

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ



**CR:COLQUİRİİTE'LERDE SPEKTROSKOPİK ÖZELLİKLERİN SICAKLIĞA
BAĞLI ÖLÇÜMÜ VE DİYOT POMPALI CR:LİCAF, YB:YLF VE YB:LLF
LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Serdar OKUYUCU

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

OCAK 2024

ANTALYA

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ**



**CR:COLQUİRİİTE'LERDE SPEKTROSKOPİK ÖZELLİKLERİN SICAKLIĞA
BAĞLI ÖLÇÜMÜ VE DİYOT POMPALI CR:LİCAF, YB:YLF VE YB:LLF
LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Serdar OKUYUCU

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ**

OCAK 2024

ANTALYA

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CR:COLQUİRİİTE'LERDE SPEKTROSKOPİK ÖZELLİKLERİN SICAKLIĞA
BAĞLI ÖLÇÜMÜ VE DİYOT POMPALI CR:LİCAF, YB:YLF VE YB:LLF
LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Serdar OKUYUCU
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

**Bu tez Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) - Bilim
İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)'nin 2214-A program desteği
kapsamında 1059B142100385 başvuru nolu proje ile desteklenmiştir.**

OCAK 2024

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**CR:COLQUİRİİTE'LERDE SPEKTROSKOPİK ÖZELLİKLERİN SICAKLIĞA
BAĞLI ÖLÇÜMÜ VE DİYOT POMPALI CR:LİCAF, YB:YLF VE YB:LLF
LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

Serdar OKUYUCU
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
DOKTORA TEZİ

Bu tez 18/01/2024 tarihinde jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Siddık Cumhur BAŞARAN (Danışman)
Prof. Dr. Murat CANPOLAT
Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK
Doç. Dr. Ersen BEYATLI
Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN

ÖZET

CR:COLQUIRİİTE'LERDE SPEKTROSKOPİK ÖZELLİKLERİN SICAKLIĞA BAĞLI ÖLÇÜMÜ VE DİYOT POMPALI CR:LiCAF, Yb:YLF VE Yb:LLF LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

Serdar OKUYUCU

Doktora Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Ocak 2024; 124 sayfa

Bu tez çalışmasının genel çerçevesi, geçiş metali ve nadir toprak element iyonu katkılı çeşitli katı-hal kazanç ortamlarının kullanıldığı deneylerde, sıcaklığa bağlı spektroskopik özelliklerin karakterizasyonu ve lazer diyotları ile pompalama altında sürekli-dalga, pasif Q-anahtarlı ve mod-kilitli rejimlerin gösterilmesine yönelik çalışmaları içermektedir. Bu kapsam altında gerçekleştirilmiş çeşitli deneysel çalışmalarda geçiş metali iyonu (Cr^{+3}) katkılı Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF ve nadir toprak element iyonu (Yb^{+3}) katkılı Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamları kullanılmıştır.

Başarılı lazer/amplifikatör sistemlerinin tasarlanması, pratik kurulumu, verimli operasyonunun sağlanması ve kazanç ortamlarının beklenen çalışma koşulları altında dayanıklılığının tahmin edilmesi için ilgili kazanç ortamının ilgili koşullarda sahip olduğu optik, mekanik ve termal özelliklerin yanında, kesit alanlarının (absorpsiyon ve emisyon), küçük sinyal kazancının ve floresan ömrü gibi spektroskopik özelliklerin parametrik (sıcaklık, katkı iyon miktarı gibi) bağımlılığının detaylı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Verilen bir kazanç ortamı için bu tür özellikler, yapısına eklenen aktif iyon türlerinin ve konak malzemenin kendine has özelliklerinin birleşimi şeklinde kendini göstermektedir. Bu kapsamda tez çalışması dahilinde hedeflenen özgün değere sahip çıktılardan ilki, üç farklı Cr:Colquiriite (ismini Bolivya'da keşfedildiği Colquiri kalay madeninden alır) kazanç ortamına (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF) ait floresan ömrü ve emisyon kesitinin sıcaklığa bağlı değişiminin deneysel olarak araştırılmasıdır. Bu hedefin gerçekleşmesinde, verilen Cr:Colquiriite kazanç ortamlarının kriyojenik (sıvı nitrojen soğutması ile 77 K'ye kadar) ve oda sıcaklığının üzerindeki (618 K'ye kadar) sıcaklıklar için kurulan farklı deney düzenekleri ile floresan ömrünün (1 K aralıklarla) ve emisyon kesitinin (5 K aralıklarla) sıcaklığa bağımlı ölçülmüş değişimi detaylı bir biçimde raporlanmıştır. Deneyler kapsamında elde edilen veriler ile floresan ömrü, ışımlı ömür, quantum verimliliği ve $E//c$ ve $E//a$ eksenlerindeki emisyonun şiddeti, pik dalgaboyu ve genişliğinin ilgili sıcaklık aralığındaki değişiminin analitik tanımları ilgili denklem ve katsayılar ile birlikte verilmektedir. Bu kapsamda rapor edilen sonuçlar, farklı rejimlerde (amplifikasyon, güç ölçekleme, pasif Q-anahtarlama ve düşük zaman titremeli mod-kilitleme gibi) çalışan Cr:Colquiriite lazer sistem modelleri ve pratik kurulumlarına ulaşılmasında ve özellikle de kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyellerinin ortaya konulması için sağlam bir temel oluşturmaktadır. Diyot-pompalı Cr:Colquiriite'ler ile farklı rejimlerde lazer operasyonunun gösterilmesi amacı kapsamında ise, düşük maliyetli çok-modlu diyotlar ile pompalı, AlGaAs tabanlı doyabilen soğurucu aynalar (SESAM) ile pasif Q-anahtarlı bir Cr:LiCAF lazeri gerçekleştirilmiştir. Dört farklı çıkış kuplörü ve

farklı modülasyon derinliklerine sahip iki SBR kullanılarak deneysel olarak karakterize edilen sistemde 18-40 kHz arasındaki tekrarlama frekanslarında, 1.5-4 μ s aralığında darbe genişlikleri ile 125 mW'a kadar ortalama çıkış güçleri elde edilmiştir. Deneysel olarak elde edilen sonuçlar temel Q-anahtarlama teorisi ile karşılaştırılmış ve darbe uzunluğunun kısaltılması ve tepe gücünün ölçeklendirilmesi açısından daha fazla performans iyileştirmesi üzerinde durulmuştur.

Tez çalışmasının son bölümünde, tek-modlu ve çoklu-modlu lazer diyotları ile pompalanmış Yb:YLF ve Yb:LLF lazer sistemleri ile (i) sürekli dalga operasyonunda güç ölçekleme, (ii) dalgaboyu ayarlama, (iii) pasif mod-kilitli femtosaniye darbe üretimi, (iv) mod-kilitli operasyonda tekrarlama frekansının GHz mertebesine ölçeklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda kompakt, tek-modlu diyot pompalı bir Yb:YLF lazerinde ilk defa SESAM mod-kitleme ile GHz tekrarlama frekansında femtosaniye darbeler elde edilmiştir. Lazer çıkışında 40 mW ortalama güce sahip 1.1 GHz tekrarlama frekanslı, 210 fs uzunluğunda darbeler (36.04 pJ'lük bir darbe enerjisine sahip) TEM₀₀ profili ile elde edilmiştir. Çok-modlu lazer diyotu (960 nm, 10W) ile pompalanmış sürekli-dalga Yb:LLF lazer sisteminde ise %0.5-%60 aralığında dokuz farklı çıkış kuplörünün kullanıldığı deneylerde (i) 3.2W'a kadar ortalama çıkış gücü ve %42.3 eğim verimliliği, (ii) kuvars çift kırılımlı bir filtre (BRF) kullanımı ile 996-1073 nm aralığında dalgaboyu ayarlanabilir sürekli-dalga lazer çıkışı gösterilmiştir. Bu sonuç, daha önce literatürde 1029-1069 nm aralığında rapor edilen dalgaboyu ayarlama aralığı ile kıyaslandığında, Yb:LLF ile gösterilen en geniş dalgaboyu ayarlama aralığı olma özelliğine sahiptir. Çok-modlu diyot ile pompalı Yb:LLF sistemlerinde SESAM ile mod-kitleme deneylerinde ise 200 MHz tekrarlama frekansında 337 fs darbelerin 2.5 W ortalama çıkış gücünde gösterilmiş, lazer operasyonunda kullanılan metodlar ve sonuçların tartışması verilmiştir. Takip eden deneylerde kavite içi dispersiyonun ayarlanması ve farklı uzunluklarda kavite kurulumları ile (i) 257 MHz'de 181 fs darbeler 3W çıkış gücü ile, (ii) 214 MHz'de 110 fs darbeler 780 mW çıkış gücü ile, (iii) 355 MHz'de 110 fs darbeler 220 mW çıkış gücü ile (benzer sonuçlar Yb:YLF ile de tekrarlanmıştır) elde edilmiştir. Son olarak, tek-modlu lazer diyotları (960 nm, 260 mW) ile pompalı Yb:LLF lazer kurulumlarında %52 eğim verimliliği ile 80 mW'a varan (tek pompalı durumda) sürekli-dalga çıkış güçleri gösterilmiştir.

ANAHTAR KELİMELEER: Cr:Colquiriite, diyot pompalama, emisyon kesiti, floresan ömrü, GHz tekrarlama frekansı, mod-kitleme, Q-anahtarlama, Yb-katkılı lazerler

JÜRİ: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Prof. Dr. Murat CANPOLAT

Dr. Öğr. Üyesi Yusuf ÖZTÜRK

Doç. Dr. Ersen BEYATLI

Doç. Dr. Ramazan ŞAHİN

ABSTRACT

TEMPERATURE DEPENDENT MEASUREMENT OF SPECTROSCOPIC PROPERTIES IN CR:COLQUIRITES AND DEVELOPMENT OF DIODE PUMPED CR:LICAF, YB:YLF AND YB:LLF LASER SYSTEMS

Serdar OKUYUCU

PhD Thesis in Electrical-Electronics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

January 2024; 124 pages

The general framework of this thesis includes the characterization of the temperature dependent spectroscopic properties and the demonstration of continuous-wave, passively Q-switched and mode-locked regimes with various transition metal and rare earth element ion doped solid-state gain media under laser diode pumping. In various experimental studies under this scope, transition metal ion (Cr^{+3}) doped Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF and rare earth element ion (Yb^{+3}) doped Yb:YLF and Yb:LLF gain media were used.

In order to design successful laser/amplifier systems, to ensure their practical installation, efficient operation and to predict the durability of the gain media under the expected operating conditions, it is necessary to know in detail the optical, mechanical and thermal properties of the gain media, as well as the parametric (e.g. temperature, dopant ion content) dependence of spectroscopic properties such as cross-sections (absorption and emission), small signal gain and fluorescence lifetime. For a given gain medium, such properties are a combination of the active ion properties added to the structure and the intrinsic properties of the host material. In this context, the first aim of this thesis is the experimental investigation of temperature dependence of the fluorescence lifetime and emission cross section of three different Cr:Colquirite (named after the Colquiri tin mine in Bolivia where it was discovered) gain media (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF). In the realization of this objective, temperature dependent variation of fluorescence lifetime (at 1 K intervals) and emission cross section (at 5 K intervals) of the given Cr:Colquirite gain media are measured at cryogenic (down to 77 K with liquid nitrogen cooling) and above room temperatures (up to 618 K) and are reported in detail. Analytical descriptions of the fluorescence lifetime, radiative lifetime, quantum efficiency and the variation of the intensity, peak wavelength, and width of the emission in the E//c and E//a axes over the relevant temperature range are given with the relevant equations and fit coefficients. The results reported in this context provide a solid basis for the modeling of Cr:Colquirite laser systems operating in different regimes (such as amplification, power scaling, passive Q-switching, and mode-locking with low timing-jitter) and for their practical implementation, especially for their potential at cryogenic temperatures. In order to demonstrate laser operation in different regimes with diode-pumped Cr:Colquirites, a Cr:LiCAF laser passively Q-switched by an AlGaAs-based saturable absorber mirror (SESAM) and pumped by low-cost multimode diodes has been realized. The system is experimentally characterized using four different output couplers and two SBRs with different modulation depths, where the system achieves average

output powers up to 125 mW at repetition frequencies between 18-40 kHz, with pulse widths in the range of 1.5-4 μ s. The experimental results are compared with the basic Q-switching theory and further performance improvements are emphasized in terms of pulse length reduction and peak power scaling.

In the last part of the thesis, studies on (i) power scaling in continuous wave operation, (ii) wavelength tuning, (iii) passively mode-locked femtosecond pulse generation, (iv) scaling of mode-locking frequency to GHz were carried out with Yb:YLF and Yb:LLF laser systems pumped with single-mode and multi-mode laser diodes. In this context, femtosecond pulses at GHz repetition frequency have been achieved for the first time with Yb:YLF by SESAM mode-locking in a compact, single-mode diode-pumped cavity. 210 fs long pulses (with a pulse energy of 36.04 pJ) with a repetition frequency of 1.1 GHz and an average power of 40 mW were obtained with the TEM₀₀ profile at laser output. As for the continuous-wave Yb:LLF laser system pumped by a multimode laser diode (960 nm, 10W), experiments using nine different output couplers in the 0.5%-60% range have demonstrated (i) average output power up to 3.2W and slope efficiency of 42.3%, (ii) wavelength-tunable continuous-wave laser output in the 996-1073 nm range using a quartz birefringent filter (BRF). This result is the widest wavelength tunability demonstrated with Yb:LLF compared to the 1029-1069 nm range previously reported in the literature. Mode-locking experiments with SESAM in multimode diode-pumped Yb:LLF systems demonstrated 337 fs pulses at a repetition frequency of 200 MHz with an average output power of 2.5 W. In the following experiments, by adjusting the intra-cavity dispersion and cavity setups of different lengths, (i) 181 fs pulses at 257 MHz with 3 W output power, (ii) 110 fs pulses at 214 MHz with 780 mW output power, (iii) 110 fs pulses at 355 MHz with 220 mW output power (similar results were repeated with Yb:YLF) were demonstrated. Finally, pumping of Yb:LLF with single-mode laser diodes (960 nm, 260 mW) are demonstrated where continuous-wave output powers of up to 80 mW (for single diode pumping) with 52% slope efficiency are reported.

KEYWORDS: Cr:Colquiriite, diode pumping, emission cross section, fluorescence lifetime, GHz repetition frequency, mode-locking, Q-switching, Yb-doped lasers

COMMITTEE: Prof. Dr. Sıddık Cumhuri BAŞARAN

Prof. Dr. Murat CANPOLAT

Asst. Prof. Dr. Yusuf ÖZTÜRK

Assoc. Prof. Dr. Ersen BEYATLI

Assoc. Prof. Dr. Ramazan ŞAHİN

ÖNSÖZ

Bu tez içeriğini oluşturan kelime ve görsellerin mevcut hali ile yıllar içerisinde bir araya gelmesi, canım ailem ve biricik eşim Öykü'nün sonsuz desteğine, bilimi sevdiren ve yolunu gösteren değerli öğretmenlerime, çok kıymetli danışman rehberliklerine, lazer laboratuvarlarında kurulum yapma ve veri almaya harcanan sayısız saatlere, dergi metinlerine, konferans bildirilerine, dostlar ile her alanda karşılıklı yardımlaşmaya, öğrenim programları ve araştırma desteklerinden faydalandığım Türkiye Cumhuriyeti kurumlarına ve Mustafa Kemal Atatürk'e dayanır.

2017 yılında araştırma görevlisi olarak çalışmaya başladığım Antalya Bilim Üniversitesi'nin (ABÜ) Lazer Teknoloji Laboratuvarı (LTL) kapısından sızan kırmızı pompa ışığını görmemle başlayan lazer alanına ilgim şimdi bu doktora tezi ile taçlanıyor. Bu zorlu ancak bir o kadar da öğretici süreçte öncelikle doktora tez danışmanım Prof. Dr. S. Cumhur Başaran'a teşekkür etmeliyim. Kendisinin rehberliği, öğretim metotları ve iletişimi, kendi kariyerim için örnek aldığım bir ideali teşkil eder.

ABÜ'de araştırma görevlisi olarak görev yaptığım süre içerisinde, LTL'de yaptığım araştırmaları cesaretlendiren, adım attığım bu yeni alanda sorduğum sorulara sabır ve içtenlikle cevap verip yol gösteren Prof. Dr. Ümit Demirbaş'a teşekkürü bir borç bilirim. Ümit Demirbaş'ın çalışma azmi, teorik ve pratik bilgisi, vizyonu, arkadaşlığı ve kişiliği hepimiz için örnektir.

Bu tez metninde sunulan sonuçların bir kısmı ABU-LTL imkanları çerçevesinde yapılmış çalışmalar ve Dr. Yusuf Öztürk'ün yürütücülüğünü yaptığı ve benim de bursiyer olarak görev aldığım 119E264 numaralı Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1001 projesi desteği kapsamında elde edilmiştir. Bahsi geçen proje başvurusunun hazırlanmasından başlayarak takip eden süreçlerde rol almamı sağlayan ve kritik tecrübe kazanımlarına imkân veren Dr. Yusuf Öztürk'e ve ABU'da mesai ve LTL'de çalışma arkadaşım Zekican Ertürk'e yardımlarında ötürü teşekkür ederim.

Doktora tez sürecinde ayrıca TÜBİTAK Bilim İnsanı Destek Programları Başkanlığı (BİDEB)'nin 1059B142100385 numaralı 2214-A program desteği ile, Almanya (Hamburg)'da bulunan Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) kurumunda bir yıl süre ile araştırmalar yürütülmüştür. Bu süreçte Cr:Colquiriite'lerde spektroskopik özelliklerin karakterizasyonu ve farklı rejimlerde çalışan diyot pompalı Yb:YLF ve Yb:LLF sistemlerinin gerçekleştirilmesinde yardım ve rehberlikleri için Ümit Demirbaş, Franz Kärtner, Mikhail Pergament ve Jelto Thesinga'ya, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGAF kristal örneklerini sağlayan Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) kurumu ve Hiroki Tanaka'ya teşekkür ederim. Almanya'da bulunduğum bu süreçte değerli dostluğu ve ev arkadaşlığı için Muharrem Kılınç'a teşekkürü borç bilirim.

Bu tezi, zorlu yazım sürecinde türlü fedakarlıklarda bulunup şefkat, sevgi ve sabırla her daim bana destek veren sevgili eşim Öykü'ye ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ	v
AKADEMİK BEYAN	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xviii
1. GİRİŞ	1
1.1 Cr:Colquiriite’lerde Spektroskopik, Opto-termo-mekanik Özellikler ve Lazer Operasyonu	1
1.1.1 Emisyon kesiti	3
1.1.2 Floresan ömrü	7
1.1.3 Kriyojenik sıcaklıklarda malzeme davranışı ve Cr:Colquiriite’lerde lazer operasyonu.....	11
1.1.4 SESAM ile Q-anahtarlı lazer operasyonu.....	12
1.2. Yb-bazlı kazanç ortamlarında sürekli-dalga ve pasif mod-kilitli femtosaniye lazer operasyonu	13
2. KAYNAK TARAMASI.....	18
2.1. Cr:Colquiriite’lerde Spektroskopik ve Termomekanik Özellikler	18
2.2. Cr:Colquiriite’lerde Lazer Operasyonu ve Pasif Q-anahtarlama.....	23
2.3 Diyot pompalı Yb-katkılı Lazer Sistemleri	25
2.3.1 GHz tekrarlama frekanslı Yb:YLF lazeri	26
2.3.2 Yb:LLF kazanç ortamı ile sürekli dalga ve pasif mod-kilitli lazer operasyonu.....	30
3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. Cr:Colquiriite’lerde Spektroskopik Özelliklerin Sıcaklığa Bağlı Ölçümü.....	31
3.1.1. Cr:Colquiriite’lerde sıcaklığa bağlı flöresan ömrünün 78-618 K aralığında ölçümü	33
3.1.2. Cr:Colquiriite’lerde sıcaklığa bağlı emisyon kesitinin 78-618 K aralığında ölçümü	37

3.2. Diyot Pompalı Cr:LiCAF ile Lazer Operasyonu	40
3.2.1. Cr:LiCAF kristalinde katkılama ve pasif kayıp karakterizasyonu	40
3.2.2. Pasif Q-Anahtarlı Cr:LiCAF lazeri.....	43
3.3. Lazer Diyot Pompalı Yb-Katkılı Lazer Sistemleri	47
3.3.1. GHz tekrarlama frekanslı Yb:YLF lazer sistemi kurulumu	49
3.3.2 Diyot pompalı Yb:LLF lazer sistemleri.....	54
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	58
4.1. Cr:Colquiriite'lerde Sıcaklığa Bağlı Ölçülmüş Spektroskopik Özellikler	58
4.1.1. Cr:Colquiriite'lerde 78-618 K aralığında ölçülen sıcaklığa bağlı flöresan ömrü.....	58
4.1.2. Cr:Colquiriite'lerde 78-618 K aralığında ölçülen sıcaklığa bağlı emisyon kesiti.....	63
4.2. Pasif Q-anahtarlama Cr:LiCAF Lazeri.....	71
4.3. Diyot Pompalı Yb:YLF ve Yb:LLF Lazer Sistemlerinin Performans Analizi.....	83
4.3.1. Gigahertz tekrarlama frekanslı femtosaniye Yb:YLF lazerinin karakterizasyonu	83
4.3.2. Diyot-pompalı Yb:LLF lazer sistemlerinde sürekli-dalga ve SESAM ile mod-kilitli rejim operasyonu	86
4.3.2.1. Çok-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde sürekli dalga operasyonu ve ayarlanabilir dalgaboyu	87
4.3.2.2. Çoklu-mod diyot pompalı, SESAM ile 200 MHz'de mod-kilitli 337 femtosaniye Yb:LLF lazeri	89
4.3.2.3. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 257 MHz'de mod-kilitli 181 femtosaniye Yb:LLF lazeri	92
4.3.2.4. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 214 MHz'de mod-kilitli 110 femtosaniye Yb:LLF lazeri	95
4.3.2.5. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 355 MHz'de mod-kilitli 145 femtosaniye Yb:LLF lazeri	97
4.3.2.6. Tek-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde sürekli-dalga operasyonu	102
4.3.2.7. Tek-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde SESAM ile mod-kilitli operasyon	103

5. SONUÇLAR	107
5.1. Cr:Colquiriite’lerde Emisyon ve Flöresan Ömrünün Sıcaklığa Bağlı Değişimi .	107
5.2. Pasif Q-Anahtarlama Cr:LiCAF Lazeri.....	108
5.3. Gigahertz Tekrarlama Frekanslı Femtosaniye Yb:YLF Lazeri	109
5.4. Diyot pompalı Yb:LLF lazerlerinde sürekli-dalga, dalgaboyu ayarlama ve SESAM ile mod-kilitleme.....	109
6. KAYNAKLAR	111
ÖZGEÇMİŞ	



AKADEMİK BEYAN

Doktora Tezi olarak sunduğum “Cr:Colquiriite’lerde Spektroskopik Özelliklerin Sıcaklığa Bağlı Ölçümü ve Diyot Pompalı Cr:LiCAF, Yb:YLF ve Yb:LLF Lazer Sistemlerinin Geliştirilmesi” adlı bu çalışmanın, akademik kurallar ve etik değerlere uygun olarak yazıldığını belirtir, bu tez çalışmasında bana ait olmayan tüm bilgilerin kaynağını gösterdiğimi beyan ederim.

18/01/2024

Serdar Okuyucu

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

$\chi^{(2)}$	: İkinci dereceden doğrusal olmayan duyarlılık
$\chi^{(3)}$	: Üçüncü dereceden doğrusal olmayan duyarlılık
n	: Kırılma indisi
T	: Sıcaklık
τ_f	: Üst durum floresan ömrü
τ_R	: Işınımsal ömür
σ_e	: Emisyon kesiti
σ_a	: Absorpsiyon kesiti
h	: Planck sabiti
ν_p	: Pompa foton frekansı
η_p	: Pompalama verimi
w_p	: Pompa ışın beli
w_c	: Kavite ışın beli
σ_{ESA}	: Uyarılmış durum absorpsiyon kesiti
L	: Toplam kavite kaybı
T	: Çıkış kuplör iletimi
q_d	: Kuantum kusuru
R	: Yansıma
A	: Absorpsiyon
$N_{\%1}$	: %1-katkılı kristalde katkılama yoğunluğu
k	: İyon katkılama yüzdesi
f	: Odak uzaklığı

c : Vakumda ışık hızı

λ : Dalgaboyu

Kısaltmalar

ECS : Emisyon kesiti

ESA : Uyarılmış durum absorpsiyonu

ETU : Auger yukarı dönüşüm

IR : Kızıl ötesi

KLM : Kerr-Lens mod-kilitleme

LED : Işık yayan diyot

LN : Sıvı nitrojen

MMD : Çok modlu diyot

SESAM: Doyabilen soğurucu ayna

SMD : Tek-modlu diyot

SNR : Sinyal gürültü oranı

VUV : Vakum ultraviyole

Tezde ondalık yazım kullanılmakta ve ondalık ayırıcı (“.”) noktaadır.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. a) LiCAF kristalinin birim hücre yapısı b) LiCAF birim hücre yapısının c-ekseni projeksiyonu.....	2
Şekil 1.2. a) Czochralski yöntemiyle büyütülmüş Cr:LiCAF kazanç ortamı örnekleri; b) spektroskopik karakterizasyon ve lazer operasyonunda kullanılmak üzere farklı geometrilerde kesilmiş Cr:LiCAF kristal örnekleri	2
Şekil 1.3. Emisyon kesiti ve floresan ömrünün sıcaklığa bağlı değişiminin incelendiği deneylerde kullanılan Cr:Colquiriite kristalleri.....	3
Şekil 1.4. Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristallerinin oda sıcaklığındaki (295 K) absorpsiyon ve emisyon kesitleri	5
Şekil 1.5. Alexandrite kazanç ortamı sıcaklığının 34-310° C aralığında değiştirilmesi ile a) Alexandrite lazer enerjisinin pompa enerjisine göre değişimi; b) Sabit pompa gücü altında Alexandrite lazer çıkış enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi	6
Şekil 1.6. Cr:Colquiriite’lerde termal yüklemeye neden olan a) kuantum kusuru; b) termal sönümlenme; c) lazer dalga boyunda uyarılmış durum emilimi; d) Auger yükseltgenmesi etkileri.....	8
Şekil 1.7. Sıcaklığın Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarının floresan ömürleri üzerindeki ölçülmüş etkisi	10
Şekil 1.8. Oda sıcaklığında ölçülmüş a) Yb:LLF absorpsiyon kesiti; b) Yb:LLF emisyon kesiti; c) Yb:YLF absorpsiyon kesiti; d) Yb:YLF emisyon kesiti	16
Şekil 3.1. Sıcaklığa bağlı emisyon kesiti ve floresan ölçümlerinde kullanılmış a) Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF; b) Cr:LiCAF kristalleri.....	31
Şekil 3.2. Çubuk geometrisinde kesimli Cr:LiCAF kazanç ortamının absorpsiyon ölçümü için kullanılan a) deney düzeneği; b) uyarılmış Cr:LiCAF kristali	32
Şekil 3.3. USHIO HL65221DG tekli-mod lazer diyotuna ait a) çıkış gücü eğrisi; b) emisyon spektrumu	33
Şekil 3.4. Çoklu-mod lazer diyotuna ait a) çıkış gücü eğrisi; b) emisyon spektrumu....	33
Şekil 3.5. a) 78 - 300 K; b) 300 - 618 K aralıkları için kullanılan sıcaklığa bağlı floresan ömrü ölçüm düzeneklerinin basitleştirilmiş şeması	34
Şekil 3.6. a) Cr:LiCAF kazanç ortamı için oda sıcaklığında ölçülen floresan düşüş eğrisi örneği; b) 78-618 K aralığında 1 K'lık artışlarla ölçülen Cr:LiCAF floresan düşüş eğrileri	34
Şekil 3.7. a) Bakır tutucu içerisine yerleştirilmiş Cr:LiSAF; b) Kristali tutucusunun dewar kazanı içerisine sıcaklık sensörü ile birlikte monte edilmesi; c) Kapatılarak dış ortamdan izole edilmiş dewar kazanı	35

Şekil 3.8. Cr:LiSGaF kristalinin floresan ömrünün kriyojenik sıcaklıklarda ölçümünde kullanılan ölçüm düzeneğinin farklı açılardan fotoğrafları.....	36
Şekil 3.9. Oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda floresan ömrü ölçümü için ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiş a) Cr:LiCAF; b) Cr:LiSGaF kristali.....	36
Şekil 3.10. a,b) Cr:LiCAF & Cr:LiSGaF; c,d) Cr:LiSAF için sıcaklığa bağlı ECS ölçüm düzeneklerinin basitleştirilmiş şeması.....	37
Şekil 3.11. a) Kriyojenik (Cr:LiSAF için gösterilmiş) sıcaklıklarda; b) oda sıcaklığı üstündeki sıcaklıklarda (Cr:LiCAF için gösterilmiş) ECS ölçümü için kullanılan ölçüm düzenekleri	38
Şekil 3.12. a) 78-618 K aralığında Cr:LiCAF için emisyon kesitinin a) E//c; b) E//a polarizasyonunda sıcaklıkla ölçülen değişimi.....	39
Şekil 3.13. a) E//c; b) E//a için kristal absorpsiyonu ölçüm düzeneği; c) absorpsiyon ölçüm deneyleri sırasında 20mm uzunluğundaki uyarılmış Cr:LiCAF kristal fotoğrafı	40
Şekil 3.14. 20 mm uzunluğunda Brewster kesimli Cr:LiCAF kristalinin güç ölçekleme ve pasif kayıp tahmininde kullanılan tek-diyot pompalı lazer sistemi	42
Şekil 3.15. 20 mm uzunluğunda Brewster kesimli Cr:LiCAF kristali ile oluşturulmuş tek diyot pompalı sürekli-dalga lazerinin güç eğrisi.....	42
Şekil 3.16 Findlay-Clay yöntemi ile 20 mm uzunluğundaki Cr:LiCAF kristalinin pasif kaybının hesaplanması	43
Şekil 3.17. Çok-modlu diyot pompalı Cr:LiCAF kavitesinin sürekli-dalga ve Q-anahtarlamalı operasyonu için deneysel kurulumu	44
Şekil 3.18. İki tarafından çok-modlu diyotlarla pompalanan, SESAM ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerinin fiziksel kurulumu	45
Şekil 3.19. Tek katmanlı yüksek-yansıtıcı kaplı 800 nm SBR aynası için kırılma indisi profili ve her katmanın fiziksel kalınlığı	46
Şekil 3.20. Kaplamasız, tek-katmanlı HR kaplamalı ve iki-katmanlı HR kaplamalı 800 nm SBR'lar için hesaplanan küçük sinyal ve doymuş yansıtma eğrileri.....	46
Şekil 3.21. Kübik geometride üretilmiş ve aktif bölgesi %25 Yb-katkılanmış Yb:LLF ve Yb:YLF örnekleri	48
Şekil 3.22. Thorlabs L960H1 tek-modlu lazer diyotun a) çıkış güç ölçeklemesi; b) farklı besleme akımlarında ölçülmüş optik spektrumu	48
Şekil 3.23. LDX-3A10-960-C2 çok-modlu lazer diyotunun a) çıkış gücü eğrisi, b) diyot sıcaklığına bağlı ölçülmüş emisyon spektrumu	49

Şekil 3.24. Mod-kilitli lazer operasyonu deneylerinde kullanılan ayna setine ait yansıma ve dispersiyon karakteristikleri.....	51
Şekil 3.25. a) Çift taraflı diyot pompalı Yb:YLF lazer osilatörün sürekli dalga ve 1.1 GHz tekrarlama frekansında mod kilitli çalışma şeması; b) Z-katlanmış lazer boşluğunun fotoğrafı	52
Şekil 3.26. Sürekli dalga rejimde çalışmak üzere SESAM yerine yüksek yansıtıcı ayna kullanılan Yb:YLF lazer sistemi.....	53
Şekil 3.27 Yb:LLF kazanç ortamı ile oluşturulmuş farklı çalışma rejimlerinde kullanılan kavite yapısı	54
Şekil 3.28. Yb:LLF kazanç ortamının kullanıldığı a) dalgaboyu ayarlama deney düzeneği; b) mod-kilitli deneylerde kullanılan ve tutucuya yerleştirilmiş örnek bir SESAM	55
Şekil 3.29. Çok-modlu diyot pompalı, pasif mod-kilitli Yb:LLF lazer sisteminde kullanılan SESAM'a (BATOP SAM-1040-2-1ps-x) ait düşük uyarım şiddetinde spektral yansıma ve dispersiyon karakteristiği	56
Şekil 3.30. Tek-modlu diyot pompalı, pasif mod-kilitli Yb:LLF lazer sisteminde kullanılan SESAM'a (BATOP SAM-1040-1.5-1ps-x) ait düşük uyarım şiddetinde spektral yansıma karakteristiği.....	57
Şekil 4.1. a) Cr:LiCAF; b) Cr:LiSAF; c) Cr:LiSGaF için floresan ömrünün sıcaklığa ölçülen bağımlılığı	59
Şekil 4.2. Cr:LiCAF'ın E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin sıcaklığa bağlı olarak ölçülen özellikleri: a) 77 K ve 300 K'de ECS; b) 78 K ve 300 K'de logaritmik ölçekte normalleştirilmiş emisyon spektrumları; c) ECS'nin pik değerinin değişimi; d) 78-618 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumda tam genişliği	64
Şekil 4.3. Cr:LiSAF için E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin sıcaklığa bağlı olarak ölçülen özellikleri: a) 77 K ve 300 K'de ECS; b) 78 K ve 300 K'de logaritmik birimlerde normalleştirilmiş emisyon spektrumları; c) ECS'nin pik değerinin değişimi; d) 78-443 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumda tam genişliği	66
Şekil 4.4. Cr:LiSGaF'ın E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin ölçülen sıcaklığa bağlı özellikleri: a) 77 K ve 300 K'de ECS; b) 78 K ve 300 K'de logaritmik birimlerde normalleştirilmiş emisyon spektrumları; c) ECS'nin pik değerinin değişimi; d) 78-463 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumda tam genişliği	68
Şekil 4.5. Sürekli dalga Cr:LiCAF lazerin %0.35-%2.75 aralığında ilettime sahip dört farklı çıkış kuplörü ile alınan güç verimliliği verileri	72

Şekil 4.6. Farklı diyot akımı veya pompa gücü seviyelerinde (1.1 A'de 0.85 W, 2.3 A'de 3.5 W) %0.7 çıkış kuplajı altında sürekli dalga lazerin ölçülen optik spektrumu	73
Şekil 4.7. SESAM ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin ölçülen güç verimliliği verileri ...	74
Şekil 4.8. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin darbe genişliğinin emilen pompa gücü miktarına göre değişimi. Veriler %0.35-2.75 aralığında farklı çıkış kuplörleri kullanılarak alınmıştır	75
Şekil 4.9. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin tekrarlama frekansının emilen pompa gücü miktarına göre değişimi. Veriler %0.35-2.75 aralığında farklı çıkış kuplörleri kullanılarak alınmıştır	76
Şekil 4.10. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin farklı zaman ölçeklerinde ölçülen zaman dinamikleri: a) 2 ms; b) 500 µs; c) 100 µs; d) 8 µs (Veriler, lazer çıkış gücü 109 mW iken, 3.13 W emilen güçte 1 katman HR kaplı SBR ile %0.7 OC kullanılarak alınmıştır. Atma genişliği ve tekrarlama frekansı sırasıyla 1.82 µs ve 36.8 kHz'dir).....	77
Şekil 4.11. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışında elde edilen darbe dizisinin geniş frekans aralığında ölçülen örnek radyo frekansı spektrumu	78
Şekil 4.12. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışında elde edilen darbe dizisinin 31.8 kHz tekrarlama frekansı civarında ölçülmüş örnek radyo frekansı spektrumu	79
Şekil 4.13. Q-anahtarlı (1HR SESAM ile) Cr:LiCAF lazerinde dört farklı çıkış kuplajı için ölçülen tepe gücü (2HR SESAM'ın %0.68 çıkış kuplajı ile kullanıldığı ek bir durum dahil edilmiştir)	80
Şekil 4.14. Q-anahtarlı (1HR SBR ile) Cr:LiCAF lazerinde dört farklı çıkış kuplajı için ölçülen atma enerjisi (2HR SBR'ın %0.68 çıkış kuplajı ile kullanıldığı ek bir durum dahil edilmiştir).....	80
Şekil 4.15. Q-Anahtarlı Cr:LiCAF lazerin 1-HR kaplı ve 2 HR kaplı 800 nm SESAM ile farklı çıkış kuplaj seviyelerinde alınan optik spektrumu. (İçteki resim her bir durum için ölçülen ışın profilini göstermektedir)	82
Şekil 4.16. Sürekli dalga ve SESAM ile pasif pasif kilitli çalışma durumlarında Yb:YLF lazerinden %0.5 çıkış kuplajı ile ölçülmüş lazer verimliliği eğrileri.....	83
Şekil 4.17. a) Sürekli-dalga rejiminde 90 mW çıkışta (HR ile, kırmızı) ve sürekli-dalga mod-kilitli rejimde 40 mW çıkışta (SBR ile, mavi) ölçülen normalleştirilmiş optik spektrum; b) 1.1 GHz tekrarlama frekansına sahip darbe dizisinin otokorelasyonu	85
Şekil 4.18. 1.11 GHz'de sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının a) dar frekans aralığında; b) geniş frekans aralığında ölçülmüş radyo frekansı spektrumu	85
Şekil 4.19. CW mod kilitli lazer çıkışının 1.11 GHz Yb:YLF lazerden gelen yoğunluk gürültüsü.....	86

Şekil 4.21. Çoklu-mod diyot pompalı sürekli-dalga Yb:LLF lazerinde güç ölçekleme karakteristiği.....	88
Şekil 4.22. Çok-modlu diyot pompalı sürekli-dalga Yb:LLF lazerinde dalgaboyu ayarlama karakteristiği	89
Şekil 4.23. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 200 MHz tekrarlama frekansında 337 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu.....	90
Şekil 4.24. a) SESAM ve yüksek yansıtıcılı ayna kullanılan durumlar için lazer çıkış gücü ölçeklemesi; b) 200 MHz’de tekrar eden 337 fs uzunlukta atmların zaman düzleminde ölçülmüş örnek dizisi.....	90
Şekil 4.25. Maksimum pompa gücünde lazer çıkışında ölçülmüş a) otokorelasyon izi; b) RF spektrumu	91
Şekil 4.26. Sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının a) 2.5 W çıkış gücünde; b) farklı pompa güçlerinde ölçülmüş normalize edilmiş optik spektrumu	92
Şekil 4.27. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 257 MHz tekrarlama frekansında 181 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu.....	93
Şekil 4.28. a) Çok-modlu diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama lazer çıkış gücü; b) farklı pompa güçlerinde elde edilen q-anahtarlı ve mod-kilitli rejimlerde ölçülen optik lazer spektrumu	93
Şekil 4.29. Maksimum pompa gücünde elde edilen 2.5 W ortalama çıkış gücünde mod-kilitli atma dizisine ait a) otokorelasyon izi; b) radyo frekans spektrumu.....	94
Şekil 4.30. Farklı pompa güçlerinde elde edilen a) Q-anahtarlı ve b) sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkış profillerinin zaman düzleminde gösterimi.....	94
Şekil 4.31. Çok-modlu diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 214 MHz tekrarlama frekansında 110 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu.....	95
Şekil 4.32. a) Çok-modlu diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama lazer çıkış gücü, b) sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen optik lazer spektrumu.....	96
Şekil 4.33. 600 mW ortalama çıkış gücünde mod-kilitli atma dizisine ait a) otokorelasyon izi, b) radyo frekans spektrumu.....	96
Şekil 4.34. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 355 MHz tekrarlama frekansında 45 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu.....	97
Şekil 4.35. Yb:LLF lazerinin a) Çoklu-mod diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama çıkış gücü (kararlı mod-kilitli rejim aralığı gösterilir); b) sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen otokorelasyon izi	98
Şekil 4.36. 355 MHz tekrarlama frekansında 145 fs uzunluğa sahip atmlar dizisi için ölçülen a) RF spektrumu; b) optik spektrum	99

Şekil 4.37. 350 MHz tekrarlama frekansında 145 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin zaman düzleminde a) dar; b) geniş ölçeklerde ölçülmüş şiddetleri.....	99
Şekil 4.38. SESAM ile mod-kilitli operasyonda, Yb:LLF versiyonu ile kıyaslamak üzere kurulmuş Yb:YLF kavitesi	100
Şekil 4.39. Yb:YLF lazerinin a) çoklu-mod diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama çıkış gücü (kararlı mod-kilitli rejim aralığı gösterilir); b) sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen optik spektrum	100
Şekil 4.40. SESAM mod-kilitli Yb:YLF lazer çıkışında 374.7 MHz tekrarlama frekansı ve 157 fs uzunluğuna sahip atma dizisi için ölçülen a) otokorelasyon izi, b) RF spektrumu	101
Şekil 4.41. 374 MHz tekrarlama frekansında 157 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin zaman düzleminde a) dar; b) geniş ölçeklerde ölçülmüş şiddetleri.....	101
Şekil 4.42. İki tarafından tek-modlu diyotlarla pompalanmış sürekli-dalga Yb:LLF lazer kavite şematığı.....	102
Şekil 4.43. a) Tek; b) iki adet tek-modlu diyot ile pompalanan sürekli-dalga Yb:LLF lazer sistemlerinin ölçülmüş güç ölçekleme karakteristiği	103
Şekil 4.44. İki taraftan SMD pompalı, SESAM ile pasif mod-kilitli 300 MHz tekrarlama frekanslı Yb:LLF femtosaniye osilatör şematığı	104
Şekil 4.45. SMD pompalı, mod-kilitli Yb:LLF lazer (%0.4 OC ile) çıkışında a) ölçülen optik spektrum, b) osiloskopta kaydedilen darbe dizisi	104
Şekil 4.46. SMD pompalı SESAM ile mod-kilitli Yb:LLF lazer (%0.4 OC ile) çıkışının a) 299 MHz temel frekans etrafında; b) geniş aralıkta ölçülmüş RF spektrumu.....	105
Şekil 4.47. İki taraftan SMD pompalı, SESAM ile pasif mod-kilitli 300 MHz tekrarlama frekanslı Yb:LLF femtosaniye osilatör (%1 OC ile) şematığı.....	105
Şekil 4.48. SMD pompalı, mod-kilitli Yb:LLF lazer (%1 OC ile) çıkışında a) ölçülen optik spektrum, b) osiloskopta kaydedilen darbe dizisi.....	106
Şekil 4.49. SMD pompalı SESAM ile mod-kilitli Yb:LLF lazer (%1 OC ile) çıkışının a) 316 MHz temel frekans etrafında; b) geniş aralıkta ölçülmüş RF spektrumu.....	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Literatürde Rapor Edilmiş GHz Tekrarlama Oranlarına Sahip Yb-Katkılı Ortama Dayalı Pasif Mod Kilitli Diyot Pompalı Lazerler	29
Çizelge 4.1. Cr:Colquiriite'lerde ölçülen floresan ömrünün analitik tanımında (Eşitlik 4.3) kullanılan ampirik uyum parametreleri.....	61
Çizelge 4.2. Seçilen sıcaklıklarda Cr:Colquiriite'ler için ölçülen ve/veya hesaplanan ışınlımlı ömür, floresan ömrü ve floresan kuantum verimliliklerinin temsili değerleri (karşılaştırma için literatürden daha önceki raporlar da dahil edilmiştir)	62
Çizelge 4.3. Cr:Colquiriite'lerin E//a ve E//c polarizasyonlarındaki sıcaklığa bağlı pik emisyon dalga boyunun Eşitlik (4.5) ile tanımlanmasında kullanılan katsayılar	69
Çizelge 4.4. Cr:Colquiriite'lerin E//a ve E//c polarizasyonlarındaki sıcaklığa bağlı pik kesit alanının Eşitlik (4.6) ile tanımlanmasında kullanılan katsayılar ...	70
Çizelge 4.5. Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı emisyon spektrum genişliğinin Eşitlik (4.7) ile tanımlanmasında kullanılan uyum değerleri	70
Çizelge 4.6. Seçilen sıcaklıklarda Cr:Colquiriite'ler için ölçülen/hesaplanan pik emisyon dalga boyu, pik emisyon kesiti ve emisyon bant genişliğinin temsili değerleri.....	71

1. GİRİŞ

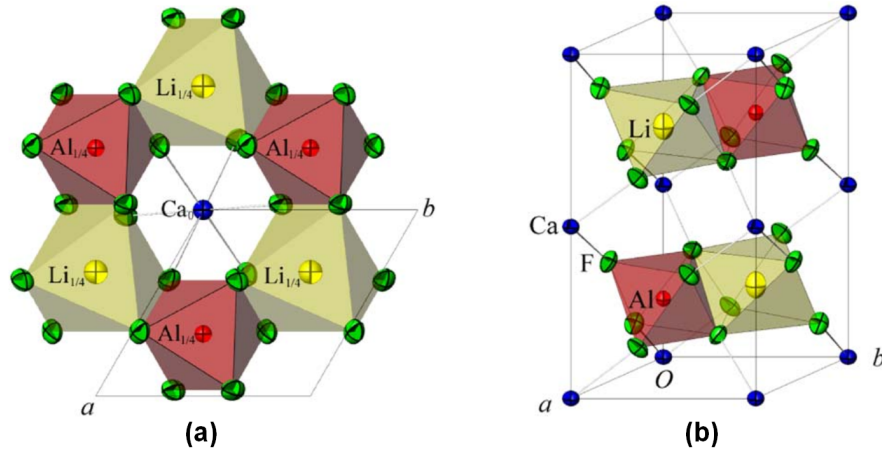
Albert Einstein'ın "Quantum theory of radiation" başlıklı meşhur makalesinin 1917 yılında yayınlanması ile birlikte ışığın uyarılmış ışıma ile yükseltilmesi fikrinin teorik temelleri atılmıştır. Bu fikrin pratiğe dökülerek tarihte ilk lazer operasyonunun deneysel olarak gösterilmesi 1960 yılında T. Maiman tarafından kurulmuş olan ve flaş lambalarının uyarım mekanizması olarak kullanıldığı bir ruby kristal lazeri ile mümkün olmuştur (Maiman 1960; Hecht 2010). Bu tarihten günümüze kadar geçen süreçte binlerce farklı türde kazanç ortamı için (bunların birçoğu birden fazla dalga boyunda emisyon yapabilir) lazer operasyonu gösterilmiş olup, bunların arasından birkaç yüz tanesi sık kullanım alanı bulmuştur. Bu kazanç ortamları arasından da yaklaşık on tanesi lazer alanının ticari, uygulama ve araştırma yönlerinin büyük bir çoğunluğunu domine etmektedir (Ti:safir ve Yb:YAG kristalleri, ultra hızlı lazer teknolojisi alanı için örnek olarak verilebilir) (Kaminskii 2013; Weber 2018).

Bu tez çalışmasının konu kapsamının genel çerçevesi, lazerlerin bir alt sınıflandırma kümesi olan katı-hal lazerleri kategorisi içerisinde yer almaktadır. Katı-hal lazerleri kendi içerisinde, kullanılmakta olan kazanç ortamının katılanmasında kullanılan paramanyetik iyonlara bağlı olarak nadir toprak elementi ve geçiş metali katkı katı-hal lazerleri olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş deneysel çalışmalarda kullanılan Cr^{+3} iyon katkı $\text{Cr}:\text{LiCAF}$, $\text{Cr}:\text{LiSAF}$ ve $\text{Cr}:\text{LiSGaF}$ kazanç ortamları geçiş metali katkı ortamlar kategorisi içerisinde, Yb^{+3} iyon katkı Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamları ise nadir toprak elementi katkı ortamlar altında sınıflandırılmaktadır.

1.1 Cr:Colquiriite'lerde Spektroskopik, Opto-termo-mekanik Özellikler ve Lazer Operasyonu

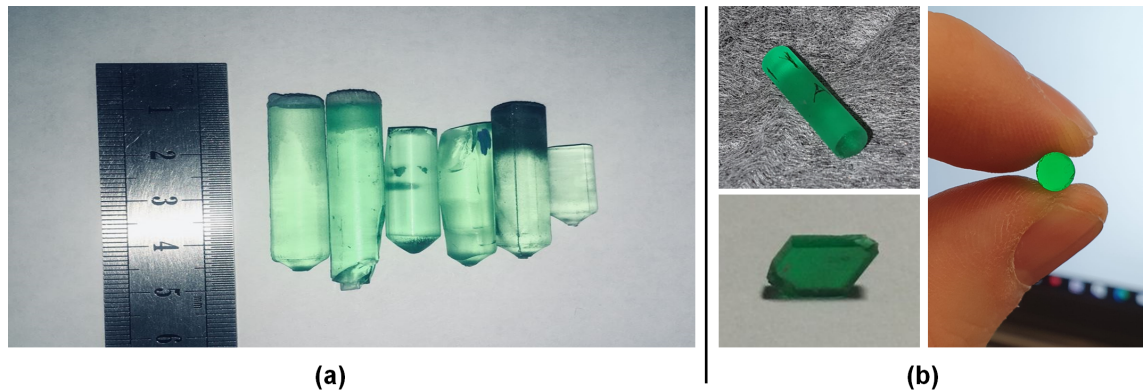
Geçiş metali katkı kazanç ortamları arasından, günümüze kadar geçen süreçte titanyum (Ti), vanadyum (V), krom (Cr), mangan (Mn), demir (Fe), kobalt (Co) ve nikel (Ni) geçiş metali elementlerinde lazer operasyonu gösterilmiş olup, bakır (Cu), gümüş (Ag) ve rodyum (Rh) geçiş metali elementlerinde ise kazanç karakteristiği rapor edilmiştir (Weber 2018). Bu manada, başarılı lazer/amplifikatör sistemlerinin tasarlanması, pratik kurulumu ve verimli operasyonunun sağlanmasında, ilgili kazanç ortamının pratik çalışma koşulları altında sahip olduğu optik, mekanik ve termal özelliklerin yanı sıra, soğurma ve emisyon kesitleri, küçük sinyal kazancı ve floresan ömrü gibi spektroskopik özelliklerin parametrik (sıcaklık, katkı iyon miktarı gibi) bağımlılığının detaylı bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Bir kazanç ortamının bu tür özellikleri ise, yapısına eklenen aktif iyon türlerinin ve konak malzemenin kendine has özelliklerinin birleşimi şeklinde kendini göstermektedir. Bu karakterize edici özelliklerden ışınımsız bozunma, yukarı dönüştürme, yer-durumu absorpsiyonu, Stokes kayması ve uyarılmış durum emilimi gibi etkiler yapıya eklenen aktif iyonlar ile ilgili iken, ikinci ($\chi^{(2)}$) ve üçüncü dereceden ($\chi^{(3)}$) doğrusal olmayan duyarlılıklar, optik hasar eşiği, termal iletkenlik, termo-optik sabit, kırılma indisinin sıcaklık katsayısı (dn/dT), termal genleşme katsayısı ve dispersiyon gibi etkiler ise host malzemesi ile ilgilidir. Dolayısıyla, pratik kullanımı gerçekleştirilecek olan kazanç ortamları ile lazer sisteminin ihtiyaçlar doğrultusunda doğru bir biçimde tasarlanabilmesi için, kullanılmakta olan iyon/konak malzeme kombinasyonu için mevcut çalışma şartları altındaki spektroskopik özelliklerin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Bu şekilde, ilgili kazanç ortamlarının

hedeflenen pratik uygulamalarda beklenen çalışma koşullarına dayanıklılığının tahmin edilmesi ve lazer dinamiklerinin kapsamlı bir şekilde modellenmesi mümkün olacaktır.



Şekil 1.1. a) LiCAF kristalinin birim hücre yapısı **b)** LiCAF birim hücre yapısının c -ekseni projeksiyonu (Kuze vd. 2004)

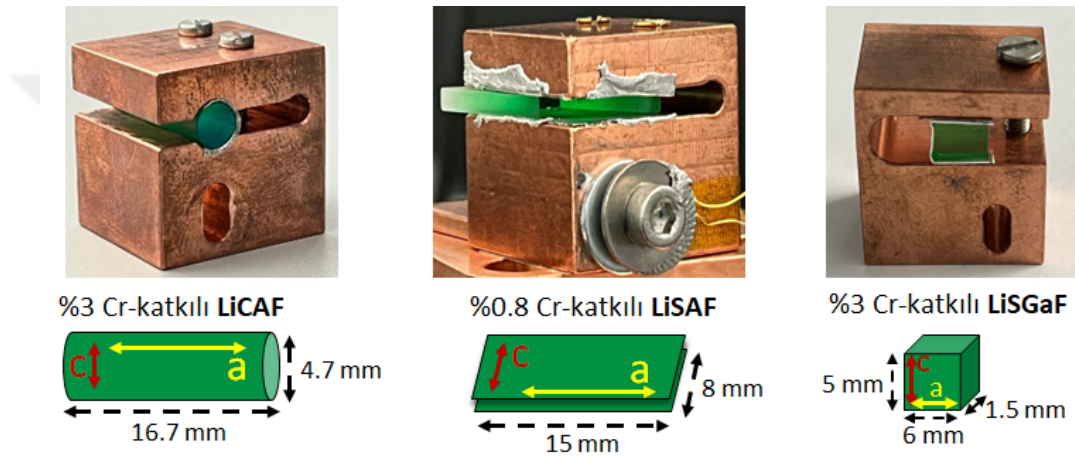
Colquiriite (ismini Bolivya'da keşfedildiği Colquiri kalay madeninden alır) kazanç ortamları arasından, Cr:LiSAF (Payne vd. 1989, 1994), Cr:LiCAF (Payne vd. 1988; Payne vd. 1991; Scheps vd. 1990) Cr:LiSGaF (Smith vd. 1992) ve Cr:LiSCAF (Chai vd. 1992) malzemeleri Cr^{+3} iyon katkılı önemli örnekleri oluşturmaktadır. Bu tez çalışması kapsamında hedeflenen özgün değere sahip çıktılardan ilki, üç farklı Cr:Colquiriite kazanç ortamına (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF) ait floresan ömrü ve $E//c$ ve $E//a$ eksenlerindeki emisyon kesitinin sıcaklığa bağlı değişiminin deneysel olarak ortaya çıkarılmasıdır. Burada verilen malzemelere ait kristal yapısına örnek oluşturması açısından, Cr^{+3} iyon katkısı eklenmemiş Colquiriite konak malzeme yapı örneklerinden LiCAF için verilmiş olan yapısal diyagram örneği Şekil 1.1a ve Şekil 1.1b'de gösterilmiştir (Kuze vd. 2004). Bu düzende LiCAF konak malzemesi içerisine Cr^{3+} iyon katkısı eklenmesi ile Cr^{3+} iyonu Al^{3+} katyonunun yerini alır ve sonuç olarak oktahedral bir düzenlemede altı flor ile çevrelenir (Avram vd. 2003).



Şekil 1.2. a) Czochralski yöntemiyle büyütülmüş Cr:LiCAF kazanç ortamı örnekleri; **b)** spektroskopik karakterizasyon ve lazer operasyonunda kullanılmak üzere farklı geometrilerde kesilmiş Cr:LiCAF kristal örnekleri

Cr:Colquiriite örneklerinin büyütülmesi ile ortaya çıkan fiziksel yapının gösterilmesi adına, Şekil 1.2a’da 119E264 numaralı Tübitak 1001 projesi kapsamında ürettirilmiş olan Cr:LiCAF kazanç ortamları (soluk yeşil rengini yapıya eklenen Cr^{3+} iyonlarından alır) gösterilmektedir. Büyütme sonucu ortaya çıkan ve farklı amaçlarla kullanım için farklı geometrilerde kesilmiş olan Cr:LiCAF kristal örnekleri de Şekil 1.2b’de gösterilmiştir.

Bu tez çalışmasının başlangıcındaki kapsamı, Antalya Bilim Üniversitesi Lazer Teknoloji Laboratuvarı envanterinde bulunan Cr:LiCAF örneklerinin spektroskopik özelliklerinin parametrik bağımlılığının araştırılmasını içermekte iken, Tübitak 2214A doktora sırası araştırma desteği kapsamında, Almanya (Hamburg)’da bulunan Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY) kurumunda yapılan araştırma faaliyetleri sırasında, Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) kurumu tarafından sağlanan uygun özellikte Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristalleri de araştırma kapsamına dahil edilmiştir.



Şekil 1.3. Emisyon kesiti ve floresan ömrünün sıcaklığa bağlı değişiminin incelendiği deneylerde kullanılan Cr:Colquiriite kristalleri

Bu şekilde, tez çalışması kapsamında Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF kristallerinin (Şekil 1.3’te uygun bakır soğutucu içerisine yerleştirilmiş şekilde gösterilmiş) tümü için floresan ömrü ve emisyon kesit alanının sıcaklığa bağlı karakterizasyonu üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

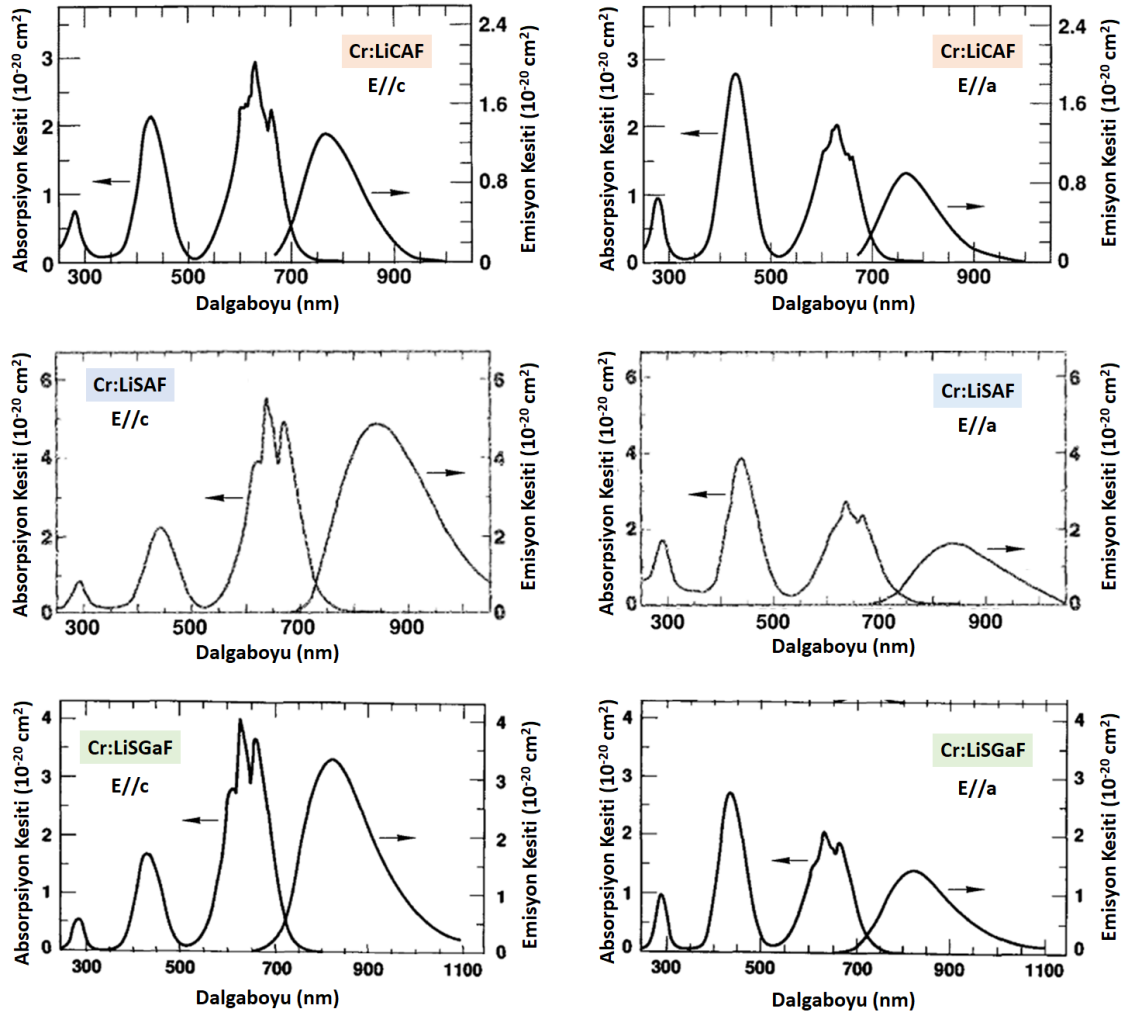
1.1.1 Emisyon kesiti

Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında güçlü elektron-fonon eşleşmesi ~ 275 nm, ~ 445 nm ve ~ 640 nm (Payne vd. 1990) etrafında merkezlenen üç yoğun ve geniş absorpsiyon bandı oluşturur. Bunlardan 640 nm geçişi ($^4A_2 - ^4T_2$ uyarımı), 100 nm’ye yaklaşan maksimum yarısı tam genişlik değerine sahip olmakla birlikte trigonal kristal yapısına sahip olan Cr:Colquiriite’lerde hem $E//a$ hem de $E//c$ eksenleri için güçlüdür. Bu geniş absorpsiyon bandı, kırmızı spektral bölgede düşük maliyetli ve iyi geliştirilmiş AlGaAs ve AlGaInP tabanlı diyotlar ile Cr:Colquiriite’lerin doğrudan pompalanmasına imkân vermektedir. Bu kristaller, geniş aralıkta ayarlanabilen lazer çalışma dalgaboyu (720-1110 nm) ve mod-kitleme yoluyla 10-fs altı darbelerin üretilmesine olanak tanıyan yakın kızılötesi geniş emisyon bantlarına sahip olup, ayrıca $\sim 0.2/\text{cm}$ gibi çok düşük kayıp seviyesine sahip olacak şekilde büyütülebilmektedirler (Demirbas, 2019).

Öte yandan, Cr:Colquiriite'ler ile güç ölçeklendirme çabaları, nispeten zayıf termomekanik özelliklerinin yanı sıra termal söndürme, uyarılmış hal emilimi (ESA) ve Auger yükseltgenmesi (ETU) gibi çeşitli istenmeyen termal yüklenme mekanizmalarının varlığı nedeniyle oldukça zor olmuştur (Woods vd. 1991; Uemura 1997; Isemann 2003; Demirbas 2016, 2018, 2019). Örnek olarak, Cr:LiSAF'ın termal iletkenliği Ti:Safir'inkinden daha düşüktür ve Yb:YAG değerinin sadece dörtte biri kadardır (Demirbas, 2019). Sonuç olarak, görece düşük kuantum kusur seviyelerine (%15-25) rağmen, düşük termal iletkenlikleri, Cr:Colquiriite kristallerinin nispeten hızlı ısınmasına neden olur ve bu da floresan ömrünün sıcaklıkla söndürülmesi ile ek ısıtma mekanizmalarının ortaya çıkmasına neden olur. Olumlu tarafta ise, Cr:Colquiriite'lerde termal mercekleme oldukça zayıftır çünkü sıcaklığa bağlı kırılma indisinin neden olduğu termal mercekleme, kristallerin içindeki fotoelastik stresin neden olduğu ters mercekleme etkisiyle telafi edilir (Eichenholz 1998). Ek olarak, oda sıcaklığında, Cr:Colquiriite'ler, Ti:safir'den ~20-50 kat daha uzun olan üst durum floresan ömürlerine (τ_f) sahiptir (Cr:LiSAF'ta 67 μ s, Cr:LiCAF'de 175 μ s, Ti:safir'de 3.2 μ s (Druon 2007)). Diğer taraftan, Cr:Colquiriite'ler orta düzeyde emisyon kesit değerlerine (σ_{em}) sahiptir, ancak burada bahsedilen daha uzun floresan ömürleri nedeniyle Cr:Colquiriite'lerin kazanç çarpanı ($\sigma_e \times \tau_f$), Ti:safir ile kıyaslandığında ~2-2.5 kat daha yüksektir. Bu durum, düşük pasif kayıplı kristallerin üretilebilme avantajı ile birlikte, Cr:Colquiriite'lerde rekor derecede düşük lazer eşikleri (1 mW altı) ve nispeten yüksek eğim verimliliklerine (%50'nin üzerinde) sahip lazer sistemlerinin oluşturulmasına imkân sağlamaktadır (Vaclav 2003). Günümüze kadar sürekli-dalga, yarı sürekli-dalga ve sürekli-dalga mod-kilitli rejimlerde Cr:Colquiriite lazerlerinden elde edilebilir ortalama güç seviyelerini geliştirmeye yönelik birçok çalışma yapılmış olup (Kopf 1997; Klimek 2002; Samad 2007; Demirbas 2015a, b, 2016), Cr:Colquiriite'lerden elde edilebilen sürekli dalga lazer gücü seviyeleri Cr:LiSAF'ta 3 W (Kopf 1997; Dergachev 2007; Demirbas 2015), Cr:LiCAF'ta 2.5 W (Demirbas, 2015) ve Cr:LiSGaF'ta 1.2 W (Smith vd. 1992) ile sınırlı kalmıştır. Daha yüksek ortalama güç seviyelerine şimdiye kadar sadece çok düşük tekrarlama oranlarında darbeli çalışmada ulaşılmıştır (15 Hz'de 2 J darbe (Samad vd. 2007), 5 Hz'de 8.8 J darbe (Klimek ve Mandi 2002)).

Farklı türde kazanç ortamları ile kurulmuş lazer sistemlerinin kıyaslanmasında sıklıkla isimlerinden söz ettiğimiz absorpsiyon kesiti, emisyon kesiti ve floresan ömrü, bu çalışmada kullanılan Cr³⁺-katkılı katı hal kazanç ortamları için beklenen pompalama özellikleri ve verim eğrisi hakkında temel bilgileri sağlayan en önemli üç spektroskopik özelliği oluşturmaktadır. Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamları için literatürde yer alan ve oda sıcaklığında ölçülmüş absorpsiyon ve emisyon spektrumları Şekil 1.4'te verilmiştir. Yapısal olarak her üç için, katkılanan Cr³⁺ iyonlarının Al³⁺ iyonlarının yerini aldığı Colquiriite yapının varlığından ötürü absorpsiyon ve emisyon spektrumları benzer karakteristik özellikler göstermektedir. Ancak, daha önce Şekil 1.1a'da Cr:LiCAF yapısı için gösterildiği üzere, bahsi edilen kristaller trigonal yapıda olup, absorpsiyon ve emisyon karakteristikleri E//c ve E//a eksenlerinde farklı şiddete sahiptir. Şekil 1.4'te görüldüğü üzere, 650 nm etrafında pompalama için, her üç kristalde de E//c ekseninde absorpsiyon kesiti daha güçlüdür. Ayrıca E//c ekseninde emisyon kesit alanının (E//a eksenine kıyasla) yüksek olması, ilgili kristallerin pratik kullanımında E//c ekseninin tercih edilmesine yol açar. Cr:Colquiriite'lerin pompalanmasında geniş absorpsiyon bantlarının varlığı, daha önce de bahsedildiği üzere, 650 nm civarında ısıtma yapan düşük maliyetli AlGaAs ve/veya AlGaInP diyotların doğrudan kullanımı avantajını

beraberinde getirmekle birlikte, diyot parlaklığını arttırmak için farklı dalga boylarında birden fazla diyotun dalga boyu kuplajı ile birlikte kullanılmasına da imkân sağlamaktadır.

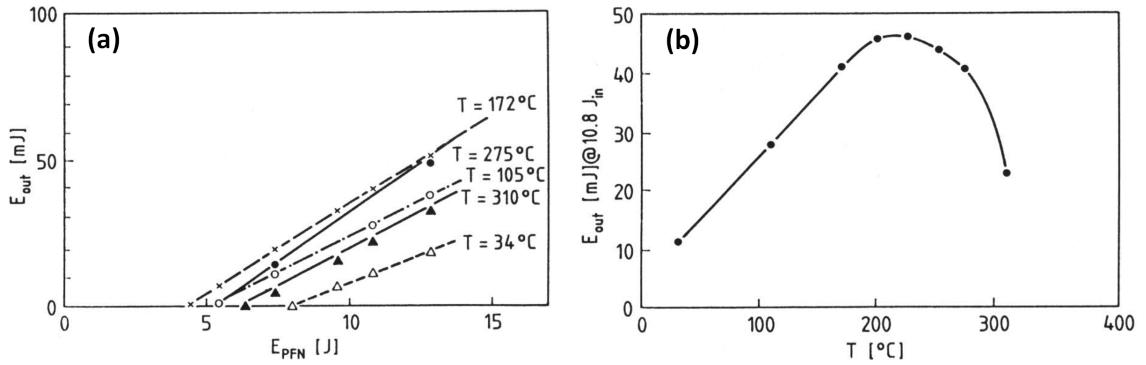


Şekil 1.4. Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristallerinin oda sıcaklığındaki (295 K) absorpsiyon ve emisyon kesitleri (Payne 1989, 1990; Smith 1992)

Colquiriite kazanç ortamlarının tez çalışması kapsamında araştırılan spektroskopik özelliklerinden ilki emisyon kesit spektrumunu ilgilendirmektedir. Şekil 1.4'te Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF malzeme örnekleri için gösterildiği üzere, Cr:Colquiriite kristalleri oda sıcaklığında 800-850 nm bölgesi etrafında merkezlenmiş geniş emisyon bantlarına sahiptirler. Uyarılmış durumda ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ geçişine karşılık gelen bu geniş emisyon spektrumunun varlığı lazer çalışma dalga boyunun bu aralıkta ayarlanabilmesini ve ultra-kısa uzunluğa sahip darbelerin üretimi ve amplifikasyonuna imkân vermektedir. Diyot pompalı pratik lazer operasyonlarında olası yüksek pompa gücüne bağlı olarak kristal içi sıcaklık oda sıcaklığından yüksek mertebelere (300 K ve üzeri) çıkabilmekte veya kristalin vakumlu bir hazne içerisinde özel soğutma yöntemleri (sıvı Helyum, sıvı Nitrojen soğutma gibi) ile kriyojenik sıcaklıklarda (4-300 K) operasyonu da mümkün olabilmektedir. Bu bağlamda, kullanımdaki kazanç ortamının emisyon kesit alanının sıcaklığa bağlı değişiminin bilinmesi, ilgili lazer sisteminin hedef

koşullardaki verimli ve güvenilir operasyonunu sağlamak üzere tasarlanması açısından önem taşımaktadır.

Emisyon kesitinin sıcaklığa bağlı değişiminin önemini vurgulamak adına Alexandrite kazanç ortamındaki davranış iyi bir örnek oluşturmaktadır. Sıcaklığı artırılan bir Alexandrite kristali için kazanç tepe noktası beklentiler dahilinde daha uzun dalga boylarına kayarken, kazançta artış, floresan ömründe ise azalma gözlemlenmektedir. (Koechner 2013)'te verilen ve Alexandrite'a ait basitleştirilmiş enerji seviye diyagramından hareketle, Alexandrite kazanç ortamının sıcaklığı arttıkça, Boltzmann dağılımına uygun olarak 2E seviyesinden 4T_2 seviyesine gerçekleşen artan geçiş ile uyarılmış emisyon kesitinde artış gözlenir. Ancak diğer taraftan sıcaklığın yükseltilmesi terminal seviyelerini doldurma eğiliminde olup aksi yönde lazer performansını düşürücü etkiye yol açar. Yükseltilmiş sıcaklıklardaki Alexandrite örneklerinde bu iki zıt etkinin birleşimi, 730nm'nin üzerindeki dalga boylarında lazer performansına pozitif etki olarak kendini göstermektedir. Şekil 1.5b'de bu etkinin gösterilmesinde, bir flaş lambasıyla pompalanan Alexandrite lazeri için, 34-310 °C sıcaklık aralığındaki lazer güç performansı gösterilmektedir. Burada artan sıcaklıklarla birlikte lazer çıkışında gözlenen dramatik iyileşme (200°C etrafında maksimuma ulaşır) alışılmışın dışında çarpıcı özellik taşımaktadır. Ayrıca lazer eşik gücü performansı (Şekil 1.5a) incelendiğinde, sıcaklık arttıkça lazer kazancının önemli ölçüde arttığı gözlemlenmektedir. Bu şekilde, Alexandrite kristalinde sıcaklığa bağlı olarak gözlenen bu sıradışı davranışın ortaya çıkarılması ve anlamlandırılmasında rol oynayan sıcaklığa bağlı emisyon kesiti bilgisinin Colquiriite malzemeleri için literatürde eksikliği, ilgili sıcaklıklarda Colquiriite malzemelerin davranışının açıklanması ve potansiyelinin ortaya konulmasında önemli bir eksiklik olarak ortaya çıkmaktadır. Sıcaklığa bağlı emisyon kesiti bilgisi ayrıca, kazanç ortamını soğutmak için kullanılacak tekniklerin tasarımında baş rolü oynayan kristal içi sıcaklık dağılımının görece yüksek tutarlılıkta tahmin edilmesine de imkân vermektedir.



