TÜBİTAK

Senkronize Olarak Pompalanan Yeni Bir Tip Raman Fiber Lazerinin Teorik Ve Deneysel İncelenmesi

Program Kodu: 1001

Proje No: 115F098

Proje Yürütücüsü:
Dr. Parviz ELAHI

Bursiyer:
Özgün YAVUZ

OCAK 2018
ANKARA

Önsöz

Günümüzde mevcut lazerlerin oluşturamayacağı yeni dalgaboyu bandının oluşturulması için fiber lazerlerin doğrusal olmama özelliğinden yararlanılabilmektedir. Bu projede, mevcut nadir toprak katkılı fiberlerin emisyon bandının dışında kalan dalgaboyu bölgelerinde eşzamanlı olarak pompalanan Raman saçınımı etkisi ile iki yüz femtosaniye mertebelereine kadar sıkıştırılabilen atımları, 1117nm, 1170 nm, 1215nm, 1260 nm ve 1320 nm'de üretebilen İterbiyum (Yb) ve 1625 nm'de ürtebilen Erbiyum (Er) katkılı Raman fiber lazerler Tübitak desteği ile geliştirilmiştir.

İçindekiler

1. Abstract……1
2. Özet……2
3. Eşzamanlı pompalanan tümüyle pasif Raman lazeri ……3
4. Eş zamanlı pompalanan fosfosilikat fiberli Raman Lazeri ……5
4.1. Birinci Stokes: 1117 nm merkezli Raman sinyali oluşturulması ……5
4.2. İkinci Stokes: Raman sinyalinin 1170 nm mekezli oluşturulması ……6
4.3. Üçüncü Stokes: 1215 nm merkezli Raman sinyalinin oluşturulması ……7
4.4. Dördüncü Stokes: 1260 nm merkezli Raman sinyali oluşturulması ……7
5. Raman lazeri ile uygulama: faz farkı ölçümü……8
6. Teorik model……9
7. Raman lazerini pompalamak için yüksek güçlü Er katkılı fiber lazer geliştirilmesi……9
7.1. Kip kilitli salıngaç karakterizasyonu……10
7.2. Genişletilmiş atım yükseltme (Chirped-pulse amplification)……11
8. Er-tabanlı eşzamanlı pompalanan Raman lazeri……13
9. Sonuçlar ve tartışma……16
10. Kaynakça……17

Şekil listleri

Şekil. 1. Eşzamanlı olarak pompalanan tümüyle pasif fiber Raman salıngaç şeması……....3
Şekl 2. Eşzamanlı olarak pompalanan tümüyle pasif bir Raman salıngaç lazerinde üretilen Raman sinyalinin optik tayfı ……..…..4
Şekil 3. Eşzamanlı olarak pompalanan tüm pasif bir Raman lazerinde üretilen Raman sinyalinin otokorelasyonu ölçümü……...4
Şekil 4. Raman kovuğunun şematik diyagramı……..……..…5
Şekil 5. Raman lazerinin senkronize geri besleme mevcut iken…….……6
Şekil 6. Raman lazerinin senkronizasyon öncesi……..……..6
Şekil 7. Raman lazerinin senkronizasyon öncesi …….. ……7
Şekil 8. Raman lazerinin senkronizasyon öncesi…….……8
Şekil 9. Si yüzeyaltı yapıların yol açtığı faz farkının ölçümünde kullanılan düzeneğin şematik diyagramı……8
Şekil 10. Teorik modelleme sonuçları……9
Şekil 11. Raman pompası olarak geliştirilen Er fiber lazer yükselteç……..…..10
Şekil 12. Salıngaç karakterizasyonu……11
Şekil 13. Yükselteç karakterizasyonu……..…12
Şekil 14. Atım yayılım simülasyonundan elde edilen……12
Şekil 15. Er-tabanlı eşzamanlı pompalanan tümüyle pasif Raman salıngacının şematik diyagramı……..……13
Şekil 16. Eşzamanlama sonrası ölçülen Raman sinyal çıktısının tayfı……..14
Şekil 17. Raman sinyalinin (katı çizgi) ölçülen şiddet otokorelasyonu……...14
Şekil 18. Er-Raman fiber lazer düzeneği……15
Şekil 19. Mode-locked osilatör. 1550 nm, 43 MHZ……...15
Şekil 20. Raman cavity……..…16

1. Abstract

Rare-earth-doped fiber lasers, based on ytterbium, erbium, and thulium, take significant advantages compare to solid-state lasers [1]. Nonlinear effects in fiber lasers are significant and generation of a high energy and ultra-short pulses are quite challenging. Nevertheless, some benefits and advantages are arising from nonlinearity, such as Raman and parametric amplification, which are promising for generating of new wavelength band, which cannot be covered by existing lasers. For example, Raman scattering can be used to achieve spectral regions, which are out of emission band of the current rare-earth doped fibers. Synchronously pumped Raman lasers are important for generating high-power signals, which are able to be compressed down to sub few-hundred femtoseconds [2-4].

In this project, we developed the synchronously pumped all-passive-fiber Raman laser system and generated about 160 mW Raman signal centered at 1115 nm. The Raman signal dechirped to 200 fs by using a pair of transmittance grating. To achieve longer wavelengths and generate higher order Stokes, we have developed a synchronously pumped all-passive-fiber Raman laser basd on phosphosilicate fiber and generated coherent pulses centered at different wavelengths i.e.1117nm, 1170 nm, 1215nm, and 1260 nm [5].

As an application of the Raman laser system, we quantify the phase delay and refractive index of silicon (Si)subsurface structures as functions of wavelength. Si subsurface structures are a product of new fabrication technology. We measure the refractive index of the subsurface Si structures through interferometric method, and then track its spectral dependency by utilizing the large tunable range of the proposed laser [5].

To understand nonlinear interaction of pump and Raman signals, the coupled complex Ginzburg-Landau equation (CGLE) need to be solved. We developed a model to describe an approximate, but still accurate, analytical solution of the CGLE and exteracted the stationary solution. The effect of some important parameters, such as initial chirp, band width, Raman gain, etc., on generation of stable pulse has been studied.

We developed a high-power Er-doped fiber laser at 1.55 μm, implementing chirp pulse amplification using single-mode fibers for diffraction-limited beam quality [6]. The laser generates 80 nJ pulses at a repetition rate of 43 MHz, corresponding to an average power of 3.5 W, which can be compressed down to 175 fs. We then developed a synchronously pumped Er-based Raman fiber laser and generated 45 mW, 200-fs long pulses at 1625 nm central wavelength.

In this report, we will first review our Raman laser development based on Yb-doped fiber briefly. The details were presented in the reports 1 and 2. Finally, we will report on Er-based Raman laser, which has been developed in the past six months.

Key words: Raman laser, Synchronously-pumped Raman, ultra-short Raman pulse.

2. Özet

İterbiyum, erbiyum ve tulium bazlı nadir toprak katkılı fiber lazerler, katı hal lazerlere kıyasla yüksek esneklik ve yüksek ışın kalitesinden dolayı önemli avantajlara sahiptirler [1]. Fiber lazerlerdeki doğrusal olmayan etkiler, küçük çekirdek boyutundan dolayı katı hal lazerlerden daha önemlidir ve sonuç olarak fiber lazer sistemlerinden yüksek enerji ve ultra kısa darbe üretimi çok zordur. Öte yandan, günümüzde mevcut lazerlerin oluşturamayacağı yeni dalgaboyu bandının oluşturulması için fiber lazerlerin doğrusal olmama özelliğinden yararlanılarak Raman ve parametrik amplifikasyon gibi umut veren birkaç yöntem vardır. Örneğin, mevcut nadir toprak katkılı fiberlerin emisyon bandının dışında kalan dalgaboyu bölgeleri elde etmek için Raman saçılması kullanılabilir. Eşzamanlı olarak pompalanan Raman lazerleri, yüz femtosaniyenin altına kadar sıkıştırılabilen yüksek güçlü sinyaller üretmek için önemlidir [2-4].

Bu projede, ilk olarak eşzamanlı olarak pompalanan tüm-pasif-fiber Raman lazer sistemi geliştirilmi ve 1115 nm merkez dalgaboyuna sahip yaklaşık 160 mW'lık Raman sinyali üretilmiştir. Raman sinyali bir çift geçirgen kırınım ağı (ızgarası) kullanarak 200 fs'ye sıkıştırılmıştır. Ayrıca, daha uzun dalga boylarına ulaşmak için daha yüksek Stokes seviyesinde Raman sinyali üretme hedefli, senkronize olarak pompanan tümüyle pasif fiber Raman lazerini fosfosilikat fiberler ile geliştirdik ve çeşitli dalga boylarında eşevreli (coherent) atımlar elde ettik [5].

Ayrıca, kurmuş olduğumuz Raman lazerinin bir uygulamasını da gerçekleştirerek, yüzey altı Silisyum (Si) oluşumların yol açtığı faz gecikmelerini ve bu oluşumların kırılma endekslerininin dalga boyuna göre değişimlerini ölçtük. Yüzeyaltı Si oluşumların kırınım endekslerini interferometrik yöntem ile ölçtük ve dalga boyuna göre değişimini de lazerimizin geniş tayfsal ayarlanabilirliği sayesinde gözlemledik [5].

Biz bu proje kapsamında, bu denklemin yaklaşık ancak hatasız analitik çözümüne yönelik bir model oluşturarak kararlı bir çözüm bulduk. İlaveten, ilk çınlama (initial chirp), tayf genişliği, Raman kazancı, vb. bazı önemli parametrelerin, kararlı atımlar oluşması üzerindeki etkilerini araştırdık.
Son altı ay içinde, esas olarak Er tabanlı eşzamanlı pompalanan Raman lazer geliştirme ele alındı. İlk olarak, 1.55 um'de yüksek güçlü bir Er katkılı fiber lazer geliştirdik ve kırınım sınırlı ışın kalitesine ulaşma amacı ile tek modlu fiber kullanarak genişletilmiş atım yükseltme yöntemini (chirped pulse amplification) uyguladık [6]. Geliştirdiğimiz lazer ile, 175 fs'ye kadar sıkıştırılabilen ortalama 3.5 W'lik bir güce karşılık gelen, 43 MHz tekrarla sıklığında 80 nJ darbe üretebildikr

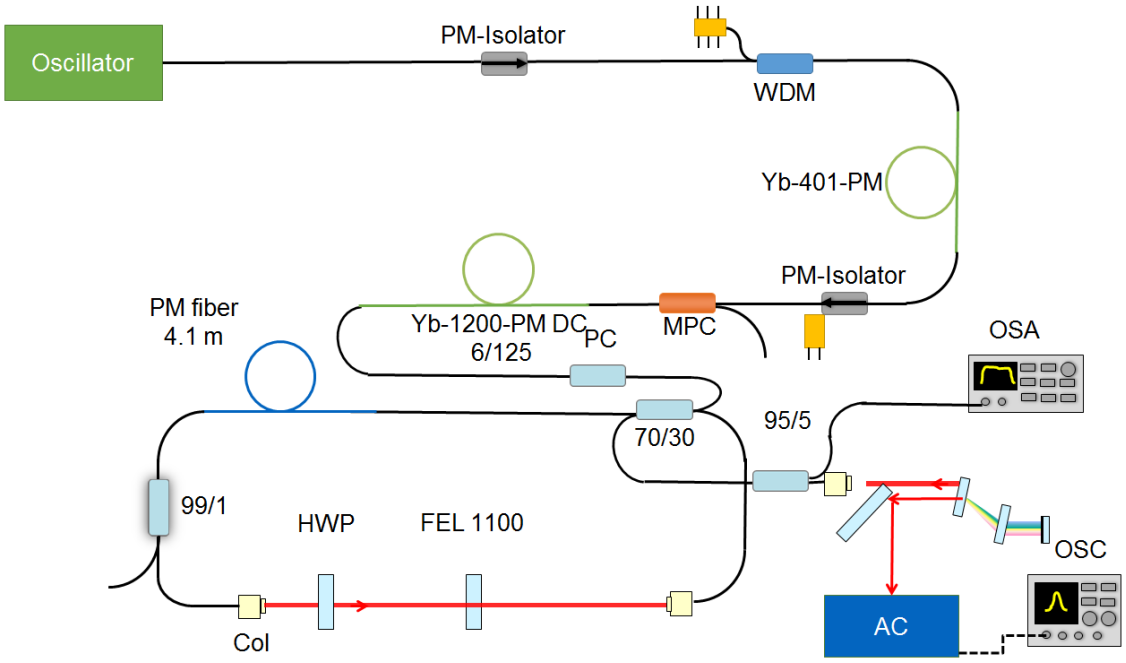
Daha sonra, lazer sistemi, Raman sinyali üretmek için bir pompa kaynağı olarak kullanıldı. Eşzamanlı olarak pompalanan Er tabanlı bir Raman fiber lazer geliştirdik ve 1625 nm merkez dalga boyunda 200 fs uzunluğunda darbeler ürettik. Raman sinyalinin ortalama gücü yaklaşık 45 mW'dır.

Bu raporda, öncelikle, projenin öceki dönemlerinde gerçekleştirmiş olduğumuz Yb-katkılı fiber bazlı Raman lazer geliştirme çalışmalarımızı kısaca gözden geçireceğiz. Bu çalışmalar daha ayrıntılı olarak 1 ve 2. raporlarda sunulmuştu. Bu özet kısım sonrasında, son altı ay içinde geliştirilen Er tabanlı Raman lazeri üzerinde bilgi verilecektir.

Anahtar kelimeler: Raman lazeri, Eşzamanlı pompalanan Raman, ultra-kısa Raman atımları.

3. Eşzamanlı pompalanan tümüyle pasif Raman lazeri

Yüksek ortalama güçte Raman darbeleri üretmek için tümüyle pasif eşzamanlı olarak pompalanan Raman lazer sistemi geliştirilmiştir. Sistem şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu konfigürasyonun en önemli avantajlarından biri, pompa ve Raman'ın bağımsızlığıdır; bu da, Raman kavitesine girmeden önce ilk cıvıltı, güç ve darbe genişliği gibi pompa sinyali parametrelerini kontrol etmemizi sağlar. İlk yükseltici, ortalama 210 mW'lık ortalama güçle, yaklaşık 6 ps uzunluktaki darbeler üretmektedir. Ölçülen spektral bant genişliği 1065 nm dalgaboyuna merkezli ve yaklaşık genişliği 17 nm'dir. İkinci yükseltici 6 µm çekirdek çapına ve 125 µm ilk kılıf çapına sahip 3.2-m uzunluğunda Yb1200-PM/DC fiber içerir. 16 W gücünde, dalga boyu ve sıcaklık sabitlenmiş diyot lazerin pompalanması için bir pompa-sinyal birleştirici kullanılmaktadır.

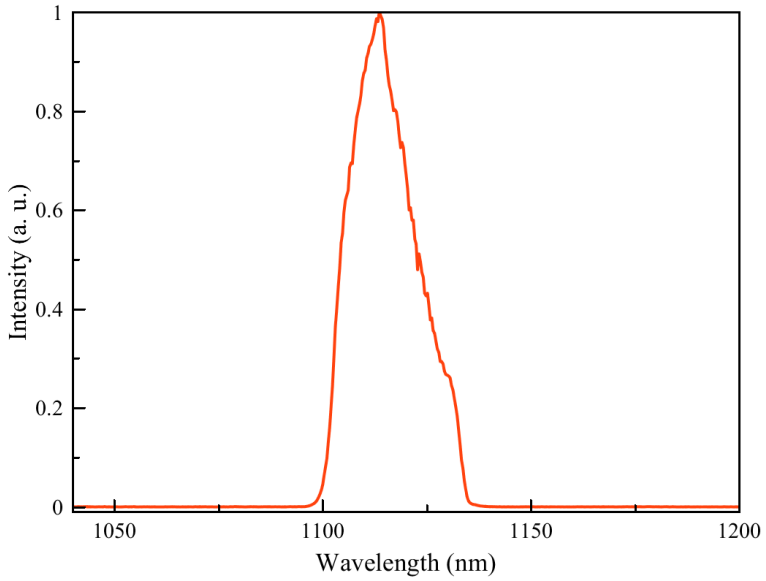


Şekil. 1. Eşzamanlı olarak pompalanan tümüyle pasif fiber Raman salıngaç şeması.

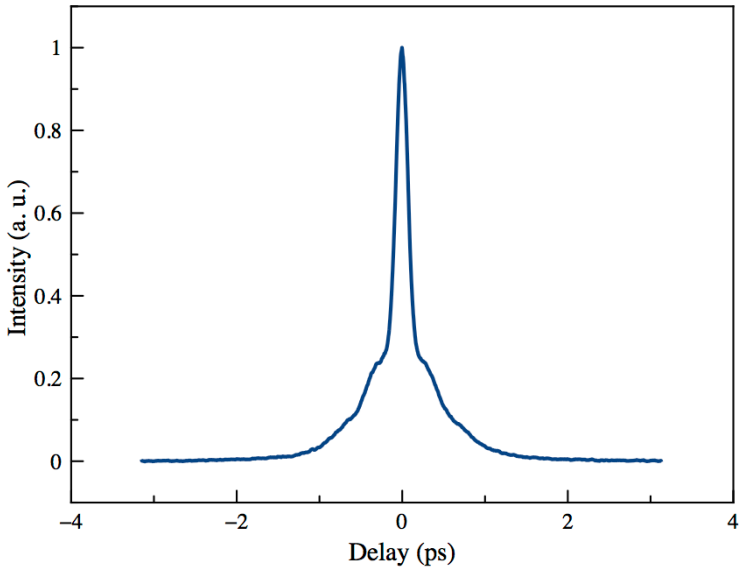
Raman sinyalini yükseltmek ve eşevreli hale getirmek için, Raman sinyalinin bir kısmı lazere geri beslenmektedir. Birleştici ve 4.1-m uzunluktaki pasif fiberin ardından pompa ve sinyali birleştiren 70/30 birleştici kullanılmıştır. Sonrasında Şekil-1'de gösterildiği gibi tek modlu bir fiber çıkışlı koşutlayıcı (col) kullanılmıştır. Kutuplu olarak koşutlayıcıdan çıkan sinyalin kutplanma yönü yarım dalga plakası (HWP) ile ayarlanabilmekte ve 1064 nm'deki pompa sinyali uzun geçiş filtresi (FEL 1100) ile elenmektedir. Tekrar tek modlu fiber çıkışlı kolimatör, ışığı salıngaç ile birleştirir. Koşutlayıcılar arası mesafe, hareketli platform ile

hassas şekilde ayarlanabilmektedir. 70/30 ayırıcı çıkış ve monitör portu olarak kullanılmaktadır. Çıktının %5'i optik spektrum analizör cihazına, geri kalan kısmı da sıkıştırma için bir çift kırınım ağına gönderilmektedir. Bu deneyde kullanılan sıkıştırıcı ızgaraları, 300 çizgi/mm yoğunluğa sahip geçirigen ızgaralardır.

