TÜBİTAK

Yüksek Parlaklığa Sahip Ekonomik Çok-Kipli Diyotlarla Uyarılan, Darbeli, Tm^{3+} Katkılı Katı-Hal Lazerlerinin Geliştirilmesi

Proje No: 115F053

Dr. Öğr. Üyesi Ersen BEYATLI

EKİM 2018
RİZE

Önsöz

Bu raporda, TÜBİTAK tarafından 3501 Kariyer Geliştirme Programı kapsamında 1/9/2015 ve 1/9/2018 tarihleri arasında desteklenen 115F053 numaralı “Yüksek Parlaklığa Sahip Ekonomik Çok-Kipli Diyotlarla Uyarılan, Darbeli, Tm^{3+} Katkılı Katı-Hal Lazerlerinin Geliştirilmesi” isimli araştırma projesinden elde edilen sonuçlar özetlenmektedir.

Bu raporda detaylı olarak sunacağımız gibi, bu proje kapsamında Tm^{3+} katklı YAG, LuAG ve YLF lazer malzemelerinin ekonomik 3W’lık AlGaAs lazer diyotları ile uyarılarak lazer performansları hem sürekli dalga rejiminde hem de darbeli rejimlerdeki performansları detaylı olarak detaylı olarak incelenmiştir. Proje sonuçlarından, bir adet bilimsel yayın üretilmiş olup, bir adet incelemesi süren ve bir adet hazırlanmakta olan yayınlar bulunmaktadır. Ayrıca, iki adet uluslararası ve bir adet ulusal konferansta sunumlar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte projeden elde edilen bilgi birikimi, önümüzdeki dönemde düşük maliyetli diyotlarla pompalanmış Tulyum katkılı katı-hal lazer sistemleri geliştirmeye yönelik yeni projelerin önünü açmış ve kısa zaman içerisinde o projelere yönelme imkânı sağlamıştır.

İçindekiler

Önsöz ii
Şekiller Listesi iv
Tablolar Listesi vi
Özet vii
Abstract viii
Yüksek Parlaklığa Sahip Ekonomik Çok-Kipli Diyotlarla Uyarılan, Darbeli, Tm^{3+} Katkılı Katı-Hal Lazerlerinin Geliştirilmesi 1
1. Giriş 1
2. Literatür Özeti 2
3. Gereç ve Yöntem 5
4. Bulgular 11
4.1 Spektroskopik Ölçümler 11
4.2 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm^{3+} Lazer Sistemleri 15
4.2.1 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:YAG Lazeri 15
4.2.2 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:LuAG Lazeri 17
4.2.3 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:YLF Lazeri 18
4.3 Çok Renkli Tm^{3+} Lazerleri 20
4.3.1 Çift Renkli Tm:YAG Lazeri 21
4.3.2 Çift Renkli Tm:LuAG Lazeri 22
4.3.3 Çok Renkli Tm:YLF Lazeri 23
4.4 Darbeli Rejimde Çalışan Tm^{3+} Lazer Sistemleri 25
4.4.1 Q-Anahtarlamalı Tm:YAG Lazeri 26
4.4.2 Q-Anahtarlamalı Tm:LuAG Lazeri 26
4.4.3 Q-Anahtarlamalı Tm:YLF Lazeri 31
4.4.4 Kip-Kilitli Rejimdeki Tm^{3+} Lazeri Çalışmaları 36
5. Tartışma/Sonuç 37
Kaynaklar 39

Şekiller Listesi

Şekil 1 Tm^{3+} iyonunun bant geçişleri ve çapraz sönümlenme 3
Şekil 2 3W güç verebilen 780 nm'de çalışan AlGaAs lazer diyotları..... 6
Şekil 3 Kristallerin soğurma yüzdelerinin ölçümü için kullanılan düzenek 7
Şekil 4 Işınların odak büyüklüklerini ölçmek için kurulan sistem..... 7
Şekil 5 Işın profil belirleyici kullanarak odak noktasında ölçülen odak büyüklükleri 8
Şekil 6 Kristallerin yarılanma ölçümleri için kurulan sistem 8
Şekil 7 Tm^{3+} lazer sistemlerinde kullanılan sistemin genel şeması 10
Şekil 8 3W'lık AlGaAs lazer diyotlarının spektrumu 11
Şekil 9 5 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı YAG kristalinin soğurma grafiği..... 12
Şekil 10 7 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı YAG kristalinin soğurma grafiği.... 12
Şekil 11 5 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı LuAG kristalinin soğurma grafiği .. 12
Şekil 12 7 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı LuAG kristalinin soğurma grafiği .. 13
Şekil 13 5 mm uzunluğunda %3 Tm^{3+} katkılı YLF kristalinin soğurma grafiği..... 13
Şekil 14 7 mm uzunluğunda %3 Tm^{3+} katkılı YLF kristalinin soğurma grafiği..... 13
Şekil 15 Tm:YAG kristalinin sönümlenme grafiği 14
Şekil 16 Tm:LuAG kristalinin sönümlenme grafiği..... 14
Şekil 17 Tm:YLF kristalinin sönümlenme grafiği 15
Şekil 18 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin güç verimi eğrileri ... 16
Şekil 19 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin spektrumu 16
Şekil 20 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı..... 16
Şekil 21 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin güç verim eğrileri .. 17
Şekil 22 Sürekli rejimde çalışan Tm:LuAG lazerinin spektrumu 18
Şekil 23 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı..... 18
Şekil 24 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin güç verimi eğrileri 19
Şekil 25 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin spektrumu 19
Şekil 26 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin eşik değerlerinin çıkış aynasının yüzdesine göre grafiği..... 20
Şekil 27 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı..... 20

Şekil 28 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları 21
Şekil 29 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları 22
Şekil 30 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları ve güç değerleri 24
Şekil 31 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin kendiliğinden çok renkli durumlardaki spektrumları 25
Şekil 32 12 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YAG lazeri darbeleri 27
Şekil 33 2 kHz tekralama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YAG lazeri darbeleri 28
Şekil 34 33 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:LuAG lazeri darbeleri 29
Şekil 35 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:LuAG lazeri darbeleri 30
Şekil 36 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Tm:LuAG lazer sisteminden bir görüntü 31
Şekil 37 Q-anahtarlamalı rejimdeki Tm:YLF lazerinin spektrumu 32
Şekil 38 16 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazer darbeleri 33
Şekil 39 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamlı Tm:YLF lazer darbeleri 34
Şekil 40 100 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazer darbeleri 35
Şekil 41 Tm:YAG lazer sisteminde elde edilmiş ancak spektrumda genişleme görülememiş kip-kilitli rejimden bir görüntü 36
Şekil 42 Q-anahtarlamalı rejimlerdeki sistemlerin böbrek taşı üzerindeki etkilerini incelemek için hazırlanmakta olan düzenek 38
Şekil 43 Proje yürütücüsünün deney düzeneğinde çalışırken çekilmiş resmi 38

Tablolar Listesi

Tablo 1 Tm:YAG lazerinin çift kırınımlı plaka ile çift renkli sonuçları 21
Tablo 2 Tm:LuAG lazerinin çift kırınımlı plake ile çift renkli sonuçları..... 22
Tablo 3 Tm:YLF lazerinin çift kırınımlı plaka ile çift renkli sonuçları 23
Tablo 4 Kendiliğinden çok renkli Tm:YLF lazerinin çok renkli durumlardaki özellikleri 25
Tablo 5 Değişik noktalardaki Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazerinin özellikleri 32

Özet

Tm^{3+} katkılı lazer sistemleri, içine katkılandığı lazer kristalinin özelliğine göre 780 nm dalga boyu aralığında uyarıldıklarında, 2 μm bölgesinde ışıma yapabilmektedirler. Bu bölge su tarafından en yüksek soğurulan bantlardan biri olduğu için, günümüzde lazerli doku kaynaştırma, ürolojik kanserlerin erken teşhisi gibi suyun yüksek soğurganlığını gerektiren pek çok biyomedikal alanda, 2 μm bölgesinde ışıma yapan lazerler kullanılmaktadır. Bunun yanında Tm^{3+} lazerleri günümüzde lazer radar, atmosferik katmanlar arası iletişim ve spektroskopi gibi alanlarda da önemli roller üstlenmektedirler. Daha önce yapılan çalışmalarda Tm^{3+} lazerleri, flaş lambası, Ti:safir lazeri ve yüksek güçlü çok-kipli AlGaAs diyotlarla uyarılmıştır. Fakat bu sistemler elektriksel açıdan oldukça verimsiz, çok yüksek maliyetli ve hantaldır. Bu yüzden ihtiyaç duyulan alanlara bütünleşmesi oldukça karmaşıklaşmış, sadece yüksek teknolojiye sahip enstitüler ve üniversitelerde kendilerine yer bulabilmişlerdir.

Projemizde, 780 nm'de ışıma yapabilen 3W'lık AlGaAs lazer diyotları kullanarak, yüksek verimliliğe sahip Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF katı-hal lazer sistemi geliştirilmiştir. AlGaAs lazer pompa diyotları sayesinde, daha önce geliştirilen sistemlere göre, çok daha kompakt ve düşük maliyetli lazer sistemleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarımızda, 2 μm bölgesinde ışıma yapabilen lazerlerden 600 mW'ın üzerinde çıkış güçleri elde edilmiştir. Sistemlerde çift kırınımlı dalda boyu ayarlayabilen plaka (birefringent tuning plate) kullanarak, lazerlerin çıkış dalgaboyu, 2 μm civarında en az 140 nm kadar sürekli olarak değişim elde edilmiştir. Ayrıca, plakanın kritik açılarında 2 μm bölgesinde, değişik özelliklere sahip çift dalgaboyu ışımaları elde edilmiştir. Bununla birlikte Tm:YLF lazerinde kristalin çift eksen özelliğine dayanarak üç ve dört renkli lazer ışımaları gözlemlenmiştir. Daha sonra, lazerlere yarıiletken doyabilen soğurucu (SESAM) ekleyerek, sistemlerin kararlı halde farklı farklı özelliklere sahip darbeli rejimde çalışabildiğini gözlemlenmiştir. Bu deneylerde, Watt seviyelerinde darbe gücüne ve μJ mertebesinde darbe enerjisine sahip atımlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, 2 μm bölgesinde çalışabilen ekonomik, aynı zamanda da kompakt Tm^{3+} lazer sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunacak ve ilgili alanlardaki çalışmalarla kolaylıkla bütünleşerek çalışmaları hızlandıracaktır.

Anahtar Kelimeler: Diyot Pompalı Lazerler, Katı-hal lazerleri, 2 μm lazerleri, Tm:YAG lazerleri, Tm:LuAG lazerleri, Tm:YLF lazerleri, Q-anahtarlamalı lazerler, Çok-renkli lazerler, Kip-kilitli lazerler

Abstract

Tm^{3+} doped laser systems (depending on their host crystal) can operate at 2 μm regime if they are pumped between 780 nm. Because of high water absorption in this band, Tm^{3+} doped laser systems are used in some of the medical operations that required water absorption like tissue welding or early diagnostics of urological cancer tissues. Furthermore, these lasers play very important roles in LIDAR, atmospheric transition, communication and spectroscopy applications. To date, Tm^{3+} doped laser systems have been pumped by flash lamps, output of Ti:Sapphire lasers and high-power multimode AlGaAs diodes. However, these systems are typically inefficient, bulky and costly. Therefore, integration of these systems into the necessary areas became too complicated. These integrations were succeeded only in the highly technological institutions and universities because of this complication.

In this project, we have developed highly efficient Tm:YAG, Tm:LuAG and Tm:YLF solid-state lasers pumped with an AlGaAs laser diodes that can capable of producing 3W light at 780 nm. Because of these diodes, the systems are more compact and low-cost compared to previous systems. In the experiments, more than 600 mW output power were obtained from the laser systems at 2 μm. Furthermore, by inserting a birefringent tuning plate into the system the outputs of the systems can be tuned more than 140 nm. And also at the critical angle of the plate, dual-wavelength laser operations were obtained at 2 μm with different properties. Moreover, in the plateless Tm:YLF system (owing to uniaxial characteristics of crystal) three- and four-color laser operations were obtained. Later on, by adding SESAM into the systems, stable pulsed regime operations were obtained. In those experiments, Watt level peak powers and μJ level pulse energies were obtained. The results obtained from this project help to improve low-cost, compact 2 μm Tm^{3+} lasers and accelerates the studies in the necessary fields.

Keywords: Diode pumped lasers, solid-state lasers, 2 μm lasers, Tm:YAG lasers, Tm:LuAG lasers, Tm:YLF lasers, Q-switched lasers, Multi-color lasers, Mode-locked lasers

TÜBİTAK

Yüksek Parlaklığa Sahip Ekonomik Çok-Kipli Diyotlarla Uyarılan, Darbeli, Tm^{3+} Katkılı Katı-Hal Lazerlerinin Geliştirilmesi

1. Giriş

Son yıllarda, lazer diyotları teknolojisinde kaydedilen gelişmeler, onların optik ve fotonik alanlarındaki pek çok uygulamasının önünü açtı. Özellikle bu diyotların kompakt bir şekilde üretilebilmesi günümüzde DVD/CD okuyucular, lazer yazıcılar, barkod okuyucular gibi pek çok endüstriyel sistemlerde kullanılmasını sağlamıştır. Bununla beraber spektroskopik incelemeler, mikroskobik araştırmalar gibi pek çok bilimsel alanda da lazer diyotları önemli rol oynamaktadır. Bu diyotlar, yukarıda sayılan alanlar dışında, 2000'li yıllarda, katı-hal lazerleri için pompa kaynağı olarak da kullanılmaya başlanmıştır. Bu lazer diyotlarının diğer pompa kaynaklarına göre çok küçük yapıda olmaları, yüksek elektrik verimliliği ve ekonomik olmaları, kolay üretilebilmeleri gibi özellikleri, bu diyotları katı-hal lazer sistemleri için çok cazip hale getirmektedir. Günümüze kadar bu diyotlar görünür, yakın kızılaltı, 2 μm bölgesinde ışıma yapan lazerlerde pompa kaynağı olarak kullanılmıştır.

Benzer nitelikli uyarma tekniklerine, 2 μm bölgesinde ışıma yapan katıhal lazer sistemleri için de ihtiyaç vardır. Bu bölgedeki en iyi ışınım kaynaklarından bir tanesi, Tm^{3+} katkılı kazanç ortamına sahip lazer sistemleridir. Tm^{3+} katkılı katı-hal kristal lazerleri, katkılandığı kristalin fiziksel özelliklerine göre 780 nm civarında uyarılabilmekte ve yine kristal özelliklerine bağlı olarak, 1.8-2.2 μm dalgaboyu aralığında ışınım üretebilmektedirler. Projemizin temelini oluşturan AlGaAs lazer diyotları ile Tm^{3+} katkılı lazer sistemlerini uyarmak mümkündür. Bu diyotlar serbest çalışma şartlarında 780 nm'de 3W güç verebilmektedir. Bu dalgaboyu projemizde kullandığımız Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF katı-hal lazer sistemlerini uyarmak için son derece elverişlidir.

Bu projede söz konusu AlGaAs lazer diyotlarla pompalanan Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF lazerlerinin kurulması hedeflenmiştir. Bunun için önce kristallerin spektroskopik özellikleri incelenmiş olup lazer diyotlarına tepkileri belirlenmiştir. Daha sonra bu diyotlarla sürekli dalga rejiminde çalışabilen Tm^{3+} katkılı katı-hal lazerleri en verimli şekilde tasarlanıp kurulmuştur. Sonrasında

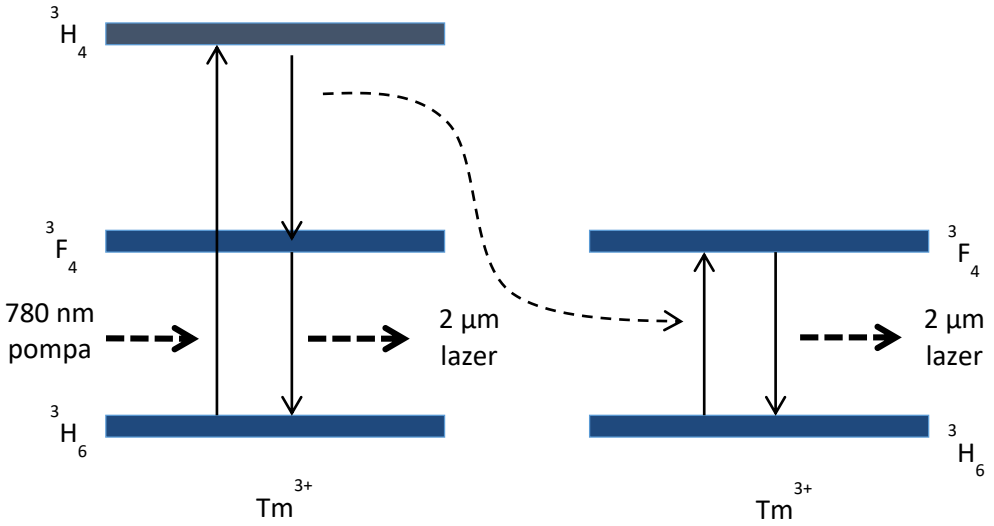
sisteme doyabilen yarıiletken Bragg yansıtıcılar eklenerek sistemlerin darbeli rejimde (Q-anahtarlamalı) çalışması sağlanmıştır. Bu sayede daha yüksek tepe güçlerine erişilmiştir. Projemizde ayrıca genelde çift kırınımlı plaka yardımıyla Tm^{3+} lazer sistemlerinde ayarlanabilen çift dalgaboyu ışımaları ve Tm:YLF lazerinde kendiliğinden çok-renkli lazer ışımaları elde edilmiştir.

2. Literatür Özeti

Maliyet etkin ve kompakt katı-hal lazer sistemlerinin üretilmesi, son yıllarda lazer biliminin ilgi çeken alanları arasında yer almaktadır. Özellikle, lazerlerin ilgili alanlarla bütünleştirilmesinde, kompakt ve ekonomik bir lazer sistemi o alanlardaki çalışmaların ve ilerlemelerin hızını büyük ölçüde arttırmaktadır. Katı-hal lazer sistemlerinde kompaktlığı ve maliyet etkinliği arttıran en etkin yöntemlerden birisi, standart hale gelmiş ve piyasada oldukça yaygın bir şekilde bulunan çok-kipli lazer diyotlarının lazer sistemlerinde pompa kaynağı olarak kullanılmasıdır. Bu diyotların standartlaşmış üretim teknikleri ve kompakt yapıları sayesinde, lazer sistemlerinde pompa kaynağı olarak kullanıldıklarında büyük avantajlar sağlamaktadırlar. Son yıllarda, bu yöntem çok-kipli AlGaAsP lazer diyotları kullanılarak Cr:LiCAF lazerlerine başarılı bir şekilde uygulanmış ve 800 nm'de 880 mW çıkış gücü elde edilmiştir [1].

Aynı gereksinime medikal [2]–[7], LIDAR [8], [9], atmosferik haberleşme [10], [11], spektroskopi [12], frekans metrolojisi [12], başka lazerlerin uyarılması [13]–[15] alanlarında sıklıkla kullanılan 2 μm bölgesindeki lazer sistemlerinde de ihtiyaç vardır. Bu uygulamalar için kullanılan en önemli 2 μm ışınım kaynaklarından birisi Tm^{3+} katkılı kazanç ortamına sahip lazer sistemleridir. Tm^{3+} iyonu, içinde bulunduğu kristalin yapısına bağlı olarak 780 nm bandında (katkılanan kristalin özellğine bağlı olarak ±15 nm) uyarıldığı zaman 2 μm bölgesinde ışınım yapabilmektedir (Şekil 1). Dalgaboyunun elverişli uygulamalarının yanı sıra, Tm^{3+} sistemlerinin kuantum verimi de çok yüksektir. Bu sistemler uyarıldıkları zaman iyonlar $^3H_6$ temel enerji seviyesinden $^3H_4$ enerji seviyesine yükseltilirler. $^3H_4$seviyesindeki iyonlar, sırasıyla $^3F_4$ ve ardından da $^3H_6$ seviyesine geçiş yapabilirler. Eğer birbirine çok yakın konumda iki Tm^{3+} iyonu varsa, $^3H_4$ geçişi yapan bir iyonun enerjisi, temel seviyede bulunan ikinci bir komşu Tm^{3+} iyonuna ışımasız bir şekilde aktarılabilmekte ve tek bir pompa fotonu ile iki tane $^3F_4$ seviyesine uyarılmış iyon elde edilebilmektedir. Bu etkiye çapraz sönüm adı verilmektedir ve normal şartlarda beklenen kuantum veriminin teorik limitlerinin üzerine çıkmasını sağlamaktadır. (Çapraz sönüm sayesinde, bir pompa fotonu ile

iki uyarılmış Tm^{3+} iyonunun nasıl oluştuğu Şekil 1'de gösterilmiştir.) Bununla beraber yakın iki adet Tm^{3+} iyonun kendiliğinden üst geçiş (upconversion) özelliğine sebebiyet verebileceğinden sistemlerin veriminde bir düşme görülebilmektedir [16], [17].



