

Yakın Gerçek Zaman İşlemleri, Fiberde Tümlleşik Atmalı Terahertz Spektrometre

Program Kodu: 1001

Proje No: 111T748

**Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. Hakan ALTAN**

Araştırmacı(lar):

Doç. Dr. Asaf Behzat Şahin
Semih Koray Eken

Danışman:

Doç. Dr. Fatih Ömer İlday

Bursiyer(ler):

Hakan Keskin
Yakup Midilli
Vedat Ali Özkan
Yiğit Ozan Aydın
Mahmut Emre Yağcı

Eylül 2015
ANKARA

ÖNSÖZ

TUBİTAK tarafından desteklenen 111T748 nolu, “Yakın Gerçek Zaman İşlemleri, Fiberde Tümlümlük Atmalı Terahertz Spektrometre” başlıklı araştırma projesinden elde edilen sonuçlar açıklanmaktadır. Çalışmalar zamana dayalı terahertz spektrometre ölçüm tekniğinin anlık olarak gerçekleştirilmesine ve bu yöntemlerin pompa/sonda ölçümlerinde kullanılması için geliştirilmesine odaklanmıştır. Proje kapsamında tekrarlama frekansını çok hızlı değiştirebilen, üç çıkış kolu olan, 1030nm merkez dalga boyunda çalışan özgün tasarıma sahip Yb: katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemi geliştirilmiştir. Üç çıkış kolundan, kısa atım kolu (<150fs) Terahertz (THz) algılanmasında, uzun atım kolu (<250fs) THz üretiminde ve pompa kolu (<1ps) pompa/THz sonda deneylerinde kullanılması için geliştirilmiştir. Geliştirilen bu özgün lazer sistemi ile THz atım ölçümlerinin ölçüm hızında neredeyse anlık olarak gerçekleştirilmesi için lazerin tekrarlama frekansının hızlı değişimi sağlanmıştır (~10Hz). Bu amaçlara ulaşmak için sistem içinde terahertz atımlarını üretmek, iletmek ve belirlemek için kullanılan birimlerin her biri optimize edilmiştir. Aynı zamanda lazerin pompa kolundaki çıkış gücünü yükselterek sistemin pompa/THz sonda deneylerinde anlık ölçüm tekniğini kullanarak uygulanması amaçlanmıştır. Böylelikle bu yeni ölçüm tekniği ile yurtdışındaki araştırma laboratuvarlarında geleneksel kullanılan pompa/sonda yöntemlerine hız kazandırarak farklı fiziksel etkenlerin tespitine katkı sağlayabileceğiz.

Projedeki çalışmalar bursiyerler Hakan Keskin, Yakup Midilli, Vedat Ali Özkan, Yiğit Ozan Aydın ve Mahmut Emre Yağcı, başta olmak üzere Semih Koray Eken, Doç. Dr. Asaf Behzat Şahin ve Doç. Dr. Fatih Ömer İlday'ın önemli katkıları ile Orta Doğu Teknik Üniversitesi Terahertz Araştırma Laboratuvarı, Fiberlast A.Ş. ve Bilkent Üniversitesi UFO Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Proje ekibi, TUBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkür eder.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
TABLolar LİSTESİ.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
ÖZET.....	1
ABSTRACT.....	2
1. GİRİŞ.....	3
2. LİTERATÜR ÖZETİ VE PROJENİN AMACI	5
2.1. ZAMANSAL ÖLÇÜM TEKNİKLERİN GELİŞTİRİLMESİ	7
2.2. DİNAMİK (POMPA/SONDA) ÖLÇÜMLER	8
2.3. PROJENİN AMACI	9
3. Yb: KATKILI KİP-KİLİTLİ FİBER LAZER SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ.....	11
3.1. LAZER SALINGAÇ KURULUMU	12
4. Yb: KATKILI KİP-KİLİTLİ FİBER LAZER YÜKSELTEÇ AŞAMALARI.....	20
4.1. ÖNYÜKSELTEÇ.....	20
4.2. İKİNCİ YÜKSELTEÇ SİSTEMİ	25
5. LAZER TEKRARLAMA FREKANSIN HIZLI DEĞİŞTİRİLMESİ	30
5.1. LAZER KAVİTE UZUNLUĞU-TEKRARLAMA FREKANS ÖLÇÜM ÇALIŞMALARI	30
5.2. LAZER TEKRARLAMA FREKANSIN HIZLI AYARLANABİLMESİ	34
6. TERAHERTZ ATIM ÜRETİMİ VE BELİRLENMESİ	38
6.1. TERAHERTZ ÜRETİCİ VE ALICI ANTEN YAPILARIN SEÇİMİ	38
6.2. TEK LAZER ÇIKIŞI THZ ATIM ÜRETİMİ VE BELİRLENMESİ	40
6.3. ÇİFT LAZER ÇIKIŞI İLE THZ ATIM ÜRETİMİ VE BELİRLENMESİ	44
6.2.1. THz Üretim ve Algılama Kolları Arası Zaman/Mesafe Farkı	44
6.2.2. THz Prob (Sonda) ve Pompa Kolları Arası Zaman/Mesafe Farkı	46
7. POMPA-THz PROB (SONDA) SİSTEMİ	52
7.1. POMPA-THz PROB (SONDA) OPTİK SİSTEMİN TASARIMI.....	52
7.2. THz PROB ATIMIN ÖRNEK ÜZERİNDE FREKANS ARALIĞIN AYARLANABİLMESİ.....	54
7.3. POMPA OPTİK SİSTEMİN KURULUMU.....	56
8. SONUÇ	60
8.1. Yb: KATKILI FİBER LAZERİN ER: KATKILI FİBER LAZER İLE KARŞILAŞTIRILMASI.....	61
8.2. OSCAT TEKNİĞİNİN ER: VE Yb: KATKILI LAZERLERDE KARŞILAŞTIRILMASI	62

8.3. ELDE EDİLEN BAŞARILAR VE İLERİYE DÖNÜK PROJELENDİRME	63
9. KAYNAKLAR.....	64

TABLULAR LİSTESİ

3.1. Diyot akım-güç değerleri	12
3.2. PPF sonrası akım-güç değerler.....	13
3.3. WDM sonrası akım-güç değerleri.....	14
3.4. Lazer Salıngaç Ölçüm Değerleri.....	17
4.2.1. İkinci yükselteç çıkış gücü.....	27
4.2.2. 25 W diyot Dalga Boyu / Akım karakterizasyonu.....	28
4.2.3. 25 W diyot Güç / Akım karakterizasyonu.....	29
5.1.1. Yakın-Gerçek Zamanda THz Ölçümleri Yapabilmek İçin YDFL Sistemi için Hesaplanan Parametreler.....	32
5.1.2. Kavite Uzunluğuna Göre Ölçülen Osilatör Parametreleri.....	32
6.2.1. Tek Kol Çıkışı THz Üretici FİA parametreleri.....	42
6.3.1. Çift Kol Çıkışı THz Üretici FİA parametreleri.....	49
7.2.1. Sonda Işını için Filtre Parametreleri.....	55
7.3.1. 1030-1060 nm pompa ile ölçülebilecek malzeme listesi.....	58
7.3.2. 514-530 nm pompa ile ölçülebilecek malzeme listesi.....	59
8.1. Geliştirilen sistem ile elde edilen parametreler.....	60

ŞEKİLLER LİSTESİ

3.1	Yb-katkılı fiber lazer THz pompalama sistemin tasarımı.....	11
3.2	Diyot sürücüsü şeması.....	12
3.3	Diyot çıkış spektrumu	13
3.4	Yb-katkılı fiber lazer THz pompalama sistemin tasarımı.....	13
3.5	Kurulumu yapılan lazer salıngacın şeması	14
3.6	Kurulumu yapılan lazer salıngacın genel fotoğrafı.....	15
3.7	Lazer salıngacın fiber bileşenlerinin fotoğrafı	15
3.8	Lazer salıngacın fiber dışı parçalarının fotoğrafı	16
3.9	Lazer salıngacın optik ızgaralarının fotoğrafı	16
3.10	%5 çıkışı atım profili- 700 mA diyot akımı-Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 100fs atım uzunluğu belirlendi.....	17
3.11	%5 çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı.....	17
3.12	%20 çıkışı spektrumu atım şekli- 700 mA diyot akım	18
3.13	%20 çıkışı spektrumu atım şekli- 700 mA diyot akımı.....	18
3.14	PBS çıkışı atım prafili- 700 mA diyot akımı- Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 1.3ps atım uzunluğu belirlendi.....	19
3.15	PBS çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı.....	19
3.16	BS çıkışı atım profikli - 700 mA diyot akımı - Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 1.1ps atım uzunluğu belirlendi.....	20

3.17	BS çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı	20
4.1.1	Yükselteç çıkışının otokorelatör ölçümleri	21
4.1.2	Yükselteç çıkış gücüne karşılık atım uzunluğu grafiği.....	21
4.1.3	Yükselteç çıkışından elde edilen dalga boyu tayfı	22
4.1.4	Pompa gücüne karşılık sinyal gücü ölçümleri.....	22
4.1.5	Yükselteç çıkışının güç kararlılığı.....	23
4.1.6	Kurulumu yapılan yükselteç kolunun şeması	24
4.1.7	Kurulumu yapılan birinci ön yükselteç kolunun fotoğrafı	24
4.1.8	Kurulumu yapılan ikinci ön yükselteç kolunun fotoğrafı.....	24
4.2.1	İkinci yükselteç şeması	25
4.2.2	İkinci yükselteç kolunun fotoğrafı	26
4.2.3	700 mA diyot akımında ikinci ön yükselteç kolu dalga boyu tayfı.....	26
4.2.4	Ön yükselteç kolu atım uzunluğu profili.....	27
4.2.5	Güç yükselteç kolu atım uzunluğu profili	30
4.2.6	Güç yükselteç çıkışı dalga boyu tayfı.....	30
5.1.1	Salıngacın osiloskop ölçümü. Tekrarlama frekansı kavite uzunluğuna bağlı olarak 51.17MHz olarak belirlendi.....	31
5.1.2	Farklı kavite uzunluklarında RF spektrum ölçümleri	33
5.1.3	2 Farklı kavite uzunluklarında lazerin tekrarlama frekansları	34
5.2.1	Voice-coil cihazı test düzeneği.....	35
5.2.2	Voice-coil cihazı hareket parametreleri	35
5.2.3	Voice-coil cihazı test sonucu-osiloskop fotoğrafı).....	35
5.2.4	Voice-coil cihazı test sonucu	36
5.2.5	Yb-katkılı fiber lazer kavitesi	37
6.1.1	ANTEN I: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ).....	38

6.1.2	<i>ANTEN II</i> : THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ).....	38
6.1.3	<i>ANTEN III</i> : THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)	39
6.1.4	<i>ANTEN IV</i> : THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)	39
6.1.5	<i>ANTEN V</i> : THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ).....	39
6.1.6	<i>ANTEN VI</i> : THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)	40
6.2.1	Zamana dayalı THz spektrometre şeması	40
6.2.2	Zamana dayalı THz spektrometre fotoğrafı.....	41
6.2.3	Salıngaç tarama 0 mm pozisyonundaki THz sinyali.....	43
6.2.4	Salıngaç tarama 3 mm pozisyonundaki THz sinyali.....	43
6.2.5	Salıngaç tarama 6 mm pozisyonundaki THz sinyali.....	43
6.2.6	Farklı tekrarlama frekanslarına denk gelen tarama pozisyonlarındaki THz sinyallerinin güç tayfları.....	44
6.3.1	Hızlı Tarayabilen Zamana dayalı THz spektrometre şeması.....	47
6.3.2	Zamana dayalı THz spektrometre fotoğrafı	48
6.3.3	Birinci ön yükselteç THz sinyali (130fs atım uzunluğu çıkışı).....	50
6.3.4	İkinci ön yükselteç THz sinyali (220fs atım uzunluğu çıkışı).....	50
6.3.5	İki ön yükselteç kullanarak üretilen THz sinyali (220fs üretimde, 130fs kolu algılamada kullanıldı).....	51
6.3.6	THz sinyallerinin güç tayfı karşılaştırması	51
7.1.1	Farklı akım değerlerinde atım profilleri	52
7.1.2	Yb-katkılı fiber lazer yükselteç bölümü	53
7.1.3	İkinci harmonik üretimi(SHG) şeması.....	53
7.2.1	340GHz merkez frekansında çalışan dikroik filtre yapısı (delikler dalga kılavuzu gibi davranarak sadece belli THz frekanslarını geçiriyor).....	54
7.2.2	Filtre ve filtresiz zamana dayalı THz puls ölçümleri	55
7.2.3	Soldaki resimdeki puls grafiklerin frekans uzayında (50GHz-1500GHz)	55
7.3.1	Örnek pompa sonda ölçüm sonuçları	56

7.3.2	Pompa-sonda sistemi.....	56
7.3.3	İkinci harmonik üretim sistemi.....	57
7.3.4	İkinci harmonik üretimi öncesi ve sonrası elde edilen spektrumlar.....	57
8.1	İki ön yükselteç kullanarak üretilen THz sinyali (220-250fs üretimde, 130fs kolu algılamada kullanıldı)(sol), THz sinyallerinin güç tayfı karşılaştırması (sağ).....	60
8.2	Atım uzunluğu değişimi a) Er katkılı fiber lazer b) Yb katkılı fiber lazer.....	61
8.3	Çıkış gücü değişimi a) Er katkılı fiber lazer b) Yb katkılı fiber lazer	62
8.4	THz profile karşılaştırması a) Er katkılı fiber lazer b) Yb katkılı fiber lazer	62
8.5	THz güç tayfı karşılaştırması a) Er katkılı fiber lazer b) Yb katkılı fiber lazer.....	63

ÖZET

Genelde zamana dayalı terahertz ölçüme dayalı spektroskopi yöntemi, pompa/THz prob (sonda) veya benzeri dinamik ölçüm deneyleri için sistem temelinde güçlendirilmiş atmalı lazer sistemleri kullanılmakta ve THz atım şeklinin ölçüm temelinde interferometrik teknikler kullanıldığından spektrum verilerinin kaydedilmesi onlarca dakika sürebilmektedir. Bu sistemler ile yakın gerçek zaman işlemeli spektroskopi ölçümlerin ve anlık dinamik olayları gözlemleyebilmek için hızlı pompa/THz prob (sonda) ölçüm kabiliyetinin kazanılması, madde karakterizasyonu yapan birçok araştırma grubu için önemli bir destek sağlayacaktır. Örneğin bazı biyolojik ve kimyasal reaksiyonlar saniyeler mertebesinde gerçekleştiğinden bu etkileşimlerin nasıl geliştiği bu tip bir anlık THz spektroskopi yöntemi sonucu daha iyi anlaşılabilenecektir. Aynı zamanda uygun pompalama lazerin fotouyarı sonrası, prob (sonda) görevi yapan THz darbelerin düşük foton enerjisi sayesinde birçok farklı malzeme türleri karakterize edilebilecektir. Bu tip bir ölçüm yeteneğini geliştirmek için proje çalışmasında tekrarlama oranı hızla ayarlanabilen, yükseltilmiş iterbiyum (Yb) katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemini geliştirdik ve bu sistemden üç farklı çıkış sağlayarak hem THz atım üretimi, hem belirlenmesi hemde pompa/THz prob (sonda) deneyleri yapabilen bir sistem geliştirdik. Lazerin üç çıkış kolundaki ışın parametrelerini optimize ederek sistem ile yakın gerçek zaman işlemeli, dinamik ölçüm yapabilen atmalı terahertz spektrometre ölçümlerin yapılabilirdiğini gösterdik.

Kip-kilitli lazerlerin tekrarlama oranları lazer kavitesinin fiziksel olarak uzunluğunun değişmesi ile ayarlanabilmesine rağmen farklı kavite uzunluklarında aynı kararlılığı (çıkış gücü, atım süresi, tayf genişliği) gösterememektedir. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda farklı kavite uzunluklarında kararlı çalışan Yb: katkılı kip-kilitli fiber lazer geliştirerek lazer tekrarlama frekansını çok hızlı bir şekilde değiştirebileceğimizi gösterdik. Lazer çıkışındaki güç ve darbe sürelerini uygun pompalama diyotları ve özel ızgara optik bileşenleri kullanarak THz atım üretimi ve belirlenmesini lazer kavite uzunluğunu değiştirerek optik örnekleme metodu ile yapılabileceğini gösterdik. Bu sayede THz atım şeklini daha hızlı belirleyebileceğimiz için çok kısa sürelerde gerçekleşen kimyasal/fiziksel olayları aydınlayabilecek yeni bir ölçüm tekniğinin temelini oluşturduk. Elde edilen hızlı tarama süreleri ve Yb: katkılı lazerlerin Er: katkılı lazerlere göre daha yüksek verimde çalışması sayesinde bu tip sistemler pompa/THz prob (sonda) gibi dinamik ölçüm kabiliyetine dayanan birçok deney için önemli bir yenilik kazandıracaktır.

Anahtar Kelimeler: Terahertz, zamana dayalı ölçüm teknikleri, pompa/sonda deneyi, Yb-katkılı fiber lazer sistemleri

ABSTRACT

Dynamical measurement techniques such as terahertz time-domain spectroscopy, pump/THz probe spectroscopy or similar techniques typically are driven by amplified pulsed laser systems and all utilize interferometric techniques to measure and record the THz profile which results in measurement times that can last tens of minutes. Rapid pump/THz probe measurement techniques will aid in observing instantaneous phenomena or perform near real-time spectroscopy benefiting many research groups which work in the field of material characterization. For example, since some biological and chemical reactions occur in a matter of seconds the interaction of these phenomena with THz waves can be better understood using near-real time measurement techniques. At the same time, after photo excitation at the appropriate pump wavelength the low photon energy THz probe will allow the characterization of a variety of materials. In this research project, to have access to such measurements, we have developed a THz spectrometer driven by an ultrafast amplified Ytterbium (Yb) doped fiber laser whose repetition rate can be tuned rapidly which allows for such dynamical measurements. The system we developed has three outputs which are used for THz pulse generation, THz pulse detection as well as pump/THz probe experiments. By optimizing the optical beam parameters in all three arms we showed that the system can be used for near-real time, pulsed terahertz measurements for dynamical systems.

Even though one can tune the repetition rate of a mode-locked laser by changing the cavity length the output beam stability will typically not remain stable (output beam power, pulse duration, and spectral width). Towards this goal, we developed a mode-locked amplified Yb: doped fiber laser system which showed the same output beam parameters despite rapid changes in its repetition rate or cavity length. By using adequately driven pump diodes and appropriate gratings we were able to control and stabilize the power output as well as the pulse duration allowing the use of optical sampling by cavity tuning methods to be utilized in the generation and detection of THz pulses. By developing the method of rapid scanning of the repetition frequency and using highly efficient Yb: doped fiber lasers when compared to Er: doped ones we were able to show that this system can be utilized in many experiments which show dynamical behavior such as pump/THz probe spectroscopy.

Keywords: Terahertz spectroscopy, time-domain measurement techniques, pump/probe experiments, Yb-doped fiber lasers

1. GİRİŞ

Fiber lazer sistemlerin THz sistemlerinde başarıyla denendiği literatürde gözlemlenmiştir: Telekomünikasyon alanında genelde kullanılan Erbiyum katkılı fiber lazer sistemlerin gelişimiyle bu lazerlerin kip-kilitlenerek THz spektrometre sistemlerinde kullanılmaya başlandığı gözlemlenmiştir [Nagai vd. 2004]. Erbiyum katkılı kip kilitli lazerler de bu dalga boyuna ikinci armonik üretiminden sonra kolayca uyabiliyor [Arbore vd 1997; Nelson vd. 1996]. Bu tip lazer sistemleri hem GaAs maddesine dayalı FİA yapılarını kullanarak hem de ZnTe tipi kristal yapılarında optik rektifikasyon ve elektro-optik belirleme yöntemleri kullanarak THz spektrometre sistemlerinde kullanılmıştır. Özellikle optik rektifikasyon üretim yöntemi ile iyi bir sinyal elde edilmesine rağmen, ZnTe kristallerinin kalınlığından dolayı istenilen sinyal güç seviyesinde elde edilen terahertz tayf bandı sadece 2.5THz'e kadar uzandığı görülmüştür [Altan vd. 2006]. İkinci armonik üretimi sonrası güç azaldığından, yakın geçmişte bu tip lazerlerin temel dalga boyunu (~1550nm) kullanarak terahertz üretimi de elde edilmiştir. Bu çalışmada, optik rektifikasyon yöntemi ile <110> yapısındaki GaAs kristali içinden terahertz üretimi gerçekleştirilmiştir [Nagai vd. 2004]. Fakat bu dalga boyundaki 2 fotonun soğurması olayı nedeniyle çıkan terahertz atışlarının gücünün verimsiz olduğu tespit edilmiştir. Son senelerde üretilen InGaAs temeline dayalı FİA yapıları sayesinde temel dalga boyunda çalışan Er: katkılı fiber lazer sistemleri ile sinyal/gürültü oranı yüksek THz spektrometre sistemlerinin kurulduğu ve araştırmaların yapıldığı görülmektedir [Wilk vd. 2011]. Fiber lazer sistemlerin gelişiminde farklı nadir toprak metallerin kazanç ortamı için kullanıldığı ve bu lazerler arasında sayılı geliştirilmiş lazerlerin femtosaniye mertebesinde kip-kilitlendiği gözlemlenmiştir [Tamura vd. 1993]. Özellikle kısa atımlar üretimi için Erbiyum'a ek olarak İterbiyum (Yb) nadir toprak metaline dayanan fiber lazer sistemleri başarıyla geliştirilmiştir [Lim vd. 2003]. Kip-kilitli Yb: katkılı fiber lazerlerin (YDFL) temel dalga boyu 1060nm civarında olduğu için yine özel geliştirilmiş düşük ısılarda büyütülen InGaAs yapıları ile THz üretimi gerçekleştirilebilir [Matthaeus vd. 2008]. YDFL lazer pompalı THz spektrometre sistemleri ile ilgili çalışmaların az sayıda olsa da literatürde son 2 senedir rastlandığı görülmektedir. Hemen her açıdan Er: katkılı fiber lazerlere göre daha iyi performans veren Yb-fiber lazerlerin bu tür uygulamalarda kullanımlarının artması beklenmektedir. Er: katkılı fiber lazerlere göre YDFL sistemlerinin en önemli avantajı ışın ve pompalama dalgaboylarının çok yakın olması sonucu daha verimli çalışabilmeleridir [Limpert vd. 2002]. Buna ek olarak bu dalgaboyunda fiber normal saçılımı (normal dispersion) olduğundan doğrusal olmayan etkilerin kontrol altında tutulması daha kolaydır. Böylelikle atım başına çıkan enerjiler Er: katkılı lazerlere göre daha yüksek olur.

Kip-kilitli lazerlerden elde edilen femtosaniye süreçli ışın darbeleri sayesinde THz atım profilin üretilmesi ve belirlenmesi zamana dayalı ölçüm tekniklerine dayanmaktadır. Bu tip THz

profil ölçümlerinde interferometrik teknikler kullanıldığından spektrum verilerinin kaydedilmesi onlarca dakika sürebilmektedir. Atmalı THz spektrometre sistemlerinde ölçümleri daha hızlı alabilmek için farklı yöntemler denenmiştir. İlk olarak lazer kavite dışı mekanik kızak sistemleri [Xu vd. 2004] yerine piezo hareket eden sistemler kullanılmıştır [Rudd vd. 2000]. Lazer kavitesinin dışındayken THz profilini elde etmek için 15mm gibi uzun bir mesafenin taranması gerektiği için piezo kızak sistemleri yetersiz kalmaktadır. Fiziksel olarak belirlemede kullanılan atmayı mekanik olarak hareket ettirmek yerine daha hızlı ölçüm alabilmek için farklı yöntemlerin denendiği gözlemlenmiştir. Bunlar tek-lazer ve çift-lazer tarama teknikleri olarak ikiye ayrılabilir. Çift-lazer tekniklerinde THz spektrometre sistemin her koluna ayrı bir lazer konularak atımların çıkış zamanları birbirine göre ayarlanmaktadır. Literatürde eşzamansız optik örnekleme (ASynchronous Optical Sampling-ASOPS) diye adlandırılan bu teknik ile olumlu sonuçlar alınmasına rağmen yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmemektedir [Ezlinga vd. 1987; Yasui vd. 2005; Klatt vd. 2009]. Tek-lazer taramalı sistemlerin fiber lazer sistemlerinde denendiği ve lazer kavitenin uzunluğunu değiştirmek için piezo fiber gerici düzeneklerin kullanıldığı görülmüştür [Krumbholz vd. 2008], yalnız atımların kutuplaşmasını olumsuz etkiledikleri gerekçesiyle lazer kavite uzunluğunu değiştirmek için başka yöntemler geliştirilmiştir.

Bunların başında çok yakın zamanda geliştirilen optik örnekleme ile kavite ayarlanması tekniğinin (Optical Sampling by Cavity Tuning-OSCAT) temel dalga boyunda çalışan Er: katkılı fiber lazerlerde başarıyla denendiği gözlemlenmiştir [Wilk vd. 2010]. Bu araştırma grubunun yaptıkları en son çalışmada, 100ps gibi uzunluğu olan THz profilini lazer tekrarlama oranının değiştirilerek 2 dakika gibi bir süreçte aldıkları vurgulanmıştır [Wilk vd ,2011]. Bu tip çözüm önerileri genelde tekrarlama oranının takip edilmesi gereken optik tarak üretimi gibi konularda sık kullanılmaktadır [Schibli vd. 2005]. Ancak, literatürde daha verimli çalışan Yb: katkılı kip-kilit fiber lazerlerde bu yöntemlerin denemediği gözlemlenmiştir. Nedeni ise OSCAT tekniğinin çalışma prensibi: THz üretimi için bir lazer atım çıkış kolu var ve belirlenmesi için ikinci bir lazer atım çıkış kolu var. Er: katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemlerinde THz belirleme çıkış koluna uzun fiber ekleyerek OSCAT tekniği gerçekleştirildiği için genelde bu kolda zero dispersion fiber kullanılıyor [Wilk vd ,2011]. Ancak, Yb: katkılı fiber lazer sistemlerin çalıştığı dalga boyu aralığında bu tip fiberler piyasada satılmamaktadır. Bu nedenle uzun fiber sonucu atım süresinin dağılımı fiber dışı ızgara (grating) bileşenler kullanarak çok iyi kontrol edilmesi gerekiyor. Böyle bir gereksinim Yb: katkılı fiber lazer sürümlü ve OSCAT tekniğine dayalı THz ölçüm sistemlerinin geliştirilmesine engel olmuştur.

Bu proje çalışmasında atım dağılım sürelerini fiber çıkışlarında çok iyi kontrol ederek ve OSCAT tekniğine benzer bir ölçüm yöntemi kullanarak THz atım şekil ölçüm hızını

iyileştirmek için lazer tekrarlama oranını kavite uzunluğunu hızlı bir şekilde değiştirerek yapılabildiğini gösterdik [Keskin vd. 2013a, Keskin vd. 2013b, Keskin vd. 2014]. Yapılan bu çalışmalar sonucunda terahertz alanında önemli sonuçlar elde ettik. Bu başarı, projenin başarı ölçütlerine uygun olarak şöyle özetlenebilir: Mevcut terahertz spektroskop sistemlerindeki ölçüm yeteneğinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi ve bu yeni ölçüm yeteneği ile pompa/sonda gibi dinamik ölçümlerin gerçekleşmesi olarak değerlendirilecektir. Proje önerisinde başarı yuzdelerinin çalışmaya göre oranı ve alınan sonuçlar aşağıda gösterilmektedir.

1. Yüksek kararlılıklı bir Yb: katkılı fiber lazerin kurulması. (%20). Başarıyla gerçekleşmiştir.
2. Yb: katkılı fiber lazer çıkışını ikiye ayırarak istenilen uzunluktaki THz üretim ve belirleme kollarından geçirildikten sonra, THz üretici ve belirleme FİA yapılarına gelmeden önce atım uzunlukların <250fs olması ve ortalama gücün en az 50-100mW olması (%30). Başarıyla gerçekleşmiştir.
3. Tasarlanan RF kontrol sistemi ile lazer tekrarlama oranını en az 50kHz aralığında hızlı bir şekilde tarayarak anlık THz atım ölçüm tekniğinin geliştirilmesi (%20). Başarıyla gerçekleşmiştir.
4. YDFL çıkışını 3. Kola ayırarak pompa/sonda için gerekli zamana dayalı ölçüm sisteminin plaka üzerinde kurulması ve test edilmesi (%20). Pompa/THz prob (sonda) sistemi kuruldu, pompa kolu hem temel merkez boyu (1030nm) hemde ikinci harmonik dalga boyunda (515nm) kuruldu ancak pompa/THz prob deneyi henüz gerçekleşmedi. O nedenle kısmi başarı elde edilmiştir.
5. Projeden bir tek tez veya yayın çıkarmak başarılı olarak değerlendirilebilecektir (%10). Projedeki yapılan çalışmalara kapsamında dört uluslararası makale, beş uluslararası bildiri, üç ulusal bildiri ve bir yüksek lisans tezi gerçekleşmiştir.

Proje kapsamında geliştirilen teknikler sayesinde birçok öğrenciye destek olunmuştur. Bu çalışmaların detayları bu raporda anlatılmaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ ve PROJENİN AMACI

1970'lerin sonu ve 1980'lerin başı itibarı ile ultra hızlı lazerlerin gelişimi koherent terahertz dalga boyu üretim tekniklerine yeni bir boyut kazandırmıştır. İlk olarak yükseltilmemiş ve yükseltilmiş kip-kilitli Ti: Yakut lazerlerin terahertz sistemlerinde denendiği ve bu çalışmalar

sayesinde biyoloji, kimya, fizik, metalürji ve başka temel bilim alanlarında önemli katkılar sağlandığı görülmektedir [Schmittenmaer, 2004]. Bu sistemleri kullanarak hem fotoiletken antenlerle (FİA) hem de kristal yapılar ile terahertz üretimi ve tespiti çalışmaları başarıyla gerçekleştirilmiştir [Suzuki vd. 2006; Otake vd. 2000; Takahashi vd. 2003].

