A., Jonas A., and Kiraz A., 2017. Guiding of emulsion droplets in microfluidic chips along shallow tracks defined by laser ablation, *Microfluidics and Nanofluidics*, 21, 160.
- Yalizay B., **Morova Y.**, Dincer K., Ozbakir Y., Jonas A., Erkey C., Kiraz A., Akturk S. 2015. Versatile liquid-core optofluidic waveguides fabricated in hydrophobic silica aerogels by femtosecond-laser ablation, *Optical Materials*, 47, 478-483.
- Sahin R., **Morova Y.**, Simsek E., Akturk S. 2013. Bessel-beam-written nanoslit arrays and characterization of their optical response, *Applied Physics Letters* 102, 193106.
- Rashid Z., Coskun U. C., **Morova Y.**, Morova B., Bozkurt A. A., Erten A. C., Jonas A., Akturk S., Kiraz A., 2017. Femtosecond Laser Ablated Tracks on Smart Surfaces for Droplet Manipulation Applications,"Proc. IEEE, 21st National Biomedical Engineering Meeting (BIYOMUT).
- Yalizay B., **Morova Y.**, Ozbakir Y., Jonas A., Erkey C., Kiraz A. Akturk S. 2015. Optofluidic waveguides written in hydrophobic silica aerogels with a femtosecond laser, "Proc. SPIE 9365, Integrated Optics: Devices, Materials, and Technologies XIX, 936518.
- Sahin R., **Morova Y.**, Simsek E. Akturk S. 2014. Electromagnetic wave propagation through and reflection from metal nano stripes fabricated with femtosecond laser ablation, USNC-URSI Radio Science Meeting (Joint with AP-S Symposium),Memphis, TN, pp. 129-129.
- **Morova Y.**, Yalizay B., Dincer K., Ozbakir Y., Jonas A., Erkey C., Kiraz A., Akturk S. 2015. Optofluidic Waveguides in Hydrophobic Aerogels Formed by Femtosecond Laser Ablation, "EOS conferences at the World of Photonics Congress, Munich.
- **Morova Y.**, Yalizay B. ve Akturk S. 2015. Femtosaniye Lazerlerde Uzay-Zaman Bağlantıları ve Malzeme İşlemede Etkileri 17. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı, Ankara.