Şekil 1 Tm^{3+} iyonunun bant geçişleri ve çapraz sönümlenme

Tm^{3+} katkılı kazanç ortamına sahip lazer sistemleri (tarihsel olarak) sırasıyla flaş lambası, Ti:Safir lazerlerinin çıkışı ve AlGaAs lazer diyotlarıyla uyarılmıştır. Flaş lambaları çok geniş bir tayf aralığında ışıma yaptıklarından dolayı spektral kayıpları çok fazladır ve optik verimlilik seviyeleri çok düşüktür [18]–[23]. Bu yöntemle uyarılan Tm^{3+} en verimli denilecek çalışmalarda bile sistemlerin optik verimleri %5'in altında kalmıştır [22]. İlerleyen yıllarda, Ti:Safir lazerlerinin çıkış dalga boyu uygun spektral bölgeye getirilerek Tm^{3+} sistemleri uyarılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [24]–[27]. Bu çalışmalar sonucu Tm^{3+} sistemlerinin 1.8 ile 2.2 µm arasında dalga boyunun değiştirilebilindiği keşfedilip yüksek verimli sistemler elde edilmiştir [24]. Fakat bu çalışmalarda başka bir lazer sistemine ihtiyaç duyulduğundan sistemler çok karmaşık hale gelmiş, ihtiyaç duyulan alanlarla tümleştirilmesi çok zorlaşmış ve sistemlerin maliyetleri de artmıştır. 2000'li yıllara gelindiğinde AlGaAs lazer diyotlarının gelişmesi ile Tm^{3+} lazerleri etkili ve verimli bir şekilde uyarılmaya başlandı. Bu sistemler ilk başlarda sürekli dalga rejiminde Watt'lar seviyelerinde çalıştırılmış, bu şekilde ilgili alanlarda bütünleşmesi amaçlanmıştır [16], [25], [28]–[30]. Bu çalışmalar sonucu daha önce belirttiğimiz gibi Tm^{3+} sistemlerinin çeşitli medikal işlemlerde önemli rol oynadığı keşfedilmiştir [2], [5]. Fakat bu sistemlerdeki en büyük sorun çok yüksek güçlerde kararlı güçler elde edebilmek için çok karmaşık tasarımlara ihtiyaç duyulması ve

bu tasarımları elde edebilmek için çok yüksek maliyetlerin gerekmesidir. Bu sistemlere alternatif olabilecek en etkili çözüm ise daha önce grubumuzun etkin olarak yer aldığı çalışmalarda uyguladığı tek-kipli diyot pompalı Tm:YAG lazeridir [31]. Bu çalışmada iki adet doğrusal polarizasyonlu ekonomik (100$) kompakt 100mW'lık AlGaAs lazer diyotu kullanarak Tm:YAG lazeri çalıştırılarak 32 mW güç elde edilmiştir. Ancak bu değer tahmin edilebileceği üzere ilgili alanlardaki çalışmalar için oldukça düşük bir değer olduğundan daha etkin çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır.

Tm^{3+} sistemlerini pompalamada en umut vaat edici yöntem, projemizin temelinin dayandığı yüksek verimliliğe sahip çok-kipli AlGaAs lazer diyotları ile sistemleri uyarmaktır. Söz konusu AlGaAs diyotlar sıcaklık kontrolü ile 780 nm'de 3W gücünde ışıma yapabilmektedirler. Bu dalga boyu projemizde kullandığımız Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF kristallerinin soğurma bantlarıyla örtüştüğünden [32]–[34], bu kristallerle kurulacak lazer sistemlerinde ideal bir pompa kaynağı olmuşlardır. Bu kristallerden Tm:YLF farklı kırılma indisine sahip eksen boyunca kesilerek (c-cut) 1.9 μm bölgesinde ışıma yapması sağlanmıştır. Bu dalga boyu özellikle diş hekimlerince dentin ablasyonlarda kullanılan Ho^{3+} katkılı lazer sistemlerini uyarmak için ideal dalgaboyudur [13], [28], [35]–[37]. Öte yandan AlGaAs lazer diyotları ile uyarılan Tm:YAG lazerlerinin 2017 nm'de ışıma yapması sağlanmıştır. Bu dalgaboyu özellikle günümüz teknolojisinde ürolojik kanserlerin erken teşhisinde önemli bir yer tutmaktadır [2], [7]. Projemizde elde edilen bir diğer sistem olan Tm:LuAG lazeri ise 2023 nm'de ışıma yaptığı görülmüştür. Bu sistemlerin çıkış dalga boyu atmosferik geçirgenliğin en yüksek olduğu 2023 nm'yle birebir örtüştüğünden atmosferik katmanlar arası iletişim gibi uygulamalarda tercih edilme potansiyeli oldukça yüksektir [10], [11].

Öte yandan, bu sistemler darbeli rejimde (Q-anahtarlamalı) doyabilen Bragg yansıtıcılar (kısaltılmış adı SESAM veya SBR olarak bilinmektedir) kullanılarak çalıştırılmıştır. Bu sayede Watt seviyelerinde tepe güçlerine ulaşılmıştır. Böylece günümüzde kullanılan sistemler için gerekli tepe güç mertebelerinde çok daha verimli, ekonomik ve kompakt bir 2 μm kaynağı üretilmiş ve ihtiyaç duyulan uygulamalarda çok hızlı gelişmelere ön ayak olacak sistemler elde edilmiştir.

Çok renkli lazer sistemleri (multi-color), iki veya daha fazla farklı dalgaboyunun aynı lazer rezonatöründe salınması sonucu ortaya çıkan bir durumdur. Birden fazla dalgaboyunun aynı sistemde salınması, bu durumu gerektiren sistemler için karmaşıklık ve maliyet açısından büyük avantajlar sağlamaktadır. Günümüzde çok renkli ışıma yapabilen lazer sistemlerine eşfazlı

THz ışımalarında [38]–[40], biyo-tıpta [41]–[43], optik haberleşme [44], [45], uzaklık ölçme [46] ve diğer başka alanlarda büyük ihtiyaç duyulmaktadır [47], [48].

Çok renkli lazer sistemleri elde etmenin genel olarak üç farklı tekniği vardır. Bunlardan ilki, iki farklı lazer kristalini (veya bir hibrit kristali) aynı rezonatörde kullanmaktır. Bu sayede her bir ışıma yapabilen iyon aynı rezonatörde kendi bölgesinde ışıma yaparak çok renkli lazer sistemi elde edilebilecektir. Günümüze kadar bu teknikle Cr^{3+}, Tm^{3+}, Nd^{3+}, Ho^{3+}, $Er^{3+}$and Yb^{3+}lazer sistemlerinden çok renkli ışımalar elde edilmiştir [49]–[52]. Ancak bu sistemde kullanılan kristallerin üretimi ve rezonatör hizalanması sistemlerdeki karmaşıklığı büyük ölçüde arttırmaktadır. İkinci teknikte, bir çift eksenli (veya üç eksenli) kristalinin lazer sisteminde kullanılması ile elde edilir. Bu yöntemdeki lazer kristalinin eksenleri pompa ışığına farklı dalgaboyunda tepki vermesi (yani ışıma yapması) sonucu çok renkli ışıma elde edilir [53]–[56]. Bu teknikte pompa ışığı kadar kristallerin termal odaklanma, çıkış aynası yüzdesi gibi diğer rezonatör etkenleri de sonucu etkilemektedir. Üçüncü teknikte ise sisteme çift kırınım etkisi oluşturacak elemanların (fabry-perrot, etalon, çift kırınımlı plaka) eklenmesi sonucu elde edilir. Bugüne kadar bu yöntem Cr^{3+} ve Nd^{3+} lazer sistemlerinde uygulanmıştır. [50], [57]. Bu yöntemin en etkili yanı sistemlerdeki çift renkli ışımaların ayarlanabilmesidir.

Günümüze kadar 2 μm bölgesinde çok renkli ışımalara çeşitli lazer sistemlerinde rastlanılmıştır [58]–[65]. Bu çalışmalarda yukarıda bahsedilen ilk iki yöntem uygulanmış olup sadece çift renkli lazer ışımaları elde edilmiştir. Bu proje kapsamında çift kırınımlı plaka yardımıyla sistemlerde üçüncü tekniği uygulayarak ayarlanabilir çift renkli ışımalar elde edilmiştir. Bununla birlikte Tm:YLF lazerinde ikinci teknikteki yöntemle birden fazla dalgaboyunda ışımalar elde edilmiş olup, 2 μm böglesinde ilk defa üç ve dört renkli lazer ışımaları elde edilmiştir.

3. Gereç ve Yöntem

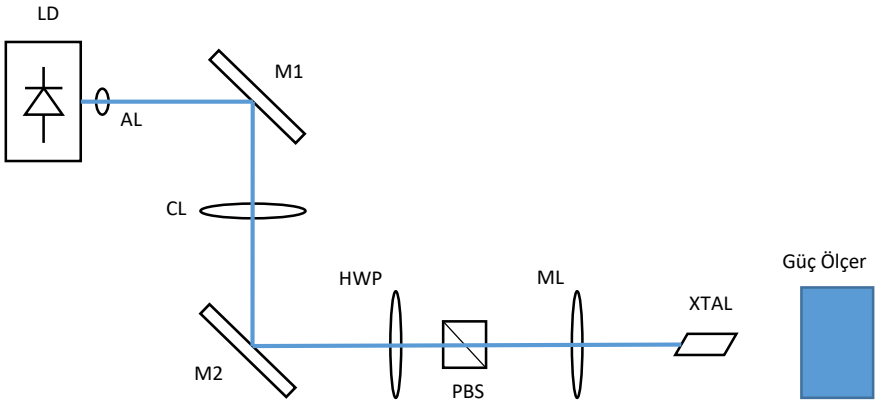
Kompakt, maliyet etkin lazer diyotlarıyla pompalanan Tm^{3+} lazer sistemi elde edebilmek için, doğrusal polarizasyonlu, çok-kipli 3A akım altında 3W çıkış gücü sağlayabilien c-yapılı AlGaAs lazer diyotları (RPMC LDX-3315-780) tercih edilmiştir (Şekil 2). Çoklu alımlarda bu diyotların maliyeti 250$'ın altında olup 1$ başına 12 mW'tan daha yüksek bir güç elde edilmektedir ki daha önceki çalışmalarımıza göre çok daha ekonomik bir değerdir [31]. Söz konusu diyotların normal şartlar altında çalışma dalgaboyu 780 nm olup sıcaklık kontrolü ile 775-785 nm değiştirilebilmektedir. Bu diyotlar c-yapılı olarak üretildiklerinden, standart bir

C-yapılı diyot tutucuya (ILX LDM-4409) yerleştirilmiş olup bu tutucuda uygun akım sürücü (ILX LDX-5562) ve sıcaklık kontrolü ile sürülmüştür (ILX LDT-3353).



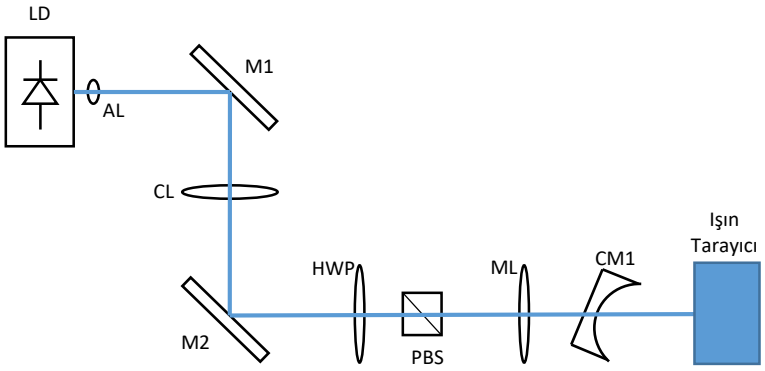
Şekil 2 3W güç verebilen 780 nm'de çalışan AlGaAs lazer diyotları

Tm^{3+} katkılı YAG, LuAG ve YLF kristallerinin kazanç ortamı olduğu lazer sisteminde çalışmalara ilk olarak kristallerin soğurma oranlarının ölçümü ile başlandı (Şekil 3). Bunun için ilk olarak diyot pompa düzeneğinin (LD) kurularak, metal aynalar yardımıyla (M1, M2) ışık odak uzaklığı 75 mm olan bir lens (ML) ile kristalin içine gönderilmiştir. Işığın çok hızlı yayılmasını önlemek amacıyla odak uzaklığı 4.5 mm olan bir asferik lens (AL) yardımıyla diyottan çıkan ışık toplanmıştır. Kullandığımız diyotların farklı eksenlerde yayılım hızları farklı olduğundan bir yönde daha hızlı yayılmaktadırlar. Bu yayılmayı engellemek için ışığın yolunun üzerine ışığı sadece bir yönde toplayan bir adet 50 mm'lik silindirik lens (CL) yerleştirilmiştir. Diyottan çıkan ışınlar dikey polarizasyona sahip olduğu için kristalin üzerinde kaçınılmaz bir Fresnel kaybı oluşturacaktır. Bu durumu engellemek için ışığın yoluna yarım dalga çevirici eklenmiş (HWP) ve ardından eklenen polarize ışın bölücü (PBS) ile kristalin üzerine sadece yatay polarizasyona sahip ışığın girmesi sağlanmıştır. Kristaller ışığın yönüne Brewster açısında yerleştirilerek Fresnel kayıpları ihmal edilecek düzeye indirgenmiştir. Güç ölçer ile kristallerin ne kadar gücü soğuramadıkları ölçülerek kristallerin soğurma yüzdeleri hesaplanmıştır. Bu aşamada kullanılan kristaller 5 ve 7 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} iyonu katkılı YAG ve LuAG kristalleri ile yine 5 ve 7 mm uzunluğunda c-kesim %3 Tm^{3+} iyonu katkılı YLF kristalidir.

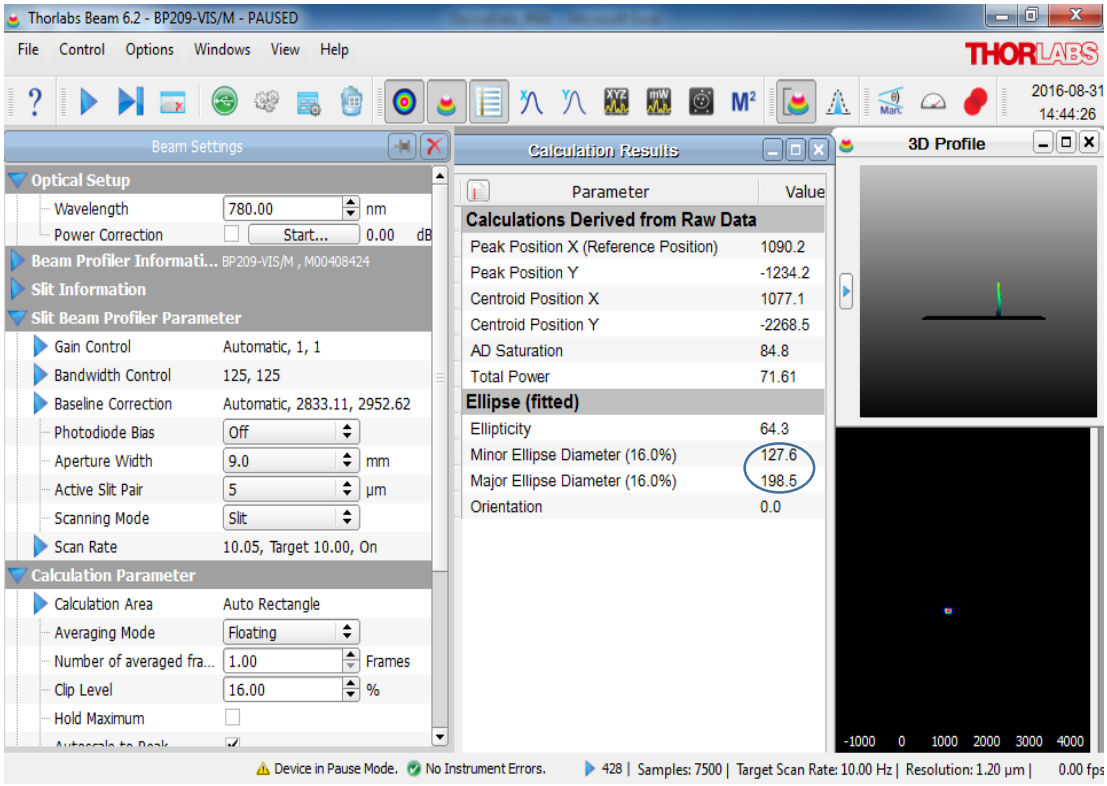


Şekil 3 Kristallerin soğurma yüzdelerinin ölçümü için kullanılan düzenek

Kristallerin soğurma bantlarının ölçümlerinden sonra diyotların en etkin şekilde kristallerin içerisine odaklanması çalışmalarına geçildi. Çalışan bir lazer düzeneğinde diyotların odaklandığı noktaya kristal yerleştirildiğinden ışığın odaklandığı noktadaki spot büyüklüğü ne kadar küçükse soğurma o kadar çok doyuma ulaşacaktır. Böylece de lazer sistemlerinin verimi (çıkış gücü) o kadar yüksek olacaktır. Bu yüzden, ilk olarak 75 mm'lik odaklayıcı lens çıkartılarak 50 mm'lik lens takılarak her durumda daha etkin bir odaklanma amaçlanmıştır (Şekil 4). Ayrıca çalışan bir lazer düzeneğinde kristal ile odaklayıcı lens arasında bir çukur ayna bulunup; odak noktasındaki spot büyüklüğünü etkileyebileceğinden sisteme bir odak uzaklığı 50 mm olan bir çukur ayna (CM1) yerleştirilmiştir. Daha sonra çift taramalı ışın profili belirleyici kullanarak ışığın odaklandığı noktadaki spot büyüklüğünün ölçümlerine başlanmıştır. Bu noktada daha küçük bir spot büyüklüğü elde edebilmek için asferik lensin ve silindirik lensin konumları değiştirilerek en küçük spot büyüklüğü hedeflenmiştir. Elde edilen en iyi durumda yaklaşık 130 x 200 μm lik bir spot büyüklüğü elde edilmiştir (Şekil 5).

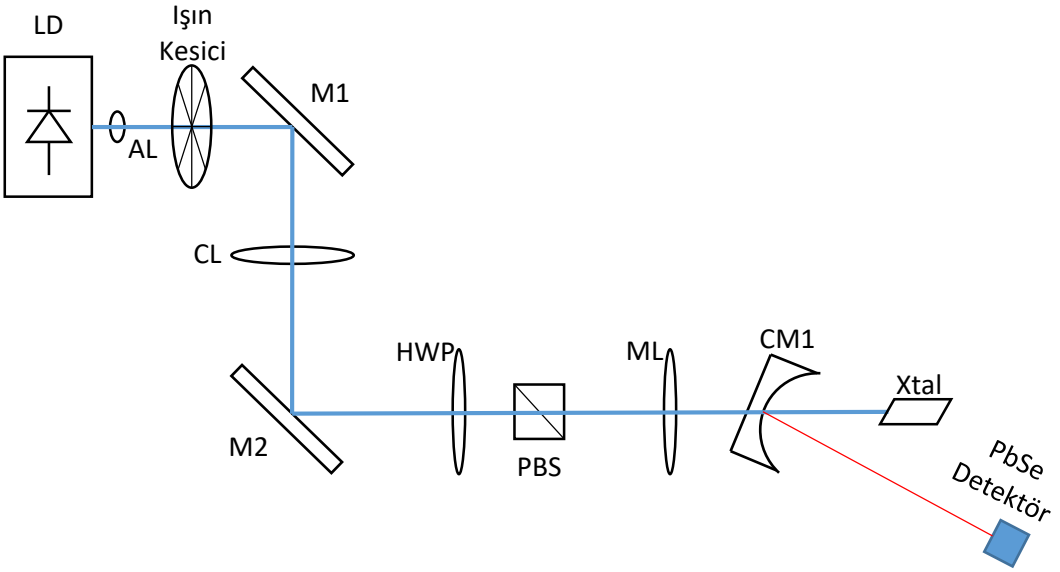


Şekil 4 Işınların odak büyüklüklerini ölçmek için kurulan sistem



Şekil 5 Işın profil belirleyici kullanarak odak noktasında ölçülen odak büyüklükleri

En etkin odaklanma elde edildikten sonra bir ışın periyodik ışın kesici yardımıyla kristallerin yarılanma ömrü ölçümlerine geçilmiştir. Bunun için Şekil 6'deki gibi bir sistem hazırlanmış olup CM1'in kristallerden saçılan ışınları topladığı noktaya PbSe detektörü yerleştirilerek sinyalin zamanla değişim grafikleri osiloskop aracılığıyla alınmıştır.