Şekil 2, sıkıştırıldıktan sonra Raman sinyalinin ölçülen optik spektrumunu ve Şekil 3 şiddet otokorelasyonunu göstermektedir. Bir geçirgen ızgarayla (300 çizgi/mm) sıkıştırdıktan sonra yaklaşık 200 fs genişliğinde darbe elde edilmiştir (Şekil 3).



Şekl 2. Eşzamanlı olarak pompalanan tümüyle pasif bir Raman salıngaç lazerinde üretilen Raman sinyalinin optik tayfı .

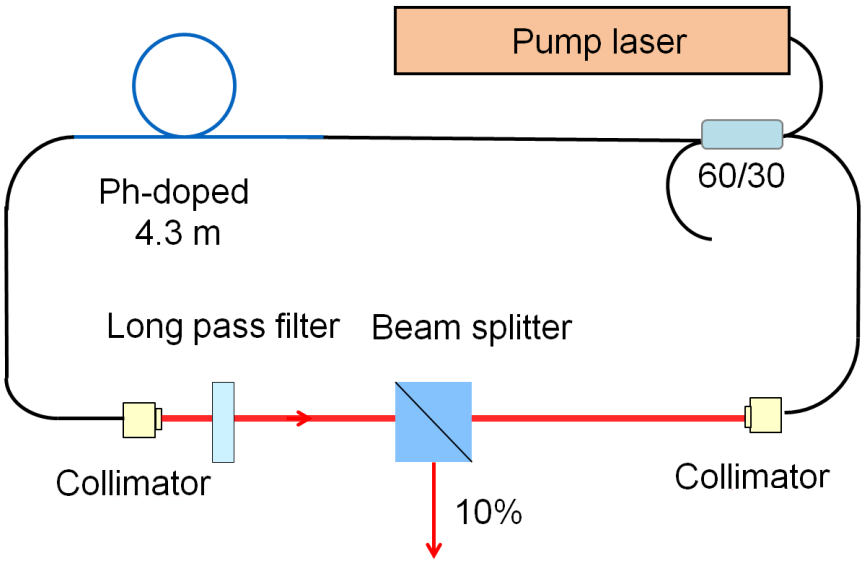


Şekil 3. Eşzamanlı olarak pompalanan tüm pasif bir Raman lazerinde üretilen Raman sinyalinin otokorelasyonu ölçümü.

4. Eş zamanlı pompalanan fosfosilikat fiberli Raman Lazeri

Raman lazeri, 1060-nm merkezli 3 pikosaniye (ps) genişliğinde atımlar üreten bir kip-kilitli salıngaç, iki kademeli yükselteç ve tümüyle pasif Raman kovuğundan oluşmaktadır. Raman kazancını arttırmak ve daha yüksek Stokes seviyesinde sinyaller üretebilmek amacı ile, kip-kilitli salıngacımızın tekrar frekansını, kovuk içerisine 80 cm pasif fiber ekleyerek 37.5'den 35 MHz'e indirdik. Salıngacın çıkış gücü ve tayf genişliği hali hazırda 8 mW ve 16 nm civarındadır. Yükselteçlerin yapısı Şekil 1'de görülen hali ile aynıdır ve ilk kademeden 200 mW çıkış alınırken, ikinci kademe 2 W'a kadar çıkmaktadır.

Şekil 4'te görülen Raman kovuğunun optik kaybını düşürerek, geri beslenen gücü arttırmak amacı ile 70/30 yerine 60/40 çiftleyici (%60 pompa kolu, %40 Raman sinyali) kullandık. Çiftleyici sonrası pasif fiber 80 cm uzunluğunda olup, 4.3 m uzunluğunda P-katkılı fibere bağlanmıştır. 90/10 oranlı ışın ayırıcı küp ile çıkış alınmaktadır.

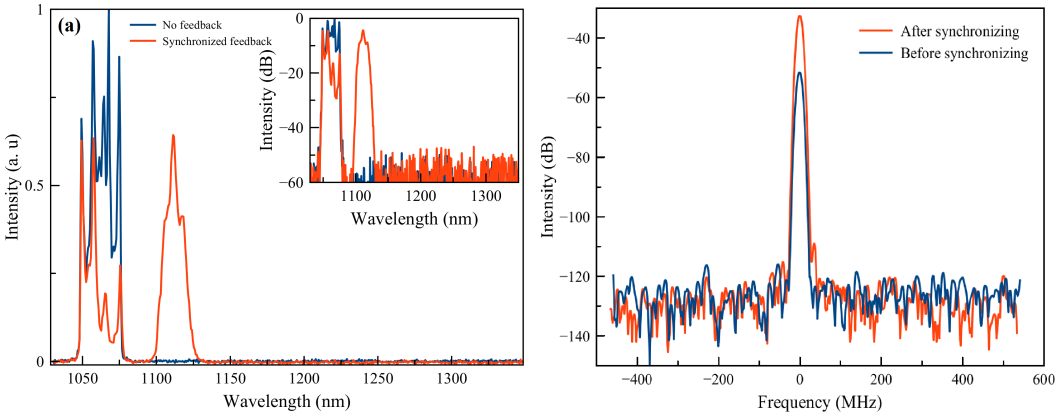


Şekil 4. Raman kovuğunun şematik diyagramı. Farklı filtreler kullanılarak, farklı Stokes seviyesinde sinyaller elde edilebilmektedir.

4.1. Birinci Stokes: 1117 nm merkezli Raman sinyali oluşturulması

Konvansiyonel pasif fiberde Raman eşiği P-katkılı fibere göre daha düşüktür ve ilk Stokes sinyali 1117 nm'de oluşur. Biz 1100 nm ötesini geçiren filtre ile 1060 nm'deki pompa sinyalini eleyerek Raman kovuğuna 1117-nm merkezli sinyali Raman kovuğuna soktuk. Pompa ve sinyali senkronize etmek için, fiber koşutlayıcıyı (collimator) hassas bir hareketli platform üzerine yerleştirdik. Kovuk senkronizasyonu elde edildiği anda eş

fazlı Raman sinyalini gözlemledik. Çıkıştaki Raman sinyalinin, senkronizasyon sonrası değerinin, öncesininkine oranı farklı pompa değerleri için dB cinsinden Şekil 5'de gösterilmiştir.

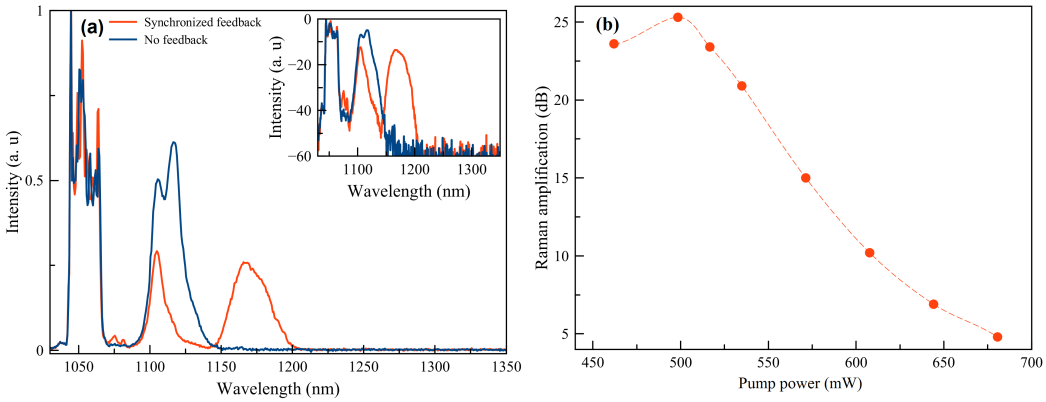


Şekil 5. (a) Raman lazerinin senkronize geri besleme mevcut iken (kırmızı çizgi) sinyal (1117 nm) ve pompa (1060 nm) ve geri besleme olmadığı (mavi çizgi) durumlarda ölçülen optic tayfı. İç kısım: aynı ölçümün logaritmik grafiği. (b) Senkronizasyon öncesi (mavi) ve sonrası (kırmızı) 1 kHz aralığında ve 10 Hz çözünürlüğünde ölçülen radio frekans tayfı.

4.2. İkinci Stokes: Raman sinyalinin 1170 nm mekezli oluşturulması

Pompa gücünü arttırarak ve 1150 nm sonrasını geçiren filtre (FEL 1150) kullanarak, 1170 nm merkezli ikinci stokes sinyalini oluşturabiliriz. Şekil 6(a)'da Raman kovuğunda oluşan senkronizasyon öncesi ve sonrası optik tayf gösterilmiştir ve Şekil 6(b)'de senkronizasyon sonrası pompa gücüne göre elde edilen 1170-nm merkezli sinyalin güçlendirilme seviyesi gösterilmektedir

.

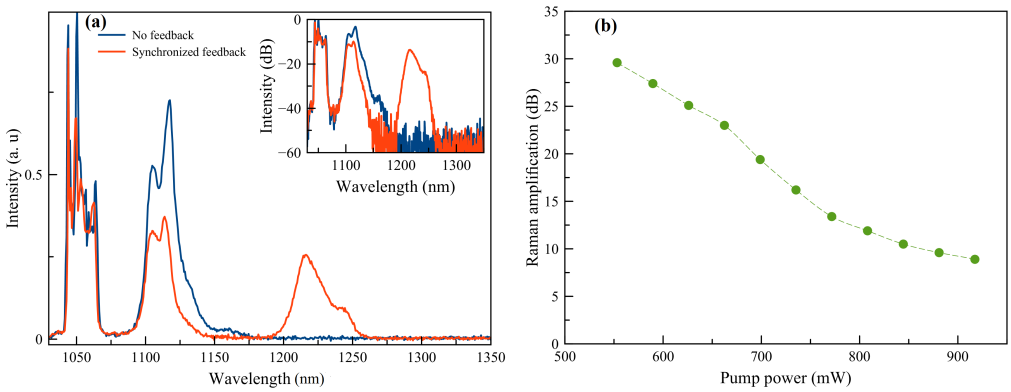


Şekil 6. (a) Raman lazerinin senkronizasyon öncesi (mavi) ve sonrası (kırmızı) ölçülen optik tayfı. İçerdeki kısım: aynı tayfların logaritmik

versiyonu. (b) 1170-nm merkezli ikinci Stokes Raman sinyalinin senkronizasyon sonucu gerçekleşen yükselme oranının dB cinsinden 1060-nm merkezli pompa gücü ile değişimi.

4.3. Üçüncü Stokes: 1215 nm merkezli Raman sinyalinin oluşturulması

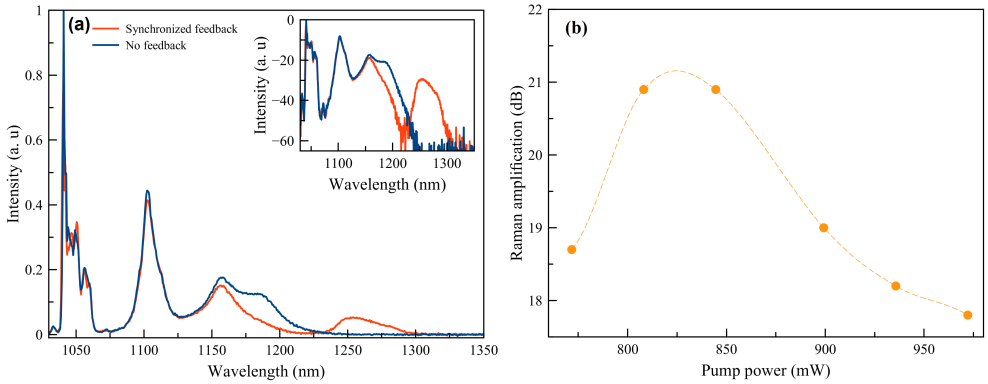
1200 nm ötesini geçiren filtre (FEL 1200) kullanarak ve pompa gücü arttırarak üçüncü Stokes sinyalini elde ettik. En üst seviyedeki verim Raman kovuğu 550 mW ile pompalandığında 39 dB olarak gerçeklşti. Şekil 7(a)'da gösterildiği gibi, senkronizasyon sonrası birinci Stokes sinyalinden üçüncü Stokes'a kısmen enerji transferi gerçekleşmekte, ve zaten zayıf olan ikinci Stokes enerjisini üçüncüye transfer ederek tamamen sönmektedir.



Şekil 7(a) Raman lazerinin senkronizasyon öncesi (mavi) ve sonrası (kırmızı) ölçülen optik tayfı. İçerdeki kısım: aynı tayfların logaritmik versiyonu. (b) 1215-nm merkezli üçüncü Stokes Raman sinyalinin senkronizasyon sonucu gerçekleşen yükselme oranının dB cinsinden 1060-nm merkezli pompa gücü ile değişimi.

4.4. Dördüncü Stokes: 1260 nm merkezli Raman sinyali oluşturulması

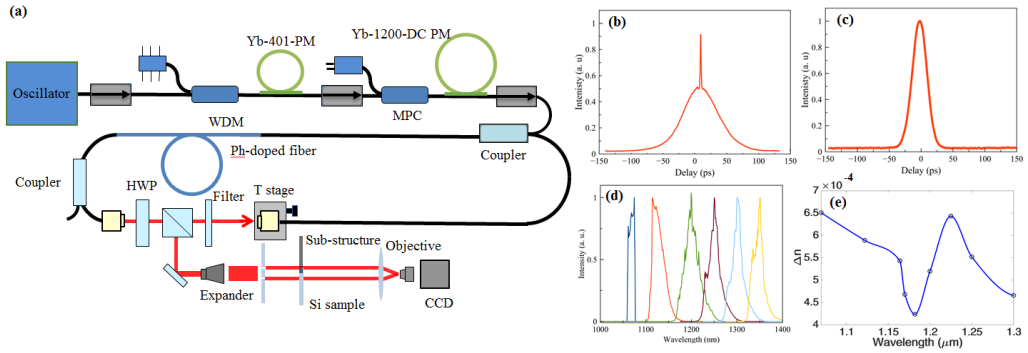
1250 nm ilerisini geçiren filtre kullanarak ve pompa gücünü arttırarak dördüncü Stokes sinyalini ürettik (Şekil 8). Şekil 8(b)'de görüldüğü gibi azami verim 820 mW pompa gücünde 20 dB (senkronizasyon sonrası sinyalin öncesine oranı) olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 8 (a) Raman lazerinin senkronizasyon öncesi (mavi) ve sonrası (kırmızı) ölçülen optik tayfı. İçerdeki kısım: aynı tayfların logaritmik versiyonu. (b) 1260-nm merkezli dördüncü Stokes Raman sinyalinin senkronizasyon sonucu gerçekleşen yükselme oranının dB cinsinden 1060-nm merkezli pompa gücü ile değişimi.

5. Raman lazeri ile uygulama: faz farkı ölçümü

Geliştirdiğimiz Raman lazer sistemi ile, Silisyum (Si) yüzeyaltı yapılarının kırınım endeksi ve bu yapıların oluşturduğu faz farklarının ölçümlerini gerçekleştirdik. Si yüzey altyapıları bizim önerdiğimiz yeni üretim teknolojisinin ürünleri olup, bunların kırınım endekslerini girişimsel yöntemle ölçerek, dalga boyuna göre değişimini lazerimizin geniş dalga boyu aralığını kullanarak tespit ettik.



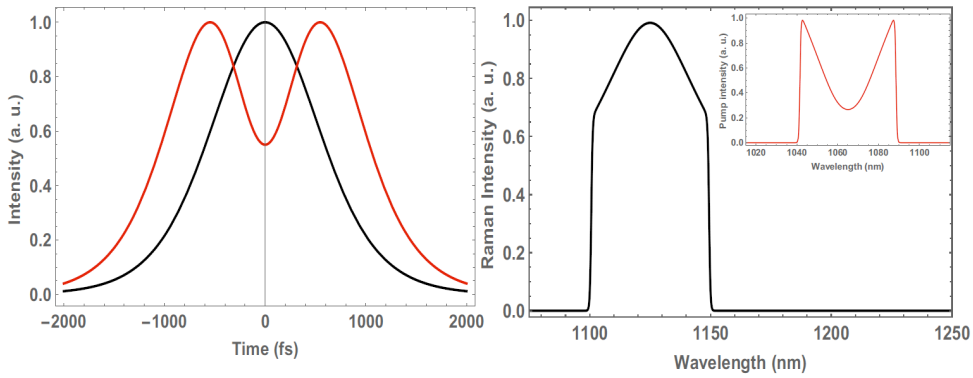
Şekil 9 (a) Si yüzeyaltı yapıların yol açtığı faz farkının ölçümünde kullanılan düzeneğin şematik diyagramı. WDM: dalgaboyu birleştirici; HWP: yarım dalga plakası; MPC: çok kipli pompa-sinyal birleştirici; T stage: hareketli platform. Otokorelasyon ölçüm sonucu senkronizasyondan (b) önce ve (c) sonra. (d) Ölçülen farklı dalga boyları. (e) Farklı dalga boylarında işenmiş ve işlenmemiş Si arasındaki kırınım endeksi farkları.

6. Teorik model

Doğrusal olmayan Kerr etkisi, grup hız saçınımı, Raman kazancı, kuantik doyurulabilir soğurucu ve çapraz faz modülasyonu etkilerinin mevcut olduğu ortamlarda, atımların ilerlemesi aşağıda verilen birleşik karmaşık Ginzburg-Landau (CGLE) denklemleri ile modellenebilmektedir.

$$\frac{du_s}{dz} = \left(\frac{1}{\Omega_s} - i\frac{\beta_{2s}}{2}\right)\frac{d^2u_s}{dt^2} + g_s u_s + i\gamma_s\left[|u_s|^2 + c\,|u_p|^2\right] + \frac{\mu_s}{2}\,|u_p|^2\,u_s - d_s\,|u_p|^4\,u_s,$$
$$\frac{du_p}{dz} = \left(\frac{1}{\Omega_p} - i\frac{\beta_{2p}}{2}\right)\frac{d^2u_p}{dt^2} + g_p u_p + i\gamma_p\left[|u_p|^2 + c\,|u_s|^2\right] + \frac{\mu_p}{2}\,|u_s|^2\,u_p - d_p\,|u_s|^4\,u_p. \quad (1)$$

Biz bu denklemleri çözdük ve Şekil 10 bu modele göre elde edilen atım yapılarını ve optik tayfları göstermektedir.

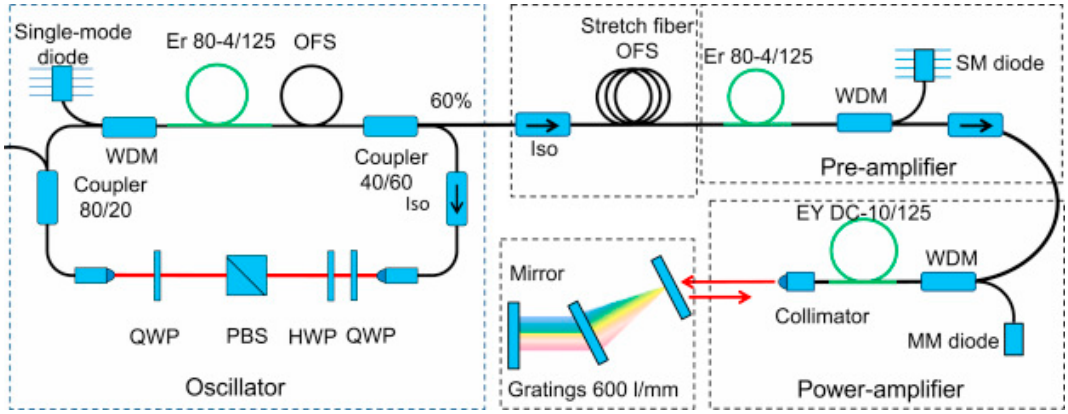


Şekil 10. Teorik modelleme sonuçları: (Sol taraf) Pompa (kırmızı) and sinyal atımının (siyah) zamansal yapısı. (Sağ taraf) İlgili Raman sinyalinin optik tayfı. İç kısım: Pompanın optik tayfı.

7. Raman lazerini pompalamak için yüksek güçlü Er katkılı fiber lazer geliştirilmesi

1,5 um'de çalışan fiber lazerlerin güç ölçeklemesi, çoğunlukla yüksek karmaşıklıklar ve teknik sorunlar ile karşılaştı. Sonuç olarak, 1.5 μm'de yüksek güçlü ve yüksek enerjili ultra hızlı fiber lazer gelişimi, çok daha hızlı ilerleyen 1μm civarındaki Yb-fiber lazerlere kıyasla geride kaldı. Burada, ilk olarak, 1560 nm merkezli dalga boyunda çalışan tek-modlu fiberden yapılmış, tümleşik fiber mimariye sahip, yüksek güçlü, ultrahızlı, yükselteç lazer sistemi geliştirdik. Sistem, ana salıngaç güç yükselteci (MOPA) mimarisi ile femtosaniye atım sinyallerini 43 MHz tekrar sıklığında 3,5 W

ortalama güçte üretebilmektedir. Güçlendirilmiş darbeler bir ızgaralı sıkıştırıcı ile 175 fs'ye kadar daraltılabilmektedir.

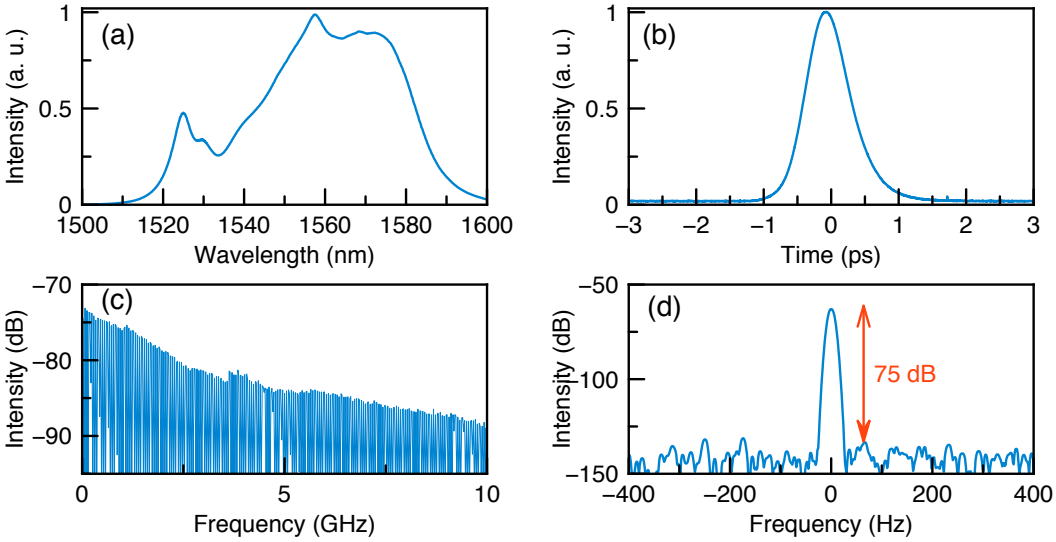


Şekil 11. (a) Raman pompası olarak geliştirilen Er fiber lazer yükselteç. WDM: wavelength division multiplexer (dalgaboyu ayırıcı), PBS: polarizing beam splitter (ışın kutuplama ayırıcı), HWP: half-wave plate (yarım dalga plakası), QWP: quarter-wave plate (çeyrek dalga plakası), SM: single-mode (tek kipli), MM: multi-mode (çok kipli).

7.1. Kip kilitli salıngaç karakterizasyonu

Şekil 11, bir osilatör ve ardından iki yükselteç aşamasından oluşan deney düzeneğinin şemasını göstermektedir. Osilatör, kendimizin kurmuş olduğu 43 MHz tekrar sıklığına sahip pasif mod kilitli saçınım-ayarlı lazer salıngacıdır. Salıngacın pasif fiber bölümü, anormal saçınıma sahip 255 cm uzunluğunda SMF 28 fiberi ve 70 cm uzunluğunda normal saçınıma sahip (OFS), aktif bölümü ise normal saçınıma sahip 100 cm uzunluğunda kazanç fiberi (Er-80-4/125) ihtiva etmektedir. Bu fiber kombinasyonu 0.01 ps^2 değerinde hafif seviyede normal toplam salıngaç saçınımı (GDD) sağlamaktadır. Mod kilitli osilatörün çıkış gücü 18 mW.

Salıngaçdan gelen çıkış sinyallerinin optik spektrumu ve otokorelasyonu, 1,1 m SMF-28 fiberinden geçtikten sonra ölçülerek, sırası ile Şekil 12 (a) ve (b) 'de gösterilmektedir. Spektrum yaklaşık 1560 nm merkezli, genişliği ise 40 nm civarındadır. Şiddet otokorelasyon ölçümünde (Şekil 12(b)) 740 fs'lik bir darbe genişliği gözlenmektedir. Osilatörün tek darbeli işletimi ve yüksek kısa vadeli stabilitesi, 100-kHz çözünürlüklü 10-GHz tarama aralığındaki geniş banttaki (Şekil 12 (c)) ve 10 Hz çözünürlüklü 800 Hz aralıklı dar banttaki 75 dB sinyal / gürültü oranını gösteren radyo frekansı (RF) spektral ölçümleri ile (Şekil 12 (d)) doğrulanmıştır.

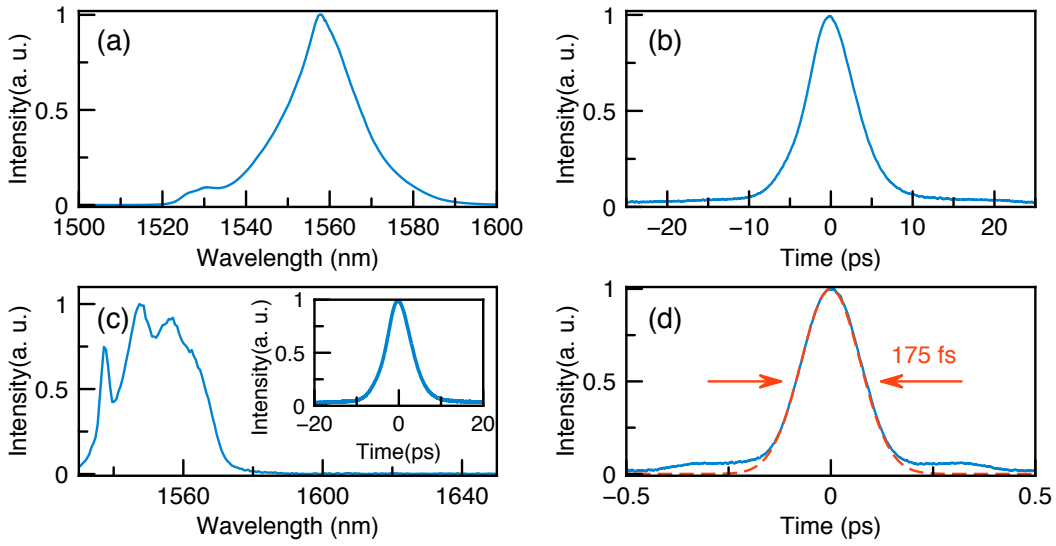


Şekil 12. Salıngaç karakterizasyonu: (a)% 60 çıkış çiftleyicisinden ölçülen optik spektrum. (b) Karşılık gelen şiddet otokorelasyonu. (c) Tek atımlı çalışmayı gösteren, 10-GHz aralık ve 100-kHz bant çözünürlüğü ile ölçülen radyo frekansı (RF) tayfı. (d) 800-Hz aralıklı ve 10-Hz bant genişliği çözünürlüğüne sahip RF tayfı, iyi düzeyde kısa vadeli istikrarı göstermektedir.

7.2. Genişletilmiş atım yükseltme (Chirped-pulse amplification)

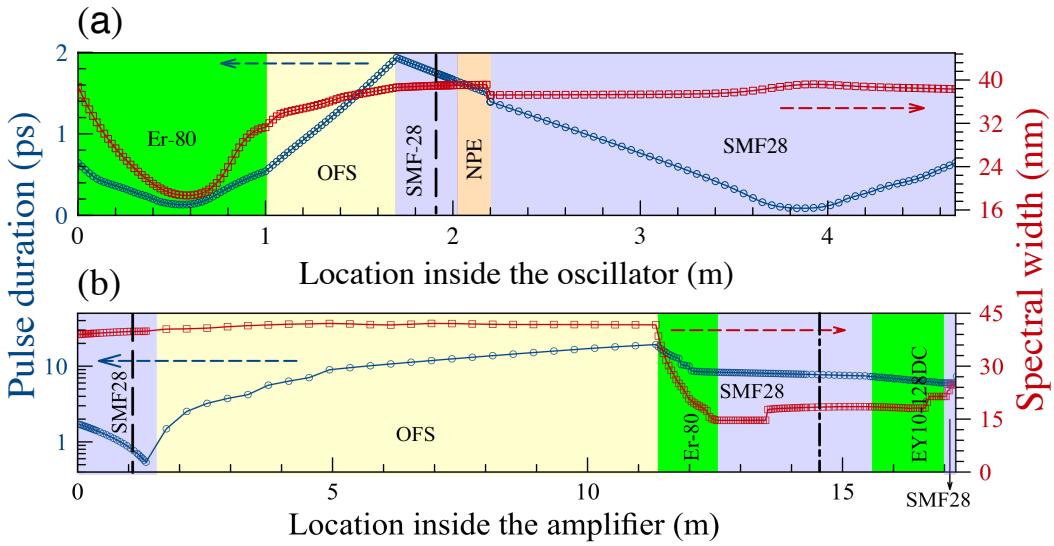
Yükselteç, salıngaç çıkışında 10 m uzunluğunda pozitif saçınımlı pasif fiber ile 18 ps'ye kadar genişletilen atımlar içeren 18 mW gücünde kaynak sinyaliyle beslenmektedir. Yükseltecin ilk aşamasında, atım treni 540 mW pompa gücü ile 120 cm'lik Er fiberden yapılmış bir tek modlu önyükselteçte 200 mW'a yükseltir. Şekil 13 (a)'da, ön yükseltiç çıkışında ölçülen optik tayf gösterilmektedir. Ölçülen otokorelasyon sinyali, Şekil 13(b)'de sunulmaktadır; bu, 7.5 ps uzunluğunda, büyük ölçüde doğrusal olarak saçınım içeren atınım süresini göstermektedir. Son aşamadaki güç yükseltecinde, dalga boyu stabilize diyot lazerden (BWT, Inc.) kazanç fiberine pompa ışığını iletmek için bir çok modlu pompa-sinyal birleştiricisi kullanıldı. Pompa diyotunun maksimum çıkış gücü 18 W'tır.

13.5 W pompa gücü ile 3.5 W çıkış gücüne ulaştık. Şekil 13(c)'de 3.5 W çıkış gücünde ölçülen optik tayf gösterilmektedir. Ölçülen spektral genişlik yaklaşık 26 nm ve merkez 1550 nm'ye kaymaktadır. Şekil 13 (c) 'nin iç kısmında ise, bu güç seviyesinde ölçülen 7-ps genişliğindeki atımların şiddet otokorelasyonu görülmektedir.



Şekil 13. Yükselteç karakterizasyonu: (a) Ön yükselteçten sonra ölçülen optik tayf ölçülmüştür. (b) Karşılık gelen şiddet otokorelasyon ölçümü. (c) 3.5 W ortalama güçte ölçülen çıkış optik tayfı. İç kısım: Aynı güç değerinde çıkışta ölçülen şiddet otokorelasyonu. (d) 3.5 W'de bir kırınım ızgaralı kompresörle (mavi düz çizgi) sıkıştırıldıktan sonraki atımların şiddet otokorelasyonu ve buna uydurulan Gauss eğrisi (kırmızı kesikli çizgi).

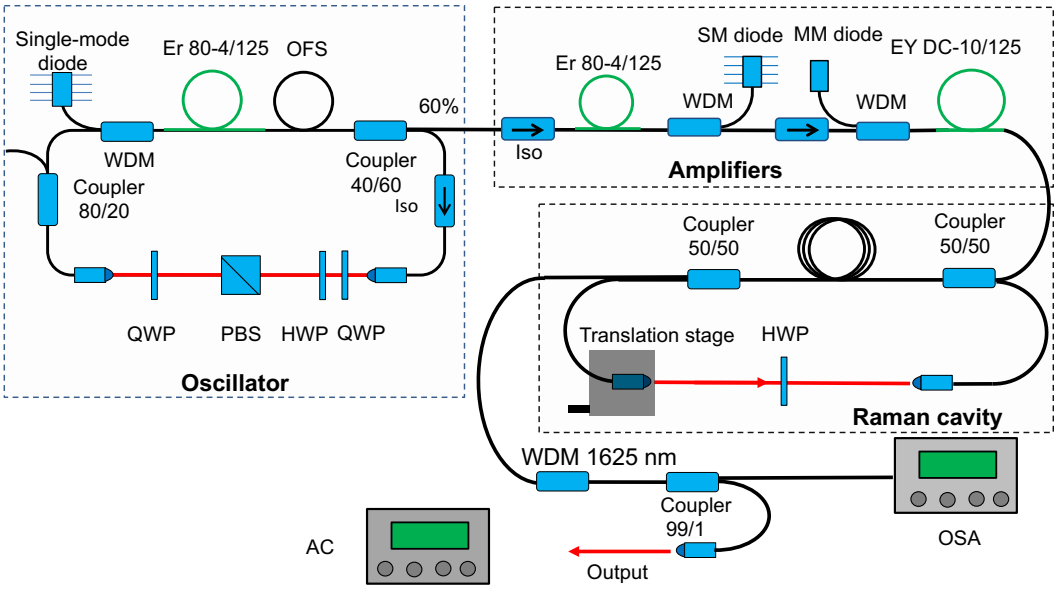
Salıngaç ve yükselteç kademeleri için atım yayılım simülasyonu sonuçları Şekil 14'de gösterilmiştir. Sistem çıkışında, atımlar, toplam verimliliği % 56 olan 300 çizgi/mm'lik bir geçirgen ızgara çifti kullanılarak 175 fs'ye kadar deneysel olarak sıkıştırılmıştır. 26 nm'lik spektral genişliği göz önüne alındığında, sıkıştırılmış süre, dönüşüm (transform) sınırlı darbe genişliğinin yaklaşık 1,3 katıdır. Bu küçük sapmanın, ızgara çiftinin telafi edilmeyen üçüncü derece saçınımından kaynaklandığına inanıyoruz.



Şekil 14. Atım yayılım simülasyonundan elde edilen, (a) salıngaç kovuğu ve (b) yükselteç sistemi boyunca atım ve optik tayf genişliğinin evrimi.

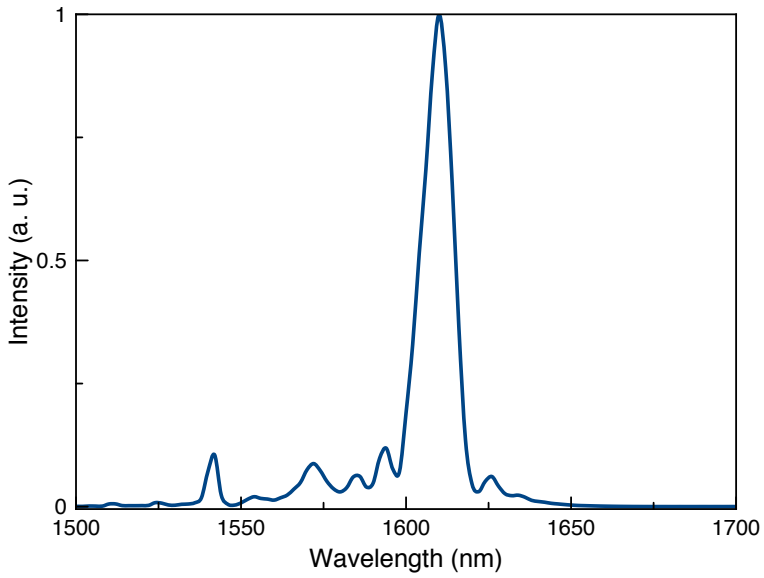
8. Er-tabanlı eşzamanlı pompalanan Raman lazeri

Bu projenin ana hedefi doğrultusunda, 1550 nm'nin ötesinde dalga boyları üretmek için Er katkılı fiber tabanlı, tümüyle pasif eşzamanlı olarak pompalanan Raman lazerini geliştirdik. Şematik kurulum Şekil 15'te gösterilmektedir. Doğrusal olmayan etkiyi arttırmak ve güç yükseltecinde Raman eşiğini düşürmek için salıngaçtan sonra yer alan atım genişletme fiberini çıkarttık. Salıngaçtan gelen 18 mW güçte, 750-fs uzunluktaki atımlar, birinci yükselteçte 210 mW'a kadar yükseltilmektedir. Birinci bölümde anlatılanla aynı olan ikinci yükselteç 1.4 m uzunluğundaki ErYb-10/130 DC fiberi içerir.



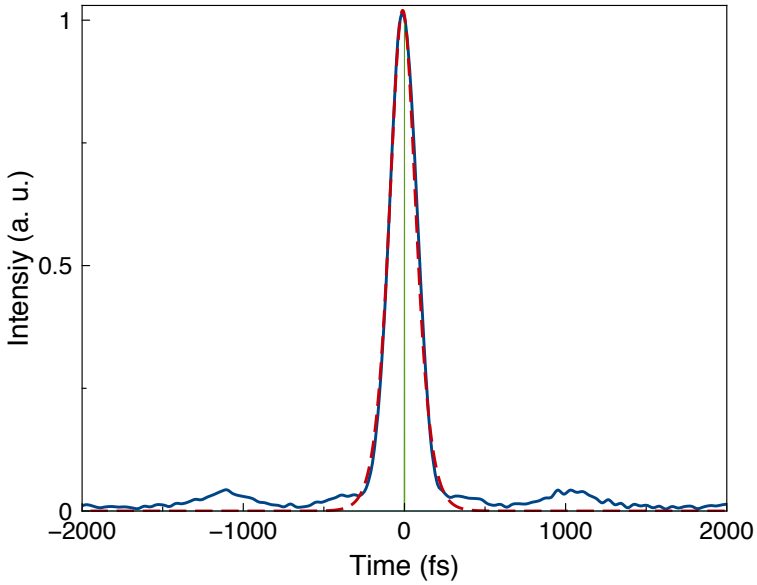
Şekil 15. Er-tabanlı eşzamanlı pompalanan tümüyle pasif Raman salıngacının şematik diyagramı.