Şekil 1.5. Alexandrite kazanç ortamı sıcaklığının 34-310° C aralığında değiştirilmesi ile **a)** Alexandrite lazer enerjisinin pompa enerjisine göre değişimi; **b)** Sabit pompa gücü altında Alexandrite lazer çıkış enerjisinin sıcaklığa bağlı değişimi (Koechner 2013)

Tez çalışması kapsamında yapılmış olan geniş literatür taramasından da görüldüğü üzere (bölüm 2.1'de detaylı olarak verilmiş), kriyojenik (4-300 K) ve oda sıcaklığının üzerindeki (>300 K) sıcaklıklarda Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristallerine ait emisyon kesitinin $E//c$ ve $E//a$ eksenlerindeki şiddetinin sıcaklığa bağlı değişimi rapor edilmemiştir. Tez çalışmasının bu alt bölümünün genel kapsamı, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamları için kriyojenik (sıvı nitrojen

soğutması ile 77 K'ye kadar) ve oda sıcaklığının üzerinde (618 K'e kadar) emisyon kesit alanının $E//c$ ve $E//a$ polarizasyonlarındaki şiddetinin sıcaklığa bağlı değişiminin deneysel olarak araştırılmasıdır. Buradan elde edilen bilgi birikimi ile farklı çalışma modlarında (sürekli dalga, Q-anahtarlı, mod-kilitli vb.) çalışan Cr:Colquiriite lazerlerin performans karakterizasyonunun gerçekleştirilmesinde ve bu özel çalışma şartlarındaki lazer dinamiğinin kapsamlı modellenmesinde kullanılmak üzere gerekli olan bilgi kaynağının ortaya çıkarılması hedeflenmektedir. Bu kapsamda ortaya konan çalışmaların özgün değeri, bahsi geçen Colquiriite kazanç ortamları için kriyojenik ve oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklardaki emisyon kesit karakteristiğinin ilk defa rapor edilmesidir. Bu alt kısım kapsamında yapılan deneyler sonucu elde edilen bulgular ile ortaya konulacak olan bilimsel değer, Colquiriite'ler arasında güç ölçekleme uygulamaları için en uygunu olarak gösterilmiş olan Cr:LiCAF kristali için öncelikli olmak üzere, farklı çalışma sıcaklıklarındaki lazer performans potansiyelinin ortaya çıkarılmasında en önemli rollerden birini oynayan sıcaklığa bağlı emisyon karakteristiğinin literatüre kazandırılması olacaktır. Buradan elde edilecek bulgular, floresan ömrü ölçüm bulguları ile bileştiğinde, lazer sistemi tasarımlarında ihtiyaç duyulan temel bilgi kaynağının ortaya çıkarılması ile optimum lazer sistem modeli ve pratik tasarımlarına ulaşarak, olası lazer sistemlerinin ilgili uygulama alanlarındaki (güç ölçekleme ve düşük zaman titremeli (timing jitter) mod-kilitli çalışma operasyonu gibi) kullanım potansiyelinin ortaya çıkarılmasının önü açılmaktadır.

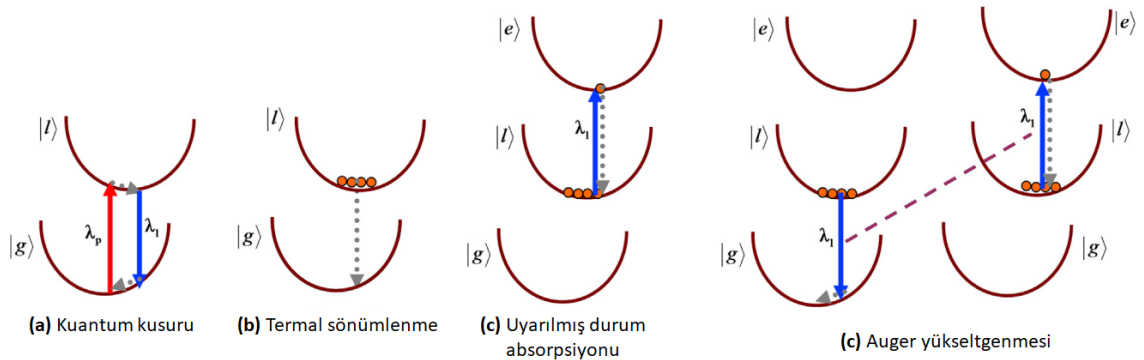
Tez çalışmasının bu alt kapsamı ile ilgili kaynak taraması bölüm 2.1'de verilmiştir. Bu alt bölüm kapsamında gerçekleştirilen deneysel faaliyetler Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristallerinde kriyojenik (78-300 K) ve 618 K'ye kadar yüksek sıcaklıklarda emisyon kesitinin sıcaklığa bağımlılığının yüksek sıcaklık çözünürlüğünde (5 K) ölçülmesini kapsamaktadır. Bildiğimiz kadarıyla bu çalışma, incelenen Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında emisyon kesitinin sıcaklığa bağımlılığını ayrıntılı olarak rapor eden ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır. İlgili deneylerde izlenen yöntemler bölüm 3.1'de sunulmuş olup, elde edilen bulgular pik emisyon dalga boyu, pik emisyon kesiti ve yarı maksimumda tam genişliği cinsinden tanımlayıcı analitik formüller ile birlikte ve literatür verileri ile kıyaslı biçimde bölüm 4.1'de verilmiştir. Rapor edilen sonuçlar, lazer mühendislerine ve bilim insanlarına oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleştirilecek Cr:Colquiriite tabanlı lazer ve amplifikatör sistemlerinin tasarlanmasında elzem olan temel bilgi birikimini oluşturmaktadır.

1.1.2 Floresan ömrü

Tez kapsamı dahilinde hedeflenen spektroskopik özellik karakterizasyonlarından ikincisi, Colquiriite kazanç ortamlarında floresan ömrünün sıcaklığa bağlı değişimini konu almaktadır. Floresans ömrü, emisyon kesiti ile birlikte spektroskopik özellikler yönünden lazer sisteminin lazer eşiğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Sürekli dalga çalışma rejiminde lazer eşik pompa gücü (P_{th}) analitik olarak (1.1) bağıntısında verilen şekli ile belirlenebilir (Payne vd. 1988; Findlay ve Clay 1966).

$$P_{th} = \frac{\pi(w_p^2 + w_c^2)}{4(\sigma_e - \sigma_{ESA})\tau_f} \frac{h\nu_p}{\eta_p} (2A_g + T + L) \quad (1.1)$$

Burada h Planck sabitini, ν_p pompa foton frekansını, η_p pompalama verimini, w_p ve w_c pompa ve kavite ışın belini, σ_e ve σ_{ESA} emisyon ve uyarılmış durum absorpsiyon kesit alanlarını, τ_f üst durum floresan ömrünü, A_g Cr^{+3} iyonlarının zemin seviyesi absorpsiyonunu, L toplam kavite kaybını, T ise çıkış kuplörünün iletimini ifade etmektedir. Burada tanımlanmış (1.1) bağıntısından hareketle, kristal davranışını ilgilendiren spektroskopik özelliklerin lazer eşik gücüne etkisi göz önüne alındığında, yüksek $\sigma_e \times \tau_f$ çarpımının düşük lazer eşik güçlerine imkân vereceği açıkça görülmektedir. Cr:Colquiriite kazanç ortamları için literatürde oda sıcaklığında ölçülmüş floresan ömürleri Cr:LiSAF için 60 μs , Cr:LiSGaF için 88 μs , Cr:LiCAF için ise 175 μs olarak verilmiş olup, Ti:safir'deki 3.2 μs değerine kıyasla ~20-55 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu bakımdan Cr:Colquiriite'ler için yüksek $\sigma_e \times \tau_f$ çarpımı, pasif kaybı $\%0.15 \text{ cm}^{-1}$ 'den daha düşük kristallerin büyütülebilme imkânı ile birleştirildiğinde Cr:Colquiriite malzemeleri için 1 mW'ın altında lazer güç eşiklerinin elde edilmesine imkan sağlamıştır (Demirbas vd. 2012; Klimm vd. 2000). Cr:Colquiriite kazanç ortamları ile oluşturulmuş lazer/yükseltici sistemlerinin popülasyon dinamiğine ve dolayısıyla floresan ömrüne etki edici rol oynayan termal etkiler (a) kuantum kusuru, (b) üst lazer seviyesinin termal sönümlenmesi, (c) uyarılmış durum absorpsiyonu ve (d) yukarı dönüşüm mekanizmaları cinsinden açıklanmaktadır.

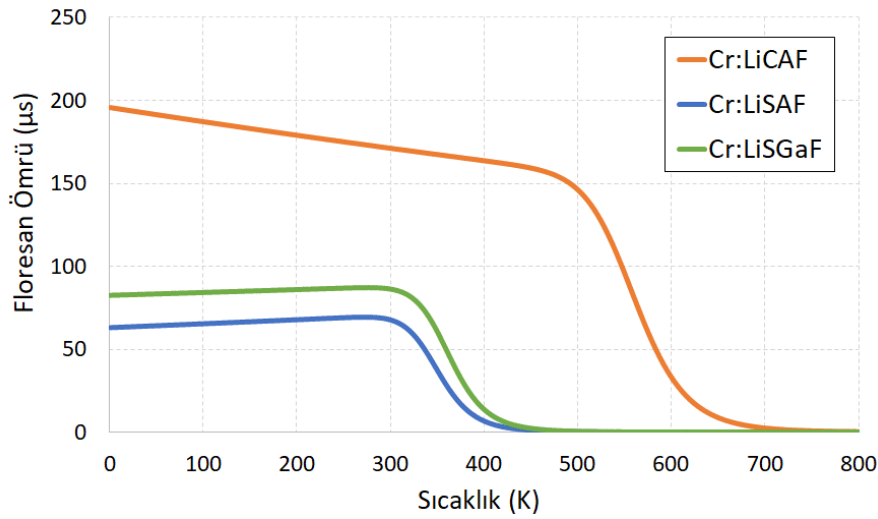


Şekil 1.6. Cr:Colquiriite'lerde termal yüklemeye neden olan **a)** kuantum kusuru; **b)** termal sönümlenme; **c)** lazer dalga boyunda uyarılmış durum emilimi; **d)** Auger yükseltgenmesi etkileri

Bu etkilerden ilki, pompa (λ_p) ve lazer (λ_l) fotonları arasındaki dalga boyu farkı, dolayısıyla da enerji farkından kaynaklanan kuantum kusurudur (Şekil 1.6a'da gösterilmiş). Bu fonon temelli etki aynı zamanda istenen absorpsiyon/emisyon genişletme sürecini mümkün kılmakta ve dört seviyeli lazer yapısını kolaylaştırmaktadır. Kuantum kusuru (q_d) nicel olarak $(1-\lambda_p/\lambda_l)$ ile tanımlanır ve ısı artışına sebep olan ışıınımsız geçişler (fonon emisyonu) yoluyla kristale aktarılan enerji farkının mümkün olduğunca sınırlanması için lazer dalga boyunun pompa dalga boyuna yakın olması arzu edilir. Yaygın kullanıma sahip kazanç ortamlarından Yb:YAG'da kuantum kusuru $\%9$, Ti:safir'de ise $\%40$ civarındadır. Bu da Yb:YAG sistemlerinin güç ölçeklendirmesi için ana avantajıdır. Cr:Colquiriite kazanç ortamları için ise kuantum kusuru $\%20$ - 25 aralığında değerlere sahip olmakla birlikte, bu malzemeler arasında en düşük q_d değeri $\%19$ ile Cr:LiCAF kazanç ortamına aittir (Demirbas 2019).

Termal yükleme mekanizmalarının ikincisi olan termal sönümlenme, uyarılmış emisyon yoluyla ideal olarak lazer/yükseltgeme sürecine katkıda bulunan üst lazer seviyesindeki uyarılmış iyonların, ışımsız süreçler yoluyla temel duruma geri döndüğü bir olgudur (Şekil 1.6b'de gösterilmiştir). Bu etkinin artışı ile, elde edilebilir kazanç azalırken, ışımsız kanal yoluyla üst durum ömrü azalır ve kazanç ortamı içerisinde istenmeyen ısı yükünde artış meydana gelir. Önceki çalışmalarda belirtildiği üzere, Cr:Colquiriite kazanç ortamları özelinde yapılan önceki çalışmalar ile bu etkinin, uyarılmış iyonların 4T_2 seviyesinin uyarılmış titreşim durumlarından elektronik 4A_2 temel durumunun yüksek uyarılmış titreşim seviyelerine tünellemesinden kaynaklandığı gösterilmiştir (Yorulmaz vd. 2014; Ghanbari ve Akbari 2016; Ghanbari vd. 2018). Sıcaklığa bağlı olarak değişen bu etkinin floresan ömrüne etkisinin analitik tanımı Mott denklemi ile verilmekte olup, bu tanım detaylı bir biçimde bölüm 3.1.1'de verilmiştir. Şekil 1.6c'de gösterilen ESA şemasında ise üst lazer seviyesindeki bir iyonun, lazer veya pompa fotonu emerek daha yüksek bir uyarılmış durum seviyesine geçiş yaptığı durum gösterilmiştir. Söz konusu iyon daha sonra ışımsız bozunma yoluyla üst lazer seviyesine geri dönerek kristal içerisinde ısı oluşumuna sebep olur. Son olarak, Şekil 1.6(d)'de gösterilen Auger yükseltgenme sürecinde ise üst lazer seviyesine uyarılmış komşu iyonlar birbirleriyle etkileşime girer ve enerji alışverişinde bulunur. Burada iyonlardan birinin zemin durumuna dönüşü ile ortaya çıkan enerji başka bir komşu iyonunun üstteki uyarılmış seviyeye uyarımı için kullanılır. Bu iyon daha sonra radyasyonsuz olarak lazer seviyesine ışımsız olarak geri dönerek kristal için sıcaklık artışına katkı yapar. Buradan çıkarımla, Cr:Colquiriite malzemelerinde sıcaklık artışı çeşitli dinamikler ile ortaya çıkmakta ve pratik lazer kurulumlarında sıcaklığa bağlı ortam özelliklerinin bilinmesinin önemini ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmada konu edilen Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamları için, floresan ömrünün termal sönümlenmesinin doğası Şekil 1.7'de verilmiş olan ve bu çalışma kapsamında deneysel olarak ölçülmüş floresan ömürlerine uyum çizgileri ile gösterilmiştir. Şekil 1.7 incelendiğinde sıcaklık değişiminin, üç kazanç ortamı için de floresan ömründe dramatik değişimlere sebep olduğu görülmekte ve her malzeme için farklı sıcaklıklardaki etkilerin farklı miktarlarda ortaya çıktığı görülmektedir. Bu etkinin ilgili kristallerin hangi sıcaklığında önemli miktarda floresan düşüşüne sebep olduğunu nicelendirmenin bir yolu, termal söndürme için kritik sıcaklık ($T_{1/2}$) değerlerini karşılaştırmaktır: Bu sıcaklık, ışımlı ve ışımsız geçişlerin oranının birbirine eşit olduğu sıcaklık (veya floresan ömrünün ışımlı ömür değerinin yarısına düştüğü sıcaklık) olarak tanımlanır. Burada konu edilen kazanç ortamlarını bu nicelik bakımından kıyaslayacak olursak, Cr:LiCAF için kritik sıcaklık 563 K (290 °C), Cr:LiSAF için 350 K (77 °C) ve Cr:LiSGaF için ise 363 K (90 °C) civarındadır. Buradan çıkarımla, Cr:Colquiriiteler arasında, Cr:LiSAF, termal söndürme için en düşük kritik sıcaklığa sahiptir (Stalder vd. 1992). Bu da Cr:LiSAF ile güç ölçeklendirmesinin zorluğunu göstermektedir. Ancak öte yandan, Cr:LiSAF'da gözlenen bu karakteristik, Cr:LiSAF'ı nispeten oda sıcaklığına yakın dar bir sıcaklık bölgesinde yüksek ölçüm çözünürlüğünün gerekli olduğu termal ölçüm uygulamaları için oldukça uygun bir sensör olarak kullanılabileceği anlamına gelmektedir. Cr:LiCAF ise, termal sönümlenme bakımından en yüksek kritik sıcaklığa sahip olduğu görülmekle birlikte, bu da onu güç ölçeklendirmesi uygulamaları için floresan ömrü bakımından tercih edilen malzeme haline getirmektedir.



Şekil 1.7. Sıcaklığın Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarının floresan ömürleri üzerindeki ölçülmüş etkisi

Tez çalışmasının bu alt bölümünün odağını oluşturan Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristalleri için, floresan ömrünün kriyojenik ve oda sıcaklığı üstündeki yüksek sıcaklıklarda da içine alan geniş aralıklarda detaylı karakteristiğinin literatürde yer almaması önemli bir eksiklik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu eksikliğin giderilmesi motivasyonu ile, tez çalışmasının bu alt bölümünün hedefi Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristalleri için floresan ömrünün kriyojenik (78-300 K) ve 618 K'ye kadar yüksek sıcaklıklarda deneysel olarak ölçülmesi ve kristal parametreleri cinsinden analitik tanımlarının yapılmasını kapsamaktadır. Bu şekilde ortaya konulacak olan yenilik, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristalleri için yüksek çözünürlüklü (1K sıcaklık artışlarında alınmış) ölçümler ile floresan ömrü karakteristiğinin detaylı bir biçimde ilk defa ortaya çıkarılacak olmasıdır. Bu ölçümler Cr:LiSGaF kristali özelinde ayrıca, floresan ömrünün, sıcaklığa bağlı değişimini ilk olarak ortaya koyma niteliğindedir. Bu bölümde Cr:Colquiriite'ler için hedeflenen ilgili deneyler sonucu elde edilecek bulguların bilimsel değeri, bahsi edilen kazanç ortamlarının kriyojenik sıcaklıkları da kapsayan aralıkta sıcaklığa bağımlı floresan ömrü davranışının yüksek sıcaklık çözünürlüğünde deneysel olarak ölçülmesinin yanında, bu sıcaklıklardaki olası uygulama alanlarının ortaya çıkarılması ve lazer eşiği gibi lazer çalışma parametrelerinin modellenmesinde kullanılmak üzere temel bilgi kaynağının oluşturulmasıdır.

Tez kapsamında gerçekleştirilen ve sıcaklığa bağlı floresan ömrünün ölçüldüğü deneylerde izlenen yöntemler bölüm 3.1.1'de sunulmuş olup, elde edilen bulgular, ölçülmüş floresan ve ışınlı ömrün sıcaklığa bağımlılığını bildiren uyum formülleri ile birlikte, literatür verileri ile kıyaslı biçimde bölüm 4.1.1'de verilmiştir. Rapor edilen sonuçlar, lazer mühendislerine ve bilim insanlarına oda sıcaklığında ve kriyojenik sıcaklıklarda gerçekleştirilecek Cr:Colquiriite tabanlı lazer ve yükseltici sistemlerinin tasarlamasında yardımcı temel bilgi birikimini oluşturmaktadır.

1.1.3 Kriyojenik sıcaklıklarda malzeme davranışı ve Cr:Colquiriite'lerde lazer operasyonu

Cr:Colquiriite kazanç ortamlarının verimli pompalanması için yüksek güçlü lazer diyot kaynakları ticari olarak mevcut olmasına rağmen, Cr:Colquiriite lazerlerden 2-3 W'ın üzerinde (bugüne kadar gösterilmiş en yüksek sürekli dalga gücü 3W'tır) sürekli dalga çıkış güçleri elde edilmesi, doğal malzeme sınırlamaları nedeniyle zorlu bir mühendislik problemi olarak ortaya çıkmaktadır. Bu problemin çözümünde yapılacak iyileştirmeler dahilinde, minimum kristal hasarı riski ile daha fazla güç ölçeklendirmesi elde etmek için düşük Cr-katkılamasına sahip ve fiziksel olarak daha uzun kristallerin (30-40 mm) kullanılması önerilmektedir (Demirbas 2019). Diğer taraftan, güç ölçekleme uygulamalarında kullanılacak kristalin geometrik tasarımı dahilinde, kazanç ortamının kalınlığının 50-300 mikrometreye kadar ölçeklenebildiği ince disk lazer geometrisi, Cr:Colquiriite'lerde güç ölçeklemesi için çekici bir alternatif sunmaktadır (Demirbas 2018).

Cr:Colquiriite lazer sistemlerinin güç ölçeklendirme optimizasyonu dahilinde burada bahsedilmiş geometrik iyileştirmelerin dışında, bu lazer sistemlerinin ulaşılabilir lazer güç seviyelerinin sınırlarının keşfedilmesinde dramatik katkılar yapabilecek bir yöntem olarak, lazer sisteminin kriyojenik sıcaklıklarda test edilmesi öne çıkmaktadır (Demirbas 2019). Literatürde yer alan önceki çalışmalarda, katı hal lazerlerinin kriyojenik sıcaklıklardaki operasyonunun Yb:YAG (Rand vd. 2011; Zapata vd. 2022), Yb:YLF (Fan vd. 2007; Kawanaka vd. 2005), Nd:YAG (Brown 2005) ve Ti:safir (Schulz ve Henion 1991) dahil olmak üzere çeşitli kazanç ortamları için büyük güç ölçeklenebilirliği sağladığı gösterilmiştir. Düşük sıcaklıklarda gözlemlenen performans artışı temel olarak ilgili kazanç ortamının spektroskopik, mekanik ve termo-optik özelliklerindeki iyileşmelerden kaynaklanmaktadır (Brown vd. 2016). Daha spesifik olarak, kriyojenik sıcaklıklarda katı-hal lazer performansında görülen iyileşme için üç temel neden sıralanabilir; (i) düşük sıcaklıklarda düşük lazer seviyelerinin termal olarak boşalarak lazer eşiğini düşürmesi, (ii) özellikle geçiş metali iyonu bazlı lazerler için ışınsız gevşeme oranının azalarak, ara kararlı seviye ömrünün artmasına sebep olması ile lazer eşiğini düşürmesi ve (iii) istenmeyen termo-optik etkilerin büyük ölçüde azalarak yüksek termal iletkenlik, daha düşük dn/dT ve daha düşük termal genleşme katsayısı gibi iyileştirilmiş termo-optik özellikleri kazandırması (Fan vd. 2007). Örneklendirecek olursak, kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile Yb:YAG (Ti:safir) kazanç ortamlarında, termal iletkenlik 4 kat (30 kat) artarken, termal genleşme katsayısı 3 kat (15 kat) azalır, termo-optik katsayı 8 kat (7 kat) azalırken (Schulz ve Henion 1991), 300 K'den 100 K'ye soğutulduğunda emisyon kesiti ise 5 kat (Ti:Safir için henüz rapor edilmemiştir) artar (Fan vd. 2007). Bu da kriyojenik çalışmada daha iyi ışın kalitesine sahip daha yüksek güçlü lazer/yükseltici sistemlerinin oluşturulmasına imkân sağlar. Örnek olarak, Ti:Al₂O₃ lazerine ait erken deneylerden birinde, Massachusetts Teknoloji Enstitüsü Lincoln Laboratuvarı'ndan Moulton, bir Ti:Al₂O₃ lazeri için 300 K sıcaklıktaki çıkış gücü 150 mW iken, 77 K'e soğutma ile ilgili çıkış gücünün 450 mW'a yükseldiğini bulmuş ve bunu düşük sıcaklıklardaki daha yüksek termal iletkenlik ile açıklamıştır (Moulton 1986).

Kriyojenik sıcaklıklarda farklı kazanç ortamları için rapor edilmiş avantajlara rağmen, son 20 yılda yüksek parlaklıkta diyot pompalarının geliştirilmesinde gösterilen teknolojik ilerlemeler sayesinde lazerlerin oda sıcaklığında makul bir lazer eşik seviyesi ile ekonomik ve verimli bir şekilde çalıştırılabilmesi imkânı da bulunmuştur. Dolayısıyla,

Cr:Colquiriite'ler ile günümüze kadar yapılan çalışmalar, pratik kurulumu daha yüksek maliyet gerektiren kriyojenik lazerler yerine oda sıcaklığındaki yeni nesil yüksek parlaklıkta diyotlarla pompalanan ekonomik kristal lazerlerinin performanslarının incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Ancak yine de oda sıcaklığında ortalama güç ölçeklendirmesi alanında gösterilen ilerlemeler, kriyojenik sıcaklıklarda elde edilebilecek olası potansiyele nazaran çok kısıtlı kalmıştır. Literatürde, Cr:Colquiriite'ler arasında üstün termal özellikleri sayesinde yüksek güç uygulamaları için en uygun ve yüksek potansiyele sahip Cr:LiCAF kristali için lazer performansının kriyojenik sıcaklıklarda incelenmemiş olması bu malzemenin güç potansiyelinin ortaya çıkarılmasında önemli bir eksiklik olarak ortaya çıkmaktadır. Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında oda sıcaklığındaki kanıtlanmış performansına rağmen, bildiğimiz kadarıyla, kriyojenik sıcaklıklarda spektroskopik ve termo-opto-mekanik özelliklerinin araştırılması dahilinde literatürde sadece dar kapsamlı birkaç çalışma yer almaktadır (Demirbas 2019). Bu nedenle, bu tez kapsamı dahilinde Cr:Colquiriite'lerdeki spektroskopik özelliklerin sıcaklığa bağlı ayrıntılı bir karakterizasyonu, yüksek güçlü kırmızı diyot kaynakları ile pompalanan lazer ve yükselteç sistemlerinin verimli kullanımı, doğru modellenmesi ve kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyellerinin araştırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Farklı kazanç ortamlarında da gösterildiği gibi, Cr:Colquiriite'ler için de kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile malzemelerin termal iletkenliğinde iyileşme beklenmektedir (Brown vd. 2016). Bu nedenle, Yb-tabanlı malzemelerde olduğu gibi, kriyojenik olarak soğutulmuş Cr: Colquiriite lazer/yükselteç sistemlerinde elde edilebilir çıkış güçlerinde benzer derecede iyileşmenin mümkün olabileceği öngörülmektedir. İlgili alt bölümler altında Cr:Colquiriite'lere ait spektroskopik yönere odaklanılan bu çalışma, Cr:Colquiriite lazerlerin kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak üzere atılan ilk adım olarak tanımlanabilir. Ancak, bu potansiyelin ortaya çıkarılmasında ve özellikle kriyojenik Cr:Colquiriite lazer sistemlerinin doğru modellenmesi için termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, kırılma indisi gibi termomekanik ve termo-optik parametrelerin sıcaklığa bağımlılığının nitel ne nicel karakterini ortaya çıkarmak için daha fazla çalışma gerekmektedir.

1.1.4 SESAM ile Q-anahtarlı lazer operasyonu

Nanosaniye ve mikrosaniye aralığında darbe genişliğine sahip lazerlerin geliştirilmesi, menzil bulma, doğrusal olmayan frekans dönüşümü, malzeme işleme ve uzaktan algılama gibi çeşitli uygulamalar için arzu edilmektedir. Q-anahtarlama veya kazanç anahtarlama teknikleri genellikle yüksek tepe güçlerine sahip kısa, yüksek enerjili darbelerin elde edilmesinde kullanılır. Q-anahtarlama, bir lazer rezonatörünün kavite içi kaybı darbeleri çıkış üretmek için modüle edilirken, kazanç anahtarlama çalışması ise kazanç malzemesinin floresan ömrüne yakın bir pompa darbe genişliği ile darbeleri pompalanmasına dayanır. Q-anahtarlı çalışmada, rezonatör kayıpları aktif veya pasif modülasyon şemaları kullanılarak modüle edilebilir (Du vd. 2003; Degnan 1995). Aktif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanmasında tipik olarak akusto-optik modülatörler, elektro-optik modülatörler veya harici sürüş devresine sahip döner aynalar kullanılır, ancak bu sistemler daha yüksek maliyet ve artan karmaşıklıktan mustarıptır. Öte yandan, pasif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanması daha ekonomik, basit ve pratiktir; burada kavite kayıpları boya bazlı emiciler, Cr^{4+} :YAG (1 μm lazerler için) (Sennaroglu 2002), Cr^{2+} :ZnSe (1.5 ve 2 μm lazerler için) (Podlipensky vd. 1999) veya SESAM/SBR bazlı doğrusal olmayan aynalar (yarı iletken doyurulabilir emici ayna (Keller vd.

1996)/doğurulabilir Bragg yansıtıcı (Tsuda vd. 1996) gibi doğurulabilir emiciler kullanılarak modüle edilir. Ancak pasif Q-anahtarlamada darbe şekli, darbe enerjisi, tepe gücü ve darbe tekrarlama hızı gibi parametrelerin bağımsız kontrolünü sağlamak görece daha zordur.

Ti:safir (Moulton 1986), Alexandrite (Walling vd. 1980) ve Cr:Colquiriite kristalleri (Cr:LiSAF (Payne vd. 1989), Cr:LiCAF (Payne vd. 1988), Cr:LiSGaF (Smith vd. 1992) ve Cr:LiSCAF (Chai vd. 1992) ~700-1100 nm aralığında ve altında (frekans katlama/üçleme yoluyla 375-550 nm ve 235-365 nm bölgeleri (Pinto vd. 1995, 1998; Demirbas 2019) geniş ölçüde ayarlanabilir Q-anahtarlı çıkış üretebilen uygun katı hal lazer kazanç ortamları arasındadır. Tez çalışmasının bu kısmında, ışık yayan diyor (LED) ve lazer diyor pompa kaynaklarında gözlenen parlaklık artışı nedeniyle son yirmi yılda yeniden ilgi çeken Cr:Colquiriite'ler üzerine, bu kez Q-anahtarlamalı operasyon gerçeklemek üzere odaklanılmaktadır. Aktif lazer iyon katkılama seviyelerinin ~%0.25'in altında sınırlı olduğu Alexandrite ve Ti:safir'in aksine, Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında kristal kalitesinden çok fazla ödün vermeden %100 katkılamaya kadar ulaşılabilir (örneğin LiChrom, LiSrCrF₆, %100 Cr katkılı LiSrAlF₆) (Smith vd. 1993). Bu daha sonra ideal olarak, verimli Q-anahtarlı lazer operasyonu ve yükselteç çalışması için oldukça önemli olan büyük popülasyon tersinmesi yoğunluğunun elde edilmesini sağlar. Önceki bölümlerde bahsedildiği üzere, Cr:Colquiriite'lerde üst lazer seviyesinin floresan ömrünün, ETU sürecinin varlığı nedeniyle inversiyon yoğunluğuna bağlı olduğunu göz önüne almak gerekmektedir (Pilla vd. 2007). Ek olarak, Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında floresan ömrünün sıcaklıkla söndürülmesine duyarlı oluşu, istenen performansı elde etmek için katkılama ve termal etkilerin dikkatli bir optimizasyonunu gerektirmektedir (Demirbas 2018).

Tez çalışmasının bu alt bölümü, SESAM elemanları kullanarak Cr:LiCAF kazanç ortamı ile gerçekleştirilmiş ilk pasif Q-anahtarlama deneylerinin rapor edilmesini kapsamaktadır. İlgili deneylerde, Cr:Colquiriite kazanç ortamları arasından, üstün termomekanik gücü ve uzun üst durum floresan ömrü gibi özellikleri nedeniyle Cr:LiCAF kristali tercih edilmiştir (Demirbas 2019). Pasif Q-anahtarlama için SESAM tercihi ise, kolay erişilebilirliğin yanında modülasyon derinliği, doygunluk akısı ve geri-kazanım süresi gibi özelliklerin dikkatlice optimize edilerek, Q-anahtarlı lazerin temel davranış özelliklerinin kontrolüne imkân sağlamasından kaynaklanmaktadır.

Tez çalışmasının bu alt bölümünün devamı niteliğindeki kısımlar sonraki ilgili kısımlarda sunulmuştur. Bölüm 3.2'de sürekli dalga ve Q-anahtarlamalı lazer çalışmalarında kullanılan deneysel düzenek anlatılmakta ve pasif Q-anahtarlama için kullanılan AlGaAs tabanlı SESAM hakkında ayrıntılar verilmektedir. Bölüm 4.2'de, Q-anahtarlama deney sonuçlarını ayrıntılı olarak sunulmakta ve farklı çıkış kuplörleri, SESAM'lar ve pompa gücü seviyeleri için performans parametreleri tartışılmaktadır. Bu ilk çalışmada elde edilen sonuçları iyileştirmenin olası yollarını da detaylandırdığımız kısa bir tartışma ise Bölüm 5.2'de sunulmuştur.

1.2. Yb-bazlı kazanç ortamlarında sürekli-dalga ve pasif mod-kilitli femtosaniye lazer operasyonu

Ultra hızlı lazerler, olağanüstü zamansal çözünürlükleri, hızlı tekrarlama oranları, geniş optik spektrumları ve yüksek tepe yoğunlukları gibi özellikleri ile temel/uygulamalı

araştırmalar ve ticari uygulamalar için büyük potansiyel barındırmaktadırlar. Bu özellikler, bu tür lazerlerin bilim, tıp, bilgi teknolojisi ve iletişim dahil olmak üzere çeşitli yaygın etkiye sahip alanlarda yaygın olarak uygulanmalarına imkân vermiştir (Keller 2003). Bilimsel alanda femtosaniye darbeleri, yüksek zamansal çözünürlüğe sahip hızlı süreçleri araştırmak için değerli bir araç olma niteliği taşımaktadır. Örneğin, femtosaniye darbeleri moleküler dinamikleri (Zewail 2000), kimyasal reaksiyon dinamiklerini (Zewail 1996) ve katı hal malzemelerindeki yapısal değişiklikleri (Brown vd. 1999) incelemek için kullanılabilir. Femtosaniye darbelerinin kullanımı ayrıca, rölativistik etkileri bile indükleyebilen ultra yüksek enerji yoğunluklarını keşfetme olanaklarını da ortaya çıkarmıştır (Courty vd. 2013).

Ultra-hızlı lazer sistemlerinin düşük maliyet ile kompakt bir biçimde gerçekleşmesinde, bu tez çalışması kapsamına giren katı hal malzemeleri için flaş lambası pompalaması yerine doğrudan lazer-diyot pompalamasının kullanılması, özellikle yüksek güçlü lazerler için lazer teknolojisinde çok önemli bir atılım olmuştur (Keyes ve Quist 1964; Streifer vd. 1988). Absorpsiyon dalga boyu ve malzemenin absorpsiyon spektrumları, flaş lambalarının geniş absorpsiyon spektrumlarına kıyasla lazer diyot emisyonu ile daha iyi eşleşerek verimlilik, basitlik, kompaktlık, güvenilirlik ve maliyet açısından önemli faydalar sağlamaktadır. Bu teknolojik ilerleme, temel ve uygulamalı araştırmalar, lazer işleme ve tıbbi uygulamalar gibi çeşitli lazer uygulamaları için önemli etkilere sahiptir (Keller 2010).

Yüksek ortalama güce sahip diyot pompalı katı hal lazerleri alanında, nadir toprak iyonu olan Neodimyum (Nd) ve İterbiyum (Yb) katkılanması kullanımı yaygındır (Brown 1997, Krupke 2000). Neodimyum, InGaAsP/GaAs veya AlGaAs/GaAs diyotlarla 808 nm'de verimli bir şekilde pompalanabilirken, İterbiyum InGaAs/GaAs diyotlarla 900 ila 980 nm arasında pompalanabilir. Standart lazer emisyonu her iki durum için de yaklaşık 1 μ m'dir ve Nd³⁺ için $^4F_{3/2}$ ve $^4I_{11/2}$ çizgileri arasındaki, Yb³⁺ için ise $^2F_{5/2}$ ve $^2F_{7/2}$ arasındaki geçişe karşılık gelir. Geride bıraktığımız yıllarda yüksek güçlü lazerlerin geliştirilmesindeki ilk aşamalarda, Nd-katkılı malzemeler, dört seviyeli yapıları ve flaş lamba pompalaması için daha uygun olan birçok absorpsiyon çizgisi nedeniyle Yb-katkılı malzemeler yerine tercih edilmiştir. Ancak, yaklaşık son on yılda Yb-katkılı malzemelerin yüksek verim ve yüksek ortalama güçlü diyot pompalı lazerler ile pompalama için daha uygun olduğu görülmüştür. Bunun başlıca nedeni, Yb³⁺ iyonunun sadece iki manifoldtan oluşan basit elektronik seviye yapısıdır. Bu benzersiz özellik, daha yüksek uyarılmış durum seviyelerinin (1 μ m lazer emisyonu için $^4G_{9/2}$) varlığı nedeniyle Nd-katkılı malzemelerde (Hardman vd. 1999) mevcut olan frekans yükseltilmesi, çapraz gevşeme veya ESA gibi çoğu parazitik etkiden kaçınılmasını sağlar. Daha önce Cr:Colquiriite'ler için de bahsedildiği üzere, bu olumsuz etkilerin iki ana sonucu vardır; (i) termal yükü ve dolayısıyla termal sorunların artması (Fan 1993), (ii) lazer popülasyon inversiyonuna dahil olan $^4F_{3/2}$ seviyesinin popülasyonunun güçlü bir biçimde azalmasını indükleyebildikleri için kazancı da değiştirirler. Yb-katkılı malzemelerin Nd-katkılı muadillerine kıyasla bir diğer avantajı da yine 2-manifold tabanlı elektronik yapı nedeniyle çok düşük kuantum kusurudur. 980 nm'de pompalandığında, İterbiyum'un %5 değerine sahip kuantum kusuru, Neodimyum'un (YAG'da) sahip olduğu %30'luk kuantum kusuru değerine kıyasla oldukça düşüktür. Bu da termal sorunların azaltılmasında ve çok yüksek ortalama güçlere ulaşılmasında önemli bir fayda sağlamaktadır.

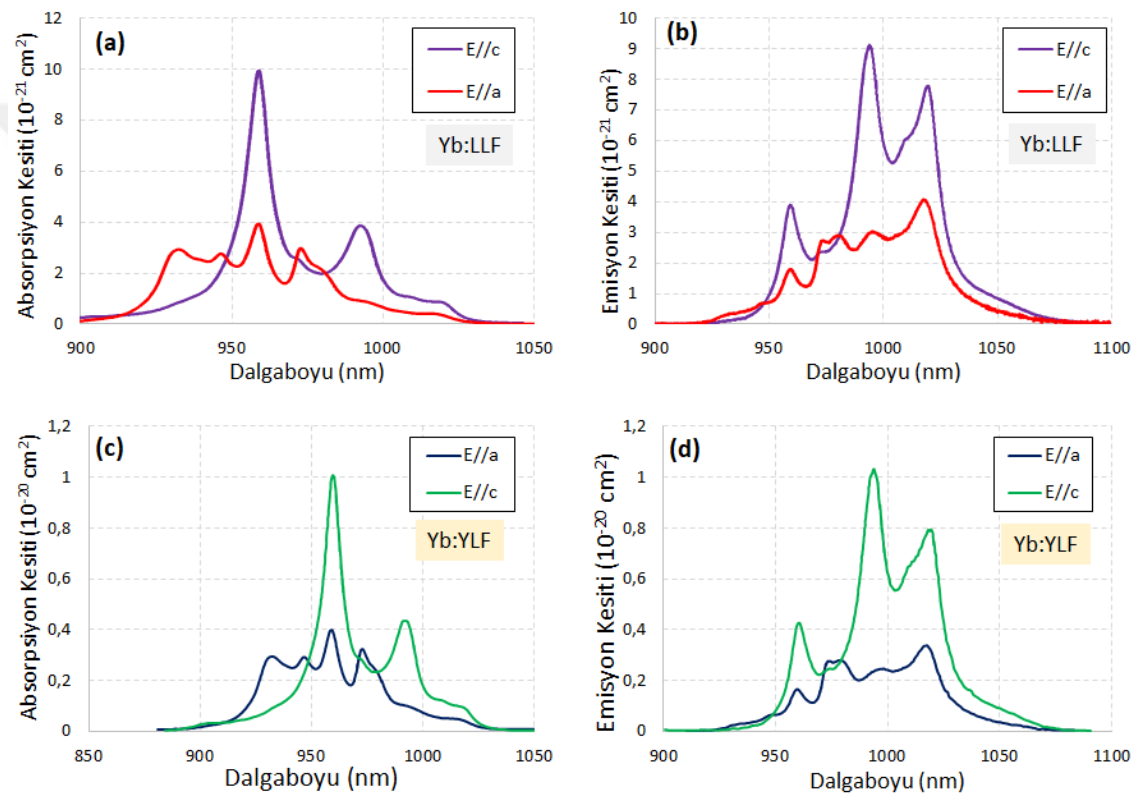
Bahsi edilmiş önemli avantajlardan ötürü İterbiyum iyonunun oksitler, florürler ve vanadateler dahil olmak üzere çeşitli ana malzemelere katkılanması, lazerlerdeki potansiyel uygulamaları nedeniyle kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Bu malzemeler arasında, florür tek kristalleri, (i) vakum ultraviyole (VUV) ile kızılötesi (IR) arasında geniş bir dalga boyu aralığında yüksek şeffaflıkları, (ii) yoğun lazer pompalama altında doğrusal olmayan etkileri sınırlayan düşük kırılma indisi ve (iii) bitişik enerji seviyeleri arasındaki ışınlı olmayan gevşemeyi azaltan düşük fonon enerjisi nedeniyle önemli ölçüde ilgi çekmiştir. Son yıllarda, CaF_2 (Siebold vd. 2009), PbF_2 (Siebold 2009), KYF_4 (Colucelli vd. 2008), LiYF_4 (YLF) (Colucelli vd. 2008) ve LiLuF_4 (LLF) (Yasukevich vd. 2009) gibi birkaç Yb-katkılı florürün verimli lazer çalışması ve büyük enerji depolama yetenekleri sergilediği gösterilmiştir. Bu özellikler, Yb-katkılı florür tek kristallerini lazer uygulamalarında kullanım için umut verici malzemeler haline getirmektedir.

Tez çalışmasının bu alt bölümünde, Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamlarının kullanıldığı sistemlerde, tekli-mod ve çoklu-mod diyotlarla pompalana ile sürekli-dalga operasyonu, çift-kırınımli filtreler ile dalgaboyu ayarlama ve SESAM ile pasif mod-kilitli sistemler ile GHz seviyesine kadar çıkan farklı frekanslarda femtosaniye darbe üretimi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Burada bahsedilen ultra hızlı kaynakların gerçekleştirilmesinde Cr:Colquiriite'ler yerine Yb:YLF ve Yb:LLF malzemelerinin tercih edilmesinin sebeplerinden bir tanesi de ilgili çalışmaların DESY kurumu bünyesinde gerçekleştirildiği sırada, Cr:Colquiriite kristal örneklerinin ilgili çalışma modlarında gerek duyulan güç seviyelerini sağlayacak kadar parlak pompa kaynaklarının envanterde bulunmamasıdır (özellikle kriyojenik sıcaklıklarda, dewar pencerelerindeki kayıplar nedeniyle). Bu nedenle çalışmalar sırasında DESY kurumunun laboratuvar altyapısı ve optomekanik imkanları kullanılarak Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamları ile mod-kitleme tekniğinin gösterilmesi, yüksek çıkış güçlü femtosaniye Yb:LLF ve GHz tekrarlama frekanslı femtosaniye Yb:YLF lazer sistemlerinin ortaya konularak literatüre özgün katkı yapılması hedeflenmiştir.

Yb^{3+} katkılı malzemeler, diyot pompalama ve basit enerji seviyesi şemaları (sadece iki manifold ile: $^2\text{F}_{7/2}$ zemin ve $^2\text{F}_{5/2}$ uyarılmış durum) için uygun olan geniş absorpsiyon hatlarına sahiptir. Bu malzemelerde, konsantrasyon sönümlenmesi, yukarı dönüştürme ve ESA'nın zararlı etkileri beklenmez ve düşük kuantum kusuru ve geniş emisyon bantları, düşük maliyetli, kompakt ve verimli Yb^{3+} tabanlı lazer sistemlerinden ultra kısa darbelerin üretilmesini sağlar (Bensalah vd. 2004). Çeşitli ana malzemeler arasında florür tek kristaller, VUV'den IR'e kadar yüksek şeffaflık ve düşük kırılma indisi nedeniyle tercih edilir. Tez çalışması dahilinde kullanılan Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamlarının genel karakteristik özelliklerinden bahsedecek olursak, absorpsiyon ve emisyon spektrumları, benzer kristal yapısı ve aynı türde iyon katkılama nedeniyle benzer özellikler göstermektedir. Şekil 1.8'de Yb:LLF ve Yb:YLF kazanç ortamlarının oda sıcaklığında ölçülmüş absorpsiyon ve emisyon kesit alanları verilmiştir. Her iki kristal de sırasıyla 980 nm ve 1030 nm civarında merkezlenen geniş absorpsiyon ve emisyon bantlarına sahiptir. Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamlarının her ikisi de yüksek kazanç, yüksek verimlilik ve ayarlanabilirlik gibi arzu edilen lazer özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte, bu malzemeler ile elde edilmiş lazer performansları, spektroskopik ve termal özelliklerdeki küçük farklılıklar nedeniyle farklılık gösterebilmektedir (Yin vd. 2012). YLF bir lazer malzemesi olarak yaygın bir şekilde çalışılmış olsa da kısmen ham LuF_3

malzemesinin yüksek maliyeti nedeniyle, izomorf LLF konağında sadece birkaç çalışma yayınlanmıştır (Bensalah vd. 2004). İtiryum Lityum Florür (YLF) konağı ise daha zayıf termal merceklenme (So vd. 2005; Zhang vd. 2015; So vd. 2005; Chen vd. 2020), doğal polarize çıkış ve geniş emisyon spektrumu gibi özellikleri ile öne çıkmaktadır. Buna ek olarak, yüksek kaliteli Yb:YLF kristalleri minimum pasif kayıpla büyütülebilmektedir (Brasse vd. 2021).

Tez çalışmasının bu alt bölümünde, diyot (tek ve çoklu modlu) pompalı Yb:LLF ve Yb:YLF lazerler sistemlerinin kurulunu ile sürekli dalga operasyonunda güç ölçeklemesi, pasif mod-kitleme (SESAM) ile watt seviyesinde ortalama güce sahip femtosaniye darbe üretimi ve GHz tekrarlama frekanslı femtosaniye osilatörlerinin oluşturulması üzerine gerçekleştirilmiş çalışmalar sunulmaktadır.



Şekil 1.8. Oda sıcaklığında ölçülmüş **a)** Yb:LLF absorpsiyon kesiti; **b)** Yb:LLF emisyon kesiti; **c)** Yb:YLF absorpsiyon kesiti; **d)** Yb:YLF emisyon kesiti (Lin vd. 2016; Püschel vd. 2021)

Tek-modlu lazer diyotlarla pompalanmış Yb:YLF lazer ile gerçekleştirilen pasif mod kitleme deneylerinde, 210 fs darbe süresine ve 1.1 GHz tekrarlama frekansına sahip soliton şekilli çıkış darbeleri, %0.5 çıkış kuplajı (OC) ile 40 mW ortalama çıkış gücünde elde edilmiştir. İlgili deneylerde kullanılan kavite yapısı, optik elemanlarının spesifikasyonları ile birlikte bölüm 4.3.2.6-7’de verilmiştir. Elde edilen bulgular, Yb:YLF kazanç ortamı ile GHz frekanslı pasif mod-kilitli çalışmada güç ölçeklendirme ve daha kısa darbeler üretimine yönelik tartışmalar ile birlikte bölüm 4.3.1’de verilmiştir. Bildiğimiz kadarıyla, tez çalışmasının bu alt bölümü kapsamında ortaya konulan

sonuçlar, Yb:YLF kazanç ortamı ile GHz tekrarlama frekanslı femtosaniye darbelerinin elde edildiği ilk çalışma olma özelliğini taşımaktadır.

Yb:LLF kazanç ortamı ile gerçekleştirilmiş deneylerde ise tek ve çok modlu lazer diyot pompalı lazer sistemlerinden, farklı çıkış kuplajları (%0.5-60) altında sürekli dalga operasyonunda güç ölçekleme ve geniş aralıkta (996-1073 nm) dalga boyu ayarlama ile SESAM mod-kilitli sistemlerde watt seviyesinde çıkış gücüne sahip femtosaniye darbelerin üretimi raporlanmıştır. İlgili deneylerde gerçekleştirilen kavite kurulumlarının tanımı ve kullanılan optik elemanların özel olarak tasarlanmış karakterleri (dispersiyon gibi) bölüm 3.3.1’de verilmiştir. Bulgular ve tartışma bölümünün 4.3.2 numaralı alt bölümünde ise lazer çıkışındaki darbe uzunluklarının kısaltılması ile ilgili tecrübe ve çıkarımlar, tek ve çok-modlu diyotlar ile çalışma pratiği ile birlikte sunulmuştur. Burada rapor edilen sonuçlar, pasif mod kilitli diyot pompalı Yb:LLF lazerden elde edilen en geniş CW ayarı, en yüksek darbe enerjileri ve ortalama güçler olarak öne çıkmaktadır.



2. KAYNAK TARAMASI

Tez çalışması dahilinde gerçekleştirilen çalışmalar, tezin giriş bölümünde ilgili hedef ve kapsamların tanımlandığı hali ile, farklı türden kazanç ortamlarının (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF, Yb:YLF, Yb:LLF) kullanımını, ilgili kazanç ortamlarında sıcaklığa (kriyojenik ve oda sıcaklığı üzerinde yüksek sıcaklıklar) bağlı spektroskopik özelliklerin (emiyon kesiti, floresan ömrü) karakterizasyonu, lazer operasyonu (sürekli-dalga, dalga boyu ayarlama), SESAM ile darbe üretimi (Q-anahtarlama, mod-kilitli operasyon) gibi çalışmaları içeren geniş bir kapsama sahiptir. Bu geniş kapsam altında kullanılan deneysel metot ve elde edilen deneysel bulguların literatüre katkısını vurgulamak amacı ile tez çalışmasının her bir ana alt bölümü için detaylı bir kaynak taraması takip eden alt bölümlerde verilmiştir.

2.1. Cr:Colquiriite'lerde Spektroskopik ve Termomekanik Özellikler

Geçiş metali iyonu ve nadir toprak iyonu katkı katı hal lazerleri parametrik iyon bazlı katı hal lazerlerinin bir alt segmentini oluşturur ve 1960'ların ortasında elektronik temel durumdan daha yüksek bir titreşim seviyesine geçişte lazer eylemi teorisi geliştirilmiş olup (McCumber 1964), aynı zaman dilimi içerisinde ayrıca Ni^{2+} , Co^{2+} ve V^{2+} safsızlıkları ile MgF_2 , MnF_2 ve KMgF_3 hostlarında lazer operasyonu ilk kez gösterilmiştir (Johnson vd. 1966). Geçiş metali vibronik lazerlerin karakteristiği dört seviyeli enerji yapılarından türetilir. Burada terminal lazer seviyelerinin oda sıcaklığında esasen doldurulmamış yüksek titreşimli seviyeler olması düşük pompa gücü eşiklerine yol açmaktadır. Geçiş metali lazerlerinde, uyarılmış durum ışıyım ömürleri, lazer ortamı içinde verimli enerji depolamaya izin veren 3 boyutlu konfigürasyon içindeki geçişlerin doğasından dolayı genellikle nispeten uzundur. Ek olarak, geçiş metali lazerlerindeki elektronik enerji seviyeleri ile kristal titreşimleri arasındaki güçlü etkileşimler, geniş absorpsiyon ve emiyon özelliklerine yol açar. Bu da bu sistemlerin flaş ışığı veya diyot ile verimli pompalanmasına ve geniş emiyon spektrumu içerisinde homojen kazanç profiline sahip ayarlanabilir sistem çıkışı üretilmesine olanak sağlar. Bu özelliklerinden dolayı geçiş metali iyon katkı katı hal lazerleri ayarlanabilir (vibronik) katı hal lazerleri olarak sınıflandırılır. Geçiş metali iyon katkı katı hal lazerlerine gösterilen ana ilgi, 1970'lerin sonlarında Alexandrite ($\text{Cr}_{3+}:\text{BeAl}_2\text{O}_4$) ile oda sıcaklığında ayarlanabilir lazer operasyonunun (yakuttan çok daha düşük eşik pompa enerjisiyle) gösterilmesiyle başlamıştır. Bugüne kadar titanyum (Ti), vanadyum (V), krom (Cr), manganez (Mn), demir (Fe), kobalt (Co) ve nikel (Ni) ile lazer operasyonu rapor edilmiş olup, bakır (Cu), gümüş (Ag) ve rodyumun (Rh) geçiş metal elementlerinde ise kazanç rapor edilmiştir (Demirbas 2019).

Lazer araştırma ve uygulamalarında yaygın kullanıma sahip kazanç ortamlarından olan ve bu çalışma kapsamında çalışılan Cr:Colquiriite'ler ile benzer bölgelerde emisyona sahip olan $\text{Ti}_{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ (Ti:safir) kazanç ortamı (1982'de Dr. Peter Moulton tarafından keşfedilmiştir [4]), (i) 5 fs saniye kadar kısa darbeleri destekleyen ultra geniş kazanç bant genişliği, (ii) en geniş kesirli ayar aralığı (660–1180 nm) ve (iii) birkaç watt'a kadar güç ölçeklendirmesi için uygun termal özellikleri (Moulton 1986; Morgner vd. 2001) ile geniş ölçüde ayarlanabilir katı hal lazerlerinin bilinen en önemli üyelerinden biridir. Bu kullanışlı özellikleriyle Ti:safir lazerler, 1990'ların başında başarılı bir şekilde boya lazer teknolojisinin yerini almış ve dalga boyu, darbe süresi ve ortalama güçte sağladığı esneklikten yararlanan uygulamalar için lazer pazarında çok önemli bir rol oynayarak

ultra hızlı lazer teknolojisinin ana malzemesi haline gelmiştir (Klein ve Kafka 2010). Günümüzün yüksek enerjili ticari Ti:safir sistemleri (i) 675-1100 nm aralığında ayarlanabilirlik ile 5 W'tan fazla sürekli dalga çıkış gücü ve (ii) Mod-kilitli çalışmada, 800 nm civarında ayarlanabilir (680-1080 nm) ~100 fs uzunlukta darbeler veya 800 nm civarında yüzlerce kW'lık güçte 10 fs uzunlukta darbeler üretebilir. Diğer taraftan, Ti:safir kristalleri oldukça yüksek pasif kayıplara sahiptir (verimli lazer çalışması için nispeten yüksek çıkış kuplajı (~%10) gerektirir) ve nispeten düşük floresans ömrü - emisyon kesit alanı çarpımına ($130 \mu s \times 10^{-20} \text{ cm}^2$) sahip olması nispeten yüksek lazer eşik güçlerine sebep olmaktadır (Harrison vd. 1991; Druon vd. 2007; Roth vd. 2009). Bu yüksek lazer eşiklerinin aşılmasında, Ti:safir lazerlerin pompalanması, 490 nm civarında merkezlenen geniş absorpsiyon bandı üzerinde (460-580 nm aralığında, ~120 nm'lik bir yarı maksimumda tam genişlik ile (Roth vd. 2009)) gerçekleşir. Yakın zamanda mavi ve yeşil spektral bölgedeki diyotlarla Ti:safir'in doğrudan diyot pompalanması gösterilmiş olsa da (Sawai vd. 2014; Rohrbacher vd. 2017), bu dalga boyu aralığında yüksek güçlü lazer diyotların yokluğu, yüksek güçlü, kompakt ve düşük maliyetli Ti:safir lazer ve amplifikatör sistemlerinin geliştirilmesini ve geniş çapta benimsenmesinin önünde engel oluşturmaktadır. Bu nedenle, 500 nm civarında ve daha uzun dalga boylarında (~450 nm dalga boylarında uyarıldığında ek parazitik kayıplar ortaya çıkar (Roth vd. 2009; Roth vd. 2011; Sawai vd. 2014; Rohrbacher vd. 2017)), daha iyi pompa diyotları mevcut olana kadar ticari Ti:safir sistemleri çoğunlukla hantal, verimsiz ve Nd- ve Yb-bazlı lazer sistemlerinin ikinci harmoniğine dayanan yüksek maliyetli pompa kaynaklarına bağlı kalacaktır.

Ti:safir'e alternatif olarak, Nd- ve Yb-katkılı kazanç ortamına dayalı diyot pompalı düşük maliyetli sürekli-dalga ve femtosaniye lazer ve yükselteç sistemlerinin geliştirilmesi, 975 nm civarında düşük maliyetli InGaAs diyotların varlığı nedeniyle ilgi çekicidir (Hönniger vd. 1999; Agnesi vd. 2009; Agnesi vd. 2010; Purnawirman ve Phua 2011). Bu lazerlerde gösterilen ilerlemeye rağmen (35 fs uzunlukta darbeler (Yoshida vd. 2011) ve Yb-katkılı sistemlerle 100 W'nin üzerindeki ortalama güçler (Baer vd. 2010; Sibbett vd. 2012), nispeten dar ayar aralıkları (~100 nm) ve sınırlı desteklenen darbe genişlikleri (~50 fs), birçok uygulamada Ti:Safir'in yerine kullanılmaları açısından önemli sınırlayıcı faktörler olarak öne çıkmaktadır.

Krom (Cr) iyonu, Cr^{2+} , Cr^{3+} ve Cr^{4+} katkılı katı hal lazerlerin sırasıyla 1850–3350 nm, 700-1100 nm ve 1100–1600 nm ayar aralıklarını kapsadığı en yaygın olarak kullanılan lazer aktif iyonlardan biridir (Sennaroglu ve Morova 2022). Cr iyonunun bu farklı yük durumları ile katkılanmış çeşitli hostlarda elde edilen büyük kazanç bant genişlikleri, Kerr-lens mod-kilitleme veya doyurulabilir soğurucu mod-kilitlemesi gibi farklı mod-kilitleme tekniklerinin uygulanması yoluyla pikosaniye ve femtosaniye zaman ölçeklerinde ultra kısa süreli darbelerin üretilmesini mümkün kılmıştır (Sennaroglu ve Morova 2022). Kromun bahsi geçen farklı yük durumları arasında Cr^{3+} iyonu, vibronik katı hal lazerlerinde kullanılan en popüler iyonlardan biridir ve aynı zamanda 1960 yılında T. H. Maiman tarafından yakut lazerde lazer etkisinin ilk deneysel gösteriminde optik kazanç malzemesi olarak kullanılmıştır (Haiman 1960). Ek olarak, son yıllarda, garnet, silikat, tungstat, borat ve niyobat gibi birçok host malzemede Cr^{3+} 'nın lazer operasyonu elde edilmiştir (Payne vd. 1989). Ruby ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) lazerin yanı sıra, $\text{Cr}^{3+}:\text{Be}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_6$ (zümrüt), $\text{Cr}_3^{3+}:\text{Be}_3\text{Al}_2\text{O}_4$ (alexandrite) ve LiCaAlF_6 (LiCAF) (Payne vd. 1988), LiSrAlF_6 (LiSAF) (Payne vd. 1989) ve LiSrGaAlF_6 (LiSGAF) (Smith vd.

1992) gibi Cr^{3+} katkılı florürler (Colquiriiteler), kapsamlı olarak incelenen diğer iyi bilinen örnekleri oluşturmaktadır. Alüminyum içeren bu kristallerin büyütülmesi sırasında, Al^{3+} iyonlarının bir kısmı Cr^{3+} iyonlarıyla yer değiştirir ve bu da kristal elektrik alanının değişmesine neden olur. Host malzemeye bağlı olarak, yapıdaki Cr^{3+} iyonları farklı bir şekilde etkilenir ve bu da her birinde optik özelliklerin (enerji seviyeleri, soğurma ve emisyon kesitleri, ışınlı ve ışınlımsız ömürler ve geçiş çizgisi genişliği gibi) her bir host malzemede farklı pertürbasyonuna yol açar. Farklı Cr^{3+} hostlarındaki emisyon çizgisi genişliklerinin doğası, güçlü, orta ve zayıf kristal alan güçleri olarak kategorize edilen kristal alan yoğunluğunun gücü ile belirlenir. Ruby, dar emisyon çizgisi genişliklerinin indüklendiği yüksek kristal alanına sahip önemli örneklerdendir. Alexandrite'de ise hem dar hem de geniş emisyon çizgisi genişliklerine izin veren orta düzeyde bir kristal alan yoğunluğu mevcuttur. Cr^{3+} :Colquiriite'lerde ise ayarlanabilir lazerler için arzu edilen geniş bir emisyon çizgi genişliğini indükleyen düşük yoğunluklu bir kristal elektrik alanı mevcuttur (Maestre vd. 2012). Son yıllarda, bilinen Cr^{3+} katı hal lazerleri arasında, araştırma ve geliştirmenin birincil odağı, %50'den fazla içsel eğim verimlerinin gösterildiği Alexandrite (Walling vd. 1979) ve Cr^{3+} :Colquiriite (Payne vd. 1988; Payne vd. 1989) lazerlerine odaklanmıştır (Demirbas 2019). Cr^{3+} katkılı vibronik lazerlerin geri kalan üyelerinin çoğu için eğim verimlilikleri daha düşüktür (zümrüt gibi birkaç host hariç (Shand ve Lai 1984; Tai 1987)) ve bu esas olarak uyarılmış durum absorpsiyonundan (ESA) kaynaklanmaktadır. Bu kristaller arasından, günümüze kadar gösterilmiş çalışmalarda Alexandrite, iyi pompalama verimliliği, düşük ışınlımsız kayıplar ve üstün termomekanik özellikleri birleştiren en başarılı kazanç ortamı olmuştur. Cr^{3+} :Colquiriite lazerlerle karşılaştırıldığında, Alexandrite'in etkili üst durum ömrü (oda sıcaklığında 260 μs) daha büyüktür, bu da Alexandrite kazanç ortamını Q-anahtarlı lazer işlemi için kullanışlı hale getirir. Alexandrite'daki $^4\text{T}_2$ ve ^2E seviyelerinin yakınlığı, bu kazanç ortamındaki kazanç dinamikleri ve güç ölçeklendirme potansiyelini ortaya çıkarmak için kapsamlı bir şekilde araştırılmış olan ve sıcaklığa bağlı olarak karakteristik özelliklere sahip spektroskopik ve lazer operasyonu özelliklerine yol açmaktadır (Fibrich vd. 2017; Demirbas vd. 2019). Giriş bölümünde de bahsedildiği üzere, bu çalışmalar, Alexandrite'in 760 nm'deki küçük sinyal kazancının oda sıcaklığının üzerinde, yaklaşık 85 °C civarında zirveye ulaştığının göstermiştir. Bu davranışın temel nedeni, ^2E seviyesinin en düşük uyarılmış durum olması, lazer geçişinin ise $^4\text{T}_2$ durumundan yayılmasıdır. Böylece pompa enerjisinin ^2E seviyesinde depolanmasının önüne geçilmesi için kristal yaklaşık 50-100°C'ye ısıtılır. Bu, $^4\text{T}_2$ popülasyonunu artırsa da kalan ^2E popülasyonu, bazı dalga boylarında ESA'nın oluşması nedeniyle lazer performansına hala zarar verebilir. Bununla birlikte, üstün termo-mekanik özellikleri ve detaylı bir biçimde rapor edilmiş spektroskopik özellikleriyle Alexandrite, kırmızı lazer diyotları ile doğrudan pompalanmasıyla sürekli dalga güç ölçeklendirmesi ve watt seviyesinde ortalama güçlerdeki 50 fs'nin altındaki darbelere ulaşılabilmesi adına büyük bir potansiyel taşımaktadır. Bu özellikleri ile Ti:safir ve Cr:Colquiriite lazer/yükselteç sistemlerine güçlü bir rakip olarak görülmektedir (Sennaroglu ve Morova 2022).

Bu tez çalışma kapsamına konu edilen Cr^{3+} :Colquiriite kazanç ortamlarında ise, ruby ve Alexandre kazanç ortamlarına göre farklı olarak, vibronik olarak genişletilmiş $^2\text{T}_4$ seviyesi ^2E seviyesi ile örtüşerek yakın kızılötesi bölgede 700 ila 1100 nm arasında geniş ölçüde ayarlanabilir bir emisyonu yol açmaktadır. Oda sıcaklığında, ^2E durumuna uyarılan elektronlar, $^4\text{T}_2$ durumuna hızlı bir ışınlımsız geçi yaşarlar, bu da bu seviyeyi en kalabalık seviye (dolayısıyla üst lazer seviyesi) yapar. $^2\text{E} \rightarrow ^4\text{A}_2$ ile karşılaştırıldığında $^4\text{T}_2$

→⁴A₂ üzerinden gerçekleşen çok daha büyük ışınlı geçiş, dört seviyeli bir lazer sistemindeki benzer karakteristikte uyarılmış emisyonu açar. Cr³⁺:Colquiriite'ler arasında, Cr:LiCAF ile yapılan ilk lazer çalışmaları, diğer lazerler veya flaş pompaları (Payne vd. 1990) tarafından pompalandığında Alexandrite kadar verimli olduğunu ve benzer bir ayar aralığına (720-840 nm), tepe uyarılmış emisyon kesitine ($1.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$) ve spontane emisyon ömrüne (oda sıcaklığında 175 μs) sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır (Chai vd. 1992). Bu sonuçlar Colquiriite ailesinin diğer kristalleri olan Cr:LiSAF (Payne vd. 1989) ve Cr:LiSGaF (Smith vd. 1992) üzerinde ilk lazer deneylerinin gerçekleştirilmesine yol açmıştır. Bu şekilde, lazer operasyonunun gerçekleştirildiği Colquiriite ana kristaline (LiCAF, LiSAF veya LiSGaF) bağlı olarak, farklı dalga boylarında uyarılmış emisyon zirveleri ve ayar aralıkları elde edilebilir. Cr:LiCAF ile karşılaştırıldığında, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF'daki emisyon ve absorpsiyon bant genişlikleri, daha uzun ve daha zayıf atomik bağlanma ile ilişkili olan nispeten daha zayıf kristal alan kuvveti nedeniyle birkaç on nanometre daha uzun dalga boylarına kayma ile karakterize edilir (Wang vd. 1994). Cr³⁺:Colquiriite lazerlerinin (Cr³⁺:LiSAF, Cr³⁺:LiCAF ve Cr³⁺:LiSGaF) temel termomekanik, spektroskopik ve güç performansına ilişkin kapsamlı bir genel bakış, yakın zamanda yayınlanan bir inceleme makalesinde sunulmuştur (Demirbas 2019). Anlam bütünlüğü açısından Cr³⁺:Colquiriite'lerin bu bölümde tekrar belirtmeye değer olan önemli spektroskopik ve lazer özellikleri; (i) %50'den büyük yüksek içsel eğim verimliliği, (ii) düşük eşikli lazere imkan veren $(20 - 30) \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \mu\text{s}$ mertebesinde büyük $\sigma_e \times \tau_f$ çarpımı, (iii) 20 fs'nin altındaki darbelerin üretimi için geniş emisyon bantları, (iv) 670 nm civarında ticari olarak temin edilebilen AlGaInAs diyot lazerleri ile doğrudan diyot pompalanabilme imkanı şeklinde sıralanabilir. Alexandrite ile karşılaştırıldığında, tek eksenli Cr:Colquiriite'lerdeki absorpsiyon kesiti, pompa polarizasyonuna daha az duyarlı olması ile pompa diyotları ile uç pompalama için verimli polarizasyon kuplajına imkân vermektedir. Ek olarak Alexandrite, diyot üreticilerinin tercih ettiği üretim aralığı olan 665-675 nm arasında zayıf bir absorpsiyona sahiptir. Öte yandan, Cr:Colquiriite'ler ile güç ölçeklendirme çalışmaları, nispeten zayıf termomekanik özellikleri (termal iletkenlik, çekme kırılma mukavemeti ve termal şok direnci gibi) ve (i) kuantum kusuru, (ii) üst lazer seviyesinin termal sönümlenmesi, (iii) uyarılmış durum absorpsiyonu ve (iv) yukarı dönüştürme gibi termal yükleme mekanizmalarının (Şekil 1.6'da verilmiş) varlığı nedeniyle zor olmuştur (3W, Cr:LiSAF ile elde edilen en yüksek değerdir (Dergachev vd. 2007)) (Demirbas 2019). Bu nedenle, yüksek $\sigma_e \times \tau_f$ çarpımı ile elde edilebilen yüksek küçük-sinyal kazancı ve düşük eşiklerle verimli lazer çalışmasının dayanıklılığı ve ölçeklenebilirliği, kazanç ortamı içindeki sıcaklığa güçlü bir şekilde duyarlıdır. Cr:Colquiriite'lerdeki spektroskopik özelliklerin sıcaklığa bağlı ayrıntılı bir karakterizasyonu, kırmızı diyot teknolojisinin yüksek güç kaynakları ile pompalanan lazer ve amplifikatör sistemlerinin verimli kullanımı, doğru modellenmesi ve kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyelinin araştırılması için büyük önem taşımaktadır.

Bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilmiş ve sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüş spektroskopik özellikler için, literatürde yer alan önceki çalışmalarda farklı kazanç ortamları için kriyojenik sıcaklıklarda gözlemlenmiş karakteristiğin doğasına yönelik özel bir parantez açmak faydalı olacaktır. Modern kriyojenik lazer teknolojilerinin geliştirilmesinde, gelişmiş kriyojenik lazerlerin doğru tasarımı ve başarılı bir şekilde gösterilmesi adına spektroskopik, fiziksel özellikler ve lazer operasyonunun karakteristiklerine yönelik kapsamlı bir yaklaşım vardır (Brown vd. 2016). İlk deneysel

kriyojenik Yb:YAG lazerinin ve kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile performansı artırılmış bir Ti:Al₂O₃ lazerinin (Schulz ve Henion 1991) gösterilmesini takip eden yıllarda, teorik ve deneysel tarafta yapılan çalışmalar kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile elde edilen avantajları sadece termal etkilerin azaltılmasıyla sınırlı kalmayıp, spektroskopik, mekanik, termo-optik özelliklerdeki iyileşmeleri de doğrulamıştır (Brown vd. 2016). Bu tez çalışmasının kapsamına giren Cr:Colquiriite kazanç ortamları için raporlanmış önceki bir çalışmada elde edilmiş olan kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile 10W'ın üzerinde ortalama güçlere ulaşma potansiyeli (nümerik olarak tahmin edilen) göz önüne alındığında, Cr:Colquiriite kazanç ortamları için sıcaklığa bağlı spektroskopik özellik karakterizasyonunun kriyojenik sıcaklıklara genişletilmesi büyük önem taşımaktadır (Demirbas 2019). Brown vd. tarafından yayınlanan yakın tarihli bir derleme makalesinde (Brown vd. 2016) görece eskiden beri bilinen (Ti³⁺:Al₂O₃, Cr³⁺:LiSAF ve Cr³⁺:LiSAF) ve nispeten daha yeni kullanıma giren Yb³⁺-katkılı lazer malzemelerinin (Yb³⁺:YAG, Yb³⁺:YLF, Yb³⁺:CaF₂) spektral özellikleri oda sıcaklığı ve 77K için rapor edilmiştir. Bu kapsamda, tek eksenli kristaller için lazer tasarımında pratik öneme sahip olan E//c ve E//a polarizasyonlarındaki absorpsiyon ve uyarılmış emisyon kesitleri tepe noktası ve bant genişliği açısından verilmiştir. Bu yakın tarihli derlemede (Brown vd. 2016) ve bu tez çalışması çerçevesinde yapılan literatür taramasında açıkça ortaya konulduğu üzere, kriyojenik ve oda sıcaklığının üzerindeki (>300 K) Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarında E//c ve E//a için sıcaklığa bağlı mutlak emisyon kesiti (ECS) verileri rapor edilmemiştir. Cr:Colquiriite kazanç ortamlarının çift kırılmalı yapısı E//c ve E//a polarizasyonları için eşit olmayan bir emisyon gücü yarattığından (E//c'nin oda sıcaklığında Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için daha güçlü olduğu Şekil 1.4'te görülmektedir), bu tür verilerin mevcudiyeti, ilgili kazanç ortamları ile kurulmuş lazer/yükselteç sistemlerinde daha yüksek kesit alanına sahip polarizasyondan yararlanılması bakımından önemlidir.

Detaylı bir biçimde burada verilmiş olan ilgili literatür özeti göz önüne alındığında, bu tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar ile yapılan literatür katkısının ilki, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamları için E//c ve E//a cinsinden sıcaklığa bağlı (5K'lık artışlarla ölçülen) mutlak emisyon kesit alanının kriyojenik (sıvı nitrojen soğutmasıyla 77 K'ye kadar) ve oda sıcaklığının üzerinde (618 K'ye kadar) deneysel olarak incelenmesidir. Tez çalışmasının bu bölümünde elde edilmiş bulguların literatüre yaptığı temel katkılarının ikincisi, Cr:Colquiriite'lerde (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF) sıcaklığa bağlı (1K'lık artışlarla ölçülen) floresan ömrünün (τ_f) ayrıntılı karakterizasyonu, kuantum verimliliğinin doğasının ve dolayısıyla ışıma ömrünün 77 K'ye kadar olan sıcaklıklarda deneysel olarak rapor edilmesi şeklinde tanımlanmaktadır. İlgili ölçümler ayrıca, Cr:Colquiriite'ler ile yüksek güç çalışması veya sıcaklık algılama uygulamaları için önemli bir ilgi alanı olan ışımsız ömrün ayrıntılı bir karakterizasyonunu, 618 K'ye varan sıcaklıklar için ortaya koymaktadır. Literatürde yer alan önceki çalışmalarda, kriyojenik sıcaklıklarda Cr:LiCAF ve Cr:LiSAF için τ_f 'nin sıcaklığa bağımlılığı (~25 K'lık artışlarla 20-300 K arasında ölçülmüş) bildirilmiştir; burada sıcaklık 77 K'den 300 K'ye yükseltildiğinde, floresan ömrünün Cr:LiCAF için 200 μ s'den 175 μ s'ye düştüğü, Cr:LiCAF için ise 67 μ s değerinde nispeten sabit kaldığı gösterilmiştir (Payne vd. 1988, 1989a, b; Sanz-Ortiz vd. 2008). Bu tez çalışmasında ise ilgili sıcaklık aralığında floresan ömrünün doğasını tanımlamak için daha yüksek bir çözünürlükle (1 K'lık artışlarla) ölçülmüş olan bulgular rapor edilmiş ve görece düşük hata payına sahip analitik model katsayıları literatüre kazandırılmıştır. Cr:LiSGaF için

ise, tez çalışması dahilinde 77-300 K aralığında yine 1 K aralıklarla ayrıntılı olarak rapor ettiğimiz kriyojenik sıcaklıklardaki floresan ömrü karakteristiğine benzer bir çalışmaya literatürde rastlanmamış olup, bu anlamda elde edilen bulgular bir ilk olma niteliği taşımaktadır. Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda floresan ömrünün sönümlenmesine ilişkin önceki raporlar (Stalder vd. 1992; Balembois vd. 1997; Stanciu ve Grattan 2002) görece düşük sıcaklık çözünürlüğünde ölçülmüş olup, bu tez çalışması kapsamında 618 K'ye varan sıcaklıklarda 1 K sıcaklık aralıkları ile ölçülen floresan ömrü karakteristiği her üç Cr:Colquiriite kristali için rapor edilmektedir.

2.2. Cr:Colquiriite'lerde Lazer Operasyonu ve Pasif Q-anahtarlama

Nanosaniye ile mikrosaniye aralığında darbe genişliğine sahip lazerlerin geliştirilmesi, menzil bulma, doğrusal olmayan frekans dönüşümü, malzeme işleme ve uzaktan algılama gibi çeşitli uygulamalar için arzu edilmektedir. Bu kapsamda yaygın kullanıma sahip Q-anahtarlama ve kazanç anahtarlama teknikleri genellikle yüksek tepe güçlerine sahip kısa, yüksek enerjili darbelerin elde edilmesinde kullanılır. Bu tez çalışması kapsamında kullanılan Q-anahtarlama tekniğinde, bir lazer rezonatörünün kavite içi kaybı darbeleri çıkış üretmek için modüle edilirken, kazanç anahtarlama tekniği ise, kullanılan kazanç ortamının, ilgili floresan ömrüne yakın bir pompa darbe genişliği ile darbeleri olarak pompalanmasına dayanır. Q-anahtarlama çalışmada, rezonatör kayıpları aktif veya pasif modülasyon şemaları kullanılarak modüle edilebilir (Degnan 1995; Du vd. 2003). Aktif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanmasında tipik olarak akusto-optik modülatörler, elektro-optik modülatörler veya harici sürüş devresine sahip döner aynalar kullanılır, ancak bu sistemler daha yüksek maliyet, kompaktlık eksikliği ve artan karmaşıklıktan mustariptir. Öte yandan, pasif Q-anahtarlı lazerlerin uygulanması daha ekonomik, basit ve pratiktir; burada kavite kayıpları boya bazlı emiciler, Cr⁴⁺:YAG (1 µm lazerler için) (Sennaroglu 2002), Cr²⁺:ZnSe (1.5 ve 2 µm lazerler için) (Podlipensky vd. 1999) veya SESAM bazlı doğrusal olmayan aynalar (Keller vd. 1996) veya doyurulabilir Bragg yansıtıcı (Tsuda vd. 1996)) gibi doyurulabilir emiciler kullanılarak modüle edilir. Bununla birlikte, pasif Q-anahtarlama, darbe şekli, darbe enerjisi, tepe gücü ve darbe tekrarlama hızı gibi parametrelerin bağımsız kontrolünü sağlamak daha zordur.

Tez çalışmasının bu bölümünde, LED ve lazer diyot pompa kaynaklarında gözlenen parlaklık artışı nedeniyle son yirmi yılda yeniden ilgi çeken Cr:Colquiriite'ler ile Q-anahtarlı operasyon gerçekleştirmek üzere çalışmalar yapılmıştır. Geniş soğurma bandı, kırmızı spektral bölgede düşük maliyetli ve iyi geliştirilmiş AlGaAs ve AlGaInP tabanlı diyotlar ile Cr:Colquiriite'lerin doğrudan diyot pompalamasını kolaylaştırır. Bu kazanç ortamları ile mod kilitleme (Sorokina vd. 1997; Uemura ve Torizuka 2000; Wagenblast vd. 2002) ve geniş ölçüde ayarlanabilir lazer çalışması (700-1100 nm) (Demirbas, 2019) yoluyla 10 fs altı ışık darbesi üretimi gibi bir dizi önceki çalışmada gösterilen performansla birleştiğinde, bu özellikler çeşitli uygulamalarda daha maliyetli Ti: safir tabanlı sistemlerin yerini alabilecek kompakt, düşük maliyetli ve verimli Cr: Colquiriite lazerlerin yapımını teşvik etmektedir. Ek olarak, oda sıcaklığında Cr:Colquiriite'ler, uzun üst durum floresan ömürlerine sahiptir (Cr:LiSAF'da 67 µs, Cr:LiCAF'da 175 µs, Ti:safir'de 3.2 µs (Druon vd. 2007)). Dahası, aktif lazer iyonu katkılama seviyelerini ~%0,25'in altında sınırlayan Alexandrite ve Ti:safir'in aksine, Cr:Colquiriite kristal kalitesinden çok fazla ödün vermeden %100 katkılamaya ulaşabilir.

Bu daha sonra ideal olarak, verimli Q-anahtarlı lazer veya yükselteç operasyonu için oldukça önemli olan büyük inversiyon yoğunluklarının elde edilmesini sağlar. Bununla birlikte, üst lazer seviyesinin floresan ömrünün, ETU sürecinin varlığı nedeniyle Cr:Colquiriiteler'deki inversiyon yoğunluğuna bağlı olduğunu göz önünde bulundurmak gerekmektedir (Pilla vd. 2007). Ayrıca, bu tez çalışmasında da detaylı olarak çalışıldığı üzere, Cr:Colquiriite'lerde floresan ömrü sıcaklıkla sönümlenmeye karşı duyarlıdır. Bu nedenle, istenen performansı elde etmek için katkılama ve termal etkilerin dikkatli bir optimizasyonu gereklidir (Demirbas 2018).

Cr:Colquiriite'lerde aktif ve pasif Q-anahtarlama operasyonu çeşitli gruplar tarafından yapılmış önceki çalışmalarda incelenmiştir. Bunlar arasındaki ilk sistemler genellikle çok düşük tekrarlama oranı ile çalışması pahasına yüksek enerjili Q-anahtarlı darbelerin elde edildiği flaş lambalı pompalamaya dayanmaktadır (Stalder vd. 1991; Pinto vd. 1995; Kuo vd. 1995; Pinto ve Esterowitz 1998; Jabczyński vd. 2001; Chen vd. 2009). Flaş lambası pompalaması altında mevcut olan büyük kazanç nedeniyle, darbe enerjileri genellikle bu sistemlerdeki kavite optiklerinin hasar eşiği ile sınırlıdır. Örnek olarak, dönen ayna Q-anahtarlı Cr:LiSAF lazer kullanan Stalder ve vd. 1 Hz'de 150 mJ enerjili 50 ns'lik atmaların üretimini raporlamıştır (Stalder vd. 1991). Akusto-optik Q-anahtarlama kullanılarak, Pinto ve arkadaşları tarafından ise, 780-1065 nm aralığını kapsayan geniş bir ayarlama kabiliyeti ile, 1 Hz'de 120 mJ enerjili 20 ns'lik atımlar elde edilmiştir (Pinto vd. 1995, 1998). Pasif Q-anahtarlama elemanları olarak V^{3+} :YAG (Jabczyński vd. 2001) ve Cr:YSO (Kuo vd. 1995) kullanılarak, flaş lambası pompalı Cr:LiCAF sistemlerinden 2 Hz'de 1 mJ seviyesinde 50 ns uzunluğunda darbeler ve 7.5 mJ enerjili 45 ns darbeler elde edilmiştir. Klimek ve arkadaşları ince levhali bir Cr:LiSAF lazerden yaklaşık 1-1.5 μ s darbe genişlikleriyle 5 Hz'de 0.5 J enerjiye kadar ulaşmışlardır (Klimek ve Mandl 2002). Weber ve arkadaşları ise ilgi çekici tekniklerden birisi olan kendinden Q-anahtarlama ile Cr:LiSAF lazerinden 60 mJ enerjili 180 ns'lik darbeler gözlemlenmiştir (Weber ve Hirth 1996, 1998). Termal etkiler bu flaş lambası pompalı sistemlerde çalışma frekanslarını sınırlamıştır ve doğrudan diyot pompalama bunun için bir çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır. Diyot pompalı sistemlerden, akusto-optik Q-anahtarlama yoluyla Cr:LiSAF ile 10 kHz'de 6.5 μ J ile 230 ns uzunluğunda atmalar (Falcoz vd. 1996; Balembois vd. 1997), Cr:LiSGaF ile 10 kHz'de 6.5 μ J ile 250 ns uzunluğunda atmalar (Balembois vd. 1997) rapor edilmiştir. Ayrıca, düşük güçlü tek modlu diyot pompalı Cr:LiCAF lazer sisteminden yaklaşık 20 kHz'de 2 μ J enerjili 5 μ s uzunluğunda darbe genişlikleriyle kendinden Q-anahtarlı çalışma gerçekleştirilmiştir (Beyatlı vd. 2013). LED pompalı örnekler arasında ise, Cr:YAG ile Q-anahtarlı Cr:LiSAF lazerinden 10 Hz'de 42 ns, 140 μ J atım elde edilmiştir (Pichon vd. 2017). Burada özetlenmiş çalışmalar incelendiğinde, diyot/LED pompalı sistemlerde yüksek tekrarlama hızında Q-anahtarlı lazer operasyonu elde edilebildiğini, ancak gerçekleştirilebilir ortalama güçleri engelleyen termal sınırlar nedeniyle darbe enerjilerinin görece düşük olduğu görülmektedir.

Tez çalışmasının bu alt bölümünde gerçekleştirilen çalışmalar, burada rapor edilmiş literatür özetine kıyasla bildiğimiz kadarıyla, Cr:LiCAF'ın SESAM ile ilk pasif Q-anahtarlı sonuçları rapor edilmektedir. İlgili deneylerde, üstün termomekanik gücü ve uzun üst durum floresan ömrü nedeniyle Cr:LiCAF kristali tercih edilmiş (Demirbas, 2019), pasif Q-anahtarlama için SESAM kullanımı ise modülasyon derinliği, satürasyon akısı ve geri kazanım süresi gibi SBR özelliklerinin dikkatlice optimize ederek Q-

anahtarlı lazerin temel davranış özelliklerinin kontrolüne imkân sağlamıştır. Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde verilmiş ve çalışmanın bu alt bölümünü ilgilendiren kısımlar aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 3.2'de sürekli dalga ve Q-anahtarlı lazer çalışmalarında kullanılan deneysel düzenek anlatılmakta ve pasif Q-anahtarlama için kullanılan AlGaAs tabanlı SESAM hakkında ayrıntılar verilmektedir. Bölüm 4.2'de Q-anahtarlama sonuçlarının ayrıntılı olarak sunulmasını ve farklı çıkış kuplörleri, SESAM'lar ve pompa gücü seviyeleri için performans parametrelerinin değişiminin tartışmasını içermektedir. Son olarak, çalışmada elde edilen sonuçları iyileştirmenin olası yollarını da detaylandırdığımız kısa bir tartışma ise Bölüm 5.2'de verilmiştir.

2.3 Diyet pompalı Yb-katkılı Lazer Sistemleri

Katı hal lazerlerini pompalamak için yıllar boyunca flaş lambaları ve lazer diyetleri gibi bir dizi farklı radyasyon kaynağı kullanılmıştır. Bu lazer kategorisi için kullanılan farklı pompa türleri arasında, en yüksek verimli pompalama ise diyet lazerleri ile mümkün olmuştur. Diyet pompalı bir lazerin ilk gösterimi 1964 yılında (Keynes ve Quist 1964), bir diyet lazerin ilk çalışmasından sadece iki yıl sonra raporlanmıştır. Akkor lamba ile pompalamaya kıyasla, lazer diyetleri gibi monokromatik pompa kaynaklarıyla pompalamanın avantajları o dönemde de bilinmesine rağmen, diyet lazerlerin oda sıcaklığındaki çalışma koşulları altında uzun ömürlü ve lazer pompalama için uygun güç seviyelerinde, en önemlisi de düşük maliyet ile ticari olarak temin edilebilmesi ancak 1980'lerin ortasında mümkün olmuştur.

Katı hal lazerleri için diyet pompalamanın özellikleri ve sağladığı avantajlardan kısaca söz edelim. İlk olarak, ilgili emisyonun yalnızca küçük bir kısmının lazer kristali tarafından emildiği flaş lambaları ile pompalamaya kıyasla, lazer diyet pompa kaynakları dar bir emisyon bant genişliğine sahip olduklarından, diyet lazerin dalga boyu tamamen belirli bir katı hal lazerinin emilim bandı içine düşecek şekilde seçilebilir. Bu şekilde sistem verimliliğinin artırılmasında büyük bir avantaj elde edilir. Ek olarak, optik spektrum üzerinde birden fazla dalgaboyu etrafında soğurma bandına sahip kazanç ortamları için, emisyon dalgaboylarına yakın taraftaki soğurma bandında ışıma yapan kaynak pompa diyetleri seçilebilir. Bu şekilde lazer malzemesinde biriken ısı miktarının ve dolayısıyla termo-optik etkilerin azaltılması (düşük kuantum kusuru) ile lazer çıkışında daha iyi ışın kalitesi sağlamak mümkün olabilmektedir. Lazer diyetlerini fiziksel ışıma karakteristikleri bakımından incelediğimizde ise, flaş lambalarına kıyasla, lazer diyetlerindeki pompa çıkışının yönlülüğü ve küçük yayma alanı, uç pompalı sistemler, mikroçip lazerler ve fiber lazerler gibi yepyeni katı hal lazer sınıflarının tasarlanmasını mümkün kılmıştır. Bu şekilde lazer diyet çıkışını lazer ortamına şekillendirme ve aktarma esnekliği, yeni pompa konfigürasyonlarının ve tasarım mimarilerinin icadı ile birçok çeşitli optik kavite şemalarının geliştirilmesine imkân sağlamıştır. Bu yönü ile lazer diyetleri kompakt ve çok yönlü lazer sistemlerinin geliştirilmesinde etkin rol oynamıştır. Katı hal lazerlerinde kullanılan kristal çeşitliliği bakımından incelendiğinde ise, her ne kadar diyet pompa kaynakları ile pompalanan en önde gelen kazanç ortamları flaş lambaları ile de pompalanabilir olsalar da Nd:YVO₄, Yb:YAG ve Tm:YAG gibi önemli kazanç ortamları diyet pompalamanın sağladığı avantajlar ile ön plana çıkabilmişlerdir. Sistem seviyesinde ise, lazer diyet pompalı katı hal lazerleri, flaş lambası tabanlı sistemlere kıyasla üstün bileşen ömrü (hem sürekli-dalga hem de darbeli çalışmada) ve sistem güvenilirliği sunar. Lamba pompalı sistemlerin aksine, lazer diyet pompalı kaynaklar pompa sistemi ve soğutucudaki malzeme bozulması gibi sorunları da ortadan

kaldırarak sistemin dayanıklılığının artmasına ve bakım gereksinimlerinin azalmasına katkıda bulunur. Son olarak, diyot lazerlerin azalan maliyetleri ve artan diyot güçleri el ele gitmiş ve diyot pompalı lazerlere olan ilgiyi körüklemiştir. Bu trend devam ettikçe, daha yüksek güce sahip diyot pompalı lazerlerin geliştirilmesi ve son kullanıcı için bu tür lazerlere ticari olarak erişim imkanının kolaylaşması beklenmektedir.

Diyot pompalı katı hal lazerleri üzerine yapılan ilk çalışmaların çoğu 1987 yılının sonuna kadar Fan ve Bver (1988) tarafından yazılan bir makalede gözden geçirilmiştir. Burada göze çarpan birkaç nokta üzerinde duralım. Diyot pompalı katı hal lazerlerinin en eski örneği, 2.613 pm'de lazer çalışmasını gösteren ve 840 nm'de pompalanan U^{3+} :CaF kazanç ortamı idi (Keynes ve Quist 1964). Daha sonraki ilgi, ağırlıklı olarak çeşitli hostlara katkılanmış nadir toprak iyonları üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar arasında en yaygın olarak bilinen örnek ise ilk kez 1968'de Ross tarafından lazer diyot ile pompalanan Nd:YAG'dır (Ross 1968). Nd:YAG, Nd:glass ve Nd:YLF dahil olmak üzere diğer Nd katkılı lazer hostları, Nd lazer çalışmasının ilk kez 1961'de gösterilmesinden bu yana katı hal lazer malzemeleri olarak uzun bir geçmişe sahiptir. İtiryum alüminyum garnet (YAG) ise 1964 yılında bir konak olarak gösterilmiş (Geusic vd. 1964) ve o zamandan beri en yaygın kullanılan katı hal lazer malzemelerinden biri haline gelmiştir.

Yb^{3+} katkılı lazer kazanç ortamı basit bir enerji seviyesi şemasına (sadece iki manifold ile: $^2F_{7/2}$ zemin ve $^2F_{5/2}$ uyarılmış durum) ve verimli diyot pompalama için uygun olan geniş soğurma hatlarına sahiptir. Buna ek olarak, diğer üç değerlikli nadir toprak iyonlarının (Nd^{3+} , Er^{3+}) aksine, konsantrasyon sönümlenmesi, yukarı dönüştürme ve ESA'nın zararlı etkileri beklenmez ve geniş emisyon bantları, düşük maliyetli, kompakt ve verimli Yb^{3+} tabanlı lazer sistemlerinden ultra kısa darbelerin üretilmesini sağlar (Bensalah vd. 2004). Çeşitli Yb -katkılı konaklar arasında florür tek kristalleri, VUV'den IR'ye kadar yüksek şeffaflık, düşük kırılma indisi (yoğun pompalama altında doğrusal olmayan etkileri sınırlar) ve düşük fonon enerjisi (ışınımlı emisyon olasılığını artırır) nedeniyle tercih edilir. Tez çalışmasının bu alt bölümünde lazer diyot pompalı, Yb-katkılı YLF ve LLF host malzemelerinde sürekli-dalga, dalgaboyu ayarlama, SESAM ile mod-kilitli (GHz frekansına ölçekleme ile) operasyonlarının gerçekleştirildiği lazer sistemlerinin geliştirilmesi üzerinde odaklanılmıştır. Bu kazanç ortamları ile önceki yıllarda yapılmış çalışmaların literatüre girmiş özetleri, aşağıda takip eden alt bölümlerde ve ilgili konu özelinde sunulmuştur.

2.3.1 GHz tekrarlama frekanslı Yb:YLF lazeri

Endüstriyel uygulamalarda ve bilimsel araştırmalarda çeşitli süreçlere olan talebin sürekli artması, dalga boyu, güç, darbe tekrarlama oranı ve gürültü seviyesi gibi uygun parametrelere sahip düşük maliyetli ultra hızlı lazer sistemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda, yüksek tekrarlama oranlarına (>500 MHz) sahip femtosaniye lazerler yaygın olarak araştırılmış ve optik frekans metrolojisi (Telle vd. 1999), yüksek bit hızlı optik iletişim (Kaiser ve Huttl 2007), rastgele dalga formu üretimi (Cundiff ve Weiner 2010) yüksek çözünürlüklü spektroskopi (Maiuri vd. 2020; Phillips vd. 2022), tıbbi görüntüleme (Voigt vd. 2017), lazer mikro işleme (Kawabata vd. 2023), kuantum optik (Woodward vd. 2021), optik saat dağıtımı (Debaes vd. 2003), mutlak mesafe ölçümü (Jang vd. 2018) ve Dünya benzeri dış gezegenlerin araştırılmasında astronomik spektrogramların hassas kalibrasyonu (Li vd. 2008) gibi çok çeşitli alanlarda pratik araçlar olarak kullanılmıştır. Belirli uygulamalarda yüksek tekrarlama oranlarının

kullanılması belirli avantajları da beraberinde getirmektedir: (i) daha geniş bir tarak modu aralığı ve tarak başına daha yüksek bir güç ile frekans tarağı tabanlı spektroskopide bireysel hatların daha kolay kullanımı (Diddams 2010), (ii) floresan proteinin daha az foto-bozunması ve foto-haşarının yanı sıra gelişmiş sinyal oranı ve görüntüleme hızı bakımından gelişmiş doğrusal olmayan biyo-görüntüleme (Bondaz vd. 2023) ve (iii) dolaşık fotonlara dayanan kuantum uygulamalarında daha yüksek dolaşık foton akısı yoluyla artan sinyal-gürültü oranı (Anwar vd. 2020) bu kapsamda verilebilecek örneklerden sadece birkaçıdır.

Günümüze kadar, gigahertz aralığında tekrarlamaya sahip ultra hızlı lazer kaynakları üretmek için fiber lazerler (Cheng vd. 2017; Zhao vd. 2021), diyot pompalı katı hal lazerleri (Bartels vd. 2008; Li vd. 2010), yarı iletken lazerler (Aschwanden vd. 2005) ve dalga kılavuzu lazerleri (Okhrimchuk ve Obraztsov 2015; Choudhary vd. 2012) dahil olmak üzere çeşitli lazer teknolojileri kullanılmıştır. Bunlar arasından fiber sistemler verimlilik ve güvenilirlik sunsa da yüksek ortalama güç elde etmek için yükselteçlerin kullanım gereksinimi, ilgili sistemin karmaşıklığını ve maliyetini artırırken hareket kabiliyetini azaltır. Yükselteç operasyonu sonucu elde edilmiş darbeler ise genellikle istenmeyen spektral özellikler ve düşük zamansal kontrast sergileyerek lazer çıkışında elde edilebilecek tepe gücünü kısıtlar (Wang vd. 2021). Bahsi geçen diğer bir tür olan yarı iletken tabanlı lazer osilatörlerde de gigahertz tekrarlamaya hızlarında yüksek güç çıkışları rapor edilmiştir. Ancak, darbe süresi, ortalama güç ve verimlilik arasındaki denge nedeniyle tepe gücünün artırılması zordur (Alfieri vd. 2017).

Bu tez çalışmasının kapsamını ilgilendiren katı hal lazer osilatörlerinde, Kerr-Lens mod-kilitleme (KLM) ve doyurulabilir emiciler kullanılarak yüksek tekrarlamaya hızlarında yüksek ortalama güçlere sahip ultra kısa darbeler üretilebilir (Keller 2010). KLM operasyonunda, lazer kavitesi ilgili bir kararlılık bölgesinin kenarında çalıştırıldığı için stabil ve güvenilir bir operasyon için gerekli kritik hizalama koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu da KLM lazer sistemlerinin kurulumundaki termal ve mekanik pertürbasyonlara karşı hassasiyeti artırır (Yefet ve Pe'er 2013). Öte yandan, hassas kavite yapılarına rağmen KLM osilatörleri, SESAM mod kilitli lazerlere kıyasla Q-anahtarlama kararsızlıklarının bastırılması için özel önlemlerin gerekli olmadığı GHz tekrarlamaya hızlarında daha yüksek tepe güçlerinin elde edilmesine de yardımcı olabilir (Krüger vd. 2020). Yakın tarihli bir çalışmada, bir KLM Yb:KGW lazerden 2.16 GHz tekrarlamaya frekansında 1.7 W ortalama güce ($P_{\text{pik}}=4.8$ kW) sahip 145 fs atımlar rapor edilmiştir (Heng vd. 2021). Bununla birlikte, yüksek güçlü KLM lazerleri tipik olarak, karmaşık ve pahalı tek modlu fiber lazerlerle pompalamaya dayanmaktadır. Günümüze kadar gösterilmiş olan ve GHz mertebesinde tekrarlamaya hızına sahip ultra hızlı katı hal lazerleri arasından 12 fs'lik en kısa darbe süresi, 1 GHz'de ortalama 1.2 W ($P_{\text{pik}}=88$ kW) güçte bir Ti:safir lazerden gösterilmiştir (Bartels ve Kurz 2002). Ancak, önceki kısımlarda da bahsedildiği üzere, standart Ti:safir lazerlerin pompalanması çoğunlukla nispeten yüksek kuantum kusurunun istenmeyen termal etkilere yol açtığı, lazer verimliliğini ve ortalama gücü sınırlandıran daha karmaşık ve pahalı yeşil pompa lazerlerine dayanmaktadır (Kawato ve Kawashima 2022).

Çeşitli kazanç ortamlarına sahip farklı tekniklerde yüksek kuantum kusuru, karmaşıklık, pahalı pompalama şemaları ve yüksek gürültü gibi pratik sorunlar göz önüne alındığında, Yb-katkılı kazanç ortamına dayalı SESAM mod kilitli diyot pompalı katı hal lazerleri, üstün gürültü performansına sahip düşük maliyetli ve kompakt ultra hızlı

kaynaklar geliştirmek için çekici kaynaklar olarak öne çıkmaktadır. Yb-katkılı katı hal kazanç ortamı, bire yakın kuantum verimliliği ile basit enerji diyagramına sahiptir (düşük kuantum kusuru ile pompalama sağlar). Buna ek olarak, sıcaklık ile sönümlenme, yukarı dönüştürme ve ESA gibi istenmeyen mekanizmalar bu malzemelerin yüksek saflıktaki örneklerinde mevcut değildir (Boulon vd. 2004; DeLoach vd. 1993). Yb³⁺ün 980 civarındaki verimli pompa bantları, piyasadaki en güvenilir ve güçlü lazer diyotlar olarak kabul edilen InGaAs lazer diyotların tercih edilen emisyon spektrumuyla örtüşmektedir (Demirbas vd. 2021). Bu da maliyet azaltma, kompaktlık, düşük gürültü ve yüksek elektrik-optik dönüşüm verimliliği gibi avantajlarla doğrudan diyot pompalamayı mümkün kılmaktadır (Lagatsky vd. 2004). Bugüne kadar, ultra kısa darbelerin üretilmesi için YAG, CaF₂, KGW, KYW gibi Yb-katkılı kazanç ortamlarına dayanan diyot pompalı katı hal lazerlerde önemli performans ve verimlilik gösterilmiştir (Uemura ve Torizuka 2008; Willenberg vd. 2020; Klopp vd. 2002; Meng vd. 2019). Çizelge 2.1'de özetlendiği gibi, son yıllarda Yb-katkılı ortama dayalı pasif mod kilitli diyot pompalı katı hal lazerlerden GHz tekrarlama frekansına sahip ultra hızlı darbelerin verimli ve uygun maliyetli üretimine yönelik önemli bir ilgi vardır.

Çizelge 2.1'den özetle, GHz tekrarlama frekansında en kısa darbe süresi (48 fs), en yüksek tepe gücü (74 W) ve ortalama güç (6.9 W) bir KLM Yb:CALGO lazeri ile elde edilmiştir (Hamrouni vd. 2022). Benzer şekilde, çeşitli kazanç ortamları ile elde edilmiş GHz tekrarlama frekanslarındaki KLM raporları incelendiğinde, yüksek tekrarlama frekanslarında içsel olarak azalan kavite içi darbe enerjisi nedeniyle mod kilitlemeyi başlatmak ve sürdürmek için nispeten yüksek güçlü tek modlu fiber veya fiber bağlı lazer diyotları pratik olarak kullanılmaktadır. SESAM'ların kullanıldığı GHz tekrarlama frekanslarındaki pasif mod kitleme operasyonunda ise, sürekli dalga mod-kitleme için gereken eşiğin altındaki güç seviyelerinde, optik bileşenlerde (SESAM gibi) kavite içi anlık pik gücü yükselmesine ve dolayısıyla hasara neden olabilecek Q-anahtarlama kararsızlıkları meydana gelebilir (Klenner ve Keller 2015). Bu nedenle, çok modlu lazer diyotlar (Mayer vd. 2017; Yamazoe vd. 2010), çok diyotlu pompalama (Li vd. 2010), kırınım sınırlı tek modlu konik lazer diyot pompalama gibi teknikler ile yüksek parlaklıkta pompalama ile pratik olarak kullanılmaktadır (Demirbas vd. 2011).

Tez çalışmasının bu başlık altında yapılmış literatür katkısı ise, basit ve düşük maliyetli bir pompalama şeması kullanarak Yb-katkılı İtriyum Lityum Florür (YLF) hostunda (Yb:YLF) ilk kez GHz tekrarlama hızlarında femtosaniye darbe üretiminin gösterilmesidir. Bu bakımdan, tez çalışmasında kullanılan Yb:YLF malzemesine ait genel karakteristiklerin ve bu malzeme ile geçmişte yapılmış çalışmaların özetini vermek faydalı olacaktır. Yb:YLF kazanç ortamı geniş bir emisyon spektrumuna (kriyojenik sıcaklıklarda bile geniş kalır (~10 nm) (Kawanaka vd. 2002), zayıf termal ve popölasyon merceklenmesine, doğal polarize çıkışa ve alternatif Yb-katkılı hostlara (YGW, KYW, YAP gibi) kıyasla daha uzun floresan ömrüne (~2 ms) sahiptir (Körner vd. 2020; Kilinc vd. 2023). Ayrıca, yüksek kaliteli Yb:YLF örnekleri de minimum pasif kayıplar ile büyütülebilmektedir (Brasse vd. 2021). Ek olarak, negatif termo-optik katsayının pozitif popölasyon ve/veya foto-elastik kaynaklı lensleme ile birleşik etkisinin bir sonucu olarak nispeten küçük olan termal lens nedeniyle ısı yükü başına düşük miktarda ışın bozulması elde edilir (Demirbas vd. 2020). Yb:YLF ile sürekli dalga operasyonunun ilk raporu 2001 yılında 400 mW'lık basit bir diyot pompalı lazerden 50 mW çıkış gücü elde edildiğini göstermiştir (Kawanaka vd. 2001). Bugüne kadar, oda sıcaklığında daha güçlü

pompalama şemaları kullanılarak, 5.87 W'a kadar sürekli dalga çıkışı (Fredrich-Thornton vd. 2011) ve 993-1110 nm'lik geniş bir ayar aralığı gösterilmiştir (Demirbas vd. 2022).

Çizelge 2.1. Literatürde Rapor Edilmiş GHz Tekrarlama Oranlarına Sahip Yb-Katkılı Ortama Dayalı Pasif Mod Kilitli Diyot Pompalı Lazerler

Kazanç Ortamı	Metot	τ_p (fs)	f (GHz)	P_{ort} (W)	$\Delta\lambda$ (nm)	λ_c (nm)	Ref.
Yb:CYA ¹	KLM	99	1.04	1,46	20	1048	(Zhang vd. 2023)
Yb:KGW ²	KLM	296	1.64	3.3	5	1049	(Zheng vd. 2022)
Yb:KGW ²	SESAM	250	0.56-1.23	0.13	4	1040-1036	(Wüst vd. 2022)
Yb:KGW ¹	SESAM	125	1.06	3.4	11.3	1046	(Klenner vd. 2013)
Yb:KGW ⁴	SESAM	290	1	2.2	4.8	1042	(Pekarek vd. 2011)
Yb:KGW ⁴	SESAM	396	4.8	1.9	4.1	1043	(Pekarek vd. 2012)
Yb:KGW ⁴	SESAM	281	1	1.1	4.9	1041	(Pekarek vd. 2010)
Yb:CALGO ²	KLM	93	1	6.9	12.5	1045	(Hamrouni vd. 2022)
Yb:CALGO ²	KLM	48	1	4.1	24.3	1052	(Hamrouni vd. 2022)
Yb:CALGO ³	SESAM	166	10.6	1.2	7	1050	(Mayer vd. 2017)
Yb:CALGO ²	SESAM	95	5	4.1	14	1060	(Klenner ve Keller 2015)
Yb:CALGO ²	SESAM	60	1.8	2.95	26	1059	(Klenner vd. 2014)
Yb:KYW ¹	CNT	168	1.2	0.05	8	1047	(Yang vd. 2012)
Yb:KYW ²	SESAM	278	1.02	0.77	3.8	1042	(Schrattwieser vd. 2012)
Yb:KYW ¹	KLM	-	4.6	0.01	11	1046	(Endo vd. 2012)
Yb:KYW ³	SESAM	162	2.8	0.68	7.5	1045	(Yamazoe vd. 2010)
YbLu ₂ O ₃ ¹	KLM	148	6	0.01	8.2	1076	(Endo vd. 2013)

¹Tek modlu fiber lazer, ²Fiber bağlı lazer diyot, ³MMD lazer diyot, ⁴Dağıtılmış Bragg reflektörlü konik diyot lazer.

Mod kilitleme operasyonunda oda sıcaklığında Yb:YLF'de şimdiye kadar gösterilen en kısa darbe süresi 40 fs'dir (Demirbas vd. 2022). Aynı çalışmada SESAM üzerindeki lazer mod büyüklüğünün uygun mühendisliği ile 1.85 W ortalama güce sahip

380 fs'lik darbeler gösterilmiştir (Demirbas vd. 2022). Ancak, şimdiye kadar ultra hızlı Yb:YLF lazerlerden sadece megahertz darbe tekrarlama oranları rapor edilmiştir. Bu çalışmada ise GHz tekrarlama frekansında ilk femtosaniye Yb:YLF lazeri rapor edilerek literatüre kazandırılmıştır. İki düşük maliyetli tek modlu lazer diyot tarafından pompalanan ve SESAM tarafından pasif olarak mod kilitlenen avuç içi boyutunda z-katlanmış bir kaviteden 40 mW ortalama güç çıkışı ile 1.1 GHz'de 220 fs darbeler elde edilmiştir. İlgili lazer sisteminin kavite düzeni, kullanılan optik elemanların teknik özellikleri ve pompalama yöntemi bölüm 3.3.1'de açıklanmaktadır. Bölüm 4.3.1'te osilatör çıkışının güç ölçeklendirmesi (sürekli dalga ve mod kilitli çalışmada), radyo frekansı spektrumu, optik spektrum, otokorelasyon ve bağıl şiddet gürültüsü açısından ölçülen özellikleri açıklanmaktadır.

2.3.2 Yb:LLF kazanç ortamı ile sürekli dalga ve pasif mod-kilitli lazer operasyonu

Tez çalışmasının bu bölümünde tek- ve çok-modlu lazer diyotları ile pompalanmış Yb:LLF sistemleri ile sürekli-dalga, dalgaboyu ayarlama ve SESAM ile mod-kilitli sistemler ile MHz mertebesinde tekrarlama frekansına sahip femtosaniye darbelerin üretilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Literatürde Yb:LLF kazanç ortamının spektroskopik özellikleri ilk olarak Bensalah vd. (2004) tarafından raporlanmış ve Yb:LLF'deki enerji seviyeleri ve floresan ömrünün sıcaklığa bağlı tayini ve izomorf olan Yb:YLF ile kıyaslaması üzerine odaklanılmıştır. Günümüze kadar YLF bir lazer malzemesi olarak yaygın bir şekilde çalışılmış olsa da (Demirbas vd. 2022), kısmen ham LuF_3 malzemesinin yüksek maliyeti nedeniyle izomorf LuLiF_4 (LLF) hostunda sadece birkaç çalışma yayınlanmıştır (Bensalah vd. 2004). LLF hostunda rapor edilmiş bu çalışmalar YLF hostundaki karşılıkları ile kıyaslandığında, (i) Ce:LLF, Yb:LLF, Tm:Ho:LLF'de üstün lazer performansı, (ii) Nd:LLF'de %25 daha geniş ECS, (iii) Yb:LLF'de ise 960 nm'de daha yüksek absorpsiyon kesiti rapor edilmiştir (Bensalah vd. 2004; Yin vd. 2012). Yb:LLF'de ışımanın vibronik genişlemesi kısa darbelerin üretilmesine (E//c'de 90 fs ve E//a'da 113 fs darbeler 30 mW çıkış gücünde bildirilmiştir (Lin vd. 2016) ve geniş ölçüde ayarlanabilir (1026-1069 nm (Akbari ve Major 2022)) sürekli dalga lazerlerin gerçekleştirilmesine olanak vermiştir.

Tez kapsamının bu alt bölümünde yapılmış çalışmalar ile, kompakt, düşük maliyetli çok-modlu lazer diyot pompalı Yb:LLF kazanç ortamı ile sürekli dalga operasyonunda 996-1073 nm aralığında ayarlanabilir lazer operasyonu gösterilmiştir. Tez kapsamında elde edilen bu sonuç, Yb:LLF kazanç ortamı ile bugüne kadar gösterilmiş en geniş sürekli-dalga dalgaboyu ayar aralığı olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca SESAM ile mod-kilitli femtosaniye osilatörlerinin oluşturulmasına yönelik çalışmalarda 2.8 W ortalama çıkış gücüne varan 181 fs uzunluğunda atmalar üretilmiştir. Elde edilmiş bu sonuçlar ise Yb:LLF kazanç ortamında elde edilmiş en yüksek ortalama güç ve atma enerjisine sahip femtosaniye atmalar olma özelliği taşımaktadır. İlerleyen alt bölümlerde ayrıca Yb:LLF kazanç ortamının tek-modlu diyotlar ile pompalanması ile lazer çıkışında sürekli dalga ve md-kilitli operasyonun elde edilmesine yönelik pratik kurulum tanımları elde edilmiş sonuçlar sunulmaktadır.

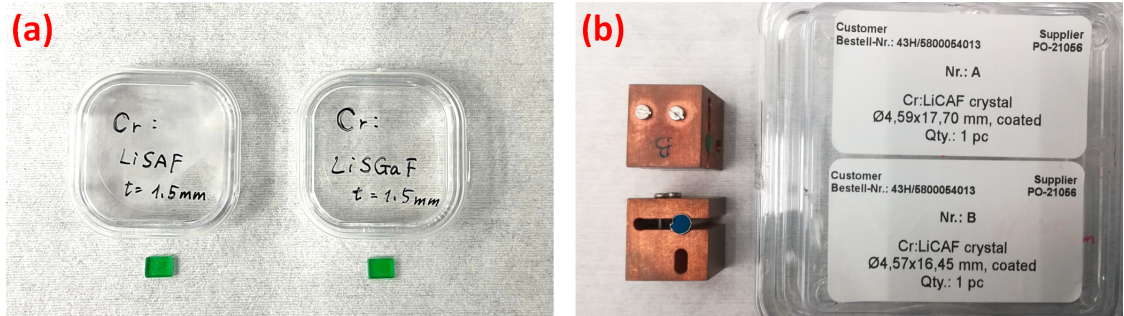
3. MATERYAL VE METOT

Tez çalışmasının bu bölümünde, giriş kısmında tanımladığımız ilgili alt bölümlerin kapsamında gerçekleştirilen lazer sistemlerinin oluşturulmasında takip edilen metot ve kullanılan optomekanik ekipmanların detaylı tanımları takip eden alt bölümlerde verilmektedir.

3.1. Cr:Colquiriite’lerde Spektroskopik Özelliklerin Sıcaklığa Bağlı Ölçümü

Kriyojenik ve oda sıcaklığı üstündeki sıcaklıkları kapsayan aralıkta sıcaklığa bağlı spektroskopik özellikleri incelediğimiz bu bölümde, Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarına ait emisyon kesiti (σ_e) ve floresan ömrünün (τ_f) 77-618 sıcaklık aralığında yüksek sıcaklık çözünürlüğü ile ölçümünde kullanılan deneysel teknikler tanımlanmaktadır.

İlgili deneylerde kullanılmış olan ve spektroskopik karakterizasyon uygulamaları için uygun geometride a-ekseninde kesilmiş Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF örnekleri (IKZ kurumu tarafından sağlanmıştır) Şekil. 3.1(a)’da gösterilmiştir. Bu Cr:Colquiriite örneklerine ek olarak, emisyon kesit alanı ölçümleri sırasında Şekil 3.1’de gösterilmiş Cr:LiSAF kristali envanterde bulunmadığı için, bu deneyler sırasında giriş bölümündeki Şekil 1.3(a)’da gösterilen Brewster-Brewster kesimli bir Cr:LiSAF kristali kullanılmıştır.

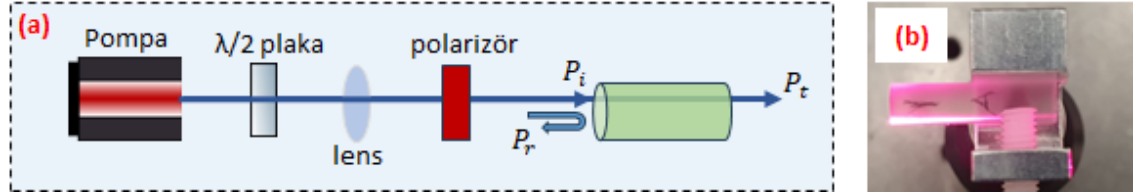


Şekil 3.1. Sıcaklığa bağlı emisyon kesiti ve floresan ölçümlerinde kullanılmış **a)** Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF; **b)** Cr:LiCAF kristalleri

Bu kısımda ve Şekil 1.3’te verilmiş olan kazanç ortamlarının geometrik tanımlarına ek olarak, spektroskopik ve lazer operasyonu için kullanılmak üzere çubuk geometride a-ekseninde kesilmiş (Şekil 3.1b) ve her iki ucuna yansıma (R) engelleyici kaplama uygulanmış Cr:LiCAF kazanç ortamı özelinde absorpsiyon testleri gerçekleştirilmiştir. Burada Cr:LiCAF kazanç ortamı yüzeylerine uygulanmış optik kaplama karakteristiği 750-900 nm aralığında $R < 0.2$ (her iki polarizasyonda, $\theta = 0^\circ$), 650 nm dalgaboyunda $R < 1\%$ (her iki polarizasyonda, $\theta = 0^\circ$), ve hasar eşiği $> 10 \text{ J/cm}^2$ (10 ns için) şeklinde üretim için tanımlanmıştır. İlgili Cr:LiCAF kristali daha sonra aşağıda tanımlanmış olan absorpsiyon testlerine tabi tutulmuştur. İlk olarak, Cr-katkılama oranı ($\sim 3\%$) ve uzunluğu bilinen Cr:LiCAF kristali için beklenen absorpsiyon miktarı (A) aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir.

$$A = 1 - e^{-\alpha l} \quad (3.1)$$

Burada α katsayısı $\alpha = N_{\%1} \times k \times \sigma_{a//c,a}$ şeklinde tanımlanmakta olup, $N_{\%1}$ %1 katkılı kristalde katkılama yoğunluğunu (Cr:LiCAF için $N_{\%1} = 0.775 \times 10^{20}$ iyon/cm³), k katkılama yüzdesini (%3 Cr-katkılı Cr:LiCAF için $k = 3$), $\sigma_{a//c,a}$ ise c- veya a- eksenlerindeki absorpsiyon kesiti temsil etmektedir. Şekil 1.4'ten, ilgili deneylerde 657 nm etrafında ışıma yapan pompalar ile uyarılma ile, Cr:LiCAF için $\sigma_{a//c} = 2.2 \times 10^{-20}$ cm², $\sigma_{a//a} = 1.5 \times 10^{-20}$ cm² değerleri kullanılmaktadır.



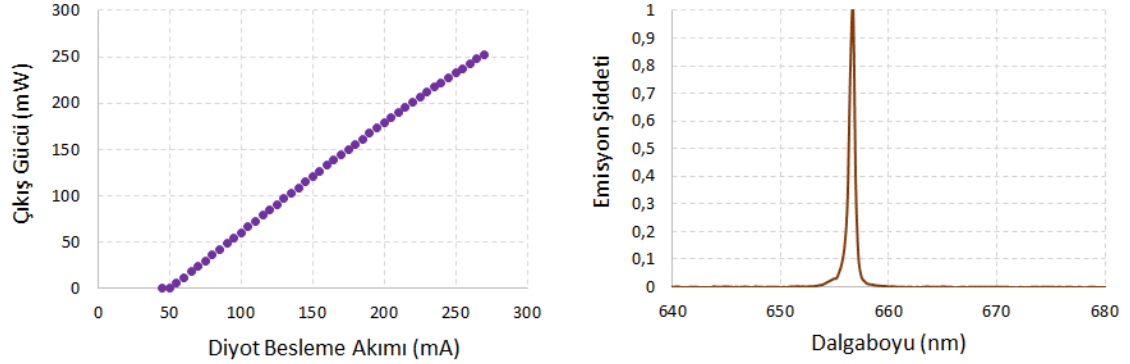
Şekil 3.2. Çubuk geometrisinde kesimli Cr:LiCAF kazanç ortamının absorpsiyon ölçümü için kullanılan **a)** deney düzeneği; **b)** uyarılmış Cr:LiCAF kristali

İlgili değerler $l = 1.75$ cm uzunluğundaki 3% Cr-katkılı Cr:LiCAF kazanç ortamı için yerine konduğunda a- ve c- eksenlerinde sırasıyla $A_a = \%99.85$, $A_c = \%99.99$ absorpsiyon değerleri hesaplanmaktadır. İlgili absorpsiyonun deneysel olarak ölçülmesinde Şekil 3.2'de gösterilmiş deney düzeneği kullanılmıştır. Burada, öncelikle pompa çıkışı önce bir asferik lens ($f_1 = 4.5$ mm) ile (Şekil 3.2'de gösterilmemiş) kolime edilir ve ardından pompa ışını kristale içerisine odaklamak için $f_2 = 100$ mm'lik bir akromatik çift lens kullanılır. Ayrıca, π -düzlemindeki polarize diyot çıkışı $\lambda/2$ plaka yardımı ile döndürülerek polarizör ile seçilmiş olan a- ve c- eksenlerindeki uyarım için maksimum güç aktarımında kullanılır. İlgili eksenler için, diyot tarafındaki kristal yüzüne uygulanan uyarım gücü ve kristalin diğer yüzeyinde okunan çıkış gücü bir güç ölçer yardımı ile 657 nm merkezinde ölçülür. Örnek olarak, E//a ekseninde uyarılmış Cr:LiCAF kristali için pompa tarafındaki yüzeye 10.9 mW güç uygulanmış, kristalin diğer tarafında ise 0.32 mW çıkış gücü ölçülmüştür. Burada, 10.9 mW'lık giriş gücünün, yüzeydeki Fresnel kayıplarından ($R=0.948$) ötürü (Cr:LiCAF için $n=1.38$) 10.33 mW'lık kısmı kristal içerisine girmektedir. Bu da %96.9'luk iletim, %96.99'luk absorpsiyona karşılık gelmektedir. E//c için de benzer yöntem ilgili değerler ile birlikte ($P_i=10.33$ mW, $P_t=0.17$ mW) kullanılmış ve sonuçta %98.35'lik iletim, %98.69'luk absorpsiyon değerleri elde edilmiştir.

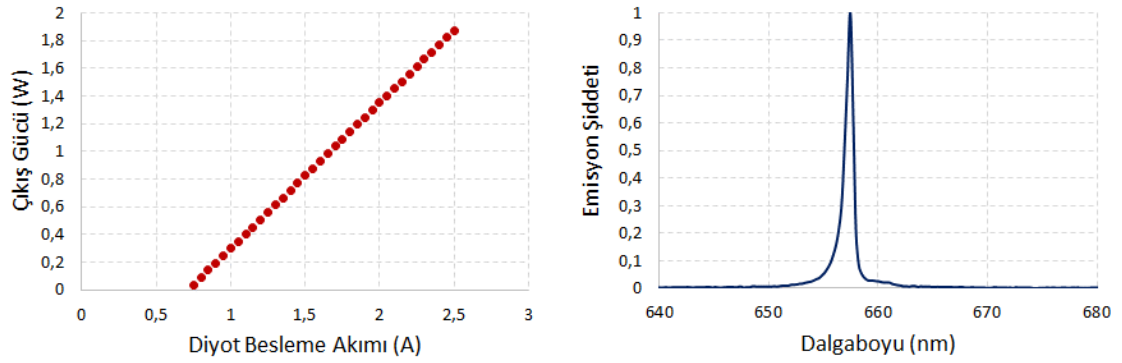
Tez çalışması kapsamı dahilinde ilgili Cr:LiCAF kazanç ortamının özellikle kriyojenik sıcaklıklarda lazer operasyonunun gösterilmesi ile ilgilenilmiş olsa da oda sıcaklığında kurulmuş olan ve çıkışında 1.8 W alınabilen çok-modlu diyotlar ile pompalanmış sürekli dalga lazer sisteminde lazer operasyonu elde edilememiştir. Yukarıda detaylandırılan güçlü absorpsiyon değerlerine rağmen, bu kristal ile verimli lazer operasyonunun elde edilememiş olması Cr:LiCAF kristalinin yüksek pasif kayıplara sahip olabileceğini işaret etmektedir. Pasif kayıpların nicel olarak ortaya çıkarılmasında kullanılabilecek Findlay-Clay ve Caird analizleri lazer operasyonu gerektirdiği için ilgili pasif kayıp karakteristiği ölçümlenememiştir.

Cr:LiCAF kazanç ortamının emisyon kesiti ve floresan ömrünün sıcaklığa bağlı

değişiminin ölçümlerinde kullanılan düzeneklerin tarif edildiği takip eden alt bölümlerde bahsi geçen, 657 nm etrafında ışımaya yapan tek-modlu ve çok-modlu diyotlara ait çıkış gücü eğrileri ve çıkış spektrumları Şekil 3.3. ve Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.3. USHIO HL65221DG tekli-mod lazer diyotuna ait **a)** çıkış gücü eğrisi; **b)** emisyon spektrumu



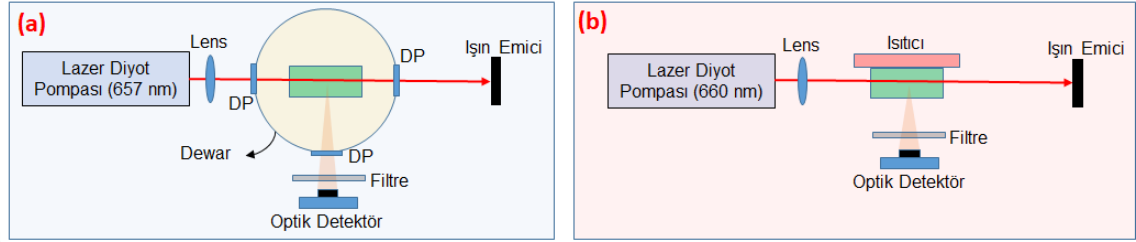
Şekil 3.4. Çoklu-mod lazer diyotuna ait **a)** çıkış gücü eğrisi; **b)** emisyon spektrumu

Takip eden alt bölümlerde tanımlandığı şekli ile kullanılan her iki tek-modlu ve çok-modlu diyotların emisyon spektrumu 657 nm etrafında merkezlenmiştir. Şekil 1.3'te verilmiş olan Cr:Colquiriite kazanç ortamlarının absorpsiyon kesitinin 657 nm etrafında güçlü olması, ilgili kristallerin burada karakteristikleri tanımlanmış diyotlar ile verimli şekilde pompalanmasına imkân vermektedir.

3.1.1. Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı flöresan ömrünün 78-618 K aralığında ölçümü

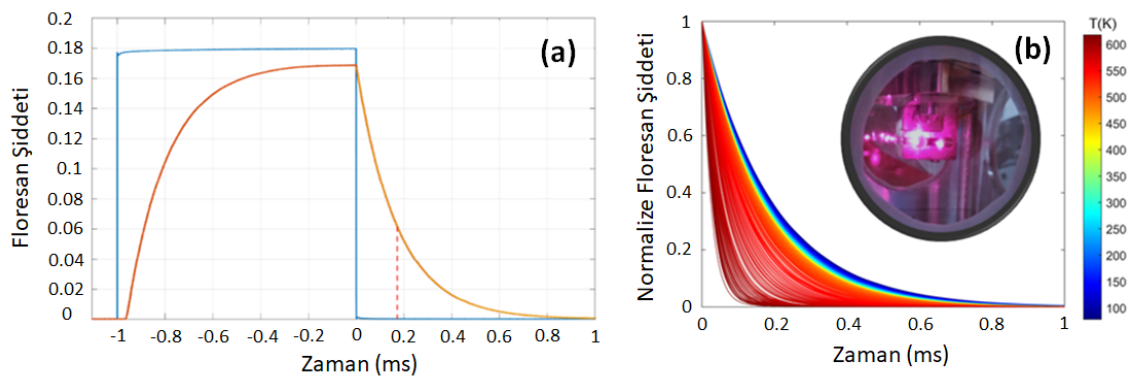
Şekil 3.5a ve Şekil 3.5b sırasıyla 78-300 K ve 300-618 K aralıklarında Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı floresan ömrünün ölçümü için kullanılan deneysel düzeneklerin şematini göstermektedir. Her iki düzenekte de uyarma kaynağı olarak, Şekil 3.4'te karakteristikleri tanımlanmış olan ve 657 nm'de dar bir emisyon zirvesine sahip 1.8 W çok modlu lazer diyotu kullanılmıştır. Burada tek-modlu lazer diyot yerine görece daha yüksek çıkış gücüne sahip çok-modlu lazer diyotunun tercihi, dewar kazanı camlarındaki yansıma kayıplarını daha yüksek güçte pompalama ile kompanze etme amacı ile ortaya çıkmaktadır. İlgili düzenekte diyot çıkışı önce bir asferik lens ile ($f_1=4.5$ mm) kolime edilir ve ardından pompa ışınını kristale gevşek bir şekilde odaklamak için

$f_2=100$ mm'lik bir akromatik çift kullanılır (Auger yükseltgenmesi yoluyla floresan ömrünün sönümlenmesini önlemek için sıkı odaklama uygulanmaz). İncelenen kristallerin absorpsiyon ve emisyon bantları arasındaki örtüşme oldukça küçük olsa da (Şekil 1.4'te verilmiş), radyasyon hapsini en aza indirmek için kristaller kenarlarına yakın bir bölgeden uyarılmıştır (Demirbas 2019). Pompa ışını daha sonra 10 Hz'lik bir tekrarlama frekansında (kristallere gelen ortalama güç: 180 mW) keskin yükselen ve düşen kenarlara sahip 1 ms uzunluğunda dikdörtgen uyarma darbeleri üretmek için bir gecikme jeneratörü kullanılarak modüle edilir.



Şekil 3.5. a) 78 - 300 K; **b)** 300 - 618 K aralıkları için kullanılan sıcaklığa bağlı floresan ömrü ölçüm düzeneklerinin basitleştirilmiş şeması

Daha sonra yayılan floresan herhangi bir kaplama içermeyen geniş bantlı bir lens ($f_3=50$ mm) tarafından uyarma ışınına dik konumda (maksimum emisyon şiddeti burada tespit edilmiştir) yerleştirilmiş bir fotodedektör üzerine odaklanır ve burada detektör tarafından ölçülen zamana bağlı floresan şiddeti osiloskopta kaydedilir. Cr:LiCAF kristali için oda sıcaklığında ölçülmüş örnek bir floresan eğrisi Şekil 3.6a'da gösterilmiştir. Burada pompa çıkışını 1 ms boyunca açık kalacak şekilde modüle eden 10 Hz tekrarlama frekansına sahip sinyal jeneratörü çıkışının bir periyotluk gösterimi mavi renkli grafik ile gösterilmiştir. Uyarılan Cr:LiCAF kristali tarafından yayılan emisyonun zamana bağlı gösterimi ise turuncu renkli grafik ile belirtilmiştir. Burada floresan ömrünün bu sıcaklıktaki tayini, pompa sinyalinin kesimi ile başlayan floresan şiddeti düşüşünün maksimum değerinin $1/e$ 'sine düşmesinde geçen süre olarak tanımlanır.

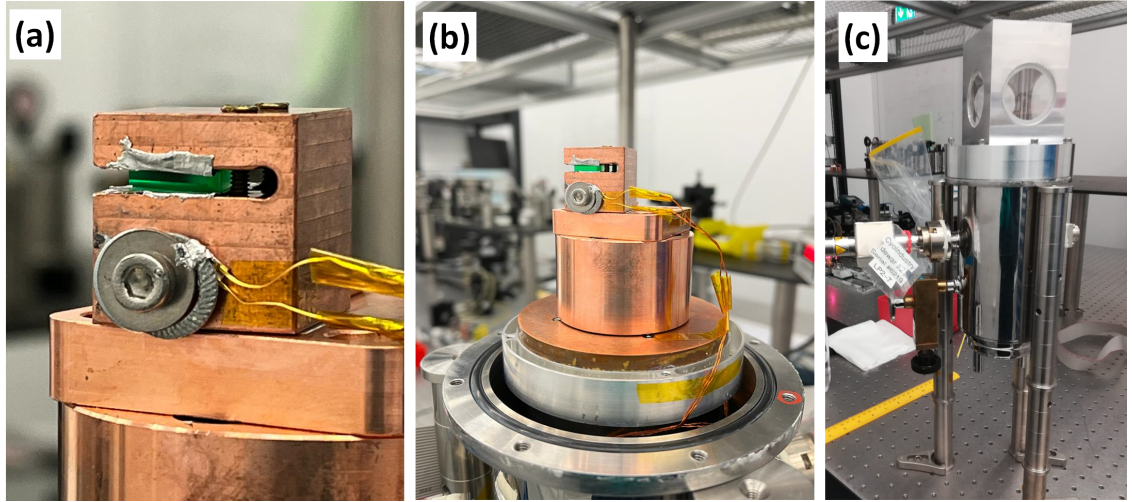


Şekil 3.6. a) Cr:LiCAF kazanç ortamı için oda sıcaklığında ölçülen floresan düşüş eğrisi örneği; **b)** 78-618 K aralığında 1 K'lık artışlarla ölçülen Cr:LiCAF floresan düşüş eğrileri (İç görsel, dewar içindeki uyarılmış Cr:LiCAF kristalini göstermektedir.)

Deneylerde, daha önce Şekil 1.3a'da gösterilmiş olan a-eksen kesimli Cr:Colquiriite kristalleri kullanılmıştır: (i) 16.7 mm uzunluğunda, 4.7 mm çapında ve %3

Cr-katkılı çubuk şeklinde bir Cr:LiCAF kristali, (ii) 15 mm uzunluğunda, 2 mm kalınlığında Brewster-Brewster kesimli, %0.8 Cr-katkılı Cr:LiSAF levha örneği, (iii) 1.5 mm uzunluğunda, 6 x 5 mm² yüzey boyutlu ve Cr katkılama seviyesi %3 olan küboid şekilli Cr:LiSGaF kristali. İncelenen %3 Cr-katkılı LiCAF ve LiSGaF kristalleri ile %0.8 Cr-katkılı Cr:LiSAF kristalleri için, floresan ömrünün konsantrasyon sönümlenmesi literatüre göre ihmal edilebilir düzeydedir (LiSAF'da %2-15 Cr katkısı için (Stalder vd. 1991), LiCAF'da %0.3-8.8 Cr katkısı için (Payne vd. 1990a, b; Rapoport ve Shand 1992) ihmal edilebileceği gösterilmiştir).

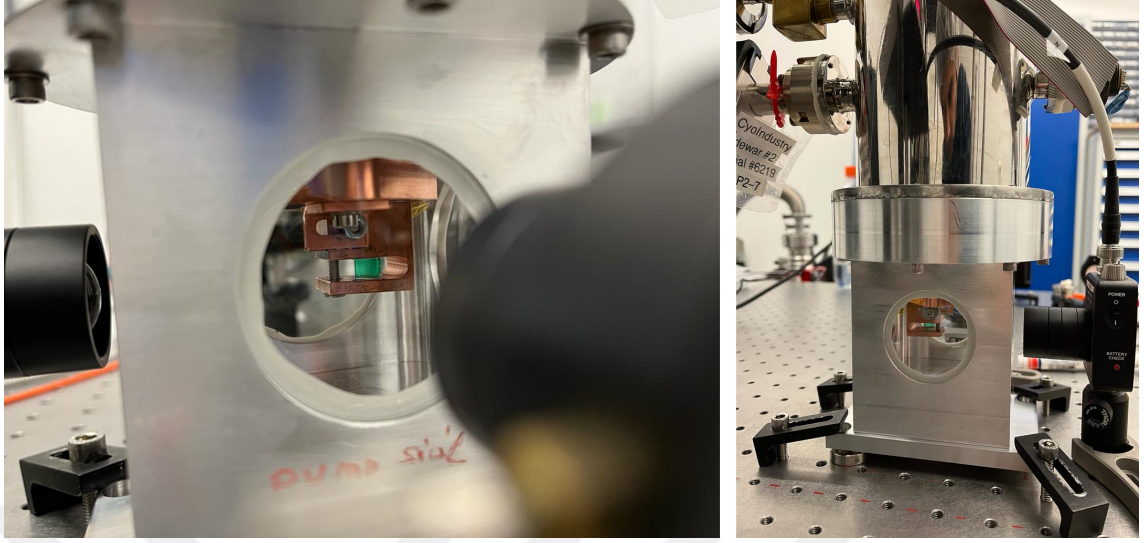
Kriyojenik sıcaklıklarda (78-300 K, Şekil 3.5a) gerçekleştirilen deneylerde Cr:Colquiriite örnekleri, her bir örnek için uygun geometriye sahip bakır tutuculara monte edilir. Kristaller ve ilgili tutucular arasında sıkı bir fiziksel ve temas, ince indiyum levhalar kullanılarak sağlanır. Kristal tutucu daha sonra dewar içindeki çok katmanlı bir soğuk başlığın üstüne sıkıca sabitlenir. Dewar kazanı vidalar ile kapatılarak kristalin bulunduğu hazne bir vakum pompası yardımı ile vakumlanır. Daha sonra dewar kazanının ilgili haznesi kristalleri 78 K'ye kadar soğutmak için sıvı nitrojenle doldurulur. Sıcaklığa bağlı floresan ömrü daha sonra dewarın yavaş ısıtma döngüsü sırasında ölçülür (78'den 300 K'ye ısınma işlemi yaklaşık 4 saat sürer). Burada anlatılan sürece örnek bir görsel referans olması adına Şekil 3.7a'da kristalin bakır renkli tutucu içerisine yerleştirilip dewar kazanı içerisindeki bakır bloklar üzerine yerleştirilmesi gösterilmiştir. Burada kristal tutucusu ve sıvı nitrojen haznesinin üzerinde konumlandırılmış bakır bloklar arasında termal iletkenliği sağlamak adına ince gümüş bir plaka kullanılmaktadır. Kristal tutucusuna sabitlenmiş bir sıcaklık sensörü, kristal sıcaklığının ± 0.1 K hassasiyetle gerçek zamanlı olarak ölçülmesini sağlamaktadır (Şekil 3.7a ve Şekil 3.7b'de sarı renkli termal sensör kabloları görünmektedir).



Şekil 3.7. a) Bakır tutucu içerisine yerleştirilmiş Cr:LiSAF; **b)** Kristali tutucusunun dewar kazanı içerisine sıcaklık sensörü ile birlikte monte edilmesi; **c)** Kapatılarak dış ortamdan izole edilmiş dewar kazanı

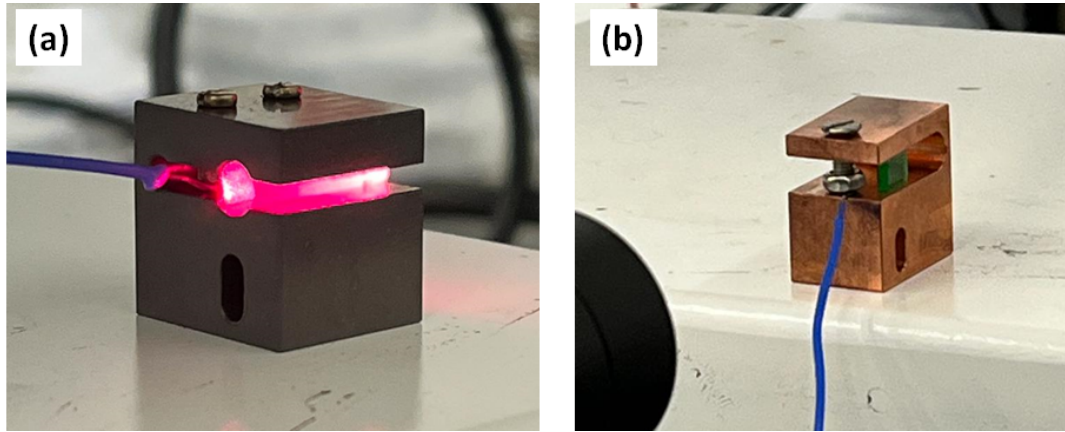
Şekil 3.8, kriyojenik sıcaklıklarda Cr:Colquiriite kristallerinin floresan ömrünün ölçülmesinde kullanılan deney düzeneğinin farklı açılarından fotoğraflarını (Cr:LiSGaF için gösterilmiş) göstermektedir. İlgili fotoğraflarda Cr:LiSGaF kristali dewar kazanının pompa tarafına bakan camından görünmekte, ayrıca uyarılmış emisyonu toplayan lens

ve fotodedektör de gözlemlenebilmektedir.



Şekil 3.8. Cr:LiSGaF kristalinin floresan ömrünün kriyojenik sıcaklıklarda ölçümünde kullanılan ölçüm düzeneğinin farklı açılardan fotoğrafları

Oda sıcaklığının üzerinde gerçekleştirilen deney kurulumlarında (>300 K, Şekil 3.5b), ilgili tutuculardaki Cr:Colquiriite kristalleri doğrudan kristallerin sıcaklığını 618 K'ye kadar kontrol etmeyi sağlayan bir ısıtma plakasının üzerine yerleştirilmiştir. Şekil 3.9'da Cr:LiCAF ve Cr:LiSGaF kristallerinin oda sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda floresan ömrünün ölçülmesinde ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiş halleri gösterilmiştir. Burada yine sıcaklık sensörü ilgili kristallere yakın bir bölgede tutucuya sabitlenmiştir (Şekil 3.9'da mavi renkte termal sensör kablosu görülmektedir).



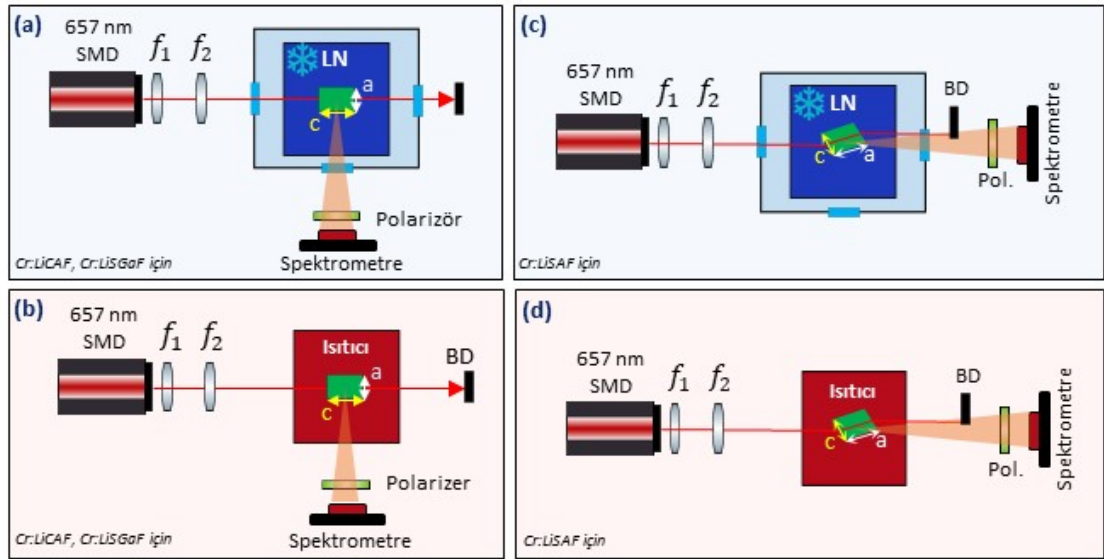
Şekil 3.9. Oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda floresan ömrü ölçümü için ısıtıcı plaka üzerine yerleştirilmiş **a)** Cr:LiCAF; **b)** Cr:LiSGaF kristali

Burada tanımlanmış deney düzeneklerinin (Şekil 3.5'te şematikleri verilmiş) kullanımı ile, her bir Cr:Colquiriite kristali için floresan düşüşü, ilgili sıcaklık aralığında (Cr:LiCAF için 78-618 K, Cr:LiSAF için 78-478 K, Cr:LiSGaF için 78-471 K) 1 K'lık artışlarla ölçülmüştür. Örnek olarak, 78-618 K aralığında Cr:LiCAF için ölçülen floresan düşüş eğrileri Şekil 3.6'b'de gösterilmektedir. Floresan ömrünün 1 K artışlarla ölçüldüğü

her bir sıcaklıkta, sinyal-gürültü oranını (SNR) ve her kristal için floresan ömrünün belirlenmesindeki doğruluğu artırmak için ölçülen 100 bozunmanın ortalaması kaydedilmiştir. Her bir sıcaklıkta ölçülen floresan düşünün analitik tanımı ve floresan ömrünün hesaplanması için tek bir üstel bozunma modelinin kullanımı, incelenen tüm Cr:Colquiriite kristalleri için tüm sıcaklıklarda ölçülen verilere çok iyi bir uyum sağlamıştır. Yapılan ölçümlerde, ısıtıcı plakanın limitinden ötürü Cr:LiCAF için 618 K'e kadar ölçümler gerçekleştirirken, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristalleri için ise ölçüm alınan üst sıcaklık yaklaşık 480 K 'da sınırlandırılmıştır. Bu iki kristal özelinde 480 K civarında ölçümlerin sonlandırılmasının sebebi, bu sıcaklığın üzerinde, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kristallerinin çoğunlukla ışıınımsız geçişe sahip olması ve böylece ışıınımlı emisyon sinyalinin detektör tarafından algılanamayacak kadar kaybolmasıdır. Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı floresan ömrünün sonuç ölçümleri Bölüm 4.1.1'de daha ayrıntılı olarak raporlanmıştır.

3.1.2. Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı emisyon kesitinin 78-618 K aralığında ölçümü

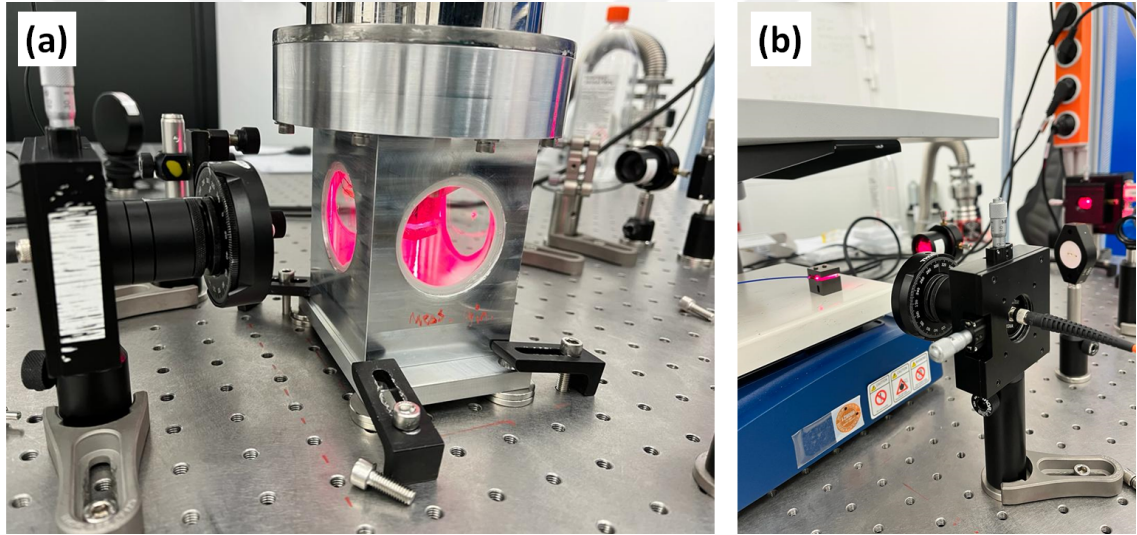
Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarında uyarılmış ışıının E//c ve E//a polarizasyonlarındaki sıcaklığa bağlı emisyon kesitinin (ECS) belirlenmesi için kullanılan deney düzenekleri Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. a,b) Cr:LiCAF & Cr:LiSGaF; c,d) Cr:LiSAF için sıcaklığa bağlı ECS ölçüm düzeneklerinin basitleştirilmiş şeması (Mavi renkle çerçevelenmiş kurulumlar kriyojenik, turuncu renkle verilenler ise oda sıcaklığı üstündeki deneyler içindir)

Kristallerin uyarılması için, karakteristiği Şekil 3.3'te gösterilmiş olan tek-modlu bir diyottan (SMD) ~250 mW sürekli dalga çıkışı (657 nm'de) kullanılmıştır. Cr:LiCAF ve Cr:LiSGaF için kristal tarafından her yöne yayılan uyarılmış emisyon yoğunluk spektrumları, pompa ışını eksenine 90° açıyla ölçülmüştür (maksimum emisyon şiddeti bu pozisyon etrafında tespit edilmiştir). Cr:LiSAF için ise, çalışmada kullanılan kristalin Brewster kesim geometrisi nedeniyle, E//c ve E//a polarizasyonlarındaki emisyon yoğunluğuna ait spektrumları ölçebilmek için, ilgili ölçümler pompa ışını yönünde

ölçülmektedir (Şekil 3.10c ve Şekil 3.10d'de gösterilmiştir). Cr:LiSAF için yapılan ölçümlerde spektrometrenin pompa ışını önüne konulması, bazı sıcaklıklarda ölçülmek istenen emisyon bandı ile çakışan istenmeyen pompa spektrumunun ölçülmesine sebep olmaktadır. İlgili pompa spektrumunun ölçülmek istenen emisyon spektrumu ile karışmasını engellemek için kristal ile spektrometre arasına pompa ışını kesecek büyüklükte bir engel konumlandırılmıştır. Şematik tanımları yapılmış olan ölçüm düzeneklerinin kriyojenik ve oda sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklarda ölçüm için kullanılan fiziksel gösterim örnekleri Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekil 3.11a'da gösterilmiş olan düzenekte, Cr:LiSAF kristali tarafından yayılan uyarılmış emisyonun E//a ve E//c eksenlerindeki şiddeti, pompa ışını yönünde konumlandırılmış polarizör ile seçilerek lens yardımı ile fiber kablo içerisine odaklanarak spektrometreye gönderilir. Şekil 3.11b'de gösterilen düzenekte ise ısıtıcı plaka üzerine konumlandırılmış ve pompa tarafından uyarılan Cr:LiCAF kristali gösterilmiştir. Burada, Cr:LiSAF kristalinden farklı olarak, Cr:LiCAF geometrisi, pompa yönüne dik konumda uyarılmış emisyonun ölçülmesine izin vermektedir. Bu pozisyonda algılanan ve istenmeyen pompa emisyonu çok düşük seviyelerde olduğu için pompa ışını engelleyici önlemlerin alınmasına gerek duyulmamıştır.



Şekil 3.11. a) Kriyojenik (Cr:LiSAF için gösterilmiş) sıcaklıklarda; **b)** oda sıcaklığı üstündeki sıcaklıklarda (Cr:LiCAF için gösterilmiş) ECS ölçümü için kullanılan ölçüm düzenekleri

Tüm ölçümlerde, ilgili polarizasyonlardaki floresan emisyonunu seçmek için 400:1'in üzerinde sönmeme oranına sahip doğrusal bir ince film polarizör (Thorlabs LPNIRE100-B) kullanılır. Her bir polarizasyondaki ilgili floresan daha sonra 25.4 mm odak uzunluğuna sahip kaplamasız bir plano-konveks lens (Newport KPX076) tarafından toplanır ve 400 μ m çekirdek boyutlu bir fiber aracılığıyla Yokogawa AQ6315A optik spektrum analizörüne gönderilir (dahili spektral çözünürlük ayarı: 1 nm, cihazın etkin çözünürlüğü: 2 nm). Ölçüm yapılan her bir sıcaklıkta, 600-1400 nm spektral aralığında, ortalama $\sim 0,8$ nm dalga boyu çözünürlüğünde 1000 veri noktası kaydedilir. Seçilen bu spektral çözünürlük ayarı, Cr: Colquiriite'lerin ilgilenilen sıcaklık aralığında yakın aralıklı keskin emisyon çizgilerine sahip olmamalarından ötürü yeterli olmaktadır. Ek olarak, uyarılmış emisyon ölçümlerinde sinyal gürültü oranını (SNR) iyileştirmek için,

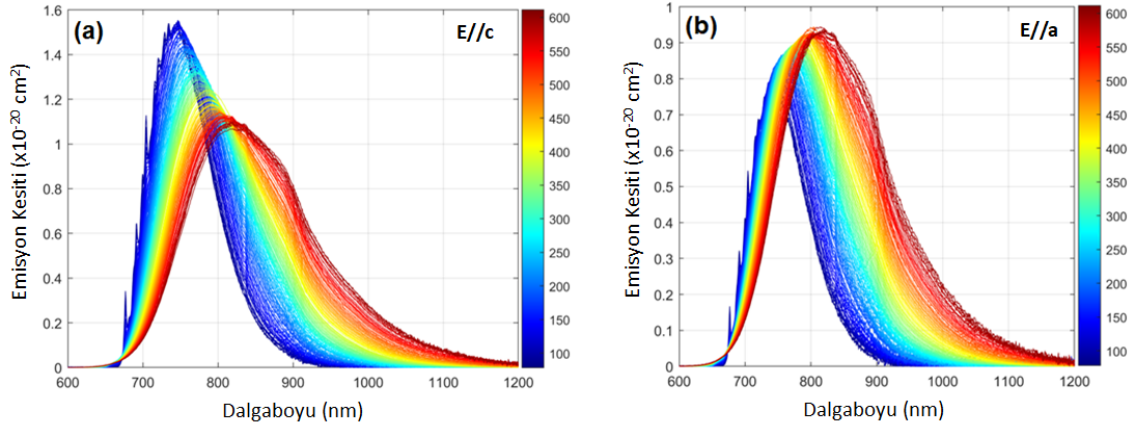
her sıcaklıkta ve ilgili bir polarizasyonda 64 ölçümün ortalaması alınarak ilgili sıcaklık ve polarizasyonda alınmış emisyon şiddet spektrumu olarak kaydedilir.

$E//a$ ($\sigma_{e,a}$) ve $E//c$ ($\sigma_{e,c}$) polarizasyonları için mutlak birimlerdeki emisyon kesiti (3.1) ve (3.2) numaralı eşitliklerle verilmiş olan modifiye edilmiş Füchtbauer-Ladenburg formülü kullanılarak hesaplanır (Huber vd. 1975; Moulton 1986; Dong vd. 2003).

$$\sigma_{e,a}(\lambda, T) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau_R(T)} \frac{I_a(\lambda)}{\int \left(\frac{1}{3} I_c(\lambda) + \frac{2}{3} I_a(\lambda) \right) \lambda d\lambda} \quad (3.1)$$

$$\sigma_{e,c}(\lambda, T) = \frac{\lambda^5}{8\pi c n^2 \tau_R(T)} \frac{I_c(\lambda)}{\int \left(\frac{1}{3} I_c(\lambda) + \frac{2}{3} I_a(\lambda) \right) \lambda d\lambda} \quad (3.2)$$

Burada $I_{a,c}(\lambda)$ tek eksenli kristalin $E//a$ ve $E//c$ polarizasyonlarında ölçülen emisyon şiddet spektrumlarını, c vakumda ışık hızını, λ dalga boyunu, n kazanç ortamının ortalama kırılma indisini (Cr:Colquiriite'ler için $n \sim 1.4$) ve $\tau_R(T)$ üst lazer seviyesinin ışınsal ömrünü temsil etmektedir. $\tau_R(T)$ 'nin sıcaklığa bağımlılığının doğası, bu çalışmada gerçekleştirilen floresan ömrü ölçümlerinden modellenmiştir (Eşitlik 4.1 ile) ve bölüm 4.1.1'de tartışılmıştır.



Şekil 3.12. a) 78-618 K aralığında Cr:LiCAF için emisyon kesitinin **a)** $E//c$; **b)** $E//a$ polarizasyonunda sıcaklıkla ölçülen değişimi

Örnek olarak, bu çalışma kapsamında 78-618 K aralığında Cr:LiCAF için ölçülen emisyon kesitleri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Beklentiler dahilinde, artan sıcaklık emisyon dalga boyunda uzun dalgaboylarına kaymaya neden olur ve emisyonun yarı maksimumdaki tam genişliği sıcaklıkla birlikte artar. Öte yandan, kristal kriyojenik sıcaklıklara soğutulduğunda $E//c$ polarizasyonundaki pik emisyon gücü artarken, $E//a$ polarizasyonunda hafif bir düşüş gözlenmektedir. İncelenen her üç Cr:Colquiriite kristali için, sıcaklığa bağlı emisyon kesitlerinin pik ECS gücü, yarı maksimumdaki tam genişliği ve pik ECS dalga boyu açısından ayrıntılı bir nicel karakterizasyonu bölüm 4.1.2'de verilecektir.

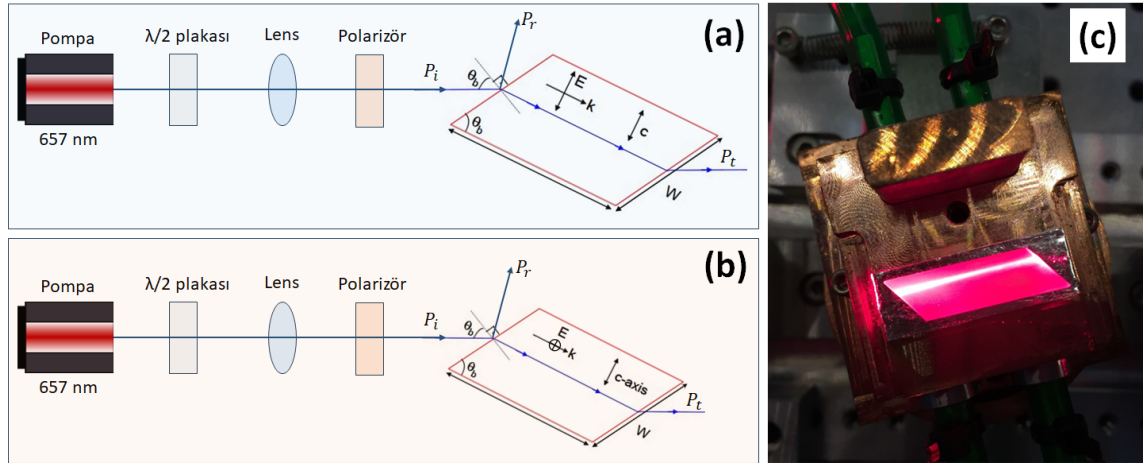
3.2. Diyot Pompalı Cr:LiCAF ile Lazer Operasyonu

Tez çalışmasının bu kısmında, çalışmalar sırasında erişilir durumda olan ve lazer operasyonu için uygun geometride üretilmiş Cr:LiCAF kristalleri ile sürekli-dalga çalışma rejiminde güç ölçeklemesi ve SESAM ile pasif Q-anahtarlamalı operasyonun gerçekleştirilmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Takip eden alt bölümlerde ilgili çalışma rejimlerinde kullanılan Cr:LiCAF kristal örneklerinin Cr-doyurulma oranı testleri, pasif kayıp analizleri ve ilgili rejimlerde kullanılan kavite şematikleri tarif edilmektedir.

3.2.1. Cr:LiCAF kristalinde katkılama ve pasif kayıp karakterizasyonu

Tez çalışması dahilinde, doktora programı sürecinde tez sahibinin bursiyer araştırmacı olarak görev aldığı 119E264 numaralı Tübitak 1001 projesi dahilinde farklı çalışma rejimlerinde kullanılmak üzere Antalya Bilim Üniversitesi Lazer Teknoloji Laboratuvarı bünyesine katılmış olan Cr:LiCAF kristallerinin karakterizasyonu üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bahsedilen Cr:LiCAF örneklerine ait Cr-doyurulma miktarı, pasif kayıp gibi tanımlayıcı özelliklerin ortaya çıkartılması için kullanılmış tekniklere, tezin bu alt bölümünde eğitsel amaçlar doğrultusunda yer verilmektedir.

İlgili kristal karakteristiklerinin ortaya çıkarılmasında LASERAND firması tarafından temin edilmiş olan düşük Cr-iyon katkılı (1.5% Cr-katkılı olacak şekilde sipariş verilmiş) ve farklı uzunluklara sahip (10 mm, 12.5 mm, 15 mm ve 20 mm) Brewster-Brewster kesimli 3 adet Cr:LiCAF kristali kullanılmış olup, burada tanımlanmış olan karakterizasyon teknikleri 20 mm uzunluğundaki Cr:LiCAF örneği üzerinden verilmektedir. İlk olarak, Cr:LiCAF kristal örneklerinin a- ve c-eksenlerinde absorpsiyon ölçümü için kullanılan deney düzeneği Şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13. a) E//c; b) E//a için kristal absorpsiyonu ölçüm düzeneği; c) absorpsiyon ölçüm deneyleri sırasında 20mm uzunluğundaki uyarılmış Cr:LiCAF kristal fotoğrafı

Bu düzenekte, $\lambda=657$ nm merkezli ışığa yapan çok-modlu diyot çıkışı kolime edildikten sonra, kristalin E//a ve E//c eksenlerinde absorpsiyon karakteristiğinin ortaya çıkarılması için bir yarım dalga plakasından (polarizasyonun döndürülmesini sağlar) geçirilir. Pompa ışını daha sonra sadece π ve σ düzlemlerindeki uyartımı sağlamak üzere

bir polarizörden geçirildikten sonra $f=125$ mm odak uzaklığına sahip bir mercek yardımı ile kristal üzerine odaklanır. Burada, absorpsiyon karakteristiği incelenen ve her iki ucunda Brewster kesimli kristaller yüzey yansımalarını minimize etmek için pompa doğrultusuna Brewster açısında yerleştirilmiştir. Kristalin uyarılmasında ise, kristale ilk temas yüzeyinde yaklaşık 1 mm çapa ve yaklaşık 40mW sürekli dalga güce sahip kaynak lazer ışını, kristalin kenarına yakın bir yerde uyarılması için kullanılmıştır (istenmeyen etkilerin oluşmasını engellemek adına kristal üzerinde sıkı bir şekilde odaklanmaktan kaçınılmıştır). Daha sonra Şekil 3.13a Şekil 3.13b’de gösterildiği üzere, giriş (P_i), yansıyan (P_r) ve iletilen (P_t) güç miktarları hassas bir optik güç sensörü kullanılarak ölçülmüş ve kristaldeki toplam absorpsiyonun (A) hesaplanması için (3.3) numaralı denklem kullanılmıştır.

$$A = 1 - \frac{P_t}{P_i - P_r} \quad (3.3)$$

Bu şekilde, ilgili pompa dalgaboyunda absorpsiyon değeri hesaplanmış olan ve üretici firma tarafından sağlanmış üç adet Cr:LiCAF kristal örneği için, sahip olmaları beklenen Cr-katkı oranlarının teyit edilmesinde daha önce (3.3) numaralı eşitlik ile verilmiş olan denklem (3.4) bağıntısında verilen açık hali kullanılır.

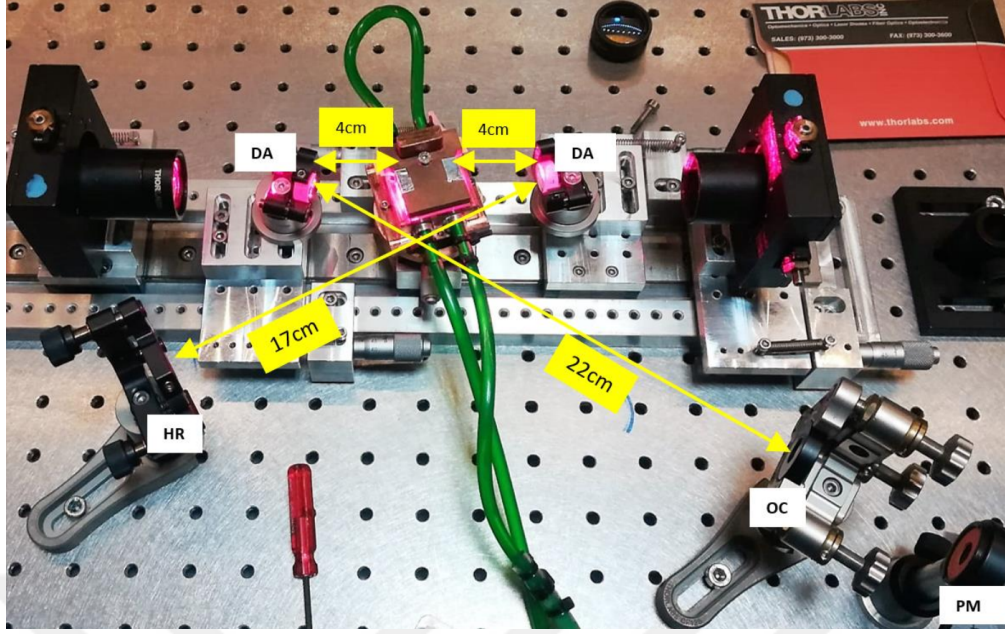
$$A = 1 - e^{-\alpha l} = 1 - e^{-N_{\%1} \times k \times \sigma_{a//c,a} \times l} \quad (3.4)$$

İlgili eşitlik yeniden düzenlenerek, katkılama oranının (k) hesabı için aşağıda verilmiş (3.5) numaralı denklem kullanılır.

$$k = -\frac{\ln(1 - A)}{-N_{\%1} \times \sigma_{a//c,a} \times l} \quad (3.5)$$

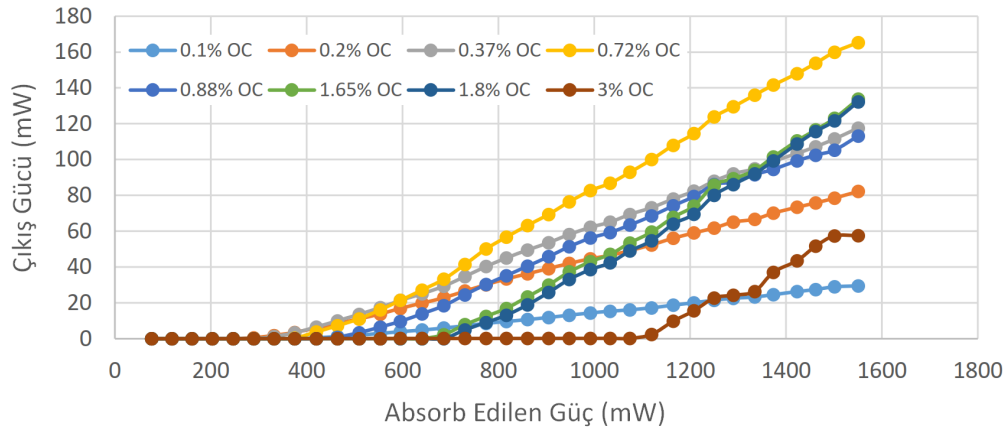
Burada, kristali için katkılama miktarının hesaplanmasında, literatürde %1 Cr-katkılı Cr:LiCAF örnekleri için iyon yoğunluğu $N_{\%1} = 0.775 \times 10^{20}$ iyon/cm³ olarak raporlanmış olup, 657 nm pompa dalga boyunda, a ve c eksenlerinde absorpsiyon kesit alanlarının $\sigma_{a//a} = 1.5 \times 10^{-20}$ cm² ve $\sigma_{a//c} = 2.2 \times 10^{-20}$ cm² değerleri giriş bölümünde verilmiş olan Şekil 1.4’ten elde edilmektedir. Örnek olarak 20 mm uzunluğundaki Cr:LiCAF kristali için alınan absorpsiyon ölçümlerinde E//a ekseninde uyarılma durumunda, $P_i = 29$ mW’lık giriş gücüne karşılık, $P_r = 2.94$ mW yansıma gücü, $P_t = 0.67$ mW iletilen güç miktarı ölçülmüştür. İlgili değerler (3.3) numaralı denklemde yerine konulduğunda $A = \%97.43$ absorpsiyon değerine karşılık gelmektedir. İlgili absorpsiyon değeri (3.5) numaralı denklemde yerine konularak verilen diğer parametreler ile hesaplandığında $k = 1.24$ katkılama oranı hesaplanmaktadır.

Absorpsiyon ve Cr-doyurulma oranı testine tabi tutulmuş olan Cr:LiCAF kristali ile ayrıca güç ölçekleme testlerinin gerçekleştirilmesi ve kristale ait pasif kaybın ortaya çıkarılmasına yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aşağıdaki Şekil 3.14’te gösterilmiş olan kavite yapısı kullanılarak tek diyot pompalı lazer sistemi için ilgili verim eğrileri farklı çıkış aynaları için elde edilmiştir.



Şekil 3.14. 20 mm uzunluğunda Brewster kesimli Cr:LiCAF kristalinin güç ölçekleme ve pasif kayıp tahmininde kullanılan tek-diyot pompalı lazer sistemi

Şekil 3.14'te görüldüğü üzere, Cr:LiCAF kristali tek tarafından, önceki kısımlarda Şekil 3.4 ile karakteristiği verilmiş olan bir çok-modlu diyet ile pompalanmaktadır (80 mm odak uzaklığına sahip bir lens yardımı ile kristal içine odaklanır). Sürekli dalga kavitesi ise 75 mm eğrilik yarıçapına sahip iki adet dikroik ayna (DA), bir yüksek yansıtıcı ayna (HR) ve bir çıkış kuplöründen (OC) oluşmaktadır. Güç ölçekleme deneylerinde, %0.1-3 aralığında farklı değerlere sahip çıkış kuplörleri kullanılarak, sürekli dalga lazer çıkışındaki ortalama güç, farklı pompa güçleri için ölçülmüş ve Şekil 3.15'te Cr:LiCAF tarafından emilen güce göre çizdirilmiştir.

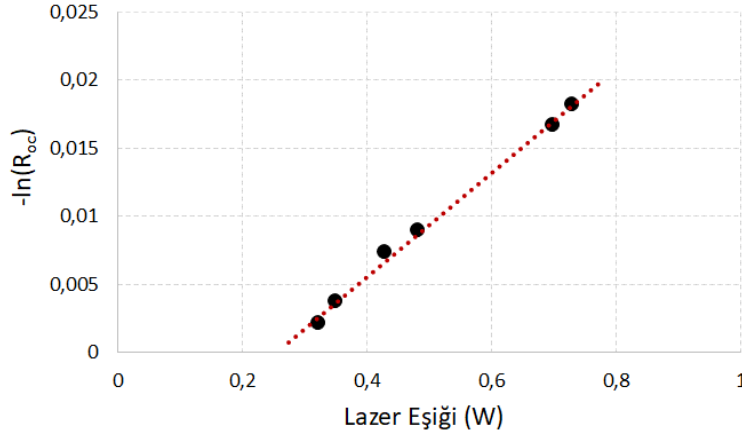


Şekil 3.15. 20 mm uzunluğunda Brewster kesimli Cr:LiCAF kristali ile oluşturulmuş tek diyet pompalı sürekli-dalga lazerinin güç eğrisi

Burada elde edilmiş sürekli dalga operasyonu incelendiğinde kavite çıkışında maksimum gücün %0.72 OC kullanımı ile alınmış olduğu görülmekle birlikte, yaklaşık 1.5W çıkış gücüne sahip tek pompa diyetuyla pompalanan lazer sistemi çıkışı 165mW değerinde

sınırlı kalmıştır. Kavite çıkış gücünün optimizasyonu için, kol uzunluklarının iteratif olarak değiştirilmesinin yanısıra farklı odak uzunluklarına sahip dikroik aynalar denenmiş olup, maksimum çıkış gücü cinsinden optimum yapıya Şekil 3.14'te verilen şekli ile ulaşılmıştır.

Sürekli dalga lazer kavitesinin optimizasyonunu takiben, bu çalışma kapsamında yapılmış olan sürekli dalga lazer operasyonu deneyleri ve sonucunda edilen Şekil 3.15'te gösterilen davranış, lazer eşik güçleri cinsinden karakterize edilerek Findlay-Clay yönteminin kullanımı ile birlikte kristalin sahip olduğu pasif kayıp miktarı belirlenmiştir.



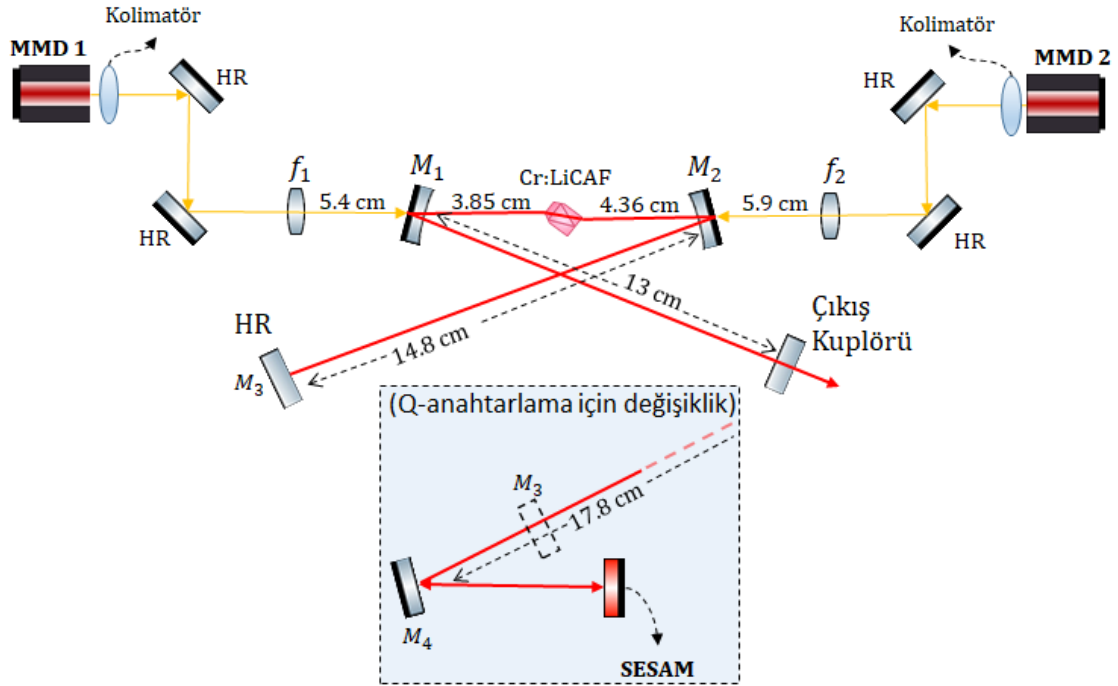
Şekil 3.16 Findlay-Clay yöntemi ile 20 mm uzunluğundaki Cr:LiCAF kristalinin pasif kaybının hesaplanması

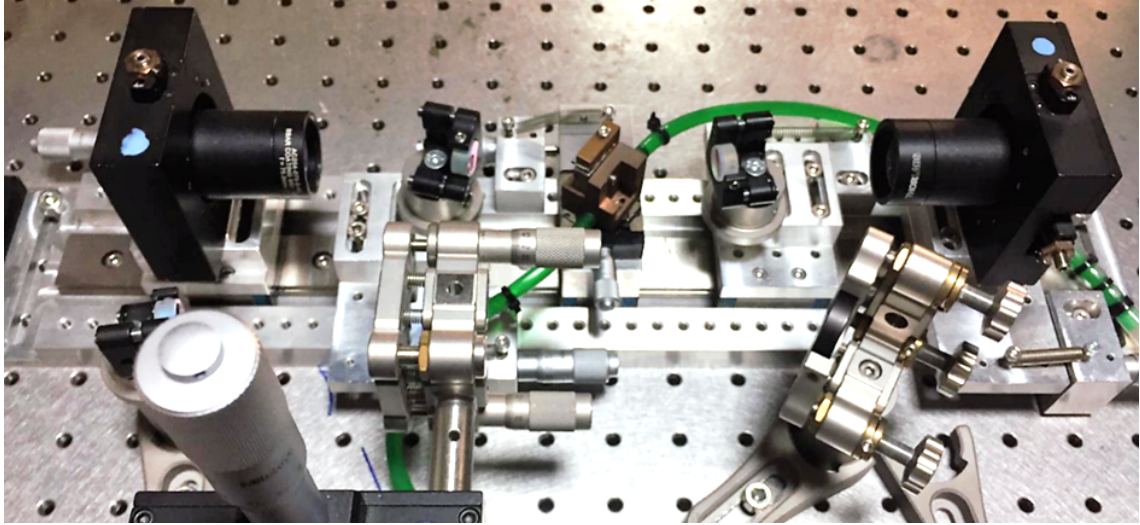
Şekil 3.15'te farklı değerlerde iletim değerine (R_{oc}) sahip çıkış kuplörleri ile sürekli dalga operasyonunda elde edilmiş sonuçlardan lazer eşik güçleri belirlenerek, Findlay-Clay yöntemi dahilinde, ilgili lazer eşiklerine karşılık, çıkış kuplörlerin yansıtma (R_{oc}) değerlerinin doğal logaritmalarının negatif değeri çizdirilerek Şekil 3.16'da verilen grafik elde edilmiştir. Bu grafiği oluşturan 5 noktayı temsil eden bir doğrusal eğri tanımlanırken, Findlay-Clay yöntemine göre 20 mm Cr:LiCAF kristal örneğinin kullanıldığı lazer kavitesinin toplam pasif kaybı %0.98 olarak hesaplanmaktadır. Bu gidiş-dönüş kaybının kabaca %0.8'i kristalden kaynaklanmakta olup, kristal için %0.2'lük bir birim uzunluk (cm) başına düşen pasif kaybı ifade etmektedir. Sonuç olarak, bu kristal için %0.2'lik birim uzunluk (cm) başına düşen pasif kayba sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu pasif kayıp miktarı, Cr:Colquiriite malzemelerin üretiminde mümkün olan %0.1/cm'lik pasif kayba kıyasla görece yüksek olup, daha fazla sayıda lazer diyotu kullanılarak oluşturulacak sürekli-dalga lazer sistemlerinde geçmişte literatürde gösterilmiş güç değerlerinin aşılmasını engelleyebilecek niteliktedir.

3.2.2. Pasif Q-Anahtarlı Cr:LiCAF lazeri

Tez kapsamında Cr:Colquiriite'ler ile farklı rejimlerde lazer operasyonunun gösterilmesi dahilinde bu alt bölümde, Cr:LiCAF kazanç ortamı ile SESAM ile pasif q-anahtarlamalı lazer operasyonunun gösterilmesi üzerine deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17, hem sürekli dalga hem de Q-anahtarlamalı lazer deneylerinde kullanılan diyot pompalı Cr:LiCAF lazer kavitesinin şematik bir tanımını göstermektedir. Bu düzenekte, pompa kaynağı olarak her biri maksimum 2.3A sürücü akımında 1.8 W

sürekli dalga çıkış gücü sağlayabilen iki adet doğrusal polarize ve çok modlu diyot (MMD-1 ve MMD-2) kullanılmıştır. Diyot çıkışı hızlı eksen boyunca kırınım sınırlı olmakla birlikte, yavaş eksen boyunca yaklaşık 10 M^2 değeri ile çok modlu bir çıkışa sahiptir. Burada bir silindirik mikro lens yardımı ile hızlı eksenindeki diyot ışını kısmen kolime edilmiştir. Daha sonra, lazer diyotlarının çıkışı 4.5 mm odak uzunluğuna sahip asferik lenslerle bir miktar daha kolime edilmiş ve ardından 75 mm odak uzunluğuna sahip akromatik çiftler (f_1 - f_2) kullanılarak lazer kristalinin içine odaklanmıştır. Kazanç ortamı olarak ise 5 mm uzunluğunda, 4 mm genişliğinde ve 1.5 mm kalınlığında, %7 mol Cr-katkılı bir Cr:LiCAF kristali kullanılmıştır. İlgili Cr:LiCAF örneği her iki tarafından Brewster kesimli geometriye sahip olmakla birlikte, deneyler sırasında 657 nm etrafında daha güçlü absorpsiyona sahip olan E//c ekseninde pompalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu şartlar altında Cr:LiCAF kazanç ortamı TM polarize pompa ışığının ~%98.3'ünü absorbe etmiştir. Mercek ve dikroik aynalardaki kayıplar hesaba katıldığında, diyotlardan elde edilebilen gücün yaklaşık %94.7'si kristal tarafından absorbe edilmiştir. Cr:LiCAF kristali, etrafında indiyum folyo bulunan bakır bir tutucuya monte edilmiş ve tutucu sıcaklığını 15°C 'de tutmak için su soğutması kullanılmıştır.



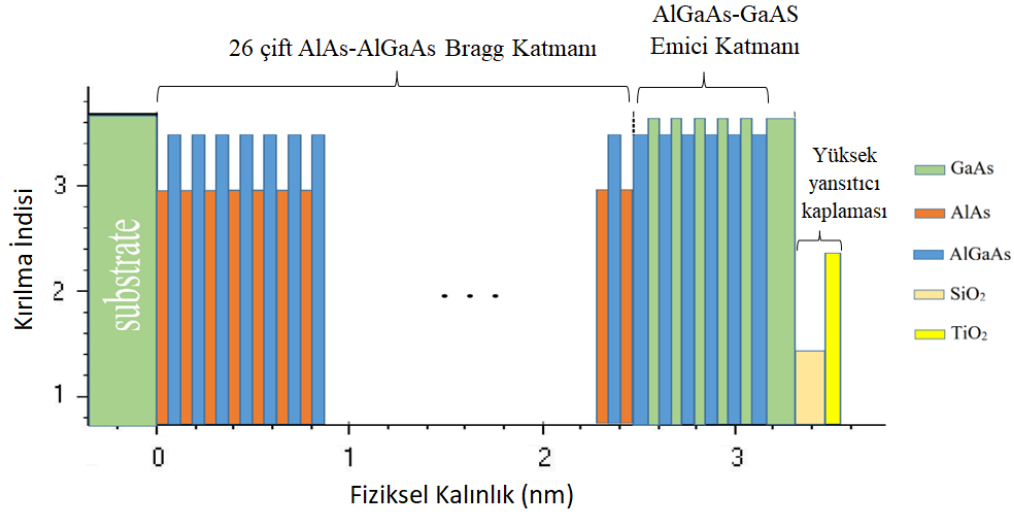


Şekil 3.18. İki tarafından çok-modlu diyotlarla pompalanan, SESAM ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerinin fiziksel kurulumu

İlgili lazer sisteminde kullanılan dikroik aynalar (M1 ve M2) 730-910 nm dalga boyu aralığında %99.9'dan fazla yansıtıcılığa, pompalama penceresinde ise >%98 iletme sahiptir. Kısa ve uzun kavite kolları ise sırasıyla 13 cm ve 14.8 cm uzunluğunda olmakla birlikte, buna karşılık sürekli dalga kavitesinin gidiş-dönüş seyahat süresi (T_R) 2.5 ns civarındadır. Bu kavite yapısı için Cr:LiCAF kristali içerisinde $\sim \pi \times 56 \mu\text{m} \times 42 \mu\text{m}$ 'lik bir lazer modu alanı elde edilmektedir. Burada tanımlanmış olan sürekli dalga lazer kurulumunun zamansal ve spektral özellikleri, %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75 iletim derecelerine sahip 4 farklı çıkış kuplörü kullanılarak incelenmiş, ilgili bulgular ise bölüm 4.2'de verilmiştir.

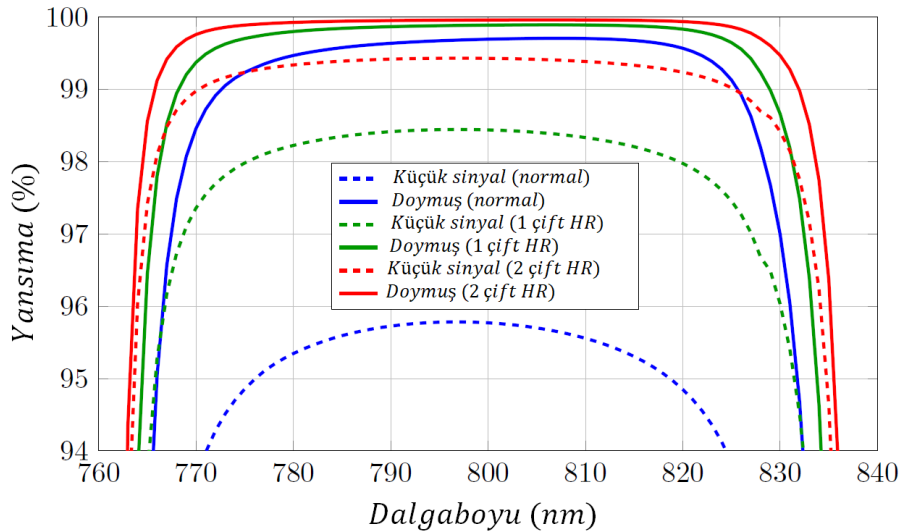
Q-anahtarlama deneylerinde ise, lazer çıkışında beklenen Q-anahtarlı darbeli operasyonunun başlatılması ve sürdürülmesi için SESAM kullanılmıştır. Denemeler sırasında, M3 aynasının doğrudan SESAM ile değiştirilmesiyle Q-anahtarlı operasyonu başlatılması mümkün olmadığından ötürü, M3 aynası kaviteden çıkarılmış ve SESAM aynasının yerleştirildiği ikincil bir odak oluşturmak için 150 mm yarıçaplı bir eğrilik aynası (M4) kullanılmıştır (Şekil 3.16'daki kesikli kutu içinde gösterilmiştir). Q-anahtarlama operasyonunun başlatılmasında ikinci odakta elde edilecek lazer modu genişliği, lazer çıkışında elde edilecek çalışma modunun mod-kilitli operasyona geçmesini engellemek adına görece geniş ($\sim 70\text{-}100 \mu\text{m}$) tutulmuştur. Şekil 3.18, bu çalışmada kullanılan SESAM'ın fiziksel yapısını göstermektedir. SESAM, 800 nm merkezi dalga boyunda yüksek yansıtıcılık sağlamak için Bragg yığını olarak 26 çift AlAs-Al_{0.17}Ga_{0.83}As çeyrek dalga katmanından oluşur. Ayrıca, doyurulabilir soğurucu eylemi için Al_{0.17}Ga_{0.83}As bariyerleri arasına sıkıştırılmış beş adet 6 nm kalınlığında GaAs kuantum kuyusu içerir. Bragg katmanları 200 nm optik kalınlığa sahiptir ($\lambda/4$) ve AlAs ve Al_{0.17}Ga_{0.83}As için sırasıyla 66.55 nm ve 57.15 nm karşılık gelen fiziksel kalınlığa sahiptir. İlgili yapı ayrıca oksitlenmeyi önlemek için 5 nm GaAs kapak ve SESAM'ın genel yansıtıcılığını artırmak için ek bir SiO₂/TiO₂ çeyrek dalga çifti yüksek reflektör içermektedir. Bu yapıda tanımlanan kuantum kuyusunun tahmini soğurma bandı kenarı 835 nm civarında olmakla birlikte, tarif edilen ayna-emici kombinasyonu bir GaAs alt tabakanın üzerine fiziksel olarak uygulanması ile SESAM elde edilir. Pratik

kullanımında ise, SESAM aynası termal iletkenliği yüksek bir yapıştırıcı ile bir inç çapında bir bakır blok üzerine yapıştırılarak ayna tutucusu içerisine yerleştirilmiş şekilde kavite içerisinde kullanılır.



Şekil 3.19. Tek katmanlı yüksek-yansıtıcı kaplı 800 nm SBR aynası için kırılma indisi profili ve her katmanın fiziksel kalınlığı (boyutlar ölçeklendirilmemiştir)

Çalışma kapsamında farklı modülasyon derinliklerine ve doygunluk akışlarına sahip SESAM'lar elde etmek için, ek bir yüksek yansıtıcı (HR) kaplama katmanı olarak bir veya iki çift SiO₂ ve TiO₂ katmanı içeren iki farklı SESAM kullanılmıştır (Şekil 3.19 tek katmanlı kaplama durumunun fiziksel yapısını göstermektedir). Şekil 3.20'de kaplamasız (normal), 1-çift HR kaplamalı ve 2-çift HR kaplamalı 800 nm SESAM'lar için hesaplanan küçük sinyal ve doymuş yansıtma eğrilerini göstermektedir.



Şekil 3.20. Kaplamasız, tek-katmanlı HR kaplamalı ve iki-katmanlı HR kaplamalı 800 nm SBR'lar için hesaplanan küçük sinyal ve doymuş yansıtma eğrileri

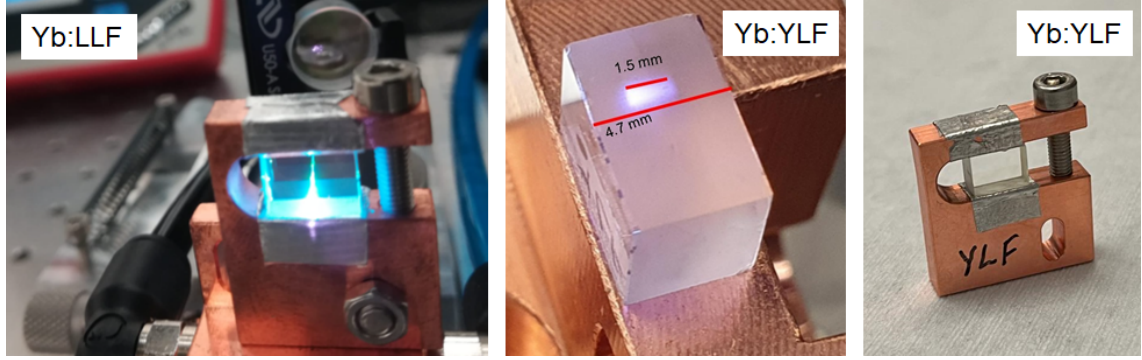
Şekil 3.20'den de görülebileceği gibi, SESAM yapısına ilave HR katmanlarının

eklenmesi modülasyon derinliğini azaltırken SESAM'ın yansıtma bant genişliğini artırmaktadır (sonuç olarak, doygunluk akısı da artmaktadır) (Lung vd. 1995; Demirbas vd. 2011). Daha spesifik olmak gerekirse, SESAM'ların tasarlanan/tahmin edilen modülasyon derinlikleri normal, 1-çift HR kaplı ve 2-çift HR kaplı SESAM'lar için sırasıyla %4.2, %1.4 ve %0.5 civarındadır. Kaplamasız SESAM'ın ölçülen modülasyon derinliği %4.5'dir ve bu da yapının tasarım özelliklerine yakın bir şekilde büyütüldüğünü doğrulamaktadır. Ayrıca, kaplanmamış SESAM'ın ölçülen doygunluk akısı $35 \mu\text{J}/\text{cm}^2$, iki fotonlu başlangıç akısı $2\text{mJ}/\text{cm}^2$ ve bozunma süresi yaklaşık 20 ps'dir. Burada, kaplamasız SESAM'ın modülasyon derinliğinin (%4.5) düşük kazançlı Cr:LiCAF lazer malzemesi için çok yüksek olduğunu unutmamak gerekir. Bu nedenle, bu tez kapsamında sunulan Q-anahtarlama denemelerinde yalnızca %0.5 ve %1.4 modülasyon derinliğine sahip HR kaplı SESAM'lar kullanılmıştır.

Deneyler sırasında kararlı Q-anahtarlı çıktıyı elde etmek için, SESAM ve M4 aynası arasındaki mesafe, SESAM konumunun ışın eksenini boyunca değiştirilmesi ile lazer operasyonunun mevcut olduğu bir aralıkta dikkatlice taranmıştır (kavitenin kararlı olduğu ilgili SESAM-M4 mesafe aralığı için, SESAM üzerindeki lazer modu yarıçapının $70 \mu\text{m}$ ile $100 \mu\text{m}$ arasında hassas bir şekilde ayarlanabildiği hesaplanmıştır). Bu aralıkta, seçilen belirli bir çıkış kuplajı için, ışın eksenini boyunca SBR'in bir dizi farklı konumunda benzer zamansal Q-anahtarlama davranışı (darbe şekli, darbe genişliği ve tekrarlama hızı) gözlemlenmiştir. Bu kararlı çalışma noktaları arasından, her çıkış kuplörü için, Q-anahtarlı lazer ortalama gücünün en yüksek olduğu konum seçilerek Q-anahtarlı lazer operasyonu zaman ve frekans düzlemlerinde yapılan ölçümler ile karakterize edilmiştir. Bahsi edilen farklı değerlerdeki çıkış kuplajları arasından, kararlı Q-anahtarlı lazer operasyonu %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75 iletim değerlerine sahip farklı çıkış kuplörleriyle elde edilmiştir. Deneyler sırasında ayrıntılı Q-anahtarlı veriler alınmış ve darbe genişliği, tekrarlama oranı, ortalama çıkış gücü, optik spektrum, RF spektrumu ve ışın profili gibi ana parametreler kaydedilmiştir. Bu sonuçlar bölüm 4.2'de verilmiştir.

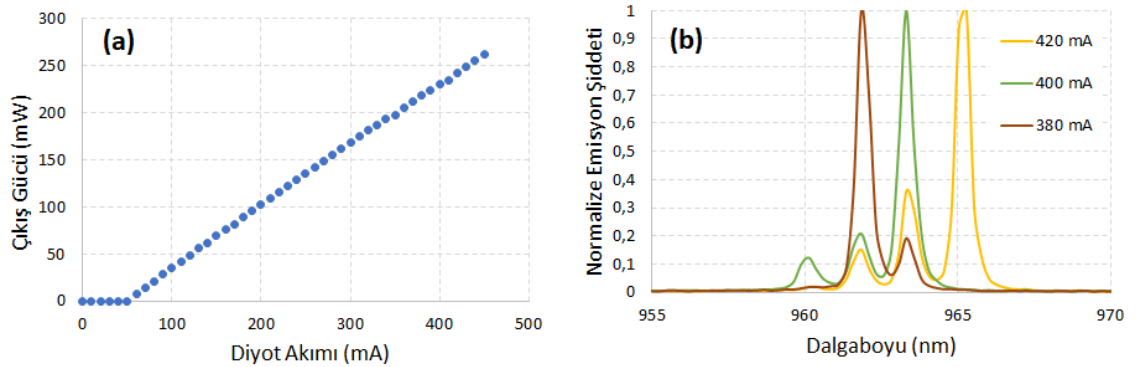
3.3. Lazer Diyot Pompalı Yb-Katkılı Lazer Sistemleri

Tez çalışmasının bu alt bölümünde tek-modlu ve çoklu-modlu lazer diyotları ile pompalanmış Yb:YLF ve Yb:LLF lazer sistemleri ile (i) sürekli dalga operasyonunda güç ölçekleme, (ii) dalgaboyu ayarlama, (iii) pasif mod-kilitli femtosaniye atma üretimi, (iv) mod-kilitli operasyonda tekrarlama frekansının GHz mertebesine ölçeklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bahsi geçen kazanç ortamları ile gerçekleştirilen çalışmalar tez önerisi kapsamında yer almamasına rağmen, tez sahibinin Tübitak 2214A program desteği kapsamında 1 yıl süre ile Hamburg (Almanya)'da bulunan DESY kurumu bünyesinde bu kapsamda yapılan araştırmalarda elde edilen bulgular tez kapsamına dahil edilmiştir. Şekil 3.21'de bu alt bölümdeki çalışmalar kapsamında kullanılmış olan ve %25 Yb-katkısına sahip Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamları gösterilmiştir. Burada gösterilmiş olan kristaller a-ekseni kesimli şekilde kübik geometride üretilmiştir. İlgili kristallerde alışılmışın dışında bir üretim tekniği olarak, verilen kristal hacminin tümünde homojen Yb-katkısı uygulanması yerine, kristallerin her iki tarafında 1.5 mm uzunluğunda Yb-katkısı uygulanmamış kısımlar bulunmaktadır (Yb-katkısı sadece orta kısımdaki 1.5 mm uzunluğundaki bölgeye uygulanmış). Burada tercih edilmiş olan kristal yapısı ile yüksek pompa güçlerinde kristal içi sıcaklık dağılımının optimize edilerek kristal içerisinde çatlak ve kırılmalara sebep olabilecek termal stresin önüne geçilmesi hedeflenmiştir.



Şekil 3.21. Kübik geometride üretilmiş ve aktif bölgesi %25 Yb-katkılanmış Yb:LLF ve Yb:YLF örnekleri

Burada tanımlanmış olan Yb:LLF ve Yb:YLF kazanç ortamlarının pompalanmasında tek-modlu ve çok-modlu olmak üzere iki tür lazer diyotu kullanılmıştır. Şekil 3.22’de Thorlabs tarafından üretilen LD60H1 model numaralı tekli-mod lazer diyotunun deneysel olarak ölçülmüş güç çıkışı ve optik spektrum karakterizasyonları verilmiştir.

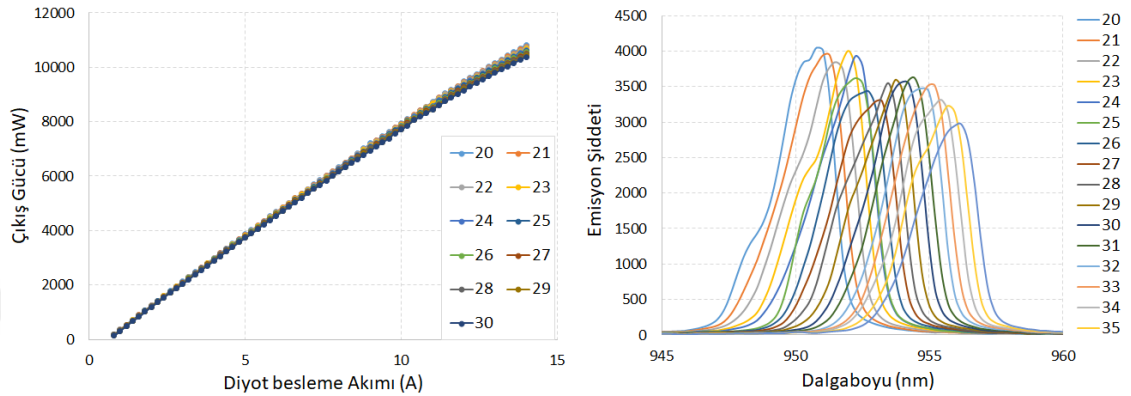


Şekil 3.22. Thorlabs L960H1 tek-modlu lazer diyotun **a)** çıkış güç ölçeklemesi; **b)** farklı besleme akımlarında ölçülmüş optik spektrumu

Şekil 3.22a’da gösterilen ve tutucu tarafından termoelektrik sistemler ile 15 C°’ye soğutulmuş L960H1 lazer diyotunun besleme akımına bağlı çıkış gücü incelendiğinde, 60 mA’lık lazer eşik gücüne ve 450 mA besleme akımında 260 mW’lık ortalama çıkış gücü sağlayabildiği görülmektedir. Şekil 3.22b’de ise ilgili tek-modlu lazer diyot çıkışının farklı besleme akımlarında ölçülmüş optik spektrumları sunulmuştur. Burada artan diyot besleme akımları için gözlemlenen, (i) pik emisyon dalgaboyunun uzun dalgaboylarına kayması ve (ii) emisyon spektrumunun daha geniş bir spektrum aralığına yayılması, ilgili Yb-katkılı kristallerinin verimli pompalanmasında bir handikap olarak ortaya çıkmaktadır.

Tez çalışmasında, özellikle Yb:LLF kazanç ortamının görece yüksek güçlerde pompalanması ve Watt seviyesinde sürekli-dalga ve mod-kilitli rejimde lazer operasyonunun gerçekleşmesinde, LDX-3A10-960-C2 model numaralı (RPMC Laser tarafından üretilmiş) çok-modlu diyot lazeri kullanılmıştır. Bu lazer diyotunun besleme akımına bağlı sürekli-dalga güç karakteristiği ve tutucu sıcaklığına bağlı olarak ölçülmüş emisyon spektrumu Şekil 3.23’te verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, diyot besleme akımının 14 Amper’e kadar sürülmesi ile lazer diyotu çıkışında 10.5 W’a kadar sürekli

dalga çıkış gücü elde edilebilmektedir. Diğer taraftan, lazer diyotunun yerleştirildiği tutucu sıcaklığının 20-30 C° arasında değiştirilmesi ile diyot çıkışında ölçülen pik dalgaboyunun 950 nm'den 956 nm'ye kaydığı görülmektedir. Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamlarının absorpsiyon bantları göz önüne alındığında, pratik pompalama işleminde 960 nm çevresindeki yüksek kesit alanına sahip absorpsiyonun kullanılarak yüksek verimli pompalama elde etmek adına lazer diyot sıcaklığı 30 C° etrafında tutulmaktadır.



Şekil 3.23. LDX-3A10-960-C2 çok-modlu lazer diyotunun **a)** çıkış gücü eğrisi, **b)** diyot sıcaklığına bağlı ölçülmüş emisyon spektrumu

Devam eden alt bölümlerde tek-modlu ve çok-modlu lazer diyotları ile pompalanan Yb:YLF ve Yb:LLF sistemlerinin çeşitli rejimlerde operasyonu için oluşturulmuş kavite şemalarının ve kullanılan optik elemanları detaylı tanımları sunulmaktadır.

3.3.1. GHz tekrarlama frekanslı Yb:YLF lazer sistemi kurulumu

Tekrarlama frekansı GHz mertebesine ölçeklemiş pasif mod-kilitli atmaların Yb:YLF kazanç ortamında ilk defa elde edilmesi amaçlanan bu alt bölümde geliştirilen lazer sistemi kısmen, bu kazanç ortamı ile MHz tekrarlama frekansında önceden gerçekleştirilmiş olan çalışmalarda elde edilmiş sonuçların temel alındığı optik elemanların tasarım ve optimizasyonuna dayanmaktadır. Literatürde Yb:YLF kazanç ortamı ile rapor edilen çok-modlu lazer diyotları ile pompalanmış pasif mod-kilitli sistemlerde, çoklu-mod diyotların kullanımının uzun süreli stabil mod-kilitlemeyi zorlaştıran kısıtlamaları da beraberinde getirdiği görülmüştür. Çoğunlukla yüksek pompa güçlerinde ortaya çıkan çok-modlu lazer çıkışı, mod-kilitli rejimde mod-atışına, dolayısıyla gürültüye sebep olmaktadır. Bu sebeple kararlı mod-kilitli operasyonun başlatılması ve sürdürülmesi için kavite içi uzamsal filtre kullanımı, detaylı kavite hizalaması ve çevresel faktörlere karşı izolasyon önlemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Alternatif olarak simetrik fiber kuplajlı pompa kaynaklarının veya SMD diyotlarının kullanılması, bahsi geçen pratik problemlerin kısmen giderilmesine ve kararlı, düşük gürültülü mod-kilitli osilatörlerin oluşturulmasına imkân vermektedir.

Tez çalışmasının bu bölümünde kurulan sistemlerin kararlı ve düşük gürültüye sahip biçimde çalışmak üzere tasarlanmasında tekli-modlu diyotlar ile pompalama imkanları araştırılmış ve SMD ile pompalı olası bir Yb:YLF sistemi üzerinden ilgili optik

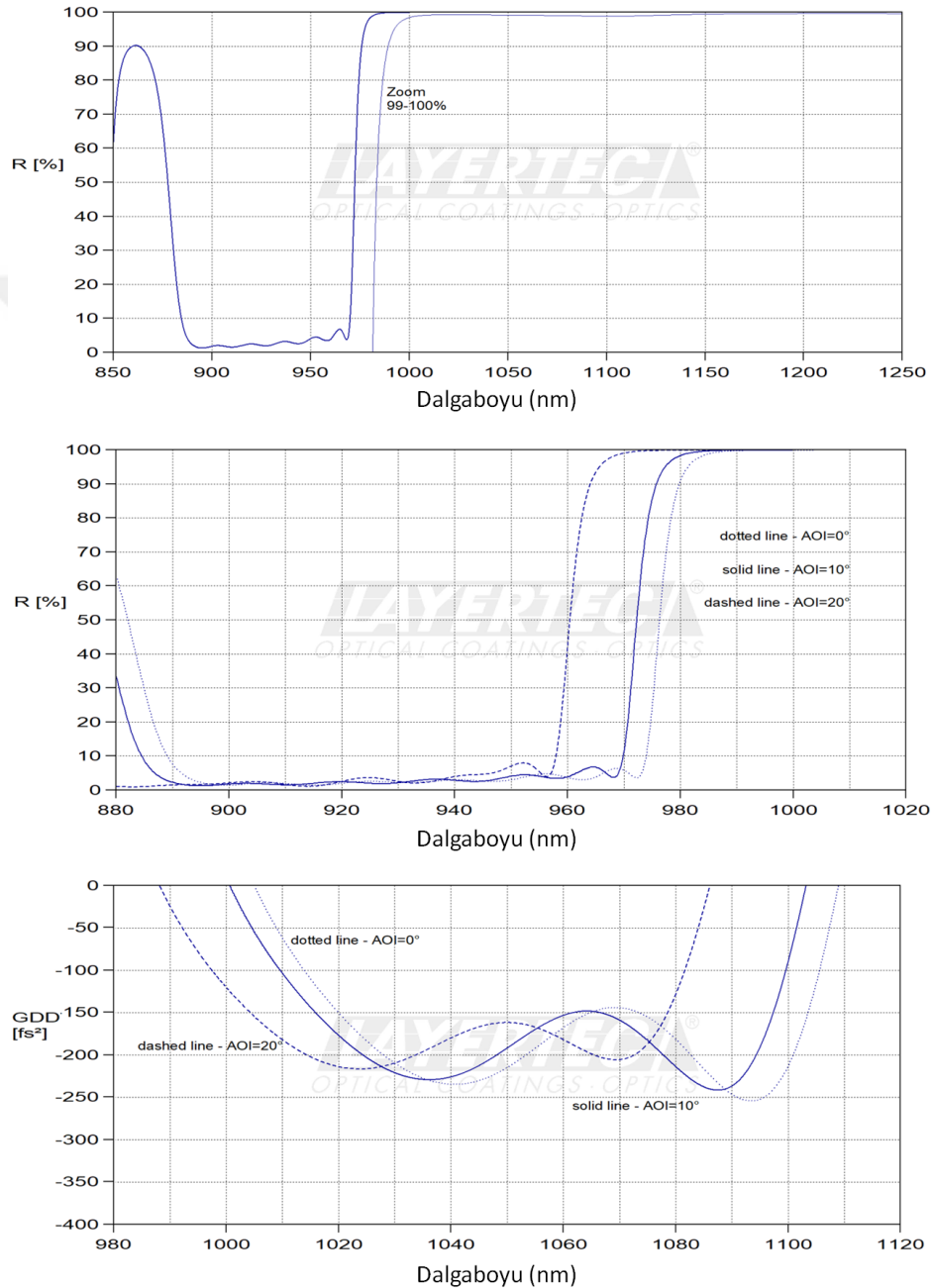
eleman karakteristikleri hesaplanmıştır. Takip eden birden fazla alt bölümde kullanılmış olan ve ilgili dalgaboyu aralığında -200 fs^2 dispersiyon değerine sahip olan optik ayna setinin tasarlanması, %1 çıkış kuplajı altında lazer çıkışında ortalama 250 mW gücü ölçülmüş, 40 fs atma uzunluğuna sahip mod-kilitli bir Yb:YLF sistem operasyonunu baz almaktadır (Demirbas vd. 2022). İlgili çalışmada kavite içi toplam mutlak dispersiyon değeri $|D| = 400 \text{ fs}^2$ ve $f = 87 \text{ MHz}$ tekrarlama frekansında lazer çıkışındaki atma enerjisi $E_p = 3 \text{ nJ}$ olarak ölçülmüştür. Pompa ve SBR üzerindeki lazer mod büyüklükleri ise $w_p = 25 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$ ve $w_{SBR} = 150 \mu\text{m}$ şeklinde hesaplanmıştır. Kurulumu gerçekleştirilecek olan ve Şekil 3.19’da karakteristiği verilen SMD pompalı sistemin olası performansının tahmin edilmesinde kabul edilen varsayımlar, $w_p = 20 \mu\text{m} \times 20 \mu\text{m}$ (SMD kullanımı daha sıkı pompalama imkânı verir), 100 mW ortalama çıkış gücü (P_o), 1 GHz tekrarlama frekansına (f) sahip 100 fs genişliğinde (τ_p) atmalar ve dolayısıyla 0.1 nJ çıkış enerjisi (E_p) şeklinde tanımlanır. Bahsi edilen literatürdeki rapor ile burada yapılan varsayımlar kıyaslandığında, Eşitlik (3.6)’dan hesaplandığı şekli ile, SMD pompalama durumunda Yb:YLF kazanç ortamında görece ~ 5 -kat daha sıkı pompalamadan (daha küçük w_0) kaynaklı ~ 25 kat daha fazla öz faz modülasyonunun meydana geldiği görülmektedir (denklemden aynı Yb:YLF kristali için w_0 dışındaki parametreler sabittir).

$$\gamma_{SPM} = 2 \frac{kn_2 L_{SPM}}{\pi w_0^2} \quad (3.6)$$

$$\tau = 1.76 \frac{2|D|}{\gamma_{SPM} E_p} \quad (3.7)$$

Burada SMD pompalı Yb:YLF lazer sistemi ile elde edileceği varsayılan atma genişliği, çıkış enerjisi ve hesaplanmış öz faz modülasyonu, literatürde baz alınan çalışma verisi ile kıyaslı biçimde Denklem (3.7)’de yerine konulduğunda ise SMD pompalı lazer sisteminde kavite içi toplam dispersiyon miktarının $|D| \approx 800 \text{ fs}^2$ olması gerektiği hesaplanır. Amaçlanan 1 GHz tekrarlama frekansında, fiziksel kavite boyu oldukça kısa (15 cm) olduğu için, burada hesaplanmış olan gerekli toplam negatif dispersiyonun elde edilmesinde kavite içerisine yerleştirilebilecek ek ayna sayısı fiziksel kısıtlardan ötürü kısıtlıdır. Dolayısıyla pasif mod-kilitli ve dört aynadan oluşan (çıkış kuplörü, 2 adet dikroik ayna, SESAM üzerine odaklamak için kullanılan ayna) klasik x- veya z-katlı bir lazer kavite düzeninde, hesaplanan toplam negatif kavite içi dispersiyonunu sağlayabilecek dikroik ve yansıtıcı aynaların istenilen özellikleri tanımlanarak Layertech firmasına temin edilmiştir. Burada arzu edilen özellikler dikroik ayna karakteristiğinde olup, kaplama özellikleri (i) birinci yüzey için $\text{HR}(\theta = 10^\circ, 1000\text{-}1200 \text{ nm}) > 99.95\%$ ve $\text{R}(\theta = 10^\circ, 900\text{-}980 \text{ nm})$ ve sekme başına GVD ($\theta = 10^\circ, 1000\text{-}1100 \text{ nm}) = -200 \text{ fs}^2 \pm 25 \text{ fs}^2$ sahip olacak şekilde, (ii) ikinci yüzey için ise, $\text{AR}(\theta = 10^\circ, 900\text{-}1000 \text{ nm}) < 0.5\%$ şeklinde tipik bir pompa bandı kaplaması belirtilmiştir. Burada tanımlanmış olan ayna karakteristiklerine ve eğrilik yarıçapları 25-200 mm aralığında değişen yarım inç çapa sahip aynalar Layertech firması tarafından üretilmiştir. Layertech firması tarafından tasarlanan bu ayna yapısına ait kaplama karakteristikleri, farklı geliş açıları ($0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$) için yüzeydeki yansıma miktarı ve dispersiyon cinsinden Şekil 3.24’te verilmiştir. Burada verilmiş olan kaplama karakteristiği üretici tarafından gerçekleştirilmiş nümerik hesaplar ile elde edilmiştir. Deneylerde Yb-katkılı kazanç ortamlarının 960 nm

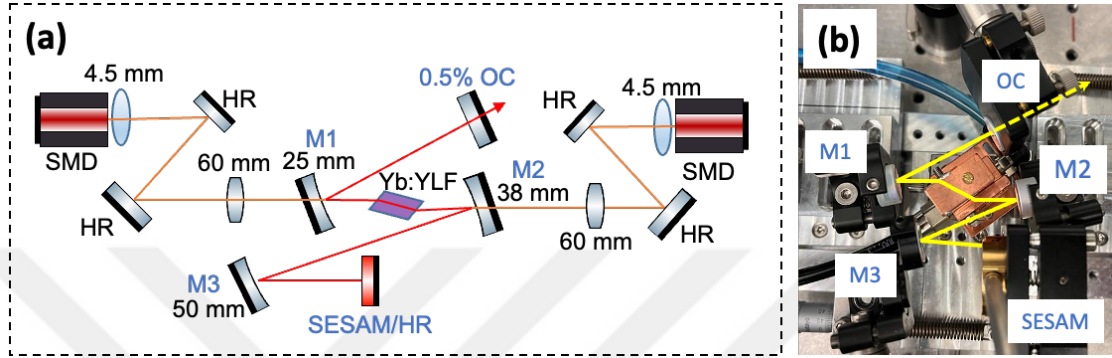
çevresinde pompalanacağı göz önüne alarak, ayrıca aynaların kavite içerisindeki konumlandırma planlarına göre $\theta=10^\circ$ geliş açısı için verilmiş tasarımının üretimi uygun görülerek üretimleri talep edilmiş ve tedarikleri sağlanmıştır. Ayna setinin üretimi sonrası üretici firma tarafından bağımsız bir deneysel karakterizasyonu gerçekleştirmediği için, takip eden alt bölümlerde bu ayna setinden aynaların kullanıldığı durumlar için, ilgili aynaların Şekil 3.21’de $\theta=10^\circ$ için verilmiş olan karakteristiklere sahip oldukları kabul edilmektedir.



Şekil 3.24. Mod-kilitli lazer operasyonu deneylerinde kullanılan ayna setine ait yansıma ve dispersiyon karakteristikleri

Diyot pompalı Yb:YLF kazanç ortamında pasif mod-kilitli operasyon ile GHz tekrarlama

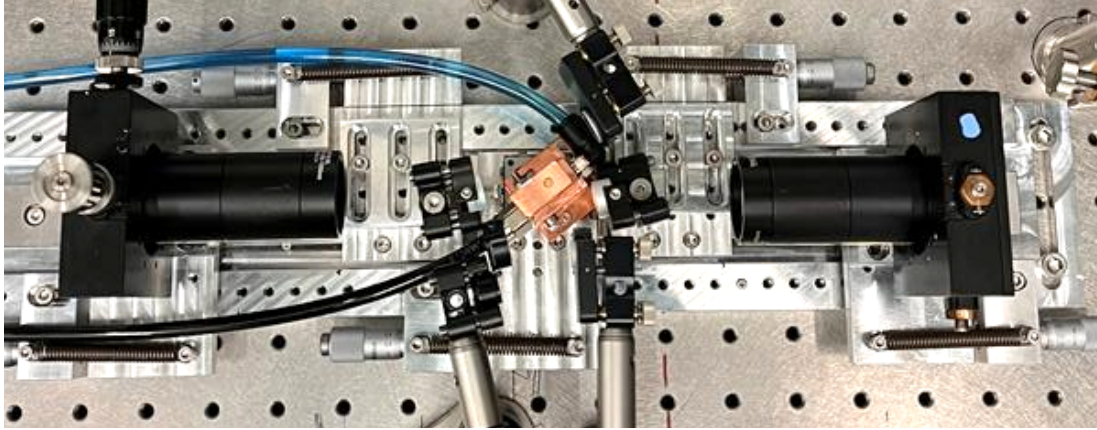
frekansında mod-kilitli operasyon deneylerinde, Şekil 1'de gösterilen z-katlı lazer kavite şeması kullanılır. Burada verilen kavite yapısında, hedeflenen çalışma frekansında operasyon için kavite kol uzunluklarının ayarlanması, uygun eğrilik yarıçapına sahip M1 ve M2 dikroik aynaların seçilmesi ve kavite içerisinde fiziksel olarak yerleştirilmesini kapsamaktadır. Deneyler sırasında 0.3-1.1 GHz aralığındaki birkaç ayrı frekansta çalışan kararlı CW mod kitleme operasyonu ile femtosaniye darbe üretimi elde edilmiş olsa da burada orta seviyede çıkış gücü seviyelerine sahip olan 1.1 GHz tekrarlama frekansına sahip, SESAM ile sürekli dalga mod kilitli Yb:YLF lazerinin ayrıntıları sunulmaktadır.



Şekil 3.25. a) Çift taraflı diyot pompalı Yb:YLF lazer osilatörün sürekli dalga ve 1.1 GHz tekrarlama frekansında mod kilitli çalışma şeması; **b)** Z-katlanmış lazer boşluğunun fotoğrafı

Fiziksel kurulumu Şekil 3.25b'de gösterilmiş olan lazer sistemi iki içbükey dikroik ayna (M1, M2), Yb:YLF kristali, bir kolunda odaklama aynası (M3) bulunan SESAM/HR ve diğer kolunda %0.5 çıkış kuplörü bulunan kavite yapısından oluşmaktadır. Şekil 3.18'de gösterilen kübik Yb:YLF takip eden bazı alt bölümlerde kullanılmış olsa da GHz tekrarlama frekansı için yapılan çalışmalarda kristal uzunluğu gerekli öz faz modülasyonunu üretmediğinden ötürü bu kısımda 10 mm uzunluğunda (Brewster-Brewster kesimli), a-kesimli Yb:YLF kazanç ortamı (5 mm genişliğinde, 2 mm kalınlığında) kullanılmıştır. Bu kristal %2 mol katkılama seviyesine ve cm başına %0.06 ölçülmüş pasif kayba sahiptir (Demirbas vd. 2022). Fiziksel lazer kurulumunda, kristal alt ve üst yüzlerine yerleştirilmiş iki ince indiyum folyo parçası ile birlikte bakır tutucu içerisindeki açıklığa yerleştirilerek sabitlenir. Bu şekilde kristal ile bakır tutucu arasında sağlam bir termal temas sağlanarak su soğutması ile sıcaklığı 15 °C'de tutulan tutucu üzerinden kristal soğutması sağlanır. Pompalama işleminde kristal, her iki yüzeydeki Fresnel yansımalarını en aza indirmek için pompa ışınına Brewster açısında yerleştirilmiştir. Pasif mod-kitlemede kullanılan ticari SESAM (Reflektron, RK177D) malzemesi üretici şirket tarafından belirtilen %1.5'lik bir modülasyon derinliğine, yaklaşık %0.5'lik bir doyurulamaz kaybına, 1000-1080 nm bölgesini kapsayan bir yansıtma aralığına ve 35 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ 'lik bir doyumluk akısına sahiptir. 1.1 GHz tekrarlama frekansı için oluşturulmuş bu kavite çok küçük bir hacim içerisinde oluşturulduğu için ek aynaların kullanımı ile dispersiyon kompanzasyonunun sağlanması zorlaşır. Bu sebeple, lazer sisteminde kullanılan sınırlı sayıda optik elemanlardan olan M1 (ROC=25 mm) ve M2 (ROC=38 mm), 1015-1090 nm aralığında sıçrama başına -200 fs² (± 125 fs²) grup gecikme dağılımına (GDD) sahip olacak şekilde (10° geliş açısı için) özel olarak tasarlanmıştır (Şekil 3.24'te detaylı karakteristiği verilmiştir). M1 ve M2 aynaları 1000-1200 nm aralığında yüksek oranda yansıtıcıdır ($R > \%99.95$) ve 900-970 nm aralığında

yansıma önleyici kaplamaya ($R < 0.2\%$) sahiptir. Lazer modunun SESAM üzerine uygun ölçekte odaklanması için kullanılan M3 ($ROC=50$ mm) aynası 860-1110 nm aralığında yüksek oranda yansıtıcıdır ($R > 99.9\%$) ve 10 derece geliş açısında -80 fs^2 ($\pm 20 \text{ fs}^2$) GVD değerine sahiptir. Mekanik kısıtlamalar ve kavite içi Brewster elemanları ve diğer kavisli aynalardan kaynaklanan astigmatizmanın telafi edilmesi ihtiyacı nedeniyle, M3 aynası kavite içi lazer ışınına $\sim 15^\circ$ açıyla yerleştirilmiştir. Yb:YLF kazanç ortamı, ölçülmüş karakteristiği Şekil 3.2'de verilen iki adet tek yayıncılı (450 mA'de 282 mW'a kadar çıkış verir) tek-modlu diyot (Thorlabs L960H1) kullanılarak, E//a'ya kıyasla kazancın daha geniş bir bant genişliğinde daha yüksek olduğu π -polarizasyonunda (E//c) iki tarafından pompalanır (Colucelli vd. 2008). Oda sıcaklığında Yb:YLF kazanç ortamının absorpsiyon kesiti 880-1030 nm aralığını kapsamakla birlikte (Şekil 1.8'de gösterilmiş), E//c için 960 nm ve 994 nm'deki absorpsiyon zirvelerinin şiddeti E//a'ya göre 2-3 kat daha yüksektir. Buradan çıkarımla, oluşturulmuş lazer sisteminde pompalama işleminin E//c ekseninde polarize olan lazer diyot çıkışı gerçekleşmesi ile verimli pompalama işlemi elde edilmiş olur (sürekli-dalga kavitesi Şekil 3.26'da gösterilmiştir) (Demirbas vd. 2022). İlgili pompa diyotlarının kullanımında, emisyon dalgaboyu ve çıkış gücünün optimum kontrolü ve kararlılığı için pompa lazer diyotları termoelektrik olarak soğutulan bir tutucuya monte edilir. Diyotlar, gelişmiş dönüşüm verimliliği ve düşük lazer eşikleri elde etmek için emisyon pikinin Yb:YLF kazanç ortamının 960 nm absorpsiyon çizgisiyle daha fazla örtüştüğü 15°C 'ye soğutulur (daha yüksek sıcaklıklarda diyotun pik emisyon dalgaboyu 960 nm'den daha uzun dalgaboylarına kaymaktadır.).



Şekil 3.26. Sürekli dalga rejiminde çalışmak üzere SESAM yerine yüksek yansıtıcı ayna kullanılan Yb:YLF lazer sistemi

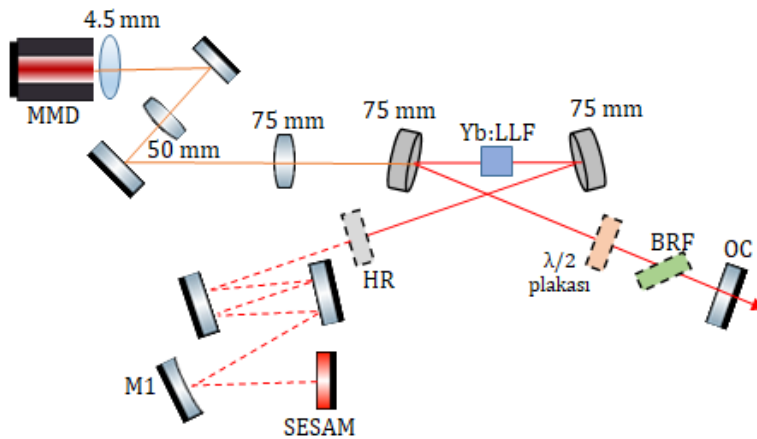
Stabil mod-kilitli lazer operasyonunun ulaşıldığı optimize edilmiş lazer sisteminde, pompa ışını önce bir asferik lens ($f=4.5$ mm) ile kolime edilir ve ardından 60 mm'lik bir akromatik çift ile Yb:YLF kristalinin içinde $\sim 25 \mu\text{m}$ yarıçaplı dairesel bir ışın beline odaklanır. Verilen pompa konfigürasyonu ile, kazanç ortamında 90% 'den fazla tek geçişli emilim olduğu tahmin edilmektedir (Demirbas vd. 2022). SESAM ise M3'ten 18 mm uzağa yerleştirilerek (SESAM hasarının gözlemlendiği odaktan birkaç mm uzakta), kavite içi ışın SESAM üzerinde tahmini $32 \mu\text{m}$ yarıçapına sahip dairesel bir ışın beline odaklanır. Şekil 3.25b'de gösterilmiş fiziksel yapısı ile ~ 130 mm uzunluğundaki kavite, mod kilitli çalışmada 1.1 GHz'lik darbe tekrarlama oranına karşılık gelir. İlgili lazer kavitesinde, gidiş-dönüş başına toplam -500 fs^2 GDD ile negatif dispersiyon rejiminde çalıştırılmakla birlikte, soliton darbe oluşumu, kavite aynalarından gelen negatif GDD ve

Yb:YLF kazanç ortamındaki öz faz modülasyonu arasındaki denge ile belirlenmektedir (Kartner vd. 1996).

Tez çalışmasının bu alt bölümünde oluşturulmuş 1.1 GHz tekrarlama frekansında SESAM mod-kilitli femtosaniye Yb:YLF lazer çıkışının zaman ve frekans düzleminde karakterizasyonu Bölüm 4.3.1’de verilmiştir. İlgili bölümde ayrıca, Şekil 3.26’da gösterildiği gibi SESAM aynasının yüksek yansıtıcı bir ayna ile değiştirilmesi ile elde edilen sürekli dalga operasyonu, güç ölçeklemesi ve lazer verimliliği cinsinden yapılan ölçümler ile incelenmiştir.

3.3.2 Diyot pompalı Yb:LLF lazer sistemleri

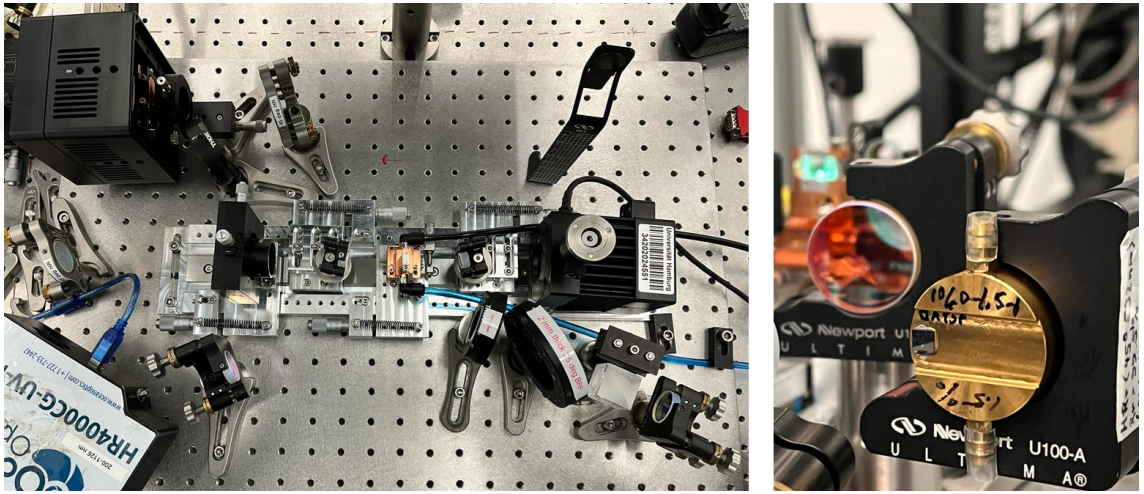
Tez çalışması kapsamında diyot pompalı Yb-katkılı kazanç ortamlarında çeşitli lazer operasyonlarının incelendiği çalışmalar dahilinde, Şekil 3.18’de gösterilen Yb:LLF kazanç ortamı kullanılarak sürekli dalga operasyonu ve femtosaniye atma genişliğine sahip atmaların MHz tekrarlama frekansı mertebesinde elde edildiği pasif mod-kilitli operasyon üzerine fiziksel lazer kurulumları ve karakterizasyonları gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.27 Yb:LLF kazanç ortamı ile oluşturulmuş farklı çalışma rejimlerinde kullanılan kavite yapısı

Yb:LLF lazer ortamının farklı çalışma operasyonlarının gösterildiği jenerik kavite yapısı Şekil 3.24'te gösterilmiştir. Burada sürekli dalga operasyonu ve bu rejimdeki dalgaboyu ayarlama deneylerinde kullanılan optik elemanlar sürekli çizgilerle gösterilmiştir. SESAM ile pasif mod-kilitli operasyonda femtosaniye atmaların elde edilmesinde kullanılan optik elemanlar ise kesikli çizgiler ile gösterilmiştir. Takip eden farkı alt bölümlerde, karakteristikleri Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te verilmiş olan tek-modlu ve çok-modlu lazer diyotları pompalama işlemi için kullanılmıştır. Pompa ışının ilgili alt çalışma rejimlerinde, ilgili optik elemanları ile kullanım şekli takip eden alt bölümlerde detaylandırılmıştır. Bu kapsamda yapılan deneysel kurulum ve analizlerin ortak özelliklerinden bahsedecek olursak, tek-modlu veya çok-modlu lazer diyotlarının kullanımını içeren durumlarda π -polarizasyonunda ($E//c$) pompalama işlemi gerçekleştirilerek Yb:LLF kristali için oda sıcaklığında daha yüksek absorpsiyon kesitine sahip olan eksen kullanılmıştır. Watt-seviyesinde ortalama güce sahip sürekli-dalga ve mod-kilitli operasyon deneylerinde tek emitörlü RPMC LDX-3A10-960-C lazer

diyotunun (960 nm etrafında 10W'a kadar çıkış gücü verir) kullanımında pompa ışını 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik bir mercek ile kolime edilir ve ışın astigmatizması 50 mm odak uzaklığına sahip silindirik bir mercek ile (hızlı eksende hareket eden) en aza indirilir. Yb:LLF kazanç ortamı ile gerçekleştirilen deneylerin tümünde Şekil 3.21'de gösterilen a-kesimli geometriye sahip %25 Yb-katkılı Yb:LLF kristali kullanılmıştır. Yb:LLF kristalinin Yb-katkılı bölgesinin toplam uzunluğu 1.5 mm olup, her iki ucunda 1.5 mm uzunluğunda katkısız uç bölümleri bulunmaktadır (toplam kristal uzunluğu, ~4.5 mm; kristal açıklığı, $\sim 5.5 \times 7 \text{ mm}^2$). Deneyler sırasında Yb:LLF kristali su soğutmalı bir sistem ile soğutulmak üzere alt ve üst yüzeylerine konulan ince indiyum folyo plakalar ile bakır tutucu içerisine yerleştirilir. Deneysel kurulumlarda kavite ışınına dik (normal geliş açısı ile) biçimde konumlandırılan a-kesimli Yb:LLF kristali 960 nm'de TM polarize pompa ışığının $\sim 85\%$ 'ini emer.

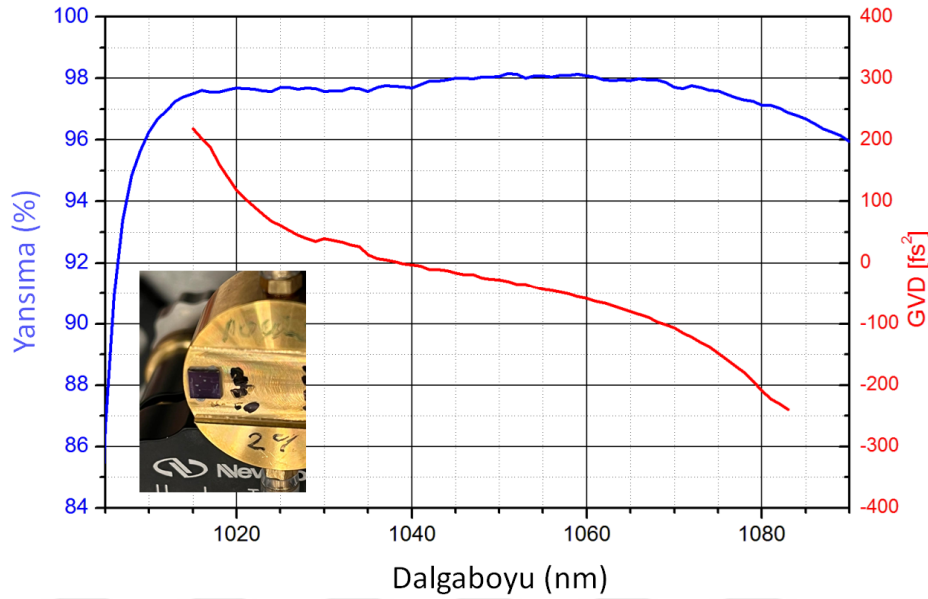


Şekil 3.28. Yb:LLF kazanç ortamının kullanıldığı a) dalgaboyu ayarlama deney düzeneği; b) mod-kilitli deneylerde kullanılan ve tutucuya yerleştirilmiş örnek bir SESAM

Çoklu-mod lazer diyotu ile pompalama uygulanan sürekli-dalga rejimde dalgaboyu ayarlama deneylerinde kullanıldığı sürekli dalga deneylerinde yüzey dışı optik eksenini 25° dalış açısına sahip 2 mm kalınlığındaki kristal kuvars çift kırılımlı bir filtre (BRF) kullanılır (Şekil 3.28'de sürekli dalga lazerine ait fiziksel bir kurulum örneği verilmiştir). İlgili kurulumda ayrıca kazanç kesitinin daha geniş olduğu E//c'de lazer operasyonunun sağlanması için yarım dalga plakası kullanılır. Dalgaboyu ayarlama karakteristiği ise $0.5\%-60\%$ aralığında dokuz farklı çıkış kuplörünün kullanıldığı çıkış spektrum ölçümleri ile analiz edilir.

SESAM ile pasif mod-kitleme deneylerinde ise soliton darbe şekillendirmesi elde etmek için M1 ve M2, negatif grup gecikme dağılımı (GDD: 1015-1090 nm arasında sıçrama başına $200 \pm 125 \text{ fs}^2$) dikroikleri (M4, M5) ile değiştirilir. Belirli bir darbe genişliğinde kararlı mod-kilitli operasyonun elde edilmesinde toplam kavite dispersiyonunun ayarlanması, uygun eğrilik yarıçapı ve GDD'ye sahip M3 aynasının seçimi gibi pratik sistemlerin oluşturulmasında gerçekleştirilen önemli adımlar olarak öne çıkmaktadır. Tezin dördüncü bölümünde sonuçları sunulan çok-modlu diyotlarla pompalanmış SESAM ile mod-kilitli lazer sistemlerinde, BATOP şirketinin ticari ürünlerinden birisi olan SAM-

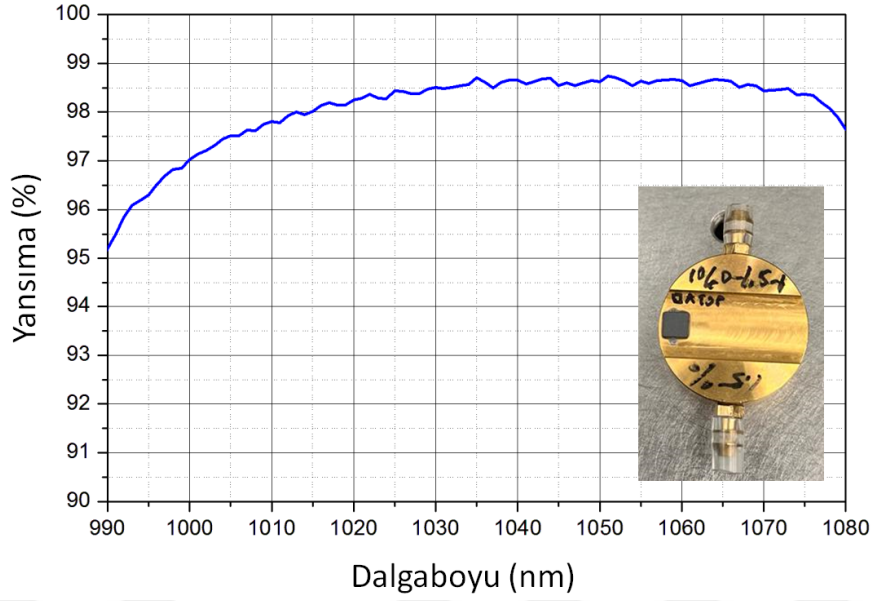
1040-2-1ps-x kod numaralı SESAM kullanılmıştır.



Şekil 3.29. Çok-modlu diyot pompalı, pasif mod-kilitli Yb:LLF lazer sisteminde kullanılan SESAM'a (BATOP SAM-1040-2-1ps-x) ait düşük uyarım şiddetinde spektral yansıtım ve dispersiyon karakteristiği

Bahsi edilen SESAM elemanının sağlayıcısı olan BATOP firması tarafından verilen düşük uyarım şiddetinde ölçülen spektral yansıtım ve dispersiyon karakteristiği Şekil 3.29'da verilmiştir. Bahsi edilen SESAM elemanının deneysel lazer kurulumunda pratik öneme sahip özelliklerini özetleyecek olursak, SESAM 1010-1070 nm aralığında yüksek yansıtıcılık özelliğine ($\lambda = 1040 \text{ nm}$ merkezli), %2 toplam soğurma miktarına (A), %1.2 modülasyon derinliğine (ΔR), %0.8 doyurulamayan kayıp oranına (A_{ns}), $60 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ doyumluk akısına (Φ_{sat}), $\sim 1 \text{ ps}$ uzunluğunda gevşeme zaman sabitine (τ), ve $4 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ değerinde hasar eşiğine (Φ) sahiptir.

Tez çalışması dahilinde pasif mod-kilitli rejimde femtosaniye uzunluğunda atmalar üreten Yb:LLF lazer sistemlerinin gerçekleştirilmesinde ek olarak, düşük maliyetli tek-modlu lazer diyotlar ile pompalanmış sistemlerin gerçekleştirilebilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmalar dahilinde, 450 mA besleme akımında 260 mW'lık ortalama çıkış gücü sağlayabilen Thorlabs L960H1 kullanılmıştır. Bu şekilde oluşturulmuş lazer sistemlerinde, yüksek güçlü çoklu-modlu lazer diyot ile pompalamaya kıyasla toplam kavite içi gücü birkaç mertebe küçük olduğundan, tercihen daha düşük toplam soğurma miktarına ve doyumluk akıcılığına sahip SESAM elemanlarının kullanımı gerekmektedir. Bu kapsamda, çalışmalar sırasında erişilebilir durumda olan SAM-1040-1.5-1ps-x kod numaralı SESAM (BATOP şirketi tarafından temin edilmiş) kullanılmıştır. Burada kullanılan SESAM 1000-1070 nm aralığında yüksek yansıtıcılık özelliğine ($\lambda = 1040 \text{ nm}$ merkezli), %1.5 toplam soğurma miktarına (A), %0.9 modülasyon derinliğine (ΔR), %0.6 doyurulamayan kayıp oranına (A_{ns}), $50 \mu\text{m}/\text{cm}^2$ doyumluk akısına (Φ_{sat}), $\sim 1 \text{ ps}$ uzunluğunda gevşeme zaman sabitine (τ), ve $4 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ değerinde hasar eşiğine (Φ) sahiptir.



Şekil 3.30. Tek-modlu diyot pompalı, pasif mod-kilitli Yb:LLF lazer sisteminde kullanılan SESAM'a (BATOP SAM-1040-1.5-1ps-x) ait düşük uyarım şiddetinde spektral yansımaya karakteristiği

Tez çalışmasının bu alt kapsamında Yb:LLF kazanç ortamı ile oluşturulmuş sistemlerin kurulumunda izlenen genel metotlar, optik elemanların tanımı ile birlikte sunulmuştur. Yb:LLF kazanç ortamının kullanıldığı farklı alt çalışma rejimlerinde izlenen ve ilgili uygulamaya has yaklaşımlar ise tezin bulgular ve tartışma bölümünün ilgili kısımlarında verilmiştir.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasının bu bölümünde, giriş bölümünde kapsam ve hedefleri ortaya konulmuş olan ve bir önceki bölümde kullanılan metotların tanımlandığı deneysel çalışmalardan elde edilmiş olan sonuçlar tartışmalı biçimde sunulmaktadır. Tez çalışmasının genel kapsamı, Cr:Colquiriite (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF) ve Yb-katkılı kazanç ortamlarının (Yb:YLF, Yb:LLF) kullanıldığı çeşitli alt bölümleri (sıcaklığa bağlı spektroskopik özellik karakterizasyonu, dalgaboyu ayarlama, pasif Q-anahtarlama ve mod-kilitli operasyon gibi) içerdiğinden, burada sunulan içerik takip eden alt bölümler altında sınıflandırılmıştır. İlgili alt bölümlerde sunulan sonuçlar kaynak taraması kapsamında incelenen önceki çalışmalar ile kıyaslı biçimde değerlendirilerek tez çalışması kapsamında elde edilmiş sonuçların literatüre katkısı vurgulanmaktadır.

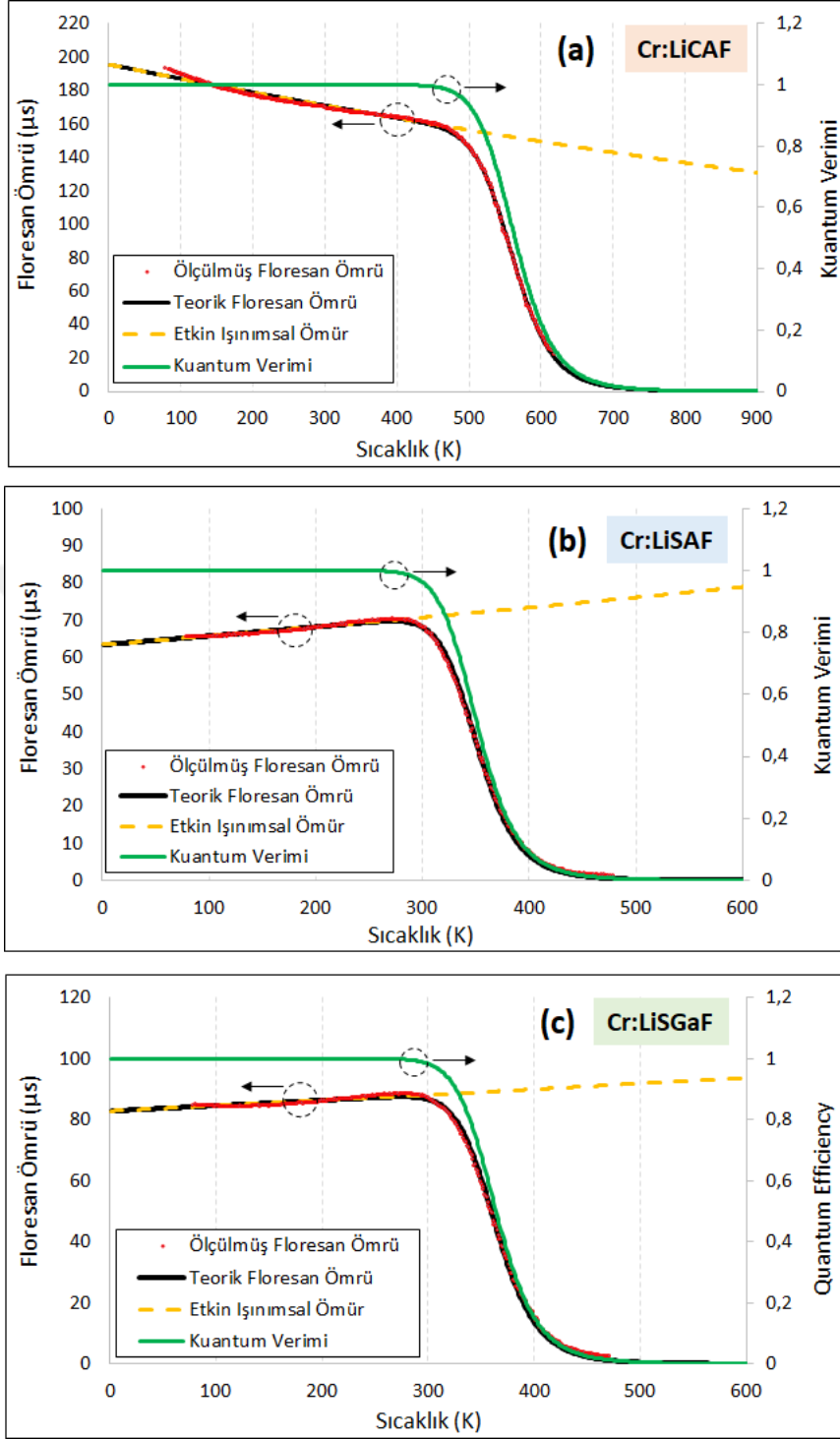
4.1. Cr:Colquiriite’lerde Sıcaklığa Bağlı Ölçülmüş Spektroskopik Özellikler

Cr:Colquiriite kazanç ortamlarına (Cr:LiCAF, Cr:LiSAF, Cr:LiSGaF) ait emisyon kesit alanı (5 K sıcaklık aralıkları ile) ve floresan ömrünün (1 K sıcaklık aralıkları ile) sıcaklığa bağlı değişimlerinin ölçülmesi Bölüm 3.1’de verilen deneysel kurulumlar ile gerçekleşmiş olup, 78-618 K aralığında elde edilmiş ölçüm sonuçları takip eden alt bölümlerde verilmiştir. Ölçülen büyüklüklere ait analitik tanımlar ilgili denklem ve katsayılar ile birlikte verilerek gelecek çalışmalar için kolay referans niteliğinde bilgi kaynağı oluşturulmuştur.

4.1.1. Cr:Colquiriite’lerde 78-618 K aralığında ölçülen sıcaklığa bağlı floresan ömrü

Cr:Colquiriite kazanç ortamları için kriyojenik (78-300 K) ve oda sıcaklığı üzerindeki (300-618 K) sıcaklıklarda gerçekleşen iki farklı deneysel kurulum ile (Şekil 3.5’te gösterilmiş) ölçülmüş floresan ömrü verileri birleştirilerek Şekil 4.1’de verilen grafikler ile 78-618 K aralığı için gösterilmiştir. Şekil 4.1’de, kırmızı renkli semboller deneysel olarak ölçülen floresan ömrü verilerini temsil etmektedir (veriler 1 K aralıklarla alındığı için noktalar sürekli bir çizgi gibi görünmektedir). İlgili şekilde verilen siyah ve yeşil renkli düz eğriler ile altın renginde verilmiş kesikli eğriler, ilerleyen kısımlarda ana hatlarıyla açıklayacağımız şekli ile verilere yapılan sayısal uyarlamaları temsil etmektedir.

Şekil 4.1’de incelenen her üç kristal için verilen ve kırmızı renkli işaretçi ile gösterilmiş floresan ömrü ölçümleri incelendiğinde, iki farklı davranış karakteristiği gözlemlenmektedir. Bunlardan birincisi düşük sıcaklıklarda (Cr:LiCAF için 78-450 K, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için 78-300 K) gözlemlenen yavaş bir doğrusal değişim, ikincisi ise yüksek sıcaklıklarda (Cr:LiCAF için $T > 450$ K, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için $T > 300$ K) floresan ömründe gözlemlenen keskin bir ani düşüş şeklinde tanımlanır. Burada her bir kristal için tanımlanmış düşük sıcaklık aralığında gözlemlenen davranışın analitik olarak tanımlanmasında, Cr:Colquiriite kazanç ortamlarında ışıınımsız bozunma hızı göz ardı edilerek, gözlemlenen sıcaklık bağımlılığı çoğunlukla ışıınımlı floresan ömrünün $\tau_R(T)$ sıcaklık değişimi ile tanımlanır.



Şekil 4.1. a) Cr:LiCAF; b) Cr:LiSAF; c) Cr:LiSGaF için floresan ömrünün sıcaklığa ölçülen bağımlılığı

Bu düşük sıcaklık rejiminde, Andrews vd. (1986) tarafından da kullanıldığı gibi, ölçülen floresan ömrü değişiminin analitik tanımı için Denklem (4.1)'de verilen ampirik formül kullanılabilir:

$$\frac{1}{\tau_R(T)} = \frac{1}{\tau_{R0}} e^{\alpha T} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de τ_{R0} 78 K'de ölçülen ışınlı floresan ömrü ve α ampirik bir uyum katsayısıdır.

İnceleme altında olan her üç Cr:Colquiriite kazanç ortamı için verilen ilgili yüksek sıcaklık aralıklarında ölçülen ve keskin bir düşüş ile kendini gösteren floresan ömürleri ışınlı süreçten kaynaklanır ve floresan ömrünün termal sönümlenmesi olarak da adlandırılır (Bölüm 1.1.2'de detaylı olarak tanımlanmış). Bahsi edilen yüksek sıcaklıklarda, ışınlı floresan ömrü ($\tau_{NR}(T)$) azalmaya başlar ve deneyler sırasında ölçülen floresan ömrünün sıcaklığa bağımlılığını belirlemede baskın hale gelir. Floresan ömrünün termal sönümlenmesi tek bir konfigürasyonel koordinat Mott modeli (Andrews vd. 1986; Stalder vd. 1992) ile Denklem (4.2)'de verildiği şekli ile tanımlanabilir:

$$\frac{1}{\tau_{NR}(T)} = \frac{1}{\tau_{NR0}} e^{\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)} \quad (4.2)$$

Burada τ_{NR0} ışınlı floresan ömrünün yüksek sıcaklık limiti, k Boltzmann sabiti ve ΔE aktivasyon enerjisini (4T_2 uyarılmış durumunun minimum değeri ile 4T_2 uyarılmış durumunun 4A_2 temel durumu ile kesişme noktası arasındaki enerji farkını temsil etmektedir (Noginov vd. 2001). Ölçülen floresan ömrünün $\tau_F(T)$ sıcaklık ile genel değişimi, sırasıyla Denklem (4.1) ve Denklem (4.2) ile tanımlanan ışınlı ve ışınlı geçişlerin birleşik oranı olarak Denklem (4.3)'te verildiği şekli ile tanımlanabilir.

$$\frac{1}{\tau_F(T)} = \frac{1}{\tau_R(T)} + \frac{1}{\tau_{NR}(T)} = \frac{1}{\tau_{R0}} e^{\alpha T} + \frac{1}{\tau_{NR0}} e^{\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right)} \quad (4.3)$$

Verilen bir sıcaklıkta ışınlı geçişlere kıyasla ışınlı geçişlerin gücünü araştırmak için, Denklem (4.4) ile tanımlanan sıcaklığa bağlı floresan kuantum verimliliği ($\eta_Q(T)$) ek bir metrik olarak kullanılabilir:

$$\eta_Q(T) = \frac{\tau_F(T)}{\tau_R(T)} \quad (4.4)$$

Şekil 4.1'de her bir kazanç ortamı için verilen eğrileri (4.1-4) numaralı denklemler ile verilen tanımlar ile bağdaştıracak olursak; (i) altın renkli kesikli çizgi ile çizilmiş eğriler eşitlik (4.1) kullanılarak her bir malzeme için hesaplanan ışınlı floresan ömrü (düşük sıcaklıklarda ölçülen floresan ömrüne göre denklem katsayıları belirlenir ve τ_R 'ın yüksek sıcaklıklardaki değeri ekstrapolasyon ile hesaplanır), (ii) siyah düz eğriler, Eşitlik (4.3) kullanılarak hesaplanmış olan ve ölçülen floresan ömrüne genel uyumu, (iii) son olarak, yeşil renkli düz eğriler ise her bir malzeme için Eşitlik (4.4) ile hesaplanmış floresan kuantum verimliliğinin sıcaklık ile tahmini değişimini temsil etmektedir. Cr:Colquiriite'ler ile yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde, ilgili düşük sıcaklık aralıklarında floresan kuantum verimliliğinin değerinin bir olarak ($\eta_Q(T) = 1$) raporlandığı ve dolayısıyla $\tau_F(T) = \tau_R(T)$ olduğu görülmektedir (Stalder vd. 1992; Pilla vd. 2001; Pilla vd. 2004). Dolayısıyla, tez çalışması kapsamında burada yapılan

analizlerde de floresan kuantum verimliliklerinin ilgili kazanç ortamları için tanımlanmış düşük sıcaklıklarda bir değerine eşit olduğu varsayılmıştır. Şekil 4.1’de Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamları için çizdirilen grafiklere karşılık gelen uyum sabitleri Çizelge 4.1’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Cr:Colquiriite’lerde ölçülen floresan ömrünün analitik tanımında (Eşitlik 4.3) kullanılan ampirik uyum parametreleri

	Cr:LiCAF	Cr:LiSAF	Cr:LiSGaF
τ_{R0} (μ s)	196 ± 0.3	62.6 ± 0.3	81.7 ± 0.3
α ($10^{-6} K^{-1}$)	447 ± 2	-445 ± 3	-293 ± 3
τ_{NR0} (ps)	0.11 ± 0.05	2.4 ± 0.5	3.3 ± 0.5
ΔE (cm^{-1})	8235 ± 50	4200 ± 50	4325 ± 50
$T_{1/2}$ (K)	563 ± 5	350 ± 5	363 ± 5

Şekil 4.1 incelendiğinde, Cr:LiCAF için düşük sıcaklık aralığında ölçülen floresan ömrünün monoton olarak 78 K’de 193 μ s’den 300 K’de 170 μ s’ye ve daha sonra 400 K’de 164 μ s’ye düştüğü görülmektedir. Cr:LiCAF kazanç ortamı için burada raporlanan ışınlı ömürdeki değişime benzer bir karakteristik, Payne vd. (1989) tarafından yapılan ve floresan ömrünün 20 K’de yaklaşık 200 μ s’den 300 K’de 175 μ s’ye düştüğünün gösterildiği eski bir çalışmada yer almıştır. Düşük sıcaklıklarda gözlemlenen floresan ömründeki hafif artış ise oda sıcaklığındaki osilatör gücüne ek küçük bir vibronik katkıya dayandırılabilir (Payne vd. 1990) (ışınımsız bozunma içermeyen sentrosimetrik bir ortamda tipik davranış olarak ortaya çıkar (Gvishi vd. 1999). Cr:LiCAF ile karşılaştırıldığında, düşük sıcaklıklarda, ilgili kristaller oda sıcaklığına doğru ısıtıldıkça Cr:LiSAF (78 K’de 66 μ s’den 255 K’de 89 μ s’ye) ve Cr:LiSGaF (78 K’de 85 μ s’den 265 K’de 89 μ s’ye) için ölçülmüş floresan ömründe monotonik bir artış gözlenir. Payne vd. (1989) ve Stalder vd. (1992) tarafından rapor edilen veriler, Cr:LiSAF için kriyojenik sıcaklık aralığında floresan ömrünün benzer bir davranışını göstermektedir; bu, floresan ömrünün Cr^{3+} ’u çevreleyen iyonların tam konumlarına duyarlı olduğundan LiSAF kristal örgüsünün hafifçe yeniden düzenlenmesine atfedilmektedir. Buna ek olarak, Kuze vd. (2004) tarafından Cr:LiSAF’da azalan sıcaklıklar için, AlF_6 ve CrF_6 oktahedralarının çift-pariteli gerinim modunun daha pozitif değerlere doğru eğiliminin, azalan titreşim hareketini tamamlayıcı olarak hareket edebileceğini ve böylece bu aralıkta ölçülen floresan ömründe genel olarak hafif bir azalmaya neden olabileceğini gösterilmiştir. Benzer argümanlar, Cr:LiSAF ile benzer yapısal özellikleri nedeniyle Cr:LiSGaF için de yapılabilir. Genel olarak, Çizelge 4.1’de verilen ampirik uyum parametreleri, her bir Cr:Colquiriite kazanç ortamındaki ışınlı ömür sıcaklığa bağımlılığını tanımlamak için kullanılabilir. Bu şekilde, ışınlı ömür ($\tau_R(T)$) daha yüksek sıcaklıklara ekstrapolasyonu için uygun bir ifade elde edilebilir ve bu ifade daha sonra Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2) kullanılarak emisyon kesit eğrilerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

Oda sıcaklığı üzerindeki yüksek sıcaklıklarda ilgili kristallerde ölçülen floresan ömrü Şekil 4.1’de incelendiğinde, Cr:LiCAF kazanç ortamının termal sönmelenmeye karşı direnç açısından üstün olduğu görülmektedir (floresan ömründe gözlemlenen dramatik düşüş daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleşir). Bu gözlem, Çizelge 4.1’de verilen ΔE ve τ_{NR0} ampirik uyum parametreleri cinsinden açıklanabilir. Cr:LiCAF kazan ortamı için ΔE termal söndürme aktivasyon enerjisinin 8235 cm^{-1} değerine sahip olduğu tespit edilmekle birlikte, bu değer Cr:LiSAF (4207 cm^{-1}) ve Cr:LiSGaF (4325 cm^{-1}) için tespit edilen değerlerden oldukça yüksektir. Daha yüksek aktivasyon enerjisi nedeniyle, Cr:LiCAF’da floresan ömrünün termal sönmelenmesi Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF’a kıyasla çok daha yüksek sıcaklıklarda başlar. Bunu ölçmenin bir başka yolu da termal söndürme için kritik sıcaklığı ($T_{1/2}$) karşılaştırmaktır. Bu sıcaklık, ışınlı ve ışınlımsız geçişlerin oranının birbirine eşit olduğu sıcaklık (veya floresan ömrünün ışınlı ömür değerinin yarısına düştüğü sıcaklık) olarak tanımlanır.

Çizelge 4.2. Seçilen sıcaklıklarda Cr:Colquiriite’ler için ölçülen ve/veya hesaplanan ışınlı ömür, floresan ömrü ve floresan kuantum verimliliklerinin temsili değerleri (karşılaştırma için literatürden daha önceki raporlar da dahil edilmiştir)

Materyal	Sıcaklık (K)	$\tau_R(T)$ (μs)	$\tau_F(T)$ (μs)	$\eta_{RE}(T)$ (%)
Cr:LiCAF	78	193	193, 190 (Stalder vd. 1992)	100
	200	179	178	~100
	300	171	170, 175 (Payne vd. 1989)	~100
	400	164	164	~100
Cr:LiSAF	78	65	65, 64 (Stalder vd. 1992)	100
	200	68	68	100
	300	71	68, 67 (Payne vd. 1989), 70 (Stalder vd. 1992)	~96
	400	75	8	~10
Cr:LiSGaF	78	85	85	100
	200	86	86	100
	300	89	87, 88 (Smith vd. 1992)	~98
	400	92	16	~17

Tez çalışması dahilinde burada sunulmuş olan ölçümlerde $T_{1/2}$ değeri Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF için sırasıyla 565 K (292 °C), 350 K (77 °C) ve 365 K (92 °C) olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma kapsamında Çizelge 4.1'de verilen uyum parametreleri (τ_{R0} , τ_{NR0} , ΔE ve $T_{1/2}$) literatürde rapor edilmiş değerlere kıyasla oldukça iyi bir uyum içindedir (önceki çalışmalarda söz konusu kazanç ortamlarında sabit bir ışınlı ömrün varlığı kabul edilmiş olup, bu çalışmada elde edilmiş uyum parametreleri ile kıyaslandığında görülen bazı farklılıklara sebep olmaktadır (Stalder vd. 1992; Balembois vd. 1997; Eichenholz ve Richardson 1998).

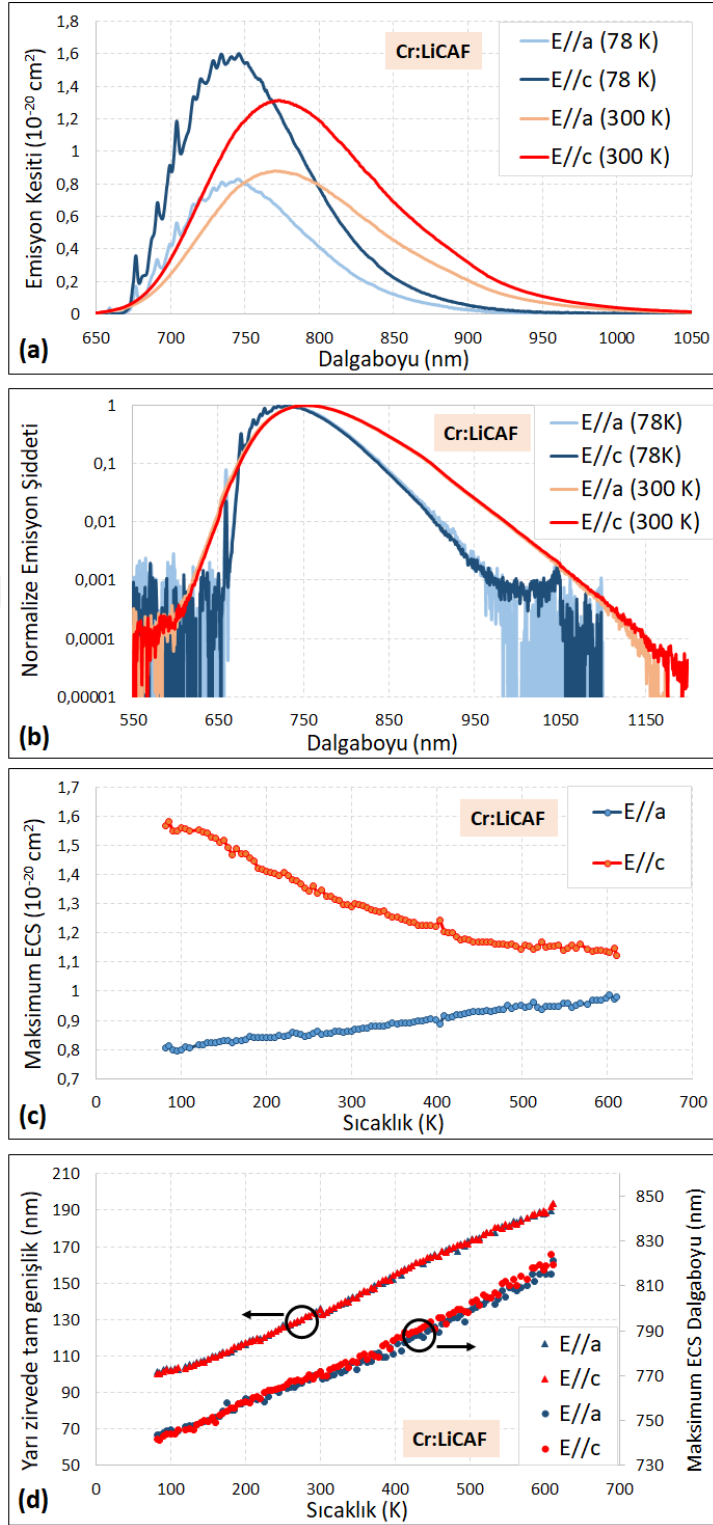
Bu alt bölüm sonlandırılırken, seçilen sıcaklıklarda Cr:Colquiriite kazanç ortamları için ölçülen ve tahmin edilen ışınlı ve floresan ömürleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Bu çizelgede ayrıca literatürde bildirilen değerlerle bir karşılaştırmaya da yer verilmiştir.

4.1.2. Cr:Colquiriite'lerde 78-618 K aralığında ölçülen sıcaklığa bağlı emisyon kesiti

Cr:Colquiriite kazanç ortamları için bir önceki bölümde verilen floresan ömrü ölçümlerine benzer şekilde, her üç kristal için kriyojenik (78-300 K) ve oda sıcaklığı üzerindeki (300-618 K) sıcaklıklarda gerçekleşen iki farklı deneysel kurulum ile (Şekil 3.10'da gösterilmiş) emisyon kesitleri ölçülmüş ve ilgili veriler birleştirilerek Şekil 4.2-4'te verilen grafikler ile 78-618 K aralığında karakterize edilmiştir.

Şekil 4.2, Cr:LiCAF için ECS ölçüm sonuçlarını özetlemektedir. Şekil 4.2a'da, 650 nm ile 1050 nm arasında 78 K ve oda sıcaklığında (300 K) hem E//a hem de E//c polarizasyonları için ölçülen ECS'ler gösterilmektedir. Şekil 4.2b'de ise spektrumun omuzlarında daha iyi görünürlük için aynı sonuçlar daha geniş bir spektral aralıkta (550-1150 nm) normalleştirilmiş logaritmik birimlerle gösterilmiştir. Oda sıcaklığında her iki polarizasyon için ölçülen emisyon spektrumları tipik $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ geçişidir. Oda sıcaklığında $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ emisyonunun tepe noktası 772 nm'de merkezlenmiştir ve E//c ve E//a polarizasyonları için sırasıyla yaklaşık $1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $0.9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'lik bir kesite sahiptir. Bu değerler Payne vd. (1989) tarafından bu kristal için raporladıkları ilk sonuçlarıyla oldukça iyi örtüşmektedir. Burada verilen emisyon kesit alan genişlikleri ile Cr:LiCAF'ın oda sıcaklığındaki emisyonunun 600-1150 nm bölgesinin tamamını kapsadığı gösterilirken (Şekil 4.2b), geçmiş deneylerde gösterilen dalgaboyu ayar aralığının 720-887 nm aralığında kısıtlı kaldığı raporlanmıştır (Payne vd. 1988; Demirbas 2012). Bu davranış Cr:LiCAF kazanç ortamına ait başka fiziksel mekanizmaların varlığı ile açıklanır; lazer ayar aralığı kısa dalga boyu aralığında kendi kendine emilim kayıpları ile, uzun dalga boyu aralığında ise uyarılmış durum absorpsiyonu ile sınırlıdır (Payne vd. 1988; Demirbas vd. 2012). Bu nedenle Şekil 4.2'de gösterilen emisyon spektrumu ilgili malzemedeki kazanç spektrumunu doğrudan yansıtmaz.

Kriyojenik sıcaklık aralığında verilen ölçüm sonuçlarını inceleyecek olursak, 78 K'de ölçülen emisyon spektrumu, Şekil 4.2a'da görülen yerel piklere sahip bir karakteristik gösterir. Bu piklere karşılık gelen titreşimsel seviyeli atamaları geçmiş çalışmalarda 20 K'e soğutma durumu için rapor edilmiştir (Payne vd. 1989). Başka birçok kazanç ortamında gözlenebileceği üzere, sıcaklık düştükçe emisyon spektrumunda daha kısa dalga boylarına doğru bir kayma ve emisyon bant genişliğinde daralma görülmektedir.



Şekil 4.2. Cr:LiCAF'ın E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin sıcaklığa bağlı olarak ölçülen özellikleri: **a)** 77 K ve 300 K'de ECS; **b)** 78 K ve 300 K'de logaritmik ölçekte normalleştirilmiş emisyon spektrumları; **c)** ECS'nin pik değerinin değişimi; **d)** 78-618 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumda tam genişliği

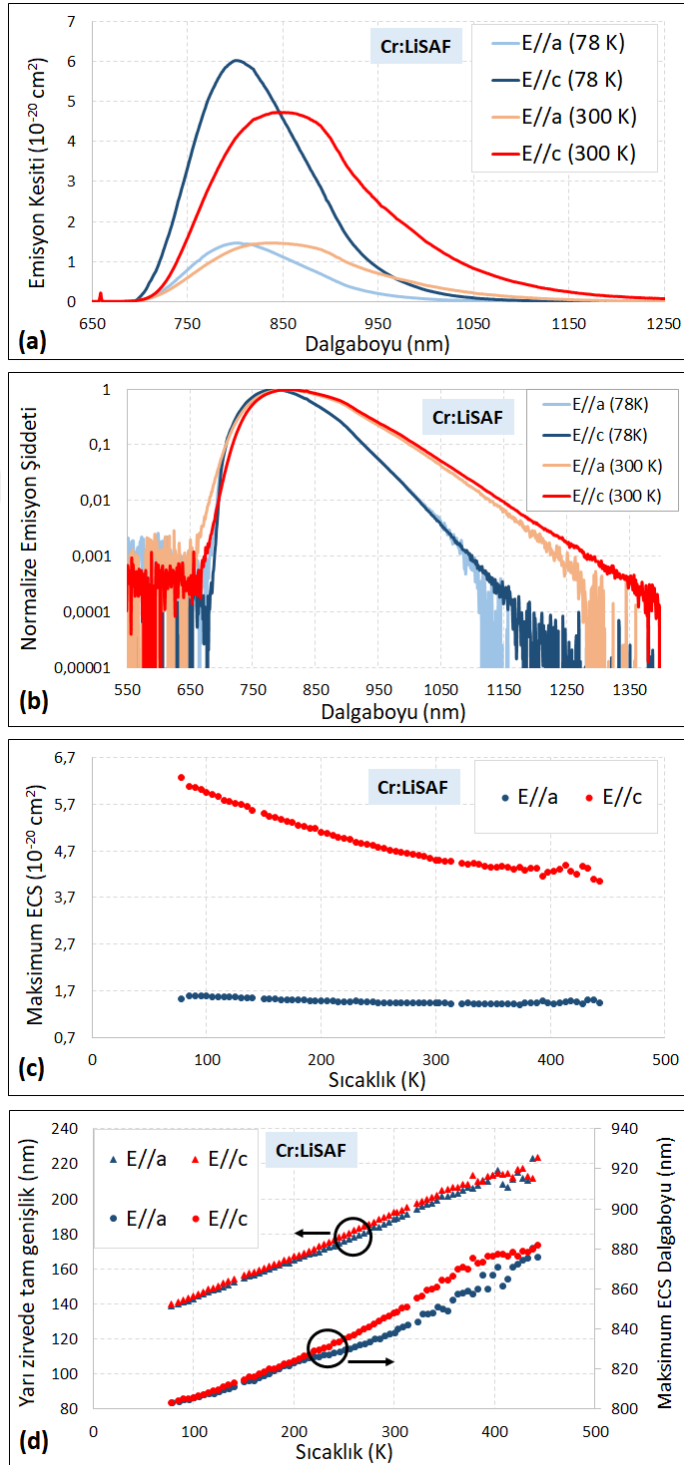
Cr:LiCAF için verilen ölçüm sonuçlarına göre pik emisyon dalga boyu 300 K'de 772 nm'den 78 K'de 743 nm'ye kayar ve 78 K'de E//c ve E//a polarizasyonları için pik ECS değerleri sırasıyla $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $0.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ olur. Buradaki davranış Şekil 4.2c'de daha açık bir biçimde görülmekle birlikte, azalan sıcaklıklarla için, beklentiler dahilinde E//c polarizasyonunda emisyon gücünün arttığını, ancak E//a polarizasyonunda emisyon gücünün görece daha zayıf bir biçimde azaldığı görülmektedir.

Literatürde verilmiş geçmiş çalışmalara bakıldığında, Cr:LiCAF için kriyojenik sıcaklıklarda sadece normalize edilmiş birimlerde ve polarize olmayan emisyon ölçümleri raporlanmıştır (Payne vd. 1989). Bu nedenle bu çalışmada 78 K sıcaklığında E//c ve E//a için elde edilmiş sonuçlar için literatür kıyaslaması yapılamamaktadır. Bu manada, her üç Cr:Colquiriite kristali için sıcaklığa bağlı olarak E//c ve E//a eksenlerinde elde edilmiş mutlak emisyon kesit alanı sonuçları ilk olarak bu tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneyler ile raporlanmıştır.

Şekil 4.2c'de 78-618 K sıcaklığı aralığında ölçülen tepe ECS değerinin değişimi gösterilmektedir (bu grafik için gösterilen veriler basit bir Matlab kodu ile analiz edilmiş ve ilgili bilgiler çıkarılmıştır). İlgili grafikte E//c ve E//a polarizasyonlarındaki tepe emisyon kesitlerinin oranının 600 K'de ≈ 1.15 'ten 300 K'de ≈ 1.5 'e ve 78 K'de ≈ 1.6 'ya yükseldiği görülmektedir. Dolayısıyla, Cr:LiCAF kristalinin soğutulması lazer etkisi için uygun olan E//c emisyonunu artırır. Son olarak, Şekil 4.2d'de, her iki polarizasyon için emisyon bant genişliği ve tepe emisyonunu oluşturduğu dalga boyunun ölçülen değişimi sunulmaktadır. Burada, beklendiği gibi, artan sıcaklıkla birlikte emisyon spektrumları genişlemekte ve daha uzun dalga boylarına kaymaktadır. Her iki polarizasyon için emisyonun yarı maksimumda tam genişliği, artan sıcaklıkla (78 K $\rightarrow$ 608 K) yaklaşık 100 nm'den 195 nm'ye yükselirken, her iki polarizasyon için tepe emisyonunun oluşturduğu dalgaboyunun 743 nm'den 823 nm'ye kaydığı gözlemlenmektedir.

Cr:LiSAF kazanç ortamı için, bu çalışmada oda sıcaklığında ve 78 K'de ölçülen emisyon kesit alanları Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b'de gösterilmiştir. Oda sıcaklığında $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ emisyonunun tepe noktası 855 nm'de ölçülmüştür ve E//c ve E//a polarizasyonları için sırasıyla yaklaşık $4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $1.45 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'lik bir kesite sahiptir. Ölçülen tepe emisyon dalga boyu (855 nm) literatürde bildirilen serbest çalışan lazer dalga boylarıyla (835-860 nm (Demirbas ve Baali 2015; Demirbas vd. 2009)) iyi bir uyum içindedir. Ayrıca emisyon spektrumunun 850 nm civarında oldukça düz bir yapıya sahip olduğu görülmekle birlikte, bu durum kazanç daraltma etkilerini en aza indirmeye yardımcı olur. Cr:LiCAF kazanç ortamı için yapılan literatür kıyasına benzer nitelikte, Cr:LiSAF'ın oda sıcaklığındaki emisyonu 650-1350 nm bölgesinin tamamını kapsadığı (Şekil 4.3b) gösterilmiş olsa da Cr:LiSAF geçmiş çalışmalar ile şimdiye kadar gösterilen lazer dalgaboyu ayar aralığı 770-1110 nm aralığı ile sınırlıdır (Demirbas ve Baali 2015). Bu durum yine kısa dalga boyu aralığındaki kendi kendine soğurma kayıpları ve uzun dalga boyu tarafında uyarılmış durum emisyonunun varlığı ile sınırlıdır (Rapoport ve Shand 1992). Bir ek gözlem olarak, bu çalışmada Cr:LiSAF için ölçülen pik ECS değerleri Payne ve arkadaşları tarafından bildirilen değerlerden %8-10 oranında daha düşüktür ($4.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$) (Payne vd. 1989). Bu durum kısmen bu çalışmadaki emisyon kesiti hesabında (Eşitlik 3.1-2) kullanılan görece uzun ışınlı ömür değerinden kaynaklanmaktadır (örnek olarak 300 K'de literatürde 67 μs olarak verilirken (Payne vd. 1989), bu çalışmada 71 μs olarak ölçülür). Ayrıca, tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen ölçümler, önceki çalışmalara göre daha geniş bir spektral aralık için

kaydedilmiştir, bu da gözlemlenen farka katkıda bulunabilir (Eşitlik 3.1-2'deki daha büyük emisyon şiddeti integrali, hesaplanan ECS değerini küçültür).

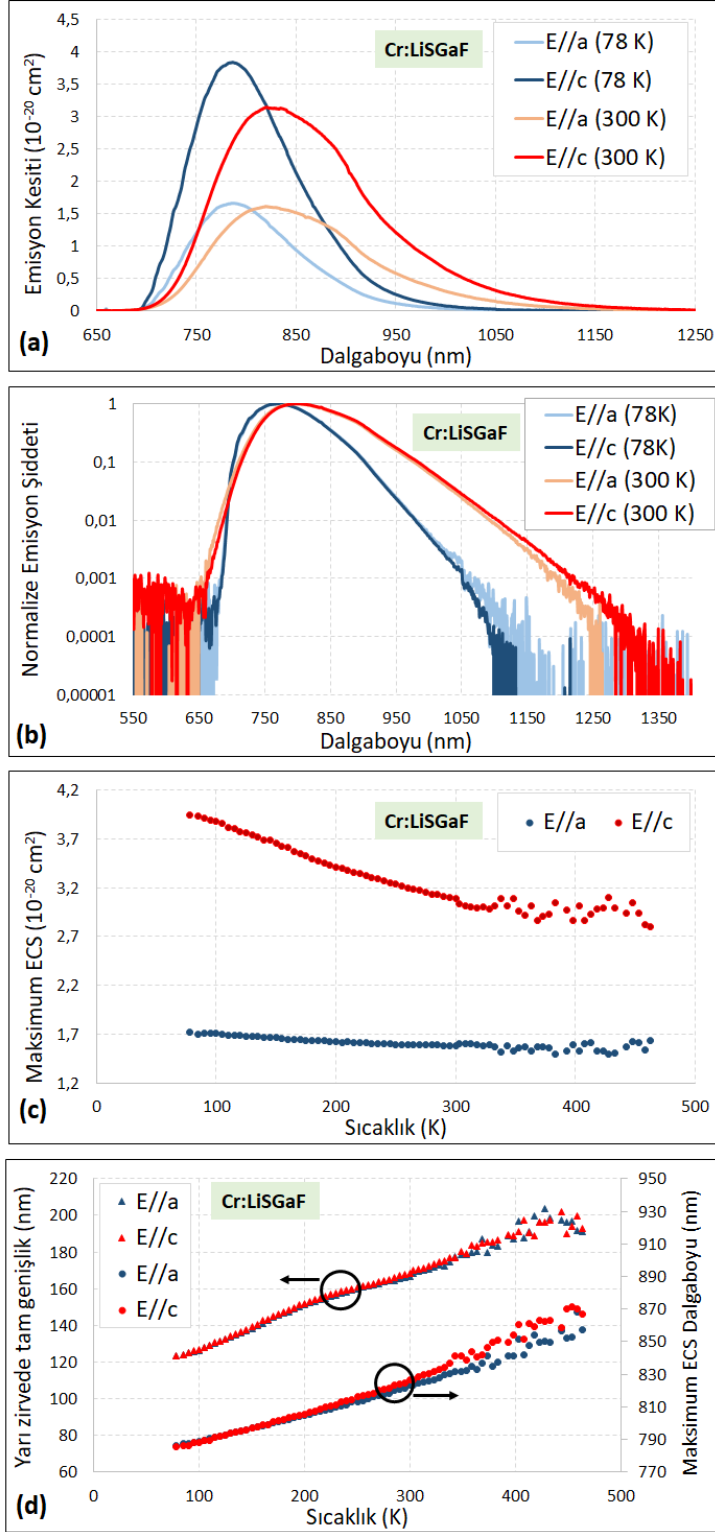


Şekil 4.3. Cr:LiSAF için E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin sıcaklığa bağlı olarak ölçülen özellikleri: **a)** 77 K ve 300 K'de ECS; **b)** 78 K ve 300 K'de logaritmik birimlerde normalleştirilmiş emisyon spektrumları; **c)** ECS'nin pik değerinin değişimi; **d)** 78-443 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumda tam genişliği

Şekil 4.3a'da 78 K sıcaklığı için Cr:LiSAF için ölçülen emisyon spektrumlarına baktığımızda, daha önce Cr:LiCAF için gözlemlenen ve lokal piklerle kendini gösteren emisyon karakteristiğinin kaybolduğu görülmekle birlikte, bu durum geçmişte raporlanan 20 K sıcaklığında polarize olmayan emisyon ölçümleri ile tutarlılık göstermektedir (Payne vd. 1989). Cr:LiSAF malzemesi 78 K'e soğutulduğunda, E//c polarizasyonu için tepe ECS $6.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'ye yükselirken, E//a polarizasyonu için sadece hafif bir artışla $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'ye yükselir. Ayrıca her iki polarizasyon için de tepe emisyon dalga boyu $\sim 803 \text{ nm}$ 'ye kayar. Cr:LiCAF'a benzer şekilde, Cr:LiSAF için literatürde daha önceki kriyojenik ECS verileri yalnızca polarize edilmemiş emisyon için ve normalize edilmiş birimlerde verildiğinden (Payne vd. 1989), kriyojenik emisyon verileri için literatürle bir karşılaştırma yapmak mümkün değildir.

Cr:LiSAF için sıcaklığa bağlı olarak ölçülmüş emisyon karakteristiğinin nicelendirilmesinde, her iki polarizasyon için 78-443 K aralığında ölçülen tepe ECS değerinin sıcaklık bağımlılığı Şekil 4.3c'de gösterilmiştir. E//c polarizasyonunda ECS şiddeti 78 K'de $6.20 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ iken artan sıcaklıkla 443 K'de $4.05 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'ye düştüğü görülmektedir. E//a polarizasyonu için ise, 78 K'deki $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ şiddetinde emisyon kesit alanı artan sıcaklıkla birlikte 443 K'de ölçülen $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ değerine hafif bir düşüş gösterir. Sonuç olarak, E//c ve E//a polarizasyonlarındaki pik emisyon kesit alanlarının oranı 443 K'de ≈ 2.7 'den 300 K'de ≈ 3.1 'e ve 78 K'de ≈ 3.9 'a yükselir. Dolayısıyla, Cr:LiCAF ile karşılaştırıldığında, Cr:LiSAF'da E//c ve E//a arasında çok daha yüksek bir emisyon oranı görmekteyiz, bu da lazer operasyonu için E//c konfigürasyonunu uygularken daha büyük bir avantaj sağlamaktadır. Cr:LiSAF için emisyon genişliğinin ve tepe emisyon dalga boyunun sıcaklığa bağlı değişimi Şekil 4.3d'de gösterilmektedir. Cr:LiCAF ile gözlemlenen davranışa benzer şekilde, Cr:LiSAF malzemesi 78 K'den 443 K'ye kadar ısıtılırken, bant genişliği doğrusal olarak 140 nm'den 223 nm'ye artarken, her iki polarizasyon için tepe ECS dalga boyu 78 K'de 800 nm'den 443 K'de 881 nm'ye kaymaktadır.

Emisyon kesit alanının E//c ve E//a eksenleri için sıcaklık bağımlılığını incelediğimiz üçüncü kazanç ortamı olan Cr:LiSGaF malzemesi için elde edilen ölçüm sonuçları Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Cr:LiSGaF için, oda sıcaklığında $^4T_2 \rightarrow ^4A_2$ emisyonunun tepe noktası 823 nm'de ölçülmüştür ve E//c ve E//a polarizasyonları için sırasıyla $3.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'lik bir kesite sahiptir. Her üç Cr:Colquiriite malzemesi için alınan ölçümler kıyaslandığında Cr:LiSGaF'a ait oda sıcaklığındaki emisyon zirvesinin (828 nm) Cr:LiCAF (772 nm) ve Cr:LiSAF (855 nm) malzemelerinde ölçülen pik emisyon dalgaboyları arasında yer aldığı görülmektedir. Benzer şekilde, E//c polarizasyonu için tepe emisyon kesiti ($3.1 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$), Cr:LiCAF ($1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$) ve Cr:LiSAF ($4.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$) için ölçülen değerlerin arasındaki ilgili değere sahiptir. Daha önce Cr:LiSAF malzemesi için de gözlemlendiği üzere, Cr:LiSGaF için ölçülen emisyon kesit değerleri literatürde önceden rapor edilmiş değerlere kıyasla bir miktar ($\sim 5\%$) daha düşüktür (Smith vd. 1992). Cr:LiSGaF için verilen bu farkın muhtemelen bu çalışmada daha geniş bir spektrum aralığı için emisyon sinyalinin daha hassas ölçülmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Cr:LiSGaF'ın E//c ve E//a eksenleri için oda sıcaklığında ölçülmüş olan emisyon spektrumları 650 nm ile 1250 nm aralığını kapsamakta ve 169 nm'lik bir bant genişliğine sahiptir (Şekil 4.4b). Ancak Cr:LiSGaF malzemesinin kullanımı ile literatürde 777-977 nm aralığında rapor edilen sürekli-dalga dalgaboyu ayar aralığı ölçülen emisyon spektral genişliğine kıyasla oldukça dardır (Demirbas vd. 2009).



Şekil 4.4. Cr:LiSGaF'nin E//a ve E//c polarizasyonlarında ECS'nin ölçülen sıcaklığa bağlı özellikleri: **a)** 77 K ve 300 K'de ECS; **b)** 78 K ve 300 K'de logaritmik birimlerde normalleştirilmiş emisyon spektrumları; **c)** ECS'nin pik değerinin değişimi; **d)** 78-463 K aralığında sıcaklıkla pik emisyon dalga boyu ve emisyonun yarı maksimumunda tam genişliği

Sürekli-dalga operasyonunda lazer dalgaboyu ayarlanmasında öz absorpsiyon ve uyarılmış durum absorpsiyonu gibi etkilerin göz önüne alındığı durumda bile Cr:LiSGaF lazeri için dalgaboyu ayarlama aralığının uzun dalga boyu tarafında daha da genişletilebileceği düşünülmektedir. Çünkü geçmiş çalışmalarda bu malzemenin lazer dalgaboyu ayarlama sınırları henüz tam olarak araştırılmamıştır.

Son olarak, kriyojenik sıcaklıklarda Cr:LiSGaF için ölçülen sıcaklığa bağlı emisyon kesit alanı karakteristiğine değinecek olursak, Cr:LiSAF'a benzer şekilde, Cr:LiSGaF'ın 78 K'deki emisyon verileri, emisyon spektrumu üzerine bindirilmiş lokal pikler içermemektedir. Bu sonuç, Smith vd. (1992) tarafından bildirilen ve 24 K sıcaklığında ölçülmüş polarize olmayan Cr:LiSGaF emisyon spektrumu ile tutarlıdır. Ek olarak, Cr:LiSGaF malzemesi 78 K'ye soğutulduğunda, E//c ve E//a polarizasyonlarının pik emisyon kesiti sırasıyla $4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ve $1.6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'ye yükselir. Cr:LiSGaF malzemesinde pik emisyon kesitinin sıcaklık değişiminin 78-463 K aralığında ölçümü Şekil 4.4c'de gösterilmektedir. E//c polarizasyonundaki emisyon kesiti 78 K'de $4.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 'den 463 K'de $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ değerine düşmektedir. E//a polarizasyonu için ise, 78 K'de ölçülen $1.7 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ değerindeki emisyon şiddeti artan sıcaklıkla birlikte 463 K'de ölçülen $1.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ değerine hafif bir düşüş göstermektedir. İki polarizasyon için tepe ECS oranı 463 K'de ≈ 1.85 'ten 300 K'de ≈ 1.95 'e ve 78 K'de ≈ 2.3 'e yükselir. 310 K'nin üzerinde, ECS şiddetlerindeki bu oransal değişim, deneyler sırasında kullanılan daha kısa Cr:LiSGaF örneğinin neden olduğu daha düşük SNR nedeniyle Cr:LiSAF ile karşılaştırıldığında nispeten daha az fark edilebilir durumdadır. Şekil 4.4d incelendiğinde, 78 K'den 463 K'ye ısıtma ile, her iki eksendeki emisyon bant genişliğinin 123 nm'den 200 nm'ye genişlediği görülürken, pik emisyon dalga boyu 786 nm'den 867 nm'ye kaymaktadır.

Çizelge 4.3. Cr:Colquiriite'lerin E//a ve E//c polarizasyonlarındaki sıcaklığa bağlı pik emisyon dalga boyunun Eşitlik (4.5) ile tanımlanmasında kullanılan katsayılar

	Eksen	$a_4(K^{-4})$	$a_3(K^{-3})$	$a_2(K^{-2})$	$a_1(K^{-1})$	a_0
Cr:LiCAF	E//c	-3.6×10^{-10}	6.86×10^{-7}	-3.75×10^{-4}	2.13×10^{-1}	725.3
	E//a	-	1.8×10^{-7}	-1.1×10^{-4}	1.43×10^{-1}	731.6
Cr:LiSAF	E//c	-1.43×10^{-8}	1.32×10^{-5}	-3.95×10^{-3}	6.5×10^{-1}	769.1
	E//a	-	7.3×10^{-7}	-3.1×10^{-4}	2×10^{-1}	788.25
Cr:LiSGaF	E//c	-5.28×10^{-9}	5.61×10^{-6}	-1.84×10^{-3}	4.06×10^{-1}	761.4
	E//a	-	-	1.64×10^{-4}	1×10^{-1}	777.7

Çizelge 4.4. Cr:Colquiriite'lerin E//a ve E//c polarizasyonlarındaki sıcaklığa bağlı pik kesit alanının Eşitlik (4.6) ile tanımlanmasında kullanılan katsayılar

	Eksen	$b_2(K^{-2})$	$b_1(K^{-1})$	b_0
Cr:LiCAF	E//c	1.62×10^{-6}	-2×10^{-3}	1.755
	E//a	-	3.35×10^{-4}	0.773
Cr:LiSAF	E//c	1.47×10^{-5}	-1.3×10^{-2}	7.127
	E//a	2.65×10^{-6}	-1.76×10^{-3}	1.726
Cr:LiSGaF	E//c	8.17×10^{-6}	-7.22×10^{-3}	4.52
	E//a	1.54×10^{-6}	-1.24×10^{-3}	1.81

Çizelge 4.5. Cr:Colquiriite'lerde sıcaklığa bağlı emisyon spektrum genişliğinin Eşitlik (4.7) ile tanımlanmasında kullanılan uyum değerleri. (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	-	-3.6×10^{-7}	4.1×10^{-4}	4.5×10^{-2}	93.75
Cr:LiSAF	-7.1×10^{-9}	6.1×10^{-6}	-1.76×10^{-3}	4.3×10^{-1}	114
Cr:LiSGaF	-	6.14×10^{-8}	-1.65×10^{-4}	2.74×10^{-1}	101.7

Bu alt bölümü kapatırken, Cr:Colquiriite malzemeleri için bu kısma kadar tanımlanmış olan önemli emisyon kesit parametrelerinin sıcaklığa bağımlılığını tanımlayan uyum denklemleri verilmektedir. Bu kapsamda ölçülen büyüklüklerin tanımlanmasında dördüncü dereceden polinom fonksiyonları benimsenmiş ve Eşitlik (4-7)'de verildiği şekilde tanımlanmıştır.

$$\lambda_p(T) = a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4 \quad (4.5)$$

$$\sigma_e(\lambda_p, T) = b_0 + b_1T + b_2T^2 \quad (4.6)$$

$$\Delta\lambda_e(T) = c_0 + c_1T + c_2T^2 + c_3T^3 + c_4T^4 \quad (4.7)$$

Verilen eşitliklerde, $\lambda_p(T)$ pik emisyon dalga boyu, $\sigma_e(\lambda_p, T)$ pik emisyon dalga boyundaki emisyon kesiti ve $\Delta\lambda_e(T)$ ölçülen emisyon spektrumlarının yarı maksimumdaki tam genişliğidir. İlgili en iyi uyum sonuçları Şekil 4.2-4'te siyah kesikli çizgilerle gösterilmiş ve her üç kristal için ilgili en iyi uyum parametreleri Çizelge 3-5'de verilmiştir. Ayrıca, daha kolay erişim için Çizelge 4.6, Cr:Colquiriite malzemeleri için

seçilen sıcaklıklarda E//c polarizasyonuna ait pik emisyon dalga boyu, pik emisyon kesiti ve emisyon yarı maksimumdaki tam genişliği için ölçülen değerleri tabloştırmaktadır.

Çizelge 4.6. Seçilen sıcaklıklarda Cr:Colquiriite'ler için ölçülen/hesaplanan pik emisyon dalga boyu, pik emisyon kesiti ve emisyon bant genişliğinin temsili değerleri. (Karşılaştırma için literatürden daha önceki raporlar da dahil edilmiştir)

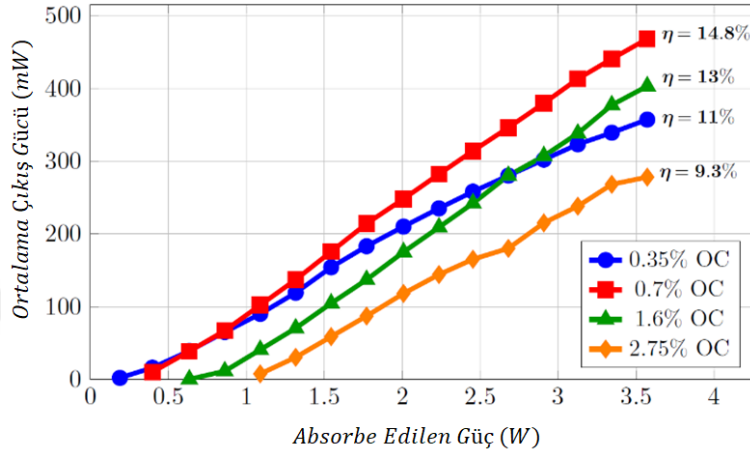
Materyal	Sıcaklık (K)	E//c'de $\lambda_p(T)$ (nm)	E//c'de $\sigma_e(\lambda_p, T)$ (10^{-20} cm^2)	Bant genişliği (nm)
Cr:LiCAF	100	744	1.56	102
	200	759	1.41	117
	300	772	1.29, 1.3 (Payne vd. 1990)	135
	400	786	1.23	155
Cr:LiSAF	100	807	5.93	144
	200	823	5.07	168
	300	855	4.48, 4.8 (Payne vd. 1989)	189
	385	875	4.43	206
Cr:LiSGaF	100	788	3.87	127
	200	806	3.41	152
	300	826	3.09, 3.3 (Smith vd. 1992)	169
	400	860	3.01	191

4.2. Pasif Q-anahtarlamalı Cr:LiCAF Lazeri

Önceki bölümlerde sunulmuş olan Cr:Colquiriite'lerde spektroskopik özelliklerin karakterizasyonunu takiben, bu bölümde Cr:LiCAF malzemesi ile lazer operasyonu deneyleri kapsamında gerçekleşen pasif Q-anahtarlı operasyonun özellikleri sunulmaktadır. İlgili deneylerde kullanılan kavite önceki bölümlerde Şekil 3.17'de verilmiştir. Sürekli dalga operasyonunda ilk olarak, her iki diyottan belirli bir pompalama gücünde uyarım ile lazer çıkışında 800 nm civarında maksimum güç elde etmek için lazer kristalinin konumu, pompa odaklama lensi ve kavite hizalaması gibi detaylar Şekil 3.17'de verildiği şekli ile optimize edilmiştir. Daha sonra %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75

çıkış kuplajları kullanılarak, her iki diyota da aynı giriş akımının uygulandığı durumda belirli güç aralıklarında lazer çıkış gücü ölçülerek sürekli dalga verim eğrisi çıkartılmıştır. Deneylerde her iki diyotun maksimum 2.3A akımı ile beslenmesi lazer kavitesi girişinde maksimum toplam 3.57 W pompa gücü mevcuttur.

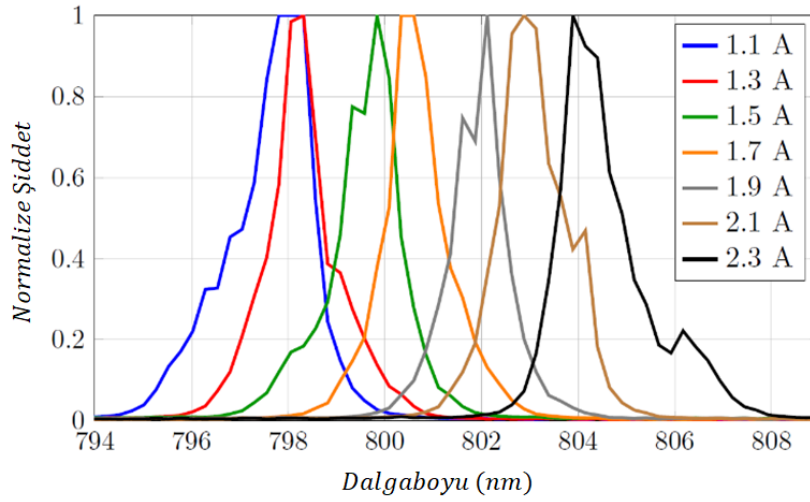
Şekil 4.5, sürekli-dalga rejiminde çalıştırılan Cr:LiCAF lazeri için farklı çıkış kuplajları ile ölçülmüş güç verimliliği eğrilerini göstermektedir.



Şekil 4.5. Sürekli dalga Cr:LiCAF lazerin %0.35-%2.75 aralığında iletme sahip dört farklı çıkış kuplörü ile alınan güç verimliliği verileri

Elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, maksimum eğim verimliliği %0.7 çıkış kuplajının kullanılması ile elde edilir ve bu durum için 3.5 W emilen pompa gücünde 468 mW'a varan çıkış gücü elde edilir. Emilen pompa gücüne göre karşılık gelen lazer eşiği ve eğim verimliliği ise sırasıyla 390 mW ve %14.8'dir. En düşük lazer eşiği (190 mW) ise beklentiler dahilinde %0.35 çıkış kuplajının kullanımı ile elde edilmiş ve lazer eşiğinin artan çıkış kuplajı seviyeleri için arttığı (%2.74 OC için 1090 mW'a kadar) görülmektedir. Mevcut çalışmanın farklı çıkış kuplajları ile ölçülen eğim verimlilikleri (maksimum %14.8), Cr:LiCAF lazeri için içsel ve önceki çalışmalarda rapor edilen (Ti:safir pompalama yoluyla elde edilmiş) ~%60'lık verimlilik değerinden önemli ölçüde daha düşük olduğu görülmektedir (Demirbas vd. 2009). Bu sonucun bir kısmı, çok-modlu pompa ışınına mod eşleştirmenin zorluğundan kaynaklanmaktadır. Ancak literatürde verilen eski çalışmalarda, benzer MMD diyot pompalı sistemlerde sırasıyla ~%0.3 pasif kayıplı %10 Cr-katkılı LiCAF örneği ve ~%0.1 pasif kayıplı %5 Cr-katkılı LiCAF örneklerinin kullanıldığı deneylerde %32 (Demirbas vd. 2009) ve %49 (Demirbas vd. 2015) sürekli-dalga eğim verimliliği rapor edilmiştir. Bu tez çalışmasında kullanılan nispeten yüksek Cr-katkılı (%7) LiCAF numunesinde daha önceki güç ölçeklendirme çalışmalarından kalma bir iç çatlak mevcut olup, bu fiziksel hasarın kullanılan Cr:LiCAF numunesinin pasif kayıplarını yaklaşık olarak %0.6'ya çıkardığı düşünülmektedir. Deneyler sırasında alternatif bir Cr:LiCAF numunesi erişilebilir durumda olmadığından bahsi edilen Cr:LiCAF kristali kullanılmıştır. Cr:LiCAF malzemesi ile pasif Q-anahtarlamalı operasyonun ilk olarak raporlandığı bu çalışmada Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerin potansiyelini anlamaya ve modellemeye odaklanıldığından, lazer çıkışındaki düşük eğim verimliliği takip eden kısımlarda sunulacak sonuçların karakteristiğini önemli ölçüde etkilemez (elde edilebilir ortalama güç seviyeleri hariç, daha düşük kayıplı

Cr:LiCAF örnekleri kullanılarak gelecekteki çalışmalarda çıkış gücü daha da ölçeklendirilebilir).

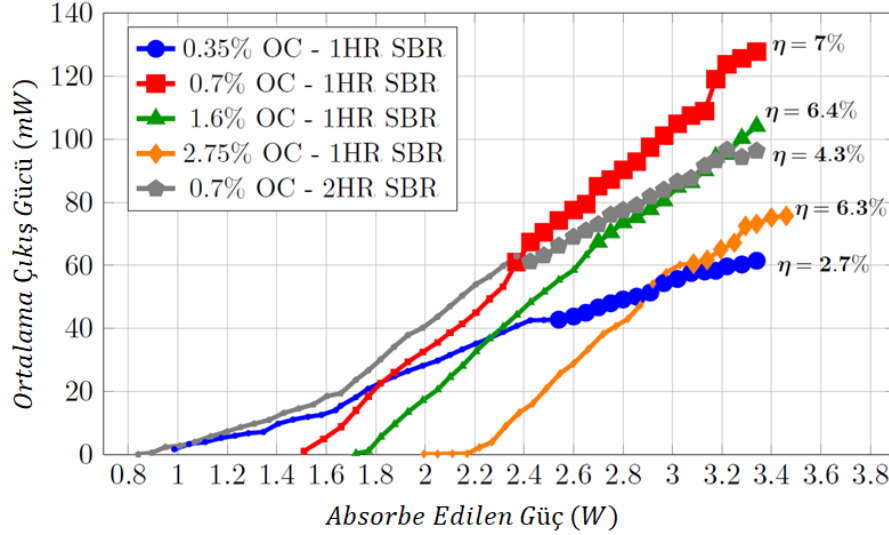


Şekil 4.6. Farklı diyot akımı veya pompa gücü seviyelerinde (1.1 A'de 0.85 W, 2.3 A'de 3.5 W) %0.7 çıkış kuplajı altında sürekli dalga lazerin ölçülen optik spektrumu

Şekil 4.6 sürekli dalga rejiminde (%0.7 çıkış kuplajı ile) çalışan Cr:LiCAF lazerinin pompa akımına göre değişen ve lazer çıkışında ölçülmüş operasyonel lazer dalgaboyunu göstermektedir. Burada görüldüğü üzere, sürekli-dalga Cr:LiCAF lazerin serbest çalışma altında optik spektrumu 800 nm civarında merkezlenmiştir ve ~1,8 nm yarı maksimumda tam genişliğe sahiptir. Pompa diyot akımı 1.1 A'den 2.3 A'e yükseltildiğinde (karşılık gelen emilen pompa güçleri 0.85 W'dan 3.5 W'a yükseldiğinde) lazer merkezi dalga boyunun 798 nm'den 804 nm'ye kaydığı görülmektedir. Gözlenen lazer dalga boyu kayması, kristalin artan sıcaklığı ile emisyon kazanç zirvesinin daha uzun dalga boylarına kaymasından kaynaklanmaktadır.

Şekil 3.17'de kesikli çizgilerle gösterilen kavite yapısının oluşturulması ile Q-anahtarlı lazer operasyonundan elde edilen sonuçların sunumuna, ölçülen çıkış gücünün emilen pompa gücü seviyesi ile değişimini gösteren Şekil 4.7 ile başlayalım. Burada sunulan veriler, (i) 1 katmanlı HR kaplı SESAM ve %0.35, %0.7, %1.6 ve %2.75 iletimli çıkış kuplörleri ve (ii) %0.7 iletimli çıkış kuplörü ile 2 katmanlı HR kaplı SESAM kullanılarak alınmıştır. Şekil 4.7'yi daha önce Şekil 4.5'te verilen sürekli dalga lazer performansı ile karşılaştırdığımızda, Q-anahtarlı deneylerde elde edilebilir lazer eğim verimlerinin önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. Örnek olarak her iki durumda da %0.7 iletimle sahip çıkış kuplörünün kullanıldığı sonuçları kıyaslayacak olursak, sürekli dalga rejiminde gözlemlenen %14.8 eğim verimine kıyasla, SBR'dan kaynaklanan ek kayıplar nedeniyle Q-anahtarlı rejimde en yüksek eğim verimi %7 olarak ölçülmüştür. Q-anahtarlı rejimde kararlı operasyonu sağlamak ve mod-kilitleme rejimine kaymayı önlemek için SBR üzerinde çok yoğun bir odaklanma kullanılmaz ve sonuç olarak, kavite kayıplarındaki artış sadece SBR'ın doyurulamayan kayıplarını değil, aynı zamanda doyurulabilir kayıpların da bir kısmını içerir. Şekil 4.7'den, bir katmanlı HR kaplı SESAM ile en yüksek ortalama güç %0.7 çıkış kuplörü kullanılarak elde edilmiş ve yaklaşık 3.4 W emilen pompa gücü seviyesinde yaklaşık 125 mW ortalama çıkış gücü elde edilmiştir. Bir ve iki katmanlı HR kaplı SESAM'larla elde edilen sonuçlar

karşılaştırıldığında (her ikisi de %0.7 OC ile alınmıştır), beklentiler dahilinde 2HR-SESAM ile daha düşük bir lazer eşiği elde edilmiştir (daha düşük toplam kayıplar nedeniyle). Öte yandan, elde edilen maksimum ortalama güç, muhtemelen 2 HR kaplamanın arkasına gizlenmiş emicinin doyurulmasındaki ek zorluk nedeniyle 100 mW olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.7. SESAM ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin ölçülen güç verimliliği verileri

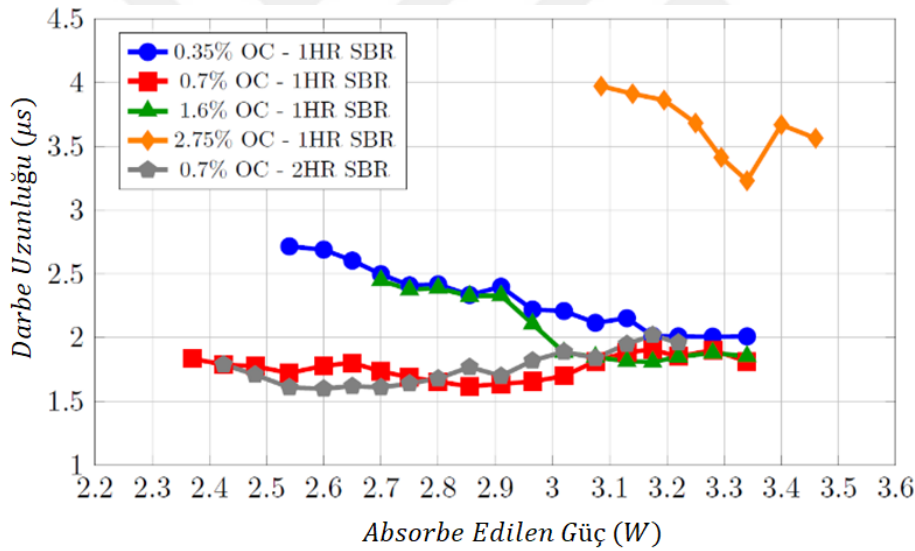
Q-anahtarlama deneyleri sırasında, sürekli-dalga rejimi ilk olarak düşük pompa gücü seviyelerinde gözlemlenmiş (Şekil 4.7'de küçük işaretlerle gösterilmiştir) ve kararlı Q-anahtarlama operasyonu (Şekil 4.7'de daha büyük işaretlerle gösterilmiştir) emilen pompa gücü belirli bir değere ulaştıktan sonra başlamıştır (her çıkış kuplörü için farklı bir seviyede gerçekleşir). Bu gözlem, lazerin kararlı bir Q-anahtarlama işlemine ulaşması için belirli bir kavite içi güç seviyesinin gerekliliğine işaret etmektedir. Bu davranışın yorumu, denklem 4.8 ile verilen Q-anahtarlama koşuluna dayanarak yapılabilir (Keller vd. 1996),

$$Q - \text{anahtarlama: } \left| \frac{dR}{dI} \right| I > r \frac{T_R}{\tau_f} \quad (4.8)$$

Burada r , pompa gücünün eşik pompa gücüne oranı olan ve kazanç ortamının lazerin eşik gücünün kaç kat üzerinde pompalandığını açıklayan pompa parametresi, T_R kavite gidiş-dönüş süresi, τ_f lazer malzemesinin üst durum ömrü, I soğurucu üzerine gelen lazer yoğunluğu, dR/dI ise SESAM yansıtıcılığının yoğunlukla değişimini temsil etmektedir. Eşitlik 4.8'in sol tarafı, kavite içi lazer yoğunluğu ile artan SBR'ın doygunluğu nedeniyle kavite gidiş-dönüşü başına gerçekleşen kaybın azalmasını açıklar. Lazer yoğunluğundaki bu artışı telafi etmek için, kazancın dengeye ulaşacak kadar hızlı doyması gerekir (Eşitlik 4.8'in sağ tarafı). Kazanç bu değişime yetişemez ise, Q-anahtarlı bir darbe gelişecektir. Eşitlik 4.8'den Q-anahtarlama eğiliminin kazanç ortamının üst durum ömrünün artmasıyla arttığı ve Cr:Colquiriite kazanç ortamları arasında oda sıcaklığında en uzun floresan ömrüne ($\tau_f = 175 \mu s$) sahip Cr:LiCAF'ın Q-anahtarlama uygulamaları için ideal bir aday olduğu açıktır. Ayrıca, daha kısa gidiş-dönüş sürelerine (T_R) sahip daha kısa

kavitelere sahip lazerlerin de Q-anahtarlama için daha yüksek bir eğilime sahip olduğunu vurgulamak gerekir. Son olarak, daha büyük bir dR/dI eğimi, yansıtıcılığın yoğunlukla daha büyük bir değişimi (daha küçük bir doygunluk akısı) anlamına gelirken, Q-anahtarlama eğilimini ve Q-anahtarlı darbe oluşturma süresini de artırır (Keller vd. 1996).

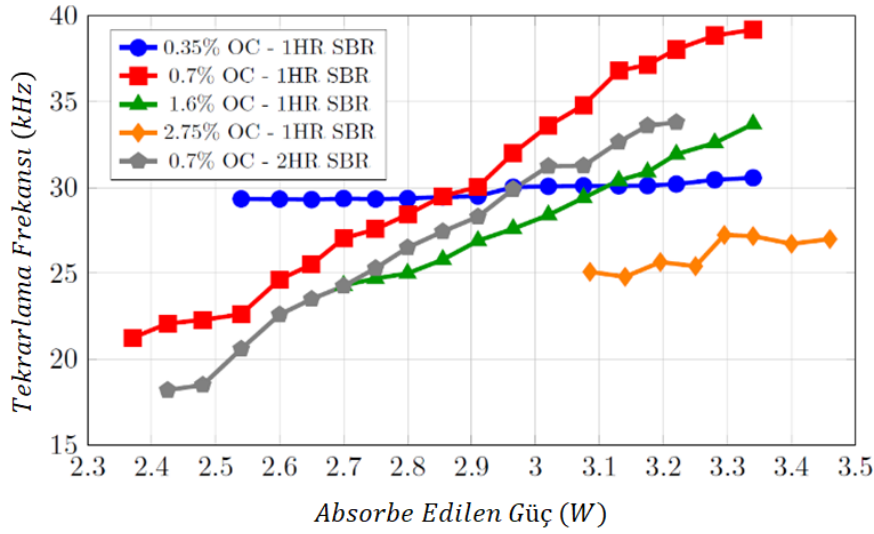
Eşitlik 4.8'den, artan pompa gücü ile kavite içi lazer yoğunluğunun ve r 'nin artacağını, buna karşın dR/dI 'nin SBR doygunluğu nedeniyle azalacağını ve τ_f 'in de artan inversiyon ve kristal sıcaklığı nedeniyle potansiyel olarak biraz azalacağını öngörülebilmektedir. Genel pratik olarak, kavite içi yoğunluğun artışı baskın bir etki olarak rol oynarken pompa güçleri yavaşça arttıkça, bir noktada lazerin Q-anahtarlı rejime geçeceği söylenebilir (sistemin diğer tüm özelliklerine de bağlıdır). Bu davranışı Şekil 4.7'de gösterilen deneysel verilerimizde açıkça görmekteyiz. Lazer görece düşük pompa güçlerinde ilk olarak tüm çıkış kuplörleriyle saf sürekli-dalga rejiminde çalışır ve bu da yoğunluk dalgalanmalarının kolayca dengelenebileceğini gösterir. Pompa güçleri ve dolayısıyla kavite içi lazer güçleri arttıkça, tüm durumlarda kararlı Q-anahtarlama operasyonuna ulaşılır. Ayrıca, Q-anahtarlama için gerekli pompa gücü seviyesinin de artan çıkış kuplajı ile arttığı gözlemlenmektedir. Bu oldukça beklenen bir sonuçtur, çünkü kavite içi lazer güçleri artan çıkış kuplör iletimi ile azalır ve Q-anahtarlama noktasına ulaşmak için daha büyük lazer çıkış güçleri (veya pompa güçleri) gerekir.



Şekil 4.8. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin darbe genişliğinin emilen pompa gücü miktarına göre değişimi. Veriler %0.35-2.75 aralığında farklı çıkış kuplörleri kullanılarak alınmıştır

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışında ölçülen darbe uzunluğu ve tekrarlama frekansının emilen pompa gücü ile ölçülen değişimi gösterilmektedir. Veriler çeşitli iletim değerlerine sahip çıkış kuplörleri ile alınmıştır. Ölçümler sırasında, zamansal dalga biçimi, tekrarlama frekansının değerlerinin kolayca elde edilebildiği bir dijital osiloskopta kaydedilmiştir (örn. bkz. Şekil 4.10). Q-anahtarlama operasyonunun kararlılığını doğrulamak için lazerin çıkışı da eş zamanlı olarak bir RF spektrum analizörü kullanılarak izlenmiştir. RF spektrumlarının geniş ve dar spektrum aralıklarında ölçüldüğü örnek ölçümler Şekil 4.11 ve Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.11'de verilen spektrum 4 MHz'lik bir aralıkta ve 100 Hz'lik

çözünürlük bant genişliği ile temel bantta ortalanmıştır (daha iyi görünürlük için yalnızca pozitif frekanslar gösterilmiştir). Şekil 4.12’de verilen ölçülmüş spektrum ise 20 kHz’lik bir genişlikte 10 Hz’lik çözünürlük bant genişliğine sahiptir. Her iki grafikte sunulan veriler, Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkış gücü 58 mW iken, 3.13 W emilen güçte 1-katman HR kaplı SESAM ile %0.35 OC kullanılarak (atma genişliği ve tekrarlama frekansı sırasıyla 2.15 μ s ve 31.8 kHz idi) alınmıştır. Şekil 4.12’de verilen ve atma tekrarlama frekans merkezli olacak şekilde ölçülmüş radyo frekans spektrumu incelendiğinde, Q-anahtarlı atımların tekrarlama frekansında (bu örnek durum için yaklaşık ~31.8 kHz) stabil operasyonun işareti olan ve yan lob içermeyen temiz bir tepe görülmektedir.

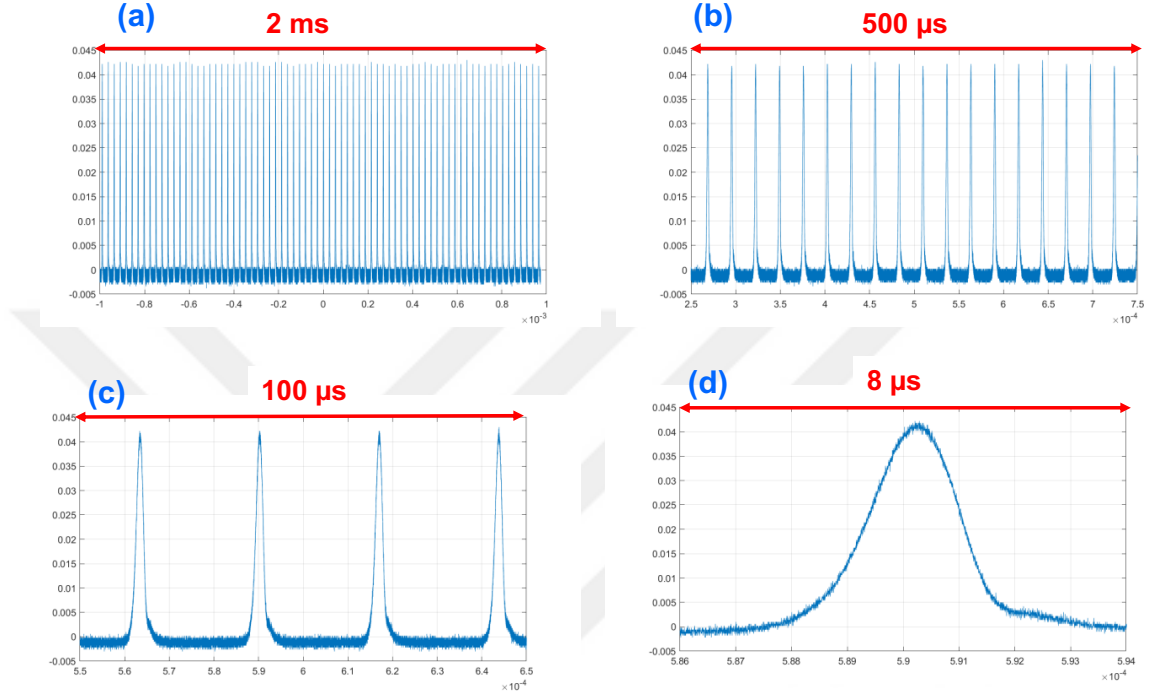


Şekil 4.9. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin tekrarlama frekansının emilen pompa gücü miktarına göre değişimi. Veriler %0.35-2.75 aralığında farklı çıkış kuplörleri kullanılarak alınmıştır

Q-anahtarlama verilerinin izolasyon önlemleri içermeyen açık bir lazer kurulumunda alındığını ve Şekil 4.12’de RF spektrum ölçümünde görülen RF pikinin lazer kavitesinin koruyucu kapaklarla kapatılması ve sisteme daha iyi bir sıcaklık stabilizasyonunun uygulanmasıyla daha da daraltılabileceği açıktır. Ayrıca, ölçülen osiloskop üzerinde okunarak kaydedilen lazer darbe genişliklerinin daha doğru bir şekilde belirlenmesi için, iki boyutlu darbe dizisi verileri, darbelerin düşük ve yüksek durum seviyeleri arasındaki orta geçişler arasındaki farkın hesaplandığı ve durum seviyelerinin bir histogram yöntemiyle belirlendiği bir algoritmaya tabi tutulur. Şekil 4.8’de bildirilen atma genişliği değerleri, her bir durumda lazer çıkışında ölçülen birden fazla darbenin ortalama darbe genişliği değerleridir (2 ms’lik bir pencereye sığan tüm darbelerin ortalama darbe genişliği olmakla birlikte tekrarlama oranına bağlı olarak ~40-80 atmanın ortalamasına karşılık gelir).

Bu kısma kadar verilen grafiklerde görülen sonuç ve davranışların yorumlanmasına ölçülen darbe genişlikleriyle başlayacak olursak, Şekil 4.8’den, %0.7 çıkış kuplajı ile ölçülen darbe genişliklerinin 1.75 μ s civarında kaldığını, bir miktar salınım gösterdiğini ($\pm 0.25 \mu$ s), ancak emilen pompa gücü seviyesinin değişmesiyle net bir artış/azalış eğilimi göstermediği görülmektedir (iki farklı SESAM için de bu çıkarım

geçerlidir). Diğer taraftan %0.35 ve %1.6 çıkış kuplajlarının kullanımı için, artan emilim güçlerine göre ölçülen darbe genişliklerinde yaklaşık 2.5-2.75 μ s'den 1.85-2 μ s seviyesine yavaş bir düşüş görülmektedir. Son olarak, %2.75 çıkış kuplajı için gösterilen veriler diğerlerinden farklı olarak 3.65 μ s civarında ölçülen darbe genişliklerine sahiptir (bu çıkış kuplajı için darbe genişliklerinde 4 μ s'den 3.5 μ s seviyesine hafif bir düşüş de gözlemlenir).



Şekil 4.10. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin farklı zaman ölçeklerinde ölçülen zaman dinamikleri: **a)** 2 ms; **b)** 500 μ s; **c)** 100 μ s; **d)** 8 μ s (Veriler, lazer çıkış gücü 109 mW iken, 3.13 W emilen güçte 1 katman HR kaplı SBR ile %0.7 OC kullanılarak alınmıştır. Atma genişliği ve tekrarlama frekansı sırasıyla 1.82 μ s ve 36.8 kHz'dir)

Şekil 4.9'a bakıldığında, tüm durumlar için Cr:LiCAF lazerin ölçülen Q-anahtarlı tekrarlama oranının emilen pompa gücü miktarıyla neredeyse doğrusal olarak arttığı görülmektedir. Ancak, gözlemlenen eğimin (emilen pompa gücünün değişimiyle tekrarlama hızının artış oranı) farklı çıkış kuplajlarında oldukça farklı olduğuna dikkat etmek gerekir. Örnek olarak, %0.7 çıkış kuplajı için, emilen pompa gücü 2.4 W'tan 3.35 W'a çıkarıldığında tekrarlama frekansının yaklaşık 21.2 kHz'den 39.2 kHz'e kadar değiştiği görülmektedir. Öte yandan, %0.35 çıkış kuplajı için, benzer bir pompa gücü değişikliği için tekrarlama frekansı yalnızca 29.3 kHz'den 30.6 kHz'e yükselmektedir. Bu noktada Q-anahtarlı tekrarlama hızı ve darbe genişliğinde gözlemlenen eğilimleri anlamaya çalışmak eğiticiidir. Tamamen doymuş bir SBR için, SBR Q-anahtarlı lazerin çıkışında beklenen darbe genişliği kabaca Eşitlik (4.9) kullanılarak tahmin edilebilir.

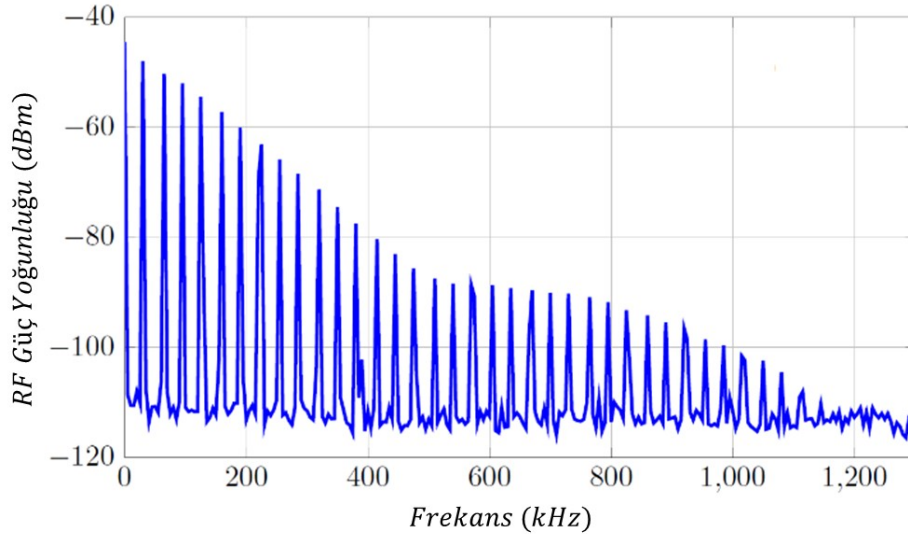
$$\tau_p = \frac{2 \ln(2) T_R}{q_0} \quad (4.9)$$

Burada q_0 emicinin doyurulabilir kayıp katsayısıdır (modülasyon derinliği olarak da

bilinir) (Spühler vd. 2001). Eşitlik (4.9)'da verilen formalizm, Q-anahtarlı darbenin büyüme hızı (atma başlangıcı ve tepesi arasında) ve düşüş hızının (atma tepesi ve sonu arasında) her ikisinin de q_0/T_R olduğunu varsayar. Kazancın doyurulması sırasında (yükselme ve düşme süreleri sırasında) darbenin büyümesi ve düşüşündeki azalma dikkate alındığında, Eşitlik 4.9 ile ~ 2.5 faktörü çarpılarak atma genişliği için Eşitlik (4.10)'da verilen daha tutarlı bir yaklaşım elde edilebilir (Spühler vd. 2001; Zayhowski ve Kelley 1991):

$$\tau_p = \frac{3.52 T_R}{q_0} \quad (4.10)$$

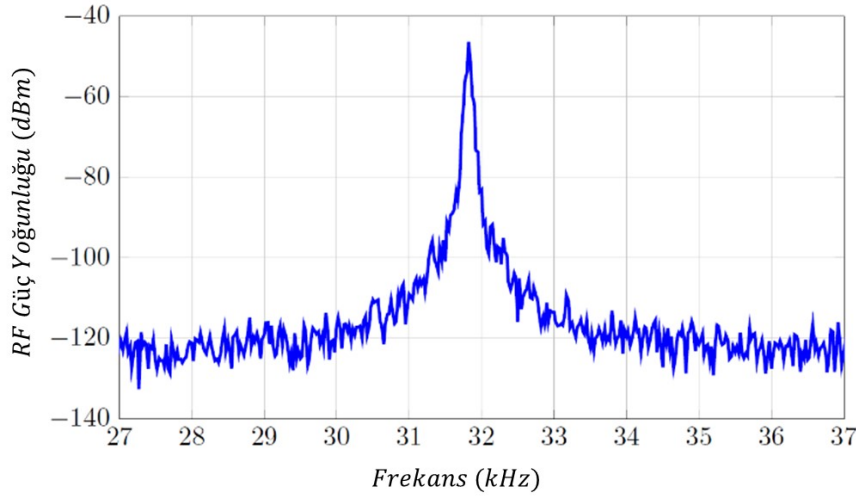
Burada raporlanan deneysel sonuçlarda, Şekil 3.17'de gösterilen deneysel kurulum için, yaklaşık 3 ns'lik bir gidiş-dönüş kavite zamanı (T_R) ve 1-çift HR kaplı SESAM için %1.4 değerinde modülasyon derinliği ($q_0 = \Delta R$) tanımlanır. İlgili büyüklükler Eşitlik 4.10'da yerine konulduğunda lazer çıkışında elde edilmesi beklenen Q-anahtarlı darbelerin genişliği $\tau_p = 0.7 \mu s$ olarak hesaplanır. 2-çift HR kaplı SEAM için yaklaşık %0.5 modülasyon derinliği kullanılarak pasif Q-anahtarlı lazer çıkışında yaklaşık $\tau_p = 2.1 \mu s$ genişliğinde atmalar hesaplanır. Ancak 1 HR SESAM ile yapılan deneyler sonucunda elde edilen ve genişlikleri deneysel olarak ölçülmüş atmaların Eşitlik (4.10) kullanılarak yapılan atma genişliği tahmininden yaklaşık 2-3 kat daha uzun olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumun potansiyel sebebi olarak



Şekil 4.11. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışında elde edilen darbe dizisinin geniş frekans aralığında ölçülen örnek radyo frekansı spektrumu

Eşitlik 4.10 kullanılırken yapılan tam SESAM doyurulma varsayımından kaynaklandığı düşünülmektedir; çünkü gerçekleştirilen deneylerde, mod kilitlenmesini önlemek için SESAM üzerinde çok küçük bir odak kullanılmamıştır (bu nedenle SBR'ların tamamen doyurulmadığı beklenir). Dahası, deneysel verilere biraz daha yakından bakarsak, Eşitlik (4.10)'dan beklendiği gibi, deneylerde %0.7 çıkış kuplajı için verilmiş olan darbe genişliği verileri emilen pompa gücü seviyesi ile değişim göstermez. Öte yandan, %0.35, %1.6 ve %2.75 çıkış kuplajları için pompa gücüyle birlikte darbe genişliğinde gözlenen

yavaş düşüş, SESAM'ın artan doygunluk seviyesinin bir göstergesidir.



Şekil 4.12. Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışında elde edilen darbe dizisinin 31.8 kHz tekrarlama frekansı civarında ölçülmüş örnek radyo frekansı spektrumu

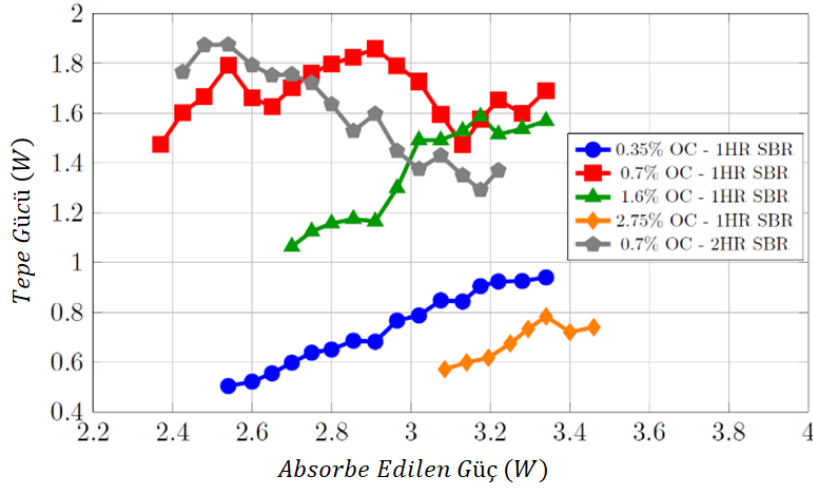
Pasif Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerinin çıkışında elde edilen darbelerin tekrarlama oranıyla ilgili olarak, tekrarlama oranının lazerin üst durum ömrü τ_f 'den çok daha büyük olması (yani $f_{rep} \geq 2/\tau_f$) koşuluyla, tekrarlama frekansının hesaplanması için teorik bir yaklaşım Eşitlik (4.11)'de verildiği şekli ile formüle edilebilir (Braun vd. 1997):

$$f_{rep} \cong \frac{g_0}{2\Delta R\tau_f} \quad (4.11)$$

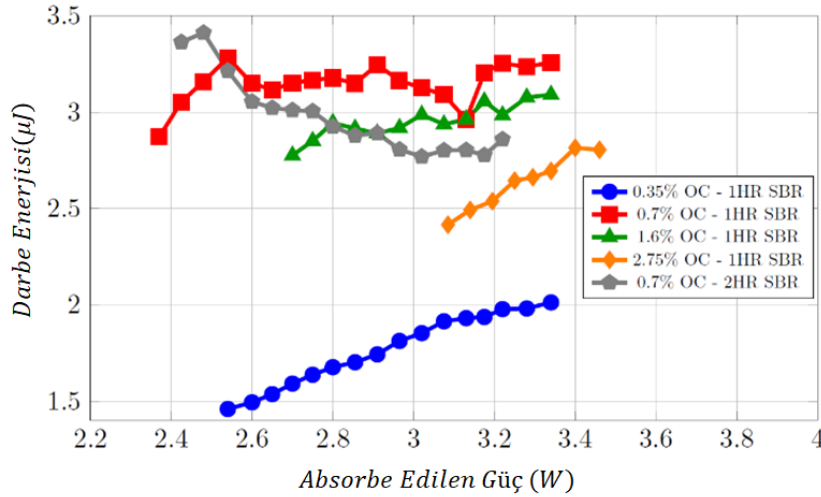
Eşitlik (4.11)'de $g_0 = rL$ küçük sinyal kazanç katsayısıdır; burada r pompa parametresidir (Eşitlik 4.8'de tanımlananla aynıdır) ve L , SBR'nin doyurulabilir ve doyurulamaz kayıpları, lazer kristali ve kavite optiklerinin kayıpları ve çıkış kuplajının etkin kaybı dahil olmak üzere kavitenin toplam gidiş-dönüş kaybıdır. Dört seviyeli bir lazer sistemi için g_0 pompa gücüyle yaklaşık doğrusal olarak değiştiğinden, emilen pompa gücünün artan seviyeleri için tekrarlama frekansında doğrusal bir artış beklenir. Buradan çıkarımla, Şekil 4.9'da verilen ve deneysel olarak ölçülmüş tekrarlama frekansına ait genel değişim karakteristiğinin teorik beklentilerle uyumlu olduğu söylenir. Bununla birlikte, daha önce de belirtildiği gibi, emilen pompa gücünün değişmesiyle tekrarlama hızının artış oranı her kuplajı için oldukça farklıdır ve özellikle %0.35 ve %2.75 çıkış kuplörleri için nispeten düşüktür. Bu davranışın sebebi olarak, ilgili çıkış kuplajı değerleri için elde edilen deneysel lazer verimlerinin oldukça düşük olmasından (Şekil 4.7) dolayı lazer sisteminin tam doymuş soğurucu yaklaşımından daha uzakta çalıştığı gösterilebilir. Bu durumda Eşitlik (4.11)'de kabul edilen tam doymuş soğurucu koşulu sağlanmamış ve analitik tanım ile deneysel davranış arasında farklılıklar oluşmuş olur.

Deneylerde %0.75 iletme sahip çıkış kuplajının kullanıldığı durumu detaylı bir biçimde inceleyecek olursak, 1 çift HR kaplı SBR kullanarak, yaklaşık 1.5 W' değerinde lazer eşiği ölçülmüş ve emilen pompa gücünün toplam 2.4 W – 3.35 W aralığında olduğu

durumlar için kararlı Q-anahtarlama operasyonu elde edilmiştir. Dolayısıyla ilgili pompa gücü aralığı, r parametresi cinsinden 1.6-2.23 aralığına karşılık gelir. Tekrarlama hızı verilerine bakıldığında, tekrarlama hızında 21.2 kHz'den 39.2 kHz'e bir artış gözlenmektedir. Buradaki frekans değişimi için, tekrarlama hızında ölçülen ~ 1.85 (39.2/21.2) artış oranının, hesaplanan r değerinden ~ 1.4 ($\sim 2.23/1.6$) oldukça farklı olduğu görülmektedir. Buradan çıkarımla Eşitlik (4.11)'in, muhtemelen türetilmesinde kullanılan basitleştirici varsayımlar nedeniyle, pratik deney sonuçlarında gözlemlenen eğilimi yalnızca kabaca tahmin ettiğini göstermektedir.



Şekil 4.13. Q-anahtarlı (1HR SESAM ile) Cr:LiCAF lazerinde dört farklı çıkış kuplajı için ölçülen tepe gücü (2HR SESAM'ın %0.68 çıkış kuplajı ile kullanıldığı ek bir durum dahil edilmiştir)



Şekil 4.14. Q-anahtarlı (1HR SBR ile) Cr:LiCAF lazerinde dört farklı çıkış kuplajı için ölçülen atma enerjisi (2HR SBR'ın %0.68 çıkış kuplajı ile kullanıldığı ek bir durum dahil edilmiştir)

Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer davranışının detaylandırılmasında, ölçülen ortalama çıkış gücü (Şekil 4.7), darbe genişliği (Şekil 4.8) ve tekrarlama oranı (Şekil 4.9) verilerine

dayalı olarak hesaplanan Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerin karşılık gelen tepe güçleri (Şekil 4.13) ve atma enerjileri (Şekil 4.14) ilgili şekillerde gösterilmektedir. Her iki grafikte de soğurulan pompa gücü seviyesiyle değişim açısından hesaplanan verilerde bir miktar dalgalanma olduğu görülmektedir. Darbe enerjisi açısından, %0.7 ve %1.6 çıkış kuplörlerinin kullanımı durumunda enerjinin pompa gücüne göre önemli bir göstermediği gözlemlenmektedir. Öte yandan, %0.35 ve %2.75 çıkış kuplörleri kullanılarak alınan verilerde darbe enerjisinde yavaş bir artış gözlemlenir. Ek olarak, 0.7% iletme sahip çıkış kuplörü için ~1.9 W'a varan tepe güçlerinin elde edildiğini, dolayısıyla lazerin tepe gücünün sürekli-dalga çıkışına kıyasla yaklaşık 4 kata kadar ölçeklendiğini de not edelim. Özetle, hesaplanan darbe enerjileri incelendiğinde, %0.35 çıkış kuplajındaki darbe enerjilerinin ~1.5-2 μJ aralığında sınırlı olduğu durum hariç, çoğu durum için 3 μJ civarındadır.

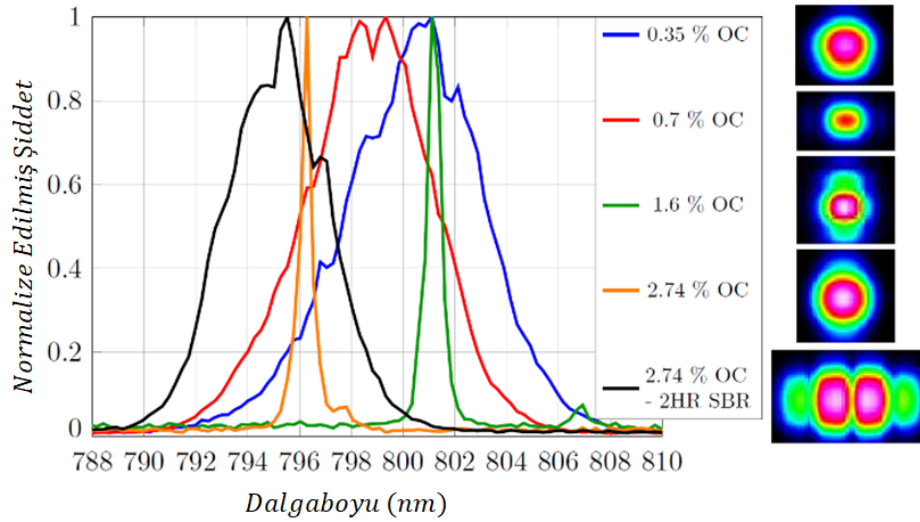
Ölçülen verileri teorik tahminlerle dahilinde değerlendirmek yine faydalı olacaktır. Yarı iletken doyurulabilir soğurucular kullanan pasif Q-anahtarlı bir lazerde atım enerjisi hesaplanması için atımın evrimi sırasında kazancın azalmasına dayanan Eşitlik (4.12)'de verilen denklem kullanılabilir (Spühler vd. 2001).

$$E_p = E_l(2q_0) \frac{T_{oc}}{T_{oc} + L} \quad (4.12)$$

Burada T_{oc} çıkış kuplör iletimi, L yine toplam gidiş-dönüş kavite kaybını ve E_l kazanç ortamının doyma enerjisini temsil etmektedir. Burada E_l ile verilen doyma enerjisi açık hali ile Eşitlik (4.13)'de tanımlanmıştır.

$$E_l = \frac{h\nu_l}{2\sigma_{em}} A \quad (4.13)$$

Eşitlik (4.13)'de, $h\nu_l$ çarpımı lazer foton enerjisini, A lazer mod alanını, σ_{em} ise emisyon kesit alanını temsil etmektedir. Eşitlik (4.12)'e göre, sabit bir lazer mod alanının varlığı varsayıldığında, darbe enerjisinin kaviteye uygulanan pompa gücünden bağımsız olması beklenir (sabit lazer mod alanı varsayımı, pompa lazer ışını profilinin diyot akımıyla değişmesi nedeniyle burada raporlanan deneylerdeki durum için tam olarak geçerli olmayabilir). Önceki kısımda tartışıldığı gibi, alınan verilerin bazıları bu beklentiye uyarken, bazılarında bazı dalgalanmalar görülmektedir, bu da yine tam olarak doymun olmayan SESAM çalışma rejiminin bir göstergesi olabilir veya diğer lazer parametrelerindeki istenmeyen değişikliklerden kaynaklanabilir. DeneySEL bulguların Eşitlik (4.12) ile daha doğrudan karşılaştırılması için, darbe enerjisinin teorik tahmini 1-çift HR kaplı SBR ($\Delta R = 1.4\%$) ve %0.7 çıkış kuplajı içeren kurulum için yapılmıştır. Burada E_p 'nin $\sigma_{em} = 1.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$, $A = \pi 56 \times 42 \mu\text{m}^2$ ve $L \sim 2\%$ parametreleri ile hesaplanan değeri yaklaşık 5.5 μJ 'dür. Bu, deneySEL olarak ölçülenin darbe enerjisinin 1.5-2 kat üzerindedir ve yine bu durumun çoğunlukla Eşitlik (4.13) türetilirken yapılan tam SBR doymunluğu varsayımından kaynaklanabileceği düşünülmektedir.



Şekil 4.15. Q-Anahtarlı Cr:LiCAF lazerin 1-HR kaplı ve 2 HR kaplı 800 nm SESAM ile farklı çıkış kuplaj seviyelerinde alınan optik spektrumu. (İçteki resim her bir durum için ölçülen ışın profilini göstermektedir)

Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazer çıkışının karakterize edilmesi dahilinde alınan ölçümlerde kaydedilen örnek optik spektrumlar Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Ek olarak, çıkış ışını profili verileri de her bir çıkış kuplörü için bir ek resim olarak (grafiğin sağ tarafında yer alır) gösterilmiştir. Optik spektrumlara bakıldığında, sürekli-dalga operasyonu ile (spektral genişlik ~ 1.8 nm) karşılaştırıldığında, Q-anahtarlı durumda zayıf spektral genişleme (%0.36 ve %0.68 çıkış kuplajı için ~ 4 nm'ye kadar) ve daralma (%1.6 ve %2.74 çıkış kuplajı için ~ 1 nm'ye kadar) gözlemlenebildiği görülmektedir. Dolayısıyla, Q-anahtarlı darbelerin optik spektrumunun, toplam net kazancın azalması nedeniyle, artan çıkış kuplajı ile daraldığı sonucuna varılabilir. Işın profiline baktığımızda ise çoğunlukla TEM00 çıkışı elde edildiği görülmektedir. Çok-modlu pompa ile uyartıma rağmen gözlemlenen bu durumun sebebi olarak, yüksek dereceli modların lazer operasyonunun sistemin nispeten yüksek kayıpları tarafından engellenmesi gösterilebilir. Bir istisna olarak, 2-HR katmanı kaplamalı SESAM ile elde edilen lazer çıkışı, muhtemelen bu SESAM için ortaya çıkan daha düşük genel kayıpları nedeniyle çok modludur.

Tez çalışmasının bu alt bölümünde elde edilen sonuçlar özetlenecek olursa, Cr:LiCAF lazeri, 665 nm civarında toplam 3.6 W pompa gücü sağlayan iki düşük maliyetli çoklu-modlu lazer diyotu ile pompalanmıştır. Sürekli-dalga deneylerinde, 800 nm civarında 470 mW'a kadar (%15 verimlilikle) bir çıkış gücü seviyesi elde edilmiştir. Pasif Q-anahtarlamalı operasyon için, farklı modülasyon derinliklerine sahip iki farklı AlGaAs tabanlı SBR kullanılmış ve ilgili q-anahtarlı çıkış performansı farklı çıkış kuplajı seviyeleri için detaylı biçimde araştırılmıştır. Q-anahtarlı çalışmada lazer, ortalama 127 mW güçle 800 nm yakınında $1.62 \mu s$ uzunluğunda atımlar üretmiştir. Farklı pompa güçlerinde ölçülen durumlarda tekrarlama frekansı 18-40 kHz arasında değişirken, 3.5 μJ 'ye varan darbe enerjileri ve 800 nm civarında 1.9 W'a kadar tepe güçlerin elde edilmiştir.

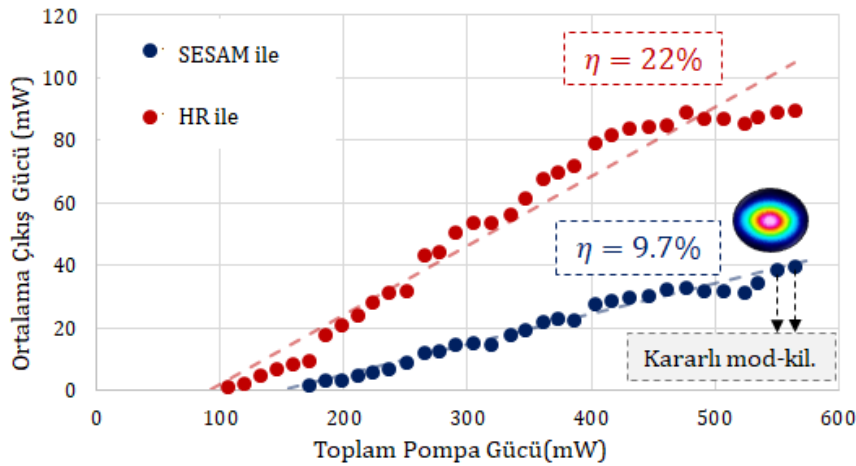
4.3. Diyot Pompalı Yb:YLF ve Yb:LLF Lazer Sistemlerinin Performans Analizi

Tez çalışması dahilinde yapılan çalışmalar kapsamında tek-modlu ve çok-modlu diyotlar ile pompalanmış Yb:YLF ve Yb:LLF lazer sistemlerinin çeşitli rejimlerde operasyonu ve ilgili karakterizasyonlarının ölçülmesi üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk olarak 960 nm çevresinde ışıma yapan tek-modlu diyotlar ile uyarılmış bir Yb:YLF lazer sisteminde SESAM elemanı kullanarak mod-kilitli operasyonun gerçekleştirilmesi ve tekrarlama frekansının GHz mertebesine ölçeklenmesine yönelik tasarımlar ve pratik kurulumlar gösterilmiştir. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar takip eden 4.3.1 numaralı alt bölüm içerisinde detaylı bir biçimde sunulmuştur.

Yb:LLF kazanç ortamı ile gerçekleştirilen çalışmalarda ise öncelikle 10 W seviyesinde çıkış gücüne sahip çoklu-mod diyot pompalı ilgili sistemler ile sürekli-dalga rejiminde güç ölçekleme ve dalgaboyu ayarlama karakteristikleri ortaya çıkarılmıştır. Daha sonra SESAM elemanlarının kullanıldığı pasif Q-anahtarlamalı rejimde çalışan Yb:LLF lazer sistemlerinde Watt seviyesinde ortalama çıkış gücüne sahip femtosaniye darbelerin elde edilmesi takip eden ilgili alt bölümlerde raporlanmıştır. Ayrıca, tekli-mod diyotlarla pompalanan düşük maliyetli Yb:LLF lazer sistemlerinin sürekli-dalga ve mod-kilitli rejimleri incelenmiş ve takip eden ilgili alt bölümlerde sunulmuştur.

4.3.1. Gigahertz tekrarlama frekanslı femtosaniye Yb:YLF lazerinin karakterizasyonu

Deneysel kurulum şematiği önceki bölümlerde Şekil 3.25a'da ile gösterilmiş ve pompalama özellikleri tanımlanmış olan SESAM mod-kilitli Yb:YLF lazerinin çıkışında ölçülen güç karakteristiği Şekil 4.16'da gösterilmiştir. Verilen grafikte SESAM ile pasif mod-kilitli operasyon için (mavi işaretçiler ile gösterilmiş) ve SESAM'ın geniş bantlı, düz bir yüksek yansıtıcı ayna ile yer değiştirildiği sürekli-dalga (kırmızı işaretçiler ile gösterilmiş) operasyonu için lazer çıkışında ölçülen ortalama gücün pompa gücüne bağlı değişimi gösterilmektedir.



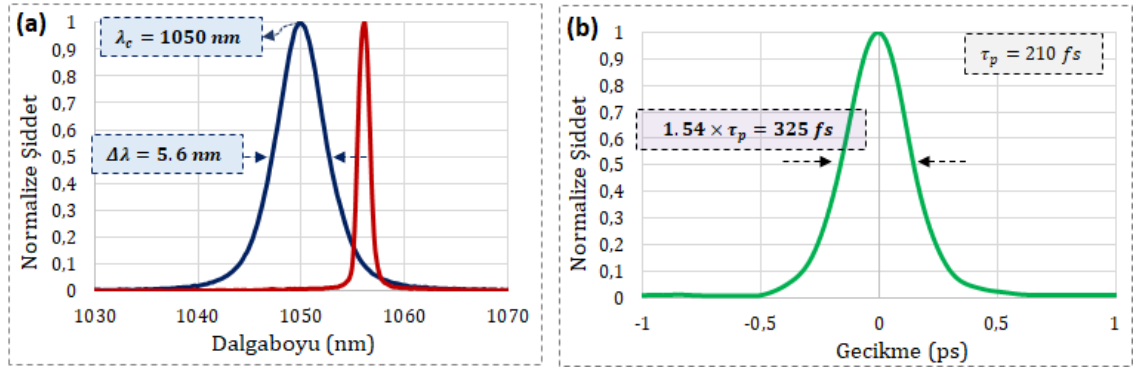
Şekil 4.16. Sürekli dalga ve SESAM ile pasif pasif kilitli çalışma durumlarında Yb:YLF lazerinden %0.5 çıkış kuplajı ile ölçülmüş lazer verimliliği eğrileri

Şekil 4.16'da verilen grafik oluşturulurken pompa gücü olarak, 60 mm akromatik çift

lensten hemen önce ölçülen pompa gücü baz alınır ve sürekli-dalga operasyonda (HR ile) %22, pasif mod-kilitli (SESAM ile) durumda ise %9.7 eğim verimi ölçülür. Sürekli-dalga çalışma rejiminde, %0.5 iletme sahip çıkış kuplörü ile yaklaşık 100 mW değerinde bir sürekli dalga lazer eşik gücü ölçülür. Bu rejimde, 565 mW'lık toplam gelen pompa gücü için yaklaşık %22'lik bir eğim verimliliği ile 90 mW civarında ortalama sürekli-dalga çıkış gücü elde edilmiştir. Şekil 4.16'da verilen çizimlerde görülen ve ~450 mW'ı aşan pompa güçleri için çıkış gücünün artış hızında görülen düşüş, diyot emisyon spektrumunun Yb:YLF kristalinin soğurma zirvesinden daha uzun dalgaboylarına kaymasından kaynaklanır. SESAM kullanılan kavite konfigürasyonu için 170 mW değerinde bir lazer eşiği ölçülür. Sürekli-dalga operasyonuna kıyasla SESAM elemanının kullanıldığı lazer sisteminde ölçülen daha yüksek lazer eşik gücü, SESAM tarafından yükseltilecek kavite iç kaybından kaynaklanmaktadır.

Pasif mod-kilitli lazer çıkışının elde edilmesinde, mod-kilitli operasyon 550 mW'ın üzerindeki toplam pompa güçleri için SESAM tarafından kendiliğinden başlatılır ve kararlı bir şekilde sürdürülür. Verilen bu sürekli dalga mod kitleme eşiğinde, SESAM üzerindeki kavite içi darbe akısı ~225 uJ/cm²'dir. Bu değer SESAM'ın tam doyurulması için gerekli doygunluk akısının 6.4 katıdır ve bu durum kendi kendine mod-kilitli operasyonun başlayabilmesi için gerekli çalışma koşulunu (Keller (2021)'de Eşitlik (9.3) ile verilmiş) sağlamaktadır. Kavite girişinde elde edilebilir en yüksek 564 mW pompa gücünde gösterilen sürekli-dalga mod-kilitli rejim operasyonunun çıkış gücü 40 mW'tır ve buna karşılık gelen darbe enerjisi 36.04 pJ'dür. Sürekli-dalga mod-kilitli rejimde, mod-kilitli lazer çıkışı herhangi bir çift-atım veya Q-anahtarlama gibi kararsızlıklar göstermemiştir. Lazer çıkışında elde edilen gücü iyileştirmek adına daha yüksek çıkış kuplaj iletimi (%1) kullanarak sürekli-dalga mod-kilitli lazer operasyonu denenmiş ancak bu kuplaj miktarı altında maksimum pompa akımlarında bile kavite-içi toplam güç, kararlı mod-kilitli operasyonun başlatılması için yeterli olmamıştır. Çıkış kuplajının %1 olduğu durumda, kavite kollarının simetrik bir şekilde uzatıldığı nispeten düşük tekrarlama hızlarında (~750 MHz) kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyonu, nispeten daha yüksek ortalama güç çıkışı (~60 mW) ile elde edebilmiştir. Burada tanımlanan iki-adet diyot ile pompalı lazer kavitesi ile, 1 GHz ve daha yüksek tekrarlama frekansına sahip kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyon elde etmek için gerekli kritik kavite içi darbe enerjisi, ancak %0.5'de ve daha düşük çıkış kuplajları ile elde edilebilmektedir. Sonuç olarak düşük çıkış kuplajları altında lazer çıkışında nispeten daha ortalama güç miktarları elde edilmektedir. Pratik olarak, aynı miktarda pompalama altında, aynı uzunlukta atmaların daha yüksek ortalama çıkış güçlerinde elde edilmesi için daha yüksek çıkış kuplaj miktarlarının kullanılması, daha küçük bir eğrilik yarıçapına sahip M3 aynası (benzer GVD ile) kullanılarak SESAM üzerinde lazer modu boyutunun küçültülmesini gerektirecektir (deneyler sırasında mevcut değildi). Bu seçenek diğer taraftan SESAM'a zarar verme olasılığını artırmakla birlikte, kararlı ve sağlam çalışmayı önleyebilir.

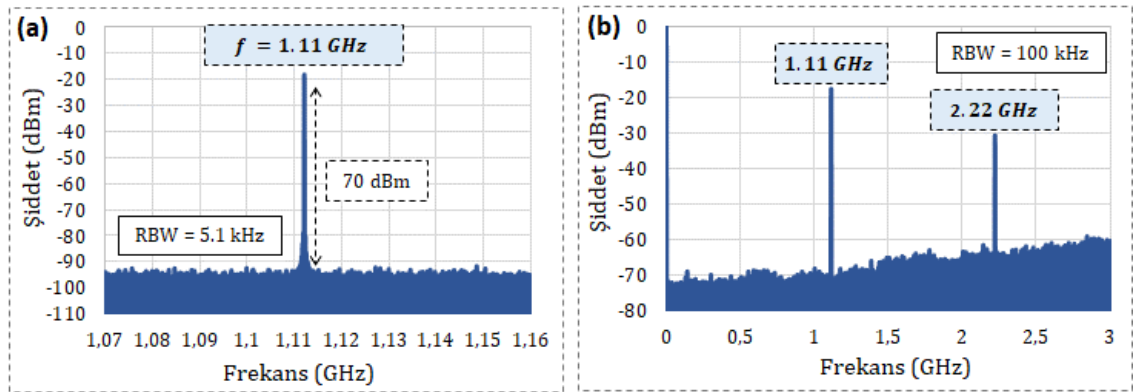
Burada sonuçlarını sunmakta olduğumuz ve %0.5 çıkış kuplajı kullanılan durum için lazer çıkışında ölçülen atma dizisinin optik spektrumu (Ocean Optics Hr4000 ile 0.27 nm çözünürlükte kaydedilmiştir) Şekil 4.17(a)'da gösterilmiştir. Burada sürekli-dalga mod-kilitli operasyon için görülen lazer çıkışının ölçülen optik spektrumu 1050 nm'de merkezlenmiştir ve yarı maksimumdaki (FWHM) tam genişlik 5,6 nm'dir. Bu da 207 fs'lik Fourier dönüşümü sınırlı darbe oluşumuna (sech² dağılımı kabul edilmiştir) karşılık gelir.



Şekil 4.17. a) Sürekli-dalga rejiminde 90 mW çıkışta (HR ile, kırmızı) ve sürekli-dalga mod-kilitli rejimde 40 mW çıkışta (SBR ile, mavi) ölçülen normalleştirilmiş optik spektrum; **b)** 1.1 GHz tekrarlama frekansına sahip darbe dizisinin otokorelasyonu

Optik spektrumu ölçülen lazer çıkışı aynı zamanda otokorelatöre aktarılır ve burada darbelerin atma genişliğinin hesaplanmasında kullanılan örnek bir oto-korelasyon izi (APE, Pulse Check cihazı kullanılarak ölçülmüştür) elde edilir (Şekil 4.17b’de gösterilmiştir). Otokorelatörde sech^2 darbe profili ve karşılık gelen 1.54 dekonvolüsyon faktörü varsayıldığında, atma süresi 210 fs olarak ölçülür. Bu, beklenen soliton darbe şekillendirme mekanizmasıyla tutarlı olan 0.32’lik bir zaman-bant genişliği çarpımına karşılık gelir. Ek olarak, Şekil 4.17b’de verilen ve yan omuzlar veya alt atmalar içermeyen otokorelasyon izi, lazer çıkışında temiz ve kararlı mod-kilitli atmaların varlığını göstermektedir.

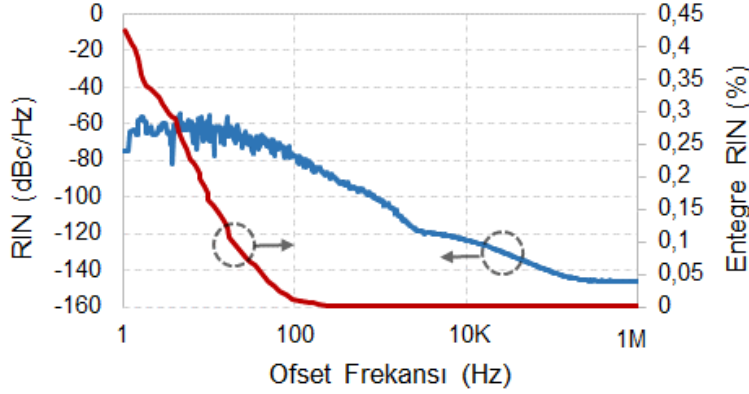
Sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının tekrarlama frekansının belirlenmesi ve olası bir kararsızlık durumunun ortaya çıkarılması için, lazer çıkışında kullanılan bir hızlı fotodedektör (Thorlabs DET08CFC/M) aracılığı ile algılanan atmaların, bir RF sinyal analizöründe (Agilent Technologies, N9000A, 9 kHz-3 GHz) RF spektrumları ölçülür.



Şekil 4.18. 1.11 GHz’de sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının a) dar frekans aralığında; **b)** geniş frekans aralığında ölçülmüş radyo frekansı spektrumu

Temel tekrarlama frekansında görülen tepe noktasının 5.1 kHz çözünürlük bant genişliği ile dar frekans aralığı (1.07-1.16 GHz) üzerinde ölçümü (Şekil 4.18a) için, ölçüm sisteminin gürültü tabanı, sinyalin 1.11 GHz’de bulunan maksimum değerine göre -70 dBm daha düşüktür. Bu da bu tekrarlama frekansında kararlı sürekli-dalga mod-kilitli

lazer operasyonunun gösterir niteliktedir. Şekil 4b’de ise 100 kHz’lik bir çözünürlük bant genişliği ile 0-3 GHz aralığında ölçülmüş ve 2.22 GHz’de ikinci harmonik bileşeni sergileyen daha geniş bir RF spektrumu gösterilmektedir. Burada verilen temel ve ikinci harmonik frekanslarında ölçülen tepeler dışında hiçbir yan tepe tespit edilmemiştir. Bu gözlem lazer çıkışında kararlı, tek uzamsal modlu, sürekli-dalga mod-kilitli lazer operasyonunu kanıtlar niteliktedir.



Şekil 4.19. CW mod kilitli lazer çıkışının 1.11 GHz Yb:YLF lazerden gelen yoğunluk gürültüsü

Son olarak, sürekli-dalga mod-kilitli lazerin bağıl şiddet gürültüsü,(RIN) ilgili frekans eksenini boyunca integrali alınmış hali ile birlikte Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Lazer çıkışındaki atma dizileri düşük gürültülü bir InGaAs fotodedektör (ET-3000) ile algılanır ve ardından filtrelemeden sonra düşük gürültülü bir trans-empedans amplifikatörü ile yükseltilir. Tüm ölçümler -142.3 dBc/Hz’lik bir atış-gürültü limitine karşılık gelen -10 dBm’lik sabit bir RF gücünde gerçekleştirilmiştir. Sinyal kaynağı analizörünün (Keysight E5052B) AM-Gürültü ölçüm işlevi, uygun bant geçiren filtreler aracılığıyla izole edilen Yb:YLF lazerinin ilk harmoniklerine (~1 GHz) uygulanır. Şekil 4.19’da gösterilen kırmızı çizgi ile gösterilen eğriden çıkarımla, 190 Hz-1MHz aralığını kapsayan yüksek frekanslarda lazer çıkışında gürültü oluşmasına sebep olan bir etki bulunmamaktadır. Bu bağlamda, Yb:YLF kazanç ortamının floresan ömrü (~2 ms), 500 Hz frekansı üzerinde meydana gelebilecek gürültü faktörlerinin bastırılmasında kısmi bir rol oynamaktadır. 190 Hz’den düşük frekanslarda ise mekanik pertürbasyonlar (soğutma gibi) ve pompa gürültüsü gibi etkenler artan lazer gürültüsüne etki eden olası kaynaklar olarak sıralanabilir. Lazer gürültüsünün düşük seviyelere çekilmesi, fiziksel lazer kurulunun etrafında izole edici kapakların ve pompa gürültüsü azaltacak geri-beslemeli stabilizasyon sistemlerinin kullanılması ile sağlanabilir.

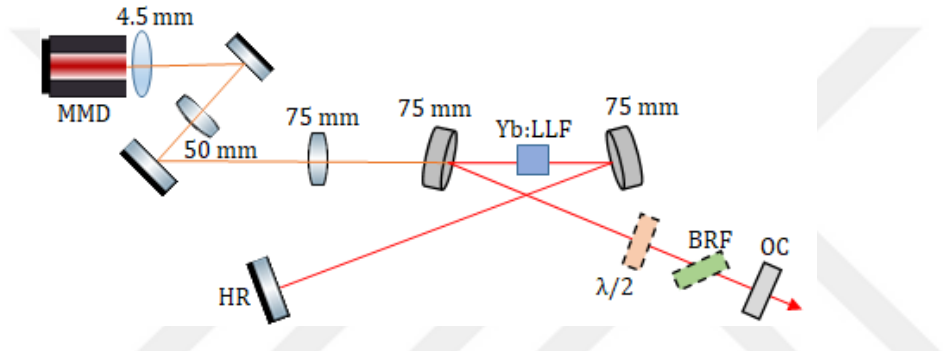
4.3.2. Diyot-pompa Yb:LLF lazer sistemlerinde sürekli-dalga ve SESAM ile mod-kilitli rejim operasyonu

Tez çalışmasının bu alt bölümünde, giriş bölümünde tanımlandığı şekli ile Yb:YLF ile benzer karakteristiklere sahip olan Yb:LLF kazanç ortamı ile gerçekleştirilen lazer sistemlerinden elde edilmiş sonuçlar raporlanmaktadır. Bahsi geçen çeşitli kurulumlarda 960 nm etrafında 10 W’a kadar çıkış gücü verebilen çoklu-mod lazer diyotu veya yine 960 nm etrafında ışıma yapan ve 260 mW çıkış gücüne sahip tekli-mod diyotlar pompalama işlemi için kullanılmıştır. Takip eden alt bölümlerde Şekil 3.21’de verilen

Yb:LLF kazanç ortamının kullanıldığı lazer kurulumlarında sürekli-dalga, dalgaboyu ayarlama ve SESAM ile pasif mod-kilitleme rejimlerinden elde edilmiş sonuçlar gösterilmektedir.

4.3.2.1. Çok-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde sürekli dalga operasyonu ve ayarlanabilir dalgaboyu

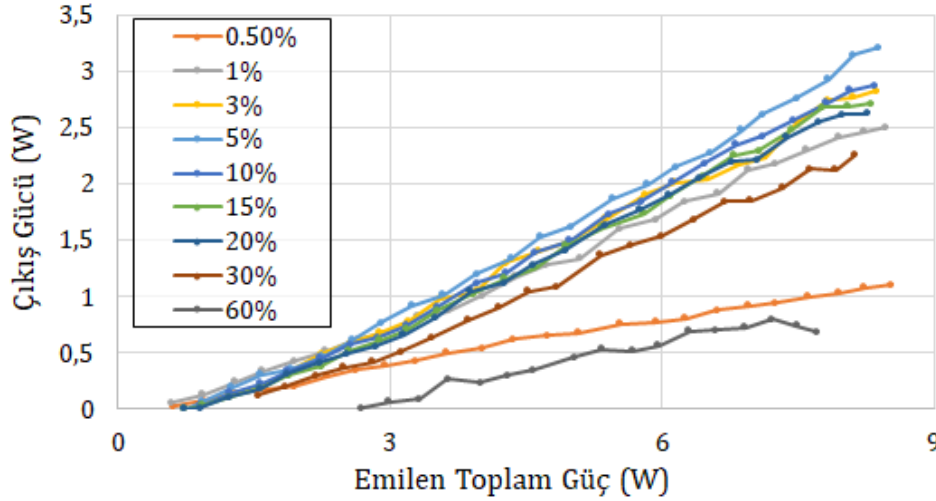
Çoklu-mod lazer diyeti ile pompalanmış Yb:LLF kazanç ortamı ile kurulmuş sistemler arasında, ilk olarak sürekli-dalga çalışma rejiminde çıkış gücünün ölçeklenmesi ve lazer dalgaboyunun ayarlanması kapasitesinin ortaya çıkartılmasına yönelik araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Sürekli dalga rejiminde fiziksel kurulumu gerçekleştirilmiş kavite yapısı şekil 4.20’de verilmiştir. Sürekli-dalga operasyonda Yb:LLF lazer çıkışında lazer dalgaboyunun ayarlanabilirliğinin keşfedilmesinde kaviteye eklenen optik elemanlar (yarı-dalga plakası ve çift-kırınımlı filtre) kesikli çizgilerle gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Sürekli-dalga rejimde güç ölçekleme ve dalgaboyu ayarlama deneylerine kullanılan kavite şematığı

İlgili kavite operasyonunda π -polarizasyonunda (E//c) pompalama için (960 nm’de 10 W’a kadar) tek emitörlü ve çoklu-modlu çıkışa sahip bir lazer diyeti (RPMC Lasers, LDX-3A10-960-C) kullanılır. Pompa çıkışı ilk olarak 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik bir mercek ile kolime edilir ve ışın astigmatizması 50 mm odak uzaklığına sahip silindirik bir mercek ile (hızlı ekseninde hareket eden) en aza indirilir. Daha sonra akromatik bir çift ($f=75$ mm) lens kullanılarak pompa ışını kristal içerisinde yaklaşık $25 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ ’lik bir bele odaklanır. Sürekli-dalga operasyonunda çalışan ve standart X-katlı kurulumu sahip lazer kavitesi ise, her biri 75 mm eğrilik yarıçapına sahip iki kavisli yüksek reflektör (M1 ve M2), bir kolda düz bir yüksek reflektör (HR) ve diğer kolda ise düz bir çıkış kuplöründen oluşur. M1 ve M2 aynaları üzerlerine uygulanmış kaplama tabakaları ile 1010-1200 nm aralığında yüksek oranda yansıtıcı ($R>\%99,9$), 800-970 nm aralığında ise yansıma önleyici kaplamaya ($R<\%2$) sahiptir. Fiziksel görünümü önceki bölümlerde Şekil 3.21 ile verilmiş olan %25 Yb-katkılı LLF kristali 1.5 mm uzunluğundadır ve her iki ucunda 1.5 mm uzunluğunda Yb-katkısız uç kapaklar bulunmaktadır. Burada tarif edilen kristal yapısı ile lazer işlemi sırasında kristal içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının optimize edilmesi (daha düşük termal strese yol açacak şekilde) amaçlanmıştır. Verilen kristal geometrisi için toplam kristal uzunluğu ~ 4.5 mm, pompalama işleminin yapıldığı yüzde ise kristal açıklığı $\sim 5.5 \times 7 \text{ mm}^2$ boyutundadır. Kavite içerisinde pratik kullanımda, Yb:YLF kristali ilk olarak alt ve üst yüzeylerine yerleştirilmiş ince indiyum folyolar ile uygun geometrideki bakır tutucu içerisine yerleştirilir. Burada kullanılan bakır tutucular içerlerinden su geçişini sağlayacak dairesel

açıklara sahip olmakla birlikte, bu açıklık içerisinde geçirilen ve su soğutucu ünitesi tarafından devir-daim ile soğutulan kapalı bir sistem ile kristale su soğutması (15°C 'ye soğutulur) uygulanır. Burada kristalin alt ve üst yüzeyine yerleştirilmiş indiyum folyolar yüksek termal iletkenlikleri sayesinde kristal içerisinde oluşan ısının etkili bir biçimde dışarıya atılmasını sağlar.

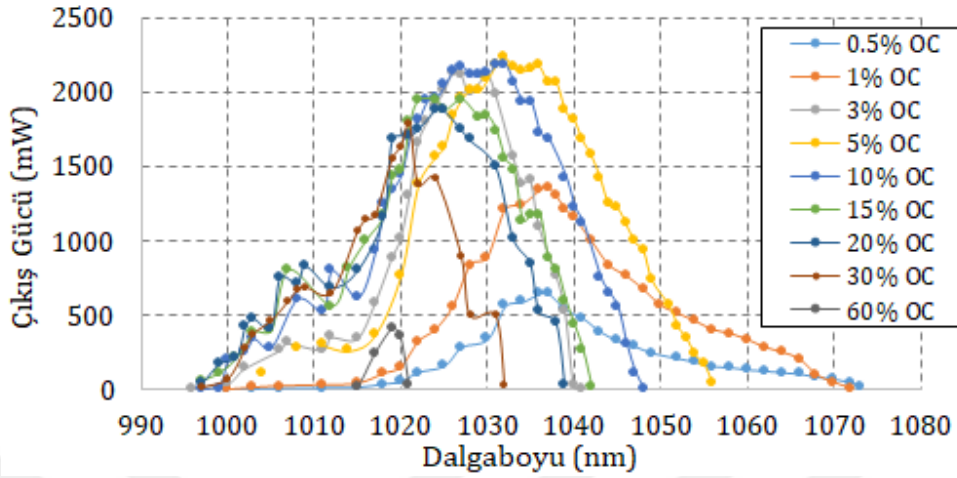


Şekil 4.21. Çoklu-mod diyot pompalı sürekli-dalga Yb:LLF lazerinde güç ölçekleme karakteristiği

Kavite içerisinde ilgili yüzeyi pompa ışınına dik olacak şekilde konumlandırılan a-kesimli Yb:LLF kristali, 960 nm pompa emisyon dalgaboyunda TM polarize pompa ışığının $\sim 85\%$ 'ini emer. Sürekli-dalga operasyonda lazer çıkışında ölçülen çıkış gücü ölçeklemesi Şekil 4.21'de iletim değerleri %0.5-60 arasında olan dokuz farklı çıkış kuplajının kullanılması için gösterilmiştir. Burada verilen sonuçlar incelendiğinde en yüksek ortalama çıkış gücü (3.2 W) ve eğim verimliliği (%42.3) açısından en iyi performansın %5 iletime sahip çıkış kuplajının kullanımı ile elde edildiği görülmektedir. Ayrıca beklentiler dahilinde artan çıkış kuplajları için ortaya çıkan lazer eşiği daha yüksek güçlerde (örn. %60 çıkış kuplajı için ~ 2.7 W) ortaya çıkmaktadır.

Yb:LLF kazanç ortamı ile sürekli-dalga rejim operasyonunda lazer dalgaboyunun ayarlanabilme potansiyelini ortaya çıkarmak üzere Şekil 4.20'de kesikli çizgilerle gösterilen optik elemanlar kavite içerisine dahil edilir. Burada 25° dalış açısına ve 2 mm kalınlığa sahip yüzey dışı optik eksenli kristal kuvars çift kırılımlı filtresi (BRF) lazer çıkışındaki dalgaboyunun ayarlamak için kullanılırken (Brewster açısında yerleştirilir), yarım dalga plakası ise lazer çıkışının, Yb:LLF kazanç ortamında emisyon bant genişliğinin daha geniş olduğu E//c ekseninde polarizasyonunu sağlamak için kullanılır. Sürekli-dalga operasyonunun güç ölçekleme deneylerinde olduğu gibi, dalgaboyu ayarlama denemeleri iletim değerleri %0.5-60 arasında olan dokuz farklı çıkış kuplajının kullanımı için gerçekleştirilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar Şekil 4.22'de sunulmuştur. Şekil 4.22 incelendiğinde, sürekli-dalga ayarlama eğrilerinin kapsamı bakımından, farklı çıkış kuplajlarının kullanımı ile sürekli-dalga lazer çıkışı 996-1073 nm aralığında gösterilmiştir. Bu sonuç, daha önce literatürde rapor edilen ve en geniş sürekli-dalga lazer dalgaboyu ayarlama aralığının 1029-1069 nm olarak gösterildiği sonuçlarla

kıyaslandığında, Yb:LLF ile gösterilen en geniş dalgaboyu ayarlama aralığı olarak dikkat çekmektedir.



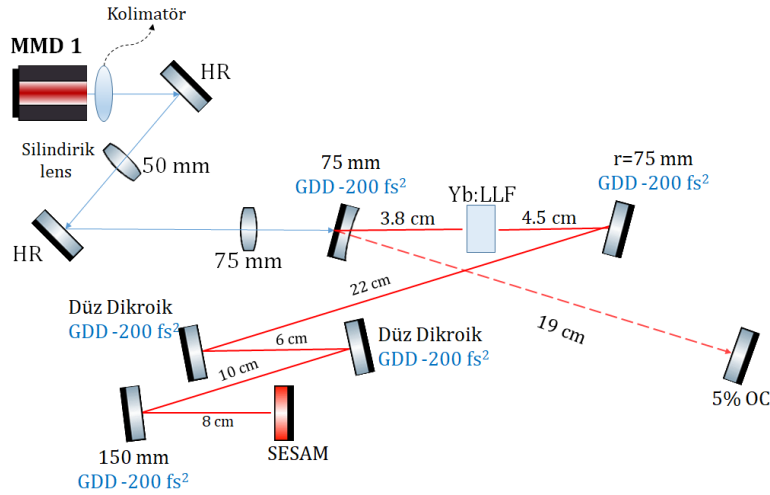
Şekil 4.22. Çok-modlu diyot pompalı sürekli-dalga Yb:LLF lazerinde dalgaboyu ayarlama karakteristiği

Şekil 4.22’de verilen eğriler çıkış kuplajının değişen iletim değerleri için incelendiğinde, ayarlama aralığının kısa dalgaboylarındaki (~996-1030 nm) bölgedeki operasyon görece yüksek çıkış kuplajına sahip çıkış kuplörleri ile, daha uzun daha boylarında operasyon ise daha düşük iletime sahip çıkış kuplajının kullanımı ile elde edilmektedir. Burada gözlemlenen davranış, artan çıkış kuplajı için artan popülasyon ters çevirmesinden dolayı kazanç spektrum pikinin kısa dalga boylarına kaymasından kaynaklanmaktadır. Özetle, gerçekleştirilen deneyler ile Yb:LLF kazanç ortamında 996-1073 nm aralığında sürekli-lazer operasyonunun gerçekleştirilebilirliği gösterilerek bu malzeme ile keşfedilmemiş potansiyel deneysel ölçümler ile literatüre kazandırılmıştır.

4.3.2.2. Çoklu-mod diyot pompalı, SESAM ile 200 MHz’de mod-kilitli 337 femtosaniye Yb:LLF lazeri

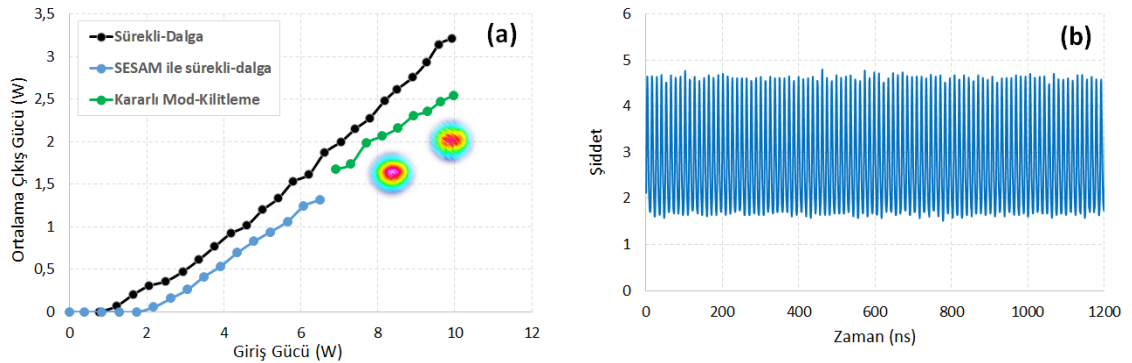
Tez çalışmasının bu alt bölümünde, 960 nm etrafında 10 W’a kadar çıkış gücü verebilen çoklu-mod lazer diyotu veya yine 960 nm etrafında ışıma yapan ve 260 mW çıkış gücüne sahip tekli-mod diyotlar pompalanmış Yb:LLF lazer sistemlerinde SESAM ile pasif mod-kitleme yöntemi ile lazer çıkışında femtosaniye uzunluğunda ve MHz mertebesinde tekrarlama frekansına sahip atmaların elde edilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapılan çeşitli deneylerde elde edilen sonuçlar, takip eden kısımlarda sonuç grafikleri ile birlikte sıralı bir biçimde verilmiştir.

İlk olarak, lazer çıkışındaki yüksek ortalama çıkış gücüne sahip femtosaniye atmaların üretilmesinin amaçlandığı deneylerde Şekil 4.23’te gösterilen kavite yapısı kullanılmıştır.



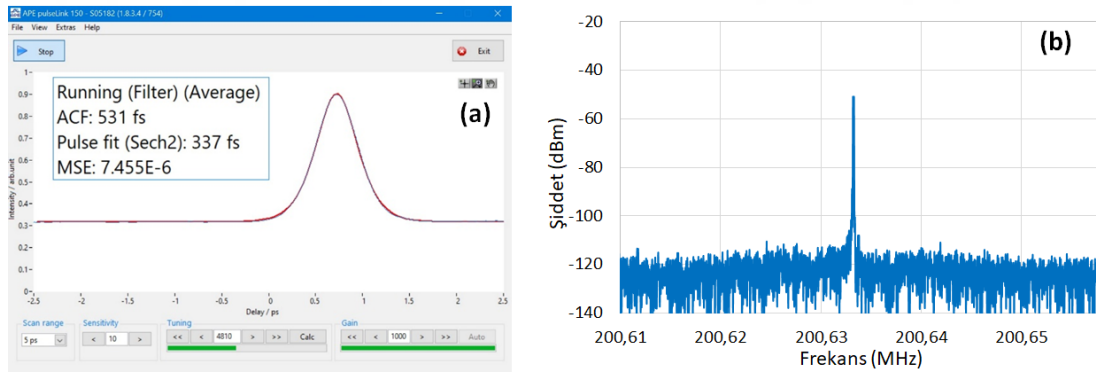
Şekil 4.23. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 200 MHz tekrarlama frekansında 337 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu

Burada gösterilen sistemde pompa çıkışı 4.5 mm odak uzaklığına sahip asferik bir mercek ile kolime edilir ve ışın astigmatizması 50 mm odak uzaklığına sahip silindirik bir mercek ile (hızlı eksende hareket eden) en aza indirilir. Daha sonra akromatik bir çift ($f=75$ mm) lens kullanılarak pompa ışını kristal içerisinde yaklaşık $25 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ 'lik bir bele odaklanır. Burada tanımlanan pompalama yapısı, takip eden kısımlarda çoklu-modlu diyot ile pompalanan mod-kilitli sistemler için de geçerli olduğundan bu bilgi ilgili kısımlarda tekrar edilmeyecektir. Kavite kurulumunda standart bir x-katlı yapı tercih edilmiş ve 75 mm eğrilik yarıçapına sahip dikroik aynalar kullanılmıştır. Şekil 4.23'te gösterilen kavite yapısında mod-kilitli operasyon SESAM (BATOP SAM-1040-2-1ps-x) ile başlatılıp sürdürülürken, soliton darbe oluşumu, kavite aynalarından gelen negatif GDD ve Yb:LLF kazanç ortamındaki öz faz modülasyonu arasındaki denge ile belirlenmektedir. Bu kapsamda, net negatif dispersiyon rejiminde mod-kilitli operasyonun elde edilmesinde önceki bölümlerde karakteristikleri tanımlanmış negatif dispersiyona sahip set aynaları kullanılmıştır. Lazer kavitesindeki bütün aynaların bahsi edilen ayna setinden seçildiği kavitede, toplan kavite dispersiyonu -1811 fs^2 olarak hesaplanmıştır.



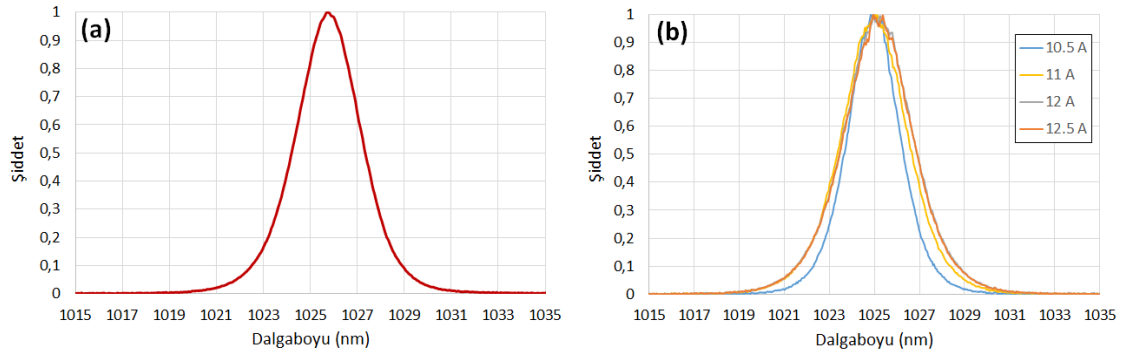
Şekil 4.24. a) SESAM ve yüksek yansıtıcılı ayna kullanılan durumlar için lazer çıkış gücü ölçeklemesi; b) 200 MHz'de tekrar eden 337 fs uzunlukta atmların zaman düzleminde ölçülmüş örnek dizisi

Lazer çıkışı ise, daha önce sürekli-dalga rejim operasyonunda maksimum çıkış gücü ve eğimini sağlayan %5 iletim değerine sahip çıkış kuplajı üzerinden yapılmıştır. Bu şekilde lazer çıkış gücü maksimize edildikten sonra karşılık gelen kavite içi güç miktarının, kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyon için SESAM yüzeyinde ideal bir lazer mod büyüklüğüne odaklanması gerekmektedir. Burada verilen kurulum için, optimum çıkış performansı, SESAM'a 8 cm uzaklıkta konumlandırılmış ve 150 mm eğrilik yarıçapına sahip aynanın kullanılması ile elde edilmiştir. Burada tanımlanan kavite çıkışında, artan pompa gücüne karşılık ölçülen ortalama lazer gücü Şekil 4.24a'da gösterilmiştir. Şekil 4.24a incelendiğinde, SESAM elemanının kullanıldığı durumda, sürekli-dalga mod-kilitli lazer operasyonu 6.7 W'dan daha büyük pompa güçlerinde gerçekleşir. İlgili şekilde kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyona ait çıkış güçleri, karşılık gelen örnek ışın profilleri ile birlikte yeşil işaretçilerle gösterilmiştir. Şekil 4.24'te ayrıca SESAM elemanının düz, yüksek yansıtıcı bir ayna ile değiştirildiği sürekli-dalga operasyonuna ait çıkış gücü karakteristiği (siyah renkli işaretçiler ile gösterilmiş) gösterilmektedir. Sürekli-dalga operasyonunda, daha önce Şekil 4.21'de verilen sonuçlara benzer lazer eşikleri, eğim verimliliği ve maksimum çıkış güç değerleri elde edilmiştir. Buradan sonuçla, Şekil 4.23'te verilen ve ek aynaların kullanıldığı kavite yapısında optimum yapının elde edildiği doğrulanmaktadır. SESAM ile operasyonda ise, SESAM elemanının içsel kayıplarında ötürü lazer eşik gücü görece daha yüksek (~ 2 W) pompa güçlerinde gerçekleşir. Şekil 4.23'te kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edildiği aralıkta farklı pompa güçleri için verilen lazer çıkış ışın profili incelendiğinde, görece düşük güçlerde TEM₀₀ çıkış profilinin artan pompa güçleri ile birlikte çok-modlu karakteristiği kazandığı gözlemlenmektedir. Bu sonuç ise direkt olarak, artan pompa gücü ile artan miktarda enine modlara sahip çıkış karakteristiği gösteren pompa diyot çıkış profilinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.25. Maksimum pompa gücünde lazer çıkışında ölçülmüş **a)** otokorelasyon izi; **b)** RF spektrumu

Şekil 4.23'te verilen lazer sisteminin sürekli-dalga mod-kilitli rejimde operasyonu sırasında, lazer çıkışı çeşitli ölçümler ile karakterize edilmiş olup, bunlardan ilki Şekil 4.25'te gösterilen otokorelasyon izi ve RF spektrum analizör ölçümleri ile verilmiştir. Şekil 4.25a'da verilen otokorelasyon izi, sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edildiği maksimum güç çıkışında (~ 2.5 W) ölçülürken, sech² dağılım kabulü altında lazer çıkışında 337 fs uzunluğunda atmaların varlığını göstermektedir. Şekil 4.25b'de ise yine ~ 2.5 W çıkış gücüne sahip atma dizisi için 200.6-200.65 aralığında ölçülmüş RF spektrumu gösterilmektedir. Verilen grafikte ölçüm sisteminin gürültü tabanı, sinyalin 200.3 GHz'de bulunan maksimum değerine göre -60 dBm daha düşük seviyededir.



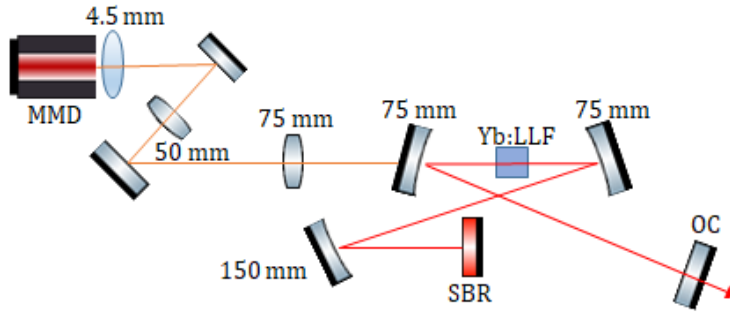
Şekil 4.26. Sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının **a)** 2.5 W çıkış gücünde; **b)** farklı pompa güçlerinde ölçülmüş normalize edilmiş optik spektrumu

Son olarak, lazer çıkışında ölçülen atma dizisinin optik spektrumu (Ocean Optics Hr4000 ile 0.27 nm çözünürlükte kaydedilmiştir) Şekil 4.26a’da gösterilmiştir. Burada sürekli-dalga mod-kilitli operasyon için görülen lazer çıkışının ölçülen optik spektrumu 1026 nm’de merkezlenmiştir ve yarı maksimumdaki tam genişliği 2.95 nm’dir. Bu da 375 fs’lik Fourier dönüşümü sınırlı darbe oluşumuna (sech^2 dağılımı kabul edilmiştir) karşılık gelir. Bu sonuç otokorelatöre ile ölçülen atma genişliği ile değerlendirildiğinde, beklenen soliton darbe şekillendirme mekanizmasıyla tutarlı olan 0,317’lik bir zaman-bant genişliği çarpımına karşılık gelir. Ek olarak, Şekil 4.26b’de verilen ve kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyonunun elde edildiği farklı pompa güçlerinde ölçülmüş optik spektrumlar da gösterilmiştir. Burada artan pompa güçlerinde emisyon pik dalgaboyu 1025 nm etrafında sabit kalırken, beklentiler dahilinde emisyon genişliğinde artış meydana gelmektedir (Şekil 4.26a’da verilen optik spektrum 2.5 W çıkış gücünde elde edilmiştir).

Takip eden alt bölümlerde gösterilen sistemlerde, kavite içi toplam negatif dispersiyonunun mutlak değeri azaltılarak, daha düşük atma genişlikleri ile kararlı halde çalışan sürekli-dalga mod-kilitli lazer sistemlerinin detayları sunulmaktadır.

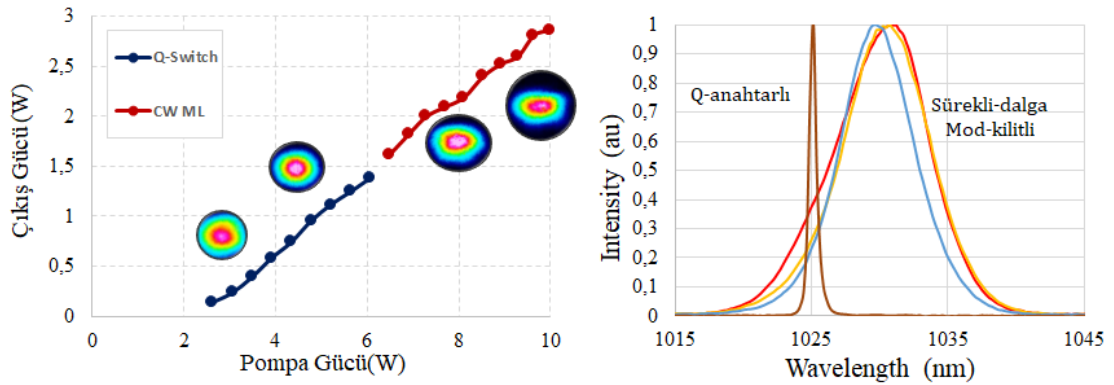
4.3.2.3. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 257 MHz’de mod-kilitli 181 femtosaniye Yb:LLF lazeri

Bu alt bölüm kapsamında sunulan lazer yapısı, yöntem olarak bir önceki alt bölümde Şekil 4.23 ile verilen kavite yapısına benzer karaktere sahip olup, kavite içi toplam mutlak dispersiyon değerinin düşürülerek lazer çıkışında daha dar atmaların elde edilmesine yönelik yapılan değişiklikleri içermektedir. Bu kapsamda, x-katlı lazer kavitesinin bir kolunda kullanılan iki düz ayna lazer sisteminden çıkartılarak Şekil 4.27’de verilen kavite yapısı oluşturulmuştur. Burada yine kaviteyi oluşturan iki adet dikroik ayna, SESAM (BATOP SAM-1040-2-1ps-x) üzerine odaklanma için kullanılan 150 mm eğrilik yarıçapına sahip içbükey ayna daha önce karakteristiği Şekil 3.24’te verilmiş ayna setinden seçilmiştir.



Şekil 4.27. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 257 MHz tekrarlama frekansında 181 fs uzunluğunda atmlar elde edilen kavite kurulumu

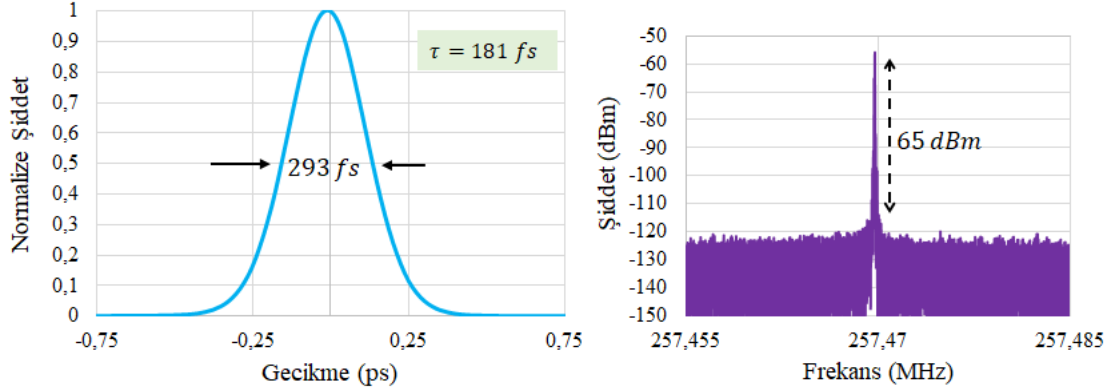
Pompalama özellikleri bir önceki alt bölümde verilen lazer sistemi ile benzer özellik gösteren bu sistemde toplam kavite içi net dispersiyon değeri -1010 fs^2 değerinde hesaplanır. SESAM kullanımı ile, lazer çıkışında ölçülen ortalama gücün pompa gücüne bağlı değişimi Şekil 4.28(a)'da verilmiştir. Sonuç olarak, 5% iletim değerine sahip çıkış kuplajının kullanıldığı lazer kavitesinde, $\sim 2.2 \text{ W}$ pompa eşik gücüne sahip lazer kavitesinde 6.1 W 'a kadar olan pompa güçlerinde lazer çıkışında q-anahtarlamalı operasyonu gözlenirken, kararlı sürekli-dalga mod-kilitli lazer operasyonu $6.2-10 \text{ W}$ aralığında verilen pompa güçlerinde gözlemlenir. İlgili pompa güçlerinde elde edilen mod-kilitli operasyon için ortalama lazer çıkış gücü $1.6-2.8 \text{ W}$ aralığında ölçülebilmektedir. Şekil 4.28a'da ayrıca belli güç seviyelerinde lazer çıkışında ölçülen ışın şekli verilirken, beklentiler dahilinde, artan pompa güçleri ile birlikte lazer çıkışının artan enine modlara sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.28. a) Çok-modlu diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama lazer çıkış gücü; **b)** farklı pompa güçlerinde elde edilen q-anahtarlı ve mod-kilitli rejimlerde ölçülen optik lazer spektrumu

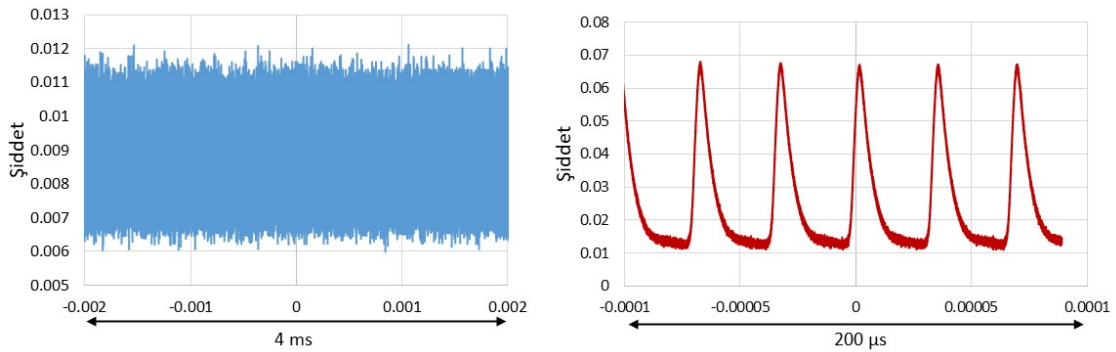
Şekil 4.28b'de farklı pompa güçlerinde lazer çıkışında ölçülen optik spektrum spektrumu (Ocean Optics Hr4000 ile $0,27 \text{ nm}$ çözünürlükte kaydedilmiştir) gösterilmiştir. Buradan yorumla, düşük pompa güçlerinde görülen Q-anahtarlı operasyona ait görece dar optik spektrum 1025 nm etrafında kendini gösterirken, yüksek pompa güçlerinde elde edilen mod-kilitli operasyon için farklı pompa güçlerinde ölçülmüş optik spektrumlar 1030 nm etrafında merkezli geniş Gauss dağılıma sahip spektrumlar ile kendini göstermektedir. Burada, ortalama 2.5 W çıkış gücünde mod-kilitli rejim için ölçülen ve Şekil 4.28b'de

kırmızı renkle gösterilmiş 1030 nm merkezli spektrum 6,2 nm genişliğinde yarı maksimumda tam genişliğe sahiptir. Bu çıkış gücünde ayrıca, lazer çıkışı otokorelatörde kullanılarak Şekil 4.29(a)'da verilen ve 293 fs genişliğinde otokorelasyon izi elde edilir. Pasif mod-kitleme ile lazer çıkışında ölçülen atmaların sech^2 dağılımına sahip olduğu varsayımı altında ise ölçülen bu değer atmaların 181 fs genişliğe sahip olduğu anlamını taşır.



Şekil 4.29. Maksimum pompa gücünde elde edilen 2.5 W ortalama çıkış gücünde mod-kilitli atma dizisine ait **a)** otokorelasyon izi; **b)** radyo frekans spektrumu

Optik spektrumları ve otokorelasyon izleri elde edilmiş atma dizileri için ek olarak, RF spektrum analizöründe tekrarlama frekanslarının belirlenmesi için Şekil 4.29b'de verilen RF spektrumu elde edilmiştir. Lazer çıkışındaki tekrarlama frekansının temel harmoniğini merkezine alan ve 257.555-257.485 MHz aralığında ölçülen spektrum için ölçüm sisteminin gürültü tabanı, sinyalin 257,47 GHz'de bulunan maksimum değerine göre -65 dBm daha düşük seviyededir. Bu durum, ilgili tekrarlama frekansında temiz bir sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının varlığını gösterir niteliktedir.

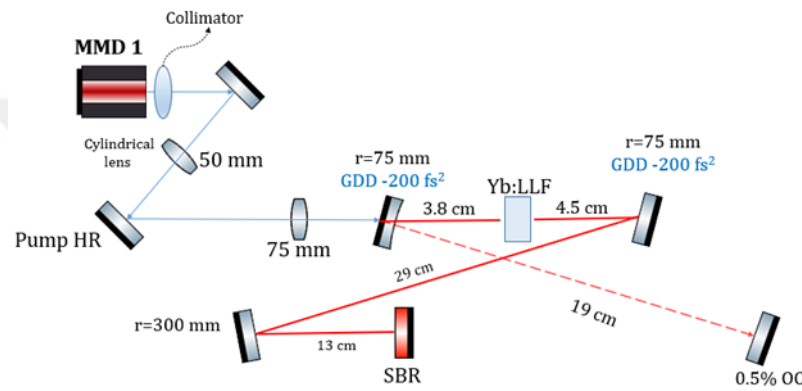


Şekil 4.30. Farklı pompa güçlerinde elde edilen **a)** Q-anahtarlı ve **b)** sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkış profillerinin zaman düzleminde gösterimi

Son olarak, çeşitli karakteristikleri ölçülünerek ilgili grafikleri burada sunulmuş olan lazer sistemi için, çeşitli pompa aralıklarında elde edilmiş Q- ve sürekli-dalga mod-kilitli rejimlerde lazer çıkışında elde edilen atma dizilerinin zaman düzleminde ölçülmüş örnek gösterimleri Şekil 4.30'da gösterilmiştir.

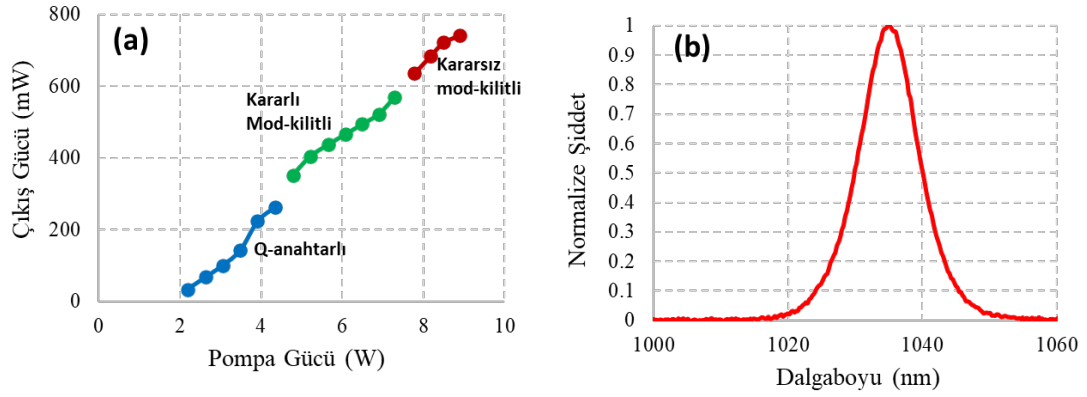
4.3.2.4. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 214 MHz’de mod-kilitli 110 femtosaniye Yb:LLF lazeri

SESAM ile 200 MHz civarında tekrarlama frekansına sahip sürekli-dalga mod-kilitli Yb:LLF lazer sistemlerinin oluşturulmasında, kavite içi toplam mutlak dispersiyon değerinin kademeli olarak düşürülerek lazer çıkışında daha kısa uzunlukta atmaların elde edilmesinin amaçlanmaktadır. Önceki iki alt bölümde gösterilmiş olan sistemler ile gösterilen bu sürecin bir sonraki aşaması olarak Şekil 4.31’de verilen kavite lazer sistemi gerçekleştirilmiştir. Burada toplam kavite dispersiyonunun düşürülmesinde, önceki sistemlerde SESAM üzerine lazer mod odaklaması için kullanılmış negatif dispersiyona sahip ayna yerine, ilgili lazer dalga boyu aralığında sıfır civarında dispersiyona sahip, 300 mm eğrilik yarıçapına sahip ayna kullanılmıştır.



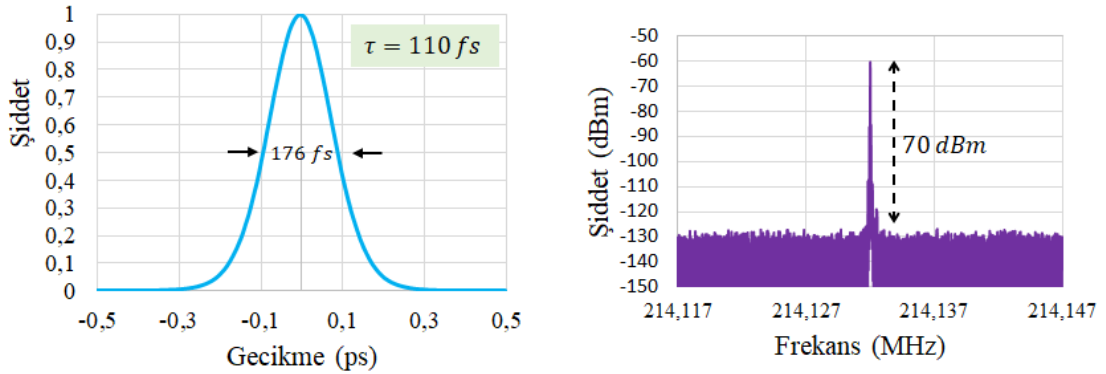
Şekil 4.31. Çok-modlu diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 214 MHz tekrarlama frekansında 110 fs uzunluğunda atmalar elde edilen kavite kurulumu

Burada verilen sistemde toplam kavite içi dispersiyonu -610 fs^2 olarak hesaplanır. Değişen pompa güçlerine göre lazer çıkışında ölçülmüş ortalama çıkış gücü eğrisi Şekil 4.32a’da gösterilmiştir. Burada kararlı halde çalışan sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun, 4.2-7.8 W pompa gücü aralığını kapsayan dar bir bölüm gerçekleştirilebildiği görülmektedir. Bu aralığın altındaki pompa gücü değerlerinde lazer çıkışında Q-anahtarlı operasyon elde edilirken, aralığın üstündeki yüksek güçlerde ise kararsız mod-kilitli lazer operasyonu lazer çıkışında ölçülmektedir. Genel çerçevede bakıldığında, 9 W pompa gücünün kavite girişine uygulandığı durumda, lazer çıkışında yalnızca $\sim 780 \text{ mW}$ çıkış gücü elde edilmiştir. Bu da SESAM üzerine odaklama için 300 mm eğrilik yarıçapına sahip aynanın (bir önceki sistemde 150 mm aynası kullanılmıştı) kullanılması sonucu ortaya çıkan kavite içi lazer mod dağılımının, bu lazer sistemi için optimum seviyede olmadığını göstergesidir. Burada sıfır civarında dispersiyona sahip 150 mm aynası erişilebilir durumda olmadığından bunun yerine 300 mm aynası kullanılmıştır.



Şekil 4.32. a) Çok-modlu diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama lazer çıkış gücü, b) sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen optik lazer spektrumu

Kararlı halde sürekli-dalga mod-kilitli rejimde çalışan lazer sistem çıkışı için, 7.8 W pompa gücüne karşılık gelen ~600 mW çıkış gücüne sahip atma dizisinin ölçülen optik spektrumu (Ocean Optics Hr4000 ile 0.27 nm çözünürlükte kaydedilmiştir) Şekil 4.32b’de gösterilmiştir. İlgili spektrum ~1035 nm merkezi etrafında 10.3 nm genişliğinde yarı maksimumda tam genişliğe sahiptir. Optik spektrumu verilen lazer çıkışı aynı zamanda otokorelatörde analiz edilerek Şekil 4.33a’da verilen otokorelasyon izi elde edilir. Burada pasif mod-kilitli lazer çıkışında elde edilen atmaların sech^2 dağılımına sahip olduğu varsayımı altında 110 fs darbe genişliğine sahip oldukları tespit edilir.

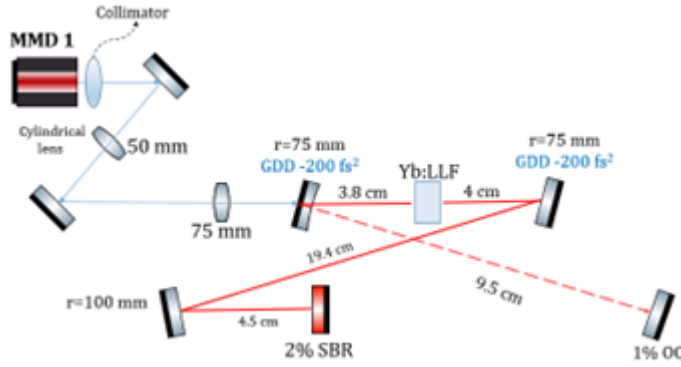


Şekil 4.33. 600 mW ortalama çıkış gücünde mod-kilitli atma dizisine ait a) otokorelasyon izi, b) radyo frekans spektrumu

Otokorelatör ve optik spektrum ölçümlerinden elde edilmiş bu veriler, beklenen soliton darbe şekillendirme mekanizmasıyla tutarlı olan 0,317 değerinde zaman-bant genişliği çarpımına karşılık gelir. Mod-kilitli lazer operasyonunun tekrarlama frekansı ve temiz ve kararlı bir biçimde operasyonunun test edildiği RF spektrum ölçümü Şekil 4.33(b)’de gösterilmiştir. Son olarak, lazer çıkışının Şekil 4.33 (b)’de gösterilmiştir. Burada tekrarlama frekansının temel harmoniğini merkezine alan 214.117-214.147 MHz aralığında alınan ölçümler sonucunda ölçüm sisteminin gürültü tabanının, sinyalin 214,13 GHz’de bulunan maksimum değerine göre -70 dBm daha düşük seviyede olduğu gösterilmektedir.

4.3.2.5. Çoklu-mod diyot pompalı SESAM ile 355 MHz’de mod-kilitli 145 femtosaniye Yb:LLF lazeri

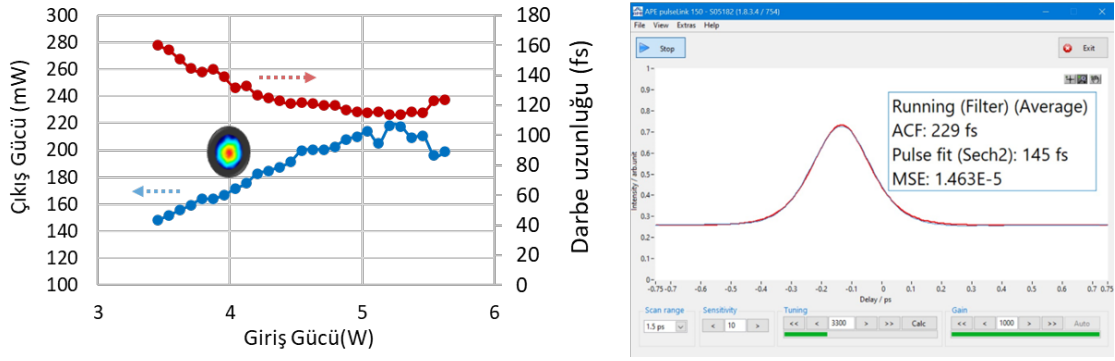
Bu kısma kadar sunulan ve Şekil 4.23, Şekil 4.27, ve Şekil 4.31 ile gösterilen Yb:LLF lazer sistemlerinin fiziksel kurulumları ve SESAM mod-kilitleme aracılığı ile ~ 200 MHz tekrarlama frekansında femtosaniye darbelerin üretimi gösterilmiştir. İlgili kavite optimizasyonu ile lazer çıkışında elde edilen atma genişliklerinin kısaltılmasına yönelik çabalar, sonuçları bir önceki alt bölümde Şekil 4.31 verilen lazer kavitesi ile 110 fs uzunluğunda darbelerin üretilmesiyle sonuçlanmıştır. Bu kapsamda kavite dispersiyonunun daha düşük seviyelere çekilerek 110 fs’den daha kısa uzunlukta (literatüre E/c ekseninde 90 fs atmalar gösterilmiştir) atmalar üzerine çalışmalar gerçekleşse de çalışmalar sürecinde erişilebilir durumda olan aynaların toplam dispersiyonunun ilgili geniş aralıkta homojen dağılmamasından dolayı gerçekleştirilememiştir. Bu sebeple, bu ve takip eden alt bölümlerde çok-modlu diyot pompalı, SESAM mod-kilitli Yb:LLF lazer sisteminin frekansının daha yüksek seviyelere çıkarılmasına yönelik çalışmalar ile yenilikçi yaklaşımlar ortaya konmuştur.



Şekil 4.34. Çoklu-diyot pompalı, SESAM ile mod-kilitli çıkışında 355 MHz tekrarlama frekansında 45 fs uzunluğunda atmalar elde edilen kavite kurulumu

Bu kapsamda gerçekleştirilen ilk girişim Şekil 4.34’te gösterilen kavite kurulumu ile gerçekleştirilmiştir. Burada x-katlı kavite kollarının kısaltılması ile tekrarlama frekansının daha yüksek seviyelere çekilmesi amaçlanmıştır, kavite aynaları arası uzaklıklar maksimum ortalama çıkış gücü elde edecek şekilde optimize edilmiştir. Pompalama karakteristikleri bir önceki bölümlerde sunulan durum ile benzer özellik gösteren bu kavitede, 75 mm eğrilik yarıçapına sahip dikroik aynaları Şekil 3.24’te karakteristikleri tanımlanan set aynaları arasından seçilirken, SESAM üzerine odaklama için 100 mm eğrilik yarıçapında ve lazer dalgaboyu etrafındaki geniş bölgede sıfır dispersiyona sahip bir içbükey ayna kullanılmıştır.

İletim değeri %1 olan çıkış kuplajı ile operasyonu sağlanan kavite için, lazer çıkışında kararlı sürekli-dalga mod-kilitli atmaların elde edildiği pompalama aralığı için verilmiş ortalama çıkış gücü ve ilgili ayırık pompa güçlerinde ölçülmüş atma genişliği Şekil 4.35a’da gösterilmiştir. Şekil 4.35a incelendiğinde, pompa gücünün 3.4-5.7 W aralığında ölçeklenmesi ile lazer çıkışında 150-210 mW ortalama güçte atmaların elde edildiği görülmektedir.



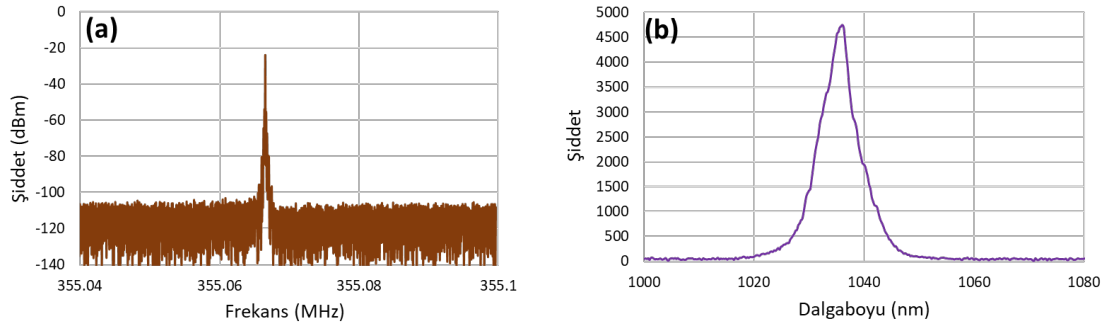
Şekil 4.35. Yb:LLF lazerinin **a)** Çoklu-mod diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama çıkış gücü (kararlı mod-kilitli rejim aralığı gösterilir); **b)** sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen otokorelasyon izi

Bahsi edilen pompa aralığındaki ayırık pompa güçlerinde ölçülmüş olan atma genişliğine örnek olarak, Şekil 4.35b’de verilen ve 3.7 W pompa gücünde lazer çıkışında ölçülen otokorelasyon izi verilmiştir. Bu örnek ölçümde, sech^2 dağılımına (pasif mod-kilitli lazer sistemi çıkışları için genel kabuldür) sahip olduğu varsayılan atmaların 145 fs uzunluğa sahip olduğu gösterilmektedir. Şekil 4.35a’da gösterilen ve artan pompa güçlerine karşılık, lazer çıkışında kısalan atma dizileri ile kendini gösteren davranışın açıklanmasında (4.14) numaralı eşitlik kullanılabilir.

$$\tau = 1,76 \frac{2|D|}{\gamma_{SPM} E_p} \quad (4.14)$$

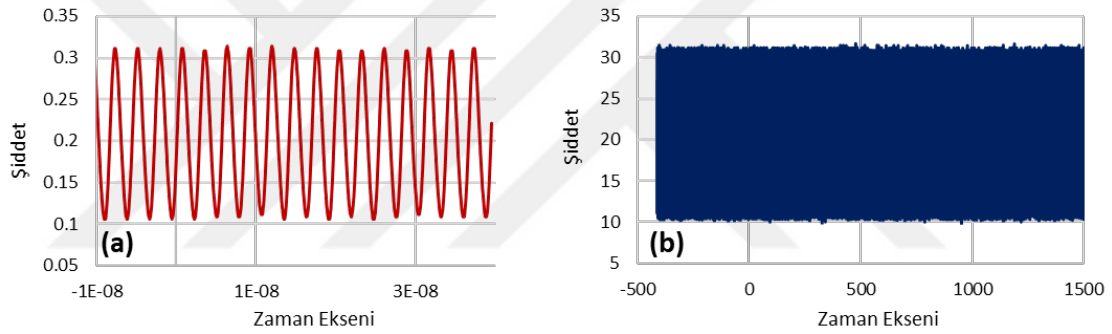
Burada, verilen kavite yapısı için değişken pompa güçleri altında $|D|$ (toplam kavite içi mutlak dispersiyon) ve γ_{SPM} (öz faz modülasyonu) sabit kabul edilirken, E_p (atma enerjisi: P_0/f) değerinin ortalama çıkış gücü ile doğru orantılı değişim göstermesi beklenir. Şekil 4.35aa’da verilen ilgili pompa gücü aralığında, artan pompa güçleri kavite içerisinde daha yüksek atma enerjilerine sebep olmakla birlikte, Denklem (4.14)’ün payda kısmında meydana gelecek artış ile lazer çıkışında elde edilen atma uzunluklarının kısalmasına yol açar.

Sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun karakterize edilmesinde güç ölçeklemeye ek olarak gerçekleştirilen ölçümlerden RF spektrumu ve optik spektrumu Şekil 4.36’da verilmiştir. Şekil 4.36a’da verilen RF spektrumu, 355 MHz tekrarlama frekansını merkezine alan 66.4 kHz’lik genişlikte 5.1 Hz çözünürlük bant genişliğinde ölçülmüştür. Burada ölçüm sisteminin gürültü tabanının, sinyalin 355 MHz’de bulunan maksimum değerine göre -60 dBm daha düşük seviyede olduğu gösterilmektedir.



Şekil 4.36. 355 MHz tekrarlama frekansında 145 fs uzunluğa sahip atmalar dizisi için ölçülen **a)** RF spektrumu; **b)** optik spektrum

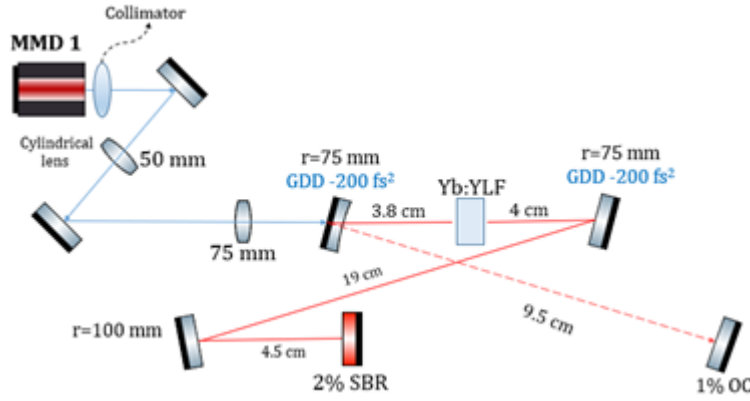
Şekil 4.36b’de verilen optik spektrum (Ocean Optics Hr4000 ile 0.27 nm çözünürlükte kaydedilmiştir) ise sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışının ~1037 nm etrafında merkezli karakterini göstermektedir. Burada gerçekleştirilen optik spektrum ölçümünde spektrometre önünde entegre edici küre kullanılmadığından ötürü (deneyler sırasında erişilebilir değildi) beklenen ideal Gauss dağılımlı optik spektrum kaydedilememiştir.



Şekil 4.37. 350 MHz tekrarlama frekansında 145 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin zaman düzleminde **a)** dar; **b)** geniş ölçeklerde ölçülmüş şiddetleri

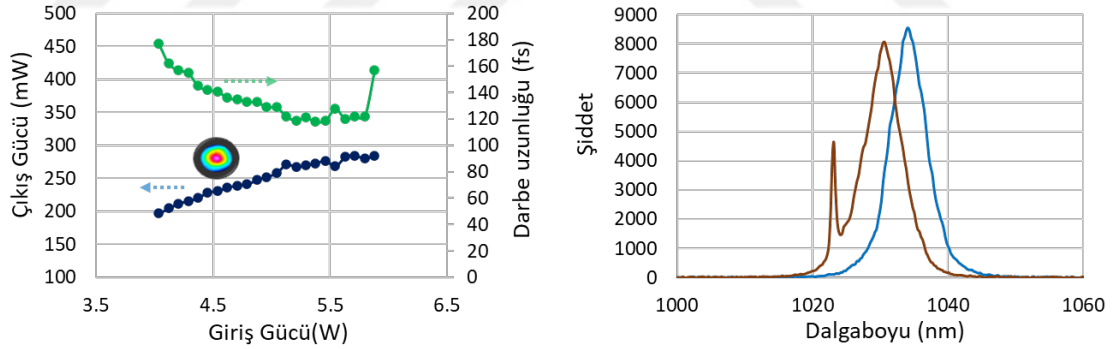
Son olarak, 350 MHz tekrarlama frekansında 145 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin lazer çıkışında hızlı detektörlerin kullanımı ile ölçülmüş ve osiloskopun dar ve geniş zaman aralıklarında kaydedilmiş zamana bağlı şiddet karakteristiği Şekil 4.37’de gösterilmiştir. Burada lazer çıkışında elde edilen atma dizisinin belirli bir aralıkta bir nevi anlık görünümü verilmiş olsa da burada gözlemlenen kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun daha uzun süre aralıklarında da devam ettiği gözlemlenmiştir.

Deneylerin bu aşamasında, deneyler sırasında erişilebilir durumda olan ve benzer geometrik şekil ve Yb-katkılama seviyesindeki (25%) Yb:YLF ve Yb:LLF kristallerinin (Şekil 3.21’de fotoğrafları gösterilmiş) çok yakın lazer özelliklerine sahip olduklarını göstermek adına, bu alt bölüm altında tanımlanan kavitedeki Yb:LLF kristali Yb:YLF kristali ile değiştirilmiştir. Lazer kristali dışında kalan optik elemanların korunduğu durum için, aynı pompala durumu için lazer çıkışında sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edilmesine yönelik küçük çapta hizalama düzeltmeleri yapılmıştır. Burada tanımlanan SESAM mod-kilitli Yb:YLF kavitesi Şekil 4.38’de gösterilmiştir.



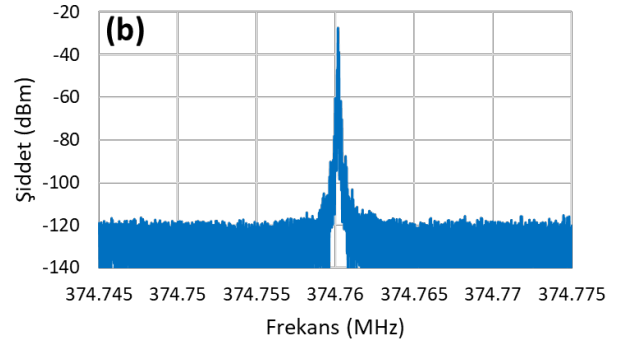
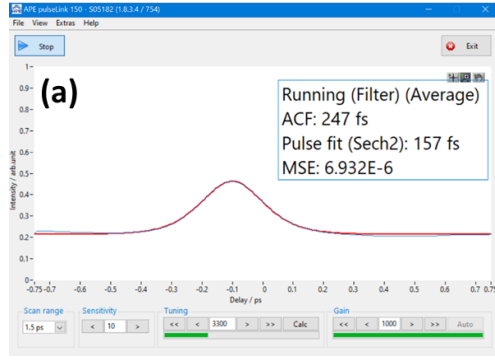
Şekil 4.38. SESAM ile mod-kilitli operasyonda, Yb:LLF versiyonu ile kıyaslamak üzere kurulmuş Yb:YLF kavitesi

Burada kavite yapısı verilmiş olan sürekli-dalga mod-kilitli Yb:YLF lazerinin karakterizasyonunda, Yb:LLF kavitesinde kullanılan cihaz ve yöntemler ile ilgili ölçümler tekrarlanmıştır. Lazer çıkışında kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edildiği pompa aralıkları için elde edilen ortalama çıkış gücü ve atma uzunluğunun değişimi Şekil 4.39(a)'da gösterilmiştir. Burada pompa gücünün 4-5.8 W aralığında değiştiği durumda lazer çıkışında 200-280 mW aralığında ortalama çıkış gücü ölçülmüştür. Burada ayrıca otokorelatörde alınan ölçümler ile, 4W pompa gücünde lazer çıkışında 180 fs uzunluğunda atmaların varlığı gösterilirken, pompa gücünün 5.8 W çıktığı durumda lazer çıkışındaki atmaların ~120 fs seviyesine kısaldığı görülmektedir.



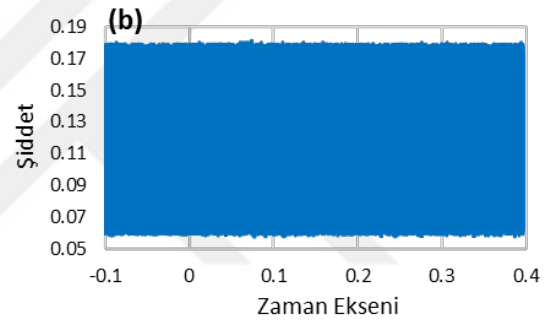
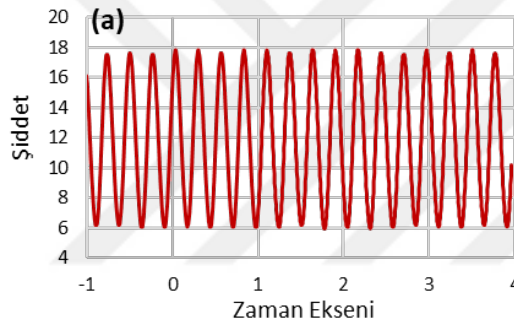
Şekil 4.39. Yb:YLF lazerinin **a)** çoklu-mod diyot çıkış gücüne bağlı ölçülmüş ortalama çıkış gücü (kararlı mod-kilitli rejim aralığı gösterilir); **b)** sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ölçülen optik spektrum

Şekil 4.39b'de ise lazer çıkışında 157 fs atma dizisinin elde edildiği pompa gücünde ölçülmüş olan örnek optik spektrum mavi çizgi ile gösterilmiştir. İlgili şekilde ayrıca stabil sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edildiği pompa aralığının üstünde pompa güçleri uygulandığında (burada 5.9 W için verilmiş) kararsız hale gelen mod-kilitli operasyona ait optik spektrum verilmektedir (turuncu renkle gösterilmiş). Lazer pompa gücü ~7 W'ın üzerinde bir değere artırılmadan tekrardan 4-5.8 W aralığına düşürüldüğünde kararlı sürekli-dalga mod-kilitli operasyon tekrardan başlamaktadır.



Şekil 4.40. SESAM mod-kilitli Yb:YLF lazer çıkışında 374.7 MHz tekrarlama frekansı ve 157 fs uzunluğuna sahip atma dizisi için ölçülen a) otokorelasyon izi, b) RF spektrumu

Şekil 4.40'ta SESAM mod-kilitli Yb:YLF lazer çıkışında 374.7 MHz tekrarlama frekansı ve 157 fs uzunluğuna sahip atma dizisi için ölçülen örnek otokorelasyon ve RF spektrum ölçümleri verilmiştir. Burada ölçüm sisteminin gürültü tabanının, sinyalin 374.7 MHz'de bulunan maksimum değerine göre -60 dBm daha düşük seviyede olduğu gösterilmektedir



Şekil 4.41. 374 MHz tekrarlama frekansında 157 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin zaman düzleminde a) dar; b) geniş ölçeklerde ölçülmüş şiddetleri

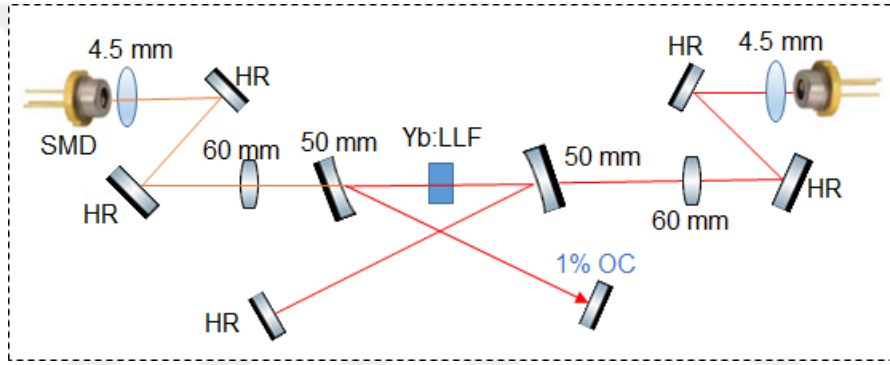
Ek olarak, 374 MHz tekrarlama frekansında 157 fs uzunluğa sahip atmalar dizisinin lazer çıkışında hızlı detektörlerin kullanımı ile ölçülmüş ve osiloskopun dar ve geniş zaman aralıklarında kaydedilmiş zamana bağlı şiddet karakteristiği Şekil 4.41'de gösterilmiştir.

Bu alt bölümde tasvir edilen Yb:LLF (Şekil 4.34) ve Yb:YLF (Şekil 4.38) kavite yapılarında elde edilmiş sonuçların kıyaslanmasına Şekil 4.35 ve Şekil 4.39'da verilen ortalama güç çıkışı ve atma genişliği karakteristiği ile başlayacak olursak, her iki sistemde de pompa gücünün benzer aralığında (Yb:LLF için ~3.5-5.5 W, Yb:YLF için ~4-5.8 W) kararlı halde çalışan sürekli-dalga mod-kilitli operasyonun elde edildiği görülmektedir. Burada verilen ilgili pompa güç aralıklarına göre, Yb:LLF için ortalama lazer çıkış gücü 150-220 mW aralığında, Yb:YLF lazer sistemi için ise 200-280 mW aralığında ölçeklenebilmektedir. Buradan çıkış güç aralıklarında ise Yb:LLF lazer sisteminde lazer çıkışında elde edilen atmaların uzunlukları artan pompa güçleri için 160 fs'den 110 fs'ye düşerken, Yb:YLF lazeri bu değişim ilgili aralıkta 170 fs'den 120 fs'ye düşüş ile kendini gösterir. Ek olarak, her iki lazer sistemi için, ilgili lazer çıkışlarında ölçülen mod-kilitli operasyona ait optik spektrumlar incelendiğinde, iki sistemde de 1030 nm etrafında merkezlenmiş optik spektrumların varlığı gözlemlenir.

Elden edilen sonuç ve kıyaslara göre, aynı geometri ve Yb-katkılama miktarına sahip Yb:LLF ve Yb:YLF malzemelerinin kullanıldığı lazer kurulumları ile benzer davranış ve nicel karaktere (örn. ortalama çıkış gücü, atma uzunluğu, optik spektrum) sahip mod-kilitli lazer operasyonu elde edilmiş ve iki kristal için tanımlayıcı özelliklerin benzer olması pratik uygulamalar açısından gösterilmiştir.

4.3.2.6. Tek-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde sürekli-dalga operasyonu

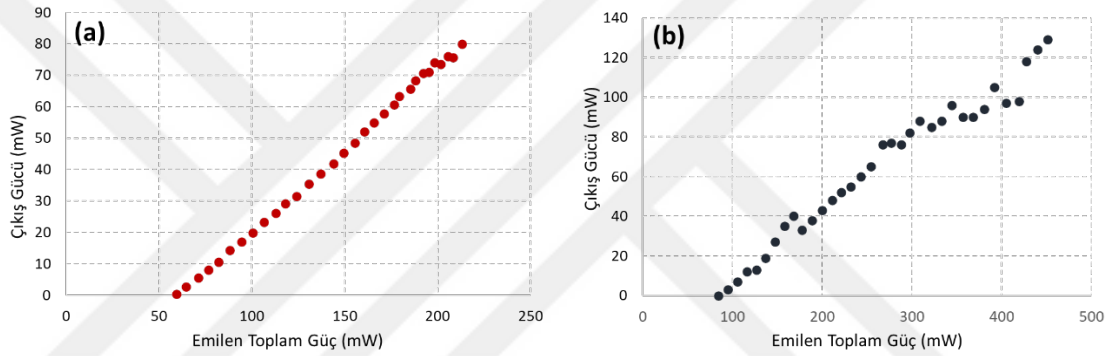
Tez çalışmasının diyot-pompalı Yb-katkılı lazer sistemlerinin farklı rejimler altında incelenmesini kapsayan bu bölümünü bitirirken, bu ve takip eden iki alt bölüm altında, tekli-mod diyot ile pompalanan sistemlerden sürekli-dalga ve mod-kilitli rejimlerde elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Şekil 4.42’de, daha önce Şekil 3.22’de terminal karakteristikleri gösterilmiş olan 960 nm merkezli 260 mW’a kadar çıkış gücüne sahip iki adet diyot ile pompalı sürekli-dalga Yb:LLF lazer sistemi gösterilmektedir.



Şekil 4.42. İki tarafından tek-modlu diyotlarla pompalanmış sürekli-dalga Yb:LLF lazer kavite şeması

Verilen standart x-katlı lazer kavite yapısında, önceki kısımlarda çok-modlu diyot pompalı sistemlerde kullanılan %25-Yb katkılı Yb:LLF lazer kristali kullanılmıştır. Pompalama işleminde pompa ışını önce bir asferik lens ($f=4,5$ mm) ile kolime edilir ve ardından 60 mm'lik bir akromatik çift ile Yb:LLF kristalinin içinde ~ 25 μ m yarıçaplı dairesel bir ışın beline odaklanır. Lazer kavitesi ise, daha önce Şekil 3.24’te tanımlanmış ayna seti içerisinde seçilmiş, eğrilik yarıçapı 50 mm olan iki adet ayna, bir adet düz ayna ve %1 iletim değerine sahip çıkış kuplöründen oluşmaktadır. Sürekli-dalga lazer operasyonunda lazer çıkışının farklı pompa güçlerinde ölçeklenme davranışının gösterilmesinde, tek taraflı pompalı sistem için ölçülen çıkış gücü değişimi Şekil 4.43a’da gösterilmiştir. Buradan yorumla, emilen pompa gücüne göre 60 mW pompa eşik gücünde başlayan lazer operasyonu %52 eğim verimliliği ile 80 mW çıkış gücüne kadar çıkabilmektedir. Burada verilen doğrusal artışın sağlanması, pompa diyotunun termoelektrik soğutma ile 10 °C sıcaklığa soğutulması ile mümkün olmuştur. Diyot sıcaklığının daha yüksek sıcaklıklarda tutulduğu aksi durumlarda, daha önce Şekil 3.22b’de de gösterildiği üzere, artan besleme akımları ile diyot emisyon spektrumu Yb:LLF kazanç ortamının maksimum absorpsiyon dalgaboyundan daha uzun dalgaboylarına kayarak belli pompa güçlerinin yukarısı için lazer çıkışında eğim verimliliğinde düşüşe sebep olmaktadır. Şekil 4.43b’de ayrıca iki diyot pompasının da aynı akım değerlerinde beslendiği durum için kavite çıkışında ölçülen güç çıkış

karakteristiği gösterilmiştir. Burada elde edilen sonuç tek-pompa sistem ile kıyaslandığında, emilen pompa gücü cinsinden lazer çıkışının 60 mW'dan 100 mW'a çıktığı, lazer eğim verimliliğinin ise %52'den %26'ya düştüğü gözlemlenmektedir. Bu şekilde beklentiler dışında ortaya çıkan karakteristiğin her iki taraftan pompalı durumda ortaya çıkan termal etkilerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çıkarımı destekler nitelikte başka bir gözlem ise iki taraftan pompalı lazer kavitesinin maksimum sürekli-dalga çıkış gücü verecek şekilde optimize edilmesi sırasında ortaya çıkar. Bu doğrultuda takip edilen klasik yöntemde, iki diyottan herhangi birinin açık olduğu durum için sistem optimize edilir. Daha sonra ikinci diyot da aktive edilerek lazer çıkışında maksimum çıkış gücü elde edilecek şekilde hizalaması gerçekleşir. Optimize edilmiş son sistemde diyotlar bağımsız olarak ayrı ayrı aktive edildiğinde (aynı besleme akımında) benzer çıkış güçlerinin elde edilmesi beklenir. Ancak daha önce Cr:Colquiriite kazanç ortamları için de gözlenen bu davranıştan yerine, Yb:LLF lazer sisteminde tahmin edilen termal etkilerden ötürü, iki taraflı pompalamada lazer verimliliğini düşüren bir durum ortaya çıkmaktadır.

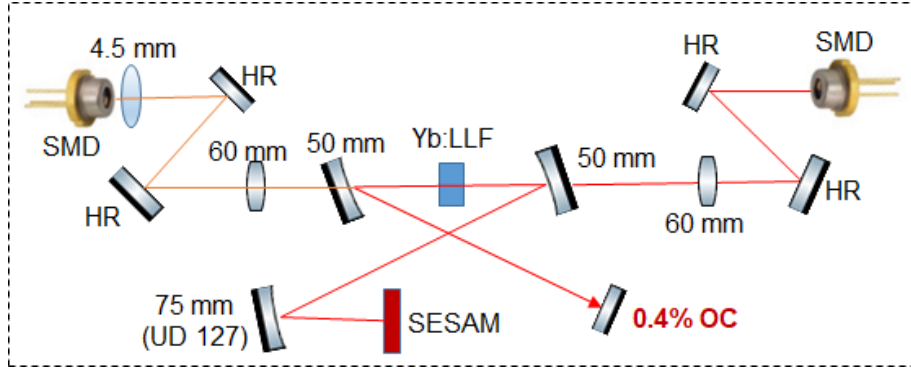


Şekil 4.43. a) Tek; b) iki adet tek-modlu diyot ile pompalanan sürekli-dalga Yb:LLF lazer sistemlerinin ölçülmüş güç ölçekleme karakteristiği

Takip eden alt bölümlerde, iki tarafından diyot pompalı Yb:LLF lazer kavitesinde SESAM ile mod-kilitli operasyonun elde edilmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalar sunulmaktadır.

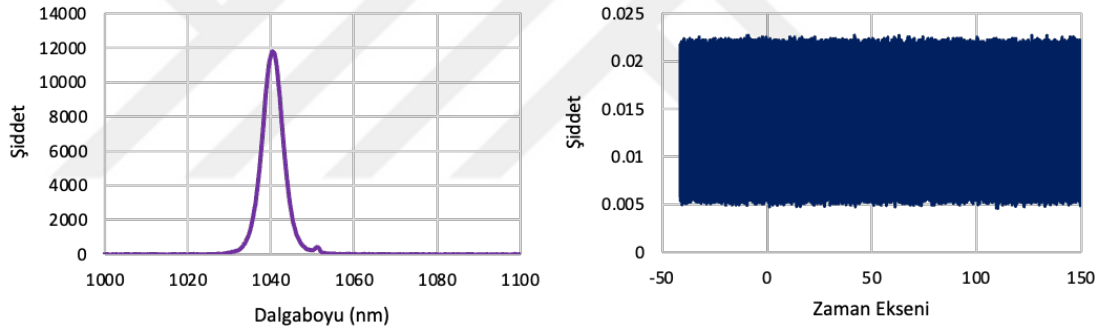
4.3.2.7. Tek-modlu diyot pompalı Yb:LLF lazer sisteminde SESAM ile mod-kilitli operasyon

Tek-modlu lazer diyotları ile pompalanan Yb:LLF lazer sistemlerinde SESAM ile mod-kilitli operasyon aracılığı ile femtosaniye darbelerin üretiminin araştırıldığı çalışmalar dahilinde, Şekil 4.44'te gösterilen kavite kurulumu gerçekleştirilmiştir. Verilen kavite kurulumunda, lazer çıkışında kararlı mod-kilitli operasyonun elde edilmesinde SESAM elemanının doyurulması için gerekli kritik kavite içi darbe enerjilerine ulaşmak amacı ile iki diyot ile pompalama gerçekleştirilmiştir. Mod-kilitleme deneylerinde, klasik x-katlı kavite yapısında SESAM üzerinde optimum lazer modunu sağlayacak eğrilik yarıçapına ve uygun dispersiyon karakteristiğine sahip bir ayna ile SESAM üzerindeki lazer mod büyüklüğü optimize edilir. Diğer taraftan, kararlı mod-kilitli operasyon için gerekli kavite içi güç miktarlarının elde edilmesinde farklı iletim değerlerine sahip çıkış kuplörleri ile denemeler yapılarak, lazer çıkışında kararlı mod-kilitli çıkış sağlayan Şekil 4.44'te verilen kavite yapısına ulaşılmıştır.



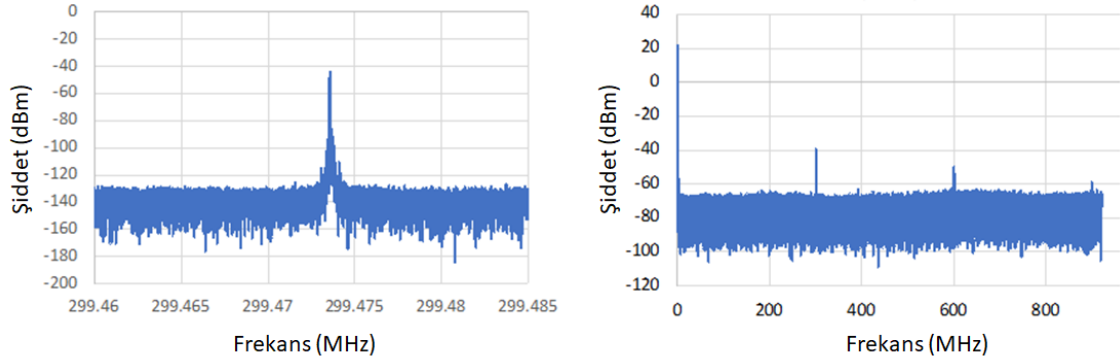
Şekil 4.44. İki taraftan SMD pompalı, SESAM ile pasif mod-kilitli 300 MHz tekrarlama frekanslı Yb:LLF femtosaniye osilatör şematığı

Verilen kavite şematığında 50 mm eğrilik yarıçapına sahip dikroik aynalar, karakteristikleri daha önce Şekil 3.24'te verilmiş olan ve -200 fs^2 dispersiyon değerine sahip ayna seti içerisinde seçilmiştir. SESAM üzerine odaklama için kullanılan 75 mm eğrilik yarıçapına sahip kavite aynası ise 1010-1200 nm arasında $R > 99.9\%$ yansımaya değeri ve sıfır etrafında dispersiyona, 800-970 nm aralığında (pompa bandı) ise 98% 'den fazla iletme sahiptir.



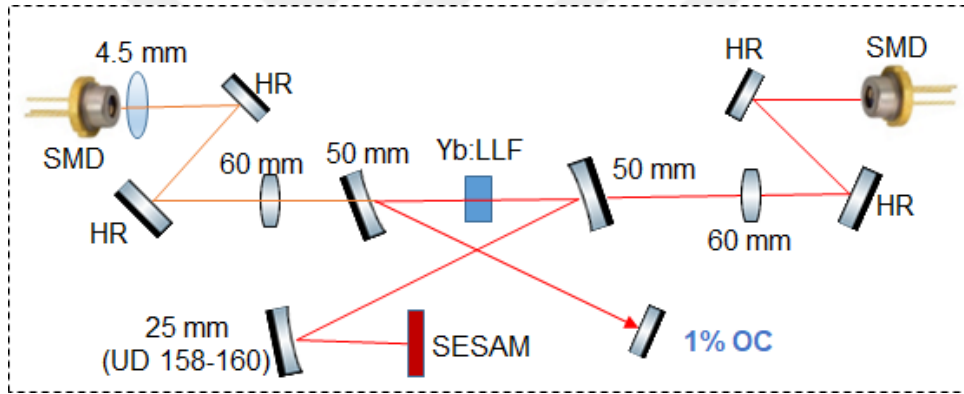
Şekil 4.45. SMD pompalı, mod-kilitli Yb:LLF lazer (0.4% OC ile) çıkışında **a)** ölçülen optik spektrum, **b)** osiloskopta kaydedilen darbe dizisi

Verilen kavite yapısı ile SMD pompalarının maksimum çıkış gücü ($\sim 260 \text{ mW}$) ile kullanıldığı durumda, 0.4% iletimli çıkış kuplajı altında lazer çıkışında 24.4 mW ortalama çıkış gücü elde edilmiştir. Deneyler sırasında erişim dahilinde bir otokorelatör cihazı bulunmadığı için, sürekli-dalga mod-kilitli lazer çıkışındaki darbe uzunlukları doğrudan ölçülememiştir. Şekil 4.45a'da verilen optik spektrum incelendiğinde, 1040 nm etrafında yaklaşık 5.2 nm yarı maksimumda tam genişliğe sahip ölçülen spektrum ile, lazer çıkışında Fourier transform limitine yakın soliton darbelerin varlığı kabulü altında 218 fs uzunluğunda ve sech^2 dağılıma sahip darbelerin üretildiği tahmin edilebilir. Şekil 4.46'da ise lazer çıkışında elde edilen mod-kilitli darbe dizisinin ölçülmüş RF spektrumları verilmiştir. Şekil 4.46a'da gösterilen RF spektrumu ile, lazer çıkışının 299 MHz temel tekrarlama frekansına sahip olduğu görülmektedir. Burada ayrıca Şekil 4.46b'de verilen geniş RF spektrum ölçümünde temel tekrarlama frekansının birinci ve ikinci harmonikleri de görülmektedir. Burada verilen harmonikler dışında başka yerel piklerin yokluğu, tek modlu lazer çıkışı ile kararlı mod-kilitli operasyonun varlığını gösterir niteliktedir.



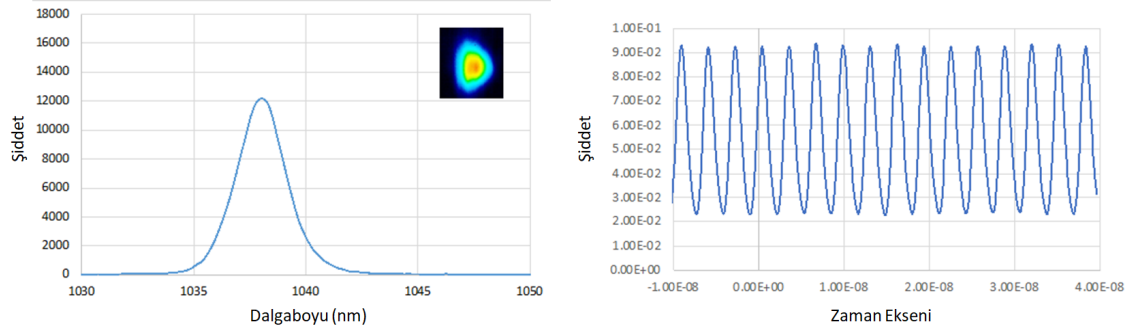
Şekil 4.46. SMD pompalı SESAM ile mod-kilitli Yb:LLF lazer (%0.4 OC ile) çıkışının **a)** 299 MHz temel frekans etrafında; **b)** geniş aralıkta ölçülmüş RF spektrumu

Buradan verilen sisteme ek olarak, verilen iki SMD ile pompalı sistemde mod-kilitli operasyonda elde edilen çıkış gücünün iyileştirilmesi kapsamında farklı konfigürasyonlar altında lazer sistem denemeleri gerçekleştirilmiştir. Eğitici bir örnek oluşturması açısından, bu denemeler arasından, Şekil 4.47’de verildiği şekli ile daha yüksek güçlerde femtosaniye çıkışı sağlayan lazer operasyonunu inceleyelim.



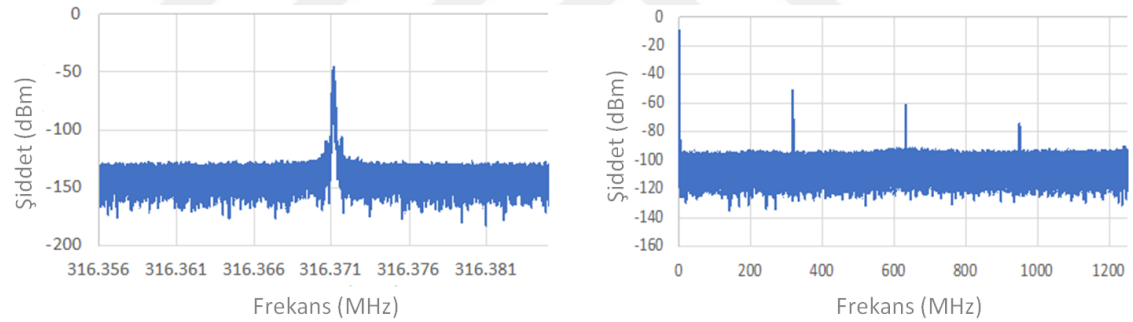
Şekil 4.47. İki taraftan SMD pompalı, SESAM ile pasif mod-kilitli 300 MHz tekrarlama frekanslı Yb:LLF femtosaniye osilatör (%1 OC ile) şematığı

Bu kavitede öncelikle, bir önceki (Şekil 4.44’te verilmiş) kavite yapısından farklı olarak, sabit pompalama gücü altında daha yüksek çıkış güçleri elde edilmesi adına daha yüksek iletme sahip (%1) çıkış kuplörü kullanılmıştır. Ancak, çıkış kuplörü iletiminin artırılması kavite içi darbe enerjilerini düşüreceği için SESAM’ın kararlı mod-kilitli operasyonunu başlatmasını sağlayacak kritik enerji eşiğine erişilmesini zorlaştıracaktır. Keza sistemde sadece çıkış kuplörünün değiştirilerek sistemin geri kalanının korunduğu durumda lazer çıkışında mod-kilitli atımlar elde edilememiştir. Bu sebeple, verilen daha düşük kavite güçlerinde SESAM üzerinde daha yüksek seviyede ışın akısının elde edilerek doyurulmanın gerçekleşmesi amacıyla daha küçük eğrilik yarıçapına sahip (25 mm) bir odaklama aynası SESAM önünde kullanılmıştır. Ancak bu eğrilik yarıçapına sahip odaklama aynası sadece daha önce Şekil 3.24’te karakteristiği tanımlanan ve -200 fs^2 dispersiyona sahip ayna seti içerisinde bulunduğu için, bu aynanın kullanımı, bir önceki sisteme (Şekil 4.44) kıyasla daha yüksek mutlak dispersiyon değerlerine ve daha kısa darbe çıkışlarına sebep olmaktadır.



Şekil 4.48. SMD pompalı, mod-kilitli Yb:LLF lazer (%1 OC ile) çıkışında **a)** ölçülen optik spektrum, **b)** osiloskopta kaydedilen darbe dizisi

Özetle, her iki SMD pompa diyotunun maksimum güç çıkışı ile kullanıldığı durumda, lazer çıkışında 1037 nm merkezli dalgaboyu ile sürekli-dalga mod-kilitli rejimde ortalama 51 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Bu çıkış gücü ile lazer çıkışında ölçülmüş optik spektrum Şekil 4.48a’da (ışın profili iç görselde verilmiş) gösterilmiştir. Ölçülen spektrum daha yüksek mutlak dispersiyon değerinden ötürü daha kısa (2.5 nm) bir maksimum yarısi tam genişlik değerine sahiptir. Bu da lazer çıkışında Fourier transform limitinde sech² dağılımına sahip darbelerin kabulü altında 452 fs darbelerin varlığını işaret etmektedir. Deneyler sırasında otokorelatöre erişim imkânı bulunmadığı için lazer çıkışında elde edilen darbe uzunlukları doğrudan ölçülememiştir.



Şekil 4.49. SMD pompalı SESAM ile mod-kilitli Yb:LLF lazer (%1 OC ile) çıkışının **a)** 316 MHz temel frekans etrafında; **b)** geniş aralıkta ölçülmüş RF spektrumu

Son olarak, 51 mW çıkış gücü ile lazer çıkışında elde edilmiş femtosaniye darbe dizisinin ölçülmüş RF spektrumu Şekil 4.49’da gösterilmiştir. Burada yine Şekil 4.49a’da verilen ve temel tekrarlama frekansı etrafında ölçülmüş RF spektrumunda, lazer çıkışındaki femtosaniye darbelerin 316 MHz tekrarlama frekansına sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.49b’de verilen daha geniş RF spektrum aralığında verilmiş ölçümde ise temel tekrarlama frekansının ikinci ve üçüncü harmonikleri görülmektedir.

5. SONUÇLAR

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen deneysel faaliyetler ile, geçiş metali iyonu (Cr^{+3}) katkılı Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF kazanç ortamlarında spektroskopik özelliklerin sıcaklığa bağlı karakterizasyonu ve pasif Q-anahtarlama operasyonun gösterilmesinde uygulanan teknik metotlar elde edilen sonuçlar ile birlikte sunulmuştur. Diyot pompalı nadir toprak element iyonu (Yb^{+3}) katkılı Yb:YLF ve Yb:LLF kazanç ortamları ile sürekli-dalga ve pasif mod-kilitli rejimlerin gösterilmesi ve mod-kilitli rejimde basit ve ucuz ve düşük maliyetli kavite yapıları ile tekrarlama frekansının GHz mertebesine ölçeklenmesi kapsamında elde edilen sonuçlar da detaylı şekilde rapor edilmiştir. Önceki bölümlerde sunulan yöntem ve sonuçları tamamlayıcı nitelikte, takip eden alt bölümlerde çıkarımlar yapılarak olası gelecek çalışmaların imkân ve kapsamı tartışılmaktadır.

5.1. Cr:Colquiriite'lerde Emisyon ve Floresan Ömrünün Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Tez çalışmasının bu alt kapsamı dahilinde Cr:LiCAF, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGaF ile gerçekleştirilen deneylerde, sıvı nitrojen soğutmalı lazer sistemleri veya oda sıcaklığında yüksek güç pompalama altındaki lazer/yükselteç sistemleri için pratik değeri olan floresan ömrü ve emisyon kesitinin sıcaklık bağımlılığı (78-618 K aralığında) yüksek çözünürlükle (floresan ömrü için 1 K artışlarla ve ECS ölçümleri için 5 K artışlarla) ölçülmüştür. Bu çalışmalar ile özellikle Cr:LiSGaF kazanç ortamındaki floresan ömrü bildiğimiz kadarıyla ilk kez 78-300 K aralığındaki sıcaklıklarda ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlardan özetle, incelenen üç Cr:Colquiriite kristalinde de literatürde yer alan geçmiş çalışmalarda yapılan kabullerin aksine 300-78 K aralığında ışınlımlı ömrün sıcaklığa bağlı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Bu değişim Cr:LiCAF'da 1.15 kat artış (170 μs 'den 195 μs 'ye), Cr:LiSAF'da 1.08 kat düşüş (71 μs 'den 66 μs 'ye) ve Cr:LiSGaF 'de hafif bir 1.04 kat düşüş (88 μs 'den 85 μs 'ye) şeklinde kendini göstermektedir. Elde edilen deneysel veriler ile ayrıca, ilgili sıcaklık aralıklarında floresan ömrü, ışınlımlı ömür ve kuantum verimi için analitik tanım denklemleri ve ilgili uyum katsayıları verilmektedir.

Emisyon kesitlerinin ($E//a$ ve $E//c$ eksenlerinde) sıcaklığa bağlı değişiminin incelendiği deneylerde kriyojenik sıcaklık davranışına göz atacak olursak, 78 K'de ölçülen emisyon spektrumu, Cr:LiSAF ve Cr:LiSGAF'da görülen yapılandırılmamış tek geniş bant davranışına kıyasla Cr:LiCAF için titreşimsel olarak yapılandırılmıştır. Oda sıcaklığından (300 K) kriyojenik sıcaklıklara (78 K) soğutma ile $E//c$ polarizasyonundaki tepe ECS değerinin Cr:LiCAF'da ~1.2 kat, Cr:LiSAF'da ~1.4 kat ve Cr:LiSGAF'da ~1.3 kat arttığı gözlenirken, $E//a$ ekseninde nispeten sabit kalmıştır (Cr:LiCAF'daki hafif bir artış hariç). Bu şekilde, $E//c$ eksenindeki emisyon şiddetinin $E//a$ eksenine kıyasla üstünlüğünün, kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile daha da büyüdüğü gözlemlenmektedir. Bu da Cr:Colquiriite'ler ile $E//c$ ekseninin kriyojenik sıcaklıklarda kullanımını desteklemektedir. Ayrıca 78 K'de ölçülen emisyon şiddetinin yarı maksimumdaki tam genişlik, Cr:LiCAF'da 100 nm, Cr:LiSAF'da 140 nm ve Cr:LiSGAF'da 123 nm olarak hesaplanmıştır (oda sıcaklığındaki değere kıyasla Cr:LiCAF'da 1.25 kat, Cr:LiSAF'da 1.28 kat ve Cr:LiSGAF'da 1.27 kat daralır). Kriyojenik sıcaklıklardaki bu bant genişliği, 50-fs altı seviyedeki darbelerin üretilmesi/yükseltilmesini destekler niteliktedir.

Cr:Colquiriite'ler için sıcaklığa bağlı spektroskopik özelliklerin ölçüldüğü deneylerden çıkarımla, kriyojenik soğutma ile emisyon şiddetinde meydana gelen

iyileşme orta seviyededir (1.2 ila 1.4 kat). Öte yandan, kriyojenik sıcaklık operasyonunda, ışımsız geçişlerin önemli hale geldiği sıcaklık bölgesinden uzakta olunduğundan, oda sıcaklığındaki sistemlere kıyasla en az 2-3 kat daha yüksek pompa güçlerinin uygulanması mümkün olabilir. Ayrıca, kriyojenik sıcaklıklara soğutma ile malzemelerin termal iletkenliğinde birkaç kat iyileşme de beklenmektedir (Brown vd. 2016). Bu nedenle, Yb-tabanlı malzemelerde olduğu gibi, kriyojenik olarak soğutulmuş Cr:Colquiriite lazer / amplifikatör sistemlerinde elde edilebilir çıkış güçlerinde önemli miktarlarda iyileşmenin mümkün olduğu düşünülmektedir. İlgili alt bölümler altında Cr:Colquiriite'lere ait spektroskopik yönle odaklanılan bu çalışma, Cr:Colquiriite lazerlerin kriyojenik sıcaklıklardaki potansiyelini tam olarak ortaya çıkarmak üzere atılan ilk adım olarak tanımlanabilir. Ancak, bu potansiyelin ortaya çıkarılmasında ve özellikle kriyojenik Cr:Colquiriite lazer sistemlerinin doğru modellenmesi için termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı, kırılma indisi gibi termomekanik ve termo-optik parametrelerin sıcaklığa bağımlılığının nitel ne nicel karakterini ortaya çıkarmak için daha fazla çalışma gerekmektedir

5.2. Pasif Q-Anahtarlama Cr:LiCAF Lazeri

Önceki bölümlerde gerçekleştirilen spektroskopik özellik karakterizasyonlarına ek olarak, diyot-pompa Cr:Colquiriite lazer kurulumları ile çeşitli rejim operasyonlarının gösterilmesi kapsamında, AlGaAs tabanlı SESAM'ların kullanıldığı diyot-pompa bir Cr:LiCAF lazerinde, pasif Q-anahtarlı operasyon ilk kez raporlanmıştır. Çıkışında 1.8 W'a kadar güce sahip çok-modlu bir diyot ile pompalama altında sürekli-dalga lazer deneylerinde, %15 eğim verimliliği ile yaklaşık 0.5 W çıkış gücüne ulaşılmıştır. Q-anahtarlı çalışmada lazer, yaklaşık 125 mW ortalama güçle 800 nm yakınında 1.62 μ s'ye kadar darbeler üretti. Q-anahtarlı darbe dizisinin tekrarlama frekansının 18-40 kHz arasında değiştiği pompa güçlerinde 3.5 μ J'e kadar darbe enerjileri ve 800 nm civarında 1.9 W'a kadar tepe güçleri elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, SESAM Q anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerden, kavite gidiş-dönüş süresini azaltan daha kompakt kaviteler kullanılarak, Eşitlik (4.9)'dan yorumlandığı üzere, daha kısa darbe genişlikleri elde edilebileceği düşünülmektedir. Elde edilebilir darbe genişliklerini azaltmak için daha büyük bir modülasyona sahip bir SESAM da kullanılabilir. Bununla birlikte, Bununla birlikte, daha yüksek modülasyon derinlikleri ancak daha düşük pasif kayıp ve daha az termal sorunlara sahip düşük Cr-katkılı Cr:LiCAF örneği (%1-3) kullanılarak elde edilebilecek gelişmiş kazançla sahip bir sistemde mümkün olacaktır. Ek olarak, daha düşük Cr-katkısı, ısı yükünün kristal uzunluğu boyunca daha iyi dağıtılması yoluyla daha yüksek pompa gücü seviyelerinin kullanımını kolaylaştırabilir ve bu da daha büyük bir modülasyon derinliğine sahip bir SESAM kullanımına izin verebilir. Ayrıca, daha kısa kavitelerin kullanılmasının SESAM'ın mod-kilitleme eğilimini de azalttığı unutulmamalıdır. Burada SESAM'ın geri kazanım süresi kavite gidiş-dönüş süresi mertebesinde veya daha büyükse, mod-kilitleme operasyonu gerçekleştirilmeyecektir (Keller vd. 1996). Bu bağlamda, daha büyük bir geri kazanım süresine sahip bir SESAM kullanımı, saf Q-anahtarlı lazerlerin oluşturulmasına yardımcı olabilir. İdeal olarak, AlGaAs tabanlı soğurucuların geri kazanım süreleri birkaç ns aralığında olacak şekilde tasarlanabilir ve bu da saf Q-anahtarlama işleminin elde edilmesinde büyük fayda sağlayabilmektedir. Kısacası, sistemin uygun mühendisliği ile SESAM ile Q-anahtarlı Cr:LiCAF lazerlerin, bu ilk çalışmada elde edilenlere kıyasla daha iyi darbe genişlikleri ve tepe güçleri üretme potansiyeline sahip olduğu çıkarımına

varılmaktadır.

5.3. Gigahertz Tekrarlama Frekanslı Femtosaniye Yb:YLF Lazeri

Diyot-pompa Yb-katkılı lazer sistemlerinin SESAM ile mod-kilitlemesi ile lazer çıkışında femtosaniye atmaların elde edilmesinin amaçlandığı çalışmalar kapsamında, Yb:YLF kristali ile oluşturulmuş ve her iki tarafından ucuz maliyetli tek-modlu diyotlarla pompalanan SESAM ile mod-kilitli bir sistemde, tekrarlama frekansının GHz mertebesine ölçeklenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda gerçekleştirilen deneylerde rapor edilen sonuçlar, Yb:YLF kazanç ortamında GHz tekrarlama frekansında femtosaniye darbelerin gösterildiği ilk çalışma olma niteliği taşımaktadır. Bahsi edilen kompakt lazer sisteminde toplam 520 mW gücünde pompalama ile 1.1 GHz tekrarlama hızında 40 mW ortalama güçle 210 fs uzunluğunda darbeler elde edilmiştir. Burada soliton darbe şekillendirme mekanizması, kavite içi dispersiyon yönetimi için özel ayna tasarımları kullanılarak ve nispeten uzun bir Yb: YLF kristalinde küçük bir lazer mod boyutu oluşturularak elde edilir (Q-anahtarlama kararsızlıklarından kaçınmak için). Pratik çalışma durumunda, mod-kilitlemenin başladığı eşik güç ve üzerinde pompalanan sistem kendi kendine mod-kilitli operasyonu başlatabilir nitelikte olup, bu durumda çevresel dalgalanmalardan etkilenmeden çalışabilmektedir. Lazer sisteminin ek ölçümler ile karakterize edilmesinde kapsamında bağıl şiddet gürültüsü 1 Hz ve 1 MHz arasındaki entegrasyonu %0.42'lik bir entegre RIN ile sonuçlanır. Gürültü ölçümlerinden çıkarımla, ilgili ölçüm aralığının 190Hz-1MHz arasındaki görece yüksek frekanslarda, Yb:YLF'in ~2 ms'lik üst durum ömrü, özellikle 500 Hz'den yüksek frekanslarda harici gürültü etkilerini bastırarak bu aralıkta düşük güç yoğunlukları ölçülmesine yol açar. Diğer taraftan, 190 Hz'den düşük frekanslarda ölçülen görece yüksek lazer gürültüsü çoğunlukla mekanik pertürbasyonlar (soğutma gibi) ve pompa kaynağının çıkış gürültüsü ile ortaya çıkar. Ölçülen lazer gürültüsü pompa stabilizasyon teknikleri ve fiziksel lazer kurulumu etrafında izole edici kapaklar kullanılarak daha da azaltılabilir Burada raporlanan sistemde çıkış gücü mevcut pompa gücü ile sınırlı olmakla birlikte, daha güçlü pompalama yöntemleri ile (fiber bağlı lazer diyotları gibi) kullanılarak güç ölçeklemesi gerçekleştirilebilmektedir.

5.4. Diyot pompa Yb:LLF lazerlerinde sürekli-dalga, dalgaboyu ayarlama ve SESAM ile mod-kilitleme

Çoklu-mod lazer diyeti ile pompalanmış Yb:LLF kazanç ortamı ile kurulmuş sistemlerden elde edilen sonuçlar için, ilk olarak, tek emitörlü ve çoklu-modlu çıkışa sahip bir lazer diyeti (RPMC Lasers, LDX-3A10-960-C) ile π -polarizasyonunda (E//c) pompalama (960 nm'de 10 W'a kadar) altında sürekli-dalga lazer karakteristikleri elde edilmiştir. İletim değerleri %0.5-60 arasında değişen dokuz farklı çıkış kuplajının kullanımı ile elde edilen sonuçlarda en yüksek ortalama çıkış gücü (3.2 W) ve eğim verimliliği (%42.3) performansın %5 ilime sahip çıkış kuplörü ile elde edilmiştir. Sürekli-dalga rejiminde lazer dalgaboyunun ayarlanabilme potansiyelini ortaya 25° dalış açısına ve 2 mm kalınlığa sahip yüzey dışı optik eksenli kristal kuvars çift kırılımlı filtresi kaviteye dahil edilerek lazer çıkışındaki dalgaboyunu ayarlamak için kullanılır. Burada yine %0.5-60 arasında iletme sahip dokuz farklı çıkış kuplörü ile 996-1073 nm aralığında dalgaboyu ayarlanabilirliği gösterilmiştir. Burada elde edilen sonuçlar Yb:LLF ile şimdiye kadar elde edilmiş (önceki çalışmalarda 1029-1069 rapor edilmiş) en geniş dalgaboyu ayarlama aralığı olma özelliği taşımaktadır.

Tez çalışmasının bu alt bölümünde ayrıca, önceki kısımda bahsedilen çok-modlu diyot ve yine 960 nm etrafında ışıma yapan ve 260 mW çıkış gücüne sahip tekli-mod diyotlar ile pompalanmış Yb:LLF lazer sistemlerinde SESAM ile pasif mod-kilitleme üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Özetle, çok-modlu diyot ile pompalanmış ve SESAM mod-kilitli lazer kurulumlarında, temel olarak toplam kavite dispersiyonu, pompalama miktarı ve SESAM üzerine odaklama miktarının optimize edilmesi ile (i) 200 MHz’de, 1.7-3.3 W ortalama çıkış gücünde, 337 fs’ye varan kısalıkta darbeler, (ii) 257 MHz’de, 1.5-3 W ortalama çıkış gücünde, 181 fs’ye varan kısalıkta darbeler, (iii) 214 MHz’de, 380-600 mW ortalama çıkış gücünde, 110 fs’ye varan kısalıkta darbeler elde edilmiştir. Ek olarak, yükseltilmiş frekanslarda mod-kilitli operasyon denemeleri dahilinde ise 355 MHz’de mod-kilitli 110 femtosaniye Yb:LLF lazeri 150-220 mW ortalama çıkış güçleri ile gösterilmiştir. Burada deneyler sırasında erişilebilir durumda olan ve benzer geometrik şekil ve Yb-katkılama seviyesindeki (25%) Yb:YLF ve Yb:LLF kristallerinin çok yakın lazer özelliklerine sahip olduklarını göstermek adına, bu alt bölüm altında tanımlanan kavitedeki Yb:LLF kristali Yb:YLF kristali ile değiştirilmiştir. İlgili kavitede Yb:YLF ile yapılan denemelerde aynı frekans bölgesinde mod-kilitli 110 femtosaniye Yb:YLF lazeri 200-280 mW ortalama çıkış güçleri ile gösterilmiştir. Her iki lazer sistemi için, ilgili lazer çıkışlarında ölçülen mod-kilitli operasyona ait optik spektrumlar incelendiğinde, iki sistemde de 1030 nm etrafında merkezlenmiş optik spektrumların varlığı gözlemlenir. Elden edilen sonuç ve kıyaslara göre, aynı geometri ve Yb-katkılama miktarına sahip Yb:LLF ve Yb:YLF malzemelerinin kullanıldığı lazer kurulumları ile benzer davranış ve nicel karaktere (örn. ortalama çıkış gücü, atma uzunluğu, optik spektrum) sahip mod-kilitli lazer operasyonu elde edilmiş ve iki kristal için tanımlayıcı özelliklerin benzer olması pratik uygulamalar açısından gösterilmiştir.

Son olarak, tek-modlu diyotlar (960 nm, 260 mW) ile pompalı Yb:LLF lazer sistemlerinde sürekli-dalga lazer operasyonu incelenmiş ve tek diyotlu pompalama için 60 mW pompa eşik gücünde başlayan lazer operasyonu %52 eğim verimliliği ile 80 mW çıkış gücüne kadar çıkabildiği gösterilmiştir. SESAM ile mod-kilitli lazer kurulumlarında ise farklı iletme sahip çıkış kuplörlerinin kullanımı ile, iki diyot ile pompalı durumda 51 mW’a varan ortalama çıkış gücüne sahip femtosaniye darbe dizileri elde edilmiştir.

6. KAYNAKLAR

- A. Rohrbacher, O. E. Olarte, V. Villamaina, P. Loza-Alvarez, and B. Resan. 2017. Multiphoton imaging with blue-diode-pumped SESAM-modelocked Ti:sapphire oscillator generating 5 nJ 82 fs pulses, *Opt. Express* 25, 10677–10684.
- Agnesi, A., Greborio, A., Pirzio, F., & Reali, G. 2010. 80-fs Nd:silicate glass laser pumped by a single-mode 200-mW diode. *Optics express*, 18 10, 10098-103 .
- Agnesi, A., Pirzio, F., & Reali, G. 2009. Low-threshold femtosecond Nd:glass laser. *Optics express*, 17 11, 9171-6.
- Akbari, R., & Major, A. 2022. Development of a diode-pumped high-power continuous-wave Yb:LLF laser. LASE.
- Alfieri, C.G., Waldburger, D., Link, S.M., Gini, E., Golling, M., Eisenstein, G., & Keller, U. 2017. Optical efficiency and gain dynamics of modelocked semiconductor disk lasers. *Optics express*, 25 6, 6402-6420 .
- Andrews, Lempicki, McCollum, Giunta, Bartram, & Dolan. 1986. Thermal quenching of chromium photoluminescence in ordered perovskites. I. Temperature dependence of spectra and lifetimes. *Physical review. B, Condensed matter*, 34 4, 2735-2740.
- Anwar, A., Perumangatt, C., Steinlechner, F., Jennewein, T., & Ling, A. 2020. Entangled photon-pair sources based on three-wave mixing in bulk crystals. *The Review of scientific instruments*, 92 4, 041101.
- Aschwandten, A., Lorensen, D., Unold, H.J., Paschotta, R., Gini, E., & Keller, U. 2005. 10GHz passively mode-locked external-cavity semiconductor laser with 1.4W average output power. *Applied Physics Letters*, 86, 131102.
- Avram, C.N., Drăgănescu, G.E., & Avram, N.M. 2003. Jahn–Teller Effect in Laser Crystal LiCaAlF₆: Cr³⁺. *Advances in Quantum Chemistry*, 44, 527-534.
- Baer, C.R., Kränkel, C., Saraceno, C.J., Heckl, O.H., Golling, M., Peters, R., Petermann, K., Südmeyer, T., Huber, G., & Keller, U. 2010. Femtosecond thin-disk laser with 141 W of average power. *Optics letters*, 35 13, 2302-4.
- Balembois, F., Druon, F., Falcoz, F., Georges, P., & Brun, A. 1997. Performances of Cr:LiSrAlF(6) and Cr:LiSrGaF(6) for continuous-wave diode-pumped Q-switched operation. *Optics letters*, 22 6, 387-9.
- Balembois, F., Falcoz, F., Kerboull, F., Druon, F., Georges, P.M., & Brun, A. 1997. Theoretical and experimental investigations of small-signal gain for a diode-pumped Q-switched Cr:LiSAF laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 33, 269-278.
- Bartels, A., & Kurz, H. 2002. Generation of a broadband continuum by a Ti:sapphire femtosecond oscillator with a 1-GHz repetition rate. *Optics letters*, 27 20, 1839-41.
- Bartels, A., Heinecke, D.C., & Diddams, S.A. 2008. Passively mode-locked 10 GHz femtosecond Ti:sapphire laser. *Optics letters*, 33 16, 1905-7.
- Bartels, A., Heinecke, D.C., & Diddams, S.A. 2008. Passively mode-locked 10 GHz femtosecond Ti:sapphire laser. *Optics letters*, 33 16, 1905-7.

- Bensalah, A., Guyot, Y., Brenier, A., Sato, H., Fukuda, T., & Boulon, G. 2004. Spectroscopic properties of Yb³⁺: LuLiF₄ crystal grown by the Czochralski method for laser applications and evaluation of quenching processes: a comparison with Yb³⁺: YLiF₄. *Journal of Alloys and Compounds*, 380, 15-26.
- Bensalah, A., Guyot, Y., Ito, M., Brenier, A., Sato, H., Fukuda, T., & Boulon, G. 2004. Growth of Yb³⁺-doped YLiF₄ laser crystal by the Czochralski method. Attempt of Yb³⁺ energy level assignment and estimation of the laser potentiality. *Optical Materials*, 26, 375-383.
- Bondaz, T.A., McInerney, J.G., Moloney, J.V., & Jones, R.J. 2023. Broadband 1.5 GHz VECSEL-Based Laser System for High Speed Multicontrast Nonlinear Imaging. *IEEE Photonics Technology Letters*, 35, 589-592.
- Boulon, G., Guyot, Y., Ito, M., Bensalah, A., Goutaudier, C., Panczer, G., & Gäcon, J.C. 2004. From optical spectroscopy to a concentration quenching model and a theoretical approach to laser optimization for Yb³⁺-doped YLiF₄ crystals. *Molecular Physics*, 102, 1119 - 1132.
- Brasse, G., Loiko, P., Grygiel, C., Benayad, A., Lemarié, F., Zakharov, V., Veniaminov, A., Doualan, J.L., Braud, A., & Camy, P. 2021. Liquid Phase Epitaxy growth, structure and spectroscopy of highly-doped 20 at.% Yb³⁺:LiYF₄ thin films. *Journal of Luminescence*, 118071.
- Braun, B.D., Kärtner, F.X., Zhang, G.W., Moser, M.A., & Keller, U. 1997. 56-ps passively Q-switched diode-pumped microchip laser. *Optics letters*, 22 6, 381-3.
- Brown, D.C. 1997. Ultrahigh-average-power diode-pumped Nd:YAG and Yb:YAG lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 33, 861-873.
- Brown, D.C. 2005. The promise of cryogenic solid-state lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 11, 587-599.
- Brown, D.C., Tornegård, S., Kolis, J.W., McMillen, C.D., Moore, C., Sanjeewa, L.D., & Hancock, C. 2016. The Application of Cryogenic Laser Physics to the Development of High Average Power Ultra-Short Pulse Lasers. *Applied Sciences*, 6, 23.
- Brown, F.L., Wilson, K.R., & Cao, J. 1999. Ultrafast extended x-ray absorption fine structure (EXAFS)—theoretical considerations. *Journal of Chemical Physics*, 111, 6238-6246.
- Chai, B.H., Lefaucheur, J., Stalder, M., & Bass, M. 1992. Cr:LiSr(0.8)Ca(0.2)AlF(6) tunable laser. *Optics letters*, 17 22, 1584-6.
- Chang-shui, C., Yi-Shi, Z., Jin-wang, Y., Jian, F., & Song-hao, L. 2009. Experimental Study on Dual Wavelength and Dual Pulse Q-Switched Frequency Doubling on a Tunable Cr:LiSAF Laser. *Chinese Physics Letters*, 26, 094206.
- Chen, C., Fang, Y., Cho, C.Y., & Liang, H. 2020. Investigation of anisotropic thermal lens effect in a dual-polarized Nd:YLF laser. *Optics letters*, 46 1, 94-97.
- Cheng, H., Wang, W., Zhou, Y., Qiao, T., Lin, W., Xu, S., & Yang, Z. 2017. 5 GHz fundamental repetition rate, wavelength tunable, all-fiber passively mode-locked Yb-fiber laser. *Optics express*, 25 22, 27646-27651 .

- Choudhary, A., Lagatsky, A.A., Kannan, P., Sibbett, W., Brown, C.T., & Shepherd, D. 2012. Diode-pumped femtosecond solid-state waveguide laser with a 4.9 GHz pulse repetition rate. *Optics letters*, 37 21, 4416-8 .
- Coluccelli, N., Galzerano, G., Bonelli, L., Lieto, A.D., Tonelli, M., & Laporta, P. (2008). Diode-pumped passively mode-locked Yb:YLF laser. *Optics express*, 16 5, 2922-7.
- Coluccelli, N., Galzerano, G., Bonelli, L., Toncelli, A., Lieto, A.D., Tonelli, M., & Laporta, P. 2008. Room-temperature diode-pumped Yb³⁺-doped LiYF₄ and KYF₄ lasers. *Applied Physics B*, 92, 519-523.
- Coury, M., Carroll, D.C., Robinson, A.P., Yuan, X., Brenner, C.M., Burza, M., Gray, R.J., Lancaster, K.L., Li, Y., Lin, X.X., Maclellan, D.A., Powell, H., Quinn, M., Tresca, O., Wahlström, C., Neely, D., & McKenna, P. 2013. Injection and transport properties of fast electrons in ultraintense laser-solid interactions. *Physics of Plasmas*, 20, 043104.
- Cundiff, S.T., & Weiner, A.M. 2010. Optical arbitrary waveform generation. *Nature Photonics*, 4, 760-766.
- Debaes, C., Bhatnagar, A., Agarwal, D., Chen, R., Keeler, G.A., Helman, N.C., Thienpont, H., & Miller, D.A. 2003. Receiver-less optical clock injection for clock distribution networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 9, 400-409.
- Degnan, J.J. 1995. Optimization of passively Q-switched lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31, 1890-1901.
- DeLoach, L., Payne, S.A., Chase, L.L., Smith, L.K., Kway, W.L., & Krupke, W.F. 1993. Evaluation of absorption and emission properties of Yb³⁺ doped crystals for laser applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29, 1179-1191.
- 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. 2019. Cr:Colquiriite Lasers: Current status and challenges for further progress. *Progress in Quantum Electronics*.
- Demirbas, U., & Acar, D.A. 2016. Continuous-wave, quasi-continuous-wave, gain-switched, and femtosecond burst-mode operation of multi-mode diode-pumped Cr:LiSAF lasers. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 33, 2105-2113.
- Demirbas, U., & Baali, I. 2015. Power and efficiency scaling of diode pumped Cr:LiSAF lasers: 770-1110 nm tuning range and frequency doubling to 387-463 nm. *Optics letters*, 40 20, 4615-8.
- Demirbas, U., Baali, I., Acar, D.A., & 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, 8901-9 .
- Demirbas, U., Cankaya, H., Pergament, M., & Kaertner, F. 2020. Power and energy scaling of rod-type cryogenic Yb:YLF regenerative amplifiers. *Journal of the Optical Society of America B*.

- Demirbas, U., Kellert, M., Thesinga, J., Reuter, S., Hua, Y., Pergament, M., & Kärtner, F.X. 2022. Recent progress in cryogenic Yb:YLF laser technology. *OPTO*.
- Demirbas, U., Li, D., Birge, J.R., Sennaroğlu, A., Petrich, G.S., Kolodziejski, L.A., Kaertner, F., & Fujimoto, J.G. 2009. Low-cost, single-mode diode-pumped Cr:Colquiriite lasers. *Optics express*, 17 16, 14374-88 .
- Demirbas, U., Petrich, G.S., Li, D., Sennaroğlu, A., Kolodziejski, L.A., Kärtner, F.X., & Fujimoto, J.G. 2011. Femtosecond tuning of Cr:colquiriite lasers with AlGaAs-based saturable Bragg reflectors. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 28, 986-993.
- Demirbas, U., Schmalz, M., Sumpf, B., Erbert, G., Petrich, G.S., Kolodziejski, L.A., Fujimoto, J.G., Kärtner, F.X., & Leitenstorfer, A. 2011. Femtosecond Cr:LiSAF and Cr:LiCAF lasers pumped by tapered diode lasers. *Optics express*, 19 21, 20444-61.
- Demirbas, U., Sennaroğlu, A., Kärtner, F.X., & Fujimoto, J.G. 2009. Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr 3+ :LiCAF lasers. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 26, 64-79.
- Demirbas, U., Thesinga, J., Kellert, M., Kärtner, F.X., & Pergament, M. 2021. Detailed investigation of absorption, emission and gain in Yb:YLF in the 78–300 K range. *Optical Materials Express*.
- Demirbas, U., Thesinga, J., Kellert, M., Reuter, S., Pergament, M., & Kaertner, F.X. 2022. Broadly tunable (993-1110 nm) Yb:YLF laser. *Applied optics*, 61 13, 3702-3710 .
- Demirbas, U., Thesinga, J., Kellert, M., Reuter, S., Pergament, M., & Kaertner, F.X. 2022. Semiconductor saturable absorber mirror mode-locked Yb:YLF laser with pulses of 40 fs. *Optics letters*, 47 4, 933-936.
- 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, 8440-8.
- Dergachev, A.Y., Flint, J.H., Isyanova, Y., Pati, B., Slobodtchikov, E.U., Wall, K.F., & Moulton, P.F. 2007. Review of Multipass Slab Laser Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13, 647-660.
- Diddams, S.A. 2010. The evolving optical frequency comb. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 27.
- Dong, J., Bass, M.A., Mao, Y., Deng, P., & Gan, F. 2003. Dependence of the Yb 3+ emission cross section and lifetime on temperature and concentration in yttrium aluminum garnet. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 20, 1975-1979.
- Druon, F., Balembois, F., & Georges, P.M. 2007. New laser crystals for the generation of ultrashort pulses. *Comptes Rendus Physique*, 8, 153-164.
- Du, K., Li, D., Zhang, H., Shi, P., Wei, X.M., & Diart, R. 2003. Electro-optically Q-switched Nd:YVO4 slab laser with a high repetition rate and a short pulse width. *Optics letters*, 28 2, 87-9 .

- E. Beyatli, A. Sennaroglu, and U. Demirbas. 2013. Self-Q-Switched Cr:LiCAF Laser, *Journal of Optical Society of America B* 30, 914-921.
- Eichenholz, J.M., & Richardson, M.C. 1998. Measurement of Thermal Lensing in Cr³⁺-doped Colquiriites. Vol. 19 of OSA Trends in Optics and Photonics Series (Optica Publishing Group, 1998), paper CS26.
- Eichenholz, J.M., & Richardson, M.C. 1998. Measurement of thermal lensing in Cr³⁺-doped colquiriites. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 34, 910-919.
- Ell, R., Morgner, U., Kärtner, F.X., Fujimoto, M., Ippen, E.P., Scheuer, Angelow, G., Tschudi, T., Lederer, M.J., Boiko, A., & Luther-Davies, B. 2001. Generation of 5-fs pulses and octave-spanning spectra directly from a Ti:sapphire laser. *Optics letters*, 26 6, 373-5.
- Endo, M., Ozawa, A., & Kobayashi, Y. 2012. Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser at 4.6-GHz repetition rate. *Optics express*, 20 11, 12191-7.
- Endo, M., Ozawa, A., & Kobayashi, Y. 2013. 6-GHz, Kerr-lens mode-locked Yb:Lu₂O₃ ceramic laser for comb-resolved broadband spectroscopy. *Optics Letters*, 38, 4502-4505.
- Falcoz, F., Kerboull, F., Druon, F., Balembois, F., Georges, P., & Brun, A. 1996. Small-signal gain investigations for a continuous-wave diode-pumped Q-switched Cr:LiSAF laser. *Optics letters*, 21 16, 1253-5 .
- Fan, T.Y. 1993. Heat generation in Nd:YAG and Yb:YAG. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 29, 1457-1459.
- Fan, T.Y., & Byer, R.L. 1988. Diode laser--pumped solid-state lasers. *Science*, 239 4841, 742-7 .
- Fibrich, M., Šulc, J., Vyhlídal, D., Jelínková, H., & Čech, M. 2017. Alexandrite spectroscopic and laser characteristic investigation within a 78–400 K temperature range. *Laser Physics*, 27.
- Findlay, D., & Clay, R.A. 1966. The measurement of internal losses in 4-level lasers. *Physics Letters*, 20, 277-278.
- Fredrich-Thornton, S.T., Beil, K., Kränkel, C., Petermann, K., Huber, G., Parisi, D., & Tonelli, M. 2011. Yb:YLF as active medium in the thin disk laser. CLEO: 2011-Laser Science to Photonic Applications, 1-2.
- G. Huber, W. W. Krühler, W. Bludau, H. G. Danielmeyer; Anisotropy in the laser performance of NdP5O14. *J. Appl. Phys.* 1 August 1975; 46 (8): 3580–3584. <https://doi.org/10.1063/1.322269>
- Geusic, J.E., Marcos, H.M., & Uitert, L.G. 1964. Laser Oscillations In Nd-Doped Yttrium Aluminum, Yttrium Gallium And Gadolinium Garnets. *Applied Physics Letters*, 4, 182-184.
- Ghanbari, S., Fedorova, K.A., Krysa, A.B., Rafailov, E.U., & Major, A. 2018. Femtosecond Alexandrite laser passively mode-locked by an InP/InGaP quantum-dot saturable absorber. *Optics letters*, 43 2, 232-234.
- Gvishi, R., Gonen, E., Kalisky, Y.Y., & Rotman, S.R. 1999. Studies of the spectroscopic behavior of Cr³⁺:LiCAF pumped by a solid-state dye laser. *Optical Materials*, 13,

129-133.

- Hamrouni, M., Labaye, F., Modsching, N., Wittwer, V.J., & Südmeyer, T. 2022. Efficient high-power sub-50-fs gigahertz repetition rate diode-pumped solid-state laser. *Optics express*, 30 17, 30012-30019.
- Hardman, P.J., Clarkson, W.A., Friel, G.J., Pollnau, M., & Hanna, D.C. 1999. Energy-transfer upconversion and thermal lensing in high-power end-pumped Nd:YLF laser crystals. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 35, 647-655.
- Harrison, J., Finch, A., Rines, D.M., Rines, G.A., & Moulton, P.F. 1991. Low-threshold, cw, all-solid-state Ti:Al₂O₃ laser. *Optics letters*, 16 8, 581-3.
- Hecht, J. 2010. Short history of laser development. *Optical Engineering*, 49, 091002.
- Hönninger, C., Paschotta, R., Graf, M., Morier-Genoud, F., Zhang, G.W., Moser, M.A., Biswal, S., Nees, J., Braun, A., Mourou, G., Johannsen, I., Giesen, A., Seeber, W., & Keller, U. 1999. Ultrafast ytterbium-doped bulk lasers and laser amplifiers. *Applied Physics B*, 69, 3-17.
- Isemann, A., & Fallnich, C. 2003. High-power Colquirite lasers with high slope efficiencies pumped by broad-area laser diodes. *Optics express*, 11 3, 259-64.
- J. C. Walling, H. P. Jenssen, R. C. Morris, E. W. O'Dell, and O. G. Peterson. 1979. Tunable-laser performance in BeAl₂O₄:Cr³⁺, *Opt. Lett.* 4, 182–183.
- Jabczynski, J.K., Zendzian, W., Mierczyk, Z., & Frukacz, Z. 2001. Chromium-doped LiCAF laser passively Q switched with a V³⁺:YAG crystal. *Applied optics*, 40 36, 6638-45 .
- Jang, Y., Kim, W., Jang, H., & Kim, S. 2018. Absolute Distance Meter Operating on a Free-Running Mode-Locked Laser for Space Mission. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 19, 975-981.
- Johnson, L.F., Guggenheim, H.J., & Thomas, R.A. 1966. Phonon-Terminated Optical Masers. *Physical Review*, 149, 179-185.
- Jung, I.D., Brovelli, L.R., Kamp, M., Keller, U., & Moser, M.A. 1995. Scaling of the antiresonant Fabry-Perot saturable absorber design toward a thin saturable absorber. *Optics letters*, 20 14, 1559-61.
- Kaiser, R., & Huttl, B. 2007. Monolithic 40-GHz Mode-Locked MQW DBR Lasers for High-Speed Optical Communication Systems. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13, 125-135.
- Kaminskiĭ, A.A. 1990. Laser Crystals: Their Physics and Properties. Springer Berlin, Heidelberg. Series E-ISSN 1556-1534.
- Kärtner, F.X., Jung, I.D., & Keller, U. 1996. Soliton mode-locking with saturable absorbers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, 540-556.
- Kawabata, S., Bai, S., Obata, K., Miyaji, G., & Sugioka, K. 2023. Two-dimensional laser-induced periodic surface structures formed on crystalline silicon by GHz burst mode femtosecond laser pulses. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 5.
- Kawanaka, J., Nishioka, H., Inoue, N., & Ueda, K. 2001. Tunable Continuous-Wave

- Yb:YLF Laser Operation with a Diode-Pumped Chirped-Pulse Amplification System. *Applied optics*, 40 21, 3542-6.
- Kawanaka, J., Tokita, S., Nishioka, H., Fujita, M., Yamakawa, K., Ueda, K., & Izawa, Y. 2005. Dramatically improved laser characteristics of diode-pumped Yb-doped materials at low temperature. *Laser Physics*, 15, 1306-1312.
- Kawanaka, J., Yamakawa, K., Nishioka, H., & Ueda, K. 2002. Improved high-field laser characteristics of a diode-pumped Yb:LiYF₄ crystal at low temperature. *Optics express*, 10 10, 455-60.
- Kawato, S., & Kawashima, T. 2022. High-Efficiency Continuous-Wave Ti:Sapphire Laser with High-Intensity Pumping Using a Commercially Available Crystal. *Applied Sciences*.
- Keller, U. 2003. Recent developments in compact ultrafast lasers. *Nature*, 424, 831-838.
- Keller, U. 2010. Ultrafast solid-state laser oscillators: a success story for the last 20 years with no end in sight. *Applied Physics B*, 100, 15-28.
- Keller, U., Weingarten, K., Kärtner, F.X., Kopf, D., Braun, B., Jung, I.D., Fluck, R., Honninger, C., Matuschek, N., & Au, J.A. 1996. Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, 435-453.
- Keyes, R.J., & Quist, T.M. 1964. Injection Luminescent Pumping Of CaF₂:U³⁺ With Gaas Diode Lasers. *Applied Physics Letters*, 4, 50-52.
- Klein, J., & Kafka, J.D. 2010. The Ti:Sapphire laser The flexible research tool. *Nature Photonics*.
- Klenner, A., & Keller, U. 2015. All-optical Q-switching limiter for high-power gigahertz modelocked diode-pumped solid-state lasers. *Optics express*, 23 7, 8532-44 .
- Klenner, A., Golling, M., & Keller, U. 2013. A gigahertz multimode-diode-pumped Yb:KGW enables a strong frequency comb offset beat signal. *Optics express*, 21 8, 10351-7.
- Klenner, A., Golling, M., & Keller, U. 2014. High peak power gigahertz Yb:CALGO laser. *Optics express*, 22 10, 11884-91.
- Klimek, D.E., & Mandl, A. 2002. Power scaling of a flashlamp-pumped Cr:LiSAF thin-slab zig-zag laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 38, 1607-1613.
- Klimm, D., Lacayo, G., & Reiche, P. 2000. Growth of Cr : LiCaAlF₆ and Cr : LiSrAlF₆ by the Czochralski method. *Journal of Crystal Growth*, 210, 683-693.
- Klopp, P., Petrov, V., Griebner, U., & Erbert, G. 2002. Passively mode-locked Yb:KYW laser pumped by a tapered diode laser. *Optics express*, 10 2, 108-13.
- Koechner, W. 1976. Solid-State Laser Engineering. Springer Science+Business Media New York, Series ISSN 0342-4111
- Kopf, D., Weingarten, K., Zhang, G.W., Moser, M.A., Emanuel, M.A., Beach, R.J., Skidmore, J.A., & Keller, U. 1997. High-average-power diode-pumped femtosecond Cr:LiSAF lasers. *Applied Physics B*, 65, 235-243.

- Körner, J., Krüger, M., Reiter, J., Münzer, A., Hein, J., & Kaluza, M.C. 2020. Temperature dependent spectroscopic study of Yb³⁺-doped KG(WO₄)₂, KY(WO₄)₂, YAlO₃ and YLiF₄ for laser applications. *Optical Materials Express*, 10, 2425-2438.
- Krupke, W.F. 2000. Ytterbium solid-state lasers. The first decade. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 6, 1287-1296.
- Krüger, L.M., Mayer, A.S., Okawachi, Y., Ji, X., Klenner, A., Johnson, A.R., Langrock, C., Fejer, M.M., Lipson, M., Gaeta, A.L., Wittwer, V.J., Südmeyer, T., Phillips, C.C., & Keller, U. 2020. Performance scaling of a 10-GHz solid-state laser enabling self-referenced CEO frequency detection without amplification. *Optics express*, 28 9, 12755-12770.
- Kuo, Y., Huang, M., & Birnbaum, M. 1995. Tunable Cr⁴⁺:YSO Q-switched Cr:LiCAF laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 31, 657-663.
- Kuze, S., Boulay, D.D., Ishizawa, N., Kodama, N., Yamaga, M., & Henderson, B. 2004. Structures of LiCaAlF₆ and LiSrAlF₆ at 120 and 300 K by synchrotron X-ray single-crystal diffraction. *Journal of Solid State Chemistry*, 177, 3505-3513.
- Lagatsky, A.A., Brown, C.T., & Sibbett, W. 2004. Highly efficient and low threshold diode-pumped Kerr-lens mode-locked Yb:KYW laser. *Optics express*, 12 17, 3928-33.
- Lai, S.T. 1987. High efficiency laser-pumped emerald lasers. AIP Conf. Proc. 25 September; 160 (1): 128–129.
- Li, C., Benedick, A.J., Fendel, P., Glenday, A.G., Kärtner, F.X., Phillips, D.F., Sassellov, D.D., Szentgyorgyi, A., & Walsworth, R.L. 2008. A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm s⁻¹. *Nature*, 452, 610-612.
- Li, D., Demırbas, U., Birge, J.R., Petrich, G.S., Kolodziejski, L.A., Sennaroğlu, A., Kärtner, F.X., & Fujimoto, J.G. 2010. Diode-pumped passively mode-locked GHz femtosecond Cr:LiSAF laser with kW peak power. *Optics letters*, 35 9, 1446-8.
- Lin, H., Pirzio, F., Volpi, A., Cittadino, G., Lieto, A.D., Tonelli, M., & Agnesi, A. 2016. Crystal growth, spectroscopic characterization, and sub-100 femtosecond mode-locked operation of a Yb:LiLuF₄ laser. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 33, 2350-2356.
- Maestre, H., Torregrosa, A.J., & Capmany, J. 2012. Intra-Cavity Nonlinear Frequency Conversion with Cr³⁺-Colquiriite Solid-State Lasers.
- Maiman, T.H. 1960. Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*, 187, 493-494.
- Maiuri, M., Garavelli, M., & Cerullo, G. 2019. Ultrafast spectroscopy: state of the art and open challenges. *Journal of the American Chemical Society*.
- Mayer, A.S., Phillips, C.R., & Keller, U. 2017. Watt-level 10-gigahertz solid-state laser enabled by self-defocusing nonlinearities in an aperiodically poled crystal. *Nature Communications*, 8.
- Mccumber, D.E. 1964. Theory of Phonon-Terminated Optical Masers. *Physical Review*, 134, 299-306.

- Meng, X., Lv, C., Liu, Q., Zhang, X., Li, Y., Xi, X., & Zhao, B. 2019. Diode-pumped Yb:KGW laser with 73 fs pulse and 0.72 MW peak power based on Kerr-lens mode locking. *Applied Physics B*, 125.
- Moulton, P.F. 1986. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 3, 125-133.
- Okhrimchuk, A.G., & Obraztsov, P.A. 2015. 11-GHz waveguide Nd:YAG laser CW mode-locked with single-layer graphene. *Scientific Reports*, 5.
- Payne, S., Smith, L.K., Beach, R., Chai, B., Tassano, J., DeLoach, L., Kway, W.L., Solarz, R.W., & Krupke, W.F. 1994. Properties of Cr:LiSrAlF₆ crystals for laser operation. *Applied optics*, 33 24, 5526-36.
- Payne, S.A., Chase, L.L., & Wilke, G.D. 1989. Optical spectroscopy of the new laser materials, LiSrAlF₆:Cr³⁺ and LiCaAlF₆:Cr³⁺. *Journal of Luminescence*, 44, 167-176.
- Payne, S.A., Chase, L.L., Atherton, L.J., Caird, J.A., Kway, W.L., Shinn, M.D., Hughes, R.S., & Smith, L.K. 1990. Properties and performance of the LiCaAlF₆:Cr³⁺ laser material. *Photonics West - Lasers and Applications in Science and Engineering*.
- Payne, S.A., Chase, L.L., Newkirk, H.W., Smith, L.K., & Krupke, W.F. (1988). LiCaAlF₆:Cr³⁺ a promising new solid-state laser material. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 2243-2252.
- Payne, S.A., Chase, L.L., Smith, L.K., & Chai, B.H. 1990. Flashlamp-pumped laser performance of LiCaAlF₆:Cr³⁺. *Optical and Quantum Electronics*, 22, S259-S268.
- Payne, S.A., Chase, L.L., Smith, L.K., Kway, W.L., & Newkirk, H.W. 1989. Laser performance of LiSrAlF₆:Cr³⁺. *Journal of Applied Physics*, 66, 1051-1056.
- Pekarek, S., Fiebig, C., Stumpf, M.C., Oehler, A., Paschke, K., Erbert, G., Südmeyer, T., & Keller, U. 2010. Diode-pumped gigahertz femtosecond Yb:KGW laser with a peak power of 3.9 kW. *Optics express*, 18 16, 16320-6.
- Pekarek, S., Klenner, A., Südmeyer, T., Fiebig, C., Paschke, K., Erbert, G., & Keller, U. 2012. Femtosecond diode-pumped solid-state laser with a repetition rate of 4.8 GHz. *Optics express*, 20 4, 4248-53.
- Pekarek, S., Südmeyer, T., Lecomte, S., Kundermann, S., Dudley, J.M., & Keller, U. 2011. Self-referenceable frequency comb from a gigahertz diode-pumped solid-state laser. *Optics express*, 19 17, 16491-7.
- Phillips, C.R., Willenberg, B., Nussbaum-Lapping, A., Callegari, F.A., Camenzind, S., Pupeikis, J., & Keller, U. 2022. Coherently averaged dual-comb spectroscopy with a low-noise and high-power free-running gigahertz dual-comb laser. *Optics express*, 31 5, 7103-7119 .
- Pichón, P., Blanchot, J., Balembois, F., Druon, F., & Georges, P.M. 2017. LED-pumped Alexandrite laser oscillator and amplifier. LASE.
- Pilla, V., Catunda, T., Lima, S.M., Medina, A.N., Baesso, M.L., Jenssen, H.P., & Cassanho, A. 2004. Thermal quenching of the fluorescence quantum efficiency in colquiriite crystals measured by thermal lens spectrometry. *Journal of The Optical*

- Society of America B-optical Physics*, 21, 1784-1791.
- Pilla, V., Jenssen, H.P., Cassanho, A., & Catunda, T. 2007. Discrimination between thermal quenching of the fluorescence and Auger upconversion processes using thermal lens technique. *Optics Communications*, 271, 184-189.
- Pilla, V., Lima, S.M., Catunda, T., Medina, A.N., & Baesso, M.L. 2001. Thermal lens study of the fluorescence thermal quenching in Cr³⁺ -doped fluoride crystals. Iberoamerican Meeting of Optics and the Latin American Meeting of Optics, Lasers and Their Applications.
- Pinto, J.F., & Esterowitz, L. 1998. Unstable Cr:LiSAF laser resonator with a variable reflectivity output coupler. *Applied optics*, 37 15, 3272-5.
- Pinto, J.F., Esterowitz, L., & Rosenblatt, G.H. 1995. Frequency tripling of a Q-switched Cr:LiSAF laser to the UV region. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1, 58-61.
- Podlipensky, A., Shcherbitsky, V.G., Kuleshov, N.V., Mikhailov, V.P., Levchenko, V.I., & Yakimovich, V.N. 1999. Cr²⁺:ZnSe and Co²⁺:ZnSe saturable-absorber Q switches for 1.54- μ m Er:glass lasers. *Optics letters*, 24 14, 960-2.
- Purnawirman, & Phua, P.B. 2011. Femtosecond laser pumped by high-brightness coherent polarization locked diodes. *Optics letters*, 36 15, 2797-9.
- Püschel, S., Kalusniak, S., Kränkel, C., & Tanaka, H. 2021. Temperature-dependent radiative lifetime of Yb:YLF: refined cross sections and potential for laser cooling. *Optics express*, 29 7, 11106-11120.
- Rand, D., Miller, D., Ripin, D.J., & Fan, T. 2011. Cryogenic Yb 3+ -doped materials for pulsed solid-state laser applications [Invited]. *Optical Materials Express*, 1, 434-450.
- Rapoport, W.R., & Shand, M.L. 1992. Excited state absorption and upconversion in Cr:LiSrAlF₆. *Solid State Communications*, 84, 29-31.
- Ross, M. 1968. YAG laser operation by semiconductor laser pumping.
- Roth, P.W., Maclean, A.J., Burns, D., & Kemp, A.J. 2009. Directly diode-laser-pumped Ti:sapphire laser. *Optics letters*, 34 21, 3334-6 .
- S. So, J. I. Mackenzie, D. P. Shepherd, W. A. Clarkson, J. G. Betterton, and E. K. Gorton. 2005. A power-scaling strategy for longitudinally diode-pumped Tm:YLF lasers, *Appl. Phys. B* 84, 389–393.
- Samad, R.E., Baldochi, S.L., Calvo Nogueira, G.E., & Vieira, N.D. 2007. 30 W Cr:LiSrAlF₆ flashlamp-pumped pulsed laser. *Optics letters*, 32 1, 50-2.
- Sanz-Ortiz, M.N., Rodríguez, F., Hernández, I., Valiente, R., & Kück, S. 2008. Time-resolved spectroscopy in LiCaAlF₆ doped with Cr³⁺ as a function of pressure and temperature: Excited-state crossover and phase-transition effects. *Journal of Luminescence*, 128, 721-724.
- Sawai, S., Hosaka, A., Kawauchi, H., Hirosawa, K., & Kannari, F. 2014. Demonstration of a Ti:sapphire mode-locked laser pumped directly with a green diode laser. *Applied Physics Express*, 7.

- Scheps, R., Myers, J.F., & Payne, S.A. 1990. CW and Q-switched operation of a low threshold $\text{Cr}^{3+}:\text{LiCaAlF}_6$ laser. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2, 626-628.
- Schratwieser, T.C., Leburn, C.G., & Reid, D.T. 2012. Highly efficient 1 GHz repetition-frequency femtosecond $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ laser. *Optics letters*, 37 6, 1133-5.
- Schulz, P.A., & Henion, S. 1991. Liquid-nitrogen-cooled $\text{Ti}:\text{Al}_2\text{O}_3$ laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 27, 1039-1047.
- Sennaroğlu, A. 2002. Broadly tunable Cr^{4+} -doped solid-state lasers in the near infrared and visible. *Progress in Quantum Electronics*, 26, 287-352.
- Sennaroğlu, A., & Morova, Y. (2021). Divalent (Cr^{2+}), trivalent (Cr^{3+}), and tetravalent (Cr^{4+}) chromium ion-doped tunable solid-state lasers operating in the near and mid-infrared spectral regions. *Applied Physics B*, 128.
- Shand, M.L., & Lai, S.T. 1984. CW laser pumped emerald laser. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 20, 105-108.
- Shirin Ghanbari, Reza Akbari, and Arkady Major. 2016. Femtosecond Kerr-lens mode-locked Alexandrite laser, *Opt. Express* 24, 14836-14840.
- Sibbett, W., Lagatsky, A.A., & Brown, C.T. 2012. The development and application of femtosecond laser systems. *Optics express*, 20 7, 6989-7001.
- Siebold, M., Bock, S., Schramm, U., Xu, B., Doualan, J.L., Camy, P., & Moncorgé, R. 2009. $\text{Yb}:\text{CaF}_2$ — a new old laser crystal. *Applied Physics B*, 97, 327-338.
- Siebold, M., Bock, S., Schramm, U., Xu, B., Doualan, J.L., Camy, P., & Moncorgé, R. 2009. $\text{Yb}:\text{CaF}_2$ — a new old laser crystal. *Applied Physics B*, 97, 327-338.
- Smith, L.K., Payne, S.A., Krupke, W.F., DeLoach, L., Morris, R.C., O'Dell, E.W., & Nelson, D.J. 1993. Laser emission from the transition-metal compound LiSrCrF_6 . *Optics letters*, 18 3, 200.
- Smith, L.K., Payne, S.A., Kway, W.L., Chase, L.L., & Chai, B.H. 1992. Investigation of the laser properties of $\text{Cr}^{3+}:\text{LiSrGaF}_6$. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 28, 2612-2618.
- Sorokina, I.T., Sorokin, E., Wintner, E., Cassanho, A., Jenssen, H.P., & Szipöcs, R. 1997. 14-fs pulse generation in Kerr-lens mode-locked prismless $\text{Cr}:\text{LiSGaF}$ and $\text{Cr}:\text{LiSAF}$ lasers: observation of pulse self-frequency shift. *Optics letters*, 22 22, 1716-8.
- Spuhler, G.J., Paschotta, R., Fluck, R., Braun, B.D., Moser, M.A., Zhang, G.W., Gini, E., & Keller, U. 2001. Experimentally confirmed design guidelines for passively Q-switched microchip lasers using semiconductor saturable absorbers. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 16, 376-388.
- Stalder, M., Bass, M.A., & Chai, B.H. 1992. Thermal quenching of fluorescence in chromium-doped fluoride laser crystals. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 9, 2271-2273.
- Stalder, M., Chai, B.H., & Bass, M.A. 1991. Flashlamp pumped $\text{Cr}:\text{LiSrAlF}_6$ laser. *Applied Physics Letters*, 58, 216-218.
- Stanciu, M., & Grattan, K.T. 2002. LiCAF crystal-based optical fiber thermometry.

- Sensors and Actuators A-physical*, 99, 277-283.
- Streifer, W.S., Scifres, D.R., Harnagel, G.L., Welch, D., Berger, J., & Sakamoto, M. 1988. Advances in diode laser pumps. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 883-894.
- Telle, H.R., Steinmeyer, G., Dunlop, A.E., Stenger, J.B., Sutter, D.H., & Keller, U. 1999. Carrier-envelope offset phase control: A novel concept for absolute optical frequency measurement and ultrashort pulse generation. *Applied Physics B*, 69, 327-332.
- Tsuda, S., Knox, W.H., Cundiff, S.T., Jan, W.Y., & Cunningham, J.E. 1996. Mode-locking ultrafast solid-state lasers with saturable Bragg reflectors. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2, 454-464.
- U. Keller, "Passive Modelocking BT - Ultrafast Lasers: A Comprehensive Introduction to Fundamental Principles with Practical Applications," U. Keller, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2021, pp. 419–546. doi: 10.1007/978-3-030-82532-4_9.
- Uemura, S., & Miyazaki, K. 1997. Thermal Characteristics of a Continuous-Wave Cr:LiSAF Laser. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36, 4312-4315.
- Uemura, S., & Torizuka, K. 1999. Generation of 10 fs Pulses from a Diode-Pumped Kerr-Lens Mode-Locked Cr:LiSAF Laser. *Japanese Journal of Applied Physics*, 39, 3472.
- Uemura, S., & Torizuka, K. 2004. Kerr-Lens Mode-Locked Diode-Pumped Yb:YAG Laser with the Transverse Mode Passively Stabilized. *Applied Physics Express*, 1, 012007.
- Voigt, F.F., Emaury, F., Bethge, P., Waldburger, D., Link, S.M., Carta, S., van der Bourg, A., Helmchen, F., & Keller, U. 2017. Multiphoton in vivo imaging with a femtosecond semiconductor disk laser. *Biomedical optics express*, 8 7, 3213-3231.
- Wagenblast, P., Morgner, U., Grawert, F.J., Schibli, T.R., Käärtner, F.X., Scheuer, V., Angelow, G., & Lederer, M.J. 2002. Generation of sub-10-fs pulses from a Kerr-lens mode-locked Cr(3+):LiCAF laser oscillator by use of third-order dispersion-compensating double-chirped mirrors. *Optics letters*, 27 19, 1726-8 .
- Walling, J.C., Peterson, O.G., Jenssen, H.P., Morris, R.C., & O'Dell, E.W. 1980. Tunable alexandrite lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 16, 1302-1315.
- Wang, H.S., Wa, P.L., Lefaucheur, J.L., Chai, B.H., & Miller, A.W. 1994. Cw And Self-mode-locking Performance Of A Red Pumped Cr³⁺LiSr_{0.8}Ca_{0.2}AlF₆ Laser. *Optics Communications*, 110, 679-688.
- Wang, Y., Liu, Y., Zhang, Z., & Kaertner, F. 2021. Amplification of 108 GHz repetition rate femtosecond laser pulses to 97 W average power by a fiber amplifier. *OSA Continuum*, 4, 1571.
- Weber, B.C., & Hirth, A.D. 1996. Efficient single-pulse emission with submicrosecond duration from a Cr:LiSAF laser. *Optics Communications*, 128, 158-165.
- Weber, B.C., & Hirth, A.D. 1998. Presentation of a new and simple technique of Q-

- switching with a $\text{LiSrAlF}_6:\text{Cr}^{3+}$ oscillator. *Optics Communications*, 149, 301-306.
- Willenberg, B., Pupeikis, J., Krüger, L.M., Koch, F.M., Phillips, C.R., & Keller, U. 2020. Femtosecond dual-comb $\text{Yb}:\text{CaF}_2$ laser from a single free-running polarization-multiplexed cavity for optical sampling applications. *Optics express*, 28 20, 30275-30288 .
- Woods, B.W., Payne, S.A., Marion, J.E., Hughes, R.S., & Davis, L.E. 1991. Thermomechanical and thermo-optical properties of the $\text{LiCaAlF}_6:\text{Cr}^{3+}$ laser material. *Journal of The Optical Society of America B-optical Physics*, 8, 970-977.
- Woodward, R.I., Lo, Y.S., Pittaluga, M., Minder, M., Paraïso, T.K., Lucamarini, M., Yuan, Z.L., & Shields, A.J. 2021. Gigahertz measurement-device-independent quantum key distribution using directly modulated lasers. *npj Quantum Information*, 7.
- Wüst, R., Hug, D., Rudin, B., Emaury, F., & Resan, B. 2022. 250 fs, 130 mW Laser With Tunable Pulse Repetition Rate From 0.5 to 1.3 GHz. *IEEE Photonics Journal*, 14, 1-6.
- Yamazoe, S., Katou, M., Adachi, T., & Kasamatsu, T. (2010). Palm-top-size, 1.5 kW peak-power, and femtosecond (160 fs) diode-pumped mode-locked $\text{Yb}^{3+}:\text{KY}(\text{WO}_4)_2$ solid-state laser with a semiconductor saturable absorber mirror. *Optics letters*, 35 5, 748-50.
- Yang, H., Kim, C., Choi, S.Y., Kim, G., Kobayashi, Y., Rotermund, F., & Kim, J. 2012. 1.2-GHz repetition rate, diode-pumped femtosecond $\text{Yb}:\text{KYW}$ laser mode-locked by a carbon nanotube saturable absorber mirror. *Optics express*, 20 28, 29518-23.
- Yasukevich, A.S., Kisel, V.E., Kurilchik, S., Grigoriev, S.V., Kuleshov, N.V., Gordeev, E.Y., Korableva, S.L., Naumov, A.K., & Semashko, V.V. 2009. Continuous wave diode pumped $\text{Yb}:\text{LLF}$ and $\text{Yb}:\text{NYF}$ lasers. *Optics Communications*, 282, 4404-4407.
- Yee Fan, T., Ripin, D.J., Aggarwal, R.L., Ochoa, J.R., Chann, B., Tilleman, M., & Spitzberg, J. 2007. Cryogenic Yb^{3+} -Doped Solid-State Lasers. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 13, 448-459.
- Yefet, S., & Pe'er, A. 2013. A Review of Cavity Design for Kerr Lens Mode-Locked Solid-State Lasers. *Applied Sciences*, 3, 694-724.
- Yin, J., Hang, Y., He, X., Zhang, L.H., Zhao, C., Gong, J., & Zhang, P. 2012. Direct comparison of Yb^{3+} -doped LiYF_4 and LiLuF_4 as laser media at room-temperature. *Laser Physics Letters*, 9, 126 - 130.
- Yorulmaz, I., Beyatlı, E., Kurt, A., Sennaroğlu, A., & Demırbas, U. 2014. Efficient and low-threshold Alexandrite laser pumped by a single-mode diode. *Optical Materials Express*, 4, 776-789.
- Yoshida, A., Schmidt, A., Petrov, V., Fiebig, C., Erbert, G., Liu, J., Zhang, H., Wang, J., & Griebner, U. 2011. Diode-pumped mode-locked $\text{Yb}:\text{YCOB}$ laser generating 35 fs pulses. *Optics letters*, 36 22, 4425-7.
- Zapata, L.E., Pergament, M., Schust, M., Reuter, S., Thesinga, J., Zapata, C., Kellert, M., Demırbas, U., Calendron, A., Liu, Y., & Kaertner, F.X. 2022. One-joule 500-Hz

- cryogenic Yb:YAG laser driver of composite thin-disk design. *Optics letters*, 47 24, 6385-6388.
- Zayhowski, J.J., & Kelley, P.L. 1991. Optimization of Q-switched lasers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 27, 2220-2225.
- Zewail, A.H. 1996. Femtochemistry: Recent Progress in Studies of Dynamics and Control of Reactions and Their Transition States. *The Journal of Physical Chemistry*, 100, 415-476.
- Zewail, A.H. 2000. Femtochemistry: Atomic-Scale Dynamics of the Chemical Bond. *ChemInform*, 31.
- Zhang, Z., Liu, Q., Nie, M., Ji, E., & Gong, M. 2015. Experimental and theoretical study of the weak and asymmetrical thermal lens effect of Nd:YLF crystal for σ and π polarizations. *Applied Physics B*, 120, 689-696.
- Zhang, Z., Ma, J., Zhao, G., Shao, X., Zheng, Y., Han, H., & Wei, Z. 2023. Sub-100 fs watt-level Kerr-lens mode-locked Yb:CaYAlO₄ laser with a gigahertz repetition rate. *Frontiers of Physics*.
- Zhao, Z., Jin, L., Set, S.Y., & Yamashita, S. 2021. 2.5 GHz harmonic mode locking from a femtosecond Yb-doped fiber laser with high fundamental repetition rate. *Optics letters*, 46 15, 3621-3624 .
- Zheng, L., Chen, Y., Tian, W., Yu, Y., Wang, G., Bai, C., Zhang, D., Zhu, J., & Wei, Z. 2022. 1.6-GHz, 3.3-W Kerr-lens Mode-locked Yb:KGW Oscillator Pumped by a Multimode Laser Diode. 2022 Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO), 1-2.
- Zheng, L., Tian, W., Liu, H., Wang, G., Bai, C., Xu, R., Zhang, D., Han, H., Zhu, J., & Wei, Z. 2021. 2-GHz watt-level Kerr-lens mode-locked Yb:KGW laser. *Optics express*, 29 9, 12950-12957.

ÖZGEÇMİŞ

SERDAR OKUYUCU

ÖĞRENİM BİLGİLERİ

Doktora	Akdeniz Üniversitesi
2018-2024	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans	Yaşar Üniversitesi
2016-2018	Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Lisans	Dokuz Eylül Üniversitesi
2009-2015	Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

MESLEKİ VE İDARİ GÖREVLER

Araştırma Görevlisi	Antalya Bilim Üniversitesi
2017-Devam ediyor	Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Araştırma Görevlisi	Yaşar Üniversitesi
2016-2018	Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

ESERLER

Uluslararası hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

- 1- Zekican Erturk, Muharrem Kilinc, **Serdar Okuyucu**, Yusuf Ozturk, and Umit Demirbas, "Challenges in power scaling of Cr:LiCAF lasers: effect of passive losses," Appl. Opt. 63, 1144-1152 (2024)

- 2- **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)
- 3- 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)
- 4- **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>
- 5- Genççağa, D.; Şengül Ayan, S.; Farnoudkia, H.; **Okuyucu, S.** Statistical Approaches for the Analysis of Dependency Among Neurons Under Noise. *Entropy* 2020, 22, 387. <https://doi.org/10.3390/e22040387>

Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitaplarında basılan bildiriler

- 1- **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 JT6A.8.
- 2- **S. Okuyucu**, K. Yeğin, M. Seçmen and B. Özbakiş, "Parametric SAR study for 4G cellular phone applications," 2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON), Poznan, Poland, 2018, pp. 308-311, doi: 10.23919/MIKON.2018.8405209.
- 3- **S. Okuyucu**, M. Seçmen, K. Yeğin and B. Özbakiş, "A numerical parametric study of SAR from a dual-band PIFA based antenna for mobile communication," 2017 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), Bursa, Turkey, 2017, pp. 1004-1008.
- 4- M. C. Ozgonul, M. Secmen and **S. Okuyucu**, "Compact printed log periodic dipole antenna with second order semi-circle iteration," 2017 25th Telecommunication Forum (TELFOR), Belgrade, Serbia, 2017, pp. 1-4, doi: 10.1109/TELFOR.2017.8249375.
- 5- B. Ozbakis, **S. Okuyucu**, M. Secmen and K. Yegin, "Multi-band frequency tunable LTE antenna for mobile phone applications," 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 939-943, doi: 10.1109/PIERS.2017.8261878.
- 6- **S. Okuyucu**, C. Turkmen and M. Secmen, "A dual circularly polarized omnidirectional receiver antenna for satellite communication," 2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS), St. Petersburg, Russia, 2017, pp. 613-620, doi: 10.1109/PIERS.2017.8261814.