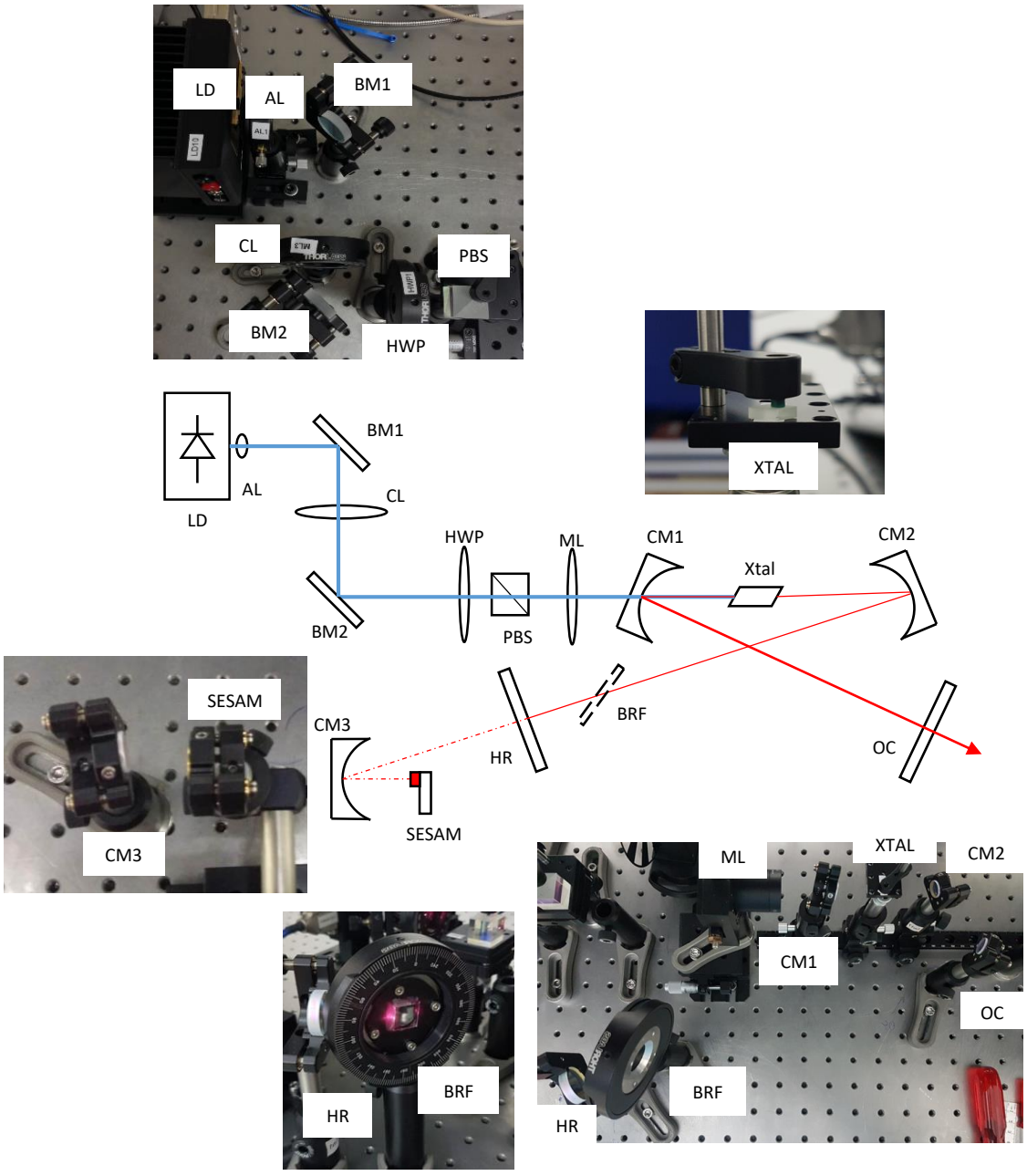
Şekil 6 Kristallerin yarılanma ölçümleri için kurulan sistem

Spektroskopik ölçümler tamamlandıktan sonra lazer düzeneğinin sürekli dalga rejiminde çalışması için kurulması aşamasına geçildi. Bu aşamada odaklayıcı lensten sonra, CM1 ilk çukur ayna olmak üzere, x-katlamalı astigmatik 4 aynalı lazer rezonatörü kurulmuştur (Şekil 7). Rezonatör, 2 adet çukur ayna (CM1 ve CM2) bir adet yüksek yansıtıcı ayna (HR) ve bir adet çıkış aynasından (OC) oluşmaktadır. Kullanılan aynaların üzerinde 650-850 nm yüksek geçirgenlik sağlayan 1850-2200 nm bölgelerinde ise yüksek yansıtma özelliğine sahip özel kaplamalar bulunmaktadır. Ayrıca bu kaplamalar 1900-2100 nm bölgelerinde sabit gecikme (dispersion) değerine sahiptir. Sürekli dalga rejimindeki çalışmalarda değişik kol boyları ve değişik yarıçaplı aynalar kullanılmış olup en etkin sonuçlar kaydedilmiştir. Sürekli dalga rejimindeki çalışmalarda en etkin sonuçlar 5 mm'lik kristallerle (kendiliğinden üst geçiş sebebiyle), CM1 50 mm yarıçapında bir çukur ayna, CM2 75 mm yarıçapındaki çukur ayna olduğunda elde edilmiştir. Her sistemde en etkin konfigürasyonda, 3 farklı çıkış aynası kullanılarak her üç lazer sistemi için sonuçlar kaydedilmiş, verim eğrileri elde edilmiştir. Bulgular kısmında da detaylıca sonuçların incelenebileceği gibi en yüksek performansa sahip sistemde (Tm:YLF) sistemin bu konfigürasyondaki kaybı incelenmiştir. Bunun için ilgili sistemde her üç çıkış aynasının çalışma eşik değeri ile yüksek yansıtıcı başka bir aynayı çıkış aynası olarak kullanarak elde edilen eşik değerleri kaydedilmiş ve gerekli analiz yapılmıştır.

Daha sonra sistemlerin yüksek yansıtıcı koluna çift kırınımlı dalga boyu değiştirebilen bir plaka eklenerek (BRF) sistemlerin dalgaboyu değişim aralıkları incelenmiştir. Bu aşamada yapılan çalışmalarda BRF'nin belli açılarında Tm^{3+} sistemlerinin çift dalgaboyunda birden çalışabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, Tm:YLF lazer sistemin BRF olmadan da stabil bölgenin belli noktalarında birden fazla dalgaboyunda da çalışabildiği gözlemlenmiştir. Çok renkli durumlarda dalga boyları ve çıkış güçleri kaydedilmiştir.

Son olarak sistemin yüksek yansıtıcı kolundaki ayna çıkartılarak yerine yarıçapı 38 mm'lik bir çukur ayna ve onun odağına darbeli rejimlerde çalışmaya olanak verecek olan doyabilen soğurucu ayna (SESAM) yerleştirilmiştir. Bu aşamada Tm:YLF için diğer sistem elemanları aynı tutulurken, Tm:YAG ve Tm:LuAG sistemleri için CM1 yarıcapı 75 mm olan bir ayna ile değiştirilmiştir. Ayrıca Tm:YAG ve Tm:LuAG kritalleri 7 mm versiyonları ile değiştirilerek Q-anahtarlamalı darbeler elde edilmiştir. Tm:YLF sisteminde ise SESAM stabil bölgede yer değiştirilerek değişik özellikteki Q-anahtarlamalı rejimler elde edilmiştir. Bu aşamada her bir Q-anahtarlamalı rejimin darbe genişlikleri, tekrarlama frekansları, ortalama güç değerleri kaydedilmiştir. Ayrıca bu aşamada

Tm:YAG ve Tm:LuAG sistemlerinde yer yer kip-kilitli rejimlerde sonuçlar da elde edilmiş olup, kullanılan aynaların gecikmelerinin yetersiz olması sebebiyle kararlı sonuçlar elde edilememiştir.

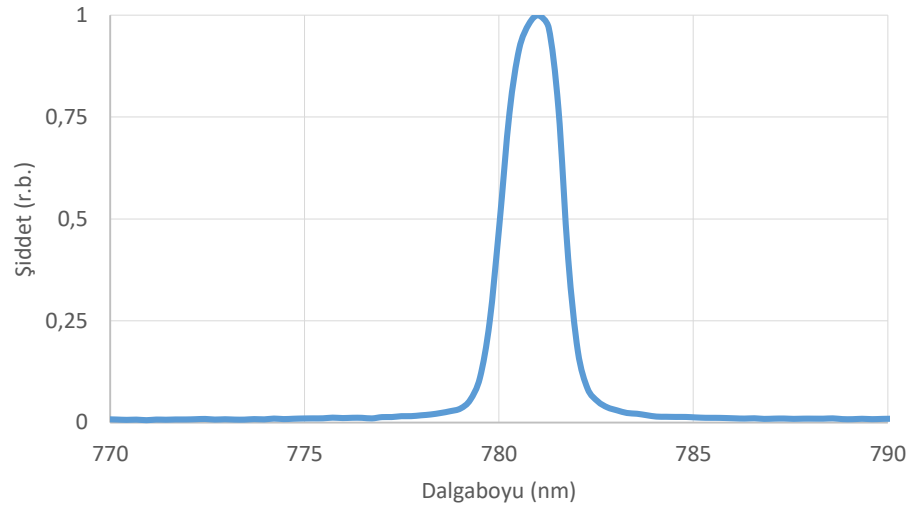


Şekil 7 Tm^{3+} lazer sistemlerinde kullanılan sistemin genel şeması

4. Bulgular

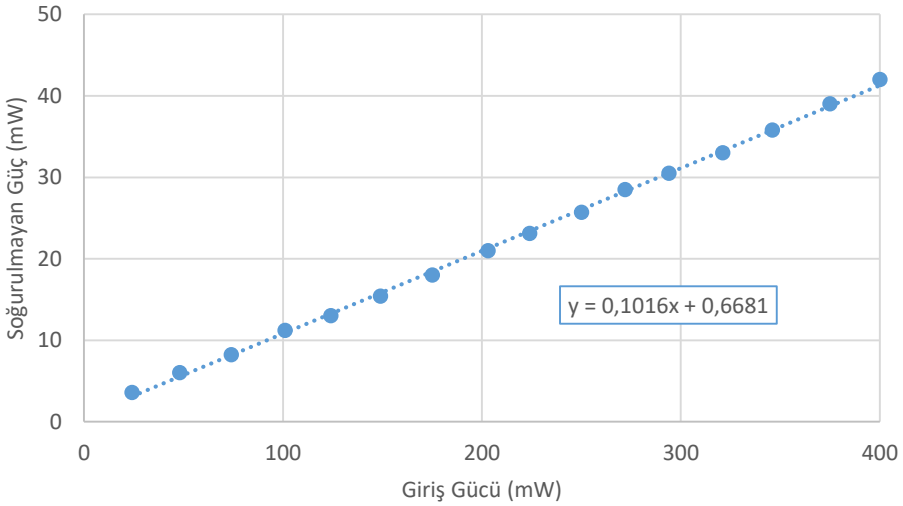
4.1 Spektroskopik Ölçümler

Deneylerimize ilk olarak spektroskopik ölçümler ile başlanmıştı. Bunun için ilk olarak kullandığımız 3W'lık AlGaAs lazer diyotunun oda sıcaklığındaki merkez dalgaboyu ölçülmüştür (Şekil 8). Bu ölçümlerde diyotların merkez dalgaboyunun 781 nm olduğu gözlemlenmiş olup teorik olarak Tm^{3+} kristalleri tarafından soğurulmaya uygun olduğu tespit edilmiştir.

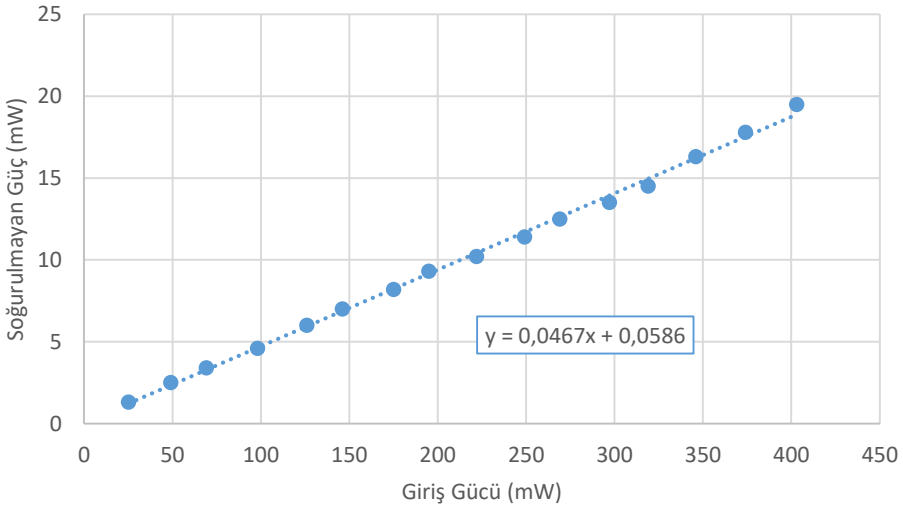


Şekil 8 3W'lık AlGaAs lazer diyotlarının spektrumu

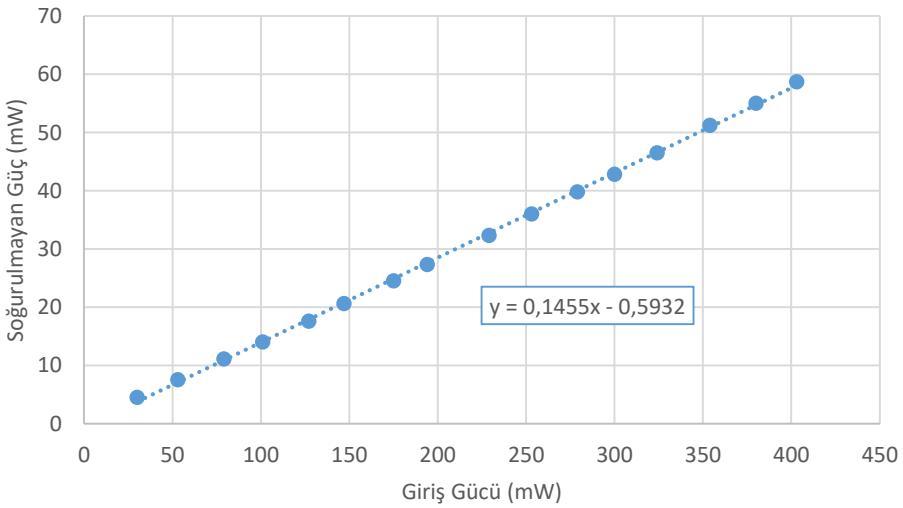
Lazer diyotunun merkez dalgaboyu ölçümünden sonra kullanılacak olan Tm^{3+} katkılı YAG, LuAG ve YLF kristallerinin soğurma miktarı ölçümlerine bakılmıştır. Bunun için yöntem kısmında belirtilen Şekil 3'deki sistem kurulmuş ve (çapraz sönümleme ve kendiliğinden üst geçiş olaylarına sebebiyet vermemek için) düşük güçlerde 5 mm ve 7 mm'lik Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF kristallerinin pompa ışığını soğurma yüzdeleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerden 5 mm'lik Tm:YAG kristalinin %90 (Şekil 9), 7 mm'lik Tm:YAG kristalinin %95 (Şekil 10), 5 mm'lik Tm:LuAG kristalinin %85 (Şekil 11), 7 mm'lik Tm:LuAG kristalinin %96 (Şekil 12), 5 mm'lik Tm:YLF kristalinin %73 (Şekil 13), 7 mm'lik Tm:YLF kristalinin %86 (Şekil 14) oranında pompa ışın kaynağını soğurabildiği gözlemlenmiştir.



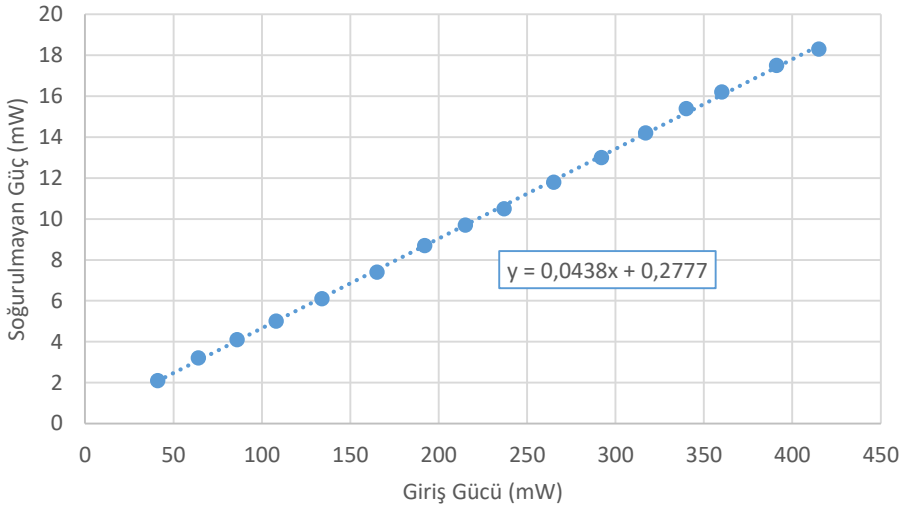
Şekil 9 5 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı YAG kristalinin soğurma grafiği



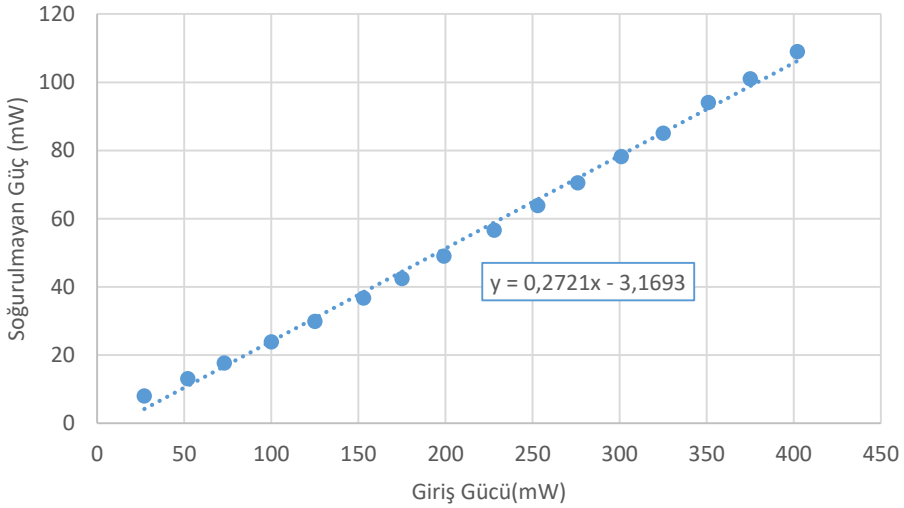
Şekil 10 7 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı YAG kristalinin soğurma grafiği



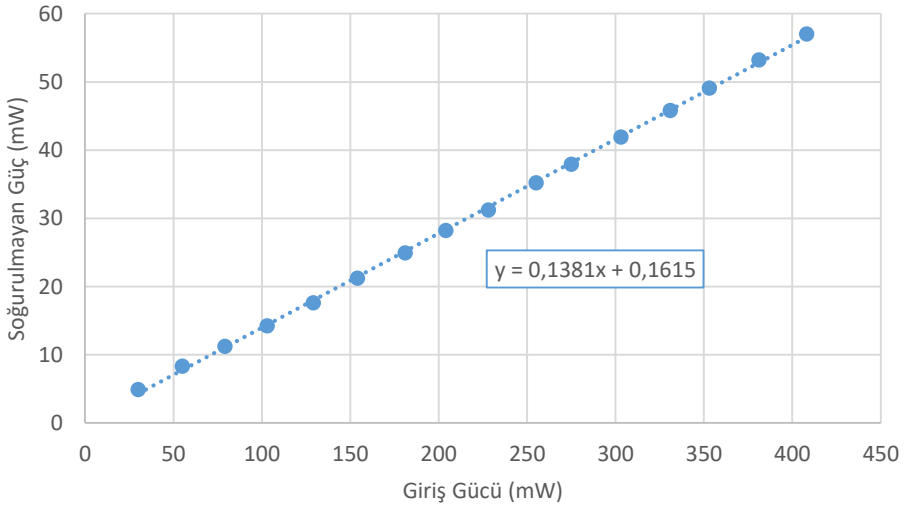
Şekil 11 5 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı LuAG kristalinin soğurma grafiği



Şekil 12 7 mm uzunluğunda %6 Tm^{3+} katkılı LuAG kristalinin soğurma grafiği

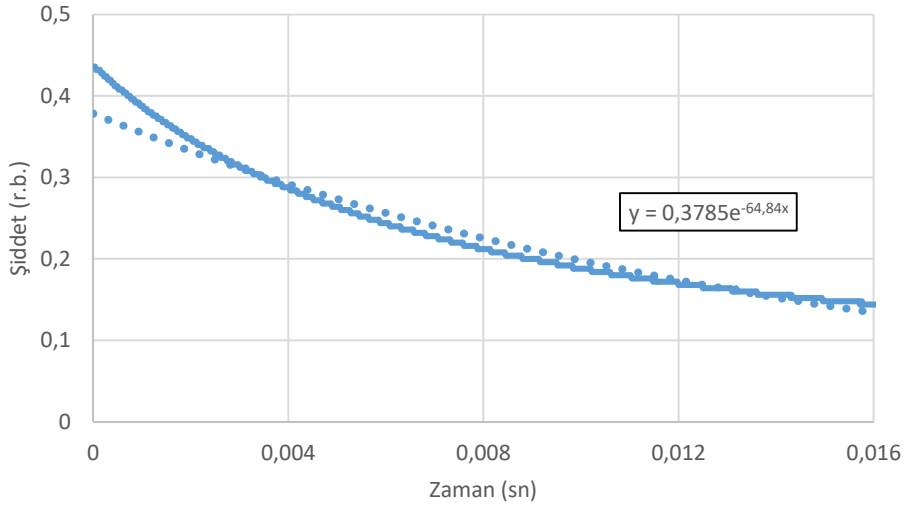


Şekil 13 5 mm uzunluğunda %3 Tm^{3+} katkılı YLF kristalinin soğurma grafiği

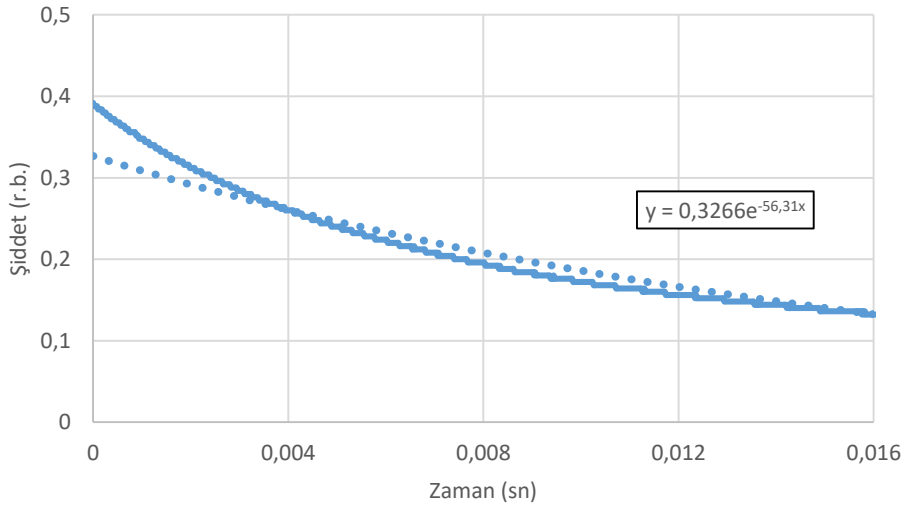


Şekil 14 7 mm uzunluğunda %3 Tm^{3+} katkılı YLF kristalinin soğurma grafiği

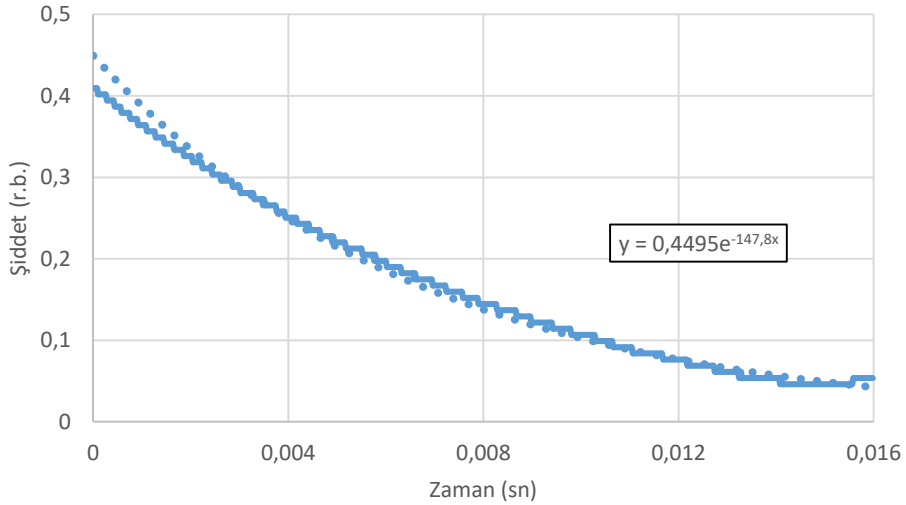
Kristallerin soğurma yüzde ölçümlerinden sonra yarılanma ömürleri ölçümlerine geçilmiştir. Bunun için yöntem kısmında belirtilen Şekil 6'deki sistem kurulmuş olup ışın kesici 20Hz'e ayarlanmıştır. 5 ve 7 mm'lik kristallerin katkı oranları aynı olduğundan her kristalin sadece 7 mm'lik uzunluğuna sahip versiyonunun yarılanma ömrü incelenmiştir. Bu ölçümlerde Tm:YAG kristalinin benzetim yardımıyla yarılanma ömrü 15 ms (Şekil 15), Tm:LuAG kristali için 18 ms (Şekil 16) ve Tm:YLF kristali için 7 ms (Şekil 17) olarak hesaplanmıştır. Millisaniye mertebesinde yarılanma ömürleri ve %70'in üzerinde soğurma oranları kristallerin bu diyotlarla uyarılmaya uygun olduğunu göstermektedir.