Raman sinyalini yükseltmek ve eşevreli darbeler üretmek için, 50/50 birleştirici kullanarak Raman sinyalinin bir kısmını Raman kovuğuna geri besleme amacı ile sokmaktayız. Eşzamanlama (senkronizasyon), hassas bir hareketli platform ile kovuk içerisindeki boşluğun uzunluğu değiştirilerek sağlanır. 50/50 çiftleyicinin diğer kolundan alınan sinyalin 1550/1625 WDM'den geçirilerek, 1625 nm ve 1550 nm merkezli Raman ve pompa sinyalleri ayrılarak elde edilir. Daha sonra çıktı, Raman sinyalini karakterize etmek için bir optik tayf analizörü ve oto-korelatöre gönderilir. Şekil 16, 1625 nm'de merkezlenmiş Raman sinyalinin ölçülmüş optik tayfını göstermektedir. Yaklaşık genişliği 15 nm'dir.

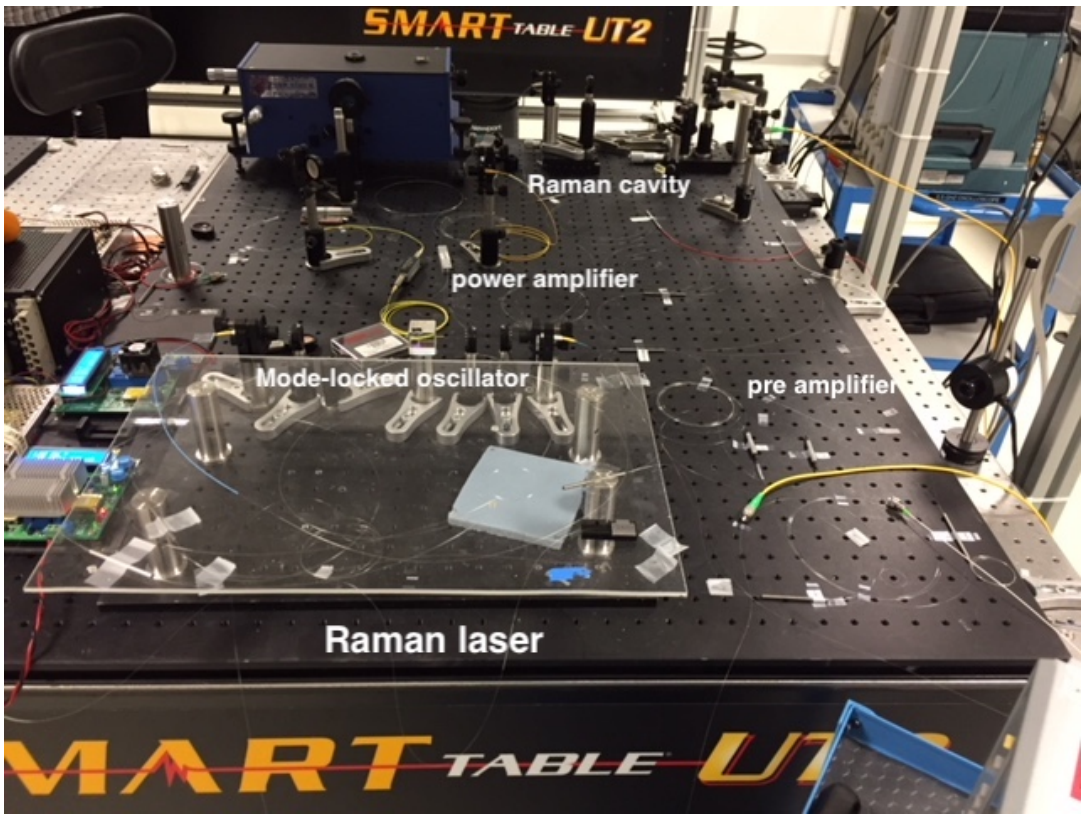


Şekil 16. Eşzamanlama sonrası ölçülen Raman sinyal çıktısının tayfı.

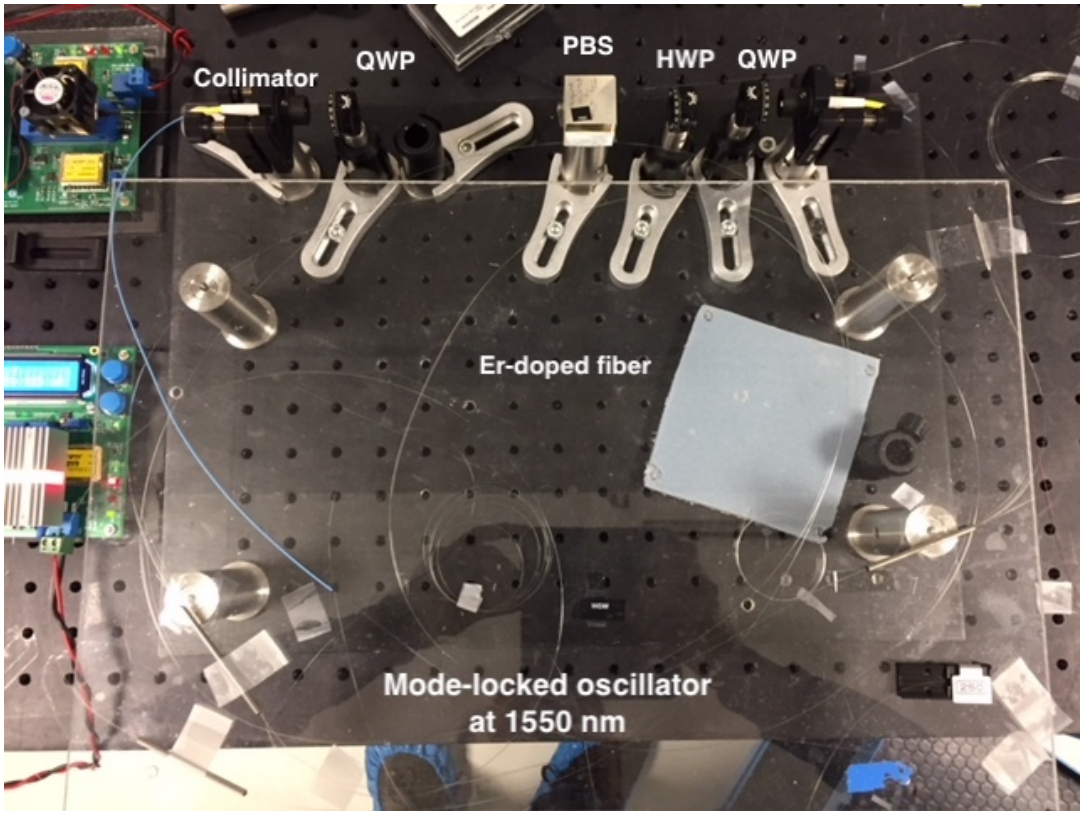
Şekil 17. Raman sinyalinin şiddet otokorelasyonunu göstermektedir. Senkronizasyon sonrasında, ızgaralı kompresör kullanmadan ~ 200 fs uzunluğundaki Raman darbelerine ulaştık.



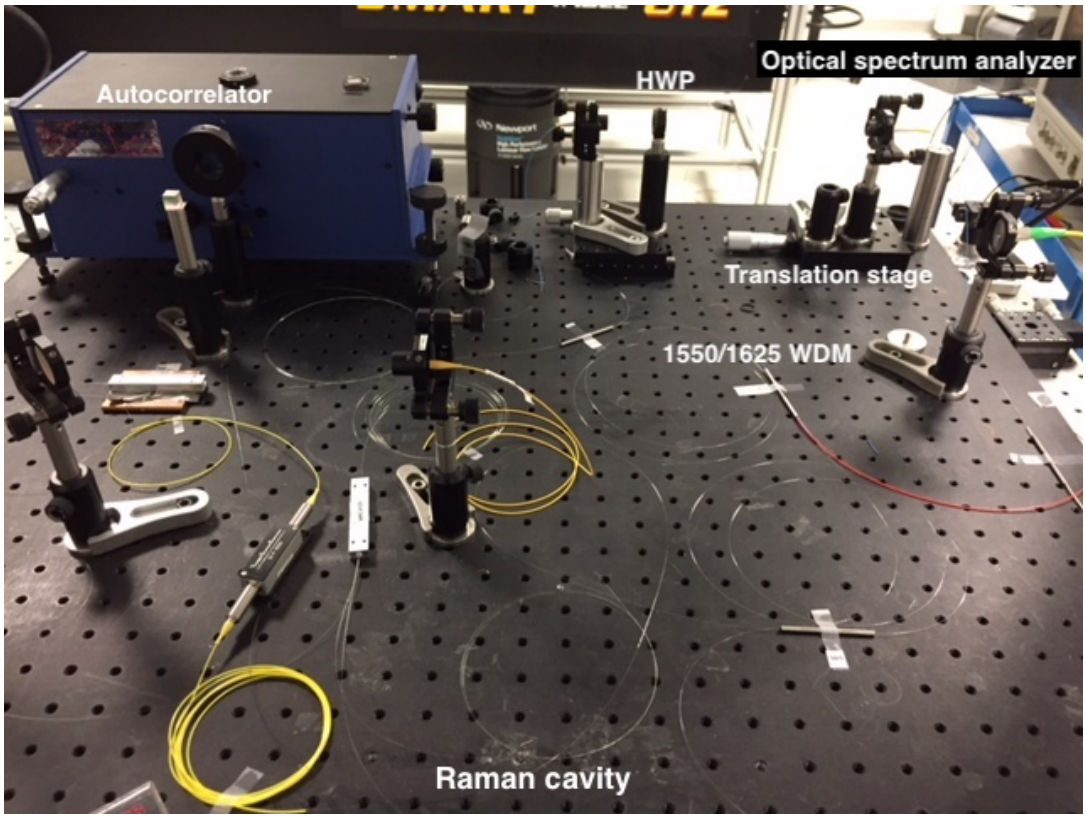
Şekil. 17. Raman sinyalinin (katı çizgi) ölçülen şiddet otokorelasyonu ve sech fonksiyonunun karesinden oluşan uyumlama eğrisi (curve fit) (kırmızı kesikli çizgi). FWHM yaklaşık 200 fs'dir.



Şekil. 18. Er-Raman fiber lazer düzeneği.



Şekil. 19. Mode-locked osilatör. 1550 nm, 43 MHZ.



Şekil. 20. Raman cavity

9. Sonuçlar ve tartışma

Bu projede, senkronize pompalı fiber lazer sistemi geliştirdik ve mevcut kazanç ortamları tarafından üretilemeyen yeni dalga boyu bantları ürettik. Aktif olarak Yb ve Er katkılı fiber ve fosfat katkılı fiber kullanarak sırasıyla 117 nm, 1170 nm, 1215 nm, 1270 nm, 1315 nm ve 1620 nm merkez dalga boylarında Raman sinyalleri ürettik. Bu projede elde edilen sonuçlarla ilgili olarak, aşağıdaki araştırmalar gelecekte yapılabilir.

1- Kazanç medyası olarak Yb ve Er katkılı fiber kullandık. Tm katkılı fiber temelli senkron pompalı fiber Raman sistemi çok ilginç bir konudur. Bu şekilde üretilecek 2 μm'den daha uzun dalgaboylarındaki lazer ışınları tıbbi uygulamalar için çok ilginçtir.
2- Farklı dalga boylarındaki kırılma indisinin ölçülmesi, özellikle yüzey altı işlenmiş ortamların karakterizasyonu için çeşitli uygulamalara sahiptir. Örneğin, silikon içerisinde üretilen dalga kılavuzunu karakterize etmek için çok dalga boylu lazer kaynağına ihtiyacımız

var. Bu projede sunulan Raman lazer sistemi bu amaçla çok yararlı olabilecek bir ışın kaynağıdır.

3- Pompa ve sinyal arasındaki gecikmeyi ayarlayarak, Raman sinyalinin eşevrelilik derecesini değiştirebiliriz. Dolayısıyla, bu sistem, hem eşevreli veya hem de eşevreli olmayan kaynaklara ihtiyaç duydulan uygulamalar için tarafımızdan önerilmektedir.

10. Kaynakça

[1] M. N. Zervas and C. A. Codemard, “High Power Fiber Lasers: A Review,” IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. 20(5), 219–241 (2014).

[2] D. Churin, J. Olson, R. A. Norwood, N. Peyghambarian, and K. Kieu, “High-power synchronously pumped femtosecond Raman fiber laser,” Opt. Lett. 40(11), 2529–2532 (2015).

[3] Denis S. Kharenko, Anastasia E. Bednyakova, Evgeniy V. Podivilov, Mikhail P. Fedoruk, Alexander Apolonski, and Sergey A. Babin, "Cascaded generation of coherent Raman dissipative solitons," Opt. Lett. 41, 175-178 (2016).

[4] Sergey Kobtsev, Sergey Kukarin, and Alexey Kokhanovskiy, "Synchronously pumped picosecond all-fibre Raman laser based on phosphorus-doped silica fibre," Opt. Express, 23, 18548-18553 (2015).

[5] P Elahi, Gh Makey, A Turnali, O Tokel, FÖ Ilday, “1.06 μm–1.35 μm Coherent pulse generation by a synchronously-pumped phosphosilicate Raman fiber laser,” Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC).

[6] Parviz Elahi, Hamit Kalaycıoğlu, Huihui Li, Önder Akçaalan, F Ömer Ilday, 175 fs-laser at 1550 nm,” Optics Commun. 403, 381 (2017).

Yayınlanan makale ve konferans bildirileri

[1] P Elahi, Gh Makey, A Turnali, O Tokel, FÖ Ilday, “1.06 μm–1.35 μm Coherent pulse generation by a synchronously-pumped phosphosilicate Raman fiber laser,” Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC).

[2] Parviz Elahi, Hamit Kalaycıoğlu, Huihui Li, Önder Akçaalan, F Ömer Ilday, 175 fs-laser at 1550 nm,” Optics Commun. 403, 381 (2017).

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. PARVIZ ELAHI
Proje No:	115F098
Proje Başlığı:	Senkronize Olarak Pompalanan Yeni Bir Tip Raman Fiber Lazerinin Teorik Ve Deneysel İncelenmesi
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İHSAN DOĞRAMACI BİLKENT Ü. FEN F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/10/2015 - 15/10/2017
Onaylanan Bütçe:	456300.0
Harcanan Bütçe:	386431.25
Öz:	İterbiyum, erbiyum ve tulium bazlı nadir toprak katkılı fiber lazerler, katı hal lazerlere kıyasla yüksek esneklik ve yüksek ışın kalitesinden dolayı önemli avantajlara sahiptirler. Fiber lazerlerdeki doğrusal olmayan etkiler, küçük çekirdek boyutundan dolayı katı hal lazerlerden daha önemlidir ve sonuç olarak fiber lazer sistemlerinden yüksek enerji ve ultra kısa darbe üretimi çok zordur. Öte yandan, günümüzde mevcut lazerlerin oluşturamayacağı yeni dalgaboyu bandının oluşturulması için fiber lazerlerin doğrusal olmama özelliğinden yararlanılarak Raman ve parametrik amplifikasyon gibi umut veren birkaç yöntem vardır. Örneğin, mevcut nadir toprak katkılı fiberlerin emisyon bandının dışında kalan dalgaboyu bölgeleri elde etmek için Raman saçılması kullanılabilir. Eşzamanlı olarak pompalanan Raman lazerleri, yüz femtosaniyenin altına kadar sıkıştırılabilen yüksek güçlü sinyaller üretmek için önemlidir. Bu projede, ilk olarak eşzamanlı olarak pompalanan tüm-pasif-fiber Raman lazer sistemi geliştirilmi ve 1115 nm merkez dalgaboyuna sahip yaklaşık 160 mW'lık Raman sinyali üretilmiştir. Raman sinyali bir çift geçirgen kırınım ağı (ızgarası) kullanarak 200 fs'ye sıkıştırılmıştır. Ayrıca, daha uzun dalga boylarına ulaşmak için daha yüksek Stokes seviyesinde Raman sinyali üretme hedefli, senkronize olarak pompanan tümüyle pasif fiber Raman lazerini fosfosilikat fiberler ile geliştirdik ve çeşitli dalga boylarında (1117, 1170, 1215 ve 1270 nm) eşevreli (coherent) atımlar elde ettik. Ayrıca, kurmuş olduğumuz Raman lazerinin bir uygulamasını da gerçekleştirerek, yüzey altı Silisyum (Si) oluşumların yol açtığı faz gecikmelerini ve bu oluşumların kırılma endekslerininin dalga boyuna göre değişimlerini ölçtük. Yüzeyaltı Si oluşumların kırınım endekslerini interferometrik yöntem ile ölçtük ve dalga boyuna göre değişimini de lazerimizin geniş tayfsal ayarlanabilirliği sayesinde gözlemledik. Pompa ve Raman sinyallerinin, birbiriyle doğrusal olmayan etkileşimini anlamak ve dinamiklerini araştırmak için, birleştirilmiş kompleks Ginzburg- Landau (CGLE) denklemi çözülmelidir. Biz bu proje kapsamında, bu denklemin yaklaşık ancak hatasız analitik çözümüne yönelik bir model oluşturarak kararlı bir çözüm bulduk. İlaveten, ilk çınlama (initial chirp), tayf genişliği, Raman kazancı, vb. bazı önemli parametrelerin, kararlı atımlar oluşması üzerindeki etkilerini araştırdık. Son altı ay içinde, esas olarak Er tabanlı eşzamanlı pompalanan Raman lazer geliştirme ele alındı. İlk olarak, 1.55 um'de yüksek güçlü bir Er katkılı fiber lazer geliştirdik ve kırınım sınırlı ışın kalitesine ulaşma amacı ile tek modlu fiber kullanarak genişletilmiş atım yükseltme yöntemini (chirped pulse amplification) uyguladık. Geliştirdiğimiz lazer ile, 175 fs'ye kadar sıkıştırılabilen ortalama 3.5 W'lik bir güce karşılık gelen, 43 MHz tekrarla sıklığında 80 nJ darbe üretebildik. Daha sonra, lazer sistemi, Raman sinyali üretmek için bir pompa kaynağı olarak kullanıldı. Eşzamanlı olarak pompalanan Er tabanlı bir Raman fiber lazer geliştirdik ve 1625 nm merkez dalga boyunda 200 fs uzunluğunda darbeler ürettik. Raman sinyalinin ortalama gücü yaklaşık 45 mW'dır.

TÜBİTAK

Anahtar Kelimeler:	Raman lazeri, Eşzamanlı pompalanan Raman, Ultrakısa Raman atımları
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- 175 fs-long pulses from a high-power single-mode Er-doped fiber laser at 1550 nm (Makale - İndeksli Makale),

TÜBİTAK