Terahertz spektroskopi sistemlerinin tarihsel gelişimleri hep kip kilitli Ti: Yakut lazerlerine dayalı olduğu için pompalama dalga boyu ~800nm civarı seçilmiştir. Optik rektifikasyon ile terahertz üretimi yapabilen kristallerin ~800nm dalga boyundaki çeşitleri azdır. Üretilen THz atımın çizgisel olmayan bir orantı ile gelen görünür atımı elektrik genliğine orantılıdır $P_{THz}^{(2)}(t) \propto \chi^{(2)} E_{vis}^2(t)$, ve ZnTe kristali, 800nm dalga boyundan THz dalga boyuna kadar yüksek bir dönüşüm oranına sahip ender kristallerden biridir (1E-6). ZnTe kristalinin bir başka özelliği ise kırılma indisinin hem THz hem de görünür bölgelerinde neredeyse eşdeğer olmasıdır. ZnTe dışında GaSe ve GaP tipi kristaller de THz üretimi için kullanılmaktadır [Rice vd. 1994; Han vd. 2001]. Dönüşüm sonrası üretilen THz atma uzunlukları antene göre daha kısa olduğundan daha geniş bir THz bandı elde edilir. ZnTe kristalleri ve yükseltmemiş femtosaniye lazerler (osilatör) ile bant genişliği 4 THz'e kadar uzanmıştır [Altan vd. 2006]. Hatta bazı çalışmalarda tayf genişliği 40THz'e kadar çıkmıştır [Huber vd. 2000]. Terahertz spektroskopi sistemlerinin tarihsel gelişimleri hep kip kilitli Ti: Yakut lazerlerine dayalı olduğu için pompalama dalga boyu ~800nm civarı seçilmiştir.

Telekomünikasyon alanında genelde kullanılan Erbiyum katkılı fiber lazer sistemlerin THz spektrometre sistemlerinde kullanılmaya başlandığı yakın tarihte gözlemlenmiştir [Nagai vd. 2004]. Erbiyum katkılı kip kilitli lazerler de bu dalga boyuna ikinci armonik üretiminden sonra kolayca uyabiliyor [Arbore vd. 1997; Nelson vd. 1996]. Bu tip lazer sistemleri hem GaAs maddesine dayalı FİA yapılarını kullanarak hem de ZnTe tipi kristal yapılarında optik rektifikasyon ve elektro-optik belirleme yöntemleri kullanarak THz spektrometre sistemlerinde kullanılmıştır. Özellikle optik rektifikasyon üretim yöntemi ile iyi bir sinyal elde edilmesine rağmen, ZnTe kristallerinin kalınlığından dolayı istenilen sinyal güç seviyesinde elde edilen terahertz tayf bandı sadece 2.5THz'e kadar uzandığı görülmüştür [Altan vd. 2006]. İkinci armonik üretimi sonrası güç azaldığından, yakın geçmişte bu tip lazerlerin temel dalga boyunu (~1550nm) kullanarak terahertz üretimi de elde edilmiştir. Bu çalışmada, optik rektifikasyon yöntemi ile <110> yapısındaki GaAs kristali içinden terahertz üretimi gerçekleştirilmiştir [Nagai vd. 2004]. Fakat bu dalga boyundaki 2 fotonun soğurması olayı nedeniyle çıkan terahertz atışlarının gücünün verimsiz olduğu tespit edilmiştir. Son senelerde üretilen InGaAs temeline dayalı FİA yapıları sayesinde temel dalga boyunda çalışan Er: katkılı fiber lazer sistemleri ile sinyal/gürültü oranı yüksek THz spektrometre sistemlerinin kurulduğu ve araştırmaların yapıldığı görülmektedir [Wilk vd. 2011].

Fiber lazer sistemlerin gelişiminde farklı nadir toprak metallere kazanç ortamı için kullanıldığı ve bu lazerler arasında sa yılı geliştirilmiş lazerlerin femtosaniye mertebesinde kip-kilitlendiği gözlemlenmiştir [Tamura vd. 1993]. Özellikle kısa atımlar üretimi için Erbiyum'a ek olarak İterbiyum (Yb) nadir toprak metaline dayanan fiber lazer sistemleri başarıyla geliştirilmiştir [Lim vd. 2003]. Kip-kilitli Yb:katkılı fiber lazerlerin (YDFL) temel dalga boyu 1060nm civarında olduğu için yine özel geliştirilmiş düşük ısılarında büyütülen InGaAs yapıları ile THz üretimi gerçekleştirilebilir [Matthaeus vd. 2008]. YDFL lazer pompalı THz spektrometre sistemleri ile ilgili çalışmaların az sayıda olsa da literatürde son 2 senedir rastlandığı görülmektedir. Hemen her açıdan Er: katkılı fiber lazerlere göre daha iyi performans veren Yb-fiber lazerlerin bu tür uygulamalarda kullanımlarının artması beklenmektedir. Er: katkılı fiber lazerlere göre YDFL sistemlerinin en önemli avantajı ışınım ve pompalama dalgaboylarının çok yakın olması sonucu daha verimli çalışabilmeleridir [Limpert vd. 2002]. Buna ek olarak bu dalgaboyunda fiber normal saçılımlı (normal dispersion) olduğundan doğrusal olmayan etkilerin kontrol altında tutulması daha kolaydır. Böylelikle atım başına çıkan enerjiler Er: katkılı lazerlere göre daha yüksek olur. Yüksek enerji, yüksek güç üreten fiber yükseltici çalışmaları büyük çekirdek boyutlarına sahip özel Yb- katkılı fiberlere ve sinyal, pompa ışınlarını fibere eşlemek için kullanılan optik bileşenlere dayanmıştır. Özellikle malzeme markalama veya işleme gibi uygulamalarda bahsi geçen bu tip lazerlerden çıkan pikosaniye ile nanosaniye mertebesinde olan atım uzunlukları fiber dışı kırınım ağı kompresörleri (diffraction grating compressor) ile femtosaniye sürelerine inebilmektedir [Buckley vd. 2005]. Dr. İlday yönetimindeki Bilkent ekibi fiber ürünlerdeki son gelişmeleri kullanarak, tamamen fiber bir sistem ile ortalama gücü 20W mertebesinde, 150 fs süresine sıkıştırılabilir atımlar üretilebileceğini göstermiştir [Mukhopadhyay vd. 2009]. Tüm tamamen fiber sistemlerin atımlarının <250 fs mertebesine sıkıştırılması sırasında halen fiber olmayan saçılım ağı gerekmektedir.

2.1. Zamansal Ölçüm Tekniklerinin Geliştirilmesi

Atmalı THz spektrometre sistemlerinde ölçümleri daha hızlı alabilmek için farklı yöntemler denenmiştir. İlk olarak lazer kavite dışı mekanik kızak sistemleri [Xu vd. 2004] yerine piezo hareket eden sistemler kullanılmıştır [Rudd vd. 2000]. Lazer kavitesinin dışındayken THz profilini elde etmek için 15mm gibi uzun bir mesafenin taranması gerektiği için piezo kızak sistemleri yetersiz kalmaktadır. Fiziksel olarak belirlemede kullanılan atmayı mekanik olarak hareket ettirmek yerine daha hızlı ölçüm alabilmek için farklı yöntemlerin denendiği gözlemlenmiştir. Bunlar tek-lazer ve çift-lazer tarama teknikleri olarak ikiye ayrılabilir. Çift-lazer tekniklerinde THz spektrometre sistemin her koluna ayrı bir lazer konularak atımların çıkışı

zamanları birbirine göre ayarlanmaktadır. Literatürde eşzamansız optik örnekleme (ASynchronous Optical Sampling-ASOPS) diye adlandırılan bu teknik ile olumlu sonuçlar alınmasına rağmen yüksek maliyeti nedeniyle tercih edilmemektedir [Elzinga vd. 1987; Yasui vd. 2005; Klatt vd. 2009]. Tek-lazer taramalı sistemlerin fiber lazer sistemlerinde denendiği ve lazer kavitenin uzunluğunu değiştirmek için piezo fiber gerici düzeneklerin kullanıldığı görülmüştür [Krumbholz vd. 2008], yalnız atımların kutuplaşmasını olumsuz etkiledikleri gerekçisiyle lazer kavite uzunluğunu değiştirmek için başka yöntemler geliştirilmiştir. Bunların başında çok yakın zamanda geliştirilen optik örnekleme ile kavite ayarlanması tekniğinin (Optical Sampling by Cavity Tuning-OSCAT) temel dalga boyunda çalışan Er:katkılı fiber lazerlerde başarıyla denendiği gözlemlenmiştir [Wilk vd. 2010]. Bu araştırma grubunun yaptıkları en son çalışmada, 100ps gibi uzunluğu olan THz profilini lazer tekrarlama oranının değiştirilerek 2 dakika gibi bir süreçte aldıkları vurgulanmıştır [Wilk vd. 2011]. Benzer bir yöntem kullanarak projede THz profil ölçüm hızını iyileştirmek için lazer tekrarlama oranını değiştirebilen bir yöntem geliştirdik. Bu tip çözüm önerileri genelde tekrarlama oranının takip edilmesi gereken optik tarak üretimi gibi konularda sık kullanılmaktadır [Schibli vd. 2005]. Projede yapılan çalışmada hızlı sürülebilir bir ısak sisteminin kavite içine entegre ederek en az 10Hz mertebesinde salınım frekansını ayarlayarak, tekrarlama frekans değişkenliğinin DC-50kHz arası değiştirilmesini sağlayan bir yaklaşıma literatürde rastlamadık. Tüm bunlara ek olarak, bildiğimiz dâhilinde, bu tip bir ölçüm hızlandırma çözüm önerisini YDFL lazer pompalı THz sistemlerinde kullanıldığına dair bir çalışma bulamadık.

2.2. Dinamik (Pompa-Sonda) Ölçümler

Terahertz spektroskop sistemleri ile birçok farklı malzeme üzerinde soğurma ve kırılma indisi ölçümleri gerçekleştirilmiştir [Auston vd. 1984; Auston vd. 1988; Zhang vd. 1992; Brener vd. 1996, Beard vd. 2001]. Bu uygulamalar madde içindeki dinamik olayları ölçmekten uzak kalmaktadır. Oysaki atmalı THz sistemlerinin, diğer uzak kızıl ötesi ölçüm yöntemlerine göre (FTIR gibi) en önemli avantajı dinamik ölçüm kabiliyetidir. Pikosaniye süreçteki atımlar sayesinde farklı madde türleri (biyolojik, kimyasal, yarı-iletken) içinde birçok düşük enerji ile uyarılan hallerin dinamik gelişimini gözlemlemek mümkün olmakla beraber madde içi fiziksel olayları daha iyi anlamamızı sağlamaktadır. Bu tip ölçüm yeteneği elektromanyetik spektrumun diğer alanlarında (görünür ve mor ötesi bölgelerinde) başarıyla uygulanmıştır. “Pump/probe” (pompa/sonda) diye adlandırılan bu çalışmalar THz bölgesinde de olumlu sonuçlar vermiştir. Yalıtkanlar, iletkenler ve yarı-iletkenlerdeki yüklerin nasıl hareket ettikleri, exciton, polaron (elektron ve fonon etkileşimleri) gibi zamansal değişen elektriksel parametrelerin ölçümleri başarıyla gerçekleştirilmiştir [Knoesel vd. 2001; Knoesel vd. 2004; Shan vd. 2003; Wang vd. 2004].

Bu tip uygulamalarda üç farklı ölçüm yöntemi geliştirilmiştir: İlk ikisi, 1 boyutta ve 2 boyutta dinamik ölçüm olarak nitelendirilmiştir [Schmuttenmaer, 2004]. Tek boyutta yapılan çalışmalarda THz atımı sabit tutulurken pompalama atımının THz atımına göre örneğe geliş zamanları değiştirilir. Böylelikle tek bir THz frekansında madde içi dinamik olayları gözlemleyebilmekteyiz. İki boyutlu çalışmalarda ise pompalama atımının THz atımına göre farklı geliş zamanlarında THz profilinin tamamı taranarak elde edilir ve böylelikle frekansa bağlı olarak dinamik olayların nasıl geliştiğini gözlemleyebiliriz. Üçüncü yöntem ise daha az bilinen ama bir örneğin elektriksel karakteristiklerini ölçmek için kullanılan en iyi yöntemlerden birisi olan 2 boyutlu diferansiyel pump/probe ölçüm düzenidir [Schmuttenmaer, 2004]. Burada incelenen örnek üzerinde hem pompa atması varken hem de pompa atması yokken 2-boyutlu ölçüm alınır. Alınan her iki taramanın sinyal farkı işlenir ve böylelikle sadece foto-iletkenlik sonucu madde içi parametreler elde edilir. Örneğin bir yarı-iletken maddenin foto-uyarı sonrası mobilitesinin nasıl değiştiğini ancak bu yöntem ile anlayabiliriz [Beard vd. 2001]. Kurulması istenilen yakın-gerçek zaman ölçüm alabilen YDFL pompalı THz spektrometre sistemi ile yukarıda bahsedilen ölçümlere dair benzeri herhangi bir çalışma henüz gerçekleştirilmemiştir.

Bilgimiz dahilindeki literatür taraması sonucu yukarıda sıralanan YDFL pompalı THz spektroskop sisteminin kurulumu, yakın-gerçek zamanda ölçüm yeteneğinin gerçekleştirilmesi ve bu tip sistemlerin pompa/sonda gibi temel malzeme araştırma konularında uygulanması özgün niteliktedir ve ilk defa bu yöntemler bu projedeki önerilen çalışmalar ile gerçekleştirilmiştir. YDFL sistemler ile THz spektroskop sistemlerinin birleştirilmesi sonucu zamana dayalı THz ölçüm tekniklerinin geliştirilmesi literatürde bir arada kullanılarak optimize edilmediği gösterilmiştir. Sonuç olarak, projede geliştirilen sistem, sonraki nesil terahertz ölçüm teknikleri için temel bilgi ve teknolojik tasarımları üretecek nitelikte olup, tamamen özgün bir çalışmadır.

2.3. Projenin Amacı

Proje çalışması, mevcut terahertz spektroskop sistemlerinde kullanılan tek boyutlu (noktasal) ölçüm tekniklerinin iyileştirilmesi, Yb: katkılı çok hızlı fiber lazerlerin THz spektroskop sistemlerinde kullanımı ve bu tip sistemlerin dinamik ölçüm yeteneğinin iyileştirilmesini amaçlamaktadır. Yapılması istenilen çalışmalar ve elde edilen sonuçlar üç ana grupta özetlenebilir:

Yb: katkılı Fiber Lazer Pompalı Terahertz Spektrometre Sistemin Kurulumu: Önerilen projenin başlıca amacı Yb-katkılı fiber lazeri (YDFL) kullanarak terahertz spektroskop sistemini

geliştirmektedir. THz atımını üretmek için kısa atma uzunlukları gerektiğinden geliştirilecek YDFL lazerinin atma uzunluklarının 250fs'den daha az olması gerekmektedir. Geliştirilen YDFL lazerin merkez dalga boyu 1030nm olduğundan THz atımlarını üretmek için düşük ısılarda büyütülmüş özel InGaAs (LT-InGaAs) yarı iletken maddesine dayalı fotoiletken THz anten (Foto İletken Anten) yapıları özel seçilerek kullanılmıştır. Bu çalışmalar projede başarıyla gerçekleşmiştir ve ülkemizdeki ilk defa bu özelliklere sahip bir lazer sistemi ile THz üretimi gerçekleştirilmiştir.

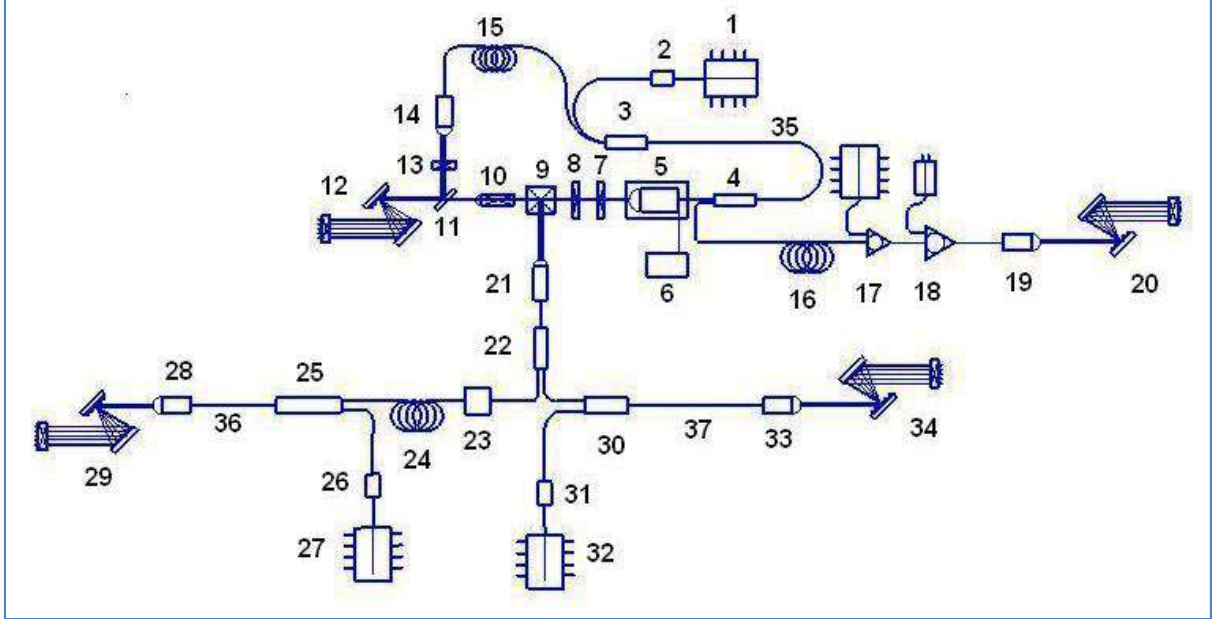
Yakın-Gerçek Zaman Ölçüm Tekniklerin Geliştirilmesi: Yaygın olarak çok sayıda laboratuvarında kullanılan femtosaniye Ti: Yakut lazerinin dezavantajları şöyle sıralanabilir: Düzenli olarak kısa süreler kararlı olarak çalışabilmesi, karmaşık yapısı ve yüksek sistem maliyeti. Bu sınırlamalar nedeniyle hem laboratuvarımızda hemde dünya çapında benzer laboratuvarlarda Ti: Yakut lazer etrafında kurulan THz spektroskop sistemlerinde THz atımını belirlemek için mekanik olarak hareket eden kızaklara ihtiyaç duyulmaktadır. Bir THz tayfını kaydetmek için en azından 15mm gibi bir mesafenin mikron basamaklarla taranması gerektiği için ölçüm zamanları uzamakta ve kullanılan lazerin bu zaman aralığında düzenli çalışmaması ya da gürültüsü gibi etkenler ölçümleri olumsuz etkilenmektedir. Bu projede geliştirilen Yb-katkılı fiber lazerin yüksek kararlılıkla çalışması sayesinde, lazer dışında hareket eden mekanik kızak yerine THz spektrumunu kaydetmek için fiber lazerin tekrarlama oranını ve fiber lazer kavitesinin uzunluğunu hızlı değiştirerek yeni bir THz ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Kavite içine konula özel hareket eden bir hızlı kızak sistemi sayesinde THz atım şeklinin 50ps gibi gerekli bir zaman diliminin aynanın bu süreci hızlı tarayabilmesi ve lazerin bu değişkenliğe karşı kararlı çalışabilmesi sayesinde saniyeler mertebesinde kaydedebileceğini gösterdik.

Zaman Çözümlü Terahertz Ölçüm Tekniğinin Geliştirilmesi: Pikosaniye mertebesinde olan THz atımları sayesinde birçok maddede (kimyasal, biyolojik, yarı-iletken) görülen ve onları ayırt edebilen foto-uyarı sonrası elektronların ilk hale dönme zamanları THz spektroskop sistemlerini geliştirerek ölçülebilmektedir. Foto-uyarı sonrası ölçüm yapabilmek için literatürde tanımlanan "pump/probe" (pompa/sonda) tipi bir sistem geliştirildi. Kurulan Yb: katkılı fiber lazer sistemi ışının bir kısmı, iki pompalama dalga boyu seçeneği ile:(1030-1060nm) ikinci harmonik üretimi sonrası (515-530nm), bant aralığı uygun yarıiletken örneklerini foto uyarmak için güçlendirildi. Kazanılan bu ölçüm yeteneğini yakın zamanda proje raporunda da belirtilen farklı numunelerin fotouyarı sonrası dinamik olayların incelenmesi için uygulamayı planlıyoruz.

Yukarıda sıralanan Bu çalışmaların detayları bu raporda anlatılmaktadır.

3. Yb: KATKILI KİP-KİLİTLİ FİBER LAZER SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ

Kurulması istenilen Yb-katkılı, tekrarlama frekansı ayarlanabilen, kısa kol atım uzunluğu <200 femtosaniye süreçli ışın darbesine sahip, kip-kilitli fiber lazer sistemin tasarımını gerçekleştirdik. Lazer şeması ve komponent listesi aşağıdaki gibidir.

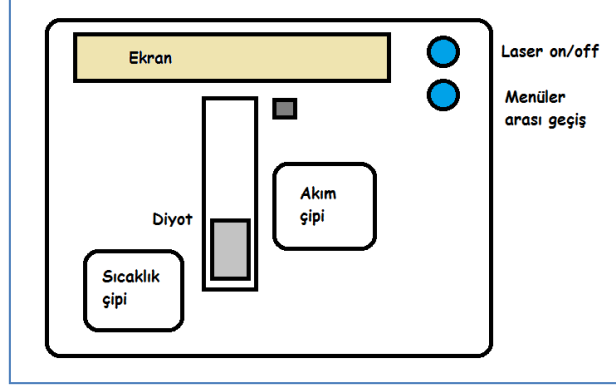


Şekil 3.1. Yb-katkılı fiber lazer THz pompalama sistemin tasarımı

1. Sistemi oluşturan bazı ana parçalar şöyledir:
2. Tek mod(SM) Pompa Diyotu 750mW
3. Özel fiber optik koruma birimleri
4. Çoklu pompa birleştirici (WDM) 980-1030nm
5. %10-20 Fiber çiftleyici
6. Özel fiber optik koşutlayıcı birimleri
7. Sürücü
8. Dalga Plakası
9. Dalga Plakası
10. Işın ayırıcı küp
11. İzolatör
12. (27) SM Pompa Diyotu
13. (32) SM Pompa Diyotu

3.1. Lazer Salıngaç Kurulumu

Lazer salıngaç kurulumuna ilk olarak 975nm merkez dalga boyunda çalışan pompa diyotunun yerleştirilmesi ve karakterizasyonu ile başlandı.



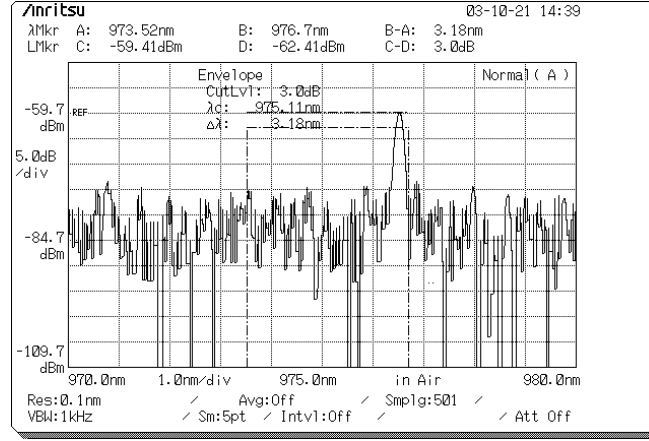
Şekil 3.2. Diyot sürücüsü şeması

Kullanılan lazer diyotların akım-güç karakterizasyonları yapıldı:

Tablo 3.1. Diyot akım-güç değerleri

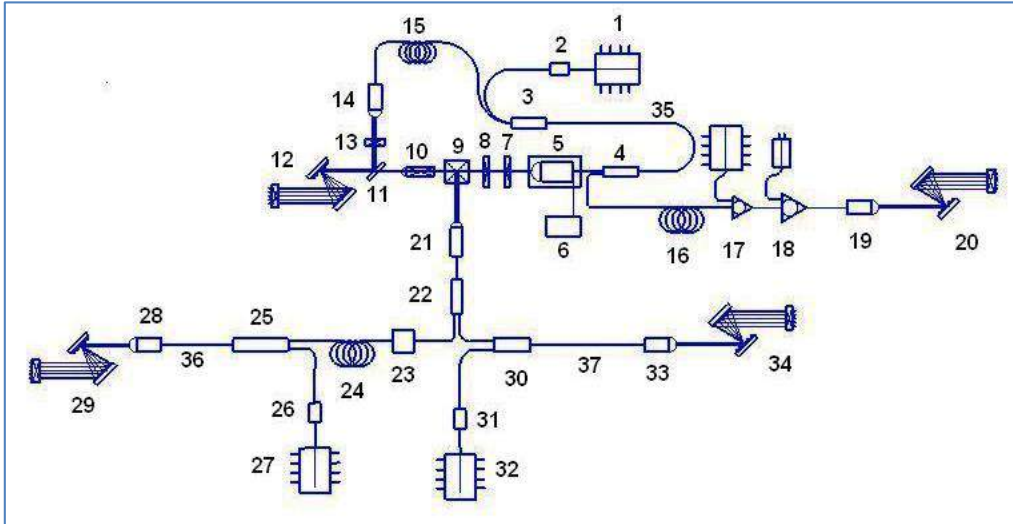
Diyot 1:		Diyot 2:	
Akım(mA)	Güç(mW)	Akım(mA)	Güç(mW)
50	4,7	50	354
100	37,6	100	389
150	73,6	150	421
200	110	200	454
250	144	250	490
300	178	300	525
350	214	350	560
400	250	400	596
450	283	450	630
500	318	500	666

Bu verilere dayanarak diyotların güvenli bir şekilde 500mA 'de çalışabilecekleri anlaşıldı. Sonra pompa diyotunun spektrum analizi yapıldı:



Şekil 3.3. Diyot çıkış spektrumu

Yukarıda elde edilen sonuç uzun çalışma aralığı sonrası belirlendi. Böylelikle dalga boyun verilen akıma göre kaymadığı doğrulandı. Yapılan çalışmalar sonrasında bir önceki belirtilen rapordaki sistemin kurulumuna başlandı:



Şekil 3.4. Yb-katkılı fiber lazer THz pompalama sistemin tasarımı

Şekil 3.4'te 2 ve 3 numara olarak belirtilen pompa koruma filtresi ve çoklu pompa birleştiricisi (WDM) 980-1030 takıldı. Sonrasında güç ölçümü yapılarak takılan parçaların güç kayıpları belirlendi:

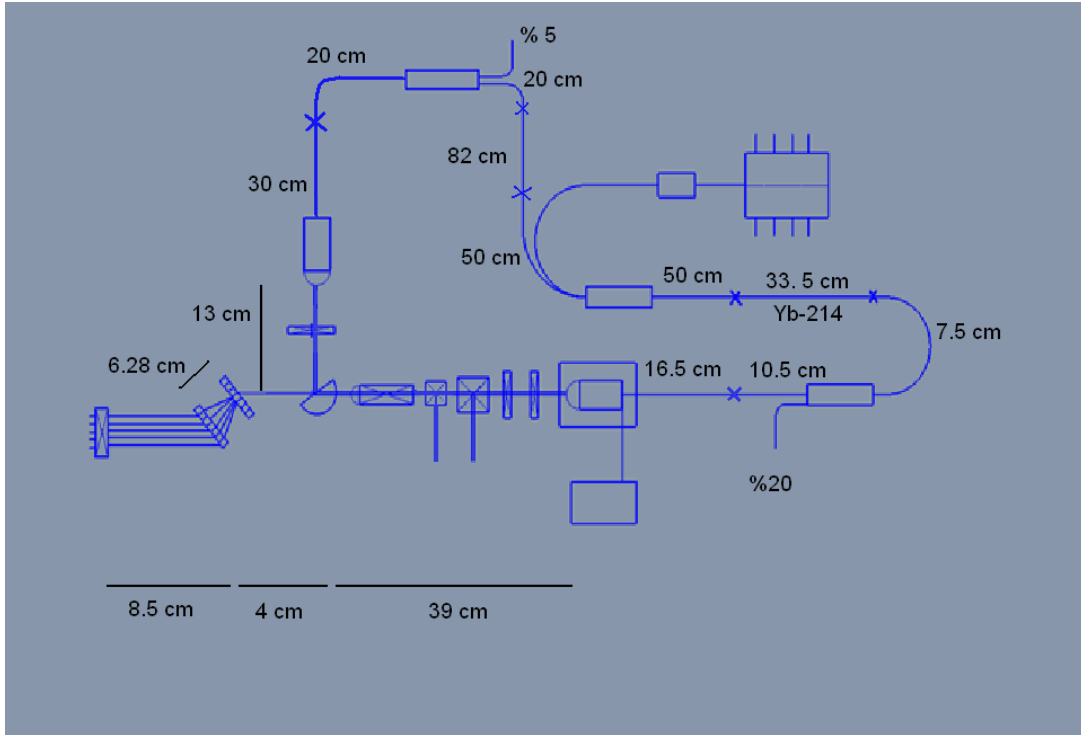
Tablo 3.2. PPF sonrası akım-güç değerleri

Akım (mA)	Güç (mW)	Kayıp (%)
200	95	13,6
400	216	13,6
600	336	13,6
800	456	13,1
1000	577	13,5

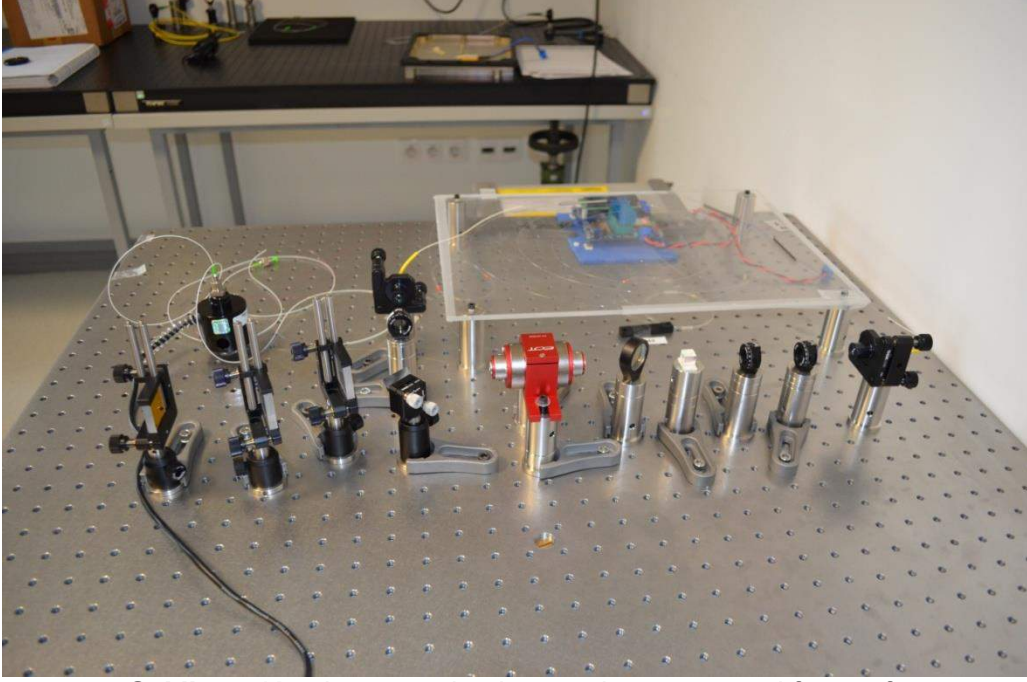
Tablo 3.3. WDM sonrası akım-güç değerleri

Akım (mA)	Güç (mW)	Kayıp (%)
200	87,5	7,9
400	201	7,0
600	312	7,1
800	423	7,2
1000	534	7,5

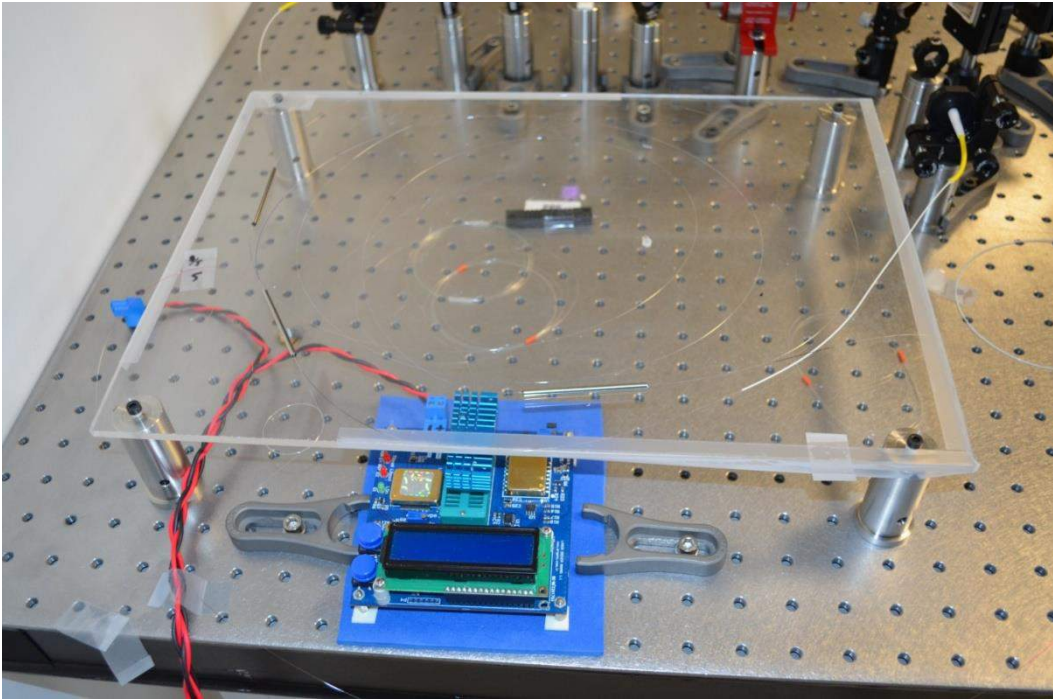
Ardından Şekil 3.4'te gösterilen 15. numaraya kadar olan birimler, yani lazer salıngacın tüm fiber optik bileşenleri takıldı. Detaylı olarak öncelikle Yb-214 aktif fiber, %10-20 fiber çiftleyici ve özel fiber optik koşutlayıcı bağlantıları *fiber splicer* cihazı ile yapıldı. Bu parçalar sonrasında fiber dışı ekipmanları olan çeyrek dalga plakası, yarım dalga plakası, polarize ışın ayırıcı küp(PBS), ışın ayırıcı(BS), izolatör yerleştirildi (numara 4-10). Sonra, atım kısaltma işleminin gerçekleştiği optik ızgara birimleri yapılan hesaplamalar doğrultusunda belirlenen mesafede yerleştirildi. Optik ızgaralardan geçen ışığı tekrar sisteme geri döndürmek için kare ayna kullanıldı (numara 12). Optik ızgaralardan ikinci defa geçen ışık D-şekil ayna ile ikinci özel fiber optik koşutlayıcıya dolayısıyla tekrar fibere yönlendirildi (numara 11). Bu noktada ikinci çeyrek dalga plakamızı da yerleştirdik (numara 13). Koşutlayıcı sonrasında sistem gözlemine rahatlıkla yapabilmek için %5-95 fiber çiftleyici eklendi. Bu çiftleyicimizin başlangıç noktamız olan çoklu pompa birleştiricisi ile bağlantısını yaptığımızda salıngaç döngümüzü tamamlamış olduk. Sistemin tamamlanmış halinin şeması ve fotoğrafları şu şekildedir:



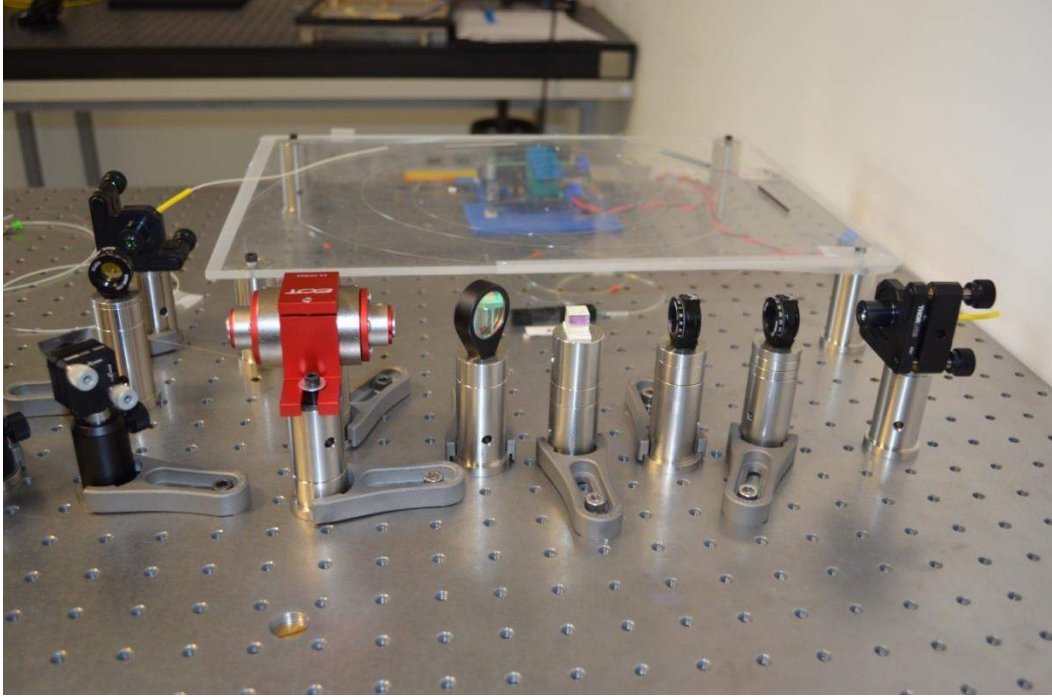
Şekil 3.5. Kurulumu yapılan lazer salıngacın şeması



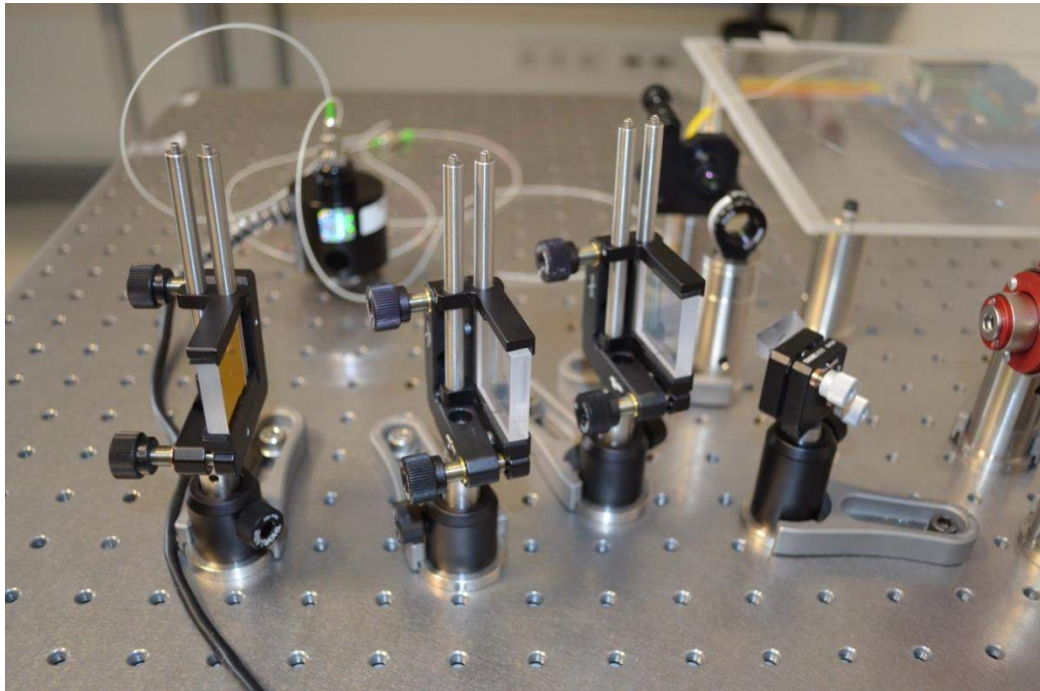
Şekil 3.6. Kurulumu yapılan lazer salıngacın genel fotoğrafı



Şekil 3.7. Lazer salıngacın fiber bileşenlerinin fotoğrafı



Şekil 3.8. Lazer salıngacın fiber dışı parçalarının fotoğrafı



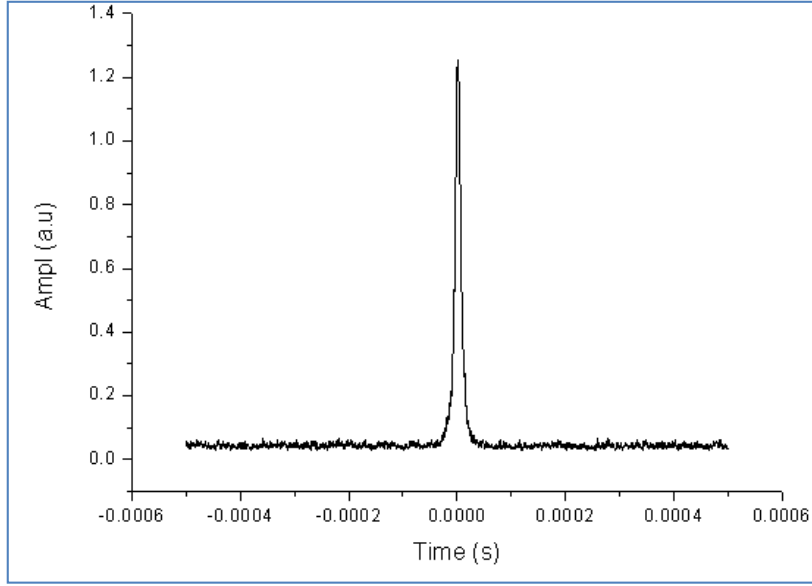
Şekil 3.9. Lazer salıngacın optik ızgaralarının fotoğrafı

Salıngaç kurulumu ve optimizasyonu tamamladıktan sonra karakterizasyon aşamasına geçildi. Çıkış aldığımız, %20 ve %5 çiftleyicilerimizden, PBS ve BS çıkışlarımızdan güç, atım uzunluğu ve spektrum ölçümleri yapıldı. Sonuçlar aşağıdaki gibidir.

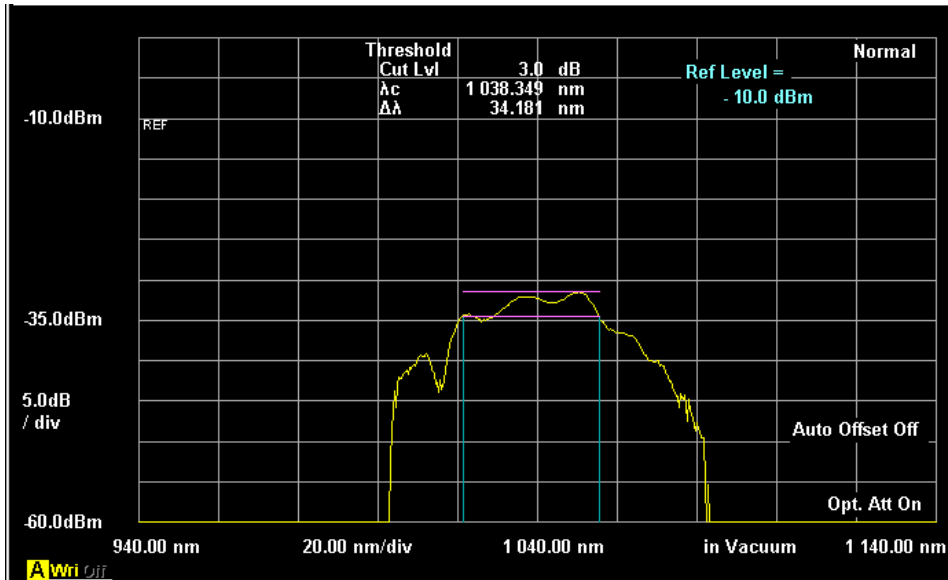
Tablo 3.4. Lazer Salıngaç Ölçüm Değerleri

Diyot Akımı	Çıkış	Spektrum ($\Delta\lambda$ -nm)	Atım Uzunluğu (ps)	Çıkış Gücü(mW)
700 mA	5%	34	0,102	0.16
	20%	60	2,06	16.9
	PBS	56	1,28	23.1
	BS	73	1,12	6.6

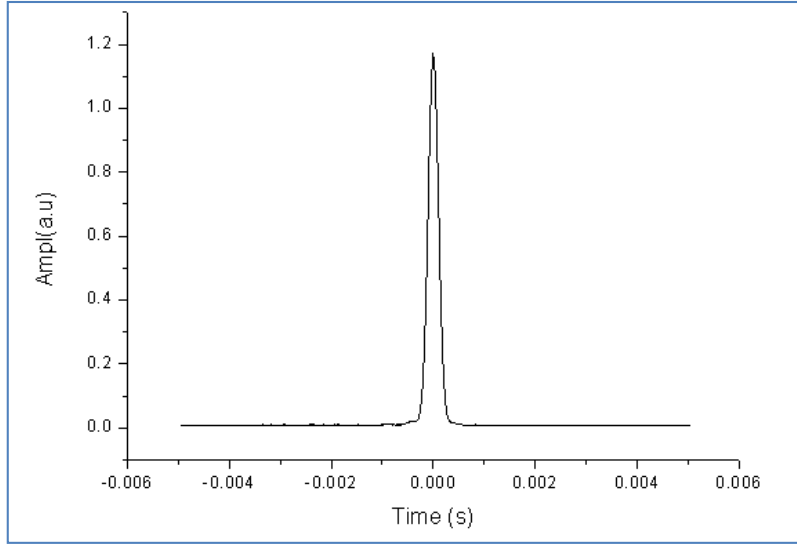
700 mA Diyot akımında ölçülen otokorelasyon sinyalleri ve bunlara denk gelen spektrumlar:



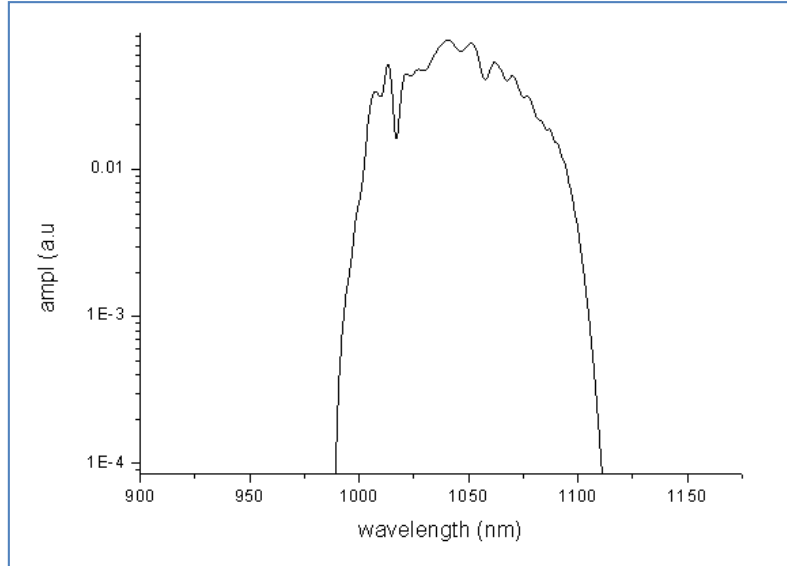
Şekil 3.10. %5 çıkışı atım profili- 700 mA diyot akımı-Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 100fs atım uzunluğu belirlendi



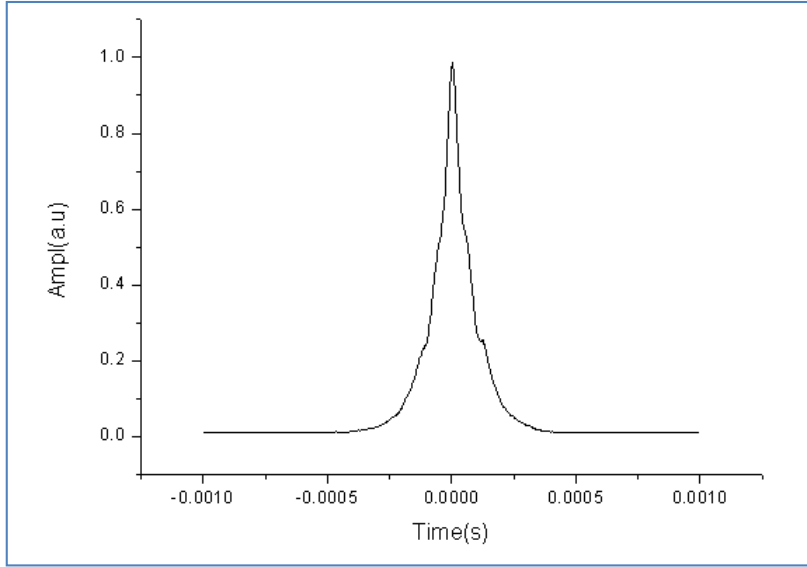
Şekil 3.11. %5 çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı



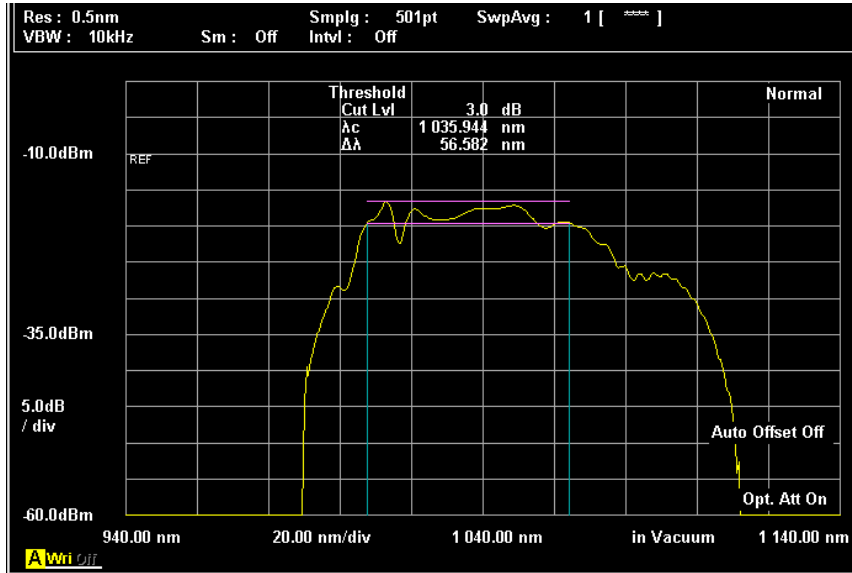
Şekil 3.12. %20 çıkışı atım profili - 700 mA diyot akımı - Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 2ps atım uzunluğu belirlendi



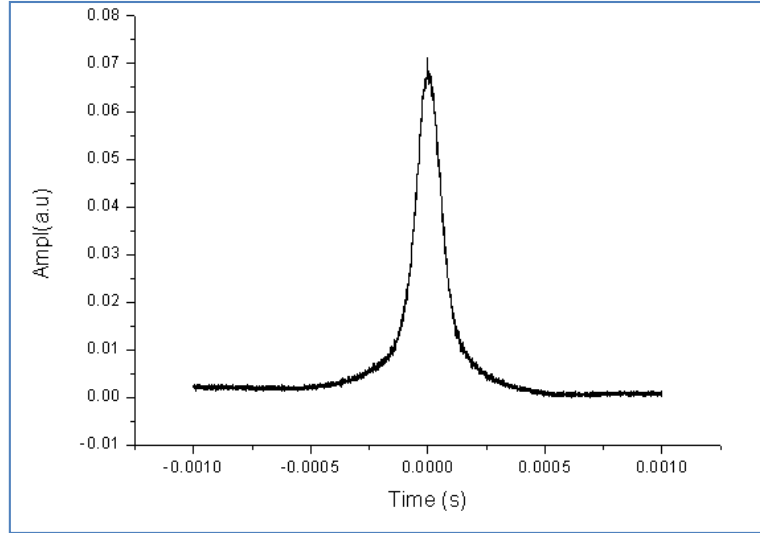
Şekil 3.13. %20 çıkışı spektrumu atım şekli- 700 mA diyot akımı



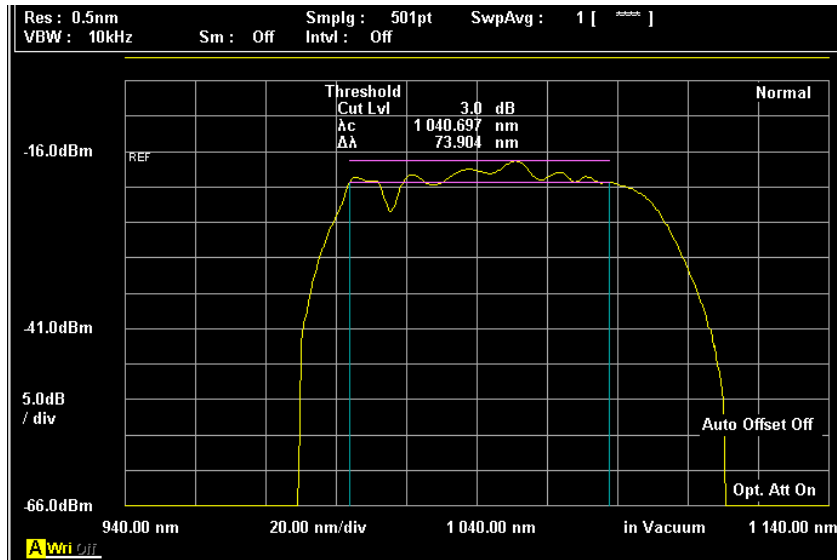
Şekil 3.14. PBS çıkışı atım profili- 700 mA diyot akımı- Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 1.3ps atım uzunluğu belirlendi



Şekil 3.15. PBS çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı



Şekil 3.16. BS çıkışı atım profikli - 700 mA diyot akımı - Otokorelatör ölçümü sonucu yaklaşık 1.1ps atım uzunluğu belirlendi



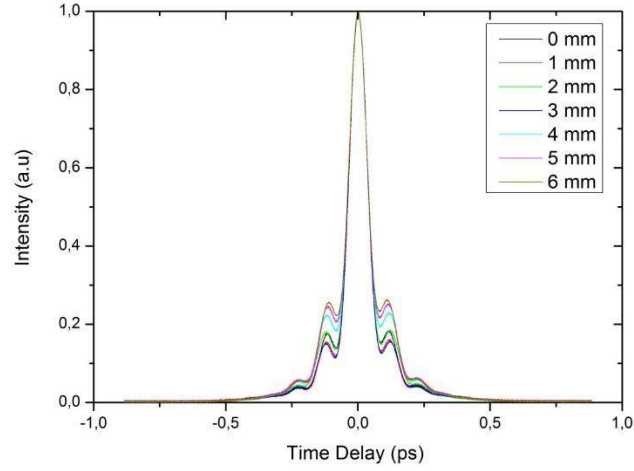
Şekil 3.17. BS çıkışı spektrumu- 700 mA diyot akımı

4. Yb: KATKILI KİP-KİLİTLİ FİBER LAZER YÜKSELTEÇ AŞAMALARI

4.1. Önyükselteç

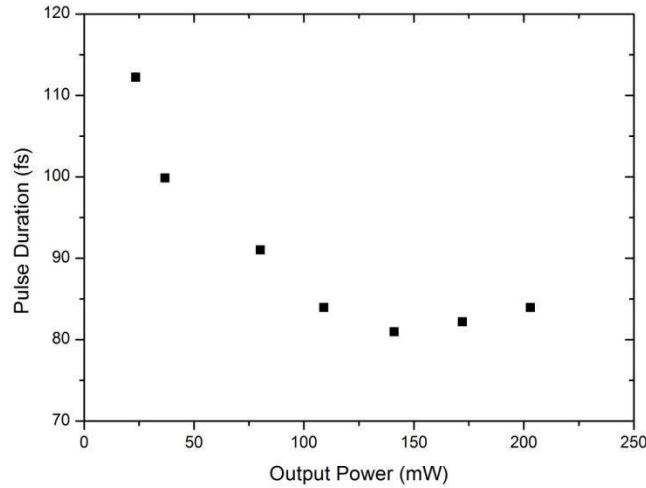
İlk olarak ön yükselteç kollarının kurulumu yapıldı. Bunun için önce diyot lazerin kurulumu ve karakterizasyonu yapıldı. Ardından diyot lazere pompa koruma filtresi splice edildi. Daha sonra pompa sinyal birleştiricisi ve %5 çiftleyici sırasıyla splice edildi. İkinci ön yükselteç kolunun kurulumu lazer salıngacın %50 çiftleyici çıkışından splice edilerek yapıldı. Sonra, atım kısaltma işleminin gerçekleştiği optik ızgara birimleri yapılan hesaplamalar doğrultusunda belirlenen

mesafede yerleştirildi. Atım kısaltma işleminden sonra otokorelatör ölçümleri aşağıdaki figürde gösterilmektedir.



Şekil 4.1.1. Yükselteç çıkışının otokorelatör ölçümleri

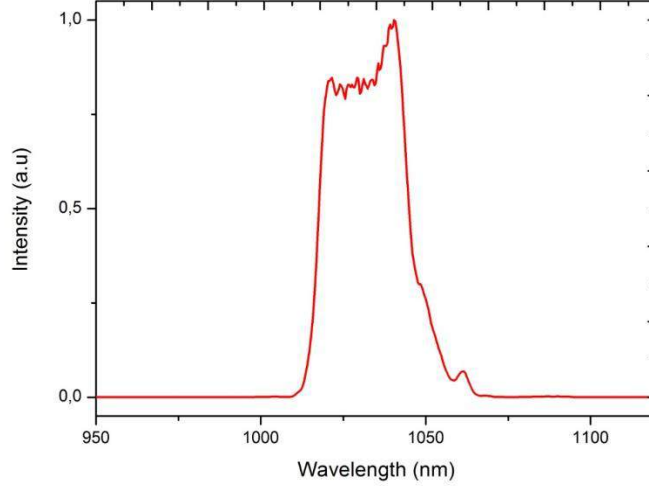
Yukarıdaki figürde salıngaç kavitesinin 6 mm değiştirilirken her 1 mm değişimde alınmış oto korelatör ölçümleri gösterilmektedir. Yükselteç çıkışında ortalama çıkış gücümüz 90 mW civarındadır. Kavite değişimiyle orantılı olarak atım uzunluğumuz 81,8 fs ile 85 fs arasında değişmektedir. Atım uzunluğundaki değişim yaklaşık % 4 civarındadır. Atım uzunluğunun ön yükselteç çıkış gücüne göre değişim grafiği aşağıdaki figürde gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1.2. Yükselteç çıkış gücüne karşılık atım uzunluğu grafiği

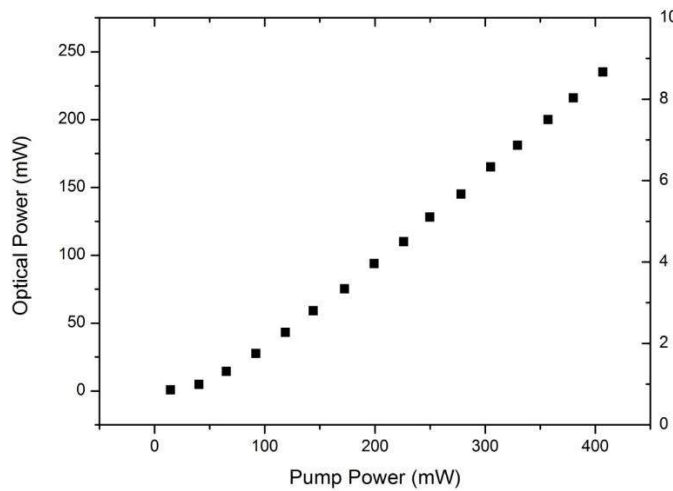
Yukarıdaki figürde farklı ön yükselteç çıkış güçlerinde atım uzunluklarının ölçüm değerleri gösterilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi atım uzunluğu bir değere kadar azalmaktadır. Bu durumun temel sebebi literatürde 'gain narrowing' diye tabir edilen bir durumdur. Daha yüksek

güçlerde çokça çarpılmış olan atımların merkez dalga boyu merkezin dışında olan atımlara kıyasla daha fazla yükseltilmektedir. Bu yüzden atım uzunluğu gittikçe kısalmaktadır. Bizim sistemimizde bu dalga boyu 1031 nm ye denk gelmektedir.



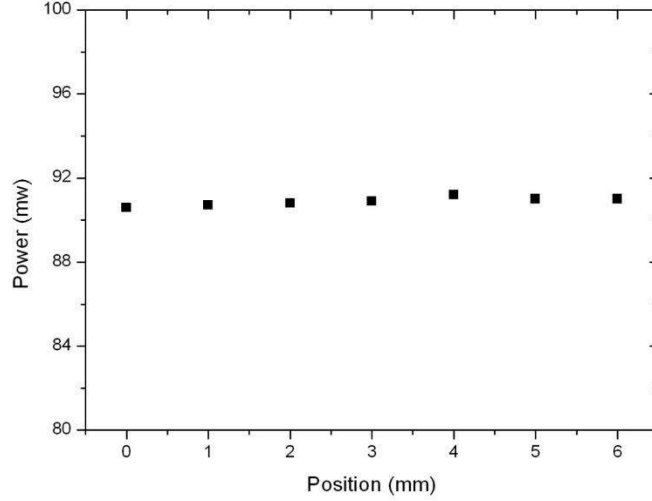
Şekil 4.1.3. Yükselteç çıkışından elde edilen dalga boyu tayfı

Yukarıdaki figürde lazerin kararlılığını gözlemleyebilmek için tarama aralığı boyunca yükselteç çıkış tayfı kaydedilmiştir. Elde ettiğimiz tayf merkezi dalga boyumuzun 1031 nm olduğunu göstermektedir ve FWHM değerimiz ise 30 nm dir. Buna ek olarak tayfımızın kavite uzunluğunun değişmesi sürecinde kararlı olduğu gözlemlendi. Yükseltecin güç karakterizasyonu sinyal gücünün pompa gücüyle değişiminin ölçülmesini de içermektedir. Aşağıdaki figürde pompa gücüne karşılık sinyal gücünün ölçümleri gösterilmiştir.



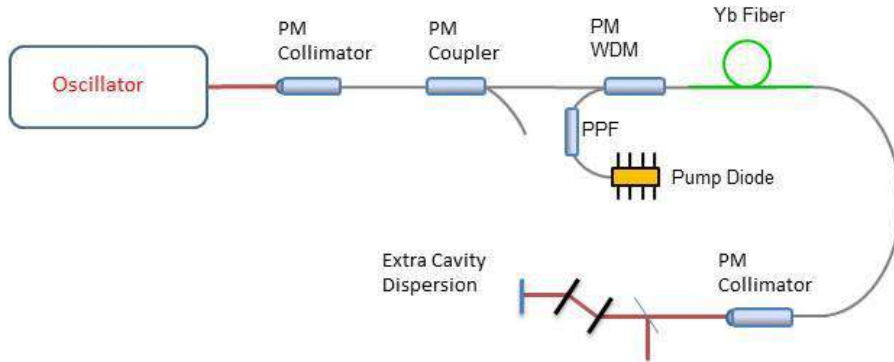
Şekil 4.1.4. Pompa gücüne karşılık sinyal gücü ölçümleri

Figürde görüldüğü gibi 400 mW pompa gücüne karşılık 200 mW güç değerinin üzerinde bir değer ölçülmüştür. Deneysel sonuçlara göre dönüşme etkinliği % 65 olarak hesaplanmıştır. Etkinlik değeri diyotun yayım dalga boyundaki değişimlerden dolayı düşük ve yüksek pompa güçleri arasında değişmektedir.

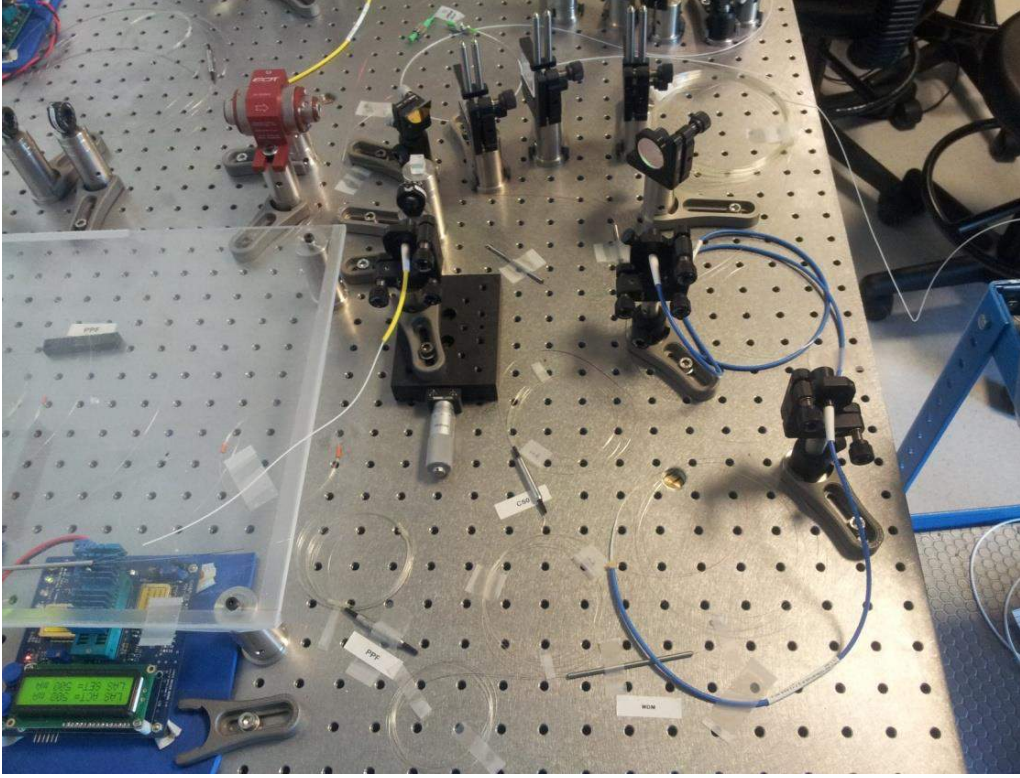


Şekil 4.1.5. Yükselteç çıkışının güç kararlılığı

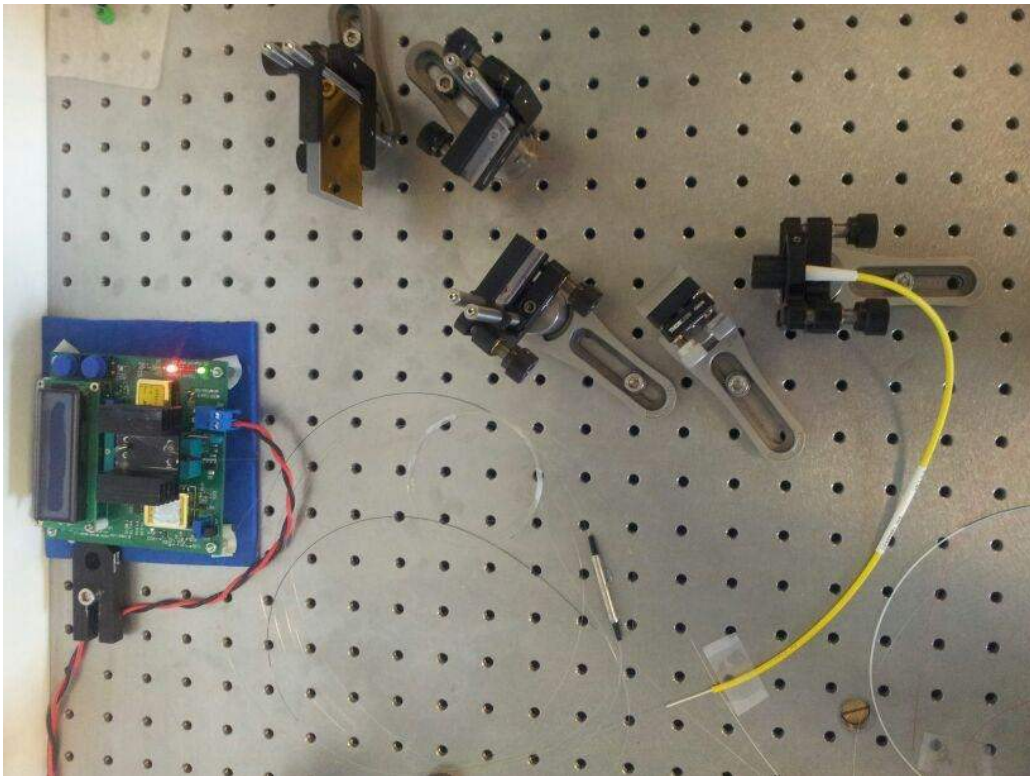
Yukarıdaki figürde kavite uzunluğu değişirken lazer yükseltecinin gücü ölçülmüştür. Figürden de anlaşıldığı üzere lazer yükselteci kavite uzunluğu değişirken yükseltecin güç değeri 90 mW civarında kararlı bir şekilde salınım yapmaktadır. Bu ölçüm iterbiyum (Yb) katkılı fiber lazer sistemimizin THz zamana dayalı spektrometre sistemimiz için iyi bir kaynak olduğunu göstermesi açısından çok önemlidir. Lazer yükseltecinin güç salınımı %1 değerinin altındadır ve bu değer THz ölçümleri için fiber lazer sistemimizin gayet kararlı olduğunu göstermektedir. Aşağıda kurulumu yapılan yükselteç kollarının şeması ve fotoğrafları mevcuttur.



Şekil 4.1.6. Kurulumu yapılan yükselteç kolunun şeması



Şekil 4.1.7. Kurulumu yapılan birinci ön yükselteç kolunun fotoğrafı



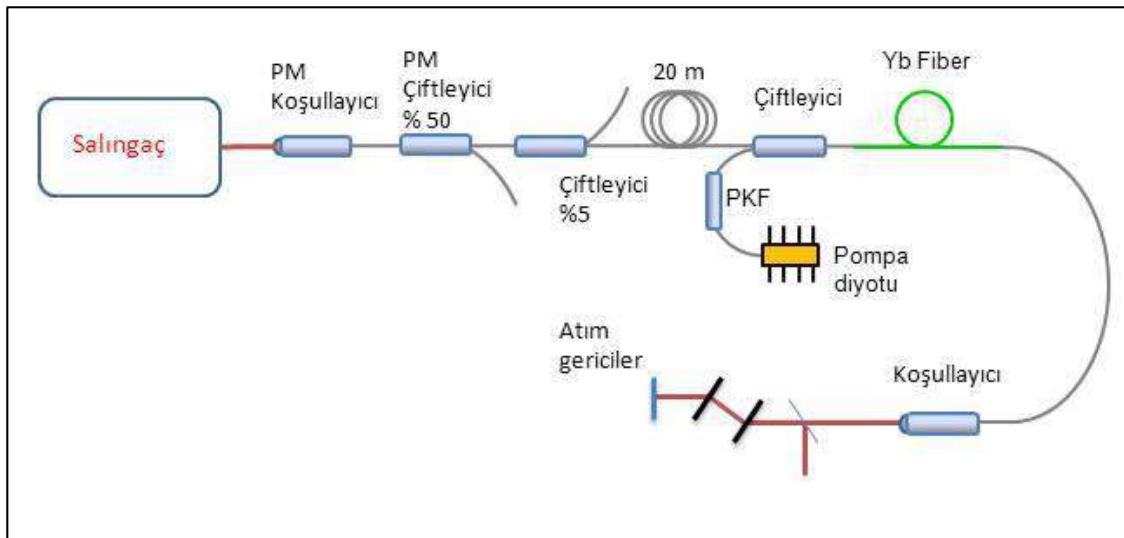
Şekil 4.1.8. Kurulumu yapılan ikinci ön yükselteç kolunun fotoğrafı

Bu sonuçlara göre sistemimizin istediğimiz kararlılıkta çalıştığını görüyoruz. Sonuç olarak proje başvurusunda belirtildiği gibi fiber lazer sistemleri boş-alan kip-kilitli lazer sistemlerine göre çok daha yüksek kararlılıkta çalışmaktadır.

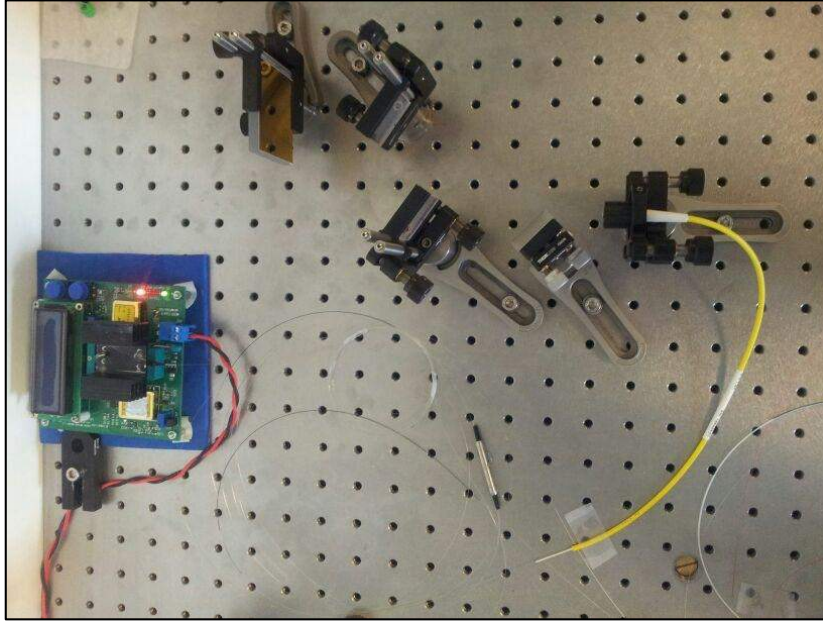
4.2. İkinci Yükselteç Sistemi

Yb: katkılı kip kilitli fiber lazerin salıngaç ve birinci ön yükselteç kısımlarını tamamladıktan sonra fiber lazerin ikinci ön yükselteç kısımlarına ek olarak, bir sonraki aşamada yapacağımız pompa-sonda deneyi için pompa kolu görevi görecek olan güç yükselteç kolunu tamamladık. Bu aşama lazerin tamamlanmasındaki son aşamaydı ve böylelikle lazeri tamamlamış olduk. Proje önerisinde THz atımlarını üretmek ve belirlemek için maksimum atım uzunlukların 250fs olabileceğini vurgulamıştık. Özellikle anlık tarama yöntemi ile gerçekleştireceğimiz ölçümlerde belirleme kolundaki atım 20m HI1060 fiberinden geçeceği için atımın fazla genişlemesinden endişeliydik. Ama aşağıdaki ölçümlerde anlaşılacağı gibi THz üretim kolunda (kısa fiber kolu) atım uzunluğu <150fs iken belirleme kolunda (20m uzunluktaki fiber kolu) <250fs uzunluğu elde ettik. Sonuç olarak projede hedeflediğimiz atım uzunluğu parametrelerini sağlamış olduk.

Önceki raporda özellikleri sunulan ön yükselteç kolu tamamlandıktan sonra, ikinci yükselteç kolunun kurulumuna başlandı. Bu koldaki fiber bileşenleri PM (polarizasyon-koruyucu) olmadığı için, fiber birleştirme işlemi için PM birleştirici ile değil, normal fiber birleştirici kullanıldı. PM kolunda 600 çizgi/mm gerici çifti kullanılmıştı. Fakat bu kolda 1200 çizgi/mm gerici çifti tercih edildi. Çünkü gericiler arası mesafe gericilerin çizgi miktarının karesiyle ters orantılıdır. Alandan tasarruf etmek adına 1200 çizgi/mm gerici çifti kullanıldı. Sistem şeması ve fotoğrafı Şekil 4.11-12 de gösterilmiştir.

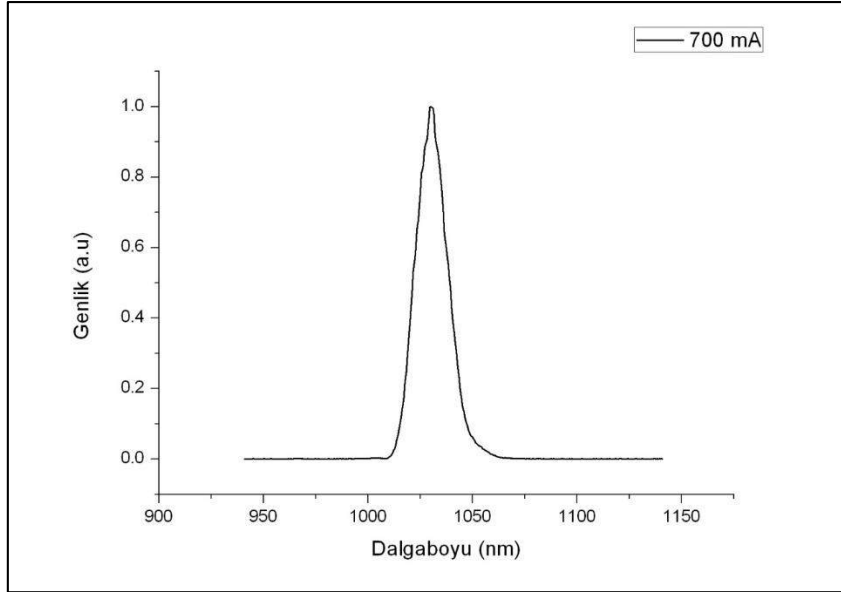


Şekil 4.2.1. İkinci yükselteç şeması



Şekil 4.2.2. İkinci yükselteç kolunun fotoğrafı

İkinci ön yükselteç kolunun 700 mA diyot akımında alınmış olan dalga boyu tayfı aşağıdaki gibidir.



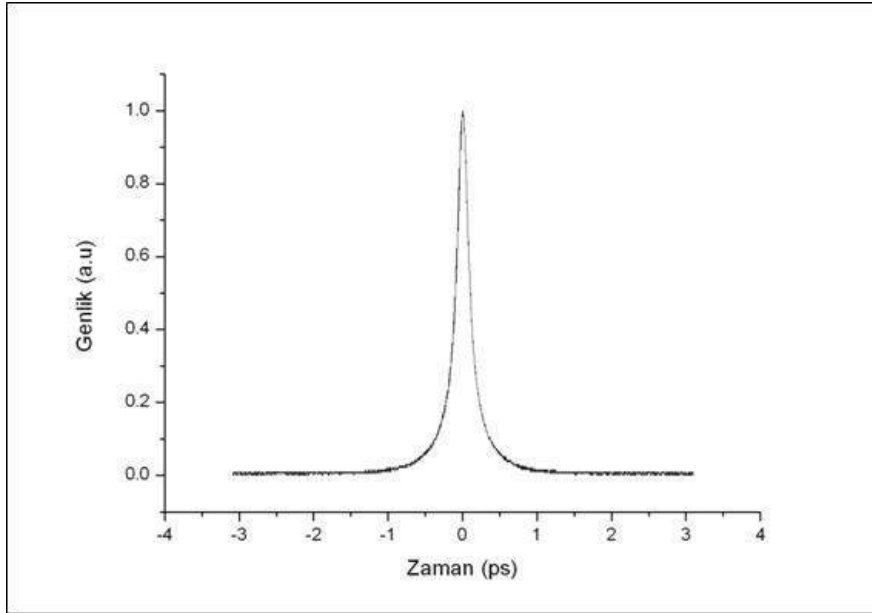
Şekil 4.2.3. 700 mA diyot akımında ikinci ön yükselteç kolu dalga boyu tayfı

İkinci yükselteç kolunun diyot akımına karşılık çıkış gücü değerleri aşağıdaki tabloda gösterildiği gibidir.

Tablo 4.2.1. İkinci yükselteç çıkış gücü

Diyot Akımı (mA)	Çıkış Gücü (mW)
200	12,0
300	24,4
400	39,5
500	53,6
600	68,3
700	83,4
800	98,4

İkinci yükselteç kolunun 550 mA diyot akımındaki atım uzunluğu profili aşağıda gösterildiği gibidir.



Şekil 4.2.4. Ön yükselteç kolu atım uzunluğu profili

İkinci yükselteç kolunun atım uzunluğu, 199 fs olarak hesaplanmıştır. Bu değer <250 fs civarında olması öngörülmüştür. 200 fs seviyesinde olmasının sebebi, bu yükselteç koluna birinci yükselteç kolundan farklı olmak üzere OSCAT tekniğinin uygulanabilmesi için Şekil 4.11 'de görüldüğü gibi 20 m uzunluğunda fiber eklenmiştir. Eklenen bu fiber üçüncül seviye dispersiyon (dağılım) oluşumuna sebep olmaktadır. Bu dispersiyon şekli, kullandığımız gericiler ile giderilememektedir. Öte yandan, THz üretme ve algılamada kullanacağımız InGaAs tabanlı FİA yapılar, elde ettiğimiz lazer atım uzunluğunda da istenilen performansı sağlayabileceği için atımları daha da kısaltma yöntemlerinin araştırılması gerekmemiştir.

Pompa kolunu beslemek için 25 W yüksek güç diyot kullanıldı. Diyotun arkasına termal pasta sürdükten sonra havalandırma plakasına vidalandı. Kullanmış olduğumuz yüksek güç diyot sıcaklığa ve akıma bağlı olarak pompaladığı dalgaboyu değişkenlik gösteriyor. Yb katkılı fiber ise 976 nm dalgaboyunu en etkili bir şekilde soğuruyor. Diyotun akıma bağlı olarak yaydığı pompa dalgaboyu Bilkent ekibi ile birlikte Melles Griot Multimode Spectrum Analyzer kullanılarak karakterize edildi. 25 W yüksek güç diyotun güç karakterizasyonu aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 4.2.2. 25 W diyot Dalga Boyu / Akım karakterizasyonu

Diyot Akımı (A)	Çıkış gücü (W)	Dalga boyu (nm)
1	1,36	966
2	3,9	967
3	6,37	968
4	8,76	970
5	11,07	973
5.5	12,2	978
6	13,35	979

Yukarıdaki verilere dayanarak diyotun en iyi performansı 5,5 A de gösterdiğini söyleyebiliriz. Çünkü görüldüğü gibi Yb katkılı fiberin pompayı en çok emdiği dalga boyu 976 nm'ye en yakın değerdir. Bu yüzden bizde diyotu 5,5 A de besleyeceğiz. Daha sonra diyot çıkışı, MPC (yüksek güç çiftleyici) pompa kolu girişi ile birleştirildi.

Osilatörün %20 çiftleyici çıkışı, bir adet 95/5 çiftleyici ile birleştirildi. Güç yükselteç kısmından kaynaklanabilecek herhangi bir geri yansımadan salıngaç zarar görmesini engellemek için bu çiftleyicinin %95 lik kısmı, 1030 nm de çalışan bir izolatör birleştirildi. %5 lik çıkışı ise güç yükselteçin girişindeki gücün ve dalga boyu tayfının ölçülmesi için ayrıldı. İzolatör MPC'nin diğer girişi ile birleştirildi. Daha sonra MPC çıkışı 20/125 DC Yb-1200 katkılı fibere birleştirildi. Kullanılacak olan Yb katkılı fiberin boyu pompanın tamamen emilmesi için çok önemliydi. Bu sebeple Bilkent grubundan edinilen simülasyon programı kullanarak lazere ait parametreleri programa girmek kaydıyla kullanmamız gereken Yb katkılı fiberin boyunun yaklaşık olarak 2 m olması gerektiği belirlendi. Son olarak Yb fiberi izolatör koşutlayıcı ile birleştirilip gericiler öncesi kurulumu tamamlanmış oldu. Diyot sıcaklığındaki olası bir değişim durumunda emilmemiş pompanın geri dönerek sisteme zarar verme ihtimali bulunmaktadır. Bu sorunu aşmak amacıyla izolatör kolimatör ile Yb katkılı fiberin birleşme noktasına fiberin kaplamasının kırılma indisinden daha büyük bir kırılma indisine sahip olan bir sıvı dökerek

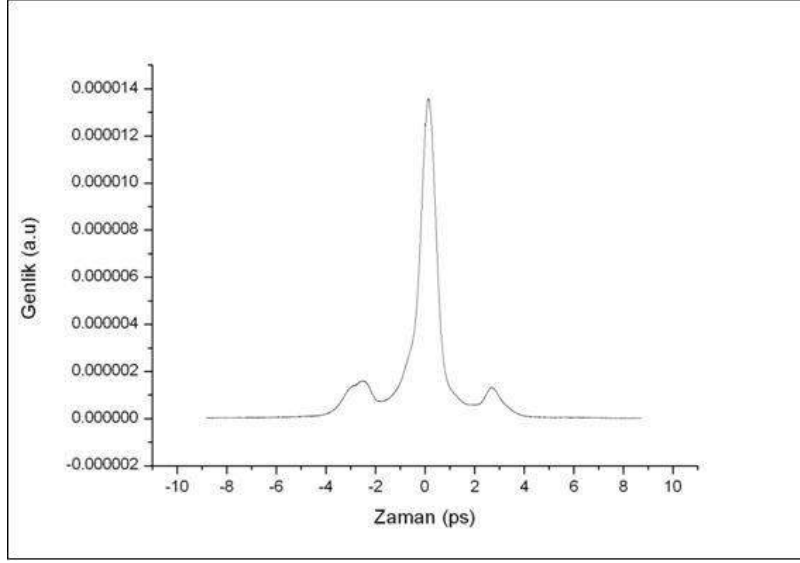
emilmemiş pompanın geri dönmeden bu noktadan dışarı kaçmasını sağlayarak, bu bağlantı zarar görmesini engellemiş oluyoruz.

Pompa-Sonda deneyleri için pompa atım uzunluğu parametresinde daha esnek olma nedenimiz ise THz atım uzunluğu. Sonda olarak pikosaniye süreçli THz atımını kullanacağımız için pompa kolundaki atım uzunluğunun da aynı şekilde ps süreçli olması ölçümler açısından sorun teşkil etmeyeceği için pompa-sonda deneyi için izolatör koşutlayıcıdan çıkan ışığın atım uzunluğunun 1 ps'den kısa olacak şekilde sistemi tasarladık. İzolatör koşutlayıcıdan çıkan ışığın atım uzunluğunu kısaltmak için gerici kurulumunu gerçekleştirdik. Bu amaç için iki adet 1200 çizgi/mm gerici ve bir adet ayna kullandık. Yapılan teorik hesaplama sonucu gericiler arası mesafenin (merkezden merkeze) 4,3 cm olması gerektiği belirlendi. Gericiler sonrası güç tablada sunulmuştur.

Tablo 4.2.3. 25 W diyot Güç / Akım karakterizasyonu

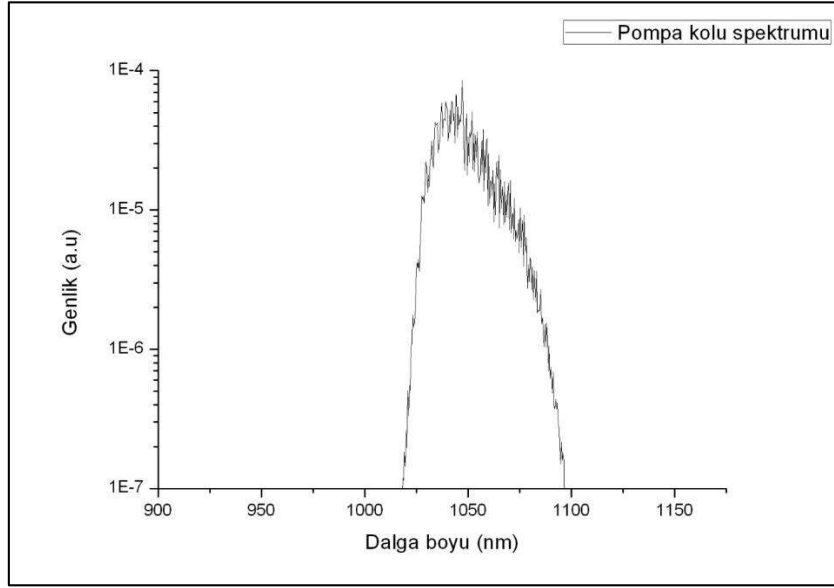
Diyot Akımı (A)	Güç (W)
1	0.038
1.5	0.17
2	0.41
2.5	0.68
3	0.98
3.5	1.31
4	1.69
4.5	2.11
5	2.48
5.5	3.11
6	3.63

Güç ölçümlerinin ardından atım uzunluğu ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçülen atım uzunluğumuz, pompa kolunu çalıştıracığımız 5,5 A diyot akımında 715 fs dir.



Şekil 4.2.5. Güç yükselteç kolu atım uzunluğu profili

Güç yükselteç kolunun dalga boyu tayfı aşağıdaki gibidir:

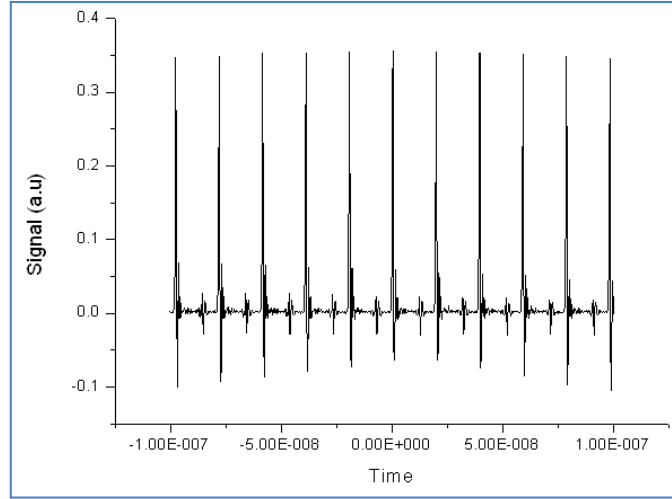


Şekil 4.2.6. Güç yükselteç çıkışı dalga boyu tayfı

5. LAZER TEKRARLAMA FREKANSIN HIZLI DEĞİŞTİRİLMESİ

5.1 Lazer Salıngaç Kavite Uzunluğu-Tekrarlama Frekans Ölçüm Çalışmaları

Kurulan lazer salıngaç sisteminde THz ölçümlerini gerçekleştirmek için tekrarlama frekansını yüksek hassasiyetle belirlememiz gerekmektedir. Kurduğumuz salıngaçın tekrarlama frekansı dijital osiloskop ile ölçüldü ve $f = 51.17$ MHz olarak belirlendi:



Şekil 5.1.1. Salıngacın osiloskop ölçümü. Tekrarlama frekansı kavite uzunluğuna bağlı olarak 51.17MHz olarak belirlendi.

THz atım profil ölçümlerini yakın gerçek zamanda kaydedebilmek için lazer kavite uzunluğunu hızlı bir şekilde değiştirmemiz gerekmektedir. Kurulması istenilen yakın gerçek-zaman işlemli THz sistemi için bir önceki bölümde anlatıldığı gibi bir çalışma yaptık. Bu çalışmaya göre lazer osilatör kavite uzunluğunun ne kadar değişmesi gerektiği anlaşıldı. THz puls ölçümünü yapabilmek için interferometrik ölçüm prensibinde olduğu gibi THz üretici ve THz alıcı optik kolların uzunlukları birbirine göre kaydırılması gerekmektedir. THz spektrumunu sağlıklı alabilmek için ölçümün $\Delta\tau \sim 100\text{ps}$ gibi bir aralıkta gerçekleştirilmesi gerekmektedir:

$$\Delta\tau = i \left(\frac{1}{f_{\text{rep}}} - \frac{1}{f_{\text{rep}} + \Delta f} \right)$$

Yukarıdaki denklemde f_{rep} , lazer tekrarlama oranı ve Δf kavite tekrarlama oranının değişimi. İstenilen $\Delta\tau$ ve ayarlanabilen Δf 'e göre atım indisi hesaplanabilir. Δf 'e göre belirleme kolunun gerekli uzunluğu da ayarlanabilir:

$$l_{\text{fiber}} = \frac{\Delta\tau c_0 (f_{\text{rep}} + \Delta f)}{\Delta f n}$$

l_{fiber} , belirleme kolunun uzunluğu, c_0 boş alan ışık hızı ve n fiber kırılma indisi. Yaptığımız hesaplama sonucu aşağıdaki tablodaki parametreleri elde ettik:

Tablo 5.1.1. Yakın-Gerçek Zamanda THz Ölçümleri Yapabilmek İçin YDFL Sistemi için Hesaplanan Parametreler

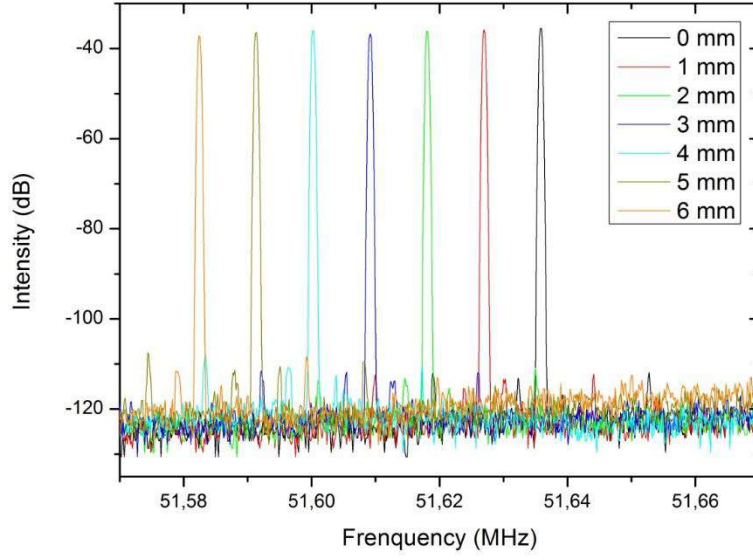
PARAMETRELER	Önerilen Parametreler
Tekrarlama Frekansı (f_{REP})(MHz)	50
Δf (kHz)	50
$\Delta \tau$ (ps)-(ns)	100
n_{fiber}	1,5
Tahmini Basamak (ps)	0,1
İki sinyal arası uzunluk (m)	5
Frekans oranı ($\Delta f/f$)	0,001
Kavite içi Piezo Hareket Alanı(air) (mm)	5
Kavite içi Piezo Hareket Alanı(fiber) (mm)	4
Atma indisi (i)	5,005
$l_{free\ space}$ (air) (m)	30,03
l_{fiber} (n) (m)	20,02

Yukarıdaki tabloda hesaplanan, ve kırmızı ile işaretlenen verilere göre 50MHz tekrarlama oranına sahip bir lazer osilatörü ile 100ps THz ölçüm aralığını gerçekleştirmek için kavite uzunluğunun 5mm kadar değişmesi gerektiği anlaşılmıştır. Bu tabloya göre kurulan lazer osilatörün tekrarlama frekansı yani kavite uzunluğu değiştirildi ve bu değişim sırasında özellikle lazer gücünün ve kip-kilitli halinin (sabit kalabilmesi) değişip değişmediği anlaşılmaya çalışıldı.

Bunu gerçekleştirmek için Şekil 3.1'te gösterilen sistemde, ikinci ışın koştulayıcının altına manuel kızak yerleştirdik. Bunun yardımıyla hesaplamış olduğumuz 5 mm mesafeyle salıngacın toplam uzunluğunu değiştirdik. Bu sayede tekrarlama frekansını ayarlayabildik. Bunları test ederken salıngacın güç ve atım uzunluklarındaki değişimleri gözlemledik. 5 mm tarama mesafesinde üç farklı pozisyonda yapılan ölçüm sonuçları şu şekildedir:

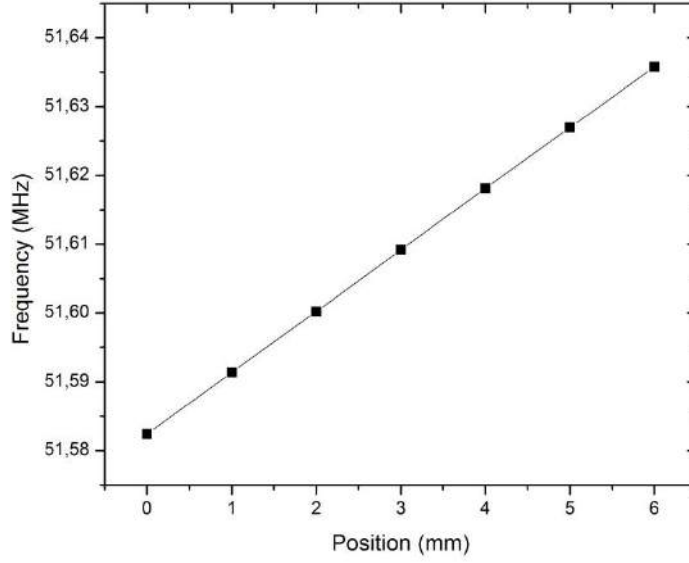
Tablo 5.1.2. Kavite Uzunluğuna Göre Ölçülen Osilatör Parametreleri

	μm Pozisyonu	Güç (mW)	Atım Uzunluğu (fs)	Tekrarlama Frekansı(MHz)
1.	11 mm	31.9	974.78	51.21
2.	8 mm	32.3	959.47	51.17
3.	5 mm	32.7	955.05	51.15
	$\Delta x=5mm$			



Şekil 5.1.2. Farklı kavite uzunluklarında RF spektrum ölçümleri

Yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi farklı kavite uzunluklarında tekrarlama frekansı ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler alınırken kavite toplamda 5 mm kadar değiştirilmiştir. Yukarıdaki figürde sadece 7 değer gösterilmesine rağmen bu 5 mm lik mesafe 1000 adımda alınıp her adımda tekrarlama frekansının değişimi gözlenmek istenmektedir. Teorik olarak beklediğimiz değer 50 MHz tekrarlama frekansının toplamda 5 mm lik kavite uzunluğunun değişmesiyle 50 kHz kadar değişmesiydi. Fakat bizim elde ettiğimiz değer ise 51,58 MHz tekrarlama frekansının 53,4 kHz kadar değişmesiydi. İstatistiksel olarak hesaplandığında teorik değerlerle elde edilen sonuçlar arasında %5 oranında bir fark olduğu görülmektedir. Bu farkın muhtemel sebeplerinden bir tanesi kavite uzunluğunu değiştirmek için koşutlayıcının altına yerleştirdiğimiz manuel hareketli tablanın hassasiyetinin yeterli olmamasıdır. Koşutlayıcının altına daha hassas hareket edebilen bir hareketli tabla konulduğu takdirde bu hata payı ciddi şekilde azalacaktır.

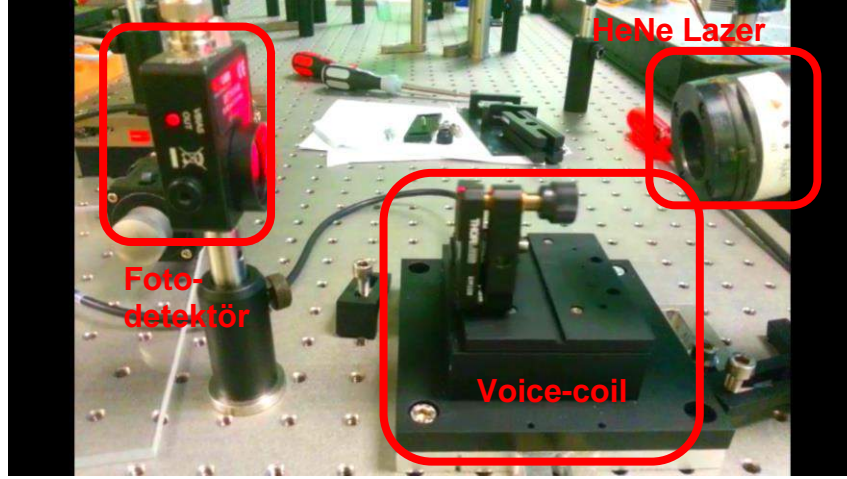


Şekil 5.1.3. Farklı kavite uzunluklarında lazerin tekrarlama frekansları

Şekil 5.1.3'te lazerin tekrarlama frekansının atımın pozisyona göre lineer değişiminin rahatça gözlenebilmesi için Şekil 5.1.2'deki veriler grafiğe dökülmüştür. Grafiğe göre, her 1 mm'lik kavite uzunluğu değişmesinde lazerin tekrarlama frekansı 8,9 kHz kadar değişmiştir. Bu sonuçlara göre sistemimiz istediğimiz kararlılıkta çalıştığını görüyoruz. Sonuç olarak proje başvurusunda belirtildiği gibi fiber lazer sistemleri boş-alan kip-kilitli lazer sistemlerine göre çok daha yüksek kararlılıkta çalışmaktadır.

5.2. Lazer Tekrarlama Frekansın Hızlı Ayarlanabilmesi

Bu ölçümü gerçekleştirebilmek için, öncelikli olarak, proje amaçları için önemli olan Yb-katkılı lazerin tekrarlanma frekansının otomatik olarak değiştirilmesi çalışmalarına başlanmıştır. Bunun için fiber osilatörün kavite uzunluğunun, THz spektrometre ölçümlerinde 100 ps kadar taranabilmesi için 5mm hareket ettirilmesi gerekmektedir. Bunun için voice-coil cihazının, Almanya merkezli "Physik Instrumente" şirketinden alımı gerçekleştirilmiştir. Cihaz elimize ulaştığında hedeflenen özellikler olan 5 mm'yi 90 gr ağırlıkla 9 Hz üzeri tarama hızını sağlayıp sağlamadığı kurulan test düzeneği ile ölçüldü. Düzenek için bir adet Helyum-Neon lazer, foto-dedektör ve osiloskop kullanılmıştır. Düzeneğin fotoğrafı aşağıdaki gibidir.



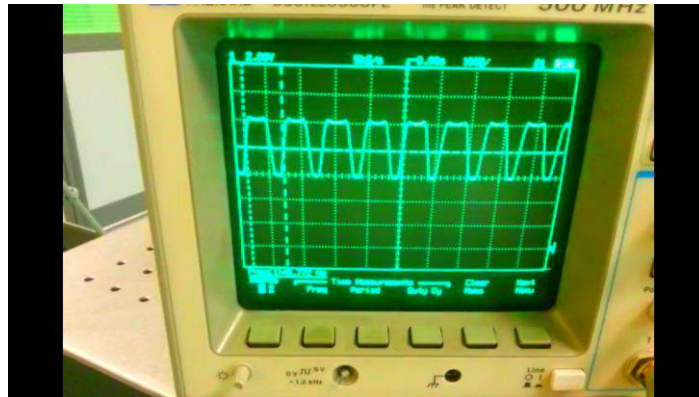
Şekil 5.2.1. Voice-coil cihazı test düzeneği

Cihazın kendi programı içerisinde aşağıdaki parametrelere göre oluşturulmuş bilgisayar kodu ile 5 mm'yi yaklaşık 10 Hz'de tarayabilmek için cihazın 9500 mm/s² ivmeyle ve 200 mm/s üzeri hızla hareket etmesi gerekmektedir.

Frekans / s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Frekans / s	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Uzunluk / mm											Uzunluk / mm										
1	16	64	144	256	400	576	784	1024	1296	1600	1	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
2	32	128	288	512	800	1152	1568	2048	2592	3200	2	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
3	48	192	432	768	1200	1728	2352	3072	3888	4800	3	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
4	64	256	576	1024	1600	2304	3136	4096	5184	6400	4	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160
5	80	320	720	1280	2000	2880	3920	5120	6480	8000	5	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
6	96	384	864	1536	2400	3456	4704	6144	7776	9600	6	24	48	72	96	120	144	168	192	216	240
7	112	448	1008	1792	2800	4032	5488	7168	9072	11200	7	28	56	84	112	140	168	196	224	252	280
8	128	512	1152	2048	3200	4608	6272	8192	10368	12800	8	32	64	96	128	160	192	224	256	288	320
9	144	576	1296	2304	3600	5184	7056	9216	11664	14400	9	36	72	108	144	180	216	252	288	324	360
10	160	640	1440	2560	4000	5760	7840	10240	12960	16000	10	40	80	120	160	200	240	280	320	360	400

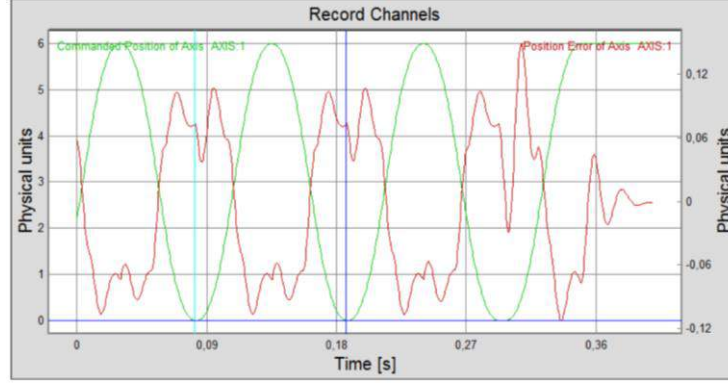
Şekil 5.2.2. Voice-coil cihazı hareket parametreleri

Yaptığımız test sonucu cihazın istenilen performansı sergilemediğini gördük. Ölçüm sonucu test düzeneğindeki osiloskop fotoğrafı şeklinde aşağıda verilmiştir.



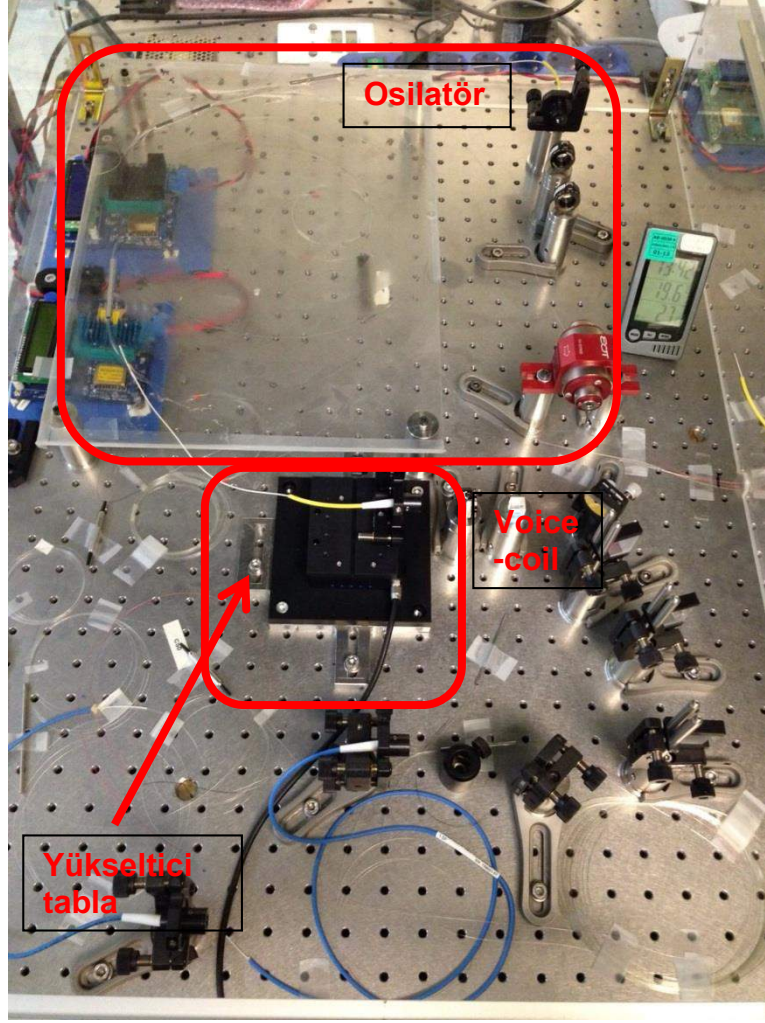
Şekil 5.2.3. Voice-coil cihazı test sonucu-osiloskop fotoğrafı

İlk olarak cihaz düzensiz, yani hareketleri her iki yönde eşit olmamakla birlikte 7 Hz in bile altında bir tarama hareketi ile çalışmaktadır. Bu sebeplerden ötürü cihaz bakım sürecinden geçirildikten sonra tekrar test edilmiş ve 5 mm'yi 9 Hz üzerinde bir hızla doğru bir şekilde taradığı görülmüştür. Ölçüm sonuçları ise aşağıdaki gibidir:



Şekil 5.2.4. Voice-coil cihazı test sonucu

Bu ölçüme göre de cihaz, 5 mm mesafeyi 93 gr ağırlıkla birlikte 9.95 Hz ile tarayabilmektedir. Bu olumlu testler sonunda cihazı Yb-katkılı fiber osilatörünün içine yerleştirilmesi aşamasına geçildi. Bu kısımda cihazın doğrusal hareketi boyunca kavite içerisindeki gücün sabit kalabilmesi, lazerin kavite uzunluğunun değiştirilirken kararlı çalışması noktasında çok önemlidir. Voice-coil cihazın üzerine ağırlık konarak, lazer bileşenlerinin yüksekliğini ayarlamaktansa, cihaz altına yüksekliği arttırmak için bir tabla yaptırılmıştır. Bu tablanın sağ-sol hareket kabiliyeti lazer ayarlaması aşamasında kolaylık sağlamıştır. Lazer kavitesi içerisindeki güç maksimize edilinceye dek bileşenlerin hassas ayarlanmasına devam edildi. Yeterli seviyeye ulaşıldığında kavite içerisindeki dalga plakaları ile kip-kilitlenme elde edilmiştir. Yükseltici tabla üzerine yerleştirilmiş voice-coil cihazı ve osilatörün son hali aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.2.5. Yb-katkılı fiber lazer kavitesi

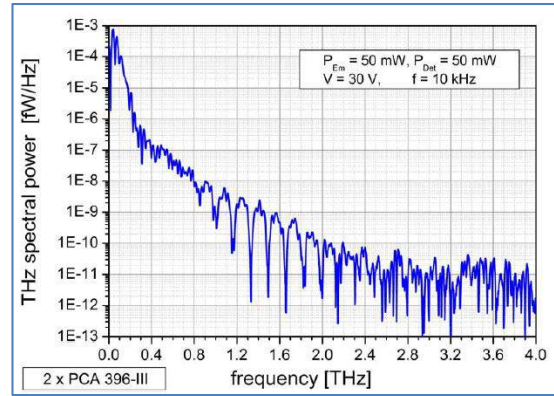
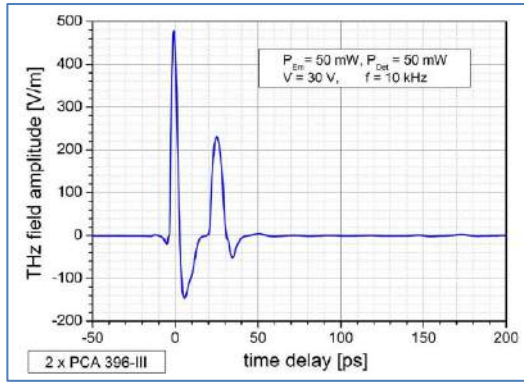
Bu zamana kadar lazer sistemin geliştirilmesi kapsamında puls uzunluklarını kontrol edebilmek için bir çok farklı teknik geliştirildi. Kısa lazer atım süreleri sayesinde daha iyi THz atım profilleri elde edildiği için projede geliştirilen teknikler yakından bizi takip eden bir araştırma grubun ilgisini çekti. Bu çalışmalar kapsamında doktora bursiyeri Hakan Keskin, 1030-1050 nm geliştirdiği geçirgen taraklı aynalar ile darbe uzunluğu kontrolü çalışmalarını COST Action MP1204 desteği kapsamında Philipps-Universität Marburg/Almanya'da, Kısa Dönem Bilimsel Görev (Short Term Scientific Mission-STSM) kapsamında uyguladı. Bu kapsamda, bu projede elde edildiği deneyim sayesinde kendiliğinden kip kilitli dikey-dış-kavite yüzey yayıcı, ~1010nm merkez dalga boyunda ışılan lazerin (SM-VECSEL) kip kilit mekanizmasının araştırılması için atım uzunluğu, atım dizisi, dalga boyu tayfı ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Ek olarak, lazer çıkışından ikinci harmonik üretimi ile yeni geliştirilen bu lazer tipinin kip kilit mekanizmasının güçlü ve kararlı atımlar üretebildiği ispatlanmıştır. SM-VECSEL çalışmalarına ek olarak THz- dış-kavite yüzey yayıcı lazerin (TECSEL) karakterizasyonu çalışmaları

gerçekleştirilmiştir. Orada yaptığı araştırmaları ve geliştirdiği lazer sistemini dönem içinde yayınlamıştır [Gaafar vd. 2014].

6. TERAHERTZ ATIM ÜRETİMİ VE BELİRLENMESİ

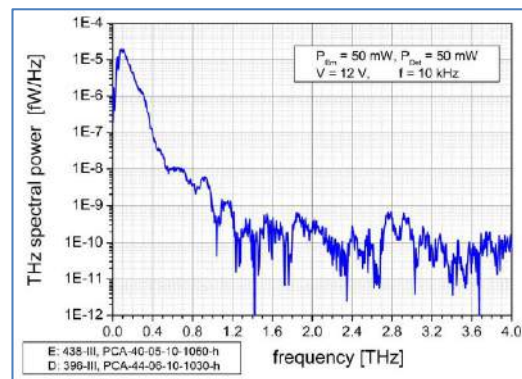
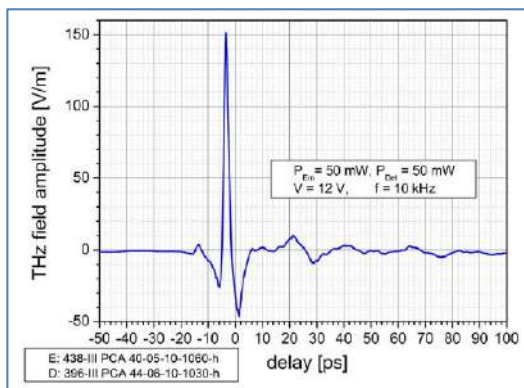
6.1. Terahertz Üretici ve Alıcı Anten Yapılarının Seçimi

Yb-katkılı fiber lazer dalga boyu çıkışı olan 1030nm civarında çalışacak THz alıcı ve verici birimlerin tespiti üzerine ön çalışma gerçekleştirdi. THz spektroskopi sisteminde alıcı/verici olarak kullanılacak THz anten hakkında araştırma yapıldı. Sistemimizde kullanılabilecek anten seçenekleri karşılaştırıldı. Aşağıda seçilen antenlerin özellikleri gösterilmektedir.



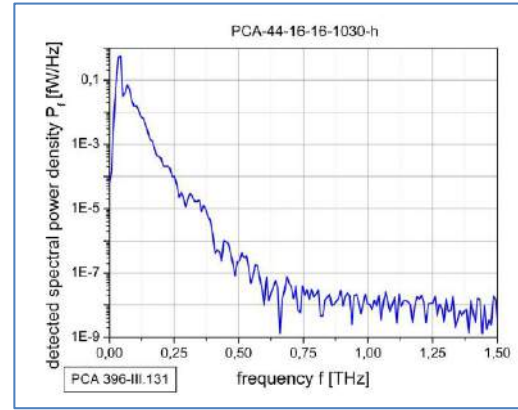
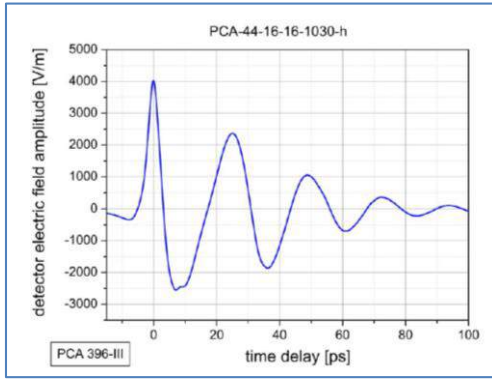
Şekil 6.1.1. ANTEN I: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 10 kHz, Kaynak voltajı: 30 V, Ortalama optik lazer gücü: 60 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs



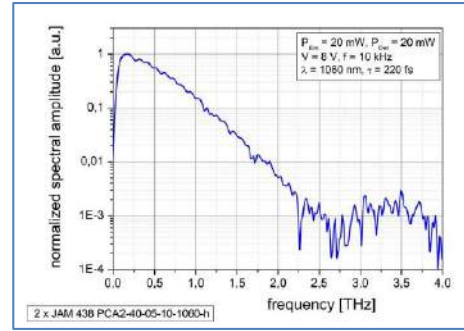
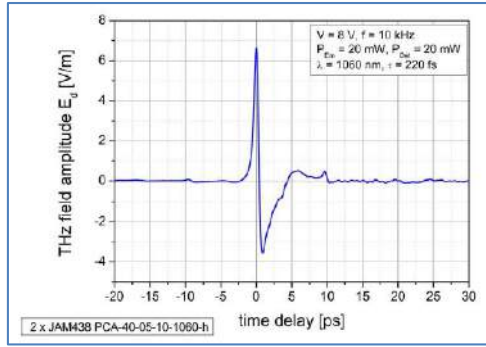
Şekil 6.1.2. ANTEN II: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 10 kHz, Kaynak voltajı: 12 V, Ortalama optik lazer gücü: 60 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs



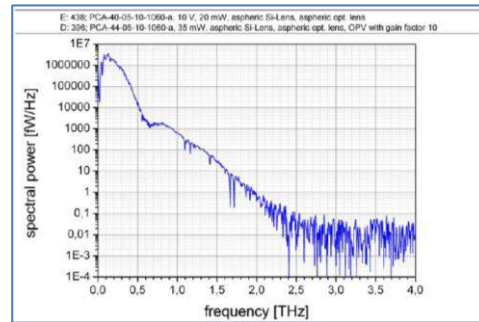
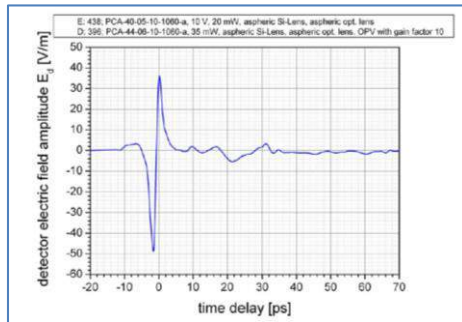
Şekil 6.1.3. ANTEN III: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 1.6 kHz, Kaynak voltajı: 12 V, Ortalama optik lazer gücü: 60 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs



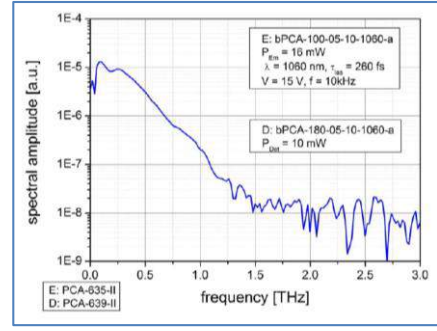
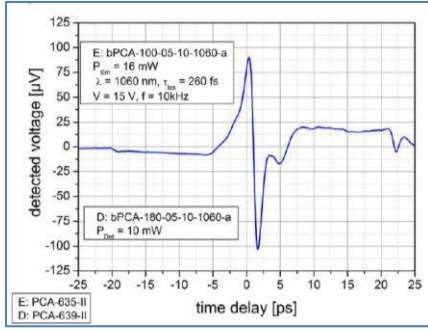
Şekil 6.1.4. ANTEN IV: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 10 kHz, Kaynak voltajı: 12 V, Ortalama optik lazer gücü: 60 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs



Şekil 6.1.5. ANTEN V: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 10 kHz, Kaynak voltajı: 10 V, Ortalama optik lazer gücü: 20 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs



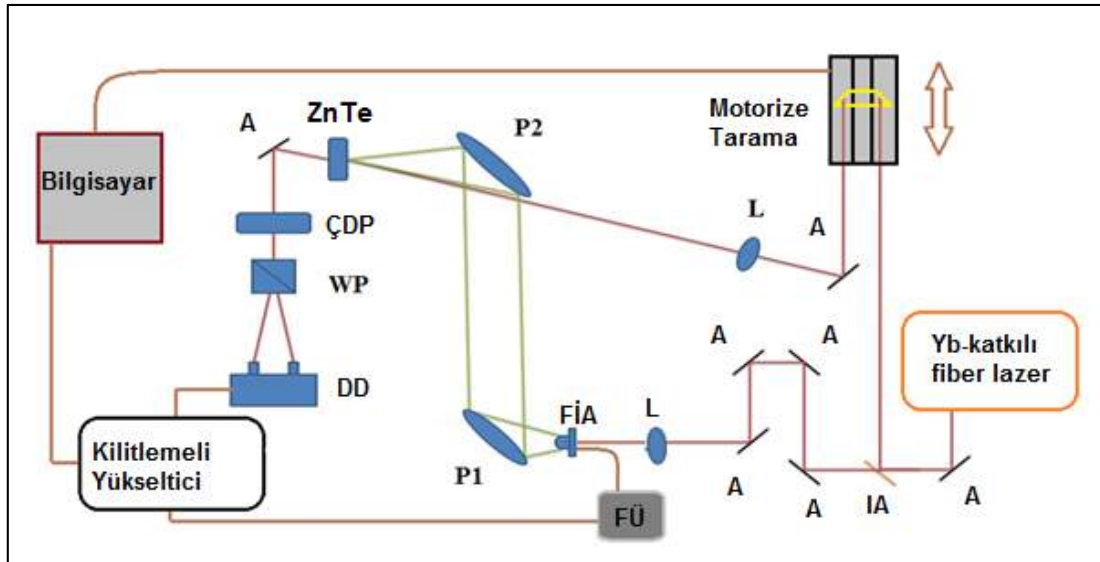
Şekil 6.1.6. ANTEN VI: THz Atım Profili (sol) ve Güç Dağılımı (sağ)

Modülasyon frekansı: 10 kHz, Kaynak voltajı: 10 V, Ortalama optik lazer gücü: 20 mW, Dalga boyu:1060 nm, Atım uzunluğu: 220 fs

Yapılan bu karşılaştırma sonrasında, optiksel uyarılma dalgaboyu ~ 1060 nm, anten boyu 40 µm, boşluk mesafesi 6 µm olan ANTEN VI fotoiletken-paralel çizgi anten seçilmiştir.

6.2. Tek Lazer Çıkışı THz Atım Üretimi ve Belirlenmesi

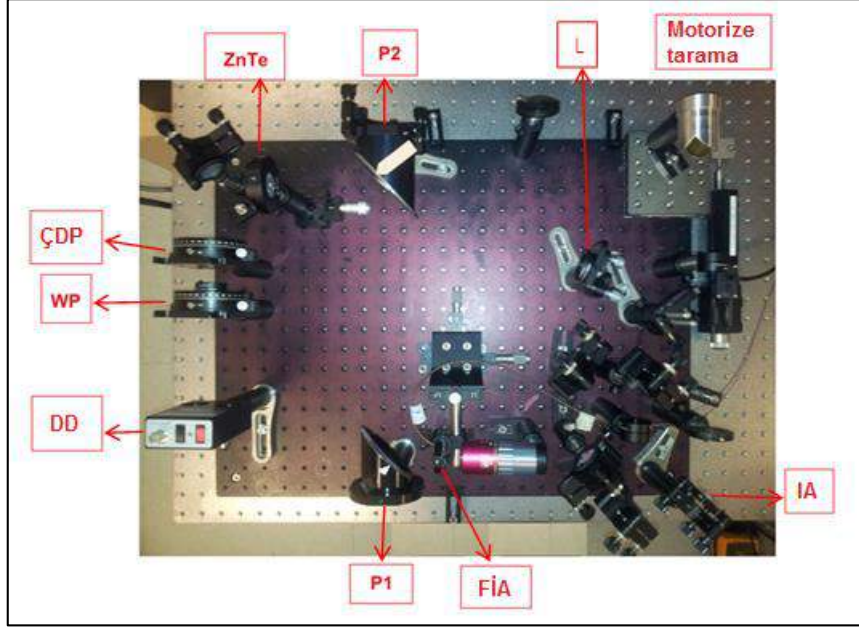
Lazerin üretim aşaması tamamlandıktan sonra THz ölçümlerine geçildi. Zamana dayalı THz spektrometre sistemi bir tabla üzerinde ODTÜ Fizik Bölümü THz Araştırma Laboratuvarı'nda kuruldu. Kurulan spektrometre sisteminin şeması ve fotoğrafı aşağıdaki figürlerdeki gibidir.



Şekil 6.2.1. Zamana dayalı THz spektrometre şeması

1. Yb-katkılı fiber lazer sistemi
2. A: Ayna
3. IA: Işın ayırıcı
4. L: Lens

5. FİA: Foto-iletken anten
6. FÜ: Fonksiyon üretici
7. P: 90° eksen dışı parabolik ayna
8. ZnTe: ZnTe kristali
9. ÇDP: Çeyrek dalgı plakası
10. WP: Wollaston prizması
11. DD: Dengeli dedektör



Şekil 6.2.2. Zamana dayalı THz spektrometre fotoğrafı

Bu spektrometrede THz üretici olarak foto-iletken anten(FİA) kullanılmıştır. Algılama yönteminde ise elektro-optik yöntemi kullanılmıştır. Bu yüzden sistemimiz, anten-kristal sistemi olarak adlandırılabilir. Spektrometre sisteminde, üretimini tamamladığımız Yb-katkılı fiber lazerimizin birinci ön yükseltici kullanılmış, bu koldan gelen atımlar bir adet ışın ayırıcı ile üretim ve algılama olmak üzere iki kola ayrılmıştır. Üretim koluna, algılama koluna kıyasla daha fazla güç aktarılmaktadır. Üretim kolundaki ışın bir lens aracılığıyla paralel yapılı fotoiletken antene odaklanmaktadır. Anten yapısının ana bileşenleri silikon lens, yarı-iletken yapıdır. Fonksiyon üreticisine bağlı olan anten 1 kHz'de $\pm 16V$ kare dalga ile modüle edilmektedir. Üzerinde altın elektrotlar bulunduran InGaAs yapı üzerine 1030 nm dalga boyundaki ışının düşmesi ile terahertz üretimi gerçekleşirken, silikon lens yardımı ile de odaktan geliyormuş gibi dağılımı sağlanmaktadır. Kullanılan FİA parametreleri aşağıdaki gibidir.

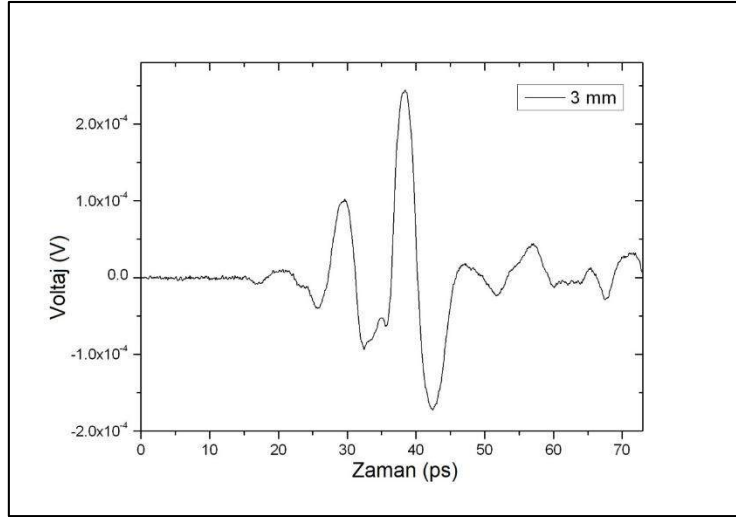
Tablo 6.2.1. Tek Kol Çıkışı THz Üretici FIA parametreleri

Elektriksel Parametreler	
	Standart değerler
Karanlık direnci	66 MΩ
Voltaj	16 V
Optik Yükseltgeme Parametreleri	
	Standart değerler
Dalga boyu	1060 nm
Ortalama güç	20 mW

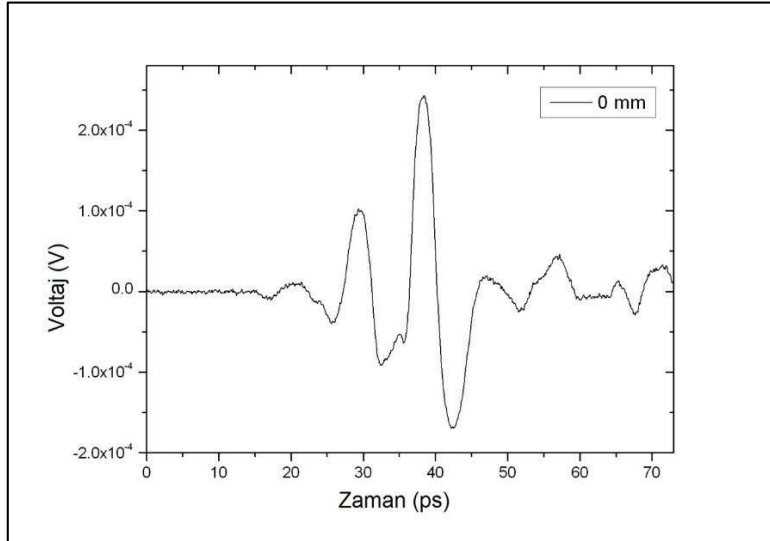
90° eksen-dışı parabolik aynanın odağına yerleştirdiğimiz antenden üretilen THz, parabolik ayna aracılığıyla paralel hale getirir. İkinci bir 90° eksen-dışı parabolik ayna, gelen THz ışınlarını <110> oryantasyonundaki ZnTe kristali üzerine odaklamaktadır. Belirleme kolunda motorize tamama sistemi ile iki kol arasında zaman farkı oluşturularak, interferometrik bir yöntem ile THz atım profili oluşturulur. Tarama esnasında iki kolun uzunluğu tam olarak birbirine eşit olduğunda, maksimum THz sinyali gözlenir. Kollar arası mesafe değiştikçe bu maksimum değerden uzaklaşılır. Motorize tarama sisteminden gelen ışık, bir lens yardımı ile ZnTe kristali üzerine odaklanmıştır. Bu sayede kristal üzerinde THz-1030nm etkileşimi arttırılmıştır.

Algılama kristalinden sonra, polarizasyon tabanlı algılama yöntemi için çeyrek dalga plakası kullanılmaktadır. Dalga plakasından sonra dairesel ya da eliptik olan polarizasyondaki ışık yatay ve düşey bileşenlerine, belli bir ayrılma açısıyla Wollaston prizması ile ayrılır. Bu iki bileşen daha sonra dengeli foto detektörde ölçülmektedir. Yapılan ölçümlerde, cihazların kontrollü ve veri toplama işlemleri LabView da geliştirilen bir program aracılığıyla gerçekleştirilir.

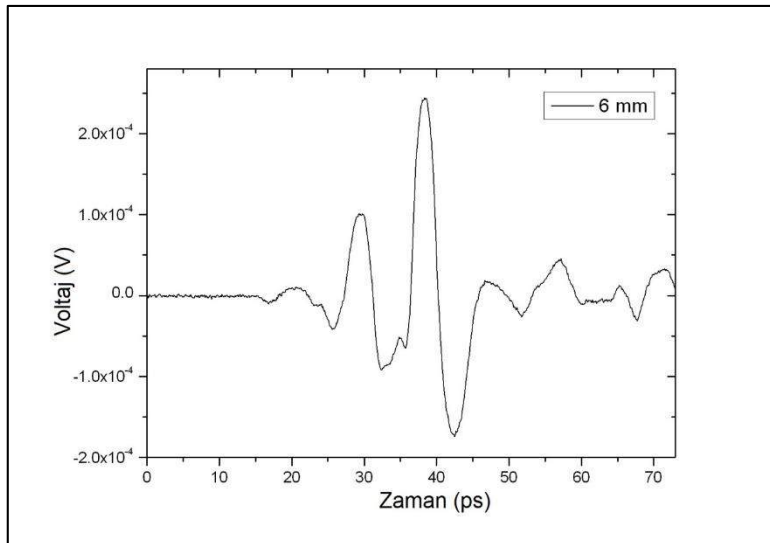
Farklı lazer tekrarlama frekanslarında gerçekleştirilen THz sinyal profilleri ve tayf güç dağılımı aşağıdaki gibidir. Tekrarlama frekansı, salıngaç içerisindeki manuel stage ile sağlanmaktadır. İlk raporda bahsedildiği gibi en az 100ps uzunluktaki bir zamanı tarayabilmek için (böylelikle iyi bir THz frekans çözünürlüğü elde etmiş oluruz) lazer kavite uzunluğunu en az 6mm kadar değiştirmeliyiz. Bu 6 mm tarama sayesinde tekrarlama frekansı yaklaşık 60 kHz kadar değiştirilmektedir. Bu farklı kavite uzunlukların lazer salıngacın kip kilitleme halinin nasıl etkileyeceğini bilemediğimiz için farklı uzunluklarda THz atım profillerini karşılaştırmak istedik. Sonuç olarak THz atım profillerin istenilen çözünürlük mertebesi kapsamında değişmediğini gözlemledik.



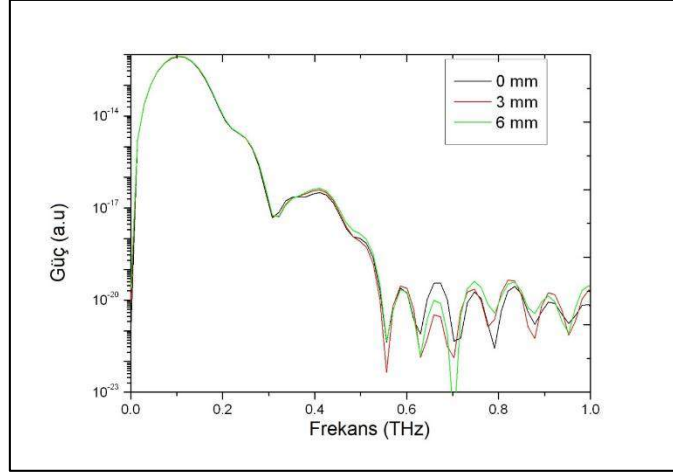
Şekil 6.2.3. Salıngaç tarama 0 mm pozisyonundaki THz sinyali



Şekil 6.2.4. Salıngaç tarama 3 mm pozisyonundaki THz sinyali



Şekil 6.2.6. Salıngaç tarama 6 mm pozisyonundaki THz sinyali



Şekil 6.2.6. Farklı tekrarlama frekanslarına denk gelen tarama pozisyonlarındaki THz sinyallerinin güç tayfları

Bu yapılan ilk ölçümlere yaklaşık 60 sinyal/gürütü oranı elde edilmiştir. THz sinyal ve tayflarında az bir değişim gözlenmektedir. Ancak bu daha yüksek sinyal/gürütü oranında gözlenmeyecektir.

6.3. Çift lazer Çıkışı ile THz Atım Üretimi ve Belirlenmesi

Pompa-sonda deneyleri için geliştirirken kolun ve THz üretim ile algılama kollarındaki atımların birbirlerine göre zamanlaması için bir hesaplama yapılmıştır. Bu hesaplamalara göre pompa/sonda sisteminin tasarımı yapılmıştır. Fiber lazer sistemimiz iki adet ön yükselteç koluna sahiptir. 130 fs atım uzunluğuna sahip olan birinci kol (sistem ilk kurulduğunda 100fs olan atım uzunlukları yapılan son ölçümlerde 130fs'ya kadar çıkmıştır), toplam 341,6 cm fiber uzunluğuna sahiptir. 220 fs atım uzunluğuna sahip olan ikinci kol ise 2361 cm fiber uzunluğuna sahiptir. Fiber uzunluklarındaki bu farktan dolayı iki kolda ilerleyen iki atım arasında zamansal bir fark oluşacaktır.

6.3.1. THz Üretim ve Algılama Kolları Arası Zaman/Mesafe Farkı

Bunu şu şekilde hesaplayabiliriz: Salıngaç tekrarlama frekansını 61,64 MHz olarak ölçtük. Salıngaçta atım üretme zamanını bulmak için frekansın tersini almamız yeterli olacaktır.

$$t: \frac{1}{f}: \frac{1}{61,66 \text{ MHz}} : 1,9398 * 10^{-8} \text{ s} : 19,398 \text{ ns}$$

Salıngaçta yaklaşık 19 ns de bir atım üretilmektedir. İki kol arasındaki fiber uzunluk farkını ışığın fiber içindeki hızına bölersek iki kol arasındaki toplam zaman farkını bulmuş oluruz.

$$2361 \text{ cm} - 341,6 \text{ cm} = 2009,6 \text{ cm}$$

Fiberin kırılma indisini 1,6 alırsak ışık hızı fiber içinde $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ olur.

$$t: \frac{20,096 \text{ m}}{2 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 1,00476 * 10^{-7} \text{ s} = 100,476 \text{ ns}$$

İki kol arasındaki atım sayısı farkını bulmak için:

$$\frac{100,476 \text{ ns}}{19,398 \text{ ns}} = 6,1796$$

Yani ikinci koldan gelen atım, fiberi dolaşana kadar birinci koldan beş tane atım, fiberi tamamen dolaşır ve altıncı atım da yola çıkmış olur.

Çift kollu THz üretim sistemi için iki atım arası mesafe THz belirlemede kullandığımız tarama tablasını konumlandıracağımız ideal yeri bulmamız açısından çok önemlidir. İki kol arasındaki atım sayısı farkı tam sayıya denk gelmediği için birinci kolun beşinci atımı, ikinci kolun birinci atımından 3,486 ns daha ileridedir. Bunu şu şekilde hesaplayabiliriz:

$$100,476 \text{ ns} - (6 * 19,398 \text{ ns}) = 3,486 \text{ ns}$$

İki atım arasındaki bu farkı elimine edebilmek için birinci kol önde olduğundan dolayı birinci kolu bir miktar uzun tutmamız gerekiyor. Işığın havada 3,486 ns de kat ettiği mesafe teorik olarak birinci kola eklenmesi gereken ekstra gecikme miktarıdır.

$$3,486 * 10^{-9} \text{ s} * 3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,046 \text{ m}$$

Yukarıdaki hesabı kullanarak sistemi kurduğumuzda aşağıda gösterilen ölçümlerden anlaşılacağı gibi üretim ve algılama kolları arasındaki $t = 0$ zamanını daha kolay bulabildik.

6.3.2. THz Prob (Sonda) ve Pompa Kolları Arası Zaman/Mesafe Farkı

Bunu şu şekilde hesaplayabiliriz: 1. Ön yükselteç kolu 341,6 cm fiber uzunluğuna ve sonrasında yaklaşık 366 cm boş alan uzunluğuna sahiptir. Pompa kolu ise 1011 cm fiber uzunluğuna sahiptir. Fiber uzunluklarındaki bu farktan dolayı iki kolda ilerleyen iki atım arasında zamansal bir fark oluşacaktır. Bunu şu şekilde hesaplayabiliriz.

Salingaç tekrarlama frekansı 61,66 MHz, iki atım arası zamansal fark 19,398 ns'dir. İki kol arasındaki fiber uzunluk farkını ışığın fiber içindeki hızına bölersek iki kol arasındaki toplam zaman farkını bulmuş oluruz.

$$1011 \text{ cm} - 341,6 \text{ cm} = 669,6 \text{ cm}$$

Fiberin kırılma indisini 1,6 alırsak ışık hızı fiber içinde $2 \times 10^8 \text{ m/s}$ olur.

$$t: \frac{6,696 \text{ m}}{2 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} : 3,3476 * 10^{-8} \text{ s} : 33,476 \text{ ns}$$

Pompa kolunun sonunda izolatör-koşutlayıcının da 24 cm uzunluğunda olduğunu hesaba kattığımızda iki kol arasındaki toplam zaman farkını bulmuş oluruz.

$$t: \frac{0,24 \text{ m}}{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} : 0,08 * 10^{-8} \text{ s} : 0,8 \text{ ns}$$

Toplam zaman farkı:

$$33,476 \text{ ns} + 0,8 \text{ ns} = 34,276 \text{ ns}$$

Boş alanda sonda kolu yaklaşık 366cm ekstra bir yol alıyor, bu da

$$t: \frac{3,66 \text{ m}}{3 * 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}} : 1,187 * 10^{-8} \text{ s} : 11,867 \text{ ns}$$

Toplam zaman farkı:

$$34,276 \text{ ns} - 11,867 \text{ ns} = 22,408 \text{ ns}$$

İki kol arasındaki atım sayısı farkını bulmak için:

$$\frac{22,408 \text{ ns}}{19,398 \text{ ns}} = 1,166170636$$

Yani pompa kolundan gelen atım, tabla kenarına kadar birinci koldan bir tane atım, fiberi tamamen dolaşır ve ikinci atım da yola çıkmış olur.

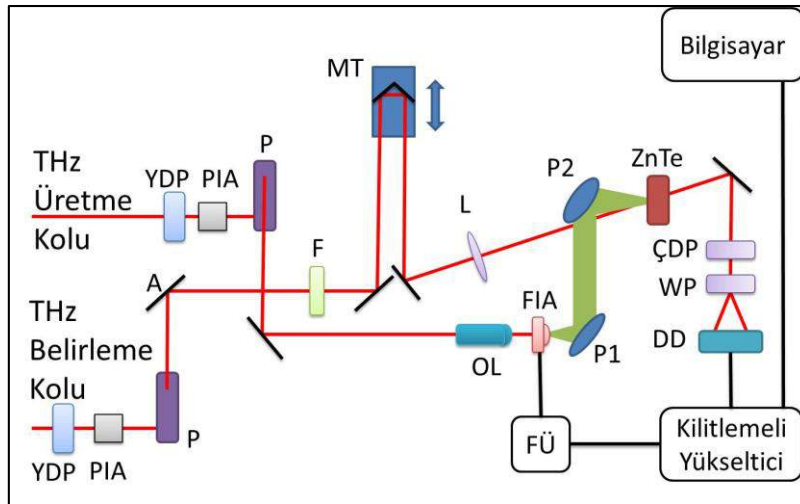
$$22,408 - 19,398 \text{ ns} = 3,01 \text{ ns}$$

İki atım arasındaki bu farkı elimine edebilmek için pompa kolu önde olduğundan dolayı birinci kolu bir miktar daha uzun tutmamız gerekiyor. Işığın havada 3,01 ns de kat ettiği mesafe teorik olarak birinci kola eklenmesi gereken ekstra gecikme miktarıdır.

$$3,01 * 10^{-9} \text{ s} * 3 * 10^8 \text{ m/s} = 0,903 \text{ m}$$

Yukarıda yapılan hesap sonucu dönem içinde kurulacak pompa kolun konumu belirlenecek ve ilk olarak bant enerjisi uygun yarı-iletken örneklerin ölçülmesi düşünülmüştür.

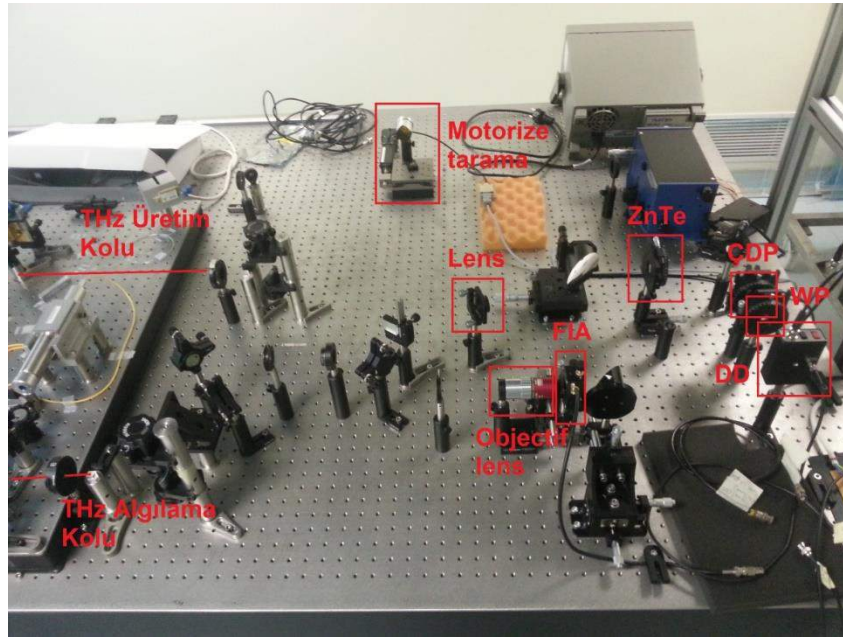
İlk hesaplamalar dikkate alınarak, iki farklı lazer çıkışı kullanılarak THz ölçümlerine geçildi. Kurulan spektrometre sisteminin şeması ve fotoğrafı aşağıdaki figürlerdeki gibidir.



Şekil 6.3.1. Hızlı Tarayabilen Zamana dayalı THz spektrometre şeması

1. A: Ayna
2. YDP: Yarım dalga plakası
3. PIA: Polarize ışın ayırıcı
4. P: Periskop
5. F: Filtre
6. MT: Motorize tarama

7. L: Lens
8. OL: Objektif lens
9. FİA: Foto-iletken anten
10. FÜ: Fonksiyon üretici
11. P1-2: 90° eksen dışı parabolik ayna
12. ZnTe: ZnTe kristali
13. ÇDP: Çeyrek dalga plakası
14. WP: Wollaston prizması
15. DD: Dengeli dedektör



Şekil 6.3.2. Zamana dayalı THz spektrometre fotoğrafı

Bu spektrometrede THz üretici olarak foto-iletken anten (FİA) kullanılmıştır. Fotoiletken anten temelinde GaBiAs katmanı yer almaktadır. Bu fotoiletken antene 1030-1060nm merkez dalga boylu 200fs altı atım odaklandığında ve uygun bir gerilim uygulandığında THz atımları üretilir. Algılama yönteminde ise elektro-optik ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Bu yüzden sistemimiz, anten-kristal sistemi olarak adlandırılabilir. Spektrometre sisteminde, üretimini tamamladığımız Yb-katkılı fiber lazerimizin birinci ve ikinci ön yükselteçleri kullanılmıştır. Bu koldan gelen ışınların aynı polarizasyonda olduklarından emin olmak için YDP kullandık. YDP'den çıkan yatay polarizasyondaki ışınlar, periskop sonrası dikey polarizasyona dönüşmektedir. THz belirleme kolunun toplam uzunluğu, daha önce yapılan hesaplamalar doğrultusunda 1,096 m kadar uzun yerleştirilmiştir. Üretim koluna, algılama koluna kıyasla daha fazla güç aktarılmaktadır. Algılama kolundaki dengeli detektöre fazla güç düşmesini engellemek için bu kolda bir filtre kullandık. Üretim kolundaki ışın bir objektif lens aracılığıyla paralel yapılı fotoiletken antene odaklanmaktadır. Anten yapısının ana bileşenleri silikon lens, yarı-iletken

yapıdır. Fonksiyon üreticisine bağlı olan anten 1 kHz'de $\pm 18V$ kare dalga ile modüle edilmektedir. Üzerinde altın elektrotlar bulunduran InGaAs yapı üzerine 1030 nm dalga boyundaki ışının düşmesi ile terahertz üretimi gerçekleşirken, silikon lens yardımı ile odakta geliyormuş gibi dağılımı sağlanmaktadır. Kullanılan FIA parametreleri aşağıdaki gibidir.

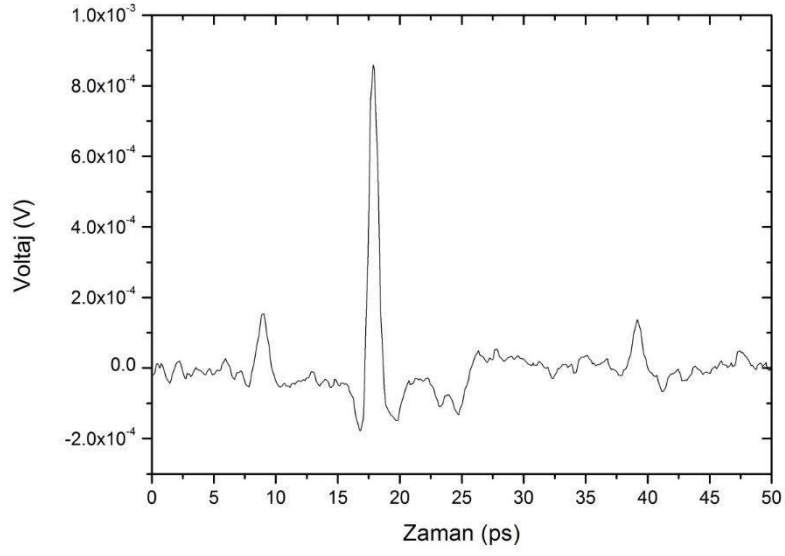
Tablo 6.3.1. Çift Kol Çıkışı THz Üretici FIA parametreleri

Elektriksel Parametreler	
	Standart değerler
Karanlık direnci	816 k Ω
Uygulanan Voltaj	18 V
Optik Yükseltgeme Parametreleri	
	Standart değerler
Çalıştığı Dalga boyu	1060 \pm 40 nm
Aydınlatan Lazerin Ortalama gücü	13 mW

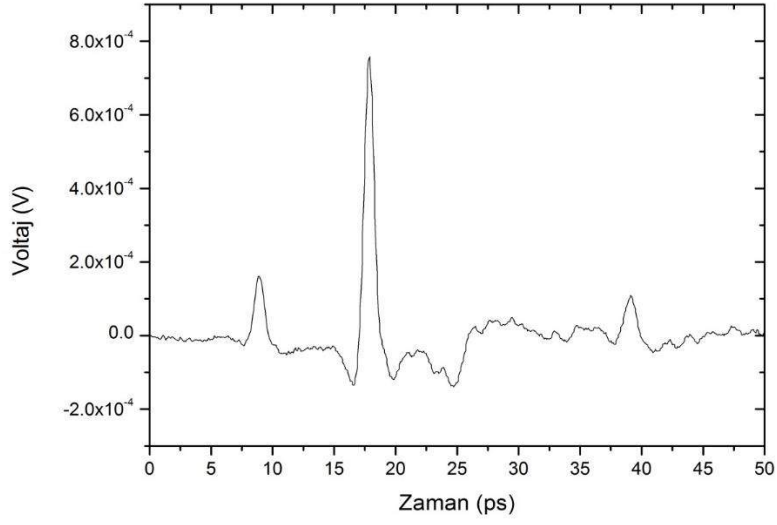
90° eksen-dışı parabolik aynanın odağına yerleştirdiğimiz antenden üretilen THz, parabolik ayna aracılığıyla paralel hale getirir. İkinci bir 90° eksen-dışı parabolik ayna, gelen THz ışınlarını <110> oryantasyonundaki ZnTe kristali üzerine odaklamaktadır. Belirleme kolunda motorize tamama sistemi ile iki kol arasında zaman farkı oluşturularak, interferometrik bir yöntem ile THz atım profili oluşturulur. Tarama esnasında iki kolun uzunluğu tam olarak birbirine eşit olduğunda, maksimum THz sinyali gözlenir. Kollar arası mesafe değiştiğinde bu maksimum değerden uzaklaşılır. Motorize tarama sisteminden gelen ışık, bir lens yardımı ile ZnTe kristali üzerine odaklanmıştır. Bu sayede kristal üzerinde THz-1030nm etkileşimi arttırılmıştır.

Algılama kristalinden sonra, polarizasyon tabanlı algılama yöntemi için çeyrek dalga plakası kullanılmaktadır. Dalga plakasından sonra dairesel ya da eliptik olan polarizasyondaki ışık yatay ve düşey bileşenlerine, belli bir ayrılma açısıyla Wollaston prizması ile ayrılır. Bu iki bileşen daha sonra dengeli foto detektörde ölçülmektedir. Yapılan ölçümlerde, cihazların kontrolü ve veri toplama işlemleri LabView da geliştirilen bir program aracılığıyla gerçekleştirilir.

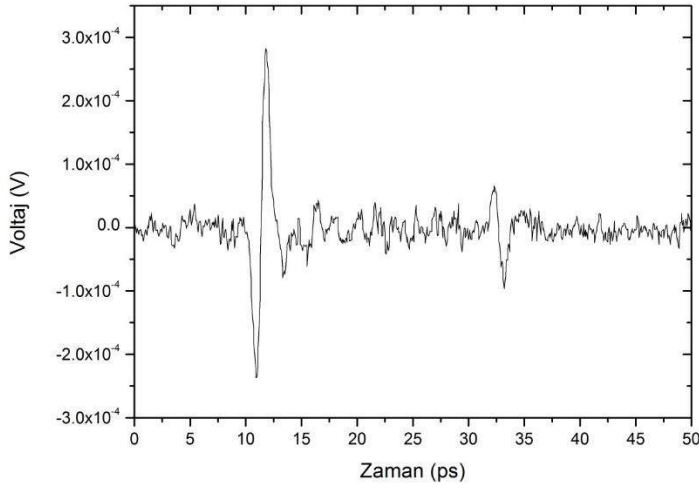
Oluşturulan bu sistemle üç farklı THz ölçümü gerçekleştirdik. İlkinde Yb-katkılı fiber lazerin sadece birinci ön yükselteç çıkışını kullanarak (kısa atım kolu), sonrasında sadece ikinci ön yükselteç çıkışını kullanarak (uzun atım kolu) ve son olarak iki çıkışı da kullanarak (kısa atım kolu THz algılamasında, uzun atım kolu THz üretiminde) ölçümler yapıldı. Sinyal profilleri ve bu profillere denk gelen güç tayfı karşılaştırması aşağıdaki gibidir.



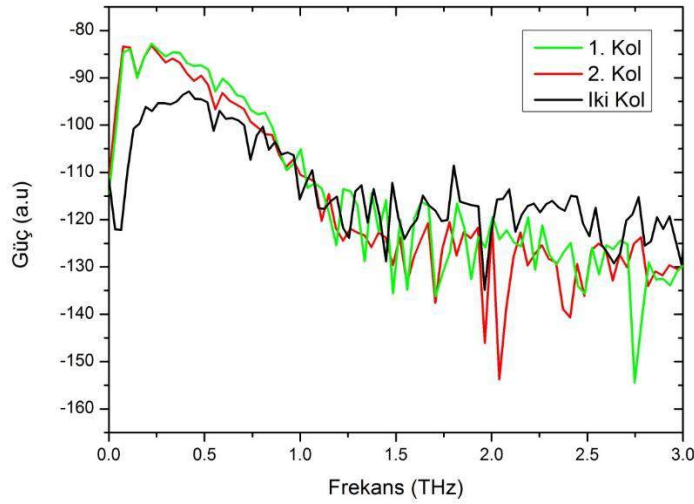
Şekil 6.3.3. Birinci ön yükselteç THz sinyali (130fs atım uzunluğu çıkışı)



Şekil 6.3.4. İkinci ön yükselteç THz sinyali (220fs atım uzunluğu çıkışı)



Şekil 6.3.5. İki ön yükselteç kullanarak üretilen THz sinyali (220fs üretimde, 130fs kolu algılamada kullanıldı)



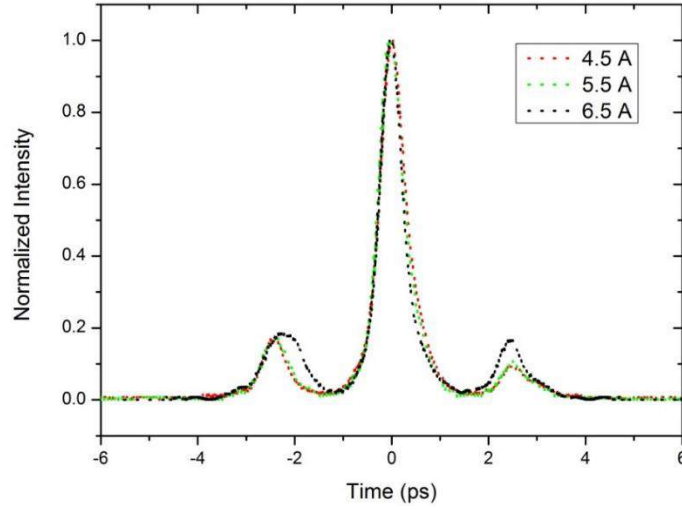
Şekil 6.3.6. THz sinyallerinin güç tayfı karşılaştırması

Sadece birinci kol ile üretilen THz sinyal seviyesi daha fazladır. İkinci kol ile üretim sağlandığında, atım uzunluğu birinci kola kıyasla daha uzun olduğu için hem sinyal seviyesinde hem de üretilen dalga boyu tayfında azalma gözlemlenmektedir. Yb-katkılı fiber lazerin iki ön yükseltecini THz üretim ve algılama kollarında kullandığımızda ise THz sinyal seviyesi ve dalga boyu tayfı önceki iki koşula kıyasla azalmaktadır. Bu çalışmanın sonucunda THz sinyalini elde edebilmemiz, ön yükselteç atım çıkışlarının zamansal farklılık hesabını başarılı bir şekilde gerçekleştirerek, anlık ölçüm alabilen spektrometre tasarımımızın çalıştığını göstermektedir.

7. POMPA-THz PROB (SONDA) SİSTEMİ

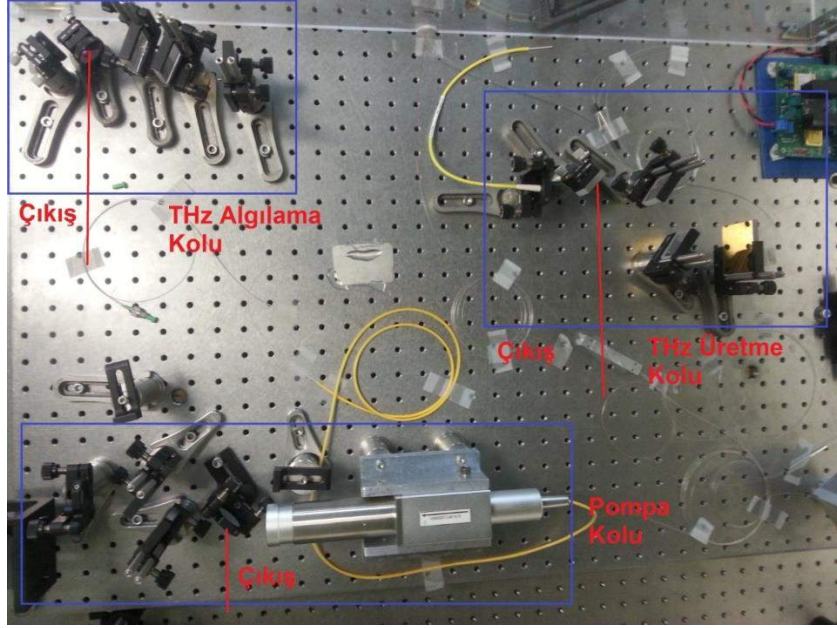
7.1 Pompa-THz Prob (Sonda) Optik Sistemin Tasarımı

Proje kapsamında geliştirilen Yb-katkılı lazer üç farklı çıkışa sahiptir. Bunlarda birincisi pompa/sonda ölçüm tekniği için optik uyarı amaçlı kullanacağımız pompa koludur. Pompa kolunun atım uzunluğu THz atımlarından kısa olabilir ama uzun olmamalıdır, çünkü pompa/sonda ölçümlerinde dinamik olayların zamansal çözünürlüğü THz prob atım uzunluğu tarafından belirlenir. Bu nedenle pompa kolundaki atımların mümkün mertebe pikosaniye civarı sürelerde kalmasını amaçladık. Bu kolun atım uzunluğu ölçümlerinin sonuçları aşağıdaki gibidir:



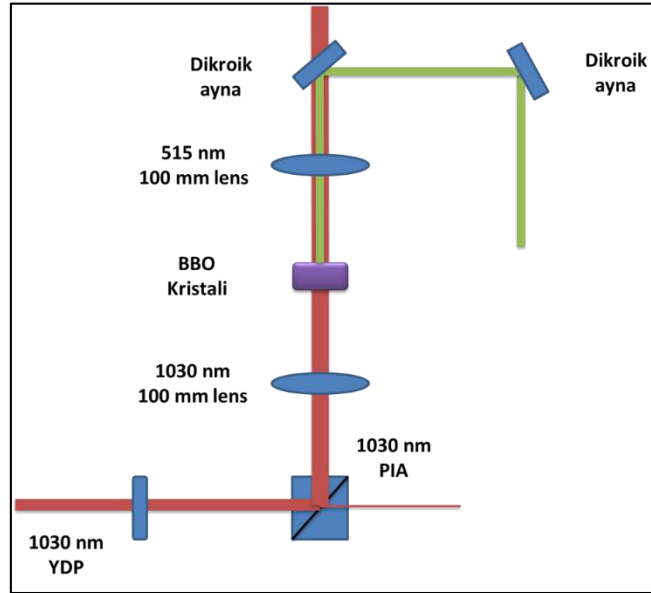
Şekil 7.1.1. Farklı akım değerlerinde atım profilleri

Yapılan bu ölçümlerde elde edilen atım uzunlukları 4,5 A diyot akımında 628 fs, 5,5 A'de 600fs, 6,6 A'de 557 fs'dir. Akım arttıkça aktif Yb fibere aktarılan pompa gücünü arttırmaktayız. Böylece atım profilini oluşturan dalga boylarından ~1030nm daha fazla yükseltgenmiş olur. Bu sayede atım uzunluğu belli bir değere kadar kısalmaktadır. Atım kısaltma işlemi için 1200 çizgi/mm'lik gerici çifti kullanılmıştır. En kısa atım uzunluğunu elde ettiğimiz 6,5 A'de 2,4 W çıkış gücü elde etmekteyiz. Ürettiğimiz iki ön yükseltici ve pompa kolunun fotoğrafı aşağıdaki gibidir.



Şekil 7.1.2. Yb-katkılı fiber lazer yükselteç bölümü

Üretilen bu 2,4 W'lık 1030nm merkez dalga boylu çıkışı pompa/sonda deneyleri için gerekli olan yüksek foton enerjilerine dönüştürebilmek için doğrusal olmayan optik etkilerden biri olan ikinci harmonik üretimi kullanıldı. Tasarlanan SHG kolu aşağıdaki şekilde gösterilmiştir:



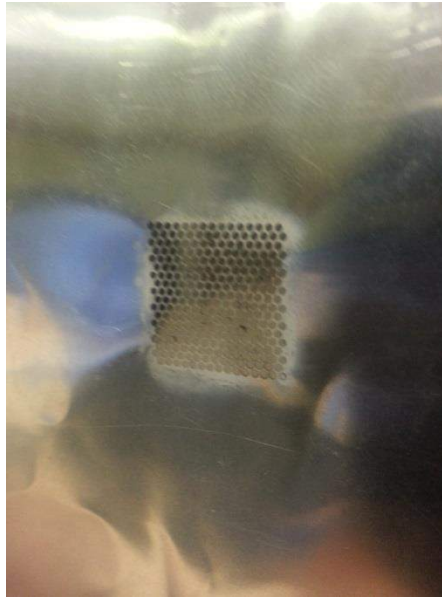
Şekil 7.1.3. İkinci harmonik üretimi(SHG) şeması

SHG yöntemi için Çeşit 1 (Type I) BBO kristalini kullanacağız. Bu kristal kullanıldığında gelen ışınların dikey polarizasyonda olması gerekmektedir. Bunun için gelen ışınlar polarize ışın ayırıcına (PIA) yönlendirilir. PIA gelen ışınların dikey bileşenlerini yansıtır ve yatay bileşenlerini geçirmektedir. Yansıtılan dikey bileşenli 1030 nm ışık, odak uzunluğu 100 mm olan bir lens

aracılığıyla BBO kristaline odaklanır. BBO kristalinde yüksek verimle yeşil ışık üretiminden sonra, dağılan yeşil ışın ikinci bir lens ile kolime edilecektir. İki adet dikroik ayna yardımıyla, arta kalan 1030 nm ışınları yeşil ışıktan ayıracağız. Bu kol sonrası elde edilecek pompa ışını yaklaşık 515nm merkez dalga boyunda olacaktır.

7.2. THz Prob Atımın Örnek Üzerinde Frekans Aralığının Ayarlanabilmesi

Bu çalışmaların devamında hedefimiz, ön yükselteç atım çıkışlarının zamansal farklılık hesabını başarılı bir şekilde gerçekleştirerek, spektrometre tasarımımızın çalıştığını göstermektedir. İlk olarak yukarıda (Şekil 5.3.6) üretilen THz tayfın ölçüm aralığında çalışacak bir filtre yapısını gerçekleştirmek istedik. Yakın zamanda sonuçlanan TUBITAK destekli, 110T849'nolu, "Zamana Dayalı Terahertz Ölçüm ve Görüntüleme Tekniklerinin Geliştirilmesi" başlıklı projemizin sonuç raporunda burada anlatılan dikroik filtrelerden bahsettik. Üretilen bu filtre yapısı sayesinde YDFL Pompa/THz Sonda sistemi ile alınan ölçümlerde uyarılmış örnek üzerinden geçen THz sinyalini filtreleyerek frekansa göre ölçüm hassasiyetini arttırmayı amaçlıyoruz. Çift-Izgara (elek teli gibi) şeklinde tasarlanan bu filtre yapılarındaki önemli etkenlerin delikler arası mesafe, delik çapı ve dalga kılavuzu olarak davranan bu deliklerin kalınlığı olduğunu ve bu tip yapıları üretmek için araştırmacıların filtrelenmesi istenilen dalga boyuna göre lazer kesim yöntemleri ile üretilebileceğini anladık. Şekil 5.3.6'daki THz tayfında gücün yoğun olduğu frekanslar 0,3 ile 0,5 THz arası olduğundan bu aralıkta 340GHz'teki bir filtre yapısının, yani yaklaşık 0.9mm dalga boyuna denk gelen frekans aralığının sonda deneylerinde kullanıldığı takdirde sinyal/gürültü oranında önemli bir iyileştirme sağlayacağı sonucuna vardık.



Şekil 7.2.1. 340GHz merkez frekansında çalışan dikroik filtre yapısı (delikler dalga kılavuzu gibi davranarak sadece belli THz frekanslarını geçiriyor).

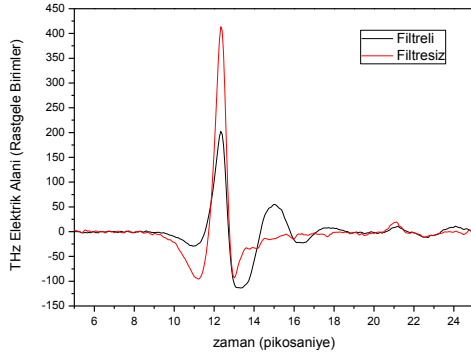
340GHz'te çalışacak bir optik filtre yapısını tasarladıktan sonra [Takan vd. 2015], delik çaplarını 0,01mm hassasiyetle üretmemiz gerektiği için proje ortağı Fiberlast Ltd. (Fiber Lazer Cihazları) firması ile yaptığımız görüşmeler sonucu bu filtrenin bu hassasiyetle ancak lazer kesimi ile yapılabileceğini anladık. Ellerinde 0.2mm kalınlığında alüminyum folyo bulunduğundan, filtre (dalga kılavuz) kalınlığını bu parametreye bağlayarak diğer parametrelerin değerlerini hesapladık.

Tablo 7.2.1. Sonda Işını için Filtre Parametreleri

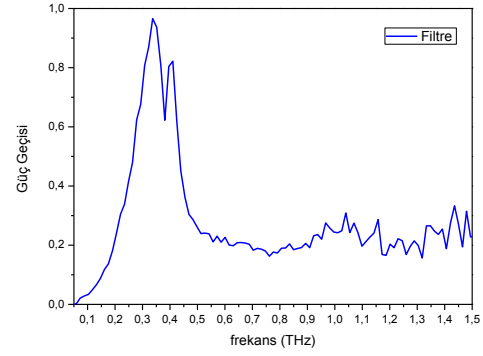
Dalga kılavuz kalınlığı	0.200 mm
Delikler arası mesafe	0.522 mm
Delik çapı	0.769 mm

Yukarıdaki tabloda verilen değerlere göre tasarlanan filtreyi kesici lazer sistemlerini kullanarak ürettirdik (bknz. Şekil 7.2.1). Fiberlast firmasında yapılan çalışmada 40kHz tekrarlama oranında, 0.5mJ puls enerjisine ve puls başına 25kW pik tepe gücüne sahip fiber lazer ile filtre yapısını işledik (Fiberlast NanoMark 20W).

Filtrenin hangi frekansları ve ne kadar orantıda geçirebildiğini karakterize etmek için laboratuvarımızda mevcut bulunan zamana-dayalı THz ölçüm sistemleri ile geniş tayfa sahip bir THz ışınına filtreden geçirdik. Yapılan ölçümler aşağıda gösterilmektedir:



Şekil 7.2.2. Filtre ve filtresiz zamana dayalı THz puls ölçümleri

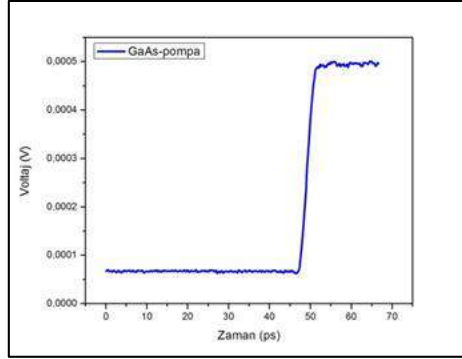


Şekil 7.2.3. Soldaki resimdeki puls grafiklerin frekans uzayında (50GHz-1500GHz) incelenmesi sonucu elde edilen geçiş grafiği (lineer skala)

Yapılan bu filtre tasarımı sonucu pompa/THz sonda deneylerinde frekans seçiciliği elde edebileceği ve böylelikle düşük probe sinyalinde olası sinyal gürültü oranını iyileştirebileceğiz.

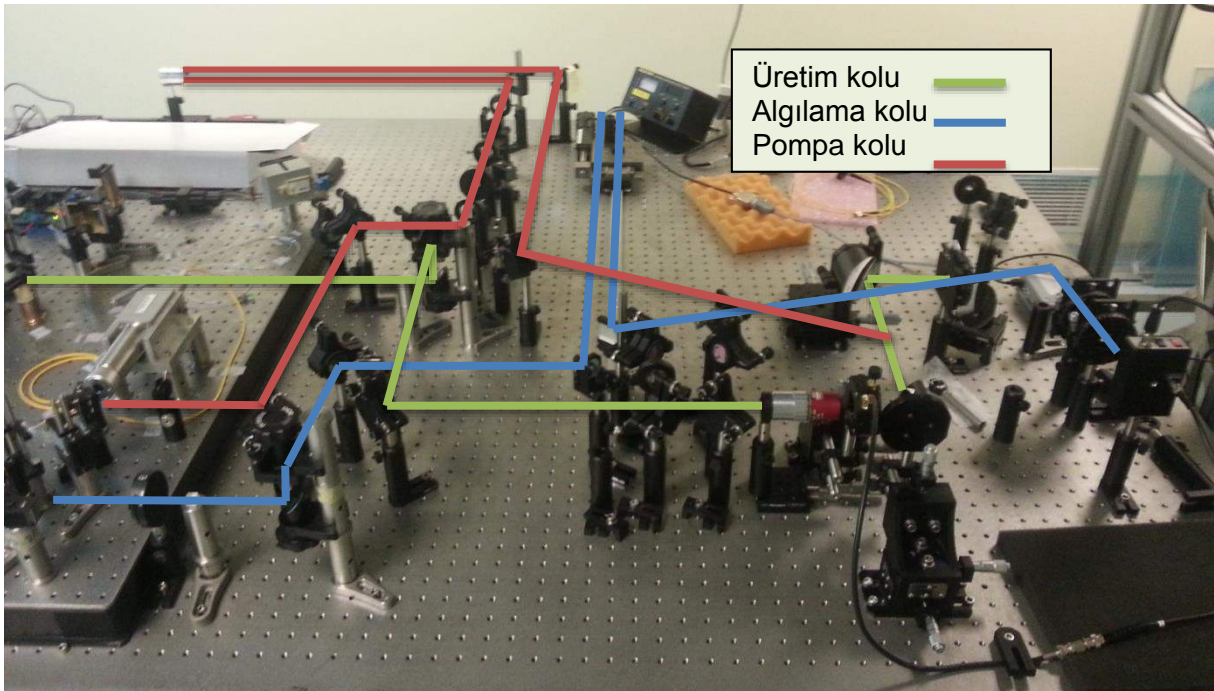
7.3. Pompa Optik Sistemin Kurulumu

Proje çalışmaları süresince yürütülen bir başka projede, Bilkent/UNAM'da geliştirilen optik pompa THz sonda çalışmaları sayesinde kendi projemiz için çeşitli konularda tecrübe ve bilgi kazanılmıştır. Bu kazanımlar projemizin ilerleyişi ve sonuçları açısından önem arz etmektedir. Bilkent'te kurulan sistem sayesinde, sistem gereklilikleri, tasarımı, ölçüm teknikleri gibi konularda kazanımlar sağlanmıştır. Yapılan GaAs 800nm pompa/THz sonda örnek ölçümlerden birisi Şekil 7.3.1'de verilmiştir.



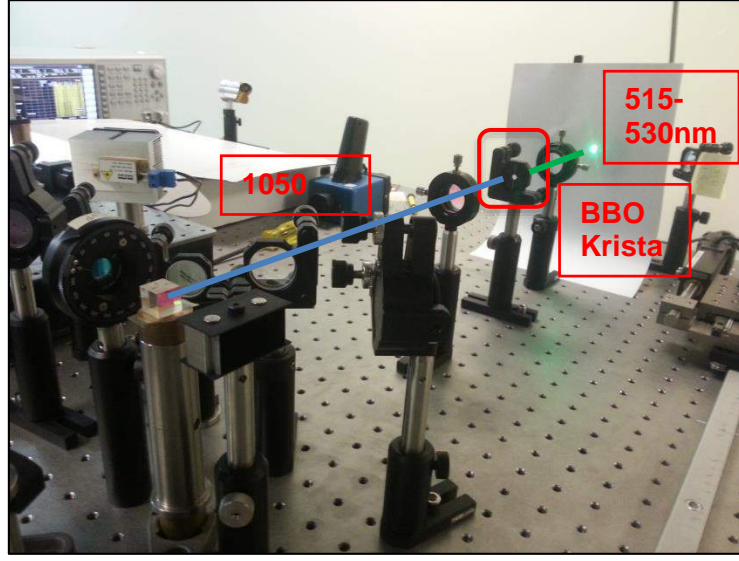
Şekil 7.3.1. Örnek pompa sonda ölçüm sonuçları

Bu ölçüm bir boyutta ölçüm olarak adlandırılmaktadır. THz dalgalarının malzemeden farklı pompa atım zamanlarındaki geçirgenliğini göstermektedir. Bilkent'te yapılan bu çalışmalarla edinilen tecrübelerle kurulan projemiz kapsamında optik pompa-THz sonda sistemi Şekil 7.3.2'de gösterilmiştir.



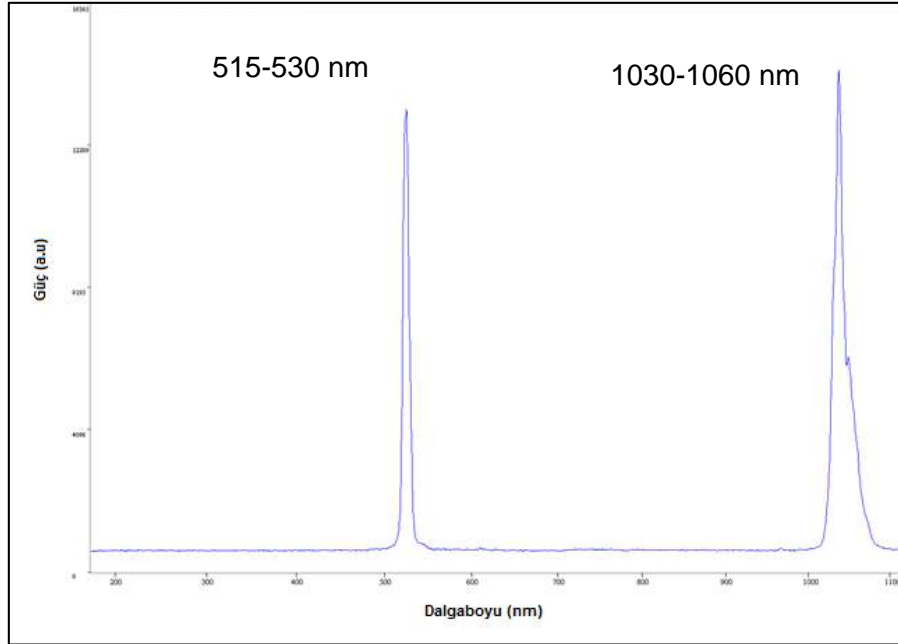
Şekil 7.3.2. Pompa-sonda sistemi

Yb-katkılı fiber lazerin yüksek güçlü olan üçüncü çıkışında yukarıda tasarlanan ikinci harmonik üretim sisteminin kurulum fotoğrafı Şekil 7.3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 7.3.3. İkinci harmonik üretim sistemi

Pompa kolu ve ikinci harmonik sonrasındaki elde edilen spektrumlar Şekil 7.3.4'te verilmiştir.



Şekil 7.3.4. İkinci harmonik üretimi öncesi ve sonrası elde edilen spektrumlar

SHG sistemin kurulum sebebin başlıca nedeni ölçülebilecek örnek çeşitliliğini arttırmak idi. Bu bağlamda proje kapsamında ikinci harmonik sonrasında ve lazerin temel çıkış dalga boyunda pompalanabilecek örneklerin listesi üzerine bir çalışma gerçekleştirdik. Bu çalışmanın sonuçları Tablo 7.3.1 ve Tablo 7.3.2'de verilmiştir.

Tablo 7.3.1. 1030-1060 nm pompa ile ölçülebilecek malzeme listesi

Materyal	Formül	Bant aralığı Enerjisi (eV)	Açıklama
Silikon	Si	1.11	En çok kullanılan yarı iletkenidir. Üretimi kolaydır. İyi elektriksel ve mekanik özellikleri vardır.
Germanyum	Ge	0.67	İlk üretilen radar algılama diyotlarında kullanılmıştır. Silikona göre daha düşük saflığa ihtiyaç duyar. Yüksek verimli fotovoltaik hücrelerde kullanılır.
Kalay	Sn	0.08	Kübik yapıya sahiptir.
Tellür	Te	0.33	Yarıiletken detektörlerde kullanılır
Galyum antimonit	GaSb	0.726	Kızılötesi dedektörlerde, LED lerde ve termofotovoltaiklerde kullanılır
İndiyum nitrit	InN	0.7	Güneş panellerinde kullanılmaya potansiyeli var. Sıklıkla alaşım olarak kullanılır.
İndiyum arsenit	InAs	0.36	1–3.8 µm dalga boyu aralığında kızılötesi detektörlerde, soğutmalı veya soğutmasız olarak kullanılır.
İndiyum antimonit	InSb	0.17	Kızılötesi detektörlerde ve termal görüntüleme sistemlerinde kullanılır.
Bakır sülfat	Cu ₂ S	1.2	Güneş panellerinde kullanılmıştır.
Kurşun selenit	PbSe	0.27	Termal görüntüleme için kızılötesi kameralarda kullanılır.
Kurşun (II) sülfat	PbS	0.37	İlk kızılötesi detektörlerde kullanılmıştır.
Kurşun tellürit	PbTe	0.32	Düşük termal iletkenliğe sahiptir.
Kalay sülfat	SnS	1	Elektriksel özellikleri katkı oranına ve yapısal değişikliklere göre ayarlanabilir.
Kadmiyum arsenit	Cd ₃ As ₂	0.14	Yüksek elektron mobilitiye sahiptir.
Bakır (II) oksit	CuO	1.2	P-tip yarı iletken
Bakır indiyum selenit, CIS	CuInSe ₂	1	Yarıiletken detektörlerde kullanılır
Gümüş sülfat	Ag ₂ S	0.9	Yarıiletken detektörlerde kullanılır
Demir ikisülfat	FeS ₂	0.95	Güneş panelleri için araştırılmaktadır.
Silikon-germanyum	Si _{1-x} Ge _x	0.67	Ayarlanabilir bant aralığına sahiptir.

İndiyum galyum arsenit	$In_xGa_{1-x}As$	0.36	Üzerinde çokça çalışılmıştır. Kızılötesi teknolojide ve termo-fotovoltaiklerde kullanılır.
İndiyum galyum fosfat	$In_xGa_{1-x}P$	1.35	Yüksek verimli güneş panellerinde kullanılır.
Alüminyum indiyum arsenit	$Al_xIn_{1-x}As$	0.36	Kuantum Cascade lazer yapılarında kullanılır.
Galyum arsenit antimonit	$GaAsSb$	0.7	Yarıiletken detektörlerde kullanılır

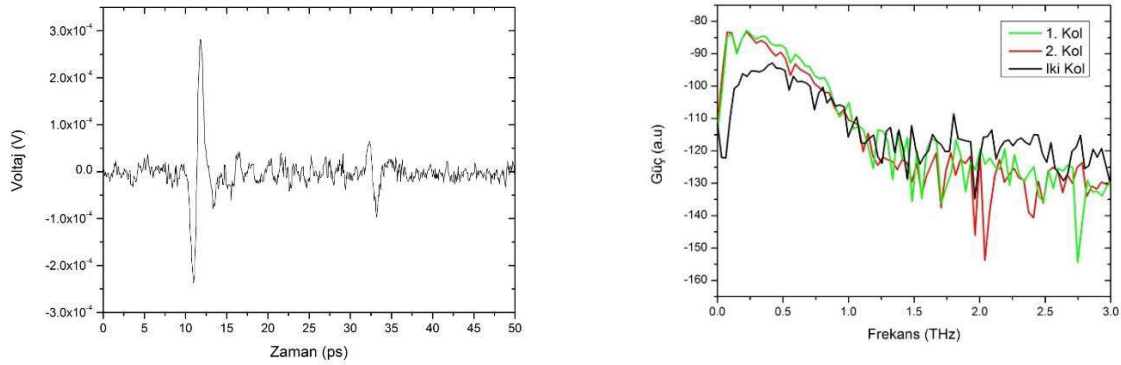
Tablo 7.3.2. 514-530 nm pompa ile ölçülebilecek malzeme listesi

Materyal	Formül	Bant aralığı Enerjisi (eV)	Açıklama
Silikon karbayt	SiC	2.3	İlk üretilen sarı led'lerde kullanılmıştır.
Galyum fosfat	GaP	2.26	İlk üretilen kırmızı, turuncu ve yeşil ledlerde kullanılmıştır.
Galyum arsenit	$GaAs$	1.43	Silikondan sonra, III-V yarı iletkenlerinde en sık kullanılan alt tabakadır.
İndiyum fosfat	InP	1.35	Yarıiletken detektörlerde kullanılır.
Kadmiyum selenit	$CdSe$	1.74	Yüksek verimli güneş panellerinde denenmektedir.
Kadmiyum tellürit	$CdTe$	1.49	CdS ile birlikte güneş panellerinde kullanılmaktadır.
Çinko tellürit	$ZnTe$	2.25	Güneş panellerinde kullanılmaktadır. Mikrodalga üreticilerinin, mavi ledler ve lazerlerin bileşenlerinde kullanılmaktadır.
Bakır (I) oksit	Cu_2O	2.17	En çok çalışılan yarı iletkenlerdendir.
Lantan bakır oksit	La_2CuO_4	2	Baryum ile katkılıandığında süper iletkenlik özelliği kazanır.
Galyum selenit	$GaSe$	2.1	Foto-iletkendir. Nonlineer optikte kullanılır.

Sonuç olarak bu dalga boyunda yapılacak pompa/sonda deneyleri için ölçüm yapılacak ilk örnek için bant-enerjisi bu enerjinin altında olan bir yarı-iletken malzemesi seçilecek. Kurulan lazerin pompa gücü örnek üzerinde yaklaşık $0.1 \mu J/cm^2$ foton enerji yoğunluğuna ulaşmamızı sağlayacak ve bu yoğunluklarda THz atım geçişlerinin etkilenmesini bekliyoruz. Örneğin bu ölçümlerden yarı iletken malzemesinde uyarılan elektronların ilk hallerine olan geçiş sürelerini çıkartabileceğiz. Kurduğumuz lazer sistemin diğer femtosaniye lazer sistemlerine olan avantajı değişen tekrarlama frekansı sayesinde THz atımını pompa atımına göre hızlı bir şekilde tarayabileceğiz. Yani 30ps uzunluktaki bir THz puls profilini hızlı bir şekilde temin edeceğiz.

8. Sonuç

Proje kapsamında geliştirilen Yb: katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemi ile fotouyarı konumunda (pompa/sonda) dinamik ölçüm alabilen özgün bir THz ölçüm sistemi geliştirilmiştir. Bu ölçümü sağlayan en önemli etken lazerin tekrarlama frekansının hızlı değiştirilebilmesidir. YDFL lazer sisteminde üç çıkış kolu geliştirilmiştir: THz atım üretim kolu, THz atım belirleme kolu ve 1030/515nm atım pompalama kolu. İki kol ile THz üretimini ve algılanmasını gerçekleştirebildiğimizi gösterdik (bknz. Şekil 8.1). Burada kısa atım kolu (<150fs) THz algılamasında, uzun atım kolu (<250fs) THz üretiminde kullanılarak ölçümler gerçekleştirildi.



Şekil 8.1. İki ön yükselteç kullanarak üretilen THz sinyali (230fs üretimde, 130fs kolu algılamada kullanıldı)(sol), THz sinyallerinin güç tayfı karşılaştırması (sağ)

Lazer parametreleri, THz Sinyal profilleri ve bu profillere denk gelen THz güç tayfı karşılaştırmasında aşağıda tabloda gösterilen veriler elde edildi:

Tablo 8.1. Geliştirilen sistem ile elde edilen parametreler

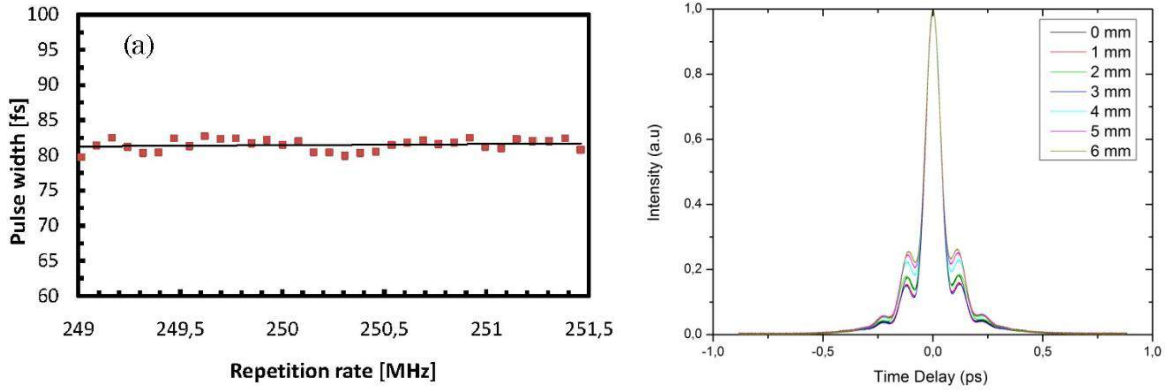
THz Üretim Kolu Atım Uzunluğu	~230fs	1030nm Pompa Kolu Gücü	~2.5 W
THz Üretim Kolu Gücü	~50 mW	Lazer Merkez Tekrarlama Frekans	~51 MHz
THz Belirleme Kolu Atım Uzunluğu	~130fs	Elde Edilen THz Tayf Genişliği	0.1-1.5 THz
THz Belirleme Kolu Gücü	~50 mW	Lazer Tekrarlama Frekans Tarama Aralığı	+/-12.5 kHz
1030nm Pompa Kolu Atım Uzunluğu	~700 fs	THz Atım Profili Tarama Uzunluğu	50 ps

Lazer Dalgaboyu	Merkez	1030nm	THz Atım Profili	10Hz
			Tarama Hızı	

8.1. Yb:katkılı Fiber Lazerin Er:katkılı Fiber Lazer İle Karşılaştırılması

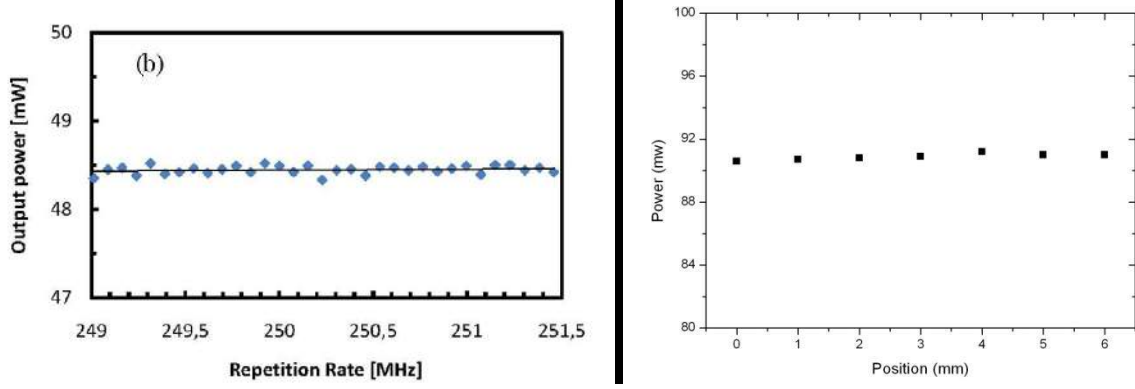
Tekrarlama frekansı değiştirilerek THz atım profilinin oluşturulması tekniği ilk olarak Er katkılı lazerde uygulanmıştır (Wilk vd., 2011). Projemizde geliştirdiğimiz Yb katkılı fiber lazer sayesinde daha yüksek güçler sayesinde pompa/sonda deneyleri mümkün olmuştur. OSCAT tekniğinin kullanıldığı bu iki lazer tipini aşağıdaki gibi karşılaştırabiliriz.

Şekil 8.2'de Er katkılı fiber lazerin literatürden alınan atım uzunluğunun tekrarlama oranı ayarlanma sırasındaki değişim sonuçlarını görüyoruz. Bu sonuca göre, tekrarlama frekansı ayarlanırken atım uzunluğu ± 2.5 fs sapma göstermiştir. Bu da yaklaşık %6 bir değişime denk gelmektedir. Geliştirdiğimiz YB katkılı lazerde ise tekrarlama frekansı ayarlanırken 85.0-81.8 fs aralığında Şekil 8.2'de gösterildiği gibi bir değişim gözlemledik. Bu değerler %4'lük bir farka denk gelmektedir.



Şekil 8.2. Atım uzunluğu değişimi **a)** Er katkılı fiber lazer **b)** Yb katkılı fiber lazer

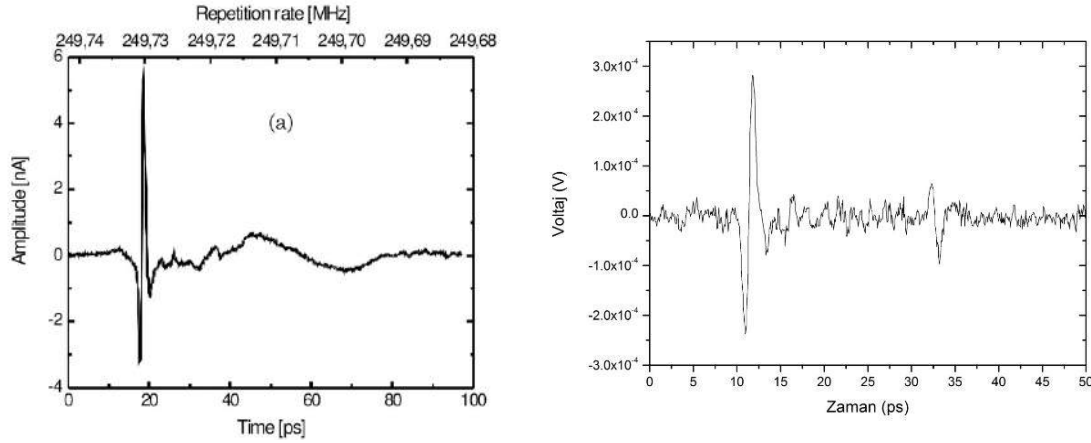
Şekil 8.2'de Er: katkılı fiber lazerin literatürden alınan çıkış gücü değişim sonuçlarını görüyoruz. Bu sonuca göre, tekrarlama frekansı ayarlanırken çıkış gücü ölçüm yapılan güç metrenin ± 5 sapma değerinin altında kalmıştır. Geliştirdiğimiz YB katkılı lazerde ise tekrarlama frekansı ayarlanırken Şekil 8.3'de gösterildiği gibi %1'in altında bir güç salınımı ölçtük.



Şekil 8.3. Çıkış gücü değişimi **a)** Er katkılı fiber lazer **b)** Yb katkılı fiber lazer

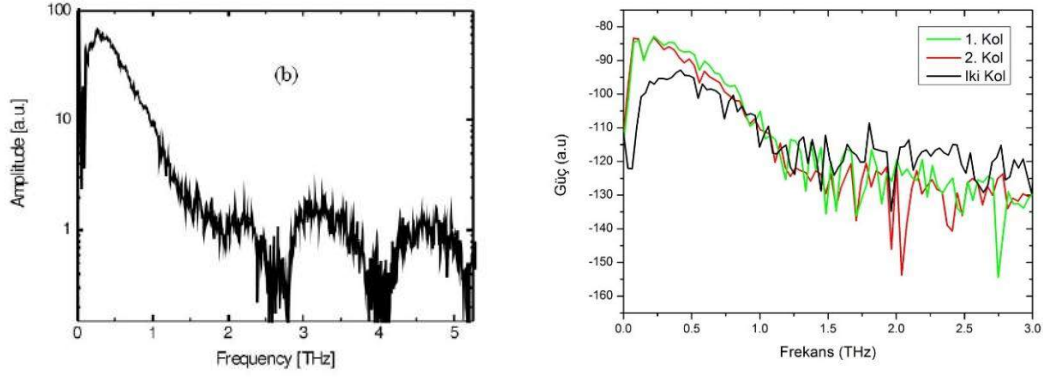
8.2. OSCAT Tekniğinin Er ve Yb Katkılı Lazerlerde Karşılaştırılması

Şekil 8.4'te literatürde anlatılan Er: katkılı lazer sonrasında THz sistemi ile alınan THz profili gösterilmiştir (Wilk vd., 2011). Bu çalışmada THz üretimde ve algılamada anten yapıları kullanılmıştır. Geliştirdiğimiz Yb: katkılı fiber lazer sonrasında kurduğum THz sistemimde, THz üretimi için anten, algılamada ise kristal sistemi kullanılmıştır. THz güç tayfını daha geniş olması için seçtiğimiz bu sistem daha fazla optik eleman içermektedir. Bu sebeple sistem için yansımalar THz atım profili içinde ek atımlar oluşturmaktadır. Elde ettiğimiz THz profili Şekil 8.4'te gösterilmiştir.



Şekil 8.4. THz profile karşılaştırması **a)** Er katkılı fiber lazer **b)** Yb katkılı fiber lazer

Elde edilen THz profillerine denk gelen THz güç tayfı Şekil 8.5'te verilmiştir. Literatürde elde edilmiş olan güç tayfı 2 THz kadardır. Bizim sistem ile güç tayfı yaklaşık 1.5 THz, yani benzer mertebede olduğu görülmüştür.



Şekil 8.5. THz güç tayfı karşılaştırması **a)** Er katkılı fiber lazer **b)** Yb katkılı fiber lazer

8.3. Elde Edilen Başarılar ve İleriye Dönük Projelendirme

Proje kapsamında tekrarlama frekansını çok hızlı değiştirebilen, üç çıkış kolu olan, 1030nm merkez dalga boyunda çalışan özgün tasarıma sahip Yb: katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemi geliştirilmiştir. Üç çıkış kolundan, kısa atım kolu (<150fs) Terahertz (THz) algılanmasında, uzun atım kolu (<250fs) THz üretiminde ve pompa kolu (<1ps) pompa/THz sonda deneylerinde kullanılması için geliştirilmiştir. Geliştirilen bu özgün lazer sistemi ile THz atım ölçümlerin ölçüm hızında neredeyse anlık olarak gerçekleştirilmesi için lazerin tekrarlama frekansın hızlı değişimi sağlanmıştır (~10Hz). Bu amaçlara ulaşmak için sistem içinde terahertz atımlarını üretmek, iletmek ve belirlemek için kullanılan birimlerin her biri optimize edilmiştir. Aynı zamanda lazerin pompa kolundaki çıkış gücünü yükselterek sistemin pompa/THz sonda deneylerinde anlık ölçüm tekniğini kullanarak uygulanması amaçlanmıştır. Böylelikle bu yeni ölçüm tekniği ile yurtdışındaki araştırma laboratuvarlarında geleneksel kullanılan pompa/sonda yöntemlerine hız kazandırarak farklı fiziksel etkenlerin tespitine katkı sağlayabileceğiz.

Projenin en önemli başarılarından biri ülkemizdeki ilk yükseltilmiş kip-kilitli Yb: katkılı fiber lazer sürümlü pompa/THz sonda sistemin geliştirilmesidir. Projede yapılan çalışmalar süresince yaşanan bazı teknik sorunlar nedeniyle istenilen performansı elde edemedik. Örneğin son dönem fiber lazerin Yb: katkılı fiberin yanması sonucu osilatör tekrar kuruldu ve çalışmalar tekrarlandı. Bu nedenle pompa/sonda tekniklerinde ölçme deneyini gerçekleştirilemedik. Yani frekansa göre incelenmesi istenilen örneklerin dinamik tepkisini ölçemedik. Bunun yanında atım dağılım sürelerini fiber çıkışlarında çok iyi kontrol ederek ve OSCAT tekniğine benzer bir ölçüm yöntemi kullanarak THz atım şekil ölçüm hızını iyileştirmek için lazer tekrarlama oranını kavite uzunluğunu hızlı bir şekilde değiştirerek yapılabildiğini gösterdik [Keskin vd. 2013a, Keskin vd. 2013b, Keskin vd. 2014]. Yapılan bu çalışmalar

sonucunda terahertz alanında önemli sonuçlar elde ettik. Proje çalışmasında alınan sonuçlar ve elde edilen başarıların özeti aşağıda gösterilmektedir.

- Yüksek kararlılıklı bir Yb: katkılı kip-kilitli <250fs atım uzunluğunda sahip fiber lazer geliştirildi ve kuruldu
- Yb: katkılı fiber lazer çıkışını ikiye ayırarak istenilen uzunluktaki THz üretim ve belirleme kollarından geçirildikten sonra, THz üretici ve belirleme FIA yapılarına gelmeden önce atım uzunluklarını özel ızgara aynalı kullanarak belirleme kolunda <130fs ve üretim kolunda <230fs olması sağlandı. Her iki kolda güç en az 50-100mW olarak düzenlendi.
- Tasarlanan ve kurulan lazer tekrarlama frekansı kontrol sistemi ile lazer tekrarlama oranını en az 50kHz aralığında hızlı bir şekilde tarayarak anlık THz atım ölçüm tekniğın geliştirildi.
- YDFL çıkışını üç kola ayırarak pompa/THz prob (sonda) için gerekli zamana dayalı ölçüm sistemi plaka üzerinde kuruldu. Pompa kolu hem temel merkez boyu (1030nm) hemde ikinci harmonik dalga boyunu üretecek şekilde (515nm) kuruldu.
- Projedeki yapılan çalışmalara kapsamında dört uluslararası makale, beş uluslararası bildiri, üç ulusal bildiri ve bir yüksek lisans tezi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca proje kapsamında yapılan yüksek lisans tez ODTÜ Lisansüstü Yılın Tezi Ödülünü kazandı (2012 – 2013)

Yapılan çalışmalar teknolojik ve ürün imalatı yönünden yeni Ar-Ge projelerine açık bir konudur. Proje sürecinde, 5 bursiyer öğrencisi yetiştirilmiş ve ülkemizin önde gelen araştırmacıları (2 farklı kuruluş ve iki farklı kurum) birarada çalışarak özgün bir spektroskopik ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu kadar geniş bir ölçüm yelpazesi sunabilen bu tekniklerin ülkemizde geliştirilmesi ve desteklenmesi ileride birçok kuruluşumuzda bilim çalışmalarına hız ve önem katacaktır.

9. KAYNAKLAR

Altan, H., Yua, B.L., Alfano, S.A., Alfano, R.R. "Terahertz (THz) Spectroscopy of Freon-11 (CCI3F, CFC-11) at room temperature" Chem. Phys. Lett. 427 241 (2006)

Arbore, M.A., Fejer, M.M., Fermann M.E., Hariharan, A., Galvanauskas, A. and Harter, D. "Frequency doubling of femtosecond erbium-fiber soliton lasers in periodically poled lithium niobate" *Optics Lett.*, 22 13 (1997)

Auston, D. H., Cheung, K. P., Valdmanis, J. A., Kleinman, D. A., "Coherent time-domain far-infrared spectroscopy with femtosecond pulses", *Journal of the Optical Society of America A-Optics Image Science and Vision* , 1, 1278-1278 (1984)

Auston, D. H., Nuss, M. C., "Electrooptic generation and detection of femtosecond electrical transients", *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 24, 184-197 (1988)

Beard, M. C.; Turner, G. M.; Schmuttenmaer, C. A., "Subpicosecond carrier dynamics in low-temperature grown GaAs as measured by time-resolved terahertz spectroscopy", *J. Appl. Phys.*, 90, 5915 (2001)

Brener, I., Dykarr, D., Frommer, A., Pfeiffer, L. N., Lopata, J., Wynn, J., West, K., and Nuss, M. C., "Terahertz emission from electric field singularities in biased semiconductors," *Opt. Lett.*, 21, 1924–1926 (1996)

Buckley, J. R., Wise, F., Ilday, F. Ö., Sosnowski, T. 2005. "Femtosecond fiber lasers with pulse energies above 10 nJ" *Opt. Lett.* 30:1888.

Elzinga, P. A., Kneisler, R. J., Lytle, F. E., Jiang, Y., King, G. B., and Laurendeau, N. M. "Pump/probe method for fast analysis of visible spectral signatures utilizing asynchronous optical sampling" *Appl. Opt.* 26, 4303–4309 (1987)

Gaafar, M., Richter, P., Keskin, H., Möller, C., Wichmann, M., Stolz, W., Rahimi-Iman, A., Koch, M. "Self-mode-locking semiconductor disk laser" *Opt. Express* 22, 28390-28399 (2014)

Han, P. Y. and Zhang, X.-C., "Free-space coherent broadband terahertz time-domain spectroscopy," *Meas. Sci. And Tech.*, 12 1747, (2001)

Hendry, E., Wang, F., Shan, J., Heinz, T. F., and Bonn, M., "Electron Transport in TiO₂ Probed by THz Time-Domain Spectroscopy," *Phys. Rev. B* 69, 081101 (2004)

Hochrein, T., Wilk, R., Mei, M., Holzwarth, R., Krumbholz, N. and Koch, M. "Optical sampling by laser cavity tuning" *Optics Express* Vol. 18, No. 2, 1613-1617 (2010)

Huber, R.; Brodschelm, A.; Tauser, F.; Leitenstorfer, A., "Generation and field-resolved detection of femtosecond electromagnetic pulses tunable up to 41 THz", *Appl. Phys. Lett.*, 76, 3191 (2000).

J Rudd, J. V., Zimdars, D. and Warmuth, M. "Compact fiberpigtailed terahertz imaging system" in *Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers II*, J. Neev and M. K. Reed, eds., *Proc. SPIE 3934*, 27–35 (2000)

Keskin., H. "Fiber-integrated terahertz spectrometer driven by ultrafast ytterbium doped fiber laser" (Yüksek lisans tezi, ODTÜ, Ankara, Eylül 2013a) etd.lib.metu.edu.tr/upload/12616465/index.pdf

Keskin, H., Yavaş, S., Yağcı, E., Aydın, O., Eken, K., İlday, F. O., Şahin, A. B., and Altan, H., "Repetition rate tuning of an ultrafast ytterbium doped fiber laser for terahertz time-domain spectroscopy," *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2013. IRMMW-THz 2013. 38th International Conference, Mainz, Germany, 01-06 Sept. (2013b) DOI: 10.1109/IRMMW-THz.2013.6665421

Keskin, H., Altan, H., Yavaş, S., İlday, F. Ö., Eken, K., and Şahin, A. B., "Development of a Rapid-Scan Fiber-Integrated Terahertz Spectrometer," *Optical and Quantum Electronics* 46, 495 (2014)

Klatt G., Gebbs, R., Janke, C., Dekorsy, T. and Bartels, A. "Rapidscanning terahertz precision spectrometer with more than 6 THz spectral coverage" *Opt. Express* 17, 22847–22854 (2009)

Knoesel, E., Bonn, M., Shan, J., and Heinz, T. F., "Charge Transport and Carrier Dynamics in Liquids Probed by THz Time-Domain Spectroscopy," *Phys. Rev. Lett.* 86, 340 (2001)

Knoesel, E., Bonn, M., Shan, J., Wang, F., and Heinz, T. F., "Transient Conductivity of Solvated Electrons in Hexane Investigated with Time-Domain THz Spectroscopy," *J. Chem. Phys.* 121, 394 (2004).

Krumbholz, N., Schwerdtfeger, M., Hasek, T., Scherger B. and Koch, M. "A fiberstretcher operating as an optical delay line in a fiber-coupled THz spectrometer" in *33rd International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2008 (IEEE, 2008), pp. 1–2.

Lim, H., İlday, F.Ö. and Wise, F.W. "Generation of 2-nJ pulses from a femtosecond ytterbium fiber laser" *Opt. Lett.* 28:660 (2003)

Limpert, J., Schreiber, T., Clausnitzer, T., Zöllner, K., Fuchs, H., Kley, E., Zellmer, H. and Tünnermann, A. "High power femtosecond Yb-doped fiber amplifier" *Opt. Express* 10, 628-638 (2002)

Matthaeus, G., Ortaç, B., Limpert, J., Nolte, S., Hohmuth, R., Voitsch, M., Richter, W., Pradarutti, B., Tünnermann A. "Intracavity terahertz generation inside a high-energy ultrafast soliton fiber laser" *Appl. Phys. Lett.*, 93, 261105 (2008)

Mukhopadhyay, P. K., Özgören, K., Budunoğlu, İ. L., İlday, F. Ö. "All-fiber low-noise high-power femtosecond Yb-fiber amplifier system seeded by an all-normal dispersion fiber oscillator" *IEEE J. Sel. Top. Quant.* 15, 145 (2009)

Nagai, M., Tanaka, K., Ohtake, H., Bessho, T., Sugiura, T., Hirosumi, T. and Yoshida, M. "Generation and detection of terahertz radiation by electro-optical process in GaAs using 1.56µm fiber laser pulses" *Appl. Phys. Lett.*, 85 3974 (2004)

Nelson, L.E., Fleischer, S. B., Lenz, G. and Ippen, E.P. "Efficient frequency doubling of a femtosecond fiber laser" *Optics Lett.*, 21 1759 (1996)

Otake, H., et al, "Development of Intense and Compact THz-radiation Source Using Femtosecond-laser Irradiated InAs Emitter in a High Magnetic Field," *Jour. Of Chinese Chem. Soc.*, 47 609-614, (2000)

Rice, A., et al, "Terahertz optical rectification from <110> zinc-blende crystals," *Appl. Phys. Lett.*, 64 1324, (1994)

Rudd, J. V., Zimdars, D. and Warmuth, M. "Compact fiberpigtailed terahertz imaging system" in *Commercial and Biomedical Applications of Ultrafast Lasers II*, J. Neev and M. K. Reed, eds., *Proc. SPIE* 3934, 27–35 (2000)

Schibli, T.R., Minoshima, K., Hong, F.-L., Inaba, H., Bitou, Y., Onae, A. and Matsumoto, H. "Phase-locked widely tunable optical single-frequency generator based on a femtosecond comb" *Opt. Lett.* 30, 2323 (2005)

Schmuttenmaer, C. A. "Exploring dynamics in the far-infrared with terahertz spectroscopy" *Chemical Reviews* 104: 1759–1779 (2004)

Shan, J., Wang, F., Knoesel, E., Bonn, M., and Heinz, T. F., "Measurement of the Frequency-Dependent Conductivity of Sapphire," *Phys. Rev. Lett.* 90, 247401 (2003)

Suzuki, M., et al., "Excitation wavelength dependence of terahertz emission from semiconductor surface", *Appl. Phys. Lett.* 89 091111, (2006)

Takahashi, H., et al., "Significant Enhancement of terahertz radiation from InSb by use of a compact fiber laser and an external magnetic field," *Applied Physics Letters* 82 13, (2003)

Takan, T., Keskin, H., and Altan. H., "Low-cost bandpass filter for terahertz applications," *Optical and Quantum Electronics* 47 (4) 953-960 (2015)

Tamura, K., Ippen, E.P., Haus, H.A., Nelson, L. E. "77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser" *Optics Letters*, Vol. 18, 1080-1082 (1993)

Wang, F., Shan, J., Knoesel, E., Bonn, M., and Heinz, T. F., "Electronic Charge Transport in Sapphire Studied by Optical-Pump/THz-Probe Spectroscopy," *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* 5352(Ultrafast Phenomena in Semiconductors and Nanostructure Materials VIII): 216-221 (2004)

Wilk, R., Hochrein, R., Koch, M., Mei, M. and Holzwarth, R. "Terahertz spectrometer operation by laser repetition frequency tuning," *J. Opt. Soc. Am. B* 28 592 (2011)

Wilk, R., Hochrein, T., Koch, M., Mei, M., and Holzwarth, R. "OSCAT: novel technique for time-resolved experiments without moveable optical delay lines" *J. Infrared Millim. Terahz. Waves* (2010). DOI: 10.1007/s10762-010-9670-8.

Xu, J., Lu, Z., and Zhang, X.-C. "Compact involute optical delay line" *Electron. Lett.* 40, 1218–1219 (2004)

Yasui, T., Saneyoshi, E. and Araki, T. "Asynchronous optical sampling terahertz time-domain spectroscopy for ultrahigh spectral resolution and rapid data acquisition" *Appl. Phys. Lett.* 87, 061101 (2005)

Zhang, X.-C., Jin, Y., Hu, B. B., Li, X., Auston, D. H., "Optoelectronic study of piezoelectric field in strained-layer superlattices", *Superlattices and Microstructures*, 12, 487-490 (1992)

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. HAKAN ALTAN
Proje No:	111T748
Proje Başlığı:	Yakın Gerçek Zaman İşlemli, Fiberde Tümlşik Atmalı Terahertz Spektrometre
Proje Türü:	Uluslararası
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	SEMİH KORAY EKEN, ASAF BEHZAT ŞAHİN
Danışmanlar:	FATİH ÖMER İLDAY
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ORTA DOĞU TEKNİK Ü. FEN-EDEBİYAT F. FİZİK B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/04/2012 - 01/08/2015
Onaylanan Bütçe:	466900.0
Harcanan Bütçe:	421068.32
Öz:	<p>Genelde zamana dayalı terahertz ölçüme dayalı spektroskopi yöntemi, pompa/THz prob (sonda) veya benzeri dinamik ölçüm deneyleri için sistem temelinde güçlendirilmiş atmalı lazer sistemleri kullanılmakta ve THz atım şeklinin ölçüm temelinde interferometrik teknikler kullanıldığından spektrum verilerinin kaydedilmesi onlarca dakika sürebilmektedir. Bu sistemler ile yakın gerçek zaman işlemli spektroskopi ölçümlerin ve anlık dinamik olayları gözlemleyebilmek için hızlı pompa/THz prob (sonda) ölçüm kabiliyetinin kazanılması, madde karakterizasyonu yapan birçok araştırma grubu için önemli bir destek sağlayacaktır. Örneğin bazı biyolojik ve kimyasal reaksiyonlar saniyeler mertebesinde gerçekleştiğinden bu etkileşimlerin nasıl geliştiği bu tip bir anlık THz spektroskopi yöntemi sonucu daha iyi anlaşılabilir olacaktır. Aynı zamanda uygun pompalama lazerin fotouyarı sonrası, prob (sonda) görevi yapan THz darbelerin düşük foton enerjisi sayesinde birçok farklı malzeme türleri karakterize edilebilecektir. Bu tip bir ölçüm yeteneğini geliştirmek için proje çalışmasında tekrarlama oranı hızla ayarlanabilen, yükseltilmiş iterbiyum (Yb) katkılı kip-kilitli fiber lazer sistemini geliştirdik ve bu sistemden üç farklı çıkış sağlayarak hem THz atım üretimi, hem belirlenmesi hemde pompa/THz prob (sonda) deneyleri yapabilen bir sistem geliştirdik. Lazerin üç çıkış kolundaki ışın parametrelerini optimize ederek sistem ile yakın gerçek zaman işlemli, dinamik ölçüm yapabilen atmalı terahertz spektrometre ölçümlerin yapılabildiğini gösterdik.</p> <p>Kip-kilitli lazerlerin tekrarlama oranları lazer kavitesinin fiziksel olarak uzunluğunun değişmesi ile ayarlanabilmesine rağmen farklı kavite uzunluklarında aynı kararlılığı (çıkış gücü, atım süresi, tayf genişliği) gösterememektedir. Proje kapsamında yaptığımız çalışmalarda farklı kavite uzunluklarında kararlı çalışan Yb: katkılı kip-kilitli fiber lazer geliştirerek lazer tekrarlama frekansını çok hızlı bir şekilde değiştirebileceğimizi gösterdik. Lazer çıkışındaki güç ve darbe sürelerini uygun pompalama diyotları ve özel ızgara optik bileşenleri kullanarak THz atım üretimi ve belirlenmesini lazer kavite uzunluğunu değiştirerek optik örnekleme metodu ile yapılabileceğini gösterdik. Bu sayede THz atım şeklini daha hızlı belirleyebileceğimiz için çok kısa sürelerde gerçekleşen kimyasal/fiziksel olayları aydınlatabilecek yeni bir ölçüm tekniğinin temelini oluşturduk. Elde edilen hızlı tarama süreleri ve Yb: katkılı lazerlerin Er: katkılı lazerlere göre daha yüksek verimde çalışması sayesinde bu tip sistemler pompa/THz prob (sonda) gibi dinamik ölçüm kabiliyetine dayanan birçok deney için önemli bir yenilik kazandıracaktır.</p>
Anahtar Kelimeler:	Terahertz, zamana dayalı ölçüm teknikleri, pompa/sonda deneyi, Yb-katkılı fiber lazer sistemleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

Proje Yapılan Yayınlar:	<p>1- Development of a Rapid-Scan Fiber-Integrated Terahertz Spectrometer (Bildiri)1- Low-cost bandpass filter for terahertz applications (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>2- Self-mode-locking semiconductor disk laser (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>3- Development of a rapid-scan fiber-integrated terahertz spectrometer (Makale - Diğer Hakemli Makale),</p> <p>4- Effect of Laser Repetition Rate Stability on THz Time Domain Spectroscopy (Bildiri - Ulusal Bildiri - Poster Sunum),</p> <p>5- Effect of Laser Repetition Rate Stability on THz Time Domain Spectroscopy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</p> <p>6- Repetition Rate Tuning of an Ultrafast Ytterbium Doped Fiber Laser for Terahertz Time-Domain Spectroscopy (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum),</p> <p>7- Dispersion Management of Optically Pumped Semiconductor Disc Laser for THz Generation (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p> <p>8- Development of a Rapid-Scan Fiber-Integrated Terahertz Spectrometer (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum),</p>
-------------------------	--

TÜBİTAK