Şekil 15 Tm:YAG kristalinin sönümlenme grafiği



Şekil 16 Tm:LuAG kristalinin sönümlenme grafiği



Şekil 17 Tm:YLF kristalinin sönümlenme grafiği

4.2 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm^{3+} Lazer Sistemleri

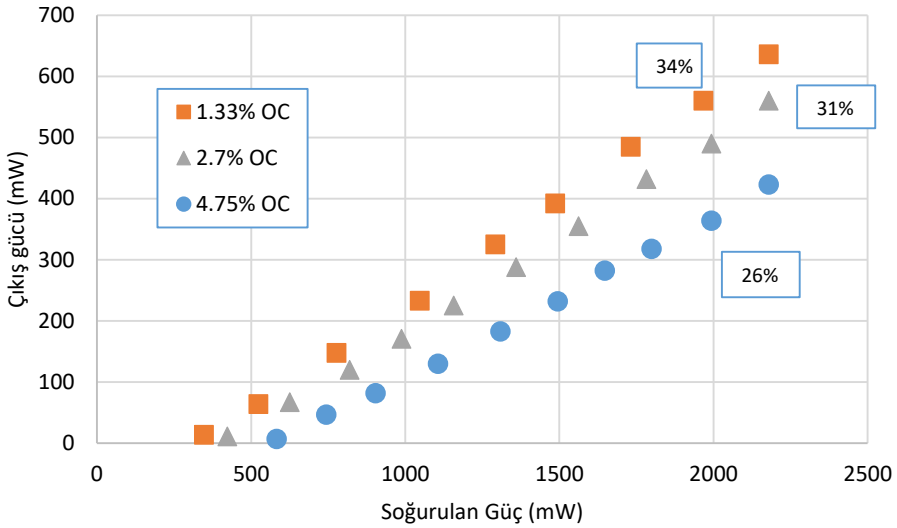
Spektroskopik ölçümler tamamlandıktan sonra sürekli dalga rejimindeki çalışmalara geçilmiştir. Bu aşamada her bir Kristal çeşidi için en uygun konfigürasyon (kristal boyu, çukur aynaların çeşitleri, kol uzunlukları v.b.) için denemeler yapılmış olup en yüksek güçler için verim eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca sistemlerin çıkış dalgaboyları ölçülmüş olup sisteme eklenen BRF yardımıyla dalgaboyu değişim aralıkları kaydedilmiştir. Ayrıca en yüksek performansın elde edildiği sistemde (Tm:YLF) sistem kaybı ölçümü de yapılmıştır.

4.2.1 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:YAG Lazeri

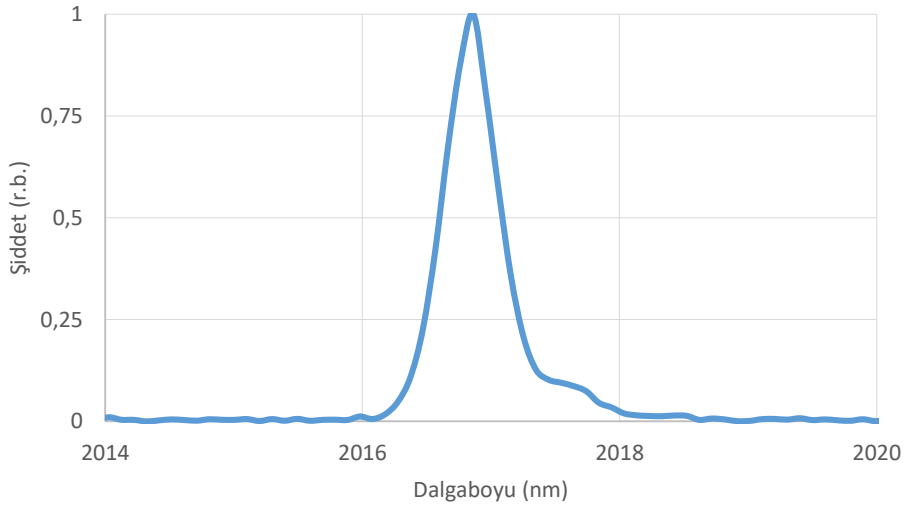
Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazer sistemi çalışmalarında en etkin sonuç 5 mm'lik kristalle elde edilmiştir. Bu sistemde CM1 50 mm ve CM2 75 mm yarıçapına sahip iken en yüksek çıkış güçleri elde edilmiştir. Bu sistemde yüksek yansıtıcı kolu 28 cm, çıkış aynası kolu ise 11 cm olarak belirlenmiştir.

En yüksek performans %1.33'lük çıkış aynası ile elde edilmiş olup çıkış gücü 636 mW'tır (Şekil 18). Bu çalışmada sistemin soğurulan güce göre çıkış gücünün verimi %34 olarak hesaplanmıştır. Çıkış aynası %2.7 ve %4.75 ile değiştirildiğinde sırasıyla en yüksek 560 mW ve 423 mW çıkış güçleri, %31 ve %26 verimlerle elde edilmiştir.

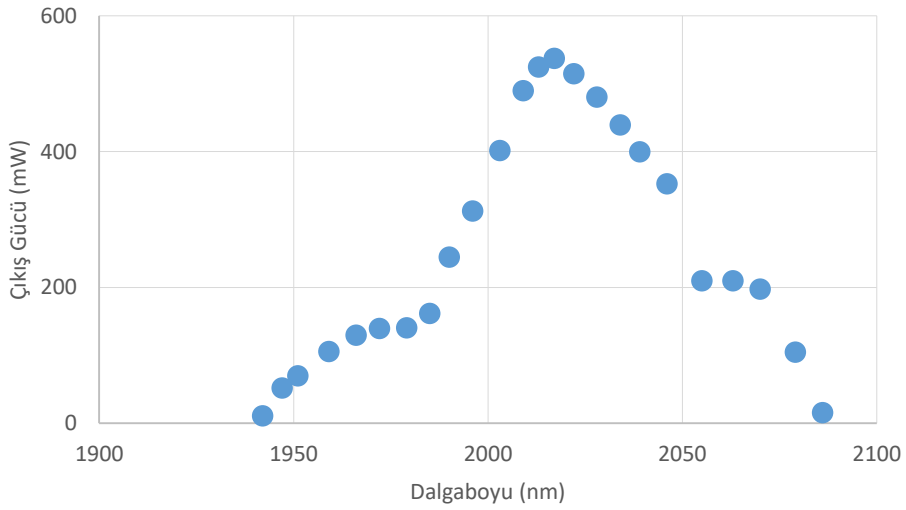
Tm:YAG lazer sisteminin çıkış dalgaboyu 2017 nm olarak ölçümlenmiştir (Şekil 19). Sisteme BRF eklendiğinde ise çıkış dalgaboyunun 1942 nm ile 2086 nm aralığında değiştirilebilindiği ölçülmüştür (Şekil 20).



Şekil 18 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin güç verimi eğrileri



Şekil 19 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin spektrumu



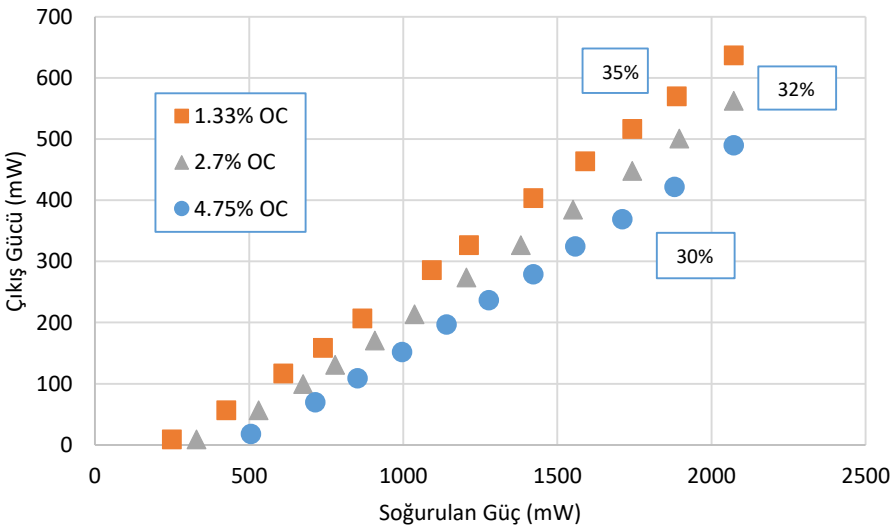
Şekil 20 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı

4.2.2 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:LuAG Lazeri

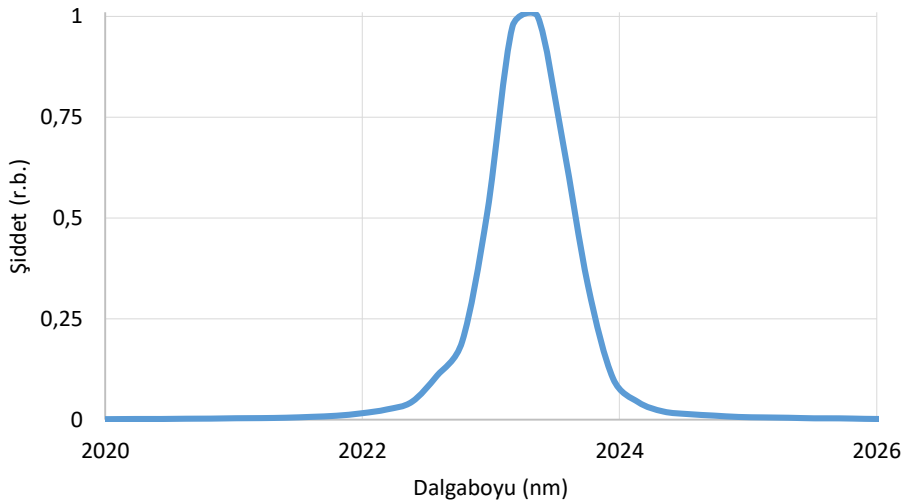
Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazer sistemi çalışmalarında yine en etkin sonuç 5 mm'lik kristalle elde edilmiştir. Bu sistemde CM1 50 mm ve CM2 75 mm yarıçapına sahip iken en yüksek çıkış güçleri elde edilmiştir. Bu sistemde yüksek yansıtıcı kolu 27 cm, çıkış aynası kolu ise 12 cm olarak belirlenmiştir.

En yüksek performans %1.33'lük çıkış aynası ile elde edillmiş olup çıkış gücü 637 mW'tır (Şekil 21). Bu çalışmada sistemin soğurulan güce göre çıkış gücünün verimi %35 olarak hesaplanmıştır. Çıkış aynası %2.7 ve %4.75 ile değiştirildiğinde sırasıyla en yüksek 563 mW ve 490 mW çıkış güçleri, %32 ve %30 verimlerle elde edilmiştir.

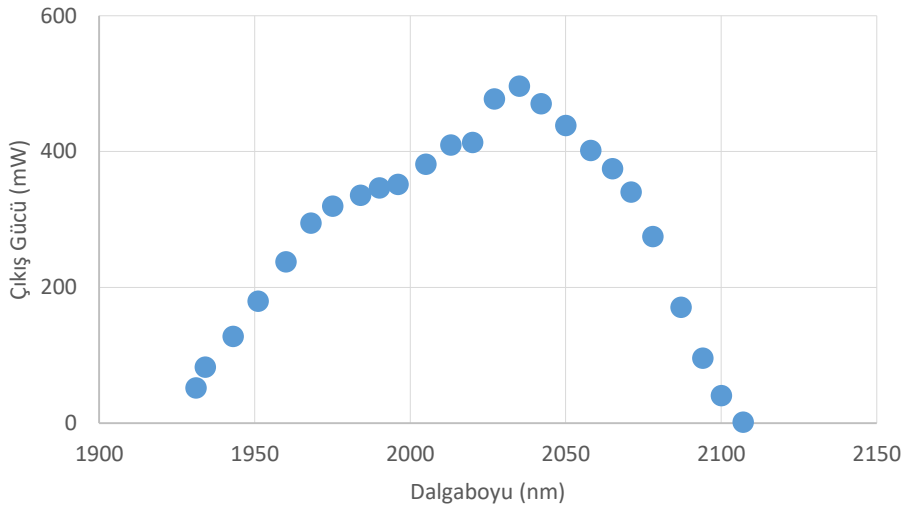
Tm:YAG lazer sisteminin çıkış dalgaboyu 2023 nm olarak ölçümlenmiştir (Şekil 22). Sisteme BRF eklendiğinde ise çıkış dalgaboyunun 1931 nm ile 2107 nm aralığında değiştirilebilindiği ölçülmüştür (Şekil 23).



Şekil 21 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin güç verim eğrileri



Şekil 22 Sürekli rejimde çalışan Tm:LuAG lazerinin spektrumu



Şekil 23 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı

4.2.3 Sürekli Dalga Rejiminde Çalışan Tm:YLF Lazeri

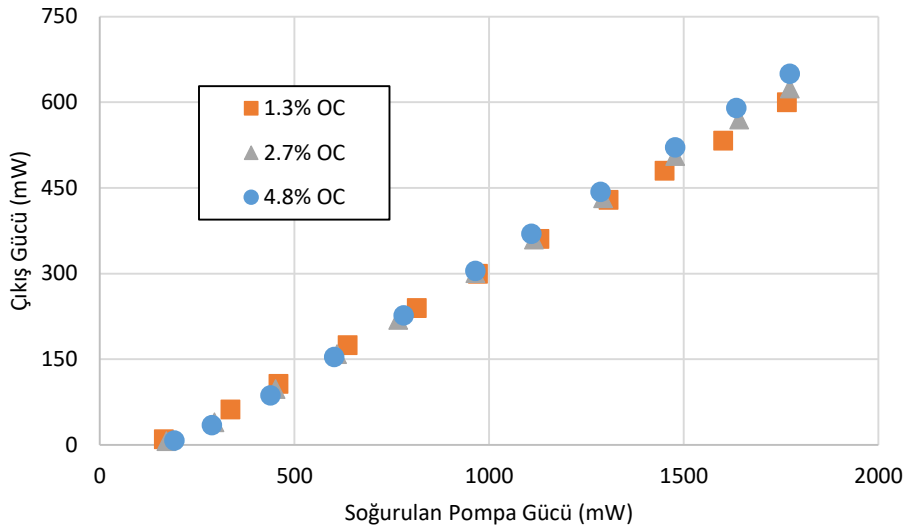
Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazer sistemi çalışmalarında en etkin sonuçlar diğer sistemlerde olduğu gibi 5 mm'lik kristalle elde edilmiştir. Bu sistemde CM1 50 mm ve CM2 75 mm yarıçapına sahip iken en yüksek çıkış güçleri elde edilmiştir. Bu sistemde yüksek yansıtıcı kolu 30 cm, çıkış aynası kolu ise 11 cm olarak belirlenmiştir.

En yüksek performans %4.8'lük çıkış aynası ile elde edillmiş olup çıkış gücü 650 mW'tır (Şekil 24). Bu çalışmada sistemin soğurulan güce göre çıkış gücünün verimi %41 olarak hesaplanmıştır. Çıkış aynası %2.7 ve %1.33 ile

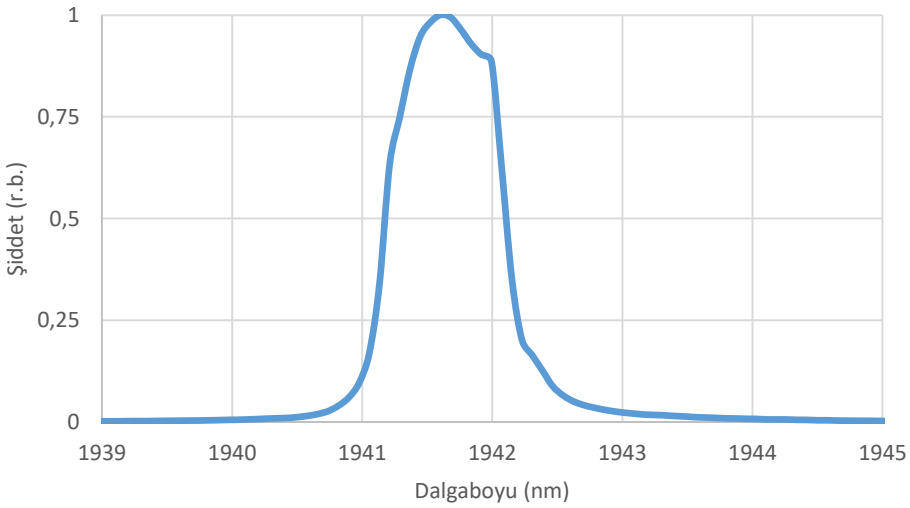
değiştirildiğinde sırasıyla en yüksek 624 mW ve 600 mW çıkış güçleri, %39 ve %37 verimlerle elde edilmiştir.

Tm:YLF lazer sisteminin çıkış dalgaboyu 1942 nm olarak ölçümlenmiştir (Şekil 25). Sisteme BRF eklendiğinde ise çıkış dalgaboyunun 1831 nm ile 2031 nm aralığında değiştirilebilindiği ölçülmüştür (Şekil 27).

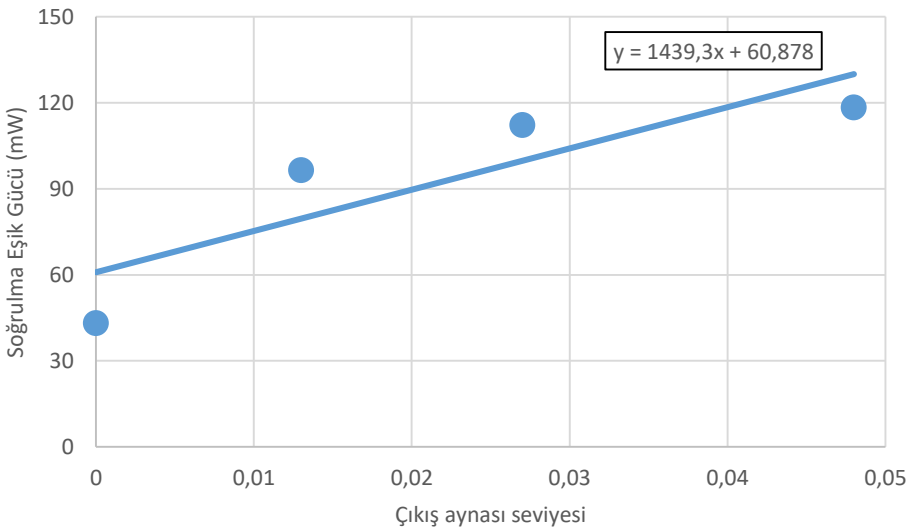
Bu sistemde ayrıca diğer lazerlere göre daha yüksek çıkış gücü ve verim eğrisi elde edildiğinden sistemin kayıpları da ölçülmüştür. Bunun için her bir çıkış aynasındaki lazer ışımasının elde edilebilmesi için gerekli soğrulma eşik gücü ölçülmüştür. Bununla birlikte çıkış aynası yerine başka bir yüksek yansıtıcı ayna eklenerek bu durumdaki eşik değeri de ölçülerek bir grafik üzerinde doğrusal yaklaşım yapılmıştır (Şekil 26). Bu yaklaşıma göre sistemin kaybı %4.24 olarak hesap edilmiştir.



