TÜBİTAK

Özgün Optik Pompalama Yöntemleri ile Geliştirilmiş 2 μm Civarında Çalışan Sürekli Dalga ve Darbeli Tulyum Katıhal Lazerleri

Program Kodu: 1001

Proje No: 114F185

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Alphan SENNAROĞLU

Araştırmacı:
Doç. Dr. Sarper Özharar

Bursiyerler:
Işınsu Baylam
Ferda Canbaz
Yağız Morova
Abdullah Muti
İsmail Yorulmaz

ARALIK 2017
İSTANBUL

ÖNSÖZ

TÜBİTAK tarafından 15 Ekim 2014-15 Ekim 2017 tarihleri arasında desteklenen 114F185 numaralı ve "Özgün Optik Pompalama Yöntemleri ile Geliştirilmiş 2 μm Civarında Çalışan Sürekli Dalga ve Darbeli Tulyum Katıhal Lazerleri" başlıklı proje kapsamında, aşağıdaki başlıklar altında toplanan çalışmalar başarılı bir şekilde tamamlanmıştır:

1) %1.5 Tm^{3+}:YAP, %4 Tm^{3+}:YAP, %5 Tm^{3+}:LuAG lazerlerinin 800 ve 1200 nm'deki uyarılmalarının kıyaslamalı incelemesi

2) Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin 800 ve 1200 nm dalgaboylarında uyarılması ve lazer performansının kıyaslamalı olarak incelenmesi

3) Pasif Q anahtarlamalı Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm dalgaboyunda çalıştırılması

4) Düşük eşikli, diyot pompalı Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm dalgaboyunda çalıştırılması

5) Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm dalgaboyunda Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılması ve femtosaniye darbe üretimi.

Pompa dalgaboylarının kıyaslandığı deneylerde, tulyum katkılı kristaller için 800 nm pompa dalgaboyu, tulyum katkılı lutetia seramik için ise 1200 nm pompa dalgaboyu daha uygun bulunmuştur. Sonraki deneylerde, sürekli dalga Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan Tm^{3+}:YLF lazeri 2.3 μm civarında kurulmuş ve rezonatör içine yerleştirilen Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu sayesinde, pasif Q anahtarlama rejiminde çalıştırılmıştır. Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm dalgaboyunda pasif Q anahtarlamalı rejimde çalıştırılışı, literatürde ilk kez gösterilmiştir. 120 mW güce sahip bir diyot pompa lazeri ile Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm dalgaboyunda düşük eşikli çalıştırılışı da deneysel olarak gösterilmiştir. Son olarak, 2.3 μm dalgaboyundaki Tm^{3+}:YLF lazeri, Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılmış ve 2304 nm dalgaboyunda, 514 fs uzunluğunda darbeler üretilmiştir. 2.3 μm dalgaboyundaki Tm^{3+}:YLF lazeri ile femtosaniye darbe üretimi, literatürde ilk kez gösterilmiştir.

Projenin çeşitli aşamalarında katkıda bulunan araştırmacılar aşağıda sıralanmıştır:

1) Prof. Dr. Alphan Sennaroğlu: Proje yürütücüsü olarak görev yapmıştır. Proje boyunca, kurulan düzeneklerin tasarımı, deneysel kurulumu, karakterizasyonu ve raporların yazılmasında katkıda bulunmuştur.

2) Doç. Dr. Sarper Özharar: Araştırmacı olarak görev yapmıştır. Pompa lazerlerinin ve tulyum katkılı lazer düzeneklerinin tasarımı, kurulumu, karakterizasyonu ve raporların hazırlanmasında katkıda bulunmuştur.

3) Işınsu Baylam, Ferda Canbaz, Yağız Morova, Abdullah Muti ve İsmail Yorulmaz: Proje kapsamında desteklenen doktora öğrencileridir. Proje boyunca kullanılan düzeneklerin tasarımı, kurulumu, eniyileştirilmesi, verilerin toplanması, raporlar ile makalelerin yazılmasında katkıda bulunmuşlardır.

4) Proje boyunca, çeşitli ölçüm ve karakterizasyon düzeneklerinin kurulumunda Teknofil Şirketi'nden teknik hizmet alımı sağlanmıştır.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

1 GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ 1

1.1 Katıhal Lazerleri 1
1.2 Tulyum Lazerleri ve Uygulamaları 1
1.3 Tulyum İyonunun Spektroskopik Özellikleri 3
1.4 Grubumuzun Tulyum Katkılı Lazerler Konusunda Önceden Yaptığı Bilimsel Çalışmalar 5
1.5 Femtosaniye Darbe Üretimi 5
1.6 Kip-kilitleme Yöntemleri 6
1.7 Doyabilen Soğurucular 6
1.8 Kerr Odaklamalı Kip-kilitleme 8
1.9 Grubumuzun Kip-kilitli Lazerler Konusunda Önceden Yaptığı Deneysel Çalışmalar 9
1.10 Proje Kapsamında Yapılan Çalışmalar 10
1.10.1 %1.5 Tm^{3+}:YAP, %4 Tm^{3+}:YAP, %5 Tm^{3+}:LuAG Lazerlerinin 800 ve 1200 nm'deki Uyarılmalarının Kıyaslamalı İncelemesi 10
1.10.2 Tm^{3+}:Lu_2O_3 Seramik Lazerinin 800 ve 1200 nm'de Uyarılması 10
1.10.3 Pasif Q-anahtarlamalı 2.3 µm Tm^{3+}:YLF Lazeri 10
1.10.4 Kerr Odaklamalı Kip-Kilitli Tm^{3+}:YLF Lazeri ile 2.3 µm'de Femtosaniye Darbe Üretimi 11
Literatür Özeti 11

2 GEREÇ ve YÖNTEM 16

2.1 Tasarım Yöntemleri 16
2.2 1200 ve 800 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Pompa Lazerleri 18
2.2.1 1200 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit Pompa Lazer Rezonatörünün Tasarımı ve Kurulumu 18
2.2.2 800 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Ti^{3+}:safir Pompa Lazer Rezonatörünün Tasarımı ve Kurulumu 23
2.3 Sürekli Dalga Kaynaklar 25
2.3.1 Ti^{3+}:safir Pompa Lazeri 25
2.3.2 Diyot Pompası 29

3 BULGULAR 33

3.1 Kazanç Anahtarlamalı %5 Tm^{3+}:LuAG, %1.5 Tm^{3+}:YAP ve %4 Tm^{3+}:YAP Lazerlerinin 800 nm ve 1200 nm Pompa Lazerleri ile Karşılaştırılması 33
3.2 2 Mikron Civarında Çalışan Tm^{3+}: Lu_2O_3 Seramik Lazeri 40

3.2.1 $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik Lazerinin 800 nm Civarında Uyarılması 41
3.2.2 $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik Lazerinin 1200 nm Civarında Uyarılması 47
3.3 Sürekli Dalga Tm^{3+}:YLF Lazerleri 52
3.4 2.3 μm'de Çalıştırılan Tm^{3+}:YLF Lazerinden Q-anahtarlama ile Darbe Üretimi 58
3.5 Kerr Odaklamalı Kip-Kilitli Femtosaniye 2.3 μm Tm^{3+}:YLF Lazeri 64
3.6 Diğer Çalışmalar: Diyot pompalı Cr:LiSAF lazerinin kurulumu 69
4 TARTIŞMA/SONUÇ 72

TABLO ve ŞEKİL LİSTELERİ

Şekil 1.3.1 Tm^{3+} İyonunun enerji seviyeleri ve çapraz sönüm (CR). 3
Şekil 1.3.2 Tm^{3+} İyonunun tellürit cam içerisindeki ışıma bantları. 4
Şekil 2.2.1 Nd^{3+}:vanadat lazerinin fotoğrafı (sağ alt köşe): Ti^{3+}:safir kristalini uyarabilmek için 532 nm üretimi ve ışın demetinin izlediği yol (yeşil), 1064 nm lazer çıkışının Cr^{4+}:forsterit lazerini uyarmak için izlediği yol (bordo). 18
Şekil 2.2.2 20 mm uzunluğunda ve Brewster açısında kesilmiş Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamı ile kurulan lazer rezonatörünün şematik gösterimi. 19
Şekil 2.2.3 ABCD matris yöntemi kullanılarak hesaplanan w_{0P} değerinin, 10 cm uzunluğunda odak mesafesi olan mercek ile Şekil 2.2.2'de gösterilen d1 mesafesine göre değişimi (d1=170 cm). 19
Şekil 2.2.4 Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörünün mesafeleri için hesaplanmış olan w_{0L} değerinin, çukur ayna (M3) konumuna göre değişimi. 20
Şekil 2.2.5 Sabit pompa giriş gücü değerinde ölçülmüş olan ve çıkış aynası geçirgenlik yüzdesine göre değişen Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış gücü. 20
Şekil 2.2.6 1236 nm civarında çalışan, kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin, en optimum çıkış aynası ile ölçülmüş verim eğrisi. 21
Şekil 2.2.7 Kırınım ağı (G) ilave edilmiş olan Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörü. 21
Şekil 2.2.8 1202 nm civarında çalışan Cr^{4+}:forsterit lazerinin, kırınım ağı ile ölçülmüş verim eğrisi 22
Şekil 2.2.9 Kırınım ağı ile çalıştırılan Cr^{4+}:forsterit lazerinin 1202 nm civarında, optik spektrum analizör ile ölçülmüş olan spektral kalınlığı 22
Şekil 2.2.10 1200 nm civarında, %18'lik çıkış aynası ve milimetre başına 1500 oluğa sahip kırınım ağı ile çalışan Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörü. 23
Şekil 2.2.11 Kazanç anahtarlamalı, x-şeklinde Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. 24
Şekil 2.2.12 Kırınım ağı içeren kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin güç verimi 25
Şekil 2.2.13 Kırınım ağı içeren kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin çıkış spektrumu. 25
Şekil 2.3.1 532 nm'de pompalanan x-şeklinde ve dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. 26
Şekil 2.3.2 532 nm OPUS lazeri ile pompalanan x-şeklindeki ve dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün fotoğrafı. 27
Şekil 2.3.3 Ti^{3+}:safir lazerinin farklı geçirgenliğe sahip çıkış aynaları kullanılarak ölçülmüş güç verim eğrileri 27

Şekil 2.3.4 Dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörü için, ölçülmüş eşik pompa gücünün çıkış aynası geçirgenliğine göre değişimi. 28
Şekil 2.3.5 Ti^{3+}:safir lazerinin güç-dalgaboyu değişim verisi. 28
Şekil 2.3.6 Tm^{3+}:YLF lazerini uyarmak için en uygun dalgaboyuna ayarlanmış Ti^{3+}:safir pompa lazerinin optik spekturumu. 29
Şekil 2.3.7 Diyot pompa lazeri merkez dalgaboyunun sıcaklık ile değişimi. 30
Şekil 2.3.8 Lazer diyotunun 47.5 ˚C'de ve 793 nm merkez dalgaboyunda ölçülmüş verim eğrisi..... 30
Şekil 2.3.9 Diyot pompa lazeriyle, 120 mA akımda elde edilen çıkış gücünün sıcaklığa göre değişimi..... 31
Şekil 2.3.10 Tm^{3+}:YLF lazerini uyarmak için en uygun dalgaboyuna ayarlanmış diyot pompa lazerinin optik spektrumu. 31
Şekil 3.1.1 Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ve bu lazerle pompalanan Tm^{3+} katkılı kristallerin lazer ışınım spektrumları. (a) Ti^{3+}:safir lazerinin Tm^{3+}:LuAG (%5) pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (b) Tm^{3+}:LuAG (%5) lazer spektrumu, (c), (e): Ti^{3+}:Safir lazerinin Tm^{3+}:YAP pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (d) Tm^{3+}:YAP (%1.5) lazer spektrumu, (f) Tm^{3+}:YAP (%4) lazer spektrumu. 34
Şekil 3.1.2 Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ile pompalanan x-şeklindeki Tm^{3+} lazer düzeneği. 35
Şekil 3.1.3 Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ve bu lazerle pompalanan Tm^{3+} katkılı kristallerin lazer ışınım spektrumları. (a) Cr^{4+}:forsterit lazerinin Tm^{3+}:LuAG (%5) pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (b) Tm^{3+}:LuAG (%5) lazer spektrumu, (c), (e): Cr^{4+}:forsterit lazerinin Tm^{3+}:YAP (%1.5 ve %4) pompası olarak kullanılırkenki spektrumu, (d) Tm^{3+}:YAP (%1,5) lazer spektrumu, (f) Tm^{3+}:YAP (%4) lazer spektrumu. 36
Şekil 3.1.4 Tm^{3+} katkılı kristallerin, Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit lazerleri ile pompalanmaları durumlarındaki lazer verim eğrileri. Kullanılan çıkış aynalarının geçirgenliği grafik üzerinde gösterilmiştir. Soldaki grafikler Ti^{3+}:safir, sağdakiler ise Cr^{4+}:forsterit ile pompalanan lazerlerin verim eğrilerini göstermektedir. a,b: Tm^{3+}:LuAG (%5), c,d: Tm^{3+}:YAP (%1.5), e,f: Tm^{3+}:YAP (%4). 37
Şekil 3.1.5 (a) Tm^{3+}:LuAG, (b) Tm^{3+}:YAP (%1.5) ve (c) Tm^{3+}:YAP (%4) lazerlerinin %2 geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak ölçülmüş güç verim eğrileri. 38
Şekil 3.2.1 3 mm uzunluğundaki, %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramiğinin 800 nm civarındaki soğurma spektrumu. 41

Şekil 3.2.2 (a) Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. (b) Ti^{3+}:safir lazerinin 796 nm'de ölçülen spektral genişliği. 42
Şekil 3.2.3 Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin 760-820 nm aralığında ölçülmüş uyarılma spektrumu. 42
Şekil 3.2.4 Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeriyle uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin üç farklı pompa dalgaboyu için ölçülmüş enerji verim eğrileri..... 43
Şekil 3.2.5 796 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin farklı pompa enerji değerlerinde ölçülmüş çıkış spektrumları ve darbe profilleri. 45
Şekil 3.2.6 796 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinden elde edilen çıkış darbelerinin pompa enerjisine göre ölçülmüş uzunlukları ve oluşma süreleri. 46
Şekil 3.2.7 3 mm uzunluğundaki, %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramiğinin, 1200 nm civarında ölçülmüş soğurma spektrumu..... 47
Şekil 3.2.8 (a) Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ile uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. (b) Cr^{4+}:forsterit lazerinin 1204 nm'de ölçülen spektral genişliği. 48
Şekil 3.2.9 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin dalgaboyuna göre ölçülen çıkış enerjisi ve bu lazer ile pompalanan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinin 1194-1220 nm aralığında ölçülmüş uyarılma spektrumu. 49
Şekil 3.2.10 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeriyle uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin 1198, 1204 ve 1211 nm'deki pompa dalgaboyları için ölçülmüş enerji verim eğrileri..... 49
Şekil 3.2.11 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeriyle uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin çıkış gücünün dalgaboyuna göre ölçülmüş değişimi..... 50
Şekil 3.2.12 1204 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin, 105 µJ pompa enerjisinde ölçülen (a) spektral ve (b) zamansal profili. (c)-(d) Seramik lazerinden üretilen darbelerin, pompa enerjisine göre ölçülen uzunlukları ve oluşma süreleri. 51
Şekil 3.3.1 Ti^{3+}:safir pompalı 2.3 µm Tm^{3+}:YLF lazerinin şematik gösterimi. 52
Şekil 3.3.2 Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu ayarlama eğrisi ile buna denk gelen uyarım (excitation) spektrumu. Grafik, eğride gösterilen Ti^{3+}:safir pompa dalgaboyu ve gücü ile elde edilen 2.3 µm Tm^{3+}:YLF çıkış güçlerini pompa dalgaboyuna göre göstermektedir. Tm^{3+}:YLF çıkış aynası geçirgenliği %1'dir.. 53
Şekil 3.3.3 (A)120-mW ve (B) 250 mW diyot pompalı 2.3 µm Tm^{3+}:YLF laserinin deneysel şeması. (B) düzeneğinde rezonatör içinde ayrıca paralel bir YAG kristali konarak yüzeylerinden fazladan güç elde edilmesi sağlanmıştır. Her bir pompa düzeneğinin sağında diyotların ayarlandıkları pompa dalgaboyundaki çıkış

spektrumları görülmektedir. Sırasıyla (FWHM) dalgaboyu genişlikleri 0.09 nm ve 0.08nm olarak belirlenmiştir. 54
Şekil 3.3.4 100 mW güce sahip diyotla pompalanan Tm^{3+}:YLF lazerinin %1 geçirgenliğe sahip çıkış aynasıyla elde edilen verim eğrisi. 55
Şekil 3.3.5 Efektif çıkış aynası geçirgenliği değişimine göre ölçülen Tm^{3+}:YLF güç verimleri..... 55
Şekil 3.3.6 Efektif çıkış aynası geçirgenliği değişimine göre ölçülmüş eşik pompa gücü değerleri. 56
Şekil 3.3.7 Kurulan Tm^{3+}:YLF lazerinin çıkış spektrumu. 57
Şekil 3.3.8 Kurulan Tm^{3+}:YLF lazeri için, dalgaboyuna bağlı ölçülmüş çıkış gücü. 57
Şekil 3.4.1 Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama yöntemiyle darbe üretilen Tm^{3+}:YLF düzeneğinin şematik gösterimi. İki prizma içeren Ti^{3+}:safir lazeri pompa lazeri olarak kullanılmıştır. 59
Şekil 3.4.2: Tek (dörtgen) ve çift (üçgen) pompalı durumlar için ölçülen ortalama çıkış gücünün (a) sürekli dalga ve (b) Q-anahtarlamalı rejimlerde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin giriş gücüne bağımlılığı. 60
Şekil 3.4.3: Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama rejiminde çalıştırılan Tm^{3+}:YLF lazerinin (a) optik spektrumu ve (b) zamana bağlı darbe profili. 61
Şekil 3.4.4: Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama rejiminde çalıştırılan, tek ve çift taraflı pompalanan Tm^{3+}:YLF lazerinin (a) darbe uzunluğu, (b) tekrar frekansı, (c) darbe enerjisi ve (d) darbe tepe gücünün giriş gücüne göre ölçülmüş değişimi. 62
Şekil 3.4.5 Tek ve çift taraflı pompalama durumları için düşük sinyal kazancının $2 \times \tau_f \times f_{rep}$ parametresine göre değişimi ve lineer çakıştırma analizi. 63
Şekil 3.5.1 Kerr odaklama yöntemi ile kip-kilitli rejimde çalıştırılan 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin şematik gösterimi. 65
Şekil 3.5.2 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin x-şeklindeki kısa rezonatör (üçgen) ve ZnSe kristalini de içeren uzun rezonatör (daire) için ölçülmüş olan güç verimleri. 66
Şekil 3.5.3 (a) Kerr-odaklamalı kip-kilitli rejimde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin çıkış spektrumu. (b) Tm^{3+}:YLF lazerinin kısa rezonatör içinde 5 mm kuartz çiftkırınımlı plaka (BTP) kullanılarak ölçülmüş dalgaboyu ayarlama eğrisi. 66
Şekil 3.5.4 Kip-kilitli Tm^{3+}:YLF lazerinin ölçülmüş (a) girişimsel (interferometric) otokorelasyon eğrisi, (b) darbe katarı ve (c) radyo frekans (RF) spektrumu. 67
Şekil 3.6.1 Cr:LiSAF lazerinin düzeneği. 70

Şekil 3.6.2 (a) Farklı geçirgenliğe sahip çıkış aynaları kullanılarak elde edilen güç verim eğrileri. (b) Bu aynalar için elde edilmiş güç eşik değerlerinin çıkış aynası geçirgenliğine göre değişimi. 70

Tablo 3.1.1 Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan tulyum kristallerinden elde edilen ve beklenen verimler..... 39
Tablo 3.1.2 Cr^{4+}:forsterit lazeri ile uyarılan tulyum kristallerinden elde edilen ve beklenen verimler..... 39

ÖZET

TÜBİTAK tarafından 15 Ekim 2014-15 Ekim 2017 tarihleri arasında desteklenen 114F185 numaralı ve "Özgün Optik Pompalama Yöntemleri ile Geliştirilmiş 2 µm Civarında Çalışan Sürekli Dalga ve Darbeli Tulyum Katıhal Lazerleri" başlıklı proje kapsamında, 2 µm ve 2.3 µm dalgaboylarında çalışan tulyum katkılı lazerlerin darbeli, sürekli-dalga, diyot pompalı ve kip-kilitli rejimlerdeki çalıştırılışı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Tamamlanan çalışmalar arasında:

1) 2 µm dalgaboyu civarında çalışan, kazanç anahtarlamalı %1.5 Tm^{3+}:YAP, %4 Tm^{3+}:YAP, %5 Tm^{3+}:LuAG lazerlerinin 800 ve 1200 nm'deki uyarılmalarının kıyaslamalı incelemesi,

2) 2068 nm ve 1968 nm dalgaboylarında çalışan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin 800 ve 1200 nm dalgaboylarında uyarılması ve lazer performansının kıyaslamalı olarak incelenmesi,

3) Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 µm dalgaboyunda pasif Q anahtarlama rejiminde çalıştırılması ve deneysel karakterizasyonu,

4) Düşük eşikli, diyot pompalı Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 µm dalgaboyunda çalıştırılması,

5) Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 µm dalgaboyunda Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılması ve femtosaniye darbe üretimi yer almaktadır.

Pompa dalgaboylarının kıyaslandığı deneylerde, tulyum katkılı kristaller için 800 nm pompa dalgaboyu, tulyum katkılı lutetia seramik için ise 1200 nm pompa dalgaboyu, elde edilebilen güç verimi açısından, daha uygun bulunmuştur. Sonraki deneylerde, sürekli dalga Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan Tm^{3+}:YLF lazeri 2.3 µm civarında kurulmuş ve rezonatör içine yerleştirilen Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu sayesinde, pasif Q anahtarlama rejiminde çalıştırılmıştır. Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 µm dalgaboyunda pasif Q anahtarlamalı rejimde çalıştırılışı, literatürde ilk kez gösterilmiştir. 120 mW güce sahip bir diyot pompa lazeri ile Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 µm dalgaboyunda düşük eşikli çalıştırılışı da deneysel olarak gösterilmiştir. Son olarak, 2.3 µm dalgaboyundaki Tm^{3+}:YLF lazeri, Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılmış ve 2304 nm dalgaboyunda, 514 fs uzunluğunda darbeler üretilmiştir. 2.3 µm dalgaboyunda çalışan Tm^{3+}:YLF lazeri ile femtosaniye darbe üretimi, literatürde ilk kez gösterilmiştir.

ABSTRACT

The Project 114F185 titled “Development of continuous wave and pulsed solid-state thulium lasers around 2 μm based on novel optical pumping schemes” and supported by TÜBİTAK between 15 October 2014 and 15 October 2017, aimed at the design, construction, and characterization of 2-μm and 2.3-μm thulium-doped gain media operated in gain-switched, continuous-wave, diode-pumped, and mode-locked regimes. The experiments which were completed during the project include:

1) comparative investigation of 800-nm and 1200-nm pumping of gain switched 2-μm thulium lasers based on 1.5% Tm^{3+}:YAP, 4% Tm^{3+}:YAP, 5% Tm^{3+}:LuAG gain media,

2) comparative investigation of 800-nm and 1200-nm pumping of a gain switched 2068-nm and 1968-nm 1.5% Tm^{3+}:Lu_2O_3 ceramic laser,

3) passive Q switching and experimental characterization of a Tm^{3+}:YLF laser at 2.3 μm,

4) investigation of a low-threshold, diode-pumped continuous-wave Tm^{3+}:YLF laser at 2.3 μm,

5) demonstration of Kerr-lens mode-locking and femtosecond pulse generation from a Tm^{3+}:YLF laser at 2.3 μm.

In the comparative pumping experiments, 800-nm and 1200-nm pumping were found to be optimum in the case of thulium-doped crystals and Tm^{3+}:Lu_2O_3 ceramic, respectively. In the next series of experiments, a Tm^{3+}:YLF laser operating at 2.3 μm was pumped with a continuous-wave Ti^{3+}:sapphire laser and passively Q switched by using a Cr^{2+}:ZnSe saturable absorber. This was the first demonstration of passive Q switching in a Tm^{3+}:YLF laser at 2.3 μm. A 120-mW single-mode pump diode was then used to demonstrate low-threshold laser operation of the Tm^{3+}:YLF laser at 2.3 μm. Finally, Kerr-lens mode-locked operation of the 2.3-μm Tm^{3+}:YLF laser was demonstrated for the first time, yielding 514-fs pulses at 2304 nm.

1 GİRİŞ VE LİTERATÜR ÖZETİ

1.1 Katıhal Lazerleri

İlk lazerin 57 yıl önce icadından bu yana, yeni lazerlerin geliştirilmesi temel bilim ve mühendislikte yoğun olarak çalışılan bir araştırma alanı olmuştur [1]. Birçok bilimsel ve teknolojik uygulamada, farklı dalgaboylarında, farklı güçlerde ve farklı çalıştırılış rejimlerinde (sürekli dalga ve darbeli) lazer kaynaklarına gereksinim duyulduğundan, geçen yarım yüzyıla rağmen, yeni lazer kaynaklarının geliştirilmesine duyulan heyecan ve ilgi azalmamıştır. Katıhal, yarıiletken, gaz ve boya lazerleri gibi çok çeşitli lazerlerin olması ve bunların tamamına farklı uygulamalarda güncel olarak ihtiyaç duyulması da, lazer araştırmalarının temel bilim ve mühendislikte önemini her zaman koruyan bir alan olduğunun göstergesidir.

Bu projede, tulyum katkılı ve 2 μm civarında ışıyan katıhal tabanlı optik kazanç ortamları üzerinde çalışılmıştır. Bu tür lazerlerde, optik kazanç elde etmek için, ışıyabilen iyon katkılanmış kristal, cam veya seramikler kullanılmaktadır. Ortamın kimyasal ve mekanik kararlılığı, katıhal tabanlı lazerlerin çevre şartlarındaki değişime daha az duyarlı olmalarını ve çok daha uzun süreli çalışmalarını sağlamaktadır. Katıhal ortamlarına geçiş metal veya nadir toprak elementleri katkılanmaktadır. Bunlardan, nadir toprak iyonları (Nd^{3+}, Tm^{3+}, Ho^{3+}, Er^{3+} gibi), dar bantlı veya geniş bantlı ışınım üretmek için kullanılabilirler. Seçilen iyon ve kristal kombinasyonlarına göre, farklı dalgaboylarında ışınım üretmek mümkündür. Örneğin, Tm^{3+} katkılanmış YAG ($Y_3Al_5O_{12}$:Yitriyum Aluminyum Garnet) kristali, 785 nm'de uyarıldığında, 2015 nm civarında geniş bir lazer ışınım bandı üretebilmektedir. Kullanılan iyonun enerji seviyelerine bağlı olarak, elde edilen lazer üç seviyeli veya dört seviyeli olabilir. Üç seviyeli lazerlerde, lazer enerji geçişi uyarılmış iyonları doğrudan temel enerji seviyesine indirir. Buna karşın, dört seviyeli lazerlerde ise lazer geçişi, temel enerji seviyesi üzerinde bulunan iki seviye arasında gerçekleşir. Bu farktan dolayı, üç seviyeli lazerlerde, çok daha yüksek düzeyde tekrar soğurulma kayıpları (reabsorption losses) oluşmakta ve dört seviyeli lazerlere göre daha yüksek eşik pompa güçlerinde lazer ışınımı elde edilebilmektedir [2].

1.2 Tulyum Lazerleri ve Uygulamaları

Projemizin başlıca amacı, orta-kızılaltı bölgesinin 1.8-2.4 μm dalgaboyu aralığında, sürekli dalga ve femtosaniye rejimlerinde çalışabilen, Tm^{3+} katkılı yüksek verimli katıhal lazerlerinin geliştirilmesidir. Dalgaboyu 2 μm civarında olan Tm^{3+} katkılı lazerlerin birçok bilimsel ve teknolojik uygulamaları vardır. Bunların en başında, ameliyatlarda doku kesme [3] ve doku kaynaştırma [4, 5] gibi tıbbi uygulamalar, orta-kızılaltı bölgesinin daha yüksek dalgaboylarında çalışan lazerlerin pompalanması [6], uzaktan algılama (remote sensing) [7],

lazer radar (LIDAR) [8] ve x-ışını bölgesinde eş evreli (coherent) yüksek harmonik üretimi [9] gelmektedir.

2 μm civarında suyun soğurması arttığından, tulyum lazerleri medikal uygulamalar için çok elverişlidir. Bu dalgaboyundaki ışığın su içerisindeki sönüm derinliği (penetration depth) birkaç yüz mikrometre mertebesine düşmektedir [10]. Biyolojik dokuların da büyük miktarda su içermesinden dolayı, tulyum lazerleri hassas kesim gerektiren ameliyatlarda ve doku kaynaştırma uygulamalarında en çok tercih edilen lazer kaynakları arasında yer almaktadır. Ayrıca, pıhtılaşma yoluyla fazladan kan kaybının da önüne geçilmektedir [4].

LIDAR uygulaması için kullanılacak lazer kaynaklarının seçiminde, soğurmanın ihmal edilebilir düzeyde olduğu durumlarda iki önemli kriter ön plana çıkmaktadır: (i) kırınıma bağlı genişlemenin en az düzeyde olması, (ii) saçılma miktarının düşük düzeyde olması. Kırınıma bağlı genişlemeyi en aza indirmek için mor-ötesi lazerler, Rayleigh mesafesi [2] ($z_R = \frac{n_0 \pi w_0^2}{\lambda}$; burada, z_R Rayleigh mesafesi, n_0 kırılma indisi, w_0 ışının odaktaki yarıçapı (beam waist), λ dalgaboyudur.) açısından avantajlı gibi görünse de, Rayleigh saçılmasının, dalgaboyunun çok daha kuvvetli bir fonksiyonu oluşundan ötürü [11], ($\sigma_s = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4}\left|\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r + 2}\right|^2$; burada, σ_s Rayleigh saçılımı, a saçılmaya neden olan dipolün oluşturduğu kürenin yarıçapı, ε_r ortamın elektriksel geçirgenliğidir.) yüksek dalgaboylarındaki lazerlerin atmosferik saçılma miktarları çok daha az düzeyde olacaktır. Örneğin, 2 μm dalgaboyunda çalışan bir lazerin Rayleigh saçılma miktarı 0.3 μm dalgaboyunda çalışan bir mor-ötesi lazerine göre yaklaşık $\left(\frac{2}{0.3}\right)^4 \approx 2000$ kat daha az olmaktadır.

Bu lazerlerin bir diğer uygulama alanı ise eş evreli yüksek harmonik üretimidir. Burada amaç, çok yüksek yeğinliğe sahip lazer darbeleri kullanarak gazları uyarmak ve düşük dalgaboylarında (derin mor-ötesi ve x-ışını bölgelerinde) eş evreli ışınım elde etmektir. Yüksek yeğinlikte lazer darbeleri ile gaz atomları uyarıldıkları zaman, iç kabuklardaki elektronlar büyük ivme değerleri ile ötelenmekte ve bunun sonucunda elektromanyetik ışınım yaymaktadırlar. Uyaran kaynak eş evreli olduğundan, üretilen yüksek harmonikler de eş evreli olmakta ve lazer ışığı ile benzer özellikler göstermektedir. Bu yöntemde elde edilebilecek en yüksek (cut-off) frekans,

$$\nu_c \approx \frac{\sqrt{U_0 + 3.2U_p}}{h} \tag{1.1}$$

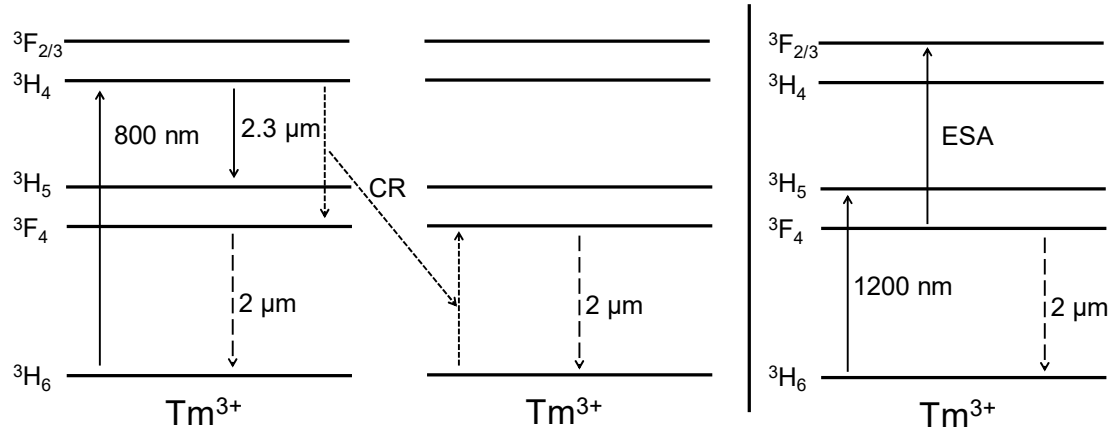
ilişkisi ile verilmektedir. Bu eşitlikte, U_0 iş enerjisi, U_p ponderomotif enerji, h ise Planck sabitidir. Denklem 1.1'den de görüleceği gibi, ponderomotif enerji arttıkça, üretilebilen üst frekans da artmaktadır. Burada, ponderomotif enerjisi U_p,

$$U_p = \frac{e^2 \langle E^2 \rangle}{4m\omega_l^2} \tag{1.2}$$

denkleminden hesaplanabilir. Burada, $\langle E^2 \rangle$ lazer elektrik alanının karesinin bir çevirimdeki ortalaması, m elektronun kütlesi, ω_l lazerin merkez açısal frekansı ve e ise elektronun yüküdür. Buradan da görüleceği gibi, lazer darbelerinin taşıyıcı dalgaboyu (carrier wavelength) arttırıldıkça, ponderomotif enerji artmaktadır. Bir başka deyişle, elektronlar daha uzun bir süre ivmeli devinime maruz kalmakta ve böylece daha yüksek frekanslarda ışınım üretebilmektedir [9]. Özetle, taşıyıcı dalgaboyu arttıkça yüksek harmonik frekansları artacağından, 2 μm civarında çalışan darbeli lazerler 800 nm'de çalışan ticari Ti^{3+}:safir lazerlerine göre daha avantajlıdır ve geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

1.3 Tulyum İyonunun Spektroskopik Özellikleri

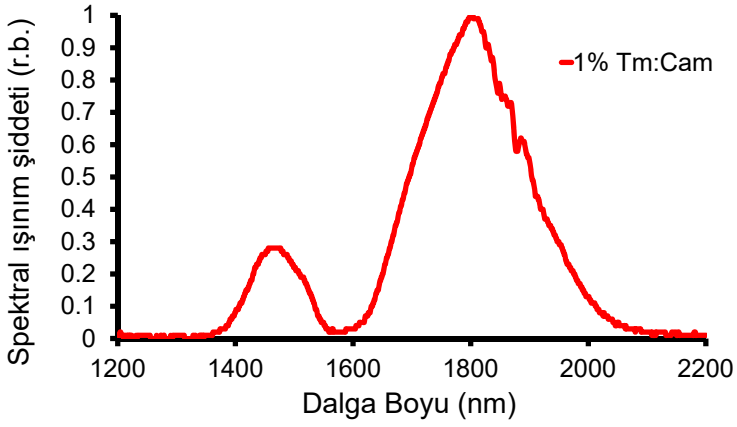
Tm^{3+} iyonunun enerji seviye diyagramı Şekil 1.3.1'de görülmektedir. Buna göre Tm^{3+}, 800 nm civarında pompalandığında $^3H_4$ seviyesine çıkmakta ve buradan da $^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ ve $^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ geçişleri sayesinde sırasıyla 1.5 μm ve 1.8 μm etrafında ışınım bandı oluşturmaktadır. Bu şekilde oluşan ışınım bantları ise Şekil 1.3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.3.1 Tm^{3+} İyonunun enerji seviyeleri ve çapraz sönüm (CR).

Tm^{3+} derişiminin yüksek olduğu kristallerde çapraz sönüm (cross relaxation, CR) denilen bir mekanizma da devreye girmekte ve 1.8 μm civarındaki lazerin verimini iki kat artırabilmektedir. Dipol-dipol etkileşimi içeren bu mekanizma sayesinde uyarılmış bir Tm^{3+} iyonu, $^3H_4 \rightarrow {}^3F_4$ geçişinin ardından ortaya çıkan enerjisini foton üretmeden temel seviyede

bulunan bir komşu tulyum iyonuna aktarmaktadır. Bu sayede, bir pompa fotonu ile $^3F_4$ enerji seviyesine uyarılmış olan iki tane tulyum iyonu elde edilmektedir. Böylece ideal şartlarda, kuantum verimliliği 2 olan bir lazer geçişi elde edilmektedir. Bir başka deyişle 800 nm'de bir pompa fotonundan 2 μm dalgaboyunda iki tane lazer fotonu üretilmektedir. Çapraz sönümleme olayı dipol-dipol etkileşimi ile oluştuğundan ve bu da iyonlar arası mesafenin çok kuvvetli bir fonksiyonu olduğundan, bu olayın verimliliği ev sahibi malzemedeki Tm^{3+} derişimi ile yakından ilgilidir [10]. Bu yöntemin önemli bir dezavantajı, tulyum sisteminin, bu şekildeki pompalama mekanizmasıyla üç seviyeli oluşundan yüksek derişimin tekrar soğurma (reabsorption) kayıplarına neden olmasıdır. Bu da lazerin çalışması için gereken pompa eşik gücünü artırmaktadır. Bir diğer pompalama yöntemi ise 1.2 μm civarında ışık kullanarak tulyum iyonlarını $^3H_6$ temel seviyesinden $^3H_5$ seviyesine uyarmaktır. Sonrasında, yukarıda anlatıldığına benzer şekilde $^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ geçişinin ardından 1.8 μm civarında lazer fotonu üretilir. Bu uyarma yönteminde çapraz sönüm ortaya çıkmamaktadır. Dolayısıyla düşük derişim değerinde daha az tekrar soğurma kaybına sahip tulyum kristalleri kullanılabilmekte ve böylece düşük pompa eşik güçlerinde lazer ışınımı elde etmek kolaylaşmaktadır. Ancak uyarılı seviyeden üst seviyelere soğurma (Şekil 1.3.1'de ESA olarak gösterilen geçiş) olabileceğinden, bu pompalama yöntemi potansiyel olarak ek kayıplara neden olabilmektedir [12]. Şekil 1.3.1'deki enerji seviyeleri her ne kadar ince çizgi olarak gösterilmiş olsa da, farklı açısal momentum özdeğerine sahip enerji seviyelerinin Stark etkisi altında ayrışmasından dolayı enerji bantları oluşmaktadır. Bu da ayarlanabilir dalgaboyu çıkışı ve femtosaniye darbe üretimine olanak sağlamaktadır. Şekil 1.3.1'den de görülebileceği gibi, 800 nm civarında uyarılan Tm^{3+} iyonunun $^3H_4 \rightarrow {}^3H_5$ geçişini kullanarak 2200 nm civarında çalışan 4 seviyeli bir lazer de kurmak mümkündür. Projemizin birinci hedefi kapsamında, 800 nm ve 1200 nm'deki pompalama yöntemleri kullanılarak, Tm^{3+} içeren farklı kristallerin enerji verimliliği deneysel olarak karşılaştırılmıştır.



Şekil 1.3.2 Tm^{3+} İyonunun tellürit cam içerisindeki ışıma bantları.

1.4 Grubumuzun Tulyum Katkılı Lazerler Konusunda Önceden Yaptığı Bilimsel Çalışmalar

Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı Tm^{3+} katkılı lazerlerin geliştirilmesi konusunda ülkemizde öncü bilimsel çalışmalar yapmıştır. Bunlar arasında, tulyum iyonunun cam ve kristal içerisindeki spektroskopik özelliklerinin incelenmesi [13-18], düşük eşik değerli özgün Tm^{3+} lazerlerinin geliştirilmesi [19-21] ve bu lazerlerin medikal uygulamalarda kullanılması [4, 22] yer almaktadır. 2001 yılındaki bir çalışmada Tm^{3+} katkılı TeO_2-WO_3 camının bileşiminin kendiliğinden ışıma olasılığı ve uyarılı ışıma arakesiti üzerindeki etkileri deneysel yöntemlerle incelendi [13]. Yine Tm^{3+} katkılı TeO_2-$CdCl_2$ camının yerel yapılarındaki farklılıkların ışıma olasılıkları [14] ve çapraz sönümlemenin 1470 ve 1800 nm'deki etkileri [15] izleyen çalışmalarla gösterildi. Tm^{3+} katkılı TeO_2-PbF_2 camının yaşam süresi ve kendiliğinden ışıma olasılıkları gibi spektroskopik özellikleri de çalışıldı [16]. LuAG kristali içerisindeki Tm^{3+} iyonunun floresans yaşam süresi ve çapraz sönüm için gerekli kritik uzaklık parametreleri belirlendi [17]. Tm^{3+} iyon derişiminin diyot pompalı Tm^{3+}:$YAlO_3$ lazerinin performansı üzerindeki etkileri [19] ve yine Tm^{3+}:$YAlO_3$ lazerinin Ti^{3+}:safir lazeriyle pompalanarak düşük eşik düzeylerindeki çalışması araştırıldı [20]. Yine düşük maliyetli diyotlarla pompalanan, düşük eşik değerli Tm^{3+}:YAG lazerinin kurulumu [21] ve Tm^{3+}:YAP lazerinin doku kaynaştırma ve beyin ablasyonu uygulamalarındaki elverişliliği araştırma laboratuvarımızın Tm^{3+} katkılı lazerler üzerindeki diğer çalışmaları arasındadır [4, 5].

1.5 Femtosaniye Darbe Üretimi

Bilindiği gibi, sürekli dalga rejiminde çalışan bir lazer rezonatörü içerisinde, farklı faz değerlerine sahip sonsuz sayıda elektromanyetik kip salınabilmektedir. Bir lazerin femtosaniye (10^{-15} s) süreye sahip darbeler üretebilmesi için, bu elektromanyetik kiplerin rezonatör içerisinde sabit faz değerleri ile salınması gerekmektedir. Kip-kilitleme (mode-locking) yöntemleri kullanılarak, lazerin kazanç ortamının sahip olduğu bant ile örtüşen sabit faz değerine sahip olarak salınan kipler elde etmek mümkündür. İki ardışık kip arasındaki frekans farkı (serbest tayf aralığı, f_0),

$$f_0 = \frac{c}{2L} \tag{1.3}$$

denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Bu denklemde, c ışığın boşluktaki hızı, L rezonatörün etkin uzunluğudur. Bilindiği gibi, belirli bir bant genişliğine sahip kazanç ortamından elde edilen optik darbenin sahip olabileceği en kısa süre Fourier dönüşüm limiti ile sınırlıdır. Bu dönüşüm limitinde darbe üretebilmek için, spektral fazın frekanstan bağımsız olması ve darbe-spektral kalınlık çarpımının (time-bandwidth product) verilen darbe zaman profili için

minimum değerinde olması gerekmektedir. Örnek olarak, $sech^2$ profiline sahip bir darbe için spektral kalınlık ve darbe süresinin ilişkisi aşağıdaki denklemde görülebilir.

$$\Delta \nu \tau_p = 0.315 \tag{1.4}$$

Burada, $\Delta\nu$, spektral kalınlık değeri, τ_p ise darbe süresidir.

1.6 Kip-kilitleme Yöntemleri

Kip-kilitleme yöntemleri, aktif ve pasif olmak üzere iki ana başlık altında toplanabilir. Aktif kip-kilitleme yönteminde, rezonatörün içerisinde salınan elektromanyetik kipler, lazerin kayıp veya kazanç miktarını dışarıdan denetleyebilen bir mekanizma ile sabit faz değerine sahip hale getirilebilir. Aktif kip-kilitleme için yaygın olarak akusto-optik modülatörler kullanılmaktadır. Bu modülatörler genellikle saydam bir kristal ve piezoelektrik dönüştürücüden oluşmaktadırlar ve çalışma frekansı, rezonatörün serbest frekans aralığı (f_0) civarındadır. Lazer rezonatörü içerisindeki ışığın kayıp miktarı, akusto-optik modülatörün uygun frekansta açılıp kapanmasıyla periyodik olarak değiştirilebilir [23]. Bu yöntem ile yapılan kip-kilitleme deneylerinden 10-100 pikosaniye aralığında süreye sahip darbeler elde edilebilir.

Önerilen projede femtosaniye mertebesinde sürelere sahip darbeler üretmek amaçlandığından, daha etkin bir yöntem olan pasif kip-kilitleme metodu kullanılmıştır. Pasif kip-kilitleme yönteminde, lazer rezonatörü içerisinde salınan elektromanyetik kiplerin fazını denetlemek için, bir dış mekanizmaya ihtiyaç yoktur. Bunun yerine ışık şiddetine bağlı olarak geçirgenliği değişebilen doyabilen soğuruculardan ya da Kerr odaklanma etkisinden faydalanarak elektromanyetik kiplerin kilitlenmesi gerçekleştirilebilir.

1.7 Doyabilen Soğurucular

Projemizde kullanılan doyabilen soğurucular, üzerine düşen ışığın şiddetine göre belirli bir dalgaboyu için geçirgenliği değişebilen malzemelerdir. Kip-kilitli rejimde çalışan bir rezonatörün ürettiği darbelerin tepe gücü, sürekli dalga rejiminde çalıştığında ortaya çıkan ışık şiddetinden daha fazla olduğu için, lazer kip-kilitli durumu destekleyecek ve kısa süreli darbeler elde edilebilecektir. Bilindiği gibi, yarıiletkenlerin valans ve iletim bantları birbirinden E_{gap} kadar ayrılmıştır. Doyabilen soğurucu, uygun dalgaboyuna sahip ışığa maruz bırakıldığında, valans bandında yer alan elektronlar iletim bandına geçiş yaparlar ve belirli bir süre sonra (sönüm süresi, recovery time) [24] eski konumlarına geri dönerler. Bu sönüm zamanı kısa da olsa, uzun da olsa, soğurucunun parametrelerini uygun aralıkta seçerek darbe üretmek mümkündür. Denklem 1.4'ten de görülebileceği gibi, kazanç bandının THz'ler mertebesinde olduğu ortamlardan, femtosaniye süreli darbe üretmek mümkündür.

Günümüzde yaygın olarak, pasif kip-kilitleme deneylerinde yarıiletken doyabilen soğurucu aynalar (SESAM: Semiconductor Saturable Absorber Mirror) kullanılmaktadır [25]. Tipik bir SESAM, doyabilen soğurucu özelliği gösteren yarıiletken tabanlı kuantum kuyu katmanları ve istenilen dalgaboyunda yüksek yansımaya sahip çeyrek dalgaboyu uzunluğunda Bragg katmanlarından oluşmaktadır. Kullanılan yarıiletken malzemenin E_{gap} değeri, doyabilen soğurucunun çalışma dalgaboyunu, kuantum kuyu tasarımı ise modülasyon derinliğini belirlemektedir.

Keşfi 2005 yılı Nobel Fizik Ödülü'ne layık görülen, ve elektronik uygulamaları çok yaygın olarak çalışılan grafenin, son yıllarda optik alanında da önemli uygulamaları olduğu gösterilmiş [26, 27] ve özellikle birçok lazer ile femtosaniye darbe üretiminde başarıyla kullanılmıştır [28]. Grafen gibi, karbondan oluşan ve nano yapıya sahip bir diğer doyabilen soğurucu da karbon nanotüplerdir. Her iki doyabilen soğurucu da, elverişli optik ve elektronik özelliklerinden dolayı SESAM'a alternatif olarak kullanılmaya başlanmıştır [27, 29]. Grafen, diğer yarıiletken malzemelerden farklı olarak sıfır E_{gap} değerine sahiptir ve grafen yapısı içerisindeki elektronlar,

$$E = h\nu_F|k| \tag{1.5}$$

denklemi ile verilen, lineer dispersiyon bağıntısına uyarak ilerlemektedir [30, 31]. Yukarıda verilmiş olan dispersiyon bağıntısında k, iki boyutlu dalga vektörü, v_F Fermi hızı (10^6 ms^{-1}) ve h Planck sabitidir. Bunun sayesinde, grafen çok geniş bir dalgaboyu aralığında soğurma özelliğine sahiptir. Ayrıca, grafen katmanlarının her birinin optik soğurma miktarı (A), dalgaboyundan bağımsız olarak,

$$A = 1 - T \approx \pi\alpha \approx 2.3\% \tag{1.6}$$

ilişkisi ile temel fizik sabitleri cinsinden yazılabilmektedir [32]. Bu denklemde, α, ince yapı sabiti, T ise grafenin tek katmanının bir geçişteki geçirgenliğidir.

Tek katmandan oluşan grafen doyabilen soğurucu kullanılarak, yukarıda sıralanmış olan özellikler sayesinde, elektromanyetik spektrumun geniş bir kısmında (800-2500 nm) çalışan lazerler, kip-kilitli rejimde çalıştırılmıştır [33-40].

Son yıllarda yaygın kullanımı artmakta olan bir diğer karbon tabanlı doyabilen soğurucu çeşidi de karbon nanotüplerdir. Karbon nanotüpler, grafen katmanlarının belirli bir açıda ve yarıçapta kıvrılması ile elde edilen yapılar olarak düşünülebilir. Kıvrılma açısı ve nanotüpün yarıçapına göre elde edilen yapının metalik ya da yarıiletken özellikleri ortaya çıkabilir [41]. Tek ya da çok katmanlı grafen yapısı ile benzer optik ve elektronik özelliklere sahip olduğu

için [27, 29], karbon nanotüp doyabilen soğurucular da pasif kip-kilitleme deneylerinde öne çıkmaktadır [28]. Grafenden farklı olarak, karbon nanotüplerin yarıçapları (genellikle 1-3 nm) ve üretim aşamasında kullanılan polimer katmanın türü (PMMA: Poly Methyl Methacrylate), doyabilen soğurucunun çalışma dalgaboyunu kısıtlamaktadır. Dolayısıyla, karbon nanotüp içeren PMMA katmanlarının ince tutulması, özellikle 2 μm civarında çalışan lazerler için önem arz etmektedir. Karbon nanotüplerden farklı olarak, grafen çok farklı alttaşlar üzerine aktarılabilmektedir ve bu da lazer dalgaboylarında az kaybı olan alttaşların seçimini mümkün kılmaktadır.

1.8 Kerr Odaklamalı Kip-kilitleme

Yukarıda anlatılmış olan doyabilen soğuruculardan bağımsız olarak, uzun yıllardır yaygın olarak kullanılan pasif kip-kilitleme tekniklerinden bir diğeri de Kerr etkisinden yararlanılarak yapılan, Kerr odaklamalı kip-kilitlemedir (Kerr lens mode locking) [42]. Bu yöntem, doğrusal olmayan kırılma indisinin yeterince yüksek değerlere sahip olduğu kazanç ortamlarında uygulanabilmektedir. Bir ışığın şiddeti (I) doğrusal olmayan etkilerin gözlenebilmesi için yeterli ise, ortamın kırılma indisi,

$$n = n_0 + n_2 I \tag{1.7}$$

ilişkisi ile verilir. Bu denklemde n_0, düşük ışık şiddetindeki kırılma indisi, n_2 ise doğrusal olmayan kırılma indisidir. Eğer kazanç ortamının doğrusal olmayan kırılma indisi pozitif ise, lazer ışığı ortamdan her geçişinde kendiliğinden odaklanma (self-focusing) etkisine maruz kalır. Ortamdaki pompa ışın demeti, lazer ışın demetinden daha küçük bir hacme odaklanırsa, kendiliğinden odaklanma sayesinde, pompa ve lazer ışın demetleri daha iyi örtüşeceğinden, optik kazanç da daha yüksek olacaktır. Bir lazer kip-kilitli rejimde çalışırken, ortalama gücüne göre daha yüksek tepe güçlerine sahip olduğundan, kendiliğinden odaklanma daha kolay ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla, lazer, daha yüksek optik kazanç görebilmek için, kip-kilitli rejimde çalışmayı tercih eder. Kerr odaklamalı kip-kilitleme için, genellikle mekanik titreşim gibi bir başlatma mekanizmasına gereksinim duyulur.

Doğrusal olmayan kırılma indisine sahip kazanç ortamlarında kip kilitleme rejimi, kritik güç (P_{cr}) olarak bilinen ve

$$P_{cr} = \frac{\alpha \lambda^2}{8\pi n_0 n_2} \tag{1.8}$$

ifadesi ile verilen (burada, *α*, birimsiz bir düzeltme sabitidir ve *λ* lazerin çalıştığı dalgaboyudur), tepe güçlerine varılana kadar, kararlı bir şekilde uygulanabilir. Bu tepe güçlerinin üstüne çıkıldığı durumda, darbe kararsızlıkları ve çok darbeli çalışma rejimleri gözlenebilir [43].

Kerr etkisi sayesinde ortaya çıkan ve doğrusal olmayan faz bozulmasını dengelemek için, rezonatör içerisine eksi değerde dispersiyon katılması gerekmektedir. Bu, doğru miktarda katıldığı zaman, soliton özelliğine sahip, bir başka deyişle zamandaki profilini mesafe ile değiştirmeyen darbeler üretmek mümkündür. Bu tür soliton darbeleri, kip-kilitli lazerlerle kolaylıkla üretilebilmektedir. Soliton darbelerinin enerjisi (W), indirgenmiş darbe süresi ($\tau = T/1.76$, T=Yarı şiddet darbe süresi), rezonatör içerisindeki dispersiyon miktarı (*D*) ve doğrusal olmayan Kerr katsayısı (*γ*),

$$W\tau = \frac{4|D|}{\gamma} \tag{1.9}$$

denklemi ile ilişkilidir. Doğrusal olmayan Kerr katsayısı (*γ*),

$$\gamma = \frac{2\pi}{\lambda}\frac{n_2}{A_{eff}} \tag{1.10}$$

bağıntısı kullanılarak hesaplanabilir. Yukarıdaki denklemde A_{eff}, lazer ışın demetinin etkin kesit alanıdır. Eksi dispersiyon elde etmek için, rezonatör içerisine, prizma çiftleri [44], eksi dispersiyona sahip alttaşlar veya aynalar, (DCM: Double Chirped Mirror [45]) konulabilir. Yukarıda bahsedilen kip kilitleme yöntemleri kullanılarak, Tm^{3+} katkılı farklı kazanç ortamlarının kip kilitli rejimdeki çalıştırılması literatürde incelenmiştir [36, 46-70].

1.9 Grubumuzun Kip-kilitli Lazerler Konusunda Önceden Yaptığı Deneysel Çalışmalar

Koç Üniversitesi Lazer Araştırma Laboratuvarı, Kerr odaklama yöntemini ve nano yapılı yarıiletken doyabilen soğurucuları kullanarak, değişik kazanç ortamlarının kip-kilitli çalıştırılışını incelemiş ve literetüre önemli katkılarda bulunmuştur. Kerr odaklamalı kip kilitleme yöntemi kullanılarak, femtosaniye darbe üreten Cr^{4+}:forsterite katıhal lazerleri geliştirilmiş [71, 72] ve Cr^{2+}:ZnSe lazerinin femtosaniye rejiminde çalışabileceği ilk defa gösterilmiştir [73, 74]. Grafen ve/veya karbon nanotüp doyabilen soğurucular kullanılarak, Cr^{4+}:forsterite ve Cr^{2+}:ZnSe lazerleri kip-kilitli rejimde çalıştırılmıştır. Bunlardan, grafen ile çalıştırılan kip-kilitli Cr^{2+}:ZnSe lazeri, literatürde ilk kez gösterilmiştir [37]. Ayrıca, çok yansımalı kovuk içeren Cr^{4+}:forsterite lazeri, karbon nanotüp ve grafen kullanarak, kip-kilitli

rejimde çalıştırılmış ve bu lazerle literatürde gösterilmiş en yüksek darbe tepe güçleri elde edilmiştir [38-40, 75-79].

1.10 Proje Kapsamında Yapılan Çalışmalar

1.10.1 %1.5 Tm^{3+}:YAP, %4 Tm^{3+}:YAP, %5 Tm^{3+}:LuAG Lazerlerinin 800 ve 1200 nm'deki Uyarılmalarının Kıyaslamalı İncelemesi

Tm^{3+} katkılı kazanç ortamlarının uyarılması için kurulan kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit lazerlerinin (Bölüm 2.2'de tanıtılan) kurulumu ve karakterizasyonunun ardından, Tm^{3+} katkılandırma konsantrasyonunun farklı olduğu 3 farklı lazer kazanç ortamı kullanılarak, 2 µm civarındaki ışıma verimlilikleri incelenmiştir. İş Paketi 1.1-1.4 arasında planlandığı şekilde, güç verimliliğinin konsantrasyon, kazanç ortamı türü ve pompalama dalgaboyuyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Deneysel olarak elde edilen, bir çevrimdeki rezonatör kayıpları göz önünde bulundurularak, beklenen teorik lazer verim oranları hesaplanmış ve deneysel olarak elde edilen lazer verimleri ile karşılaştırılmıştır. Deneysel ayrıntılar, hesaplamalar ve sonuçlar Bölüm 3.1'de anlatılmıştır.

1.10.2 Tm^{3+}:Lu_2O_3 Seramik Lazerinin 800 ve 1200 nm'de Uyarılması

İş Paketleri 1.1-1.4'te planlanan, Tm^{3+} katkılandırılmış kristallerin 800 ve 1200 nm civarında uyarılması ve güç verimlerinin karşılaştırılması deneylerine ek olarak, proje kapsamında edinilen Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramik tabanlı kazanç ortamının da bu iki dalgaboyu ile pompalanması ve güç verimlerinin karşılaştırılması ayrıntılı bir biçimde incelenmiştir. Son yıllarda kristal tabanlı kazanç ortamlarına alternatif olarak geliştirilen seramik tabanlı kazanç ortamları, üstün termal iletkenlik katsayıları ve geniş ışıma-soğurma bantları sayesinde ilgi çekmektedir. Her iki pompalama dalgaboyu için Tm^{3+}:Lu_2O_3 lazerinin eş zamanlı iki dalgaboyunda çalıştığı gözlenmiş, spektral ve zamansal karakterizasyonu ayrıntılı bir biçimde tamamlanmıştır. Deneysel verilerin ayrıntıları ve sonuçlar Bölüm 3.2'de sunulmuştur.

1.10.3 Pasif Q-anahtarlamalı 2.3 µm Tm^{3+}:YLF Lazeri

Sürekli dalga Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan Tm^{3+}:YLF lazeri, 2.3 µm civarında çalıştırılmış ve İş Paketi 3.4'te planlandığı gibi lazer çıkışı eniyileştirilmiştir. Sonrasında, Tm^{3+}:YLF lazeri pasif Q-anahtarlama yöntemi kullanılarak 2.3 µm'da darbeli rejimde çalıştırılmıştır. Bu çalışmada, rezonatör içine yerleştirilen Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu sayesinde darbe üretimi sağlanmıştır. Kullanılan Cr^{2+}:ZnSe örneğinin doyabilen soğurucu özelliklerine ve rezonatörün parametrelerine bağlı olarak, kHz mertebesinde darbe tekrar frekansına ve birkaç µs mertebesinde darbe uzunluğuna sahip darbeler üretilmiştir. Bu çalışmayla birlikte darbe üretimi için B planı olarak önerdiğimiz tulyum katkılı lazerlerin pasif Q-anahtarlama

rejiminde çalıştırılması da iş paketlerine ek olarak tamamlanmıştır. Deneysel çalışmanın ayrıntıları ve sonuçlar Bölüm 3.4'de ayrıntılı bir biçimde anlatılmıştır.

1.10.4 Kerr Odaklamalı Kip-Kilitli Tm^{3+}:YLF Lazeri ile 2.3 μm'de Femtosaniye Darbe Üretimi

2.3 μm dalgaboyundaki Tm^{3+}:YLF lazeri, İş Paketi 3.5'te planlandığı gibi kip-kilitli rejimde çalıştırılmıştır. Bunu sağlayabilmek için, lazer rezonatörünün boyu uzatılmış ve rezonatörün doğrusal olmayan faz modülasyonu ZnSe örneği kullanılarak artırılmıştır. Buna ek olarak rezonatör içindeki darbe gecikme dispersiyon (Group delay dispersion, GDD) miktarı dengelenmiştir. Sonuç olarak deneylerde, femtosaniye mertebesinde darbeler üretilebilmiştir. Bu çalışma ile İş Paketi 3.5 başarıyla sonuçlandırılmıştır. Deneysel çalışmanın ayrıntıları ve sonuçlar Bölüm 3.5'de anlatılmıştır.

Literatür Özeti

[1] T. H. Maiman, "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature* **187**, 493-494, (1960).

[2] A. Sennaroglu, *Photonics and Laser Engineering:Principles, Devices, and Applications*. New York: McGraw-Hill, 2010.

[3] E. Passacantilli, G. Anichini, G. Lapadula, M. Salvati, J. Lenzi, and A. Santoro, "Assessment of the utility of the 2-micron thulium laser in surgical removal of intracranial meningiomas," *Lasers Surg. Med.* **45**, 148-54, (2013).

[4] T. Bilici, H. O. Tabakoglu, N. Topaloglu, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, and M. Gulsoy, "Modulated and continuous-wave operations of low-power thulium (Tm:YAP) laser in tissue welding," *J. Biomed. Opt.* **15**, 038001, (2010).

[5] R. Rasier, M. Ozeren, O. Artunay, H. Bahcecioglu, I. Seckin, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, and M. Gulsoy, "Corneal Tissue Welding With Infrared Laser Irradiation After Clear Corneal Incision," *Cornea* **29**, 985-990, (2010).

[6] P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons, C. A. Miller, J. R. Mosto, and E. P. Chicklis, "Efficient mid-infrared laser using 1.9-μm pumped Ho:YAG and $ZnGeP_2$ optical parametric oscillators," *J. Opt. Soc. Amer. B* **17**, 723-728, (2000).

[7] T. M. Taczak and D. K. Killinger, "Development of a tunable, narrow-linewidth, cw 2.066-μm Ho:YLF laser for remote sensing of atmospheric CO_2 and H_2O," *Appl. Opt.* **37**, 8460-8476, (1998).

[8] R. Targ, B. C. Steakley, J. G. Hawley, L. L. Ames, P. Forney, D. Swanson, R. Stone, R. G. Otto, V. Zarifis, P. Brockman, R. S. Calloway, S. H. Klein, and P. A. Robinson, "Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 μm," *Appl. Opt.* **35**, 7117-7127, (1996).

[9] A. Gordon and F. X. Kartner, "Scaling of keV HHG photon yield with drive wavelength," *Opt. Express* **13**, 2941-2947, (2005).

[10] K. Scholle, S. Lamrini, P. Koopmann, and P. Fuhrberg, "2 μm Laser Sources and Their Possible Applications," in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*, B. Pal, Ed.: InTech, 2010.

[11] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3 ed. NewYork: Wiley, 1999.

[12] F. Fusari, S. Vetter, A. A. Lagatsky, B. Richards, S. Calvez, A. Jha, M. D. Dawson, W. Sibbett, and C. T. A. Brown, "Tunable laser operation of a Tm^{3+}-doped tellurite glass laser near 2 μm pumped by a 1211 nm semiconductor disk laser," *Opt. Mater.* **32**, 1007-1010, (2010).

[13] G. Ozen, A. Aydinli, S. Cenk, and A. Sennaroglu, "Effect of composition on the spontaneous emission probabilities, stimulated emission cross-sections and local

environment of Tm^{3+} in TeO_2-WO_3 glass," *J. Lumin.* **101**, 293-306, (2003).
[14] M. R. Ozalp, G. Ozen, A. Sennaroglu, and A. Kurt, "Stimulated and spontaneous emission probabilities of Tm^{3+} in TeO_2-$CdCl_2$ glass: the role of the local structure," *Opt. Commun.* **217**, 281-289, (2002).
[15] A. Sennaroglu, A. Kurt, and G. Özen, "Effect of cross relaxation on the 1470 and 1800 nm emissions in Tm^{3+}:TeO_2-$CdCl_2$ glass," *J. Phys. Condens. Matter* **16**, 2471-2478, (2004).
[16] A. Sennaroglu, I. Kabalci, A. Kurt, U. Demirbas, and G. Ozen, "Spectroscopic properties of Tm^{3+}:TeO_2-PbF_2 glasses," *J. Lumin.* **116**, 79-86, (2006).
[17] H. Kalaycioglu, A. Sennaroglu, A. Kurt, and G. Ozen, "Spectroscopic analysis of Tm3+: LuAG," *J. Phys. Condens. Matter* **19**, (2007).
[18] A. T. Gorgulu, H. Cankaya, A. Kurt, A. Speghini, M. Bettinelli, and A. Sennaroglu, "Spectroscopic characterization of Tm^{3+}:TeO_2-K_2O-Nb_2O_5 glasses for 2-μm lasing applications," *J. Lumin.* **132**, 110-113, (2012).
[19] H. Kalaycioglu, A. Sennaroglu, and A. Kurt, "Influence of Doping Concentration on the Power Performance of Diode-Pumped Continuous-Wave Tm^{3+}:$YAlO_3$ Lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **11**, 667-673, (2005).
[20] H. Kalaycioglu and A. Sennaroglu, "Low-threshold continuous-wave Tm^{3+}:$YAlO_3$ laser," *Opt. Commun.* **281**, 4071-4074, (2008).
[21] E. Beyatlı, S. Naghizadeh, A. Kurt, and A. Sennaroglu, "Low-cost low-threshold diode end-pumped Tm:YAG laser at 2.016 μm," *Appl. Phys. B* **109**, 221-225, (2012).
[22] T. Bilici, S. Mutlu, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, and M. Gulsoy, "Development of a thulium (Tm:YAP) laser system for brain tissue ablation," *Lasers Med. Sci.* **26**, 699-706, (2011).
[23] B. Furch, A. L. Scholtz, and W. R. Leeb, "Isolation and frequency conversion properties of acoustooptic modulators," *Appl. Opt.* **21**, 2344-7, (1982).
[24] J. M. Dawlaty, S. Shivaraman, M. Chandrashekhar, F. Rana, and M. G. Spencer, "Measurement of ultrafast carrier dynamics in epitaxial graphene," *Appl. Phys. Lett.* **92**, 042116, (2008).
[25] U. Keller, K. J. Weingarten, F. X. Kartner, D. Kopf, B. Braun, I. D. Jung, R. Fluck, C. Hönninger, N. Matuschek, and J. A. d. Au, "Semiconductor saturable absorber mirrors (SESAM's) for femtosecond to nanosecond pulse generation in solid-state lasers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* **2**, 435-453, (1996).
[26] K. S. Novoselov, V. I. Falko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, and K. Kim, "A roadmap for graphene," *Nature* **490**, 192-200, (2012).
[27] F. Bonaccorso, Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Graphene photonics and optoelectronics," *Nat. Photonics* **4**, 611-622, (2010).
[28] Z. Sun, T. Hasan, and A. C. Ferrari, "Ultrafast lasers mode-locked by nanotubes and graphene," *Physica E* **44**, 1082-1091, (2012).
[29] P. Avouris, M. Freitag, and V. Perebeinos, "Carbon-nanotube photonics and optoelectronics," *Nat. Photonics* **2**, (2008).
[30] A. H. Castro Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, "The electronic properties of graphene," *Rev. Mod. Phys.* **81**, 109-162, (2009).
[31] P. R. Wallace, "The band theory of graphite," *Phys. Rev.* **71**, (1947).
[32] A. B. Kuzmenko, E. van Heumen, F. Carbone, and D. van der Marel, "Universal Optical Conductance of Graphite," *Phys. Rev. Lett.* **100**, 117401, (2008).
[33] Q. Bao, H. Zhang, Y. Wang, Z. Ni, Y. Yan, Z. X. Shen, K. P. Loh, and D. Y. Tang, "Atomic-Layer Graphene as a Saturable Absorber for Ultrafast Pulsed Lasers," *Adv. Func. Mater.* **19**, 3077-3083, (2009).
[34] W. B. Cho, J. W. Kim, H. W. Lee, S. Bae, B. H. Hong, S. Y. Choi, I. H. Baek, K. Kim, D.-I. Yeom, and F. Rotermund, "High-quality, large-area monolayer graphene for efficient bulk laser mode-locking near 1.25 μm," *Opt. Lett.* **36**, 4089-4091, (2011).
[35] I. H. Baek, H. W. Lee, S. Bae, B. H. Hong, Y. H. Ahn, D. I. Yeom, and F. Rotermund, "Efficient Mode-Locking of Sub-70-fs Ti:Sapphire Laser by Graphene Saturable Absorber," *Appl. Phys. Express* **5**, 032701, (2012).

[36] J. Ma, G. Q. Xie, P. Lv, W. L. Gao, P. Yuan, L. J. Qian, H. H. Yu, H. J. Zhang, J. Y. Wang, and D. Y. Tang, "Graphene mode-locked femtosecond laser at 2 um wavelength," *Opt. Lett.* **37**, 2085-2087, (2012).

[37] M. N. Cizmeciyan, J. W. Kim, S. Bae, B. H. Hong, F. Rotermund, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked femtosecond Cr:ZnSe laser at 2500nm," *Opt. Lett.* **38**, 341-343, (2013).

[38] S. Ozharar, I. Baylam, M. N. Cizmeciyan, O. Balci, E. Pince, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked multipass-cavity femtosecond Cr^{4+}: forsterite laser," *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, 1270-1275, (2013).

[39] F. Canbaz, N. Kakenov, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked Cr:LiSAF laser at 850 nm," *Opt. Lett.* **40**, 4110-4113, (2015).

[40] F. Canbaz, N. Kakenov, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Generation of sub-20-fs pulses from a graphene mode-locked laser," *Opt. Express* **25**, 2834-2839, (2017).

[41] S. M. Bachilo, M. S. Strano, C. Kittrell, R. H. Hauge, R. E. Smalley, and R. B. Weisman, "Structure-assigned optical spectra of single-walled carbon nanotubes," *Science* **298**, 2361-6, (2002).

[42] D. E. Spence, Kean, P. N., Sibbett, W., "60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.* **16**, (1991).

[43] D. Huang, M. Ulman, L. H. Acioli, H. A. Haus, and J. G. Fujimoto, "Self-Focusing-Induced Saturable Loss for Laser Mode-Locking," *Opt. Lett.* **17**, 511-513, (1992).

[44] R. L. Fork, O. E. Martinez, and J. P. Gordon, "Negative dispersion using pairs of prisms," *Opt. Lett.* **9**, 150-152, (1984).

[45] F. X. Kartner, N. Matuschek, T. Schibli, U. Keller, H. A. Haus, C. Heine, R. Morf, V. Scheuer, M. Tilsch, and T. Tschudi, "Design and fabrication of double-chirped mirrors," *Opt. Lett.* **22**, 831-833, (1997).

[46] C. Luan, K. Yang, J. Zhao, S. Zhao, T. Li, H. Zhang, J. He, L. Song, T. Dekorsy, M. Guina, and L. Zheng, "Diode-pumped mode-locked Tm:LuAG laser at 2 μm based on GaSb-SESAM," *Opt. Lett.* **42**, 839-842, (2017).

[47] Y. Wang, R. Lan, X. Mateos, J. Li, C. Li, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, V. Petrov, and U. Griebner, "Thulium doped LuAG ceramics for passively mode locked lasers," *Opt. Express* **25**, 7084-7091, (2017).

[48] Y. C. Wang, G. Q. Xie, X. D. Xu, J. Q. Di, Z. P. Qin, S. Suomalainen, M. Guina, A. Harkonen, A. Agnesi, U. Griebner, X. Mateos, P. Loiko, and V. Petrov, "SESAM mode-locked Tm:CALGO laser at 2 μm," *Opt. Mater. Express* **6**, 131-136, (2016).

[49] L. C. Kong, Z. P. Qin, G. Q. Xie, X. D. Xu, J. Xu, P. Yuan, and L. J. Qian, "Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked 2-μm Tm:$CaYAlO_4$ laser," *Opt. Lett.* **40**, 356-358, (2015).

[50] T. Feng, K. Yang, J. Zhao, S. Zhao, W. Qiao, T. Li, T. Dekorsy, J. He, L. Zheng, Q. Wang, X. Xu, L. Su, and J. Xu, "1.21 W passively mode-locked Tm:LuAG laser," *Opt. Express* **23**, 11819-11825, (2015).

[51] A. Gluth, Y. C. Wang, V. Petrov, J. Paajaste, S. Suomalainen, A. Harkonen, M. Guina, G. Steinmeyer, X. Mateos, S. Veronesi, M. Tonelli, J. Li, Y. B. Pan, J. K. Guo, and U. Griebner, "GaSb-based SESAM mode-locked Tm:YAG ceramic laser at 2 μm," *Opt. Express* **23**, 1361-1369, (2015).

[52] Z. P. Qin, G. Q. Xie, L. C. Kong, P. Yuan, L. J. Qian, X. D. Xu, and J. Xu, "Diode-Pumped Passively Mode-Locked Tm:$CaGdAlO_4$ Laser at 2-μm Wavelength," *IEEE Photonics J.* **7**, (2015).

[53] J. Hou, B. T. Zhang, X. C. Su, R. W. Zhao, Z. W. Wang, F. Lou, and J. L. He, "High efficient mode-locked Tm:YAP laser emitting at 1938 nm by SESAM," *Opt. Commun.* **347**, 88-91, (2015).

[54] K. Yang, D. Heinecke, J. Paajaste, C. Kölbl, T. Dekorsy, S. Suomalainen, and M. Guina, "Mode-locking of 2 μm Tm,Ho:YAG laser with GaInAs and GaSb-based SESAMs," *Opt. Express* **21**, 4311-4318, (2013).

[55] K. J. Yang, D. C. Heinecke, C. Kölbl, T. Dekorsy, S. Z. Zhao, L. H. Zheng, J. Xu, and

G. J. Zhao, "Mode-locked Tm,Ho:YAP laser around 2.1 μm," *Opt. Express* **21**, 1574-1580, (2013).

[56] A. Gluth, X. Mateos, J. Paajaste, S. Suomalainen, A. Härkönen, M. Guina, G. Steinmeyer, S. Veronesi, M. Tonelli, J. Li, Y. Pan, J. Guo, V. Petrov, U. E. D. H. G. Griebner, and P. Moulton, "Passively Mode-Locked Tm:YAG Ceramic Laser at 2 μm," presented at Advanced Solid-State Lasers Congress, Paris, 2013, pp. AF1A.2.

[57] J. Ma, G. Q. Xie, W. L. Gao, P. Yuan, L. J. Qian, H. H. Yu, H. J. Zhang, and J. Y. Wang, "Diode-pumped mode-locked femtosecond Tm:CLNGG disordered crystal laser," *Opt. Lett.* **37**, 1376-1378, (2012).

[58] A. A. Lagatsky, O. L. Antipov, and W. Sibbett, "Broadly tunable femtosecond Tm:Lu2O3 ceramic laser operating around 2070 nm," *Opt. Express* **20**, 19349-19354, (2012).

[59] B. Q. Yao, W. Wang, K. K. Yu, G. Li, and Y. Z. Wang, "Passively mode-locked Tm,Ho:YVO4 laser based on a semiconductor saturable absorber mirror," *Chin. Opt. Lett.* **10**, (2012).

[60] A. A. Lagatsky, F. Fusari, S. Calvez, S. V. Kurilchik, V. E. Kisel, N. V. Kuleshov, M. D. Dawson, C. T. A. Brown, and W. Sibbett, "Femtosecond pulse operation of a Tm,Ho-codoped crystalline laser near 2 μm," *Opt. Lett.* **35**, 172-174, (2010).

[61] A. A. Lagatsky, X. Han, M. D. Serrano, C. Cascales, C. Zaldo, S. Calvez, M. D. Dawson, J. A. Gupta, C. T. A. Brown, and W. Sibbett, "Femtosecond (191 fs) $NaY(WO_4)_2$ Tm,Ho-codoped laser at 2060 nm," *Opt. Lett.* **35**, 3027-3029, (2010).

[62] J. Ma, G. Q. Xie, J. Zhang, P. Yuan, D. Y. Tang, and L. J. Qian, "Passively Mode-Locked Tm:YAG Ceramic Laser Based on Graphene," *IEEE J. Sel. Top. Quant.* **21**, (2015).

[63] A. A. Lagatsky, Z. Sun, T. S. Kulmala, R. S. Sundaram, S. Milana, F. Torrisi, O. L. Antipov, Y. Lee, J. H. Ahn, C. T. A. Brown, W. Sibbett, and A. C. Ferrari, "2 mu m solid-state laser mode-locked by single-layer graphene," *Appl. Phys. Lett.* **102**, (2013).

[64] B. Yang, Q. Mei, W. Shuang, S. Ruiping, L. Diao, R. Zhaoyu, and B. Jintao, "CW Mode-Locked 1.908 μm Tm:$LiYF_4$ Slab Laser Based on an Output-Coupling Graphene Saturable Absorber Mirror," *Appl. Phys. Express* **6**, 102701, (2013).

[65] A. Schmidt, S. Y. Choi, D. I. Yeom, F. Rotermund, X. Mateos, M. Segura, F. Diaz, V. Petrov, and U. Griebner, "Femtosecond Pulses near 2 μm from a Tm:KLuW Laser Mode-Locked by a Single-Walled Carbon Nanotube Saturable Absorber," *Appl. Phys. Express* **5**, (2012).

[66] H. Cheng, X. D. Jiang, X. P. Hu, M. L. Zhong, X. J. Lv, and S. N. Zhu, "Diode-pumped 1988-nm Tm:YAP laser mode-locked by intracavity second-harmonic generation in periodically poled $LiNbO_3$," *Opt. Lett.* **39**, 2187-2190, (2014).

[67] J. Muzik, M. Jelinek, D. Vyhlidal, and V. Kubecek, "2.6 W diode-pumped actively mode-locked Tm:YLF laser," *Laser Phys. Lett.* **12**, (2015).

[68] F. Heine, E. Heumann, G. Huber, J. E. D. P. A. Koetke, and T. Fan, "Self-Mode-Locking Properties of Tm:YAG-Lasers," presented at Advanced Solid State Lasers, New Orleans, Louisiana, 1993, pp. ML3.

[69] W. B. Cho, A. Schmidt, J. H. Yim, S. Y. Choi, S. Lee, F. Rotermund, U. Griebner, G. Steinmeyer, V. Petrov, X. Mateos, M. C. Pujol, J. J. Carvajal, M. Aguilo, and F. Diaz, "Passive mode-locking of a Tm-doped bulk laser near 2 μm using a carbon nanotube saturable absorber," *Opt. Express* **17**, 11007-11012, (2009).

[70] Y. Wang, W. Chen, M. Mero, L. Zhang, H. Lin, Z. Lin, G. Zhang, F. Rotermund, Y. J. Cho, P. Loiko, X. Mateos, U. Griebner, and V. Petrov, "Sub-100 fs Tm:$MgWO_4$ laser at 2017 nm mode locked by a graphene saturable absorber," *Opt. Lett.* **42**, 3076-3079, (2017).

[71] H. Cankaya, A. Sennaroglu, and S. Akturk, "Direct generation of 81 nJ pulses and external compression to a subpicosecond regime with a 4.9 MHz chirped-pulse multipass-cavity Cr^{4+}:forsterite oscillator," *Opt. Lett.* **36**, 1572-1574, (2011).

[72] H. Cankaya, J. G. Fujimoto, and A. Sennaroglu, "Low-threshold, 12-MHz, multipass-

cavity femtosecond Cr^{4+}:forsterite laser," *Laser Phys.* **19**, 281–284, (2009).

[73] M. N. Cizmeciyan, H. Cankaya, A. Kurt, and A. Sennaroglu, "Kerr-lens mode-locked femtosecond Cr^{2+}:ZnSe laser at 2420 nm," *Opt. Lett.* **34**, 3056-3058, (2009).

[74] M. N. Cizmeciyan, H. Cankaya, A. Kurt, and A. Sennaroglu, "Operation of femtosecond Kerr-lens mode-locked Cr:ZnSe lasers with different dispersion compensation methods," *Appl. Phys. B-Lasers O.* **106**, 887-892, (2012).

[75] I. Baylam, S. Ozharar, H. Cankaya, S. Y. Choi, K. Kim, F. Rotermund, U. Griebner, V. Petrov, and A. Sennaroglu, "Energy scaling of a carbon nanotube saturable absorber mode-locked femtosecond bulk laser," *Opt. Lett.* **37**, 3555-3557, (2012).

[76] I. Baylam, O. Balci, N. Kakenov, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Graphene-gold supercapacitor as a voltage controlled saturable absorber for femtosecond pulse generation," *Opt. Lett.* **41**, 910-913, (2016).

[77] I. Baylam, M. N. Cizmeciyan, S. Ozharar, E. O. Polat, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Femtosecond pulse generation with voltage-controlled graphene saturable absorber," *Opt. Lett.* **39**, 5180-5183, (2014).

[78] I. Baylam, S. Ozharar, N. Kakenov, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Femtosecond pulse generation from a Ti^{3+}: sapphire laser near 800 nm with voltage reconfigurable graphene saturable absorbers," *Opt. Lett.* **42**, 1404-1407, (2017).

[79] S. Ozharar, I. Baylam, M. N. Cizmeciyan, O. Balci, E. Pince, C. Kocabas, and A. Sennaroglu, "Graphene mode-locked multipass-cavity femtosecond Cr^{4+}: forsterite laser," *J. Opt. Soc. Am. B* **30**, 1270-1275, (2013).

2 GEREÇ ve YÖNTEM

2.1 Tasarım Yöntemleri

Deneylerde kullanılan lazer ışın demetlerinin enlemesine elektrik alanları ve parlaklık şiddetleri normal (Gaussian) dağılım profiline sahiptir. Gauss dağılım profiline sahip ışın demetleri optik eksen boyunca yol alırken, spot genişlikleri (w) de kırınım nedeniyle değişmektedir. Spot genişliğinin kök iki katına çıktığı mesafeye Rayleigh mesafesi (z_0), bu dağılımın düzlemsel dalga yüzlerine sahip olduğu konumdaki minimum olduğu yarıçapa ise ışın demeti beli (w_0) adı verilmektedir. Bir lazer ışın demeti için Rayleigh mesafesi Denklem 2.1 ile, aynı ışın demetinin bir kazanç ortamını optimum şekilde doldurması için gerekli odak çakışma parametresi (confocal beam parameter) ise Denklem 2.2 ile hesaplanabilir.

$$z_0 = \frac{n_0 \pi w_0^2}{\lambda} \tag{2.1}$$

$$b = \sqrt{\frac{\lambda L}{2\pi n_0}} \tag{2.2}$$

Yukarıdaki denklemlerde, λ lazer dalgaboyu, n_0 ortamın sahip olduğu kırınım indisi, L ise kazanç ortamının uzunluğudur.

Bir lazerin verimli çalışabilmesi için, kazanç ortamı içerisindeki pompa ve lazer ışın demeti belinin yarıçaplarının birbirleriyle örtüşmeleri gerekmektedir. Kullanılan pompa ve lazer ışın demetlerinin paraksiyal optik kurallarına uygun olarak yol aldığını göz önünde bulundurursak, pompa ve lazer ışın demetlerinin kazanç ortamı içerisindeki yarıçaplarının hesaplanmasında ABCD matris yöntemi kullanılabilmektedir. ABCD matris yöntemi, bir optik sistemin (bu sistem lens, ayna vb optik elemanlardan oluşabilir) gelen bir ışın demetinin temel parametrelerini nasıl değiştireceğini gösterir. Bir ışın demetini tanımlamak için iki parametre kullanmak yeterlidir. Bunlar, ışın demetinin optik eksenden yüksekliği (r) ve optik eksen ile yaptığı açıdır (θ).

$$r = \begin{bmatrix} r \\ \theta \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

Sonuç olarak, bir lazer ışınının çeşitli optik elemanlardan geçtikten sonra nasıl bir değişime uğrayacağını aşağıdaki denklem ile hesaplamak mümkündür.

$$r_f = M_T r_i \tag{2.4}$$

Bu denklemde, $\mathbf{r_f}$, optik sistemden geçtikten sonra ışının aldığı son yükseklik ve açı, $\mathbf{r_i}$, sistemden geçmeden önceki hali ve $\mathbf{M_T}$ ise ABCD transfer matrisidir:

$$M_T = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Birden fazla optik elemana sahip bir sistem için, ABCD transfer matrisi, Denklem 2.6'da gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır.

$$M_T = M_{T_n} M_{T_{n-1}} \ldots = \prod_{i=n}^{1} M_{T_i} \tag{2.6}$$

ABCD matris yönteminin üç temel kuralından biri, bütün paraksiyal optik sistemlerin yerdeğişim ($\mathbf{M}_d$) ve ince mercek ($\mathbf{M}_L$) matrislerinin kombinasyonları olarak yazılabilmesidir.

$$M_d = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

$$M_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Yukarıdaki matrislerde, d, ışığın gittiği mesafe, f ise merceğin odak uzunluğudur. Bu temel kurallardan bir diğeri ise, tasarlanan lazer rezonatörünün kararlılığı hakkında bilgi vermektedir. Denklem 2.9'daki koşul sağlandığında, rezonatör içerisinde yol alan lazer demetinin optik eksene yakın konumlarda bulunacağını ve lazerin kararlı bir şekilde çalışacağını söylemek mümkündür.

$$\left|\frac{A+D}{2}\right| \leq 1 \tag{2.9}$$

Bir Gauss ışın demeti için q-parametresi, spot genişliği ve eğrilik yarıçapı bilgilerini kapsamaktadır. Bir çevrim için ABCD matrisi bilinen bir optik rezonatör içerisinde oluşan Gauss ışın demetinin q parametresi,

$$q = \frac{Aq+B}{Cq+D} \tag{2.10}$$

denklemi kullanılarak hesaplanabilir. Sonuç olarak, ışın demetinin odak çakışma parametresi, Rayleigh mesafesi, ve q parametresi ABCD matris metodu kullanılarak hesaplanabilir. Bu yöntemle, pompa lazer ışığının belli bir mesafe ilerledikten sonra, kazanç

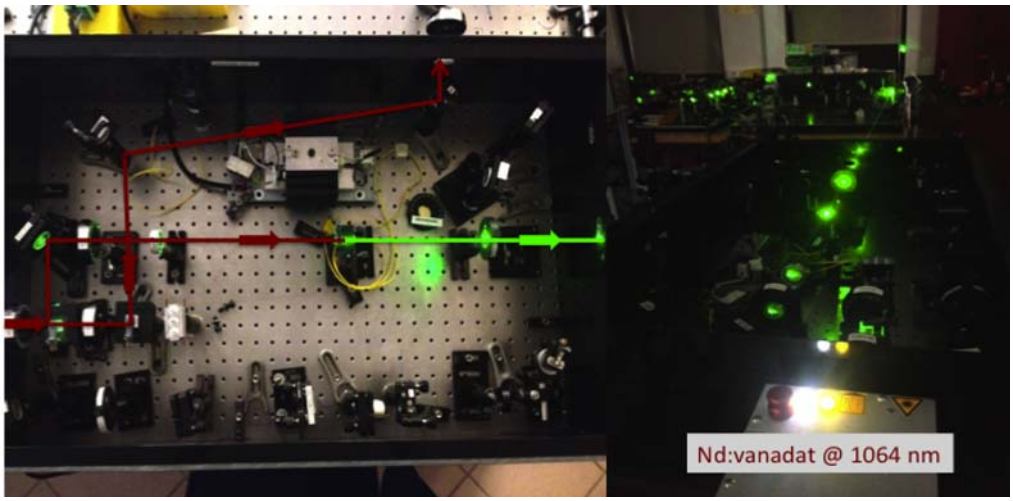
ortamına girmeden karşılaşacağı odaklayıcı mercek ve çukur ayna tarafından ne şekilde değiştirilebileceği ve yarıçapının nasıl olacağı da belirlenebilir. Ayrıca ABCD matris yöntemi sayesinde, çalıştırılması planlanan lazer rezonatörlerinin kararlı olması için gerekli olan rezonatör mesafeleri ve çukur ayna odak değerleri hesaplanabilmekte, pompa ve lazer kipleri eşleştirilebilmektedir.

2.2 1200 ve 800 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Pompa Lazerleri

2.2.1 1200 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit Pompa Lazer Rezonatörünün Tasarımı ve Kurulumu

Projemizin birinci (İş Paketi 1.4) aşamasında belirtildiği gibi, tulyum katkılı kazanç ortamlarının karşılaştırmalı olarak incelenebilmesi ve en uygun pompa dalgaboyunun belirlenebilmesi için, kazanç anahtarlamalı, 1200 nm civarında çalışabilen Cr^{4+}:forsterit lazeri kurulmuştur. Bu lazerin kurulum aşamasında, en verimli çalışabilecek Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamının seçilebilmesi ve en uygun lazer rezonatörünün oluşturulabilmesi için Bölüm 2.1'de anlatılan hesaplamalar ve çeşitli deneyler yapılmıştır.

Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerini optik olarak pompalayabilmek için, Şekil 2.2.1'de görülen 1064 nm'de çalışan, 1kHz darbe tekrar frekansına ve 70 ns darbe uzunluğuna sahip Nd^{3+}:vanadat lazeri kullanılmıştır. Cr^{4+}:forsterit kristalini en verimli şekilde uyarabilmek için, Nd^{3+}:vanadat pompa lazerinin ışın demetinin kristal içerisindeki yarı çapının odak çakışma parametresi (confocal parameter,b) ile uyumlu olması gerekmektedir.

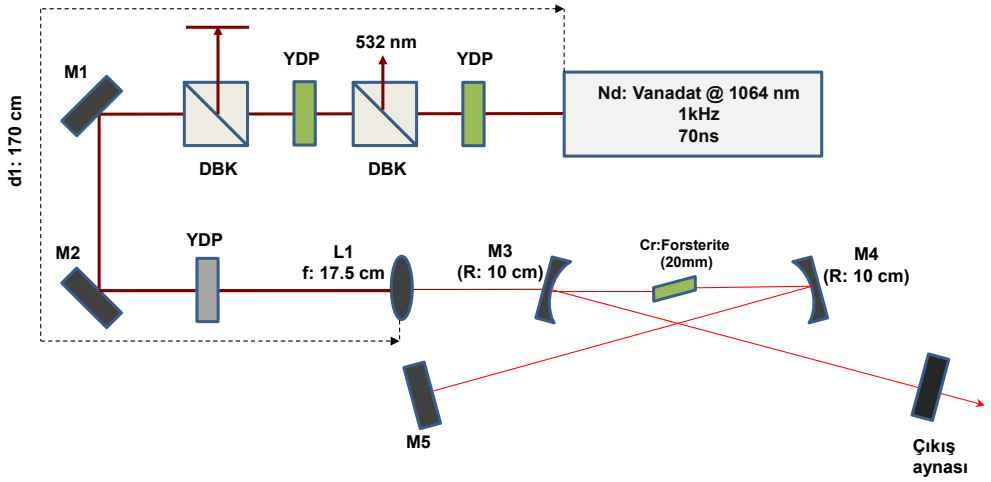


Şekil 2.2.1 Nd^{3+}:vanadat lazerinin fotoğrafı (sağ alt köşe): Ti^{3+}:safir kristalini uyarabilmek için 532 nm üretimi ve ışın demetinin izlediği yol (yeşil), 1064 nm lazer çıkışının Cr^{4+}:forsterit lazerini uyarmak için izlediği yol (bordo).

Projenin bu aşamasında, yukarıda anlatılan kriterler göz önünde bulundurularak, en verimli çalışan Cr^{4+}:forsterit pompa lazerinin kurulabilmesi amacıyla laboratuvarımızda bulunan Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamları için hesaplamalar yapılmış, Nd^{3+}:vanadat lazeri ile

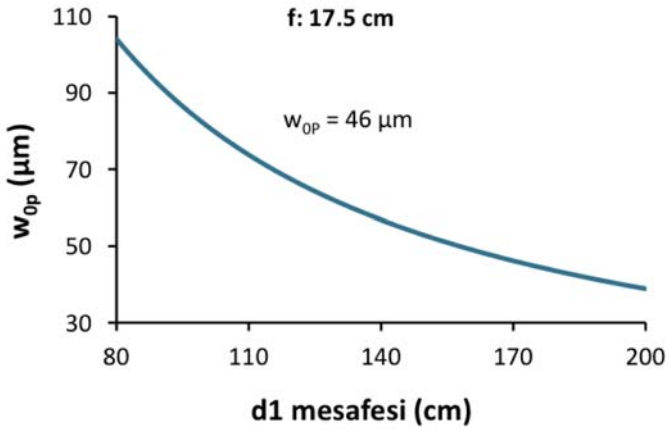
pompalanarak performansları incelenmiştir. Çalışmalar sonucunda en iyi güç performansı 20 mm uzunluğundaki Brewster açılı Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamı ile elde edilmiştir.

20 mm uzunluğunda, Brewster açısında kesilmiş Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamı için, odak çakışma parametresi ile en uyumlu w_{0P} değerini veren mercek odak uzunluğu 17.5 cm ve bu durumda elde edilen w_{0P} değeri 46 µm'dir. Şekil 2.2.2'de şematik çizimi verilen, dört aynalı bir rezonatör kurularak, pompa ve lazer kiplerini en iyi eşleştiren kol boyları hesaplanmış ve bu mesafeler için w_{0L} değeri 34 µm olarak bulunmuştur. Bu kazanç ortamı ile tasarlanan lazer için hesaplanan değerlerin sonuçları Şekil 2.2.3-2.2.4'de gösterilmektedir.

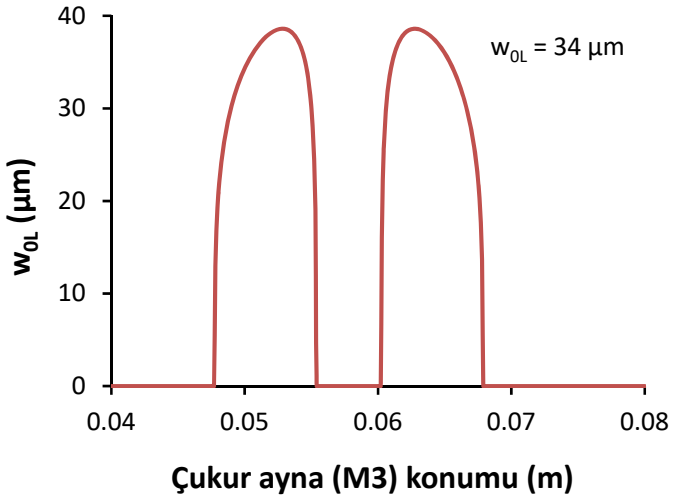


YDP: yarıdalga plakası (half wave plate)
DBK: demet bölücü küp (beam splitter cube)

Şekil 2.2.2 20 mm uzunluğunda ve Brewster açısında kesilmiş Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamı ile kurulan lazer rezonatörünün şematik gösterimi.

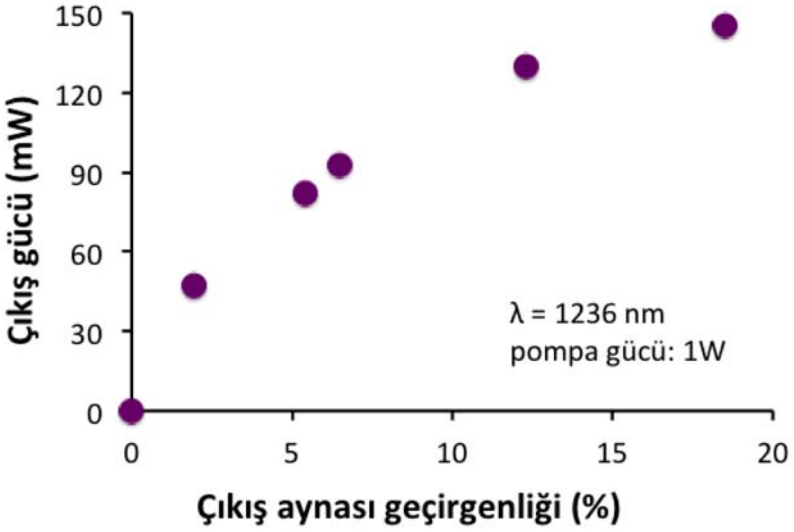


Şekil 2.2.3 ABCD matris yöntemi kullanılarak hesaplanan w_{0P} değerinin, 10 cm uzunluğunda odak mesafesi olan mercek ile Şekil 2.2.2'de gösterilen d1 mesafesine göre değişimi (d1=170 cm).

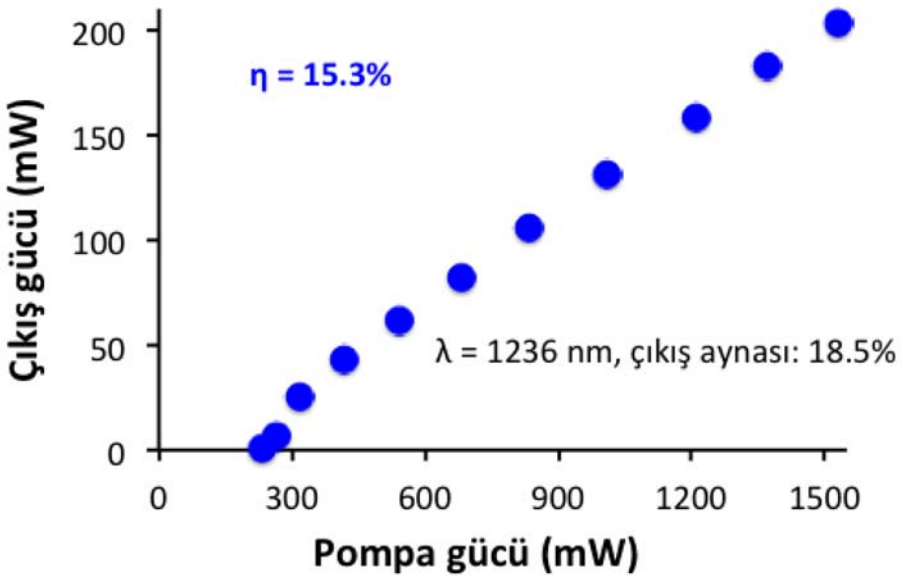


Şekil 2.2.4 Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörünün mesafeleri için hesaplanmış olan w_{0L} değerinin, çukur ayna (M3) konumuna göre değişimi.

Şekil 2.2.5'te görülebileceği gibi, 20 mm uzunluğundaki Cr^{4+}:forsterit kazanç ortamını içeren lazer rezonatörü için en uygun çıkış aynası geçirgenlik yüzdesi %18'dir. Bu çıkış aynası ile lazer, merkez dalgaboyu olan 1236 nm civarında çalışırken elde edilen verim (η) yaklaşık %15.3'tür (Şekil 2.2.6).

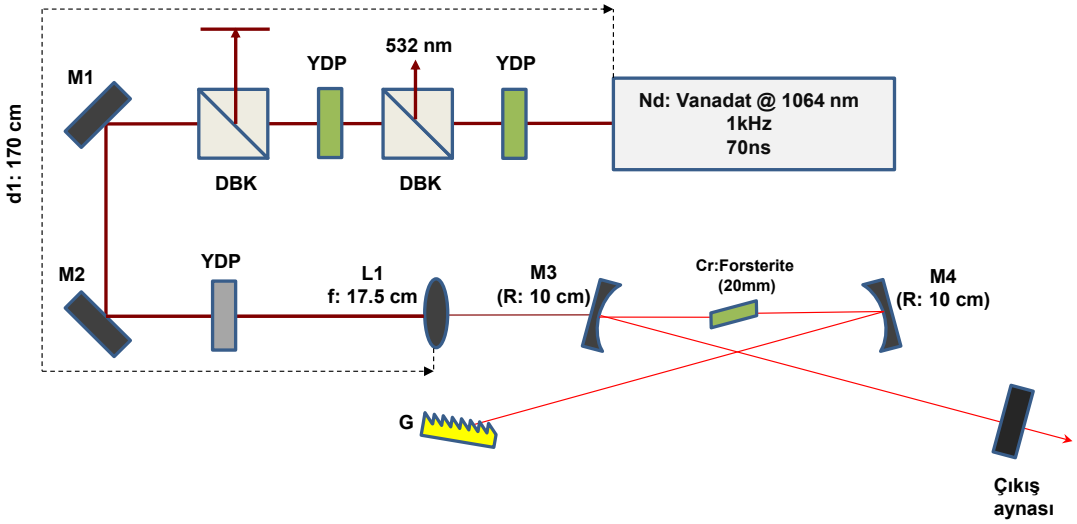


Şekil 2.2.5 Sabit pompa giriş gücü değerinde ölçülmüş olan ve çıkış aynası geçirgenlik yüzdesine göre değişen Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış gücü.



Şekil 2.2.6 1236 nm civarında çalışan, kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin, en optimum çıkış aynası ile ölçülmüş verim eğrisi.

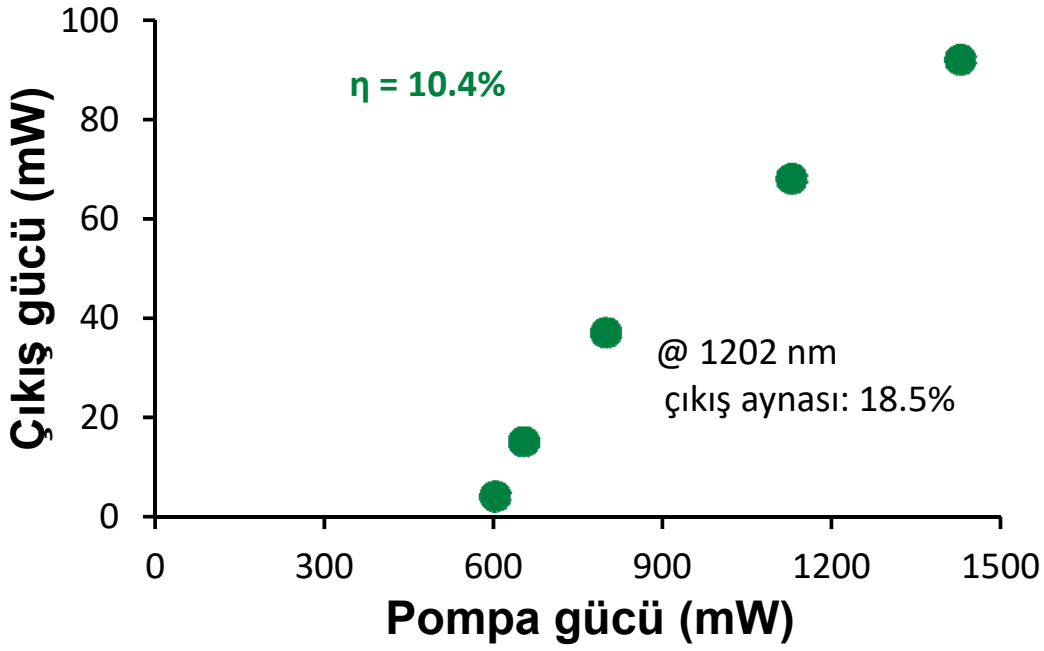
Uyarılacak olan kazanç ortamlarının soğurma bantlarının spektral kalınlıklarının oldukça dar olduğu göz önünde bulundurularak, Cr^{4+}:forsterit lazeri dalgaboyu ayarlama deneylerinde optik kırınım ağı (diffraction grating) kullanılmıştır. Laboratuvarımızda bulunan kırınım ağlarından, Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış dalgaboyu için uygun kırınım verimine sahip ve optik kayıpları azaltılmış olan kırınım ağı (G), Şekil 2.2.7'de gösterildiği gibi rezonatöre ilave edilmiştir.



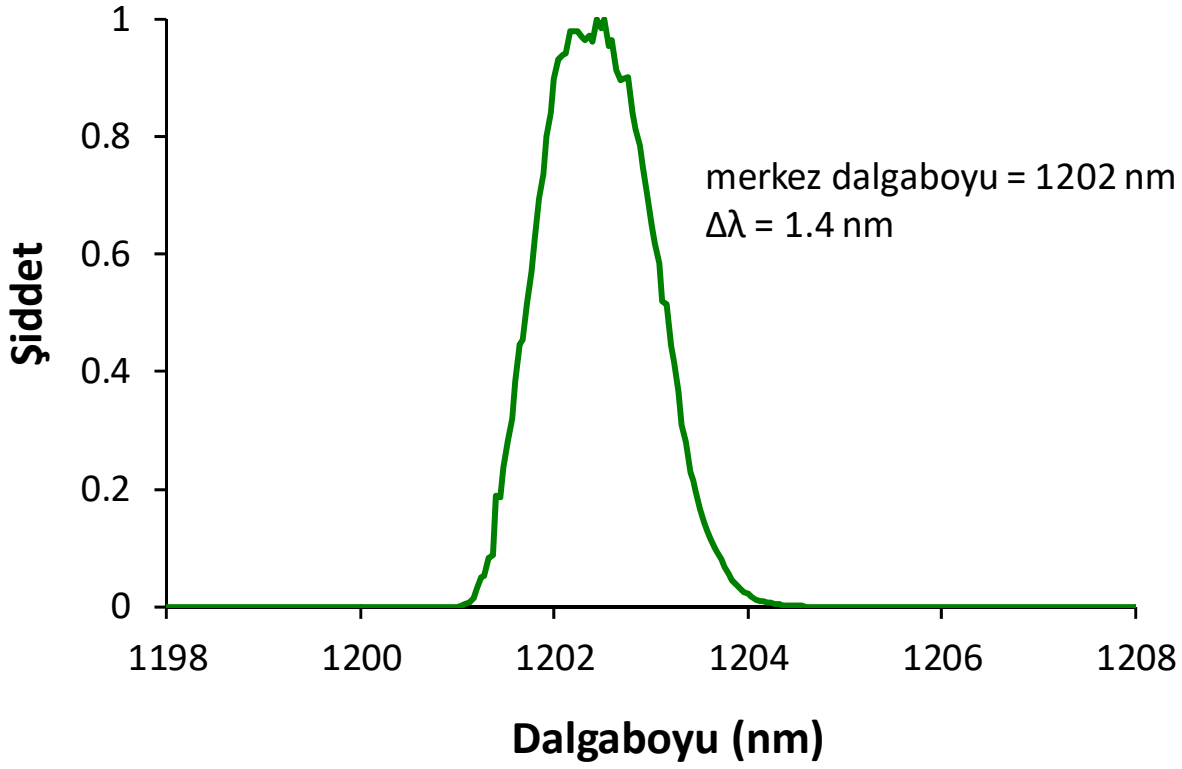
YDP: yarıdalga plakası (half wave plate)
DBK: demet bölücü küp (beam splitter cube)

Şekil 2.2.7 Kırınım ağı (G) ilave edilmiş olan Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörü.

Kırınım ağı (milimetre başına 1500 oluğa sahip) ile elde edilen verim eğrisi ve spektral kalınlık, sırasıyla Şekil 2.2.8 ve 2.2.9'da gösterilmektedir.

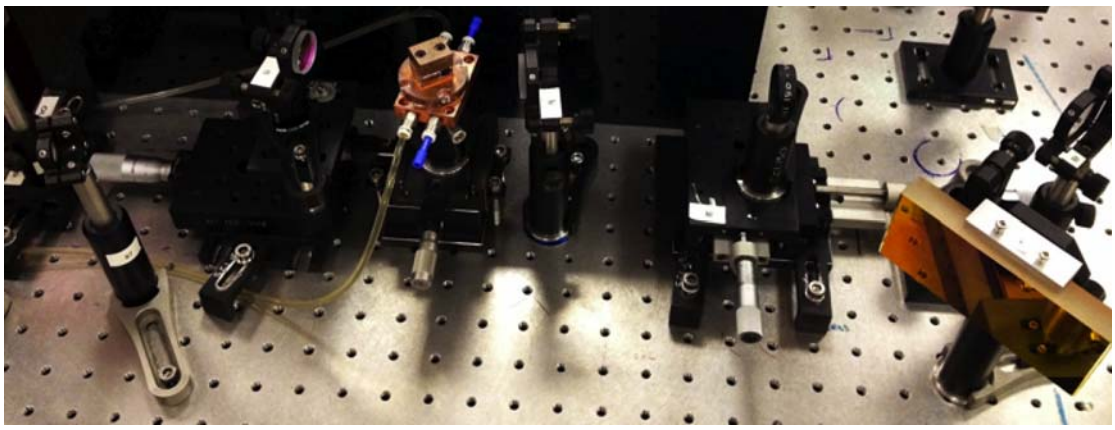


Şekil 2.2.8 1202 nm civarında çalışan Cr^{4+}:forsterit lazerinin, kırınım ağı ile ölçülmüş verim eğrisi.



Şekil 2.2.9 Kırınım ağı ile çalıştırılan Cr^{4+}:forsterit lazerinin 1202 nm civarında, optik spektrum analizör ile ölçülmüş olan spektral kalınlığı.

Sonuç olarak, optik uyarım için kullanılan Cr^{4+}:forsterit lazerinin kazanç ortamı, yukarıda analizleri ve deneysel sonuçları anlatılmış olan, 20 mm uzunluğunda ve Brewster açısında kesilmiş olan kristaldir. Kazanç anahtarlamalı Cr:forsterit lazerinin optimum çıkış aynası, yapılan deneyler sonucunda %18.5 olarak belirlenmiş ve lazerin kararlı çalışması için gerekli olan rezonatör uzunlukları için Bölüm 2.1'de anlatılan ABCD matris yöntemiyle hesaplanmıştır. Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış dalgaboyunu, tulyum katkılı kristalleri uyarabilecek dalgaboyuna ayarlamak için, yüksek kalitede ve milimetre başına 1500 oluğa sahip bir kırınım ağı kullanılmıştır. Bu kırınım ağı sayesinde, kazanç anahtarlamalı Cr:forsterite lazeri, 1200 nm civarında, 1 nm'den dar spektral kalınlığa sahip ve yaklaşık 100 mW çıkış gücünde çalıştırılabilmiştir. Darbe tekrar frekansı 1 kHz dir. Pompa olarak kullanılmış olan, 20 mm uzunluğundaki kazanç ortamına ve kırınım ağına sahip kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin fotoğrafı Şekil 2.2.10'da görülebilir.



Şekil 2.2.10 1200 nm civarında, %18'lik çıkış aynası ve milimetre başına 1500 oluğa sahip kırınım ağı ile çalışan Cr^{4+}:forsterit lazer rezonatörü.

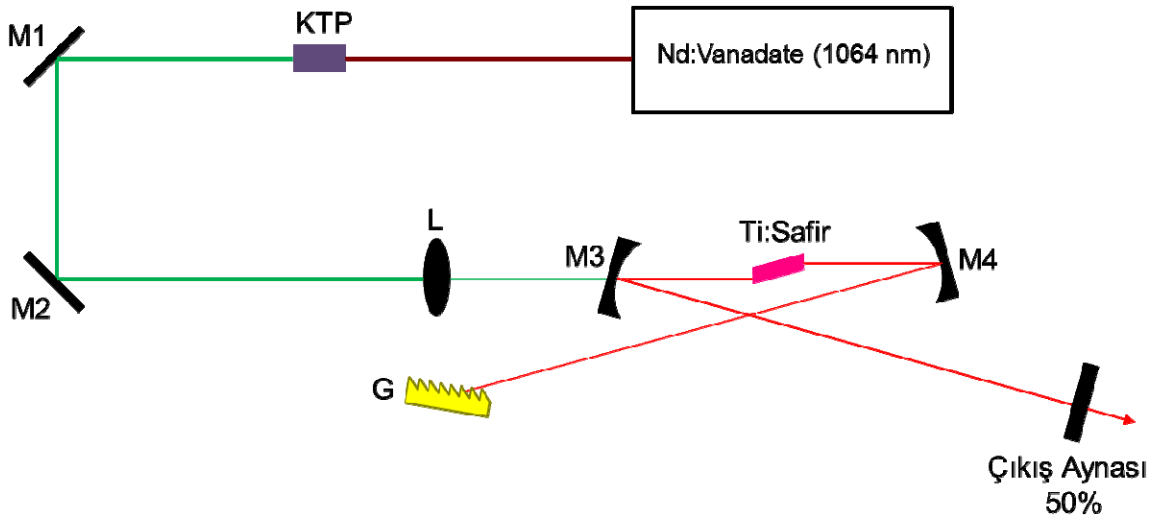
2.2.2 800 nm'de Çalışan Kazanç Anahtarlamalı Ti^{3+}:safir Pompa Lazer Rezonatörünün Tasarımı ve Kurulumu

Tulyum iyonunu 800 nm civarında uyarmak için dalgaboyu ayarlanabilen kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri kurulmuştur. Bu lazerin kazanç anahtarlamalı rejimde çalışabilmesi için yine bir darbeli lazer olan Nd^{3+}:vanadat lazeri kullanıldı. Nd^{3+}:vanadat lazeri diyot pompalı ticari bir katıhal lazer olup, 1kHz darbe tekrar frekansında, 70 ns darbe süreli ve 1064 nm dalgaboyunda ışımaktadır. Ti^{3+}:safir kristalini uyarmak için ise, 1064 nm'de darbeli rejimde çalışan Nd^{3+}:vanadat lazerinden, KTP (Potasyum Titanil Fosfat) kristali kullanılarak 532 nm'de ikinci harmonik sinyali üretilmiştir. Pompa lazer kaynağı darbeli olduğundan, optik kazanç sadece darbenin malzeme ile etkileştiği süre zarfında ortaya çıkmakta ve bunun sayesinde, Ti^{3+}:safir lazeri de nanosaniye mertebesinde ve pompa lazeri

ile aynı darbe tekrar frekansında (1kHz) darbeler üretebilmektedir. Ti^{3+}:safir pompa lazerinin tasarımı, kurulumu ve karakterizasyonu aşağıda anlatılmaktadır.

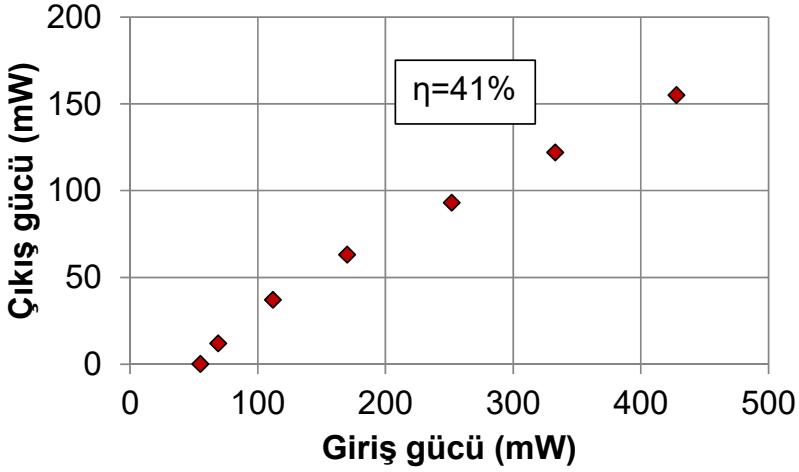
İki değişik pompa dalgaboyunun (800 nm ve 1200 nm) kıyaslanabilmesi için, Cr^{4+}:forsterit ve Ti^{3+}:safir rezonatörlerinin geometrileri birbirlerine olabildiğince yakın tasarlanmıştır.

Tulyum katkılı kazanç ortamlarının uyarılma bantlarını verimli bir şekilde pompalayabilmek için, Ti^{3+}:safir lazerinin spektral genişliği aynı kırınım ağı (G, Şekil 2.2.11) yardımıyla daraltılmıştır. Bu kırınım ağıyla kurulan Ti^{3+}:safir lazerinin spektral genişliği 0.4 nm'nin altında ölçülmüştür.

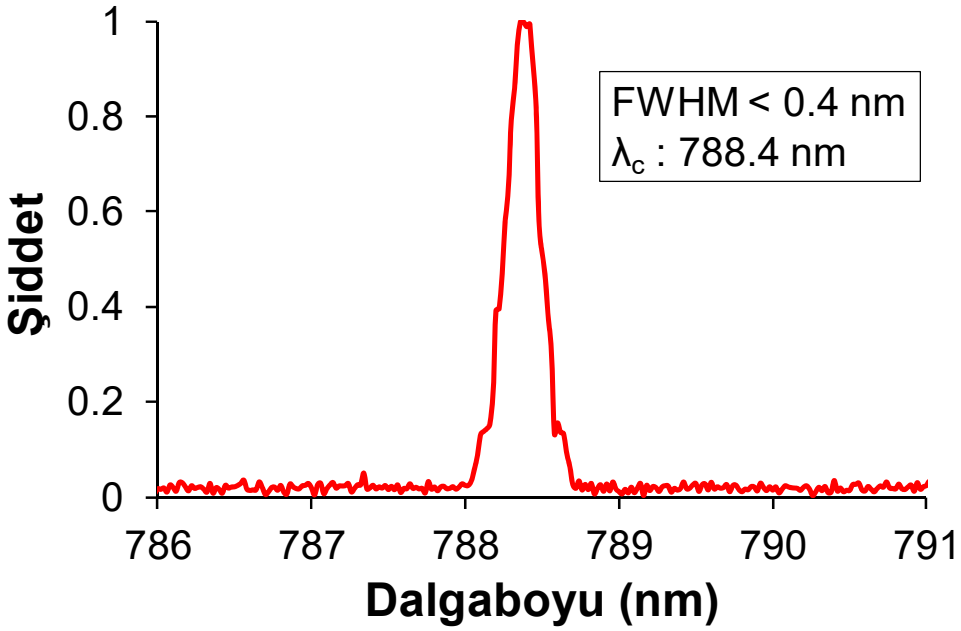


Şekil 2.2.11 Kazanç anahtarlamalı, x-şeklinde Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün deneysel düzeneği.

Güç performansı incelenmek istenen tulyum lazerlerinin en verimli şekilde kurulabilmesi için, kazanç ortamı içerisindeki pompa ve lazer ışın demetleri birbiriyle kırınım sınırları içerisinde örtüştürülmüştür. Bu hesapların nasıl yapıldığı Bölüm 2.1'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Kristal içerisindeki pompa bel yarıçapı, 3 değişik tulyum kristali için yaklaşık olarak 22 μm civarına ayarlanmıştır. Deneylerde kullanılan ve kırınım ağı içeren kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin güç verimi ve spektral genişliği Şekil 2.2.12 ve 2.2.13' de gösterilmiştir. Lazerin güç verimi ve spektral genişliği sırasıyla %41 ve 0.4 nm'den küçük olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.2.12 Kırınım ağı içeren kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin güç verimi.

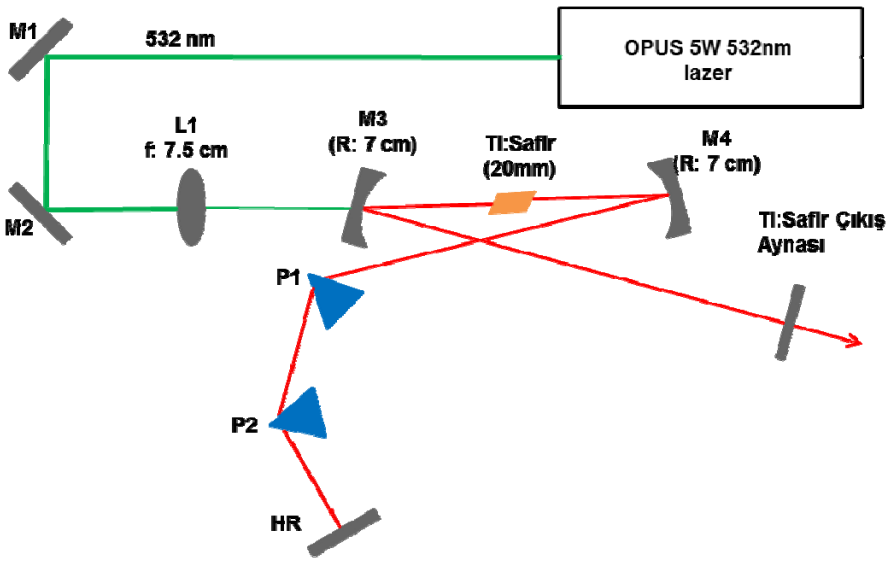


Şekil 2.2.13 Kırınım ağı içeren kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin çıkış spektrumu.

2.3 Sürekli Dalga Kaynaklar

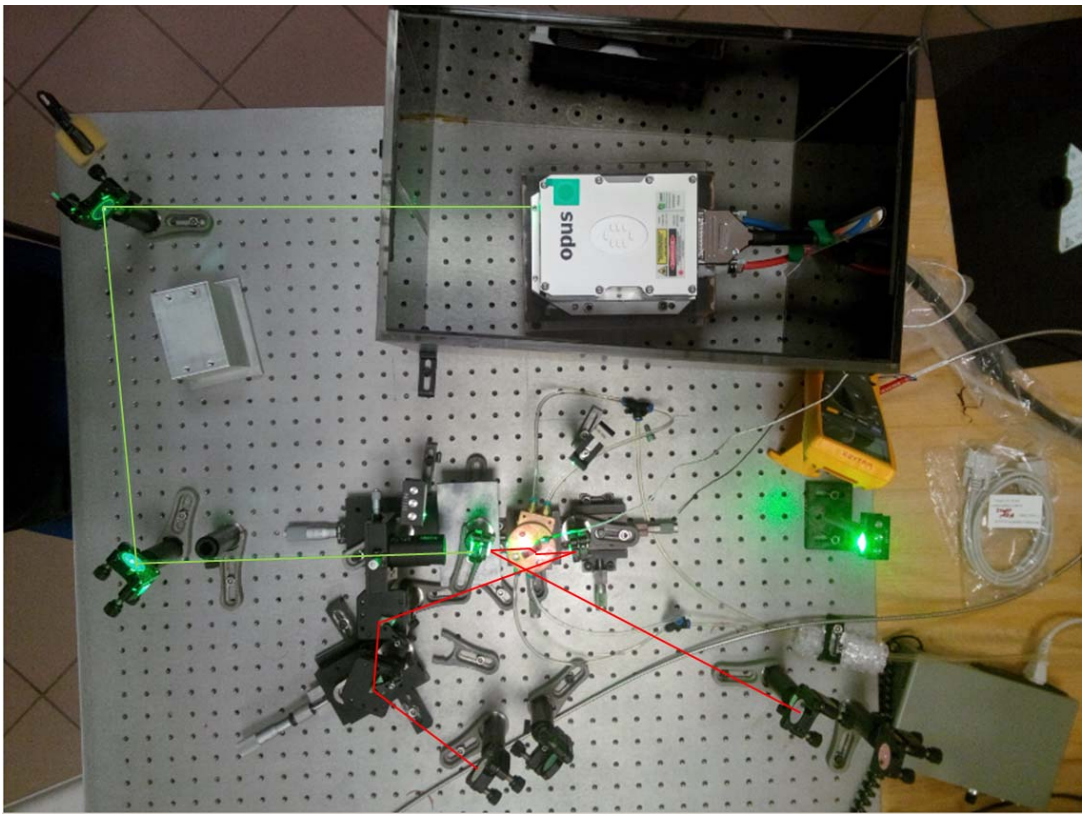
2.3.1 Ti^{3+}:safir Pompa Lazeri

Projemizin temel amaçlarından biri olan 2.3 μm dalgaboyunda kip-kilitli çalışan tulyum lazerini uyarmak için yüksek güçlü ve sürekli dalga rejiminde çalışan bir Ti^{3+}:safir lazeri kurulmuştur. Bu amaçla, projemizin İş Paketi 3.1 kapsamında 5 W pompa gücü sağlayan ticari bir yeşil lazer (Laser Quantum, model OPUS 532) satın alınmıştır. Böylece Ti^{3+}:safir lazeri, güçlü soğurma bantlarından biri olan 532 nm'de pompalanarak, 800 nm civarında yaklaşık 1W sürekli dalga çıkış gücü sağlamıştır.

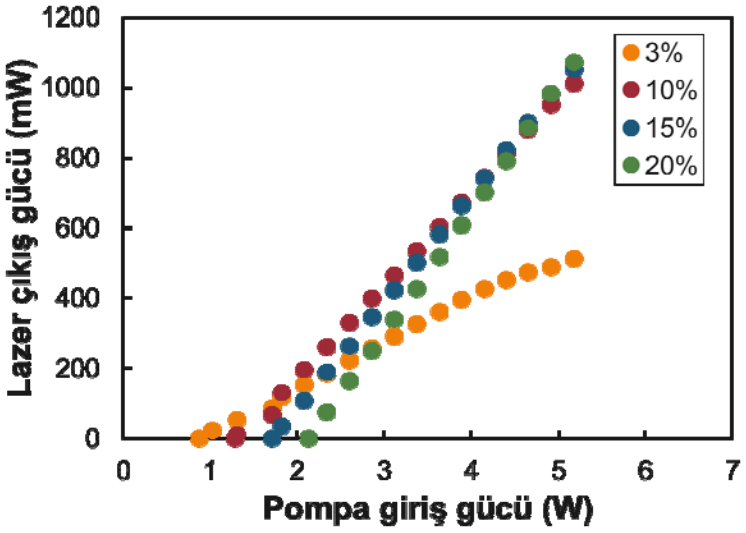


Şekil 2.3.1 532 nm'de pompalanan x-şeklinde ve dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün deneysel düzeneği.

Kurulan sürekli dalga Ti^{3+}:safir lazerinin şeması Şekil 2.3.1'de gösterilmiştir. OPUS 532 nm pompa lazeri, iki düz ayna ile bir eksen üzerinde ayarlanarak 75 mm odak uzunluğuna sahip bir mercek ile Ti^{3+}:safir kristali içine odaklanmıştır. Ti^{3+}:safir kristali 10 mm uzunluğunda olup, 532 nm dalgaboyundaki soğurma oranı %92'dir. Daha önce de bahsedildiği gibi Tm^{3+} iyonunun soğurma bantlarının dar olması sebebiyle pompa lazer rezonatörünün yüksek yansıtıcı ayna koluna iki adet SF-14 prizma ardışık şekilde eklenerek lazerin spektral genişliği daraltılmış ve dalgaboyu ayarlanabilir hale getirilmiştir. Lazer rezonatörünün diğer kolunda ise %3, %10, %15 ve %20 geçirgenliğe sahip çıkış aynaları kullanılarak güç verimleri incelenmiştir. Şekil 2.3.2'de de Ti^{3+}:safir lazer düzeneğinin fotoğrafı gösterilmiştir.



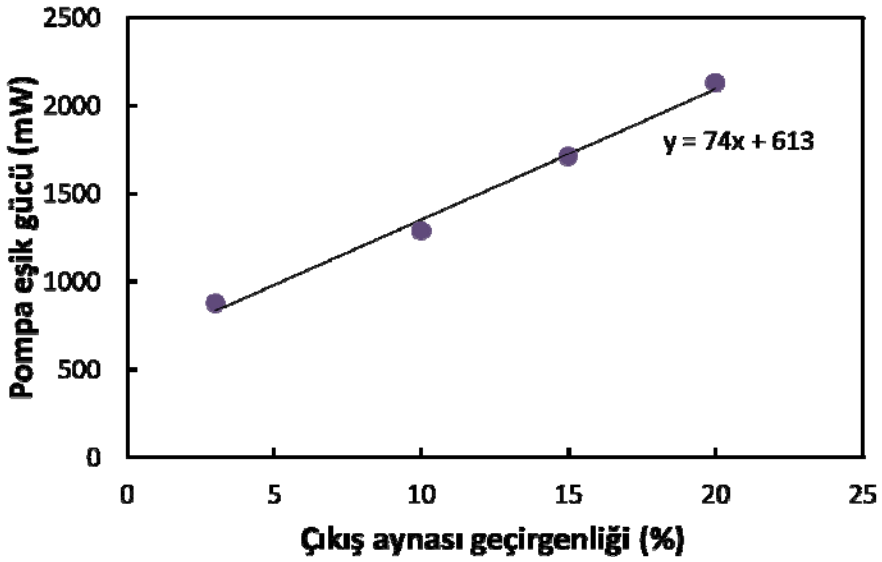
Şekil 2.3.2 532 nm OPUS lazeri ile pompalanan x-şeklindeki ve dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün fotoğrafı.



Şekil 2.3.3 Ti^{3+}:safir lazerinin farklı geçirgenliğe sahip çıkış aynaları kullanılarak ölçülmüş güç verim eğrileri.

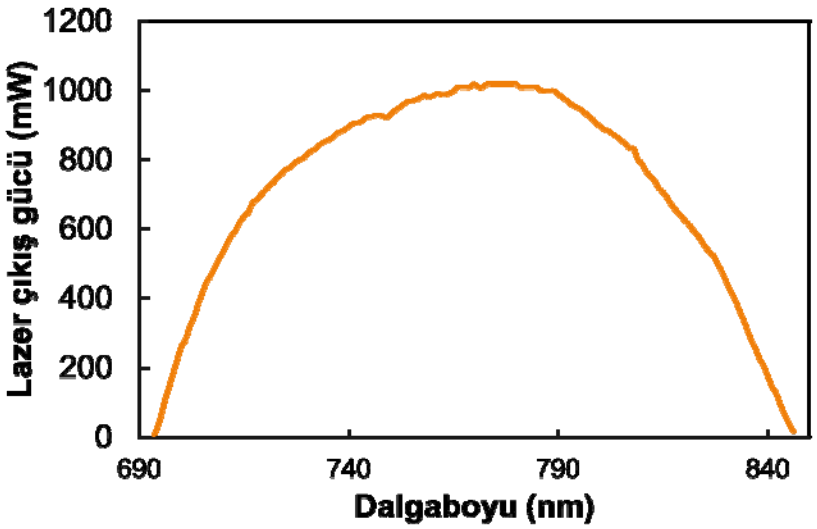
Şekil 2.3.3'te Ti^{3+}:safir lazerinin dört farklı geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak ölçülen güç verim eğrileri görülmektedir. Buna göre en düşük pompa eşik değeri, %3 lük çıkış aynası için 878 mW olurken; %10, %15 ve %20 'lik aynalar için sırasıyla 1287 mW, 1709 mW ve 2131 mW eşik pompa değeri ölçülmüştür. Geçirgenliği %3, %10, %15 ve %20 olan çıkış aynaları için güç verimleri sırasıyla %12.5, %26, %30.5 ve %35 olarak ölçülmüştür. Buna

göre en yüksek çıkış gücü %20 geçirgenliğe sahip ayna ile 1070 mW olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak Ti^{3+}:safir lazerinden 1 W üzerinde çıkış gücü elde edilebilmesi, İş Paketi 3.4 ve İş Paketi 3.5'de (Tulyum lazerinin pompalanması ve kip-kilitli rejimde çalıştırılması)planlanan çalışmalar için yeterlidir.



Şekil 2.3.4 Dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazer rezonatörü için, ölçülmüş eşik pompa gücünün çıkış aynası geçirgenliğine göre değişimi.

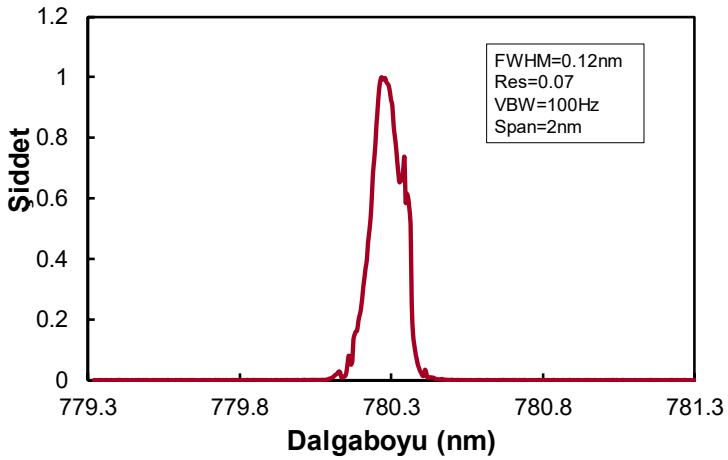
Lazerin dört farklı çıkış aynası geçirgenliğine göre ölçülmüş pompa eşik güç değerleri Şekil 2.3.4'te yer almaktadır. Bu veriler doğrultusunda bir çevrimdeki rezonatör kaybı %8.3 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.3.5 Ti^{3+}:safir lazerinin güç-dalgaboyu değişim verisi.

Deneylerimizde kullanılan Ti^{3+}:safir lazerinin güç-dalgaboyu değişim verisi Şekil 2.3.5'te gösterilmiştir. Şekilde de görülebileceği gibi, kip kilitleme deneylerinde kullanılan Tm^{3+}:YLF

kristalinin uyarılma bantlarından olan 780 nm ve 792 nm civarında, Ti^{3+}:safir pompa lazerinin çıkış gücü neredeyse sabit kalmıştır.



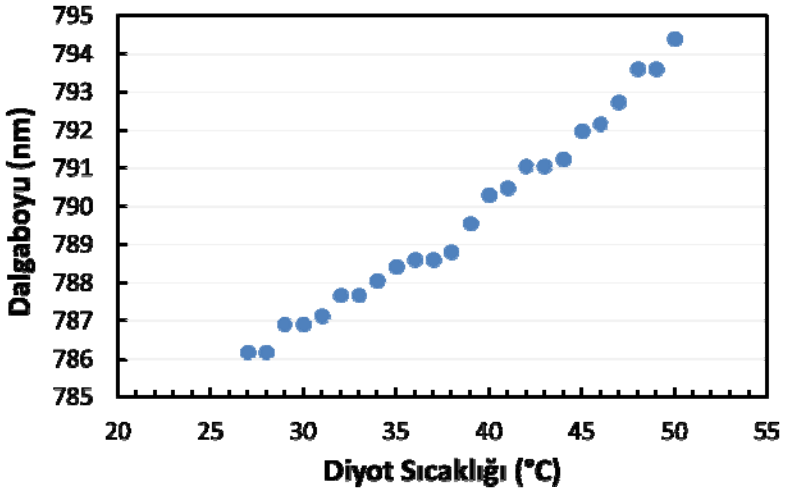
Şekil 2.3.6 Tm^{3+}:YLF lazerini uyarmak için en uygun dalgaboyuna ayarlanmış Ti^{3+}:safir pompa lazerinin optik spekturumu.

Dalgaboyu ayarlama verisine ek olarak hassas bir optik spektrum çözümleyici (Anritsu MS 9740A) ile lazerin 780 nm merkez dalgaboyundaki spektral genişliği ölçülmüştür. Şekil 2.3.6'da görülen bu ölçüme göre 0.07 nm çözünürlük (res) ve 100 Hz video bant genişliğinde (VBW), lazerin spektral genişliği (FWHM) 0.12 nm olarak ölçülmüştür. Sonuç olarak, İş Paketi 3.2'de amaçlanan OPUS pompa lazeri ile uyarılmış Ti^{3+}:safir lazerinin kurulumu ve karakterizasyonu eksiksiz bir şekilde tamamlanmıştır.

2.3.2 Diyot Pompası

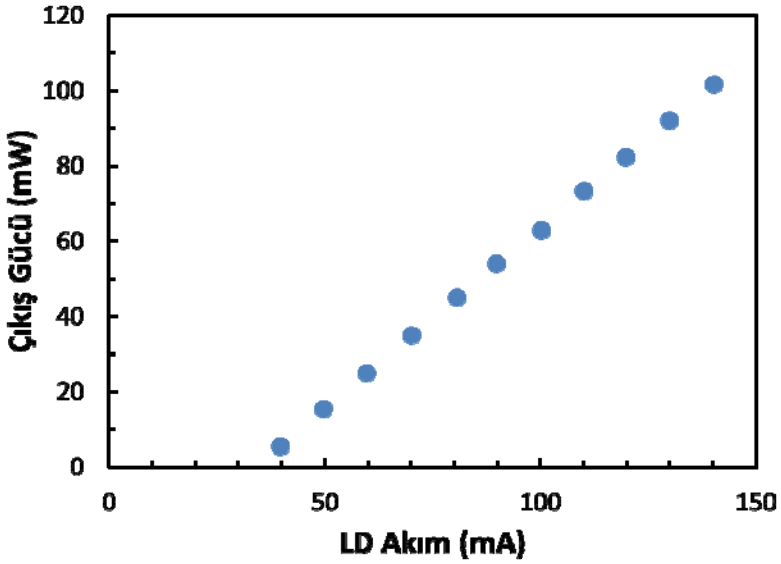
Tm^{3+} iyonları 800 nm civarında uyarıldığı zaman, $^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ geçişiyle üst lazer seviyesine çıkarılabilmektedir. %1.5 Tm^{3+} iyonu katkılı Tm^{3+}:YLF kristalinin en yüksek soğurmanın olduğu dalgaboyları 780 nm (soğurma katsayısı:1.23 cm^{-1}) ve 792 nm'dir (soğurma katsayısı:1.02 cm^{-1}) [1]. Yaygın olarak kullanılmakta olan AlGaAs diyot lazerlerinin oda sıcaklığındaki merkez dalgaboyu ise 786 nm civarındadır (Şekil 2.3.7). Diyot lazer dalgaboyu, 1°C sıcaklık değişimiyle yaklaşık 0.37 nm değiştirilebilmektedir [2]. Bu durumda, kullanılan AlGaAs diyot lazerini uygun pompa dalgaboyuna ayarlamak için oda sıcaklığına göre yaklaşık olarak 20 derece soğutmak veya 20 derece ısıtmak gerekmektedir. Diyotu çok düşük sıcaklıklara soğutmak, dalgaboyunu 780 nm'ye ayarlamamıza imkan sağlasa da, yonga üzerinde birikebilecek olan nem, diyotların zarar görmelerine neden olabilmektedir. Bunun için, 786 nm AlGaAs diyotunun ilk etapta, ısıtılarak 792 nm'de çalıştırılması uygun görülmüştür. Lazeri 50 °C'ye kadar ısıtabilmek için özel bir PID denetleyici sistemi, hizmet alımı kapsamında geliştirilmiştir. Bu PID sistemi, sıcaklık kontrolü yaparak lazer diyotunu 50 °C'ye kadar ısıtabilen bir mikro denetleyicidir. Şekil 2.3.7'de, 27 °C'den 50 °C'ye kadar olan

yonga sıcaklıklarında, lazer diyotunun ölçülmüş merkez dalgaboyu görülmektedir. Buna göre, merkez dalgaboyu 786.2 nm'den 794.4 nm'ye kadar geniş bir aralıkta ayarlanabilmiştir.



Şekil 2.3.7 Diyot pompa lazeri merkez dalgaboyunun sıcaklık ile değişimi.

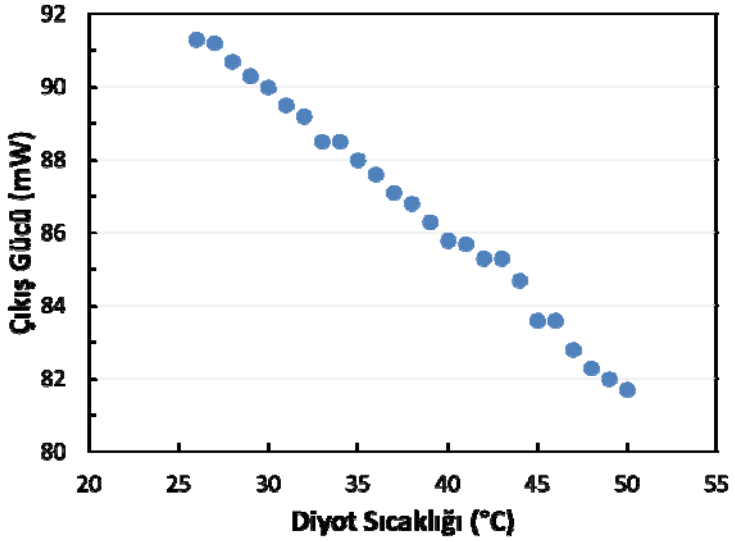
Diyot lazerinin güç verimi ölçülerek, lazer ışımasının başladığı eşik akım değerinin 34 mA olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 2.3.8'de diyot lazerinin çıkış gücünün, akım ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.3.8'den de görüldüğü gibi, 140 mA akım ile 102 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Ayrıca, bu verim eğrisi, lazer merkez dalgaboyunun 793 nm'ye ayarlandığı sıcaklıkta (yaklaşık olarak 47.5 °C) ölçülmüştür. Tm^{3+}:YLF lazer deneylerinde, pompa diyotu daha yüksek akımlarda da sürülebilmiş, 116 mW'a kadar çıkış gücü elde edilmiştir.



Şekil 2.3.8 Lazer diyotunun 47.5 °C'de ve 793 nm merkez dalgaboyunda ölçülmüş verim eğrisi.

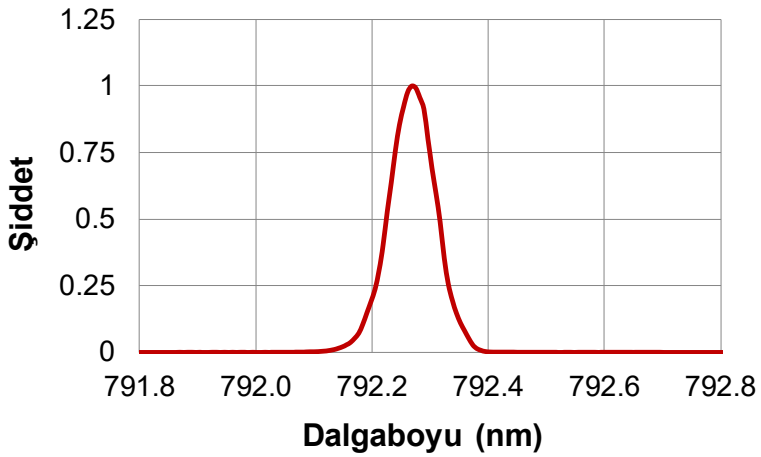
Diyot lazer çıkış gücünün artan sıcaklıkla azaldığı Şekil 2.3.9'da gösterilmiştir. Yarıiletken yonga içerisindeki fonon etkileşimlerinin sıcaklık ile daha da şiddetleneceği göz önüne

alındığı zaman, bu beklenen bir davranıştır. Şekil 2.3.9'dan da görülebileceği gibi, diyot 120 mA akımla çalışırken, yaklaşık 14 derece sıcaklık artışı, çıkış gücünde 10 mW kadar azalmaya neden olmuştur. Diyot ile 47.5 derecede elde edebildiğimiz pompa güçleriyle, Tm^{3+}:YLF lazerini 2.3 μm'da çalıştırabilmemiz mümkün olmuştur.



Şekil 2.3.9 Diyot pompa lazeriyle, 120 mA akımda elde edilen çıkış gücünün sıcaklığa göre değişimi.

Tm^{3+}:YLF lazerinin uyarılmasında kullanılan diyot lazerinin spektrumu, dalgaboyu çözünürlüğü 0.07 nm olan bir spektrum analizör (Anritsu, MS9740A) yardımıyla kaydedilmiş ve Şekil 2.3.10'da gösterilmiştir. Buna göre diyot lazerinin merkez dalgaboyu 792.3 nm ve spektrum genişliği 0.09 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 2.3.10 Tm^{3+}:YLF lazerini uyarmak için en uygun dalgaboyuna ayarlanmış diyot pompa lazerinin optik spektrumu.

Kaynaklar:

[1] V. Sudesh and E. M. Goldys, "Spectroscopic properties of thulium-doped crystalline materials including a novel host, $La_2Be_2O_5$: a comparative study," Journal of the Optical Society of America B-Optical Physics 17, 1068-1076 (2000).

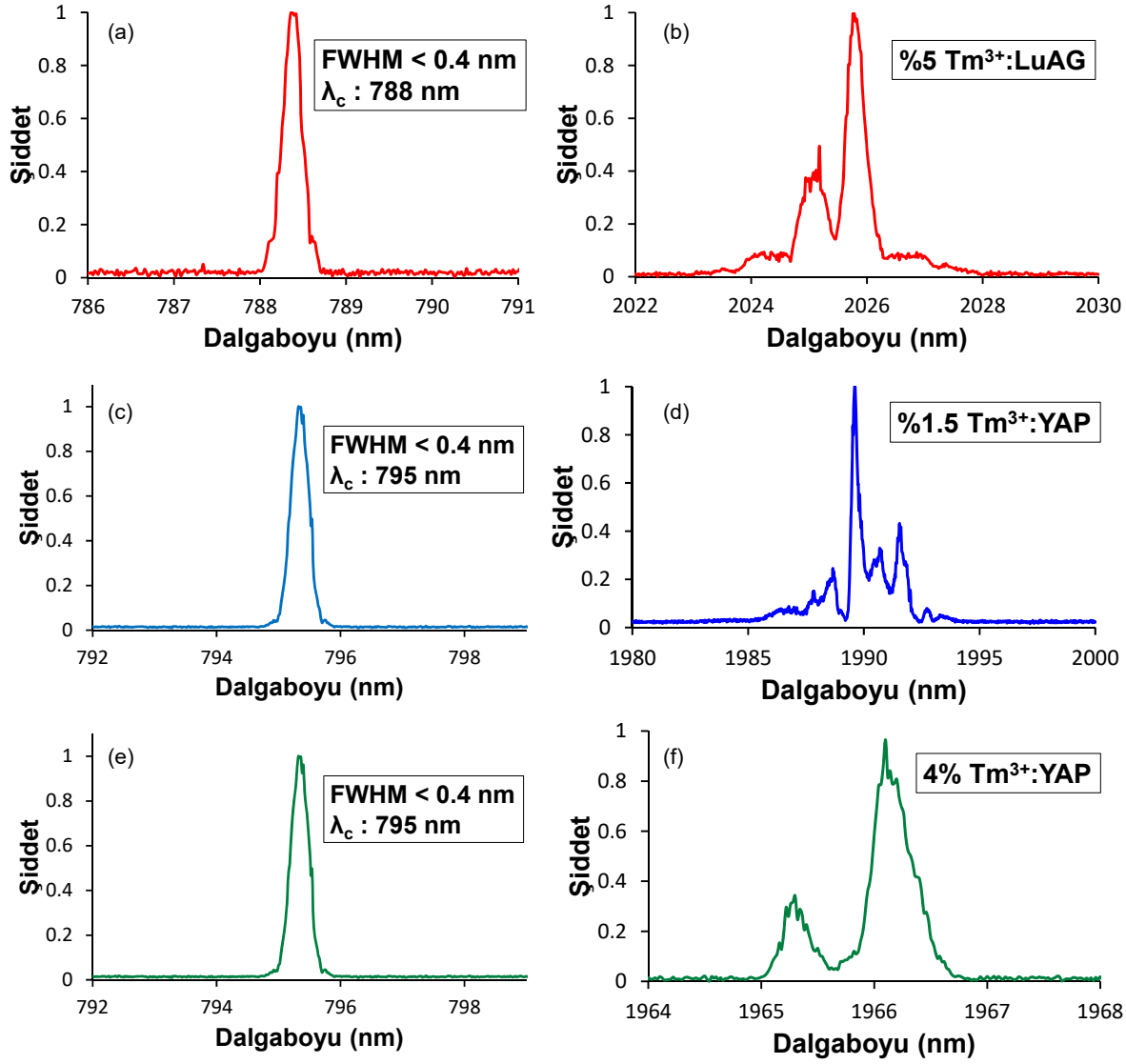
[2] RP Fotonik Ansiklopedisi, *"Wavelength tuning"* https://www.rp-photonics.com/wavelength_tuning.html, Edinilme zamanı: 10 Nisan 16, 22:30.

3 BULGULAR

3.1 Kazanç Anahtarlamalı %5 Tm^{3+}:LuAG, %1.5 Tm^{3+}:YAP ve %4 Tm^{3+}:YAP Lazerlerinin 800 nm ve 1200 nm Pompa Lazerleri ile Karşılaştırılması

Bu bölümde Tm^{3+} katkılı LuAG ve YAP kristallerinin pompalanması için en uygun dalgaboyunun belirlenmesiyle ilgili çalışmaların sonuçlarına yer verilmektedir. Ayrıca, kurulan Tm^{3+} katkılı lazerlerin verimlerinin iyon konsantrasyonuna ve konak türüne (YAP, LuAG) bağımlılığı incelenmiştir.

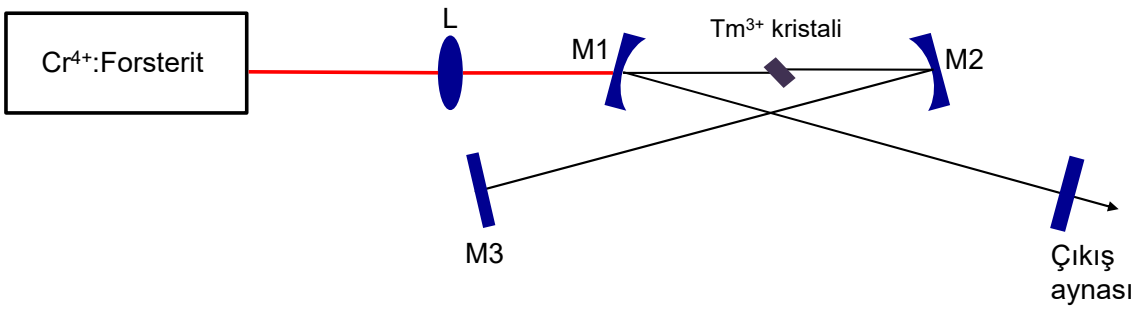
Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan x-şeklindeki tulyum lazer düzeneği Şekil 2.2.11'de gösterilmiştir. Pompa lazeri olarak kullanılan Ti^{3+}:safir lazerinin spektral genişliği, yukarıda da belirtildiği gibi 0.4 nm'nin altında ölçülmüştür. Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu 788 nm'ye ayarlanarak Tm^{3+}:LuAG kristalinin uyarılmasında kullanılmıştır. Tm^{3+}:LuAG (%5 Tm^{3+} katkılı) lazerinin 2026 nm'de çalıştığı gözlenmiştir. Buna ek olarak, Ti^{3+}:safir lazeri 795 nm'ye ayarlanarak Tm^{3+}:YAP kristallerinin pompalanmasında kullanılmıştır. %1.5 Tm^{3+} katkılı YAP lazeri %2, %3, %4.8, %5.2 geçirgenliğe sahip çıkış aynaları ile 1992 nm'de lazer ışınımı üretirken, %6.7 geçirgenliğe sahip çıkış aynası ile 1945 nm'de çalıştırılmıştır. %4 Tm^{3+} katkılı YAP kristali kullanıldığında ise %2 ve %4 geçirgenliğe sahip çıkış aynaları ile 1965 nm'de lazer ışınımı üretirken, %4.8 ve %5.9 geçirgenliğe sahip çıkış aynaları ile 1890 nm'de çalıştırılmıştır. Bu durum Tm^{3+}:YAP lazerlerinde, rezonatörün bir çevrimdeki kaybına bağlı olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 3.1.1 Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ve bu lazerle pompalanan Tm^{3+} katkılı kristallerin lazer ışınım spektrumları. (a) Ti^{3+}:safir lazerinin Tm^{3+}:LuAG (%5) pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (b) Tm^{3+}:LuAG (%5) lazer spektrumu, (c), (e): Ti^{3+}:Safir lazerinin Tm^{3+}:YAP pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (d) Tm^{3+}:YAP (%1.5) lazer spektrumu, (f) Tm^{3+}:YAP (%4) lazer spektrumu.

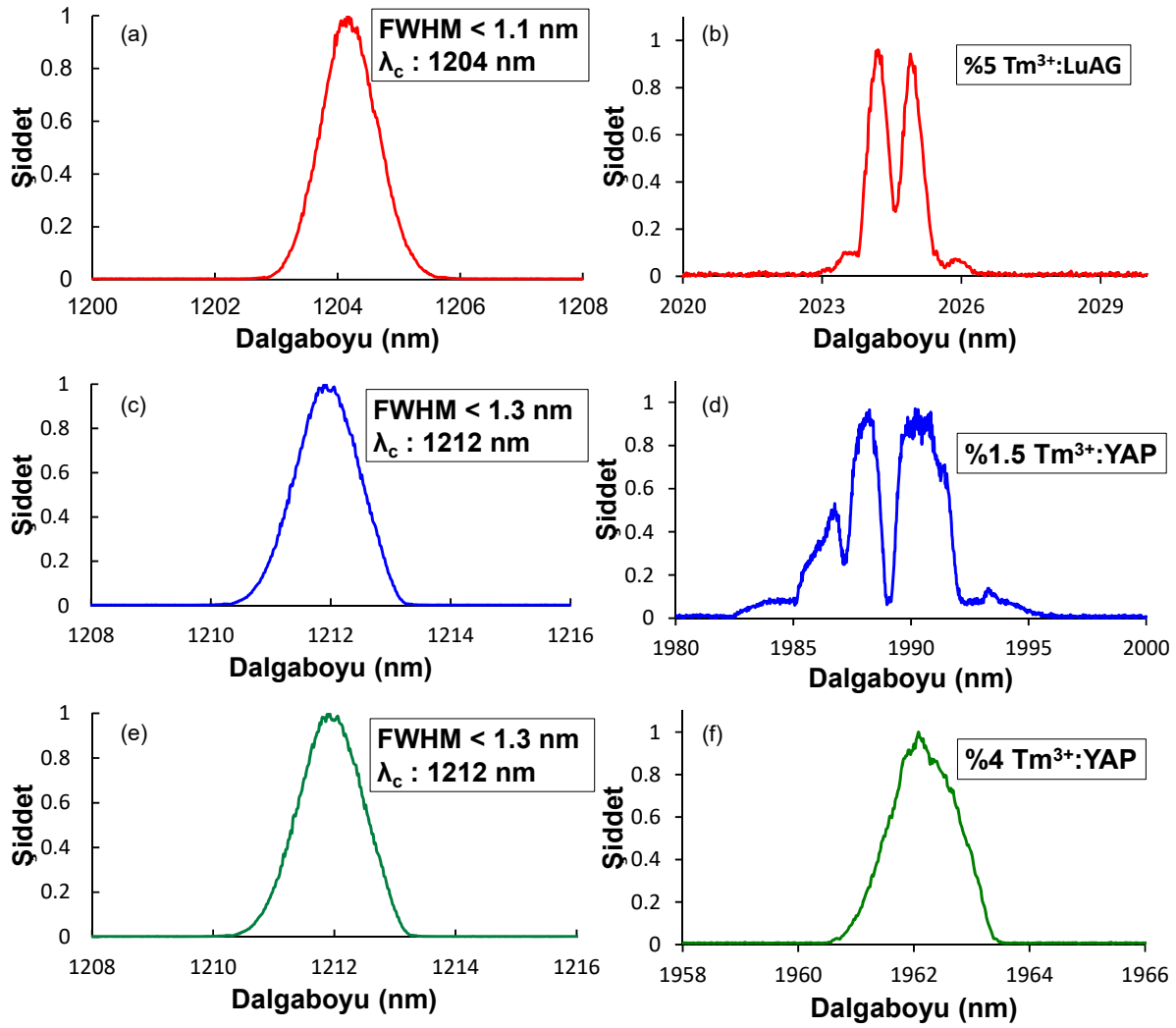
İkinci pompa lazeri olarak kullandığımız kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri, 1064 nm dalgaboyunda ışıyan Nd^{3+}:vanadat lazeri ile pompalanmaktadır. Ti^{3+}:safir lazerinde olduğu gibi spektral genişliğini düşürmek amacıyla yüksek yansıtıcı ayna yerine kırınım ağı (G, Şekil 2.2.11) kullanılmıştır. Bu kırınım ağı ile kurulan lazerin bant genişliği 1.3 nm'nin altında ölçülmüştür. Kullanılan çıkış aynasının lazer dalgaboyundaki geçirgenliği %18'dir. Şekil 2.2.7'de Cr^{4+}:forsterit lazerinin deneysel düzeneği gösterilmiştir.

Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeriyle pompalanan Tm^{3+} katkılı kazanç ortamları için kullanılan x-şeklindeki lazer rezonatörünün deneysel düzeneği Şekil 3.1.2'de gösterilmiştir.



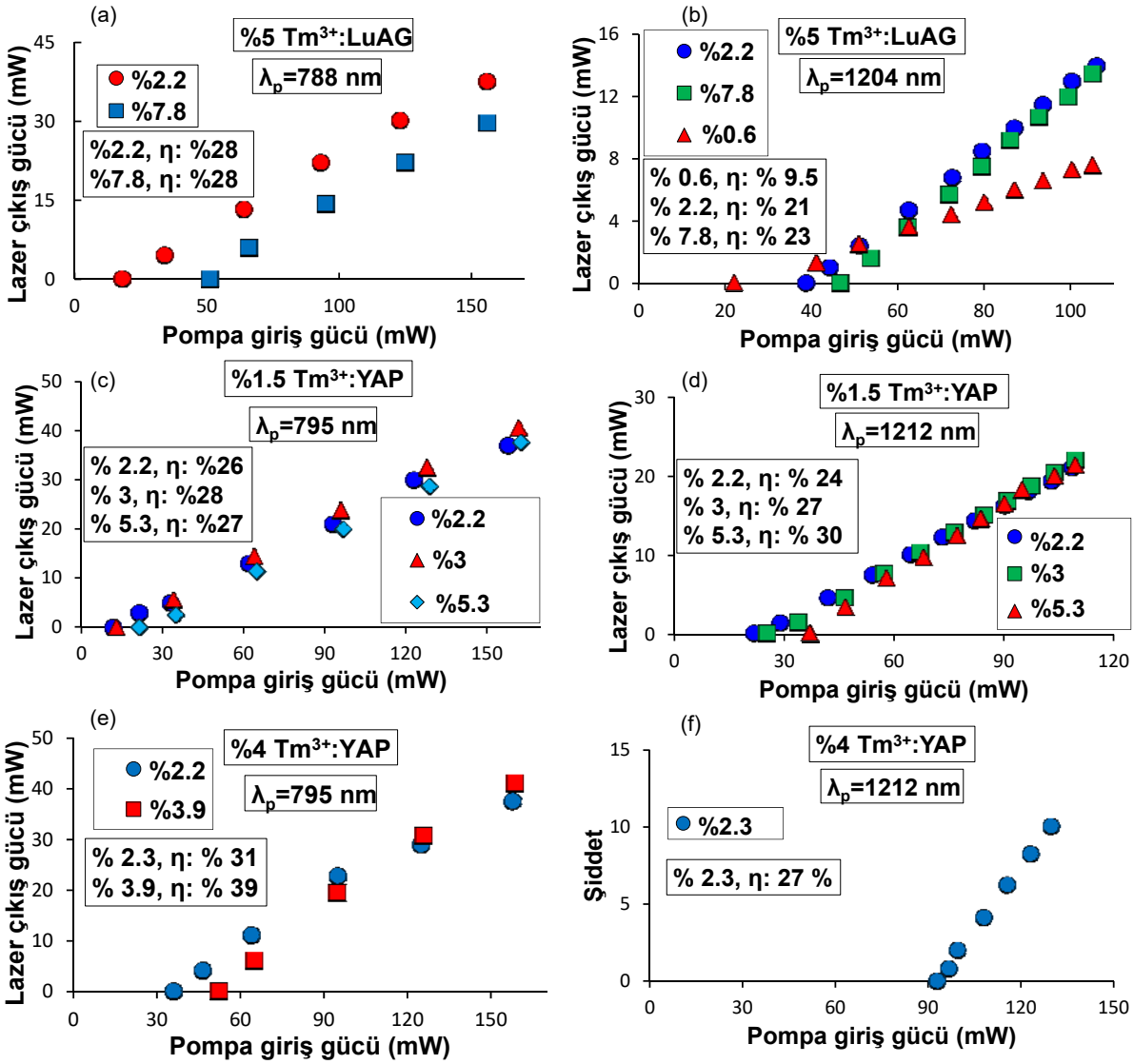
Şekil 3.1.2 Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ile pompalanan x-şeklindeki Tm^{3+} lazer düzeneği.

Pompa lazeri olarak kullanılan Cr^{4+}:forsterit lazerinin spektral genişliği, yukarıda da belirtildiği gibi 1.3 nm'nin altında ölçülmüştür. Cr^{4+}:forsterit lazerinin dalgaboyu 1204 nm civarına ayarlanarak Tm^{3+}:LuAG (%5) lazerinin uyarılmasında kullanılmıştır. Tm^{3+}:LuAG (%5) lazerinin 2026 nm civarında çalıştığı gözlenmiştir. Cr^{4+}:forsterit lazeri 1212 nm civarına ayarlanarak Tm^{3+}:YAP kristallerinin pompalanmasında kullanılmıştır. Tm^{3+}:YAP lazerleri, Ti^{3+}:safir ile uyarıldıkları duruma benzer bir şekilde 1990 nm ve 1960 nm'de çalıştırılmıştır.



Şekil 3.1.3 Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ve bu lazerle pompalanan Tm^{3+} katkılı kristallerin lazer ışınım spektrumları. (a) Cr^{4+}:forsterit lazerinin Tm^{3+}:LuAG (%5) pompası olarak kullanılırken kaydedilen spektrumu, (b) Tm^{3+}:LuAG (%5) lazer spektrumu, (c), (e): Cr^{4+}:forsterit lazerinin Tm^{3+}:YAP (%1.5 ve %4) pompası olarak kullanılırkenki spektrumu, (d) Tm^{3+}:YAP (%1,5) lazer spektrumu, (f) Tm^{3+}:YAP (%4) lazer spektrumu.

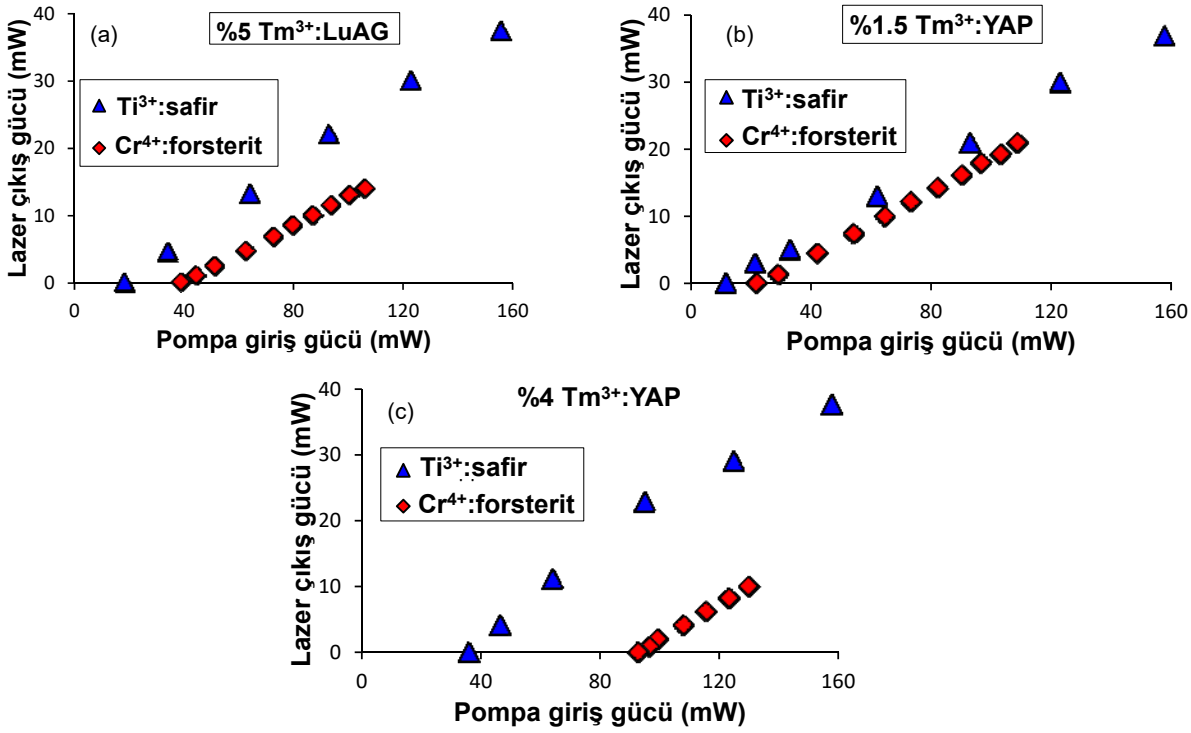
Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit ile uyarılan Tm^{3+} katkılı lazerlerin güç verimleri, farklı geçirgenliklere sahip çıkış aynaları kullanılarak incelenmiştir. Çıkış aynalarının geçirgenlik değerleri, lazerlerin çalıştığı dalgaboyu belirlendikten sonra, ışınım spektrometresi yardımıyla ölçülmüştür. Elimizdeki çıkış aynalarıyla alınan verilere ek olarak, lazer rezonatörünün her iki kolunda da çıkış aynası kullanılarak verim eğrileri ölçülmüştür. Farklı çıkış aynaları ile ölçülmüş pompa eşik güçleri ve bu aynaların lazer dalgaboyundaki geçirgenlik değerleri kullanılarak, rezonatörlerin bir çevrimdeki kayıp miktarları da hesaplanmıştır. Tm^{3+}:LuAG (%5), Tm^{3+}:YAP (%1.5) ve Tm^{3+}:YAP (%4) kristallerini içeren rezonatör kayıpları, lazerlerin çalıştıkları dalgaboylarında sırasıyla %1.45, %1.6 ve %1.45 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.1.4 Tm^{3+} katkılı kristallerin, Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit lazerleri ile pompalanmaları durumlarındaki lazer verim eğrileri. Kullanılan çıkış aynalarının geçirgenliği grafik üzerinde gösterilmiştir. Soldaki grafikler Ti^{3+}:safir, sağdakiler ise Cr^{4+}:forsterit ile pompalanan lazerlerin verim eğrilerini göstermektedir. a,b: Tm^{3+}:LuAG (%5), c,d: Tm^{3+}:YAP (%1.5), e,f: Tm^{3+}:YAP (%4).

Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit lazerleri yukarıda anlatıldığı şekilde eniyileştirildikten sonra, tulyum katkılı kristaller uyarılmış ve her üç kristal ile de lazer ışınımı elde edilmiştir. Toplanan güç verim eğrileri Şekil 3.1.4'te özetlenmiştir.

Bu bölümde, yukarıda ayrıntılı bir şekilde anlatılan ve Şekil 3.1.4'te gösterilen verim eğrilerinden yola çıkarak, tulyum lazerlerinin yaklaşık %2 geçirgenliğe sahip çıkış aynasıyla ölçülen güç verimleri kıyaslanmıştır. Şekil 3.1.5, Tm^{3+}:LuAG, Tm^{3+}:YAP (%1.5) ve Tm^{3+}:YAP (%4) kristallerinin Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit pompa lazerleriyle uyarılması sonucunda elde edilen güç verim eğrilerini göstermektedir.



Şekil 3.1.5 (a) Tm^{3+}:LuAG, (b) Tm^{3+}:YAP (%1.5) ve (c) Tm^{3+}:YAP (%4) lazerlerinin %2 geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak ölçülmüş güç verim eğrileri.

Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri, Cr^{4+}:forsterit lazerine göre daha yüksek çıkış güçlerinde çalıştırılabildiği için, Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan kristallerden daha yüksek çıkış gücü elde edilebilmiştir. Aynı pompalama güç değerlerine kadar bakıldığında da Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan tulyum lazerlerinden daha çok güç elde edildiği gözlemlenmiştir. Tulyum konsantrasyonunun optimum pompa dalgaboyunun belirlenmesindeki rolünü inceleyebilmek için yapılan analizlerde, 800 nm'deki çapraz sönüm (cross-relaxation) etkisi ve pompa-lazer demet yarıçaplarının örtüşme faktörleri göz önünde bulundurulmuştur. Pompa ve lazer ışın demetlerinin kristalin içerisinde mümkün olan en iyi şekilde örtüşmesi, lazerin verimini büyük oranda etkilemektedir. Bu örtüşme miktarı,

$$\eta_0 = 4\frac{w_p^2 w_L^2}{\left(w_p^2 + w_L^2\right)^2} \tag{3.1}$$

denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır. Denklem 3.1'de, w_p ve w_L, pompa ve lazer demetlerinin kristal içerisindeki ortalama yarıçap değerleridir. Beklenen güç verimi ise,

$$\eta = \eta_a \eta_0 \frac{\lambda_p}{\lambda_L}\frac{T}{T+L} \tag{3.2}$$

denklemiyle hesaplanabilir. Bu denklemde, kristalin pompa dalgaboyundaki soğurma miktarı η_a, çıkış aynasının lazer dalgaboyundaki geçirgenliği T, rezonatör içerisindeki bir çevrimde

ortaya çıkan toplam kayıp miktarı *L*, pompa ve lazer dalgaboyları ise λ_p ve λ_L olarak gösterilmektedir. Lazer ve pompa ışın demetlerinin kristal içerisindeki örtüşme miktarının (η_O) verim hesabına katılması, daha gerçekçi öngörülerin yapılmasını sağlamaktadır. 800 nm'deki çapraz sönümün lazer verimi üzerindeki etkisi ise, elde edilen verim değerinin ikiyle çarpılması sonucunda hesaba katılmaktadır. Tulyum kristallerinin Ti^{3+}:safir (800 nm) ve Cr^{4+}:forsterit (1200 nm) lazerleri ile uyarılması sonucunda ölçülen ve hesaplanan verim değerlerinin karşılaştırılması Tablo 3.1.1 ve Tablo 3.1.2'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1.1 Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan tulyum kristallerinden elde edilen ve beklenen verimler.

	Tm^{3+}:LuAG (%5)	Tm^{3+}:YAP (%1.5)	Tm^{3+}:YAP (%4)
Ölçülen verim (%)	28	26	31
η_a (%)	76.6	77	90
η_O (%)	99	98	99
Çapraz sönüm ile hesaplanan verim (2η, %)	36.5	36	43.5
Çapraz sönümden kaynaklanan verim artışı (%)	53	44	43

Tablo 3.1.2 Cr^{4+}:forsterit lazeri ile uyarılan tulyum kristallerinden elde edilen ve beklenen verimler.

	Tm^{3+}:LuAG (%5)	Tm^{3+}:YAP (%1.5)	Tm^{3+}:YAP (%4)
Ölçülen verim (%)	21	24	27
η_a (%)	66	71	85
η_o (%)	98	99	96
Hesaplanan verim (η, %)	23.5	25	31

Elde edilen ve hem Şekil 3.1.5 hem de Tablo 3.1.1 ve Tablo 3.1.2'de gösterilen deneysel veriler ışığında, aşağıdaki sonuçlara varılmıştır:

1-Her kristal için, Ti^{3+}:safir pompa lazeri ile, Cr^{4+}:forsterit pompa lazerine göre daha yüksek çıkış gücü elde edilmiştir.

2-Ti^{3+}:safir ile uyarım durumunda, yine çapraz sönümden dolayı, pompa eşik değerleri, Cr^{4+}:forsterit lazerine kıyasla yaklaşık olarak 2 kat daha küçüktür.

3-Verim değerleri, belli bir kristal için, her iki pompalama durumunda yaklaşık aynı çıkmış olsa da, Ti^{3+}:safir pompalama durumunda, eşik pompa gücünün yaklaşık yarı değere düşmesi, çıkış gücünün, Cr^{4+}:forsterit pompalama durumuna göre, aynı pompa gücünde, daima daha yüksek kalmasını sağlamıştır.

4-Kristal kayıpları hesaba katıldığı zaman öngörülen verim değerleri, ölçülen verim değerleri ile de karşılaştırılmıştır. Cr^{4+}:forsterit pompalama durumunda öngörülen ve ölçülen verimler, Ti^{3+}:safir pompalama durumuna göre, birbirlerine daha yakın çıkmıştır. Ti^{3+}:safir durumunda, beklenen ve ölçülen verim değerleri arasındaki fark, muhtemelen çapraz sönümün %100 verimle çalışmamasından kaynaklanmıştır.

5-Ti^{3+}:safir pompa lazeri ile uyarılan durumda, üç kristal için de çapraz sönüm %100 verimlilik ile gözlemlenememiştir. Bunun olası kaynağı kristal içerisindeki iyon konsantrasyonunun optimum düzeyde olmaması, ışımasız geçişlerin verimi düşürmesi veya pompa spektral genişliğinin yeterli düzeyde daraltılamamasıdır.

Özetle, incelenen kristaller arasında, en verimli pompalama yönteminin, çapraz sönüm mekanizmasını devreye sokan Ti^{3+}:safir pompalama durumu olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar ile birlikte, projemizin "tulyum lazerleri için en verimli pompa dalgaboyunun belirlenmesi" hedefi tamamıyla bitirilmiştir.

3.2 2 Mikron Civarında Çalışan Tm^{3+}: Lu_2O_3 Seramik Lazeri

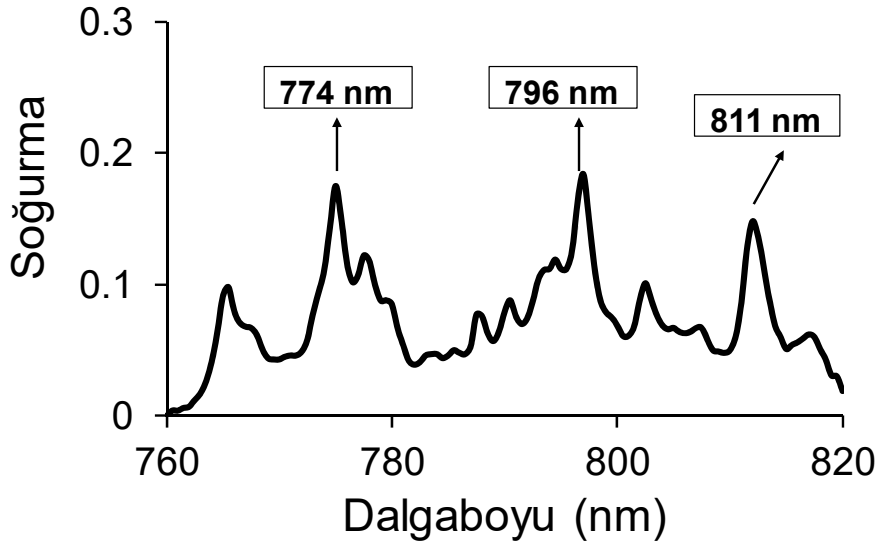
Bu bölümde, seramik-tabanlı, 3 mm uzunluğundaki, %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 kazanç ortamının farklı pompalama dalgaboylarındaki lazer performans karşılaştırması ve kazanç-anahtarlamalı düzeneğin spektral ve zamansal karakterizasyonu kapsamlı deneysel veriler ile sunulacaktır. Deneylerde Bölüm 2.2.1 ve Bölüm 2.2.2'de detaylı olarak anlatılan kazanç anahtarlamalı, dalgaboyu ayarlanabilir Cr^{4+}:forsterit (1200 nm) ve Ti^{3+}:safir (800 nm) lazerleri kullanılmıştır. İki değişik pompa dalgaboyunun kıyaslanabilmesi için, iki rezonatörün geometrilerinin olabildiğince yakın olmasına dikkat edilmiş ve her iki rezonatör de konfokal rejimde tasarlanmıştır.

3.2.1 $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik Lazerinin 800 nm Civarında Uyarılması

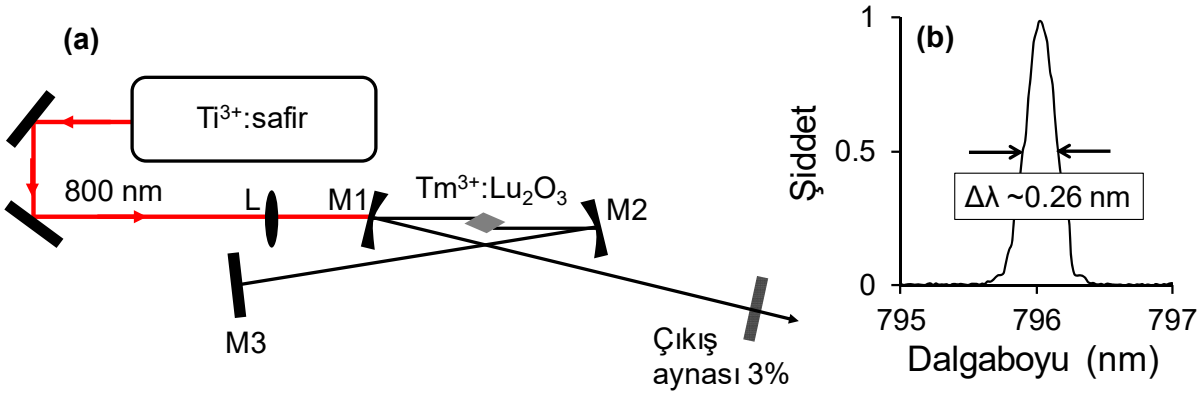
Lazer deneylerinden önce, $Tm^{3+}Lu_2O_3$ seramiğinin 800 nm civarındaki soğurma spektrumu UV-shimadzu spektrofotometre kullanılarak ölçülmüştür. Şekil 3.2.1'den de görülebileceği gibi, optimum soğurma dalgaboyları 774, 796 ve 811 nm civarında yer almaktadır.

Lazer deneylerinin ilk kısmında ise, Şekil 3.2.2 (a)'da gösterilen, 800 nm civarında çalışan kazanç-anahtarlamalı ve dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazeri kullanılarak, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiği kazanç-anahtarlamalı rejimde çalıştırılmıştır. Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazer rezonatörünün deneysel düzeneği Bölüm 2.2.2'de detaylı olarak anlatılmıştı. Ti^{3+}:safir lazerinin çıkışı, odak uzunluğu 7.5 cm olan bir lens (L) yardımıyla 3 mm uzunluğundaki $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinin içine odaklanmıştır. Bölüm 2.1'de anlatılan ABCD matris yöntemi kullanılarak, seramiğin içindeki pompa ışın demeti beli yarıçapı 20 μm olarak hesaplanmıştır. $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazer rezonatörü, Şekil 3.2.2 (a)'dan da görülebileceği gibi, iki yüksek yansıtıcı çukur ayna (M1 ve M2, R=7.5 cm), yüksek yansıtıcı düz ayna (M3) ve 2 μm civarında %3 geçirgenliğe sahip çıkış aynasından oluşmaktadır. Lazerin seramik içerisindeki ışın demeti beli yarıçapı ise, ABCD matris yöntemiyle 28 μm olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.2.2 (b)'de ise, kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazerinin monokromatör kullanılarak 796 nm'de ölçülmüş bant genişliği gösterilmektedir. Bölüm 2.2.2'de de anlatıldığı gibi, Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu kırınım ağı yardımıyla ayarlanmış ve lazerin bant genişliği 760-820 nm aralığında 0.4 nm'nin altında kalmıştır.

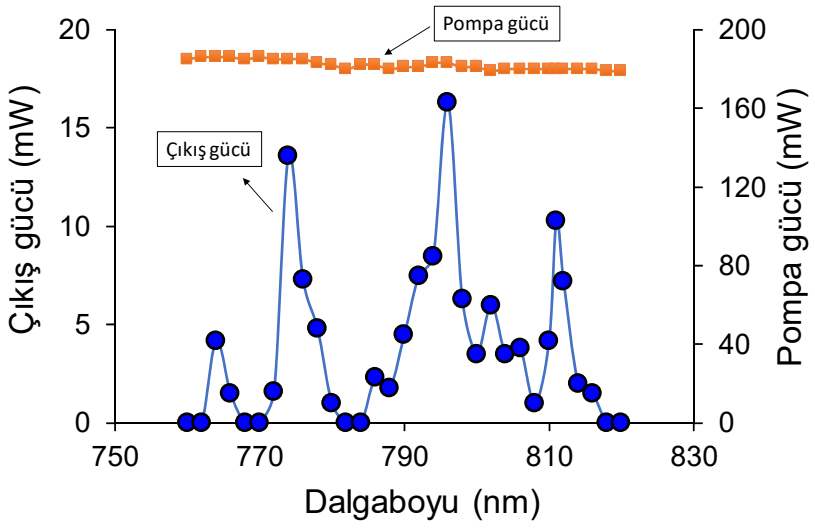


Şekil 3.2.1 3 mm uzunluğundaki, %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramiğinin 800 nm civarındaki soğurma spektrumu.



Şekil 3.2.2 (a) Kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. (b) Ti^{3+}:safir lazerinin 796 nm'de ölçülen spektral genişliği.

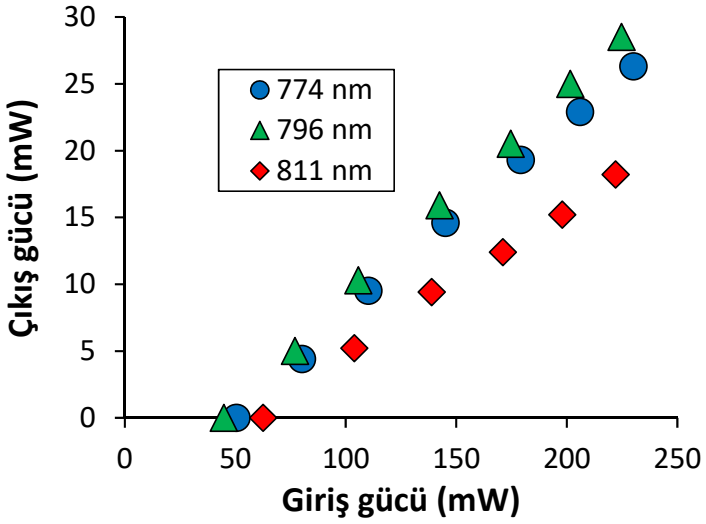
$Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin enerji verimlerinin araştırılmasından önce, dalgaboyu ayarlanabilir Ti^{3+}:safir lazeri kullanılarak, seramiğin 800 nm civarındaki uyarılma spektrumu ve optimum pompalama dalgaboyları belirlenmiştir. Şekil 3.2.3'den de görülebileceği gibi, seramiğin uyarılma spektrumu, lazerin 2 µm civarındaki çıkış enerjisinin, pompa dalgaboyuna göre ölçülmesiyle elde edilmiştir. Bu deneyler esnasında, Ti^{3+}:safir lazerinin 760-820 nm aralığındaki çıkış enerjisi, 186-179 µJ civarında kalmıştır. Optimum pompa dalgaboyları ise, soğurma spektrofotometre ölçümleriyle tutarlı bir şekilde 774, 796 ve 811 nm olarak belirlenmiştir. $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinin 774, 796 ve 811 nm'deki soğurma oranı (η_a) sırasıyla, %41.6, %42.4 ve %36.8 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2.3 Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin 760-820 nm aralığında ölçülmüş uyarılma spektrumu.

Şekil 3.2.4, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin üç farklı pompa dalgaboyu ile uyarılması sonucunda elde edilmiş enerji verim eğrilerini göstermektedir. Uyarılma spektrumundan da beklenildiği gibi en yüksek verim, pompa dalgaboyu 796 nm'ye ayarlandığında %15.8 olarak

elde edilmiştir. 774 ve 811 nm için lazerin enerji verimleri sırasıyla %14.6 ve %11.2 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2.4 Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeriyle uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin üç farklı pompa dalgaboyu için ölçülmüş enerji verim eğrileri.

$Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazeri, üç farklı pompa dalgaboyu için de, lazer eşik enerji değerleri civarında 2066 nm'de çalıştırılmıştır. Fakat, daha yüksek pompa enerji değerlerinde, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinden 2066 ve 1967 nm'de iki dalgaboylu lazer ışınımı gözlemlenmiştir. Bu durum, düşük dalgaboylarındaki lazer kazancının, artan tersinme faktörüyle (inversion factor) birlikte artması sonucunda gözlemlenmektedir ve $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğiyle yapılan daha önceki çalışmalarda da raporlanmıştır [1]. Seramik lazeri, eşik enerji değerleri civarında 2066 nm'de çalıştığı için, rezonatörün 2066 nm'deki pasif kayıpları, farklı geçirgenliklere sahip üç çıkış aynasıyla (%1, %2.8 ve %3.8) elde edilmiş eşik enerji değerleri kullanılarak, %1.7 olarak hesaplanmıştır.

Bölüm 1.3'te de anlatıldığı gibi, 800 nm civarında uyarılan Tm^{3+} lazerlerinde, çapraz-sönüm (cross-relaxation) gözlemlenmektedir. Deneylerde kullandığımız %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramiği için, efektif Tm^{3+} konsantrasyonu 4.2×10^{20} cm^{-3} olarak hesaplanmıştır. Bu konsantrasyona sahip $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğindeki çapraz sönüm miktarını belirlemek için

$$\eta_{\text{exp.}} = \eta_{CR}\eta_o\eta_a \frac{\lambda_P}{\lambda_L}\frac{T}{T+L} \tag{3.3}$$

denklemi kullanılmıştır. Bu denklemde, $\eta_{exp.}$ lazerin çapraz-sönümle birlikte artan verim değeri, η_a ölçülen pompa soğurma oranı, λ_P pompa dalgaboyu, λ_L lazer dalgaboyu, T çıkış

aynasının geçirgenliği ve *L* rezonatörün bir çevrimdeki pasif kayıp miktarıdır. η_o ise, pompa ve lazer ışın demetlerinin örtüşme miktarını vermektedir ve

$$\eta_0 = 4\frac{w_P^2 w_L^2}{\left(w_P^2 + w_L^2\right)^2} \tag{3.4}$$

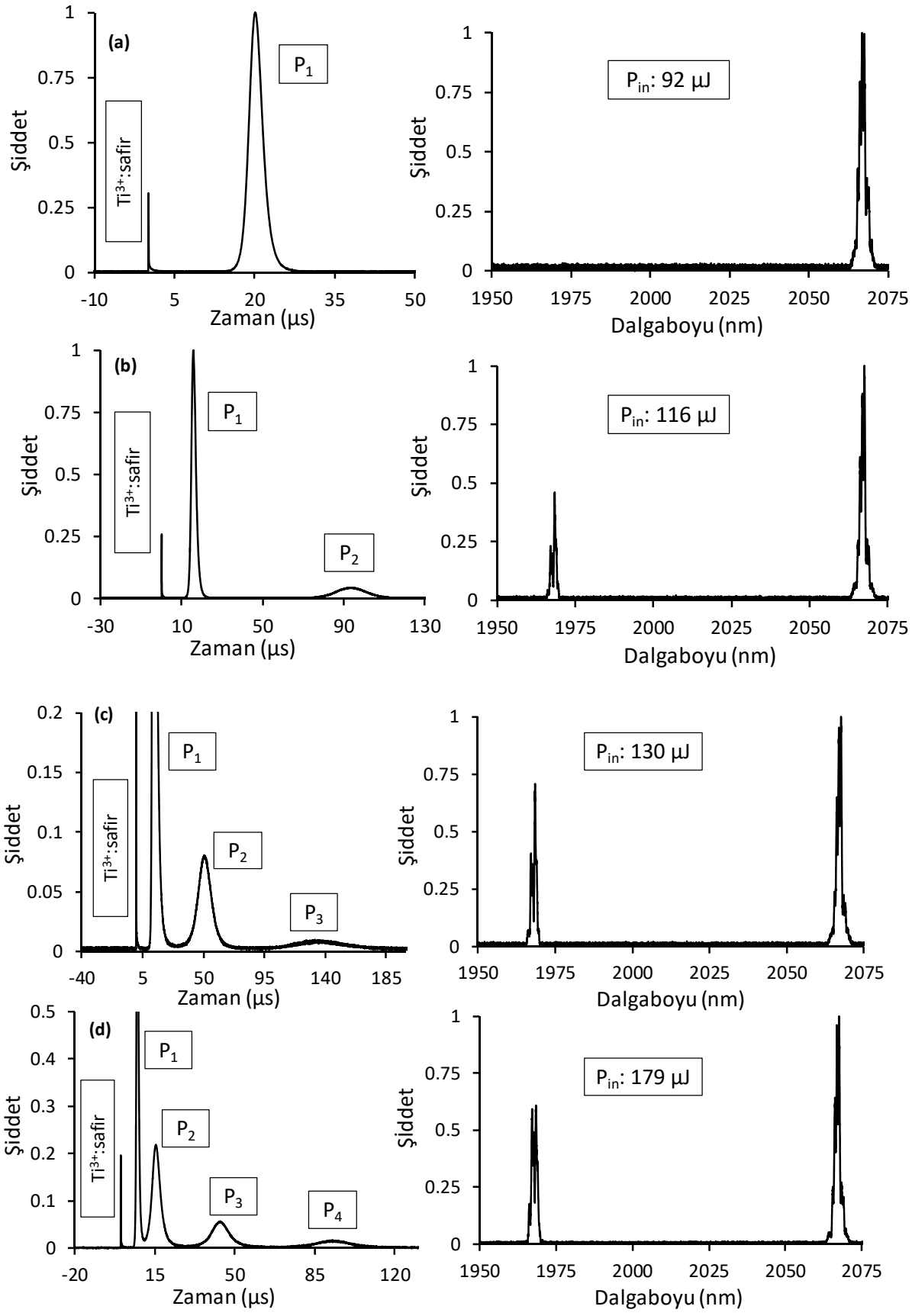
denklemiyle, ışın demetlerinin (w_P=pompa ve w_L=lazer) kök-ortalama (root-mean-squared rms) değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeriyle uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazeri için bu örtüşme miktarı 0.95 olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.3'teki η_{CR} ise, çapraz-sönümün etki miktarını vermektedir ve 1-2 arasında bir değer almaktadır. η_{CR}=1 olduğu durum, çapraz-sönümlemenin etkili olmadığı, η_{CR}=2 ise tamamen etkin olduğunu gösterir. Deneylerde kullanılan ve üç farklı çıkış aynasıyla 2066 nm'de çalıştırılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiği için η_{CR} değeri 1.86 ± 0.28 olarak hesaplanmıştır.

Deneylerde ölçülen enerji eşik değerlerini ve

$$\sigma_{e.} = \frac{\pi}{4}\frac{h\nu_P}{E_{th}}\frac{w_P^2 + w_L^2}{\eta_a}(L+T) \tag{3.5}$$

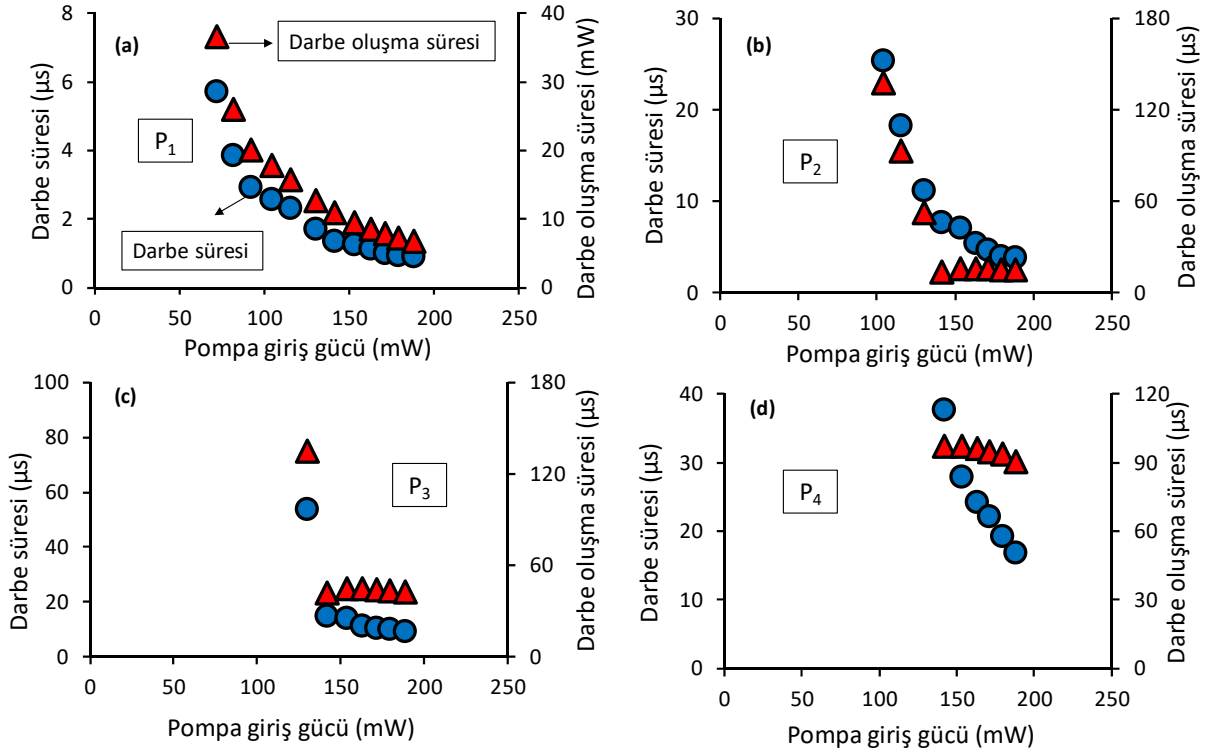
denklemini [2] kullanarak, 2066 nm'de çalıştırılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiği için uyarılı ışıma arakesiti (stimulated emission cross-section (σ_e)) değeri $3.74 \pm 0.52 \times 10^{-21}$ cm^2 olarak hesaplanmıştır. Denklem 3.5'te, *h* Planck sabiti, E_{th} ölçülen eşik pompa enerji değeri, w_P ve w_L ise pompa ve lazer ışın demeti yarıçaplarının kök-ortalama değerleridir.

Deneylerde, 800 nm civarında uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin enerji verimliliğinin yanı sıra, 2066 ve 1967 nm'deki ikili ışınımın spektral ve zamansal karakterizasyonu da yapılmıştır. Şekil 3.2.5 (a)'dan da görülebileceği gibi, eşik enerji değerleri civarında $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazeri tek dalgaboyunda (2066 nm), bir çıkış darbesi (P1) üretmiştir. Pompa enerjisi 92 µJ üzerine çıktığında ise, iki dalgaboyunda (2066 ve 1967 nm) ışınım gözlemlenmiş ve çıkış darbelerinin sayısı (P2-P4) artmıştır [Şekil 4.2.5 (b)-(d)].



Şekil 3.2.5 796 nm'de uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin farklı pompa enerji değerlerinde ölçülmüş çıkış spektrumları ve darbe profilleri.

Kazanç-anahtarlamalı Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin çıkış darbelerinin uzunluğu ve pompa lazerine göre oluşma sürelerinin 796 nm'deki pompa enerjisine göre değişimleri Şekil 3.2.5'te özetlenmiştir. P_2-P_4 için, darbe uzunlukları ve darbe oluşma süreleri düzensizlik gösterse de [Şekil 3.2.6 (b)-(d)], kazanç-anahtarlamalı lazerlerden beklenildiği şekilde, P_1 darbesinin uzunluğu (pulse duration) ve oluşma süresi (build-up time) pompa enerjisi arttıkça azalmıştır [Şekil 3.2.6 (a)]. Deneyler sırasında Ti^{3+}:safir pompa lazerinin darbe uzunluğu 26-50 ns arasında ölçülmüş olup, seramiğin yaşam süresinden (life-time) daha kısa mertebelerde kalmıştır ve ölçümleri etkilememiştir.

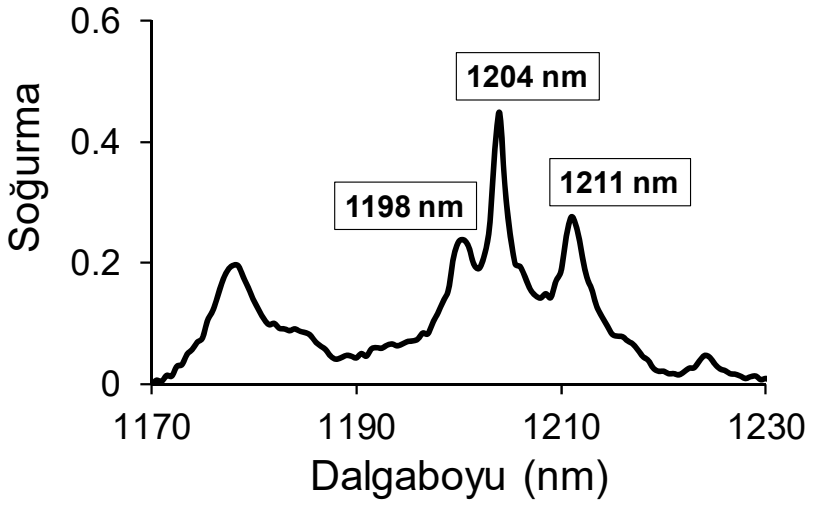


Şekil 3.2.6 796 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinden elde edilen çıkış darbelerinin pompa enerjisine göre ölçülmüş uzunlukları ve oluşma süreleri.

Sonuç olarak, projenin bu bölümünde, son yıllarda geliştirilen ve özgün lazer kazanç ortamlarından biri olan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinin, literatürde ilk kez, 800 nm civarındaki lazer uyarım spektrumu ölçülmüş ve optimum pompa dalgaboyları 774, 796 ve 811 nm olarak belirlenmiştir. Seramik lazerinin bu dalgaboylarındaki verimliliği detaylıca incelenmiş ve çapraz-sönüm mekanizmasının %1.5 Tm^{3+} konsantrasyona sahip Lu_2O_3 seramiğindeki etkinliği araştırılmıştır. Deneyler esnasında, Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin iki dalgaboyundaki (2066 ve 1967 nm) çalışması da spektral ve zamansal olarak ilk kez incelenmiştir.

3.2.2 $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik Lazerinin 1200 nm Civarında Uyarılması

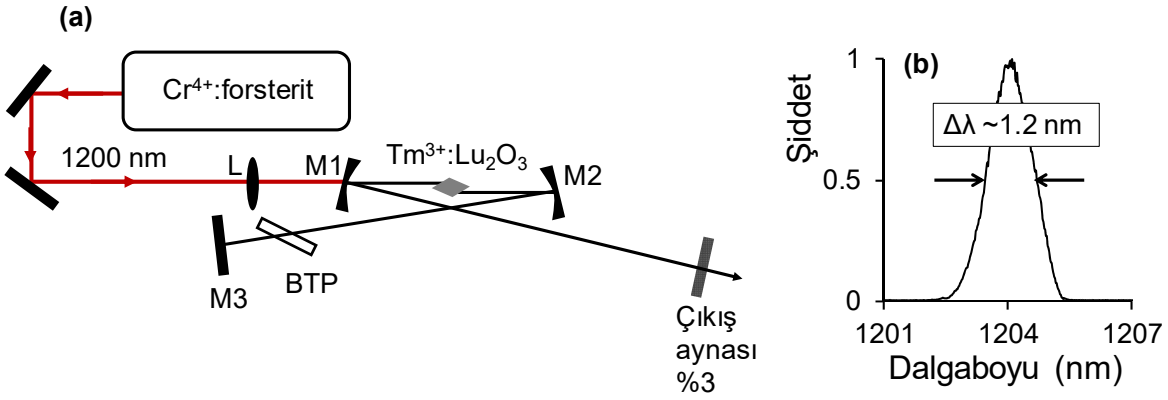
Projenin bu bölümünde, 800 nm ile uyarılmadan farklı olarak, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin 1200 nm civarındaki soğurma bantlarının pompalama verimliliği incelenmiştir. Bölüm 1.3'te de anlatıldığı şekilde, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinden lazer ışınımı elde etmek için en yaygın olarak tercih edilen pompa dalgaboyu, $^3H_6 \rightarrow {}^3H_4$ geçişine karşı gelen 800 nm civarındaki soğurma bandıdır. Bu uyarım şemasının tercih edilme nedenlerinden biri, çapraz-sönüme olanak vermesi ve lazerin beklenen verimini iki kata yakın arttırabilmesidir. Fakat bir önceki kısımda gösterildiği gibi, düşük Tm^{3+} konsantrasyonuna sahip Lu_2O_3 seramiği için, çapraz-sönüm verimi en üst düzeyde etkin olmayabilmektedir. Daha etkin çapraz-sönüm elde edebilmek için, seramik içerisine katkılanan iyon konsantrasyonunun arttırılması gerekmektedir. İyon konsantrasyonunun arttırılması ise, kazanç-ortamındaki yeniden-soğurma (re-absorption) ve ışımasız geçiş (nonradiative decay) miktarını arttıracağı için, lazerin güç performansını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinin 1200 nm civarındaki soğurma miktarının, 800 nm civarındakinden daha yüksek olması (Şekil 3.2.7) ve 1200 nm civarındaki uyarılmanın lazerin kuantum verimini arttırması sonucunda, düşük iyon konsantrasyonuna sahip $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiklerinde dahi, 1200 nm civarında uyarıldıklarında lazer verimlerinde iyileşme beklenmektedir.



Şekil 3.2.7 3 mm uzunluğundaki, %1.5 Tm^{3+} katkılı Lu_2O_3 seramiğinin, 1200 nm civarında ölçülmüş soğurma spektrumu.

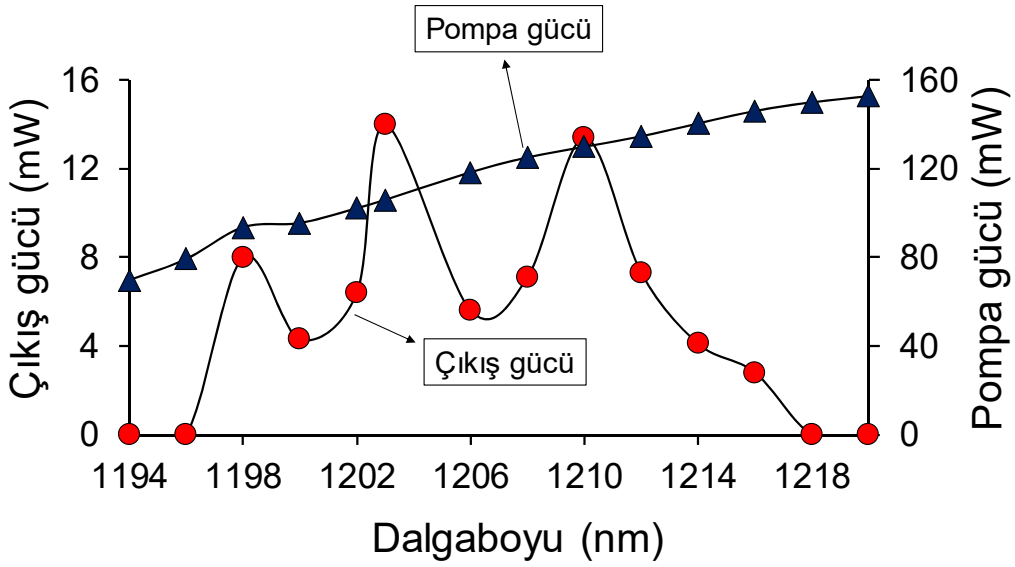
1200 nm civarında uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin verimliliğin incelenmesi ve 800 nm civarında elde edilen sonuçlar ile kıyaslanabilmesi için, Bölüm 2.2.2'deki Ti^{3+}:safir lazeriyle benzer rezonatör parametrelerine sahip, kazanç-anahtarlamalı ve dalgaboyu ayarlanabilen Cr^{4+}:forsterit lazeri kullanılmıştır. Cr^{4+}:forsterit lazerinin rezonatör detayları Bölüm 2.2.1'de anlatılmaktadır. 1200 nm civarında uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin rezonatörü, Şekil 3.2.2 (a)'da anlatılan rezonatördeki aynalar kullanılarak oluşturulmuştur. Cr^{4+}:forsterit

lazerinin çıkışı, 7.5 cm'lik odak uzunluğuna sahip bir mercek (L) kullanılarak, seramik lazeri içerisinde yaklaşık 30 μm'ye odaklanmıştır. Şekil 3.2.8 (a)'dan da görülebileceği gibi, Ti^{3+}:safir ile uyarılan rezonatörden farklı olarak, 1200 nm civarında uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazer rezonatörü, 2 μm civarındaki çıkış dalgaboyunun ayarlanabilmesi için çift kırınımlı 1.5 mm kuartz plaka (birefringent tuning plate, BTP) içermektedir. Bu plaka yardımıyla, seramik lazerinin dalgaboyu, iki farklı merkez dalgaboyu etrafında, 1929-1990 nm ve 2058-2078 nm arasında ayarlanabilmiştir. Şekil 3.2.8 (b) ise, spektral genişliği kırınım ağı yardımıyla daraltılmış kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin, 1204 nm'de monokromatör yardımıyla ölçülmüş çıkış spektrumunu göstermektedir. Pompa lazerinin ölçülen spektral genişliği, 1194-1220 nm aralığında 1.5 nm'nin altında kalmıştır ve kazanç ortamını etkin bir şekilde pompalamaya olanak vermiştir.



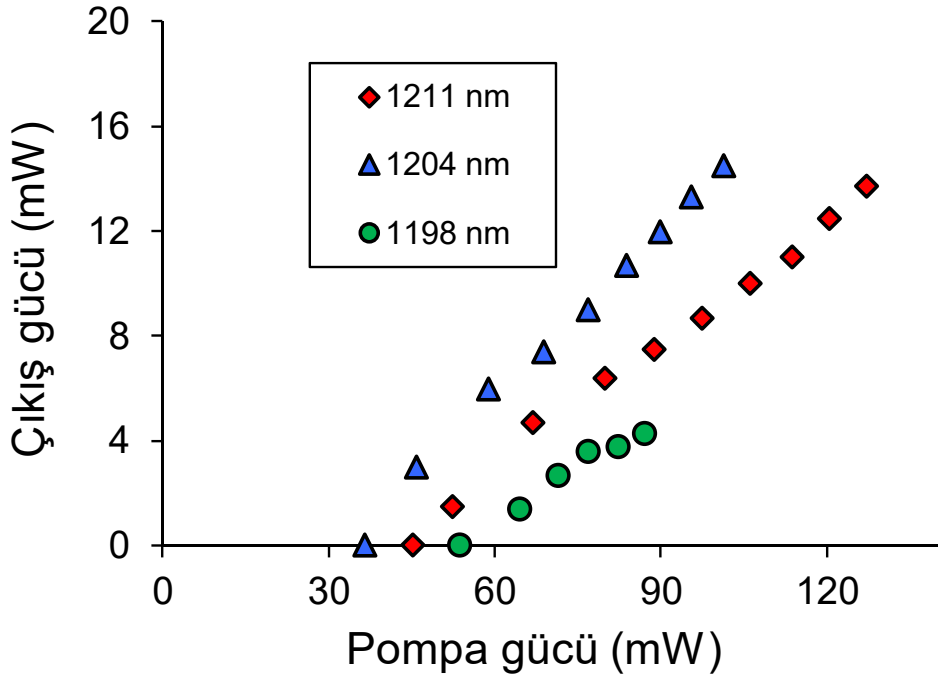
Şekil 3.2.8 (a) Kazanç anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeri ile uyarılan $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazer rezonatörünün deneysel düzeneği. (b) Cr^{4+}:forsterit lazerinin 1204 nm'de ölçülen spektral genişliği.

Lazer verimliliğinin incelenmesinden önce, kazanç-anahtarlamalı Ti^{3+}:safir lazeriyle yapılan deneylere benzer şekilde, dalgaboyu ayarlanabilir Cr^{4+}:forsterit lazeri kullanılarak, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramik lazerinin uyarılma spektrumu ve 1200 nm civarındaki optimum uyarılma bantları belirlenmiştir. Şekil 3.2.9'dan görülebileceği gibi, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinin lazer uyarılma spektrumu, seramiğin 2 μm civarındaki çıkış enerjisinin, Cr^{4+}:forsterit dalgaboyuna göre ölçülmesiyle elde edilmiştir. Bu deney sonucunda, $Tm^{3+}:Lu_2O_3$ seramiğinin 1200 nm civarındaki optimum uyarılma bantları 1198, 1204, 1211 nm olarak belirlenmiş ve seramiğin bu dalgaboylarındaki soğurma oranları da %52.7, %67.6 ve %57.6 olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.2.9 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazerinin dalgaboyuna göre ölçülen çıkış enerjisi ve bu lazer ile pompalanan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinin 1194-1220 nm aralığında ölçülmüş uyarılma spektrumu.

Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış dalgaboyu 1204 nm'ye ayarlandığında, Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinden elde edilen en yüksek verim, %21.5 olarak ölçülmüştür. Diğer optimum uyarılma dalgaboyları olan 1198 ve 1211 nm için ise sırasıyla, %13 ve %16 verim elde edilmiştir (Şekil 3.2.10).



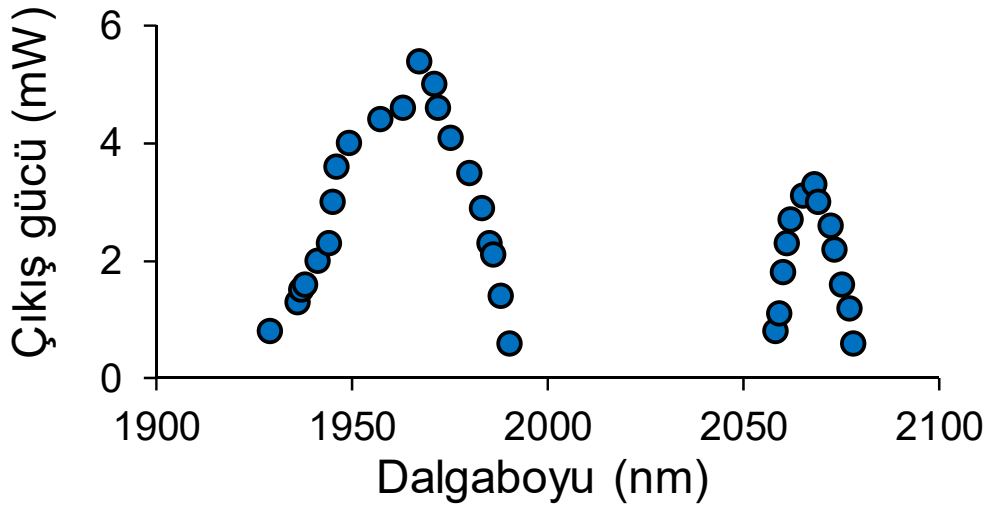
Şekil 3.2.10 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeriyle uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin 1198, 1204 ve 1211 nm'deki pompa dalgaboyları için ölçülmüş enerji verim eğrileri.

800 nm ile uyarılmaya benzer bir şekilde, 1204 ve 1211 nm ile uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazeri de, eşik enerjiler civarında 2066 nm'de çalışmış ve pompa enerji değerleri arttıkça,

2066 ve 1967 nm'de ikili ışınım gözlemlenmiştir. Cr^{4+}:forsterit lazerinin çıkış enerjisi kısa dalgaboylarında azaldığından, 1198 nm'de uyarılan seramik lazeri sadece 2066 nm civarında çalıştırılabilmiştir. Seramik lazerinin ölçülen enerji eşik değerleri ve iki farklı geçirgenlik yüzdesine sahip çıkış aynası kullanılarak (%2.6 ve %2.8), 1204 ve 1211 nm'deki uyarılma için, seramiğin 2066 nm'deki pasif rezonatör kayıpları %1.85 olarak hesaplanmıştır.

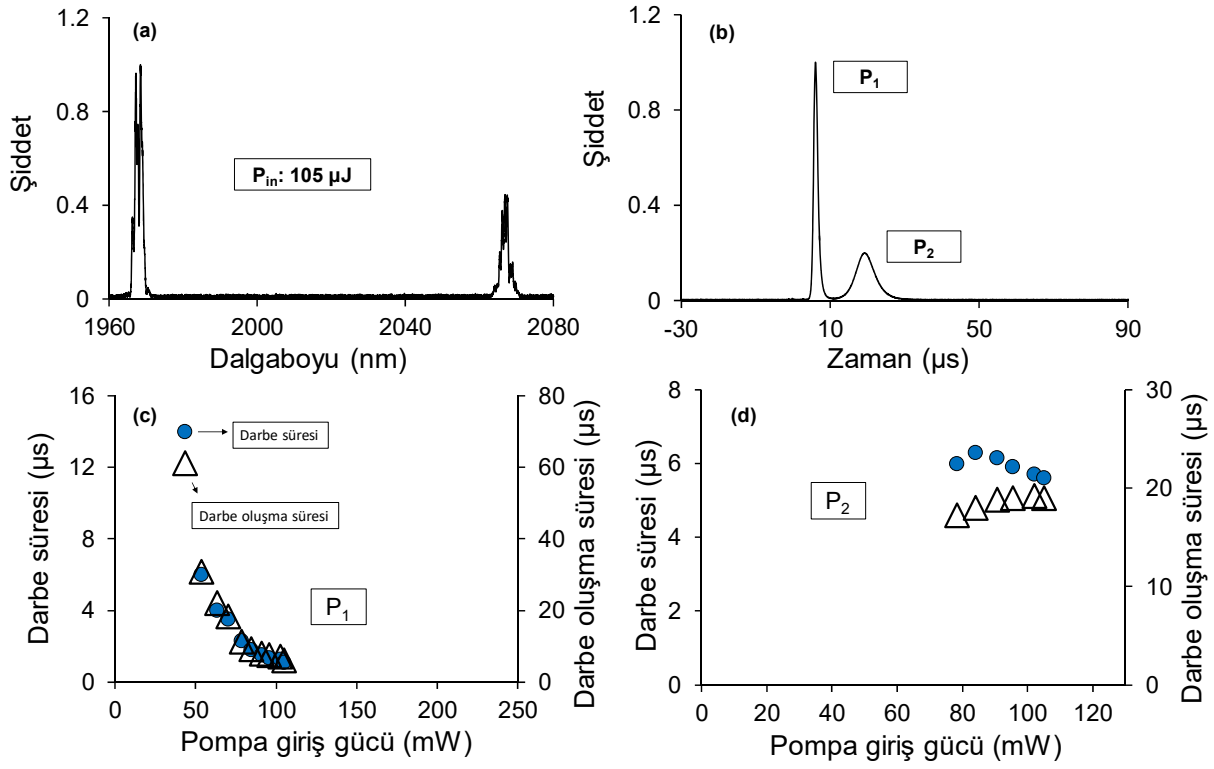
Cr^{4+}:forsterit pompa lazerinin ve Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin ışın demeti örtüşme miktarı Denklem 3.4 kullanılarak 0.97, en verimli uyarılma dalgaboyu olan 1204 nm için beklenen verim ise Denklem 3.3 yardımıyla %22.9 olarak hesaplanmıştır. 1204 nm'de uyarılan seramik lazerinin ölçülen veriminin ve beklenen veriminin birbirlerine makul oranda yakın çıkması sonucunda ve bir önceki kısımda anlatılan şekilde 796 nm için çapraz-sönümün zayıf olduğunun gösterilmesiyle, %1.5 Tm^{3+} konsantrasyona sahip Lu_2O_3 seramiği için 1204 nm'de uyarılmanın 796 nm ile uyarılmaya kıyasla daha verimli olduğu söylenebilir. 1200 nm civarındaki uyarılma için de 800 nm'de yapılan deneylere benzer bir şekilde Denklem 3.5 kullanılarak, 1204 ve 1211 nm'deki pompa dalgaboyları için, Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinin 2066 nm'deki uyarılı ışıma ara kesiti (emission cross section, σ_e) değeri $(5.48\pm0.31)\times10^{-21}$ cm^{-2} olarak hesaplanmıştır.

Pompa enerji değerleri arttırıldıkça, seramik lazeri 2066 ve 1967 nm'de aynı anda çalışmış ve her iki merkez dalgaboyu civarındaki ayarlanabilir dalgaboyu aralığı ölçülmüştür. Şekil 3.2.11'de gösterildiği gibi, 1204 nm ile uyarılan seramik lazerinden, iki merkez dalgaboyu (1967 ve 2066 nm) civarında, 1929-1990 nm ve 2058-2078 nm aralığında ayarlanabilir çıkış spektrumu elde edilmiştir.



Şekil 3.2.11 Kazanç-anahtarlamalı Cr^{4+}:forsterit lazeriyle uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin çıkış gücünün dalgaboyuna göre ölçülmüş değişimi.

800 nm ile uyarılmaya benzer olarak, 1204 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin, pompa enerjisine göre değişen spektral ve zamansal karakterizasyonu yapılmıştır. Seramik lazeri, 105 µJ enerjiden daha düşük pompa enerjilerinde 2066 nm'de tek çıkış darbesi (P_1) üreterek çalışmıştır. Fakat Şekil 3.2.12 (a) ve (b)'den görülebileceği gibi, pompa enerjisi 105 µJ ve daha yüksek seviyelere geldiğinde, 2066 ve 1967 nm'de iki dalgaboylu lazer ışınımı gözlemlenmiş ve çıkış darbelerinin sayısı ikiye (P_1 ve P_2) yükselmiştir. Şekil 3.2.12 (c) ve (d), bu darbelerin uzunluklarının ve oluşma sürelerinin 1204 nm'deki enerjiye göre değişimini göstermektedir. Deneyler esnasında pompa lazerinin en kısa darbe uzunluğu 37 ns olarak ölçülmüştür.1204 nm'de uyarılan seramik lazeri için, ölçülen en kısa darbe uzunluğu 1.1 µs ve en kısa darbe oluşma süresi ise 6 µs'dir (P_1). 800 nm ile uyarılmaya benzer olarak, P_1 için darbe uzunluğu ve oluşma süresi pompa enerjisi arttıkça kısalmıştır. İkinci darbe (P_2) için ise, darbe uzunluğu ve darbe oluşma süresi pompa enerjisi arttırıldıkça fazla değişim göstermemiş, sırasıyla 5.9 µs ve 18.5 µs civarında kalmıştır.



Şekil 3.2.12 1204 nm'de uyarılan Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik lazerinin, 105 µJ pompa enerjisinde ölçülen (a) spektral ve (b) zamansal profili. (c)-(d) Seramik lazerinden üretilen darbelerin, pompa enerjisine göre ölçülen uzunlukları ve oluşma süreleri.

Bu çalışma sonucunda, literatürde ilk kez, Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramiğinin 1200 nm civarındaki lazer uyarılma spektrumu ölçülmüş ve optimum uyarılma dalgaboyları 1198, 1204 ve 1211 nm olarak belirlenmiştir. Daha sonra 1200 nm civarındaki enerji verimliliği incelenerek 800 nm civarında elde edilen verimlerle kıyaslanmıştır. Sonuç olarak, 1204 nm'de uyarılan seramik

lazerinden yaklaşık iki kat daha fazla verim elde edilmiş ve 1200 nm bandının, düşük konsantrasyonlu Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramikler için daha optimum bir uyarılma bandı olduğu gösterilmiştir. Ayrıca iki dalgaboyunda (2066 ve 1967 nm) aynı anda çalışan seramik lazerinin, pompa enerjisine bağlı spektral ve zamansal karakterizasyonu yapılmıştır.

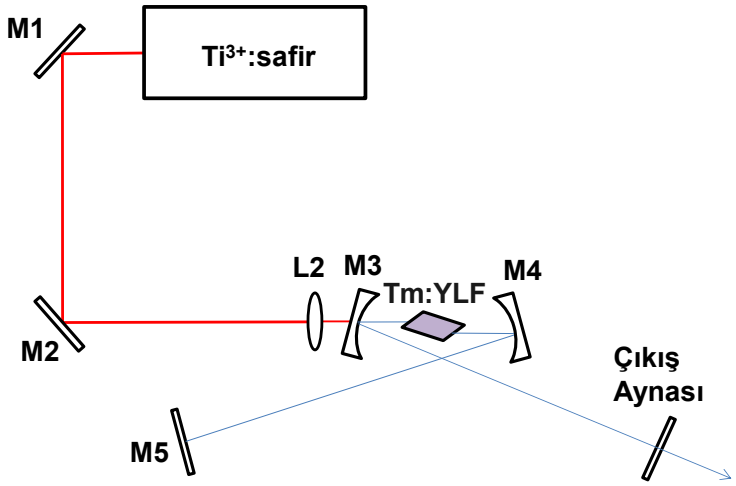
Kaynaklar:

1. O. Antipov, A. Novikov, S. Larin, and I. Obronov, "Highly efficient 2 μm CW and Q-switched Tm^{3+}:Lu_2O_3 ceramics lasers in-band pumped by a Raman-shifted erbium fiber laser at 1670 nm," Opt. Lett. 41, 2298-2301 (2016)

2. P. F. Moulton, "An Investigation of the Co:MgF_2 Laser System," IEEE J. of Quant. Electron. 21, 1582-1595 (1985).

3.3 Sürekli Dalga Tm^{3+}:YLF Lazerleri

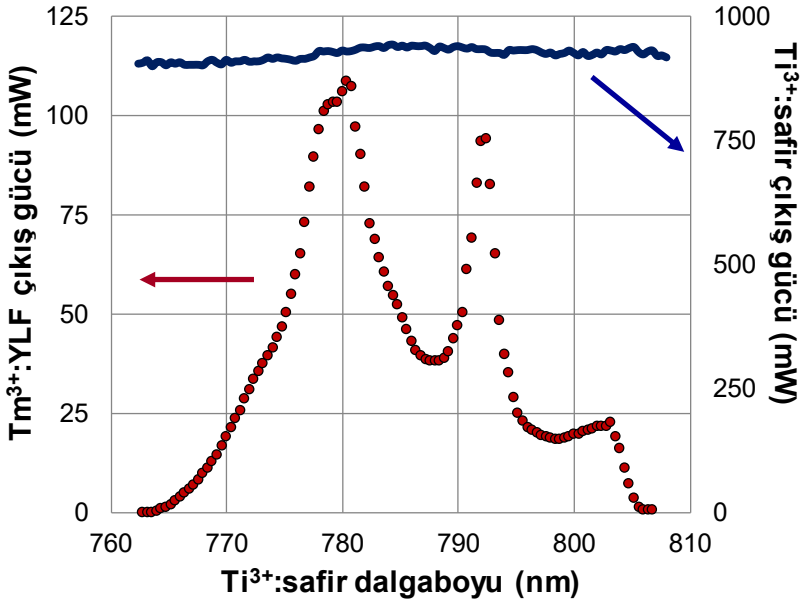
2.3 μm'da çalışan tulyum tabanlı Tm^{3+}:YLF katıhal lazerinin en uygun pompalama dalgaboyunu belirlemek için kurulan Ti^{3+}:safir lazer düzeneği, Bölüm 2.3.1'de ayrıntılarıyla anlatılmıştır. Bu bölümde ise, Ti^{3+}:safir ve diyot pompalı, sürekli dalga Tm^{3+}:YLF lazerlerinden ve deney sonuçlarından bahsedilecektir.



Şekil 3.3.1 Ti^{3+}:safir pompalı 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin şematik gösterimi.

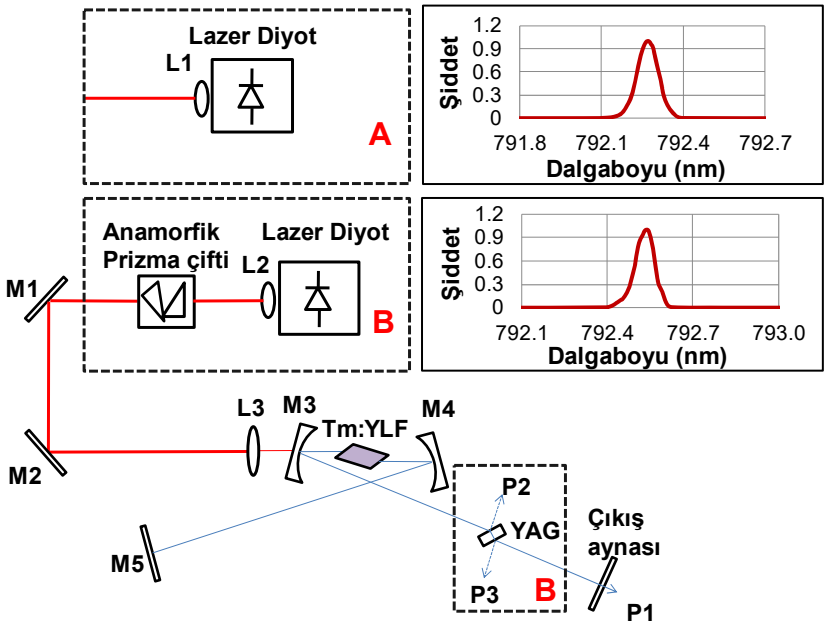
Şekil 3.3.1'de sürekli dalga Ti^{3+}:safir lazeri ile uyarılan 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin deneysel düzeneği şematik olarak gösterilmiştir. Dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir lazeri iki yüksek yansıtıcı ayna (M1 ve M2) ve bir odaklayıcı mercek (L2, f=75 mm) yardımıyla Brewster açılı, 9-mm uzunluğunda ve %1.5 katkılı (atomik oranda) Tm^{3+}:YLF kristalinin içine odaklanmıştır. Lazer kristalinin sıcaklığı, bakır tutucusundan su devirdaim ettirilerek 21 C°'de tutulmuştur. Yüksek yansıtıcı çukur aynalar (M3 ve M4, R (eğrilik yarıçapı)=100mm), düz ayna (M5) ve bir çıkış aynası kullanılarak standart x-şeklinde bir lazer rezonatörü kurulmuştur. Lazer deneylerinde çıkış aynası olarak geçirgenliği %1 ve %3.2 olan aynalar kullanılmıştır.

Deneylerde kullanılan yüksek yansıtıcı aynaların optik kaplaması 2200-2500 nm aralığında ve %99.8'den yüksek geri yansıtmaya sahip olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu aynalar yardımıyla Tm^{3+} iyonunun 2 μm civarındaki ışıma bandı engellenmiştir. Rezonatörün yüksek yansıtıcı ayna içeren kolu boyu 49 cm, çıkış aynasının bulunduğu kol boyu ise 65 cm'dir. Bölüm 2.1'de bahsedilen ABCD matris yönteminden yola çıkılarak, kristal içindeki lazer ışın demetinin beli 39 μm olarak belirlenmiştir.



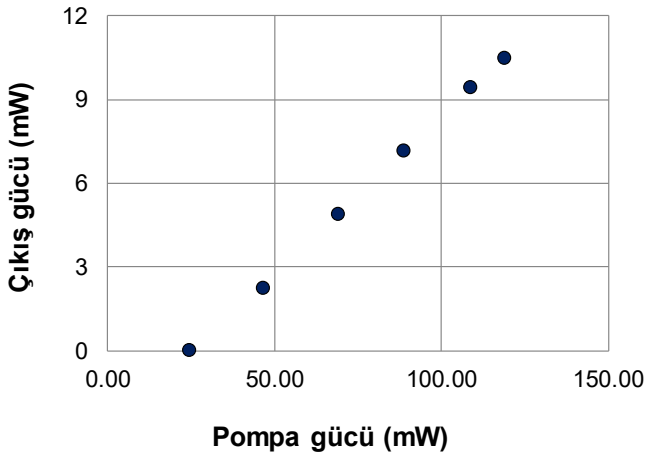
Şekil 3.3.2 Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu ayarlama eğrisi ile buna denk gelen uyarım (excitation) spektrumu. Grafik, eğride gösterilen Ti^{3+}:safir pompa dalgaboyu ve gücü ile elde edilen 2.3 μm Tm^{3+}:YLF çıkış güçlerini pompa dalgaboyuna göre göstermektedir. Tm^{3+}:YLF çıkış aynası geçirgenliği %1'dir.

Şekil 3.3.2'de pompa lazeri dalgaboyuna göre ölçülmüş Tm^{3+}:YLF lazeri çıkış gücü (soldaki eksen, yuvarlak noktalı eğri) ve pompa lazeri olan Ti^{3+}:safir'in dalgaboyu ayarlama eğrisi (sağdaki eksen, sürekli eğri) gösterilmiştir. Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu 0.5 nm aralıklarla değiştirilerek pompa ve lazer güçleri Şekil 3.3.2'de kaydedilmiştir. Yaklaşık olarak 900mW civarındaki pompa güçlerinde, Tm^{3+}:YLF kristalinin 780 nm civarında uyarma dalgaboyları gösterilmiştir. Tm^{3+}:YLF'in uyarım spektrumu, soğurma spektrumunun özelliklerini yansıtarak en yüksek güç değerlerini 780 nm ve 792 nm'de göstermiş ve 803 nm'deki karakteristik omzu da ortaya çıkarmıştır. 780 nm ve 792 nm'de soğurma değerleri %78 ve %68 iken, 930 mW pompa gücünde elde edilen çıkış güçleri sırasıyla 107 mW ve 94 mW olarak ölçülmüştür.



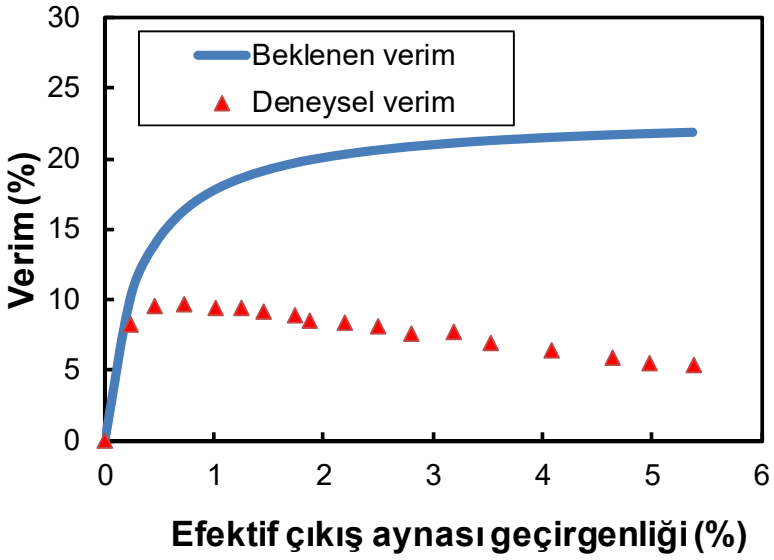
Şekil 3.3.3 (A)120-mW ve (B) 250 mW diyot pompalı 2.3 μm Tm^{3+}:YLF laserinin deneysel şeması. (B) düzeneğinde rezonatör içinde ayrıca paralel bir YAG kristali konarak yüzeylerinden fazladan güç elde edilmesi sağlanmıştır. Her bir pompa düzeneğinin sağında diyotların ayarlandıkları pompa dalgaboyundaki çıkış spektrumları görülmektedir. Sırasıyla (FWHM) dalgaboyu genişlikleri 0.09 nm ve 0.08nm olarak belirlenmiştir.

Şekil 3.3.3'te diyot pompalı Tm^{3+}:YLF lazer düzenekleri ve bu diyotların çıkış spektrumları gösterilmiştir. Şekil 3.3.3 (A)'da görülen ilk düzenekte 120-mW çıkış gücüne sahip tek kipli AlGaAs lazer diyotu kullanılmıştır (Bluesky Research). Bu diyotun çıkış yüzeyine yerleştirilen bir mikro-mercek sayesinde çıkış profili daireselleştirilmiştir. Lazer diyotuna 120 mA akım sürülerek 25 C°'de 785 nm'de 100 mW çıkış gücü vermiş ve daha sonra bir PID denetimcisi ile 46 C°'ye ısıtılarak çıkış dalgaboyu Tm^{3+}:YLF'in 792 nm'deki soğurma bandına ayarlanmıştır. Çıkış dalgaboyu genişliği 0.09 nm ve M^2 değeri 1.1 olarak ölçülmüştür. Şekil 3.3.3 (B)'de ise 250-mW çıkış gücüne sahip diyotla pompalanan düzenek gösterilmiştir. Bu diyot ise yine 46 C°'de 792 nm'de çalıştırılmış ve 500 mA akımla bu sıcaklıkta 250 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Her iki düzenekteki rezonatör parametreleri yukarıda anlatılan Ti^{3+}:safir pompalı Tm^{3+}:YLF lazer rezonatörü ile aynı tutulmuştur. Yalnızca, 250 mW gücündeki diyotun kullanıldığı düzeneğin çıkış aynası kolunda 6 mm kalınlığında bir YAG etalon (//<1 sec) kristal kullanılmıştır. Brewster açısında çıkış aynası koluna yerleştirilen YAG kristalinin açısı değiştirilerek rezonatörün efektif çıkış geçirgenliğini sürekli olarak ayarlamak mümkün olmuştur.



Şekil 3.3.4 100 mW güce sahip diyotla pompalanan Tm^{3+}:YLF lazerinin %1 geçirgenliğe sahip çıkış aynasıyla elde edilen verim eğrisi.

Şekil 3.3.4'te 120 mW gücündeki tek kipli diyot kullanılarak ölçülen Tm^{3+}:YLF lazeri güç verimi görülmektedir. Buna göre verim %11.4 ve pompa eşik gücü de 25 mW olarak ölçülmüştür. Buna göre 119 mW (en yüksek) pompa gücüyle 10 mW çıkış gücü elde etmek mümkün olmuştur.

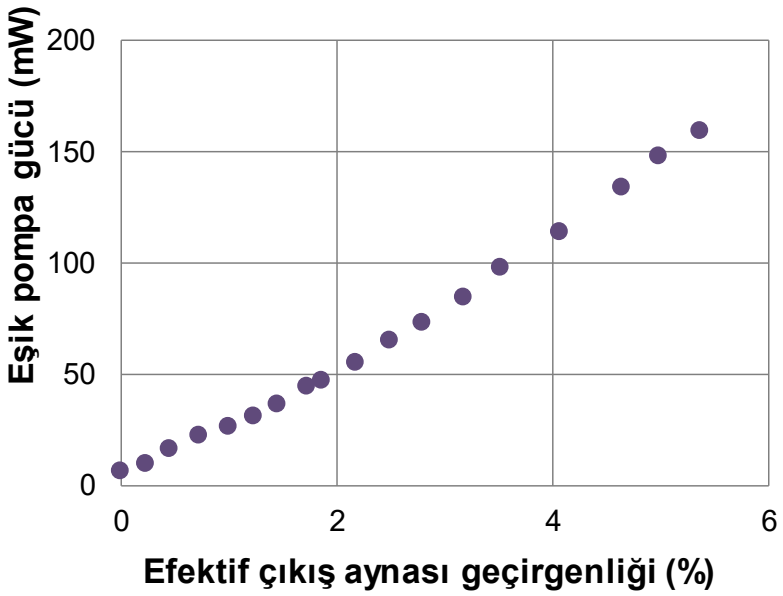


Şekil 3.3.5 Efektif çıkış aynası geçirgenliği değişimine göre ölçülen Tm^{3+}:YLF güç verimleri.

Şekil 3.3.5'te efektif çıkış aynası geçirgenliğine göre ölçülen 400 mW diyot pompalı Tm^{3+}:YLF lazerinin güç verimleri gösterilmiştir. Ayrıca, elde edilmesi beklenen verimler de

$$\eta = \frac{\lambda_p}{\lambda_L}\frac{T}{T+L}\eta_a \tag{3.6}$$

formülü kulllanılarak hesaplanmıştır. Burada η verim, λ_p ve λ_L pompa ve lazer dalgaboyları, η_a pompa soğurma oranı, T çıkış aynası geçirgenliği ve L de rezonatörün bir çevrimdeki pasif kaybıdır. Buna göre, 4-seviyeli lazerlerde artan çıkış geçirgenliği ile verim artar ve sonra doyuma ulaşır. Ancak, burada çıkış aynası geçirgenliğinin düşük değerlerinde verim artarken, yüksek geçirgenlik değerlerinde verimin düştüğü gözlemlenmektedir. Bunun muhtemel bir sebebi bir üst seviyeye geçiş (upconversion) ile lazer seviyesindeki uyarılmış iyon konsantrasyonunun ışımasız olarak azalmasıdır. Düşük geçirgenliklerde, rezonatör içindeki foton şiddeti yüksek olduğundan, temel seviyeye doğru uyarılı ışıma hızı artar ve bu sayede lazer seviyesindeki iyonların ışımasız üst geçişleri azaltılabilir.



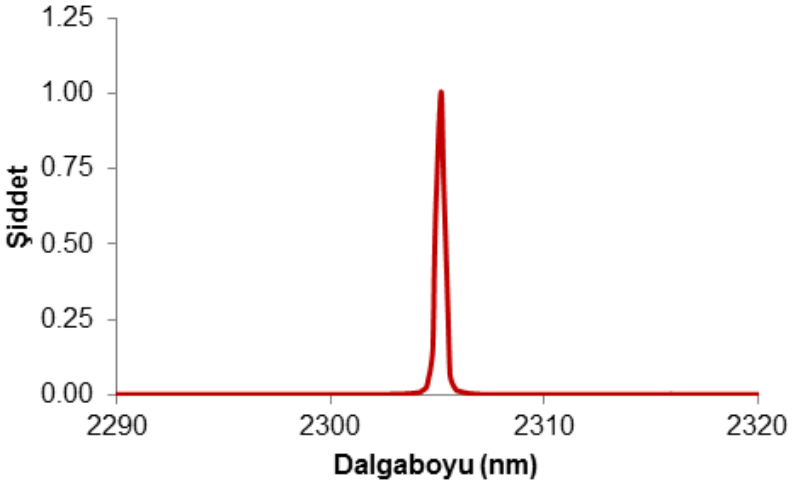
Şekil 3.3.6 Efektif çıkış aynası geçirgenliği değişimine göre ölçülmüş eşik pompa gücü değerleri.

Şekil 3.3.6'da efektif çıkış aynası geçirgenliği değişimine göre ölçülmüş eşik pompa gücü değerleri görülmektedir. 4-seviyeli lazerlerde eşik pompa gücü,

$$P_{th} = \frac{\pi\left(w_p^2 + w_L^2\right)h\upsilon_p}{4\sigma_e \tau_f \eta_a}(L+T) \tag{3.7}$$

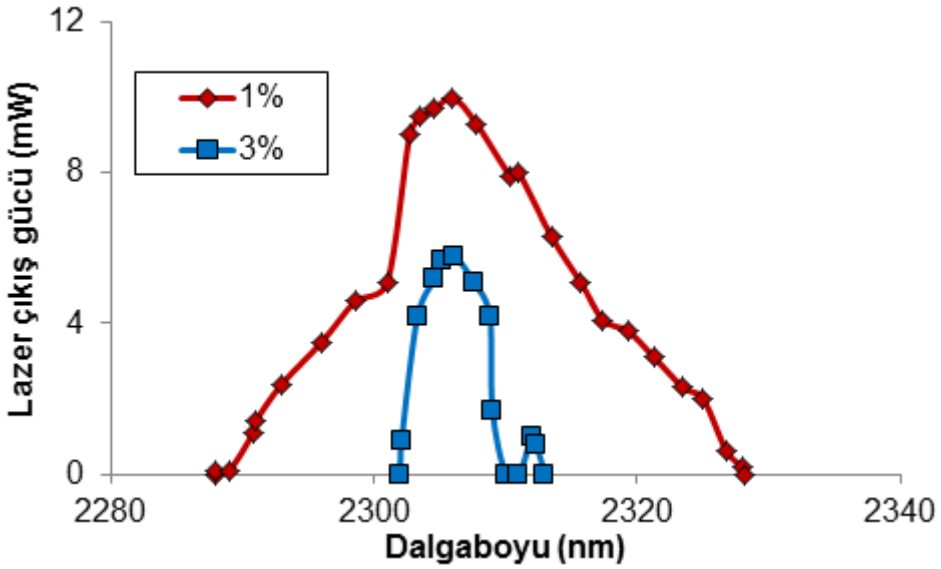
formülüyle hesaplanmaktadır. Buna göre, w_p ve w_L pompa ve lazer ışın demeti yarı çapı, υ_p pompa fotonu frekansı, σ_e ışıma kesiti (emission crossection) ve τ_f ise lazer seviyesinin floresans yaşam süresidir. Bu denklem ve Şekil 3.3.6'daki eşik pompa değerleri kullanılarak hesapladığımız rezonatörün bir çevrimindeki kaybından $\sigma_e = 0.57 \times 10^{-20}$ cm² olarak bulunur.

Lazerin çıkış spektrumu, projemiz kapsamında edindiğimiz taramalı optik spektrometre (A.P.E waveScan) yardımıyla ölçülmüş ve Şekil 3.3.7'de gösterilmiştir. Buna göre lazerin merkez dalgaboyu 2305.2 nm ve lazerin spektral genişliği spektrometrenin ölçüm çözünürlüğü sınırında ~0.5 nm olarak ölçülmüştür.



Şekil 3.3.7 Kurulan Tm^{3+}:YLF lazerinin çıkış spektrumu.

İş paketi 2.4 doğrultusunda, Tm^{3+}:YLF lazerinin farklı çıkış aynalarıyla ve farklı dalgaboylarındaki çalıştırılışının incelenmesi deneylerinde, rezonatör içinde dalgaboyu seçici optik eleman olarak çift kırınımlı kuartz plaka (birefringent tuning plate) kullanılmıştır. Sırasıyla %1 ve %3 çıkış aynalı durumlar için, Tm^{3+}:YLF lazerinin dalgaboyuna göre ayarlanabilirliği Şekil 3.3.8'de gösterilmiştir. Buna göre %1 geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak yapılan deneylerde Tm^{3+}:YLF lazerinin çıkış dalgaboyu 2287 ile 2328 nm aralığında yaklaşık 40 nm değiştirilebilmiştir.



Şekil 3.3.8 Kurulan Tm^{3+}:YLF lazeri için, dalgaboyuna bağlı ölçülmüş çıkış gücü.

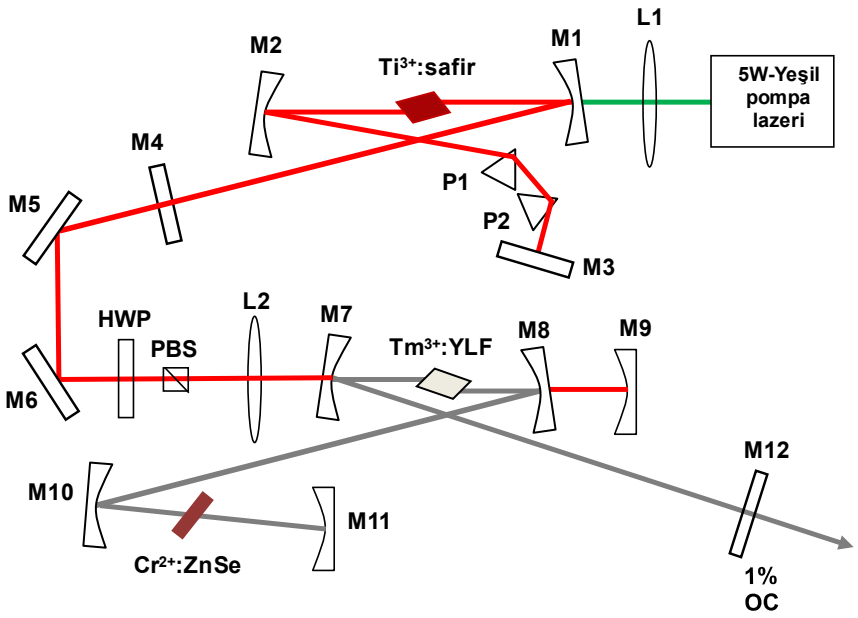
Sonuç olarak İş Paketi 2.3 ve İş paketi 2.4 kapsamında diyot pompalı Tm^{3+}:YLF lazerinin güç performansı eniyileştirilmiş, farklı çıkış aynalarıyla ve farklı dalgaboylarındaki çalıştırılışı incelenmiştir. En iyi güç performansı %1'lik çıkış aynası ile elde edilmiştir.

3.4 2.3 µm'de Çalıştırılan Tm^{3+}:YLF Lazerinden Q-anahtarlama ile Darbe Üretimi

Giriş bölümünde anlatıldığı gibi, 2 µm civarında çalışan darbeli lazerlerin birçok uygulaması bulunmaktadır. Bu uygulamalardan bir tanesi $ZnGeP_2$ (ZGP) tabanlı optik parametrik osilatörlerin (OPOs) pompalanmasıdır. Ancak, ZGP tabanlı OPO sistemlerinin verimli bir şekilde uyarılabilmesi için 2.1 µm'den uzun dalgaboyunda çalışan lazer sistemleri kullanılmalıdır. ZGP OPO sistemleri darbeli bir şekilde pompalandığında, orta kızılaltı bölgesinde geniş bir spektrumda çalışabilmekte ve birçok doğrusal olmayan optik uygulamada kullanılabilmektedir. Bu pompalama dalgaboyuna ulaşabilmek için genellikle, Tm^{3+} tabanlı bir lazer ile Ho^{3+} tabanlı bir lazer uyarılmakta veya Tm^{3+} ve Ho^{3+} iyonları aynı kazanç ortamı içine katılarak 2.1 mikron civarında lazer ışınımı elde edilmektedir. Bu karmaşık sistemlere alternatif olarak, Tm^{3+} iyonunun 2.3 µm civarında olan ışıma bandı kullanılarak, basit bir pompalama sistemi kullanılabilir.

Lazer rezonatörüne doyabilen bir soğurucu yerleştirildiğinde, yüksek şiddetteki ışığın düşük şiddetteki ışığa göre daha az kayıp görmesi sağlanabilir. Bir başka deyişle, ışığın şiddetine göre rezonatörün kalite faktörü değiştirilebilir. Bu yöntemle darbe üretimine "pasif Q-anahtarlama" adı verilmektedir. Elde edilen darbelerin süresi, rezonatörün uzunluğuna ve doyabilen soğurucunun spektroskopik parametrelerine bağlıdır. Yakın ve orta kızılaltı bölgesinde, yaygın olarak kullanılan doyabilen soğurucular arasında Cr^{2+}:ZnSe, Cr^{2+}:ZnS, Cr^{2+}:CdSe, Fe^{2+}:ZnS ve Fe^{2+}:ZnSe [1-3] yer almaktadır. Bu doyabilen soğurucuların ortak özelliği, 2.3 µm civarına kadar uzanan soğurma bantlarının olması ve bu bantların doyabilen soğurucu özelliği göstermesidir.

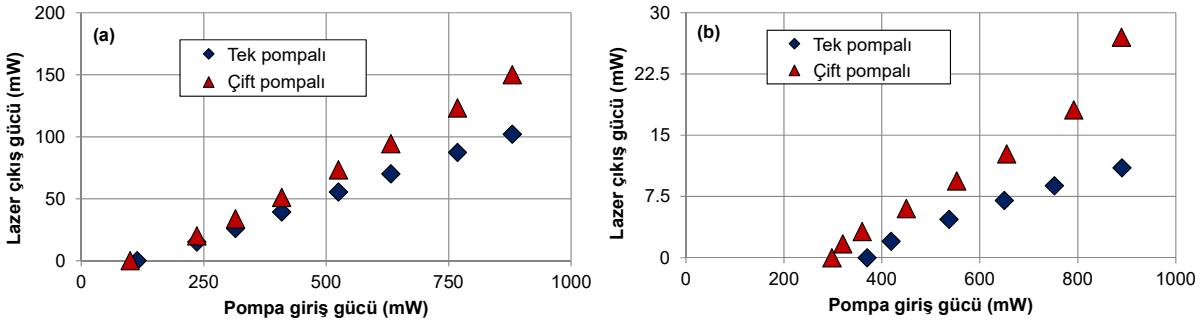
Bu bölümde, 2.3 µm civarında çalıştırılan Tm^{3+}:YLF lazerinin pasif Q-anahtarlama yöntemi kullanılarak darbeli olarak çalıştırılması anlatılacaktır. Bu çalışmalar sayesinde, literatürde ilk kez pasif Q-anahtarlama yöntemi kullanılarak 2.3 µm Tm^{3+}:YLF lazerlerinden darbe üretimi elde edilmiştir. Darbelerin üretimi Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucunun rezonatör içine yerleştirilmesi ile mümkün olmuştur.



Şekil 3.4.1 Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama yöntemiyle darbe üretilen Tm^{3+}:YLF düzeneğinin şematik gösterimi. İki prizma içeren Ti^{3+}:safir lazeri pompa lazeri olarak kullanılmıştır.

Prizma ile dalgaboyu ayarlanabilen bir Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan ve darbeli rejimde çalışan Tm^{3+}:YLF düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 3.4.1'de verilmiştir. Şekil 3.4.1'den de görülebileceği gibi pasif Q-anahtarlama deneylerinde kullanılan Tm^{3+}:YLF lazeri, Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu içermektedir. Deneylerde, Tm^{3+}:YLF lazerini uygun bir biçimde uyarabilmek için, kristalinin soğurma bandı civarında etkin bir kaynak olan Ti^{3+}:safir lazeri kurulmuştur. Ti^{3+}:safir lazerinin uyarıcı lazeri olarak, TUBITAK desteği ile satın alınan 5W çıkış gücüne sahip yeşil lazer (OPUS, MPC 6000) kullanılmıştır. Yeşil lazer ışını içbükey bir mercek (L1=75mm) yardımıyla, 10-mm uzunluğundaki Brewster açısında kesilmiş Ti^{3+}:safir lazerinin içine odaklanmıştır. Deneylerimizde kullandığımız Ti^{3+}:safir kristali, uyarıcı dalgaboyu olan 532 nm'de %92 oranında soğurmaya sahiptir. Ti^{3+}:safir lazer rezonatörü, iki adet içbükey (M1 ve M2, R=70mm), bir adet yüksek yansıtıcı ayna (M3) ve 800 nm çalışma dalgaboyu civarında %15 oranında geçirgenliğe sahip bir çıkış aynasından oluşmaktadır. Bunlara ek olarak, ardışık biçimde rezonatöre yerleştirilen iki adet prizma (P1 ve P2, SF10) yardımıyla Ti^{3+}:safir lazerinin çıkış dalgaboyu, spektral genişliği 0.09 nm civarında kalacak şekilde 700-840 nm aralığında ayarlanabilmektedir. Bu dalgaboyu aralığında Ti^{3+}:safir lazeri 900 mW civarında çıkış gücüne sahiptir. Tm^{3+}:YLF lazerinde etkin bir uyarılma sağlamak için, Ti^{3+}:safir lazerinin çıkış dalgaboyu 780 nm'ye ayarlanmıştır. 780 nm'deki pompa ışını iki düz ayna (M5, M6) yardımıyla Tm^{3+}:YLF kristalinin içine ayarlanmıştır. Tm^{3+}:YLF lazerinin giriş gücünü Ti^{3+}:safir lazerinin ışın parametrelerini değiştirmeden sürekli bir şekilde ayarlayabilmek için, bir adet yarım dalga plakası (Half-wave plate, HWP) ve polarize ışın bölücü (Polarizing beam splitter, PBS) kullanılmıştır. Ti^{3+}:safir pompa ışını %1.5 Tm^{3+} iyonu katkılı, Brewster açısında kesilmiş YLF kristalinin içine bir mercek (L2, f=100mm) yardımıyla

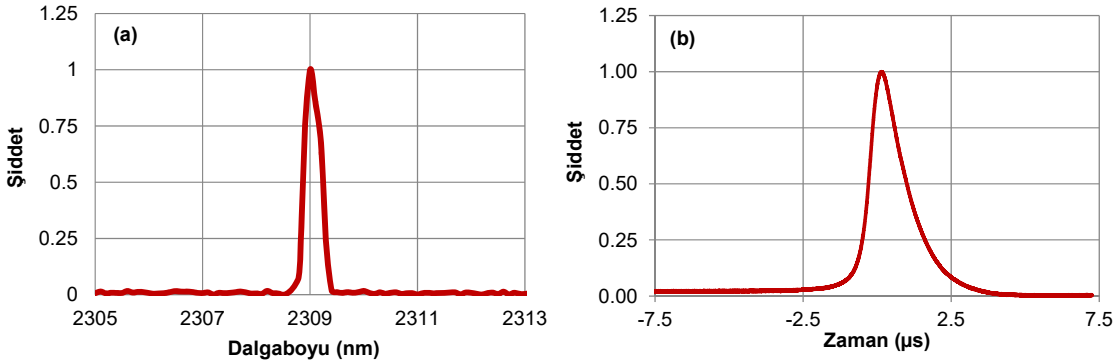
odaklanmıştır. 780 nm pompa dalgaboyunda %78 oranında soğurmaya sahip Tm^{3+}:YLF kristalinden geçen ışığı kullanabilmek için, içbükey bir ayna (M9, R=100mm) normal açıda yerleştirilmiş ve kristalin çift taraflı pompalanması (double pumping) sağlanmıştır. Tm^{3+}:YLF lazer rezonatörü, dört adet içbükey yüksek yansıtıcı ayna (M7 ve M8, R=100mm; M10 ve M11, R=75mm) ve bir adet %1 oranında geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanılarak kurulmuştur.



Şekil 3.4.2: Tek (dörtgen) ve çift (üçgen) pompalı durumlar için ölçülen ortalama çıkış gücünün (a) sürekli dalga ve (b) Q-anahtarlamalı rejimlerde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin giriş gücüne bağımlılığı.

Şekil 3.4.2 (a)'da sürekli dalga rejiminde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin tek ve çift yönlü pompalama durumları için ölçülmüş çıkış güçleri verilmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi, 900 mW giriş gücüne karşılık tek yönlü pompalama ile 102 mW ve çift yönlü pompalama ile de 150 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Sürekli dalga güç verimleri tek ve çift pompalama durumları için sırasıyla %14 ve %19 olarak ölçülmüştür. Deneysel olarak ölçülen eşik pompa güç değerleri (114 mW tek yönlü pompalama, 100 mW çift yönlü pompalama) kullanılarak lazer rezonatörünün kayıpları %0.3 olarak belirlenmiştir.

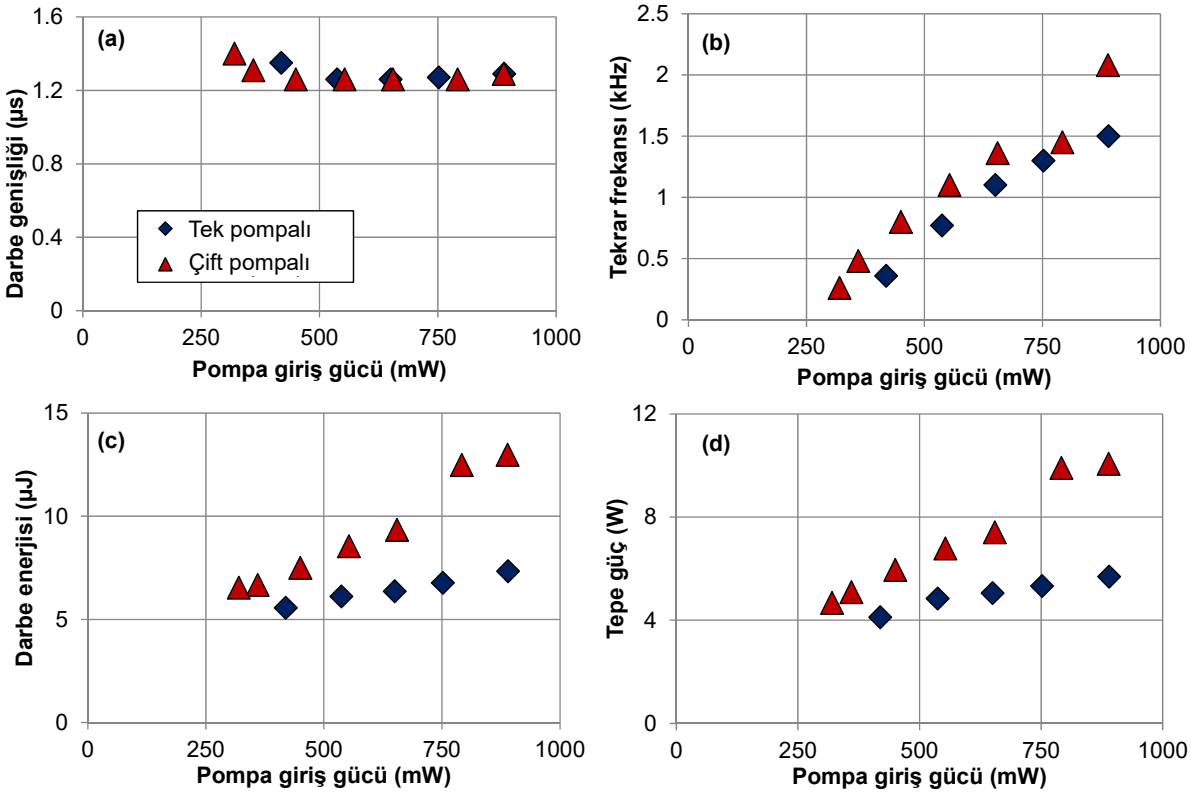
Polikristal yapıya sahip ve 2.6 mm uzunluğundaki Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu, M10 ve M11 aynalarının odak noktasına Brewster açısında yerleştirilmiştir. Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucunun eklenmesinin ardından çıkış güç değerleri çift yönlü pompalama için 150 mW'tan 27 mW'a, tek yönlü pompalama için ise 100 mW'tan 11 mW'a düşmüştür [Şekil 3.4.2(b)]. Lazer salınımı elde edildiği her pompa güç değerinde pasif Q-anahtarlamalı çalışma rejimi gözlenmiştir. Lazer rezonatörü içinde Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucunun olduğu durumda pompa eşik güç değerleri 380 mW (tek yönlü pompalama) ve 300 mW (çift yönlü pompalama) olarak ölçülmüştür. Ölçülen eşik pompa güç değerleri kullanılarak Cr^{2+}:ZnSe örneğinin bir çevrimdeki kaybı %2.9 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.4.3: Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama rejiminde çalıştırılan Tm^{3+}:YLF lazerinin (a) optik spektrumu ve (b) zamana bağlı darbe profili.

Şekil 3.4.3(a) ve (b)'de üretilen darbelerin optik spektrumu ve zamansal profili gösterilmiştir. Optik spektrumdan da görüleceği gibi çıkış dalgaboyu 2309 nm olarak ölçülmüştür.

Pasif Q-anahtarlamalı rejimde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin giriş gücüne bağlı olarak değişen çıkış parametreleri Şekil 3.4.4'te gösterilmiştir. Bunlar sırasıyla darbe uzunluğu (a), darbe tekrar frekansı (b), darbe enerjisi (c) ve darbe tepe güç değerleri (d)'dir. Şekil 3.4.4 (a)'da gösterildiği gibi farklı giriş güçlerinde ölçülen darbe uzunlukları 1.2-1.4 µs civarındadır. Çift yönlü pompalama durumu için, giriş güç değerlerine karşılık gelen darbe tekrar frekansları ölçüldüğünde ise 0.3 kHz ile 2.1 kHz arasında olduğu gözlenmiştir [Şekil 3.4.4 (b)]. Tek yönlü pompalama için bu değerler ise 0.4 kHz ile 1.5 kHz arasındadır. Ölçülen çıkış gücü, darbe uzunluğu ve darbe tekrar frekans değerleri kullanılarak hesaplanan en yüksek darbe enerjisi ve darbe tepe güç değeri sırasıyla, 13 µJ ve 10.1W'tır [Şekil 3.4.4(c) ve Şekil 3.4.4(d)].



Şekil 3.4.4: Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu kullanılarak pasif Q-anahtarlama rejiminde çalıştırılan, tek ve çift taraflı pompalanan Tm^{3+}:YLF lazerinin (a) darbe uzunluğu, (b) tekrar frekansı, (c) darbe enerjisi ve (d) darbe tepe gücünün giriş gücüne göre ölçülmüş değişimi.

Deneylerde doyabilen soğurucu olarak kullanılan Cr^{2+}:ZnSe örneğinin düşük sinyal kaybını belirlemek için,

$$f_{rep} = \frac{1}{\tau_f}\frac{G_0}{2Q_0} \tag{3.8}$$

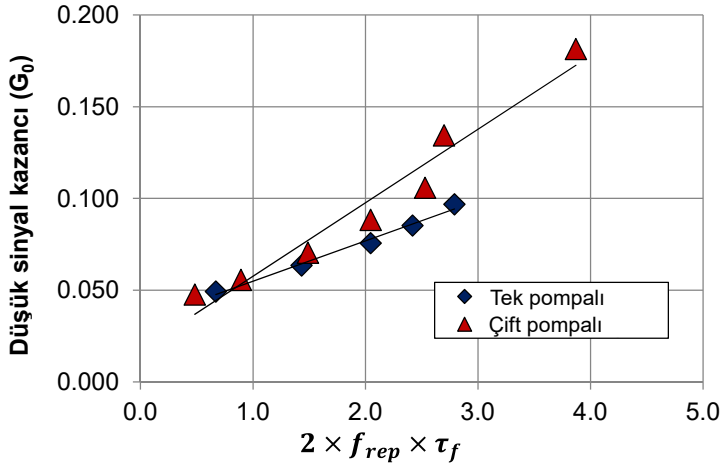
denklemi kullanılmıştır [4-6]. Pasif Q-anahtarlamalı lazerlerin analizi için kullanılan bu denklemde, darbe tekrar frekansı (f_{rep}), bir çevrimdeki düşük sinyal kazanç katsayısı (G_0) ve doyabilen soğurucunun düşük sinyal kayıpları (Q_0) birbiri ile ilişkilendirilmiştir. Denklem 3.8'te verilen τ_f kazanç ortamının ışıma yaşam süresidir. Bu denklemdeki bilinmeyenlerden biri olan, bir çevrimdeki düşük sinyal kazanç katsayısını (G_0) hesaplayabilmek için, çıkış güç değerleri ile G_0 'ı birbiri ile ilişkilendiren

$$P_{out} = T\frac{P_{sat}}{2}\left(\frac{G_0}{G_{th}} - 1\right) \tag{3.9}$$

denklem kullanılmıştır [7]. Burada, T çıkış aynasının geçirgenliğini, G_{th} bir çevrimdeki eşik kazancını ($G_{th} = L_c + T$, L_c bir çevrimdeki rezonatör kaybı), P_{sat} ise lazer kazanç ortamının doyum gücünü göstermektedir. Bu değer ise,

$$P_{sat} = \frac{h\nu_L}{\sigma_e \tau_f} A \tag{3.10}$$

formülüyle hesaplanır. Bu denklemde, $h\nu_L$ lazer dalgaboyundaki foton enerjisi (0.54eV), σ_e kazanç ortamının uyarılı ışıma arakesiti (0.87X10^{-21} cm^2) ve τ_f ise kazanç ortamının ışıma yaşam süresidir (930μs). Denklemde verilen A lazer demetinin ara kesit alanı olup $A = \pi w_{rms}^2$ denklemiyle hesaplanmıştır. w_{rms} ışın demetinin kök ortalama (root-mean-squared) değeridir. Bölüm 2.1'de anlatılan ABCD matris analizine göre hesaplanan w_{rms} değeri 36 μm olup, bu değer için elde edilen P_{sat} 1.46 W'tır. Bilinen bu değerler ve ölçülen çıkış güçlerine karşılık gelen düşük sinyal kazanç değerlerinin (G_0) kullanılmasıyla Şekil 3.4.5'te gösterilen lineer çakıştırmalar elde edilmiştir. Sonuç olarak, Q_0 değerleri tek yönlü ve çift yönlü pompalama için %2.2 ve %4 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.4.5 Tek ve çift taraflı pompalama durumları için düşük sinyal kazancının $2 \times \tau_f \times f_{rep}$ parametresine göre değişimi ve lineer çakıştırma analizi.

Özetle, 2.3 μm civarında çalıştırdığımız Tm^{3+}:YLF lazerinin içine Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu yerleştirerek pasif Q-anahtarlama rejiminde çalışması literatürde ilk kez gösterilmiştir [8]. Bu rezonatör tasarımı için, lazer salınımının elde edildiği her pompa gücünde pasif Q-anahtarlama gözlenmiştir. Merkez dalgaboyu 2309 nm ve darbe uzunlukları 1.2-1.4 μs olarak ölçülmüştür. Ayrıca bu çalışmada, elde edilen darbe tekrar frekanslarının değişimi ve çıkış güç değerleri kullanılarak, doyabilen soğurucu olarak kullanılan Cr^{2+}:ZnSe örneğinin bir çevrimdeki kaybı belirlenmiştir.

Kaynaklar

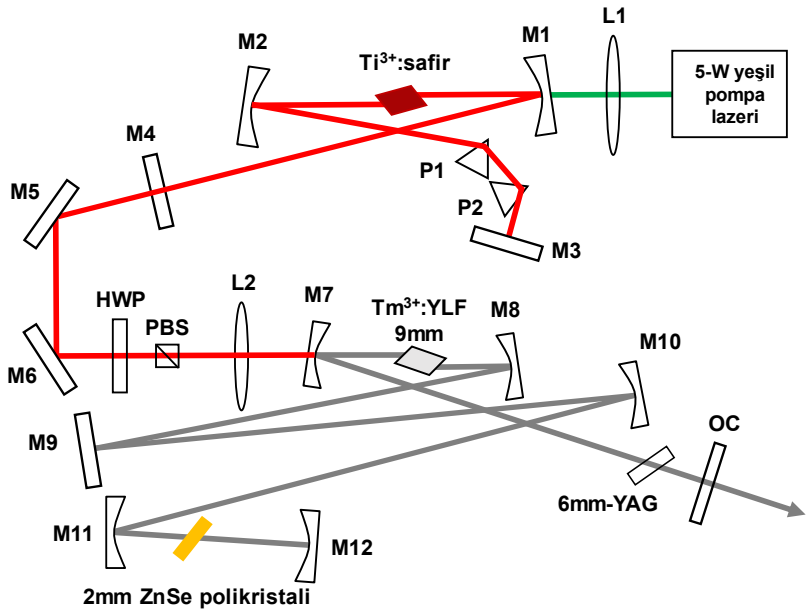
1. S. Mirov, V. Fedorov, I. Moskalev, D. Martyshkin, and C. Kim, "Progress in Cr^{2+} and Fe^{2+} doped mid-IR laser materials," Laser Photon. Rev. **4**, 21-41 (2010).
2. H. Cankaya, U. Demirbas, A. K. Erdamar, and A. Sennaroglu, "Absorption saturation analysis of Cr^{2+}: ZnSe and Fe^{2+}: ZnSe," J. Opt. Soc. Am. B **25**, 794-800 (2008).

3. N. Myoung, V. V. Fedorov, S. B. Mirov, and L. E. Wenger, "Temperature and concentration quenching of mid-IR photoluminescence in iron doped ZnSe and ZnS laser crystals," J. Lumin. **132**, 600-606 (2012).
4. J. J. Zayhowski and C. Dill, "Diode-pumped passively Q-switiched picosecond microchip lasers," Opt. Lett. **19**, 1427-1429 (1994).
5. B. Braun, F. X. Kartner, U. Keller, J.-P. Meyn, and G. Huber, "Passively Q -switched 180-ps Nd:$LaSc_3(BO_3)_4$ microchip laser," Opt. Lett. **21**, 405-407 (1996).
6. F. X. Kartner, L. R. Brovelli, D. Kopf, M. Kamp, I. Calasso, and U. Keller, "Control of solid state laser dynamics by semiconductor devices," Opt. Engineering **34**, 2024-2036 (1995).
7. A. Sennaroglu, *Photonics and laser engineering : principles, devices, and applications* (McGraw-Hill, New York, 2010).
8. F. Canbaz, I. Yorulmaz, and A. Sennaroglu, "2.3-μm Tm^{3+}:YLF laser passively Q-switched with a Cr^{2+}:ZnSe saturable absorber," Opt. Lett. **42**, 1656-1659 (2017).

3.5 Kerr Odaklamalı Kip-Kilitli Femtosaniye 2.3 μm Tm^{3+}:YLF Lazeri

2.3 μm'de çalışan tulyum tabanlı katıhal lazerlerinin kip-kilitli rejimde çalıştırılması, bu projenin önemli ana hedefleri arasında yer almaktadır. Bu bölümde, Kerr odaklama yöntemi kullanılarak kip-kilitli rejimde ilk defa çalıştırılan ve 2.3 μm dalgaboyunda femtosaniye süreli darbeler üretebilen Tm^{3+}:YLF lazerinden ve deney sonuçlarından bahsedilecektir. Bunun için, rezonatör içine bir ZnSe kristali konularak doğrusal olmayan faz modülasyonunu artırılmıştır.

Tm^{3+}:YLF lazerini Kerr-odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırabilmek için, Bölüm 2.3.1'de ayrıntılı olarak anlatılan dalgaboyu ayarlanabilen Ti^{3+}:safir pompa lazer düzeneği kullanılmıştır. Ti^{3+}:safir pompa lazerinin çıkışı yine aynı şekilde, iki yüksek yansıtıcı ayna, ve odaklayıcı bir mercekten (L2, f=75mm) geçirilerek 9 mm uzunluğundaki Brewster açılı Tm^{3+}:YLF kristaline odaklanmıştır (Şekil 3.5.1). %1.5 Tm^{3+} iyon katkılı YLF kristali, 780 nm'deki pompanın %78'ini soğurmuştur. Rezonatörü oluşturan bütün yansıtıcıların yansıtma aralığı 2.2 μm üzerinde tutularak $^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ 2 μm lazer geçişi engellenmiştir.

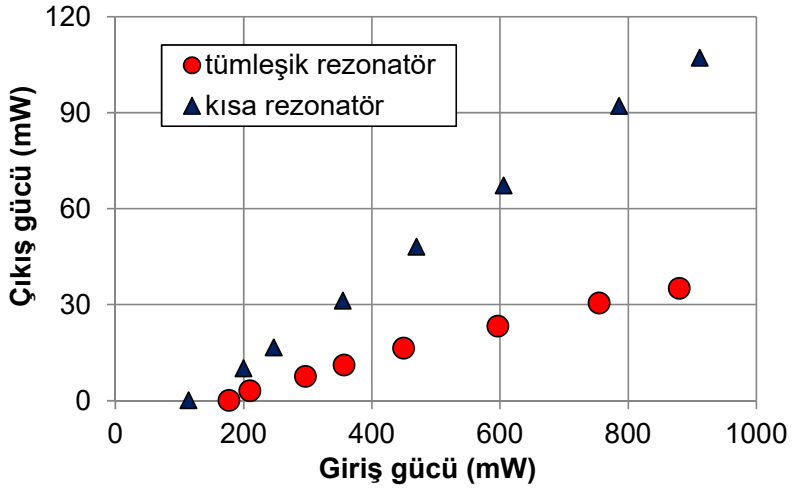


Şekil 3.5.1 Kerr odaklama yöntemi ile kip-kilitli rejimde çalıştırılan 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin şematik gösterimi.

Deneylerin ilk kısmında, M7, M8, M9 ve çıkış aynası (OC) kullanılarak kısa bir rezonatör kurulmuş ve lazer sürekli dalga rejiminde çalıştırılmıştır. Bu rezonatörün yansıtıcı ayna ve çıkış aynası kolları sırasıyla 62.5 cm ve 67 cm'dir. Bu lazer için eşik pompa gücü 114 mW'tır. En yüksek pompa gücü olan 912 mW güç ile 2.3 μm dalgaboyunda %13 güç verimiyle 107 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Kerr odaklamalı rejimde çalışırken rezonatör-içi darbe enerjisini yükseltmek için, yüksek yansıtıcı ayna (M9) kol boyu daha sonra uzatılmıştır. Bunun için, M9 aynası kendisinden 1 m uzağa yerleştirilen çukur aynaya (M10, R=1000mm) doğru çevrilmiş ve böylece M9 üzerindeki ışın demeti beli, q-korunumlu olarak M11 aynasına taşınmıştır. Rezonatör, ışının M12 aynası üzerinden geri yansıtılması ile tamamlanmıştır. Lazer rezonatörünün toplam uzunluğu 361 cm olup, bu da 41.5 MHz darbe tekrar frekansına karşılık gelmektedir. Doğrusal olmayan faz modülasyonunu arttırmak için 2mm uzunluğunda bir polikristal ZnSe alttaşı, M11 ve M12 aynaları arasına Brewster açısında yerleştirilmiştir. Rezonatörün ABCD matris analizine göre Tm^{3+}:YLF kazanç ortamındaki ve ZnSe alttaş içindeki ışın demeti beli sırasıyla 41 μm ve 76 μm olarak hesaplanmıştır.

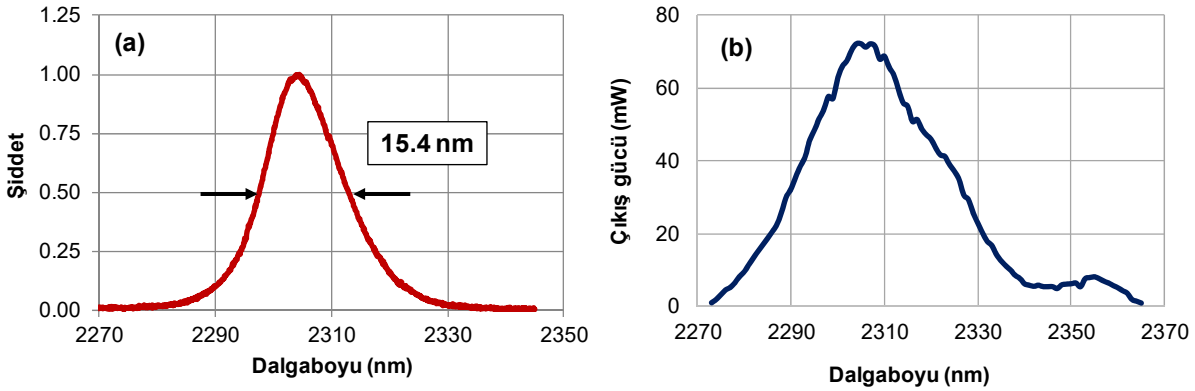
Ayrıca, YLF ve ZnSe kristallerinin dispersiyon değerleri ters işaretli oldukları için 6-mm kalınlığındaki bir YAG kristaliyle rezonatör içine ilave negatif grup gecikme dispersiyonu (Group delay dispersion, GDD) eklenerek soliton darbeleri üretilmesi amaçlanmıştır. Bu uzun rezonatör konfigürasyonuna geçilirken çıkış gücü 107 mW'tan 35mW'a düşmüştür (Şekil 3.5.2). Bu konfigürasyon için güç verimi %5 olarak ölçülmüştür. Değişik çıkış aynası geçirgenliklerinde ölçülen eşik pompa güç değerleri kullanılarak x-şeklindeki rezonatörün kaybı %0.3 olarak hesaplanmıştır. Buna ek olarak, (M10, M11, M12, YAG ve ZnSe alttaşlar gibi) ek optik bileşenlerin eklenmesiyle eşik pompa gücü 114mW'tan 178mW'a yükselmiş ve

tahmini %0.7'lik ilave bir kayba neden olmuştur. Böylece, tümleşik rezonatörün bir çevrimdeki toplam kaybı yaklaşık %1 olmuştur.



Şekil 3.5.2 2.3 μm Tm^{3+}:YLF lazerinin x-şeklindeki kısa rezonatör (üçgen) ve ZnSe kristalini de içeren uzun rezonatör (daire) için ölçülmüş olan güç verimleri.

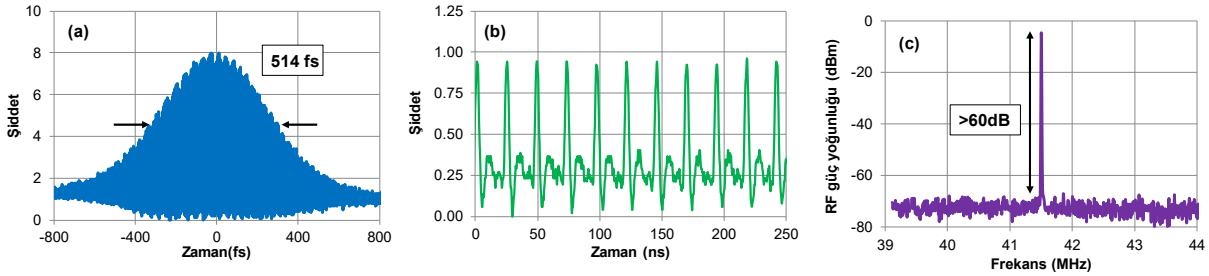
Tm^{3+}:YLF ve ZnSe içindeki lazer odağı ayarlandıktan sonra çıkış aynası hareket ettirilerek lazer 2303 nm'de Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılmıştır. Şekil 3.5.3 (a) 'da kip-kilitli rejimdeki çıkış spektrumu görülmektedir. Buna göre ölçülen spektral genişlik 15.4 nm'dir. Şekil 3.5.3 (b)'de ise 5 mm kuartz çift kırınımlı plaka (Birefringent tuning plate, BTP) ve %1 geçirgenlikteki çıkış aynası kullanılarak lazerin önceden ölçülen dalgaboyu ayarlama eğrisi görülmektedir. Kip kilitleme yöntemi sayesinde elde edilen darbelerin spektral genişliği (FWHM), mevcut olan dalgaboyu ayarlanabilme aralığının yaklaşık olarak yarısı kadardı. Dolayısıyla, daha hassas GDD optimizasyonu ile daha kısa süreli optik darbelerin elde edileceği de öngörülmektedir.



Şekil 3.5.3 (a) Kerr-odaklamalı kip-kilitli rejimde çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin çıkış spektrumu. (b) Tm^{3+}:YLF lazerinin kısa rezonatör içinde 5 mm kuartz çiftkırınımlı plaka (BTP) kullanılarak ölçülmüş dalgaboyu ayarlama eğrisi.

Şekil 3.5.4(a)'da kip-kilitli darbelerin girişimsel otokorelasyon (interferometric autocorrelation) eğrisi görülmektedir. Girişimsel otokorelasyon eğrisi 3.5 ns yükselme zamanına sahip bir

germanyum fotodetektör içinde, iki foton soğurma yöntemi kullanılarak ölçülmüştür. Darbelerin süresi ve spektral genişliği sırasıyla 514 fs ve 15.4 nm olarak ölçülmüştür. Bu değere karşılık gelen zaman-spektral genlik çarpımı, darbelerin sech^2 şiddet profiline sahip oldukları varsayılarak 0.44 olarak hesaplanmıştır. Bu da, oluşan darbelerin bir miktar çirpli olduklarını göstermektedir. Şekil 3.5.4(b) nanosaniye zaman ölçeğinde ölçülmüş darbe katarını göstermektedir. Darbe katarı ölçümlerinde, daha yüksek zaman ölçeklerinde herhangi bir salınım gözlemlenmemiştir. Şekil 3.5.4(c)'deki radyo frekans (RF) spektrumundan da görüleceği üzere, 41.5 MHz'de olan temel (fundamental) darbe tekrar sinyali ve gürültü seviyesi arasındaki kontrast, 60 dB'nin üzerindedir. Bu da kararlı bir kip kilitleme rejiminin elde edildiğini göstermektedir. RF spektrumu 1kHz'lik bir çözünürlükte kaydedilmiştir.



Şekil 3.5.4 Kip-kilitli Tm^{3+}:YLF lazerinin ölçülmüş (a) girişimsel (interferometric) otokorelasyon eğrisi, (b) darbe katarı ve (c) radyo frekans (RF) spektrumu.

Tm^{3+}:YLF kazanç ortamında 2.3 μm'da KLM elde etmenin birkaç faktöre bağlı olarak zorluğu vardır. Birincisi, ışımasız sönümü engellemek için Tm^{3+} iyon derişiminin %1.5'un altında tutulması, 780nm'deki pompanın soğurulmasını arttırmak için göreli olarak daha uzun örnekler kullanılmasını gerektirmiştir. Bizim durumumuzda, %78 soğurma elde etmek için 9mm uzunluğunda bir örnek kullanılmıştır. Bu da, ortamın göreli olarak düşük doğrusal olmayan kırınım indisini (YLF kristali için $n_2 = 1.72 \times 10^{-20}$ m^2/W) kullanılarak, eklenmiş olan aşırı negatif grup gecikme dispersiyonunun (bir çevrimde -1377 fs^2) dengelenmesini zorlaştırmaktadır. Rezonatörün uzunluğu arttırılarak ve ZnSe alttaş eklenerek, daha yüksek darbe enerjilerinin elde edilmesi ve Kerr nonlineeritesinin arttırılması sağlanarak bu sorunun çözülmesi sağlanmıştır. . Tm^{3+}:YLF lazerimizin kip-kilitli çalışma rejimini analiz etmek için soliton alan teoremini kullandık. Buna göre darbe süresi (τ_p), rezonator içindeki enerji (W), Kerr nonlineerite katsayısı (δ) ve bir turdaki grup gecikme dağılımı (D) ;

$$W = 1.76 \frac{4|D|}{\delta_{eff} \tau_p} \tag{3.11}$$

denklemi ile birbiriyle bağıntılıdır. Bizim durumumuzda, doğrusal olmayan Kerr katsayısı (Effective nonlinear Kerr coefficient) hem ZnSe, hem de Tm^{3+}:YLF ortamından kaynaklanmaktadır. Bunun için, etkin doğrusal olmayan Kerr katsayısı (δ_{eff})

$$\delta_{eff} = \delta_{ZnSe} + \delta_{Tm:YLF} = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\left(\frac{2n_2 L}{A_{eff}}\right)_{ZnSe} + \left(\frac{2n_2 L}{A_{eff}}\right)_{Tm:YLF}\right] \qquad (3.12)$$

denklemi kullanarak hesaplanmıştır. Denklem (3.12)'de, n_2, L, ve A_{eff} her bir ortam için, sırasıyla doğrusal olmayan kırınım indisi, kristal uzunluğu ve etkin hüzme kesit alanıdır. Ek olarak, A_{eff} değeri

$$A_{eff} = \pi w_{rms}^2 \ , \qquad (3.13)$$

denkleminden bulunmuştur. Burada, w_{rms} kristal içindeki hüzme yarıçapının kök ortalama değeridir (root-mean-squared). Çıkış aynası kolunda, lazer hüzmesinin geniş olduğu bir konuma yerleştirildiği için YAG alttaşın nonlineeritesi ihmal edilmiştir. Rezonatörün ABCD analizinden yola çıkarak, w_{rms} değeri Tm^{3+}:YLF ve ZnSe alttaşları için sırasıyla 52 μm ve 76 μm olarak bulunmuştur. YLF ve ZnSe 'nin bilinen doğrusal olmayan kırınım indisi değerlerini kullanarak, (YLF için $n_2 = 1.72\times10^{-20}$ m^2/W, ZnSe için 120×10^{-20} m^2/W) Kerr nonlineeritesi katsayıları $\delta_{Tm:YLF} = 9.98\times10^{-8}$ ve $\delta_{ZnSe} = 7.79\times10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. ZnSe'ten gelen nonlineeritenin YLF kristalinden gelene göre 7.5 kat fazla olması KLM rejimini elde etmek için ZnSe alttaşının önemini göstermektedir. Denklem 3.11 ve kip-kilitli lazerin çalışma parametreleri kullanılarak ($W = 0.35$ nJ, $\tau_p = 514$ fs), soliton çalışma noktasında, rezonatör içinde bir turun net grup gecikme dağılımı -1963 fs^2 olarak bulunmuştur. Rezonatör içindeki optik elemanların bilinen GDD değerlerini kullanarak (2.3 μm dalgaboyunda, ZnSe için 236.5 fs^2/mm, YLF kristali için -76.5 fs^2/mm, YAG kristali için -123 fs^2/mm, ve hava için -10.1 fs^2/m), rezonatörün bir turda toplam GDD'si -2135 fs^2 olarak hesaplanmış ve soliton alan teoremiyle uyum içinde olduğu çıkmıştır.

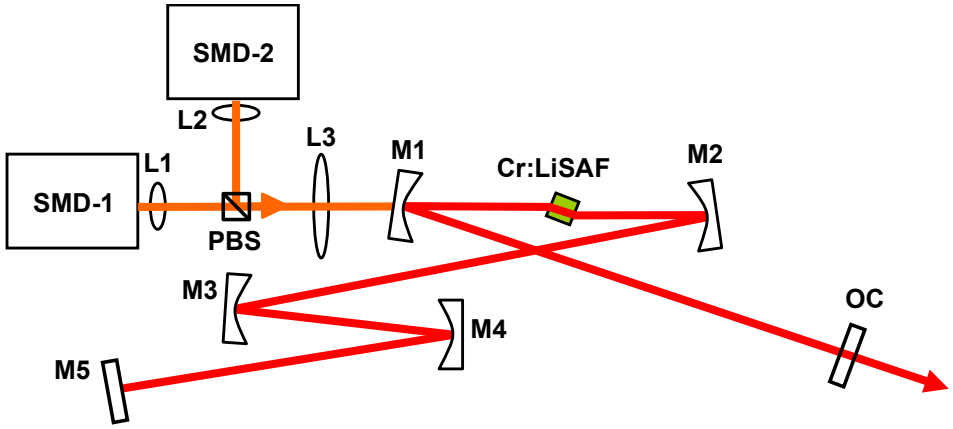
Sonuç olarak, 2303 nm'de Tm^{3+}:YLF lazerinin Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalışmasını, bildiğimiz kadarıyla ilk kez göstermiş bulunuyoruz [1]. 780 nm'de 880 mW pompa gücü ile 14.5 mW ortalama güce sahip, 41.5 MHz tekrar frekansında 514-fs uzunluğunda darbeler ürettik. Kullanılan Tm^{3+}:YLF kristalinin yaygın bir şekilde bulunabilmesi ve bu kazanç ortamının 800 nm civarında çalışan birçok farklı ticari lazer ile uyarılabilmesinden dolayı, kip-kilitli Tm^{3+}:YLF lazerinin orta-kızılaltı bölgesinde çalışan ultra kısa darbeli kaynaklar arasında önemli bir seçenek olacağını öngörüyoruz.

Kaynaklar

1. Ferda Canbaz, Ismail Yorulmaz, and Alphan Sennaroglu, "Kerr-lens mode-locked 2.3-μm Tm^{3+}:YLF laser as a source of femtosecond pulses in the mid-infrared," Opt. Lett., 42, 3964-3967 (2017).

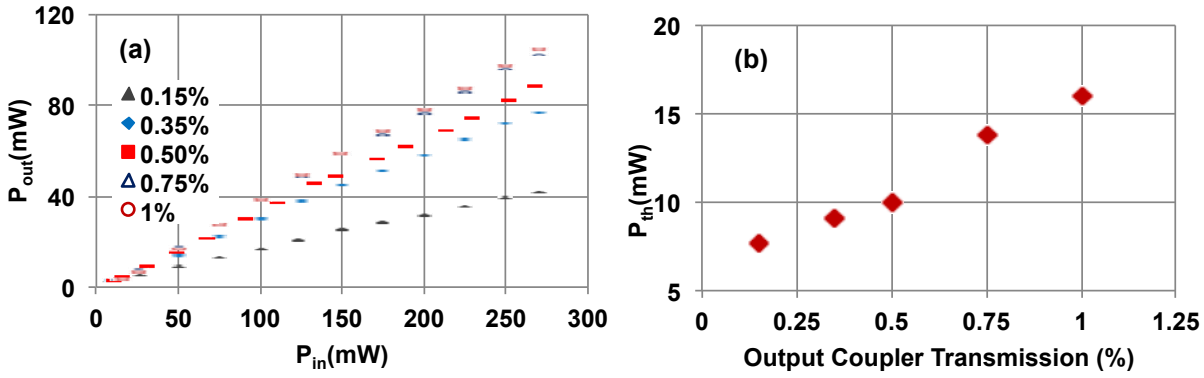
3.6 Diğer Çalışmalar: Diyot pompalı Cr:LiSAF lazerinin kurulumu

Projemizde önerilen iş paketleri dahilinde bahsedilen pompalama tekniklerine alternatif olarak, Ti^{3+}:safir lazeri ile benzer özelliklere sahip olduğu bilinen ve düşük maliyetli pompalama alternatifi sunan Cr:LiSAF lazerinin kurulması amacıyla, projenin ilk aşamalarında, Cr:LiSAF kristali (II-IV Photop firmasından) satın alınmıştı. Cr:LiSAF lazerinin çıkış dalgaboyu 850 nm civarındadır ve tulyum katkılı kazanç ortamlarının pompalanmasında kullanılabileceği öngörülmüştü. Bu bağlamda, halihazırda laboratuvarımızda bulunan pompalama kaynakları ve optikler yardımıyla Cr:LiSAF lazeri kurulmuştur. Pompa kaynağı olarak Şekil 3.6.1'de görüldüğü gibi, iki adet düşük maliyetli, DVD yazma teknolojisinde kullanılan ve düşük çıkış gücüne sahip diyot lazerleri kullanılmıştır. Merkez dalgaboyu 660 nm olan pompa diyot lazerlerinin her birinin çıkış gücü 135 mW'tır. Diyot lazerlerinin ışın demetlerinin, polarizasyon ışın bölücü (polarizing beam splitter, PBS) tarafından eş-eksenli hale getirilebilmesi için, SMD-1 diyotu (single mode diode-1) yatay polarizasyona, SMD-2 diyotu ise dikey polarizasyona sahip çıkışı olacak şekilde ayarlanmıştır. Sonrasında ışın demeti Şekil 3.6.1'de görülen, 60 mm odak uzaklığına sahip giriş merceği yardımıyla 7 mm uzunluğundaki Cr:LiSAF kazanç ortamının içine odaklanmıştır. Lazer rezonatörü, 850 nm civarında yüksek yansımaya sahip 4 adet 37.5 mm çukur ayna (M1-M4), 1 adet düz ayna (M5), 1 adet çıkış aynası (OC) ve kazanç ortamından oluşmaktadır. Şekil 3.6.1'de görülen lazer rezonatöründe ek bir odak noktası oluşturan yüksek yansıtmaya sahip aynalar (M3-M4) bulunmaktadır. Bu aynaların ortasında ek bir odak noktası oluşturulmaktadır. Cr:LiSAF lazerinin darbeli rejimde çalışması istendiğinde, bu odak noktasına grafen doyabilen soğurucu yerleştirilmiş ve 850 nm'de femtosaniye darbe üretimi elde edilmiştir. Kurulan rezonatörün toplam uzunluğu 112 cm ve buna karşı gelen darbe tekrar frekansı ise 132 MHz'dir.



Şekil 3.6.1 Cr:LiSAF lazerinin düzeneği.

Bu noktada, Cr:LiSAF lazerinin pompa kaynağı olarak kullanılabilmesi için, lazerin çalışma dalgaboyunda, farklı geçirgenlik değerlerine sahip çıkış aynaları kullanılarak güç verimliliği incelenmiştir. Bunun sonucunda, Şekil 3.6.2 (a)'da gösterildiği gibi, geçirgenliği %1 oranında olan çıkış aynası kullanıldığında en yüksek 100 mW çıkış gücü elde edilmiştir. Buna karşın, %0.15 geçirgenliğe sahip çıkış aynası kullanıldığında elde edilen en yüksek çıkış gücü 40 mW civarındadır. Buna ek olarak, Şekil 3.6.2 (b)'de, farklı geçirgenlik değerlerine sahip çıkış aynaları ile lazer pompa eşik değerleri ölçülmüştür. Şekil 3.6.2 (b)'de verilen grafikte görülebileceği gibi, çıkış aynasının geçirgenliği arttıkça lazerin eşik güç değeri de artmaktadır.



Şekil 3.6.2 (a) Farklı geçirgenliğe sahip çıkış aynaları kullanılarak elde edilen güç verim eğrileri. (b) Bu aynalar için elde edilmiş güç eşik değerlerinin çıkış aynası geçirgenliğine göre değişimi.

Sonuç olarak, deneylerde kurduğumuz Cr:LiSAF lazeri ile 850 nm dalgaboyu civarında 100 mW mertebesinde çıkış gücü elde edilebilmiştir. Dalgaboyu 800 nm'ye kaydırıldığında, çıkış gücü daha da azalacağından ve Ti^{3+}:safir pompa lazeri ile 800 nm civarında 1W kadar güç elde edilebildiğinden, Cr:LiSAF lazeri daha sonraki tulyum lazer deneylerinde pompa lazeri olarak kullanılmamıştır. Bunun yerine, kurulan diyot pompalı Cr:LiSAF lazeri ile 850 nm dalgaboyu civarında femtosaniye darbe üretimi deneyleri yapılmıştır.

Kaynaklar

1. F. Canbaz, N. Kakenov, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Graphene Mode-Locked Femtosecond Cr:LiSAF Laser," in Advanced Solid State Lasers, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2015), paper AM5A.24.
2. Ferda Canbaz, Nurbek Kakenov, Coskun Kocabas, Umit Demirbas, and Alphan Sennaroglu, "Graphene mode-locked Cr:LiSAF laser at 850 nm," Opt. Lett. 40, 4110-4113 (2015)
3. F. Canbaz, N. Kakenov, C. Kocabas, U. Demirbas, and A. Sennaroglu, "Sub-20 Femtosecond Pulse Generation with a Graphene Mode-locked Solid-State Laser," in Lasers Congress 2016 (ASSL, LSC, LAC), OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2016), paper ATu1A.2.

4 TARTIŞMA/SONUÇ

TÜBİTAK tarafından desteklenen 114F185 numaralı projemiz boyunca, planlanan tüm iş paketleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır. Ayrıca, B planı kapsamında planlanan bir iş paketi de, eksiksiz bir şekilde sonuçlandırılmıştır. Aşağıdaki bölümlerde her iş paketi kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar özetlenmiş, elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu çalışmaların ayrıntılı anlatımı raporumuzun 2. ve 3. Bölümlerinde yer almıştır.

İş Paketleri 1.1-1.4

Bu iş paketleri (İP) kapsamında, sırasıyla satın alma işlemleri (İP 1.1), kazanç anahtarlamalı Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit lazerlerinin kurulumu/karakterizasyonu (İP 1.2), tulyum katkılı YAP ve LuAG kristallerinin Ti^{3+}:safir lazeri ile çalıştırılması ve karakterizasyonu (İP 1.3) ve tulyum katkılı YAP ve LuAG kristallerinin Cr^{4+}:forsterit lazeri ile çalıştırılması ve karakterizasyonu (İP 1.4) kapsamlı bir şekilde ele alınmış ve önceki bölümlerde anlatıldığı gibi eksiksiz bir şekilde tamamlanmıştır. Toplam üç tulyum katkılı kristalin (%1.5 Tm^{3+}:YAP, %4 Tm^{3+}:YAP, %5 Tm^{3+}:LuAG) karşılaştırmalı güç verim ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Aynı yöntem kullanılarak, tulyum katkılı lutetia seramik (%1.5 Tm^{3+}:Lu_2O_3 seramik) lazeri de ayrıca her iki pompa lazeri (Ti^{3+}:safir ve Cr^{4+}:forsterit) ile kurulmuş ve güç verim karşılaştırması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kristaller için 800 nm, lutetia seramik için ise 1200 nm pompa dalgaboyu daha uygun bulunmuştur. Özetle, projemizin genel başarı oranının %45'ine karşı gelen, "Tulyum lazerlerinin en uygun pompa dalgaboyunun belirlenmesi" başlıklı iş paketleri grubu (İP 1.1-1.4) %100 başarıyla tamamlanmıştır.

İş Paketleri 2.1-2.4

Bu iş paketleri (İP) kapsamında, sırasıyla satın alma işlemleri (İP 2.1), diyot pompasının karakterizasyonu ve eniyileştirilmesi (İP 2.2), diyot pompalı 2.3 mikronda çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin kurulması (İP 2.3) ve diyot pompalı 2.3 mikronda çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin karakterizasyonu (İP 2.4) ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve tüm hedeflenen çalışmalar tamamlanmıştır. Özellikle 800 nm civarında çalışan iki farklı pompa diyotu ile pompalanan Tm^{3+}:YLF kristaliyle tasarlanan lazer rezonatörlerinden, 2.3 µm civarında lazer ışıması elde edilmiştir. Düşük pompa eşik güçlerinde, diyot pompalı çalıştırılışı deneysel olarak gösterilebilmiştir. Ayrıca, Tm^{3+}:YLF lazerinin güç verimliliği ve dalgaboyu ayarlanabilme aralığı ölçülmüştür. Özetle, projemizin genel başarı oranının %35'ine karşı gelen, "2.2-2.4 µm aralığında çalışan diyot pompalı tulyum lazerlerinin geliştirilmesi" başlıklı iş paketleri grubu (İP 2.1-2.4) %100 başarıyla tamamlanmıştır.

İş Paketleri 3.1-3.5

Bu iş paketleri (İP) kapsamında, sırasıyla satın alma işlemleri (İP 3.1), OPUS yeşil pompa lazeri ile Ti^{3+}:safir lazeri kurulumu ve karakterizasyonu (İP 3.2), satın alma (İP 3.3), Ti^{3+}:safir lazeri ile Tm^{3+} katkılı lazerin kurulması, eniyileştirilmesi ve karakterizasyonu (İP 3.4) ve Ti^{3+}:safir lazeri ile pompalanan Tm^{3+} katkılı lazerin kip kilitlemesi ve darbe karakterizasyonu ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve tüm hedeflenen çalışmalar tamamlanmıştır.

Bu iş paketlerinde yer alan deneylerde, 5W güce sahip OPUS yeşil pompa lazeri ile 800 nm civarında çalışan bir sürekli-dalga Ti^{3+}:safir lazeri kurulmuş ve 1W civarında çıkış gücü elde edilmiştir. Ti^{3+}:safir lazerinin dalgaboyu ayarlanarak, Tm^{3+}:YLF lazerinin önce uyarma spektrumu ölçülmüş, en uygun pompa dalgaboyları belirlenmiştir. Daha sonra, 120 mW'lık 790 nm'de çalışan pompa diyotu ile Tm^{3+}:YLF lazerinin 2.3 μm merkez dalgaboyunda, düşük eşik gücünde ve diyot pompalı çalıştırılabileceği deneysel olarak gösterilmiştir. Daha sonra, Ti^{3+}:safir pompa lazerini kullanarak, Tm^{3+}:YLF lazerinden Kerr odaklı kip-kilitleme yöntemiyle femtosaniye darbe üretimi başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Deneylerde, rezonatör içindeki doğrusal olmayan faz modülasyonunu artırmak için, yüksek doğrusal olmayan kırılma indisine sahip katkısız ZnSe örneği kullanılmıştır. Soliton rejiminde darbeler üretebilmek için doğrusal olmayan faz modülasyonu, negatif dispersiyon ile dengelenmiştir. Bunlara ek olarak, darbe başına düşen enerji artırılarak kararlı femtosaniye uzunluğa sahip darbeler üretilmiştir. Bölüm 3.5'te ayrıntılı şekilde bahsedildiği gibi 514-fs uzunluğunda, 41 MHz darbe tekrar frekansına sahip kararlı darbeler üretilmiştir.

Bu çalışmalarımız sayesinde, Tm^{3+}:YLF lazeri ile 2.3 μm dalgaboyunda ilk kez femtosaniye darbe üretimi literatürde yer almıştır. Femtosaniye darbe üretimi deneyleri, projemizde elde edilen en önemli sonuçların başında gelmektedir. 3.1-3.4 İş Paketleri, proje önerisinde yer alan genel başarı oranının %20'lik bir kısmını kapsamaktadır. Başarı ölçütü olarak öngördüğümüz darbe uzunluğu 200 fs civarında olduğundan, projenin bu kısmında %80 oranında bir başarı elde ettiğimizi söyleyebiliriz. Dolayısıyla 3.1-3.4 İş Paketlerinin proje toplam başarısına %16 kadar bir katkıda bulunduğu değerlendirilebilir.

Projenin Genel Başarı Değerlendirmesi

Yukarıda yer alan değerlendirmelerimizden yola çıkarak, TÜBİTAK tarafından desteklenen 114F185 numaralı projemizin %96 başarı oranıyla tamamlandığını söyleyebiliriz.

Bu çalışmalarımıza ek olarak, B planımızda yer alan bir deneyi de ayrıca tamamlayabildik. Yukarıda bahsedilen ve 2.3 μm civarında çalışan Tm^{3+}:YLF lazerinin içerisine Cr^{2+}:ZnSe doyabilen soğurucu katarak, lazerin pasif Q anahtarlamalı rejimde çalışması da sağlanmıştır.

Deneylerde, Ti^{3+}:safir pompa lazeri kullanılarak, Tm^{3+}:YLF lazerinden 1.2-1.4 μs darbe uzunluğuna, 0.3-2.1 kHz darbe tekrar frekansına sahip darbeler üretilmiştir. Elde edilen en yüksek darbe enerjisinin 13 μJ, en yüksek darbe tepe gücünün ise 10.1 W olduğu ölçülmüştür. Deneysel çalışmanın ayrıntıları Bölüm 3.4'te yer almaktadır. Özetle, bu çalışma ile proje önerisinde femtosaniye darbe üretimine alternatif olarak sunulan ve B planında yer alan "Tm^{3+}:YLF lazerinin pasif Q-anahtarlama rejiminde çalıştırılması" iş paketi %100 başarı ile tamamlanmıştır.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ALPHAN SENNAROĞLU
Proje No:	114F185
Proje Başlığı:	Özgün Optik Pompalama Yöntemleri İle Geliştirilmiş 2?M Civarında Çalışan Sürekli Dalga Ve Darbeli Tulyum Katıhal Lazerleri
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	SARPER ÖZHARAR
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	KOÇ Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2014 - 15/10/2017
Onaylanan Bütçe:	454500.0
Harcanan Bütçe:	413223.05
Öz:	TÜBİTAK tarafından 15 Ekim 2014-15 Ekim 2017 tarihleri arasında desteklenen 114F185 numaralı ve -Özgün Optik Pompalama Yöntemleri ile Geliştirilmiş 2 mikron Civarında Çalışan Sürekli Dalga ve Darbeli Tulyum Katıhal Lazerleri- başlıklı proje kapsamında, 2 mikron ve 2.3 mikron dalgaboylarında çalışan tulyum katkılı lazerlerin darbeli, sürekli-dalga, diyot pompalı ve kip-kilitli rejimlerdeki çalıştırılışı deneysel yöntemlerle incelenmiştir. Tamamlanan çalışmalar arasında: 1) 2 mikron dalgaboyu civarında çalışan, kazanç anahtarlamalı %1.5 Tm3+:YAP, %4 Tm3+:YAP, %5 Tm3+:LuAG lazerlerinin 800 ve 1200 nm'deki uyarılmalarının kıyaslamalı incelemesi, 2) 2068 nm ve 1968 nm dalgaboylarında çalışan Tm3+:Lu2O3 seramik lazerinin 800 ve 1200 nm dalgaboylarında uyarılması ve lazer performansının kıyaslamalı olarak incelenmesi, 3) Tm3+:YLF lazerinin 2.3 mikron dalgaboyunda pasif Q anahtarlama rejiminde çalıştırılması ve deneysel karakterizasyonu, 4) Düşük eşikli, diyot pompalı Tm3+:YLF lazerinin 2.3 mikron dalgaboyunda çalıştırılması, 5) Tm3+:YLF lazerinin 2.3 mikron dalgaboyunda Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılması ve femtosaniye darbe üretimi yer almaktadır. Pompa dalgaboylarının kıyaslandığı deneylerde, tulyum katkılı kristaller için 800 nm pompa dalgaboyu, tulyum katkılı lutetia seramik için ise 1200 nm pompa dalgaboyu, elde edilebilen güç verimi açısından, daha uygun bulunmuştur. Sonraki deneylerde, sürekli dalga Ti3+:safir lazeri ile pompalanan Tm3+:YLF lazeri 2.3 mikron civarında kurulmuş ve rezonatör içine yerleştirilen Cr2+:ZnSe doyabilen soğurucu sayesinde, pasif Q anahtarlama rejiminde çalıştırılmıştır. Tm3+:YLF lazerinin 2.3 mikron dalgaboyunda pasif Q anahtarlamalı rejimde çalıştırılışı, literatürde ilk kez gösterilmiştir. 120 mW güce sahip bir diyot pompa lazeri ile Tm3+:YLF lazerinin 2.3 mikron dalgaboyunda düşük eşikli çalıştırılışı da deneysel olarak gösterilmiştir. Son olarak, 2.3 mikron dalgaboyundaki Tm3+:YLF lazeri, Kerr odaklamalı kip-kilitli rejimde çalıştırılmış ve 2304 nm dalgaboyunda, 514 fs uzunluğunda darbeler üretilmiştir. 2.3 mikron dalgaboyunda çalışan Tm3+:YLF lazeri ile femtosaniye darbe üretimi, literatürde ilk kez gösterilmiştir.
Anahtar Kelimeler:	tulyum lazerleri, Tm:YLF lazerleri, Tm:lutetia lazerleri, femtosaniye tulyum lazerleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Graphene mode-locked Cr:LiSAF laser at 850 nm (Makale - İndeksli Makale), 2- Graphene Mode-Locked Femtosecond Cr:LiSAF Laser (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Sub-20 Femtosecond Pulse Generation with a Graphene Mode-locked Solid-State Laser (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 4- 2.3-mu m Tm3+: YLF laser passively Q-switched with a Cr2+: ZnSe saturable absorber (Makale - İndeksli Makale), 5- Passive Q-Switching of a Tm3+:YLF Laser at 2.3 μm with a Cr2+:ZnSe Saturable Absorber, (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 6- Tm3+:Lu2O3 Ceramic Lasers Pumped near 1200 nm (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 7- Kerr-lens mode-locked 2.3-mu m Tm3+:YLF laser as a source of femtosecond pulses in the mid-infrared (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK