

**Düşük İyon Katkılı, İyot-pompaı, Verimli ve Yüksek Güçlü Cr:LiCAF  
Lazer Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Karakterize Edilmesi**

**Program Kodu: 1001**

**Proje No: 119E264**

Proje Yürütücüsü:

**Dr. Yusuf ÖZTÜRK**

Araştırmacı(lar):

Doç. Dr. Ersen BAYATLI

Danışman(lar):

Prof. Dr. Ümit DEMİRBAŞ

Bursiyer(ler):

Serdar OKUYUCU

Zekican ERTÜRK

Muharrem KILINÇ

MART 2023

ANTALYA

## ÖNSÖZ

Bu rapor Antalya Bilim Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölümündeki Lazer Teknoloji Laboratuvarı bünyesinde yürütülen ve TÜBİTAK tarafından desteklenen EEEAG 119E2 numaralı " Düşük İyon Katkılı, İyot-pompaalı, Verimli ve Yüksek Güçlü Cr:LiCAF Lazer Sistemlerinin Geliştirilmesi ve Karakterize Edilmesi" başlıklı proje kapsamında yapılan çalışmaları içermektedir. Projeye desteklerinden dolayı TÜBİTAK EEEAG gurubuna, değerlendirci hakemlere, izleyici hakeme, TÜBİTAK çalışanlarına ve Üniversitemize teşekkür ederiz.

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iii
TABLolar DİZİNİ	vii
ÖZET	viii
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ VE ORTAK LİTERATÜR ÖZETİ	1
1.1 Ortak Literatür Özeti İçin Kaynaklar	13
2. GEREÇ VE YÖNTEM	19
2.1 Projede Kullanılan Malzemeler	27
2.2 Genel Kapsamlı Yazılım Araçlarının Geliştirilmesi	30
2.3 Lazer Diyotların Karakterizasyonu	42
2.4 Lazer Kristalinin Spektroskopik Özelliklerinin Karakterizasyonu	44
2.5 Sürekli Dalga (CW) Cr:LiCAF Güç Ölçeklemeleri	51
2.6 Çift-Kırılmalı Filtre Kullanımı ile Geniş Ölçüde Ayarlanabilir İki Renkli Cr:LiCAF Lazeri	56
2.7 Pasif Q-anahtarlamalı Cr:LiCAF Lazer	63
2.8 Pasif Q-anahtarlamalı Mod Kiplmeli Cr:LiSAF Lazer	69
2.9 Kavite kazanç ortamının termo-optik-mekanik incelemesi	73
2.10 BBO kristalleri kullanılarak ikincil harmonik elde edilmesi	89
2.10.1 402-535 nm Geniş Aralığında Ayarlanabilir, Frekansı İkiye Katlanmış Cr:LiSAF Lazeri	89
2.10.2 377-424 nm Geniş Aralığında Ayarlanabilir, Frekansı İkiye Katlanmış Cr:LiCAF Lazeri	94
3 BULGULAR VE TARTIŞMA	106
4 SONUÇ VE ÖNERİLER	110
5 PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR	113

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<b>ŞEKİL 1. 1 (A)</b> OPTİK GEÇİŞLERİ GÖSTEREN DÜŞÜK ALAN CR <sup>3+</sup> ENERJİ SEVİYELERİ <b>(B)</b> CR: LİCAF'IN TİPİK SOĞURMA VE EMİSYON SPEKTRUMLARI-----	4
<b>ŞEKİL 1. 2 (A)</b> PASİF MOD KİLİTLEME İÇİN TEMSİLİ ŞEMATİK LAZER KAVİTESİ <b>(B)</b> KAYIP VE DOYURULABİLİR KAZANÇ CİNSİNDEN ATMA OLUŞUMUNUN GÖSTERİMİ -----	8
<b>ŞEKİL 1. 3</b> KERR LENSİ ETKİSİ İLE KLM ELDE EDİLMESİ-----	10
<b>ŞEKİL 1. 4 (SOL)</b> CR:LİSAF LAZERLERİNDE KULLANILAN GMOC AYNASININ GEÇİRGENLİĞİNİN VE CR:LİSAF MALZEMESİNİN OPTİK KAZANCININ DALGABOYUYLA DEĞİŞİMİ. (ORTA VE SAĞ) CR:LİSAF LAZERİNDEN ELDE ETTİĞİMİZ 13-FS UZUNLUĞUNDA, 25 MW ORTALAMA GÜÇTEKİ (15 KW TEPE GÜCÜ) OPTİK DARBELERİN ÖLÇÜLMÜŞ OPTİK SPEKTRUMU VE DARBE UZUNLUĞU.-----	11
<b>ŞEKİL 2. 1</b> SÜREKLİ-DALGA MODUNDA ÇALIŞAN DALGABOYU DEĞİŞTİRİLEBİLİR (750-850 NM) DİYOT-POMPALI CR:LİCAF LAZER DÜZENEGİ-----	20
<b>ŞEKİL 2. 2(A)</b> TM:YAG KRİSTALİ İÇİNDE POMPA KAYNAĞININ İLERLEMESİ. <b>(B)</b> HESAPLANAN SICAKLIK DAĞILIMI. (SAG) SICAKLIK DAĞILIMINA BAĞLI OLARAK KIRILMA İNDEKSİNİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİNDEN (DN/DT) VE KRİSTAL YÜZEYLERİNİN SICAKLIKLA GENLEŞMESİNDEN KAYNAKLI OPTİK YOL DEĞİŞİMİ (OPD: OPTICAL PATH DIFFERENCE).-----	21
<b>ŞEKİL 2. 3</b> DALGABOYU DEĞİŞTİRİLEBİLİR SÜREKLİ DALGA MAVİ İŞİNİMİ ÜRETMEK İÇİN KULLANILACAK CR:LİCAF LAZER SİSTEMİ-----	23
<b>ŞEKİL 2. 4</b> SESAM'A AİT NONLİNEAR YANSIMANIN EMİCİ ÜZERİNDEKİ ATMA AKICILIĞININ FONKSİYONU OLARAK GÖSTERİLMESİ -----	25
<b>ŞEKİL 2. 5</b> LAZER KRİSTAL SPEKLERİ-----	29
<b>ŞEKİL 2. 6</b> FARKLI FİZİKSEL ÖZELLİKLERDEKİ CR:LİCAF KRİSTAL TEDARİK TALEBİ VE YURDIŞINDA ÜRETİLEN HAM KRİSTAL YAPILAR-----	30
<b>ŞEKİL 2. 7</b> DİYOT POMPALI KATI HAL LAZER SİSTEMİ-----	31
<b>ŞEKİL 2. 8</b> DÖRT SEVİYELİ BİR LAZER KAZANÇ ORTAMININ ENERJİ SEVİYESİ DİYAGRAMI. -----	31
<b>ŞEKİL 2. 9</b> 4 SEVİYELİ KATI HAL LAZER SİSTEMLERİNİN DİNAMİK CEVAPLARINI HESAPLAMAK ÜZERE OLUŞTURULMUŞ MATLAB GUI ANA ARAYÜZÜ. -----	33
<b>ŞEKİL 2. 10</b> LAZER PARAMETRELERİNİN TANIMLANARAK DENKLEM (2.5)'İN ÇÖZDÜRÜLDÜĞÜ MATLAB ARAYÜZÜ. -----	34
<b>ŞEKİL 2. 11</b> MALZEME OPTİK KARAKTERİSTİKLERİNİN VERİ SETİNDEN ÇEKİLEREK ÇİZDİRİLMESİNİ SAĞLAYAN MATLAB ARAYÜZÜ.-----	35
<b>ŞEKİL 2. 12</b> ÇEYREK-DALGA SOĞURUCU YAPILI 800NM CİVARINDA ÇALIŞAN SBR MALZEMENİN FİZİKSEL YAPISI (SOLDA) VE YANSIMA KARAKTERİSTİĞİ (SAĞDA).-----	36
<b>ŞEKİL 2. 13</b> 800NM CİVARINDA ÇALIŞAN SBR MALZEME ÖRNEĞİ İÇİN LUMERİCAL PROGRAMINDA FİZİKSEL YAPISININ OLUŞTURULMASI (SOLDA) VE YANSIMA KARAKTERİSTİĞİNİN ELDE EDİLMESİ (SAĞDA).-----	37
<b>ŞEKİL 2. 14</b> 800NM CİVARINDA ÇALIŞAN SBR MALZEME ÖRNEĞİ İÇİN MATLAB PROGRAMINDA FİZİKSEL YAPI MODELİ VE ELEKTRİK ALAN DAĞILIMI (SOLDA), YANSIMA KARAKTERİSTİĞİ (SAĞDA).-----	38
<b>ŞEKİL 2. 15</b> 800NM CİVARINDA ÇALIŞAN SBR MALZEME ÖRNEĞİ İÇİN COMSOL PROGRAMINDA YAPILAN ANALİZ SONUCU ELDE EDİLEN YANSIMA KARAKTERİSTİĞİ -----	39
<b>ŞEKİL 2. 16</b> İKİ ADET ÇOKLU-MOD DİYOT POMPALI CW CR:LİCAF KAVİTESİ-----	40
<b>ŞEKİL 2. 17</b> CW CR:LİCAF KAVİTESİNİN (ŞEKİL 2.16) REZONATOR PROGRAMINDA MODELLENMESİ-----	40
<b>ŞEKİL 2. 18</b> REZONATOR PROGRAMINDA İŞİN YARIÇAPININ KAVİTE EKSENİ BOYUNCA HESAPLANMASI (KIRMIZI: S DÜZLEMİ, YEŞİL: T DÜZLEMİ) -----	41
<b>ŞEKİL 2. 19</b> İŞİN OPTİĞİ ANALİZLERİNİN MATLAB PROGRAMINDA YAPILMASINDA KULLANILAN ABCD MATRİS TANIMLARINA BİR ÖRNEK (BRESTER AÇISINDA KONUMLANDIRILMIŞ KRİSTAL) -----	42
<b>ŞEKİL 2. 20</b> NEWPORT DİYOT TUTUCULARININ İÇ DEVRE KURULUMLARI VE USHIO HL63520HD DİYOTLARININ ÇALIŞMA TESTLERİ -----	43
<b>ŞEKİL 2. 21</b> ABU-LTL ENVANTERİNDEKİ LAZER DİYOTLARININ KARAKTERİSTİĞİ -----	43
<b>ŞEKİL 2. 22 (A)</b> 78 - 300 K VE <b>(B)</b> 300 - 618 K ARALIKLARI İÇİN KULLANILAN SICAKLIĞA BAĞLI FLORESAN ÖMRÜ ÖLÇÜM KURULUMLARININ BASİTLEŞTİRİLMİŞ ŞEMASI. (C) 78-618 K ARALIĞINDA 1 K ARTIŞLARLA ÖLÇÜLEN	

CR:LİCAF'IN FLORESAN BOZUNMA EĞRİLERİ (SICAKLIK RENK HARİTASI SAĞDA GÖSTERİLMEKTEDİR). İÇ GÖRSEL, DEWAR İÇİNDEKİ CR:LİCAF KRİSTALİNİ GÖSTERİR. ....	45
<b>ŞEKİL 2. 23</b> CR:LİCAF İÇİN FLORESAN ÖMRÜNÜN SICAKLIĞA ÖLÇÜLEN BAĞIMLILIĞI. KIRMIZI SEMBOLLER DENEYSEL OLARAK ÖLÇÜLEN VERİLERİ GÖSTERİRKEN, SİYAH ÇİZGİLER MOTT MODELİ KULLANILARAK ÖLÇÜLEN VERİLERE ANALİTİK FİTİ GÖSTERİR. FLÖRESAN ÖMRÜ İÇİN ANALİTİK TAHMİNLER, ALTIN RENKLİ KESİKLİ ÇİZGİLERLE TEMSİL EDİLİR VE KUANTUM VERİMLİLİĞİ KESİNTİSİZ YEŞİL ÇİZGİLER İLE ÇİZİLİR. ....	46
<b>ŞEKİL 2. 24</b> CR:LİCAF İÇİN SICAKLIĞA BAĞLI ECS ÖLÇÜM KURULUMLARININ BASİTLEŞTİRİLMİŞ ŞEMASI. (A) VE (B) KURULUMLARI SIRASIYLA KRİYOJENİK VE ODA/YÜKSEK SICAKLIK DENEYLERİ İÇİNDİR. ....	47
<b>ŞEKİL 2. 25 (A)</b> E  C VE (B) E⊥C POLARİZASYONLARI İÇİN 78-618 K ARALIĞINDA CR:LİCAF İÇİN SICAKLIK İLE ECS'NİN ÖLÇÜLEN DEĞİŞİMİ. ....	48
<b>ŞEKİL 2. 26</b> CR:LİCAF'IN E⊥C VE E  C POLARİZASYONLARINDA ÖLÇÜLEN SICAKLIĞA BAĞLI ECS ÖZELLİKLERİ: (A) 77 K VE 300 K'DE ECS, (B) LOGARİTMİK ÖLÇEKTE 78 K VE 300 K'DE NORMALİZE EDİLMİŞ EMİSYON SPEKTRUMLARI, (C) ECS TEPE DEĞERİNİN DEĞİŞİMİ, (D) 78-618 K ARALIĞINDA TEPE EMİSYON DALGA BOYU VE EMİSYON FWHM'İN SICAKLIK İLE DEĞİŞİMİ. ....	49
<b>ŞEKİL 2. 27</b> DÖRT ADET 1.8 W ÇIKIŞ GÜCÜNE SAHİP ÇOKMODLU DİYOTLARLA POMPALANAN DENEYSEL CR:LİCAF LAZER KAVİTESİ ŞEMASI. ....	51
<b>ŞEKİL 2. 28</b> DÖRT ADET ÇOK-MODLU DİYOTLA POMPALANAN, SÜREKLİ-DALGA 5 FARKLI CR:LİCAF (SIRASIYLA 10 MM, 12.5 MM, 15 MM (1), 15 MM (2) VE 20 MM) KAVİTESİNE AİT 6 FARKLI GEÇİRGENLİĞE (SIRASIYLA 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.7%, 1.6% VE 2.6%) SAHİP SAHİP ÇIKIŞ AYNASI İLE ALINMIŞ VERİM EĞRİLERİ. ....	53
<b>ŞEKİL 2. 29</b> DÖRT ADET ÇOK-MODLU DİYOTLA POMPALANAN, SÜREKLİ-DALGA CR:LİCAF KAVİTESİNE AİT 5 FARKLI CR:LİCAF KRİSTALİ 2.6% GEÇİRGENLİĞE SAHİP ÇIKIŞ AYNASI İLE ALINMIŞ VERİM EĞRİLERİ. ....	54
<b>ŞEKİL 2. 30</b> ŞEKİL 2.29. (A) 10 MM CR:LİCAF LAZERİ İÇİN FARKLI ÇIKIŞ GÜCLERİNDE ÖLÇÜLEN İŞİN M2 FAKTÖR GRAFİĞİ. (B) 2.3 AMPER DRIVER AKIMINDAKİ İŞİN ÇIKIŞ GÜCÜ M2 FAKTÖRÜ X EKSENİ İÇİN 8.6 VE Y EKSENİ İÇİN 1.2. (C) 10 MM CR:LİCAF LAZERİ İÇİN FARKLI POMPA AKIMLARINDAKİ İŞİN PROFİLİ. ....	55
<b>ŞEKİL 2. 31</b> LABORATUVARIMIZDA KURULAN 4 ADET ÇOK-MODLU DİYOTLA POMPALANAN SÜREKLİ DALGA CR:LİCAF LAZERİNİN BİR RESMİ. ....	55
<b>ŞEKİL 2. 32</b> PROJE KAPSAMINDA SATIN ALINAN FARKLI BOYLARDAKİ CR:LİCAF KRİSTALLERİ ....	56
<b>ŞEKİL 2. 33</b> PROJE KAPSAMINDA SATIN ALINAN CMOS KAMERA İLE LAZER İŞİNİN CR:LİCAF KRİSTALİ İÇERİSİNDEKİ GÖRÜNÜMÜ VE NORMAL KAMERA İLE ÇEKİLMİŞ GÖRÜNTÜSÜ. ....	56
<b>ŞEKİL 2. 34 (A)</b> 2 MM, 4 MM VE 8 MM FİLTRE KALINLIĞI İÇİN YÜZEY ÜSTÜ ( $\Sigma=90^\circ$ ) VE YÜZEY DIŞI ( $\Sigma=25^\circ$ ) KRİSTAL KUVARSA ÇİFT KIRILMALI FİLTRE PLAKALARININ 790 NM MERKEZ DALGA BOYUNDA HESAPLANMIŞ SERBEST SPEKTRAL ARALIĞI. (B) KUVARSA ÇİFT KIRILMALI FİLTRE PLAKASININ, PLAKA DÖNÜŞ AÇISININ (P) BİR FONKSİYONU OLARAK HESAPLANAN MODÜLASYON DERİNLİĞİ. HESAPLAMA DALIŞ AÇISININ ( $\Sigma$ ) FARKLI DEĞERLERİ İÇİN YAPILMIŞTIR. ....	57
<b>ŞEKİL 2. 35 (A)</b> BRF OPTİK EKSEN DALIŞ AÇISININ KARAKTERİZASYONU İÇİN KULLANILAN KURULUMUN ŞEMASI. (B) İKİ RENKLİ LAZER DENEYLERİNDE KULLANILAN DİYOT POMPALI CR:LİCAF LAZERİN ŞEMASI. SMD: TEK MODLU DİYOT, HR: YÜKSEK REFLEKTÖRLÜ AYNA, OC: ÇIKIŞ KUPLÖRÜ, BRF: ÇİFT KIRILMALI PLAKA, PBS: POLARİZE İŞİN AYIRICI KÜP, BD: İŞİN DÖKÜMÜ. ....	58
<b>ŞEKİL 2. 36</b> DALIŞ AÇILARI ( $\Sigma$ ) (A) $25^\circ$ VE (B) $90^\circ$ (B) OLAN FİLTRELER İÇİN $0-180^\circ$ ARALIĞINDA FİLTRE DÖNÜŞ AÇISININ BİR FONKSİYONU OLARAK 2 MM KALINLIĞINDA KRİSTAL KUVARSA ÇİFT KIRILMALI FİLTRELERİN İLETİM ÖZELLİĞİ. KIRMIZI NOKTALAR DENEYSEL OLARAK ÖLÇÜLEN VERİLERDİR, DÜZ MAVİ ÇİZGİLER İSE ÖLÇÜLEN VERİLERE EN UYGUN OLAN TEORİK HESAPLAMALARDIR. ....	60
<b>ŞEKİL 2. 37 (A)</b> ÖLÇÜLEN CW LAZER VERİMLİLİĞİ VE (B) %0,1-1 ARALIĞINDA İLETİMLERE SAHİP DÖRT FARKLI ÇIKIŞ AYNASI İLE SMD POMPALI CR:LİCAF LAZERİN DALGABOYU AYARLAMA PERFORMANSI. ....	60
<b>ŞEKİL 2. 38</b> $\Sigma=25^\circ$ DALIŞ AÇISINA SAHİP (A) 2 MM, (B) 4 MM VE (C) 8 MM KALINLIĞINDA YÜZEY DIŞI OPTİK EKSEN KRİSTAL KUVARSA BRF KULLANILARAK CR:LİCAF LAZERİN ÖLÇÜLEN İKİ RENKLİ LAZER SPEKTRUMU . ....	61
<b>ŞEKİL 2. 39</b> CR:LİCAF LAZERİN (A) 2 MM, (B) 4 MM (C) 8 MM VE (D) 16 MM KALINLIKTA YÜZEY ÜSTÜ OPTİK EKSEN KUVARSA BRF'Sİ VE DALIŞ AÇISI $\Sigma=90$ KULLANILARAK ÖLÇÜLEN İKİ RENKLİ LAZER SPEKTRUMU. ....	62
<b>ŞEKİL 2. 40</b> CW VE PASİF Q-ANAHTARLAMALI ÇALIŞMA MODLARI İÇİN KURULAN DENEY DÜZENEKLERİ. ....	64
<b>ŞEKİL 2. 41 (A)</b> %0,35 İLA %2,75 ARALIĞINDA İLETİME SAHİP DÖRT FARKLI OC İLE ALINAN SÜREKLİ DALGA CR:LİCAF LAZERİN GÜÇ VERİMLİLİĞİ VERİLERİ. (B) FARKLI DİYOT AKIMI VEYA POMPA GÜCÜ SEVİYELERİNDE %0,7 OC İLE LAZERİN ÖLÇÜLEN OPTİK SPEKTRUMU (1,1 A'DA 0,85 W, 2,3 A'DA 3,5 W)-----	65
<b>ŞEKİL 2. 42</b> Q-ANAHTARLAMALI ÇALIŞMA MODUNDA ELDE EDİLEN DARBELERİN FARKLI ZAMAN SKALALARINDA GÖSTERİMİ. ....	66

<b>ŞEKİL 2. 43</b> Q-ANAHTARLAMALI ÇALIŞMA MODUNDA DARBE KARAKTERİSTİKLERİNİN DEĞİŞEN GİRİŞ GÜCÜ VE ÇIKIŞ KUPLAJINA GÖRE DEĞİŞİMİ-----	67
<b>ŞEKİL 2. 44</b> FARKLI MERKEZİ FREKANSLARDA ALINAN CR:LİCAF LAZERİNDEN YAYILAN Q-ANAHTARLI ATMA DİZİSİNİN ÖRNEK RADYO FREKANSI SPEKTRUMU: <b>(A)</b> 4 MHZ'LİK BİR AÇIKLIK VE 100 HZ'LİK BİR ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİ İLE TABAN BANDINDA MERKEZLENMİŞ RF (YALNIZCA POZİTİF FREKANSLAR DAHA İYİ GÖRÜNÜRLÜK İÇİN GÖSTERİLMİŞTİR). <b>(B)</b> RF, 20 KHZ'LİK BİR ARALIK VE 10 HZ'LİK BİR ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİ İLE 31,8 KHZ CİVARINDA Q-ANAHTARLAMA FREKANSINDA MERKEZLENMİŞTİR. VERİLER, 3,13 W SOĞURULAN GÜÇTE 1 KATMANLI HR KAPLAMALI SBR İLE %0,35 OC KULLANILARAK ALINIRKEN, Q-ANAHTARLI CR:LİCAF LAZER ÇIKIŞ GÜCÜ 58 MW İDİ. DARBE GENİŞLİĞİ VE TEKRARLAMA FREKANSI SIRASIYLA 2,15 M S VE 31,8 KHZ İDİ.-----	67
<b>ŞEKİL 2. 45</b> Q-ANAHTARLAMALI ÇALIŞMA MODUNDA ELDE EDİLEN DARBELERİN FARKLI ZAMAN SKALALARINDA GÖSTERİMİ-----	68
<b>ŞEKİL 2. 46</b> CW VE PASİF Q-ANAHTARLAMALI MOD-KİPLEME ÇALIŞMA MODLARI İÇİN KURULAN DENEY DÜZENEGİ-----	69
<b>ŞEKİL 2. 47 (A)</b> SÜREKLİ DALGA VE Q ANAHTARLAMALI MOD KİLİTLİ (QML) REJİMLERDE CR:LİCAF LAZERİN ÖLÇÜLEN ETKİNLİĞİ. <b>(B)</b> EMİLEN POMPA GÜCÜ İLE Q-ANAHTARLI DARBELERİN TEKRARLAMA ORANININ ÖLÇÜLEN DEĞİŞİMİ. HER İKİ DURUMDA DA KARARLI VE KARARSIZ QML İŞLEM NOKTALARI GÖSTERİLİR. - 70	70
<b>ŞEKİL 2. 48</b> Q-ANAHTARLAMALI KİP-KİLİTLEME ÇALIŞMA MODUNDA ELDE EDİLEN DARBELERİN FARKLI ZAMAN SKALALARINDA GÖSTERİMİ.-----	72
<b>ŞEKİL 2. 49</b> FARKLI YAYILMA ARALIKLARINDA VE ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİ AYARLARINDA ALINAN, FARKLI MERKEZİ FREKANSLARDA CR:LİCAF LAZERDEN YAYILAN Q-ANAHTARLI MOD KİLİTLİ DARBE DİZİSİNİN RADYO FREKANSI SPEKTRUMU. <b>(A)</b> 3 MHZ'LİK ARALIK VE 500 HZ'LİK ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİ İLE TEMEL BANTTA MERKEZLENMİŞ RF. <b>(B)</b> RF, 10 KHZ ARALIK VE 100 HZ ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİ İLE 63,9 KHZ CİVARINDA Q-ANAHTARLAMA FREKANSINDA MERKEZLENMİŞTİR. <b>(C)</b> RF, 169.39 MHZ MOD KİLİTLEME FREKANSINDA, 1 MHZ ARALIKTA VE 100 HZ ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİNDE MERKEZLENMİŞTİR. <b>(D)</b> RF, 169.39 MHZ'LİK MOD KİLİTLEME FREKANSINDA, 40 KHZ'LİK BİR ARALIKTA VE 1 HZ'LİK ÇÖZÜNÜRLÜK BANT GENİŞLİĞİNDE MERKEZLENMİŞTİR.-----	73
<b>ŞEKİL 2. 50</b> CR:LİCAF KRİSTALİ VE BAKIR MALZEMEDEN YAPILMIŞ TUTUCUNUN COMSOL PROGRAMINDA MODELLENMESİ (SOLDA), CR:LİCAF KRİSTALİ ÜZERİNDE ÜRETİLEN ISININ KRİSTAL VE TUTUCU ÜZERİNDE SEBEP OLDUĞU SICAKLIK DAĞILIMININ ANALİZİ.-----	74
<b>ŞEKİL 2. 51</b> 4-SEVİYELİ KAZANÇ ORTAMINA AİT ENERJİ SEVİYELERİ VE GEÇİŞ MEKANİZMALARI-----	75
<b>ŞEKİL 2. 52</b> CR:ND:GSGG KRİSTALİNİN İLÜSTRASYONU-----	77
<b>ŞEKİL 2. 53</b> LEVHA GEOMETRİSİNDE İŞİNİMİN GAUSS DAĞILIMI-----	78
<b>ŞEKİL 2. 54</b> ABU-LTL'DE ÖNCEDEN KULLANILAN TUTUCU TASARIMI 1 <b>(B)</b> , ÇALIŞMA KAPSAMINDA YENİ TASARLANAN TUTUCU TASARIMI 2 <b>(A)</b> VE TUTUCU TASARIMI 2'NİN GENİŞLETİLMİŞ GÖRÜNÜMÜ <b>(C)</b> .-----	80
<b>ŞEKİL 2. 55</b> ISI ALIŞVERİŞİNİN BİTTİĞİ DENGİ KONUMUNDA KELVİN CİNSİNDEN GENEL SICAKLIK DAĞILIMLAR: TUTUCU TASARIMI- 2 SU AKIŞI İLE <b>(A)</b> , TUTUCU TASARIMI- 2 SU AKIŞSIZ <b>(B)</b> VE TUTUCU TASARIMI- 1 SU AKIŞI İLE <b>(C)</b> .-----	81
<b>ŞEKİL 2. 56</b> ISI ALIŞVERİŞİNİN BİTTİĞİ DENGİ KONUMUNDA KRİSTAL ÜZERİNDE KELVİN CİNSİNDEN GENEL İZOTERMAL KONTUR SICAKLIK DAĞILIMLARI: TUTUCU TASARIMI- 2 SU AKIŞI İLE <b>(A)</b> , TUTUCU TASARIMI- 2 SU AKIŞSIZ <b>(B)</b> VE TUTUCU TASARIMI- 1 SU AKIŞI İLE <b>(C)</b> -----	81
<b>ŞEKİL 2. 57</b> X-EKSENİNE GÖRE (Y=0, Z=0) ISI ALIŞVERİŞİNİN BİTTİĞİ DENGİ KONUMUNDA KRİSTAL ÜZERİNDE KELVİN CİNSİNDEN SICAKLIK DAĞILIMI GRAFİĞİ; TUTUCU TASARIMI- 2 VE SU AKIŞI İLE, TUTUCU TASARIMI- 2 VE SU AKIŞI OLMADAN, TUTUCU TASARIMI- 1 VE SU AKIŞI İLE, <b>(A)</b> X-EKSENİNE GÖRE (X=0, Y=0), <b>(B)</b> Y-EKSENİNE GÖRE (X=0, Z=0), <b>(C)</b> Z-EKSENİNE GÖRE (X=0,Y=0)-----	82
<b>ŞEKİL 2. 58</b> 15 MM CR:LİCAF KRİSTALİNİN 15 °C SOĞUTUCU SIVI AKIŞI ALTINDA 6 W GÜÇLE POMPALANMA DURUMDAKİ <b>A)</b> GENEL SICAKLIK DAĞILIMI <b>B)</b> KRİSTAL ÜZERİNDEKİ SICAKLIK DAĞILIMI <b>C)</b> KRİSTAL İÇERİSİNDEKİ ISININ YÜZEYSEL OLARAK YAYILIMI-----	84
<b>ŞEKİL 2. 59</b> 15 MM CR:LİCAF KRİSTALİ İÇİN, POMPA İŞİNİ BOYUNCA KRİSTAL İÇERİSİNDEKİ SICAKLIĞIN FARKLI GÜÇLERE GÖRE DEĞİŞİMİ-----	85
<b>ŞEKİL 2. 60</b> 15 MM CR:LİCAF KRİSTALİ İÇİN, POMPA İŞİNİ BOYUNCA KRİSTAL İÇERİSİNDEKİ MAKSİMUM SICAKLIĞIN 0-100 W ARALIĞINDAKİ DEĞİŞİMİ.-----	85

<b>ŞEKİL 2. 61</b> KRİSTAL İÇİ SICAKLIĞIN DENEYSSEL OLARAK BELİRLENMESİNDE, DÜŞÜK FREKANSLI DARBELİ POMPA KAYNAĞI İLE BESLENMİŞ KRİSTALİN UYARILMIŞ EMİSYONUNUN SICAKLIĞA GÖRE DEĞİŞİMİNİN ÖĞRENME EĞRİSİNİN ÇIKARILMASI İÇİN ABU-LTL'DE KURULMUŞ DENEY DÜZENEGİ. ....	86
<b>ŞEKİL 2. 62 A)</b> DÜŞÜK TEKRARLAMA FREKANSLI VE KISA DARBELİ POMPA GÜCÜ İLE HER İKİ TARAFINDAN UYARTILAN CR:LİCAF KRİSTALİNİN ÖLÇÜLMÜŞ UYARILMIŞ EMİSYONUNUN SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK DEĞİŞİMİ. <b>B)</b> SÜREKLİ-DALGA POMPALANMA İLE ÖLÇÜLMÜŞ FARKLI GÜÇLERDE UYARILMIŞ EMİSYON GRAFİĞİ. ....	87
<b>ŞEKİL 2. 63 A)</b> SICAKLIĞI ISITICI VE TERMAL KAMERA YARDIMI İLE KONTROL EDİLEN 15 MM UZUNLUĞUNDAKİ CR:LİCAF KRİSTALİNİN 10°C-100°C ARALIĞINDA 0.5°C ARALIKLARLA ÖLÇÜLMÜŞ UYARILMIŞ EMİSYONA AIT MAKSİMUM EMİSYON DALGA BOYU VE <b>B)</b> SÜREKLİ-DALGA POMPALI, FARKLI GÜÇLERDE UYARILMIŞ 15 MM CR:LİCAF KRİSTALİNE AIT MAKSİMUM EMİSYON DALGA BOYU GRAFİĞİ. ....	88
<b>ŞEKİL 2. 64</b> SÜREKLİ-DALGA POMPALI SİSTEMDE TERMAL KAMERA İLE ÖLÇÜLMÜŞ FARKLI GÜÇLERDEKİ KRİSTAL YAN YÜZEYİNDEKİ SICAKLIK ÖLÇÜMLERİ. ÖLÇÜLER GRAFİKLERDEKİ KARELER İÇERİSİNDEKİ MAKSİMUM MİNİMUM VE ORTALAMA DEĞERLERİ GÖSTERMEKTEDİR. ....	88
<b>ŞEKİL 2. 65 (A)</b> CW <b>(B)</b> CW İNTRAKAVİTE FREKANS-İKİ KATINA CR:LİSAF LAZERİN ŞEMASI. X KAVİTESİ, 660 NM'DE İKİ ADET 210 MW TEK UZAMSAL MOD DİYOT (SMD'LER) TARAFINDAN UÇTAN POMPALANIR. BRP: ÇİFT KIRILMALI FİLTRE .....	90
<b>ŞEKİL 2. 66 . (A)</b> CR:LİSAF LAZER İÇİN %0,015, 0,15, 0,3, 0,6, 1 VE %3 ÇIKIŞ KUPLAJINDA ALINAN SÜREKLİ DALGA GÜÇ VERİMLİLİĞİ EĞRİLERİ. SERBEST ÇALIŞAN LAZER DALGA BOYU HER DURUM İÇİN BELİRTİLMİŞTİR. <b>(B)</b> 365 MW EMİLEN POMPA GÜCÜ SEVİYESİNDE SMD POMPALI CR:LİSAF LAZERİN CW AYAR EĞRİSİ. VERİLER, %0,015 İLE %1 ARASINDA AKTARIMA SAHİP DÖRT FARKLI ÇIKIŞ KUPLÖRÜ İLE ALINMIŞTIR. HER ÇIKIŞ KUPLÖRÜNÜN YANSITMA ARALIĞI, RESİM AÇIKLAMALARINDA LİSTELENMİŞTİR. CR:LİSAF'IN E//C EKSENİ İÇİN NORMALLEŞTİRİLMİŞ EMİSYON KESİT VERİLERİ DE KARŞILAŞTIRMA AMACIYLA GÖSTERİLMİŞTİR. ---	91
<b>ŞEKİL 2. 67 (A)</b> 365 MW EMİLEN POMPA GÜCÜNDE SMD POMPALI CR:LİSAF LAZERİN ÖLÇÜLEN CW İNTRAKAVİTE FREKANSI İKİYE KATLANMIŞ AYARLAMA (402-535 NM) PERFORMANSI. VERİLER, MERKEZİ ÇALIŞMA ARALIĞI 800 İLE 1000 NM ARASINDA OLAN 6 FARKLI BBO KRİSTALİ İLE ALINMIŞTIR. GRİ EĞRİ, TEMEL DALGA BOYU ARALIĞINDA CR:LİSAF LAZERİN CW AYARLAMA ÖZELLİKLERİNE DAYANAN TAHMİNİ AYARLAMA PERFORMANSIDIR. <b>(B)</b> 402-535 NM BÖLGESİNDE İKİNCİL HARMONİK İŞİNİN AYARLANABİLİRLİĞİNİ GÖSTEREN CW İNTRAKAVİTE FREKANSI İKİYE KATLANMIŞ CR:LİSAF LAZERİNDEN ÖRNEK OPTİK SPEKTRUMLAR. ....	93
<b>ŞEKİL 2. 68</b> SÜREKLİ DALGA CR:LİCAF LAZERİNDEN, KAVİTE İÇİNDE İKİNCİL HARMONİK ÜRETMEK İÇİN KURULAN SİSTEMİN BASİT BİR ŞEMATİĞİ. BBO: BETA BARIUM BORATE. ....	95
<b>ŞEKİL 2. 69</b> FARKLI DALGA BOYLARINDA ELDE EDİLEN İKİNCİL-HARMONİK GUCUNUN 665 NM DEKİ SOĞURAN POMPA GÜCÜNE GÖRE DEĞİŞİMİ. <b>(A)</b> KAVİTE İÇİ GÜCÜ ARTTIRMAK İÇİN YUKSEK YANSITI AYNA KULLANILIRKEN, <b>(B)</b> 0.1% ÇIKIŞ AYNASI KULLANILIRKEN. ....	95
<b>ŞEKİL 2. 70</b> KAVİTE İÇİ İKİNCİL HARMONİK OLUŞTURMA DENEYLERİNDE ELDE EDİLMİŞ DALGABOYU DEĞİŞTİRİLEBİLİRLİK GRAFİĞİ. İKİNCİL HARMONİK DALGABOYU 377-424 NM ARALIĞINDA SERBESTÇE DEĞİŞTİRİLEBİLDİ. ....	96
<b>ŞEKİL 2. 71</b> ELDE EDİLEN MAVİ IŞIK GÜCÜNÜN ZAMANA BAĞLI DEĞİŞİM GRAFİĞİ. ....	97
<b>ŞEKİL 2. 72</b> KERR LENS MODULASYONU (KLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK SÜREKLİ-DALGA KİP-KİLİTLİ CR:LİCAF ÇALIŞMASI İÇİN KURULAN LAZER SİSTEMİ .....	98
<b>ŞEKİL 2. 73</b> KERR LENS MODULASYONU (KLM) YÖNTEMİ KULLANILARAK CR:LİCAF LAZERİNDEN ELDE EDİLMİŞ DARBELERİN OSİLOSKOP İLE ÖLÇÜLMÜŞ PROFİLİ. ....	99

## TABLolar DİZİNİ

<b>TABLO 2. 1</b> MERKEZİ DALGABOYU 850 NM OLAN, CR:LİSAF LAZERLERİ İÇİN TASARLANMIŞ SESAM/SBR AYNASI ÖRNEĞİ. -----	27
<b>TABLO 2. 2</b> EKİPMAN LİSTESİ-----	27
<b>TABLO 2. 3</b> SARF MALZEME LİSTESİ-----	28
<b>TABLO 2. 4</b> CR:LİCAF'IN ÖLÇÜLEN FLORESANS YAŞAM SÜRESİ VERİLERİNE AMPİRİK UYUM PARAMETRELERİ. 46	
<b>TABLO 2. 5</b> CR:LİCAF'IN E <sub>⊥</sub> C VE E <sub>  </sub> C POLARİZASYONLARINDA TEPE EMİSYON DALGA BOYUNUN TEMSİLİNDE DENKLEM 2.8'DEKİ SICAKLIK KATSAYILARININ EN UYGUN DEĞERLERİ -----	50
<b>TABLO 2. 6</b> CR:LİCAF'IN E <sub>⊥</sub> C VE E <sub>  </sub> C POLARİZASYONLARINDA TEPE ECS DEĞERİNİN TEMSİLİ İÇİN DENKLEM 2.9'DAKİ SICAKLIK KATSAYILARININ EN UYGUN DEĞERLERİ-----	50
<b>TABLO 2. 7</b> CR:COLQUİRİİTES'DE EMİSYON SPEKTRUM GENİŞLİĞİNİN (FWHM) TEMSİLİ İÇİN DENKLEM 2.10'DAKİ SICAKLIK KATSAYILARININ EN UYGUN DEĞERLERİ. 9. EMİSYON GENİŞLİĞİNİN POLARİZASYONDAN BAĞIMSIZ OLDUĞU BULUNMUŞTUR. -----	51
<b>TABLO 2. 8</b> CR:ND:GSGG KRİSTALİNİN ÖZELLİKLERİ-----	77
<b>TABLO 2. 9</b> FARKLI MADDELERİN TERMAL İLETKENLİK KATSAYILARI (HOLMAN, 2009) -----	79
<b>TABLO 2. 10</b> CR:LİCAF KRİSTALİNE AİT TERMO-OPTO-MEKANİK ÖZELLİKLER -----	82



## ÖZET

Yarı iletken lazerlerin 50 yıl önce Theodore Maiman tarafından keşfedilmesiyle birlikte bu lazerler teknolojik süreçler, bilimsel araştırmalar, savunma, sağlık, vb birçok alanı kapsayan çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. 1980'lerin ortalarından itibaren geçiş metal ve nadir element iyonları kullanımına dayalı sürekli ve darbeli lazer türevleri geliştirilmektedir. Bu lazerlerin çalışma frekansları aynı zamanda temel özellikleri aktif iyonlarla ana kristal arasındaki etkileşimlerle belirlenmektedir. Dalgaboyu geniş bir aralıkta ayarlanabilen sürekli-dalga (continuous-wave, cw) veya darbeli lazerlere ihtiyaç duyulan uygulamalarda, çok geniş kazanç bant aralığına sahip Ti:Safir gibi katı-hal lazerleri yoğun ilgi görmektedir. Bu geniş kazanç bant aralığı, dalga boyunun ayarlanabilirliği dışında, kip-kilitli (mode-locked) rejimde çok kısa optik darbelerin lazerlerden direkt olarak üretimine izin vermektedir. Özellikle femtosaniye (fs) darbe uzunluğu, düşük ortalama güçlerde yüksek tepe güçlerini sağlayabildiğinden yoğun ilgi görmektedir. Bunun yanında nanosaniye (ns) ve mikrosaniye ( $\mu$ s) uzunlukta darbeler de malzeme işleme/delme/kesme ve nonlineer optik gibi bazı alanların uygulamalarında ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirilen lazer kaynakları diyotlarla doğrudan pompalanabiliyorsa, çoğu zaman bu düşük maliyet, yüksek elektrikten optiğe dönüşüm etkinliği, kompaktlık ve düşük lazer gürültü düzeyi gibi ek avantajlar sağlamaktadır. Optik spektrumun farklı bölgelerinde geniş aralıklarda dalgaboyu ayarlanabilir, doğrudan diyot pompalı sürekli dalga ve darbeli lazer kaynaklarını geliştirmek için bilim dünyasında çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Bilinen lazer malzemeleri arasında Cr:LiCAF lazer malzemesi, yakın kızılaltı bölgede, Ti: Safir'den sonra bilinen en geniş kazanç bandına sahip malzemelerdendir. Cr:LiCAF lazerleri 745-885 nm aralığında lazer ışınımı üretebilirler ve bu geniş kazanç bandı 10-fs altı darbeler üretmek için yeterlidir. Cr:LiCAF lazerleri, Ti: Safir lazerlerinin aksine kırmızı dalgaboyundaki diyotlarla pompalanabilirler. Bu dalga boylarındaki diyotlar 1990'lardan beri piyasadadır ve Ti: Safir için kullanılan yeşil-mavi diyotlara göre çok daha gelişmişlerdir. Ayrıca Cr: LiCAF malzemesi çok düşük pasif kayıplara sahiptir ve 1 mW altında lazer çalışma eşikleri deneysel olarak elde edilmiştir (Ti:Safir için bu rakam 100 mW civarındadır). Termal parametreleri Ti: Safir kadar optimum olmayan Cr:LiCAF lazerlerini yüksek güçlerde çalıştırmak özel kavite/kristal geometrisi dizaynı gerektirmektedir. Son yıllarda kırmızı bölgedeki diyotların güçleri artması ve fiyatlarının ucuzlamasına rağmen, Cr:LiCAF lazerlerinin güç seviyelerinin artırılmasına yönelik detaylı çalışmalar yapılmamaktadır.

Antalya Bilim Üniversitesi Lazer Teknoloji Laboratuvarı olarak bu proje kapsamında düşük Cr iyon katkılı, diyot-pompa, ucuz, kompakt, verimli, lazer ve yükselticilerinin ülkemizde geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda gözetilen ana motivasyon, Cr:LiCAF lazerlerini son yıllarda geliştirilmiş olan düşük maliyetli, çok-modlu 1.5 W'lık 665 nm diyotlarıyla pompalayıp, değişik çalışma rejimlerinde (cw ve darbeli) yüksek verimli lazer ışınımı elde etmektir. Bu kapsamda yapılmış olan çalışmaların bütünü, farklı iş paketleri altında konulan hedefler kapsamında aşağıda özetlendiği şekilde gerçekleşmiştir.

İlk olarak, Yb-tabanlı sistemlerde önemli güç ölçeklenebilirliği gösteren kriyojenik sıcaklıklara soğutma işleminin, Cr:LiCAF kristali için floresan ömrü ve emisyon kesitinin (ECS) sıcaklığa bağlılığı açısından 78-618 K aralığında ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Floresan ömrü ölçümleri, Cr:LiCAF'ta ışımaya ömürlerinin yanı sıra floresans ömrünün de sıcaklığa bağlı olduğunu göstermiştir. Cr:LiCAF kristali 300 K'den 78 K'ye soğutulurken, E||c polarizasyonundaki tepe ECS'nin  $1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'den  $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'ye yükseldiği ölçülmüştür. Floresans/ışımaya ömrü, tepe emisyon dalga boyu, tepe emisyon kesiti ve yarı maksimumda tam genişlikte emisyon gibi ilgili tüm niceliklerin ölçülen sıcaklık bağımlılığını açıklayan analitik formüller elde edilmiştir. Genel olarak, rapor edilen sonuçlar, özellikle kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyellerinin değerlendirilmesi için, Cr:LiCAF bazlı lazer ve amplifikatör sistemlerinin modellenmesi için sağlam bir temel oluşturmaktadır.

Sürekli dalga güç ölçekleme deneylerinde, dört adet çok modlu diyotla pompalanan 10 mm %1.25 krom katkılı kazanç ortamına ait sürekli-dalga verim eğrileri elde edilmiştir. Kurulan 4 pompa sistemine ilk olarak 10 mm kazanç ortamını yerleştirilerek 7 farklı geçirgenliğe (%0.1, %0.2, %0.4, %0.7, %1.65, %1.8, %2.6) sahip çıkış aynaları kullanılarak sürekli-dalga ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek güce %2.6 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ile ulaşılmıştır. 5.53 W soğurma gücünde 790 nm merkez dalga boyunda 2.26 W çıkış gücü elde edilmiştir. Lazer çalışma eşik değeri yaklaşık olarak 770 mW, lazer verim eğrisi %49 ve optik-optik dönüşümü %33 olarak ölçülmüştür. Ayrıca %1.6 çıkış aynasıyla 46% verim eğrisinde 2.23 W çıkış gücü elde edilmiştir.

Q-anahtarlamalı rejim deneylerinde, 800 nm civarında çalışan pasif Q-anahtarlı, düşük maliyetli çok modlu bir diyot ile pompalanan Cr:LiCAF lazeri sunulmaktadır. Pasif Q-anahtarlama için AlGaAs tabanlı doyurulabilir Bragg reflektörleri (SBR'ler) kullanılmıştır. Sistem, dört farklı çıkış

kuplörü ve farklı modülasyon derinliklerine sahip iki SBR kullanarak deneysel olarak ayrıntılı olarak karakterize edilmiştir. 1.5–4  $\mu$ s aralığında darbe genişlikleri, 125 mW'a kadar ortalama güçlerle 18 ile 40 kHz arasındaki tekrar frekansına ulaşılmıştır. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar, temel Q-anahtarlama teorisi ile karşılaştırılmış, darbe uzunluğunun kısaltılması ve tepe güç ölçeklendirmesi açısından daha fazla performans iyileştirmesi amacı ile detaylandırılmıştır.

Proje kapsamında üretilen Cr:LiCAF kristallerinin yüzey üzerinde ( $\sigma=90^\circ$ ) ve yüzey dışında ( $\sigma=25^\circ$ ) kristal kuvars çift kırılmalı filtre plakaları ile kullanımı ile ayarlanabilir iki renkli lazer performansı araştırılmıştır. Yüzey çift kırılmalı filtre plakaları ile 27-37 nm (2 mm kalınlıkta BRF), 12-18 nm (4 mm kalınlıkta BRF), 6-10 nm (8 mm kalınlıkta BRF) ve 2-5 nm (16 mm kalınlıkta BRF) ayarlama aralıkları elde edilmiştir. Buna karşılık, yüzey dışı optik eksen BRF ile daha geniş bir dalga boyu ayırma ayarıyla iki renkli lazeri elde edilmiştir: 40-98 nm (2 mm kalınlıkta BRF), 20-96 nm (4 mm kalınlıkta BRF) ve 10-99 nm (8 mm kalınlığında BRF). Sonuç olarak, ayarlanabilir iki renkli lazer işleminde yüzey dışı optik eksenli BRF'lerin avantajları açıkça gösterilmiştir.

Projeye ait bir başka iş bölümünde, pasif Q-anahtarlı mod kilitli (QML) operasyonu bir Cr:LiSAF lazerinde karakterize edilmiştir. Deneylerde 10 mm uzunluğunda, %1.5 Cr katkılı LiSAF kristali iki adet 150 mW'lık tek modlu diyot ile 660 nm'de pompalanmıştır. QML operasyonunu başlatmak ve sürdürmek için merkezi dalga boyu 850 nm ve modülasyon derinliği %0.8 olan bir AlGaAs bazlı doyurulabilir Bragg reflektörü (SBR) kullanılmıştır. QML işleminde sistem, 30–70 kHz tekrarlama frekansına sahip 2–2.5  $\mu$ s uzunluğunda Q-anahtarlı zarflar içinde 150–200 MHz'de 5 ps'nin altında uzun mod kilitli darbeler üretmiştir. Yaklaşık 280 mW'lık bir emilen pompa gücü seviyesinde, QML darbeleri ortalama 50 mW güce sahipken, mod kilitli darbelerin tahmini tepe gücü yaklaşık 0.5 kW olarak hesaplanmıştır. Bir kavite içi çift kırılmalı ayar plakasının (BRF) basit dönüşü, darbelerin merkezi dalga boyunun 835 ve 865 nm arasında ayarlanmasını sağlamıştır. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, Cr:LiSAF lazerlerde QML işlemine odaklanan ilk çalışma olmakla birlikte, çalışmadaki bulgular Cr:LiSAF'ta QML işleminin dinamiklerini anlamaya yönelik ilk girişimi oluşturmaktadır.

Cr:LiSAF kristalinin kullanıldığı bir başka iş bölümünde, yakın kızılötesi ve görünürde ultra geniş ayarlanabilirliğe sahip, düşük maliyetli ve kompakt bir Cr:LiSAF lazer sistemi sunmaktayız. Sistem iki adet son teknoloji ürünü 210 mW tek modlu kırmızı diyotla pompalanır ve sürekli dalga (cw)

lazer deneylerinde 190 mW'a kadar çıkış gücü, 795–1103 nm ayar aralığı ve %54'lük bir eğim verimliliği elde edilir. Beta-baryum borat (BBO) kristalleri ile kavite içi frekansı ikiye katlama yoluyla, mordan yeşile (402 535 nm) spektral bölgeleri sürekli olarak kapsayan cw ikinci harmonik ayarlama aralığı gösterilmiştir. Basit pompa sistemine rağmen, 422.5 nm'de 17.5 mW'a kadar cw frekansı ikiye katlanmış güç seviyelerine ulaşılabilir, bu da %4.2'lik bir optik-optik dönüşüm verimliliğine ve %1.4'lük bir elektrik-optik dönüşüm verimliliğine karşılık gelmektedir.

Bir diğer iş paketi kapsamında, Kerr Lens Modulasyonu (KLM) yöntemi kullanılarak sürekli dalga kilitli modda Cr:LiCAF lazerler üretilmesine yönelik çalışmalar proje kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bunun için iki adet 210 mW gücünde tek-modlu diyot ile pompalanan 2.5 mm %11 doped Cr:LiCAF lazer kristali kullanılmıştır. Kavite içerisinde iki adet DCM (double chirped mirror) ve normal geçirgenliğe sahip çıkış aynası yerine GMOC (gain-matched output coupler) kazanç uyumlu çıkış aynası kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda lazer çıkışının net bir şekilde Q-anahtarla modunda çalıştığı fakat sürekli dalga kip-kilitli moda geçiş yapmadığı gözlemlenmiştir.

Son olarak, proje çalışmaları dahilinde konu edilen farklı lazer çalışma rejimlerinin çalışma performanslarının belirlenmesinde kristal içi sıcaklık dağılımı önemli bir yer tutmaktadır. Bu kapsamda, güçlü kırmızı diyotlarla pompalanan ve farklı soğutucu yapıları içerisine yerleştirilmiş Cr:LiCAF kristallerinin iç sıcaklık dağılımlarının karakterize edilmesinde çoklu fizik programları kullanılarak sonlu elemanlar yöntemleri ile sıcaklık ve mekanik stres analizleri gerçekleştirilmiştir. İlgili benzetim sonuçları, lazer operasyonu sırasında kullanılan bir termal kamera üzerinden yapılan sıcaklık ölçümleri ile desteklenerek sıcaklık tahmin yöntemleri geliştirilmiştir.

## ABSTRACT

With the discovery of semiconductor lasers 50 years ago by Theodore Maiman, these lasers have been used in a variety of applications including technological processes, scientific research, defense, healthcare, etc. Since the mid-1980s, continuous and pulsed laser derivatives based on the use of transition metal and rare element ions have been developed. The operating frequencies of these lasers are also determined by the interactions between the active ions and the main crystal. Solid-state lasers such as Ti:Sapphire with a very wide gain band gap are of great interest in applications where continuous-wave (cw) or pulsed lasers with a wide range of wavelengths are required. This wide gain bandgap allows direct generation of very short optical pulses from lasers in the mode-locked regime, apart from the tunability of the wavelength. In particular, the femtosecond (fs) pulse length is of great interest as it can provide high peak powers at low average powers. In addition, nanosecond (ns) and microsecond ( $\mu$ s) impacts are also needed in some applications such as material processing/drilling/cutting and nonlinear optics. If the developed laser sources can be directly pumped with diodes, this often provides additional advantages such as low cost, high electrical-to-optical conversion efficiency, compactness and low laser noise level. Intense work continues in the scientific world to develop direct diode-pumped continuous wave and pulsed laser sources with adjustable wavelengths in wide ranges in different regions of the optical spectrum.

Among the known laser materials, Cr:LiCAF laser material is one of the materials with the widest known gain band after Ti: Sapphire in the near infrared region. Cr:LiCAF lasers can produce laser radiation in the 745-885 nm range, and this wide gain band is sufficient to produce sub-10-fs pulses. Unlike Ti: Sapphire lasers, Cr:LiCAF lasers can be pumped with red wavelength diodes. Diodes of these wavelengths have been on the market since the 1990s and are much more advanced than the green-blue diodes used for Ti: Sapphire. In addition, the Cr:LiCAF material has very low passive losses and laser operating thresholds below 1 mW have been experimentally obtained (for Ti: Sapphire, this figure is around 100 mW). Operating Cr:LiCAF lasers, whose thermal parameters are not as optimal as Ti:Sapphire, requires special cavity/crystal geometry design to operate at high power. Although the power of the diodes in the red zone has increased and their prices have decreased in recent years, detailed studies have not been carried out to increase the power levels of Cr:LiCAF lasers.

As Antalya Bilim University Laser Technology Laboratory, studies have been carried out for the development of low Cr ion doped, diode-pumped, cheap, compact, efficient lasers and amplifiers in our country within the scope of this project. The main motivation in these studies is to pump Cr:LiCAF lasers with low-cost, multi-mode 1.5 W 665 nm diodes that have been developed in recent years to obtain highly efficient laser radiation in different operating regimes (cw and pulsed). All of the studies carried out in this context were carried out as summarized below within the scope of the objectives set under different work packages.

First, cooling to cryogenic temperatures, which shows significant power scalability in Yb-based systems, was investigated in detail in the range of 78-618 K in terms of the temperature dependence of the fluorescence lifetime and emission cross section (ECS) for the Cr:LiCAF crystal. Fluorescence lifetime measurements showed that in Cr:LiCAF, fluorescence lifetimes as well as fluorescence lifetimes are temperature dependent. As the Cr:LiCAF crystal was cooled from 300 K to 78 K, the peak ECS in the E||c polarization was measured to increase from  $1.3 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup> to  $1.6 \times 10^{-20}$  cm<sup>2</sup>. Analytical formulas describing the measured temperature dependence of all relevant quantities such as fluorescence/luminescence lifetime, peak emission wavelength, peak emission cross-section, and full-width emission at half-maximum are obtained. Overall, the reported results provide a solid basis for modeling Cr:LiCAF-based laser and amplifier systems, particularly for the evaluation of their potential at cryogenic temperatures.

In continuous wave power scaling experiments, continuous-wave efficiency curves of 10 mm 1.25% chromium doped gain medium pumped with four multimode diodes were obtained. Continuous-wave measurements were taken using output mirrors with 7 different transmittance (0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.7%, 1.65%, 1.8%, 2.6%) by first placing a 10 mm gain medium in the 4-pump system. As a result of the measurements, the highest power was reached with the output mirror with a transmittance of 2.6%. At an absorption power of 5.53 W, an output power of 2.26 W was obtained at a center wavelength of 790 nm. Laser operating threshold value is approximately 770 mW, laser efficiency curve measured 49% and optical-optical conversion 33%. In addition, 2.23 W output power was obtained at 46% efficiency curve with 1.6% output mirror.

In Q-switched regime experiments, a passive Q-switched, low-cost multimode diode pumped Cr:LiCAF laser operating around 800 nm is presented. AlGaAs based saturable Bragg reflectors (SBRs) are used for passive Q-switching. The system was characterized in detail experimentally using four different output couplers and two SBRs with different modulation depths. Pulse widths

in the 1.5–4  $\mu\text{s}$  range, repetition frequencies between 18 and 40 kHz are achieved with average powers up to 125 mW. Experimentally obtained results are compared with basic Q-switching theory and elaborated with the aim of further performance improvement in terms of pulse length shortening and peak power scaling.

Tunable two-color laser performance was investigated by using Cr:LiCAF crystals produced on-axis ( $\sigma=90^\circ$ ) and off-axis ( $\sigma=25^\circ$ ) with crystal quartz birefringent filter plates. Tuning 27-37 nm (2 mm thick BRF), 12-18 nm (4 mm thick BRF), 6-10 nm (8 mm thick BRF) and 2-5 nm (16 mm thick BRF) with surface birefringent filter plates ranges have been obtained. In contrast, with the off-surface optical axis BRF, two color lasers were obtained with a wider wavelength separation setting: 40-98 nm (2 mm thick BRF), 20-96 nm (4 mm thick BRF) and 10-99 nm (8 mm thick BRF). In conclusion, the advantages of off-axis optical axis BRFs in the tunable two-color laser process are clearly demonstrated.

In another work part of the project, passive Q-switched mode locked (QML) operation was characterized on a Cr:LiSAF laser. In the experiments, a 10 mm long, 1.5% Cr doped LiSAF crystal was pumped at 660 nm with two 150 mW single-mode diodes. An AlGaAs-based saturable Bragg reflector (SBR) with a central wavelength of 850 nm and a modulation depth of 0.8% was used to initiate and maintain the QML operation. In the QML process, the system generated long mode locked pulses under 5 ps at 150–200 MHz in 2–2.5  $\mu\text{s}$  long Q-switched envelopes with a repetition frequency of 30–70 kHz. At a pump power level of approximately 280 mW, QML pulses have an average power of 50 mW, while the estimated peak power of mode locked pulses is approximately 0.5 kW. Simple rotation of an intracavity birefringent tuning plate (BRF) allowed the central wavelength of the pulses to be tuned between 835 and 865 nm. To the best of our knowledge, this study is the first to focus on QML processing in Cr:LiSAF lasers, but the findings in the study constitute the first attempt to understand the dynamics of QML processing in Cr:LiSAF.

In another part of the Project where Cr:LiSAF crystal is used, we offer a low cost and compact Cr:LiSAF laser system with ultra-wide tunability in the near infrared and visible. The system is pumped by two state-of-the-art 210 mW single-mode red diodes, achieving output power of up to 190 mW, a tuning range of 795–1103 nm, and a slope efficiency of 54% in continuous wave (cw) laser experiments. The cw second harmonic tuning range is shown, which continuously covers the violet to green (402–535 nm) spectral regions by doubling the intracavity frequency with beta-barium borate (BBO) crystals. Despite the simple pump system, cw frequency doubled power

levels of up to 17.5 mW at 422.5 nm can be achieved, resulting in an optical-optical conversion efficiency of 4.2% and an electric-optic conversion efficiency of 1.4%. corresponds to the optical conversion efficiency.

Within the scope of another work package, studies on the production of Cr:LiCAF lasers in continuous wave locked mode using the Kerr Lens Modulation (KLM) method were carried out within the scope of the project. For this, a 2.5 mm 11% doped Cr:LiCAF laser crystal pumped with two 210 mW single-mode diodes was used. Two DCM (double chirped mirrors) and GMOC (gain-matched output coupler) gain-matched output mirrors are used in the cavity instead of the output mirror with normal transmittance. As a result of the experiments, it was observed that the laser output works clearly in the Q-switched mode, but does not switch to the continuous wave mode-locked mode.

Finally, the temperature distribution inside the laser crystal has an important place in determining the operating performances of different laser operating regimes, which are the subject of the project studies. In this context, temperature and mechanical stress analyzes were carried out using finite element methods in the characterization of the internal temperature distributions of Cr:LiCAF crystals pumped with strong red diodes and placed in different cavity structures. Relevant simulation results are supported by temperature measurements made on a thermal camera used during laser operation to estimate the temperature.



## 1. GİRİŞ VE ORTAK LİTERATÜR ÖZETİ

LAZER (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) olarak bilinen uyarılmış ışınımın fiziksel prensibi Einstein tarafından 1917 yılında ortaya konulan radyasyonun kuantum teorisi ile ortaya konulmuştur. Mikrodalgalar ile optik dalgaboyları rejimlerinde birçok teknoloji geçişine tipik bir örnek teşkil eden Lazerler başlangıçta Willis Lamb ve Robert Retherford tarafından Hidrojen molekülünden 2.74 cm dalgaboyundaki radyasyon emisyonunun yükseltilerek uyarılmış ışınım elde edilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Benzer biçimde Amonyak molekülleri ve yüksek-H kavite yordamıyla 1.25 cm dalgaboyunda ve nW güç seviyelerinde sinyal elde edilebilmiştir (Gordon vd. 1954). Daha sonra bu teknoloji MASER olarak adlandırılan kazanç ortamında yeterli popülasyon inversiyonu sağlanarak optik frekanslara taşınmıştır (Koechner, 2006). Son olarak, flaş lambalar yordamıyla uyarılan RUBY kristalindeki ( $A_2O_3$ )  $Cr^{+3}$  iyonlarının  $^2E$  ve  $^4A_2$  enerji bantlarındaki geçişiyle 694 nm dalgaboyunda ışımaya yapan katı hal bir lazer sistemi geliştirilmiştir (Maiman 1960). Genel olarak katı hal lazerleri (solid state lasers) genel olarak kazanç ortamlarının sıvı veya gaz yerine katı bir materyal yordamıyla oluşturulan lazer tiplerine verilen genel isimdir. Kazanç ortamı olarak genellikle Neodyum (neodymium), Erbiyum (erbium) veya İterbiyum (ytterbium) vb nadir toprak elementleri katkılanmış cam veya kristaller tercih edilmektedir.

Günümüzde oldukça popüler olan ultra-hızlı lazerler (ultrafast lasers), biyomedikal görüntüleme, malzeme işleme, optik-kimya ve optik-metroloji gibi uygulama alanlarında kullanıldığı için üzerinde çalışmaların aktif olarak devam ettiği bir araştırma konusudur. Bu alanda gerçekleştirilen çalışmaların temel yönelim düşük maliyet ile oluşturulmuş kompakt rezonans mimarileri ile kararlı ve yüksek darbe enerjili lazer sistemleri elde edilerek bu mimarilerin doğrudan bahsi geçen ve ilave kullanım alanlarında düşük maliyet ile kullanılmasını sağlamaktır. Ayrıca, çoklu-foton mikroskopi, doğrusal olmayan spektroskopi gibi dalgaboyu değiştirilebilir kaynaklara ihtiyaç duyulan uygulamalar için optik spektrumun farklı bölgelerinde geniş aralıklarda dalgaboyu ayarlanabilir, doğrudan diyot pompalı cw ve darbeleri lazer kaynaklarını geliştirmek için bilim dünyasında çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar kapsamında diyotlarla doğrudan pompalanabilen femtosaniye lazerlerin gerçekleştirilmesi, düşük maliyet, yüksek elektrik/optik veya optik/optik dönüşüm etkinliği, kompaktlık, düşük lazer gürültü düzeyi ve azalan soğutma gereksinimleri gibi ek avantajları da beraberinde getirecektir.

Diyot pompalı katı hal lazer malzemesi olarak Ti:Safir malzemesinin kullanıldığı ticari kip-kilitli

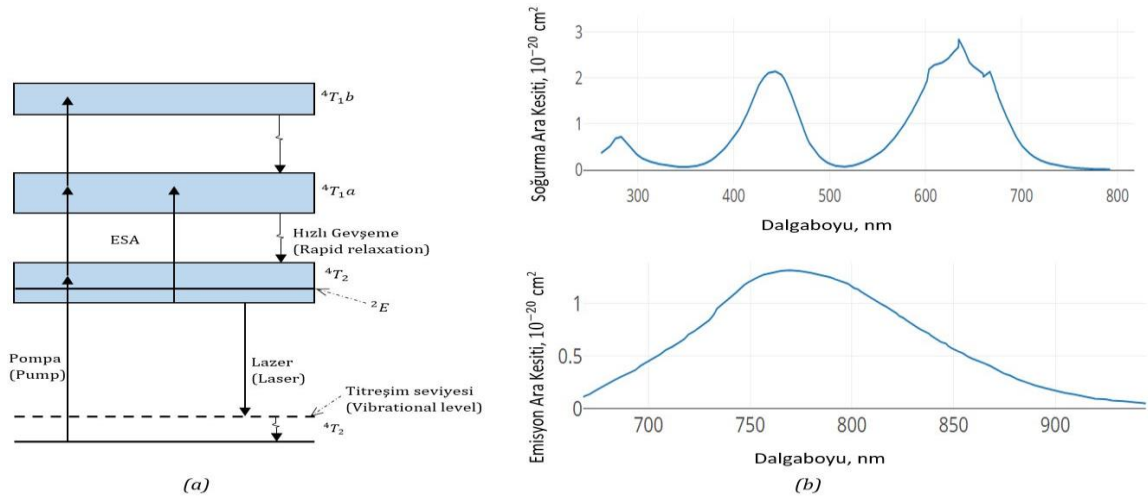
lazer osilatörlerinde, malzemenin geniş kazanç bant genişliği sayesinde 100 fs civarında uzun süreli darbelerin (atmaların) yanında, yüzlerce kilowatt tepe gücü ve 680 ila 1080 nm arası spektrumda geniş bir ayarlanabilirlik imkanı elde edilmiştir. Ancak, Ti:Safir lazerlerin çoğunlukla geleneksel yüksek maliyetli, hantal ve elektrikçe verimsiz, yüksek güçlü frekans-katlamalı neodyum ve iterbiyum lazerleri tarafından pompalanmayı gerektirmesi, Ti:Safir lazer sistemlerinin yaygın kullanımını sınırlamış ve bir çok bilimsel ve teknolojik alanda meydana gelebilecek gelişmelerin yavaşlamasına sebep olmuştur. Son yıllarda gerçekleştirilen mavi ve yeşil diyotlarla pompalanan Ti:Safir lazer çalışmaları umut vericidir, ama bu dalgaboylarındaki diyotların halihazırdaki düşük parlaklıklarından dolayı, elde edilen sistemler henüz istenilen seviyelere ulaşabilmiş değildir (Sibbett vd., 2012; Roth vd., 2011; Pichon vd., 2018a). Ayrıca Ti:Safir malzemesinin düşük yaşam süresi, yüksek pasif kayıpları ve sıcaklıkla artan fonon etkileşimlerinin diyot teknolojileri daha gelişmiş duruma geldiğinde bile sınırlandırıcı parametreler olarak kalacağı öngörülmektedir ((Balembois vd., 2018; Pichon vd., 2018b).

Bazı uygulamalarda Ti:Safir lazerlerine alternatif olarak neodyum ve iterbiyum katkılı lazer malzemeleri kullanılmaktadır (Nilsson ve Payne, 2011; Krupke, 2000; Xu vd., 2012). Bu malzemeler doğrudan diyotlarla pompalanabilmektedir ve görece uzun flüoresans ömürleri vardır. Bu uzun flüoresans ömrü, malzemelerin Ti:Safir'den çok daha iyi bir şekilde optik enerji depolayabilmesini sağlar ve bu da özellikle optik yükselteç amaçlı kullanımlar için çok önemlidir. Ayrıca bu tip malzemelerin görece yüksek emisyon arakesit değerlerinden dolayı optik kazançları da yüksektir. Uygulama kısıtı olarak söz konusu malzemelerin çok dar emisyon bantları olduğundan bu malzemelerle kurulan lazerlerin dalgaboyu sadece çok dar bir aralıkta değiştirilebilmektedir. Bu malzemenin kullanıldığı lazer sistemlerinden elde edilen darbeler çoğunlukla pikosaniye seviyesinde olmaktadır. Ayrıca bu malzemeler kullanılarak kurulan optik yükselteçlerde kazanç daralması etkisinden dolayı darbe enerjileri arttıkça darbeler zaman skalasında daralmakta ve yükselteç içindeki optik elemanların zarar görmesi riskini ortaya çıkarmaktadır. Neodyum ve İterbiyum katkılı lazer malzemeleri pikosaniye seviyesinde darbe uzunluğuna sahip sistemler olması bir çok uygulama alanı için çok daha kısa süreli darbeler üreten Ti:Safir lazerleri ve yükselteçleri tercih edilmektedir.

$Cr^{3+}$  katkılı kolquirit ( $Cr^{3+}$ : LiSrAlF<sub>6</sub> (Payne vd., 1989),  $Cr^{3+}$ : LiCaAlF<sub>6</sub> (Payne vd., 1988) ve  $Cr^{3+}$ : LiSrGaF<sub>6</sub> ((Smith vd., 1992)) malzemeler, 700-1100 nm aralığını kapsayan geniş emisyon bantları ve 650 nm civarı dalga boyunda emisyon yapan düşük maliyetli lazer diyotlarıyla doğrudan pompalanabilme imkanından dolayı Ti:Safir kristallerine düşük maliyetli bir alternatif

oluşturmaktadır. Bu malzemeler, ikincil ve üçüncül harmonik oluşturulması (Pinto vd., 1995; Agate vd., 2002a; Demirbas ve Baali, 2015a; Demirbas vd., 2015b) veya optik parametrik salınım (Maestre vd., 2013; Sadeghi vd., 1997) kullanılarak optik spektrumun 250-500 nm ve 1100-3500 nm bölgelerinde de lazer çıkışının elde edilmesini sağlayabilmektedir. Ayrıca, Cr: kolquiritler'in geniş ve her iki polarizasyonda da etkili olan soğurma bantları, 650 nm civarında gelişmiş düşük maliyetli kırmızı lazer diyotları ile verimli pompalama imkanı sağlamaktadır (Scheps vd., 1991; Tsuda vd., 1996; Valentine vd., 1997; Agate vd., 2002b). Bunun yanında, Cr: kolquirit kristalleri, yaklaşık %0.2/cm'lik çok düşük bir kayıp seviyesine sahip olarak büyütülebilmektedirler (Ti:Safir malzemesinin optik kayıpları kabaca bunun 5-10 katı seviyesindedir) (Roth vd., 2009; Wolter vd., 2017). Maliyette önemli bir düşüş sağlanmasına ek olarak, yüksek parlaklıklı diyotlarla doğrudan pompalanabilmesi nedeniyle Cr<sup>3+</sup>:kolquirit türü malzemeler, kazanç ortamı olarak kullanıldığı lazer sistemlerinin elektriksel-optik dönüşüm verimini de büyük ölçüde artırmaktadır. Bu özellikler, seçilen uygulamalarda daha pahalı olan Ti:Safir tabanlı sistemlere alternatif oluşturabilecek kompakt ve verimli sürekli-dalga veya kip-kilitli Cr:kolquirit lazerlerin oluşturulmasına imkan vermektedir.

Cr:kolquirit lazerlerinde optik pompalama ve lazer oluşumu sürecinde rol oynayan Cr<sup>3+</sup> enerji seviyeleri arasındaki elektronik geçişler Şekil 1.1 (a)'da gösterilmiştir. Ayarlanabilir Cr<sup>3+</sup> lazerlerinde, kırmızı ve mavi soğurma bantlarına pompalanarak <sup>4</sup>T<sub>2</sub> durumuna uyarılan iyonlar, zemin <sup>4</sup>A<sub>2</sub> seviyesinin uyarılmış titreşim durumlarına lazer geçişi (lasing) yapmaktadır. Bu lasing şeması, <sup>4</sup>T<sub>2</sub> durumunun (gevşeyen kafes konfigürasyonunda) <sup>2</sup>E durumundan (yakutta üst lazer seviyesi) daha düşük bir enerjide olan kristalleri gerektirir. Bu tür kristallere Cr<sup>3+</sup> için "düşük alan" konaklar denir. Üst lazer seviyesinden kaynaklanan ve lazerlerin verimliliğini azaltan içsel bir işlem olan uyarılmış durum soğurulması (excited state absorption: ESA) da gösterilmiştir. Bu projede kazanç ortamı olarak kullanılmak üzere seçilen Cr:LiCAF kristaline ait soğurulma (absorption) ve emisyon (emission) bantları Şekil 1.1 (b)'de gösterildiği biçimde kırmızı ve mavi renkli soğurma bantları, yeşil (~500 nm) için şeffaf bir bölge bırakır ve malzemeye zümrüt yeşili bir renk vermenin yanında pompa ışığının verimli bir şekilde emilmesini sağlar (Payne vd., 1988).



**Şekil 1. 1 (a)** Optik geçişleri gösteren düşük alan Cr<sup>3+</sup> enerji seviyeleri **(b)** Cr: LiCAF'ın tipik soğurma ve emisyon spektrumları

Cr:LiCAF kristali, Cr:kolquiritler arasında en az kuantum kusuruna (quantum defect), uyarılmış durum soğurulması (excited state absorption) ve üst-dönüşüm (up-conversion) oranına sahip olmakla birlikte en yüksek termal iletkenliğe de sahiptir (Kopf vd., 1997; Stalder vd., 1992; Jabczyński vd., 2001). Bahsedilen fiziksel özellikler proje kapsamındaki termo-optik analizlerde ayrıntılı olarak yer almaktadır. Bu avantajlara rağmen, Cr:kolquirit ile yapılan önceki çalışmalar, daha geniş kazanç bant genişliği, daha yüksek kazançla sahip olan ve erişim kolaylığı bulunan,  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  seviyesinde düşük pasif kayıplı yüksek kaliteli kristal olan Cr:LiSAF üzerinde yoğunlaşmıştır. Öte yandan, Cr:LiCAF'e ait ilk örnekler, büyütme işlemi sırasında ortaya çıkan nano ölçekli çökeltiler nedeniyle  $2 \text{ cm}^{-1}$  civarında yüksek dışsal kayıplara sahiptir (Klimm ve Reiche, 1999). Ancak son yıllarda (Klimm vd., 2005) kristal kalitesinde ortaya konulan iyileştirmeler ile Cr:LiCAF kristali yapılan çalışmaların odağını oluşturmaya başlamıştır.

Cr:kolquiritler için daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda en yüksek sürekli dalga lazer çıkış gücü 3 W (Dergachev vd., 2007) olarak bildirilmiştir. Bu sonuç için, çok geçişli bir levha lazer geometrisi (slab geometry) ve iki adet 15 W'lık düşük parlaklıkta diyot çubuğu tarafından pompalanan 27 mm uzunluğunda ve 1 mm kalınlığında Cr: LiSAF kristali kullanılarak sadece %10'luk bir optik-optik dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. Cr:LiCAF kristali için ise önceki çalışmalarda bildirilen en yüksek çıkış gücü, sürekli-dalga işleminde (Demirbas vd., 2009) 1 W ve sürekli-dalga mod kilitlemede (Demirbas vd., 2011b) ise 415 mW olarak elde edilmiştir. Üniversitemiz bünyesinde daha önce gerçekleştirmiş olduğumuz TÜBİTAK destekli çalışmalar neticesinde, Cr: LiCAF kristalinin kullanıldığı lazer sistemlerinin bu güç değerleri ile sınırlı

olmadığı gösterilmiştir. Bu doğrultuda yaptığımız çalışmalarda 5.5 W soğurulan pompa gücüne karşılık 805 nm civarında 2.54 W sürekli dalga lazer çıkışı elde edilmiştir. Ayrıca BBO kristali ile ikiye katlanma frekansı yapısı oluşturularak, 402 nm civarında, %12'lik bir optik-optik dönüşüm verimine tekabül eden 0.9 W lazer çıkışı elde edilmiştir. Çift-kırınımlı bir quartz filtre kullanılarak, lazer çıkışı ve onun ikincil harmoniği, sırasıyla 745 nm ile 885 nm ve 375 ile 440 nm arasındaki geniş bir dalga boyu aralığında kontrol edilebilmiştir. Proje kapsamında yapılan çalışmalar sonucunda, 4-diyot pompalı Cr:LiCAF lazeri 5.53 W soğurulan pompa gücüne karşılık 795 nm civarında 2.26 W sürekli dalga modunda çalışma performansı göstermiştir. Bu da %49 verim eğrisi ve %33 optik-optik dönüşüm verimi sağlamaktadır. Ayrıca ikincil harmonik üretimi için yapılan çalışmalarda farklı kalınlıklardaki BBO kristalleri kullanılarak 4-diyot pompalı sistemde, 441 mW mavi ışık elde edilmiştir. Üretilen mavi ışığın dalgaboyu 377 ile 424 nm arasında değiştirilebilmiştir. Mod kilitlemeyi başlatmak ve sürdürmek amacıyla doyurulabilir bir Bragg reflektörü kullanılmıştır. Oluşturulan kip-kilitli rejiminde, Cr:LiCAF lazer, ortalama 0.75 W'lık bir güçle 810 nm civarında, tekrarlama hızı 96.4 MHz olan 105 fs uzunluğunda darbeler üretmiştir. Bu da 7.7 nJ'lik darbe (atma) enerjisi ve 65 kW'lık tepe gücüne karşılık gelmektedir. Q anahtarlamalı mod kilitletili işletimde, enerjileri 150 nJ'nin üstünde olan darbeler üretilmiştir (Demirbas vd., 2015b). Cr: LiSAF sistemlerinin performansı ile karşılaştırıldığında ve Cr: LiCAF'ın üstün fiziksel özellikleri göz önüne alındığında, bu malzemeyle elde edilen güç seviyeleri, teknolojinin içsel sınırlarının henüz araştırılmadığını göstermektedir. Grubumuz tarafından daha önce gerçekleştirilen çalışmalarda %10, %7 ve %5 Cr-katkili Cr:LiCAF kristalleri kullanılmış ve azalan krom katkısının elde edilebilir lazer güç seviyelerine olumlu etki yaptığı %5-10 aralığında Cr iyon katkısı içeren kristaller için deneysel olarak gösterilmiştir.

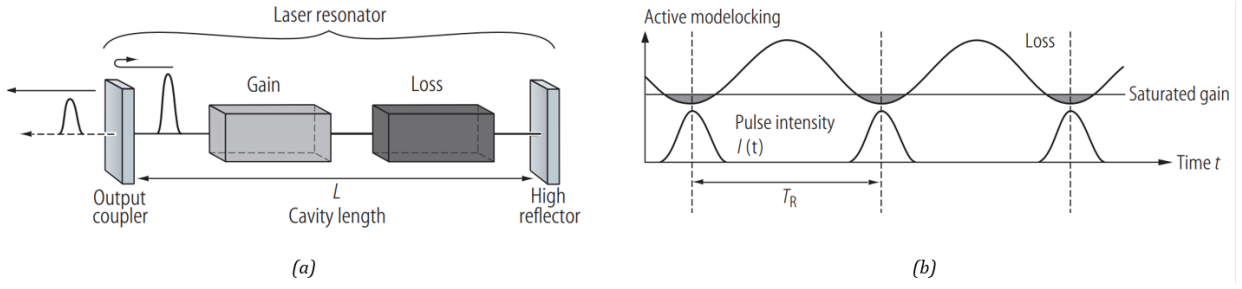
Proje kapsamında; düşük yoğunlukta (%1) krom katkısı içeren ve birim uzunluk başına düşen termal yükü azaltmak adına görece daha uzun şekilde biçimlendirilmiş Cr<sup>+3</sup>:LiCAF kristallerinin sürekli-dalga ve mod-kilitli çalışma durumlarında lazer performansları incelenmektedir. Çalışmaların ana hedefini Antalya Üniversitesi Lazer Teknoloji Laboratuvar'ında bu malzeme ile gerçekleştirilen önceki çalışmalarda karşılaştığımız termal kısıtların iyileştirilmesi yordamıyla, sürekli-dalga modu için >3-W çıkış gücü ve >%50 optikten-optiğe çevirimi elde edilmesidir. Bu ilk projemizdeki elde edilebilir güç seviyeleri (3 W) toplam diyot pompa gücümüzle (4x1.5= 6W) sınırlıdır. Proje süresince daha güçlü diyotlar (2.5 W'lık veya üzeri) diyotların piyasaya çıkacağını öngörülmüştü ve elde edilebilir güç seviyelerinin 5 W düzeyine çıkabileceği planlanmıştır. Raporun sonraki bölümlerinde açıldığı üzere bu alandaki uygun ticari diyotlardaki gelişmeler öngörüldüğü biçimde gerçekleşmemiştir. Bu sebeple bu rapor içerisinde verilen deney düzeneklerinde Bu diyotlar yerine ABU-LTL envanterinde bulunan 660 nm de 1.8 W çıkış gücüne sahip tek çıkışlı (single emitter), çok modlu (multimode) nLight lazer

diyotlar, yine ABU-LTL envanterindeki ILXLightwave diyot tutucularıyla birlikte kullanılmıştır. Dört adet çok modlu diyotla pompalanan 10 mm uzunluğunda ve %1.25 krom katkılı Cr:LiCAF lizer kavitesi ile, 7 farklı geçirgenliğe (%0.1, %0.2, %0.4, %0.7, %1.65, %1.8, %2.6) sahip çıkış aynaları kullanılarak sürekli-dalga ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda, 5.53 W soğurma gücüne karşılık, maksimum 2.6W'lık çıkış gücüne (790 nm merkezli) %2.6 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ile ulaşılmıştır. Lazer çalışma eşik değeri yaklaşık olarak 770 mW, lazer verim eğrisi %49 ve optik-optik dönüşümü %33 olarak ölçülmüştür. Ayrıca 1.6% çıkış aynasıyla 46% verim eğrisinde 2.23 W çıkış gücü elde edilmiştir. Uzun vadeli hedeflerimizde bu projemizde elde edilecek sonuçlarla, bir sonraki aşamada yapacağımız projelerde 50-100 W civarı güç veren 660 nm diyotlarını satın almayı ve Cr:LiCAF lazerinden elde edilebilir güç seviyelerini 10 W üzerine çıkarmayı hedeflemekteyiz. Bu noktada piyasadan tedarik edilebilen veya ikili işbirliği çerçevesinde büyütülebilecek düşük Cr-katkılı Cr:LiCAF örneklerinin istenilen yüksek kaliteye sahip olduğunun gösterilmesi belirleyici bir rol üstlenmektedir. Ayrıca proje kapsamında geliştirilen termal modelleme ve sonrasında termal kamera ile yapılan sıcaklık ölçümleri, sonrasında gerçekleştirilen deneysel lazer çalışmaları ile proje ekibimize bu konuda gerekli bilgi birikimini de sağlanmıştır.

Proje hedefleri kapsamında gerçekleştirilen lazer kavitelerinin farklı rejimlerdeki karakteristiğinin yorumlanması ve modellenmesinde, ilgili tüm kesitlerin ( $\sigma_{em}$ ,  $\sigma_{esa}$  ve  $\sigma_a$ ) yanı sıra floresan ömrünün ( $\tau_f$ ) sıcaklığa bağımlılığı hakkında ayrıntılı bilgi birikimini gerektirmektedir. Bu karakterize edici kesit alanı değerleri arasında, Emisyon enine kesiti (ECS -  $\sigma_{em}$ ) lazer/amplifikatör sistemlerinin etkili tasarımı ve modellenmesi için gerekli temel bilgi gövdesini oluşturan, bir lazer kazanç ortamına ait en önemli spektroskopik özelliklerinden biridir. Ek olarak, ilgili kazanç ortamının floresan ömrü sıcaklıkla doğrudan değişir nitelikte olup, bu değer  $\sigma_{em}$  ile çarpımı ilgili kazanç ortamının kazancını belirlemektedir. Projede gerçekleştirilen deneysel çalışmalar neticesinde, ECS'nin ve floresan ömrünün sıcaklık değişimi (kriyojenik sıcaklıkları da kapsayacak şekilde) Cr: LiCAF için literatürde ilk kez rapor edilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında, Cr:LiCAF kristalinin her iki eksenindeki (a- ve c- eksenleri) ECS'in sıcaklığa göre değişimi ve floresan ömrü 78-618 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Sonuç olarak, Cr:LiCAF'da kriyojenik sıcaklıklarda ECS'de orta düzeyde (1.2 ila 1.4 kat) iyileşme ve floresan ömründe (oda sıcaklığından soğutulduğunda) 175 us'den 190 us' ye artış gözlemlenmiştir. İlgili spektroskopik özelliklerin sıcaklık bağımlılıklarına ait analitik fitler tanımlanarak detaylı deneysel spektroskopi verileri literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilmiş bulgular neticesinde, kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile Cr:LiCAF lazer/amplifikatör sistemlerinde elde edilebilir çıkış güçlerinde önemli derecede iyileştirmelerin

mümkün olduğuna inanmaktayız. Projenin spektroskopik yönlere odaklanan bu kısmı, Cr:LiCAF lazerlerin kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için ilk adımı oluşturmuştur. Kriyojenik Cr:Colquiriite lazerlerin doğru modellenmesi için termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, kırılma indeksi vb. gibi termo-mekanik ve termo-optik parametrelerin sıcaklığa bağımlılığını anlamak için gerekli çalışmalar, bu kapsamdaki takip eden açılım hedeflerini oluşturmaktadır.

Bu proje dahilinde Cr:LiCAF kristali ile ayrıca kip-kilitleme ve Q-anahtarlamalı operasyon ile kısa veya yüksek pik gücüne sahip darbeler üretilmesi üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Termal etkileri azaltılmış düşük Cr-katkılı Cr:LiCAF kristalleri kullanılarak darbe enerjisi ve darbe tepe gücü bakımından literatürde şu ana kadar elde edilmiş mevcut sonuçların daha iyi değerlere yükseltilmesi için gerekli çalışmalar olanaklar dahilinde araştırılmıştır. İlgili çalışma rejimlerinde doyurulabilir yarı-iletken soğurucu aynalar (SESAM: Semiconductor saturable absorber mirrors) kullanılmıştır. Proje çalışmalarını konu alan çalışma rejimlerinin ilgili dinamiğine örnek olarak pasif bir mod-kilitleme operasyonunun basit bir şematiği Şekil 1.2 (a)'da verilen diyagram ile temsil edilmektedir. Kısa darbelerin (atmaların) oluşumu kayıp ve doyurulabilir kazanç mekanizmaları cinsinden Şekil 1.2 (b)'de gösterilmiştir. Burada soğurucu yapısı, düşük şiddetli atmalar için (ya da sürekli dalga operasyonu için) nispeten büyük optik kayıplara neden olmaktadır. Bunun yanında yüksek şiddetli kısa atmalar için ayna üzerindeki soğurucu sature olmakta ve lazer kayıpları azalmaktadır. Lazer kavitesi içinde bir atmanın gidiş-dönüş süresi  $T_R$  periyodu ve atma süresi  $\tau_p$  ile tanımlanan bir atma treni üretmesi sağlanmaktadır. Bu sistemde doğal olarak lazer sürekli dalga modunda çalışmak yerine kısa darbeler üretmeyi seçmektedir. Kavite için uygun dispersiyon kontrolü de sağlandığında sistem kararlı femtosaniye darbeler üretebilmektedir. Genel olarak Cr:kolquiritler'in kullanıldığı lazer sistemlerinin dezavantajı doğrusal olmayan kırılma indeks değerinin görece düşük olmasıdır. Böyle bir sistemde sadece Kerr lens modu (KLM) ile yeterli bir modülasyon derinliği elde edilmesi zorlaşmaktadır.



**Şekil 1. 2 (a)** Pasif mod kilitleme için temsili şematik lazer kavitesi **(b)** Kayıp ve doyurulabilir kazanç cinsinden atma oluşumunun gösterimi

Yarı iletken doyurucu emici aynalar (SESAM) (Keller vd., 1992; Keller vd., 1996) pasif mod kilitleme veya birçok çeşit katı hal lazerin Q-anahtarlaması için avantaj sağlayan (Keller 1998, 2004, 2003) yapılar olarak ultra hızlı katı hal lazerlerinin performansına ve gelişmelerine önemli katkılarda bulunmuştur. Bu cihazların hem doğrusal hem de doğrusal olmayan optik özellikleri geniş bir aralıkta tasarlanabildiğinden, cihaz performansı çok çeşitli lazer tasarımları ve çalışma rejimleri için optimize edilebilmektedir. Çalışma dalga boyu  $\lambda$ , modülasyon derinliği (modulation depth)  $R$ , doyma akıcılığı (saturation fluence)  $F_{sat}$  ve emici geri kazanım süresi  $\tau_A$  gibi ana parametreleri, kararlı sürekli-dalga kip-kilitleme (Hönninger vd., 1999), saf Q-anahtarlama (Spühler vd., 1999) veya her ikisinin kombinasyonu (Keller, 1998) gibi çalışma şekilleri için geniş bir aralıkta özel olarak tasarlanabilmektedir. SESAM malzemelerinin önemli limitlerinden biri, birkaç on ila yüzlerce  $\mu\text{J} / \text{cm}^2$  aralığında tipik değerlere sahip doyma akıcılığıdır ( $F_{sat}$ ). Düşük doyma akıcılığına sahip, yüksek güçlere dayanıklı SESAM yapılarının geliştirilmesi gibi alanlar hala aktif araştırma alanlarıdır (Krainer vd., 2002; Zeller vd., 2004, Paschotta vd., 2004).

Önceki çalışmalarımız sonucunda, piyasadan satın alınabilen 800 nm civarında çalışan SESAM yapıların bizim düzeneğimize uygun performans değerlerine sahip olmadığı tespit edilmiştir. Projemiz için halihazırda elimizde Prof. Leslie Kolodziejcki'nin Integrated Photonic Materials and Devices Grubu ile ortak yaptığımız çalışmalarda ürettiğimiz 1-2 örnek kullanılmıştır. Çalışmalarımızda elimizde mevcut bu örneklerle hatta bu örneklerin fiziksel hasar görmemiş sınırlı yüzeyleri kullanılmıştır ve sunulan sonuçlar bu kısıtlar altında elde edilebilmiştir Ayrıca önceki çalışmalarımıza dayanarak özellikle projede hedeflediğimiz yüksek tepe güçleri için daha iyi tasarlanmış SESAM yapılarının gerektiğini öngörmekteyiz. Bu alandaki bilgi birikimimizi artırmak ve teknolojik gelişim amacıyla optimum bir SESAM yapısına ihtiyaç duyulduğundan projemiz dahilinde yeni bir SESAM yapısı dizayn edilmesi ve bu yapının fabrikasyonunun yapılarak test edilmesi planlanmasına rağmen bütçesel kısıtlamalar nedeniyle bu ilave çalışmalar proje kapsamına dahil edilememiştir. Ancak, proje sürecinde gerçekleştirilen benzetim programları ile yapılan çalışmalar dahilinde, projenin yeni tip doyurulabilir ayna



(SESAM/SBR) modellemesi hedefinde grup içi bilgi birikimi, tasarım ve analiz tecrübesi oluşturmak adına halihazırda laboratuvar envanterimizde bulunan ve raporun 2.2 numaralı bölümünde bahsedilecek olan çalışmalarda kullanılan SBR malzeme örnekleri MATLAB, Lumerical ve COMSOL programlarında modellenmiştir. İlgili benzetim programlarında elde edilmiş yansıma karakteristiği, doğrulanması hedeflenen yansıma karakteristikleri ile kıyaslandığında, ilgili malzeme örneğinin başarılı bir biçimde modellenerek, ilgili programlarda yetkinlik ve bilgi birikimi kazanımı gösterilmiştir.

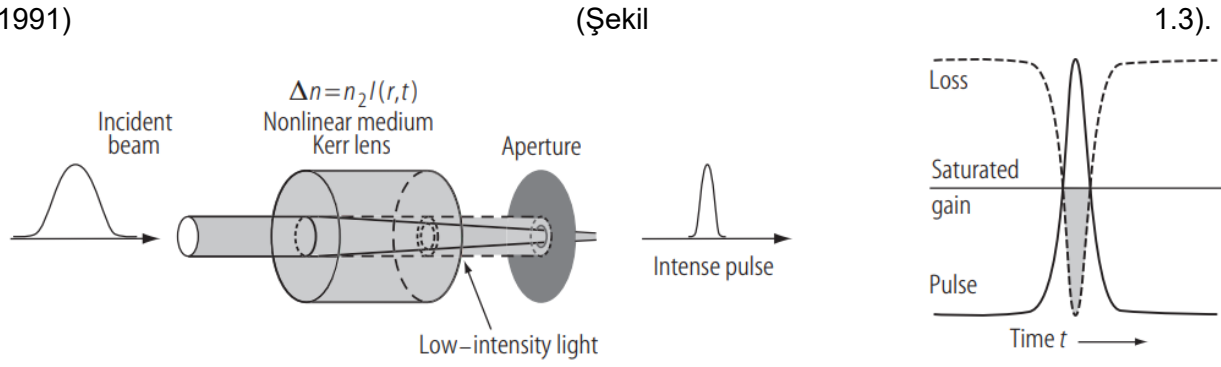
Önceki kısımlarda özetlenen CW çalışma rejiminde güç ölçeklemeleri ve spektroskopik özelliklerin gibi karakterizasyonlarının yanısıra, proje iş paketleri kapsamında gerçekleştirilen Cr:LiCAF kavitesinin farklı çalışma modlarına (Q-anahtarlama, ikinci harmonik üretimi, Cw frekans ayarlama gibi) yönelik çalışmalar, bu bölümün takip eden kısımlarda özetlenmiştir.

İlk olarak, pasif Q-anahtarlama rejimi çalışmalarımız sonucunda, bildiğimiz kadarıyla, lazer diyodu ile pompalanmış bir Cr:LiCAF lazer sisteminde doyurulabilir Bragg reflektörleri (SBR'ler) ile ilk pasif Q-anahtarlama gerçekleştirme deneyleri rapor edilmiştir. Cr:LiCAF lazeri, toplam 3.6 W pompa gücü sağlayan iki adet düşük maliyetli 665 nm geniş alanlı lazer diyot tarafından pompalanmış olup, Q-anahtarlama operasyonu, farklı modülasyon derinliklerine sahip iki farklı AlGaAs tabanlı SBR'nin kullanılmasıyla sağlanmış ve farklı çıkış kuplörü seviyelerinde lazer performansı araştırılmıştır. Q-anahtarlı çalışmada lazer, ortalama 127 mW güçle 800 nm yakınında 1.62  $\mu$  s'ye kadar darbeler üretmiştir. Darbelerin tekrarlama frekansı 18 ve 40 kHz arasında değişiyorken, 3.5  $\mu$  J'ye kadar darbe enerjileri ve 800 nm civarında 1.9 W'a kadar tepe güçleri kavite çıkışında ölçülmüştür (Okuyucu vd. 2021).

SESAM aynalarının kullanıldığı bir diğer iş paketinde, bir Cr:LiSAF lazerde stabil pasif Q-anahtarlı mod kilitli (QML) operasyonu elde edilmesine yönelik çalışmalar başarıyla gerçekleştirilmiştir. Deneylerde 10 mm uzunluğunda, %1.5 Cr katkılı LiSAF kristali iki adet 150 mW'lık tek modlu diyot ile 660 nm'de pompalanmış, QML operasyonunu başlatmak ve sürdürmek için merkezi dalga boyu 850 nm ve modülasyon derinliği %0.8 olan bir AlGaAs bazlı doyurulabilir Bragg reflektörü (SBR) kullanılmıştır. Sonuçta lazer çıkışındaki QML işleminde, 30–70 kHz tekrarlama frekansına sahip 2–2.5  $\mu$ s uzunluğunda Q-anahtarlı zarflar içinde 150–200 MHz'de 5 ps'nin altında uzun mod kilitli darbeler üretmiştir (Mekteplioğlu vd. 2021). Yaklaşık 280 mW'lık bir emilen pompa gücü seviyesinde, QML darbeleri ortalama 50 mW güce sahipken, mod kilitli darbelerin tahmini tepe gücü yaklaşık 0.5 kW olarak hesaplanmıştır. Ek olarak, . Bir kavite içi çift kırılmalı ayar plakasının (BRF) kullanımı ile darbelerin merkezi dalga boyunun 835 ve 865 nm arasında ayarlanmasını sağlamıştır. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, Cr:LiSAF lazerlerde QML işlemine odaklanan ilk çalışmadır. Bu ilk çalışmadaki bulgular,

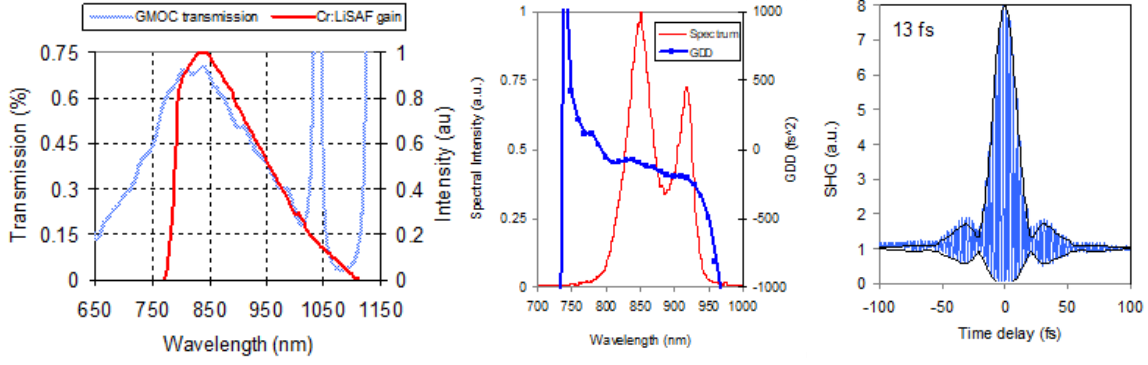
Cr:LiSAF'ta QML işleminin dinamiklerini anlamaya yönelik bir ilk girişimi temsil etmekte olup, daha fazla çalışma, mod kilitleme darbe genişliklerini 1-ps seviyesinin altına düşürmeye ve ayrıca daha fazla tepe güç ölçeklendirmesi için mod kilitlemenin modülasyon derinliğini artırmaya yönelik olacaktır.

Çalışmalarımızda araştırdığımız bir kip-kilitleme modu da Kerr-lens kip-kilitleme (KLM) mekanizmasıdır (Spence vd., 1991). KLM'de, enine Kerr etkisi, ışının yüksek yoğunluklu kısmını, düşük yoğunluklu parçadan daha güçlü bir şekilde odaklayan bir Kerr merceği üretir. Böylece, bir boşluk içi açıklık ile birlikte Kerr merceği, yüksek yoğunluk için daha az kayıp üretir ve etkili bir hızlı doyurucu soğurucu oluşturur (Keller vd., 1991; Salin vd., 1991; K. Negus vd., 1991)



**Şekil 1.3** Kerr lensi etkisi ile KLM elde edilmesi

Kazanç ortamında veya bir başka malzemede, kırılma indisinin arttırılmış yoğunluk olan  $\Delta n = n_2 I(r,t)$  ile arttırıldığı kavite içi odağında Kerr lensi etkisi ile KLM elde edilmektedir ( $n_2$ : doğrusal olmayan kırılma indisi,  $I(r,t)$ : radyal ve zamana bağlı kısa darbeleri bir lazer ışınının yoğunluğu) Kerr lensleme mekanizması bant-genişliği sınırlamasına sebep olmadığından, en kısa darbeler ve Cr:kolquirit lazerlerden elde edilebilecek en geniş dalgaboyu ayar aralığı KLM sistemlerinden elde edilmiştir. Ancak, KLM modu kip-kilitli Cr: kolquirit lazerleri için, Ti:Safir'e kıyasla neredeyse 8 kat daha küçük olan bağıl doğrusal olmayan kırılma indisi ( $n_2$ ) (Ti:Sapphire ( $1.2 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ ), Cr:LiCAF ( $0.4 \times 10^{-16} \text{ cm}^2/\text{W}$ )), mod-kilitli lazer sisteminin uzun süreli stabilitesinin sağlanması konusundaki ana zorluğu oluşturmaktadır. Ayrıca, KLM Cr:LiCAF lazerlerinde kavitenin stabilite kenarına yakın bir şekilde kritik hizalanması ihtiyacı, lazer verimliliğinin (ortalama çıkış gücü / pompa gücü), nispeten düşük çıkmasına sebep olmaktadır (Demirbas vd., 2011a). Son olarak kullanılacak olan diyotların görece düşük parlaklıkları (yüksek  $M^2$  değerleri) de KLM sürecinde zorluklara yol açmaktadır.



**Şekil 1. 4** (Sol) Cr:LiSAF lazerlerinde kullanılan GMOC aynasının geçirgenliğinin ve Cr:LiSAF malzemesinin optik kazancının dalgaboyuyla değişimi. (Orta ve Sağ) Cr:LiSAF lazerinden elde ettiğimiz 13-fs uzunluğunda, 25 mW ortalama güçteki (15 kW tepe gücü) optik darbelerin ölçülmüş optik spektrumu ve darbe uzunluğu.

Bu deneylerde daha verimli ve stabil KLM oluşmasını sağlamak için, son yıllarda gurubumuzun katkısıyla da geliştirilmiş olan kazanç-uyumlu çıkış aynası (gain-matched output coupler, GMOC) (Chen vd., 2010; Canbaz vd., 2014) teknolojisi kullanılmıştır. GMOC aynalarında, çıkış aynası geçirgenliği kazancın yüksek olduğu dalga boylarında yüksek, kazancın düşük olduğu dalga boylarında düşük tutulmuştur (Şekil 1.4). Bu sayede net kavite kazancının, kazanç bandı içindeki tüm dalga boylarında kabaca eşitlenmesi sağlanır ve bu da kazanç filtreleme etkisini minimize ederek, lazerin verimli ve stabil şekilde KLM rejiminde çalışmasına katkı sağlar. Burada Cr:LiCAF lazer malzemesi ile elde etmeyi hedeflediğimiz tepe gücü değerleri, literatürde Cr: kolquirit lazer malzemeleriyle elde edilmiş en iyi değerlerin 3-4 kat üzerindedir. Burada çok modlu diyotların optimum olmayan profillerinden dolayı, bu sistemlerde verimli şekilde KLM elde etmekte zorluklar söz konusudur. Deneysel çalışmalarımızda, KLM etkisini optimize eden, termal etkileri minimize edip, lazer güçlerini maksimize eden bir lazer konfigürasyonu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda için iki adet 210 mW gücünde tek-modlu diyot ile pompalanan 2.5 mm 11% dourulmuş bir Cr:LiCAF lazer kavitesi (Şekil 2.71'de verilmiş) kullanılmıştır. İlgili kavitede GMOC aynalarının kullanımı, farklı kol uzunlukta lazer kavitesi denemeleri, hassas milimetrik ayna tutucusu konumlandırma denemelerine rağmen sonucunda lazer çıkışının net bir şekilde Q-anahtarla modunda çalıştığı fakat sürekli dalga kip-kilitli moda geçiş yapmadığı gözlemlenmiştir. İlgili Q-anahtarlama rejiminde lazer çıkışında 39.8 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir.

Proje kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak, çift kırınımlı filtre tasarımı konusunda literatüre katkıda bulunmak açısından çalışmalar da yapılmıştır. Yapılan çalışmalarda çift kırınmalı filtreler kullanılarak iki-renkli Cr:LiCAF lazerlerin performanları incelenmiştir. Öncelikli

olarak kesme açısı yüzey üstü ( $\sigma=90^\circ$ ) ve yüzey dışı olan ( $\sigma=25^\circ$ ) 2 mm kalınlığındaki çift kırılmalı filtreler için, açılarının doğrulamasına yönelik çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra ise kalınlıkları yüzey üstü filtre için 2, 4, 8, ve 16 mm olan ve yüzey dışı filtre için 2, 4, 8 mm olan filtreler ile iki-renkli Cr:LiCAF lazerlerinin performansları ölçüldü. Yapılan çalışmalar sonucunda yüzey üstü çift kırılmalı filtreler ile dalgaboyu 772-810 nm aralığında değiştirilebilen iki renkli Cr:LiCAF lazeri üretildi. Öte yandan, yüzey dışı çift kırılmalı filtre ile yapılan çalışmada ise dalgaboyu 745-850 nm aralığında değiştirilebilir iki renkli Cr:LiCAF lazeri elde edilmiştir (Erturk, 2022).

Son olarak, Cr:LiSAF kristalinin kullanıldığı bir başka iş bölümünde, yakın kızılötesi ve görünürde ultra geniş ayarlanabilirliğe sahip, düşük maliyetli ve kompakt bir Cr:LiSAF lazer sistemi sunulmaktadır. 210 mW tek modlu kırmızı diyotla pompalanan sürekli dalga (cw) lazer deneylerinde 190 mW'a kadar çıkış gücü, 795–1103 nm ayar aralığı ve %54'lük bir eğim verimliliği elde edilmiştir. Beta-baryum borat (BBO) kristalleri ile kavite içi frekansı ikiye katlama yoluyla, mordan yeşile (402 535 nm) spektral bölgeleri sürekli olarak kapsayan cw ikinci harmonik ayarlama aralığı elde edilmiştir. Basit pompa sistemine rağmen, 422.5 nm'de 17.5 mW'a kadar cw frekansı ikiye katlanmış güç seviyelerine ulaşabildiği gösterilmekle birlikte, %4.2'lik bir optik-optik dönüşüm verimliliğine ve %1.4'lük bir elektrik-optik dönüşüm verimliliğine karşılık gelmektedir (Mekteplioğlu, 2023). Bu kompakt, düşük maliyetli ve basit Cr:LiSAF lazer sisteminin spektroskopi, atom soğutma/tutma ve kuantum optiği dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için çekici bir kaynak olabileceğine inanılmaktadır.

## 1.1 Ortak Literatür Özeti İçin Kaynaklar

- J.P. Gordon, H.J. Zeiger, C.H. Townes. 1954. "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in microwave spectrum of NH<sub>3</sub>", Phys. Rev. 95, 282
- W. Koechner, 2006. Solid-state laser engineering, in: 6th Rev. And Updated, Springer, New York,
- T.H. Maiman. 1960. "Stimulated optical radiation in ruby", Nature 187, 493–494
- J. F. Pinto, L. Esterowitz, and G. H. Rosenblatt. 1995. "Frequency tripling of a Qswitched Cr:LiSAF laser to the UV region," IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 1, 58-61
- B. Agate, A. J. Kemp, C. T. A. Brown, and W. Sibbett. 2002. "Efficient, high repetition-rate femtosecond blue source using a compact Cr : LiSAF laser," Opt. Express 10, 824-831
- U. Demirbas, and I. Baali. 2015. "Power and efficiency scaling of diode pumped Cr:LiSAF lasers: 770–1110 nm tuning range and frequency doubling to 387–463 nm," Opt. Lett. 40, 4615-4618.
- U. Demirbas, I. Baali, D. A. E. Acar, and A. Leitenstorfer. 2015. "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet," Opt. Express 23, 8901-8909
- R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, and M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser," Opt. Lett. 16, 820-822.
- S. Tsuda, W. H. Knox, and S. T. Cundiff. 1996. "High efficiency diode pumping of a saturable Bragg reflector-mode-locked Cr:LiSAF femtosecond laser," Appl. Phys. Lett. 69, 1538-1540.
- G. J. Valentine, J. M. Hopkins, P. Loza-Alvarez, G. T. Kennedy, W. Sibbett, D. Burns, and A. Valster. 1997. "Ultralow-pump-threshold, femtosecond Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub> laser pumped by a single narrow-stripe AlGaInP laser diode," Opt. Lett. 22, 1639-1641.
- B. Agate, B. Stormont, A. J. Kemp, C. T. A. Brown, U. Keller, and W. Sibbett. 2002. "Simplified cavity designs for efficient and compact femtosecond Cr:LiSAF lasers," Opt. Comm. 205, 207-213.

- P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp. 2009. "Directly diode-laserpumped Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* **34**, 3334-3336.
- J. H. Wolter, M. A. Ahmed, and T. Graf. 2017. "Thin-disk laser operation of Ti:sapphire," *Opt. Lett.* **42**, 1624-1627.
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and H. W. Newkirk. 1989. "Laser performance of LiSAIF6:Cr3+," *J. Appl. Phys.* **66**(3), 1051–1056.
- S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, and W. F. Krupke. 1988. "LiCaAlF6:Cr3+ a promising new solid-state laser material," *IEEE J. Quantum Electron.* **24**(11), 2243–2252.
- L. K. Smith, S. A. Payne, W. L. Kway, L. L. Chase, and B. H. T. Chai. 1992. "Investigation of the laser properties of Cr3+:LiSrGaF6," *IEEE J. Quantum Electron.* **28**(11), 2612–2618.
- I. T. Sorokina, E. Sorokin, E. Wintner, A. Cassanho, H. P. Jenssen, and R. Szipöcs. 1997. "14-fs pulse generation in Kerr-lens mode-locked prismless Cr:LiSGaF and Cr:LiSAF lasers: observation of pulse self-frequency shift," *Opt. Lett.* **22**(22), 1716–1718
- S. Uemura and K. Torizuka. 2000. "Generation of 10 fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Cr: LiSAF laser," *Jpn. J. Appl. Phys.* **39**(Part 1, No. 6A), 3472–3473
- P. C. Wagenblast, U. Morgner, F. Grawert, T. R. Schibli, F. X. Kärtner, V. Scheuer, G. Angelow, and M. J. Lederer. 2002 "Generation of sub-10-fs pulses from a Kerr-lens mode-locked Cr3+:LiCAF laser oscillator by use of third-order dispersion-compensating double-chirped mirrors," *Opt. Lett.* **27**(19), 1726–1728
- U. Demirbas, S. Eggert, and A. Leitenstorfer. 2012. "Compact and efficient Cr:LiSAF lasers pumped by one single spatial-mode diode: a minimal cost approach," *J. Opt. Soc. Am. B* **29**(8), 1894–1903
- R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, and M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF6 laser," *Opt. Lett.* **16**(11), 820–822.

- S. Tsuda, W. H. Knox, and S. T. Cundiff. 1996. "High efficiency diode pumping of a saturable Bragg reflector-modelocked Cr:LiSAF femtosecond laser," *Appl. Phys. Lett.* **69**(11), 1538–1540
- G. J. Valentine, J. M. Hopkins, P. Loza-Alvarez, G. T. Kennedy, W. Sibbett, D. Burns, and A. Valster. 1997. "Ultralow-pump-threshold, femtosecond Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub> laser pumped by a single narrow-stripe AlGaInP laser diode," *Opt. Lett.* **22**(21), 1639–1641.
- D. Kopf, K. J. Weingarten, G. Zhang, M. Moser, M. A. Emanuel, R. J. Beach, J. A. Skidmore, and U. Keller. 1997. "High-average-power diode-pumped femtosecond Cr:LiSAF lasers," *Appl. Phys. B* **65**(2), 235–243
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," *J. Opt. Soc. Am. B* **9**(12), 2271–2273
- J. K. Jabczynski, W. Zendzian, Z. Mierczyk, and Z. Frukacz. 2001. "Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal," *Appl. Opt.* **40**(36), 6638–6645
- D. Klimm and P. Reiche. 1999. "Ternary colquiriite type fluorides as laser hosts," *Cryst. Res. Technol.* **34**(2), 145–152.
- D. Klimm, R. Uecker, and P. Reiche. 2005. "Melting behavior and growth of colquiriite laser crystals," *Cryst. Res. Technol.* **40**(4-5), 352–358
- A. Dergachev, J. H. Flint, Y. Isyanova, B. Pati, E. V. Slobodtchikov, K. F. Wall, and P. F. Moulton. 2007. "Review of multipass slab laser systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **13**(3), 647–660.
- U. Demirbas, A. Sennaroglu, F. X. Kartner, and J. G. Fujimoto. 2009. "Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr<sup>3+</sup>: LiCAF lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* **26**(1), 64–79
- U. Demirbas, M. Schmalz, B. Sumpf, G. Erbert, G. S. Petrich, L. A. Kolodziejcki, J. G. Fujimoto, F. X. Kärtner, and A. Leitenstorfer. 2011. "Femtosecond Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers pumped by tapered diode lasers," *Opt. Express* **19**(21), 20444–20461

- Umit Demirbas, Ilyes Baali, Durmus Alp Emre Acar, and Alfred Leitenstorfer. 2015. "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet," *Opt. Express* 23, 8901-8909
- E. Sorokin, *Few-Cycle Laser Pulse Generation and Its Applications*. 2004, F. X. Kartner, ed. (Springer-Verlag,) pp. 3–71.
- Kopf, D., Weingarten, K., Zhang, G. et al. 1997. "High-average-power diode-pumped femtosecond Cr:LiSAF lasers". *Appl Phys B* 65, 235–243.
- C. Hönniger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller. 1999. "Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 46-56
- U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, and M. T. Asom. 1992. "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry–Perot saturable absorber," *Opt. Lett.* 17, 505-507
- U. Keller et al., 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 435-453,
- U. Keller, *Nonlinear Optics in Semiconductors*, vol. 59, ed. by E. Garmire, A. Kost (Academic, Boston, MA, 1999), p. 211
- Haiml, M., Grange, R. & Keller, U. 2004. "Optical characterization of semiconductor saturable absorbers.", *Appl. Phys. B* 79, 331–339.
- Keller, U. 2003. "Recent developments in compact ultrafast lasers." *Nature* 424, 831–838.
- C. Hönniger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller. 1999. "Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 46-56
- G. J. Spühler, R. Paschotta, R. Fluck, B. Braun, M. Moser, G. Zhang, E. Gini, and U. Keller. 1999. "Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 376-388
- L. Krainer, R. Paschotta, S. Lecomte, M. Moser, K. J. Weingarten and U. Keller. 2002. "Compact Nd:YVO/sub 4/ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 10, pp. 1331-1338.



- G. J. Spühler, L. Krainer, E. Innerhofer, R. Paschotta, K. J. Weingarten, and U. Keller. 2005. "Soliton mode-locked Er:Yb:glass laser," *Opt. Lett.* 30, 263-265.
- R. Paschotta, L. Krainer, S. Lecomte, G.J. Spuhler, S.C. Zeller, A. Aschwanden, D. Lorensen, H.J. Unold, K.J. Weingarten, U. Keller. 2004. "Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power", *New J. Phys.* 6, 174.
- L. R. Brovelli, U. Keller, and T. H. Chiu. 1995. "Design and operation of antiresonant Fabry–Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* 12, 311-322
- Spühler, G.J., Weingarten, K.J., Grange, R. et al. 2005. "Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence." *Appl. Phys. B* 81, 27–32.
- Spence, D.E., Kean, P.N., Sibbett, W. 1991. "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser". *Opt. Lett.* 16, 42–44.
- Keller, U., 'tHooft, G.W., Knox, W.H., Cunningham, J.E. 1991. "Femtosecond pulses from a continuously self-starting passively mode-locked Ti:sapphire Laser", *Opt. Lett.* 16, 1022–1024.
- Salin, F., Squier, J., Pich´e, M. 1991. "Modelocking of Ti:Sapphire lasers and self-focusing: a Gaussian approximation". *Opt. Lett.* 16 1674–1676.
- Negus, D.K., Spinelli, L., Goldblatt, N., Feugnet, G. 1991. "Sub-100 femtosecond pulse generation by Kerr lens modelocking in Ti:Sapphire", *Advanced Solid-State Lasers*, Dub´e, G., Chase, L. (eds), Washington, D.C.: Optical Society of America, , Vol. 10, p. 120–124
- Umit Demirbas, Gale S. Petrich, Duo Li, Alphan Sennaroglu, Leslie A. Kolodziejski, Franz X. Kärtner, and James G. Fujimoto, 2011. "Femtosecond tuning of Cr:colquiriite lasers with AlGaAs-based saturable Bragg reflectors," *J. Opt. Soc. Am. B* 28, 986-993
- Hönninger, C., Paschotta, R., Morier-Genoud, F., Moser, M., Keller, U. 1999. "Q-switching stability limits of cw passive modelocking", *J. Opt. Soc. Am. B* 16 () 46–56.].
- Spuehler, Gabriel & Weingarten, Kurt & Grange, Rachel & Krainer, L & Haiml, M & Liverini, Valeria & Golling, M & Schön, Silke & Keller, U. 2005. "Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence.", *Applied Physics B.* 81. 27-32.
- Erturk, Z., Okuyucu, S., Kilinc, M., Ozturk, Y., Pergament, M., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2022). "Broadly tunable two-color lasing of Cr: LiCAF with on-surface and off-surface optical axis birefringent filters: performance comparison". *Applied Optics*, 61(36), 10735-10743.
- Mekteplioglu, M. F., Ozturk, Y., Pergament, M., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2023). "Broadly tunable (402–535 nm) intracavity frequency-doubled Cr: LiSAF laser". *Applied Physics B*, 129(1), 1-9.

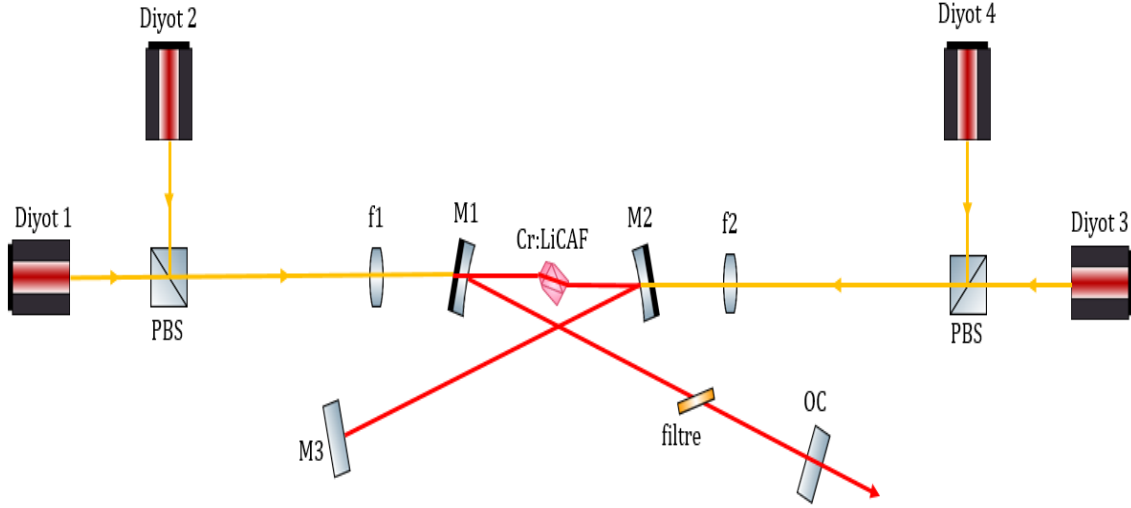
- Mekteplioglu, M. F., Ozturk, Y., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2021). "Tunable Q-switched mode-locked Cr: LiSAF laser". *Optics Communications*, 488, 126836.
- Okuyucu, S., Ozturk, Y., & Demirbas, U. (2021). "Passively Q-switched Cr: LiCAF laser with a saturable Bragg reflector". *Applied Physics B*, 127(4), 54.

## 2. GEREÇ VE YÖNTEM

Bu projede kapsamında Antalya Bilim Üniversitesi Lazer Teknoloji Laboratuvarı olanakları ve TÜBİTAK tarafından sağlanan destekler kullanılarak düşük Cr iyon katkılı, diyot-pompa, ucuz, kompakt, verimli, lazer ve yükselticilerinin ülkemizde geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda öncelikle elimizde bulunan görece düşük güçlü lazer diyotlar (1.5 W) yardımıyla elimizde mevcut farklı tiplerdeki kazanç ortamları (GSGG, LiSAF ve yüksek oranda katkılı LiCAF kristalleri) ile lazer düzenekleri kurulmuştur. Bu gelişme dönemi için projede başlatılan bursiyerlerle birlikte proje ekibi mevcut olanaklar ve eldeki malzemeler ile öncü çalışmalar gerçekleştirerek gerekli know-how ve pratik tecrübe edinilmesi sağlanmıştır. Bu kapsamda 3 (üç) makale hazırlanarak uluslararası SCI dergilere gönderilmiştir. Yeni tedarik edilen daha güçlü diyotlar (2.4 W) kullanılarak çıkış gücü ve performansları artırılmış lazer sistemlerinin geliştirilmesi bu diyotların çift-emiter özelliğinin kavite kurulumlarında engel teşkil etmesi nedeniyle tamamlanamamıştır. Bu konuda tek-emiter özellikte yüksek güçlü uygun pompa kaynaklarının ticari olarak piyasaya sunulması beklenmektedir. Proje belirlenen hedefler doğrultusunda mevcut diyotlar ve proje özelinde tasarılan ve yeni üretimi yapılan kristaller kullanılarak oluşturulan çalışmalar sonraki bölümlerde ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

Aleksandrit, zümrüt, borat, GSGG (gallium scandium gadolinium garnet), YSAG (yttrium scandium aluminum garnet), GGG (gadolinium gallium garnet), LiCAF (lithium calcium aluminum fluoride), vb ana malzemelere  $Cr^{+3}$  iyonu katkılanarak elde edilen kristal yapılar, lazerlerin ihtiyaç duyduğu ahenkli ışık kaynağı işlevine sahip hale gelmektedir. Yüksek güç uygulamalarının gerekliliği olarak yüksek ısı iletkenlik katsayısı, maksimum ısıl sönme sıcaklığı, düşük kuantum defekti, ayrık-durum soğurma ve yükseltme çevrimi (upconversion) özellikleri göz önüne alınarak bu projede Cr:LiCAF kullanılmasına karar verilmiştir. Proje kapsamında kazanç malzemesi olarak kullanılan bu kristalin sınırları test edilerek ve güç çıkışının artırılması sağlanmıştır. Öncelikle yüksek kalitede bir kristal fabrikasyonu ile pasif kayıpların  $0.2 \text{ cm}^{-1}$  ve nano boyuttaki çökeltilerden kaynaklanan harici kayıpların  $2 \text{ cm}^{-1}$  seviyelerinde olması üretim sürecinde talep edilmiştir. Ayrıca Cr:LiCAF kristalinde katkı maddesi olan krom iyonu yüzdesi ilk defa  $0.8-1$  seviyelerine indirgenerek, kullanılacak uzun ( $\approx 1 \text{ cm}$ ) kristallerle, oluşan ısı daha büyük hacimlere yayılması, daha büyük bir yüzey alandan kristal tutucusuna aktarılacak ve sonuç olarak kristal içinde oluşacak sıcaklıklar düşürülmesi, ve termal etkilerin minimize edilmesi sağlanmıştır. Bu sayede sürekli dalga ve kip-kilitleme durumlarında termal etkiler

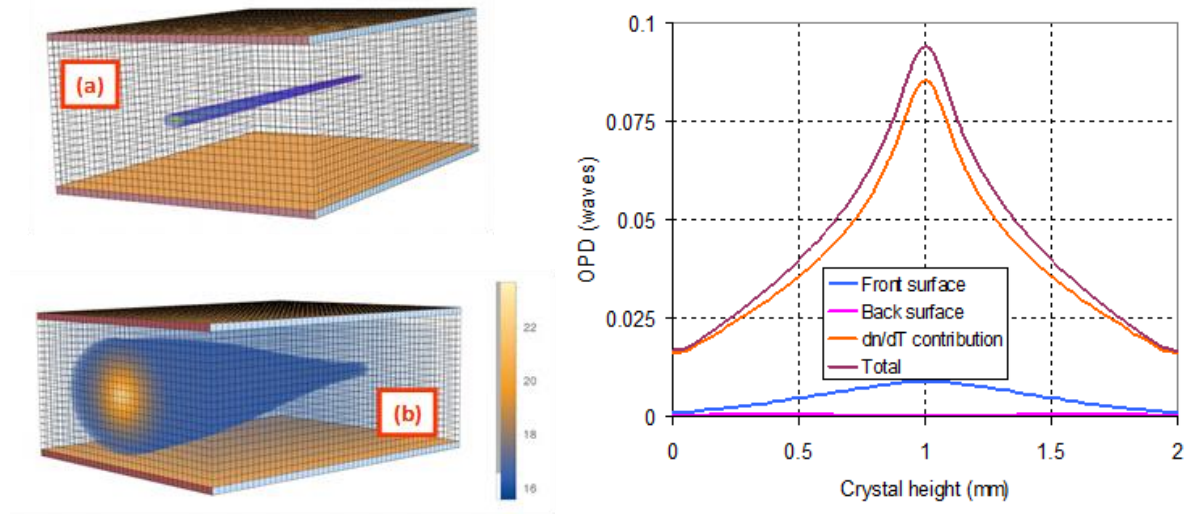
nedeniyle sınırlanan lazer çıkış güçleri çok daha üst seviyelere çıkarılabilmektedir. Proje kapsamında oluşturulan deneysel düzenekler genellikle X-biçimli kavite mimarisinde aşamalı olarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.1 ilk mevcut kristaller ile ilk aşamada kurulan ve jenerik diyebileceğimiz sürekli-dalga (cw) Cr:LiCAF lazer rezonatörünü göstermektedir.



**Şekil 2. 1** Sürekli-dalga modunda çalışan dalgaboyu değiştirilebilir (750-850 nm) diyot-pompanlı Cr:LiCAF lazer düzeneği

Başlangıçta sürekli dalga düzeneği için 4 adet 1.5 W gücündeki doğrusal polarizasyona sahip n-Light Photonics çoklu mod lazer diyotlar (MMD) kullanılarak çalışma dalga boyu 665 nm civarında merkezi spektruma sahip bir güçle sistemin pompalanması sağlanmıştır. Normal katalog değerlerinde bu lazer diyotlar 1.8-W seviyesine kadar güç de verebilmesine rağmen kullanım ömürleri dikkate alındığında beklendiği gibi daha düşük değerlerde pompa gücü sağlanabilmiştir. Bu diyot sürücüleri veri yaprağı incelendiğinde  $1 \mu\text{m} \times 150 \mu\text{m}$  ebatlarında enleme alana sahip emitörlerin (salgaç) dahili mikrolensler yordamıyla ışığı eklem düzlemine dik biçimde paralel hale getirdiği (collimate) görülmektedir. Bu nedenle çoklu-mod diyot sürücü çıkışında odak uzaklığı 4.5 mm olan küresel sapıncısız (asferik) lensler ve uygun değerde nümerik boşluk kullanılarak ışık toplanmıştır. Polarize demet bölücü (PBS) küp iki farklı sürücüden gelen kaynağı polarize biçimde çoğullayarak (multiplexer) kazanç kristalinin bir tarafına aktarılmıştır. Benzer şekilde diyot 3 ve diyot 4 ışınları da birleştirilerek rezonatörün diğer tarafından kristal üzerine gönderilmiştir. Kolime olmuş diyot ışınlarını lazer kristali üzerine odaklamak için de 50-100 mm arası odak uzunluğuna sahip lensler ( $f_1$ ,  $f_2$ ) kullanılmıştır. Rezonatör M1, M2, M3 ve OC aynalarından oluşmaktadır. M1 ve M2 aynaları içbükey olup

çapları 7.5, 10 ve 15 cm olan üç ayrı ayna setinin denenmesi ve optimum gücü veren setin bulunması sağlanmıştır. Bu iki ayna (M1-M2) aynı zamanda pompa aynasıdır, yani 750-850 nm dalgaboyu aralığında yüksek yansıtıcı olmaları dışında 650 nm aralığında da yüksek geçirgenliğe sahiptir. Kavitedeki OC aynası çıkış aynasıdır (output coupler). Yapılan çalışmalarda lazer performansının çeşitli oranlarda Cr-katkılı Cr:LiCAF kristallerinde nasıl değiştiği detaylı olarak incelenmekte, yapılan termo-opto-mekanik simülasyonlar ve termal kamera ile ısı ölçümleri kullanılarak, performans iyileştirmesi için gerekler saptanmıştır.

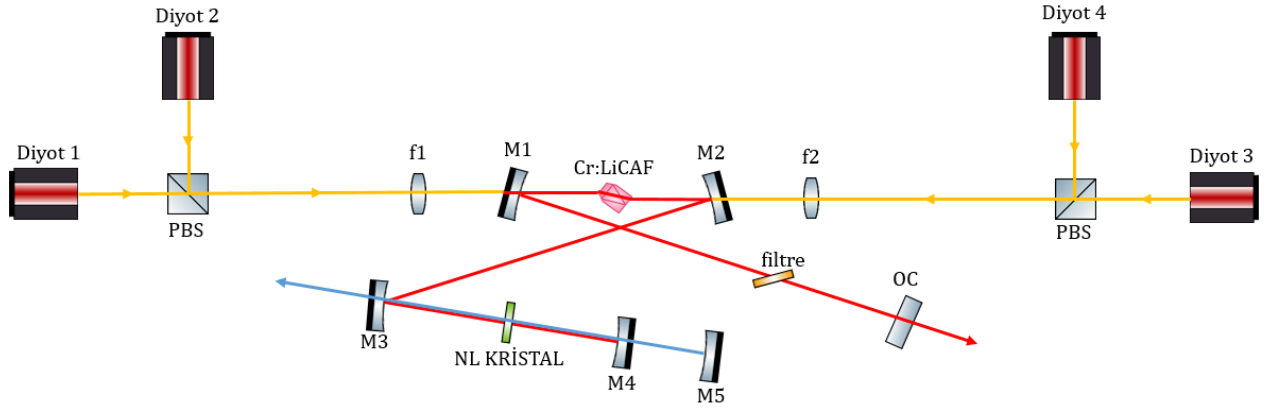


**Şekil 2. 2(a)** Tm:YAG kristali içinde pompa kaynağının ilerlemesi. **(b)** Hesaplanan sıcaklık dağılımı. (Sag) Sıcaklık dağılımına bağlı olarak kırılma indeksinin sıcaklıkla değişiminden ( $dn/dT$ ) ve kristal yüzeylerinin sıcaklıkla genişlemesinden kaynaklı optik yol değişimi (OPD: optical path difference).

Burada kısaca yapılan termo-opto-mekanik simülasyonların çerçevesi aktarılacaktır. Termal merceklenme, depolarizasyon kayıpları ve nihayetinde kırılmadan sorumlu olan kazanım ortamındaki termal etkiler, yüksek ışın kalitesine sahip yüksek güçlü lazer sistemlerinin başarılmasını zorlaştıran temel etmenlerden birkaçıdır. Lazer kristallerinde termal etkileri araştırmanın en yaygın yolu, termo-optik yöntemler (termal merceklenme veya depolarizasyon ölçümleri) kullanmaktır. Ancak, bu yöntemler sadece prob alanı içindeki termal gradyanlarla orantılı olan ve az çok bilinen termo-optik katsayılarla ilişkili miktarları vermektedir. Benzer şekilde, sonlu elemanlar hesaplamaları ile elde edilen sıcaklıklarda, çubuk yüzey sıcaklığına göre ifade edilen sadece bağıl sıcaklık dağılımlarının elde edilmesini sağlamaktadır. Bu da tahmin edilmesi çok zor olan sınır koşullarına bağlı olduğu için temsili modellerin oluşturularak güvenilir sonuçların elde edilmesini zorlaştırmaktadır. Alternatif olarak, doğrudan sıcaklık haritalaması, pompanın neden olduğu termal etkileri anlamak için kullanışlı olan ölçüm

mekanizmalarından biridir (Chénais vd., 2004). Bu yöntem sayesinde, ısıtma etkilerini azaltmak ve kırılmayı önlemek için çok önemli parametrelerden biri olan kristal ve çevresindeki montaj birimi arasındaki termal temas sırasında gerçekleşen ısı transfer katsayısı ile ilgili nicel bilginin elde edilerek yüksek güçlü lazer sistemleri optimize edilmektedir. Bu sayede, ilgili malzeme için sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen nümerik metodlardan elde edilen sonuçların doğruluğunun test edilebilmesinin yolu açılmaktadır. Örnek olarak Şekil 2.2’de gurubumuz tarafından Tm:YAG malzemesi için yapılmış olan termo-opto-mekanik simülasyonlar yer almaktadır. Bu projede, TÜBİTAK tarafından sağlanacak bütçe ile alınacak bir yüksek çözünürlüklü termal kamera aracılığı ile aktif kazanç ortamı olarak kullanılan düşük krom katkılı Cr:LiCAF kristali üzerindeki sıcaklık dağılım haritasının çıkartılması ve ısı transfer katsayısının hesaplanması ile bu malzemeye ait sıcaklık karakterizasyonu nitel ve nicel olarak çıkarılacaktır. Bu şekilde Sonlu Elemanlar Metodu (FEM) ile gerçekleştirilen sıcaklık analizlerinden elde edilecek sonuçlar deneysel çalışmalarla karşılaştırılmış ve lazer sistemi optimize edilmiştir.

Yüksek güçlü sürekli-dalga Cr:LiCAF lazeri kullanılarak optik rezonatör içine yerleştirilmiş bir nonlinear kristal ile dalgaboyu 375-425 nm aralığında değiştirilebilen, olabildiğince yüksek optik güce sahip ikincil harmonik elde edilmiştir. Şekil 2.3 bu amaçla kurulan jenerik optik düzeneğin mimarisini göstermektedir. Burada Şekil 2.1’de gösterilen düzenden farklı olarak, farklı dalga boylarını da kapsayacak biçimde frekans katlama (frequency doubling) yapabilmek için CW düzeneğindeki düz yüksek yansıtıcı M3 aynası düzenden çıkarılarak kavite uzunluğu artırılabilecektir. Çıkış aynasının (OC) geçirgenliği düşürülerek doğrusal olmayan dönüşüm verimliliğinde iyileştirme sağlanacak ve kavite içi güç seviyesinde artış sağlanacaktır. Uygun eğrilik yarıçaplarında iki adet eğik yüksek yansıtıcı ayna (M3 ve M4) arasına yerleştirilen nonlinear (NL) kristal ile 800 nm civarında ikincil harmonik üretimi gerçekleştirilecektir. Elde edilen ikincil ışık kaynağı yüksek yansıtıcılı metal yansıtıcı ayna (M5) yordamı ile lazer kavite içine geri yansıtılacaktır. Burada nonlinear malzemenin yerleştirildiği rezonatör ortamının mavi ışığa karşılık gelen 400 nm dalgaboyunda %90 civarında bir iletim katsayısına sahip olması gerekmektedir. Burada en uygun nonlinear kristalin ne olduğu önce nümerik olarak saptanmış, daha sonra da bütçe imkanları dahilinde tedarik edilen kristaller ile bu konuda deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2. 3** Dalgaboyu değiştirilebilir sürekli dalga mavi ışınımı üretmek için kullanılacak Cr:LiCAF lazer sistemi

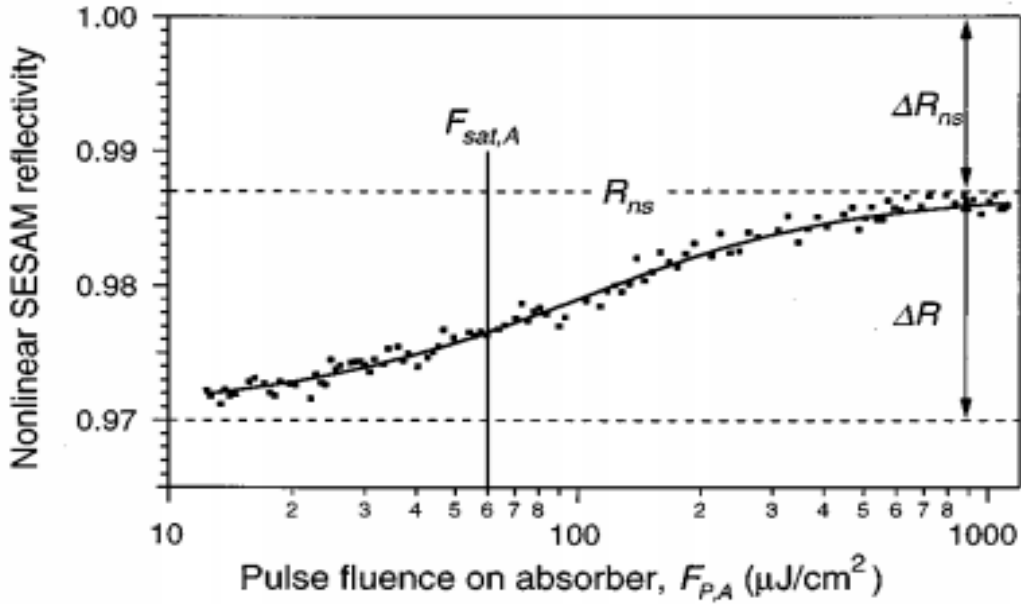
Bilindiği üzere optik kavite ler sınır koşulları ve kavite uzunluğu  $L$  dikkate alınarak  $L = m \lambda / 2$  uzamsal kipler üretmektedir ( $m$  en yakın tam sayıya ve  $\lambda$  dalga boyuna karşılık gelmektedir). Birden fazla uzamsal modun faz uyumluluğu içinde salınımı ile koherent ışık elde edilmesi kip-kilitleme olarak adlandırılmaktadır. Burada, sürekli-dalga çalışma prensibindeki rastgele faz bilgisi yerine, faz ifadelerinin kısa bir zaman dilimi için yapıcı biçimde girişim oluşturması gerekmektedir. Kip-kilitleme işlevi için öncelikle grup hız saçınımı (Group Velocity Dispersion GVD) mekanizmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Gerek kazanç materyali gerekse çevresel optik komponentlerin frekans bağımlı (dispersif) özelliklere sahip olması üretilen darbelerin ilerlemesi anında spektral faz bilgisini değiştirmektedir. Kümülatif faz eklenmesi ve kavite içinde her gidiş-dönüşte darbe genişlemesi GVD'ye neden olmaktadır. Bu amaçla iki adet GTI interferometre ayna kullanılarak  $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCAF}$  kristalinde  $+250 \text{ fs}^2$  kadar dispersiyon düzeltmesi sağlanmıştır. Olanaklar ölçüsünde özel aynalar (chirped mirrors) ve prizma çifti de deneylere eklenmiştir. Bu aşamada toplam gidiş-dönüş kavite dispersiyonu hesaplanmıştır. Doğrusal olmayan etkileri azaltmak için gerekli darbe kısaltma, dispersiyon ve kazanç bant genişliği kısıtları bağlamında kararlı durumda ulaşılan sonuçlar gözlemlenmiştir. Antalya Bilim Üniversitesi Lazer ve Fotonik Araştırma laboratuvarında bulunan mevcut ekipman ile proje kapsamında temin edilen veya üretilen yeni aygıtlar, işbirliği yapılmakta olan kuruluşlardan ödünç alınacak bileşenler kullanılarak farklı deney ve gözlem çalışmaları yapılmıştır.

Proje kapsamında analizi gerçekleştirilen kip-kilitleme çalışma şekli için SESAM aygıtının kullanıldığı lazer sistemi ve KLM lazer sistemi olmak üzere iki farklı sistem üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmiş ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Yarı iletken doyurucu emici

ayna (SESAM), tümü yarı iletken teknolojsi kullanılarak oluşturulan ve yarı iletken doyurulabilir bir emicinin ayna yapısına entegre edilerek optik yoğunluk arttıkça yansımalarının artması sağlanan bir ayna türüdür. SESAM'lar pasif kip-kilitleme ve birçok katı hal lazer türünün Q-anahtarlaması için avantajlı bir seçenek oluşturmaktadır. Pasif olarak kip-kilitlenmiş lazer sistemlerinde kavite içerisindeki atmaların (fs-ps) oluşumu doyurulabilir ayna tarafından başlatılıp stabilizasyonu sağlanmakta olup çıkış kuplöründe yüksek tekrarlamaya hızlarında (MHz-GHz) atmalar elde edilmektedir. SESAM malzemesinin kullanımda sağladığı temel avantaj, belirli kavite tasarımında hem doğrusal hem de doğrusal olmayan optik özelliklerin daha fazla özgürlük sağlayacak şekilde geniş bir aralıkta tasarlanabilmesidir. Ayrıca, SESAM'lar küçük doyma akıcılığını (saturation fluence) sağlayan büyük emici enine kesitine sahip olduklarından pasif kip-kilitlemeli katı hal lazerler için ideal olup Q-anahtarlama kararsızlıklarını bastırmak için kullanılabilir.

Katı hal lazerlerinde doyurulabilir bir emicinin eklenmesiyle pasif olarak kip-kilitlenebilmenin yanında lazeri Q-anahtarlamalı kip-kilitleme (QML) rejimine itebilen bir Q-anahtarlama eğilimi ortaya çıkmaktadır. Bu Q-anahtarlama kararsızlıkları, sabit atma enerjisi ve yüksek tekrarlamaya oranının gerekli olduğu birçok uygulama için istenmeyen bir durumdur. Ancak aynı zamanda, doğrusal olmayan frekans dönüşümü, mikro yapıların hassas bir şekilde imal edilmesi gibi bazı uygulamalar için, QML rejimi, önemli ölçüde yüksek atma enerjili ultrashort kip-kilitli atmalar nedeniyle istenme durumu da ortaya çıkabilmektedir. Her durumda, bu çalışma modunu bastırmak veya kullanmak için katı hal lazer dinamiklerinin QML açısından anlaşılması gerekmektedir.





**Şekil 2. 4** SESAM'a ait nonlinear yansımının emici üzerindeki atma akıcılığının fonksiyonu olarak gösterilmesi

Q-anahtarlama yatkinliğini karakterize etme adına SESAM malzemesi için tipik bir doğrusal olmayan yansımalarının gösterildiği Şekil 2.4'ü ele alalım. Şekil 2.4'de verilen ölçüm verisini temsil eden bir fonksiyonu,  $\Delta R$ ,  $F_{sat,A}$  ve  $R_{ns}$  fit parametreleri ile aşağıda verilen denklem ile ifade edelim (Hönninger vd., 1999).

$$R(E_p) = R_{ns} \frac{\left\{ 1 + \exp(-\Delta R) \left[ \exp\left(\frac{E_p}{E_{sat,A}}\right) - 1 \right] \right\}}{E_p/E_{sat,A}} \quad (2.1)$$

Burada  $R_{ns}$ , yüksek atma enerjilerinin yansıtıcılığıdır ve karşılanamayan kaybı,  $\Delta R_{ns} = 1 - R_{ns}$ , belirler.  $\Delta R$ , doğrusal olmayan yansıtıcılıktaki maksimum değişiklik olup SESAM cihazının maksimum modülasyon derinliği olarak da adlandırılır.  $\Delta R$  değeri %10'dan daha küçük olan emiciler için denklemin sadeleştirilmiş şekli aşağıda verilmiştir.

$$R(E_p) = R_{ns} \left\{ 1 - \Delta R \frac{F_{sat,A} A_{eff,A}}{E_p} \times \left[ 1 - \exp\left(-\frac{E_p}{F_{sat,A} A_{eff,A}}\right) \right] \right\} \quad (2.2)$$

SESAM'ın doğrusal olmayan yansımaları  $R(E_p)$  tur başına atma enerji kaybı  $q_p(E_p)$ 'ye bağlı olup maksimum modülasyon derinliği,  $\Delta R \ll 1$  için  $\Delta R = 1 - \exp(-q_0) \approx q_0$  şeklinde ifade edilir. Stabil kip-kilitleme için tipik olarak %1-2 gibi küçük çıkış kuplör iletimi  $T_{out}$  gerekliliği,  $\Delta R_{ns} \ll T_{out} \ll 1$  ile verilen başka bir şartı getirmektedir. Böylece,  $R_{ns} \approx 1$  kabulü altında, aşağıdaki

basitleştirilmiş eşitlik elde edilir.

$$R(E_p) \approx \exp[-q_p(E_p)] \approx 1 - q_p(E_p) \quad (2.3)$$

Buradan hareketle, QML operasyonuna karşı koşul, doğrusal olmayan yansıtıcılık bakımından aşağıda verildiği gibi ifade edilebilir (Hönninger vd., 1999).

$$E_p \frac{dR(E_p)}{dE_p} < \frac{T_R}{\tau_L} r = \frac{T_R}{\tau_L} + \frac{E_p}{E_{sat,L}} \quad (2.4)$$

Burada, denklemin sol tarafı emici parametreleri tarafından kontrol edilirken, sağ taraf ise lazer malzeme ve kavite parametreleri tarafından kontrol edilmektedir. Böylece, ilgili lazer performans parametreleri için uygun malzeme kavite parametreleri seçilerek lazer operasyon modu kontrol altına alınabilmektedir (Spühler et al. 2005).

Bu doğrultuda, Cr: kolquirit lazerlerini stabil olarak kip-kilitli modda çalıştırmak için optimize edilmiş AlGaAs/InGaAs tabanlı SESAM/SBR aynaların çalışma prensibinin anlaşılması, tasarlanması ve üretimi için ön çalışmalar yapılmıştır. Çok katmanlı yapıdaki SBR tasarımına örnek olarak Tablo 2.1'de, 850 nm merkezi dalga boyu olan Cr:LiSAF lazeri için tasarlanmış bir SBR aynanın katmanları hakkında bilgi verilmiş olup karşılık gelen yansıma profili Şekil 9'da gösterilmiştir. Tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken pek çok konudan ilki SBR içine konulacak soğurucunun kolay sature olabilmesi için soğurucu olarak kalın (bulk) bir malzeme yerine kuantum kuyusu veya kuantum noktası kullanılmasıdır. Böylece  $F_{sat,A}$  değeri düşürülerek lazerin kip-kilitli çalışması için gereken kritik enerji de o kadar düşürülebilmektedir. Yine SBR soğurucusunun kolay sature olabilmesi için, kullanılan soğurucunun soğurma bandı sınırının Bragg aynası yansıtma bandının hemen üstünde olması gerekir (örneğin bu SBR için Bragg ayna yansıtma sınırı 820-880 nm aralığındadır ve kuantum kuyusu soğurma bandı sınırı 897 nm olarak seçilmiştir). Bunun yanında kullanılan InGaAs soğurucusunu tasarlarken sadece kuantum etkilenmeler değil, In'un GaAs kristal kafes yapısına uyumsuzluğu da dikkate alınmalıdır (strain effect).

**Tablo 2. 1** Merkezi dalgaboyu 850 nm olan, Cr:LiSAF lazerleri için tasarlanmış SESAM/SBR aynası örneği.

Katman numarası	Malzeme	Fiziksel kalınlık (nm)	Optik kalınlık (nm)	Kırılma indeksi n	Amaç
0	GaAs	-	-	-	Alt tabaka (Substrate)
1	Al <sub>0,95</sub> Ga <sub>0,05</sub> As	70.44	212.50	3.02	Bragg katmanı
2	Al <sub>0,14</sub> Ga <sub>0,86</sub> As	59.54	212.50	3.55	Bragg katmanı
...	...	...	...	...	Bragg katmanları
49	Al <sub>0,95</sub> Ga <sub>0,05</sub> As	70.44	212.50	3.02	Bragg katmanı
50	Al <sub>0,14</sub> Ga <sub>0,86</sub> As	59.54	212.50	3.55	Bragg katmanı
51	Al <sub>0,95</sub> Ga <sub>0,05</sub> As	70.44	212.50	3.02	Bragg katmanı
52	Al <sub>0,14</sub> Ga <sub>0,86</sub> As	10	35.45	3.55	Bariyer
53	In <sub>0,11</sub> Ga <sub>0,89</sub> As	6	22.00	3.67	Soğurucu katman (kuantum kuyusu)
54	Al <sub>0,14</sub> Ga <sub>0,86</sub> As	45	159.54	3.55	Bariyer
55	GaAs	5	18.17	3.63	Kapak (oksidlenmeye karşı koruyucu)

## 2.1 Projede Kullanılan Malzemeler

Bu bölümde kısaca proje bütçe planlaması dahilinde satın alınan ve proje çalışmalarında kullanılan ekipman ve sarf malzemenin bir bölümü sınıflandırılmıştır. Tedarik edilen ekipman/cihaz listesi Tablo 2.2 ve sarf malzeme listesi Tablo 2.3'de yer almaktadır.

**Tablo 2. 2** Ekipman Listesi

Adı / Modeli	Kullanım Amacı
<b>CMOS Kamera</b> (DCC1240M - High-Sensitivity USB 2.0 CMOS Camera, 1280 x 1024, Global Shutter, Monochrome Sensor) <b>ve Kamera Lensi</b> (MVL50M1 - 50 mm EFL, f/1.4, for 1" C-Mount Format Cameras, with Lock)	Lazer kavitelesinin kurulmasında, hassas ayarlanmasında ve optimize edilmesinde bu kamera kullanılmıştır.
Thorlabs FSAC Autocorrelator for Femtosecond Lasers	Çalışılmakta olan dalga boylarında Cr:LiCAF lazerinin kip-kilitli moda oluşturduğu darbelerin uzunluğunu ve detaylı yapısını incelemek için kullanılmıştır.
SA200-8B - Scanning Fabry Perot Interferometer, 820-1275 nm, 1.5 GHz FSR	Geliştirilecek lazer sistemlerinin spektral özelliklerini incelenmesinde spektrum analizörü olarak kullanılmıştır.

SA201-EC - Control Box for Scanning Fabry-Perot Interferometers, 230 VAC Power Cord	İnterferometrenin kontrolü bu aygıtla sağlanmıştır.
Newport Model 710 TO-CAN Laser Diode Mount	Kurulan Cr:LiCAF lazerlerini pompalayacak yüksek güçteki diyotlar için tutucu olarak tedarik edilmiştir.
Termal Kamera (FLIR E75)	Lazer sistemindeki kazanç materyalindeki sıcaklık benzetim ve ölçüm sonuçlarının doğrulanmasında kullanılmıştır.

**Tablo 2. 3** Sarf Malzeme listesi

<b>Malzeme Adı</b>	<b>Kullanım Amacı</b>
Cr:LiCAF Kristaller	Geliştirilen olan lazer sistemlerinde temel kazanç materyali olarak kullanılmıştır.
Non-Linear Kristaller	İkincil harmonik yordamıyla mavi ışık elde edilmesinde kullanılmıştır.
IS236A - Ø2" Integrating Sphere, Si Sensor, 3 Ports	Deneyler sırasında lazer gücü, akı, yansıma ve ışıma ölçümleri için kullanılmıştır.
USHIO HL63290HD 638nm / 2.2W(CW) / 2.5W(Pulse) AlGaInP Laser Diode (6 adet)	Yeni alınan lazer kristallerinin kullanıldığı sistemlerde Çıkış gücü ölçüm deneylerinde pompalama amacıyla kullanılmıştır.
Opto-mekanik sarf malzemeler	ABU-LTL bünyesinde bulunan optik masalar, çeşitli tutucular ve aparatlar, ayna setleri, polarizerler, ışın ayırıcılar, mercekler, çeşitli tip ve çalışma frekansında aynalar, vb sarf malzemeler kullanılmıştır.

Projenin malzeme tedarik ihtiyacı dahilinde en fazla önceliğe sahip olan ve farklı çalışma modları ile birlikte optik, mekanik ve termal karakterizasyonunu gerçekleştireceğimiz düşük iyon katkılı Cr:LiCAF kristalleri, LASERAND, Inc. Montreal, Canada şirketi tarafından aşağıda Şekil 2.5’de tanımlandığı gibi yedi farklı türde olacak şekilde üretilmiştir

<u>Cr: Colquirite Crystal Properties</u>	
<p>Cr:LiCAF X-tal I Dimensions (parallelepiped)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>10 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Width of the medium (W): <math>\sim 10</math> mm<math>\pm 2</math></li><li>• Height of the medium (H): <math>2 \pm 0.1</math> mm</li><li>• Quantity: 1</li></ul>	<p>Cr:LiCAF X-tal IV Dimensions (parallelepiped)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>25 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Width of the medium (W): <math>\sim 10</math> mm<math>\pm 2</math> possible)</li><li>• Height of the medium (H): <math>2 \pm 0.1</math> mm (not seen in Fig. 1)</li><li>• Quantity: 1</li></ul>
<p>Cr:LiCAF X-tal II Dimensions (parallelepiped)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>15 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Width of the medium (W): <math>\sim 10</math> mm<math>\pm 2</math></li><li>• Height of the medium (H): <math>2 \pm 0.1</math> mm (not seen in Fig. 1)</li><li>• Quantity: 2</li></ul>	<p>Cr:LiCAF X-tal V Dimensions (oblique/slanted cylinder)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>10 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Diameter of the cylinder: <math>4 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Quantity: 1</li></ul>
<p>Cr:LiCAF X-tal III Dimensions (parallelepiped)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>20 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Width of the medium (W): <math>\sim 10</math> mm<math>\pm 2</math></li><li>• Height of the medium (H): <math>2 \pm 0.1</math> mm</li><li>• Quantity: 1</li></ul>	<p>Cr:LiCAF X-tal VI Dimensions (oblique/slanted cylinder)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Length of the medium (L): <math>15 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Diameter of the cylinder: <math>4 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Quantity: 1</li></ul>
	<p>Cr:LiCAF X-tal VII Dimensions (oblique/slanted cylinder)</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Material: Cr:LiCAF</li><li>• Dopant Concentration: 1.5 %</li><li>• Chamfers: If possible, desired on critical edges of Brewster cut surfaces.</li><li>• Length of the medium (L): <math>20 \pm 0.5</math> mm</li><li>• Diameter of the cylinder: <math>4 \pm 0.5</math> mm</li></ul>

**Şekil 2. 5** Lazer kristal spekleri

Kristal siparişinin yapıldığı bahsi geçen firma tarafından üretilmiş olan ilk kristal örneklerinin ölçülmüş pasif kayıp değerleri tarafımıza bildirilmiştir. Tarafımızca yapılan ölçüm sonucunda örnek kristallere ait pasif kayıp değerlerinin proje kapsamında yapılacak deneylerde ilgili proje hedeflerinin sağlanması anlamında yeteri kadar az kayıplı olmadığı görülmüştür. Firma tarafından kristallerin tarafımızca bildirilen pasif kayıp miktarından daha fazla kayba sahip olmayacak şekilde tekrardan üretilmesi talep edilmiştir. Kristallerin işlenmemiş halde ilk üretim fotoğrafları Şekil 2.6’da gösterilmektedir. İkinci teslimat kapsamında pandemi sürecin 1.5 yıl gecikmeli olarak tedarik edilen lazer kristallerine ait karakterizasyon sonuçları ilerleyen bölümlerde açıklanmaktadır.

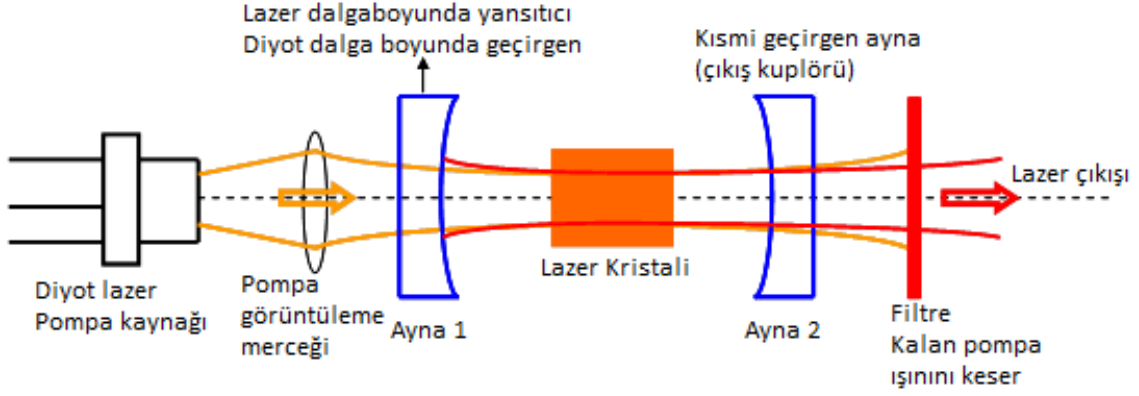


**Şekil 2. 6** Farklı fiziksel özelliklerdeki Cr:LiCAF kristal tedarik talebi ve yurtdışında üretilen ham kristal yapılar

## 2.2 Genel Kapsamlı Yazılım Araçlarının Geliştirilmesi

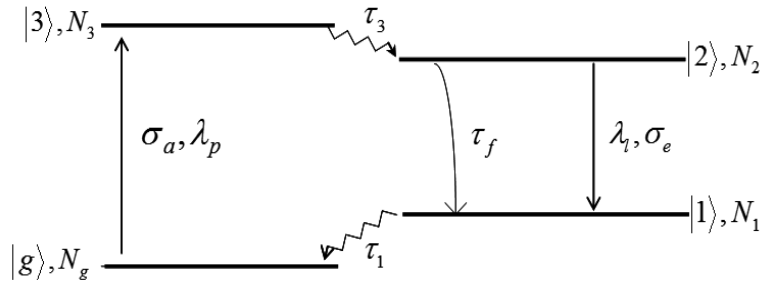
Proje kapsamında grubumuz tarafından gerçekleştirilen deneysel çalışmalara ek olarak ilgili lazer kurulumları ve kullanılan optik bileşenlerin yazılım araçları ile modellenerek performans analizlerinin gerçekleştirilmesi önemli bir yer tutmaktadır. İlgili lazer sistemlerinin veya bu sistemleri oluşturan bileşenlerin Lumerical, Rezonator ve MATLAB gibi yazılım araçlarının etkili kullanımı ile bileşen veya sistem düzeyinde performans analizlerinin yapılması, tasarlanan bileşenlerin üretimi veya deneysel çalışmalar öncesinde geniş hareket kabiliyeti ve ciddi maddi tasarruf sağlamaktadır. Bu anlamda, proje hedeflerinin gerçekleştirilmesi doğrultusunda ihtiyaç duyulması muhtemel yazılım araçları belirlenerek projenin farklı alt başlıklarında kullanılmak üzere dijital veri seti ve yazılım araçları oluşturulması üzerinde çalışılmıştır.

Bu çalışmalardan ilki, proje kapsamında gerçekleştirilecek olan deneysel çalışmaların da ilk adımını oluşturacak olan Cr:LiCAF lazer kurulumunun CW çalışma modunun temel biçimde nümerik modellenmesi gerçekleştirilmiştir. İlgili modelin oluşturulmasında aşağıda verilen diyot pompalı katı hal lazer sistemi temel alınarak yazılım modellemesi, Antalya Bilim Üniversitesi bünyesinde kullanılan MATLAB yazılımında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2. 7** Diyot pompalı katı hal lazer sistemi

Şekil 2.7'de gösterilen lazer sisteminde, Cr: LiCAF kazanç ortamı, pompa kaynağı olarak başka bir lazer (diyot lazer) kullanılarak optik olarak uyarılır. Pompa lazer ışını, bir pompa görüntüleme merceği kullanılarak kazanç ortamına odaklanır. Bu modelde Cr: LiCAF lazer rezonatörü, amplifikatöre optik geri bildirim sağlayan iki kavisli aynadan (Mirror 1 ve 2) oluşur. Birinci ayna (Mirror 1), pompa lazer dalgaboyunda ( $T > \% 95 @ 650 \text{ nm}$ ) yüksek geçirgenliğe sahip ve lazer dalgaboyunda ( $R \sim \% 100 @ 775 \text{ nm}$ ) yüksek yansıtıma kaplanmasına sahip bir pompa aynasıdır. İkinci kavisli ayna (Mirror 2) bir çıkış kuplörü olup, kavite içi lazer ışınının bir kısmının dışarıya iletilmesini sağlar. Bu şekilde oluşturulmuş olan kavite içerisinde oluşacak optik kazanç ve lazerleme eşiğinin hesaplanması için, harici bir kaynak tarafından pompalanmış olan Cr:LiCAF kristalinin enerji seviyelerinin tanımlanması ve kristal içerisindeki aktif iyonlarının pompalanma sırasında ilgili enerji seviyeleri arasında yaptığı dinamik geçişlerin tanımlanması gerekmektedir.



**Şekil 2. 8** Dört seviyeli bir lazer kazanç ortamının enerji seviyesi diyagramı.

Cr:LiCAF kristalinin enerji düzeylerini temsil eden dört seviyeli bir enerji diyagramı Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Burada,  $\lambda_p$  (Cr:LiCAF için 650 nm) dalgaboyundaki pompa fotonlarının lazer

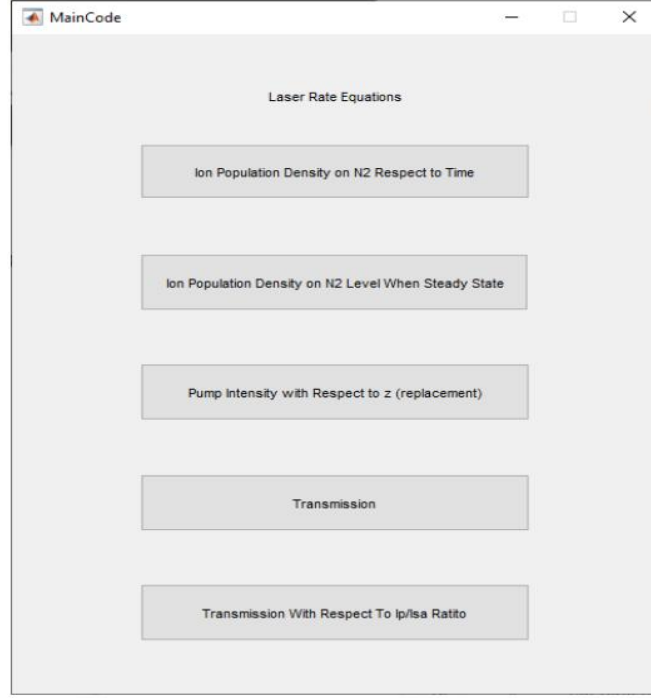
kazanç ortamına gönderilmesi ile ve  $\lambda_p$  dalgaboyunun kazanç ortamının absorpsiyon bandı içerisinde olması durumunda, kristalin temel durumundaki ( $|g\rangle$ ) iyonlar, uyarılmış absorpsiyon yoluyla temel durumdan ilk uyarılmış duruma ( $|3\rangle$ ) uyarılır. Bu pompalama işlemi, Şekil 2.8'de yukarı okla temsil edilmektedir. Burada  $\sigma_a$  uyarılmış absorpsiyon kesitidir (ışığın ne kadarının absorbe edileceğini belirleyen bir orantılılık sabiti).  $|3\rangle$  Seviyesine uyarıldıktan sonra, uyarılmış iyonlar hızlı bir şekilde ışımaz (zikzak çizgi) olarak  $|2\rangle$  seviyesine geçmektedir. Çok hızlı bir biçimde ( $\tau_3$  ps-ns seviyesinde) gerçekleşen bu geçiş aynı zamanda fonon emisyonu olarak adlandırılmakta ve böylece kristali ısıtarak enerji kaybına yol açmaktadır. Benzer fenomen yine zikzak çizgiler ile gösterilmiş  $|1\rangle$ 'den  $|g\rangle$ 'ye geçişinde de gerçekleşmektedir. Uyarılmış emisyon yolu ile Cr:LiCAF için  $\lambda_l=775$  nm civarında lazer radyasyonunun üretildiği geçiş ise aşağı yönlü ok ile gösterilmiştir ve burada  $\sigma_e$  uyarılmış emisyon kesitine karşılık gelmektedir.

Yukarıda tanımlanmış olan dinamik iyon geçişleri, kısmi diferansiyel denklemler ile modellenerek ilgili seviyelerde bulunan iyon miktarları ve buna bağlı olarak gerçekleşen emisyonun dinamik olarak karakterize edilmesi mümkün olmaktadır. Örneğin, lazer radyasyonunun üretildiği geçişin bir tanımlayıcısı olarak  $|2\rangle$  seviyesinde bulunan iyon sayısının ( $N_2$ ) zamana göre değişimi aşağıdaki diferansiyel denklem ile tanımlanmıştır.

$$\frac{dN_2}{dt} = \sigma_a \frac{I_p}{h\nu_p} N_g - \frac{N_2}{\tau_f} - \sigma_e \frac{I_L}{h\nu_l} N_2 \quad (2.5)$$

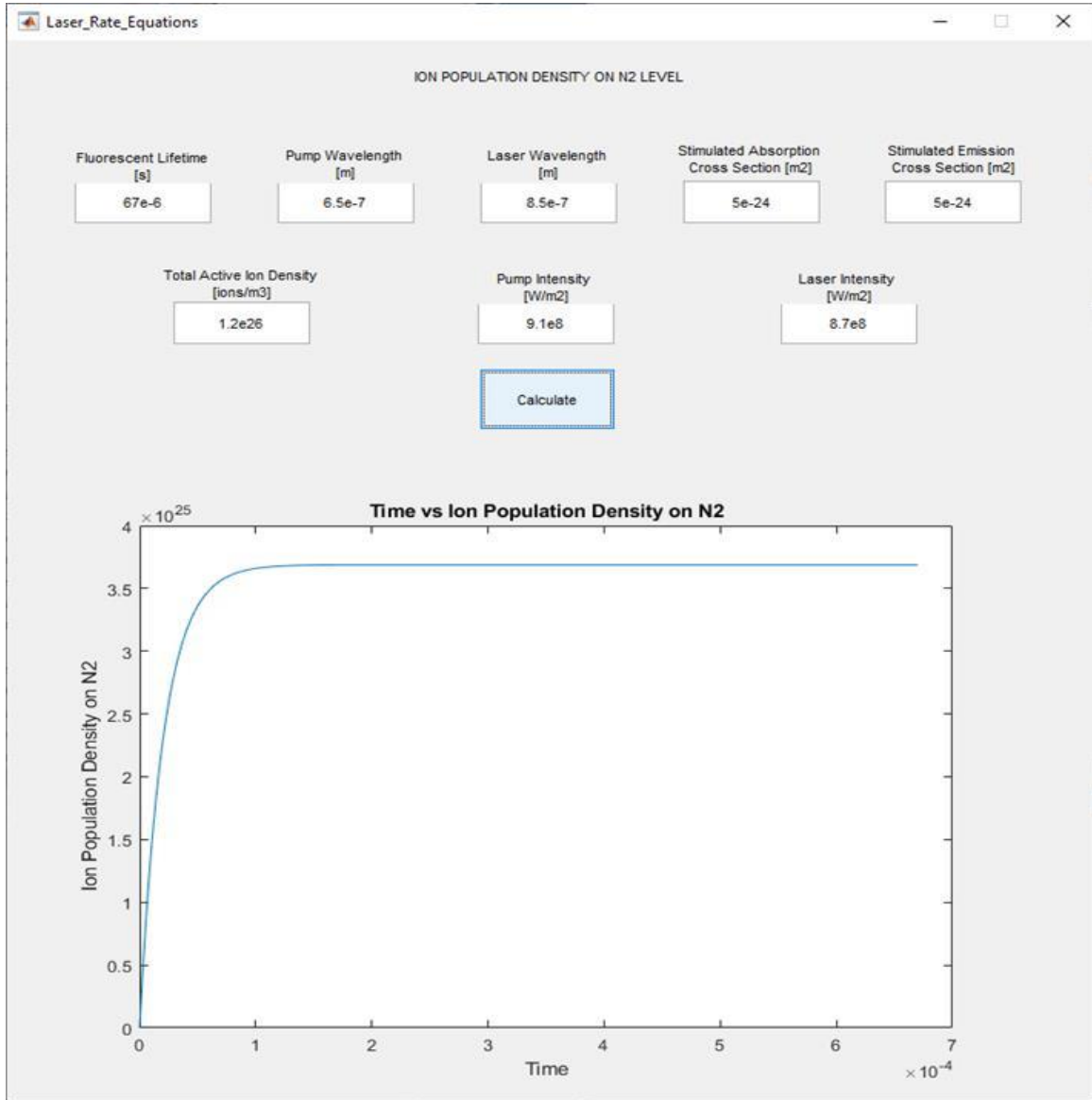
Burada  $I_p$  ve  $I_L$  pompa ve lazer yoğunlukları,  $h$  Planck sabiti,  $\nu_p$  ve  $\nu_L$  pompa ve lazer foton frekansları,  $N_g$  temel seviyede bulunan iyon sayısı,  $\tau_f$  ise kazanç ortamının floresan ömrüdür. Proje kapsamında kurulan olan lazer sistemlerinin bu kabuller altında modellenerek ilgili dinamik cevapların çözümlenmesinde kullanılmak üzere, MATLAB programında bir ana arayüz (Şekil 2.9) oluşturulmuştur.





**Şekil 2.9** 4 seviyeli katı hal lazer sistemlerinin dinamik cevaplarını hesaplamak üzere oluşturulmuş MATLAB GUI ana arayüzü.

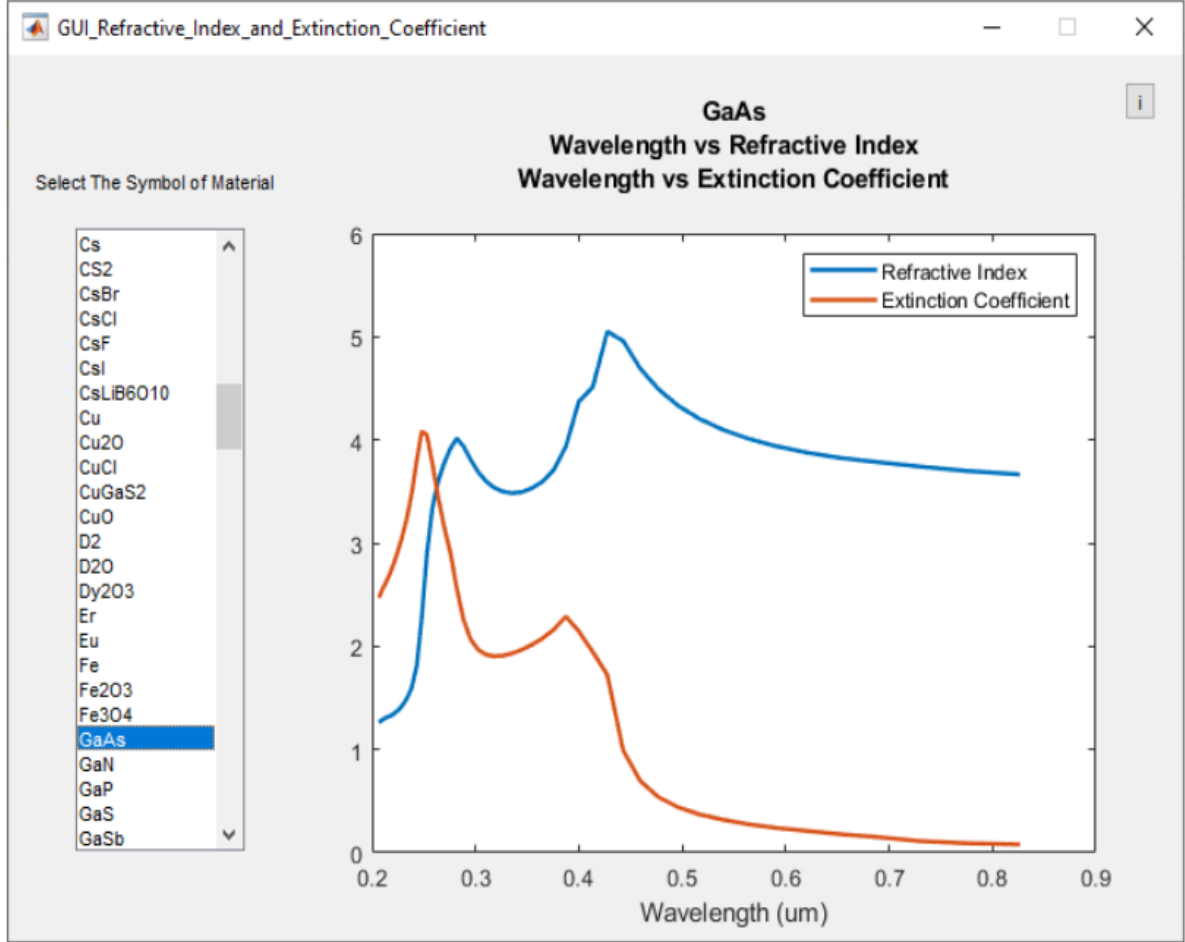
Örneğin bu arayüzün en üstünde yer alan “Ion Population Density on N2 Respect to Time” seçeneği seçildiğinde açılan Şekil 5’te gösterilen arayüzde ilgili kavite ve kazanç ortamı bilgileri girilmesi halinde Denklem (2.5) çözümlenerek,  $N_2$ ’nin zamana bağlı değişimi çizdirilebilmektedir (Şekil 2.10).



**Şekil 2. 10** Lazer parametrelerinin tanımlanarak Denklem (2.5)'in çözdürüldüğü MATLAB arayüzü.

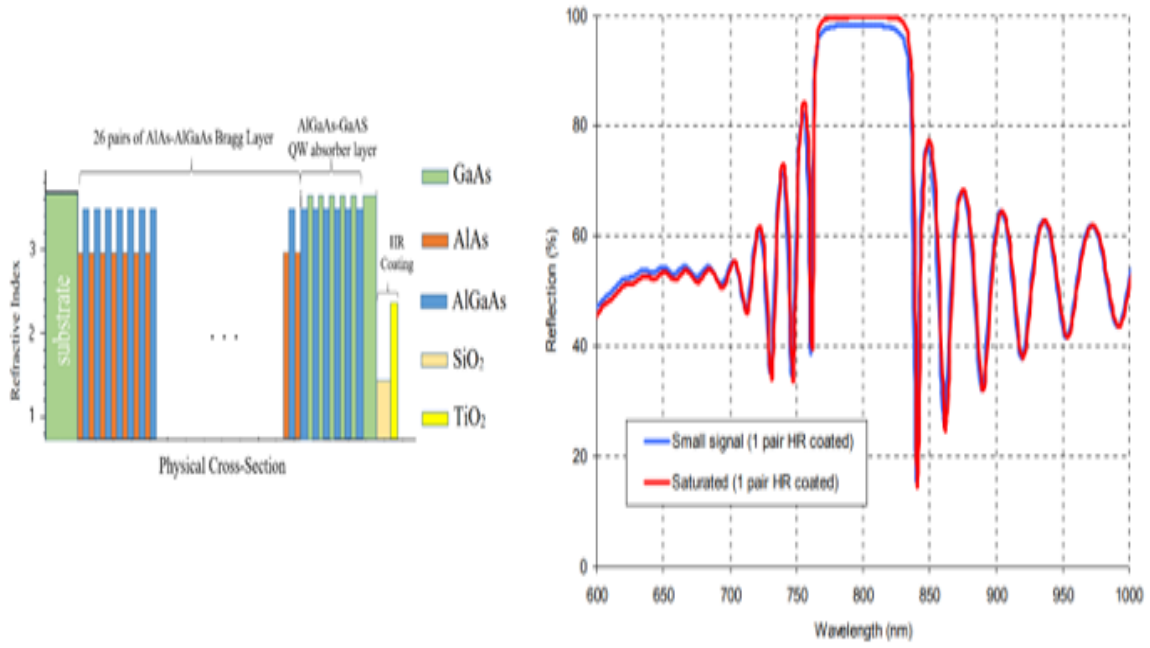
Proje hedeflerimiz arasında yer alan yeni tip doyurulabilir ayna (SESAM/SBR) modellemeleri kapsamında yapılan çalışmalarda farklı malzeme türleri değerlendirildiğinden, uygun görülen ilgili malzemelerinin projenin hedef çalışma dalgaboylarındaki karakteristiklerinin (yansıma endeksi gibi), kullanılan modelleme yazılımlarına tanımlanması gerekmektedir. Bu kapsamda, hem bu proje, hem de ileride yapılacak muhtemel çalışmalara veri seti oluşturması bakımından, pasif aygıt tasarımlarında sıkça kullanılmakta olan malzemelerin optik özellikleri farklı kaynaklardan toplanmış ve bir veri seti halinde depolanmıştır. Modellemeler içerisinde kullanılması planlanan bir malzemenin ilgili çalışma dalgaboylarındaki optik davranış karakteristiklerinin erişilebilirliğini kolaylaştırmak ve hızlandırmak adına, MATLAB programında bir arayüz (Şekil 2.11) oluşturularak, kullanıcı tarafında malzeme isim kısaltmasının

seçilmesinden sonra ilgili malzemenin veri setinde bulunan verisi ekrana çizdirilerek pratik kullanım ve erişim kolaylığı sağlanmıştır.



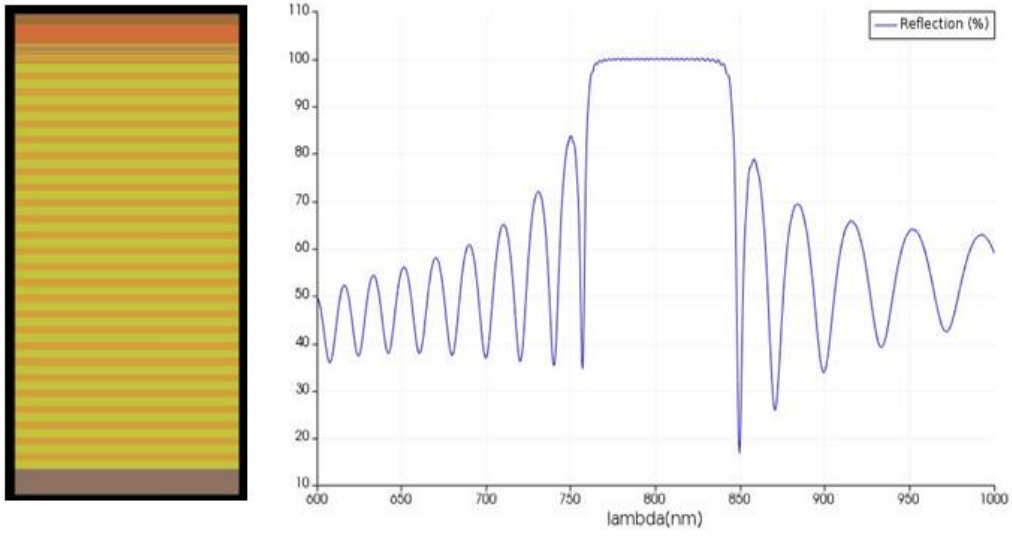
**Şekil 2. 11** Malzeme optik karakteristiklerinin veri setinden çekilerek çizdirilmesini sağlayan MATLAB arayüzü.

Yeni tip doyurulabilir ayna (SESAM/SBR) modellemesi kapsamında grup içi bilgi birikimi, tasarım ve analiz tecrübesi oluşturmak adına halihazırda laboratuvar envanterimizde bulunan ve raporun ilerleyen kısımlarda bahsedilecek olan çalışmalarda kullanılan SBR malzeme örnekleri MATLAB, Lumerical ve COMSOL programlarında modellenmiştir. Bu çalışmaya örnek olarak aşağıda Şekil 2.12'de fiziksel yapı ve çalışma dalgaboyundaki yansıma karakteristiği verilmiş olan SBR malzeme örneğinin modelleme ve analizleri bahsi geçen yazılım araçlarında gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2. 12** Çeyrek-dalga soğurucu yapıli 800nm civarında çalışın SBR malzemenin fiziksel yapısı (solda) ve yansıma karakteristiği (sağda).

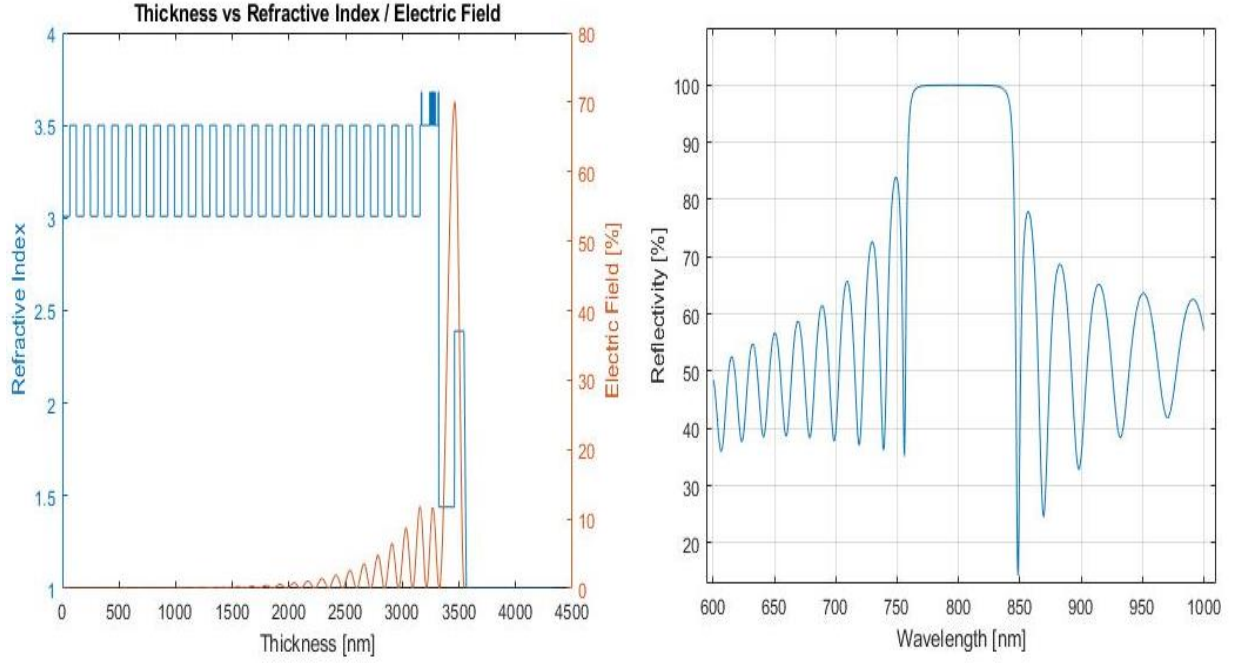
Şekil 2.12’de fiziksel yapısı tanımlanmış olan SBR malzemesinin fiziksel yapısının Lumerical yazılımında modellenmesi ve yapıyı oluşturan malzemelere (GaAs, AlAs, AlGaAs, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>) ait ilgili optik karakteristikler programda tanımlandıktan sonra yapılan nümerik analiz sonucunda elde edilmiş yansıma karakteristiği Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



**Şekil 2. 13** 800nm civarında çalışan SBR malzeme örneği için Lumerical programında fiziksel yapısının oluşturulması (solda) ve yansımaya karakteristiğinin elde edilmesi (sağda).

Şekil 2.13'de Lumerical programında gerçekleştirilmiş olan modelleme sonucu elde edilmiş yansımaya karakteristiği, doğrulanması hedeflenen şekil 2.12'de verilmiş yansımaya karakteristiği ile kıyaslandığında, ilgili malzeme örneğinin başarılı bir biçimde Lumerical programında analiz edilebildiği gösterilmiştir.

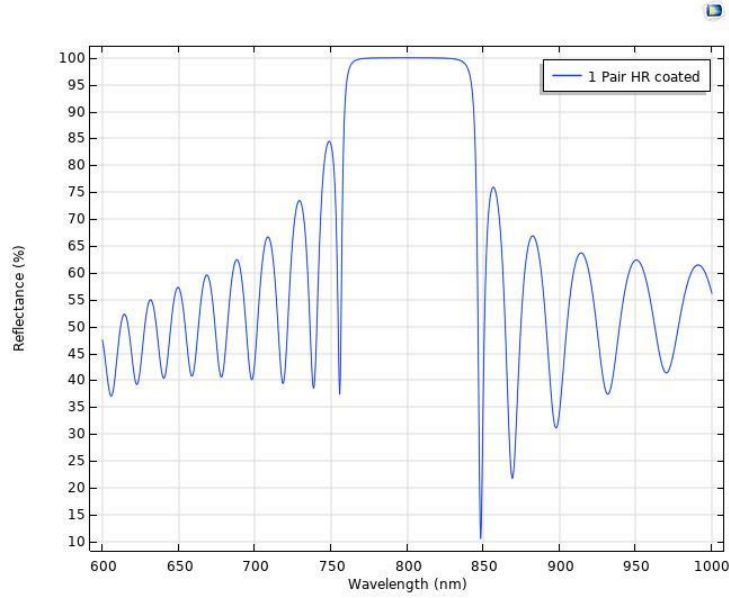
Benzer biçimde, ilerdeki çalışmalarda farklı yazılım programlarındaki kabiliyetlere duyulma ihtimali üzerine elimizdeki SBR örneğinin modellemesi ve analizi ayrıca MATLAB programında da gerçekleştirilmiştir. MATLAB programında gerçekleştirilmiş olan analizler sonucunda elde edilmiş olan yansımaya karakteristiği ve malzeme içerisindeki elektrik alan dağılımı Şekil 9'da gösterilmiş olup Şekil 2.12 ve şekil 2.13'de verilen karakteristiklerle uyumlu olduğu gösterilmiştir.



**Şekil 2. 14** 800nm civarında çalışan SBR malzeme örneği için MATLAB programında fiziksel yapı modeli ve elektrik alan dağılımı (solda), yansımaya karakteristiği (sağda).

Şekil 2.14'da verilmiş olan SBR malzemesinin fiziksel yapısına ait elektrik alan dağılımı ve yansımaya karakteristiğinin MATLAB programında hesaplanmasında (Blinsky, 199) referans içerisinde yer alan prosedür baz alınmıştır.

Son olarak, ilgili analizlere ek olarak COMSOL programında da gerçekleştirilerek elde edilmiş olan yansımaya karakteristiği Şekil 2.15'de gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar ile, ilgili SBR yapısının başarılı bir şekilde modelleme ve analizinin yapılarak diğer yazılımlar ile uyumlu sonuçların elde edildiği gösterilmiştir.

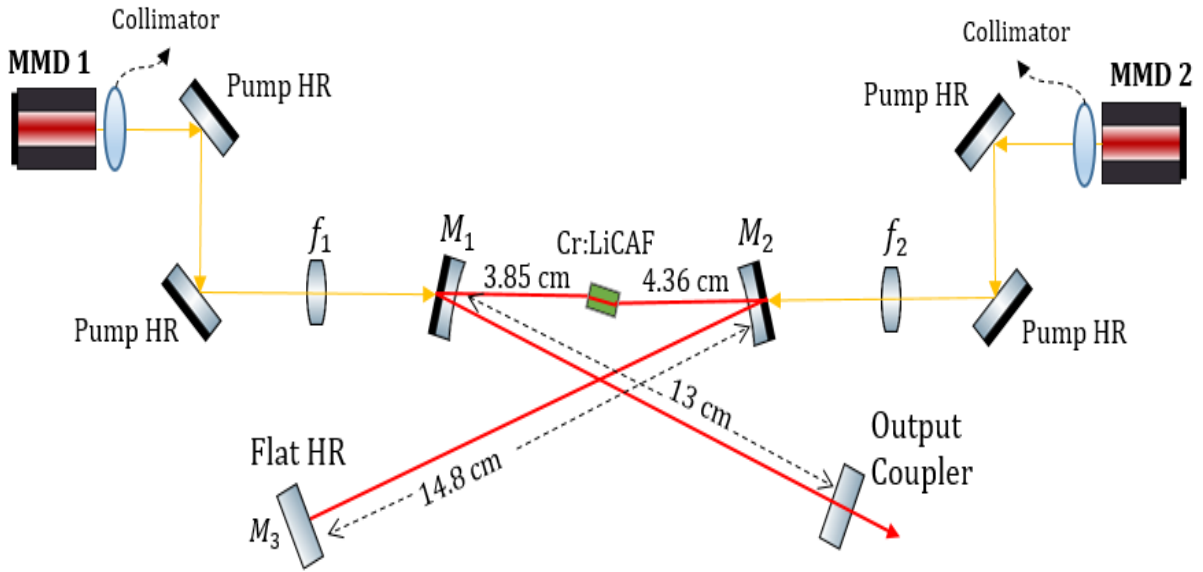


**Şekil 2. 15** 800nm civarında çalışan SBR malzeme örneği için COMSOL programında yapılan analiz sonucu elde edilen yansıma karakteristiği

Sonuç olarak, proje hedeflerimiz arasında yer alan yeni tip doyurulabilir ayna (SESAM/SBR) modellemeleri ve buradan elde edilecek sonuçlar ile darbeli rejim deneylerinde kullanılacak SBR malzeme tasarımlarının ortaya çıkartılmasında üç farklı yazılım programında tasarım ve analiz deneyimi ve bilgi birikimi oluşturulmuştur. Bu sayede, projenin ilerleyen aşamalarında bu programlar tarafından sağlanan kabiliyetler bireysel veya birlikte (örneğin MATLAB ve COMSOL programlarının yerel sunucu üzerinden koordineli çalıştırılması) kullanılarak ilgili SBR malzemelerinin analiz kapsamı genişletilmiş olup bu programlar tarafından sağlanabilecek yenilikçi tasarım ve analiz yaklaşımlarına temel oluşturulmuştur.

### **Işın Optiği ve Kavite Stabilite Analizleri**

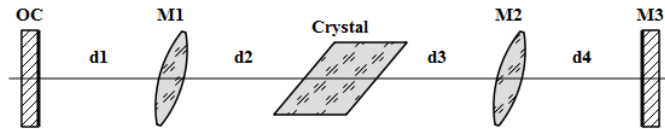
Kavite içi ışın optiği (dağılım, komponent üzerindeki yarıçapları) karakterizasyonu ve stabilite analizlerinin deneysel kurulumlar öncesinde ilgili yazılım araçları kullanılarak yapılması büyük önem arz etmektedir. Bu analizlerin yapılmasında “Rezonator” isimli program grubumuz tarafından kullanılmaktadır.



Şekil 2. 16 İki adet çoklu-mod Diyot pompalı CW Cr:LiCAF kavitesi

Şekil 2.16'da CW modunda çalışan ve iki adet çoklu-mod diyot tarafından pompalanan bir Cr:LiCAF kavitesi gösterilmiştir. Bu gelişme raporunun kapsadığı ilgili proje dönemi içerisinde deneysel çalışmaları da gerçekleştirilmiş olan bu kavite kurulumu fiziksel olarak yapılmadan önce, Rezonator programında kavite tanımlanması yapılmış olup stabilite analizleri gerçekleştirilmiştir.

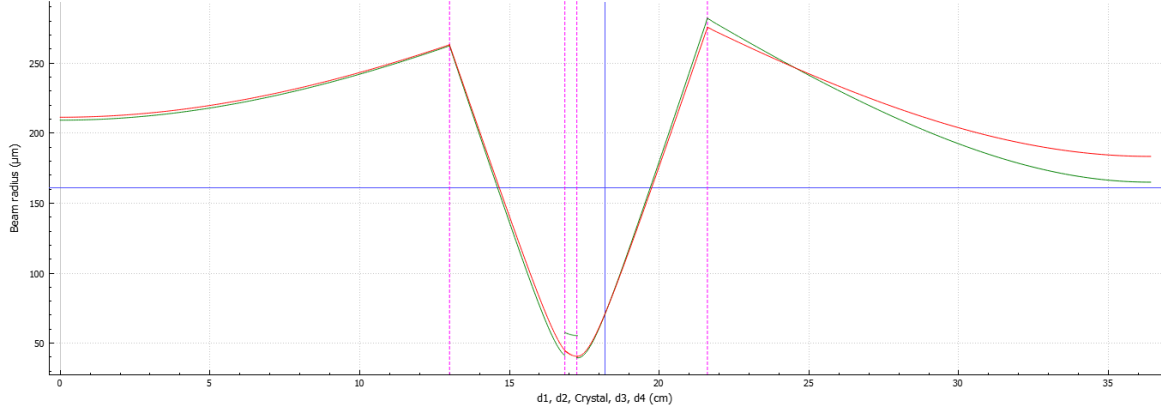
Typ	Label	Parameters
1	OC	
2	d1	L = 13 cm
3	M1	F = 37.5 mm, $\alpha = 10^\circ$
4	d2	L = 3.85 cm
5	Crystal	L = 4 mm, n = 1.4
6	d3	L = 4.36 cm
7	M2	F = 37.5 mm, $\alpha = 10^\circ$
8	d4	L = 14.8 cm
9	M3	
10		



Şekil 2. 17 CW Cr:LiCAF kavitesinin (Şekil 2.16) Rezonator programında modellenmesi



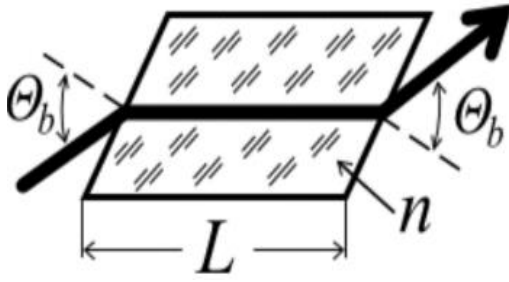
Şekil 2.17’de deneysel kurulumu şekil 2.7’de gösterilmiş olan lazer kavitesinin Rezonator programında modellenmesi gösterilmiştir. Burada ilgili optik komponentler arasındaki mesafeler, program tarafından hesaplanan stabilite koşulu sağlanacak ve kristal üzerinde optimum ışın yarıçapı (~50µm) elde edilecek şekilde optimize edilmiş olup şekil 2.7’de verilen kavite içi komponentler arası mesafeler elde edilmiştir.



**Şekil 2. 18** Rezonator programında ışın yarıçapının kavite eksenı boyunca hesaplanması (Kırmızı: S düzlemi, Yeşil: T düzlemi)

Şekil 2.17’de ayrıntıları verilen modelin Rezonator programında analiz edilmesi sonucunda elde edilen kavite içi ışın yarıçaplarının S ve T düzlemleri için hesaplanarak çizdirilmesi Şekil 2.18’de gösterilmiştir. Stabilite ve kavite içi ışın yarıçapları analizlerine ek olarak Rezonator programında daha başka bir çok araç (kavite gidiş-dönüş süresi hesabı, parametrik optimizasyon gibi) bulunmakta olup proje çalışanları tarafından bu kabiliyetler sıklıkla kullanılmaktadır.

Rezonator programında gerçekleştirilebilen bahsi geçen hesaplamalar ayrıca, ilgili kavite komponentlerinin tanımlayıcı ABCD matrisleri kullanılarak MATLAB programlama dilinde gerçekleştirilmiştir.



$$M_{Tangential} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n^3} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

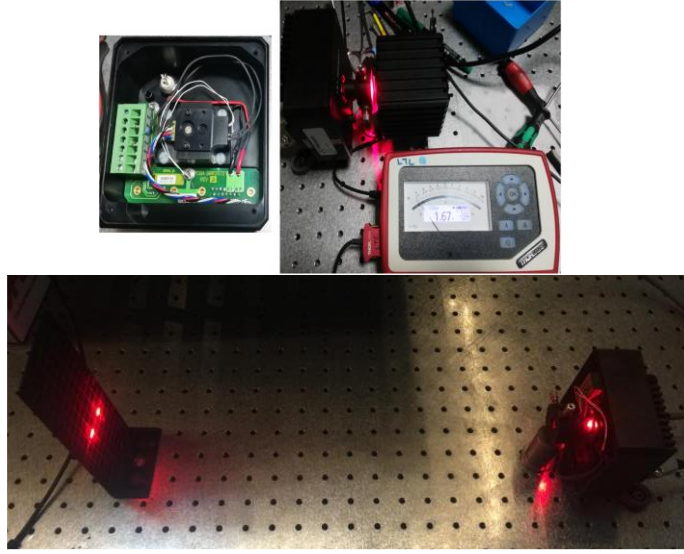
$$M_{Sagittal} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{n} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

**Şekil 2. 19** Işın optiği analizlerinin MATLAB programında yapılmasında kullanılan ABCD matris tanımlarına bir örnek (Brester açısında konumlandırılmış kristal)

Örnek olarak, Brester açısında konumlandırılmış bir paralel kenarlı kristale ait tanımlayıcı ABCD parametreleri Şekil 2.19'de verilmiştir. Rezonator programında bulunan diğer komponentlere ait optik elemanlar da benzer T ve S düzlemlerinde cevap matrisleri ile karakterize edilmekte olup bu tanımlar her bir eleman için MATLAB'de yapılmıştır. Bu şekilde Rezonator programında gerçekleştirilme imkanı olan analizler aynı zamanda bu programdan bağımsız olarak MATLAB programında da yapılabilir. Bu şekilde, ileride yapılacak olan çalışmalarda Rezonator programının kabiliyetleri yeterli bulunmazsa veya başka bir spesifik eleman tanımlama (Rezonator'de izin verilmiyor) gereksinimi ortaya çıktığında, oluşturmuş olduğumuz MATLAB programı bu anlamda daha fazla hareket kabiliyeti sağlayarak ileride yapılacak olan çalışmalara temel oluşturacaktır.

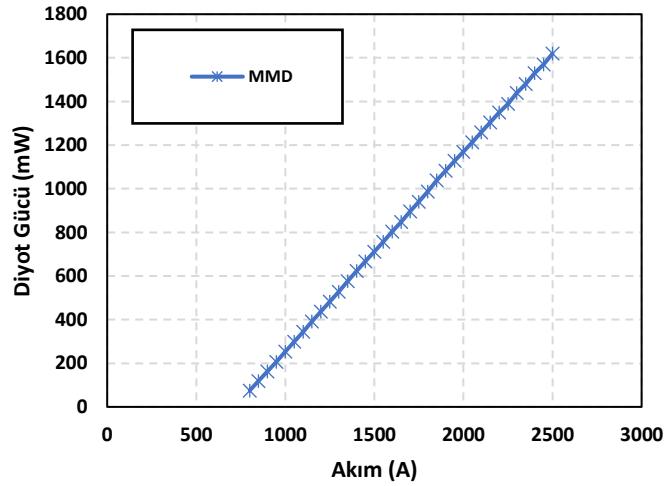
### 2.3 Lazer Diyotların Karakterizasyonu

Cr:LiCAF kristalinin Cw ve kip-kilitleme düzeneklerinin deneysel olarak oluşturulması ve operasyonel karakteristiklerinin incelenmesini kapsayan bu iş paketi dahilinde, ilk aşamada proje kapsamında satın alınmış olan USHIO HL63520HD diyotlarının çalışma testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, ilgili diyotların giriş akım seviyesi ve sıcaklık kontrolünü sağlayan tutucuların ilgili iç devre kurulumları aşağıda gösterildiği şekilde gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 2. 20** Newport diyot tutucularının iç devre kurulumları ve USHIO HL63520HD diyotlarının çalışma testleri

Gerçekleşmiş olan ilgili çalışma testleri sonucunda, 15 derece tutucu sıcaklığında gerçekleştirilen çalışma testlerinde maksimum giriş akımı olan 2.4 A seviyesinde maksimum 1.9 W cw çıkış gücü elde edilebilmiştir. Bu çıkış gücü, USHIO HL63520HD diyota üretici tarafından sağlanan performans tablosunda verilen maksimum cw çıkış gücü olan 2.4 W değerinin altında kalmıştır ve ilgili testlerde kullanılan NEWPORT tutucuların soğutma kapasitesinin yetersiz olabileceği sonucuna varılmıştır. Alternatif olarak ABU-LTL envanterindeki ~1.7 W çıkış gücündeki diyotların kullanılmasına karar verilmiştir.



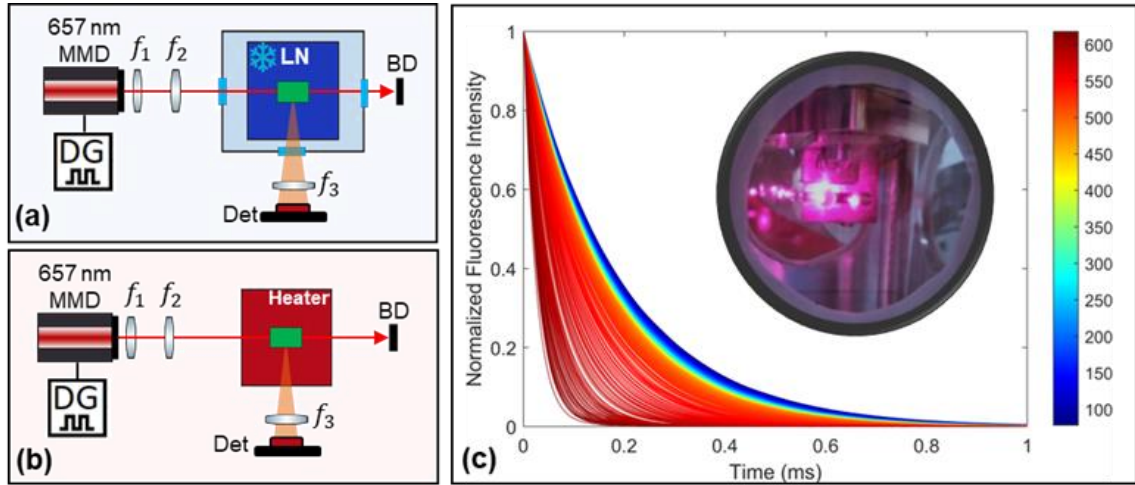
**Şekil 2. 21** ABU-LTL envanterindeki lazer diyotlarının karakteristiği

## 2.4 Lazer Kristalinin Spektroskopik Özelliklerinin Karakterizasyonu

Son on yılda daha yüksek parlaklığa sahip kırmızı lazer diyotların geliştirilmesinde kaydedilen ilerlemeler, verimli, düşük maliyetli ve yüksek güçlü Cr:Colquirite lazer ve amplifikatör sistemlerinin oluşturulma imkanını ortaya çıkarmıştır. Cr: colquirite kazanç ortamları arasında, bu proje kapsamında çalışılmakta olan Cr: LiCAF kristali, minimum kuantum kusuru, uyarılmış durum absorpsiyonu ve üst dönüştürme oranı ile birlikte en yüksek termal iletkenliğe ve maksimum termal söndürme sıcaklığına sahip olduğu için yüksek güçlü uygulamalar için en uygun aday olarak öne çıkmaktadır. Ancak bunun yanı sıra, bu ilerleme, özellikle ultra kısa darbeleri lazer/amplifikatör kaynaklarının geliştirilmesi dahilinde nispeten yavaş kalmış olup, lazer potansiyelinin ilgili spektroskopik özellikler dahilinde doğru bir biçimde modellenerek Cr: LiCAF lazer kazanç ortamının çalışma karakteristiğinin daha iyi bir biçimde anlaşılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Bu kapsamda, bir lazer tasarım mühendisi için, lazer dinamiğinin kapsamlı bir modelinin oluşturulması ve bu bilginin verimli bir lazer kurulumunda kullanılması, ilgili tüm kesitlerin ( $\sigma_{em}$ ,  $\sigma_{esa}$  ve  $\sigma_a$ ) yanı sıra floresan ömrünün ( $\tau_f$ ) sıcaklığa bağımlılığı hakkında ayrıntılı bilgi birikimini gerektirmektedir. Bu karakterize edici kesit alanı değerleri arasında, Emisyon enine kesiti (ECS -  $\sigma_{em}$ ), lazer/amplifikatör sistemlerinin etkili tasarımı ve modellenmesi için gerekli temel bilgi gövdesini oluşturan, bir lazer kazanç ortamına ait en önemli spektroskopik özelliklerinden biridir. Projede yapılmakta olan deneysel çalışmalar neticesinde, ECS'nin sıcaklık değişimi Cr: LiCAF için literatürde ilk kez rapor edilmektedir. Bu çalışmalar kapsamında, Cr:LiCAF kristalinin her iki eksenindeki (a- ve c-eksenleri) ECS'in sıcaklığa göre değişimi 78-618 K sıcaklık aralığında incelenmiştir.

### **2.4.1 Flöresan Ömrü – Sıcaklık Bağımlılığının 78-618 K Aralığında Karakterizasyonu**

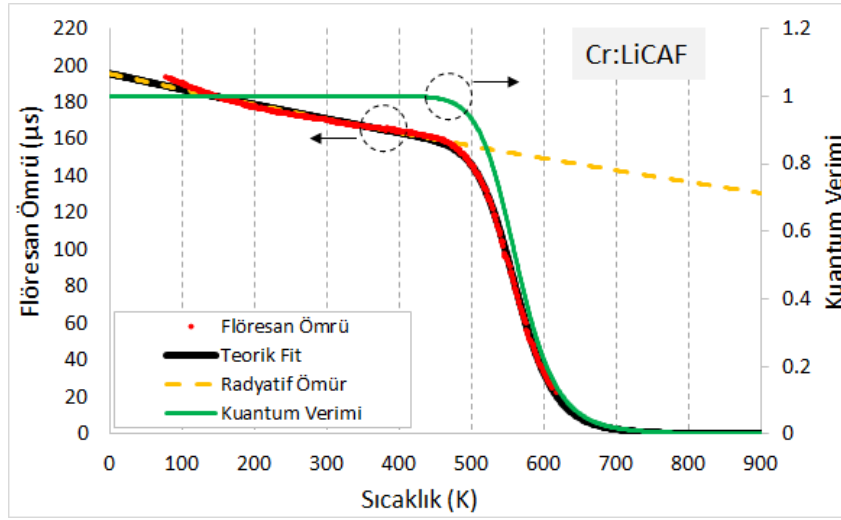
Şekil 2.22 (a) ve (b), sırasıyla 78-300 K ve 300-618 K aralıklarında Cr:LiCAF'da sıcaklığa bağlı floresan ömrünün ölçümü için kullanılan deney düzeneklerini göstermektedir. Her iki kurulumda da, uyarma kaynağı olarak 657 nm'de dar bir emisyon zirvesine sahip bir 1.8 W çok modlu lazer diyot (MMD) kullanılır. MMD çıkışı önce bir asferik mercek (f<sub>1</sub>=4.5 mm) paralelleştirilir ve ardından pompa ışığını kristale gevşek bir şekilde odaklamak için f<sub>2</sub>=100 mm'lik bir akromatik çift kullanılır.



**Şekil 2. 22** (a) 78 - 300 K ve (b) 300 - 618 K aralıkları için kullanılan sıcaklığa bağlı floresan ömrü ölçüm kurulumlarının basitleştirilmiş şeması. (c) 78-618 K aralığında 1 K artışlarla ölçülen Cr:LiCAF'ın floresan bozunma eğrileri (sıcaklık renk haritası sağda gösterilmektedir). İç görsel, dewar içindeki Cr:LiCAF kristalini gösterir.

İncelenmekte olan kristallerin absorpsiyon ve emisyon bantları arasındaki örtüşme oldukça küçük olsa da, radyasyon hapsolmesini daha da azaltmak için kristaller kenarlarından uyarılır (Demirbas, 2019). Pompa ışını daha sonra, 10 Hz'lik bir tekrarlama hızında (kristallere gelen ortalama güç: 180 mW), keskin yükselen ve alçalan kenarları olan 1 ms uzunluğunda dikdörtgen uyarma darbeleri üretmek için bir gecikme üretici kullanılarak modüle edilir. Yayılan floresan, kaplanmamış bir lens ( $f_3=50$  mm) tarafından toplanır ve uyarma ışını yönünde  $90^\circ$ 'ye yerleştirilmiş bir fotodetektör kullanılarak tespit edilir. Deneylerde (i) 16.7 mm uzunluğunda, 4.7 mm çapında ve Cr-katkılaması seviyesi %3 olan çubuk şeklinde bir Cr:LiCAF kristali kullanılmıştır. İncelenmekte olan %3 Cr doyurulmuş LiCAF için, literatüre göre floresans ömrünün söndürülmesi konsantrasyonu ihmal edilebilir düzeydedir (LiCAF'ta %0.3-8.8 Cr-doping (Payne vd.,1990a, Payne vd. 1990b, Rapoport & Shand, 1992)).

Cr:LiCAF kristali için floresan ömrünün sıcaklığa bağlılığı, Şekil 2.23'de özetlenmiştir.



**Şekil 2. 23** Cr:LiCAF için floresan ömrünün sıcaklığa ölçülen bağımlılığı. Kırmızı semboller deneysel olarak ölçülen verileri gösterirken, siyah çizgiler Mott modeli kullanılarak ölçülen verilere analitik fiti gösterir. Flöresan ömrü için analitik tahminler, altın renkli kesikli çizgilerle temsil edilir ve kuantum verimliliği kesintisiz yeşil çizgiler ile çizilir.

Sıcaklık ile değişimi ölçülen floresan ömrünün  $\tau_F(T)$  genel değişimi, aşağıdaki gibi ışınımlı ve ışınımsız geçişlerin birleşik hızı olarak tanımlanabilir:

$$\frac{1}{\tau_F(T)} = \frac{1}{\tau_R(T)} + \frac{1}{\tau_{NR}(T)} = \frac{1}{\tau_{R0}} e^{\alpha T} + \frac{1}{\tau_{NR0}} e^{-\left(\frac{\Delta E}{kT}\right)}. \quad (2.6)$$

Burada  $\tau_{NR0}$  ışınımsız ömrün yüksek sıcaklık sınırı, k Boltzmann sabiti,  $\Delta E$  aktivasyon enerjisi,  $\tau_{R0}$  78 K'de ölçülen ışınım ömrü ve  $\alpha$  ampirik bir uyum katsayısıdır. Ölçüm sonuçlarına uyarlanan fit denkleminde karşılık gelen uyum sabitleri Tablo 2.4'de verilmiştir.

**Tablo 2. 4** Cr:LiCAF'ın ölçülen floresans yaşam süresi verilerine ampirik uyum parametreleri.

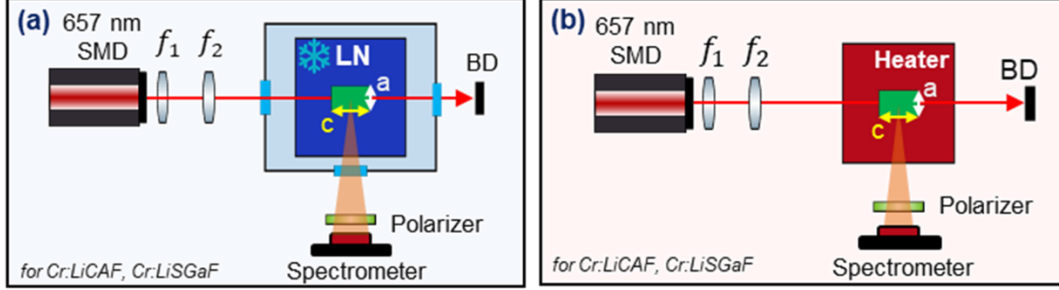
	$\tau_{R0}$ ( $\mu s$ )	$\alpha$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )	$\tau_{NR0}$ (ps)	$\Delta E$ ( $cm^{-1}$ )	$T_{1/2}$ (K)
Cr:LiCAF	196	450	0.11	8250	565

Tablo 2.4'de verilen uyum parametreleri, literatürle oldukça iyi bir uyum içindedir (önceki çalışmaların, uyum parametrelerinde bir miktar farklılıkla sonuçlanan sabit bir ışınım ömrü varsaydığını not edelim) (Dergachev vd., 2007, Noginov vs., 2002, Payne vd., 1989).

#### **2.4.2 Emisyon Kesit Alanı – Sıcaklık Bağımlılığının 78-618 K Aralığında Karakterizasyonu**

Cr:LiCAF kristalinin E $\perp$ c ve E $\parallel$ c polarizasyonlarında sıcaklığa bağlı ECS'nin belirlenmesi için kullanılan deney düzenekleri Şekil 2.24'de gösterilmektedir. Kristallerin uyarılması için tek

modlu bir diyottan (SMD) ~250 mW sürekli dalga çıkışı (660 nm'de) kullanılır. İlgili eksenlerdeki emisyon yoğunluk spektrumları, pompa yayılma yönüne 90° açığa konlandırılmış bir kutuplayıcının arkasında ölçülür.



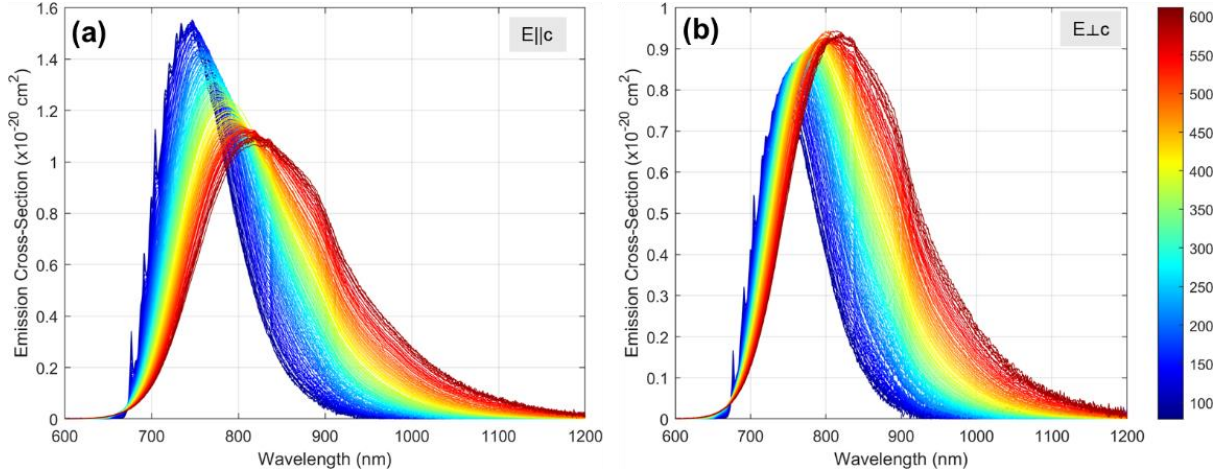
**Şekil 2. 24** Cr:LiCAF için sıcaklığa bağlı ECS ölçüm kurulumlarının basitleştirilmiş şeması. (a) ve (b) kurulumları sırasıyla kriyojenik ve oda/yüksek sıcaklık deneyleri içindir.

Tüm ölçümlerde, ilgili polarizasyonlarda flüoresan emisyonunu seçmek için 400:1'in üzerinde sönme oranı olan bir doğrusal ince film polarizörü (Thorlabs LPNIRE100-B) kullanılır. Her bir polarizasyondaki ilgili flüoresan daha sonra 25.4 mm odak uzaklığına sahip kaplanmamış bir plano-dışbükey mercek (Newport KPX076) tarafından toplanır ve 400 um çekirdek boyutlu bir fiber (dahili spektral çözünürlük ayarı: 1) yoluyla Yokogawa AQ6315A optik spektrum analiz cihazına beslenir. nm, cihazın etkin çözünürlüğü: 2 nm). Her sıcaklıkta, 600-1400 nm'lik spektral aralık içinde, ~0.8 nm'lik bir ortalama dalga boyu ayırımında 1000 veri noktası kaydedilir. Spektral çözünürlük ayarı, Cr:Colquiriites'in ilgililenen sıcaklık aralığı içinde yakın aralıklı keskin emisyon çizgilerine sahip olmadığını doğruladığımız için yeterlidir. SNR'yi iyileştirmek için, her sıcaklıkta, ortalama 64 ölçüm, her polarizasyonda yoğunluk spektrumu olarak kaydedilir.

Flöresans emisyon ölçümlerini takiben, Normalleştirilmiş emisyon kesit ( $\sigma_e(\lambda)$ ) eğrileri, ölçülen flüoresans emisyon spektrumunu  $\lambda^5$  faktörü ile çarparak (burada  $\lambda$  emisyon dalga boyudur) ve ardından eğrileri yeniden normalize ederek elde edilmiştir. Mutlak birimler cinsinden emisyon kesiti, değiştirilmiş Füchtbauer – Ladenburg formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_{e,a}(\lambda, t) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau_R} \frac{I_a(\lambda)}{\int \left( \frac{1}{3} I_c(\lambda) + \frac{2}{3} I_a(\lambda) \right) d\lambda} \quad (2.7)$$

Burada,  $I_{a,c}(\lambda)$  tek eksenli kristalin a, c eksenlerinde ölçülen emisyon yoğunlukları, n kazanç ortamının ortalama kırılma indisi,  $\tau_R$  radyatif ömür (radiative lifetime), c ışık hızını temsil etmektedir.

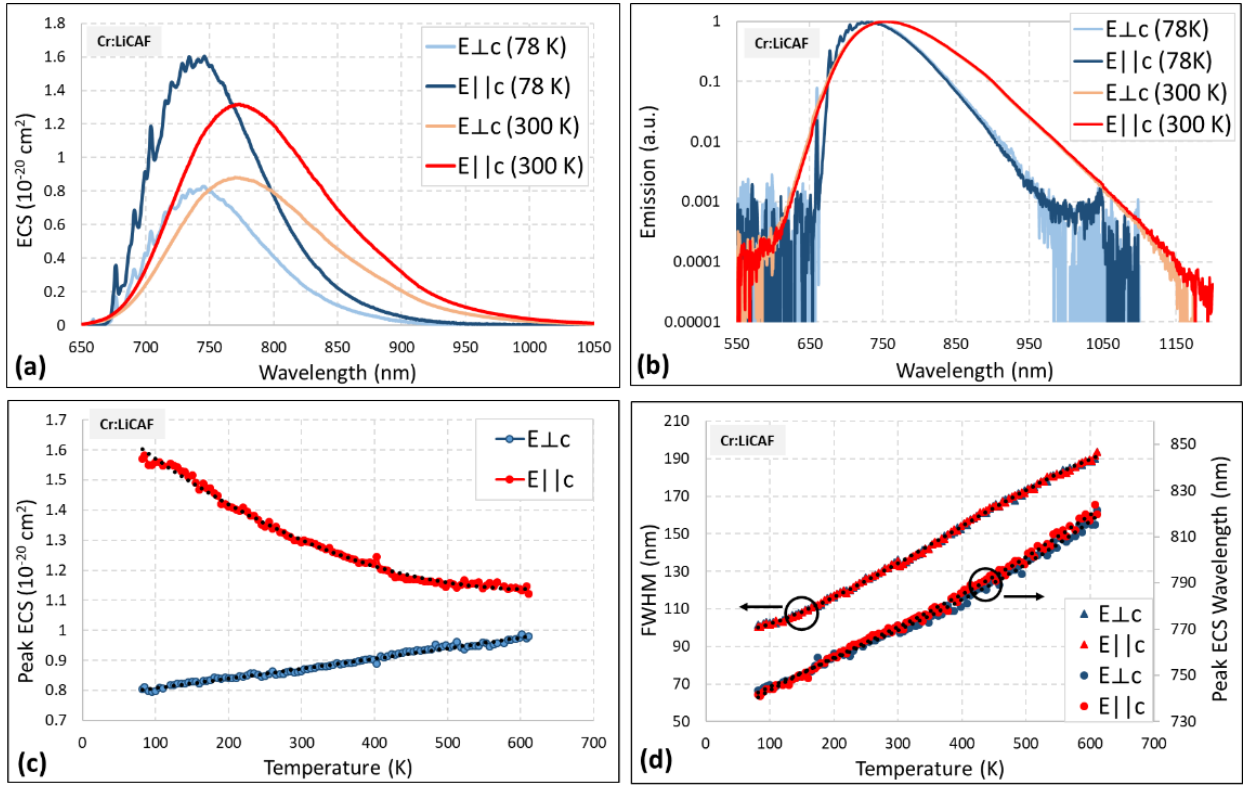


**Şekil 2. 25 (a)** E||c ve **(b)** E⊥c polarizasyonları için 78-618 K aralığında Cr:LiCAF için sıcaklık ile ECS'nin ölçülen değişimi.

Yapılan deneyler sonucunda 78-618 K aralığında Cr:LiCAF'ın ölçülen ECS spektrumları Şekil 2.25'te gösterilmektedir. Beklentiler dahilinde, artan sıcaklık, emisyon dalga boyunun ve tam genişliğin yarı maksimumda ( FWHM) kırmızıya kaymasına neden olur emisyon sıcaklıkla artar. Öte yandan, kristal kriyojenik sıcaklıklara soğutulduğunda, E||c polarizasyonundaki tepe emisyon kuvveti artarken, E⊥c polarizasyonunda hafif bir düşüş gözlenir.

Şekil 2.26, Cr:LiCAF için ECS ölçüm sonuçlarını özetlemektedir. Şekil 2.26 (a)'da, 78 K'de ve 650 nm ile 1050 nm arasında oda sıcaklığında (300 K) hem E⊥c hem de E||c polarizasyonları için ölçülen ECS'yi göstermektedir. Şekil 2.26 (b)'de, spektrumun omuzlarında daha iyi görünürlük için aynı sonuçlar daha geniş bir spektral aralıkta (550-1150 nm) normalleştirilmiş logaritmik birimlerde gösterilmektedir. Oda sıcaklığında her iki polarizasyon için ölçülen emisyon spektrumları,  $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$  geçişi için tipiktir. Oda sıcaklığında  $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$  emisyonunun tepe noktası 772 nm'de ortalanır ve E||c ve E⊥c polarizasyonları için yaklaşık  $1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  ve  $0.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  kesit alanına sahiptir. Bu değerler Payne ve diğerlerinin ilk sonuçlarıyla oldukça iyi eşleşir (Payne vd., 1990a). Oda sıcaklığında Cr:LiCAF emisyonunun tüm 600-1150 nm bölgesini kapsamasını destekleyecek şekilde (Şekil 2.26 (b)), literatürde gösterilen ayar aralığı 720-887 nm aralığında rapor edilmiştir (Payne vd., 1988). Cr:LiCAF'ın lazer ayarlama aralığı, kısa dalga boyu aralığında kendi kendine soğurma kayıpları, uzun dalga boyu aralığında ise ESA ile sınırlıdır (Payne vd., 1988, Demirbas vd., 2012). Bu nedenle, Şekil 2.25'te gösterilen emisyon spektrumu kazancı doğrudan yansıtmaz.





**Şekil 2. 26** Cr:LiCAF'ın E $\perp$ c ve E $\parallel$ c polarizasyonlarında ölçülen sıcaklığa bağlı ECS özellikleri: **(a)** 77 K ve 300 K'de ECS, **(b)** Logaritmik ölçekte 78 K ve 300 K'de normalize edilmiş emisyon spektrumları, **(c)** ECS tepe değerinin değişimi, **(d)** 78-618 K aralığında tepe emisyon dalga boyu ve emisyon FWHM'in sıcaklık ile değişimi.

Şekil 2.26 (a)'da görüldüğü üzere, 78 K'da ölçülen emisyon spektrumu, yerel tepe noktaları ile yapılandırılmış şekilde ortaya çıkmaktadır. Bu tepe noktalarının titreşim atamaları (Demirbas vd., 2012)'de 20 K'da bildirilmiştir. Düşen sıcaklıklarla birlikte, emisyon spektrumunun daha kısa dalga boylarına doğru kayması ve emisyon bant genişliğinin daralması da gözlemlenmiştir. Pik emisyon dalga boyu 300 K'de 772 nm'den 78 K'da 743 nm'ye kayarken, 78 K'de E $\parallel$ c ve E $\perp$ c polarizasyonları için tepe ECS değerleri sırasıyla  $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  ve  $0.8 \text{ olur} \times 10^{-20} \text{ cm}^2$  olarak ölçülmüştür. Beklendiği gibi, azalan sıcaklıklarla birlikte E $\parallel$ c polarizasyonunda emisyon gücünde bir artış görüyoruz, ancak ilginç bir şekilde E $\perp$ c polarizasyonunda emisyon gücünde bir düşüş görüyoruz. Literatürde sunulmuş önceki çalışmalarda, normalleştirilmiş birimlerde (Demirbas vd., 2012) polarize olmayan ışık için Cr:LiCAF'ın kriyojenik ECS verileri sağladığında ötürü, bu çalışmada ölçülen 78 K verileri için literatürle bir karşılaştırma yapılması mümkün olmamıştır. Bu bakımdan burada sunulan emisyonun sıcaklığa bağlı değişim karakteristiğinin raporlanması bir ilk olma özelliği taşımaktadır.

Şekil 2.26 (c), 78-618 K aralığında tepe ECS değerinin ölçülen değişimini göstermektedir (bu grafik için, Şekil 3'te gösterilen veriler basit bir Matlab kodu ile analiz edilir ve ilgili bilgiler

çıkarılır). E||c ve E⊥c polarizasyonlarındaki tepe emisyon kesitlerinin oranının 600 K'de ≈1.15'ten 300 K'de ≈1.5'e ve 78 K'de ≈2'ye yükseldiğine dikkat çekelim. Dolayısıyla, Cr:LiCAF kristalinin soğuması lazer eylemi için uygun olan E||c emisyonunu artırır. Son olarak, Şekil 2.26 (d)'de, her iki polarizasyon için ölçülen emisyon bant genişliği ve tepe emisyon dalga boyunun değişimi sunulmaktadır. Burada, beklendiği gibi, artan sıcaklıkla birlikte emisyon spektrumları genişlemekle birlikte daha uzun dalga boylarına kaymaktadır. Her iki polarizasyon için FWHM emisyonu, artan sıcaklıkla (78 K →608 K) yaklaşık 100 nm'den 195 nm'ye yükselirken, her iki polarizasyon için tepe ECS dalga boyu 743 nm'den 823 nm'ye kayar.

Bu bölümü kapatırken, Cr:Colquiriites'in önemli ECS parametrelerinin sıcaklığa bağlılığı için uygun denklemler sağlamak istiyoruz. Analitik temsil için dördüncü dereceden polinom fonksiyonlarının kullanımı aşağıda verildiği şekli ile benimsenmiştir.

$$\lambda_p(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4, \quad (2.8)$$

$$\sigma_e(\lambda_p, T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 \quad (2.9)$$

$$\Delta\lambda_e(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4T^4 \quad (2.10)$$

Burada,  $\lambda_p(T)$  tepe emisyon dalga boyu,  $\sigma_e(\lambda_p, T)$  tepe emisyon dalga boyundaki ECS ve  $\Delta\lambda_e(T)$  ölçülen emisyon spektrumlarının yarı maksimumdaki tam genişliğidir. İlgili en uygun sonuçlar Şek. 2.25 siyah kesikli çizgilerle ve her üç kristal için ilgili en uygun parametreler Tablo 3-5'te verilmiştir. Ayrıca, daha kolay erişim için, Tablo 6 seçilen sıcaklıklarda E||c polarizasyonu için tüm kristaller için tepe emisyon dalga boyu, tepe ECS ve emisyon FWHM için ölçülen/uygun değerleri tablo haline getirilmiştir (Okuyucu, 2021).

**Tablo 2. 5** Cr:LiCAF'ın E⊥c ve E||c polarizasyonlarında tepe emisyon dalga boyunun temsilinde Denklem 2.8'deki sıcaklık katsayılarının en uygun değerleri

	Axis	$a_4(K^{-4})$	$a_3(K^{-3})$	$a_2(K^{-2})$	$a_1(K^{-1})$	$a_0$
Cr:LiCAF	E  c	$-4 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-7}$	$0.4 \times 10^{-3}$	0.212	725
	E⊥c	-	$2 \times 10^{-7}$	$-0.1 \times 10^{-3}$	0.142	731

**Tablo 2. 6** Cr:LiCAF'ın E⊥c ve E||c polarizasyonlarında tepe ECS değerinin temsili için Denklem 2.9'daki sıcaklık katsayılarının en uygun değerleri

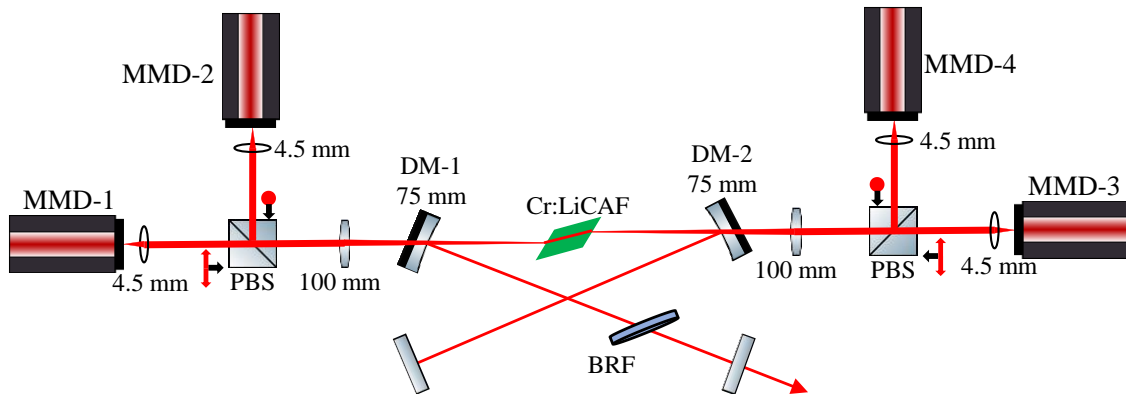
	Axis	$b_2(K^{-2})$	$b_1(K^{-1})$	$b_0$
Cr:LiCAF	E  c	$2 \times 10^{-6}$	$2 \times 10^{-3}$	1.75
	E⊥c	-	$0.3 \times 10^{-3}$	0.773

**Tablo 2. 7** Cr:Colquirites'de emisyon spektrum genişliğinin (FWHM) temsili için Denklem 2.10'daki sıcaklık katsayılarının en uygun değerleri. 9. Emisyon genişliğinin polarizasyondan bağımsız olduğu bulunmuştur.

	$c_4(K^{-4})$	$c_3(K^{-3})$	$c_2(K^{-2})$	$c_1(K^{-1})$	$c_0$
Cr:LiCAF	-	$-4 \times 10^{-7}$	$0.4 \times 10^{-3}$	0.045	93.75

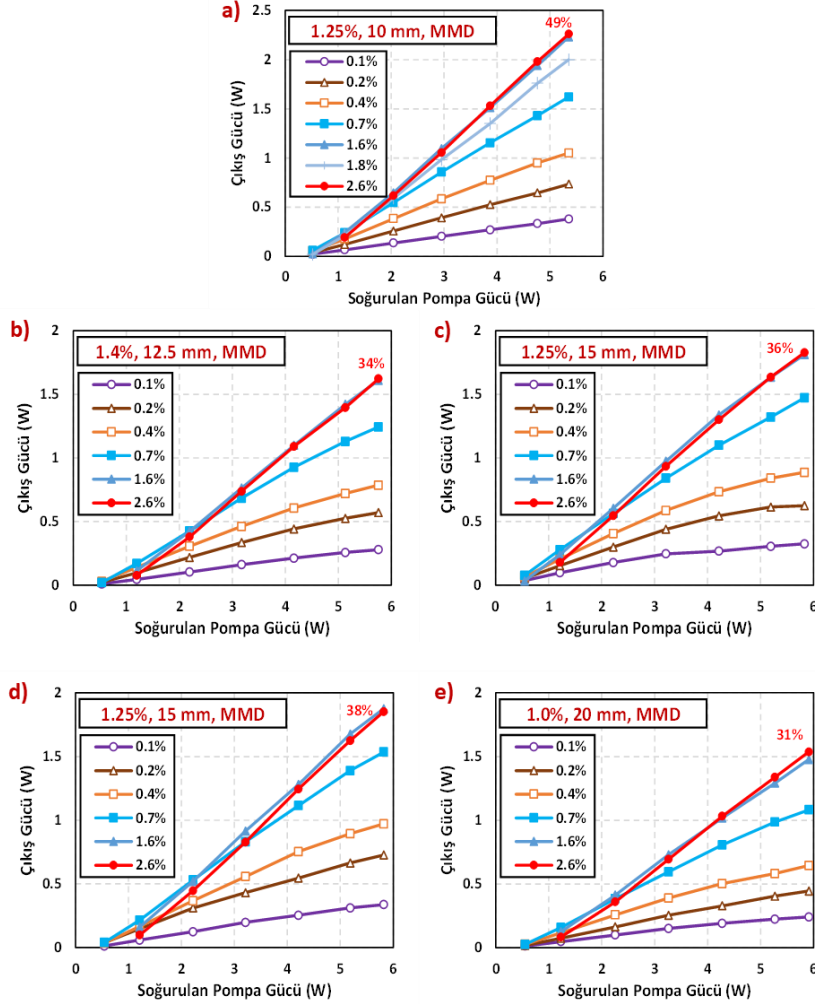
## 2.5 Sürekli Dalga (CW) Cr:LiCAF Güç Ölçeklemeleri

Cr:LiCAF kristalinin sürekli dalga ve kip-kitleme düzeneklerinin deneysel olarak oluşturulması ve operasyonel karakteristiklerinin incelenmesini kapsayan bu iş paketi dahilinde, proje kapsamında daha önceden alınmış olan 2.4 W çıkış gücüne sahip USHIO HL63520HD diyotlarının ikili çıkışlı (dual emitter) olmasından ve yapılan testler sonucunda maksimum çıkış gücü olan 2.4 W değerine çıkamamış olmasından ötürü, diyotlar herhangi bir kavite kurulumunda kullanılamamıştır. Bu diyotlar yerine ABU-LTL envanterinde bulunan 660 nm de 1.8 W çıkış gücüne sahip tek çıkışlı (single emitter), çok modlu (multimode) nLight lazer diyotlar, yine ABU-LTL envanterindeki ILXLightwave diyot tutucularıyla birlikte kullanılmıştır. Kavitede kullanılmak üzere kullanılacak kristaller, LaserAnd firması tarafından talep edildiği üzere ikinci sefer üretilip tarafımıza gönderilen brewster kesimli 10, 12.5, 15(2) ve 20 mm'lik kristallerden oluşmaktadır. Yapılan testler sonucunda kristallerin krom katkılama oranları kristal uzunluklarına göre sırasıyla %1.25, %1.40, %1.25, %1.25, %1 olarak ölçülmüştür. Bu testler sonucunda ikinci sefer talep üretilmesine rağmen istenilen katkılama oranına (%1.5) tam olarak yaklaşılamamış olsada kristallerin deneyler için uygun olabileceğine karar verilmiştir.



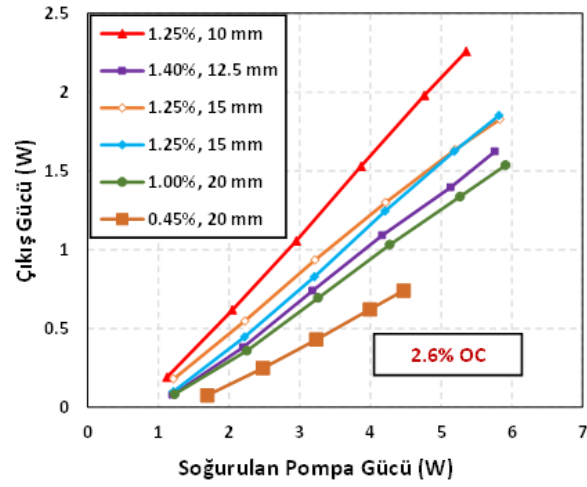
**Şekil 2. 27** Dört adet 1.8 W çıkış gücüne sahip çokmodlu diyotlarla pompalanan deneysel Cr:LiCAF lazer kavitesi şeması.

Tek emitörlü MMD diyotları,  $150 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$ 'lik bir asimetric enine yayma alanına sahip olup, diyot çıkışı, hızlı eksen boyunca kırınım ile sınırlı, yavaş eksen boyunca çok modlu olup, M2 değeri yaklaşık 10'dur. 2.5 A de  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  tutucu sıcaklığında yaklaşık olarak 1.6 W çıkış gücüne ulaşmışlardır. Yerleşik bir silindirik mikro lens yardımı ile hızlı ekseninde diyot ışını kısmen hizalanmıştır. Daha sonra, lazer diyotlarının çıkışı, 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik lenslerle kolime edildikten sonra, odak uzunlukları 100 mm olan akromatik çiftler ve eğrilik yarıçapı 75 mm olan kavisli dikroik pompa aynası (DM-1, DM-2) kullanılarak lazer kristalinin içine odaklanmıştır. Şekil 2.27'da görüldüğü gibi 2 (MMD-2) ve 4 (MMD-4) numaralı çok modlu diyotlar ise polarizasyonu 90 derece çevrilmiş polarize ışın ayırıcı ile (polarizing beam splitter PBS) 1 ve 3 numaralı diyotlar ile karşılaştırılarak sisteme gönderilmiştir. Kazanç ortamı olan Brewster kesimli Cr:LiCAF kristaller, bakır tutucuya yerleştirilip, Brewster açısında kaviteye yerleştirilmiştir. Deneyler boyunca tutucu sıcaklığı  $15 \text{ }^\circ\text{C}$  deki su akışı ile sabit tutulmuştur.



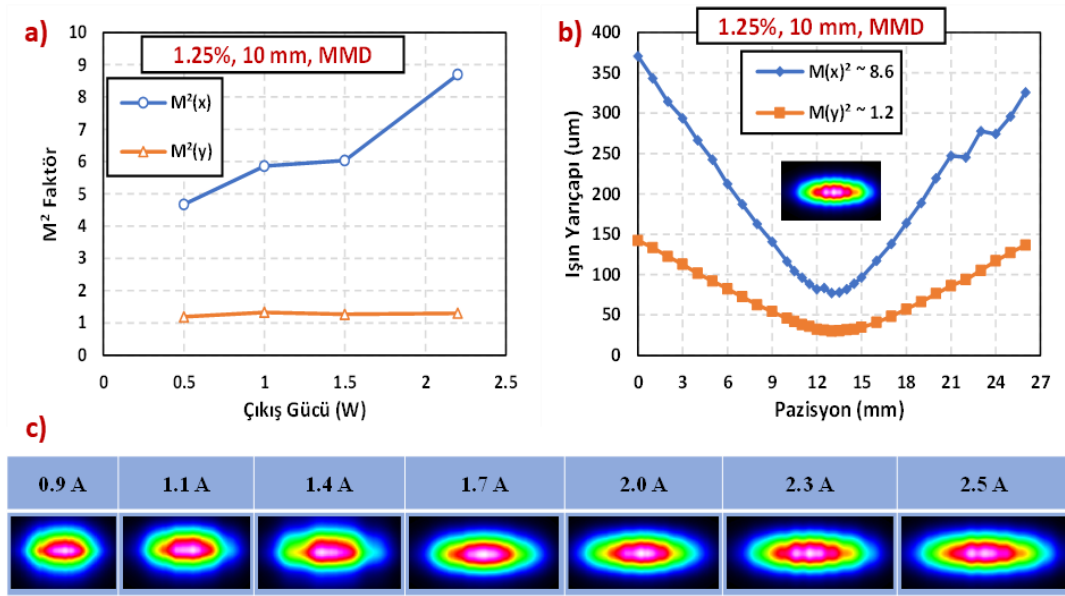
**Şekil 2. 28** Dört adet çok-modlu diyotla pompalanan, sürekli-dalga 5 farklı Cr:LiCAF (sırasıyla 10 mm, 12.5 mm, 15 mm (1), 15 mm (2) ve 20 mm) kavitesine ait 6 farklı geçirgenliğe (sırasıyla %0.1, %0.2, %0.4, %0.7, %1.6 ve %2.6) sahip sahip çıkış aynası ile alınmış verim eğrileri.

Dört adet çok modlu diyotla pompalanan 10 mm %1.25 krom katkılı kazanç ortamına ait sürekli-dalga verim eğrileri Şekil 2.28(a)'da gösterilmiştir. Kurulan 4 pompalı siteme ilk olarak 10 mm kazanç ortamını yerleştirildi. 7 farklı geçirgenliğe (%0.1, %0.2, %0.4, %0.7, %1.65, %1.8, %2.6) sahip çıkış aynaları kullanılarak sürekli-dalga ölçümler alınmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda en yüksek güce %2.6 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ile ulaşılmıştır. 5.53 W soğurma gücünde 790 nm merkez dalga boyunda 2.26 W çıkış gücü elde edilmiştir. Lazer çalışma eşik değeri yaklaşık olarak 770 mW, lazer verim eğrisi %49 ve optik-optik dönüşümü %33 olarak ölçülmüştür. Ayrıca %1.6 çıkış aynasıyla %46 verim eğrisinde 2.23 W çıkış gücü elde edilmiştir.



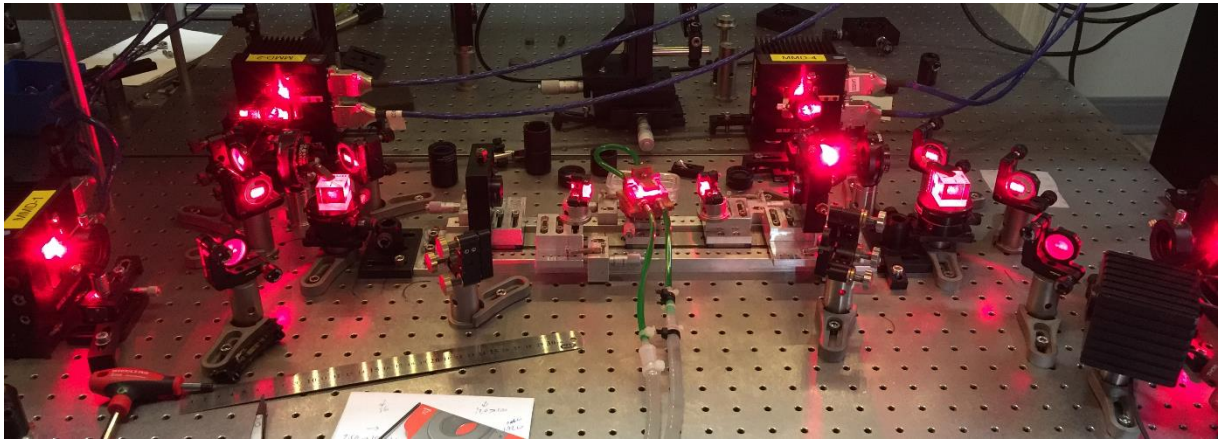
**Şekil 2. 29** Dört adet çok-modlu diyotla pompalanan, sürekli-dalgı Cr:LiCAF kavitesine ait 5 farklı Cr:LiCAF kristali %2.6 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ile alınmış verim eğrileri.

Proje kapsamında alınan bütün kristaller aynı sistemde kullanılıp ölçümler en iyi çıkış gücünün elde edildiği 2.6% geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak şekil 2.29'da karşılaştırılmıştır. Ayrıca, LaserAnd firmasından alınmış olan fakat katkılama oranının düşük çıktığı 20 mm lik kristalde karşılaştırma için grafiğe eklenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda 10 mm ~%1.25 Cr<sup>3+</sup> katkılama oranına sahip kristal 2.26 W çıkış gücüne 5.35 W soğurma gücünde ulaşmıştır. Lazer çalışma eşik değeri yaklaşık olarak 770 mW ve lazer verim eğrisi %49 olarak ölçülmüştür. Diğer kristaller ise sırasıyla 12.5 mm 1.63 W ve %34, 15 mm (1) 1.82 W ve %36, 15 mm (2) 1.85 W %38, 20 mm %1 katkı 1.53 W %31 ve 20 mm %0.45 katkı 741 mW ve %24 çıkış gücü ve verim eğrilerine sahiptir. Ayrıca bekledendiği üzere kristal boyunun uzamasıyla soğurulan pompa gücü 10 mm %1.25 krom katkı 1.82 W değerlerinden, 20 mm %1 krom katkı 1.53 W değerlerine ulaşmıştır. Öte yandan, %0.45 katkı 20 mm kristalin yapılan ölçümler sonucunda soğurulan pompa gücü 4.5 W da sınırlı kalmıştır.



**Şekil 2. 30** Şekil 2.29. (a) 10 mm Cr:LiCAF lazeri için farklı çıkış güçlerinde ölçülen ışın M2 faktör grafiği. (b) 2.3 Amper driver akımındaki ışın çıkış gücü M2 faktörü x eksenini için 8.6 ve y eksenini için 1.2. (c) 10 mm Cr:LiCAF lazeri için farklı pompa akımlarındaki ışın profili.

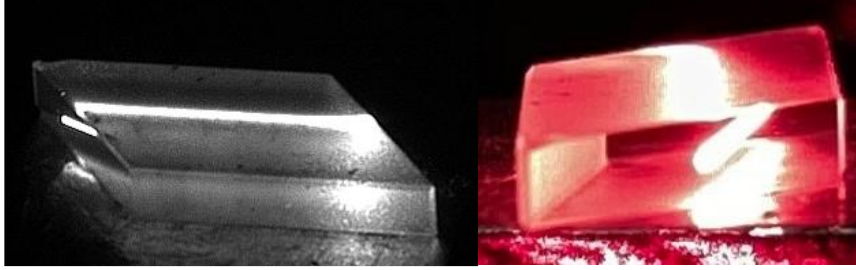
Şekil 2.30'da 10 mm kazanç ortamı kullanılarak oluşturulmuş Cr:LiCAF lazerinin çıkış ışınının kalitesi ve ışın profili incelenmiştir. Şekil 2.30(a)'da çıkış gücü arttıkça M2 faktörünün x ekseninde arttığını ve y ekseninde ise neredeyse aynı kaldığı görülebilir. M2 faktörünün artması bağıl ekseninde ki odaklama kalitesini etkilemektedir. Bu artışı da 2.30(c)'deki görsellerde görmek mümkündür. Buradaki önemli faktörlerden biri kullanım olduğumuz lazer diyotlardır. Artan akımla birlikte lazer diyotlarındaki asimetrik enine yayma oranları da değişmektedir. Ek olarak Şekil 2.31'de kullanılan kavitenin fotoğrafı verilmiştir.



**Şekil 2. 31** Laboratuvarımızda kurulan 4 adet çok-modlu diyotla pompalanan sürekli dalga Cr:LiCAF lazerinin bir resmi.



**Şekil 2. 32** Proje kapsamında satın alınan farklı boylardaki Cr:LiCAF kristalleri

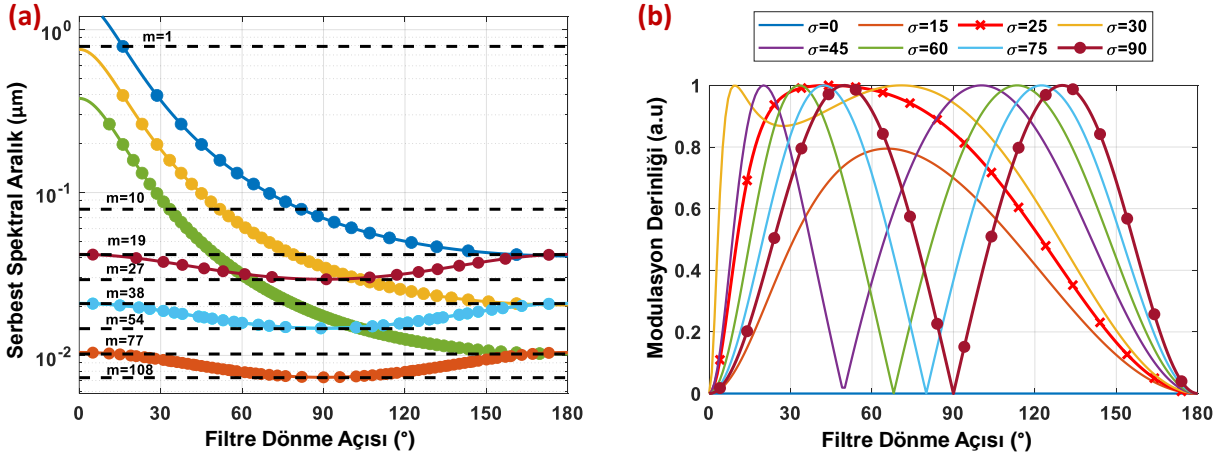


**Şekil 2. 33** Proje kapsamında satın alınan CMOS kamera ile lazer ışının Cr:LiCAF kristali içerisindeki görünümü ve normal kamera ile çekilmiş görüntüsü.

## 2.6 Çift-Kırılmalı Filtre Kullanımı ile Geniş Ölçüde Ayarlanabilir İki Renkli Cr:LiCAF Lazeri

Proje kapsamında yapılan çalışmalara ek olarak, çift-kırılmalı filtre (birefringent filter, BRF) kullanılarak geniş ölçüde ayarlanabilir iki renkli Cr:LiCAF lazeri üretilmiştir. Yapılan çalışmalarda, 10 mm uzunluğunda %1.25 krom katkılı kazanç ortamı kullanılmıştır. Ayrıca, kullanılan çift-kırılmalı filtrelerin iki farklı ( $25^\circ$  ve  $90^\circ$ ) dalış açısı ( $\sigma$ , optik eksen ve kristal yüzeyi arasındaki açı) için, 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm olmak üzere farklı kalınlıklarındaki performansları ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Bunun için tek optik eksene sahip (uniaxial) kristal kuvars malzemedan üretilmiş BRF'ler kullanılmıştır. Başlangıç noktası olarak, Şekil 2.33(a), plakanın dönme açısının bir fonksiyonu olarak bu çalışmada kullanılan BRF filtrelerinin serbest spektral aralığının (FSR) hesaplanan değişimini göstermektedir. Hesaplama hem yüzey üstü ( $\sigma=90^\circ$ ) hem de yüzey dışı ( $\sigma=25^\circ$ ) optik eksen BRF'leri için yapılmıştır. Burada, daha önce tanıtıldığı gibi,  $\sigma$ 'nın BRF plakasının (Demirbas, 2017) dalış açısı olduğuna dikkat edin; bu, plaka yüzeyi normali ile optik eksen arasındaki açı ve yüzey üstü optik eksen BRF için  $\sigma=90^\circ$ 'dir. Şekil 2.33(a)'daki hesaplama 2 mm, 4 mm ve 8 mm kalınlıktaki BRF'ler için yapılmıştır. Merkezi çalışma dalga boyu, oda sıcaklığında Cr:LiCAF lazer malzemesinin kazanç zirvesi olan 790 nm olarak alınmıştır.





**Şekil 2. 34 (a)** 2 mm, 4 mm ve 8 mm filtre kalınlığı için yüzey üstü ( $\sigma=90^\circ$ ) ve yüzey dışı ( $\sigma=25^\circ$ ) kristal kuvars çift kırılmalı filtre plakalarının 790 nm merkez dalga boyunda hesaplanmış serbest spektral aralığı. **(b)** Kuvars çift kırılmalı filtre plakasının, plaka dönüş açısının ( $\rho$ ) bir fonksiyonu olarak hesaplanan modülasyon derinliği. Hesaplama dalış açısının ( $\sigma$ ) farklı değerleri için yapılmıştır.

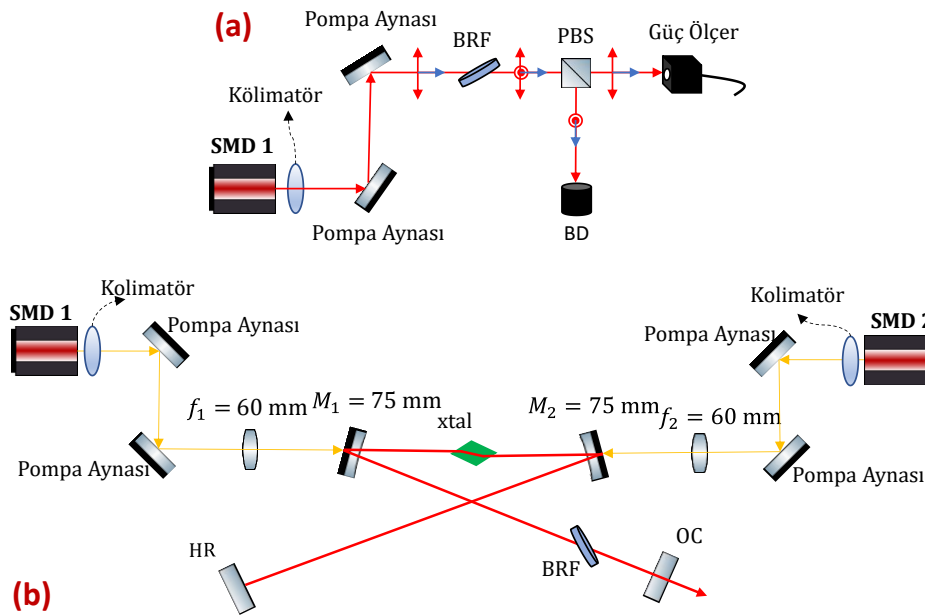
Şekil 2.34 (a)'dan, normal yüzey üstü optik eksen BRF için elde edilebilir FSR değerlerinin ~7-41 nm aralığında sınırlı olduğunu görebiliriz. Daha kesin olarak, ~29-41 nm, ~14-20 nm ve ~7-10 nm FSR değerleri, sırasıyla 2 mm, 4 mm ve 8 mm kalınlıktaki yüzey üstü optik eksenli BRF'ler için elde edilebilir. Bu, altta yatan fiziğe biraz detaylı bakılarak anlaşılabilir. Bir çift kırılımlı filtrenin FSR'si (Demirbas, 2017) kullanılarak hesaplanabilir:

$$FSR = \frac{\lambda}{m} \quad (2.11)$$

Yüzey üstü optik eksenli BRF'nin ana dezavantajlarından biri, erişilebilen sınırlı sayıda filtre sırasındır (Naganuma vd.,1992). Örnek olarak, 2 mm kalınlığındaki yüzey optik eksenli BRF için yalnızca 19 ile 27 arasındaki filtre sıralarına erişilebilir (filtre döndürülerek, yalnızca  $\sim 38.3 \pi$  ve  $\sim 54.4 \pi$  arasındaki faz gecikme değerleri taranabilir) . Bu, filtrenin FSR'sini önemli ölçüde sınırlar (Denklem 2.11): FSR, basitçe  $\lambda/m$  yoluyla tahmin edilebilir, burada  $\lambda$  merkezi dalga boyudur ve m filtre sırasındır, dolayısıyla 2 mm kalınlıktaki BRF için, FSR değerleri  $\lambda$  arasındadır /19 $\cong$ 41 nm ve  $\lambda/27\cong$ 29 nm elde edilebilir.

Bir filtreyi kontrol etmek için bir diğer önemli parametre de modülasyon derinliğidir (yan bant reddetme gücü olarak da bilinir). Bir BRF'nin reddetme gücünü artırmak için, lazer boşluğuna TE(s) polarize boşluk içi ışın için kayıplar oluşturan optik elemanlar dahil edilir. Lazer kristali ve BRF, Brewster açısında yerleştirildiğinde, yüzeylerinden yansımalar, TE(s) polarize ışını için halihazırda bir miktar reddetme düzeyi oluşturur. Öte yandan, istenmeyen dalga boylarının polarizasyonu (filtrenin iletim maksimumundan uzaktaki dalga boyları) genel olarak eliptiktir ve rastgele miktarda TE(s) ve TM(p) polarizasyon ışığı içerir. Bu nedenle, BRF filtresini içeren bir

lazer boşluğunun etkili modülasyon derinliği, her bir boşluk içi elemandaki ışığın polarizasyon durumuna bakılarak hesaplanmalıdır (bu, boşluğun genel Jones matrisinin polarizasyon özmodlarının ve özdeğerlerinin hesaplanmasını içerir) (Kobtsev & Svetsitskaya, 1992). Örnek olarak, polarizasyon durumuna bağlı olarak Cr:LiCAF lazer kavitemiz için, ortaya çıkabilecek reddetme kaybı %0 ile %55 arasında ölçeklenir. Soruna daha ayrıntılı bakmak için, Şekil 2.34 (b), plaka dönüş açısının bir fonksiyonu olarak BRF filtre modülasyon derinliğinin hesaplanan değişimini göstermektedir. Burada modülasyon derinliğinin isteğe bağlı birimlerde olduğuna ve buradaki Cr:LiCAF boşluğu için 1 değerinin %55 kaybı gösterdiğine dikkat edin. Şekil 2.34 (a)'da olduğu gibi, hesaplama 790 nm'lik bir merkezi dalga boyu ve  $0^\circ$  ile  $90^\circ$  arasındaki optik eksen dalış açıları için yapılmıştır. Buradaki ana nokta, BRF'yi ayarlarken ideal olarak, keskin bir filtreleme işlemi (güçlü yan bant reddi) elde etmek için genellikle filtrenin tüm dönüş aralığı boyunca büyük miktarda modülasyon derinliğini korumak isteriz. Şekil 2.34 (b)'den görebileceğimiz gibi,  $\sigma=25^\circ$ , oldukça geniş bir BRF plaka dönüş açıları aralığında nispeten yumuşak bir modülasyon derinliği sağlar ve bu da onu geniş bant ayarlama için ideal bir aday yapar.

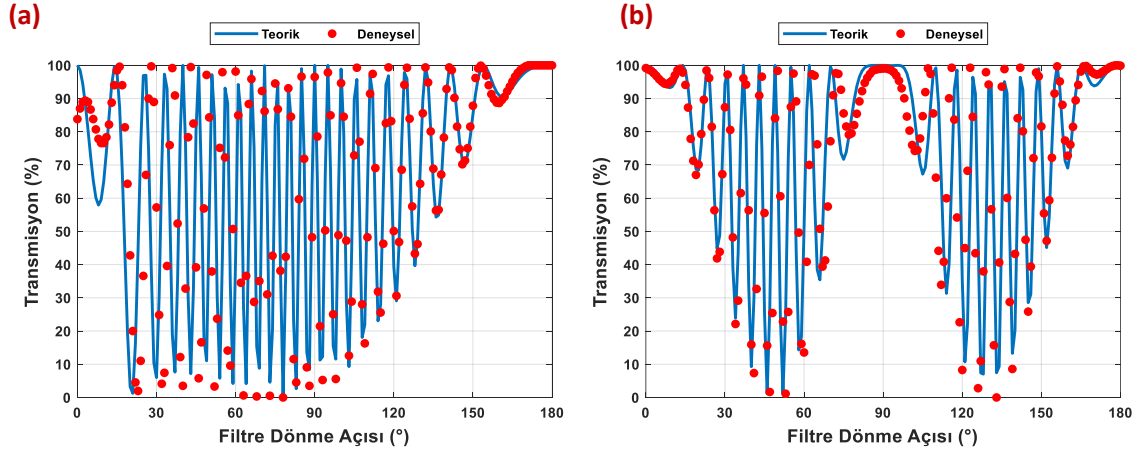


**Şekil 2. 35 (a)** BRF optik eksen dalış açısının karakterizasyonu için kullanılan kurulumun şeması. **(b)** İki renkli lazer deneylerinde kullanılan diyot pompalı Cr:LiCAF lazerin şeması. SMD: tek modlu diyot, HR: yüksek reflektörlü ayna, OC: çıkış koplörü, BRF: çift kırılmalı plaka, PBS: polarize ışın ayırıcısı küp, BD: ışın dökümü.

İlk deney setinde, kesme açılarını deneysel olarak belirlemek ve doğrulamak için çift kırılmalı plakaların iletim özelliklerini ölçtük (Şekil 2.35 (a)). Bu amaçla, prob ışını olarak 660 nm dalga boyunda çalışan tek bir uzamsal mod diyotu (SMD 1) kullandık. SMD'den gelen ışık önce 4.5

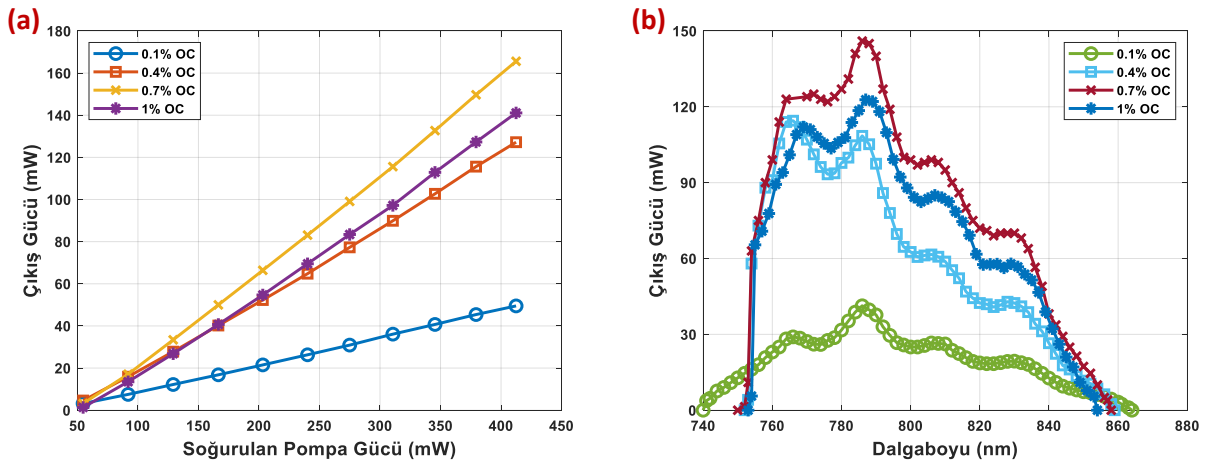
mm odak uzaklığına sahip küresel olmayan bir mercekle paralel hale getirilir ve ardından iki dielektrik pompa aynası kullanılarak düz bir çizgi boyunca dikkatlice hizalanır. SMD diyot çıkışı, 1:200'den daha iyi bir polarizasyon oranıyla TM(p)-polarize edilmiştir. BRF plakaları, Brewster açısında ışın hattına yerleştirilir. BRF üzerinden iletdikten sonra ışın, BRF'nin durumuna bağlı olarak hem TM(p) hem de TE(s) polarizasyon bileşenlerine sahiptir. TE(ler) polarize iletilen ışığı ortadan kaldırmak için BRF'den sonra bir polarize edici ışın ayırıcı (PBS) küpü eklenir. Deneyler sırasında, sistemin iletim özelliklerini BRF dönüş açısının ( $\rho$ ) bir fonksiyonu olarak ölçtük. Daha sonra deneysel veriler, BRF plakalarının kesim açılarını belirlemek için teorik olarak hesaplanan eğrilerle karşılaştırılır.

Bir sonraki adım olarak, eldeki yüzey üstü ve yüzey dışı optik eksenli BRF'leri kullanırken Cr:LiCAF'ın iki renkli performansını deneysel olarak araştırdık. Şekil 2.34 (b), lazer sisteminin bir şemasını göstermektedir. Kazanç ortamı, Şekil 2.35 (a)'da kullanılanla aynı özelliklere sahip iki adet 660 nm tek uzamsal mod diyot ile pompalanır. SMD diyotları, 20 °C çalışma sıcaklığında 210 mW'a kadar çıkış gücü sağlar. Kazanç ortamı içindeki pompa ışınlarını odaklamak için 60 mm odak uzaklığına sahip akromatik çiftler (f1-f2) kullanıldı. Cr:LiCAF kristali 10 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığında, Brewster-Brewster kesimlidir ve %1.2 krom katkısına sahiptir. 660 nm'de TM(p) polarize gelen pompa ışığının ~%91'ini emer. İki eğimli ayna (M1 ve M2), bir yüksek yansıtıcı ayna (HR) ve bir düz çıkış kuplöründen (OC) oluşan, astigmatik olarak dengelenmiş bir X-katlanmış boşluk kullanılır. M1-M2, R=75 mm eğrilik yarıçapına sahiptir ve 660 nm civarında bir geçiş bandı ve 740-900 nm bölgesinde yüksek yansıtma bandı ( $R > \%99.9$ ) sağlar. İlk deneylerde, sistemin tek renkli lazer performansı ve ayar davranışı, %0.1-1 aralığında iletimli çıkış kuplörleri kullanılarak karakterize edildi. Daha sonra, eldeki OC'ler arasında en iyi cw performansını veren %0.7 verici çıkış kuplörü kullanılarak iki renkli lazer performansı ayrıntılı olarak incelenmiştir.



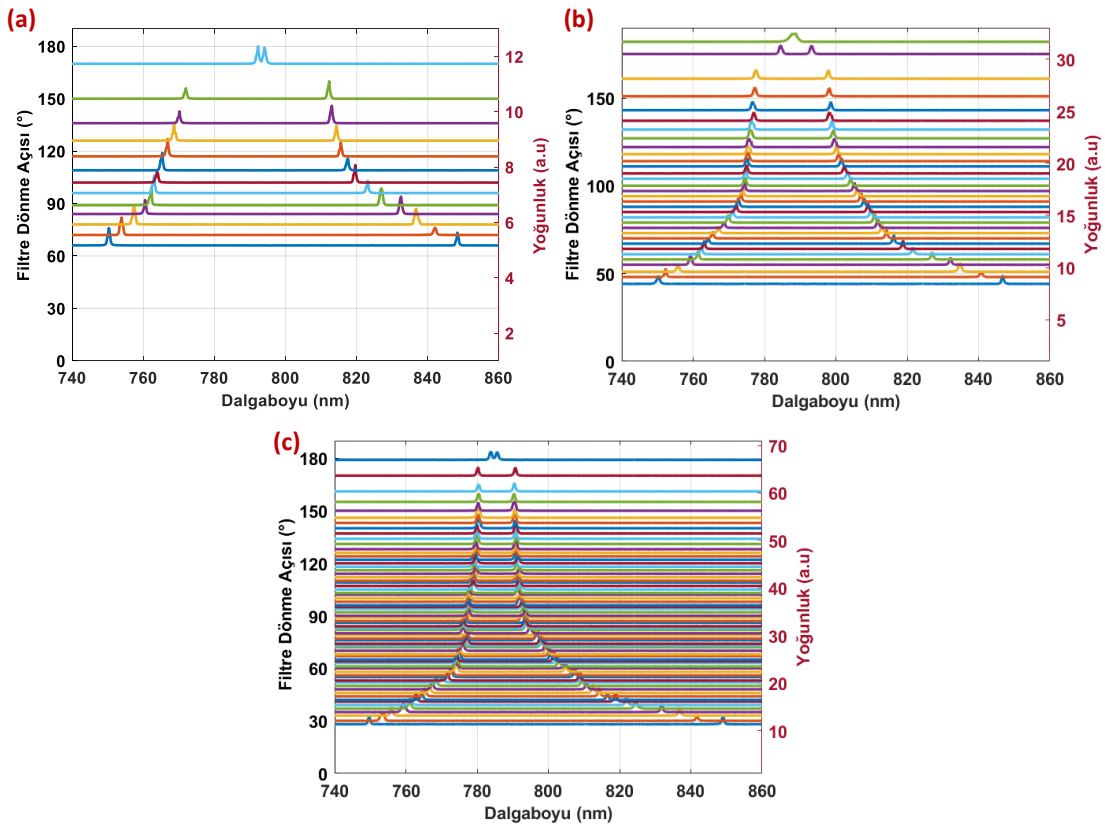
**Şekil 2. 36** Dalış açıları ( $\sigma$ ) (a)  $25^\circ$  ve (b)  $90^\circ$  olan filtreler için 0-180° aralığında filtre dönüş açısının bir fonksiyonu olarak 2 mm kalınlığında kristal kuvars çift kırılmalı filtrelerin iletim özelliği. Kırmızı noktalar deneysel olarak ölçülen verilerdir, düz mavi çizgiler ise ölçülen verilere en uygun olan teorik hesaplamalardır.

İlk deney setinde bir başlangıç noktası olarak, BRF filtrelerinin dalış açısını doğrulamak için çift kırılmalı filtre plakalarının iletim özelliklerini dönme açılarının bir fonksiyonu olarak 660 nm'de ölçtük. Örnek olarak, Şekil 2.36'da, ( $\sigma$ )  $25^\circ$  ve  $90^\circ$  (yüzey üzerinde) dalış açılına sahip 2 mm kalınlığındaki çift kırılmalı plakalar için veri sağlıyoruz. Şekil 2.36'deki kırmızı işaretler, çift kırılmalı filtre plakası dönüş açısının ( $\rho$ ) bir fonksiyonu olarak sistemin ölçülen iletim varyasyonunu gösterir. Kesintisiz mavi çizgiler, deneysel verilere teorik olarak en uygun olanlardır. Ölçülen verilere en uygun hale getirerek plakaların dalış açılarını  $89.9^\circ$  ve  $25.7^\circ$  olarak belirledik. Bu değerler, şirket tarafından sağlanan spesifikasyonlara ( $90^\circ$  ve  $25^\circ$ ) oldukça yakındır; bu, BRF plakalarının  $\pm 1^\circ$ 'nin altında kesme açısı hatalarıyla büyüdüğünü doğrular.



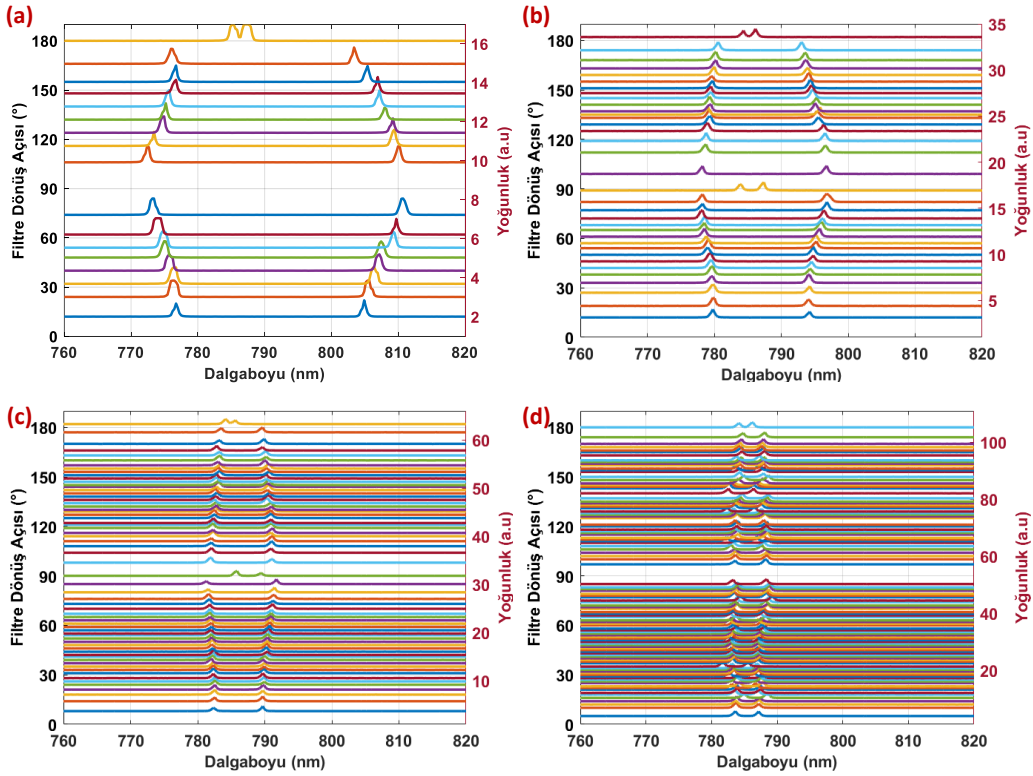
**Şekil 2. 37** (a) Ölçülen cw lazer verimliliği ve (b) %0,1-1 aralığında iletimlere sahip dört farklı çıkış aynası ile SMD pompalı Cr:LiCAF lazerin dalgaboyu ayarlama performansı.

Şekil 4, ölçülen sürekli dalga lazer performansını özetlemektedir. Şekil 2.37 (a)'da, %0.1, %0.4, %0.7 ve %1'lik iletimlerle dört farklı çıkış kuplörüyle alınan lazer verimlilik eğrilerini sunuyoruz. Her durumda, serbest çalışan lazerli dalga boyu yaklaşık 790 nm'dir. En iyi cw performansı, 412 mW emilen pompa gücünde 165 mW çıkış gücüne ulaştığımız %0.7 çıkış kuplörü ile elde edilir. Karşılık gelen eğim verimliliği ve lazer eşikgücü, sırasıyla %45 ve 54 mW'dir. Bu açıkça göstermektedir ki, mevcut çalışmada kullanılan %1.2 katkılı 10 mm uzunluğundaki kristal biraz daha yüksek miktarda pasif kayıplara sahiptir, bu da kalıcı eşiği yükseltir ve burada elde edilebilecek verimi azaltır. Çıktı eşleşmesi ile ölçülen eğim etkinliğinin varyasyonunu analiz ederek (Caird analizi (Caird, 1988)), boşluğun gidiş-dönüş kayıplarını yaklaşık  $0.3 \pm 0.05$  olarak tahmin ettik. Şekil 2.37 (b), 2 mm kalınlığında yüzey dışı optik eksen BRF ile Cr:LiCAF lazerin ölçülen tek renkli ayar özelliğini göstermektedir. Lazerin merkezi dalga boyu, %0.1 ileten OC ile 740 nm ile 864 nm arasında sorunsuz bir şekilde ayarlanabildi. Çıkış gücü açısından en iyi performans, 752-859 nm bölgesini kapsayan bir ayar aralığına erişilebilen %0.7 verici çıkış kuplörü ile elde edilir. Bu çalışmada elde edilen ayarlama aralığı (740-864 nm), literatürdeki SMD pompalı sistem raporlarıyla ((Demirbas vd., 2012)'te 746-887 nm) iyi bir uyum içindedir.



**Şekil 2. 38**  $\sigma=25^\circ$  dalış açısına sahip (a) 2 mm, (b) 4 mm ve (c) 8 mm kalınlığında yüzey dışı optik eksen kristal kuvars BRF kullanılarak Cr:LiCAF lazerin ölçülen iki renkli lazer spektrumu .

Şekil 2.38 de  $\sigma=25^\circ$  dalış açısına sahip (a) 2 mm, (b) 4 mm ve (c) 8 mm kalınlığında yüzey dışı optik eksen kristal kuvars BRF kullanılarak Cr:LiCAF lazerin ölçülen iki renkli lazer spektrumu verildi. 2 mm kalınlığında yüzey dışı optik eksen BRF, 1 ile 19 arasındaki filtre sıralarını (m değerleri) destekler ve bu nedenle  $\sim 42$  nm ile 790 nm arasındaki serbest spektral aralık değerleri uygundur (daha spesifik olmak gerekirse, aşağıdaki FSR değerleri mevcuttur) : 41.6 nm, 43.9 nm, 46.5 nm, 49.4 nm, 52.7 nm, 56.4 nm, 60.8 nm, 65.8 nm, 71.8 nm, 79 nm, 87.8 nm, 98.8 nm, 112.9 nm, 131.6 nm,  $\sim 158$  nm, 197.5 nm, 263.3 nm, 395 nm, 790 nm). Açıkça görüyoruz ki; iki renkli lazer işleminin dalga boyu ayrımı, BRF'nin FSR değerleri ile oldukça iyi eşleşir. Elbette, lazer kristalinin asimetric kazanç profili ve merkezi 790 nm tepe noktası etrafındaki boşluk kayıpları, spektral konumları biraz kaydırarak gözlemlenen küçük farklılıklara neden olabilir. Ayrıca, Cr:LiCAF kristalinin sınırlı kazanç bant genişliğinin, dalga boyu ayrımı  $\sim 100$  nm'den fazla olan iki renkli lazeri önlediğini görüyoruz.  $0-60^\circ$  dönüş açısı aralığındaki boşluğun nedeni budur: FSR, iki renkli lazerlemeyi etkinleştirmek için çok büyüktür. Daha geniş bant genişliğine (Cr:LiSAF, Ti:Safir, vb.) sahip lazer kazanım ortamı, 200 nm'den daha büyük dalga boyu ayrımlarıyla iki renkli lazeri etkinleştirebilir (örn. (Demirbas, 2017)]'de Şekil 10'a bakın).



**Şekil 2. 39** Cr:LiCAF lazerin (a) 2 mm, (b) 4 mm (c) 8 mm ve (d) 16 mm kalınlıkta yüzey üstü optik eksen kuvars BRF'si ve dalış açısı  $\sigma=90$  kullanılarak ölçülen iki renkli lazer spektrumu.

Şekil 2.39 (a) 'da 2 mm kalınlığında yüzey üstü optik eksen BRF ile alınan iki renkli lazer verilerini görüyoruz. Bu BRF için, önceki bölümde tartışıldığı gibi, 19 ile 27 arasında filtre sırası mevcuttur ve plakaların dönüş açısı ayarlanarak, ~29 nm (~790/27) ve ~42 nm (~790/19) arasındaki FSR değerleri taranabilir. Bu kalınlık için elde edilen lazer dalga boyu çiftleri ve lazerin cw çıkışı da şekilde gösterilmiştir. 0-180° aralığında dönüş açısı tarandığında 16 farklı noktada iki renkli lazerleme işlemi gözlemledik. Çift renkli kalıcı çizgilerin dalga boyu ayrımı, plakanın FSR değerlerine kabaca uyan 27-37 nm aralığında yer alır. Ayrıca, dalga boyu çiftlerinin merkezi dalga boyunun, Cr:LiCAF malzemesinin kazanç zirvesi olan 791 nm civarında olduğuna dikkat edin. Temel olarak, iki renkli lazer işlemi, BRF kazanç zirvesi (~790 nm) etrafında kabaca simetrik olarak ortalanmış iki iletim maksimumu sağladığında elde edilir. Elde edilen iki renkli lazer gücü 71-115 mw aralığında olup, tek renk ayarında elde edilebilecek değer (150 mW) altındadır. İki renkli çalışmada kazanç zirvesinden uzakta çalıştığımız için bu bekleniyor.

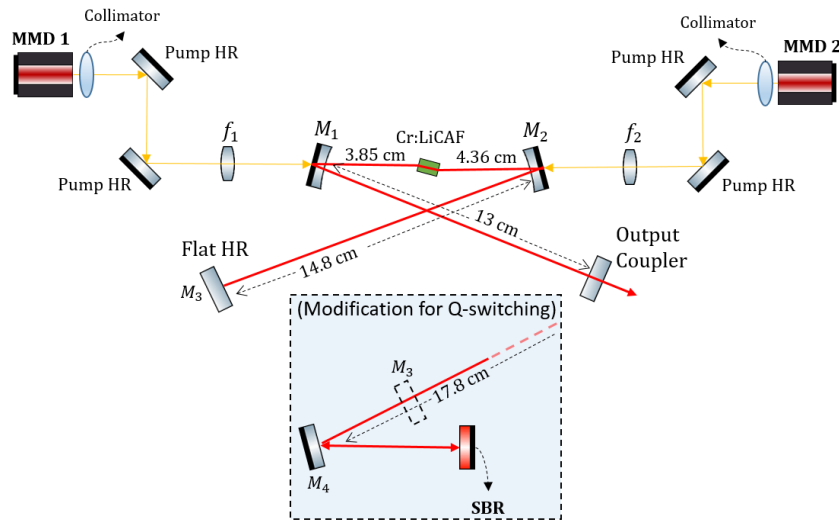
Sonuç olarak, yüzey üzerinde ( $\sigma=90^\circ$ ) ve yüzey dışında ( $\sigma=25^\circ$ ) kristal kuvars çift kırılmalı filtre plakaları bulunan bir Cr:LiCAF sisteminin ayarlanabilir iki renkli kalıcı performansını araştırdık. Yüzey çift kırılmalı filtre plakaları, 27-37 nm (2 mm kalınlıkta BRF), 12-18 nm (4 mm kalınlıkta BRF), 6-10 nm (8 mm kalınlıkta BRF) ve 2-5 nm (16 mm kalınlıkta BRF). Buna karşılık, yüzey dışı optik eksen BRF, daha geniş bir dalga boyu ayırma ayarıyla iki renkli lazeri etkinleştirdi: 40-98 nm (2 mm kalınlıkta BRF), 20-96 nm (4 mm kalınlıkta BRF) ve 10-99 nm (8 mm kalınlığında BRF). Adil bir karşılaştırma için, 2-8 mm kalınlığındaki BRF'lerin performansını karşılaştırırsak (16 mm kalınlığındaki BRF'yi dışarıda bırakırsak), genel olarak taranabilen dalga boyu ayrımı 6-37 nm ve yüzey için 10-99 nm'dir. ve sırasıyla yüzey dışı optik eksen BRF'leri. Sonuçlar, ayarlanabilir iki renkli lazer işleminde yüzey dışı optik eksenli BRF'lerin avantajlarını açıkça göstermektedir.

## 2.7 Pasif Q-anahtarlamalı Cr:LiCAF Lazer

Nanosaniye-mikrosaniye aralığında darbe genişliklerine sahip lazerlerin uygulanması, menzil bulma, doğrusal olmayan frekans dönüştürme, malzeme işleme ve uzaktan algılama dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için arzu edilir (Paschotta, 2005). Q-anahtarlama veya kazanç anahtarlama teknikleri genellikle yüksek tepe güçlerine sahip kısa, yüksek enerjili darbelerin elde edilmesinde kullanılır.

Q-anahtarlı çalışmada, rezonatör kayıpları aktif veya pasif modülasyon şemaları (Du vd., 2003, Degnan, 1995) kullanılarak modüle edilebilir. Aktif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanmasında, akustik-optik modülatörler, elektro-optik modülatörler veya harici tahrik devresine sahip döner aynalar tipik olarak kullanılır, ancak bu sistemler daha yüksek maliyet, kompaktlık eksikliği ve artan karmaşıklıktan muzdariptir. Öte yandan, pasif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanması, Cr<sup>4+</sup>:YAG (1µm lazerler için), Cr<sup>2+</sup>:ZnSe (1.5µm ve 2µm lazerler için) (Podlipensky, 1999) veya SESAM/SBR tabanlı doğrusal olmayan aynalar (yarı iletken doyurulabilir soğurucu ayna (Keller vd., 1996)/doydurulabilir Bragg reflektör (Tsuda vd., 1996) gibi doyurulabilir emicilerin kullanımıyla kavite kayıplarının modüle edildiği yerlerde daha ekonomik, basit ve pratik çözümler sunmaktadır (Sennaroglu, 2002). Bununla birlikte, pasif Q anahtarlama darbe şekli, darbe enerjisi, tepe gücü ve darbe tekrarlama hızı gibi parametrelerin bağımsız kontrolünü sağlamak daha zordur.

Proje ana hedefleri arasında bulunan ve Cr:LiCAF lazerinin doyurulabilir Bragg yansıtıcılar (SESAM/SBR) ve/veya Cr:YAG, karbon nano-tüp gibi soğurucular kullanılarak Q-anahtarlama (self-Q-switching) rejiminde çalışması kapsamında Antalya Bilim Üniversitesi envanterinde bulunan ve yukarıda karakteristik ölçüm sonuçları verilmiş olan kristal ile birlikte, yine laboratuvar bünyemizde bulunan GaAs bazlı SESAM malzemeler kullanılarak pasif Q-anahtarlama lazer deneyleri gerçekleştirilmiştir.



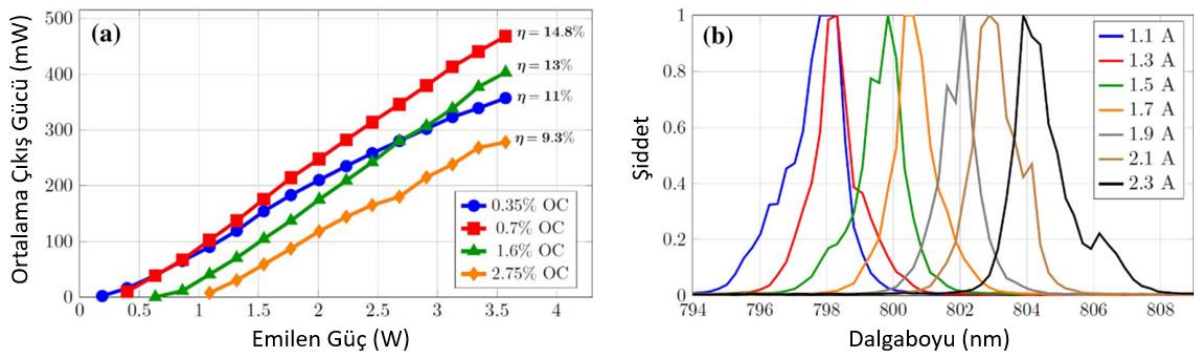
**Şekil 2. 40** CW ve pasif Q-anahtarlama için kurulan deney düzenekleri.

Şekil 2.40'da gösterilen deney düzeneğinde, Cr: LiCAF lazer, toplam 3.6 W pompa gücü sağlayan iki düşük maliyetli 665 nm geniş alan lazer diyodu ile pompalanmaktadır. Yerleşik bir



silindirik mikro mercekle, hızlı ekseninde diyot ışını kısmen kolime hale getirmiştir. Daha sonra, lazer diyotların çıkışı, 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik lenslerle daha da kolime hale getirilip, ardından 75 mm odak uzaklığına sahip akromatik çiftler ( $f_1$ ,  $f_2$ ) kullanılarak lazer kristalinin içine odaklanmıştır. Kazanç malzemesi, 7 molm% krom katkısı içeren, 5 mm uzunluğunda, 4 mm genişliğinde ve 1.5 mm kalınlığında bir Cr:LiCAF kristalidir. Cr:LiCAF numunesi, Brewster-Brewster kesim yüzeylerine sahip olmakla birlikte, lazer deneylerinde E//c eksenini kullanılmıştır. Kristal, TM polarize pompa ışığının %98.3'ünü emerken, mercekle ve dikroik aynalardaki kayıplar dikkate alındığında, diyotlardan sağlanan gücün yaklaşık %94.7'si kristal tarafından emilmiştir. Cr:LiCAF kristali, çevresinde indiyum folyo bulunan bakır bir tutucuya monte edilmiş ve kristal sıcaklığını 15 °C'de tutmak için suyla soğutma kullanılmıştır.

Cw deneylerinde, her iki diyottan da belirli bir pompalama gücünde 800 nm civarında maksimum güç çıkışı elde etmek için lazer kristalinin konumu, pompa odaklama merceği ve kavite hizalaması Şekil 2.40'deki gibi optimize edilmiştir. %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75 OC'lerin her biri için güç verimliliği eğrileri, her iki diyotun aynı anda aynı ayırık giriş akımı seviyelerinde çalıştırılmasıyla oluşturulmuştur. Her iki diyot için maksimum 2.3 A akımda maksimum toplam pompa gücü 3.57 W'tır. Şekil 2.41 (a), Cr:LiCAF lazer için ölçülen cw güç verimliliği eğrilerini göstermektedir. Karşılaştırıldığında, 3.5 W emilen pompa gücünde 468 mW'a kadar çıkış güçlerinin elde edildiği durumlarda %0.7 OC'nin en iyi sonuçları sağladığı görülmektedir. Emilen pompa gücüne göre karşılık gelen kalıcı eşik ve eğim verimliliği 390 mW ve %14.8'dir.

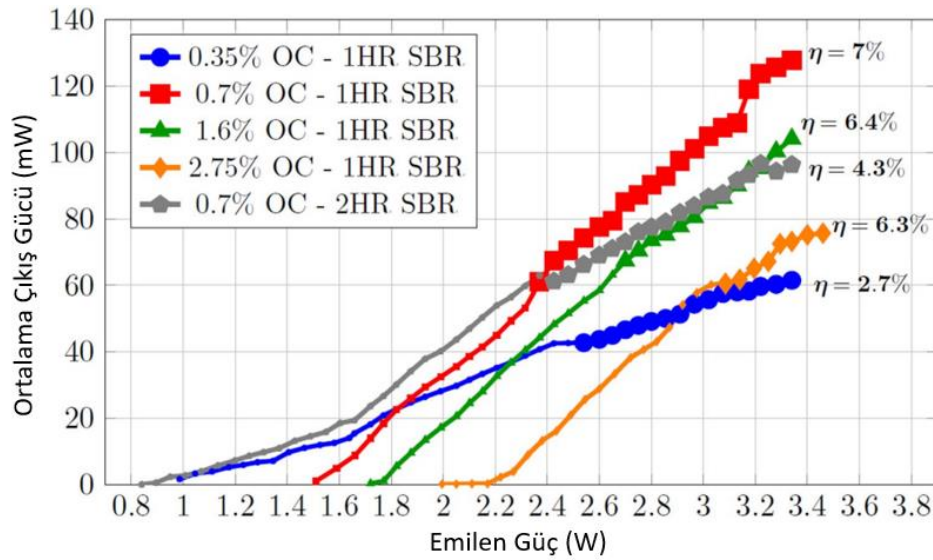


**Şekil 2. 41 (a)** %0.35 ila %2.75 aralığında iletme sahip dört farklı OC ile alınan sürekli dalga Cr:LiCAF lazerin güç verimliliği verileri. **(b)** Farklı diyot akımı veya pompa gücü seviyelerinde %0.7 OC ile lazerin ölçülen optik spektrumu (1.1 A'da 0.85 W, 2.3 A'da 3.5 W)

Şekil 2.41 (b), %0.7 verici çıkış kuplörü için lazer dalga boyunun pompa akımıyla değişimini gördüğümüz cw Cr:LiSAF lazerinden elde edilen örnek optik spektrumları göstermektedir. Şekil 2.41 (b)'de görebileceğimiz gibi, cw Cr:LiCAF lazerin serbest çalışan optik spektrumları 800 nm civarında ortalanmıştır ve ~1.8 nm'lik bir FWHM'ye sahiptir. Lazer merkezi dalga boyunun 798 nm ve 804 nm'den net bir kayma, pompa diyot akımı 1,1'den 2.3 A'ya yükseltildiğinden kolayca

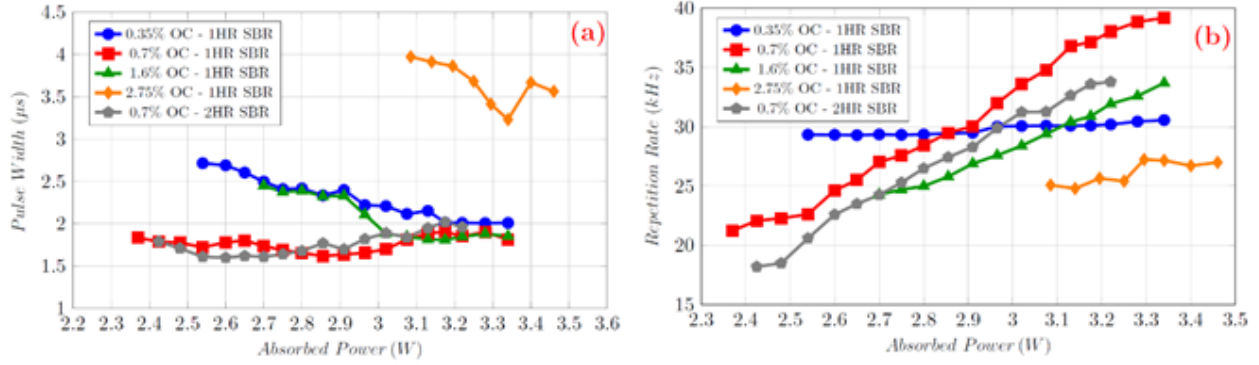
görülebilmektedir (karşılık gelen emilen pompa gücü 0.85'ten 3.5 W'a yükselir). Gözlenen lazer dalga boyu kayması, kristalin artan sıcaklığı ile emisyon kazanç tepe noktasının daha uzun dalga boylarına kaymasından kaynaklanmaktadır.

Q-anahtarlı operasyon sonuçlarımızın sunumuna, ölçülen çıkış gücünün emilen pompa gücü seviyesiyle değişimini gösteren Şekil 2.42 ile başlayalım. Veriler, (i) 1 katmanlı HR kaplı SBR ve %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75 iletim çıkış kabloları ve (ii) %0.7 iletim çıkışına sahip 2 katmanlı HR kaplı SBR kullanılarak alınmıştır. Şekil 2.42'yi daha önceki cw performansıyla karşılaştırdığımızda (Şekil 2.41), Q-anahtarlı deneylerde elde edilebilir lazer eğim verimliliklerinin önemli ölçüde azaldığını görüyoruz: Q-anahtarlı operasyonda %0.7 OC için en yüksek verimlilik, Cw operasyonda gözlenen %14.8'e kıyasla, SBR ile ilişkili ek kayıplar nedeniyle %7 olarak ölçülmüştür.



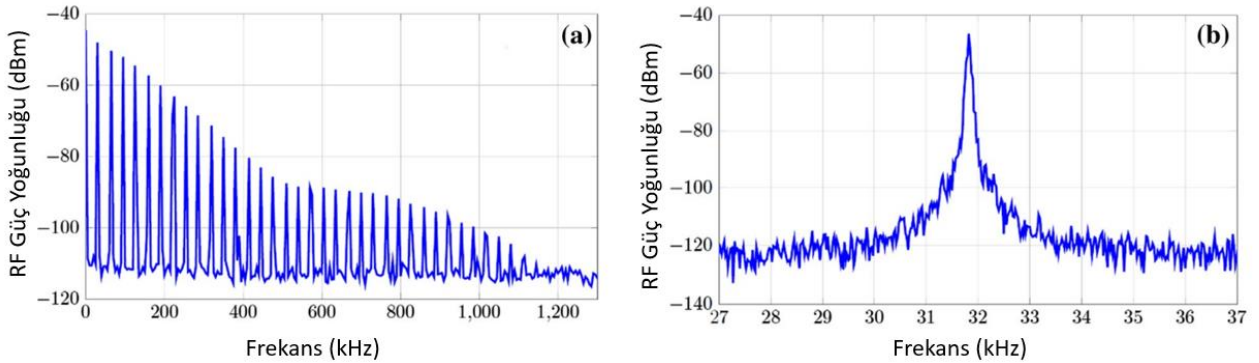
**Şekil 2. 42** Q-anahtarlamalı çalışma modunda elde edilen darbelerin farklı zaman skalalarında gösterimi.

Tek katmanlı HR kaplı SBR ile en yüksek ortalama güç %0.7 çıkış kablolu olarak elde edilmiştir (yaklaşık 3.4 W emilen pompa gücü seviyesinde yaklaşık 125 mW). Bir ve iki katmanlı HR kaplamalı SBR'lerle (her ikisi de %0.7 OC ile kullanımda) elde edilen sonuçları karşılaştırdığımızda, beklendiği gibi (daha düşük toplam kayıplar nedeniyle) 2HR-SBR ile daha düşük bir kalıcı eşik elde edilmiştir.



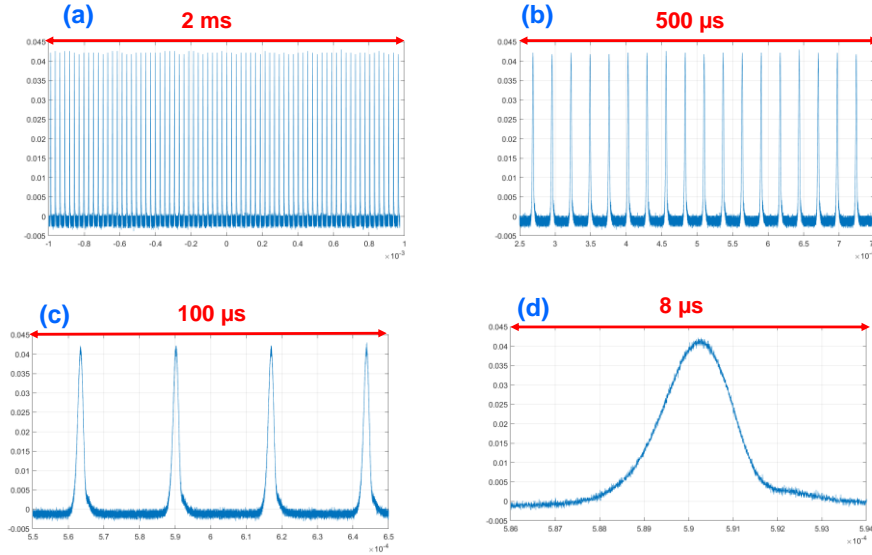
**Şekil 2. 43** Q-anahtarlamalı çalışma modunda darbe karakteristiklerinin değişen giriş gücü ve çıkış kuplajına göre değişimi

Şekil 2.43 , emilen pompa gücü ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkış darbe genişliğinin ve tekrarlama oranının ölçülen değişimini göstermektedir. Veriler, çeşitli çıkış kuplör değerleri ile alınır.



**Şekil 2. 44** Farklı merkezi frekanslarda alınan Cr:LiCAF lazerinden yayılan Q-anahtarlı atma dizisinin örnek radyo frekansı spektrumu: **(a)** 4 MHz'lik bir açıklık ve 100 Hz'lik bir çözünürlük bant genişliği ile taban bandında merkezlenmiş RF (yalnızca pozitif frekanslar daha iyi görünürlük için gösterilmiştir). **(b)** RF, 20 kHz'lik bir aralık ve 10 Hz'lik bir çözünürlük bant genişliği ile 31.8 kHz civarında Q-anahtarlama frekansında merkezlenmiştir. Veriler, 3.13 W soğurulan güçte 1 katmanlı HR kaplamalı SBR ile %0.35 OC kullanılarak alınırken, Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkış gücü 58 mW idi. Darbe genişliği ve tekrarlama frekansı sırasıyla 2.15 µ s ve 31.8 kHz idi.

Ölçümler sırasında, zamansal dalga formu, tekrarlama frekansı değerlerinin kolayca elde edilebildiği bir dijital osiloskopa kaydedilmiştir (örn. bkz. Şekil 2.45). Q-anahtarlamanın kararlılığını doğrulamak için lazerin çıkışı aynı zamanda bir RF spektrum analizörü kullanılarak eş zamanlı olarak izlenmiştir. Şekil 2.44 (b)'de, Q-anahtarlı darbelerin tekrarlama frekansında (bu örnek durum için yaklaşık 31.8 kHz civarında) yan lobsuz temiz bir tepe noktası gösteren örnek bir RF spektrum grafiği verilmiştir.



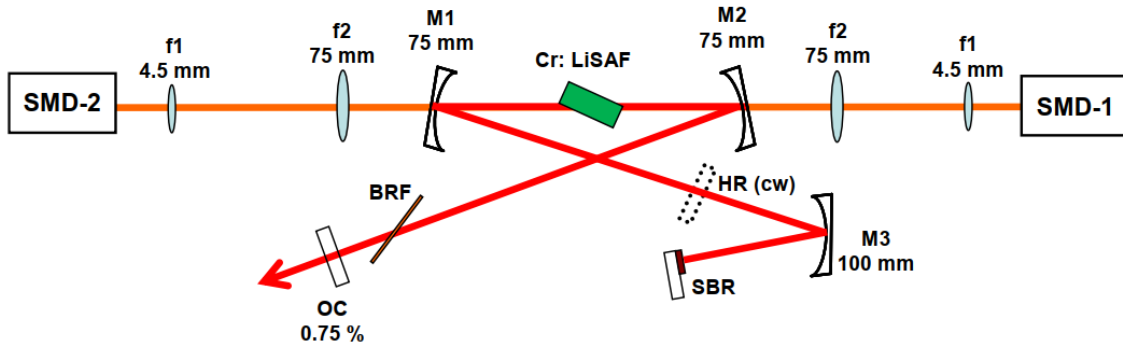
**Şekil 2. 45** Q-anahtarlamalı çalışma modunda elde edilen darbelerin farklı zaman skalalarında gösterimi

Gözlenen karakteristiklerin tartışılmasına ölçülen darbe genişlikleri ile başlarsak, Şekil 6a'da görüldüğü gibi %0.7 OC ile ölçülen darbe genişlikleri 1.75  $\mu$ s civarında ölçülmüş olup, değişen emilen pompa gücü seviyesiyle (hem 1HR SBR hem de 2HR SBR için) bir miktar salınım ( $\pm 0.25$   $\mu$ s) gösterse de net bir azalma/artış eğilimi göstermemiştir. %0.35 ve %1.6 OC için, ölçülen darbe genişliklerinde yaklaşık 2.5–2.75'ten 1.85–2  $\mu$ s seviyesine yavaş bir düşüş görüyoruz. %2.75'lik OC için veriler, yaklaşık 3.65  $\mu$ s'lik darbe genişliklerini ölçtüğümüz diğerlerinden sapmaktadır (bu OC için darbe genişliklerinde 4'ten 3.5  $\mu$ s'ye hafif bir düşüş de gözlemlenmektedir). Şekil 6b'ye baktığımızda, tüm durumlar için Cr:LiCAF lazerin ölçülen Q-anahtarlı tekrarlama frekansının, emilen pompa gücü miktarı ile neredeyse doğrusal olarak arttığını görüyoruz. Bununla birlikte, gözlemlenen eğimin (emilen pompa gücünün değişimi ile tekrarlama frekansının artış oranı) oldukça farklı olması dikkat çekicidir. Örnek olarak, %0.7 çıkış kuplörü için, emilen pompa gücü 2.4'ten 3.35 W'a çıkarıldığında tekrarlama frekansının yaklaşık 21.2 kHz'den 39.2 kHz'e kadar değiştiği görülmektedir. Öte yandan, %0.35 OC için, benzer bir pompa gücü değişikliği için tekrarlama frekansı yalnızca 29.3'ten 30.6 kHz'e yükselmiştir.

## 2.8 Pasif Q-anahtarlamalı Mod Kiplenmeli Cr:LiSAF Lazer

Projenin amaçları doğrultusunda gerçekleştirilecek olan bir başka çalışma modu mod-kiplenmeli lazer operasyonunun elde edilerek karakterize edilmesine temel oluşturmak adına, yine Cr:colquirite ailesinden olan Cr:LiSAF kristali kullanılarak Q-anahtarlamalı mod-kiplenmeli çalışma rejimi elde edilmiştir.

Cr:LiSAF lazerlerinden mevcut ortalama ve/veya zirve gücünü iyileştirmenin yolları olarak daha önce levha geometrisi (Demirbas, 2015), ince disk geometrisi (Demirbas, 2018) ve darbeli (Demirbas & Acar, 2018) pompalama (yarı sürekli dalga, kazanç anahtarlamalı ve patlama modu çalışması) araştırılmıştır.. Bu mevcut çalışmada, Cr:LiSAF lazer sisteminden daha yüksek tepe güçleri elde etmenin alternatif bir yolu olarak Q-anahtarlı mod kilitli çalışmasına odaklanılmıştır. QML işleminde, genellikle kullanılan sürekli dalga modu kilitleme ile karşılaştırıldığında, yüksek tekrar oranı (MHz ila GHz) mod kilitli darbelerin daha düşük bir tekrar oranı (Hz–kHz) Q-anahtarlı zarf altında gruplanmasıyla potansiyel olarak ek tepe güç ölçeklendirmesi elde edilebilir. Temel olarak, QML işlemi, sistemlerin tepe güçlerini yalnızca mod kilitli veya Q anahtarlı operasyondan elde edilebilecek olanın üzerine çıkarmak için Q değiştirme ve mod kilitlemenin tepe güç ölçekleme yeteneğini birleştirir.

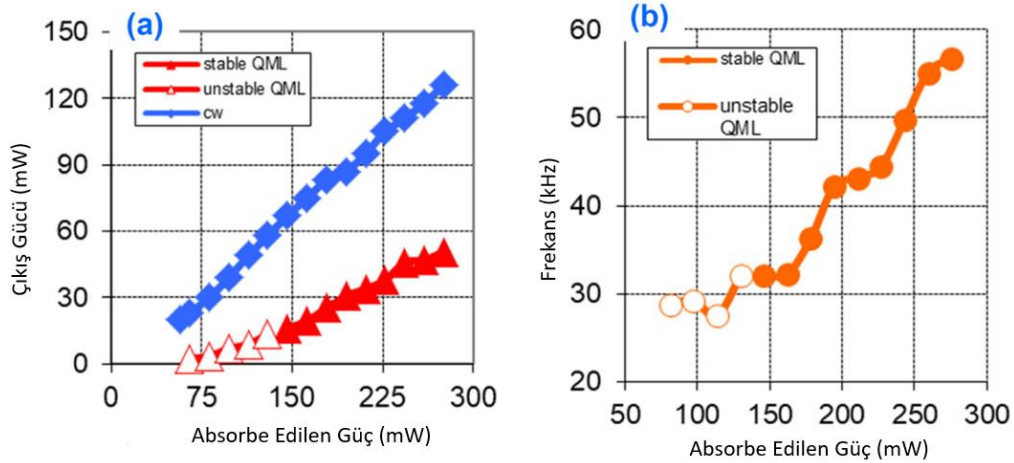


**Şekil 2. 46** CW ve pasif Q-anahtarlamalı mod-kiplene çalışma modları için kurulan deney düzeneği

Şekil 2.46, Q-anahtarlı mod kilitleme deneylerinde kullanılan Cr:LiSAF lazer kavitesinin basitleştirilmiş bir şemasını göstermektedir. Lazer, kristal içinde dengeli bir termal yük elde etmek için her iki taraftan iki adet düşük maliyetli 150 mW, 660 nm tek çapraz modlu diyot (SMD-1 ve SMD-2) tarafından pompalanır. SMD çıkışları önce 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik lensler kullanılarak kolime edilir, ardından 75 mm odak uzaklığına sahip akromatik ikili lensler kullanılarak Cr:LiSAF kristalinin içinde yaklaşık 25  $\mu\text{m}$ 'lik bir nokta boyutuna odaklanır.

Kazanç ortamı, bir Brewster-Brewster kesimi, %1.5 krom konsantrasyonuna sahip 10 mm uzunluğunda Cr:LiSAF kristali olup, TE polarizasyonu için 660 nm pompa ışığının %98'inden fazlasını absorbe etmektedir.

Sürekli dalga (cw) Cr:LiSAF lazer rezonatörü, 75 mm eğrilik yarıçapına sahip iki eğimli dikroik aynadan (M1-M2), düz bir yüksek reflektörden (HR) ve %0.75 verici çıkış kuplöründen (OC) oluşmaktadır. Q-anahtarlı mod kilitli çalışma için, düz HR aynası çıkarılır (kesikli çizgilerle gösterilmiştir) ve yerine konulan 100 mm'lik bir eğrilik kavisli ayna (M3) tarafından oluşturulan ikinci bir odağa doyurulabilir bir Bragg reflektörü (Tsuda vd., 1996, Keller vd., 1996) yerleştirilir. SBR'deki mod boyutu, cw modu kilitleme yerine QML'yi elde etmek için nispeten büyük, yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  tutulmuştur. Bu aynı zamanda Q-anahtarlı mod kilitli çalışmada kararlılık sağlamıştır. 850 nm SBR'nin hesaplanan modülasyon derinliği yaklaşık  $\%0.8 \pm 0.1$  idi (Demirbas vd., 2011). Q-anahtarlı mod kilitleme için SBR'nin kullanımı, kendi kendine başlayan QML işlemini, çevresel dalgalanmalara karşı bağımsızlığı ve azaltılmış kavite hizalama gereksinimlerini kolaylaştırmıştır. Plaka yüzeyine 45° optik eksene sahip 3 mm kalınlığında bir kristal kuvars çift kırılımlı filtre, kavitenin içine Brewster açısıyla yerleştirilmiş ve darbelerin merkezi dalga boyunun ayarlanması için kullanılmıştır (Demirbas, 2017, Demirbas vd., 2017).



**Şekil 2. 47 (a)** Sürekli dalga ve Q anahtarlamalı mod kilitli (QML) rejimlerde Cr:LiSAF lazerin ölçülen etkinliği. **(b)** Emilen pompa gücü ile Q-anahtarlı darbelerin tekrarlama oranının ölçülen değişimi. Her iki durumda da kararlı ve kararsız QML işlem noktaları gösterilir.

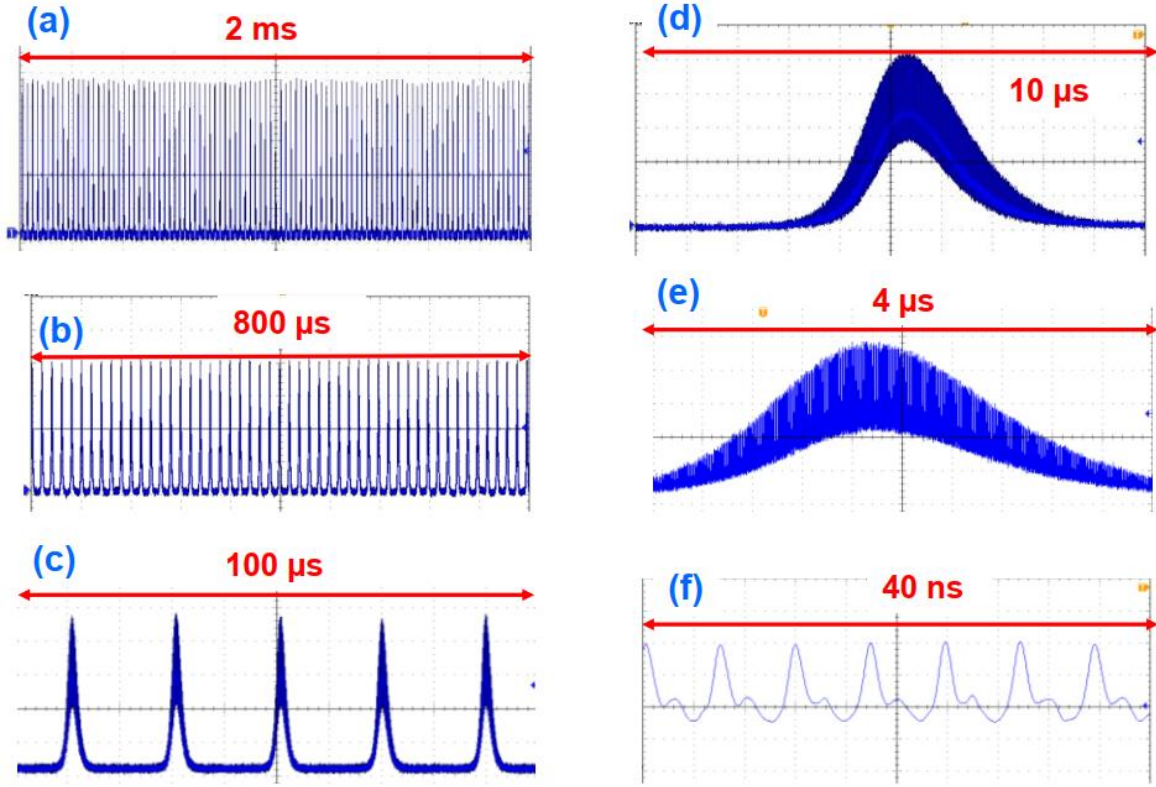
Deneyisel sonuçlarımızın sunumuna, sürekli dalga ve Q-anahtarlı mod kilitli çalışma rejimleri için ölçülen lazer verimlilik eğrilerini gösteren Şekil 2.47 (a) ile başlıyoruz. Lazer verimliliği, %0.75 geçirgen çıkış kuplörü kullanıldığında serbest çalışan lazer dalga boyu yaklaşık 860 nm idi. Cw lazer, yaklaşık 15 mW'lık bir lazer eşliğine ve emilen pompa gücüne göre yaklaşık

%49'luk bir eğim verimliliğine sahipti; bu, Cr:LiSAF ortamının (%54) gerçek eğim verimliliğine çok bir değer olarak ortaya çıkmaktadır. Bundan çıkarımla, pompa ve kavite modlarının iyi eşleşmesinin yanı sıra, yaklaşık %0.1-0.2'lik nispeten düşük gidiş-dönüş kavite kayıpları (%0.75 çıkış kuplörüne kıyasla oldukça düşük) etkili olduğu söylenebilir. QML rejiminde, ek kavisli aynanın (M3) ve özellikle SBR'nin eklenmesiyle, kalıcı eşik 60 mW'a yükselmiş ve bu da, kullanılan büyük kavite spot boyutu nedeniyle beklenen kavite kayıplarında dört kat artışa işaret etmektedir (Q-anahtarlı model kilitli operasyon için, SBR üzerindeki nokta boyutu büyük tutulur ve sonuç olarak SBR tamamen doygun değildir ve önemli kayıplar yaratır). 60–145 mW arasındaki düşük emilen pompa güçlerinde, QML işleminin çok kararlı olmadığına dikkat edilmelidir (bu noktalar, Şekil 2.47'da boş işaretlerle gösterilmiştir). 145–275 mW aralığında emilen pompa güçleri için kararlı QML işlemi elde edilmiştir (dolu işaretlerle gösterilmiştir). 275 mW emilen pompa gücünde lazer, 56.75 kHz Q-anahtarlama tekrarlama hızında 50.7 mW ortalama güce sahip q-anahtarlı mod kilitli lazer darbeleri üretmiştir. Q-anahtarlı darbe, yaklaşık 2 µs'lik yarı maksimumda tam genişliğe (FWHM) sahipti.

Şekil 2.47 (b), emilen pompa gücü seviyesi ile q-anahtarlama tekrarlama oranının değişimini göstermektedir. Pasif q-anahtarlama teorisinden (Spuhler vd., 1999) beklendiği gibi, artan pompa gücü ile tekrarlama oranında bir artış gözlemlenmiştir.

QML işlemi elde edildikten sonra, kapaksız test kavitemiz için bile oldukça kararlıydı ve saatlerce sürdü. Şekil 2.48, QML Cr:LiSAF lazerin zaman ve frekans alanı özelliklerine ilişkin örnek ölçümleri göstermektedir. Şekil 2.48'ten, mod kilitlemenin modülasyon derinliğinin yalnızca %50 civarında olduğunu ve bunun da mod kilitlemede elde edilebilecek tepe güç seviyelerini büyük ölçüde sınırladığı görülmektedir. Öte yandan, (Jabczynski, 2005)'da ayrıntılı olarak tartışıldığı gibi, doyurulabilir soğurucularla QML işlemi daha büyük modülasyon derinlikleri sağlamaz.

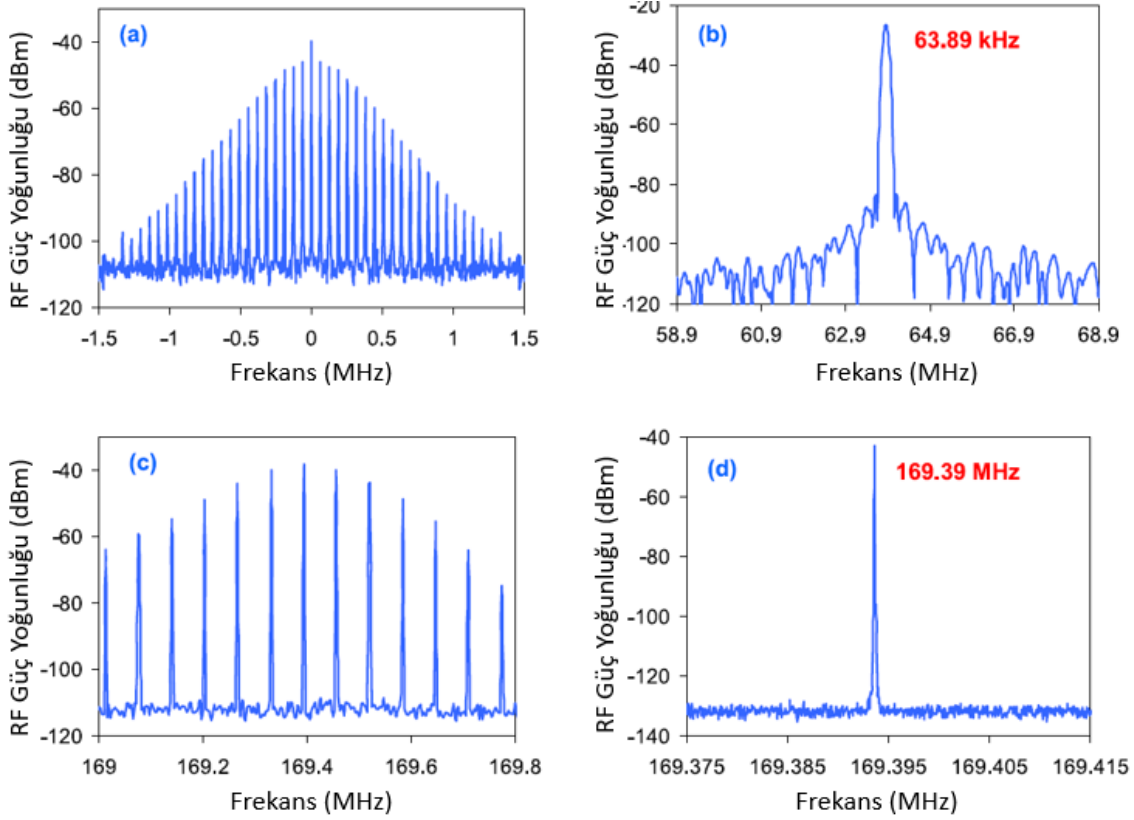
Şekil 2.49'teki RF spektrumundan da açıkça görüldüğü gibi, lazer QML işlemi nispeten kararlıdır. Lazer, 63.9 kHz frekansında yaklaşık 2 µs uzunluğunda (FWHM) Q-anahtarlı darbeler üretmektedir. Q anahtarlama zarfı, 169.39 MHz'lik (her ~5.9 ns'de bir) tekrarlama hızına sahip mod kilitli darbeler içerir. Zaman dinamiği resminden, Q-anahtarlı zarfın yaklaşık 500 mod kilitli darbe içerdiğini görüyoruz. Osiloskop yoluyla mod kilitli darbelerin kaydedilen darbe genişliğinin



**Şekil 2. 48** Q-anahtarlamalı kip-kilitleme çalışma modunda elde edilen darbelerin farklı zaman skalalarında gösterimi.

sistem tepki süresi ile sınırlı olduğunu için darbe genişliğini ölçmek için bir otokorelasyon ölçümü gerçekleştirilmiştir (atma genişliği 7 ps olarak ölçülmüştür). Bir yan not olarak, 169.39 MHz'deki mod-kilitli atma dizisi RF tepe noktasının spektral genişliği oldukça dardır (Şekil 2.49(d)), çünkü sistemin tekrar oranı, yalnızca mekanik titreşimler ve sıcaklık dalgalanmaları ile yavaşça dalgalanan kavite uzunluğu tarafından belirlenir. Karşılaştırıldığında, 63.89 kHz civarında Q-anahtarlamalı RF spektral tepe noktasının genişliği nispeten geniştir, çünkü pasif mod kilitlemede Q-anahtarlama parametreleri lazer dinamikleri değiştiğinde/nefes aldıkça nispeten hızlı dalgalanır. Bu anlamda Q-anahtarlama frekans dalgalanmalarını azaltmak için sisteme aktif geri beslemenin (belki pompa güç modülasyonu aracılığıyla) kullanılıp kullanılmayacağını araştırmak ilginç olacaktır.

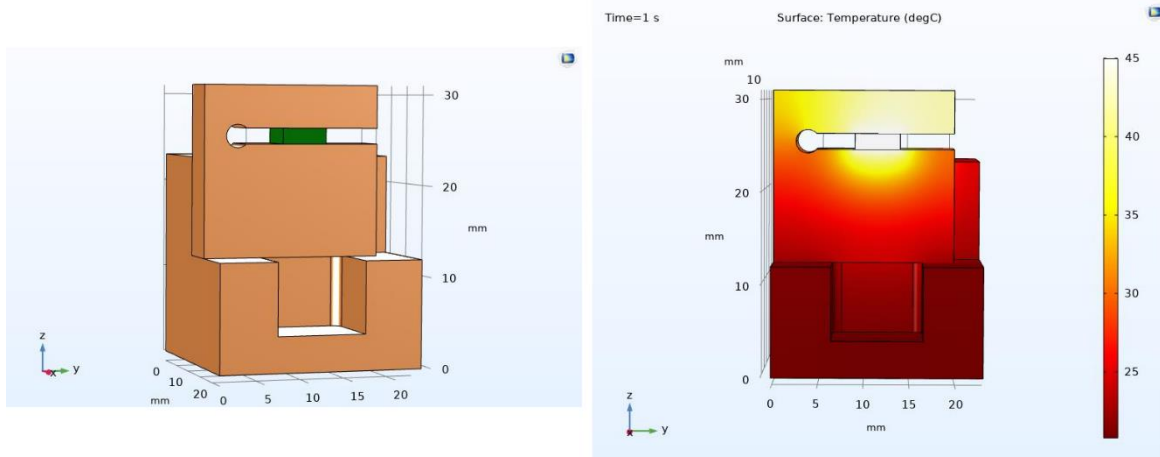




**Şekil 2. 49** Farklı yayılma aralıklarında ve çözünürlük bant genişliği ayarlarında alınan, farklı merkezi frekanslarda Cr:LiSAF lazerden yayılan q-anahtarlı mod kilitli darbe dizisinin radyo frekansı spektrumu. **(a)** 3 MHz'lik aralık ve 500 Hz'lik çözünürlük bant genişliği ile temel bantta merkezlenmiş RF. **(b)** RF, 10 kHz aralık ve 100 Hz çözünürlük bant genişliği ile 63.9 kHz civarında Q-anahtarlama frekansında merkezlenmiştir. **(c)** RF, 169.39 MHz mod kilitleme frekansında, 1 MHz aralıkta ve 100 Hz çözünürlük bant genişliğinde merkezlenmiştir. **(d)** RF, 169.39 MHz'lik mod kilitleme frekansında, 40 kHz'lik bir aralıkta ve 1 Hz'lik çözünürlük bant genişliğinde merkezlenmiştir.

## 2.9 Kavite kazanç ortamının termo-optik-mekanik incelemesi

Projenin ulaşılmak istenen hedefleri arasında yer alan, piyasaya yeni çıkmış olan ve yakın zamanda envanterimize kattığımız 2.5 W'lık diyotlar ile literatürde daha önceden ulaşılmamış olan 4-5 W çıkış güçlerine çıkarılması çalışmaları doğrultusunda, bu güç seviyelerinde kazanç ortamı içerisindeki sıcaklık dağılımının incelenmesi ve termal kısıtlamaların üstesinden gelinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu anlamda, grubumuz tarafından Cr:LiCAF kristalinin termal karakteristiği ve kavite içerisinde konumlandırıldığı tutucu malzemenin ısı dağıtım analizlerinin incelenmesi ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür.



**Şekil 2. 50** Cr:LiCAF kristali ve bakır malzemeden yapılmış tutucunun COMSOL programında modellenmesi (solda), Cr:LiCAF kristali üzerinde üretilen ısının Kristal ve tutucu üzerinde sebep olduğu sıcaklık dağılımının analizi.

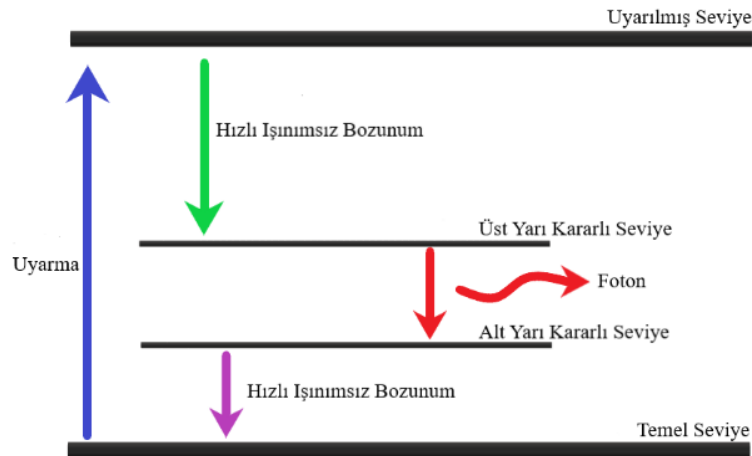
Raporun önceki kısımlarındaki gösterilen Cr:LiCAF kristali ve bakır malzemeden yapılmış tutucu malzemenin COMSOL programında modellenmesi Şekil 2.50'da verilmiştir. Deneysel çalışmalarda tutucu içerisinde bulunan oval bir açıklıktan akan ve bir soğutucu üniteye bağlı olan devir-daim mekanizması kristalin sıcaklığının sabit tutulması için kullanılmaktadır. Soğutma ünitesine ek olarak, kullanılan tutucu geometrisi de sıcaklığın kristalden etkili bir biçimde dışarıya atılmasında etkili olmasından ötürü kullanılan tutucu geometrileri özelinde sıcaklık dağılımı modellemelerinin yapılması önem kazanmaktadır. Şekil 2.50'da laboratuvarında kullanmakta olduğumuz tutucuya ait sıcaklık dağılım analizleri gösterilmiş olup projenin ilerleyen kısımlarında farklı tutucu tasarımlarının ortaya konulacağı çalışmalara temel oluşturulmuştur.

Süreç içerisinde ilerleyen çalışmalar sonucunda, ABU-LTL' kullanılmak üzere yeni tutucu tasarımı için Cr:Nd:GSGG (gallium scandium gadolinium garnet) kristali kullanılarak ön çalışmalar yapılmıştır. Geleneksel ekzotermik katı hal lazerlerinde uyarma ve uyarılmış emisyon süreçleri (frekans dönüştürme süreçleri) her zaman lazer ortamına verilen ısı enerjisi ile sonuçlanmaktadır. Lazer sistemindeki bu ısı artışı, lazer işleminin verimini ve çıkış ışın kalitesini düşürmekte, pompa gücünü ve kavite kararlılığını değiştiren termo-optik sapmalara, merceklenme oluşumu ve çift kırılmaya neden olmaktadır. Lazer kazanç ortamında ışınımsal olmayan geçişlere yol açan üç ana mekanizma tanımlanmaktadır: kuantum kusuru (quantum defect), yukarı dönüştürme (upconversion), floresan yaşam süresinin termal sönmülmesi (thermal quenching of fluorescence) ve uyarılmış seviye absorpsiyonu (excited state absorption). Bu ışınmaz mekanizmalar, katı hal lazer sistemlerindeki ısı üretim kaynakları

olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu dört mekanizmanın tümü, bir lazer sisteminde çıkış gücü miktarını sınırlamaktadır (Eichholz, 1998). Alt bölümlerde bu mekanizmalar ayrıntılı biçimde açıklanmaktadır.

### 2.9.1 Kuantum Kusuru

Şekil 2.51’de verilmiş olan 4 seviyeli lazer kazanç ortamı enerji seviyeleri için, üst yarı kararlı enerji durumu ile daha düşük yarı kararlı enerji durumu arasında lazer operasyonu (lasing) meydana gelmektedir. Diğer enerji seviyeleri arasındaki geçişler "hızlı bozunma" veya "hızlı yayımsız bozunma" olarak adlandırılır. Örneğin, dört seviyeli lazer sisteminde 2. seviyesi ile 1. seviyesi arasında lazerleme meydana gelmekte olup, hızlı bozunma olarak adlandırılan diğer geçişler 3. seviye ile 2. seviye arasında ve 1. seviye ile yer seviyesi arasında gerçekleşerek ısı (fonon) üretimine yol açmaktadır. Başka bir deyişle, kuantum kusuru, pompa dalga boyundaki pompa foton enerjisi ile merkez dalga boyundaki lazer foton enerjisi arasındaki fark nedeniyle ortaya çıkan bir ısınma olarak tanımlanabilmektedir.



Şekil 2. 51 4-seviyeli kazanç ortamına ait enerji seviyeleri ve geçiş mekanizmaları

### 2.9.2 Yukarı Dönüştürme

Yarı kararlı lazer seviyesindeki iki uyarılmış iyon etkileşime girdiğinde ve enerji alışverişinde bulunduğu anda kazanç ortamında yukarı dönüşüm meydana gelmektedir. Bir iyon, enerjisini komşu bir iyonla aktararak onun temel enerji seviyesine düşmesine neden olur. Enerji transferi, ikinci iyonu daha yüksekte bulunan uyarılmış bir duruma yükseltir. Isıtma etkisi ise, daha yüksekte bulunan uyarılmış durumdaki uyarılmış iyonların, radyal olmayan bir şekilde üst lazer seviyesine gerilediğinde meydana gelmektedir.

### 2.9.3 Floresan Yaşam Süresinin Termal Sönümlenmesi

Kazanç ortamlarındaki iyonların flüoresans ömrü, sıcaklığa bağlı olarak değişim göstermektedir. Düşük sıcaklıklarda, üst durum ömrü, sıcaklığa göre neredeyse sabittir. Kristalin sıcaklığı arttıkça yaşam süresi de hızla düşer (Eichholz, 1998).

### 2.9.4 Uyarılmış Seviye Absorbsiyonu

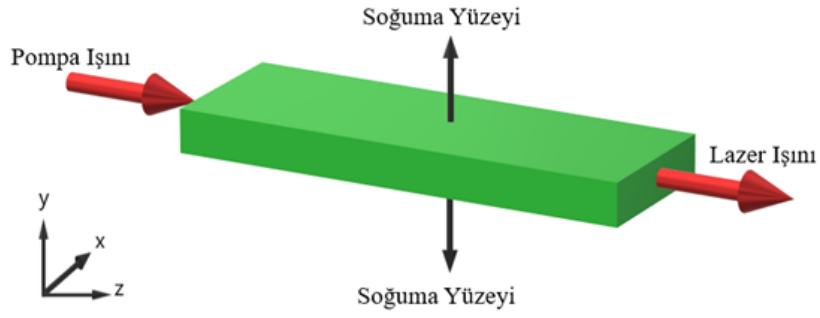
Uyarılmış enerji seviyesindeki bir iyonun, bir başka uyarılmış iyon tarafından emilmesi ve enerjisi artırarak bir üst seviyeye geçmesi sonucu uyarılmış seviye absorpsiyonu meydana gelir. Üst seviyedeki iyon daha sonra tekrar radyal olmayan bir şekilde uyarılmış enerji seviyesine geri döner. Bu geri dönüş sonucunda kristal içerisinde sıcaklık artışı meydana gelmektedir.

Sonlu eleman modellemesinde kullanılacak numerik hesaplamalar için, kazanç ortamındaki thermal yüklerin etkileri aşağıdaki gibi formülize edilebilir (Sennaroğlu, 2002 ve Okida, 2005).

$$\eta_{\text{heat}} = 1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_l} \left( \frac{\sigma_{em}}{\sigma_{em} + \sigma_{ESA}} (MMF) \frac{\frac{\tau_f}{\tau_R} + \frac{I_c}{I_{sat}}}{1 + \frac{I_c}{I_{sat}}} \right) \quad (2.12)$$

Buradaki en önemli zorluklardan biride formülasyondaki terimlerin bazılarının sıcaklık bağımlı olmasıdır. Bunların en önemlidesi floresans yaşam süresinin ( $\tau_f$ ) sıcaklığa bağlı olarak değişiklik göstermesidir. Ve bu etkinin göz önüne alınması yapılan numerik hesaplamalarda kazanç ortamının ne kadar yüksek derece pompa güçlerine maruz kalabileceğine dair daha net bir çıkarım yapılabilmesi sağlamaktadır.

Nümerik analizlerde ve ölçüm düzeneğinde kazanç ortamı olarak Krom ve Neodimyum katkılı Gadolinyum Skandiyum Galyum Granat (Cr:Nd:GSGG) kristali kullanılmaktadır. Kristal Şekil 2.52'de gösterilen çift uç pompalı levha geometriye, 17 mm uzunluk, 11 mm genişlik ve 3.2 mm yüksekliğe sahiptir.

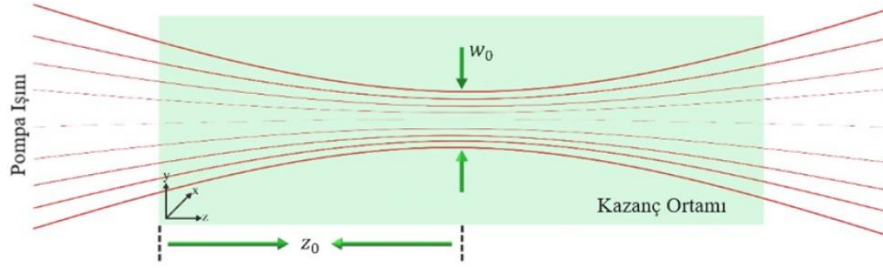


**Şekil 2. 52** Cr:Nd:GSGG Kristalinin İllüstrasyonu

**Tablo 2. 8** Cr:Nd:GSGG kristalinin özellikleri

Parametre	Sembol	Değer
Pompa Dalga Boyu	$\lambda_p$	665 nm (Okida,2005)
Lazer Dalga Boyu	$\lambda_l$	1064 nm (Sennaroglu, 2005)
Soğurma Katsayısı	$a$	$256 \text{ m}^{-1}$ (Yerebakan, 2017)
Özısı	$C_p$	$402.9 \text{ J/(kgK)}$ (Yerebakan, 2017)
Yoğunluk	$\rho$	$6495 \text{ kg/m}^3$ (Yerebakan, 2017)
Termal İletkenlik Katsayısı	$k$	$6.02 \text{ W/(mK)}$ (Yerebakan, 2017)
Derinlik	$K$	11 mm
Uzunluk	$L$	17 mm
Yükseklik	$M$	3.2 mm
Mod Eşleştirme Faktörü	MMF	10
Kırılma İndisi	$n$	1.9424 (Demirbas, 2017)
Kavite Işın Bel Çapı (Tanjantsal)	$w_{T_0}$	86.16 $\mu\text{m}$
Kavite Işın Bel Çapı (Sagital)	$w_{S_0}$	44.5 $\mu\text{m}$
Kavite Işın Belinde Z-ekseni	$z_0$	8.5 mm
Sol Taraftan Toplam Emilen	$P_{ab_{left}}$	1.5 W
Sağ Taraftan Toplam Emilen	$P_{ab_{right}}$	1.5 W
Young'ın Modülü	$E$	210 GPa (Endo, 2007)
Poisson Oranı	$\nu$	0.28 (Endo, 2007)
Termal Genleşme Katsayısı	$A$	$7.5e-6 \text{ 1/K}$ (Endo, 2007)
Gerilme Direnci	TenS	33 094 835 Pa (Chen, 2017)

Lazer diyotların farklı konfigürasyonları için çubuk-diyot pompalama, tek diyotlu Gauss pompalama, vb. pompalama teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sisteme Şekil 2.53'teki konfigürasyonda tek diyotlu pompalama ( $TEM_{00}$ ) yapılmaktadır. Kazanç ortamı levha geometrisinde olduğundan formüller de levha geometrisiyle uyumlu biçimde yeniden düzenlenmektedir.



**Şekil 2. 53** Levha geometrisinde ışınımın Gauss dağılımı

Isı dağılımı, kazanç ortamının parametrelerine ve pompalama tarzına bağlıdır. Örneğin, kristalin uzunluğu-genişliği-yükseklği, kavite ışın bel çapı, kip eşleştirme faktörü vb. Levha geometrilerindeki ısı dağılımı Eş. 2.13 kullanılarak hesaplanmaktadır (Ma, 2007)

$$Q(x, y, z) = C \exp \left[ -\frac{2y^2}{wS^2(z)} - \frac{2x^2}{wT^2(z)} - az \right] \quad (2.13)$$

Burada, soğurma katsayısı  $C$  katsayı sabiti Eş. 8,  $wS(z)$  sagital ışın çapı Eş. 9 ve  $wT(z)$  tanjantsal ışın çapı Eş. 2.14 ile hesaplanmaktadır.

$$C = \frac{\eta_{heat} P_{ab}}{\int_0^L \int_{-M/2}^{M/2} \int_{-K/2}^{K/2} \exp \left( -\frac{2y^2}{wS^2(z)} - \frac{2x^2}{wT^2(z)} - az \right) dx dy dz} \quad (2.14)$$

Burada,  $P_{ab}$  pompa gücü,  $K, L, M$  kazanç ortamının derinliği, uzunluğu ve yüksekliği olarak tanımlanmaktadır.

Bu çalışma için kullanılan lazer sistemi ideal bir Gauss dağılımlı ışın ile pompalanmadığından, ışın bel çapı formülü referans makalesinden (Shen, 2017) farklı olarak fiziksel sistemimize uyumlu olarak tarafımızca yeniden düzenlenerek Eş. 2.15 ve Eş. 2.16 ile ifade edilmektedir.

$$wS(z) = wS_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{M^2 \lambda_p (z - z_0)}{n\pi wS_0^2} \right]^2} \quad (2.15)$$

$$wT(z) = wT_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{M^2 \lambda_p (z - z_0)}{n\pi wT_0^2} \right]^2} \quad (2.16)$$

Burada,  $wS_0$  sagital ışın bel çapı,  $wT_0$  tanjantsal ışın bel çapı,  $M^2$  beam kalite faktörü,  $z_0$  kavite ışın belinde z-ekseni değeri ve  $n$  merkez dalga boyunda kazanç ortamının kırılma indisine karşılık gelmektedir.

### 2.9.5 Tutucu Tasarımı

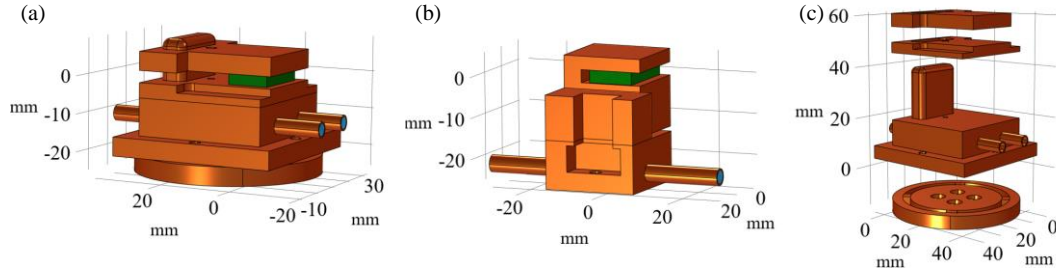
Önceki bölümlerde açıklandığı üzere katı hal lazerler geleneksel biçimde ekzotermiktir. Bu durumda, verimi düşüren ekzotermik etkileri en aza indirmek için lazer kazanç ortamlarının soğutulması kritik öneme sahiptir. Kristalin yerleştirildiği tutucu da soğutma sürecindeki ana mekanizmalardan birine karşılık gelmektedir. Tutucu malzemenin termal iletkenlik katsayısı tasarımda kullanılan belirleyici parametrelerden biri olmaktadır. Bu kapsamda, farklı maddelerin termal iletkenlik katsayıları Tablo 2.9'da sunulmaktadır. Bakır, fiziksel/ısı özellikler, fiyat avantajı ve sarfiyatından dolayı ısı transfer alanında günümüzde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir.

**Tablo 2. 9** Farklı maddelerin termal iletkenlik katsayıları (Holman, 2009)

Materyal	Termal İletkenlik
Gümüş	410
Bakır	385
Alüminyum	202
Nikel	93
Demir	73
Karbon Çelik, %1 C	43
Kurşun	35
Krom-Nikel Çelik (%18 Cr, %8 Ni)	16.3

Lazer kristal tutucusunun tasarımının temel ilkesi, lazer kristali üzerinde pompalama işlemi ile üretilen ısının sistemden dışarı atılmasını sağlamaktır. Isı, iki sistem (veya bir sistem ile çevresi) arasında bir sıcaklık farkı nedeniyle aktarılan enerji formu olarak tanımlanmaktadır (Holman, 2009). Isı aktarımı iletim, konveksiyon ve radyasyon olmak üzere üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bir sıcaklık farkının varlığı, tüm farklı ısı transferi yolları için gereklidir ve üç farklı transfer için de yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklık ortamına doğrudur. İletim yoluyla ısı transferi, parçacıklar arasındaki etkileşimler sonucunda enerjinin bir maddenin daha enerjik parçacıklarından yanındaki daha az enerjili olanlara aktarılmasıdır (Castro, 2008). İletim ısı transferi katılarda moleküler titreşim, sıvı ve gazların rastgele hareketleri sırasında moleküler

difüzyon ve çarpışma yoluyla meydana gelmektedir. Konveksiyon, bir katı yüzey ile hareket halindeki bitişik sıvı veya gaz arasındaki enerji aktarım biçimi olarak tanımlanmakta ve iletim ile sıvı hareketinin birleşik etkilerini içermektedir. Radyasyon ısı transferine atom veya moleküllerin elektronik dizilimlerindeki değişimlerden kaynaklı elektromanyetik dalgalar veya fotonlar neden olmaktadır (Cengel, 1997). Daha iyi bir soğutma işlemi elde etmek için tutucu tasarım sürecinde sıvı akışı da verim artırıcı ilave bir mekanizma olarak kullanılmaktadır.



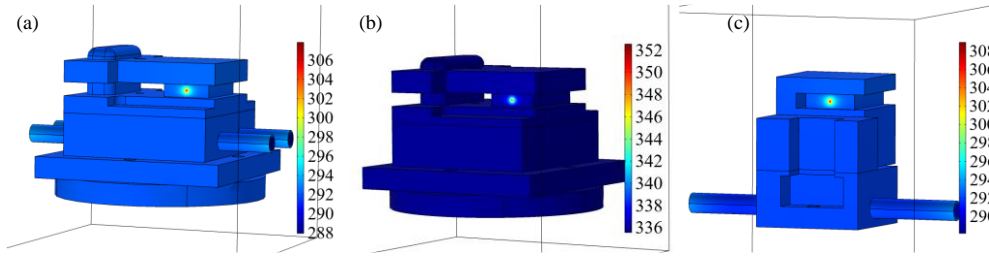
**Şekil 2. 54** ABU-LTL'de önceden kullanılan Tutucu Tasarımı 1 (b), çalışma kapsamında yeni tasarlanan Tutucu Tasarımı 2 (a) ve Tutucu Tasarımı 2'nin genişletilmiş görünümü (c).

Şekil 2.54 (b)'de laboratuvarımızda daha önce kullanılmakta olan referans tasarım gösterilmektedir. Mevcut bu yapıda, su akış kısmının tutucuda ortalanmaması ve bundan dolayı kazanç ortamına yakın tarafta daha fazla soğutmaya neden olması gibi bazı dezavantajlar söz konusudur. Bu durumda termal stres etkisi daha etkili hale gelmektedir. Ayrıca, bu tür tutucular kazanç ortamının (kristal) yerleştirildiği boş alanın yüksekliği değiştirilemediğinden her kazanç ortamı için farklı boyutlarda olmak zorundadır. Diğer bir dezavantajı ise son kullanıcının optik düzenek ve kavite ayarlamaları aşamalarında sınırlı hareket kabiliyetine sahip olmasıdır. Bu dezavantajın bir sonucu olarak, kullanıcının Brewster açısını (yansıma kayıplarını azaltmak için en iyi açı) ayarlaması ekstra çaba gerektirmektedir.

### 2.9.6 Cr:Nd:GSGG Termal Analiz Sonuçları

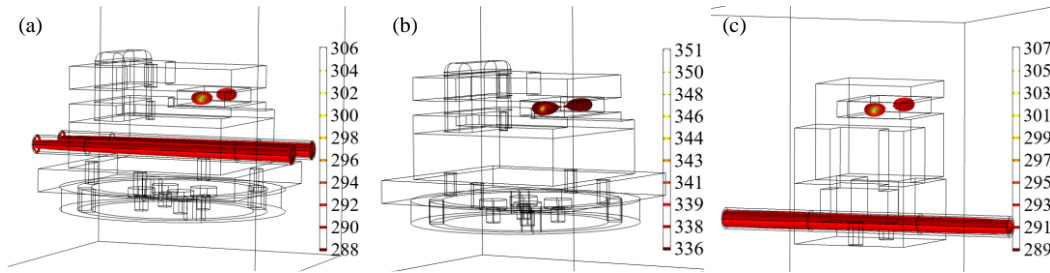
Tasarlanan ve referans alınan tutucu konfigürasyonları için sonlu elemanlar modellemesi alt yapısında 2. bölümde sunulan eşitlikler kullanılarak hesaplanan Kelvin cinsinden genel sıcaklık dağılımları Şekil 2.55 (a), 2.55 (b) ve Şekil 2.55 (c)'de tutucu yüzeyleri sonuçları olarak gösterilmiştir. Tutucu tasarımı- 1'in sonucu, kristal üzerindeki maksimum sıcaklığın yaklaşık 308 K olduğunu gösterir; su soğutmasız tutucu tasarımı- 2 için yaklaşık 352 K; su soğutmalı tutucu tasarımı için yaklaşık 306 K'dir. Bu durumda, sonuçların genel izlenimi, su soğutmalı tutucu tasarımı- 2'nin kazanç ortamı için daha iyi soğutma sağladığını ve su akışı olmayan tutucu tasarımı- 2 ile karşılaştırıldığında, su akışının tutucunun soğutma yeteneği üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça gözlenebilir.





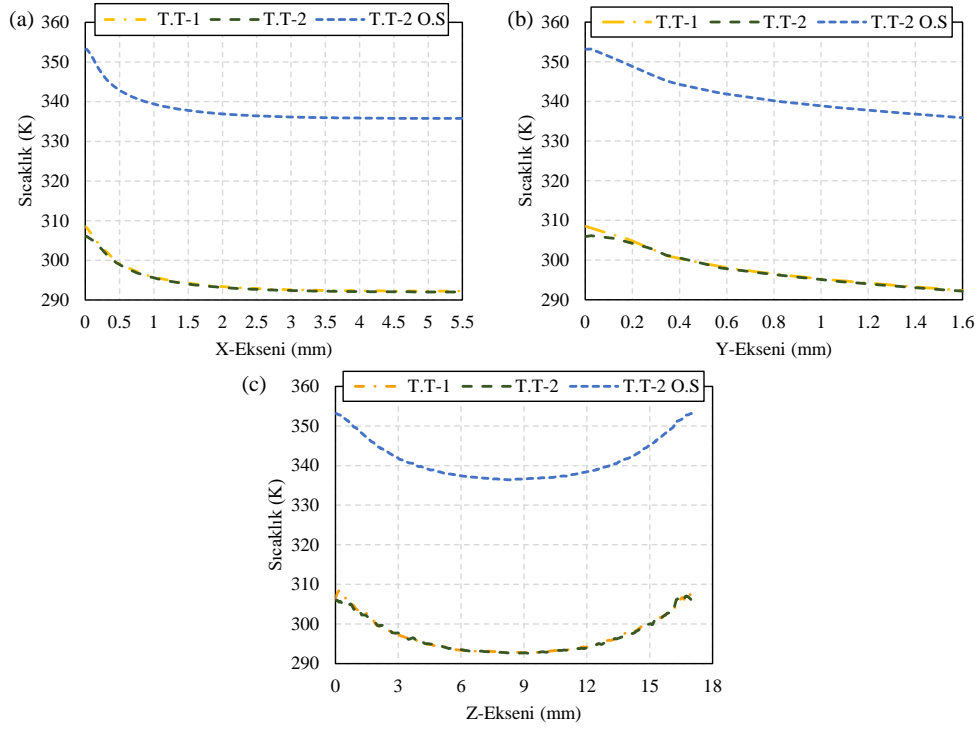
**Şekil 2. 55** Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kelvin Cinsinden Genel Sıcaklık Dağılımları: Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışı ile (a), Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışsız (b) ve Tutucu Tasarımı- 1 Su Akışı ile (c).

Çalışmada kullanılan tutucular için Kelvin cinsinden genel izotermal kontur sıcaklık dağılımları Şekil 2.56 (a), 2.56 (b) ve 2.56 (c)'de aynı sıralamayla gösterilmektedir. Şekillerde Gauss ışın dağılımı açıkça görülebilir, ışın demeti beli kristalin kenarlarından kristalin ortasına doğru çift uçlu pompalanan lazer sistemleri için beklendiği gibi azalmaktadır. Ayrıca, Şekil 2.56 (a) ve Şekil 2.56 (c)'de yer alan ısı dağılımları yordamıyla da su akışı etkisi açıkça belirlenebilmektedir.



**Şekil 2. 56** Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kristal Üzerinde Kelvin Cinsinden Genel İzotermal Kontur Sıcaklık Dağılımları: Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışı ile (a), Tutucu Tasarımı- 2 Su Akışsız (b) ve Tutucu Tasarımı- 1 Su Akışı ile (c)

Kelvin cinsinden üç tutucu tasarımı için sıcaklığın “x” eksenine göre ( $y=0$  ve  $z=0$ ) dağılım grafikleri Şekil 2.57 (a)'da gösterilmektedir. Benzer biçimde sıcaklığın “z” eksenine göre ( $x=0$  ve  $y=0$ ) dağılım grafikleri Şekil 2.57 (b)'de, “y” eksenine göre ( $x=0$  ve  $z=0$ ) dağılım grafikleri Şekil 2.57 (c)'de sunulmaktadır. Sıcaklık dağılımı karakteristiği beklendiği gibi Gauss ışın karakteristiği nedeniyle kazanç ortamının arkasına doğru azalmaktadır. Maksimum sıcaklık ve minimum sıcaklık arasındaki fark, su akışlı tutucu tasarımı-2 için 14 K, su akışsız tutucu tasarımı- 2 için 18 K ve su akışlı tutucu tasarımı-1 için 16 K'dir. Bu sıcaklık farkları arttıkça termal stresin formülüne göre daha büyük termal strese neden olmaktadır. Bu nedenle, her üç tutucu tasarımı karşılaştırıldığında, su akışlı tutucu tasarımı-2 daha az termal strese neden olmakta ve soğutucu seçim kriterleri dikkate alındığında daha uygun olduğu anlamına gelmektedir.



**Şekil 2. 57** X-Eksenine Göre ( $y=0, z=0$ ) Isı Alışverişinin Bittiği Denge Konumunda Kristal Üzerinde Kelvin Cinsinden Sıcaklık Dağılımı Grafiği; Tutucu Tasarımı- 2 ve Su Akışı ile, Tutucu Tasarımı- 2 ve Su Akışı olmadan, Tutucu Tasarımı- 1 ve Su Akışı ile, **(a)** X-Eksenine Göre ( $x=0, y=0$ ), **(b)** Y-Eksenine Göre ( $x=0, z=0$ ), **(c)** Z-Eksenine Göre ( $x=0, y=0$ )

### 2.9.7 Cr:LiCAF Kazanç Ortamının Karakteristik Özellik Tanımları

Proje kapsamında kullanılmakta olan kazanç ortamı Krom (Cr) katkılı Lityum Kalsiyum Alüminyum Florür (Cr:LiCAF) kristali için, yüksek güç seviyelerinde sağladığı avantajlar sebebi ile çift taraflı olarak pompalanmıştır. Ayrıca, 2-diyotlu pompa yerine 4-diyotlu pompa konfigürasyonu temel alınarak hesaplamalar yapılmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılmış olan 15 mm uzunluğa 10 mm genişliğe ve 2 mm yüksekliğe sahip Cr:LiCAF kristaline ait nümerik benzetim hesaplamalarında kullanılmış olan termo-opto-mekanik özellikler Tablo 2.10'da listelenmiştir.

**Tablo 2. 10** Cr:LiCAF kristaline ait termo-opto-mekanik özellikler

Parametre	Sembol	Değer
Pompa Dalga Boyu	$\lambda_p$	660 nm
Lazer Dalga Boyu	$\lambda_l$	795 nm
Doping	Dp	%1.25
Soğurma Katsayısı	$a$	$249.37 \text{ m}^{-1}$ (Demirbas,2019)
Özısı	Cp	$0.935 \text{ J}/(\text{g}^* \text{K})$

Yoğunluk	rho	6495 kg/m <sup>3</sup>
Termal İletkenli Katsayısı	k	5.14 //c 4.58 //a W/(mK) (Demirbas,2019)
Derinlik	K	10 mm
Uzunluk	L	15 mm
Yükseklik	M	2 mm
Mod Eşleştirme Faktörü	<i>MMF</i>	0.8
Kırılma İndisi	n	1.39
Kavite Işın Bel Çapı	<i>wT<sub>0</sub></i>	186 um
Kavite Işın Bel Çapı	<i>wS<sub>0</sub></i>	12 um
Kavite Işın Belinde Z-axis	<i>z<sub>0</sub></i>	7.5 mm
Young's Modülü	E	96 GPa (Demirbas, 2018)
Poisson Oranı	v	0.25 (Demirbas, 2018)
Termal Genleşme Katsayısı	α	3.1//c 21//a 10 <sup>-6</sup> 1/K (Demirbas, 2018)
Gerilme Direnci	TenS	62 MPa (Demirbas, 2018)

Yapılan çalışmalar sonucunda, numerik hesaplamalar için kullanılan formulüzasyonlarda literatürdeki çalışmalara dayanarak değişikliklere gidilmiştir (Demirbaş, 2020 ve Fu, 2013).

$$Q(x, y, z) = \frac{2(n_{heat})P_{in}\alpha}{\pi(wS(z) * wT(z))} \text{Exp} \left[ -\frac{2(x^2 + y^2)}{wS(z) * wT(z)} \right] \text{Exp}[-\alpha_{eff}z] \quad (2.17)$$

Isı yoğunluğunun levha geometrisindeki dağılımının hesaplamak için denklem 2.17 kullanılmıştır. Buradaki önemli parametrelerden biride kullanılan gauss ışının şeklidir. Kullanılan denklem beam şekli elliptik olacak şekilde revize edilmiştir. Tanjantsal ve sagital olarak iki düzlemdeki ışın bel çapının hesaplanması denklem 2.18 ve 2.19 de gibi formulize edilmiştir.

$$wT(z) =$$

$$wT_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{MMF^2 \lambda_p (z-z_0)}{n\pi wT_0^2} \right]^2} \quad (2.18)$$

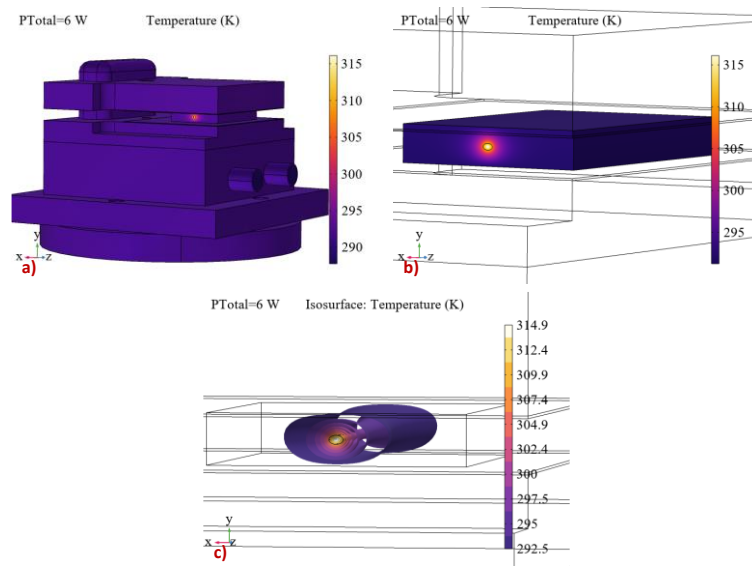
$$wS(z) =$$

$$wS_0 \sqrt{1 + \left[ \frac{MMF^2 \lambda_p (z-z_0)}{n\pi wS_0^2} \right]^2} \quad (2.19)$$

Yukarıda tanımlanmış olan pompalama şekli, kristal özellikleri ve ısı üretim mekanizmaları hesaba katılarak, 15 mm Cr:LiCAF lazer kristali için çift taraflı pompalama ile çoklu fizik programında sıcaklık analizi yapılmıştır. Analizler sırasında pompa gücü 4-adet çok modlu diyotla pompalanan lazer sistemine göre, maximum 6 W'ı da kapsayacak şekilde geniş bir aralık olan 0-100 W aralığında yapılmıştır. Buradaki amaç Cr:LiCAF kristalinin, maksimum termal sönümlenme sıcaklığı olan 255 °C (Eichholz, 1998 ve Stalder, 1992) ne kadarlık bir pompa gücünde ulaştığını hesaplayabilmektir.

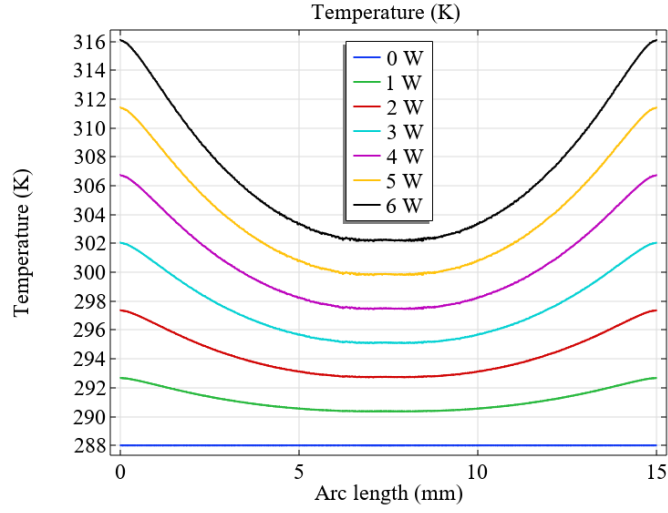
### 2.9.8 Cr:Nd:GSGG Termal Analiz Sonuçları

Şekil 2.58'da (solda) Cr:LiCAF kristalinin tutucu birlikte genel sıcaklık dağılımı pompa gücü çift taraflı olarak totalde 6 W iken verilmiştir. Kristalin lasing eşiğini aşmasıyla birlikte oluşan sıcaklık en yüksek 315 kelvin yani 42 °C olarak görülmektedir. Maximum sıcaklığın olduğu bölge tamamiyle aktif lazer ışını tarafından uyarılan alan içerisinde kalmaktadır. Şekil 2.58 (b) ve (c)'de, sırasıyla kristal üzerindeki ve içerisindeki sıcaklık dağılımı gösterilmektedir.



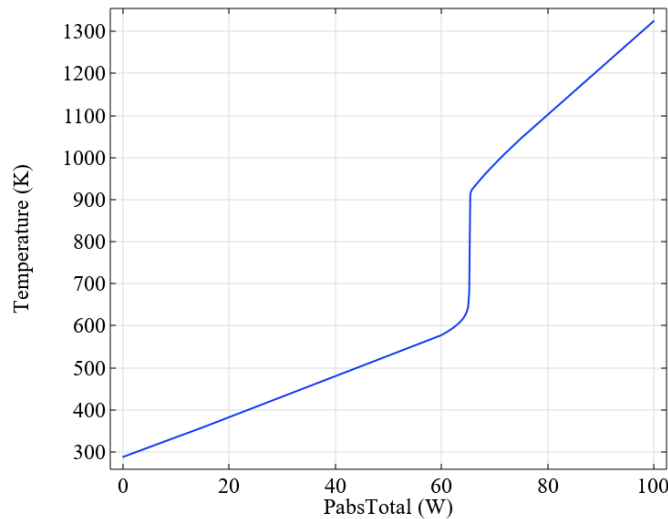
**Şekil 2. 58** 15 mm Cr:LiCAF kristalinin 15 °C soğutucu sıvı akışı altında 6 W güçte pompalanma durumdaki **a)** genel sıcaklık dağılımı **b)** kristal üzerindeki sıcaklık dağılımı **c)** kristal içerisindeki ısının yüzeyel olarak yayılımı

Şekil 2.59'da çift taraflı pompalama ile simulasyon yapılmış 15 mm Cr:LiCAF kristali için, pompa ışını boyunca kristal içerisindeki sıcaklık değişimi hesaplanmıştır. Pompa gücünün olmadığı durumda, kristal içerisindeki sıcaklığın oda sıcaklığında olduğu, ve pompa gücünün artmaya başlamasıyla birlikte özellikle uygulanan gücün kristale ilk temas noktası olan yüzeylerdeki sıcaklığın arttığı görülmüştür. Kristale uygulanan maksimum pompa gücü olan 6 W güç değerinde kristal içerisindeki sıcaklık farkının 14 °C ye çıktığı hesaplanmıştır (Ozturk, 2023 -- accepted).



**Şekil 2. 59** 15 mm Cr:LiCAF kristali için, pompa ışını boyunca kristal içerisindeki sıcaklığın farklı güçlere göre değişimi

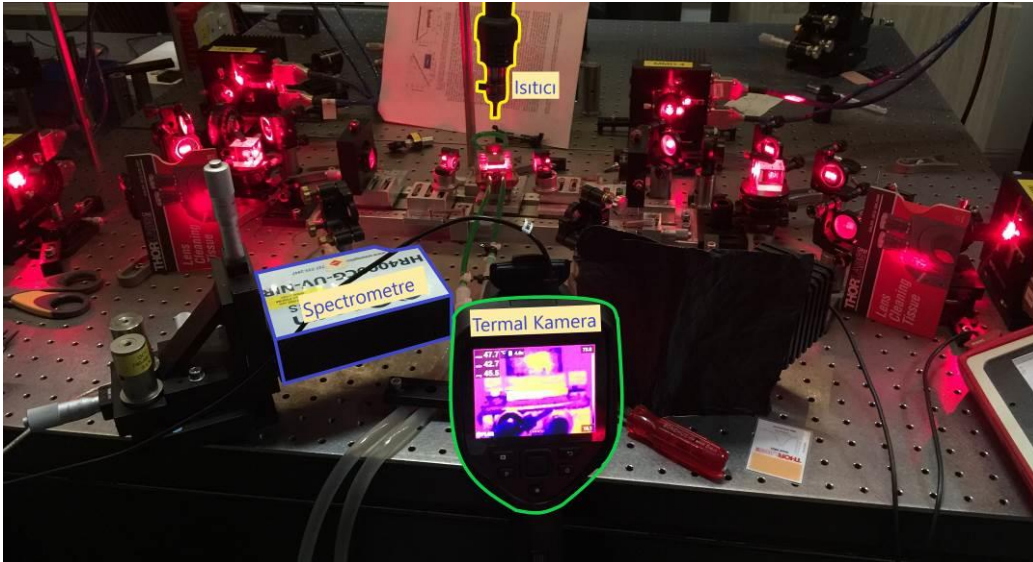
Bir diğer önemli parametre olan kristal içerisindeki maksimum sıcaklık değerinin 0-100 W pompa gücü aralığındaki değişimi Şekil 2.60'da verilmiştir. Yapılan hesaplama sonucunda, maksimum sıcaklık değeri belirli bir noktaya kadar lineer olarak artmakta fakat o noktadan sonra dikey bir artış göstermektedir. Bu durum Cr:LiCAF lazer kristalinin maksimum termal sönmüleme sıcaklığı olan 255 °C'den sonra floresans yaşam süresinin hızlı bir şekilde düşmesi sonucu kristal içerisindeki bütün enerjinin sıcaklığa dönüşmesiyle açıklanabilir.



**Şekil 2. 60** 15 mm Cr:LiCAF kristali için, pompa ışını boyunca kristal içerisindeki maksimum sıcaklığın 0-100 W aralığındaki değişimi.

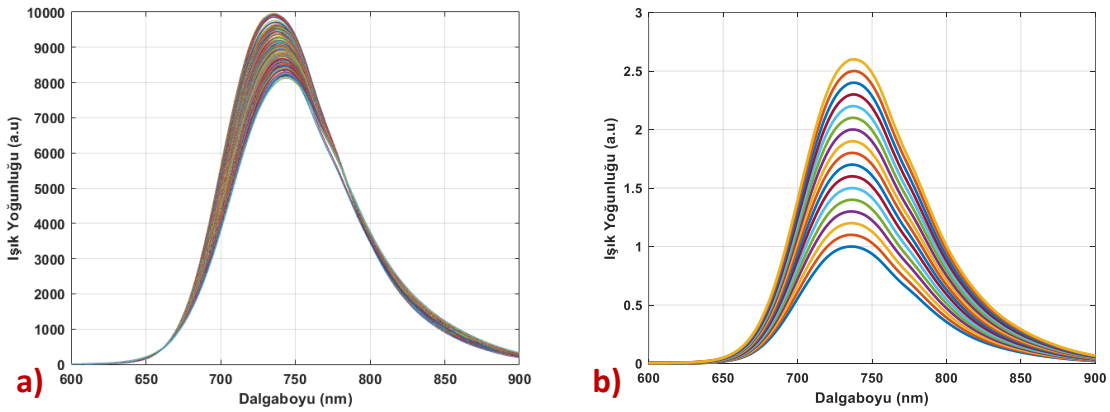
### 2.9.9 Sürekli-dalga pompalı Cr:LiCAF kristalinin ortalama iç sıcaklığının deneysel olarak temassız optik problama yöntemi ile tahmin edilmesi

Projenin dahilinde gerçekleştirilecek olan 4 diyot pompalı sürekli-dalga Cr:LiCAF kavitesi için operasyon sırasında üretilecek olan yüksek sıcaklığın termo-optik etkilerinin doğru bir biçimde anlaşılabilmesi için kristal içi sıcaklık dağılımının ortaya çıkarılmasında kullanılacak olan deneysel yöntemlerden biri Şekil 2.61'de gösterildiği şekilde ABU-LTL'de gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde Cr:LiCAF kristalinin uyarılmış emisyon karakteristiği, ilgili tahmin yönteminin dayandığı referansı oluşturmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak Şekil 2.61'de gösterilen harici bir ısıtıcı yardımı ile 10°C-100°C aralığında sıcaklığı 0.5°C aralıklarla artırılan Cr:LiCAF kristalinin verilen herhangi bir andaki sıcaklığı proje kapsamında satın alınmış olan termal kamera yardımı ile kristalin tutucu içerisinde açıkta kalan yüzeylerinden ölçülmüştür. Daha sonra kristal her iki tarafından 1Hz tekrarlama frekansı ve 10ms atma genişliğine sahip pompa kaynakları tarafından ilgili her bir periyot aralığında 30mW ortalama pompa gücü ile uyarılarak, kristal tarafından saçılan uyarılmış emisyon şiddeti spektrometre yardımı ile ölçülmektedir. İlgili ölçümlerin gerçekleştirilmesi üzerine Antalya Bilim Üniversitesi lazer Teknoloji Laboratuvarı'nda kurulmuş deney düzeneği Şekil 2.661'da gösterilmiştir.



**Şekil 2. 61** Kristal içi sıcaklığın deneysel olarak belirlenmesinde, düşük frekanslı darbeli pompa kaynağı ile beslenmiş kristalin uyarılmış emisyonunun sıcaklığa göre değişiminin öğrenme eğrisinin çıkarılması için ABU-LTL'de kurulmuş deney düzeneği.

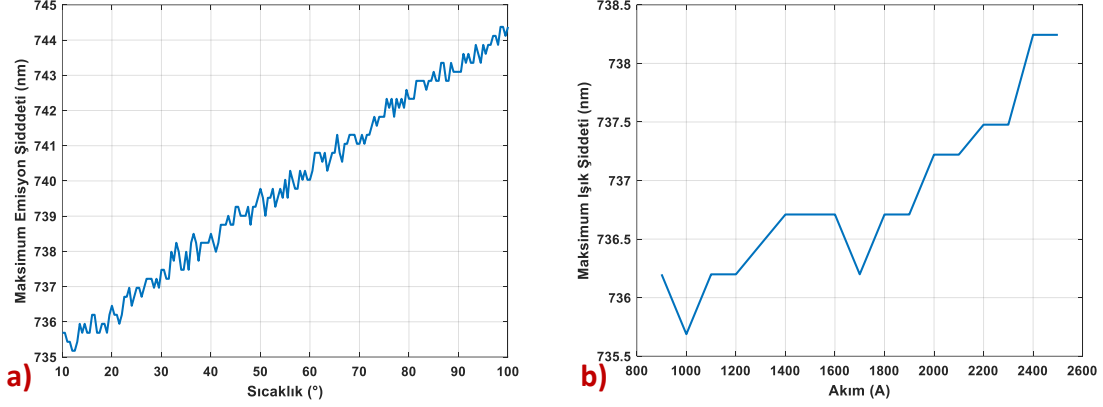
Burada sıcaklığı harici ısıtıcı ve termal kamera ile kontrol edilen kristal üzerinde pompa tarafından ekstra bir termal yük oluşturulmaması ve dolayısıyla kristal sıcaklığının doğru bir biçimde kontrol edilebilmesi için düşük tekrarlama frekansına sahip kısa süreli darbeleri uyartım uygulanmıştır. Tanımlanmış olan uyartım altında açığa çıkan uyarılmış emisyon, 10°C-100°C sıcaklık aralığında her bir 0.5°C artış için ölçülerek ilgili emisyon bilgisi dijital ortamda kayıt altına alınmıştır. Daha sonra, sistemdeki termal kamera ve spektrometrenin pozisyonu değiştirilmeden, Cr:LiCAF kavitesinin sürekli-dalga pompalanma ile beslendiği durumdaki uyarılmış emisyonu farklı giriş güçleri için ölçülmüştür.



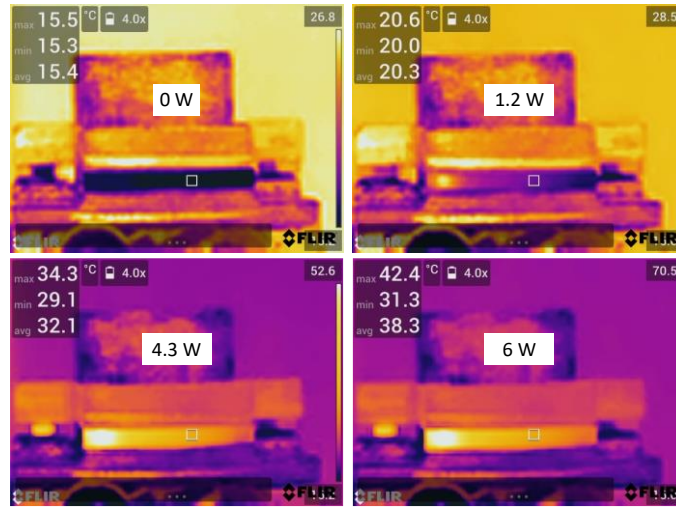
**Şekil 2. 62 a)** Düşük tekrarlama frekanslı ve kısa darbeleri pompa gücü ile her iki tarafından uyarılan Cr:LiCAF kristalinin ölçülmüş uyarılmış emisyonunun sıcaklığa bağlı olarak değişimi. **b)** Sürekli-dalga pompalanma ile ölçülmüş farklı güçlerde uyarılmış emisyon grafiği.

Şekil 2.62 a'da 15 mm Cr:LiCAF kristaline ait sıcaklığa bağlı uyarılmış emisyon karakteristiği gösterilmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, kristal sıcaklığındaki artış, kristal tarafından yayılan uyarılmış emisyon yoğunluğunun tepe noktasının daha uzun dalga boyuna doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.63'de ölçülen emisyonların dijital ortamda işlenmesiyle elde edilmiş maksimum emisyon dalga boyları, sırasıyla farklı sıcaklıklar ve sürekli-dalga pompalamada farklı giriş güçleri için verilmiştir. Sıcaklığa bağlı uyarılmış emisyon grafiğinde görüldüğü gibi lineer bir artış gözlemlenmiştir. elde edilen bu eğri sürekli-dalga pompalı istemden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmak üzere referans olarak kullanılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda 4-Diyot pompalı sistem için, diyotların çalıştığı maksimum akım değeri olan 2.5 A da üretilen 6 W pompa gücünde maksimum emisyon dalga boyunun 738.244 nm de olduğu anlaşılmıştır. Sıcaklığa bağlı emisyon şiddeti grafiği ile yapılan karşılaştırma sonucunda kristal içerisindeki sıcaklığın 39.5 °C olabileceği tahmin edilmiştir. Yapılan numerik çalışmalara ek olarak termal kamera ile ölçülmüş sıcaklık değerleride şekil 2.64'de verilmiştir. Termal kamera ile kristalin yan yüzeyinden yansıyan sıcaklığın 6 W pompa gücünde maksimum 42.4 °C olduğu

görülmektedir. Fakat, sıcaklığın özellikle pompanın giriş kısmında 70.5 °C ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir.



**Şekil 2. 63 a)** Sıcaklığı ısıtıcı ve termal kamera yardımı ile kontrol edilen 15 mm uzunluğundaki Cr:LiCAF kristalinin 10°C-100°C aralığında 0.5°C aralıklarla ölçülmüş uyarılmış emisyonun ait maksimum emisyon dalga boyu ve **b)** sürekli-dalgalı pompalı, farklı güçlerde uyarılmış 15 mm Cr:LiCAF kristaline ait maksimum emisyon dalga boyu grafiği.



**Şekil 2. 64** Sürekli-dalgalı sistemde termal kamera ile ölçülmüş farklı güçlerdeki kristal yan yüzeyindeki sıcaklık ölçümleri. Ölçüler grafiklerdeki kareler içerisindeki maksimum minimum ve ortalama değerleri göstermektedir.



## 2.10 BBO kristalleri kullanılarak ikincil harmonik elde edilmesi

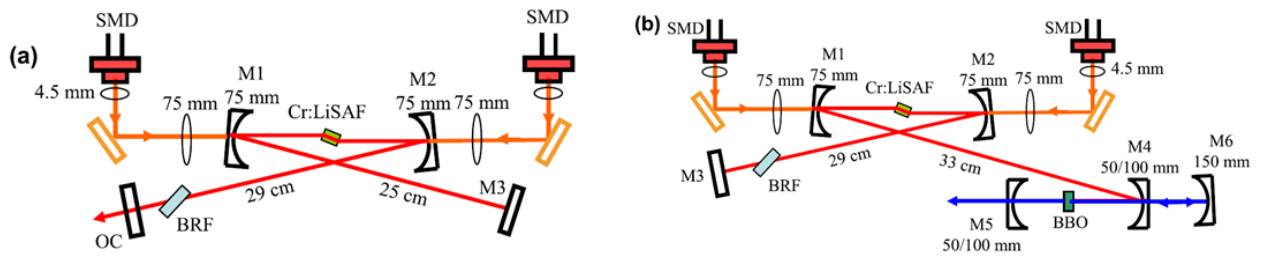
### 2.10.1 402-535 nm Geniş Aralığında Ayarlanabilir, Frekansı İkiye Katlanmış Cr:LiSAF Lazeri

Ayarlanabilir lazerler, lazer emisyon dalga boyunu önemli bir aralıkta serbestçe ayarlama fırsatı sağlar ve dalga boyu seçiminin bu esnekliği, spektroskopi, biyomedikal görüntüleme, optik iletişim, frekans metrolojisi ve interferometri (Duarte, 1995, Colles & Pidgeon, 1975) dahil olmak üzere birçok uygulama tarafından arzu edilir.

İdeal olarak, ikinci harmonik üretimi yoluyla, Cr:LiSAF (770–1110 nm) ayar aralığı, spektrumun mor, mavi, mavi ve yeşil bölgelerine genişletilebilir: 385–555 nm. Bu dalga boyu aralığı, spektroskopi, biyomedikal görüntüleme, atom soğutma/tutma ve kuantum optiği gibi birçok uygulama için ilgi çekicidir. Cr:LiSAF'ın ikinci harmonik üretim çalışmaları, boşluk dışı ve boşluk içi temelli çabalara bölünebilir.

Cr:LiSAF ile önceki tüm bu doğrusal olmayan kavite içi frekans oluşturma deneyleri, nispeten karmaşık çok modlu pompa kaynakları kullanmıştır ve kullanılan pompa güçlerinde, lazer kristalinin yanı sıra diyotların/diyotların soğutulması gerekir. Bu nedenle, çok modlu diyot pompalama yaklaşımı, kompakt, taşınabilir ve verimli lazer sistemlerinin geliştirilmesini engellemektedir (Agate vd., 2002, Agate vd., 2003). Çok modlu diyotların kullanımına ilişkin daha önceki çalışmaların odak noktası, kırmızı dalga boyu tek modlu diyotların sınırlı çıkış güçlerinden kaynaklanıyordu. Kırmızı dalga boyu bölgesindeki ilk tek modlu diyotlar, 1990'ların başında yalnızca yaklaşık 10 mW ve 2000'lerin başında yaklaşık 50 mW sağladı (Sheps vd., 1991). Güç seviyeleri 2010'da 100 mW seviyesinin üzerine ve birkaç yıl önce 200 mW seviyesinin üzerine çıktı (Demirbas vd., 2012, Mekteplioğlu, 2021). Bu nedenle, diyot teknolojisindeki son gelişmeler, ayarlanabilir görünür kaynakların karmaşıklığını azaltmanın bir yolunu açtı. Bundan motive olarak, bu projenin bu kısmında, pompa kaynağı olarak 210 mW çıkış gücüne sahip son teknoloji 660 nm tek modlu diyotları kullanmaya odaklandık. Bu diyotlar aktif soğutma gerektirmez, basit pillerle çalıştırılabilir ve çok kompakt bir ayak izi ile düşük maliyetli lazer sistemlerinin oluşturulmasını sağlar. Deneylerde, ilk önce kızılötesinde Cr:LiSAF'ın kalıcı özelliklerini karakterize etmek için bu tür iki SMD kullanıldı. 420 mW pompa gücü kullanarak 190 mW'a kadar cw güçleri elde ettik, %54'e varan bir verime ulaştık ve 795 nm'den 1103 nm'ye ayar aralığı elde ettik. Frekans ikiye katlama deneylerinde, 425 nm'de 17.5 mW'a kadar çıkış gücü elde ettik ve buna karşılık gelen %4.4'lük bir optikten optiğe dönüştürme verimliliği elde ettik. 800–1000 nm aralığında optimize edilmiş kesim açlarına sahip altı farklı

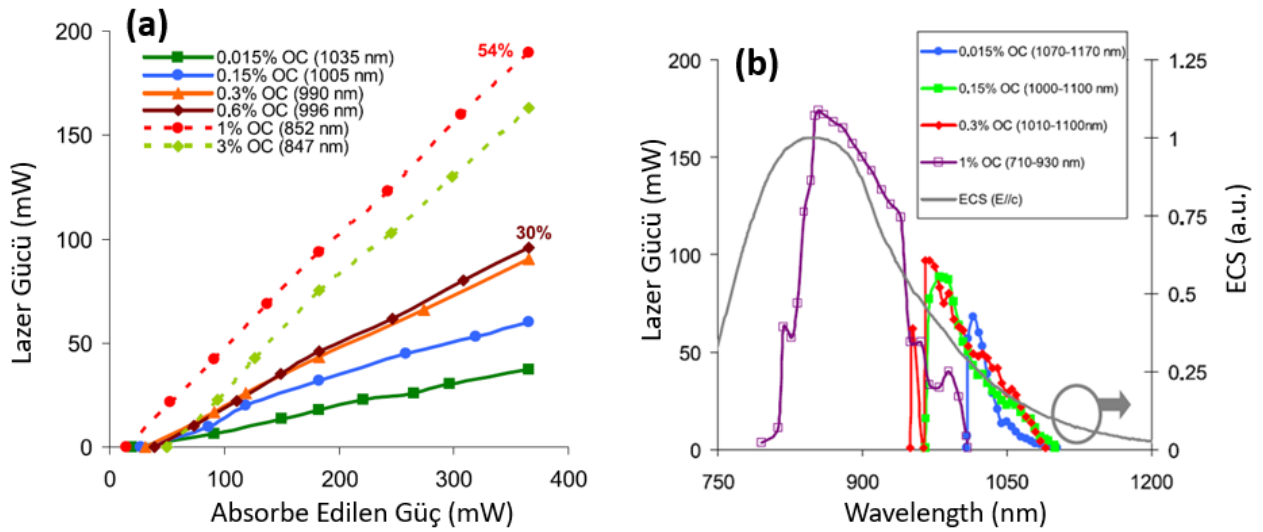
BBO kristali kullanılarak, 402–525 nm'lik bir rekor frekansı ikiye katlayan ayar aralığı da elde edilmiştir. Bildiğimiz kadarıyla bunlar, yakın zamanda mevcut olan 210 mW tek modlu diyotlar kullanılarak Cr:LiSAF ile bildirilen ilk laser sonuçlardır. Ayrıca, elde edilen cw frekansı ikiye katlanmış ayarlama aralığı (402–525 nm), Cr:LiSAF (387 463 nm (Demirbas, 2015)) ile önceki literatürü, spektrumun cyan ve yeşil bölgelerine önemli ölçüde genişletir. Sistemin elde edilen optik-optik dönüşüm verimliliği (%4.4), son SMD diyot pompa kaynaklarının etkinliğini kanıtlamaktadır. Spektrumun yakın kızılötesi ve görünür bölgelerinde ultra geniş ayar davranışına sahip bu düşük maliyetli ve kompakt lazer sisteminin birçok bilimsel ve teknolojik uygulama alanı için faydalı olabileceğine inanıyoruz.



**Şekil 2.65 (a) cw (b) cw intrakavite frekans-iki katına Cr:LiSAF lazerin şeması.** X kavitisi, 660 nm'de iki adet 210 mW tek uzamsal mod diyot (SMD'ler) tarafından uçtan pompalanır. BRF: Çift kırılmalı filtre

Şekil 2.65 (a), cw lazer deneylerinde kullanılan diyot pompalı Cr:LiSAF lazer kavitelinin şemasını göstermektedir. Pompa kaynağı olarak 210 mW çıkış gücüne sahip iki adet lineer polarize,  $660 \pm 2$  nm AlGaInP tek uzamsal mod diyot (SMD'ler) kullanılır. Diyotların elektriksel-optik dönüşüm verimliliği  $\sim\%33$ 'tür ve diyotların aktif olarak soğutulması gerekli değildir (diyot çalışma aralığı - 10 ila 75 °C olarak belirtilmiştir). Diyotların çıkışları önce asferik merceklerle ( $f = 4,5$  mm) paralelleştirilir ve ardından pompa ışınlarını Cr:LiSAF kristalinin içine odaklamak için iki adet 75 mm odak uzunluklu mercek kullanılır. %1.5 Cr katkılı, Brewster kesimli Cr:LiSAF kazanç ortamı 10 mm uzunluğundadır ve 2 mm (kalınlık) x 10 mm (genişlik) açıklık boyutuna sahiptir. Pompa/lazer ışığının elektrik alanı TM(p) polarizedir ve absorpsiyonu ve kazancı maksimize etmek için kristalin c eksenine paraleldir. Kristal, TM polarizasyonu için 660 nm pompa ışığının %98'inden fazlasını emer. Emilen bu pompa gücü seviyelerinde, Cr:LiSAF kristali ayrıca aktif soğutma gerektirmez, bu da oldukça basit ve kompakt bir lazer sisteminin oluşturulmasını sağlar. İki kavisli pompa aynası (M1 ve M2,  $R = 75$  mm), bir düz uçlu ayna (M3) ve bir düz çıkış kuplörü (OC) ile astigmatik olarak dengelenmiş, x-katlanmış bir lazer kavitisi oluşturulmuştur. Kristalin içinde  $\sim 25 \times \sim 40 \mu\text{m}$ 'lik bir ışın demeti elde etmek için  $\sim 29$  cm'lik uzun bir boşluk kolu uzunluğu kullanılır. Cr:LiSAF'ın tüm ayar aralığını kapsamak için iki farklı özel tasarlanmış pompa aynası kullanılır. İlk set 750-850 nm bölgesini kapsayan yüksek yansıtma özelliğine sahiptir, burada ikinci set 900 ila 1050 nm bandında yansıtma sağlar.

Pompa aynalarının her ikisi de pompa dalga boyunda (660 nm) %95'in üzerinde iletme sahiptir. Cw ayarlama deneylerinde, lazer dalga boyunu ayarlamak için 25° dalış açısına sahip 4 mm kalınlığında yüzey dışı optik eksen kristal kuvars çift kırılmalı filtre kullanılır (Mekteplioğlu vd., 2021, Demirbas, 2017). Kavite içi frekans ikiye katlama deneyleri için, kavite iki tane daha kavisli yüksek yansıtıcı aynanın (M4 ve M5) yerleştirilmesiyle genişletilir. BBO kristalleri, bu yeni kavisli aynalar tarafından üretilen bu ikinci odağa yerleştirilir. Pompa aynalarına benzer şekilde, tüm spektral aralığı kapsamak için iki farklı kavisli ayna seti kullanılır. İlk set 100 mm'lik bir eğrilik yarıçapına sahiptir ve 750-850 nm bölgesini kapsayan bir yansıtma bandına ve 380-430 nm bölgesinde %95'lik bir iletme sahiptir (Layertec 105440). İkinci set, 50 mm'lik bir eğrilik yarıçapına, 900–1000 nm bölgesini kapsayan bir yansıtma bandına ve 450–500 nm spektral aralığında bir iletim bandına sahiptir (Layertec 116786). M4 ve M5 tarafından oluşturulan odaktaki boşluk içi Cr:LiSAF ışın boyutunun, eğrilik aynalarının 50 mm ve 100 mm yarıçapları için sırasıyla 25  $\mu$ m ve 60  $\mu$ m olduğu tahmin edilmektedir.

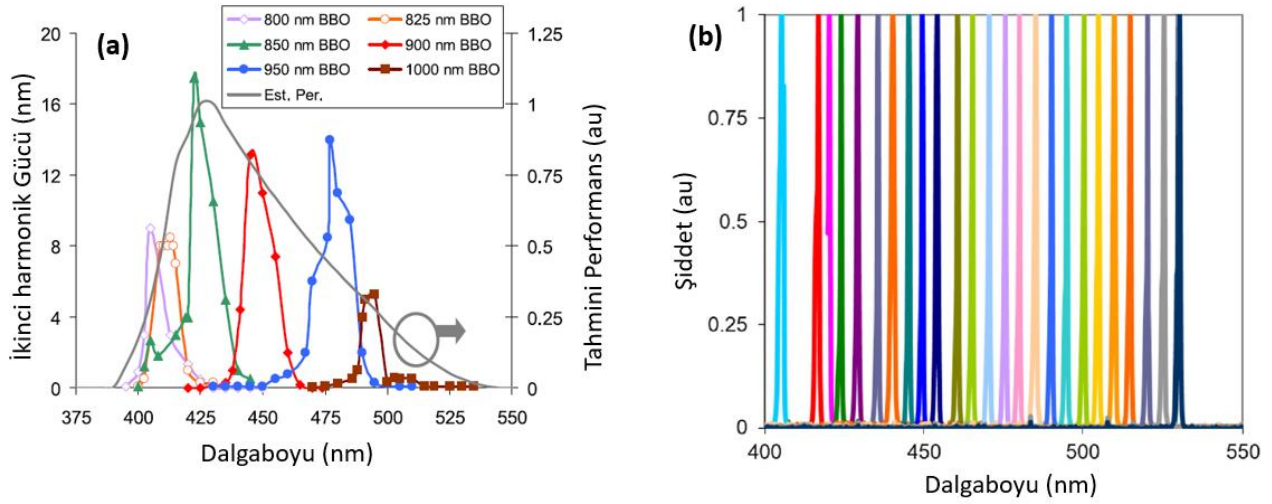


**Şekil 2. 66 . (a)** Cr:LiSAF lazer için %0.015, 015, 0.3, 0.6, 1 ve %3 çıkış koplajında alınan sürekli dalga güç verimliliği eğrileri. Serbest çalışan lazer dalga boyu her durum için belirtilmiştir. **(b)** 365 mW emilen pompa gücü seviyesinde SMD pompalı Cr:LiSAF lazerin CW ayar eğrisi. Veriler, %0.015 ile %1 arasında aktarıma sahip dört farklı çıkış koplörü ile alınmiştır. Her çıkış koplörünün yansıtma aralığı, resim açıklamalarında listelenmiştir. Cr:LiSAF'ın E/c eksenini için normalize edilmiş emisyon kesit verileri de karşılaştırma amacıyla gösterilmiştir.

Şekil 2.66 (a), iletimleri %0.015 ila %3 arasında değişen altı farklı OC için emilen pompa gücünün bir fonksiyonu olarak Cr:LiSAF lazer çıkış gücünün ölçülen değişimini göstermektedir.

%1 ve %3 çıkış kuplörleri, kazanç tepe noktası (850 nm) civarında lazer için optimize edilirken, %0.015-0.6 kuplörleri 1000 nm yakınında çalışacak şekilde tasarlanmıştır. En iyi lazer performansı, %1 ileten OC ile elde edilir. Bu kuplörü kullanarak, 365 mW emilen pompa gücünde yaklaşık 852 nm'de 190 mW'a kadar cw çıkışı elde edilir. Tek modlu diyot pompa kaynaklarının kullanılması nedeniyle, Cr:LiSAF lazer çıkışı da bir TEM00 ışın profili ile tek moddur (tek enine mod). Kalıcı eşik 16 mW'tır ve emilen pompa gücüne göre eğim verimliliği %54'tür. Bu eğim verimliliği, tek modlu lazer diyotların çıkış ışını kalitesini kanıtlayan Cr:LiSAF tarafından bildirilen en yüksek verimliliklerden biridir (Demirbas, 2019). %0.015–0.6 çıkış kuplörleri için, serbest çalışan dalga boyu 1000 nm bölgesine kaydırılır (şekilde de gösterildiği gibi). Bu rejimde, en iyi performans %0.6 verici çıkış kuplörü ile elde edilir. %0.6 OC kullanarak, 40 mW'lık bir cw kalıcı eşiğine ulaşılmış, %30'luk bir eğim verimliliği ile 95 mW'lık bir cw çıkış gücü elde edilmiştir. Burada, beklendiği gibi, bu uzun dalga boyu rejiminde, lazer dalga boyunun kazanç zirvesinden uzağa kayması nedeniyle lazer eşiği artar ve lazer eğim verimi azalır (Demirbas vd., 2022, Demirbas vd., 2021).

Şekil 2.66 (b), ~365 mW emilen pompa gücünde %0.015, %0.15, %0.3 ve %1 iletimli OC'ler kullanılarak Cr:LiSAF lazerin ölçülen cw ayar aralığını göstermektedir. E//c için Cr:LiSAF'ın normalleştirilmiş emisyon kesit eğrisi de gösterilmiştir. Lazerin 795 nm'den 1010 nm'ye nispeten yumuşak ayarı gösterildi ve beklendiği gibi en yüksek çıkış gücü, malzemenin kazanç zirvesine yakın olan 850 nm civarında elde edildi. Cr:LiSAF lazerin çıkışı çok uzunlamasına moddur. Öte yandan, kavitede BRF bulunması nedeniyle, Cr:LiSAF lazer çıktısının spektral genişliği tüm ayarlama aralığında 0.2 nm'den daha dardır ve hatta çoğu dalga boyu için 0.05 nm'nin altındadır (ölçüm, eldeki spektrometrenin çözünürlüğü). Pompa aynalarımızın sınırlı yansıtma bant genişliği, 795 nm'nin altına düşmeyi engelledi (önceki çalışmalar, 770 nm'ye kadar ayarlama olduğunu göstermiştir (Demirbas, 2015, Stalder vd., 1991). 1090 nm ve 1102 nm'lik bir uzun dalga boyu ayar kenarı, sırasıyla %0.3 ve %0.015 çıkış kuplörleri kullanılarak elde edilir. Azaltılmış emisyon kesiti ve dolayısıyla kazanç, Cr:LiSAF'ta 1110 nm'nin üzerine çıkmayı önler. Cr:Colquiriite malzemeleri (Cr:LiCAF, Cr:LiSGaF) arasında, Cr:LiSAF, yakın kızılötesinde en geniş ayarlama aralığını sağlar ve bu, geniş ölçüde ayarlanabilir frekans katlama çalışmasında Cr:LiSAF'e odaklanmamız için bizi motive edici niteliktedir (Demirbas, 2019).



**Şekil 2. 67 (a)** 365 mW emilen pompa gücünde SMD pompalı Cr:LiSAF lazerin ölçülen cw intrakavite frekansı ikiye katlanmış ayarlama (402–535 nm) performansı. Veriler, merkezi çalışma aralığı 800 ile 1000 nm arasında olan 6 farklı BBO kristali ile alınmıştır. Gri eğri, temel dalga boyu aralığında Cr:LiSAF lazerin cw ayarlama özelliklerine dayanan tahmini ayarlama performansıdır. **(b)** 402–535 nm bölgesinde ikinci harmonik ışının ayarlanabilirliğini gösteren cw intracavity frekansı ikiye katlanmış Cr:LiSAF lazerinden örnek optik spektrumlar.

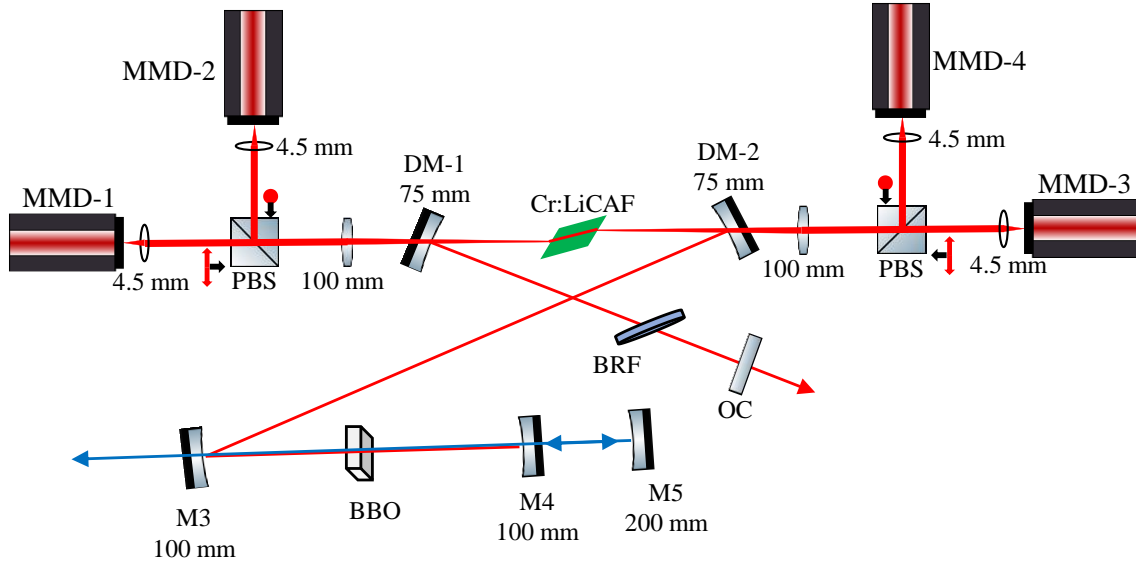
Şekil 2.67 (a), Cr:LiSAF lazerin cw intrakavite frekansını ikiye katlama performansını özetlemektedir. Veriler, merkezi çalışma dalga boyları 800, 825, 850, 900, 950 ve 1000 nm olan altı farklı BBO kristali kullanılarak 365 mW emilen pompa gücünde alınır. Her BBO kristali için, Cr:LiSAF lazerin merkezi dalga boyunu ayarlamak için önce BRF açısı değiştirilir. Daha sonra her dalga boyu için, BBO kristalinin eğimi ve konumu ile oynanarak ikinci harmonik verimlilik optimize edilir. Bu gereklidir çünkü BBO çok küçük bir açısal faz eşleştirme bant genişliğine sahiptir (Nikogosyan, 1991). Örnek olarak, 2 mm kalınlığındaki 850 ve 1000 nm BBO kristalleri, sırasıyla yalnızca yaklaşık 7.2 ve 16 nm'lik tahmini bir frekansı ikiye katlayan kabul bant genişliğine sahiptir. Doğrusal olmayan kristalin tasarım dalga boyundan uzakta çalıştırılmasının, numunenin normal olaydan uzakta kullanılmasını gerektirdiğini, bunun da BBO kristal kayıplarını artırdığını ve Cr:LiSAF lazer boşluk içi güçlerini azalttığına dikkat çekelim (yüksek Q lazer boşluğu, kayıplara karşı son derece hassastır). Sonuç olarak, her bir kristal için ayarlama eğrisi yaklaşık 10 nm'lik bir bant genişliğine sahiptir ve bunun ötesinde, üretilen frekansı ikiye katlanmış güçler önemli ölçüde azalır. Olumlu tarafı, BBO oldukça geniş faz eşleştirme sıcaklık bant genişliğine sahiptir ve bu nedenle doğrusal olmayan kristalin aktif sıcaklık kontrolü gerekli değildir (BBO kristalinin yerel iç ısıtması, verimlilikte bir değişikliğe yol açmaz) (Nikogosyan, 1991).

Elde edilen ayarlama aralığı (402–535 nm) açısından, bilgimize göre, bu çalışma şimdiye kadar cw Cr:LiSAF lazerlerinden bildirilen en geniş ikinci harmonik ayarlama aralığını rapor eder ve mordan yeşile tüm spektral bölgeleri kapsar. Şekil 2.67 (b), ayarlama aralığı boyunca alınan örnek optik spektrumları göstermektedir). Daha önce 427 ve 443 (Falcoz vd., 1995), 432 ve 442 nm (Laperle vd., 1997) ve 387 ve 463 nm (Demirbas, 2015) arasında bir ayarlama aralığı elde edildi. Kısa dalga boyu tarafında, çalışmamızdaki ayar limiti (402 nm) kullanılan optiklerin yansıtma özelliği ile sınırlıdır (387 nm'lik bir cw ayar limiti (Demirbas, 2015)'da bildirilmiştir). Uzun dalga boyu tarafında, 535 nm'ye kadar dalga boylarına ulaşabiliriz. Bu Cr:LiSAF lazerlerinin bildirilen cw intrakavite ikinci harmonik ayar kenarını 463 nm'den (Demirbas, 2015) 535 nm'ye genişletir: spektrumun cyan ve yeşil bölgelerine 72 nm'lik bir genişleme.

Şekil 2.67 (a)'da, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak tahmin edilen normalleştirilmiş mavi dönüştürme verimliliğini de gösterdiğimizize dikkat çekelim. Tahmin eğrisi, Cr:LiSAF lazerin ölçülen cw ayar özelliklerine dayalıdır ve elde edilebilir ikinci harmonik güç seviyelerinin, temel dalga boyunda mevcut Cr:LiSAF lazer gücünün karesiyle ölçeklendiğini varsayar. Gördüğümüz gibi, genel olarak orada ölçülen cw ikinci harmonik güçleri ile tahmin edilen performans arasında çok iyi bir uyumdur.

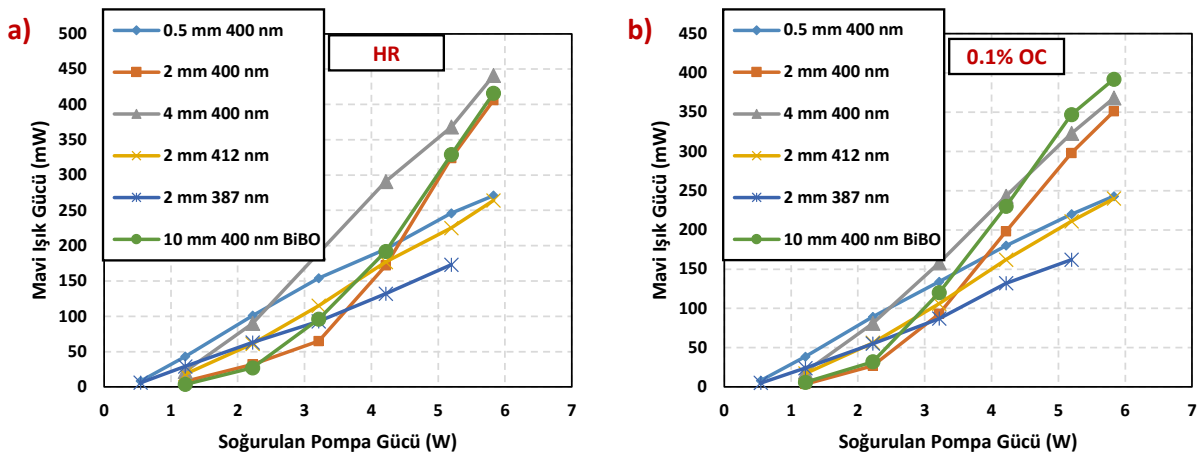
#### 2.10.2 377-424 nm Geniş Aralığında Ayarlanabilir, Frekansı İkiye Katlanmış Cr:LiCAF Lazeri

Cr:LiCAF laser sistemi kullanılarak optik kavite içine yerleştirilmiş bir nonlinear kristal ile dalga boyu 375-425 nm aralığında değiştirilebilen, olabildiğince yüksek optik güce sahip ikincil harmonik elde etmekte. Bu kapsamda, EKSMa optic firmasından farklı uzunluklarda 0.5 mm, 2 mm, 4 mm farklı dalga boylarına sahip BBO (beta barium borate) nonlinear kristaller satın alınmıştır. Satın alınan kristaller, iş paketi birde anlatılan çok-modlu diyotlarla pompalanan sürekli dalga Cr:LiCAF lazer sistemine yerleştirilerek, kavite içi ikincil-harmonik oluşturma deneyleri yapılmıştır. Şekil 2.68 kurulan lazer sisteminin basit bir şematüğünü göstermektedir.



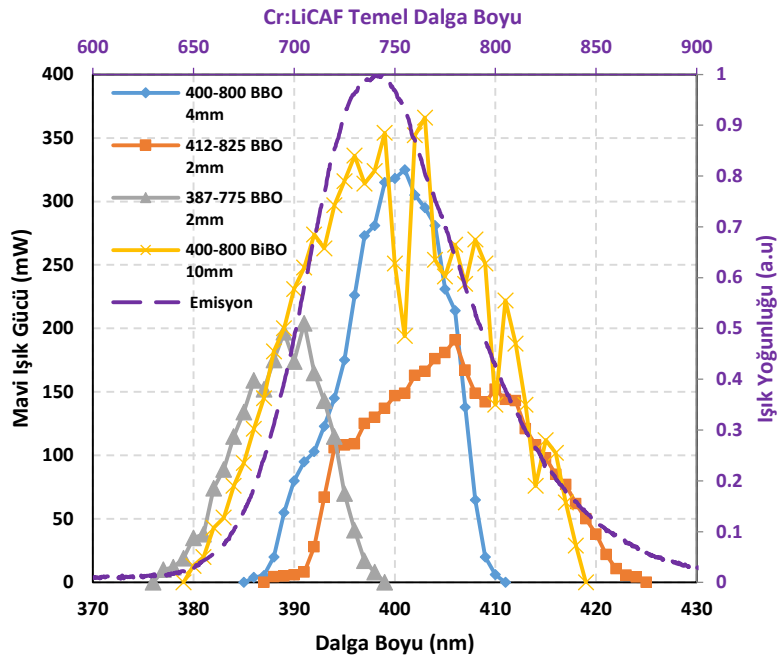
**Şekil 2. 68** Sürekli dalga Cr:LiCAF lazerinden, kavite içinde ikincil harmonik üretmek için kurulan sistemin basit bir şematığı. BBO: beta barium borate.

Ölçümler esnasında merkez dalga bopyunu oluşturmak için 15 mm uzunluğundaki %1.25 krom katkılı Cr:LiCAF kristali kullanılmıştır. İkincil-harmonik deneyleri için kavitedeki yüksek yansıtıcı ayna çıkarıldı ve 100 mm eğrilik yarıçapına sahip, 400 nm civarında geçirgenliği bulunan iki çukur ayna ile kavitede ikinci bir odak noktası oluşturulmuştur. Oluşturulan bu yeni odağa farklı boylardaki BBO kristalleri yerleştirilmiştir. Kaviteden tek bir çıkış olmasını sağlamak amacıyla 200 mm eğrilik yarıçapına sahip M5 aynasından yansıyan ışını geri kavite içine yönlendirmekte kullanılmıştır. Oluşan ikincil-harmonik dalga boyunu kontrol etmek amacıyla, kaviteye filtre (BRF:birefringent filter) eklenmiştir.



**Şekil 2. 69** Farklı dalga boylarında elde edilen ikincil-harmonik gücünün 665 nm deki soğurulan pompa gücüne göre değişimi. (a) Kavite içi gücü arttırmak için yüksek yansıtıcı ayna kullanılırken, (b) %0.1 çıkış aynası kullanılırken.

Şekil 2.69 farklı dalga boylarında kullanılan BBO kristali ile elde edilen ikincil-harmonik güçlerini göstermektedir. İkincil-harmonik üretimi için 400 nm’de 0.5 mm, 2 mm, 4 mm, 412 nm’de 2 mm, 387 nm’de 2 mm kalınlıklarındaki BBO kristaller kullanılarak çıkış güçleri ölçülmüştür. Ölçümler için kavite içi gücü yükseltmek için %0.1 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ve yüksek yansıtıcılı ayna kullanılmıştır. Mavi ışık çıkış güçlerinde %0.1 geçirgenliğe sahip aynadan, yüksek yansıtıcılı aynaya geçilince artış gözlemlenmiştir. Bu artıştaki sebep kavite içi güçlerin aynaların değiştirilmesiyle birlikte artması olarak belirlenmiştir. Proje kapsamında satın alınan kristallere ek olarak ABU-LTL envanterinde bulunan 10 mm uzunluğundaki bismuth borate (BiBO) kristal ile de ölçümler yapılmıştır. En yüksek mavi ışık gücüne 441 mW ile 4 mm uzunluğundaki BBO kristal ile ulaşılmıştır. Literatürdeki verilerle yapılan karşılaştırmada 900 mW’lık (Demirbas, 2015), ikincil harmonik gücüne göre az kalmasını kullandığı kristaller arasındaki pasif kayıpların, kavite içi güçleri etkilemesine, bu sebeple dönüştürülen ışığın veriminin daha az kalmasına bağlayabiliriz.

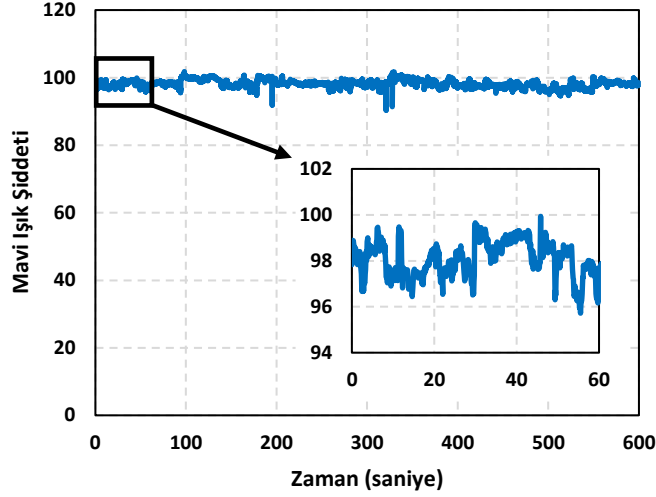


**Şekil 2. 70** Kavite içi ikincil harmonik oluşturma deneylerinde elde edilmiş dalgaboyu değiştirilebilirlik grafiği. İkincil harmonik dalgaboyu 377-424 nm aralığında serbestçe değiştirilebildi.

Şekil 2.70 deneylerde elde edilen kavite içi ikincil harmonik güçlerinin dalgaboyu ile değişimini göstermektedir. Her dalga boyu için BBO kristallerinin pozisyonu ve hizalanması dikkatlice ayarlanmıştır. Üç farklı dalga boyundaki BBO kristalleri kullanılarak dalga boyu 377-424 nm aralığında değiştirilmiştir. Şekil 2.70 de görüleceği gibi bu değişim Cr:LiCAF lazerinin emisyon dalga boyu içerisinde kalmaktadır. Literatürdeki verilerle karşılaştırdığımızda, 375-433 nm (Demirbas vd., 2012) dalga boyundaki değişime göre dar kalmıştır. Bu durum kullanılan



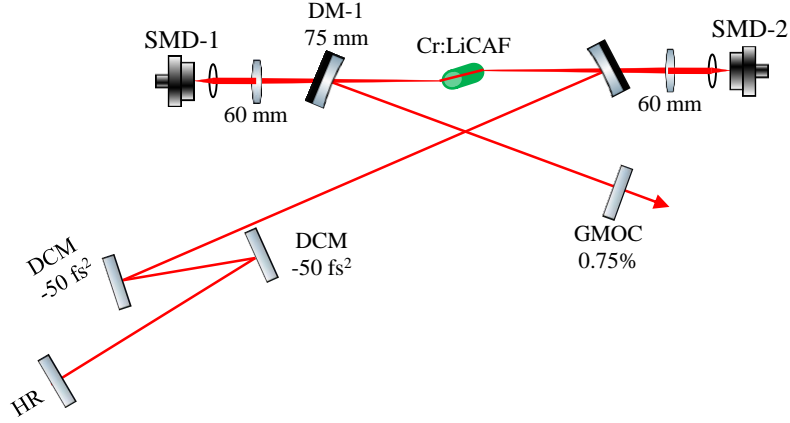
nonlinear kristallerinin yantıcı kaplamalarına göre değişiklik göstermektedir. Şekil 2.70 deki 10 mm BiBO kristalinin geniş bir dalga boyunda değiştirilebilmesi ve diğer kristallerin ona göre daha dar bir dalga boyunda değiştirilmesi buna örnek olarak gösterilebilir. Şekil 2.71 elde edilen mavi ışık gücün zamana bağlı değişimini göstermektedir. Yapılan ölçüm sonucunda sistemdeki gürültünün %2 den az olduğu belirlenmiştir. Buda sistemin kararlı çalıştığını göstermektedir.



Şekil 2. 71 Elde edilen mavi ışık gücünün zamana bağlı değişim grafiği.

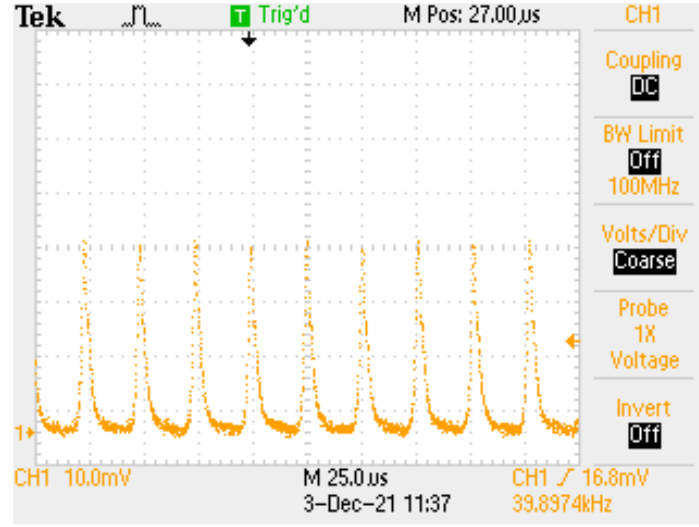
## 2.11 KLM araştırma ve geliştirme faaliyetleri

Kerr Lens Modulasyonu (KLM) yöntemi kullanılarak sürekli dalga kilitli modda Cr:LiCAF lazerler üretilmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bunun için iki adet 210 mW gücünde tek-modlu diyot ile pompalanan 2.5 mm %11 doped Cr:LiCAF lazer kristali kullanılmıştır. Lazer kristalinin oluşturduğu kromatik dağılımı kontrol etmek için kaviteye iki adet DCM (double chirped mirror) eklenmiştir. Ayrıca normal geçirgenliğe sahip çıkış aynası yerine GMOC (gain-matched output coupler) kazanç uyumlu çıkış aynası kullanılmıştır. Şekil 2.72 kurulan sistemin basit şematini göstermektedir.



**Şekil 2. 72** Kerr Lens Modulasyonu (KLM) yöntemi kullanılarak sürekli-dalga kip-kilitli Cr:LiCAF çalışması için kurulan lazer sistemi

GMOC aynalarında, çıkış aynası geçirgenliği kazancın yüksek olduğu dalga boylarında yüksek, kazancın düşük olduğu dalga boylarında düşük tutulur. Bu sayede net kavite kazancının, kazanç bandı içindeki tüm dalga boylarında kabaca eşitlenmesi sağlanır ve bu da kazanç filtreleme etkisini minimize ederek, lazerin verimli ve stabil şekilde KLM rejiminde çalışmasına katkı sağlar. Yapılan çalışmalar sırasında, lazer sistemindeki kol boylarının uzunlukları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Ayrıca kavite içerisindeki odak aynaları olan DM-1 ve DM-2 doğru odaklanmanın oluşması için farklı uzaklıklarda hareket ettirilmiştir. Ek olarak, GMOC ayna yatay ekseninde hareket eden bir X-stage e konulmuş ve denemeler yapılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda lazer çıkışının net bir şekilde Q-anahtarla modunda çalıştığı fakat sürekli dalga kip-kilitli moda geçiş yapmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 2.73'de elde edilmiş Q-anahtarlama rejiminde lazer çıkışının osiloskop ile ölçülmüş profili verilmiştir. 39.8 kHz tekrarlama frekansında darbeler elde edilmiştir.



**Şekil 2. 73** Kerr Lens Modülasyonu (KLM) yöntemi kullanılarak Cr:LiCAF lazerinden elde edilmiş darbelerin osiloskop ile ölçülmüş profili.

## 2.12 Gereç ve Yöntem İçin Kaynaklar

- Demirbas, U. (2017). Off-surface optic axis birefringent filters for smooth tuning of broadband lasers. *Applied optics*, 56(28), 7815-7825.
- Kobtsev, S., & Svetsitskaya, N. (1992). Application of birefringent filters in continuous-wave tunable lasers: a review. *Opt. Spektrosk*, 73, 196-212.
- Caird, J. A., Payne, S. A., Staver, P. R., Ramponi, A. J., & Chase, L. L. (1988). Quantum electronic properties of the Na<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>Li<sub>3</sub>F<sub>12</sub>: Cr<sup>3+</sup> laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 1077-1099.
- Demirbas, U., Uecker, R., Klimm, D., & Wang, J. (2012). Low-cost, broadly tunable (375–433 nm & 746–887 nm) Cr: LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode. *Applied Optics*, 51(35), 8440-8448.
- Demirbas, U., Uecker, R., Fujimoto, J. G., & Leitenstorfer, A. (2017). Multicolor lasers using birefringent filters: experimental demonstration with Cr: Nd: GSGG and Cr: LiSAF. *Optics express*, 25(3), 2594-2607.
- Eichenholz J.M., (1998). Generation of high powers from diode pumped Cr<sup>3+</sup> doped colquirrites, Retrospective Theses and Dissertations, University of Central Florida, Optical Science and Engineering, Florida,.
- Sennaroglu, A. (2002). Broadly tunable Cr<sup>4+</sup>-doped solid-state lasers in the near infrared and visible. *Progress in Quantum Electronics*, 26(6), 287-352.

- Okida, M., Itoh, M., Yatagai, T., Ogilvy, H., Piper, J., & Omatsu, T. (2005). Heat generation in Nd doped vanadate crystals with 1.34  $\mu\text{m}$  laser action. *Optics express*, 13(13), 4909-4915.
- Yerebakan, T., Demirbas, U., Eggert, S., Bertram, R., Reiche, P., & Leitenstorfer, A. (2017). Red-diode-pumped Cr: Nd: GSGG laser: two-color mode-locked operation. *JOSA B*, 34(5), 1023-1032.
- Endo, M. (2007). Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers. *Optics Express*, 15(9), 5482-5493.
- Chen, Y., Sun, D., Peng, F., Zhang, Q., Liu, W., Gao, J., ... & Zheng, L. (2017). Growth and spectroscopic investigations of the 1.5 at.% Er: GSGG laser crystal. *Materials Research Express*, 4(9), 096202.
- Ma, Z., Li, D., Gao, J., Wu, N., & Du, K. (2007). Thermal effects of the diode end-pumped Nd: YVO4 slab. *Optics communications*, 275(1), 179-185.
- Shen, Y., Gong, M., Ji, E., Fu, X., & Sun, L. (2017). Spatial dynamic thermal iteration model for 888 nm end-pumped Nd: YVO4 solid-state laser oscillators and amplifiers. *Optics Communications*, 383, 430-440.
- Holman, J. P. (2009). *Heat transfer*. McGraw Hill Higher Education.
- Castro, W. (2008). *Elemental analysis of biological matrices by laser ablation high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-HR-ICP-MS) and high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICP-MS)* (Doctoral dissertation, Florida International University).
- Cengel, Y. A. (1997). *Introduction to thermodynamics and heat transfer* (Vol. 846). New York: McGraw-Hill.
- Demirbas, U. (2019). Cr: Colquiriite Lasers: Current status and challenges for further progress. *Progress in quantum electronics*, 68, 100227.
- Demirbas, U. (2018). Power scaling potential of continuous-wave Cr: LiSAF and Cr: LiCAF lasers in thin-disk geometry. *Applied Optics*, 57(35), 10207-10217.
- Demirbas, U., Cankaya, H., Pergament, M., & Kärtner, F. X. (2020). Power and energy scaling of rod-type cryogenic Yb: YLF regenerative amplifiers. *JOSA B*, 37(6), 1865-1877.
- X. Fu, K. H. Hong, L. J. Chen, and F. X. Kartner, "Performance scaling of high-power picosecond cryogenically cooled rod-type Yb:YAG multipass amplification," *J Opt Soc Am B* 30, 2798-2809 (2013).
- Stalder, M., Bass, M., & Chai, B. H. (1992). Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals. *JOSA B*, 9(12), 2271-2273.
- Demirbas, U., Baali, I., Acar, D. A. E., & Leitenstorfer, A. (2015). Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr: LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet. *Optics Express*, 23(7), 8901-8909.

- U. Demirbas. 2019. "Cr:Colquiriite Lasers: Current status and challenges for further progress," *Prog. Quantum Electron.* 68, 100227.
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. J. Atherton, J. A. Caird, W. L. Kway, M. D. Shinn, R. S. Hughes, and L. K. Smith. 1990. "Properties and performance of the LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser material," *Solid State Lasers* 1223, 84.
- W. R. Rapoport and M. L. Shand. 1992. "Excited state absorption and upconversion in Cr:LiSrAlF<sub>6</sub>," *Solid State Commun.* 84(1–2), 29–31.
- J. M. Eichenholz and M. Richardson. 1998. "Measurement of thermal lensing in Cr<sup>3+</sup>-doped colquiriites," *IEEE J. Quantum Electron.* 34(5), 910–919.
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," *J. Opt. Soc. Am. B* 9(12), 2271.
- F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, and A. Brun. 1997. "Performances of Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> and Cr:LiSrGaF<sub>6</sub> for continuous-wave diode-pumped Q-switched operation," *Opt. Lett.* 22(6), 387 (1997).
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, and B. H. T. Chai. 1990a. "Flashlamp-pumped laser performance of LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>," *Opt. Quantum Electron.* 22(1), S259–S268
- S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, and W. F. Krupke. 1988. "LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>: a promising new solid-state laser material," *IEEE J. Quantum Electron.* 24(11), 2243–2252.
- U. Demirbas, R. Uecker, D. Klimm, and J. Wang. 2012. "Low-cost, broadly tunable (375–433 nm & 746–887 nm) Cr:LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode," *Appl. Opt.* 51(35), 8440.
- S. A. Payne, L. L. Chase, and G. D. Wilke. 1989. "Optical spectroscopy of the new laser materials, LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> and LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>," *J. Lumin.* 44(3), 167–176.
- R. Gvishi, E. Gonen, Y. Kalisky, and S. Rotman. 1999. "Studies of the spectroscopic behavior of Cr<sup>3+</sup>:LiCAF pumped by a solid-state dye laser," *Opt. Mater.* 13(1), 129-133.
- J. M. Eichenholz and M. Richardson. 1998. "Measurement of thermal lensing in Cr<sup>3+</sup>-doped colquiriites," *IEEE J. Quantum Electron.* 34(5), 910–919.
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," *J. Opt. Soc. Am. B* 9(12), 2271.
- D. C. Brown, S. Tornegard, J. Kolis, C. McMillen, C. Moore, L. Sanjeeva, C. Hancock, S. Tornegård, J. Kolis, C. McMillen, C. Moore, L. Sanjeeva, and C. Hancock. 2016. "The application of cryogenic laser physics to the development of high average power ultra-short pulse lasers," *Appl. Sci.* 6(1), 23.
- K. Du, D. Li, H. Zhang, P. Shi, X. Wei, R. Diart, 2003. "Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width." *Opt. Lett.* 28, 87–89.

- J.J. Degnan. 1995. "Optimization of passively Q-switched lasers.", *IEEE J. Quantum Electron.* 31, 1890–1901.
- A.V. Podlipensky, V.G. Shcherbitsky, N.V. Kuleshov, V.P. Mikhailov, V.I. Levchenko, V.N. Yakimovich. 1999. "Cr<sup>2+</sup>:ZnSe and Co<sup>2+</sup>:ZnSe saturable-absorber Q switches for 1.54-um Er:glass lasers." *Opt. Lett.* 24, 960–962.
- S. Tsuda, W.H. Knox, S.T. Cundiff, W.Y. Jan, J.E. Cunningham. 1996. "Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors", *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 454–464 (1996)
- Sennaroglu. 2002. "Broadly tunable Cr<sup>4+</sup>-doped solid-state lasers in the near infrared and visible. *Prog. Quantum Electron.*" 26, 287–352 (2002)
- U. Demirbas, A. Sennaroglu, F.X. Kartner, J.G. Fujimoto. 2009. "Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr<sup>3+</sup>:LiCAF lasers." *J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys.* 26, 64–79.
- J.K. Jabczyński, W. Zendzian, Z. Mierczyk, Z. Frukacz. 2001. "Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal." *Appl. Opt.* 40, 6638–6645.
- Y.-K. Kuo, M.-F. Huang, M. Birnbaum. 1995. "Tunable Cr<sup>4+</sup>:YSO Q-switched Cr:LiCAF laser", *IEEE J. Quantum Electron.* 31, 657–663.
- P. Pichon, A. Barbet, J.P. Blanchot, F. Druon, F. Balembos, P. Georges. 2017. "LED-pumped alexandrite laser oscillator and amplifier." *Opt. Lett.* 42, 4191–4194.
- K.J. Keller, F.X. Weingarten, D. Kärtner, B. Kopf, I.D. Braun, R. Jung, C. Fluck, N. Hönninger, J.A.A. Matuschek. 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers." *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 435–453.
- U. Demirbas. 2018. "Power scaling potential of continuous-wave Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers in thin-disk geometry," *Appl. Opt.* 57, 10207–10217
- U. Demirbas, D.A.E. Acar. 2016. "Continuous-wave, quasi-continuous-wave, gainswitched, and femtosecond burst-mode operation of multi-mode diode-pumped Cr:LiSAF lasers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 33, 2105–2113.
- S. Tsuda, W.H. Knox, S.T. Cundiff, W.Y. Jan, J.E. Cunningham. 1996. "Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors," *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 454–464
- U. Keller, K.J. Weingarten, F.X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I.D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, J.A. der Au. 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 435–453.

- U. Demirbas, G.S. Petrich, D. Li, A. Sennaroglu, L.A. Kolodziejski, F.X. Kärtner, J.G. Fujimoto. 2011. "Femtosecond tuning of Cr:Colquiriite lasers with AlGaAs-based saturable Bragg reflectors," *J. Opt. Soc. Amer. B* 28 986–993.
- U. Demirbas. 2017. "Off-surface optic axis birefringent filters for smooth tuning of broadband lasers," *Appl. Opt.* 56 7815–7825
- G.J. Spuhler, R. Paschotta, R. Fluck, B. Braun, M. Moser, G. Zhang, E. Gini, U. Keller. 1999. "Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 16 376–388
- F. Pirzio, J.R. Negri, S. Pizzurro, E. Piccinini, A. Agnesi. 2020. "Assessment of broad usability of a simple analytic model for passively Q-switched lasers with Cr:YAG saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 37 1659–1663.
- B. Braun, F.X. Kartner, G. Zhang, M. Moser, U. Keller, 1997, "56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser," *Opt. Lett.* 22 381–383.
- J.J. Zayhowski, C. Dill III. 1994. "Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers," *Opt. Lett.* 19 1427–1429.
- B. Braun, F.X. Kartner, U. Keller, J.-P. Meyn, G. Huber. 1996. "Passively Q –switched 180-ps Nd:LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> microchip laser," *Opt. Lett.* 21 405–407.
- E. Beyatli, F. Kaya, H. Bilici. 2020. "Self-Q-switched and multicolor operation of a Tm: LuAG laser," *Appl. Opt.* 59 () 8247–8252.
- E. Beyatli, A. Sennaroglu, U. Demirbas. 2013. "Self-Q-switched Cr:LiCAF laser," *J. Opt. Soc. Amer. B* 30 914–921
- J.K. Jabczynski, W. Zendzian, J. Kwiatkowski. 2005. "Q-switched mode locking in diode pumped lasers," *Opto-Electron. Rev.* 13 317–323.
- J. K. Jabczynski, W. Zendzian, and J. Kwiatkowski, "Q-switched mode-locking with acousto-optic modulator in a diode pumped Nd : YVO<sub>4</sub> laser," *Opt. Express* 14, 2184-2190 (2006).
- M.J. Colles, C.R. Pidgeon. 1975. "Tunable lasers." *Reports Prog. Phys.* 38(3), 329–460
- B. Agate, A.J. Kemp, C.T.A. Brown, W. Sibbett. 2002. "Efficient, high repetition-rate femtosecond blue source using a compact Cr :LiSAF laser." *Opt. Express* 10(16), 824–831.
- B. Agate, E.U. Rafailov, W. Sibbett, S.M. Saltiel, P. Battle, T. Fry, E. Noonan, 2003. "Highly efficient blue-light generation from a compact, diode-pumped femtosecond laser by use of a periodically poled KTP waveguide crystal." *Opt. Lett.* 28(20), 1963–1965
- R. Scheps, J.F. Myers, H.B. Serreze, A. Rosenberg, R.C. Morris, M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser." *Opt. Lett.* 16(11), 820–822

- U. Demirbas, S. Eggert, and A. Leitenstorfer, "Compact and efficient Cr:LiSAF lasers pumped by one single-spatial-mode diode: A minimal cost approach," *J. Opt. Soc. Am. B Opt. Phys* 29(8), 1894–1903 (2012)
- M. F. Mekteplioglu, Y. Ozturk, F. X. Kärtner, and U. Demirbas. 2021. "Tunable Q-switched mode-locked Cr:LiSAF laser," *Opt. Commun.* 488, 126836
- U. Demirbas, I. Baali. 2015. "Power and efficiency scaling of diode pumped Cr:LiSAF lasers: 770–1110 nm tuning range and frequency doubling to 387–463 nm," *Opt. Lett.* 40(20), 4615–4618.
- U. Demirbas, 2019. "Cr: Colquiriite lasers: current status and challenges for further progress." *Prog Quantum Electron* 68, 100227.
- U. Demirbas, F.X. Kärtner, M. Pergament. 2022. "Cavity-dumped nanosecond Cr:LiSAF laser in the 985–1030 nm region for versatile seeding of Yb-based amplifiers." *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 128(2), 1–13.
- F. J. Duarte, *Tunable Lasers Handbook* (Academic Press, 1995).
- U. Demirbas, J. Thesinga, M. Kellert, S. Reuter, B. Sumpf, M. Pergament, F.X. Kärtner. 2021. "Mode-locked Cr:LiSAF laser far of the gain peak: tunable sub-200-fs pulses near 1  $\mu\text{m}$ ." *Appl. Opt* 60(29), 9054–9061
- R. Paschotta, R.P.P.C. GmbH, *Encyclopedia of Laser Physics and Technology* (RP Photonics Consulting, Zürich, 2005)
- D.N. Nikogosyan, 1991. "Beta barium borate (BBO)." *Appl. Phys. A* 52(6), 359–368.
- F. Falcoz, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, D. Rytz. 1995. "All-solidstate continuous-wave tunable blue-light source by intracavity doubling of a diode-pumped Cr:LiSAF laser." *Opt. Lett.* 20(11), 1274–1276.
- P. Laperle, K.J. Snell, A. Chandonnet, P. Galarnau. 1997. "Tunable diode-pumped and frequency-doubled Cr:LiSAF lasers." *Appl. Opt.* 36(21), 5053–5057
- U. Demirbas, I. Baali. 2015. "Power and efficiency scaling of diode pumped Cr:LiSAF lasers: 770–1110 nm tuning range and frequency doubling to 387–463 nm," *Opt. Lett.* 40(20), 4615–4618
- L.S. Cruz, F.C. Cruz, 2007. "External power-enhancement cavity versus intracavity frequency doubling of Ti : sapphire lasers using BIBO." *Opt. Express* 15(19), 11913–11921.
- M. Thorhauge, J.L. Mortensen, P. Tidemand-Lichtenberg, P. Buchhave. 2006. "Tunable intracavity SHG of CW Ti: Sapphire lasers around 785 nm and 810 nm in BiBO-crystals." *Opt. Express* 14(6), 2283–2288
- M. A. Noginov, M. Vondrova, and B. D. Lucas, "Thermally induced optical bistability in Cr-doped colquiriite crystals," *Phys. Rev. B* 65(3), 035112 (2002).



- U. Demirbas, R. Uecker, D. Klimm, J. Wang. 2012. "Low-cost, broadly tunable (375–433 nm & 746–887 nm) Cr:LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode." *Appl. Opt.* 51(35), 8440
- U. Demirbas, I. Baali, D. A. E. Acar, A. Leitenstorfer. 2015. "Diodepumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet," *Opt. Express* 23(7), 8901–8909
- H. Maestre, A. J. Torregrosa, J. Capmany, 2015. "Tunable blue-violet Cr<sup>3+</sup>:LiCAF + BiBO compact laser," *Laser Phys.* 25(3), 035401.
- Okuyucu, S., Ozturk, Y. & Demirbas. 2021. "U. Passively Q-switched Cr:LiCAF laser with a saturable Bragg reflector." *Appl. Phys. B* 127, 54.
- Y. Ozturk, M. Kilinc, Z. Erturk, H. Buzcu " Termal analiz ve iyileştirilmiş tutucu tasarımı ile 1.5 W lazer diyot çift-uç pompalı levha geometrisine sahip Cr:Nd:GSGG lazer sistemi ", accepted for press in *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*.
- I. P. Bilinsky. 1999. "Novel saturable absorber materials and devices for laser modelocking," Massachusetts Institute of Technology.
- R. Gvishi, E. Gonen, Y. Kalisky, and S. Rotman, "Studies of the spectroscopic behavior of Cr<sup>3+</sup>:LiCAF pumped by a solid-state dye laser," *Opt. Mater.* 1, 1 (1999).
- S. Kuze, D. Du Boulay, N. Ishizawa, N. Kodama, M. Yamaga, and B. Henderson, "Structures of LiCaAlF<sub>6</sub> and LiSrAlF<sub>6</sub> at 120 and 300 K by synchrotron X-ray single-crystal diffraction," *J. Solid State Chem.* 177(10), 3505–3513 (2004).

### 3 BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu iş paketinin hedefleri dahilinde ulaşılmaması hedeflenen yüksek güç çıkışlı Cr:LiCAF lazer sistemlerinin kurulmasında düşük kayıplı kavite komponentlerinin kullanımının yanısıra, ilgili kavitede kazanç ortamı olarak kullanılan Cr:LiCAF kristalinin sahip olduğu fiziksel ve performansını belirleyen karakteristik özellikleri (Cr katkılama oranı, pasif kayıplar, yüzey kalitesi vb.) bu hedeflere ulaşmada büyük önem taşımaktadır. Bu kapsamda proje önerisinde de detaylı olarak gerekçelendirildiği üzere düşük iyon katkılı (~%1.5) farklı uzunlukta Cr:LiCAF kristal örnekleri ikinci sefer sipariş edilmiş olup bunlardan 10 mm, 12.5 mm, 15 mm(2), 20 mm uzunluğunda brewster kesimli Cr:LiCAF kristal örnekleri tarafımıza teslim edilmiştir. Teslim alınan kristal örneklerine ait ön performans testleri ABU-LTL laboratuvarında gerçekleştirilmiş olup, ilgili testler neticesinde üretici tarafından teslim edilen Cr:LiCAF kristallerinin krom katkı oranlarının yine talep edilen seviyede olmamasına rağmen ilk partideki kristallerden daha iyi (~%1.25) bir oranda olduğu anlaşılmıştır. Ayrıca, kurulan lazer sisteminin %49 sürekli dalga verim eğimine ulaşması proje kapsamındaki hedefimize ulaşmamızı sağlamıştır. Öte yandan, sistemde kullanılacak olan diyotlardaki problem neticesinde, ABU-LTL envanterindeki lazer diyotların kullanılması sonucunda, hedeflenen 3 W çıkış gücüne ulaşamamıştır. Fakat, %49 verim eğrisi ve %33 optik-optik dönüşümü bize daha güçlü diyotlarla, daha yüksek güçlere çıkılabileceğine dair işaretler vermiştir.

Cr:LiCAF kristalinin spektroskopik özelliklerinin (Flöresan ömrü ve ECS) sıcaklıkla değişimlerinin incelenmesi sonucunda, düşük sıcaklık aralığında, Cr:LiCAF için ölçülen ömür monoton bir şekilde 78 K'de 193  $\mu$ s'den 300 K'de 170  $\mu$ s'ye ve daha sonra 400 K'de 164  $\mu$ s'ye düştüğü ölçülmüştür. Cr:LiCAF'ın ışınımsal ömründe benzer bir eğilim Payne ve diğerleri tarafından literatürde rapor edilmiştir: floresan ömrü 20 K'de yaklaşık 200  $\mu$ s'den 300 K'da 175  $\mu$ s'ye düşmüştür (Givishi vd., 1999). Düşük sıcaklıklarda ölçülen flöresan ömründeki hafif artışın, oda sıcaklığında osilatörün gücüne ek küçük bir vibronik katkı nedeniyle olduğu rapor edilmiştir (ışınımsal olmayan bozunma olmaksızın merkez simetrik bir ortam altında tipik davranış (Kuze, 2004)) .

Ek olarak, Tablo 2.4'de verilen ampirik uyum parametreleri, Cr:LiCAF kristalindeki ışınım ömrünün sıcaklığa bağımlılığı için bir tahmin elde etmek için kullanılmıştır. Bu şekilde, ışınım ömrü  $\tau_R(T)$ 'nin daha yüksek sıcaklıklara ekstrapolasyonu için uygun bir ifade elde edilerek, ECS hesabının literatüre kıyasla daha kesin bir biçimde ölçülmesi sağlanmıştır.

Floresans ömürlerinin oda sıcaklığının üzerindeki değişimi (bkz. Şekil 4), Cr:LiCAF'ın termal söndürmeye karşı direnç açısından üstün olduğunu göstermektedir. Bu, ampirik uyum

parametreleriyle bağlantılıdır: Tablo 2.4'de gösterilen  $\Delta E$  ve  $\tau_{NR0}$ . Cr:LiCaF için termal söndürme  $\Delta E$  için aktivasyon enerjisinin  $8235 \text{ cm}^{-1}$  olduğu hesaplanmıştır. Bu da Cr:LiSAF ( $4207 \text{ cm}^{-1}$ ) ve Cr:LiSGaF ( $4325 \text{ cm}^{-1}$ ) için rapor edilen değerlerden oldukça yüksektir. Daha yüksek aktivasyon enerjisi nedeniyle, Cr:LiCAF'ta floresan ömrünün termal söndürülmesi, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF'a kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda başlar. Bunu ölçmenin başka bir yolu, termal söndürme için kritik  $T_{1/2}$  sıcaklığı karşılaştırmaktır. Bu sıcaklık, ışınımlı ve ışınımsız geçiş hızının birbirine eşit olduğu sıcaklık (veya floresan ömrünün ışınım ömür değerinin yarısına düştüğü sıcaklık) olarak tanımlanır. Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için  $T_{1/2}$ 'yi sırasıyla 565 K (292 °C), 350 K (77 °C) ve 365 K (92 °C) olarak rapor edilmiştir. Uyum parametreleri,  $\tau_{R0}$ ,  $\tau_{NR0}$ ,  $\Delta E$  ve  $T_{(1/2)}$ , literatürle oldukça iyi bir uyum içindedir (önceki çalışmaların, uyum parametrelerinde bir miktar farklılıkla sonuçlanan sabit bir ışınım ömrü varsaydığını unutmayın). Sıcaklığa bağlı ECS karakterizasyonu deneylerinde ise, kriyojenik sıcaklıklara soğutulmuş, E||c polarizasyonundaki tepe ECS değerinin Cr:LiCAF'ta ~1.2 kat arttığı gözlemlenmiştir. 78 K'da emisyon bant genişliği (FWHM) Cr:LiCAF'ta 100 nm ölçülmüştür (oda sıcaklık karşılığına kıyasla Cr:LiCAF'ta 1.25 kat daralır). Kriyojenik sıcaklıklardaki bu bant genişliği, 50 fs altı seviye darbelerinin üretilmesi/güçlendirilmesi için oldukça yeterlidir.

Bu proje çalışması içerisinde, bildiğimiz kadarıyla, doyurulabilir Bragg reflektörleri (SBR'ler) ile Cr:LiCAF'ın ilk pasif Q-anahtarlama deneyleri rapor edilmiştir. Pasif Q-anahtarlama için SBR'lerin kullanımı, modülasyon derinliği, doyumluk akışı ve iyileşme süresi gibi SBR özelliklerini dikkatlice optimize ederek potansiyel olarak Q-anahtarlı lazerin temel davranışsal özelliklerinin kontrolünü sağlanabilmektedir. Cr:Colquiriitler arasında, üstün termomekanik mukavemeti ve uzun üst durum floresans ömrü nedeniyle Cr:LiCAF kristali kullanılmıştır. Cr:LiCAF lazeri, toplam 3.6 W pompa gücü sağlayan iki adet düşük maliyetli 665 nm geniş alanlı lazer diyot tarafından pompalanır. Q-anahtarlama operasyonu, farklı modülasyon derinliklerine sahip iki farklı AlGaAs tabanlı SBR'nin kullanılmasıyla başlatıldı ve sürdürülmüş olup, farklı çıkış koplörleri seviyelerinde lazer performansı araştırılmıştır. Q-anahtarlı çalışmada lazer, ortalama 127 mW güçle 800 nm yakınında  $1.62 \mu\text{s}$ 'ye kadar darbeler üretmiştir. Darbelerin tekrarlama frekansı 18 ve 40 kHz arasında değişiyorken,  $3.5 \mu\text{J}$ 'ye kadar darbe enerjileri ve 800 nm civarında  $1.9 \text{ W}$ 'a kadar tepe güçleri kavite çıkışında ölçülmüştür.

Süreklî-dalga operasyonun için kıyaslama yapıldığında, 3.5 W emilen pompa gücünde 468 mW'a kadar çıkış güçlerinin elde edildiği durumlarda %0.7 OC'nin en iyi sonuçları sağladığı görülmektedir. Emilen pompa gücüne göre karşılık gelen kalıcı eşik ve eğim verimliliği 390 mW

ve %14.8 olarak ölçülmüştür. Laser eşiği, %0.35 OC ile en düşük (190 mW) olarak ölçülmüş ve artan çıkış kuplajı seviyeleri için arttığı (%2.74 OC için 1090 mW'a kadar) gözlemlenmiştir. Mevcut çalışmanın ölçülen eğim verimlilikleri (maksimum %14.8), Cr:LiCAF lazerin (Ti:Safir pompalama yoluyla elde edilen) içsel verimliliği olan ~%60 değerinden önemli ölçüde daha düşüktür. Bunun bir kısmı, çok modlu pompa ışınına mod eşleştirmenin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Öte yandan, benzer MMD diyot pompalı sistemlerde %32 ve %49 cw eğim verimliliği, sırasıyla, yaklaşık %0.1 ve ~%0.3 pasif kayba sahip, %5 ile %10 Cr katkılı LiCAF numunesi kullanılırken rapor edilmiştir. Çalışmamızdaki nispeten yüksek oranda (%7) Cr doyurulmuş LiCAF numunesinde daha önceki güç ölçeklendirme çalışmalarından kaynaklanan dahili bir çatlak vardı ve bunun eldeki numunenin pasif kayıplarını yaklaşık %0.6'ya çıkardığına inanıyoruz. Ne yazık ki, bu çalışma sırasında başka bir örnek mevcut değildi; ancak, bu ilk çalışmada Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerin potansiyelini anlamaya odaklandığımız için, bu durum ilgili bölümde sunulan sonuçları önemli ölçüde değiştirmez (daha fazla ölçeklenebilen elde edilebilir ortalama güç seviyeleri hariç)

Projeye ait bir başka iş bölümünde, bir Cr:LiSAF lazerde stabil pasif Q-anahtarlı mod kilitli (QML) operasyon elde edilmiştir. Deneylerde 10 mm uzunluğunda, %1.5 Cr katkılı LiSAF kristali iki adet 150 mW'lık tek modlu diyot ile 660 nm'de pompalanmıştır. QML operasyonunu başlatmak ve sürdürmek için merkezi dalga boyu 850 nm ve modülasyon derinliği %0.8 olan bir AlGaAs bazlı doyurulabilir Bragg reflektörü (SBR) kullanılmıştır. QML lazeri kendi kendine çalışmaya başlamış ve çevresel dalgalanmalara karşı dayanıklı olduğu gözlemlenmiştir. QML işleminde sistem, 30–70 kHz tekrarlı frekansına sahip 2–2.5  $\mu$ s uzunluğunda Q-anahtarlı zarflar içinde 150–200 MHz'de 5 ps'nin altında uzun mod kilitli darbeler üretmiştir. Mod kilitlemenin modülasyon derinliği %50 civarındadır. Ayrıca, Q-anahtarlı zarf içinde ve ayrıca Q-anahtarlı darbeden darbeye mod-kilitli darbe parametrelerinin varyasyonu gözlemlenmiştir. Yaklaşık 280 mW'lık bir emilen pompa gücü seviyesinde, QML darbeleri ortalama 50 mW güce sahipken, mod kilitli darbelerin tahmini tepe gücü yaklaşık 0.5 kW olarak hesaplanmıştır. Bir kavite içi çift kırılmalı ayar plakasının (BRF) basit dönüşü, darbelerin merkezi dalga boyunun 835 ve 865 nm arasında ayarlanmasını sağlamıştır. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, Cr:LiSAF lazerlerde QML işleme odaklanan ilk çalışmadır. Bu ilk çalışmadaki bulgular, Cr:LiSAF'ta QML işleminin dinamiklerini anlamaya yönelik bir ilk girişimdir. Daha fazla çalışma, mod kilitli darbe genişliklerini 1-ps seviyesinin altına düşürmeye ve ayrıca daha fazla tepe güç ölçeklendirmesi için mod kilitlemenin modülasyon derinliğini artırmaya odaklanacaktır.

Cr:LiSAF kristalinin kullanıldığı bir başka iş bölümünde, yakın kızılötesi ve görünürde ultra geniş ayarlanabilirliğe sahip, düşük maliyetli ve kompakt bir Cr:LiSAF lazer sistemi sunmaktayız. Sistem iki adet son teknoloji ürünü 210 mW tek modlu kırmızı diyotla pompalanır ve sürekli dalga (cw) lazer deneylerinde 190 mW'a kadar çıkış gücü, 795–1103 nm ayar aralığı ve %54'lük bir eğim verimliliği elde edilir. Beta-baryum borat (BBO) kristalleri ile kavite içi frekansı ikiye katlama yoluyla, mordan yeşile (402 535 nm) spektral bölgeleri sürekli olarak kapsayan cw ikinci harmonik ayarlama aralığı gösterilmiştir. Basit pompa sistemine rağmen, 422.5 nm'de 17.5 mW'a kadar cw frekansı ikiye katlanmış güç seviyelerine ulaşılabilir, bu da %4.2'lik bir optik-optik dönüşüm verimliliğine ve %1.4'lük bir elektrik-optik dönüşüm verimliliğine karşılık gelir. Bu kompakt, düşük maliyetli ve basit Cr:LiSAF lazer sisteminin spektroskopi, atom soğutma/tutma ve kuantum optiği dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için çekici bir kaynak olabileceğine inanıyoruz.

## 4 SONUÇ VE ÖNERİLER

78-618 K aralığında Cr:LiCAF, kristali için floresan ömrünün ve polarize emisyon gücünün sıcaklığa bağlılığı araştırılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, bu çalışma Cr:Colquiriites için ilk detaylı deneysel kriyojenik spektroskopi verilerini sunmaktadır.

Cr:LiCAF'da kriyojenik sıcaklıklarda ECS'deki gelişme orta düzeydedir (1.2 ila 1.4 kat). Öte yandan, kriyojenik operasyonda, ışınımsal olmayan geçişlerin önemli hale geldiği sıcaklıklardan daha uzaktır, bu da oda sıcaklığındaki sistemlere kıyasla en az 2-3 kat daha yüksek pompa güçlerinin uygulanmasına olanak sağlayabilir. Ayrıca, kriyojenik sıcaklıklara soğutulmuş malzemelerin termal iletkenliğinde birkaç kat iyileşme beklenmektedir. Bu nedenle, Yb bazlı malzemelerde olduğu gibi, kriyojenik olarak soğutulmuş Cr:Colquiriite lazer/amplifikatör sistemlerinde elde edilebilir çıkış güçlerinde önemli derecede iyileştirmelerin mümkün olduğuna inanıyoruz. Yalnızca spektroskopik yönlere odaklanan bu kısım, Cr:LiCAF lazerlerin kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak için ilk adımdır. Kriyojenik Cr:Colquiriite lazerlerin doğru modellenmesi için termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, kırılma indeksi vb. gibi termo-mekanik ve termo-optik parametrelerin sıcaklığa bağımlılığını anlamak için daha fazla çalışma gereklidir.

Projenin bir diğer iş bölümünde, literatürde ilk kez AlGaAs tabanlı SBR'ler kullanan bir diyot pompalı Cr:LiCAF lazerin pasif Q-anahtarlı çalışması araştırılmıştır. Cw lazer deneylerinde, yaklaşık %15'lik bir eğim verimliliği ile yaklaşık 0.5 W çıkış gücüne ulaşılmıştır. Q-anahtarlı çalışmada, lazer yaklaşık 125 mW ortalama güçle 800 nm yakınında 1.62  $\mu$  s'ye kadar darbeler üretir. Tekrarlama frekansı 18 ve 40 kHz arasında değişirken, 3.5  $\mu$  J'ye kadar darbe enerjileri ve 800 nm civarında 1.9 W'a kadar tepe güçleri ile elde edilmiştir. Açıkçası, V:YAG, Cr:YSO ve Cr:YAG ile daha önceki pasif Q-anahtarlama deneylerine kıyasla, SBR Q-anahtarlama ile elde edilen darbe genişlikleri oldukça uzundur. Kısmen uzun darbe genişlikleri ve kısmen de eldeki SBR'nin nispeten yüksek kayıpları nedeniyle, sistemin tepe güç ölçeklendirmesi de cw çalışmasına kıyasla yalnızca üç-dört kat daha fazladır. Gelecekteki çalışmalarda, SBR Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerinden daha kısa atma genişliklerinin, azaltılmış kavite gidiş-dönüş süresi ile daha kompakt kaviteler kullanılarak elde edilebileceğine inanıyoruz. Daha büyük bir modülasyona sahip bir SBR, elde edilebilir darbe genişliklerini azaltmak için de kullanılabilir. Bununla birlikte, daha yüksek modülasyon derinlikleri yalnızca, daha düşük pasif kayıp ve azaltılmış termal sorunlar ile düşük Cr katkılı bir Cr:LiCAF numunesi (%1-3) kullanılarak elde

edilebilecek, iyileştirilmiş kazanca sahip bir sistemde mümkün olacaktır. Demirbas (2015)'de açıklandığı gibi, daha düşük bir Cr-katkılama, ısı yükünün kristal uzunluğu boyunca daha iyi dağılımı yoluyla daha yüksek pompa gücü seviyelerinin kullanımını kolaylaştırabilir, bu da daha sonra daha büyük bir modülasyon derinliğine sahip bir SBR'nin kullanımına izin verebilir. Ayrıca, daha kısa kavitelerin kullanımının SBR'nin mod kilitleme eğilimini de azalttığına dikkat etmek gerekir: SBR'nin geri kazanım süresi, kavite gidiş-dönüş süresi büyükse, lazer mod kilitli olmayacaktır. Bu açıdan, daha uzun iyileşme süresine sahip bir SBR'nin kullanılması saf Q-anahtarlamaya da yardımcı olabilir. Çalışmamızda kullanılan SBR, mod kilitleme için optimize edildi: bazı katmanlar, kusurları tetiklemek ve yaklaşık 20 ps gibi nispeten hızlı bir iyileşme süresi elde etmek için düşük sıcaklıkta büyütüldü. İdeal olarak, AlGaAs tabanlı soğurucuların geri kazanım süreleri birkaç ns aralığında olacak şekilde tasarlanabilir, bu da saf Q-anahtarlamalı operasyon elde etmede büyük fayda sağlayabilir. Kısacası, sistemin uygun mühendisliği ile SBR Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerinin, bu ilk çalışmada elde edilebilecek olana kıyasla çok daha iyi darbe genişlikleri ve tepe güçleri üretme potansiyeline sahip olduğuna inanıyoruz.

Raporun bir başka bölümünde, bildiğimiz kadarıyla, Cr:LiSAF'daki QML operasyonunun detaylarını ilk defa raporlamaktayız. Bu kısımda, doyurulabilir Bragg reflektörü (SBR) tarafından başlatılan QML Cr:LiSAF laser çıkışında 2–2.5  $\mu$ s uzunluğundaki Q-anahtarlı zarflar içinde 30–70 kHz tekrar frekanslarında 5 ps'nin altında uzun mod-kilitli darbeler üretilmiştir. Bir çift kırılımlı ayar plakası kullanılarak darbelerin merkezi dalga boyu kolayca 835 ve 865 nm arasında ayarlanabilmektedir. Diğer yandan Cr:LiSAF'deki QML işleminin dinamiklerini anlamak için gelecekteki çalışmalar (i) mod kilitli darbe genişliklerini 1-ps seviyesinin altına düşürme ve (ii) tepe güç ölçeklendirmesi için QML modülasyon derinliğini %100'e yükseltmesi bakımından önem taşımaktadır. Öte yandan, mod kilitlemenin sınırlı modülasyon derinliği ve nispeten uzun model kilitli darbe genişlikleri, daha fazla tepe güç ölçeklendirmesini engelleyici niteliktedir. Özellikle, darbe genişliklerini 5-ps seviyesinden 50-fs'nin altına düşürerek ek bir 2 sıra tepe güç ölçeklendirmesi potansiyel olarak mümkündür. Ek olarak, Q-anahtarlı zarf içinde mod kilitli darbe parametrelerinin varyasyonu da gözlemlenmiştir. QML'nin altında yatan fiziğini ve tepe güçlerini cw modu kilitleme rejiminde elde edilebilecek olanın üzerine, potansiyel olarak MW aralığına ölçeklendirme potansiyelini anlamak için daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir.

Cr:LiCAF kristalinin kullanıldığı bir diğer araştırma bölümünde, iki düşük maliyetli son teknoloji 210 mW tek modlu diyotla pompalanan kompakt bir Cr:LiSAF lazerin cw lazer performansını araştırdık. Bu basit sistemin 200 mW'a yaklaşan cw güçleri sağladığını, %50'nin üzerinde eğim verimlerine ulaşabileceğini ve 795 ila 1103 nm aralığında düzgün ayar sağladığını gösterdik. BBO kristalleri ile frekansı ikiye katladıktan sonra, yakın kızılötesindeki ayar, 17 mW'a kadar çıkış güçlerinin ve 402–535 nm bölgesini kapsayan bir ayar aralığının gösterildiği görünür bölgeye etkili bir şekilde aktarılır. Sistem, yakın kızılötesi ve görünür işletim rejimleri için sırasıyla %15 ve %1.4 gibi yüksek bir elektrik-optik dönüştürme verimliliğine sahiptir. Bu geniş ölçüde ayarlanabilir kompakt ve verimli sistem, ideal olarak basit AA tipi pillerle çalıştırılabilir. Sistemin, kristalin kendinden yüksek pasif kayıpları nedeniyle çok daha yüksek pompa güçlerinin gerekli olduğu Ti:Safir tabanlı yaklaşımlara kıyasla birçok avantajı vardır. Elektrikten optiğe dönüştürme verimliliği açısından, Cr:Colquiriites'in Cr:LiCAF gibi diğer üyeleri benzer bir performans sağlayabilir. Ancak, burada Cr:LiSAF (402–535 nm) ile elde ettiklerimizle karşılaştırıldığında Cr:LiCAF'ın ayarlama aralığı oldukça sınırlıdır (375–433 nm). Grafiklerin sunulduğu raporun ilgili kısımlarına göz atıldığında 475 nm'de 450 nm'ye kıyasla biraz daha yüksek verimin kısmen, 950 nm ve 475 nm spektral bölgelerdeki kavite aynalarının (M4-M5) daha iyi spektral özelliklerinden (950 nm'de daha iyi yansıtma ve çevresinde daha yüksek iletim) kaynaklandığına inanıyoruz. Deneysel verilerdeki boşluklar, BBO örneklerinin sınırlı ayarlama aralığından kaynaklanmaktadır ve gelecekteki çalışmalarda geliştirilebilir. Örnek olarak, 440, 465 veya 525 nm'deki düşük verimlilik, çalışma süresi boyunca merkezi dalga boyu 880, 930 ve 1050 nm olan BBO kristallerinin olmamasından kaynaklanmaktadır. Temel olarak, Cr:LiSAF lazer artan kayıplara karşı çok hassas olduğundan, farklı dalga boylarında performansın optimizasyonu, bölgeye özel tasarlanmış kaplamalarla doğrusal olmayan kristallerin kullanılmasını gerektirir. Daha geniş kaplama bant genişliğine sahip doğrusal olmayan kristaller, gelecekteki çalışmalarda daha geniş ayar aralıkları sağlayabilir. Öte yandan, daha geniş kaplamalar genellikle daha büyük kayıplara sahiptir ve bu da dönüşüm verimliliklerini azaltabilir.



## 5 PROJE KAPSAMINDA YAPILAN YAYINLAR

- Zekican Erturk, Serdar Okuyucu, Muharrem Kilinc, Yusuf Ozturk, Mikhail Pergament, Franz X. Kärtner, and Umit Demirbas, "Broadly tunable two-color lasing of Cr:LiCAF with on-surface and off-surface optical axis birefringent filters: performance comparison," *Appl. Opt.* 61, 10735-10743 (2022).
- S. Okuyucu, U. Demirbas, H. Tanaka, J. Thesinga, Y. Ozturk, F. X. Kärtner, and M. Pergament, "Temperature Dependence of Emission Cross Section and Fluorescence Lifetime of Cr:Colquiriites in 78-618 K Range," in *Optica Advanced Photonics Congress 2022, Technical Digest Series* (Optica Publishing Group, 2022), paper JTU6A.8.
- Okuyucu, S., Ozturk, Y. & Demirbas, U. Passively Q-switched Cr:LiCAF laser with a saturable Bragg reflector. *Appl. Phys. B* 127, 54 (2021).  
<https://doi.org/10.1007/s00340-021-07593-x>
- Mustafa Fetih Mekteplioglu, Yusuf Ozturk, Franz X. Kärtner, Umit Demirbas, Tunable Q switched mode-locked Cr:LiSAF laser, *Optics Communications*, Volume 488, 2021, 126836, ISSN 0030-4018,
- Mekteplioglu, M.F., Ozturk, Y., Pergament, M. et al. Broadly tunable (402–535 nm) intracavity frequency-doubled Cr:LiSAF laser. *Appl. Phys. B* 129, 22 (2023).
- Serdar Okuyucu, Jelto Thesinga, Hiroki Tanaka, Yusuf Ozturk, Franz X. Kärtner, Mikhail Pergament, and Umit Demirbas, "Temperature dependence of the emission cross-section and fluorescence lifetime in Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, and Cr:LiSGaF between 78 K and 618 K," *Opt. Mater. Express* 13, 1211-1227 (2023)
- Öztürk, Y. , Kılınç, M. , Buzcu, H. N. & Ertürk, Z. (2023). Termal analiz ve iyileştirilmiş tutucu tasarımı ile 1.5 W Lazer Diyot çift-uç pompalı levha geometrisine sahip Cr:Nd:GSGG lazer sistemi . *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* , 38 (4) , 2347-2358 . DOI: 10.17341/gazimmfd.1053971

## Kaynakça

- Kobtsev, S., & Svetsitskaya, N. (1992). "Application of birefringent filters in continuous-wave tunable lasers: a review. *Opt. Spektrosk*", 73, 196-212.
- Caird, J. A., Payne, S. A., Staver, P. R., Ramponi, A. J., & Chase, L. L. (1988). "Quantum electronic properties of the Na<sub>3</sub>Ga<sub>2</sub>Li<sub>3</sub>F<sub>12</sub>: Cr<sup>3+</sup> laser." *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 1077-1099.
- Demirbas, U., Uecker, R., Klimm, D., & Wang, J. (2012). "Low-cost, broadly tunable (375–433 nm & 746–887 nm) Cr: LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode." *Applied Optics*, 51(35), 8440-8448.
- Demirbas, U., Uecker, R., Fujimoto, J. G., & Leitenstorfer, A. (2017). "Multicolor lasers using birefringent filters: experimental demonstration with Cr: Nd: GSGG and Cr: LiSAF." *Optics express*, 25(3), 2594-2607.
- Eichenholz J.M., (1998). "Generation of high powers from diode pumped Cr<sup>3+</sup> doped colquiriites, Retrospective Theses and Dissertations," University of Central Florida, Optical Science and Engineering, Florida,.
- Sennaroglu, A. (2002). "Broadly tunable Cr<sup>4+</sup>-doped solid-state lasers in the near infrared and visible." *Progress in Quantum Electronics*, 26(6), 287-352.
- Okida, M., Itoh, M., Yatagai, T., Ogilvy, H., Piper, J., & Omatsu, T. (2005). "Heat generation in Nd doped vanadate crystals with 1.34 μm laser action." *Optics express*, 13(13), 4909-4915.
- Yerebakan, T., Demirbas, U., Eggert, S., Bertram, R., Reiche, P., & Leitenstorfer, A. (2017). "Red-diode-pumped Cr: Nd: GSGG laser: two-color mode-locked operation." *JOSA B*, 34(5), 1023-1032.
- Endo, M. (2007). "Feasibility study of a conical-toroidal mirror resonator for solar-pumped thin-disk lasers." *Optics Express*, 15(9), 5482-5493.
- Chen, Y., Sun, D., Peng, F., Zhang, Q., Liu, W., Gao, J., ... & Zheng, L. (2017). "Growth and spectroscopic investigations of the 1.5 at.% Er: GSGG laser crystal." *Materials Research Express*, 4(9), 096202.
- Ma, Z., Li, D., Gao, J., Wu, N., & Du, K. (2007). "Thermal effects of the diode end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> slab. *Optics communications*," 275(1), 179-185.
- Shen, Y., Gong, M., Ji, E., Fu, X., & Sun, L. (2017). "Spatial dynamic thermal iteration model for 888 nm end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> solid-state laser oscillators and amplifiers." *Optics Communications*, 383, 430-440.
- Holman, J. P. (2009). *Heat transfer*. McGraw Hill Higher Education.

- Castro, W. (2008). "Elemental analysis of biological matrices by laser ablation high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-HR-ICP-MS) and high resolution inductively coupled plasma mass spectrometry (HR-ICP-MS)" (Doctoral dissertation, Florida International University).
- Cengel, Y. A. (1997). Introduction to thermodynamics and heat transfer (Vol. 846). New York: McGraw-Hill.
- Demirbas, U., Cankaya, H., Pergament, M., & Kärtner, F. X. (2020). "Power and energy scaling of rod-type cryogenic Yb: YLF regenerative amplifiers". *JOSA B*, 37(6), 1865-1877.
- X. Fu, K. H. Hong, L. J. Chen, and F. X. Kartner, "Performance scaling of high-power picosecond cryogenically cooled rod-type Yb:YAG multipass amplification," *J Opt Soc Am B* 30, 2798-2809 (2013).
- Stalder, M., Bass, M., & Chai, B. H. (1992). "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals." *JOSA B*, 9(12), 2271-2273.
- Demirbas, U., Baali, I., Acar, D. A. E., & Leitenstorfer, A. (2015). "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr: LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet." *Optics Express*, 23(7), 8901-8909.
- U. Demirbas. 2019. "Cr:Colquiriite Lasers: Current status and challenges for further progress," *Prog. Quantum Electron.* 68, 100227.
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. J. Atherton, J. A. Caird, W. L. Kway, M. D. Shinn, R. S. Hughes, and L. K. Smith. 1990. "Properties and performance of the LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser material," *Solid State Lasers* 1223, 84.
- W. R. Rapoport and M. L. Shand. 1992. "Excited state absorption and upconversion in Cr:LiSrAlF<sub>6</sub>," *Solid State Commun.* 84(1-2), 29-31.
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," *J. Opt. Soc. Am. B* 9(12), 2271.
- F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, and A. Brun. 1997. "Performances of Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> and Cr:LiSrGaF<sub>6</sub> for continuous-wave diode-pumped Q-switched operation," *Opt. Lett.* 22(6), 387 (1997).
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, and B. H. T. Chai. 1990. "Flashlamp-pumped laser performance of LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>," *Opt. Quantum Electron.* 22(1), S259-S268
- U. Demirbas, R. Uecker, D. Klimm, and J. Wang. 2012. "Low-cost, broadly tunable (375-433 nm & 746-887 nm) Cr:LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode," *Appl. Opt.* 51(35), 8440.

- S. A. Payne, L. L. Chase, and G. D. Wilke. 1989. "Optical spectroscopy of the new laser materials, LiSrAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> and LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>," J. Lumin. 44(3), 167–176.
- R. Gvishi, E. Gonen, Y. Kalisky, and S. Rotman. 1999. "Studies of the spectroscopic behavior of Cr<sup>3+</sup>:LiCAF pumped by a solid-state dye laser," Opt. Mater. 13(1), 129-133.
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. J. Atherton, J. A. Caird, W. L. Kway, M. D. Shinn, R. S. Hughes, and L. K. Smith. 1990. "Properties and performance of the LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> laser material," Solid State Lasers 1223, 84.
- J. M. Eichenholz and M. Richardson. 1998. "Measurement of thermal lensing in Cr<sup>3+</sup>-doped colquiriites," IEEE J. Quantum Electron. 34(5), 910–919.
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," J. Opt. Soc. Am. B 9(12), 2271.
- F. Balembois, F. Druon, F. Falcoz, P. Georges, and A. Brun. 1997. "Performances of Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> and Cr:LiSrGaF<sub>6</sub> for continuous-wave diode-pumped Q-switched operation," Opt. Lett. 22(6), 387.
- D. C. Brown, S. Tornegard, J. Kolis, C. McMillen, C. Moore, L. Sanjeewa, C. Hancock, S. Tornegård, J. Kolis, C. McMillen, C. Moore, L. Sanjeewa, and C. Hancock. 2016. "The application of cryogenic laser physics to the development of high average power ultra-short pulse lasers," Appl. Sci. 6(1), 23.
- K. Du, D. Li, H. Zhang, P. Shi, X. Wei, R. Diart, 2003. "Electro-optically Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser with a high repetition rate and a short pulse width." Opt. Lett. 28, 87–89.
- J.J. Degnan. 1995. "Optimization of passively Q-switched lasers.", IEEE J. Quantum Electron. 31, 1890–1901.
- A.V. Podlipensky, V.G. Shcherbitsky, N.V. Kuleshov, V.P. Mikhailov, V.I. Levchenko, V.N. Yakimovich. 1999. "Cr<sup>2+</sup>:ZnSe and Co<sup>2+</sup>:ZnSe saturable-absorber Q switches for 1.54-um Er:glass lasers." Opt. Lett. 24, 960–962.
- S. Tsuda, W.H. Knox, S.T. Cundif, W.Y. Jan, J.E. Cunningham. 1996. "Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors", IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 2, 454–464 (1996)
- U. Demirbas, A. Sennaroglu, F.X. Kartner, J.G. Fujimoto. 2009. "Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr<sup>3+</sup>:LiCAF lasers." J. Opt. Soc. Am. B-Opt. Phys. 26, 64–79.
- J.K. Jabczyński, W. Zendzian, Z. Mierczyk, Z. Frukacz. 2001. "Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal." Appl. Opt. 40, 6638–6645.

- Y.-K. Kuo, M.-F. Huang, M. Birnbaum. 1995. "Tunable Cr<sup>4+</sup>:YSO Q-switched Cr:LiCAF laser", *IEEE J. Quantum Electron.* 31, 657–663.
- P. Pichon, A. Barbet, J.P. Blanchot, F. Druon, F. Balembois, P. Georges. 2017. "LED-pumped alexandrite laser oscillator and amplifier." *Opt. Lett.* 42, 4191–4194.
- K.J. Keller, F.X. Weingarten, D. Kärtner, B. Kopf, I.D. Braun, R. Jung, C. Fluck, N. Hönninger, J.A.A. Matuschek. 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers." *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 435–453.
- U. Demirbas. 2018. "Power scaling potential of continuous-wave Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers in thin-disk geometry," *Appl. Opt.* 57, 10207–10217
- U. Demirbas, D.A.E. Acar. 2016. "Continuous-wave, quasi-continuous-wave, gainswitched, and femtosecond burst-mode operation of multi-mode diode-pumped Cr:LiSAF lasers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 33, 2105–2113.
- S. Tsuda, W.H. Knox, S.T. Cundiff, W.Y. Jan, J.E. Cunningham. 1996. "Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors," *IEEE Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 454–464
- U. Keller, K.J. Weingarten, F.X. Kärtner, D. Kopf, B. Braun, I.D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, J.A. der Au. 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2, 435–453.
- U. Demirbas, G.S. Petrich, D. Li, A. Sennaroglu, L.A. Kolodziejski, F.X. Kärtner, J.G. Fujimoto. 2011. "Femtosecond tuning of Cr:Colquiriite lasers with AlGaAs-based saturable Bragg reflectors," *J. Opt. Soc. Amer. B* 28 986–993.
- U. Demirbas. 2017. "Off-surface optic axis birefringent filters for smooth tuning of broadband lasers," *Appl. Opt.* 56 7815–7825
- G.J. Spuhler, R. Paschotta, R. Fluck, B. Braun, M. Moser, G. Zhang, E. Gini, U. Keller. 1999. "Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 16 376–388
- F. Pirzio, J.R. Negri, S. Pizzurro, E. Piccinini, A. Agnesi. 2020. "Assessment of broad usability of a simple analytic model for passively Q-switched lasers with Cr:YAG saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 37 1659–1663.
- B. Braun, F.X. Kartner, G. Zhang, M. Moser, U. Keller, 1997, "56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser," *Opt. Lett.* 22 381–383.

- J.J. Zayhowski, C. Dill III. 1994. "Diode-pumped passively Q-switched picosecond microchip lasers," *Opt. Lett.* 19 1427–1429.
- B. Braun, F.X. Kartner, U. Keller, J.-P. Meyn, G. Huber. 1996. "Passively Q –switched 180-ps Nd:LaSc<sub>3</sub>(BO<sub>3</sub>)<sub>4</sub> microchip laser," *Opt. Lett.* 21 405–407.
- E. Beyatli, F. Kaya, H. Bilici. 2020. "Self-Q-switched and multicolor operation of a Tm: LuAG laser," *Appl. Opt.* 59 ( ) 8247–8252.
- E. Beyatli, A. Sennaroglu, U. Demirbas. 2013. "Self-Q-switched Cr:LiCAF laser," *J. Opt. Soc. Amer. B* 30 914–921
- J.K. Jabczynski, W. Zendzian, J. Kwiatkowski. 2005. "Q-switched mode locking in diode pumped lasers," *Opto-Electron. Rev.* 13 317–323
- M.J. Colles, C.R. Pidgeon. 1975. "Tunable lasers." *Reports Prog. Phys.* 38(3), 329–460
- B. Agate, A.J. Kemp, C.T.A. Brown, W. Sibbett. 2002. "Efficient, high repetition-rate femtosecond blue source using a compact Cr :LiSAF laser." *Opt. Express* 10(16), 824–831.
- B. Agate, E.U. Rafailov, W. Sibbett, S.M. Saltiel, P. Battle, T. Fry, E. Noonan, 2003. "Highly efficient blue-light generation from a compact, diode-pumped femtosecond laser by use of a periodically poled KTP waveguide crystal." *Opt. Lett.* 28(20), 1963–1965
- R. Scheps, J.F. Myers, H.B. Serreze, A. Rosenberg, R.C. Morris, M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser." *Opt. Lett.* 16(11), 820–822
- M. F. Mekteplioglu, Y. Ozturk, F. X. Kärtner, and U. Demirbas. 2021. "Tunable Q-switched mode-locked Cr:LiSAF laser," *Opt. Commun.* 488, 126836
- U. Demirbas, 2019. "Cr: Colquiriite lasers: current status and challenges for further progress." *Prog Quantum Electron* 68, 100227.
- U. Demirbas, F.X. Kärtner, M. Pergament. 2022. "Cavity-dumped nanosecond Cr:LiSAF laser in the 985–1030 nm region for versatile seeding of Yb-based amplifiers." *Appl. Phys. B Lasers Opt.* 128(2), 1–13.
- U. Demirbas, J. Thesinga, M. Kellert, S. Reuter, B. Sumpf, M. Pergament, F.X. Kärtner. 2021. "Mode-locked Cr:LiSAF laser far of the gain peak: tunable sub-200-fs pulses near 1  $\mu\text{m}$ ." *Appl. Opt* 60(29), 9054–9061
- D.N. Nikogosyan, 1991. "Beta barium borate (BBO)." *Appl. Phys. A* 52(6), 359–368.
- F. Falcoz, F. Balembois, P. Georges, A. Brun, D. Rytz. 1995. "All-solidstate continuous-wave tunable blue-light source by intracavity doubling of a diode-pumped Cr:LiSAF laser." *Opt. Lett.* 20(11), 1274–1276.

- P. Laperle, K.J. Snell, A. Chandonnet, P. Galarneau. 1997. "Tunable diode-pumped and frequency-doubled Cr:LiSAF lasers." *Appl. Opt.* 36(21), 5053–5057
- U. Demirbas, I. Baali. 2015. "Power and efficiency scaling of diode pumped Cr:LiSAF lasers: 770–1110 nm tuning range and frequency doubling to 387–463 nm," *Opt. Lett.* 40(20), 4615–4618
- L.S. Cruz, F.C. Cruz, 2007. "External power-enhancement cavity versus intracavity frequency doubling of Ti : sapphire lasers using BIBO." *Opt. Express* 15(19), 11913–11921.
- M. Thorhauge, J.L. Mortensen, P. Tidemand-Lichtenberg, P. Buchhave. 2006. "Tunable intracavity SHG of CW Ti: Sapphire lasers around 785 nm and 810 nm in BiBO-crystals." *Opt. Express* 14(6), 2283–2288
- U. Demirbas, R. Uecker, D. Klimm, J. Wang. 2012. "Low-cost, broadly tunable (375–433 nm & 746–887 nm) Cr:LiCAF laser pumped by one single-spatial-mode diode." *Appl. Opt.* 51(35), 8440
- H. Maestre, A. J. Torregrosa, J. Capmany, 2015. "Tunable blue-violet Cr<sup>3+</sup>:LiCAF + BiBO compact laser," *Laser Phys.* 25(3), 035401.
- Okuyucu, S., Ozturk, Y. & Demirbas. 2021. "U. Passively Q-switched Cr:LiCAF laser with a saturable Bragg reflector." *Appl. Phys. B* 127, 54.
- Y. Ozturk, M. Kilinc, Z. Erturk, H. Buzcu " Termal analiz ve iyileştirilmiş tutucu tasarımı ile 1.5 W lazer diyot çift-uç pompalı levha geometrisine sahip Cr:Nd:GSGG lazer sistemi ", accepted for press in *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*.
- J.P. Gordon, H.J. Zeiger, C.H. Townes. 1954. "Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in microwave spectrum of NH<sub>3</sub>", *Phys. Rev.* 95, 282
- W. Koechner, 2006. *Solid-state laser engineering*, in: 6th Rev. And Updated, Springer, New York,
- T.H. Maiman. 1960. "Stimulated optical radiation in ruby", *Nature* 187, 493–494
- J. F. Pinto, L. Esterowitz, and G. H. Rosenblatt. 1995. "Frequency tripling of a Qswitched Cr:LiSAF laser to the UV region," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 1, 58-61
- B. Agate, A. J. Kemp, C. T. A. Brown, and W. Sibbett. 2002. "Efficient, high repetition-rate femtosecond blue source using a compact Cr : LiSAF laser," *Opt. Express* 10, 824-831
- U. Demirbas, I. Baali, D. A. E. Acar, and A. Leitenstorfer. 2015. "Diode-pumped continuous-wave and femtosecond Cr:LiCAF lasers with high average power in the near infrared, visible and near ultraviolet," *Opt. Express* 23, 8901-8909

- R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, and M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser," *Opt. Lett.* 16, 820-822.
- S. Tsuda, W. H. Knox, and S. T. Cundiff. 1996. "High efficiency diode pumping of a saturable Bragg reflector-mode-locked Cr:LiSAF femtosecond laser," *Appl. Phys. Lett.* 69, 1538-1540.
- G. J. Valentine, J. M. Hopkins, P. Loza-Alvarez, G. T. Kennedy, W. Sibbett, D. Burns, and A. Valster. 1997. "Ultralow-pump-threshold, femtosecond Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub> laser pumped by a single narrow-stripe AlGaInP laser diode," *Opt. Lett.* 22, 1639-1641.
- B. Agate, B. Stormont, A. J. Kemp, C. T. A. Brown, U. Keller, and W. Sibbett. 2002. "Simplified cavity designs for efficient and compact femtosecond Cr:LiSAF lasers," *Opt. Comm.* 205, 207-213.
- P. W. Roth, A. J. Maclean, D. Burns, and A. J. Kemp. 2009. "Directly diode-laserpumped Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* 34, 3334-3336.
- J. H. Wolter, M. A. Ahmed, and T. Graf. 2017. "Thin-disk laser operation of Ti:sapphire," *Opt. Lett.* 42, 1624-1627.
- S. A. Payne, L. L. Chase, L. K. Smith, W. L. Kway, and H. W. Newkirk. 1989. "Laser performance of LiSAIF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup>," *J. Appl. Phys.* 66(3), 1051–1056.
- S. A. Payne, L. L. Chase, H. W. Newkirk, L. K. Smith, and W. F. Krupke. 1988. "LiCaAlF<sub>6</sub>:Cr<sup>3+</sup> a promising new solid-state laser material," *IEEE J. Quantum Electron.* 24(11), 2243–2252.
- L. K. Smith, S. A. Payne, W. L. Kway, L. L. Chase, and B. H. T. Chai. 1992. "Investigation of the laser properties of Cr<sup>3+</sup>:LiSrGaF<sub>6</sub>," *IEEE J. Quantum Electron.* 28(11), 2612–2618.
- I. T. Sorokina, E. Sorokin, E. Wintner, A. Cassanho, H. P. Jenssen, and R. Szipöcs. 1997. "14-fs pulse generation in Kerr-lens mode-locked prismless Cr:LiSGaF and Cr:LiSAF lasers: observation of pulse self-frequency shift," *Opt. Lett.* 22(22), 1716–1718
- S. Uemura and K. Torizuka. 2000. "Generation of 10 fs pulses from a diode-pumped Kerr-lens mode-locked Cr: LiSAF laser," *Jpn. J. Appl. Phys.* 39(Part 1, No. 6A), 3472–3473
- P. C. Wagenblast, U. Morgner, F. Grawert, T. R. Schibli, F. X. Kärtner, V. Scheuer, G. Angelow, and M. J. Lederer. 2002 "Generation of sub-10-fs pulses from a Kerr-lens mode-locked Cr<sup>3+</sup>:LiCAF laser oscillator by use of third-order dispersion-compensating double-chirped mirrors," *Opt. Lett.* 27(19), 1726–1728
- U. Demirbas, S. Eggert, and A. Leitenstorfer. 2012. "Compact and efficient Cr:LiSAF lasers pumped by one single spatial-mode diode: a minimal cost approach," *J. Opt. Soc. Am. B* 29(8), 1894–1903



- R. Scheps, J. F. Myers, H. B. Serreze, A. Rosenberg, R. C. Morris, and M. Long. 1991. "Diode-pumped Cr:LiSrAlF<sub>6</sub> laser," *Opt. Lett.* 16(11), 820–822.
- S. Tsuda, W. H. Knox, and S. T. Cundiff. 1996. "High efficiency diode pumping of a saturable Bragg reflector-modelocked Cr:LiSAF femtosecond laser," *Appl. Phys. Lett.* 69(11), 1538–1540
- G. J. Valentine, J. M. Hopkins, P. Loza-Alvarez, G. T. Kennedy, W. Sibbett, D. Burns, and A. Valster. 1997. "Ultralow-pump-threshold, femtosecond Cr<sup>3+</sup>:LiSrAlF<sub>6</sub> laser pumped by a single narrow-stripe AlGaInP laser diode," *Opt. Lett.* 22(21), 1639–1641.
- B. Agate, B. Stormont, A. J. Kemp, C. T. A. Brown, U. Keller, and W. Sibbett. 2002. "Simplified cavity designs for efficient and compact femtosecond Cr:LiSAF lasers," *Opt. Commun.* 205 (1-3), 207–213
- D. Kopf, K. J. Weingarten, G. Zhang, M. Moser, M. A. Emanuel, R. J. Beach, J. A. Skidmore, and U. Keller. 1997. "High-average-power diode-pumped femtosecond Cr:LiSAF lasers," *Appl. Phys. B* 65(2), 235–243
- M. Stalder, M. Bass, and B. H. T. Chai. 1992. "Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals," *J. Opt. Soc. Am. B* 9(12), 2271–2273
- J. K. Jabczynski, W. Zendzian, Z. Mierczyk, and Z. Frukacz. 2001. "Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V<sup>3+</sup>:YAG crystal," *Appl. Opt.* 40(36), 6638–6645
- D. Klimm and P. Reiche. 1999. "Ternary colquiriite type fluorides as laser hosts," *Cryst. Res. Technol.* 34(2), 145–152.
- D. Klimm, R. Uecker, and P. Reiche. 2005. "Melting behavior and growth of colquiriite laser crystals," *Cryst. Res. Technol.* 40(4-5), 352–358
- A. Dergachev, J. H. Flint, Y. Isyanova, B. Pati, E. V. Slobodtchikov, K. F. Wall, and P. F. Moulton. 2007. "Review of multipass slab laser systems," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 13(3), 647–660.
- U. Demirbas, A. Sennaroglu, F. X. Kartner, and J. G. Fujimoto. 2009. "Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr<sup>3+</sup>: LiCAF lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* 26(1), 64–79
- U. Demirbas, M. Schmalz, B. Sumpf, G. Erbert, G. S. Petrich, L. A. Kolodziejski, J. G. Fujimoto, F. X. Kärtner, and A. Leitenstorfer. 2011. "Femtosecond Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers pumped by tapered diode lasers," *Opt. Express* 19(21), 20444–20461
- E. Sorokin, *Few-Cycle Laser Pulse Generation and Its Applications*. 2004, F. X. Kartner, ed. (Springer-Verlag,), pp. 3–71.

- Kopf, D., Weingarten, K., Zhang, G. et al. 1997. "High-average-power diode-pumped femtosecond Cr:LiSAF lasers". *Appl Phys B* 65, 235–243.
- U. Keller, D. A. B. Miller, G. D. Boyd, T. H. Chiu, J. F. Ferguson, and M. T. Asom. 1992. "Solid-state low-loss intracavity saturable absorber for Nd:YLF lasers: an antiresonant semiconductor Fabry–Perot saturable absorber," *Opt. Lett.* 17, 505-507
- U. Keller et al., 1996. "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," in *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 2, no. 3, pp. 435-453,
- U. Keller, *Nonlinear Optics in Semiconductors*, vol. 59, ed. by E. Garmire, A. Kost (Academic, Boston, MA, 1999), p. 211
- Haiml, M., Grange, R. & Keller, U. 2004. "Optical characterization of semiconductor saturable absorbers.", *Appl. Phys. B* 79, 331–339.
- Keller, U. 2003. "Recent developments in compact ultrafast lasers." *Nature* 424, 831–838.
- C. Hönninger, R. Paschotta, F. Morier-Genoud, M. Moser, and U. Keller. 1999. "Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 46-56
- G. J. Spühler, R. Paschotta, R. Fluck, B. Braun, M. Moser, G. Zhang, E. Gini, and U. Keller. 1999. "Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers," *J. Opt. Soc. Am. B* 16, 376-388
- L. Krainer, R. Paschotta, S. Lecomte, M. Moser, K. J. Weingarten and U. Keller. 2002. "Compact Nd:YVO/sub 4/ lasers with pulse repetition rates up to 160 GHz," in *IEEE Journal of Quantum Electronics*, vol. 38, no. 10, pp. 1331-1338.
- G. J. Spühler, L. Krainer, E. Innerhofer, R. Paschotta, K. J. Weingarten, and U. Keller. 2005. "Soliton mode-locked Er:Yb:glass laser," *Opt. Lett.* 30, 263-265.
- R. Paschotta, L. Krainer, S. Lecomte, G.J. Spuhler, S.C. Zeller, A. Aschwanden, D. Lorensen, H.J. Unold, K.J. Weingarten, U. Keller. 2004. "Picosecond pulse sources with multi-GHz repetition rates and high output power", *New J. Phys.* 6, 174.
- L. R. Brovelli, U. Keller, and T. H. Chiu. 1995. "Design and operation of antiresonant Fabry–Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state lasers," *J. Opt. Soc. Am. B* 12, 311-322
- Spühler, G.J., Weingarten, K.J., Grange, R. et al. 2005. "Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence." *Appl. Phys. B* 81, 27–32.
- Spence, D.E., Kean, P.N., Sibbett, W. 1991. "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser". *Opt. Lett.* 16, 42–44.

- Keller, U., 'tHooft, G.W., Knox, W.H., Cunningham, J.E. 1991. "Femtosecond pulses from a continuously self-starting passively mode-locked Ti:sapphire Laser", *Opt. Lett.* 16, 1022–1024.
- Salin, F., Squier, J., Piché, M. 1991. "Modelocking of Ti:Sapphire lasers and self-focusing: a Gaussian approximation". *Opt. Lett.* 16 1674–1676.
- Negus, D.K., Spinelli, L., Goldblatt, N., Feugnet, G. 1991. "Sub-100 femtosecond pulse generation by Kerr lens modelocking in Ti:Sapphire", *Advanced Solid-State Lasers*, Dubé, G., Chase, L. (eds), Washington, D.C.: Optical Society of America, , Vol. 10, p. 120–124
- Umit Demirbas, Gale S. Petrich, Duo Li, Alphan Sennaroglu, Leslie A. Kolodziejski, Franz X. Kärtner, and James G. Fujimoto, 2011. "Femtosecond tuning of Cr:colquiriite lasers with AlGaAs-based saturable Bragg reflectors," *J. Opt. Soc. Am. B* 28, 986-993
- Spuehler, Gabriel & Weingarten, Kurt & Grange, Rachel & Krainer, L & Haiml, M & Liverini, Valeria & Golling, M & Schön, Silke & Keller, U. 2005. "Semiconductor saturable absorber mirror structures with low saturation fluence.", *Applied Physics B*. 81. 27-32.
- Erturk, Z., Okuyucu, S., Kilinc, M., Ozturk, Y., Pergament, M., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2022). "Broadly tunable two-color lasing of Cr: LiCAF with on-surface and off-surface optical axis birefringent filters: performance comparison". *Applied Optics*, 61(36), 10735-10743.
- Mekteplioglu, M. F., Ozturk, Y., Pergament, M., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2023). "Broadly tunable (402–535 nm) intracavity frequency-doubled Cr: LiSAF laser". *Applied Physics B*, 129(1), 1-9.
- Mekteplioglu, M. F., Ozturk, Y., Kärtner, F. X., & Demirbas, U. (2021). "Tunable Q-switched mode-locked Cr: LiSAF laser". *Optics Communications*, 488, 126836.