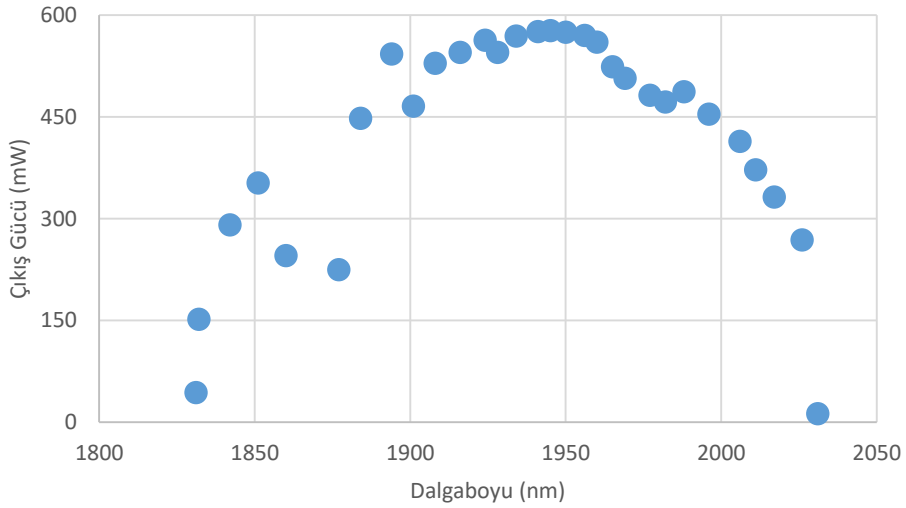
Şekil 24 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin güç verimi eğrileri



Şekil 25 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin spektrumu



Şekil 26 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin eşik değerlerinin çıkış aynasının yüzdesine göre grafiği



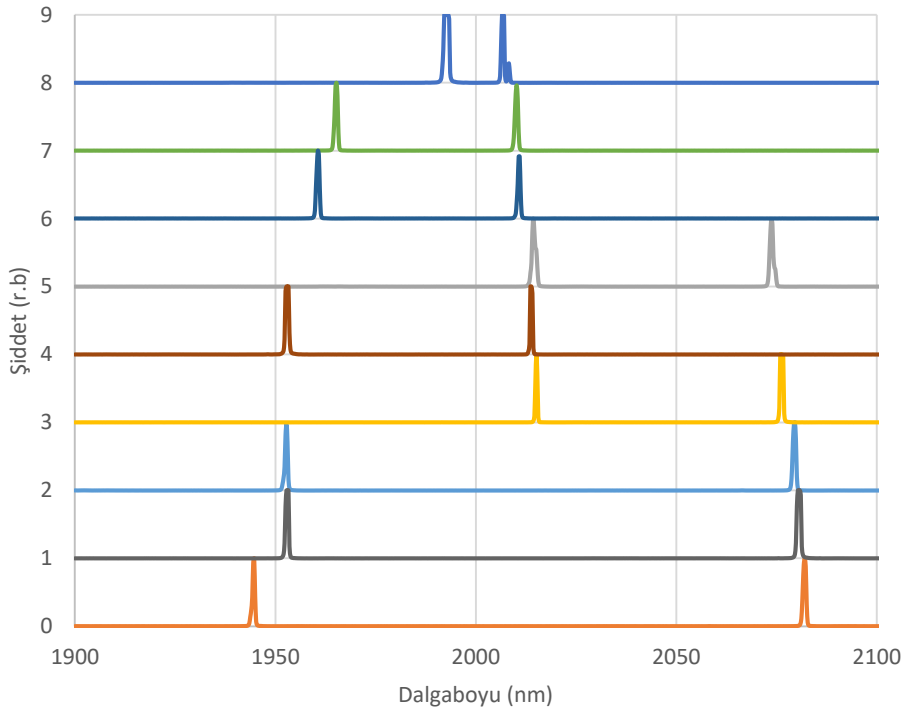
Şekil 27 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin dalgaboyunun değişim aralığı

4.3 Çok Renkli Tm^{3+} Lazerleri

Lazer sistemlerine BRF plakası eklendikten sonra, plakanın belli açılarında sistemlerin birden fazla dalgaboyunda çalışabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca Tm:YLF lazerinin optimizasyonu yapılırken kristalin iki çukur ayna arasındaki konumu değiştirilirken kendiliğinden birden fazla dalgaboyunda çalışabildiği gözlemlenmiştir. Birden fazla dalgaboyunda çalışan durumlarda sistemlerin spektrumları ve güç miktarları kaydedilmiştir.

4.3.1 Çift Renkli Tm:YAG Lazeri

Tm:YAG lazer sistemine BRF plakası eklendiğinde, plakanın 9 farklı açısında sistemlerin çift dalgaboyunda birden çalışabildiği gözlemlenmiştir (Şekil 28). Dalgaboyu farkları 14 nm ile 140 nm arasında değişmektedir. Frekans olarak bu değerler 1.05 THz ile 10.15 THz arasında bir frekans değişimine denk gelmektedir (Tablo 1).



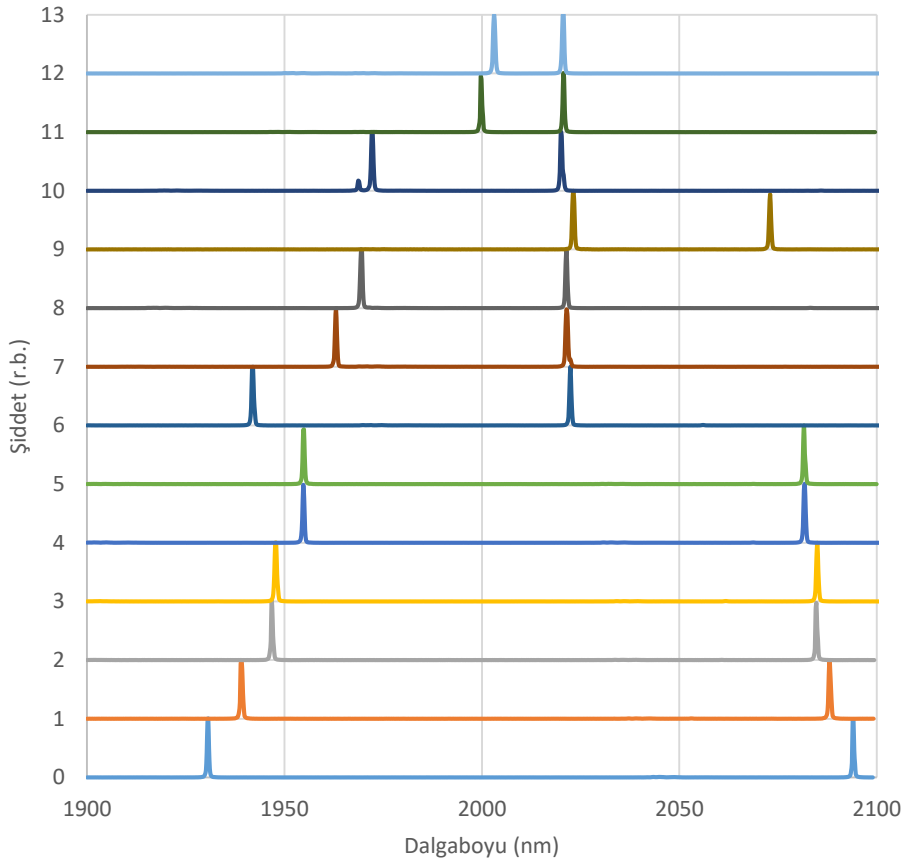
Şekil 28 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YAG lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları

Tablo 1 Tm:YAG lazerinin çift kırınımlı plaka ile çift renkli sonuçları

Çıkış Gücü (mW)	Kısa Dalgaboyu (nm)	Uzun Dalgaboyu (nm)	Dalgaboyu Farkı (nm)	Frekans farkı (THz)
194	1993	2007	14	1,05
90	1965	2010	45	3,42
41	1961	2011	50	3,80
130	2014	2074	60	4,31
66	1953	2014	61	4,65
38	2015	2077	62	4,44
194	1953	2080	127	9,38
106	1953	2081	128	9,45
125	1945	2082	137	10,15

4.3.2 Çift Renkli Tm:LuAG Lazeri

Tm:LuAG lazer sistemine BRF plakası eklendiğinde ise, plakanın 13 farklı açısında sistemlerin çift dalgaboyunda birden çalışabildiği gözlemlenmiştir (Şekil 29). Dalgaboyu farkları 17 nm ile 164 nm arasında değişmektedir. Frekans olarak bu değerler 1.26 THz ile 12.17THz arasında bir frekans değişimine denk gelmektedir (Tablo 2).



Şekil 29 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:LuAG lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları

Tablo 2 Tm:LuAG lazerinin çift kırınımlı plake ile çift renkli sonuçları

Çıkış Gücü (mW)	Kısa Dalgaboyu (nm)	Uzun Dalgaboyu (nm)	Dalgaboyu Farkı (nm)	Frekans farkı (THz)
160	2003	2020	17	1,26
223	2000	2021	21	1,56
44	1972	2020	48	3,61
137	2023	2073	50	3,58
110	1970	2021	51	3,84
58	1963	2021	58	4,39
101	1942	2022	80	6,11

205	1955	2082	127	9,36
130	1955	2082	127	9,36
68	1948	2085	137	10,12
166	1947	2085	138	10,20
115	1939	2088	149	11,04
68	1930	2094	164	12,17

4.3.3 Çok Renkli Tm:YLF Lazeri

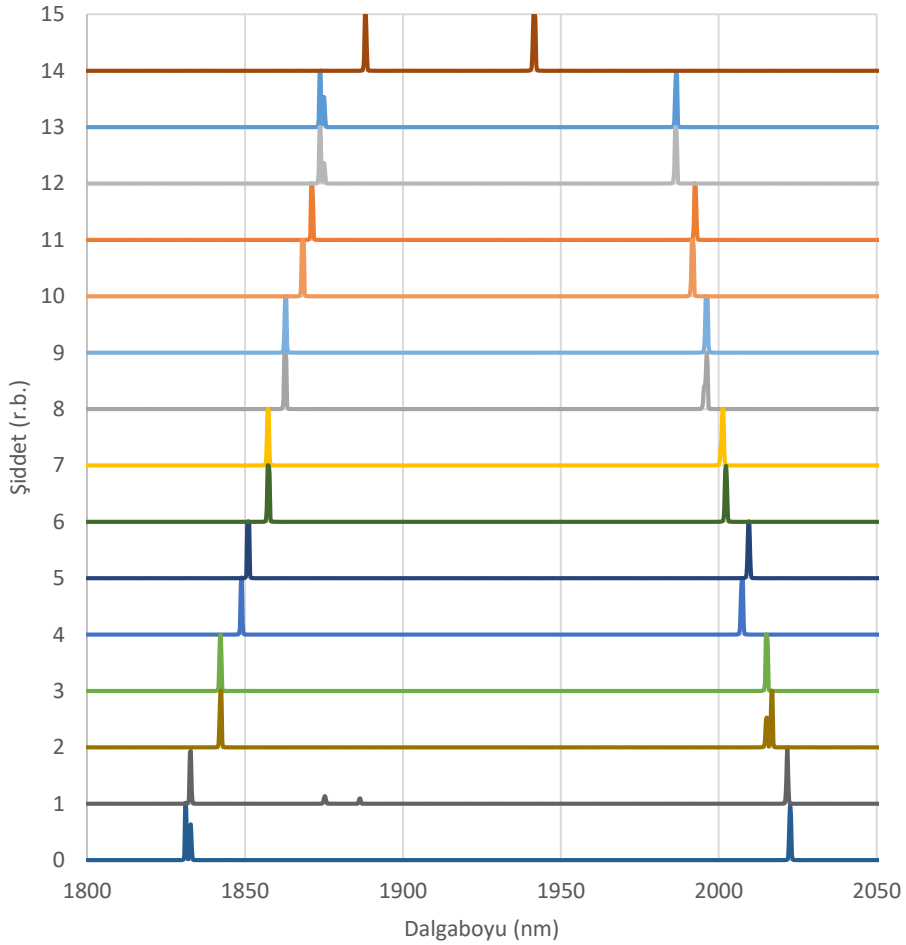
Tm:YLF lazerinde ise iki farklı şekilde çok renkli ışıma elde edilmiştir. Bunlardan ilki diğer lazer sistemlerinde olduğu gibi BRF plakası eklendiğinde elde edilen çift renkli sistemler, diğer durum ise (literatür özetinde bahsedildiği üzere YLF kristalinin çift eksenli olmasından dolayı) plakanın olmadığı sistemde kristalin karalı bölgede gezdirilmesi ile elde edildiği durumlardır.

4.3.3.1 Çift Kırınımlı Plaka ile Elde Edilen Çift Renkli Tm:YLF Lazeri

Tm:YLF lazer sistemine BRF plakası eklendiğinde 15 farklı açıda çift renkli ışımalar elde edilmiştir. 53 nm ile 192 nm arasında değişen bu değerler 4.34 THz ile 15.55 THz frekans değişimine denk gelmektedirler (Şekil 30, Tablo 3) . Ayrıca diğer sistemlerden farklı olarak, dalgaboyları bulundukları noktlarda 1-2 nm değişim yapabilmektedirler. Bununla birlikte diğer sistemlere göre Tm:YLF lazer sisteminin çift renkli ışımaları diğer sistemlere göre çok daha fazla güç vermektedir.

Tablo 3 Tm:YLF lazerinin çift kırınımlı plaka ile çift renkli sonuçları

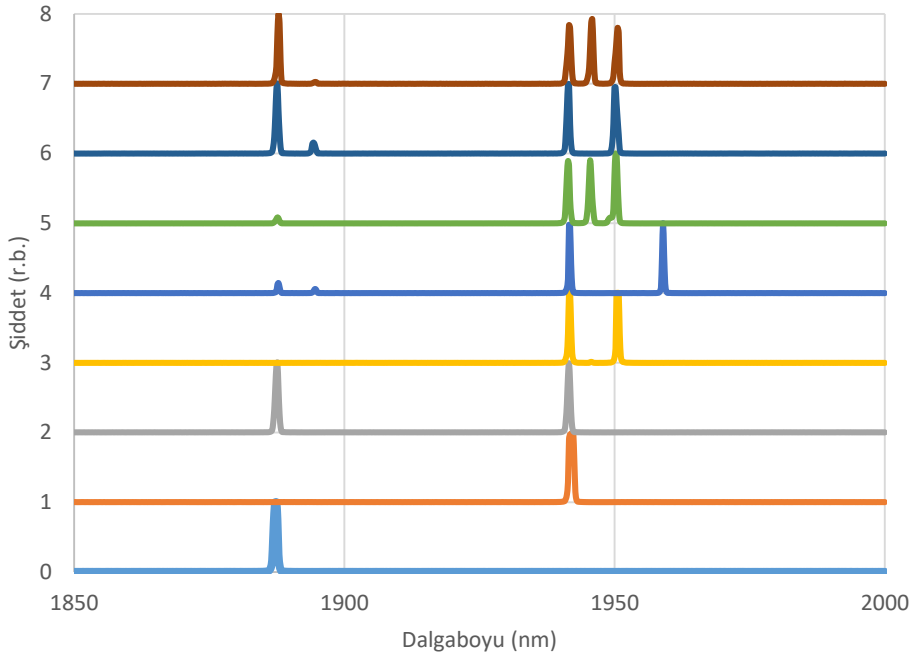
Çıkış Gücü (mW)	Kısa Dalgaboyu (nm)	Uzun Dalgaboyu (nm)	Dalgaboyu Farkı (nm)	Frekans farkı (THz)
90	1888	1941	53	4,34
412	1874	1987	113	9,10
386	1874	1987	113	9,10
376	1871	1993	122	9,82
420	1868	1991	123	9,92
420	1863	1996	133	10,73
420	1862	1996	134	10,82
382	1857	2001	144	11,63
400	1857	2002	145	11,70
395	1851	2009	158	12,75
384	1849	2008	159	12,85
340	1842	2015	173	13,98
352	1842	2017	175	14,13
113	1833	2022	189	15,30
300	1831	2023	192	15,55



Şekil 30 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin çift kırınımlı plaka yardımıyla çift renkli durumlardaki spektrumları ve güç değerleri

4.3.3.2 Kendiliğinden Çok Renkli Tm:YLF Lazeri

Tm:YLF lazer sistemindeki bir diğer değişik özellik ise kendiliğinden çok renkli olarak çalışabilmesidir. Kristali sadece kararlı bölgede hareket ettirerek farklı dalgaboyunda (1888 nm) ışıma elde edebilmek mümkündür. Ayrıca belirli noktalarda sistem çift renki, üç-renkli ve dört-renkli olarak çalışabilmektedir (Şekil 31, Tablo 4). Özellikle üç- ve dört- renkli Tm^{3+} katkılı lazer sistemleri bu çalışmada ilk olarak gösterilmiştir. Bunula birlikte özellikle bazı çok renkli ışıma spektrumlarında küçük şiddetli ışımalarda gözlemlenmektedir (örneğin 4 renkli ışımada 1896 nm'de küçük bir ışık şiddeti gözlemlenmektedir.). Bu küçül ışımalar farklı konfigürasyonlarda diğer dalgaboyları gibi ışıma yapabileceği potansiyeli olduğunu göstermektedir.



Şekil 31 Sürekli dalga rejiminde çalışan Tm:YLF lazerinin kendiliğinden çok renkli durumlardaki spektrumları

Tablo 4 Kendiliğinden çok renkli Tm:YLF lazerinin çok renkli durumlardaki özellikleri

Dalgaboyu Sayısı	Çıkış Gücü (mW)	Dalgaboyları (nm)
1	203	1888
	600	1942
2	284	1888, 1942
	535	1942, 1951
	273	1942, 1959
3	316	1942, 1946, 1951
	194	1888, 1942, 1951
4	396	1888, 1942, 1946, 1951

4.4 Darbeli Rejimde Çalışan Tm^{3+} Lazer Sistemleri

Lazer sistemlerinde yüksek yansıtıcı kolundaki ışınlar bir çukur ayna yardımıyla doyabilen Bragg yansıtıcı ayna (SESAM) üzerine odaklandığında sistemlerin Q-anahtarlamalı rejimlerde çalışabildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda Tm:YAG ve Tm:LuAG sistemlerinde 7 mm'lik kristallerin kullanılmasına ihtiyaç duyulurken, Tm:YLF sisteminde aynı konfigürasyonla darbeli rejimler elde edilmiştir.

4.4.1 Q-Anahtarlamalı Tm:YAG Lazeri

Tm:YAG lazer sistemindeki darbeli rejimlerdeki çalışmalarda sürekli dalga rejimindekinin aksine 7-mm'lik kristaller kullanılarak başarı elde edilmiştir. Bununla beraber CM1 aynasının yarıçapı 75 mm'lik olanla değiştirilerek çıkış aynası tarafından kol boyu 35 cm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca yüksek yansıtıcı koluna eklenen SESAM sisteminin CM2 aynasına olan uzaklığı 38 cm olarak ayarlandığında başarılı Q-anahtarlamalı rejimler elde edilmiştir.

Tm:YAG lazer sistemine SESAM eklendikten sonra iki farklı Q-anahtarlamalı rejim elde edilmiştir. Bunlardan ilki 12 kHz tekrarlama frekansına sahip 56 mW ortalama gücünde Q-anahtarlamalı Tm:YAG lazeridir (Şekil 32). Bu rejimde elde edilen darbelerin genişliği 3.7 μs'dir. Bu da 1.26 W darbe gücüne ve 4.7 μJ darbe enerjisine denk gelmektedir.

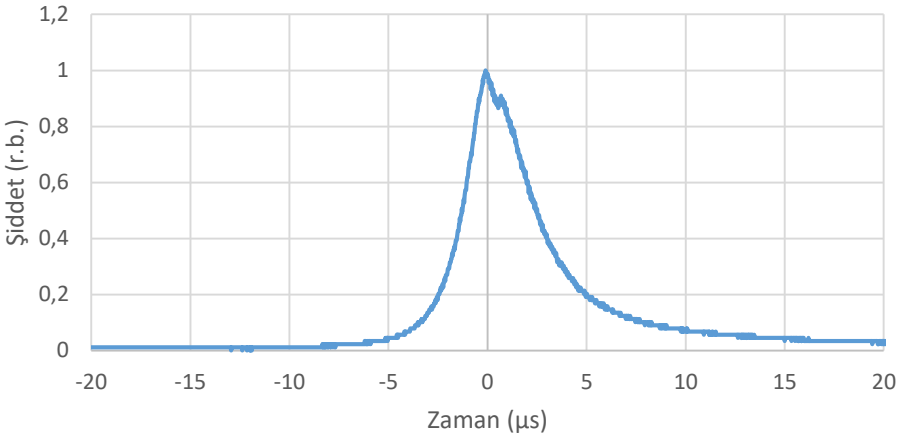
Tm:YAG lazerinde ikinci olarak elde edilen Q-anahtarlamalı rejimde ise 2 kHz tekrarlama frekansına sahip 80 mW ortalama gücünde darbeler elde edilmiştir (Şekil 33). Bu sistemdeki darbelerin genişliği 64 μs olarak ölçülmüştür. Bu durumda darbelerin tepe gücü 0.63 W ve darbelerin enerjisi ise 40 μJ olarak hesaplanmıştır.

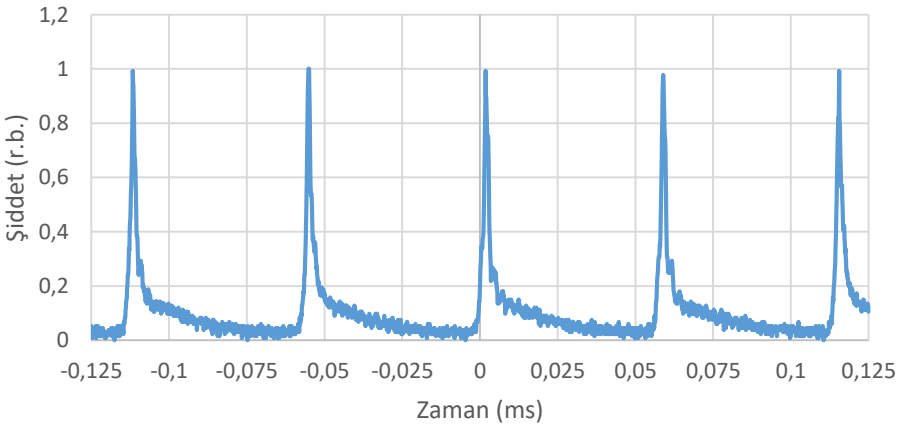
4.4.2 Q-Anahtarlamalı Tm:LuAG Lazeri

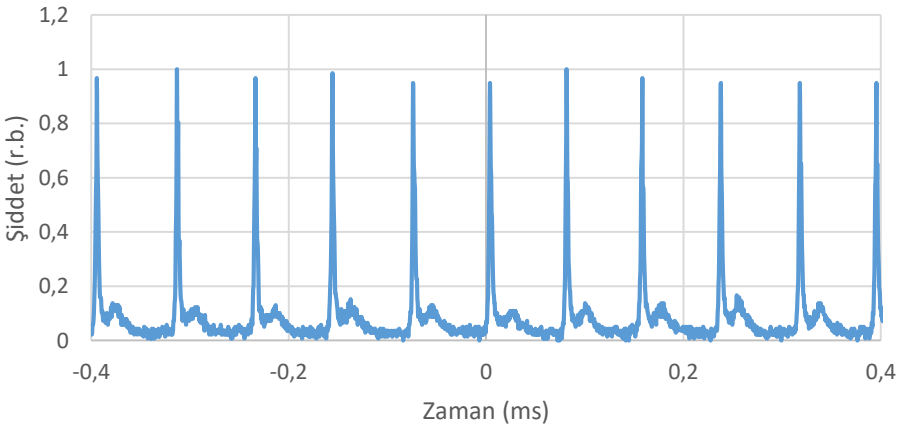
Tm:LuAG lazer sistemindeki darbeli rejimlerdeki çalışmalarda tıpkı Tm:YAG sisteminde olduğu gibi 7-mm'lik kristaller kullanılarak başarı elde edilmiştir. Bununla beraber CM1 aynası yine yarıçapı 75 mm'lik olanla değiştirilerek çıkış aynası tarafından kol boyu 28 cm olarak ayarlanmıştır. Ayrıca yüksek yansıtıcı koluna eklenen SESAM sisteminin CM2 aynasına olan uzaklığı 32 cm olarak ayarlandığında başarılı Q-anahtarlamalı rejimler elde edilmiştir.

Tm:LuAG lazer sistemine SESAM eklendikten sonra iki farklı Q-anahtarlamalı rejim elde edilmiştir. Bunlardan ilki 33 kHz tekrarlama frekansına sahip 44 mW ortalama gücünde Q-anahtarlamalı Tm:LuAG lazeridir (Şekil 34). Bu rejimde elde edilen darbelerin genişliği 4.8 μs'dir. Bu da 0.28 W darbe gücüne ve 1.3 μJ darbe enerjisine denk gelmektedir.

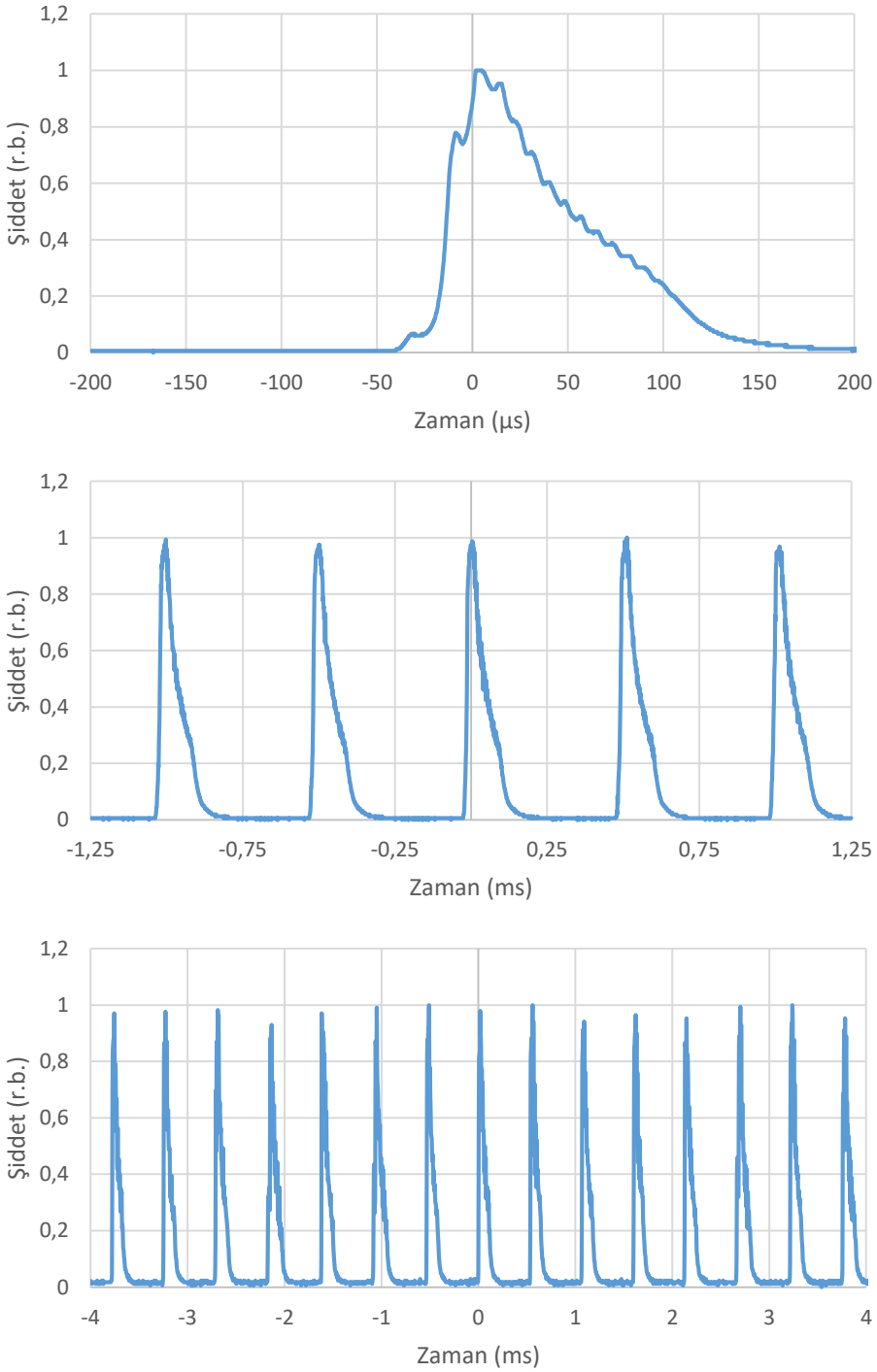
Tm:LuAG lazerinde ikinci olarak elde edilen Q-anahtarlamalı rejimde ise 30 kHz tekrarlama frekansına sahip 48 mW ortalama gücünde darbeler elde edilmiştir (Şekil 35, Şekil 36). Bu sistemdeki darbelerin genişliği 3.3 μs olarak ölçülmüştür. Bu durumda darbelerin tepe gücü 0.48 W ve darbelerin enerjisi ise 1.6 μJ olarak hesaplanmıştır.



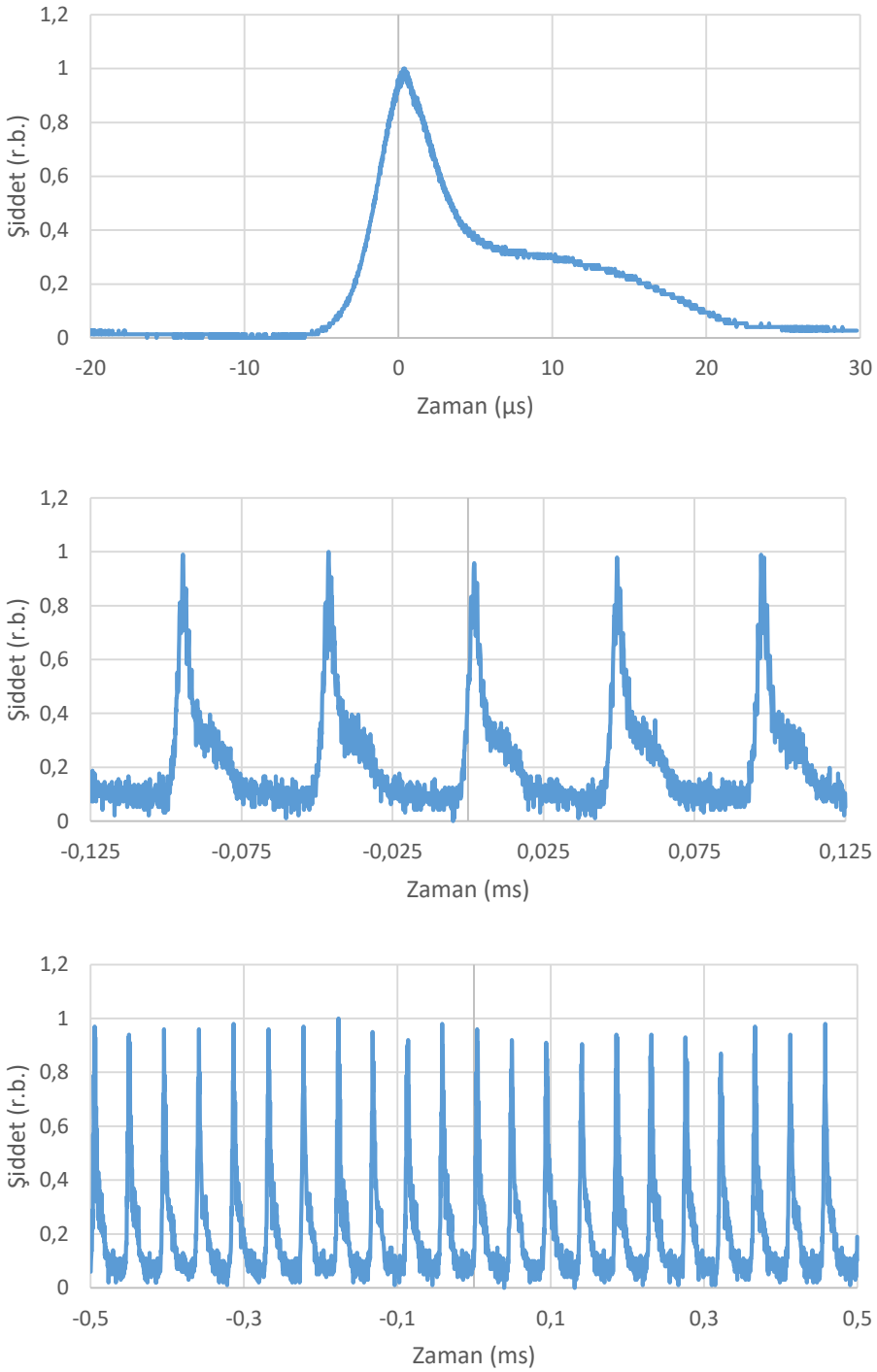




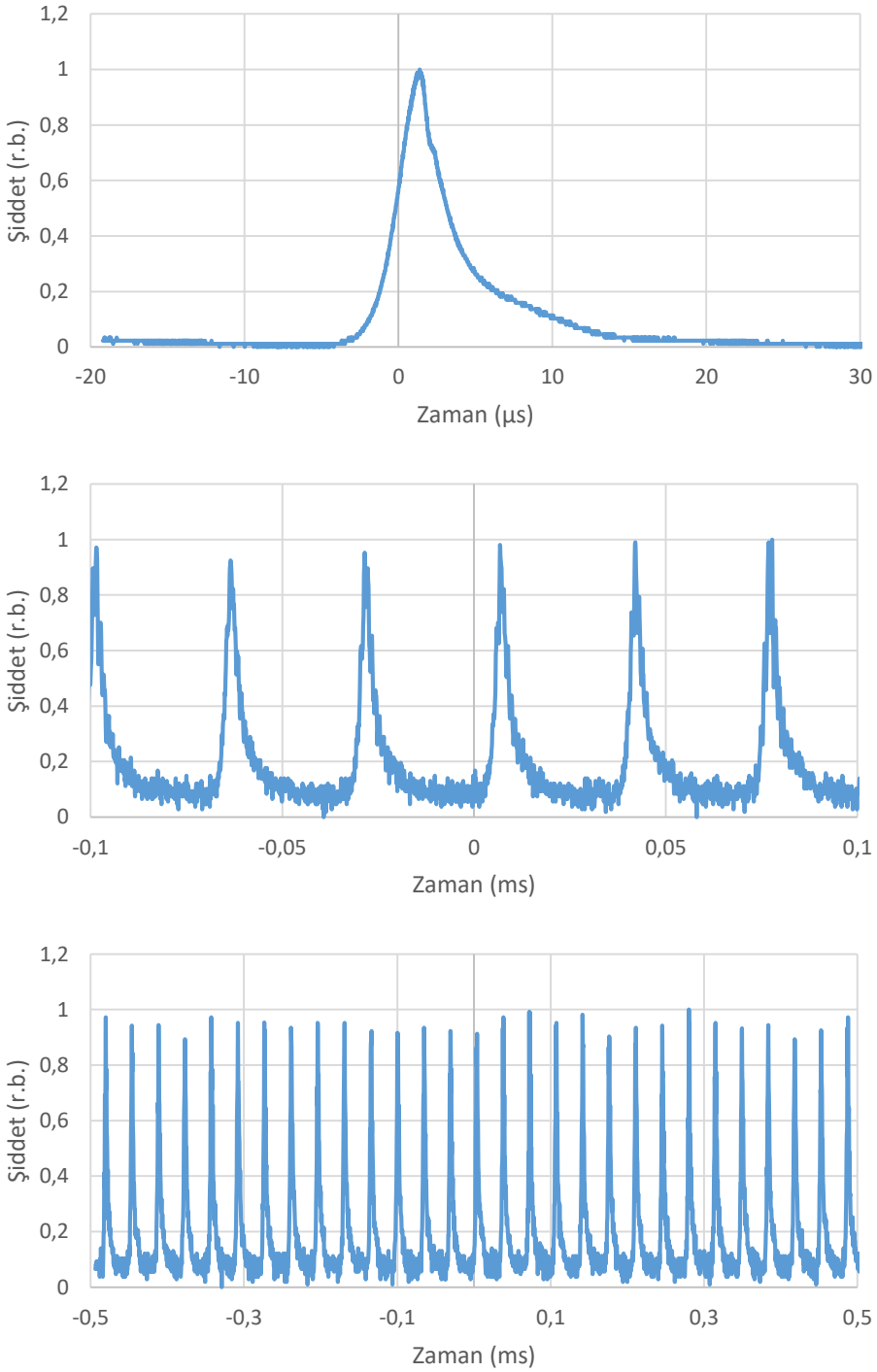
Şekil 32 12 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YAG lazeri darbeleri



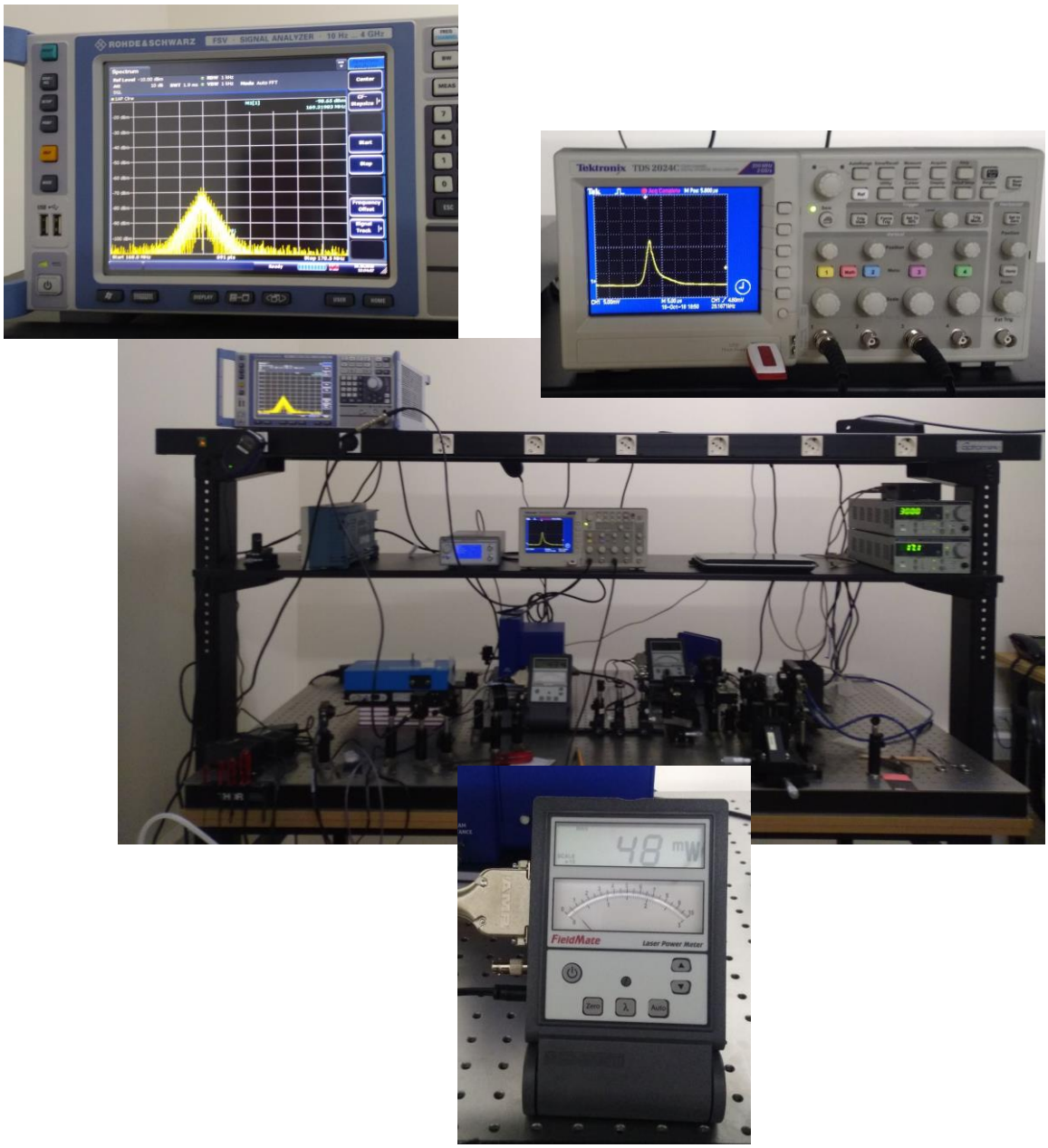
Şekil 33 2 kHz tekralama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YAG lazeri darbeleri



Şekil 34 33 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:LuAG lazeri darbeleri



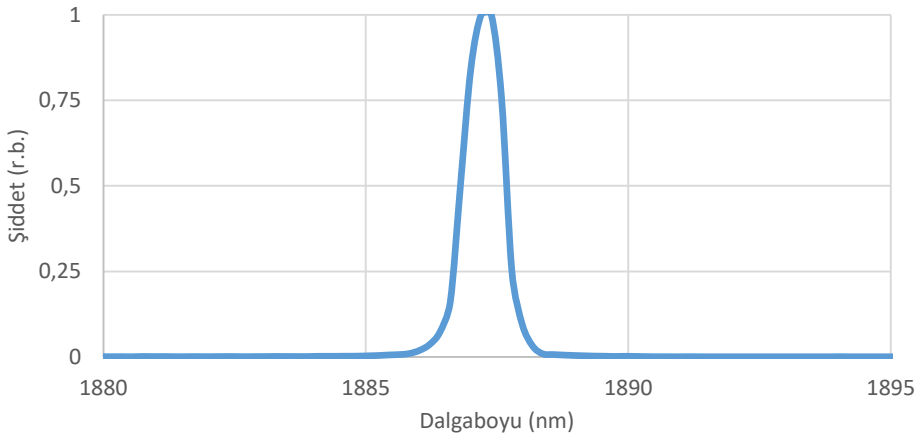
Şekil 35 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:LuAG lazeri darbeleri



Şekil 36 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Tm:LuAG lazer sisteminden bir görüntü

4.4.3 Q-Anahtarlamalı Tm:YLF Lazeri

Tm:YLF lazerinde ise diğer sistemlerin aksine 5 mm'lik kristal kullanıldığında Q-anahtarlamalı rejimler elde edilmiştir. Ayrıca diğer sistemlerden farklı olarak Q-anahtarlamalı rejimde sistemin dalgaboyu 1942 nm'den 1888 nm'ye geçiş yapmıştır (Şekil 37).

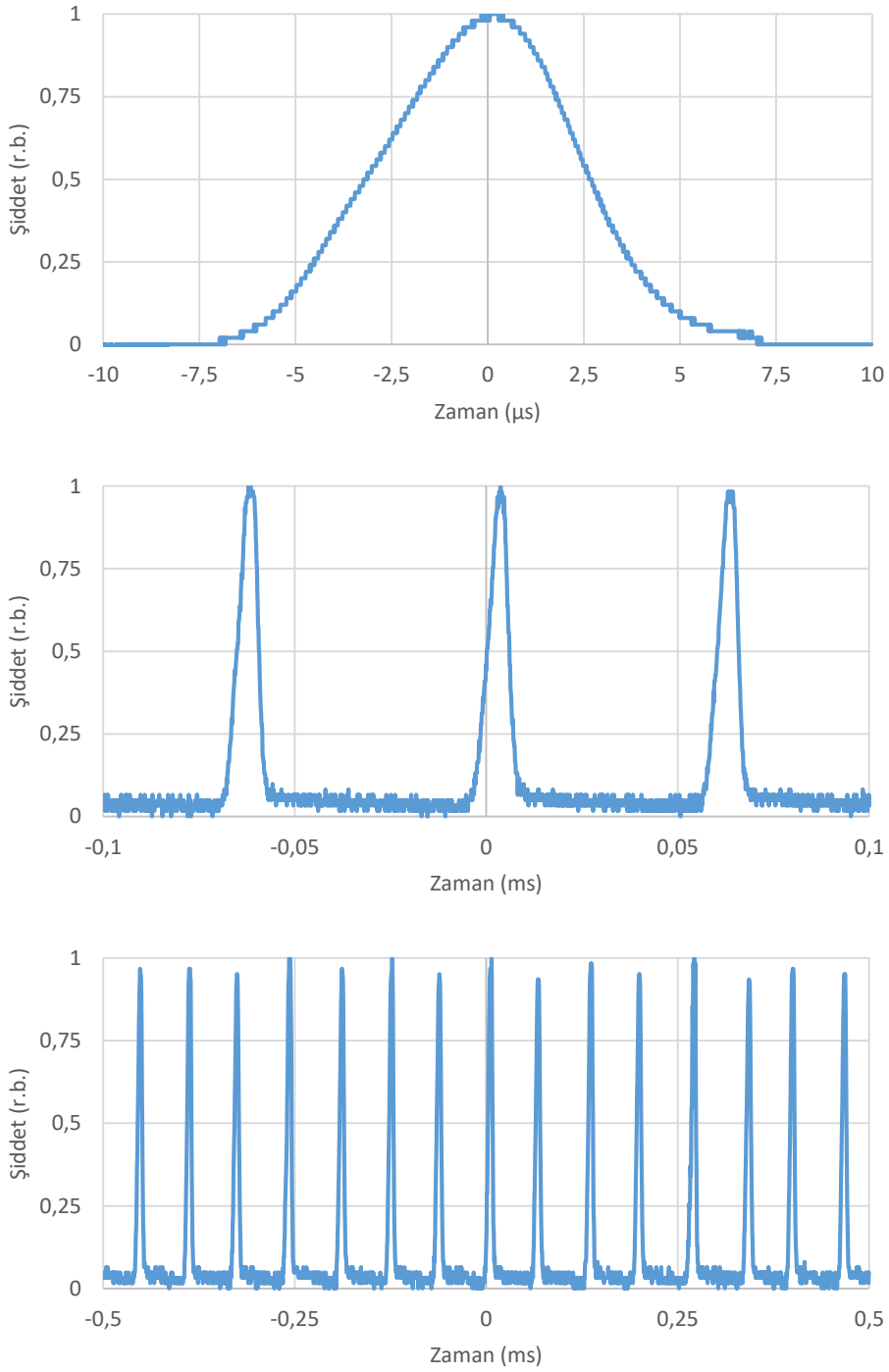


Şekil 37 Q-anahtarlamalı rejimdeki Tm:YLF lazerinin spektrumu

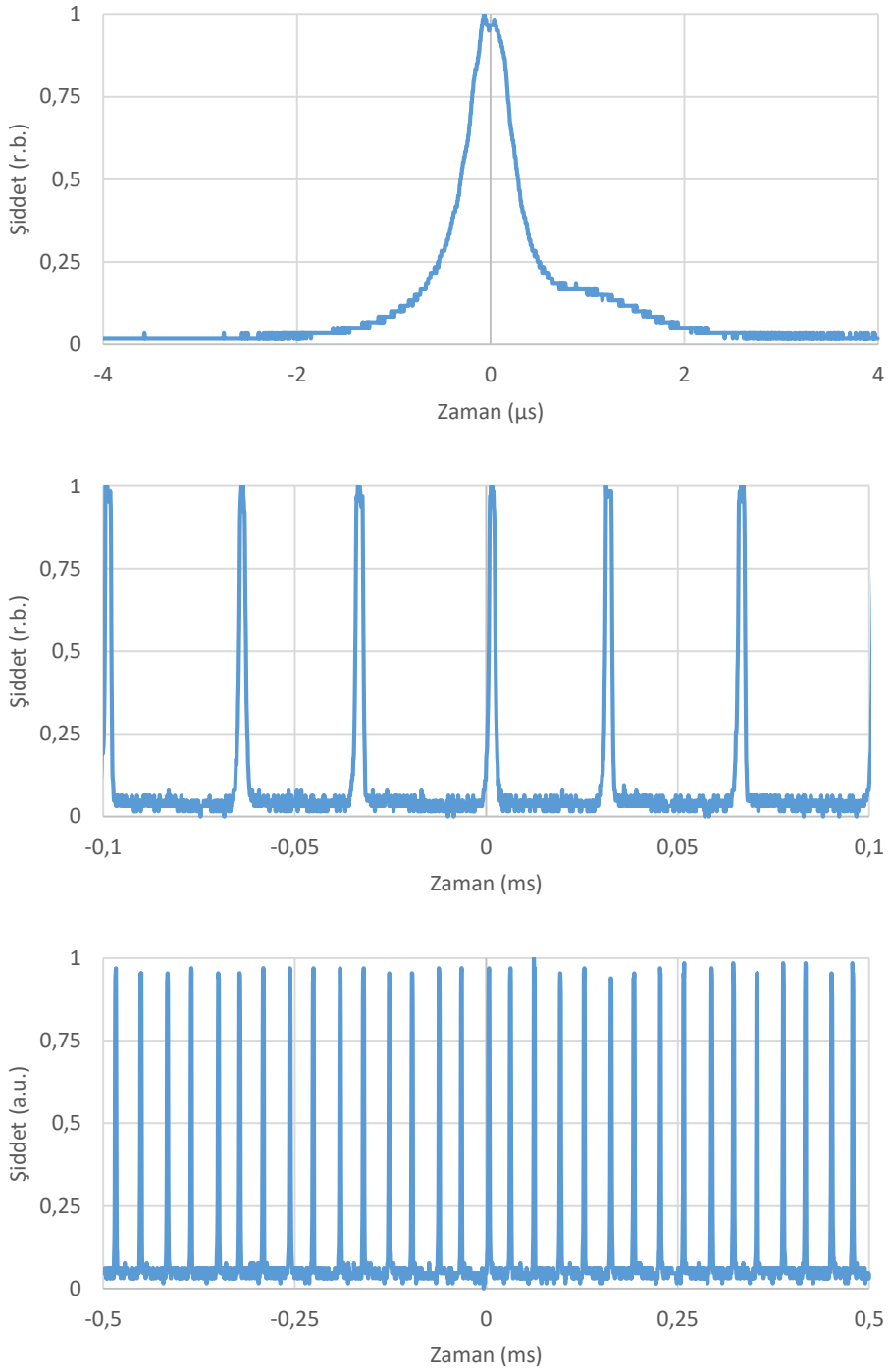
Sisteme SESAM eklendikten sonra kararlı bölgede yeri mikron hassasiyetinde değişimi yapıldığında 10 farklı noktada Q-anahtarlamalı darbeler elde edilmiştir (Tablo 5). Bu rejimdeki tekrarlama frekansları 16 kHz (Şekil 38) ile 100 kHz (Şekil 40) arasında değişmektedir. Bu rejimlerde 2.7 W darbe gücü (Şekil 39) ve 2.38 µJ darbe enerjisinde atımlar elde edilmiştir.

Tablo 5 Değişik noktalardaki Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazerinin özellikleri

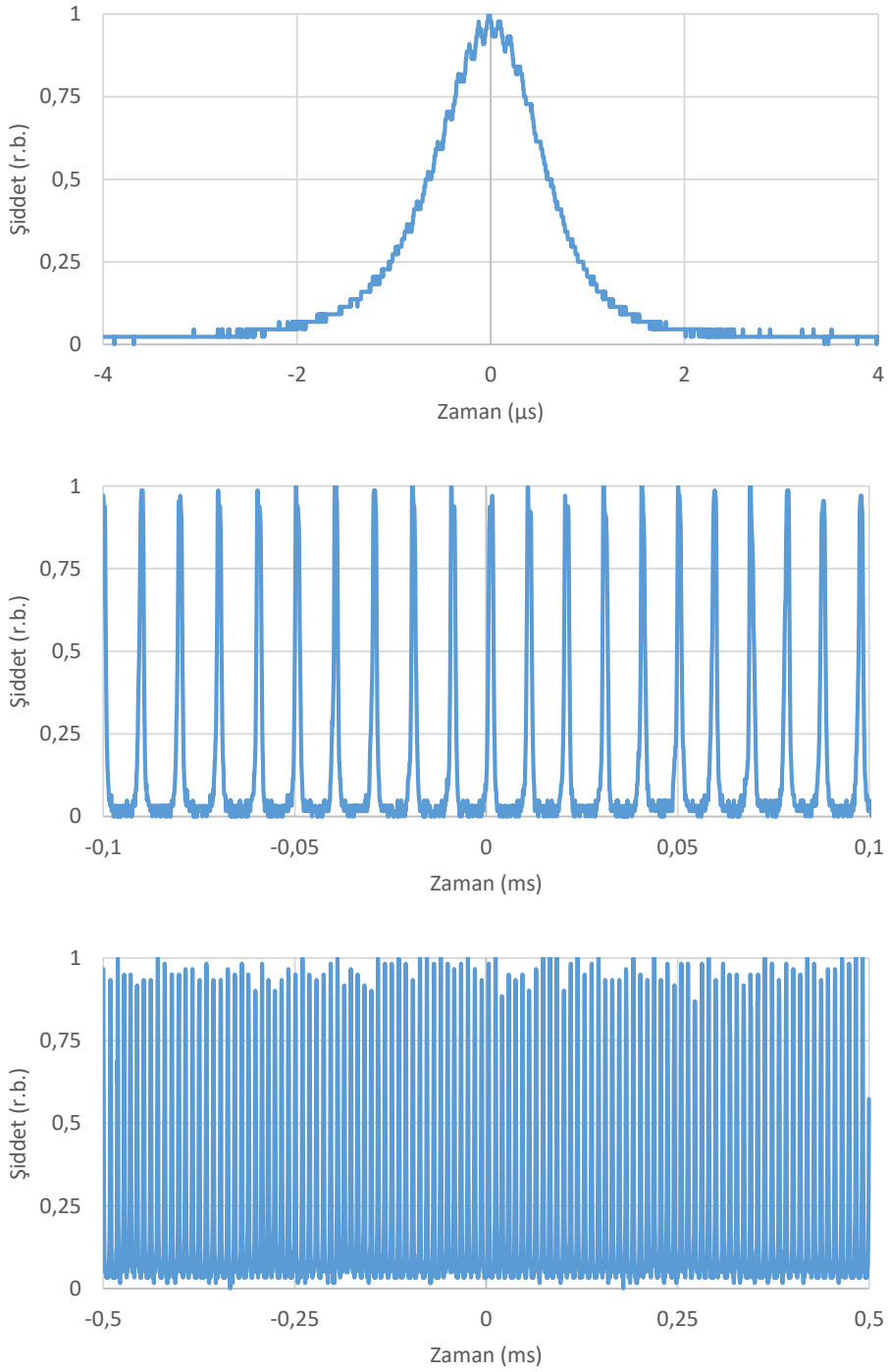
Tekrar Frekansı (kHz)	Çıkış Gücü (mW)	Darbe Genişliği (ns)	Tepe Gücü (W)	Darbe Enerjisi (nJ)
16	38	5840	0,41	2375,00
24	45	1010	1,86	1875,00
30	48	592	2,70	1600,00
38	51	956	1,40	1342,11
45	56	776	1,60	1244,44
59	58	948	1,04	983,05
67	63	548	1,72	940,30
79	63	592	1,35	797,47
92	63	812	0,84	684,78
100	62	1252	0,50	620,00



Şekil 38 16 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazer darbeleri



Şekil 39 30 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamlı Tm:YLF lazer darbeleri

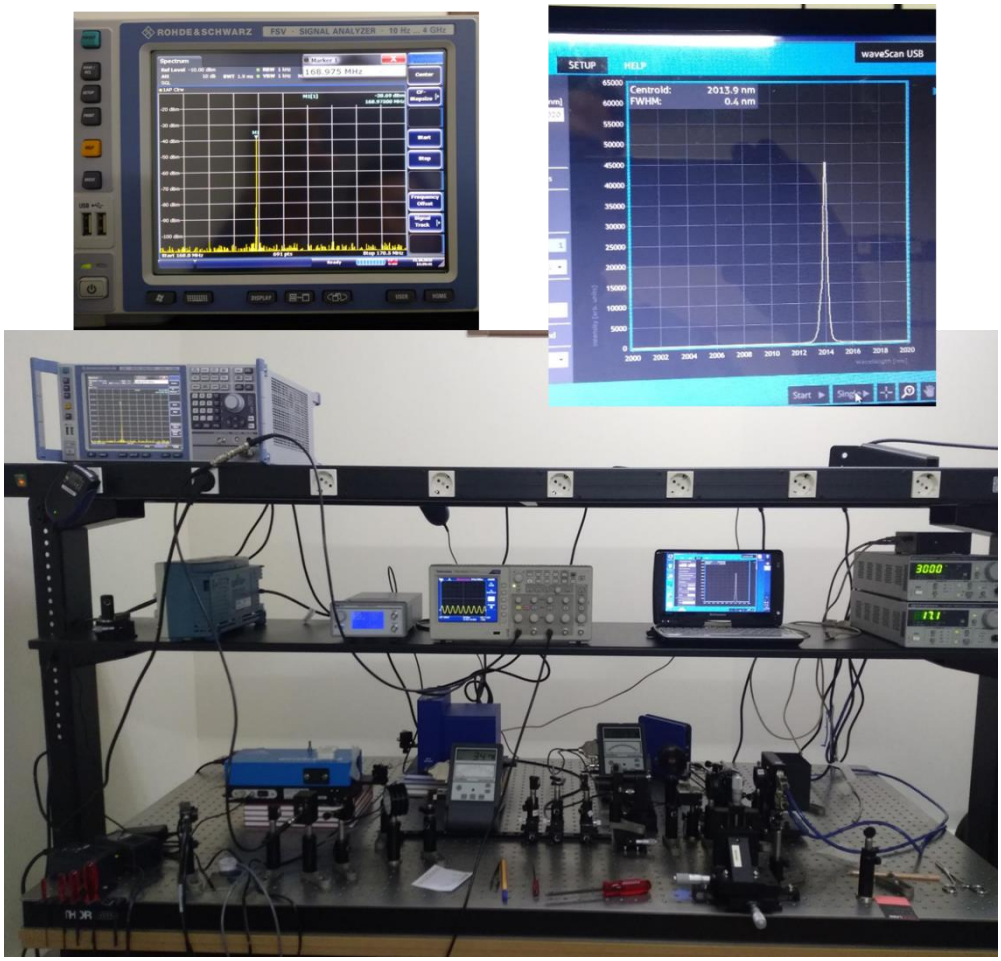


Şekil 40 100 kHz tekrarlama frekansına sahip Q-anahtarlamalı Tm:YLF lazer darbeleri

4.4.4 Kip-Kilitli Rejimdeki Tm^{3+} Lazeri Çalışmaları

Lazer sistemlerinde Q-darbeli rejimler elde edildikten sonra kip-kilitli rejimlerde çalışmalara başlanmıştır. Bunun için lazer sistemlerindeki elemanların konumları, açıları ve çeşitleri ile denemeler yapılmıştır. Tm:YLF lazer sistemlerinde darbeli rejimdeki çıkış dalgaboyu 1888 nm'dir. Bu dalgaboyu kullanılan aynaların gecikme bandı olan 1900-2100 nm bölgesinin dışında kaldığından hiçbir şekilde kip-kilitli rejimde sonuç elde edilememiştir.

Öte yandan Tm:YAG ve Tm:LuAG lazer sistemlerinde kip-kilitli rejimlerde sonuçlar RF spektrometresinde gözlemlenmiştir (Şekil 41). Ancak kullanılan aynaların gecikme miktarları yetersiz olduğundan lazerlerin spektrumlarında herhangi bir genişleme gözlemlenememiş (spektrometrenin çözünürlük bandında sonuç elde edilmiş) ve dolayısıyla darbelerde herhangi bir kararlılık elde edilememiştir. Bu durum daha önce proje önerisinde de öngörülmüş olup sorunun bir prizma çifti ile giderilmesi düşünülmüştü. Ancak proje hazırlanış döneminden günümüze kadar avro kurunun çok hızlı artışı (2,83 TL'den 6,25 TL'ye) sebebiyle prizma çiftinin alımı için bütçe yetersiz kalmış ve bu denemeler gerçekleştirilememiştir.



Şekil 41 Tm:YAG lazer sisteminde elde edilmiş ancak spektrumda genişleme görülememiş kip-kilitli rejimden bir görüntü

5. Tartışma/Sonuç

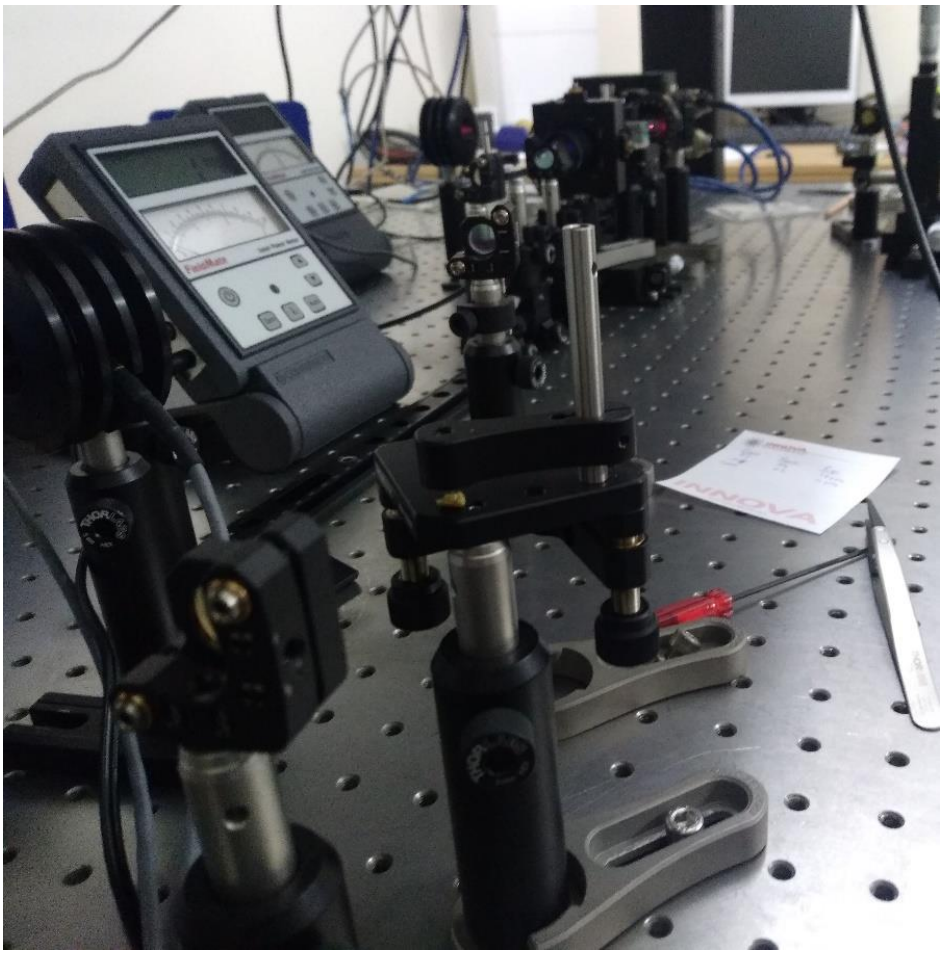
Deneylerimizin birinci aşamasında kristallerin en az %80 soğurması hedeflenmişti. Spektroskopik çalışmalarda Tm:YAG ve Tm:LuAG kristallerinin her iki uzunluğunda bu başarıya ulaşılmış olup Tm:YLF kristallerden 7-mm uzunluğundaki kristalle bu başarıya ulaşılmıştır. Dolayısıyla projemizin ilk %10'luk kısmını başarıyla tamamlamış olduk.

Deneylerimizin ikinci aşamasında sürekli dalga rejimlerinde en az 400 mW'lık güç değerleri hedeflenmekteydi. Her üç sistemde 600 mW'ın üzerinde değerler elde edilmiştir. Dolayısıyla proejmizin %45'lik (her bir sistem için %15 belirlenmişti) kısmını da başarıyla tamamlamış olduk.

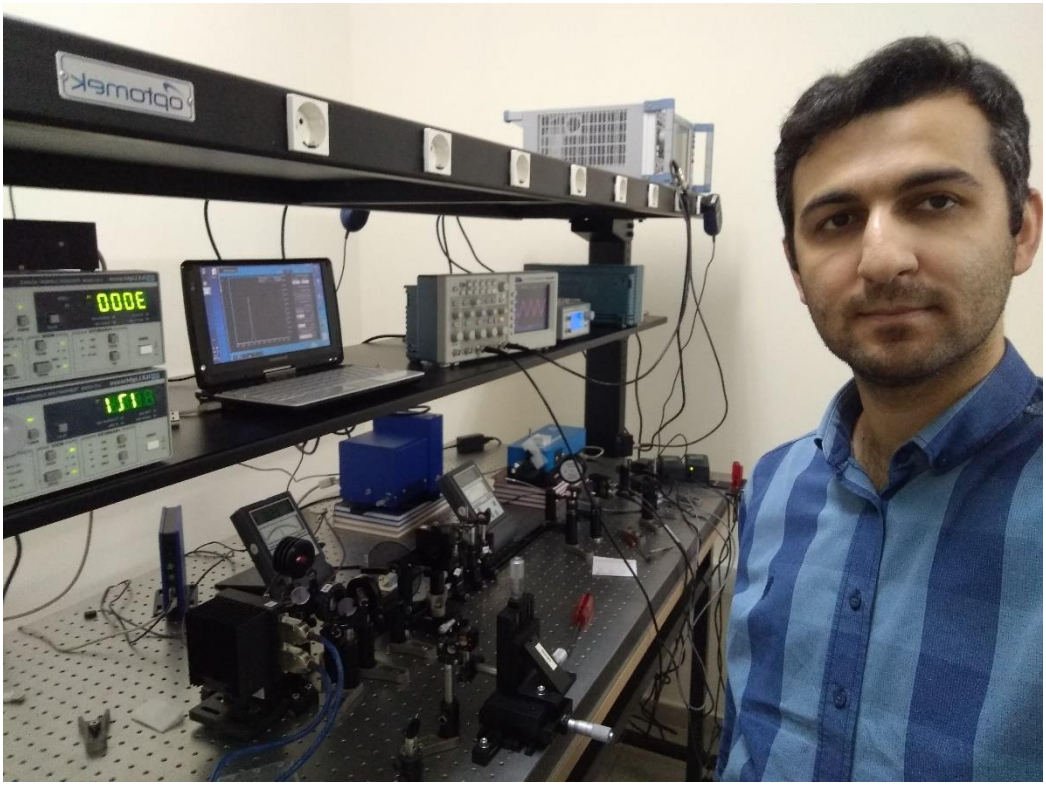
Projemizin son aşamasında ise sistemlerin darbeli rejimlerde çalışmaları hedeflenmişti. Bu rejimlerden Q-anahtarlamalı her bir sistem için %8, kip-kilitli rejimdeki sistemlerin her biri için ise %15 başarı değeri belirlenmişti. Her üç lazer türünde de Q-anahtarlamalı rejim elde edilmiştir (%24). Tm:YAG ve Tm:LuAG kip-kilitli rejimler elde edilmiştir. Ancak sistemlerde kullanılan aynaların gecikmelerinin yetersiz olması sebebiyle elde edilen darbe genişlikleri ölçülebilir zamanın çok üzerinde olmuştur. Tm:YLF lazerinde ise darbeleri rejimde lazer dalgaboyunun aynaların gecikme bandının dışına çıkması sebebiyle hiçbir şekilde kip-kilitli rejim elde edilememiştir. Bu durumda darbeli rejimlerdeki çalışmalarda en az %24 en çok %38 başarı sağlandığı kabul edilebilir.

Bunun dışında projemiz boyunca söz konusu Tm^{3+} lazer sistemlerinin çok renkli çalışmalarına olanak veren sistemler de kurulmuş olup detaylıca incelenmiştir. Özellikle Tm:YLF lazerinde 2 μm bölgesinde ilk defa üç ve dört renkli lazer ışıması elde edilmiştir.

Bu projede elde ettiğimiz darbeli rejimlerdeki sonuçların ilgili alanlarla bütünleşme ihtimali çok yüksektir. Bu amaç doğrultusunda Q-anahtarlamalı durumlarda ilk olarak kalsiyum böbrek taşı üzerinde denemeler yapılacaktır. Bunun için ilk olarak vücut dışında bir böbrek taşı üzerindeki etkileri incelenmesi için (projenin bitiş tarihinden raporun son yazılış tarihi arasındaki zamanda) bir adet insan vücudundan çıkan böbrek taşı temin edilmiş olup Q-anahtarlamalı rejimlerdeki ışınların üzerine düşürülmesi sonucu ortaya çıkacak olaylar incelenecektir. (Hazırlanmakta olan deney düzeneğinden bir resim Şekil 42'da gösteilmektedir.). Ayrıca bu projeden bir adet uluslararası makale yayınlanmış bir adet makale değerlendirme aşamasında olup ve bir adet makale de hazırlanma aşamasındadır. Bununla birlikte projemizden ikisi uluslararası üç adet konferans bildirisi yayınlanmıştır.



Şekil 42 Q-anahtarlamalı rejimlerdeki sistemlerin böbrek taşı üzerindeki etkilerini incelemek için hazırlanmakta olan düzenek



Şekil 43 Proje yürütücüsünün deney düzeneğinde çalışırken çekilmiş resmi

Kaynaklar

[1] U. Demirbas, A. Sennaroglu, F. X. Kärtner, and J. G. Fujimoto, "Comparative investigation of diode pumping for continuous-wave and mode-locked Cr^3+:LiCAF lasers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 26, no. 1, p. 64, 2009.

[2] M. Wolters *et al.*, "Tm:YAG laser en bloc mucosectomy for accurate staging of primary bladder cancer: Early experience," *World J. Urol.*, vol. 29, no. 4, pp. 429–432, 2011.

[3] G. Musi *et al.*, "Thulium–yttrium–aluminium–garnet (Tm:YAG) laser treatment of penile cancer: oncological results, functional outcomes, and quality of life," *World J. Urol.*, vol. 36, no. 2, pp. 265–270, 2018.

[4] P. Kallidonis *et al.*, "Thulium Laser in the Upper Urinary Tract: Does the Heat Generation in the Irrigation Fluid Pose a Risk? Evidence from an *In Vivo* Experimental Study," *J. Endourol.*, vol. 30, no. 5, pp. 555–559, Jan. 2016.

[5] N. J. Scott, C. M. Cilip, and N. M. Fried, "Thulium fiber laser ablation of urinary Stones through small-core Optical fibers," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 15, no. 2, pp. 435–440, 2009.

[6] C. Netsch, T. Bach, T. R. W. Herrmann, and A. J. Gross, "Update on the current evidence for Tm:YAG vapoenucleation of the prostate 2014," *World J. Urol.*, vol. 33, no. 4, pp. 517–524, 2015.

[7] H. Jelínková *et al.*, "Comparison of mid infrared lasers effect on ureter tissue," *Laser Phys. Lett.*, vol. 1, no. 3, pp. 143–146, 2004.

[8] J. Yu *et al.*, "An airborne 2-μm double-pulsed direct-detection lidar instrument for atmospheric CO2column measurements," *J. Atmos. Ocean. Technol.*, vol. 34, no. 2, pp. 385–400, Dec. 2017.

[9] R. Targ *et al.*, "Coherent lidar airborne wind sensor II: flight-test results at 2 and 10 μm," *Appl. Opt.*, vol. 35, no. 36, p. 7117, 1996.

[10] J. D. Kmetec, C. J. Grund, T. S. Kubo, and T. J. Kane, "Laser performance of diode-pumped thulium-doped Y_3Al_5O_12, (Y, Lu)_3Al_5O_12, and Lu_3Al_5O_12 crystals," *Opt. Lett.*, vol. 19, no. 3, p. 186, 1994.

[11] H. Kaushal and G. Kaddoum, "Optical Communication in Space: Challenges and Mitigation Techniques," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 19, no. 1, pp. 57–96, 2017.

[12] G. Galzerano, C. Svelto, and E. Bava, "Diode-pumped 2 μm optical oscillator for high-resolution spectroscopy and frequency metrology," *IEEE*

Trans. Instrum. Meas., vol. 50, no. 4, pp. 1003–1006, 2001.

[13] P. A. Budni, L. A. Pomeranz, M. L. Lemons, C. A. Miller, J. R. Mosto, and E. P. Chicklis, “Efficient mid-infrared laser using 19-μm-pumped Ho:YAG and ZnGeP_2 optical parametric oscillators,” *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 17, no. 5, p. 723, 2000.

[14] P. A. Budni, M. L. Lemons, J. R. Mosto, and E. P. Chicklis, “High-power/high-brightness diode-pumped 1.9-μm Thulium and resonantly pumped 2.1-μm Holmium lasers,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 6, no. 4, pp. 629–635, 2000.

[15] C. D. Nabors, J. Ochoa, T. Y. Fan, A. Sanchez, H. K. Choi, and G. W. Turner, “Ho:YAG Laser Pumped By 1.9-μm Diode Lasers,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 1603–1605, 1995.

[16] K. S. Lai *et al.*, “120-W continuous-wave diode-pumped Tm:YAG laser,” *Opt. Lett.*, vol. 25, no. 21, p. 1591, 2000.

[17] G. Rustad and K. Stenersen, “Modeling of laser-pumped Tm and Ho lasers accounting for upconversion and ground-state depletion,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 32, no. 9, pp. 1645–1655, 1996.

[18] N. P. Barnes, K. E. Murray, M. G. Jani, and R. L. Hutcheson, “Flashlamp-pumped-room-temperature Ho:Tm:LuAG laser,” 1995, vol. 2379, no., pp. 2374–2379.

[19] T.-Y. Tsai and M. Birnbaum, “Q-switched 2-μm lasers by use of a Cr^2+:ZnSe saturable absorber,” *Appl. Opt.*, vol. 40, no. 36, p. 6633, 2001.

[20] L. F. Johnson, J. E. Geusic, and L. G. Van Uitert, “Coherent oscillations from Tm3+, Ho3+, Yb3+and Er3+ions in yttrium aluminum garnet,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 127–129, Sep. 1965.

[21] G. J. Quarles, J. F. Pinto, and L. Esterowitz, “Broad Tunability of Flash-Pumped, Tm-Activated Garnet Lasers,” in *Advanced Solid State Lasers*, 1991, vol. 10, p. MIL3.

[22] G. J. Quarles, A. Rosenbaum, C. L. Marquardt, and L. Esterowitz, “Efficient room-temperature operation of a flash-lamp-pumped, Cr,Tm:YAG laser at 201 μm,” *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 1, p. 42, 1990.

[23] S. J. Hamlin, J. D. Myers, and T. R. Rexrode, “High-Efficiency, Flashlamp-Pumped CTH:YAG Lasers Operated Above Room Temperature,” in *Advanced Solid State Lasers*, 1992, vol. 13, p. ML6.

[24] R. C. Stoneman and L. Esterowitz, “Efficient, broadly tunable, laser-pumped Tm:YAG and Tm:YSGG cw lasers,” *Opt. Lett.*, vol. 15, no. 9, p. 486, 1990.

[25] G. L. Bourdet and R. A. Muller, “Tm,Ho:YLF microchip laser under Ti:sapphire and diode pumping,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 70, no. 3, pp. 345–349, 2000.

[26] X. Mateos *et al.*, “Efficient 2-μm continuous-wave laser oscillation of Tm3+: KLu(WO4)2,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 42, no. 10, pp. 1008–1015, 2006.

[27] F. Di Trapani *et al.*, “Continuous-wave laser performance of Tm:LuVO $_4$ under Ti:sapphire laser pumping,” *Laser Phys.*, vol. 24, no. 3, p. 035806, 2014.

[28] X. Mateos, F. Di Trapani, M. Aguiló, F. Díaz, U. Griebner, and V. Petrov, “Diode-pumped continuous-wave (Ho,Tm):KLu(WO_4)_2 laser with >1 W output power,” *Opt. Mater. Express*, vol. 4, no. 11, p. 2274, 2014.

[29] H. Zhu *et al.*, “1.96-μm Tm:YAG ceramic laser,” *IEEE Photonics J.*, vol. 9, no. 6, pp. 1–7, 2017.

[30] M. Yumoto, N. Saito, Y. Urata, and S. Wada, “128 mJ/Pulse, Laser-Diode-Pumped, Q-Switched Tm:YAG Laser,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 21, no. 1, pp. 364–368, 2015.

[31] 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*, vol. 109, no. 2, pp. 221–225, 2012.

[32] A. Wegrzyn, A. Rafalska-Łasocha, B. Dudek, and R. Dziembaj, “Nanostructured V-containing hydrotalcite-like materials obtained by non-stoichiometric anion exchange as precursors of catalysts for oxidative dehydrogenation of n-butane,” *Catal. Today*, vol. 116, no. 1, pp. 74–81, 2006.

[33] H. K. and A. S. and A. K. and G. Ozen, “Spectroscopic analysis of Tm 3+ :LuAG,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 19, no. 3, p. 36208, 2007.

[34] I. Razumova, A. Tkachuk, A. Nikitichev, and D. Mironov, “Spectral-luminescent properties of Tm:YLF crystal,” *J. Alloys Compd.*, vol. 225, no. 1, pp. 129–132, 1995.

[35] M. Schellhorn, A. Hirth, and C. Kieleck, “Ho:YAG laser intracavity pumped by a diode-pumped Tm:YLF laser,” *Opt. Lett.*, vol. 28, no. 20, p. 1933, 2003.

[36] S. So, J. I. Mackenzie, D. P. Shepherd, and W. A. Clarkson, “Power-scalable Ho : YAG Slab Laser , intracavity side- pumped by a Tm : YLF Slab Laser,” in *Advanced Solid-State Photonics*, 2006, pp. 7–9.

[37] B. H. Stevens, H. O. Trowbridge, G. Harrison, and S. F. Silverton, “Dentin

ablation by Ho:YAG Laser: Correlation of energy versus volume using stereophotogrammetry," *J. Endod.*, vol. 20, no. 5, pp. 246–249, 1994.

[38] M. Scheller, J. M. Yarborough, J. V. Moloney, M. Fallahi, M. Koch, and S. W. Koch, "Room temperature continuous wave milliwatt terahertz source," *Opt. Express*, vol. 18, no. 26, p. 27112, 2010.

[39] K. Kawase *et al.*, "Difference-frequency terahertz-wave generation from 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium-tosylate by use of an electronically tuned Ti:sapphire laser," *Opt. Lett.*, vol. 24, no. 15, p. 1065, 1999.

[40] P. Gu, F. Chang, M. Tani, K. Sakai, and C. L. Pan, "Generation of coherent cw-terahertz radiation using a tunable dual-wavelength external cavity laser diode," *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 38, no. 11 A, p. L1246, 1999.

[41] C. W. Pirnstill, B. H. Malik, V. C. Gresham, and G. L. Coté, "In Vivo Glucose Monitoring Using Dual-Wavelength Polarimetry to Overcome Corneal Birefringence in the Presence of Motion," *Diabetes Technol. Ther.*, vol. 14, no. 9, pp. 819–827, Jun. 2012.

[42] M. R. Jafarfard, S. Moon, B. Tayebi, and D. Y. Kim, "Dual-wavelength diffraction phase microscopy for simultaneous measurement of refractive index and thickness," *Opt. Lett.*, vol. 39, no. 10, p. 2908, 2014.

[43] M. Prigge *et al.*, "Color-tuned channelrhodopsins for multiwavelength optogenetics," *J. Biol. Chem.*, vol. 287, no. 38, pp. 31804–31812, Sep. 2012.

[44] S. Pan, X. Zhao, and C. Lou, "Switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber ring laser incorporating a semiconductor optical amplifier," *Opt. Lett.*, vol. 33, no. 8, p. 764, 2008.

[45] C. W. Chow, C. S. Wong, and H. K. Tsang, "All-optical NRZ to RZ format and wavelength converter by dual-wavelength injection locking," *Opt. Commun.*, vol. 209, no. 4–6, pp. 329–334, 2002.

[46] R. Gaulton, F. M. Danson, F. A. Ramirez, and O. Gunawan, "The potential of dual-wavelength laser scanning for estimating vegetation moisture content," *Remote Sens. Environ.*, vol. 132, pp. 32–39, 2013.

[47] F. M. Danson *et al.*, "Developing a dual-wavelength full-waveform terrestrial laser scanner to characterize forest canopy structure," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 198–199, pp. 7–14, 2014.

[48] S. L. Pan and J. P. Yao, "A wavelength-switchable single-longitudinal-mode dual-wavelength erbium-doped fiber laser for switchable microwave generation," *Opt. Express*, vol. 17, no. 7, pp. 5414–5419, Mar. 2009.

[49] B. M. Walsh, “Dual wavelength lasers,” *Laser Phys.*, vol. 20, no. 3, pp. 622–634, 2010.

[50] U. Demirbas, R. Uecker, J. G. Fujimoto, and A. Leitenstorfer, “Multicolor lasers using birefringent filters: experimental demonstration with Cr:Nd:GSGG and Cr:LiSAF,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 3, p. 2594, 2017.

[51] W. Q. Shi, R. Kurtz, J. MacHan, M. Bass, M. Birnbaum, and M. Kokta, “Simultaneous, multiple wavelength lasing of (Er, Nd):Y3Al5O12,” *Appl. Phys. Lett.*, vol. 51, no. 16, pp. 1218–1220, Oct. 1987.

[52] G. E. Peterson, A. D. Pearson, and P. M. Bridenbaugh, “Energy Exchange from Nd3+ to Yb3+ in Calibo Glass,” *J. Appl. Phys.*, vol. 36, no. 6, pp. 1962–1966, Jun. 1965.

[53] H. Maestre, A. J. Torregrosa, J. A. Pereda, C. R. Fernández-Pousa, and J. Capmany, “Dual-wavelength Cr3+:LiCaAlF6solid-state laser with tunable THz frequency difference,” *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 46, no. 11, pp. 1681–1685, 2010.

[54] L. Kunpeng *et al.*, “Dual-wavelength operation in all-solid-state Cr:LiSAF lasers with grating-controlled coupled-cavities,” *Opt. Laser Technol.*, vol. 74, pp. 1–5, 2015.

[55] Y. F. Chen, “cw dual-wavelength operation of a diode-end-pumped Nd:YVO4laser,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 70, no. 4, pp. 475–478, 2000.

[56] H. Y. Shen *et al.*, “10795- and 13414-nm: larger energy from a dual-wavelength Nd:YAlO_3 pulsed laser,” *Appl. Opt.*, vol. 32, no. 30, p. 5952, 1993.

[57] T. Waritanant and A. Major, “Dual-wavelength operation of a diode-pumped Nd:YVO4laser at the 1064.1 & 1073.1 nm and 1064.1 & 1085.3 nm wavelength pairs,” *Appl. Phys. B Lasers Opt.*, vol. 124, no. 5, p. 87, 2018.

[58] L. C. Kong *et al.*, “Dual-wavelength synchronous operation of a mode-locked 2-μm Tm:CaYAlO_4 laser,” *Opt. Lett.*, vol. 40, no. 3, p. 356, 2015.

[59] G. Li, B. Q. Yao, P. B. Meng, W. Wang, Y. L. Ju, and Y. Z. Wang, “InGaAs/GaAs saturable absorber for diode-pumped passively Q-switched mode-locking of Tm,Ho:YVO4laser,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 8, no. 1, pp. 42–45, 2011.

[60] C. H. Zhang, B. Q. Yao, G. Li, Q. Wang, Y. L. Ju, and Y. Z. Wang, “2041.3 nm/2054.6 nm simultaneous dual-wavelength single-longitudinal-mode Tm, Ho:YVO4 microchip laser,” *Laser Phys.*, vol. 20, no. 7, pp. 1564–

1567, 2010.

[61] I. Baylam, F. Canbaz, and A. Sennaroglu, “Dual-Wavelength Temporal Dynamics of a Gain-Switched 2-μm Tm3+:Lu2O3 Ceramic Laser,” *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 24, no. 5, pp. 1–8, 2018.

[62] P. Liu *et al.*, “A Diode-Pumped Dual-Wavelength Tm, Ho: YAG Ceramic Laser,” *IEEE Photonics J.*, vol. 8, no. 5, pp. 1–7, 2016.

[63] H. Zhang *et al.*, “Dual-wavelength, passively Q-switched Tm:YAP laser with black phosphorus saturable absorber,” *Opt. Mater. Express*, vol. 6, no. 7, p. 2328, 2016.

[64] J. Y.-L. and W. Z.-G. and L. Y.-F. and W. Yue-Zhu, “A Single-Longitudinal-Mode Dual-Wavelength cw Tm, Ho:GdVO 4 Microchip Laser,” *Chinese Phys. Lett.*, vol. 25, no. 9, p. 3250, 2008.

[65] B. Wang *et al.*, “Dual-wavelength mid-infrared CW and Q-switched laser in diode end-pumped Tm,Ho:GdYTaO4crystal,” *Laser Phys. Lett.*, vol. 15, no. 2, p. 25801, 2018.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi ERSEN BEYATLI
Proje No:	115F053
Proje Başlığı:	Yüksek Parlaklığa Sahip Ekonomik Çok-kipli Diyotlarla Uyarılan , Darbeli, Tm3+ Katkılı Katı-Hal Lazerlerinin Geliştirilmesi
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	RECEP TAYYİP ERDOĞAN Ü. MÜHENDİSLİK F. ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/09/2015 - 01/09/2018
Onaylanan Bütçe:	355500.0
Harcanan Bütçe:	303366.95
Öz:	Tm3+ katkılı lazer sistemleri, içine katkılandığı lazer kristalinin özelliğine göre 780 nm dalga boyu aralığında uyarıldıklarında, 2 ?m bölgesinde ışıma yapabilmektedirler. Bu bölge su tarafından en yüksek soğurulan bantlardan biri olduğu için, günümüzde lazerli doku kaynaştırma, ürolojik kanserlerin erken teşhisi gibi suyun yüksek soğurganlığını gerektiren pek çok biyomedikal alanda, 2 ?m bölgesinde ışıma yapan lazerler kullanılmaktadır. Bunun yanında Tm3+ lazerleri günümüzde lazer radar, atmosferik katmanlar arası iletişim ve spektroskopi gibi alanlarda da önemli roller üstlenmektedirler. Daha önce yapılan çalışmalarda Tm3+ lazerleri, flaş lambası, Ti:safir lazeri ve yüksek güçlü çok-kipli AlGaAs diyotlarla uyarılmıştır. Fakat bu sistemler elektriksel açıdan oldukça verimsiz, çok yüksek maliyetli ve hantaldır. Bu yüzden ihtiyaç duyulan alanlara bütünleşmesi oldukça karmaşıklaşmış, sadece yüksek teknolojiye sahip enstitüler ve üniversitelerde kendilerine yer bulabilmişlerdir. Projemizde, 780 nm?de ışıma yapabilen 3W?lık AlGaAs lazer diyotları kullanarak, yüksek verimliliğe sahip Tm:YAG, Tm:LuAG ve Tm:YLF katı-hal lazer sistemi geliştirilmiştir. AlGaAs lazer pompa diyotları sayesinde, daha önce geliştirilen sistemlere göre, çok daha kompakt ve düşük maliyetli lazer sistemleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalarımızda, 2 µm bölgesinde ışıma yapabilen lazerlerden 600 mW?ın üzerinde çıkış güçleri elde edilmiştir. Sistemlerde çift kırınımlı dalda boyu ayarlayabilen plaka (birefringent tuning plate) kullanarak, lazerlerin çıkış dalgaboyu, 2 µm civarında en az 140 nm kadar sürekli olarak değişim elde edilmiştir. Ayrıca, plakanın kritik açılarında 2 µm bölgesinde, değişik özelliklere sahip çift dalgaboyu ışımaları elde edilmiştir. Bununla birlikte Tm:YLF lazerinde kristalin çift eksen özelliğine dayanarak üç ve dört renkli lazer ışımaları gözlemlenmiştir. Daha sonra, lazerlere yarıiletken doyabilen soğurucu (SESAM) ekleyerek, sistemlerin kararlı halde farklı farklı özelliklere sahip darbeli rejimde çalışabildiğini gözlemlenmiştir. Bu deneylerde, Watt seviyelerinde darbe gücüne ve µJ mertebesinde darbe enerjisine sahip atımlar elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, 2 µm bölgesinde çalışabilen ekonomik, aynı zamanda da kompakt Tm3+ lazer sistemlerinin geliştirilmesine önemli katkılarda bulunacak ve ilgili alanlardaki çalışmalarla kolaylıkla bütünleşerek çalışmaları hızlandıracaktır.
Anahtar Kelimeler:	Diyot Pompalı Katı-hal lazerleri, Tm3+ lazerleri, Darbeli lazerler, Çok-renkli lazerler
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK