

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Cs ATOMİK SAATİNE KİLİTLİ TAŞINABİLİR OPTİK
FREKANS TARAĞI ÜRETECİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

OĞUZHAN KARA

KOCAELİ 2013

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRO-OPTİK SİSTEM MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Cs ATOMİK SAATİNE KİLİTLİ TAŞINABİLİR OPTİK
FREKANS TARAĞI ÜRETECİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ**

OĞUZHAN KARA

Doç.Dr. Özcan GÜNDOĞDU
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Arif DEMİR
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Mehmet ÖZER
Jüri Üyesi, Kültür Üniv.


.....


.....


.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 24.06.2013

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi, TÜBİTAK tarafından 15 Ocak 2010 ve 15 Ocak 2013 tarihleri arasında desteklenen “Cs Atomik Saatine Kilitli Taşınabilir Optik Frekans Tarağı Üreteci Geliştirilmesi” başlıklı ve 109T350 numaralı tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalara bursiyer olarak katılarak ve katkıda bulunarak ortaya çıkmıştır. Belirtilen süre içinde planlı olarak ilerleyen tez çalışması, Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Zaman, Frekans ve Dalgaboyu Laboratuvarı'nda başarılı bir şekilde tamamlanmış ve proje çalışması çıktılarını şahsım adına yüksek lisans tezine dönüşmüştür.

TÜBİTAK UME Zaman, Frekans ve Dalgaboyu Standartları Laboratuvarı ekibindeki araştırmacılar ve bursiyer olan şahsım adına kurulan sistemlerin tasarlanmasında, simülasyon ve teorik çalışmalarda, üretiminde ve ölçüm analizlerinde büyük bir özveri gösterilmiştir. Tez çalışmasından elde edilen veriler, TÜBİTAK'a sunulan gelişme ve sonuç raporlarında belirtilmiş ve aynı raporlardan faydalanarak bu yüksek lisans tezi yazılmıştır. Araştırmalara katılmamı sağlayan başta Doç. Dr. Ramiz Hamid olmak üzere tüm Ulusal Metroloji Enstitüsü Zaman, Frekans ve Dalgaboyu Standartları Laboratuvar çalışanları olmak üzere çalışmalardaki teşviki için Bilkent Üniversitesi Fizik Bölümü'nden Yard. Doç. Dr. Ömer İlday'a, tanıdığım ilk günden bu yana bana verdiği destek ve akıl hocalığı için Çağrı Şenel'e ve yüksek lisans eğitimim sırasındaki yardımları ve destekleri için başta Doç. Dr. Özcan Gündoğdu olmak üzere tüm Elektro-Optik Sistem Mühendisliği öğretim üyelerine teşekkür ederim.

Temmuz 2013

Oğuzhan Kara

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	iii
TABLolar DİZİNİ	v
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	2
2. Yb FİBER LAZERLERİ.....	7
2.1. Taşınabilir Yb Katkılı Tam Normal Dispersiyonlu (ANDi) Fiber Lazerinin Tasarlanması ve Kurulması	7
2.2. Frekansı Kilitli Yb Katkılı ANDi Fiber Lazerinin Tekrar Frekans Sinyalinin Faz Gürültüsü Ölçümleri ve Analizi.....	12
2.3. Frekansı Cs Atomik Saatinin 10 MHz Referans Sinyaline Kilitli Yb Katkılı ANDi Fiber Lazerinin Frekans Kararlılığının Ölçülmesi ve Allan Varyans İstatistiği ile Analiz Edilmesi.....	14
2.4. Yb Similariton Lazerinin Kurulması ve Temel Parametreleri.....	20
2.5. Spektrum gerilimli Yb Fiber Similariton Lazeri.....	22
3. Yb FİBER LAZERİ VE OPTİK YÜKSELTEÇ İLE FOTONİK FİBER KRİSTAL (PCF) ÇIKIŞINDA GENİŞ SPEKTRUMLU (SC) LAZER İŞİMASININ ÜRETİLMESİ	25
3.1. Sıkıştırılmış Lazer Darbelerini Üreten Optik Yükselteç Sistemlerinin Kurulumu ve 600 - 1800 nm Dalgaboyu Aralığındaki GenişSpektrumlu (SC) Lazer İşimasının Üretimine Uygulanması.....	25
3.2. SC İşimasının Üretimi ve Spektrumu Etkileyen Faktörler.....	29
4. Cs ATOMİK SAATİNE KİLİTLİ 33 FEMTOSANİYE Yb FİBER LAZER TARAK SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE OPTİK FREKANS METROLOJİSİNDE UYGULAMASI	35
4.1. Lazer Tarak Sisteminin Optik Tasarımı ve Kurulumu	35
4.2. Fs Optik Frekans Tarakları Üreticisinin Tekrarlama Frekansının Cs Atomik Saatine Kilitlenmesi.....	38
4.3. $\omega - 2\omega$ İnterferometrik Sistem ile "Ofset Vuru" Sinyalinin Gözlenmesi ve Frekansının Cs Atomik Saatine Kilitlenmesi.....	43
4.4. Cs Atomik Saatine Kilitli Yb Fiber Tarak ile Frekansı Stabilize Lazerin Mutlak Frekans Ölçümü	50
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
KAYNAKLAR	60
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	63
ÖZGEÇMİŞ	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Lazer darbelerinin elektrik alanının ve ilgili spektrumunun görünümü	2
Şekil 2.1. Yb katkılı fiber lazerin blok diyagramı.....	8
Şekil 2.2. Kurulan Yb katkılı fiber lazerin görüntüsü.....	9
Şekil 2.3. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin spektrumu.	10
Şekil 2.4. Yb katkılı fiber lazerin bağıl şiddet ölçüm düzeneğinin blok diyagramı.....	11
Şekil 2.5. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin bağıl şiddet oranının (RIN) spektrumu	11
Şekil 2.6. Faz ölçüm sisteminin blok diyagramı	13
Şekil 2.7. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin 1300 MHz frekans değerindeki RF sinyalinin faz gürültüsünün spektrumu	14
Şekil 2.8. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin tekraralama frekansının kilitlenmesi ve frekans kararlılığı ölçüm düzeneğinin şeması.	15
Şekil 2.9. Yb katkılı fiber lazerinin tekraralama frekansının ortalama zamana göre kararlılığı.....	18
Şekil 2.10. Cs atomik saatlerinin Yb katkılı fiber lazerlerini bulunduğu laboratuvarın görüntüsü.....	19
Şekil 2.11. Tasarlanan ve kurulan similariton lazerinin blok şeması ve fotoğrafı.....	20
Şekil 2.12. Similariton lazerinin sıfır saçılım değerinde çıkış ışınımın spektrumu	21
Şekil 2.13. Similariton lazerinin pozitif saçılım değerinde çıkış spektrumu	21
Şekil 2.14. Similariton lazeri ile elde edilen ve sıkıştırılmış 50 mW ortalama güç değerindeki lazer darbe şiddetinin zaman göre değişim sinyali.....	22
Şekil 2.15. 33 fs lazer darbeleri üretimine olanak sağlayan spektrumu gerilimli Yb fiber similariton lazerinin blok şeması.	23
Şekil 2.16. Spektrumu gerilimli similariton lazerinin kutuplayıcı küp (a) ve 50/50 bölücü (b) çıkışlarındaki spektrumları	23
Şekil 2.17. Spektrumu gerilimli similariton lazerinin PICASO algoritması ile elde edilen lazer darbe şekli.	24
Şekil 3.1. SC öncesi darbelerin evrimi.....	26
Şekil 3.2. SC ışması üretiminde kullanılan optik düzeneğin blok şeması.	26
Şekil 3.3. PCF tutucusunun fotoğrafı.....	27
Şekil 3.4. PCF sonrasında 34 mW SC ışması ve Nd:YAG lazeri arasındaki vuru sinyali	30
Şekil 3.5. Yb similariton lazer osilatörü ve gücü yükseltip sıkıştırılan lazer darbelerinin şiddetinin zaman göre değişim sinyali	32
Şekil 3.6. Yb similariton lazer osilatörü ve iki adet ön yükselteç ile elde edilen lazer ışmasının spektrumu.....	32
Şekil 3.7. SC-3.7-975 kodlu PCF'in saçılım spektrumu	33

Şekil 3.8.	(a) 95 fs lazer darbeleri ile 135 cm uzunluğundaki SC-3.7-975 kodlu PCF çıkışında farklı güçlerde ölçülen SC spektrumları ve (b) 109 mW ortalama güce sahip 95 fs lazer darbeleri ile farklı uzunluklardaki SC-3.7-975 kodlu PCF çıkışında ölçülen SC spektrumları.....	34
Şekil 4.1.	Tasarlanan ve kurulan fs tarak sisteminin optik blok diyagramı	37
Şekil 4.2.	Fs optik frekans tarakları üreticisinin veya lazer osilatörünün tekrarlama frekansının Cs atomik saatine kilitlenmesi düzeneğinin blok şeması	39
Şekil 4.3.	Fs optik frekans tarakları üreticisinin veya lazer osilatörünün tekrarlama frekansının ortalama zamana göre frekans kararlılığı.....	41
Şekil 4.4.	Yb katkılı spektrumu gerilimli similariton fiber lazerin 800 MHz frekans değerindeki RF sinyalinin faz gürültüsü spektrumu.....	42
Şekil 4.5.	Yb katkılı spektrumu gerilimli similariton fiber lazerin bağlı gürültü oranının (RIN) spektrumu.....	42
Şekil 4.6.	Spektrumu gerilimli similariton lazer osilatörünün ve optik yükselteç sisteminin spektrumları ve sıkıştırılan darbeleri	44
Şekil 4.7.	35 fs lazer darbeleri ile 30 cm uzunluğundaki SC-3.75-975 model PCF çıkışında ölçülen SC spektrumu ve simülasyon sonuçları	45
Şekil 4.8.	$\omega - 2\omega$ interferometresinin iki optik yolunda ilerleyen lazer darbe sinyallerinin zaman ölçeğindeki durumları	46
Şekil 4.9.	Koherent olmayan SC ışması ile gözlenen lazer tekrarlama sinyalinin RF spektrumu ve gürültülü $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalleri.	48
Şekil 4.10.	35 fs lazer darbeleri ile üretilen SC ışmasının tekrarlama sinyallerinin ve $\omega-2\omega$ ofset vuru sinyallerinin RF spektrumları	48
Şekil 4.11.	f_{CEO} RF sinyalinin frekansının Cs atomik saatine kilitlenmesinde kullanılan elektronik sistemin blok şeması.	49
Şekil 4.12.	f_{CEO} frekans değerindeki "ofset" RF sinyalinin Cs atomik saatine kilitlenmeden önceki ve sonraki frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi.....	50
Şekil 4.13.	Geliştirilen Yb tarak ile lazerlerin mutlak frekans ölçüm düzeneğinin blok şeması	51
Şekil 4.14.	Yb fiber tarak tarakları ve frekansı ölçülen lazer spektrumunun frekans ölçeğindeki durumu.....	52
Şekil 4.15.	Filtreden geçirilerek güçlendirilmiş Yb tarak ve Nd:YAG/I ₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyalinin spektrumu.	54
Şekil 4.16.	Yb fiber tarak ve Nd:YAG/I ₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyalinin f_{beat} frekansının zamana göre değişimi (üstteki grafik) ve Allan sapması ile yapılan kararlılık analizi (alttaki grafik).....	55

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1. Darbe genişliğine ve PCF parametrelerine bağılı olarak vuru sinyalinin genlik değışimi.....	31
--	----

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

λ	: Dalgaboyu
ω	: Frekans
φ	: Faz
σ	: Ofset vuru sinyali kararlılığı
Cs	: Sezyum (Cesium)
f	: Frekans (1/saniye)
fs	: Femtosaniye (10^{-15} saniye)
Hz	: Hertz
I	: İyot
m	: Metre
mA	: Mili Amper (10^{-3} Amper)
mK	: Mili Kelvin
mW	: Mili Watt
nm	: Nanometre
s	: Saniye
V	: Genlik
T	: Sıcaklık (Kelvin; K)
t	: zaman

Kısaltmalar

ANDi	: All Normal Dispersion (Tam Normal Dispersiyon)
CEO	: Carrier Envelope Offset (Taşıyıcı zarf sinyalinin ofseti)
CIPM	: Uluslararası Ağırlık ve Uzunluk Komitesi
DC	: Direct Current (Doğru akım)
dB	: Desibel
DRO	: Dielektrik rezonatör osilatör
ECDL	: External Cavity Diode Laser (Dış kavite diyot lazeri)
Er	: Erbiyum
PCF	: Photonic Crystal Fiber (Fotonik kristal fiber)
PPLN	: Periodically Poled Lithium Niobate
PZT	: Piezo Electric Transducer (Pizo elektrik çevirici)
rep	: Repetation rate (Tekrar frekansı)
RF	: Radyo frekans
RIN	: Relative intensity noise (Bağlı şiddet gürültüsü)
SC	: Supercontinuum (Ultra uzun)
UME	: Ulusal Metroloji Enstitüsü
Yb	: Ytterbium (İterbiyum)

CS ATOMİK SAATİNE KİLİTLİ TAŞINABİLİR OPTİK FREKANS TARAĞI ÜRETECİ SİSTEMİ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında merkez dalgaboyu 1050 nm olan 33 fs darbelere sahip Yb fiber optik frekans tarağı üreticisi tasarlanarak üretildi ve 600 – 1600 nm aralığında üretilen lazer tarakları frekansı Cs atomik saatinin referans 10 MHz frekansına kilitlendi. Yb tarak sisteminde optik osilatör olarak kullanılmak amacıyla farklı parametrelere sahip tam normal dispersiyonlu (ANDi), anormal dispersiyonlu, similariton ve spektrumu gerilimli similariton lazerleri geliştirilerek ışımının darbe genişliği, spektrumu, faz ve şiddet gürültüsü araştırıldı. Güçlendirilmiş lazer darbeleri kırınım ağı ile sıkıştırılarak analiz edildi ve daha sonra PCF içine gönderilerek 600 – 1750 nm aralığından geniş spektrumlu lazer ışınımları (supercontinuum, SC) üretildi. Burada SC ışınımın spektral genişliğini etkileyen faktörler (merkez dalgaboyu, darbe genişliği, PCF uzunluğu ve tipi, ısım polarizasyonu) araştırıldı, simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırıldı. Farklı şartlarda üretilen SC ışınımının Nd:YAG lazeri ile vuru sinyali ve $\omega - 2\omega$ optik interferometresinde algılanan “ofset” vuru sinyali ölçülerek SC spektrumunun koherentliği araştırıldı.

Anahtar Kelimeler: Femtosaniye tarak, frekans kilitlemesi, mutlak optik frekans ölçümü, optik frekans üreteç, Yb fiber lazer.

DEVELOPMENT OF MOBILE OPTICAL FREQUENCY COMB SYNTHESIZER SYSTEM LOCKED TO Cs ATOMIC CLOCK

ABSTRACT

In this thesis work, a 33 fs Yb-doped optical frequency comb with central wavelength of 1050 nm and that covers the spectral range of 600-1600 nm has been generated and stabilized to 10 MHz output of a Cs atomic clock. All-normal-dispersion (ANDi), dispersion-managed, similariton and spectrally-breathing lasers have been built to be used as the optical oscillator of the Yb-doped frequency comb and their pulse durations, spectra, relative intensity noise and phase noise have been characterized. Amplified laser pulses are compressed using diffraction gratings and coupled into photonic crystal fiber (PCF), which produces supercontinuum (SC) that covers the range of 600-1750 nm. The factors that affects the spectral bandwidth of SC (central wavelength, duration and polarization of pulses, type and length of PCF, etc.) have been investigated experimentally and compared to simulation results. The coherence properties of the generated supercontinuum have been investigated using the obtained carrier-envelope-offset beat signal and the beat signal between SC and a stabilized Nd:YAG laser.

Key Words: Femtosecond comb, frequency stabilization, absolute optical frequency measurement, optical frequency generation, Yb fiber laser.

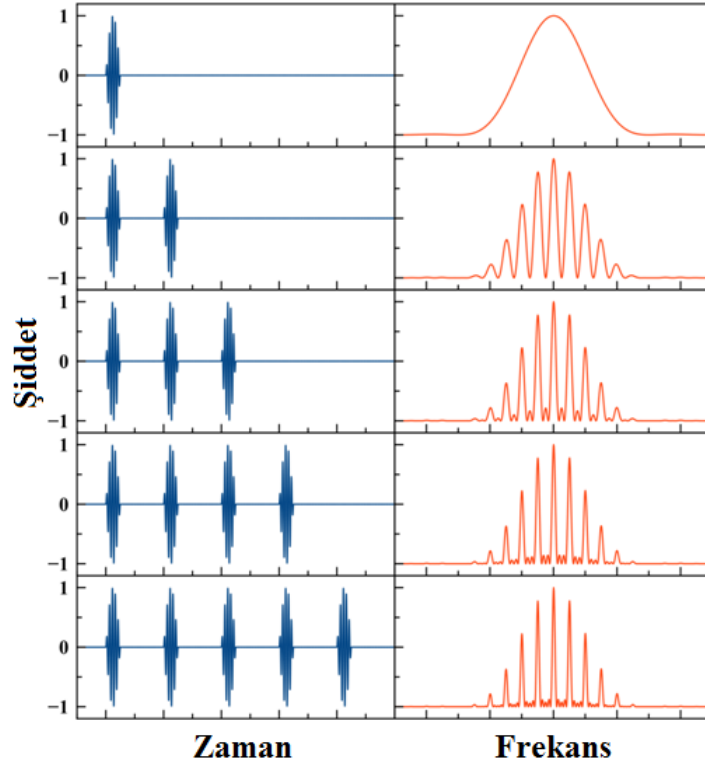
GİRİŞ

Tez çalışması kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda 33 fs darbeli ve 600 - 1600 nm aralığında çalışan Yb fiber lazer temelli lazer tarağı (COMB) geliştirilmiş ve kurulan lazer tarağının ofset ve tekrarlama frekansı Cs atomik saatinin 10 MHz referans frekansına kilitlenerek I_2 moleküllerinin enerji geçişlerine kilitli Nd:YAG lazerinin mutlak frekansının ölçümü gerçekleştirilmiştir. Kurulan bu 33 fs fiber comb sistemi en dar darbelere sahip fiber lazer tarak sistemidir. Proje kapsamında alınan sonuçların bir kısmı makale ve konferans bildirisi olarak yayınlanmıştır. Ayrıca yayına sunulmak üzere diğerk makale çalışmaları da devam etmektedir.

Kurulan Yb fiber tarak sistemi genel olarak fiber lazerden, fiber lazer yükselteçten, lazer darbe sıkıştırıcıdan, geniş lazer spektrumunu üreten fotonik fiber kristalinden, lazer ofset frekansın kilitlenmesinde kullanılan interferometreden, lazer frekansının Cs saatine kilitlenmesinde kullanılan elektronik servo sistemden ve sabit frekanslı lazerlerin frekansını ölçen alt sistemlerden oluşmaktadır.

1. GENEL BİLGİLER

Son on yılda femtosaniye lazer tarak üreticileri yoğun bir şekilde araştırılmakta olup optik frekans ve boyutsal metrolojisinde, lazer spektroskopide, düşük gürültülü optik osilatör uygulamalarında çok önemli bilimsel ve teknolojik gelişmelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. 2005 yılında John L. Hall ve Theodor Hänsch lazer tarak teknolojisinin geliştirilmesi ve yüksek çözünürlüğe sahip spektroskopi uygulamalarını da içeren çalışmalarından dolayı Nobel Fizik Ödülü'nü almaları lazer tarak konusunun önemini bir daha vurgulamış ve son on yılda lazer tarak konusundaki gelişmeler [1] tarafından yayınlanmıştır. Uygulama ihtiyaçlarına bağlı olarak farklı spektral aralıklarda, lazer tarakları üretilmekte ve araştırılmaktadır.



Şekil 1.1. Lazer darbelerinin elektrik alanının ve ilgili spektrumunun görünümü.

Lazer tarak sisteminin temel olarak çalışma prensibi, Şekil 1.1'de gösterildiği gibi lazer belirli aralıklarla darbeler üretmektedir. Şeklin sol tarafında lazer ışınının elektrik alanının zamana göre değişimi, sağ tarafında ise ilgili darbe paketlerinin frekansa göre değişimi gösterilmiştir. Örneğin, Ti:Sa femtosaniye lazeri 10 fs genişliğinde 10 ns aralıklarla darbeler üretmektedir. Bu darbelerin frekans ölçeğinde Fourier dönüşümünü aldığımızda lazer spektrum taraklar şeklinde üretildiği gözlenmektedir. Lazer taraklarının arasındaki frekans farkı, f_{rep} tekrarlama frekansı, taraklar kümesinin sıfır frekanstan farkı ise "offset" frekansı f_{CEO} olarak bilinmektedir [2]. Bu durumda f_n frekans değerindeki lazer tarak taraklarının frekansı aşağıdaki denklemdeki gibi ifade edilmektedir;

$$f_n = f_{CEO} + (n \times f_{rep}) \quad (1.1)$$

Lazer tarakları arasındaki f_{rep} frekans farkının ve f_{CEO} "offset" frekansının çok kararlı ve bilinen referans frekansa, örneğin, 1×10^{-14} civarında standart sapma hassasiyetine ve uzun dönem kararlılığına sahip Cs saatinin 10 MHz referans frekansına kilitlenmesi sağlandığında gerçek lazer tarak sistemi kurulmuş olur. Bu durumda femtosaniye Ti:Sa tarak örneğinde olduğu gibi 550 nm - 1100 nm spektral aralığında 1 GHz farkla yaklaşık 10 milyon adet çok kararlı lazer ışınları üretilmiş olur. Bu dalgaboyu aralığında çalışan ve frekansı atom ve moleküllerin enerji geçişlerine kilitli CW lazerin f_0 frekansını ölçmek için bu lazer ışınımı ve tarak lazer ışınımı hızlı detektörde bir araya getirilerek ilgili n_0 tarak ile arasındaki Δf frekans farkı ölçülür ve lazer frekansı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$f_0 = f_{CEO} + (n_0 \times f_{rep}) \pm \Delta f \quad (1.2)$$

Lazer parametresine bağlı olarak f_n frekans değerlerindeki sinyalin genliği, koherentliği, sinyalin gürültüye oranı ciddi bir şekilde değişmektedir. Frekansı stabilize edilmiş fs lazer tarak üretmek ve frekans metrolojisinde uygulamak için öncelikli iki koşulun yerine getirilmesi gereklidir [3]:

İlk koşul; darbeleri lazer ışınının spektrumu fotonik fiber kristali veya başka doğrusal olmayan maddenin kullanımıyla dalga boyunun iki katından fazla olan yeterli $\Delta\lambda$ seviyeye kadar genişletilmelidir ($\Delta\lambda > 2\lambda - \lambda$).

İkinci koşul ise; yeterli seviyede üretilen spektrum CW lazerlerle 20 dB üzerinde vuru sinyalinin gözlenebileceği kadar koherent, düşük gürültülü ve güçlü olmalıdır. En önemlisi ise bu yeterli parametrelere sahip spektrumun düşük frekanslı ışımalarının ikinci harmoniği ile yüksek frekanslı ışımaları $\omega-2\omega$ interferometresinde ve hızlı detektörde bir araya getirilerek 20 dB'den yüksek f_{CEO} vuru sinyali elde edilmelidir [4].

Birinci koşula sahip ve yeterli koherentliği olmayan geniş spektrumlu ışımalarının üretilmesi konusunda literatürde çok sayıda yayın mevcuttur. Ancak lazer tarak üretimi için önemli olan her iki koşula sahip ve koherent geniş spektrumlu ışımalarının üretimi konusunda bir önceki duruma göre az sayıda yayın vardır. Tekrarlama frekansı kilitli lazer taraklarının çok önceden üretilmesine rağmen ilk defa yeterli geniş spektrumun üretimi ve hem tekrarlama frekansının hem de ofset frekansının kilitlendiği stabilize femtosaniye lazer tarak üretimi 2000 yılında J. Hall ve T.Hansch'ın gruplarının ortak çalışmasında gösterilmiştir [5]. Bu çalışmada merkez dalgaboyu 800 nm olan Ti:Sa lazeri ve fotonik fiber kristalinin (PCF) kullanımı ile 500 – 1200 nm dalgaboyu aralığında (> 300 THz) lazer tarakları üretilmiş, tekrarlama ve “ofset” frekansları kilitlenmiştir . PCF ve diğer doğrusal olmayan kristal ile koherent geniş spektrumun üretimi için dar lazer darbelerinin üretimi ve kullanımı çok önemlidir. 2000 – 2006 yılları arasında Ti:Sa (800nm, 10-50fs), Cr:LiSAF (894 nm, 50 fs) ve Cr:forsterite (1275 nm, 30 fs) katı hal lazerlerin kullanım ile fs tarak üreteçleri kurulmuş ve optik frekans metrolojisinde uygulanmıştır [6]. Ancak bu lazer sistemlerinin mekanik titreşimlerden ve sıcaklık değişimlerinden ciddi bir şekilde etkilenmekte olduğu, kullanımı için sıcaklık ve titreşim kontrollü ortam şartlarının gerektiği, uzun süreli (> 1 saat) ölçümlerin yapılmasının zor olduğu ve sürekli opto-mekanik ayarların gerektiği bilinmektedir [7]. Bu durumlar yukarıdaki katı hal tarak lazerlerini CW lazerlerin mutlak frekans ölçüm uygulamaları açısından sınırlamıştır. Bu sınırlamalar uzun süreli (> 3 saat) kararlı çalışabilecek lazer tarak arayışlarını tetiklemiştir. 2003 – 2010 yılları arasında merkez dalgaboyları 1560 nm olan Er:fiber [8,9] ve Er:Yb:glass [10] lazer temelli ve 80 – 200 fs aralığında darbelere sahip tarak sistemleri geliştirilmiştir. Günümüzde 1.5 μm merkez dalgaboylu Er fiber tarak sistemleri bir çok metroloji laboratuvarlarında yaygın olarak kullanılmakta olup, uygulama açısından Ti:Sa taraklara göre çok daha

kararlı performans sergilemekte ve günlerce ayarı bozulmadan çalışabilmektedir. Merkez dalgaboyu 1 μm olan Yb fiber lazerlerinin tarak uygulamaları ile ilgili araştırmalar 2008 yılında başlamış olup koherent spektrum üretimi ve lazer parametrelerinin araştırılması yönünde devam etmiştir [11,12,13]. Bu çalışmalarda lazer darbe genişliği 70 – 170 fs arasında değişmekte olup doğrudan frekans metroloji uygulaması henüz yapılmamıştır.

Tez çalışmasının amacına uygun olarak, darbe genişliği 33 fs değerinde ve merkez dalgaboyu 1 μm olan Yb fiber lazer tarak sistemi tasarlanarak kuruldu ve optik frekans metrolojisinde kullanılabilir hale getirildi. Tez çalışması kapsamında yapılan çalışmalar ve elde sonuçlar aşağıdaki 3 kısımda belirtilecektir:

İlk kısımda tez çalışması süresince tasarlanan 6 adet fiber lazer osilatörü ile ilgili bilgiler sunulacaktır. Bu lazerlerin tasarımları ve parametreleri ile bilgi sunulurken lazerlerin spektrumları ve darbe genişlikleri simülasyon sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılacaktır. Serbest çalışan lazer ışmasının genlik, frekans ve faz sakinimleri ölçüldü ve analiz edildi. Kurulan darbeli lazerlerin tekrarlama frekansları hem kısa dönem kararlılığı yüksek DRO osilatörün referans frekansına hem de uzun dönem kararlılığı yüksek olan Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyaline kilitlendi. Bölümün sonunda geliştirilen fiber lazerlerinin Yb femtosaniye lazer tarak için uygun olabilecek lazer uygulaması yönünde tartışmalar sunulacaktır.

İkinci kısımda, tasarlanan lazer ve yükselteç sistemleri sunulacaktır. Farklı yükselteç sistemleri ile elde edilen lazer darbelerinin spektrumları gösterilecek ve ortalama ısınım güçleri hakkında bilgi verilecektir. Güçlendirilmiş lazer darbeleri kırınım ağı ile sıkıştırılarak analiz edilmiş ve daha sonra fotonik fiber kristal (PCF) içine gönderilerek geniş spektrumlu lazer ısınımı (supercontinuum, SC) üretilmiştir. Üretilen SC ısınımını etkileyen faktörlerle (merkez dalgaboyu, darbe genişliği, PCF uzunluğu ve modeli, ısınım polarizasyonu) ilgili araştırma sonuçları sunulacaktır. Lazer tarak için gerekli olan koherent lazer ısınımının üretiminin en önemli şart olduğu tartışılacak ve sergilenecektir.

Son kısımda tasarlanan ve kurulan fs Yb fiber tarak sistemi sunulacaktır. Lazer – yükselteç – darbe sıkıştırıcı – PCF ve ω - 2ω interferometre sistemi anlatılacak ve bu sistem ile üretilen SC ışmasının spektrumu, f_{ceo} frekansındaki “ofset” sinyalini ve

lazer tekrarlama frekansındaki sinyalleri içeren RF spektrumu sonuçları verilecektir. Kurulan elektronik sistemle her iki “ofset” ve tekrarlama sinyalinin frekansının Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyal frekansına kilitlenmesi gösterilerek kurulmuş fs tarak sistemi sergilenecektir. Bölümün sonunda I2 moleküllerinin enerji geçişine kilitli Nd:YAG/I₂ lazerinin mutlak frekansının tez çalışması kapsamında kurulan tarak ile ölçüm sonucu verilerek geliştirilen sistemin optik frekans metrolojisinde uygulanması gösterilecek ve uluslar arası verilerle karşılaştırması sağlanacaktır.

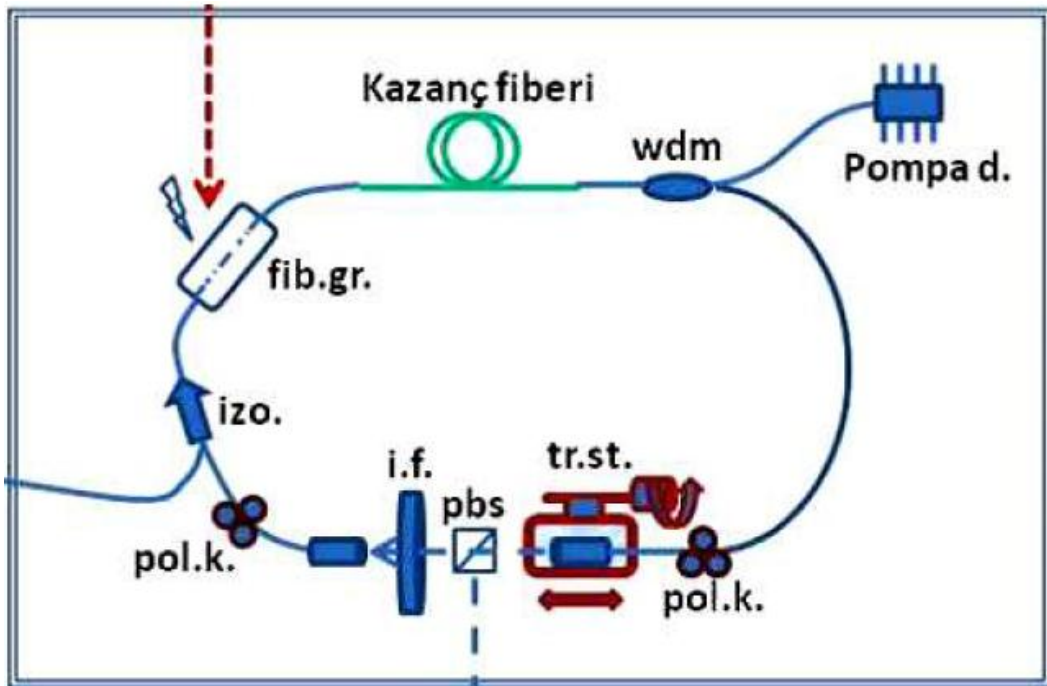
2. Yb FİBER LAZERLERİ

Bu bölümde tez çalışması kapsamında tasarlanan ve kurulan lazerler ile ilgili sonuçlar sunulacaktır. İlk olarak Yb katkılı tam normal dispersiyonlu lazer anlatılacak ve bu lazerin çalışma prensibinin kolayca algılanabilmesi adına spektral ölçüm sonucu, ışınım şiddeti ve faz gürültüsü analizleri, lazer frekansının referans osilatör frekansına ve Cs atomik saatine kilitlenmesi teknikleri ve sonuçları hakkında bilgi verilecektir. Devam eden kısımlarda ise geliştirilen diğer lazerlerle ilgili önemli detay ve sonuçlar paylaşılacaktır.

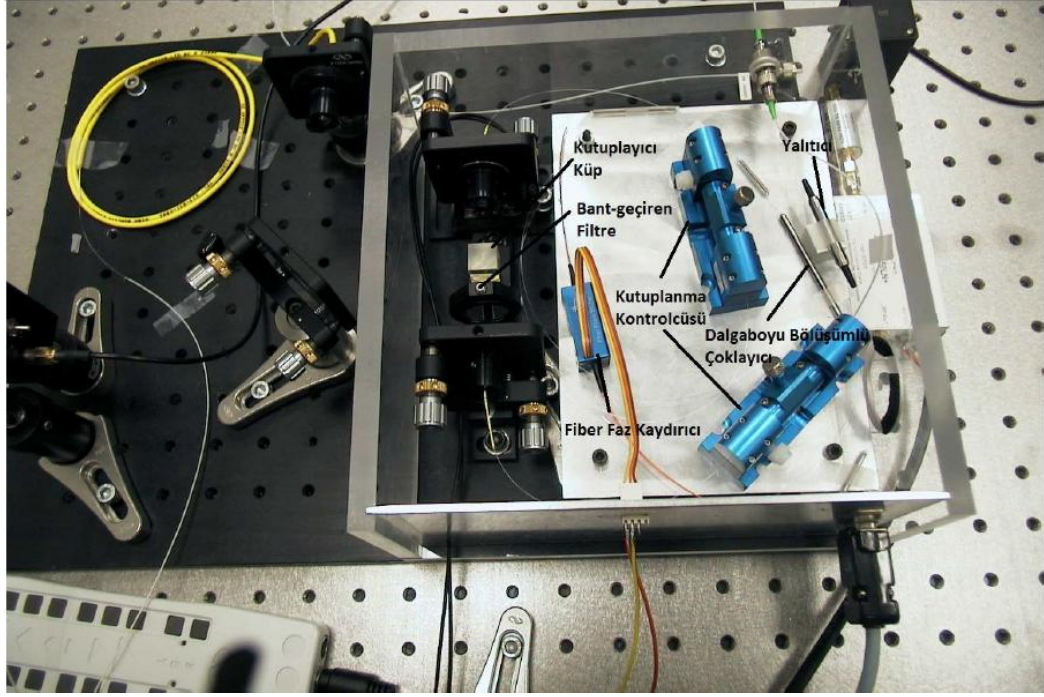
2.1. Taşınabilir Yb Katkılı Tam Normal Dispersiyonlu (ANDi) Fiber Lazerinin Tasarlanması ve Kurulması

Tasarlanan Yb katkılı ANDi lazerinin blok diyagramı ve görüntüsü sırasıyla Şekil 2.1 ve şekil 2.2'de verilmiştir. Lazerin pompa kaynağı olarak 976 nm dalgaboyunda çalışan Oclaro LC96AA76-20R model lazer diyot kullanıldı. Lazer diyot, Thorlabs LM14S2 tutucusuna montaj edilerek sıcaklığı 25 °C dereceye ayarlandı ve 0.1 °C 'den daha az belirsizlikle stabilize edildi. Jenerasyon eşik (threshold) akımı 39 mA olan diyot lazerinin akımı, 1 A değerine kadar ayarlanabilmekte olup, 850 - 950 mA akım değişiminde lazer çıkış gücü 550 - 600 mW arasında değişmekteydi. Lazer diyotunun sıcaklık stabilizasyonu ve akım beslemesi Thorlabs ITC 510 model akım kaynağı kullanılarak sağlandı. Fiber kablolu çıkış pompa diyot lazerinden elde edilen 976 nm dalgaboyundaki ışınım, dalgaboyu bölme çoklayıcısının (WDM) 976 nm kolundan geçerek, uzunluğu yaklaşık 25 cm olan Yb katkılı kazanç fiberinde ilerlerken kısmen soğuruldu. Bu soğurum sonucunda E_1 temel enerji seviyesinden E_3 üst seviyesine uyarılan Yb elementinin atomları, E_2 meta-kararlı enerji seviyesine geçiş yapar. Daha sonra E_2 seviyesinden geri temel seviyeye dönüş yapan atomlar Yb katkılı fiberin her iki yöne de merkez dalgaboyu 1030 nm olacak şekilde ışınım yapmasını sağlar. Sistemde bulunan optik izolatör, ışığın yönünü Şekil 2.1'de görüldüğü gibi pompa ışığının yönüne zıt olacak şekilde tayin etmektedir. Yb katkılı fiberden çıkan 1030 nm merkez dalgaboylu ışık, tek kipli fiberde ilerleyerek yoluna

devam eder ve ilk kolimatörden hava ortamına çıkar. Hava ortamında bulunankutuplayıcı ışın küpü (PBS) ve hava ortamından önce ve sonra bulunan, fiberlere mekanik baskı uygulayarak ışığın kutuplanmasını sağlayan polarizasyon kontrolcüsü (FPC-100), uygun kutuplanma kombinasyonunu sağlayarak doyurulabilir soğurgan görevi görür. Doyurulabilir soğurgan, ilgili optik modlar dışındaki modları filtreleyerek ışınının gürültüden bir atıma dönüşmesini sağlayan osilatörün temel bileşenidir ve pasif olarak lazerlerin atımlı çalışmasını sağlar. Işık, hava ortamını terk etmeden önce girişim filtresinden geçer. Burada osilatör boyunca normal dispersiyona maruz kalarak zaman uzayında genişletilmiş atımlar filtrelenerek uç frekans değerleri soğurular ve atımlara, osilatörün fiberlerinin etki ettiğinin tersi yönde (negatif) dispersiyon gerçekleşir. Böylece toplam osilatör dispersiyon değeri her yeni turda dengelenir ve lazer atımlarının modüler yapısı kararlı bir şekilde oluşturulur. Hava ortamından sonra tekrar tek kipli fiberde ilerlemeye başlayan atım basınç (piezo) eleman içeren fiber gericiden (fiber phase shifter) geçerek tekrar kazanç Yb fiberine ulaşır.

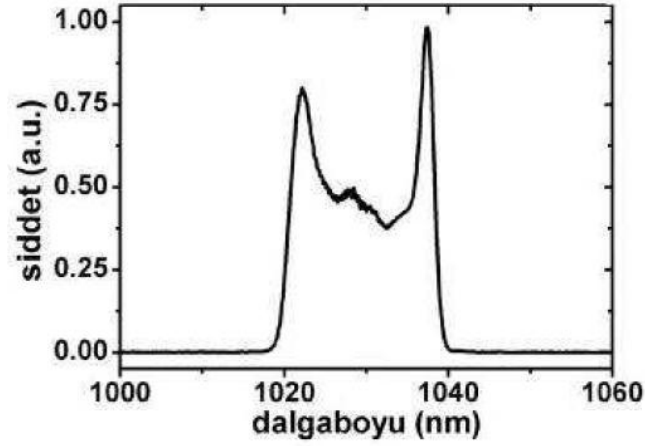


Şekil 2.1. Yb katkılı fiber lazerin blok diyagramı (wdm: dalgaboyu çoklayıcı, fib. gr.: fiber gerici, izo.: optik izolatör, pol.k.: polarizasyon kontrolcüsü, i.f.: şiddet filtresi, pbs: kutuplayıcı ışın küpü, tr.st.:hareketli platform).



Şekil 2.2. Kurulan Yb katkılı fiber lazerin görüntüsü.

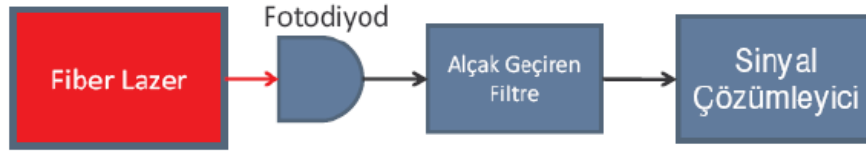
Lazer rezonatör optik uzunluğu hava boşluğu da dikkate alındığında yaklaşık 277 cm'dir. Bu küçük boylu rezonatöre sahip lazerin çıkış demetindeki atımlarının tekrarlama frekansı (f_{rep}) yaklaşık 108 MHz olarak ölçüldü. Bu lazeri tasarlarken amacımız, lazerin frekans kararlılığını, faz gürültüsünü ve şiddet gürültüsünü kurulan benzer lazerlere göre olumsuz yönde etkilemeden, mümkün oldukça yüksek tekrarlama frekansına sahip lazer üretmek oldu. Çünkü, bu lazer, osilatör olarak optik frekans tarağında kullanılacak ve yüksek tekrarlama frekansı mod başına düşen spektral gücün artmasına katkı sağlayacaktır. Dolayısı ile frekansını ölçmek istediğimiz lazer ile frekans tarağına sahip Yb katkılı fiber lazerin vuru (beat) sinyalinin artmasına yol açacaktır. Kurulan lazerin biri hava ortamında bulunan kutuplayıcı ışın küpü (PBS), diğeri ise optik izolatörün bölücü fiberi olmak üzere iki çıkışı mevcuttur. Fiber lazere yaklaşık 400 mW pompa gücü verildiğinde kutuplayıcı küp çıkışından 66 mW, fiber çıkışından ise 0.4 mW güçlerinde lazer ışınımları elde edildi. Lazer atımlarının darbe aralığı 9.25 ns, darbe kalınlığı ise 2 pikosaniyeden küçüktür. Lazer darbelerinin genişliği kırınım açısından oluşan sıkıştırma sistemi ile 150 femtosaniye değerine kadar azaldığı ölçüldü. Deney sırasında lazer üretimi ve ışınım spektrumu, optik spektrum analizör ile analiz edildi. Optik spektrum analizör ile elde edilen tipik lazer spektrumu Şekil 2.3'de verildi. Kurulan lazer ışınımlarının merkez dalgaboyu 1030 nm olup spektral kalınlığı ise yaklaşık 20 nm olarak ölçüldü.



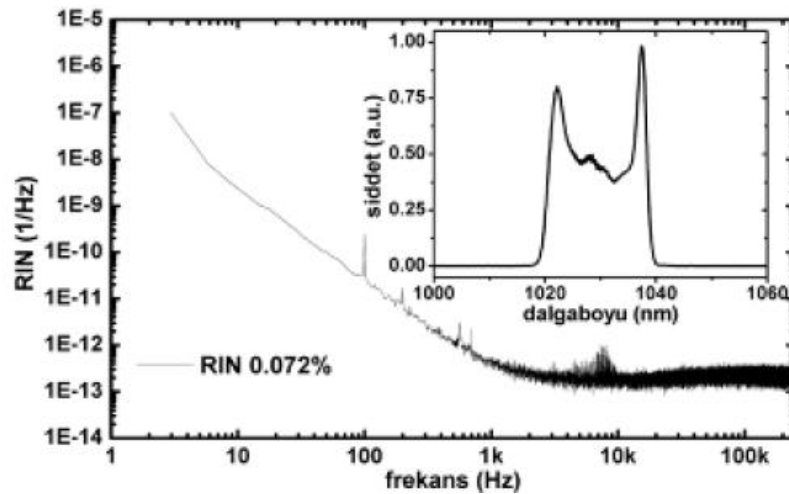
Şekil 2.3. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin spektrumu.

Bizim ışınım şiddeti ve bir sonraki bölümdeki faz gürültü ölçümlerdeki amacımız tez çalışması kapsamında kurulan lazeri karakterize etmek ve parametrelerini en optimum değerlere uygun ayarlamak oldu. Lazerin bağıl şiddet ölçüm düzeneğinin blok diyagramı Şekil 2.4'de verilmiştir. Lazerin kutuplayıcı ışın küpünden (PBS) veya optik izalotörün bölücü fiberinden çıkan ışınım demeti 5 ns yükselme süresine (rise time) sahip düşük gürültülü fotodetektörde algılanmıştır. Fotodetektör çıkışında algılanan sinyal hem DC hem de AC sinyalleri içermektedir. DC sinyali lazer demetinin çıkış gücü ile orantılıdır. AC sinyaller ise lazer ışınım şiddetindeki düşük frekanslı salınımları ve lazerin tekrarlama frekansına (108 MHz) ve harmoniklerine uygun gelen RF sinyallerini içermektedir. Zaman ölçeğinde bakıldığında lazer atımlarının genlikleri veya şiddetleri sabit kalmayıp lazer parametrelerindeki değişimlerden dolayı salınım yaparlar. Bu salınımların analizini frekans ölçeğinde teknik olarak yapmak daha kolay olmaktadır. Deneylerde fotodetektör çıkışında DC sinyali dahil olmak kaydıyla üst frekansı tekrar frekansının altında olan alçak geçirgen filtre kullanıldığında lazer parametrelerindeki değişimlerden dolayı salınım yaparlar. Bu salınımların analizini frekans ölçeğinde teknik olarak yapmak daha kolay olmaktadır. Deneylerde fotodetektör çıkışında DC sinyali dahil olmak kaydıyla üst frekansı tekrar frekansının altında olan alçak geçirgen filtre kullanıldığında lazer ışınım şiddeti ($P = P_{DC} + P_{AC}$) ile orantılı sinyal ölçmüş oluruz. Bu frekans aralığında DC sinyalini filtrelediğimizde ise lazer ışınım şiddeti gürültüsü (P_{AC}) ile orantılı sinyal ölçmüş oluruz. Gürültü sinyalinin gücünün toplam güce oranı literatürde bağıl gürültü oranı (relative intensity noise, RIN) olarak bilinmektedir ($RIN = P_{AC}/P$).

Genelde ve bizim kurduğumuz lazerde ışınım şiddeti gürültüsünün spektral dağılımı lazerin tekrarlama frekansının (108 MHz) çok altında olduğundan ve bu aralıkta yoğunlaştığından, bu çalışmada ölçümler $0 < \Delta\omega < 250$ kHz aralığında yapılmıştır. Fotodetektörden üretilen RF sinyali 1.9 MHz'lik bir alt-geçiren filtre ile filtrelenerek sinyal çözümleyicisine (Rohde & Schwarz Audio Analyzer UPV) gönderildi. Sinyal çözümleyicisi DC - 250 kHz aralığında çalışan, temel olarak bir Fourier dönüşümü sağlayan bir cihazdır. Yaklaşık 70 mW çıkış gücüne sahip lazerin bağıl gürültü oranı (RIN) 0.072% olarak ölçüldü. Lazer şiddet gürültüsünün 3 Hz - 250 kHz frekans aralığında ölçülen spektrumu ve 1 Hz bant aralıklarına karşılık gelen RIN değerleri Şekil 2.5'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi gürültü esas olarak 1 kHz frekans değerinden küçük bölgede etkindir. 100 Hz değerindeki tepe ise daha çok şebeke gürültüsünün etkisidir. Elde edilen sonuçlar konu ile ilgili literatürdeki sonuçlarla örtüştüğü görüldü [14,15,16]. Ayrıca fiber lazerin RIN değeri gaz lazerlere göre çok düşük olup diyot lazer değerleri ile aynı mertebededir [17]. Örneğin He-Ne lazerlerinde RIN değerleri 1% - 0.1% arasında olup, diyot lazerlerde 0.1% - 0.01% arasındadır.



Şekil 2.4. Yb katkılı fiber lazerin bağıl şiddet ölçüm düzeneğinin blok diyagramı.



Şekil 2.5. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin bağıl şiddet oranının (RIN) spektrumu.

2.2. Frekansı Kilitli Yb Katkılı ANDi Fiber Lazerinin Tekrar Frekans Sinyalinin Faz Gürültüsü Ölçümleri ve Analizi

Bu tez çalışmasının temel amaçlarından biri frekansı kilitli optik osilatör üretmektir. Burada üretilmesi planlanan Yb katkılı fiber lazer osilatörünün daha sonra spektrumunu genişleterek ve tekrarlama frekansını Cs atomik saatin referans frekansına kilitleyerek diğer lazerlerin frekans ölçümüne uygulanması amaçlanmaktadır. Bilindiği gibi ideal osilatörün temiz sinüzoidal sinyali aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

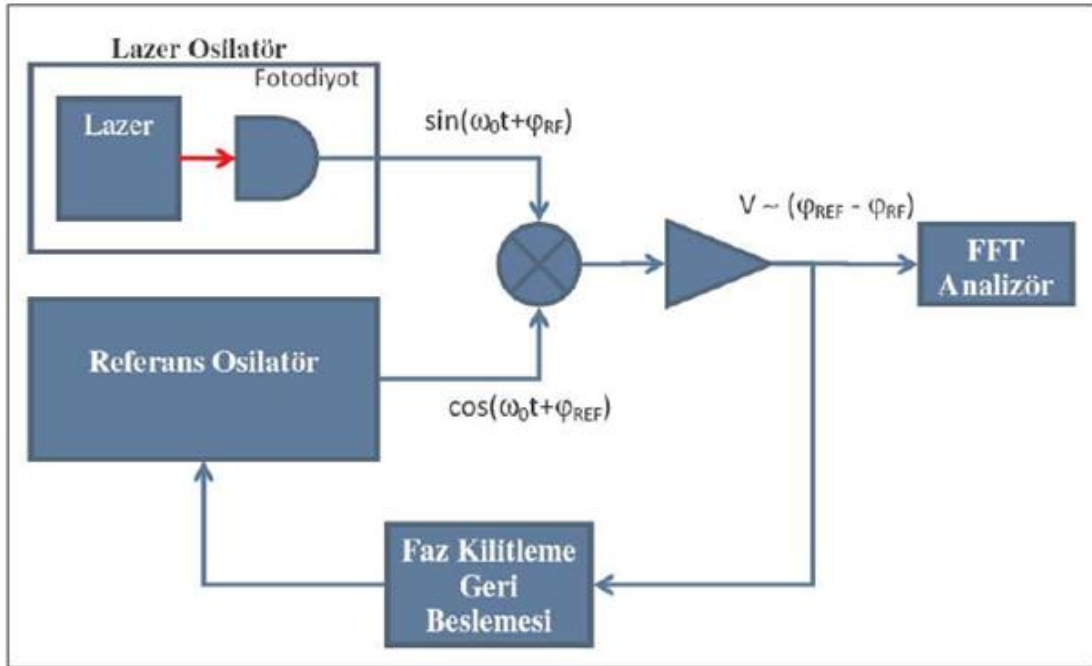
$$V(t) = V_0 \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (2.1)$$

Burada V_0 sinyalin genliği, ω_0 frekansı, φ ise fazıdır. Gerçek ortamlarda ise osilatörlerin sinyalinin parametreleri sabit kalmayıp hem genlikleri hem de faz değerleri zaman içinde değişim göstermektedir. Bu osilatörlerin çıkış sinyalini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$V(t) = V_0 [1 + \alpha(t)] \cos[\omega_0 t + \varphi(t)]; \quad |\alpha(t)| \ll 1, |\varphi(t)| \ll 1 \quad (2.2)$$

Laboratuvar şartlarında çalışan kaliteli osilatörlerin genlik değişimleri $10^{-3} - 10^{-6}$ aralığındadır. Bir önceki bölümde biz lazerin genlik değişimleri ile ilgili sonuçları sunduk. Bu bölümde ise lazer osilatörünün RF sinyalinin $\varphi(t)$ faz değişimleri ile ilgili sonuçları sunulacaktır. Faz ölçüm sisteminin blok diyagramı Şekil 2.6'da verilmiştir. Lazer çıkış demeti fotodiyot ile algılanarak ve filtreden geçirilerek tekrarlama frekansının 12. harmoniği olan $\omega_0=1300$ MHz frekans değerinde RF sinyali elde edilir. Bu $A_{RF}\sin(\omega_0 t + \varphi_{RF})$ RF sinyali referans osilatörün ω_0 frekansındaki ve fazı 90° derece kaydırılmış $A_{REF}\cos(\omega_0 t + \varphi_{REF})$ sinyali ile doğrusal olmayan elementte (mixer) çarpılır ve sinyallerin faz farkı $V \sim (\varphi_{REF} - \varphi_{RF})$ ile orantılı sinyal elde edilir. Bu sinyalin zaman ölçeğinde salınımı RF osilatörün faz gürültüsü hakkında bilgi verir. Faz farkı sinyalinin frekans ölçeğinde analizi ise RF sinyalinin referans sinyaline kıyasla faz gürültüsü taşıyıcı frekanstan sapma frekansının bir fonksiyonu olarak FFT analizör ile araştırılır. Ölçümler sırasında RF sinyali ile referans sinyalin frekansının eşit ve faz farkının 90° tutulması için ayrıca faz kilitlemesi geri besleme sistemi kullanılır. Deneysel ölçümlerde Electro- Optics Technology firmasının ET3500 model 12 GHz bantlı fotodiyodu ve Rohde&Schwars

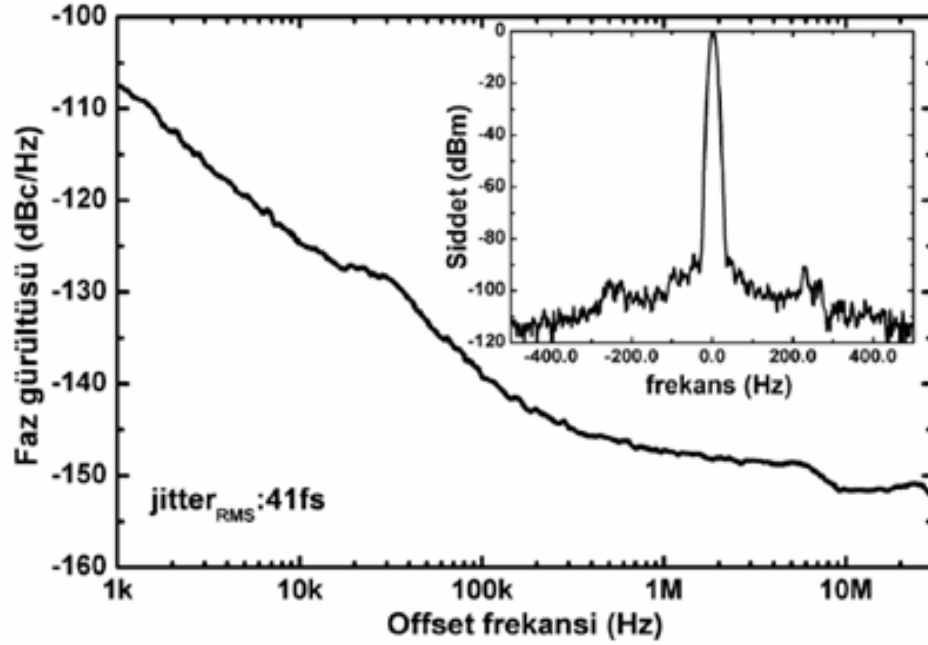
firmasının FSUP26 sinyal kaynağı analizörü kullanıldı. Lazerin 1300 MHz frekans değerindeki RF sinyalinin faz gürültüsünün spektrumu Şekil 2.7’de verilmiştir. Ölçümler 1 kHz – 30 MHz frekans aralığında yapıldı. Bu frekans aralığı, lazer RF sinyalinin veya lazer spektral atımlarının 30 ns – 1 ms aralığında faz salınımlarının incelenmesi anlamına gelmektedir. Frekans aralığının üst limitini lazer frekans tekrarlama frekansının yarısı olan 54 MHz degeri ve sinyal faz gürültü analizlerinde önemli olan Nyquist kriteri belirlendi. Lazerin faz gürültü ölçümleri sırasında lazer tekrarlama frekansı, DRO osilatörünün 1300 MHz çıkış sinyaline faz geri besleme tekniği ile kilitlendi. Bunun için lazer RF sinyali ile DRO RF sinyali mikserde karşılaştırıldı ve elde edilen fark sinyali güçlendirilerek, geri besleme hata sinyali PID kontrolcü üzerinden lazerin faz kaydırıcı PZT elemanına verildi. Bu yöntemle lazer tekrarlama frekansının 12. harmonik değeri olan 1300 MHz, DRO osilatörünün 1300 MHz değerine otomatik ayarlanarak kilitlendi.



Şekil 2.6. Faz ölçüm sisteminin blok diyagramı.

Şekilden gözüktüğü gibi faz gürültüsü 1 kHz değerinde -103 dBc/Hz iken frekans arttıkça azalmakta ve 30 MHz değerinde ölçüm sisteminin gürültü tabanına yaklaşmaktadır. Lazer RF sinyalinin spektrumu şekil 2.7’de yerleştirilmiş panoda verilmiştir. Görüldüğü gibi sinyal seviyesi gürültü tabanına göre 100 dB’den fazladır. Lazer atımları yaklaşık 9.25 ns aralıklarla (108 MHz) üretilmektedir. Yapılan faz

gürültüsü sonuçlarını analiz ettiğimizde araştırılan zaman aralığında atımların zaman kayması 41 fs olarak hesaplandı. Bu sonuç şekil 2.7’de verilmiş olan faz gürültü grafiğinin integralinin alınarak taşıyıcı frekansa bölünmesi ile elde edilir.



Şekil 2.7. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin 1300 MHz frekans değerindeki RF sinyalinin faz gürültüsünün spektrumu.

2.3. Frekansı Cs Atomik Saatinin 10 MHz Referans Sinyaline Kilitli Yb Katkılı ANDi Fiber Lazerinin Frekans Kararlılığının Ölçülmesi ve Allan Varyans İstatistiği ile Analiz Edilmesi

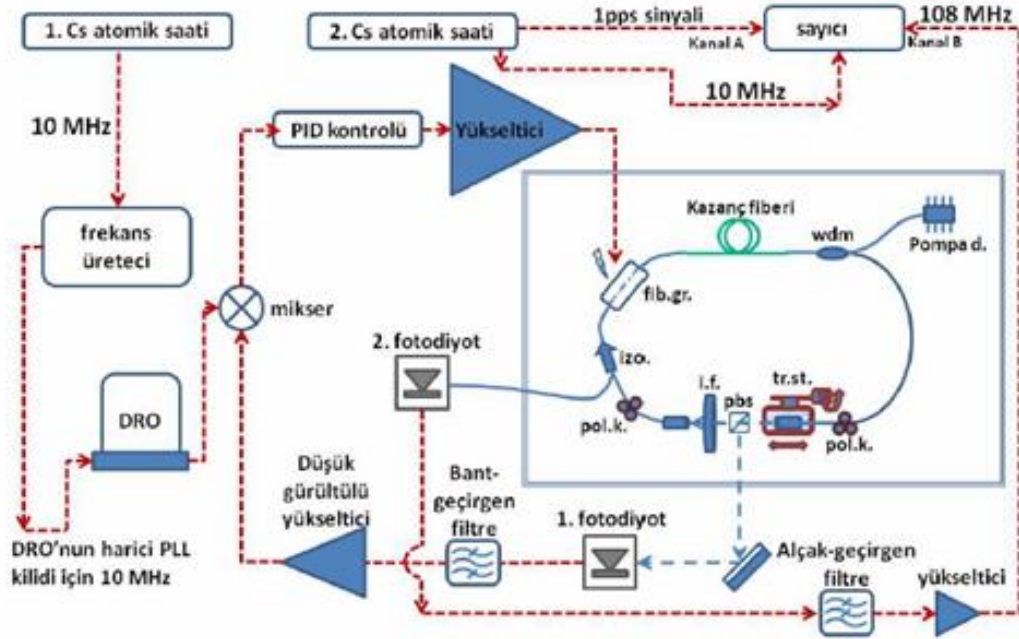
Genelde kısa zaman aralıklarında lazer veya RF osilatör frekansının $\varphi(t)$ fazı $(-\pi, +\pi)$ arasında değişmektedir ve (2.2) formülü çıkış sinyalinin açıklanması için yeterli olmaktadır. Kararlı olmayan osilatörlerde, örneğin serbest çalışan lazerlerde uzun zaman aralığında faz kayması yarım periyottan fazla olabilir ve bu durumda $\Delta\omega$ frekans değişimlerinin analizi de önemli olur. Bu şartlar altında (2.2) formülü aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$V(t) = V_0[1 + \alpha(t)]\cos[\omega_0 + \int (\Delta\omega)(t)d(t)] \quad (2.3)$$

Biz bu tez çalışmasında 30 ns – 1 ms zaman aralığında lazerin tekrarlama RF sinyalinin faz salınımını inceledik ve bu sonuçları bölüm 2.2’de faz gürültüsü

ölçümleri olarak sunduk. Bu bölümde ise RF sinyalinin 1 s – 10000 s ortalama zaman aralığında frekans kararlılığını Allan sapma istatistiği ile analiz edeceğiz. Çok kısaca değinmek gerekirse bu istatistiksel analizde, standart sapma analizinden farklı olarak iki komşu frekans değerleri arasındaki fark analiz edilmektedir. Bu analiz sonucunda RF sinyalinin frekans salınımindaki beyaz gürültü, fliker veya frekans kaymaları hakkında bilgi elde edilebilir [18].

Serbest çalışan lazerlerde RF sinyalinin faz kaymaları çok yüksek olduğundan ($>2\pi$) doğrudan frekans ölçüm metodu uygulanırken, frekansı stabilize edilmiş lazerin RF sinyalinin frekans kararlılığı faz kaymasının ölçümü kullanılarak yapıldı. Yb katkılı fiber lazerinin tekrarlama frekansının Cs atomik saatinin 10 MHz referans çıkışına kilitlemesi ve lazer tekrarlama frekansının kararlılığının analizi için kurulan deney düzeneğinin blok şeması Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8. Yb katkılı ANDi fiber lazerinin tekrarlama frekansının kilitlemesi ve frekans kararlılığı ölçüm düzeneğinin blok şeması.

Lazerin tekrarlama frekansının Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyaline kilitlemesi DRO osilatörünün 1300 MHz frekans değerindeki sinyali üzerinden sağlanmıştır. Birinci fotodiyot çıkışındaki RF sinyali 1300 MHz bant geçirgen filtreden geçirilerek lazer tekrarlama frekansının 12. harmonisindeki sinyal elde edilmiştir. Bu harmoniğin seçimi mevcut DRO osilatörün çıkış sinyalinin frekans

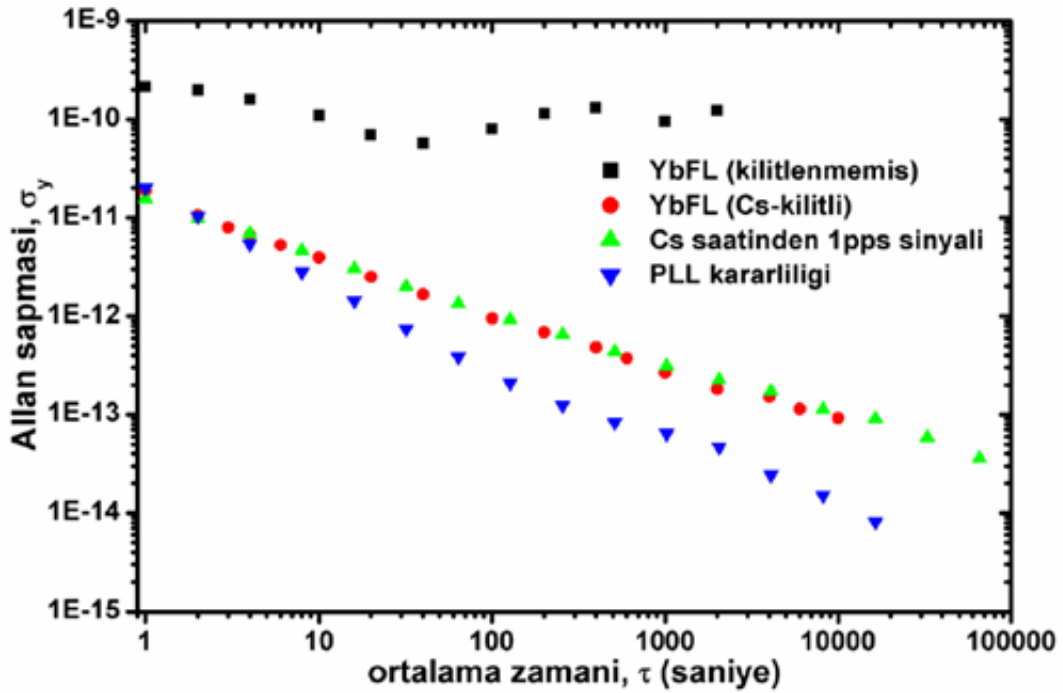
değerine göre yapılmıştır. Filtre çıkışındaki RF sinyali düşük gürültülü yükselteçle güçlendirilerek DRO RF sinyali ile mikserde karşılaştırılmış ve elde edilen fark sinyali PID kontrolcüsüne verilmiştir. PID kontrolcüsünün çıkışındaki hata sinyali yükselteçte güçlendirilerek lazerin faz kaydırıcı PZT elemanına verilmiştir. PZT elemanı lazerin rezonatör boyutunu gelen hata sinyaline göre değiştirerek lazer tekrarlama frekansının ayarını yapmıştır. Bu yöntemle lazer tekrarlama frekansının 12. harmonik değeri olan 1300 MHz DRO osilatörünün 1300 MHz değerine otomatik ayarlanarak kilitlenmiştir. Benzer teknikle PLL sistemli DRO osilatörü de Cs atomik saatinin referans 10 MHz sinyaline kilitlenmiştir. Yukarıda izah edildiği gibi hassas lazer frekans kararlılığı ölçümü yüksek çözünürlüklü faz kayması tekniği ile yapılmıştır. Bu teknikte, RF sinyalinin faz kayması zaman aralığı sayıcısı ile ölçülür. Sayıcının A ve B girişlerine verilen Cs saatinin 1PPS sinyali ile 108 MHz sinüzoidal sinyalin karşılaştırılması sonucunda 108 MHz RF sinyalinin zaman içinde periyot kayması incelenir. Ancak bu ölçümleri uzun zaman aralığında yapabilmek için 108 MHz değeri tam sayıya çok yakın olmalıdır. Bu durumda tekrarlama frekansının 12. Harmoniği $12 \times 108 \text{ MHz} = 1296$ olmalıdır. Deneyler sırasında lazer tekrarlama frekansı DRO çıkış sinyalinin frekansı ile belirlendiğinden, DRO'nun tetiklenmesi için kullanılan 10 MHz frekans değerinde ince ayar gerekli olmuştur. DRO'nun frekans kilitlenmesinde kullanılan Cs atomik saati UTC ve UTC(UME) zaman ölçeğinin oluşturulmasında kullanıldığı için, frekans ayarı zaman kaymasını değiştireceğinden bu saatin frekans ayarı yapılamaz. Bu problemi çözmek için Cs atomik saati ile DRO arasında Cs atomik saatine kilitli ancak çıkış frekansı ayarlanabilen frekans sentezleyici kullanıldı.

Yb-katkılı fiber lazerinin tekrarlama frekansı kararlılığı ile ilgili ölçüm sonuçları şekil 2.9'da verilmiştir. Frekansı kilitlenmemiş, başka deyişle serbest çalışan lazerin frekans kararlılığının 1 saniye ile 2000 saniye arasındaki ortalama zaman aralığında 5.64×10^{-11} ile 2.15×10^{-10} arasında değiştiği gözlenmiştir. Serbest çalışan lazerin kısa dönem kararlılığı çevredeki akustik gürültü ve titreşimin lazer rezonatörüne etkisi tarafından belirlenmektedir. Ayrıca lazeri besleyen elektronik sistemlerinin parametrelerindeki salınım da etkili olabilir. Uzun dönem kararlılığı ise lazer sisteminin sıcaklık değişimi tarafından belirlenmektedir. Ölçümler sırasında lazerin bulunduğu laboratuvarın sıcaklığı 1°C 'den az değişmiştir. Frekans kararlılık

sonuçlarını incelediğimizde 1 saniye ile 30 saniye arasında kararlılığın arttığı (iyileştiği) ve dolayısı ile frekans salınımında beyaz gürültünün etkin olduğu gözlenmiştir. Ancak beklendiği gibi uzun zaman aralığında fliker salınım ve frekans kayması kendisini göstermeye başlamıştır. Serbest çalışan Yb katkılı fiber lazer için alınan frekans kararlılığı sonuçları mevcut ECDL, He-Ne, Nd-YAG lazerlerin sonuçlarına kıyasla yakın ve daha iyi görünmektedir. Ayrıca lazerin RF sinyalinin frekans kararlılık sonuçlarının laboratuarlarda bulunan RF frekans sentezleyicilerin frekans kararlılıklarından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Dolayısı ile sıcaklık stabilizasyonlu ve dış akustik etkenlerden izole edilmiş fiber lazerler yüksek performanslı RF kaynağı adayı olarak ön plana çıkabilir. Burada not etmek gerekir ki, fiber lazerin frekans kararlılık ölçümlerinde sayıcı frekans ölçüm modunda çalıştırılmıştır. Çünkü serbest çalışan lazerin 108 MHz frekansındaki değişim stabilize lazere göre çok fazladır. Bu göreceli büyük değişim kısa zamanda 1 periyot faz kaymasına neden olmakta ve zaman aralığı ölçüm tekniği lazerin uzun zaman aralığında kararlılığını analiz etmekte problem yaratmaktadır. Ayrıca, frekans ölçüm modunda sayıcıdan gelen belirsizlik zaman aralığı ölçüm moduna göre daha fazla olduğu bilinmektedir [14,19].

Lazer tekrarlama frekansı Cs atomik saatinin referans 10 MHz frekans değerine kilitlendiği zaman beklendiği gibi frekans kararlılığında ciddi bir iyileşme gözlenmiştir. Ortalama zamana bağlı olarak lazer kararlılığı 10 ile 1000 kat arasında iyileşme sergilemiştir. 1 saniye ortalama zamanda 2×10^{-11} olan lazer frekans kararlılığı 10000 saniye ortalama zamanda 1×10^{-13} değerine ulaşmıştır. Lazer frekans kararlılığını incelediğimizde frekans salınımları beyaz gürültü şeklinde olup lazer frekansının fliker salınımları ve frekans kaymaları tez çalışması kapsamında kurulan elektronik frekans kilitleme sistemi tarafından yok edilmiştir. Ölçülen lazer frekans kararlılığını Cs atomik saatlerin frekans kararlılıkları ile kıyaslandırmak ve sonuçları karşılaştırmak için atomik saatlerin frekans kararlılıkları ölçülmüş ve aynı Allan Varyans istatistiği ile analiz edilmiştir. Bu ölçümlerde 2. atomik saatin 1 pps çıkışı zaman aralığı sayıcısının A girişine, 1. atomik saatin 1 pps çıkışı ise sayıcısının B girişine verilmiştir. Sayıcı bir önceki ölçümlerde olduğu gibi 2. atomik saatin 10 MHz sinyali ile tetiklenmiştir. Ölçüm sonuçları Şekil 2.9'da yeşil renkli grafik ile gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi lazer tekrarlama frekansı kararlılığı Cs atomik

saatin frekans kararlılığı ile örtüşmektedir. Atomik saat frekans kararlılığı da 1 saniye ortalama zamanda 2×10^{-11} kararlılık göstermiş ve bu kararlılık 10000 saniyede 1×10^{-13} değerine ulaşmıştır. Yaklaşık 3 gün boyunca aralıksız yapılan ölçümlerin sonucunda ise atomik saatin frekans kararlılığının 65536 saniye ortalama zamanda 4×10^{-14} değerine ulaştığı tespit edilmiştir. Dolayısı ile yaklaşık 10 günlük aralıksız ölçümler ile lazer tekrarlama frekans kararlılığının 100000 saniye ortalama zamanda Cs saatinin uzun dönem kararlılığı olan 2×10^{-14} değerine ulaşabileceği tahmin edilebilir. Ancak böyle uzun süreli ölçümlerde için 108 MHz frekansının 1 periyot faz kaymasının engellenmesi gereklidir. Bu problemi çözmek için 108 MHz frekansın bölücü sistem ile azaltılması gereklidir.



Şekil 2.9. Yb katkılı fiber lazerinin tekrarlama frekansının ortalama zamana göre kararlılığı (kırmızı noktalar). Siyah kare noktalar frekansı kilitlenmemiş serbest çalışan lazerin kararlılığıdır. Yeşil üçgen noktalar Cs saatlerinin frekans kararlılığıdır. Mavi üçgen noktalar PLL sisteminin kararlılığıdır.

Lazer frekans kilitlemesinde kullanılan elektronik sisteminin (DRO osilatörü, frekans sentezleyici, PID kontrolcü, yükseltici) ve frekans ölçüm sisteminin frekans kararlılığına etkisinin araştırılması amacıyla ek deneyler yapılmıştır. Bu deneylerden birincisi, PLL sisteminin kararlılığının araştırılması olarak adlandırdığımız deneydir. Bu deneyde iki atomik saat yerine sadece tek atomik saat kullanılmıştır. Deney düzeneğinde birinci Cs atomik saatin 10 MHz sinyalinin yerine ikinci Cs atomik

saatinin 10 MHz referans sinyali kullanılmıştır. Bu durumda sayıcı aynı atomik saatin 1 PPS sinyali ile 10 MHz sinyalini karşılaştırmış oluyor. Ancak sayıcıya gelen 10 MHz sinyal frekans sentezleyici ve DRO üzerinden lazer tekrarlama frekansına (108 MHz) çevrilerek sayıcıya ulaşıyor ve temel kaynaktan gelen 1 PPS sinyali ile karşılaştırılıyor. Beklendiği gibi PLL sisteminin kararlılığı iki bağımsız Cs osilatörlerinin kararlılığından daha iyidir ve bir önceki deneylerde alınan lazer tekrarlama frekansı kararlılık ölçüm sonuçlarını olumsuz yönde etkilememiştir. İkinci çok önemli deney ise atomik saatler ile lazer sistemi arasında kullanılan uzun kabloların frekans kararlılığına etkisidir.

Sonuç olarak geliştirilen Yb katkılı fiber lazerinin tekrarlama frekansı ulusal zaman frekans standardı olan Cs atomik saatinin 10 MHz referans frekansına kilitlemesi sağlanmış ve atomik saat kararlılığının benzeri elde edildi. Edindiğimiz bilgilere göre literatürde ilk defa Yb katkılı fiber lazerlerin tekrarlama frekansı Cs atomik saatinin 10 MHz referansına kilitlenmif ve atomik saat ile benzer kararlılığa ulaşıldı.

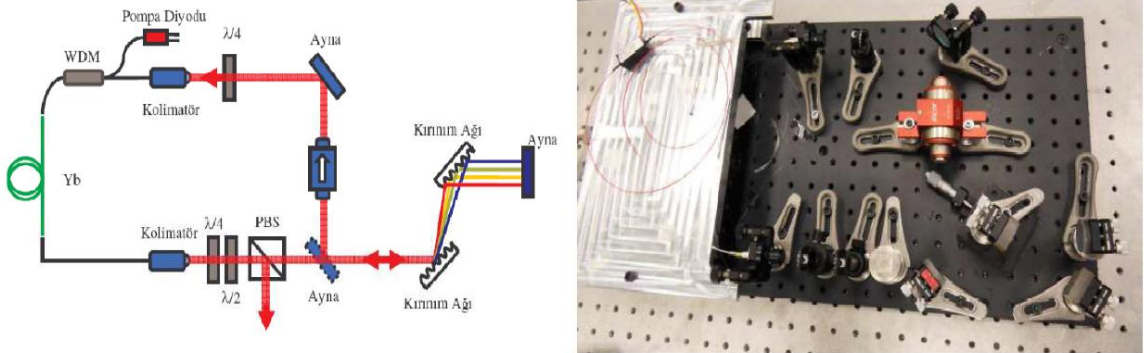


şekil 2.10. Cs atomik saatlerinin Yb katkılı fiber lazerlerini bulunduğu laboratuvarın görüntüsü.

2.4. Yb Similariton Lazerinin Kurulması ve Temel Parametreleri

Giriş bölümünde açıkladığımız literatürde bilinen ve mevcut durumda bir çok laboratuarda kullanılan Er temelli fiber lazer tarak üreteçleri ve son birkaç yılda yeni geliştirilmekte olan Yb temelli tarak sistemlerde 70 fs ile 170 fs arasında lazer darbeleri elde edilebildi. Lazer darbelerinin genişlemesi ise koherent ışınım üretimini ve optik frekans uygulamasını sınırlamaktadır. Bu raporun ileriki bölümlerinde de göreceğimiz gibi 150 – 180 fs darbe genişliğine sahip ANDi lazeri ve optik yükselteç sistemi ile yaklaşık 200 fs lazer darbelerine sahip geniş spektrumlu SC lazer tarakları üretildi, ancak bu özelliğe sahip ışınım ile optik frekans metrolojisinde uygulanacak lazer tarak üretimi mümkün olamamıştır. Dolayısı ile bu sebeplerden dolayı tez çalışması kapsamında daha dar lazer darbelerinin üretimine yönelik lazer tasarımları ve üretimi çalışmaları yapılmış ve hedeflenen amaca ulaşılmıştır.

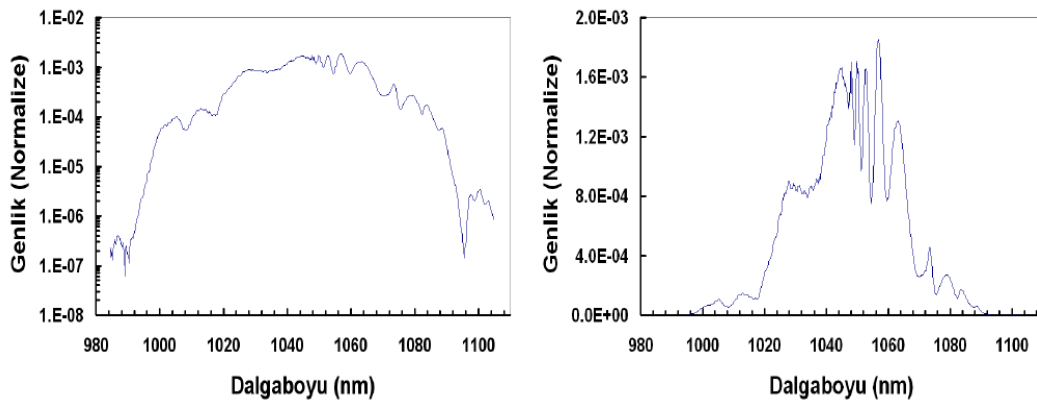
Tez çalışması kapsamında 3. lazer olarak similariton lazer sistemi tasarlanmış ve kurulmuştur. Literatür bilgilerine [20,21] göre similariton fiber lazeri ANDi fiber lazerine göre kullanılması zor olsa da, kısa lazer darbelerinin ve az gürültülü lazer ışınımının üretimi için en uygun lazerlerden biridir. Kurulan similariton lazerinin blok şeması ve fotoğrafı Şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Tasarlanan ve kurulan similariton lazerinin blok şeması ve fotoğrafı.

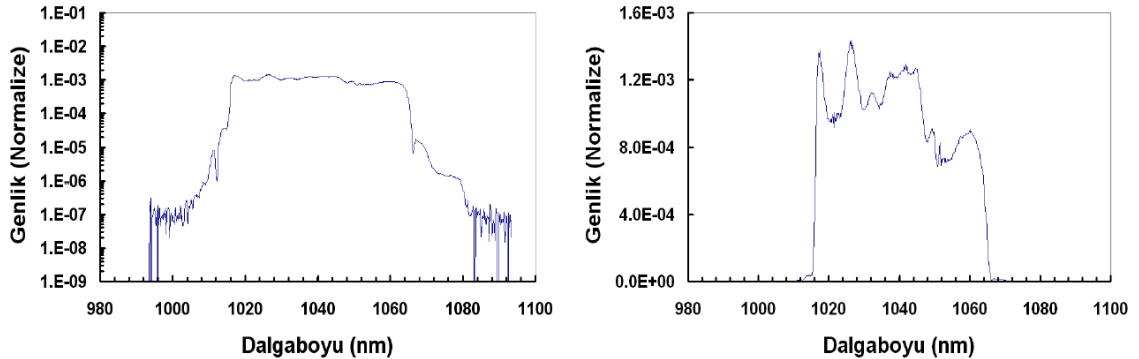
Lazerin tekrar frekansı 50 MHz olarak ayarlanmıştır. Lazerin içindeki kırınım ağlarının aralarındaki mesafe değiştirilerek lazerin net toplam saçılım değeri yaklaşık olarak -25000 fs^2 ile $+15000 \text{ fs}^2$ arasında taranmıştır. Dolayısıyla lazerin farklı modlarda çalışması sağlanmış, farklı modlar için lazerin spektrum ve sıkıştırılmış darbe uzunluğu gibi özellikleri incelendi. Kırınım ağları kaldırılıp bir bant geçiren

filtre yerleştirilirse, lazerin ANDi modunda da çalışması sağlanabilecektir. Lazer net negatif saçılım değerlerinde soliton-benzeri modda, net pozitif saçılım değerinde ise similariton-benzeri modda çalışmaktadır. Soliton-benzeri modda, yüksek net negatif saçılım değerleri için darbe enerjileri düşüktür ve görece dar bir spektrum elde edilebilmektedir. Darbe enerjileri düşük olduğundan, yüksek pompa güçleri uygulandığında lazerin çok-darbeleri (multiple pulsing) şekilde çalıştığı gözlemlendi. Saçılım değeri sıfıra yaklaştırıldığında (kırınım ağıları arasındaki mesafe $L=64$ mm) darbe enerjisi artmış ve elde edilen spektrum genişlemiştir (Şekil 2.12).



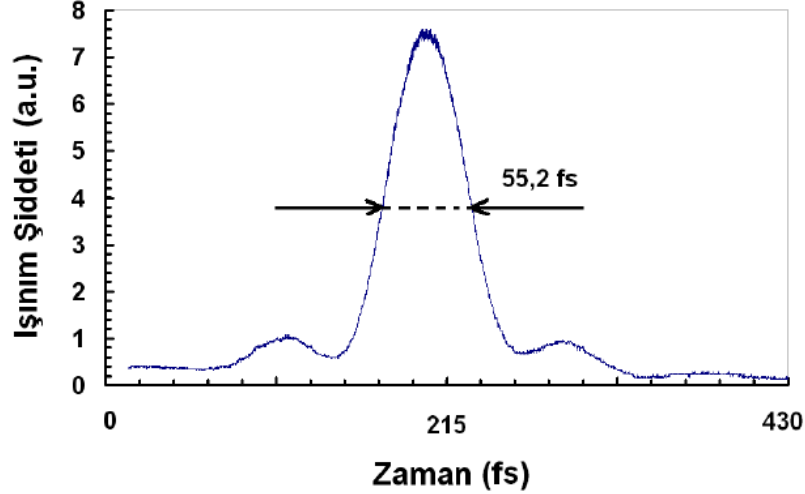
Şekil 2.12. Similariton lazerinin sıfır saçılım değerinde çıkış ışınının spektrumu.

Saçılım değeri pozitif iken kare-benzeri spektrumlar ve yüksek darbe enerjisi elde edilebilmektedir (Şekil 2.12). Örneğin, şekil 2.13’de verilen ve saçılım değeri 8400 fs^2 iken gözlenen spektrumun lineer ölçekteki görüntüsünü şekil 2.12’de verilen sonuçlarla kıyaslandığında bu durum daha net bir şekilde görülmektedir. Bu lazer ile elde edilen spektrumun merkez dalgaboyu 1043 nm ve genişliği ise 50 nm’dir.



Şekil 2.13. Similariton lazerinin pozitif saçılım değerinde (8400 fs^2) çıkış spektrumu.

İncelemelerden sonra, lazer yaklaşık $+8000 \text{ fs}^2$ net saçılım ile çalıştırılmış, çıkan darbeler lazer dışında kırınım ağılları kullanılarak sıkıştırıldı. Elde edilen spektrum ve otokorolasyon verileri aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.14). Otokorolasyon verisi 55 fs uzunluğunda darbeler olduğunu göstermekte ise de, ölçüm sırasında kullanılan otokorolatörün ölçüm çözünürlüğü 15 fs'den büyük olduğundan, bu ölçüm, elde edilen darbe uzunluğunun üst limiti olarak düşünülmelidir.

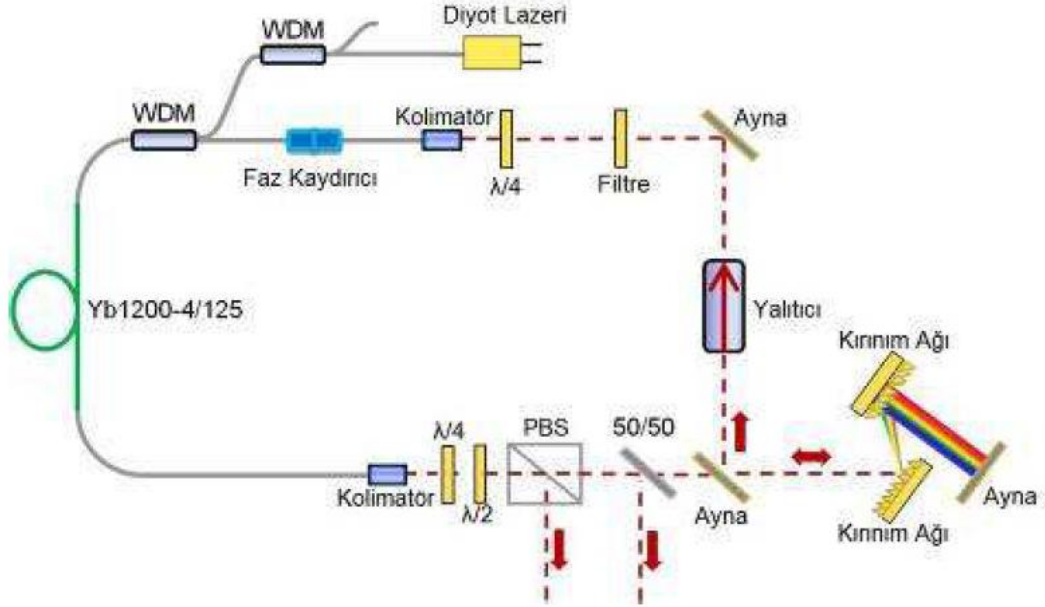


Şekil 2.14. Similariton lazeri ile elde edilen ve sıkıştırılmış 50 mW ortalama güç değerindeki lazer darbe şiddetinin zaman göre değişim sinyali.

2.5. Spektrum gerilimli Yb Fiber Similariton Lazeri

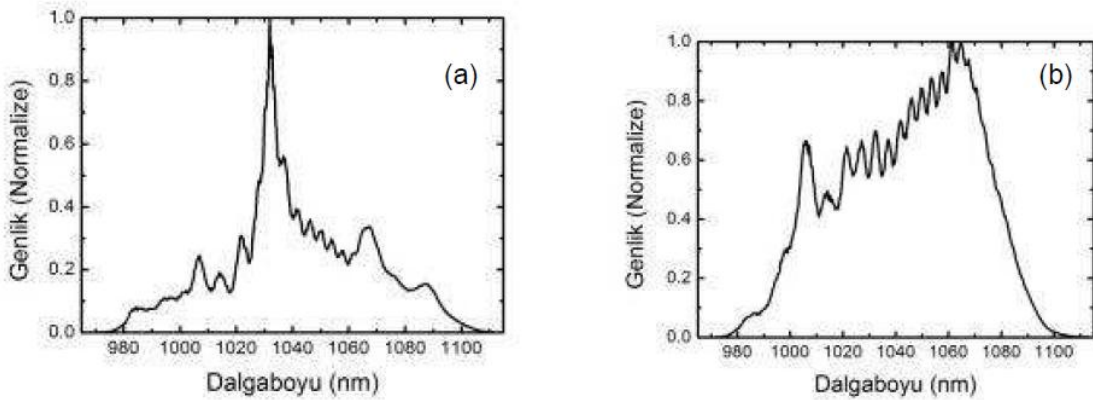
Literatürdeki sonuçlara göre minimum ofset vuru sinyali genişliği için lazerin net sıfır saçılım değerinde çalışması gerekmektedir [19]. Koherent ve geniş spektrumlu SC ışmasının üretimi için ise mümkün olduğunca kısa darbeler kullanılmalıdır. Bilinen sıfır saçılım değerli lazer tasarımları kısa darbelere erişilmesini mümkün kılmamaktadır. Bu nedenle, net sıfır saçılımda çalışabilecek ve kısa darbe uzunluklarına erişilebilecek yeni bir lazer tasarımı gerekli oldu. Simülasyonlar Bilkent Üniversitesi Ultrahızlı Optik ve Lazerler Laboratuvarı'ndan Çağrı Şenel tarafından yazılan simülasyon yazılımı ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre, yukarıda sonuçları sunulan similariton lazerinin (Şekil 2.18) içine 10 nm genişliğinde bir bant-geçiren filtre ve 50/50 bölücü koyulduğunda, lazerin net sıfır saçılım değerinde bile yüksek güçlerde çalışması mümkündür ve darbeler lazerin dışında kırınım ağılları kullanılarak 35 fs'ye kadar sıkıştırılabilmektedir. Simülasyonlarda elde

edilen sonuçlardan sonra deneysel olarak aynı sistem kuruldu. Lazerin blok şeması aşağıda gösterilmiştir (Şekil 2.15).



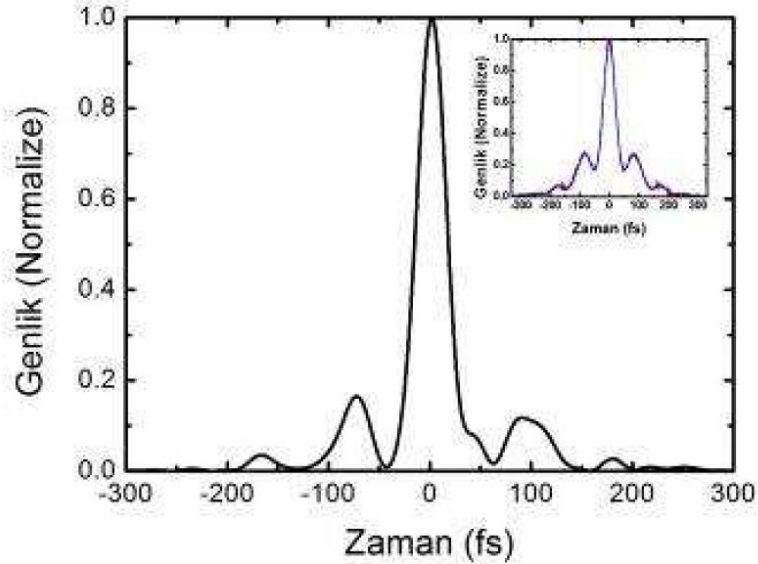
Şekil 2.15. 33 fs lazer darbeleri üretimine olanak sağlayan spektrumu gerilimli Yb fiber similariton lazerinin blok şeması.

Lazerin kutuplayıcı küp ve 50/50 bölücü çıkış ışınlarının spektrumları Şekil 2.16'de gösterilmiştir. Lazerin bu çalışma rejiminde kutuplayıcı küpten çıkan demet ortalama gücü 90,4 mW, 50/50 bölücüden çıkan demet ortalama gücü ise 38,6 mW olarak ölçüldü. Lazerin 50/50 bölücü çıkışındaki spektrumu daha geniş ve düzgün olduğu için daha sonraki aşamalarda bu çıkış ışınının kullanılmasına karar verildi.



Şekil 2.16. Spektrumu gerilimli similariton lazerinin kutuplayıcı küp (a) ve 50/50 bölücü (b) çıkışlarındaki spektrumları

Şekilden görüldüğü gibi bu çıkıştaki lazer spektrumu daha önce kullandığımız lazerlere göre çok daha geniş (80 nm) olup 980 – 1100 nm aralığını kapsamaktadır. Kıyaslamak amacıyla sunmak gerekirse 121 fs darbe elde ettiğimiz Yb ANDi lazerinin spektral kalınlığı 28 nm olup dalgaboyu 1035 – 1063 nm arasında değişmektedir. 55 fs darbeler elde ettiğimiz sıfır saçılımlı Yb similariton lazerinin spektral kalınlığı 50 nm olup dalgaboyu 1016 – 1066 nm arasında değişmektedir. Dolayısı ile son kurulan lazer ile daha kısa darbeler üretmek mümkün olabilecektir. Lazerin çıkışı, 600 çizgi/mm yoğunluğa sahip bir kırınım ağı çifti ile sıkıştırılmış, darbe uzunluğu otokorelatör kullanılarak ölçüldü. Ölçülen otokorelasyon sinyalinin ve PICASSO algoritmasından elde edilen darbenin zamana göre değişimi Şekil 2.17’de verildi ve darbenin yarı şiddetteki genişliği 33 fs olarak ölçüldü.



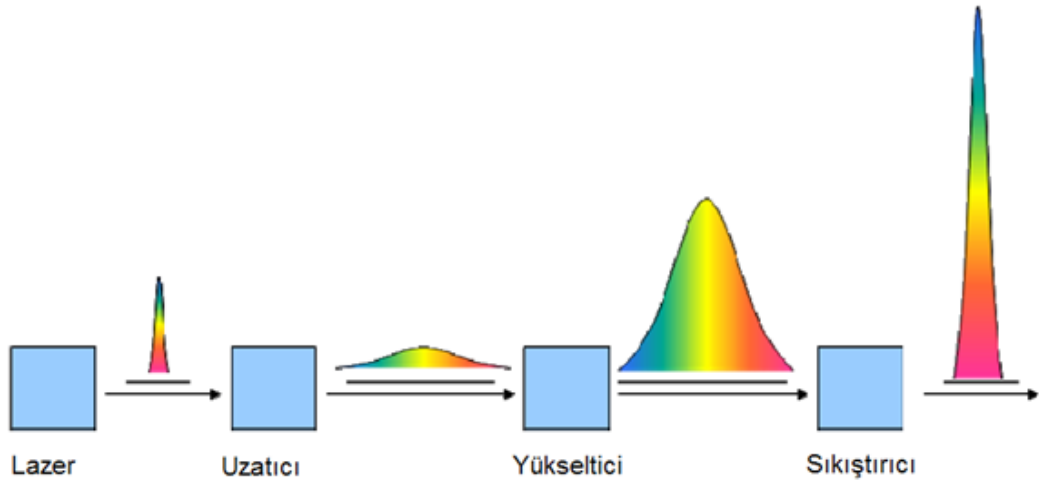
Şekil 2.17. Spektrumu gerilimli similariton lazerinin PICASSO algoritması ile elde edilen lazer darbe şekli.

3. Yb FİBER LAZERİ VE OPTİK YÜKSELTEÇ İLE FOTONİK FİBER KRİSTAL (PCF) ÇIKIŞINDA GENİŞ SPEKTRUMLU (SC) LAZER IŞIMASININ ÜRETİLMESİ

Bu bölümde tasarlanan farklı lazer ve yükselteç sistemleri ile farklı özelliklere sahip PCF'lerin kullanımıyla SC lazer ışımalarının üretimi ile ilgili sonuçlar ele alınacaktır. Güçlendirilmiş lazer darbeleri kırınım ağı ile sıkıştırılarak analiz edildi ve daha sonra PCF içine gönderilerek geniş spektrumlu lazer ışınımı (supercontinuum, SC) üretildi. Burada SC ışınımını etkileyen faktörlerle (merkez dalgaboyu, darbe genişliği, PCF uzunluğu ve tipi, ışın polarizasyonu) ilgili araştırma sonuçları sunulacak, simülasyon ve deney sonuçları karşılaştırılacak, lazer tarak için gerekli olan koherent lazer ışınımının üretimini için ne kadar önemli olduğu gösterilecektir.

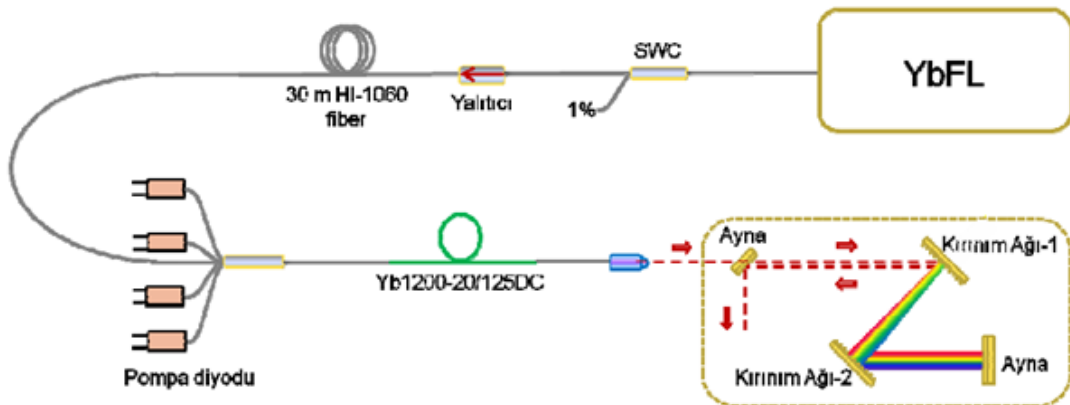
3.1. Sıkıştırılmış Lazer Darbelerini Üreten Optik Yükselteç Sistemlerinin Kurulumu ve 600 - 1800 nm Dalgaboyu Aralığındaki Geniş Spektrumlu (SC) Lazer Işımasının Üretimine Uygulanması

Optik frekans tarağı (COMB) üreteçlerinde SC lazer ışımalarının üretimi, kullanılan doğrusal olmayan optik malzeme içinde Kerr etkisi kullanılarak elde edilmiş geniş spektrumlu lazer ışınımıdır. Frekans taraklı fs lazerin f_{CEO} sapma frekansının kilitlenebilmesi için, elde edilen spektrumun en az bir oktav genişliğinde olması gerekmektedir [22]. Kerr etkisi, lazer darbelerinin tepe gücüyle ve malzemenin bir özelliği olan Kerr katsayısı ile doğru orantılıdır [23]. Bu nedenle, geniş spektrumlu lazer ışması elde etmek için, lazerden çıkan darbeler bir yükseltici ile yükseltilip kırınım ağları kullanılarak sıkıştırıldıktan sonra, yüksek Kerr katsayılı bir fibere, örneğin, fotonik fiber kristale (PCF) odaklanır. Bu amaçla tez çalışması kapsamında, lazer osilatörlerden sonra optik yükseltici ve lazer darbeler sıkıştırıcı sistemi tasarlandı ve kuruldu. Darbelerin kalitesinin bozulmaması için, yükselticide Kerr etkisinden kaçınmak gerekir [24]. Bu nedenle, lazerden gelen darbeler önce uzunca bir fiberden geçirilerek uzatılır ve tepe gücünün düşmesi sağlanır. Daha sonra yükseltilen darbeler, fiberden çıkarıldıktan sonra sıkıştırılır.



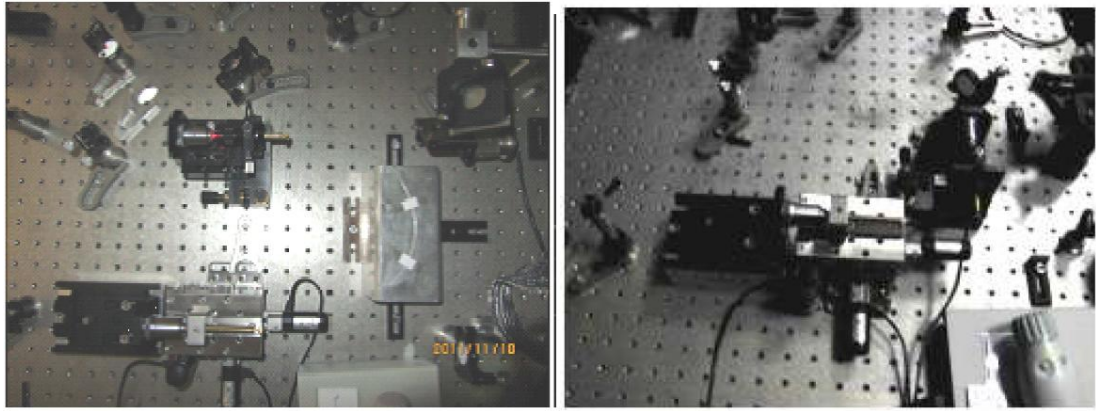
Şekil 3.1. SC öncesi darbelerin evrimi.

Şekil 3.1'in temelinde tasarlanan ve kurulan optik sisteminin blok diyagramı Şekil 3.2'de verilmiştir. İlerleyen kısımlarda göreceğimiz gibi bu temel optik deney düzeneğinde farklı lazerler, yükselteçler, sıkıştırıcılar ve PCF kullanılarak, bu alt parçaların parametrelerinin SC ışına genişliğine, spektral güç yoğunluğuna ve koherentliğine etkisi tez çalışması amacına uygun olarak araştırıldı. Lazerden gelen darbeli ışınlar %1'lik bir ayırıcıdan ve optik yalıtıcıdan geçirildikten sonra, uzatmak amacıyla 40 m uzunluğunda NKT Photonics firmasından satın alınan HI-1060 fiberinden geçirildi. Uzatılan darbeler bir lazer diyotu ile pompalanmış Yb katkılı fiberden (Yb1200-4/125) oluşan ön yükselteçten ve iki adet lazer diyotu ile pompalanmış diğer Yb katkılı fiberden (Yb1200-20/125DC) oluşan yükselteçten geçirilerek kırınım ağı çifti kullanılarak sıkıştırıldı.



Şekil 3.2. SC ışınası üretiminde kullanılan optik düzeneğin blok şeması.

SC lazer ışımının üretilebilmesi amacıyla sıkıştırılan lazer darbeleri iki ayna ve bir mikroskop objektifi (NA=0.65) kullanılarak %20'den daha az verimle, yüksek Kerr katsayısına sahip olan PCF'e sokulmuştur. Lazer ışımının fotonik fiber içine hassas bir şekilde gönderilmesi ve kararlı SC ışımının üretimi için fotonik kristal fiberinin bir ucu XYZ eksenlerinde hassas ayarlanabilen PZT kontrollü tutucu üzerine montaj edilmiştir. Bu kapsamda 30 nm adımlarla 12.5 cm hareket kabiliyetine sahip hassas PZT kontrollü temin edilerek PCF tutucuları için kararlı sistem tasarlandı ve yapıldı. Bu işlem sonucunda birkaç saat içinde ciddi değişim gösteren ve sürekli ayar gerektiren SC üretim sistemi kararlı hale getirildi. Ayrıca lazer gücünün de değişmemesi için gerekli işlemler yapıldı. Sonuç olarak günlerce ayar gerektirmeden kararlı SC üretimi sağlanmıştır. Kurulan PCF tutucu sisteminin 50 cm ve 22 cm PCF için fotoğrafları Şekil 3.3'de verilmiştir. Bu fotonik kristal fiberinde lazer spektrumunun genişlemesi sağlanmış ve fiberin çıkışında elde edilen geniş spektrumlu SC lazer tarağı ışması ikinci mikroskop objektifi ile paralel demet haline getirildi.



Şekil 3.3. PCF tutucusunun fotoğrafı.

Farklı güçlerde ve spektral bantta SC ışması elde etmek amacıyla farklı lazer sistemlerinde elde edilen ışmalar PCF'e doğrudan sıkıştırılarak gönderildi. ANDi lazeri ile yapılan deneylerde iki tür güçlendirici sistemi kullanıldı. Birinci sistemde ön-yükselteç ve yükselteçten oluşan sistem ile PCF girişinde 6 W güç elde edilirken, ikinci sistemde iki ön-yükselteç kullanımıyla PCF girişinde 250 mW güc elde edildi. Birinci yükselteç sisteminde 1050 nm ANDi lazer darbeleri 40 m uzunluğundaki HI-1060 model fiber ile genişletildikten sonra 600 mW pompa diyot ile pompalan Yb1200-4/125 model Yb fiber ile 300 mW değerine yükseltildi. Bu ön yükselteç

çıkışındaki ısımaya 20 W pompa ışması ile pompalanmış Yb1200-20/125DC model Yb fiberde yükseltildi. 20 W pompa gücü, çıkış gücü 25W ve 10 W olan iki adet yüksek güçlü lazer diyot ile elde edildi. Bu şartlar altında yükselteç çıkışında ortalama gücü 9 W olan darbeleri lazer ışması üretildi. Lazer darbeleri iki adet kırınım ağlarının kullanımıyla sıkıştırıldı. Kırınım ağı çıkışındaki sıkıştırılan ısımının gücünü artırmak için optik izolatör, polarizasyon kontrolcüsü ve yarı dalga plakaları kullanıldı. Uygun ayarlamalardan sonra kırınım ağlarının çıkışında 66% verimle 6 W ortalama sahip ısımın üretildi. Sıkıştırılan lazer darbeleri PCF içine gönderilerek çıkışında 1.5 W ortama güç değerine sahip SC lazer ışmasının jenerasyonu sağlandı.

İkinci yükselteç sisteminde ise lazer darbeleri benzer şekilde 10 m uzunluğundaki HI-1060 model fiber ile genişletildikten sonra ardı-ardına iki adet 600 mW pompa diyot ile pompalan Yb1200-4/125 model Yb fiberden geçirilerek güçlendirildi. Buradaki amaç daha önce yapılmış olan ANDi lazer ışması şiddetinin yüksek güçlü, yüksek gürültülü, çok-kipli pompa diyotları kullanılmadan sadece tek-kipli, düşük gürültülü pompa diyotları kullanılarak yükseltilmesidir. Bu amaçla iki aşamalı yeni bir yükseltici yapılmış ve yapısı aşağıda açıklanmıştır. Lazer osilatörden çıkan darbeler fiber kolimatöre sokulmuştur. Kolimatörün ardından lazer ışması UHNA3 kodlu küçük çekirdek çaplı ($\sim 2 \mu\text{m}$), yüksek (~ 0.65) NA (numerical aperture) değerine sahip 3 m uzunluğunda fiberden geçirildi. Bu fiberin çekirdek yarıçapı küçük olduğundan, düşük güçlerde dahi fiberde es-benzer (self-similar) yayılmayı olanaklı kılmaktadır. Lazerden çıkan 132 mW gücün 35 mW'ı fibere sokuldu ve bu güçte iken UHNA3 fiberinde es-benzer yayılma gözlemlendi. Bu ise spektrumun sıkıştırılabilir şekilde genişlemesini sağlamış, dolayısıyla yükseltici çıkışında daha dar darbeler elde edilebilirdi. UHNA3 fiberinden çıkan darbeler bir optik yalıtıcıdan geçirildikten sonra yaklaşık 600 mW gücünde pompalanan 32 cm boyunda Yb1200-4/125 kodlu Yb katkılı fiberden geçirilerek ortalama 302 mW değerine yükseltildi. Bu darbeler yine 600 mW güçle pompalanan ikinci bir 32 cm boyunda Yb1200-4/125 kodlu Yb katkılı fiberden geçirilip ve ortalama 554 mW değerine yükseltildi. Lazer darbeleri sıkıştırılarak ve teleskoptan geçirilerek PCF'e yönlendirildi. PCF girişinde 250 mW ortalama güç elde edilirken PCF çıkışında 75 mW güç elde edildi.

Similariton lazeri ile yapılan çalışmalarda 3 tip deney yapıldı. Birinci olarak lazer çıkışı doğrudan sıkıştırılarak PCF'e gönderilip, ikinci deneylerde bir ön yükseltici

kullanıldı ve darbeler sıkıştırılarak PCF'e gönderildi. Üçüncü deneyde ise ardı-ardına iki ön yükselteç kullanıldı. Bu deneylerde PCF girişinde farklı lazer güçleri (40 – 470 mW) elde edilirken farklı kalınlıkta lazer darbelerinin üretimi (40 – 100 fs) de amaçlanmıştır.

SC lazer ışınması üretiminde ticari olarak elde edilebilen 3 farklı model PCF kullanıldı. Bunlardan birincisi NKT Photonics firmasından temin edilen çift saçılım spektrumlu NL-1050-ZERO-2 model PCF olmuştur. Bu fiberin 1050 nm değerinde saçılımı negatif iken bu dalgaboyundan aşağı ve yukarı değerlerinde saçılımı parabolik olarak azalmakta ve yaklaşık 925 nm ve 1150 nm dalgaboyunda saçılımı -10 ps/nm.km değerine kadar azalmaktadır.

İkinci ve üçüncü model PCF'ler ise tek sıfır saçılım dalgaboylu olmuştur. İkinci model PCF NKT Photonics firmasından temin edilen tek saçılım spektrumlu SC-5.0-1040 model PCF'dir. Bu PCF sıfır saçılım değeri 1040 nm'de olup, 700 nm – 1700 nm dalgaboyu aralığında saçılım değeri -200 ps/nm.km'den +75 ps/nm.km'ye kadar artmaktadır. Üçüncü model PCF ise yine NKT Photonics firmasından temin edilen, SC-3.7-975 kodlu, sıfır saçılım dalgaboyu 975 nm olan, tek sıfır saçılım dalgaboylu fiberdir.

Deneyler sırasında lazer ışınması PCF'e mikro objektif (NA=0.65) kullanılarak gönderildi. Mikro objektif sabit tutulup, PCF ucu ise 30 nm adımlarla toplam 12.5 mm hareket kabiliyetine sahip ve XYZ eksenleri boyunca montaj edilen hassas PZT kontrollü tutucular kullanılarak ayarlanmıştır. Bu sistemle lazer ısınımı %25-30 verimle PCF içine sokulabilmiş ve gün boyunca kararlı supercontinuum üretimi sağlanmıştır. PCF çıkış ucu ise PZT kontrolü olmayan mekanik sistemle ayarlanmış ve lazer ısınımı mikro objektif (NA=0.40) kullanılarak paralel hale getirilmiştir.

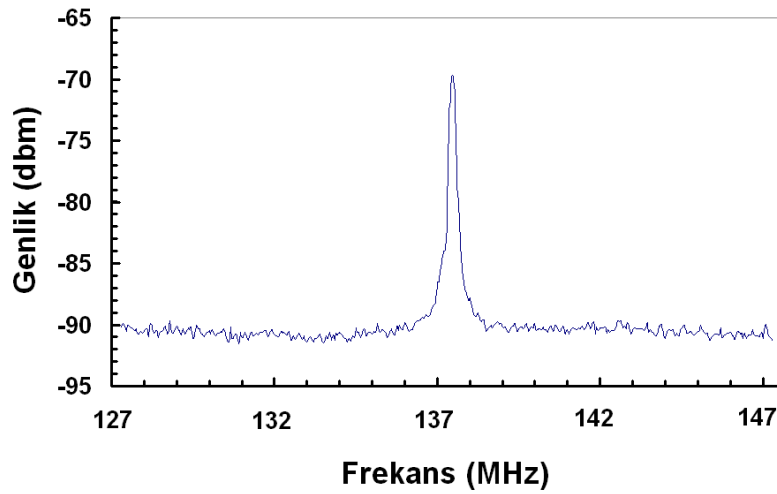
3.2. SC Işınmasının Üretilmesi ve Spektrumu Etkileyen Faktörler

Burada geniş spektrumlu SC lazer ışınmasının üretimi ile ilgili deney sonuçları ve analizleri sunulurken sıralamanı PCF girişine verilen lazer darbelerinin kalınlığının ve ortalama gücünün büyük değerlerden küçük değerlere göre azalmasına göre verilmeye çalışılacaktır. SC spektrumuna PCF uzunluğunun, lazer gücünün, darbe genişliğinin, lazer polarizasyonunun, PCF modelinin etkileri gösterilecektir. Deney

sonuçları simülasyonlarla desteklenecektir. Ayrıca tek modlu frekansı kararlı CW lazerin SC spektrumu ile vuru sinyalinin PCF girişindeki darbe genişliği ve spektrumun koherentliği ile korelasyonu gösterilecektir.

Literatür araştırmalarımıza göre geniş SC spektrumun gözlenmesi ve bu spektrumun üst dalgaboyunun ikinci harmoniği (2ω) ile alt spektrumun (ω) kesişmesi $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalinin gözlenmesi için yeterli değildir [23,24]. Spektrumdaki gürültü seviyesi, lazer darbelerinin kısa olması, PCF fiberinin kısa olması vuru sinyalinin gözlenmesi için önemli şartlardır. Nd:YAG lazeri ile SC ışınması arasında yapılan vuru ölçümleri ve literatürden bulunan bilgiler, darbe uzunluğu ve darbelerin genlik gürültüsü ile elde edilen SC ışınmasının evre uyumluluğu (coherence) arasında güçlü bir ilişki olduğunu, darbe uzunluğu kısaldıkça ve genlik gürültüsü azaldıkça evre uyumluluğun iyileştiğini göstermektedir.

Farklı lazer sistemleri ile üretilen SC ışınmasının koherentliği ve gürültü seviyesi hakkında bilgi edinmek amacıyla SC lazer ışınması ile sürekli (CW) Nd:YAG lazer ışınmasının (1064 nm) hızlı foto detektördeki vuru sinyalinin RF spektrumu analizörde incelendi. Örneğin 74 mW çıkış gücünde 14 dB vuru sinyali gözlenmiştir. Sistemde kullanılan ikinci ön yükselteçteki lazer pompalama gücü düşürülerek PCF çıkışındaki ışınım gücü 74 mW değerinden 34 mW değerine düşürüldüğünde, 21 dB olan en yüksek vuru sinyali gözlemlendi (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. PCF sonrasında 34 mW SC ışınması ve Nd:YAG lazeri arasındaki vuru sinyali.

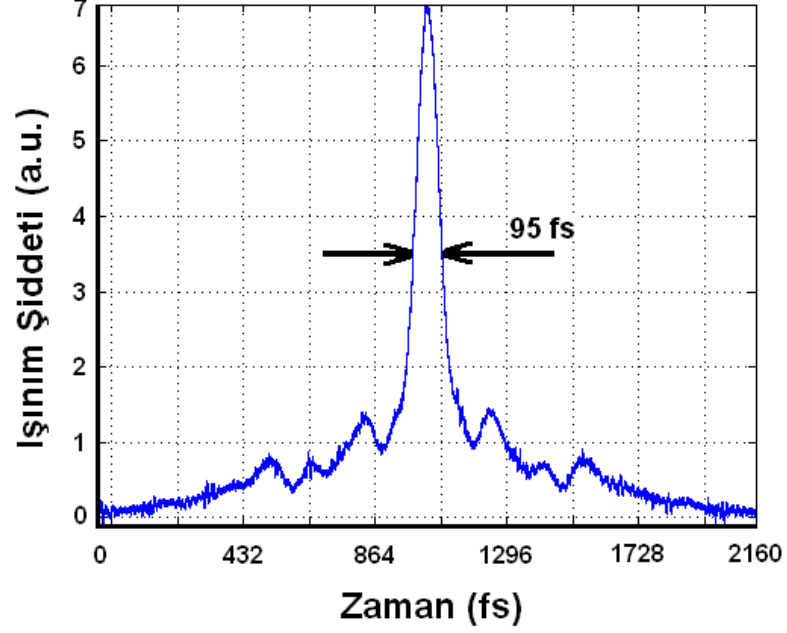
Dolayısı ile PCF içine gönderilen lazer darbeleri daraldıkça daha az gürültülü ve yüksek genlikli vuru sinyalleri gözlenmektedir. ANDi lazer sistemleri ve NL-1050-ZERO-2 kodlu PCF ile farklı lazer güçlerinde, darbe genişliğinde ve PCF uzunluğunda elde edilen vuru sinyali genliği ölçüm sonuçları Tablo 3.1’de özetlendi. PCF uzunluğunun 55 cm’den 22’cm’ye azalması, PCF’e girilen 207 fs darbelerin daha da genişlemesini engellemiş ve SC ışımalarının koherentliğini artırmıştır. Bundan dolayı da 1 dB seviyesinde olan vuru sinyali 6 dB seviyesine çıkmıştır. Yüksek güçlü ve gürültülü pompa diyotlar içeren birinci yükselteç sisteminin az gürültülü diyotlar ile beslenen ikinci yükselteç sistemi ile değiştirilmesi, en önemlisi lazer darbelerinin genişliğinin 207 fs’den 121 fs değerine azaltılması ve SC ışımalarının gücünün yaklaşık 8 kat azalmasına rağmen vuru sinyali 6 dB’den 14dB’ye artmıştır. Darbe genişliğinin 110 fs değerine azalması ile vuru sinyalinin 21 dB’ye çıkması daha koherent SC ışımalarının üretildiğinin göstergesidir. Dolayısı ile bu sonuçlar ile spektroskopi ve özellikle optik frekans metroloji uygulamaları açısından daha dar lazer darbeleri ile daha koherent SC ışımalarının üretiminin yapılabildiği gösterildi.

Tablo 3.1. Darbe genişliğine ve PCF parametrelerine bağlı olarak vuru sinyalinin genlik değişimi.

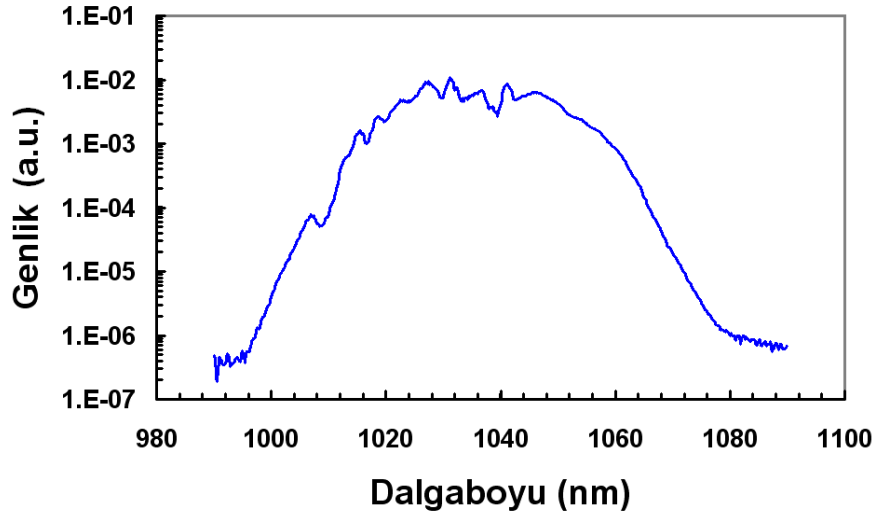
Darbe Genişliği	PCF çıkış gücü	PCF uzunluğu	PCF çıkışı SC ışımaları ile Nd:YAG lazeri arasındaki vuru sinyali
207 fs	600 mW	52 cm	1 dB
207 fs	600 mW	22 cm	6 dB
121 fs	74 mW	22 cm	14 dB
110 fs	34 mW	22 cm	21 dB

Daha koherent ve geniş spektrumlu SC ışımaları üretimi amacıyla daha dar genişliğe sahip lazer darbeleri üretimi gerektiği için similariton lazer sistemi kuruldu ve bu sistemle elde edilen otokorelasyon ölçümlerinin sonuçları bölüm 2’de verildi. Similariton lazer ışımalarını 600 mW pompa diyotlu iki ön yükselteç ile güçlendirdikten ve lazer darbelerini sıkıştırdıktan sonra pompa gücüne bağlı olarak 95 fs ile 110 fs arasında lazer darbeleri elde edilebildi. Bu otokorelasyon ölçümleri şekil 3.5’de verildi. Yb ANDi lazer sistemi 121 fs lazer darbelerine ulaşıldı. ANDi lazerinden farklı olarak similariton lazerinin spektrumu daha geniştir (1000 – 1080 nm) ve bundan dolayı da daha kısa darbeler elde edildi. PCF girişinde ölçülen lazer spektrumu Şekil 3.6’da verildi. Şekilden görüldüğü gibi lazer ve yükselteç sisteminin

spektrumu merkez dalgaboyu etrafında simetrik yapıya sahiptir ve yarı yükseklikteki spektrum genişliği yaklaşık 20 nm'dir.



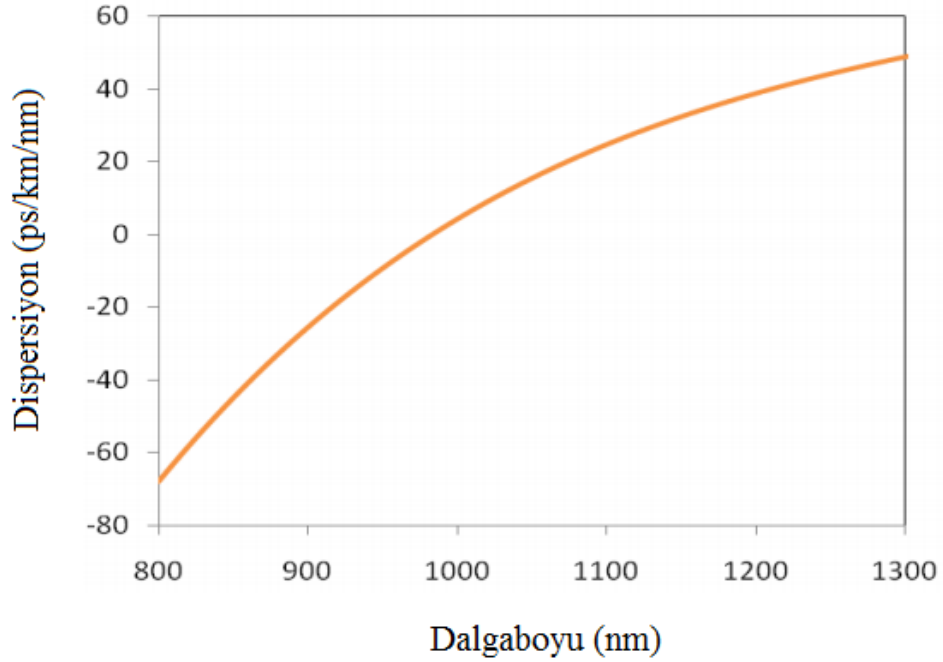
Şekil 3.5. Yb similariton lazer osilatörü ve gücü yükseltip sıkıştırılan lazer darbelerinin şiddetinin zaman göre değişim sinyali.



Şekil 3.6. Yb similariton lazer osilatörü ve iki adet ön yükselteç ile elde edilen lazer ışımının spektrumu.

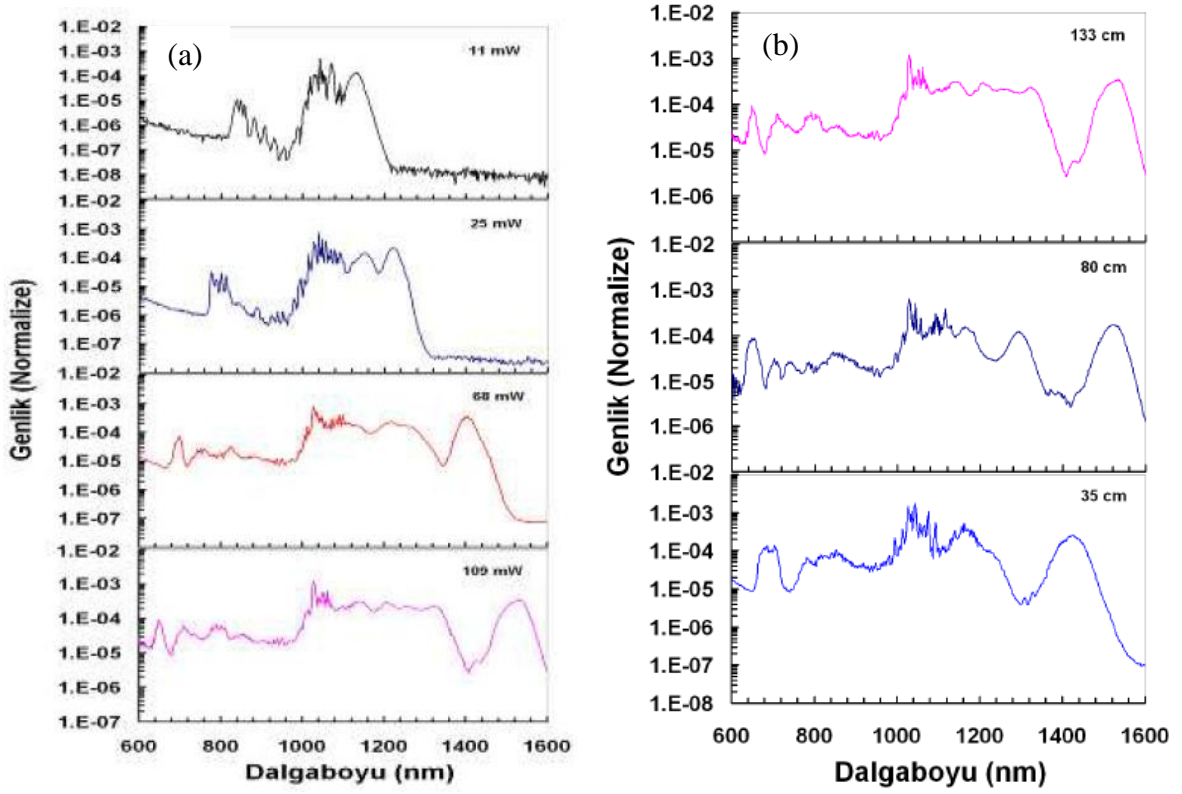
Bu sistem ile yapılan deneylerde önceki sistemlerden farklı olarak deney düzeneğinde iki teknik iyileştirme yapıldı. Birincisi, altın malzemedeki yüksek verimli (98%) kırınım ağırları (830 çizgi/mm) kullanılarak PCF girişindeki ortalama

lazer gücünü 413 mW değerine kadar artırılması sağlandı. İkincisi ise NKT Photonics firmasından SC-3.7-975 kodlu, tek sıfır saçılım dalgaboyu 975 nm olan PCF satın alınarak SC ışına üretiminde kullanıldı. Bu PCF daha önce kullanılan PCF'lere göre geniş spektrumlu SC ışına üretimi açısından daha verimli olmuştur. Satın alınan PCF'in saçılım spektrumu aşağıdaki Şekil 3.7'da verilmiştir.



Şekil 3.0.7. SC-3.7-975 kodlu PCF'in saçılım spektrumu [25].

Bu iki iyileştirme işlemleri sonucunda lazer ve iki ön yükselteç sistemi ile PCF çıkışında ortalama lazer gücü önceki dönemde elde edilen 74 mW değerinden 109 mW değerine çıkarıldı ve SC lazer spektrumu daha da genişletilerek 600 nm -1600 nm aralığına genişletildi. Ayrıca PCF girişindeki lazer darbeleri ANDi lazer sisteminde elde edilen 121 fs değerinden daha kısa oldu. Bu geliştirmeler $\omega - 2\omega$ "ofset vuru" sinyalinin gözlenebilmesi için gerekli olan koherent geniş spektrumun üretimine katkı sağlandı. Şekil 3.8 (a)'da 135 cm uzunluğunda ve SC-3.7-975 kodlu PCF ile farklı çıkış güçlerinde elde SC spektrumları verilmiştir. Şekil 3.8 (b)'de ise 109 mW çıkış gücünde farklı PCF uzunluklarında elde edilen spektrumlar verilmiştir.



Şekil 3.8. 95 fs lazer darbeleri ile 135 cm uzunluğundaki SC-3.7-975 kodlu PCF çıkışında farklı güçlerde ölçülen SC spektrumları (a) ve 109 mW ortalama güce sahip 95 fs lazer darbeleri ile farklı uzunluklardaki SC-3.7-975 kodlu PCF çıkışında ölçülen SC spektrumları (b).

Şekillerden görüldüğü gibi bu PCF ile de 600 nm - 1600 nm aralığında geniş spektrumlar elde etmek mümkün olmuştur. Burada önemli olan 35 cm PCF ile darbeleri fazla genişletmeden 640 nm - 1600 nm aralığında koherent spektrumun elde edilmesidir. Bu spektrumda dikkat edilmesi gereken 700 nm ve 1400 nm bölgesinde yeterli gücün olması ve yüksek dalgaboylu ışımının ikinci harmoniği ile küçük dalgaboyunun örtüşmesidir.

4. Cs ATOMİK SAATİNE KİLİTLİ 33 FEMTOSANIYE Yb FİBER LAZER TARAK SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ VE OPTİK FREKANS METROLOJİSİNDE UYGULAMASI

Bu bölümde tez çalışması kapsamında son şekliyle tasarlanan ve kurulan 33 femtosaniye lazer tarak sistemi sunulacaktır. Lazer – yükselteç – darbe sıkıştırıcı – PCF ve $f - 2f$ interferometre sistemi anlatılacak ve bu sistem ile üretilen SC ışımalarının lazer taraklarının frekansının Cs atomik saatin referans 10 MHz frekansına kilitlendiği gösterilerek frekans kararlılık ölçümleri verilecektir. Başka deyişle lazer taraklarının hem tekrarlama frekansı hem de lazer tarak kümesinin tamamı atomik saate kilitlendiği gösterilecektir. Tez çalışması kapsamında geliştirilen ve kurulan fs lazer tarak ve sistemi destekleyen elektronik sisteminin tamamının Cs atomik saatinden tetiklenmiş optik frekans sayıcı görevini yaptığını ve sayıcı 400 THz frekansında çalışan CW lazer osilatörlerin mutlak frekans ölçümünde uygulaması ve ölçüm sonuçları verilecektir. Bu kapsamda I_2 moleküllerinin enerji geçişine kilitli Nd:Yag/ I_2 lazerinin mutlak frekansının tez çalışması kapsamında kurulan tarak ile ölçüm sonucu verilerek geliştirilen sistemin optik frekans metrolojisinde uygulanması ve uluslararası verilerle karşılaştırması gösterilecektir.

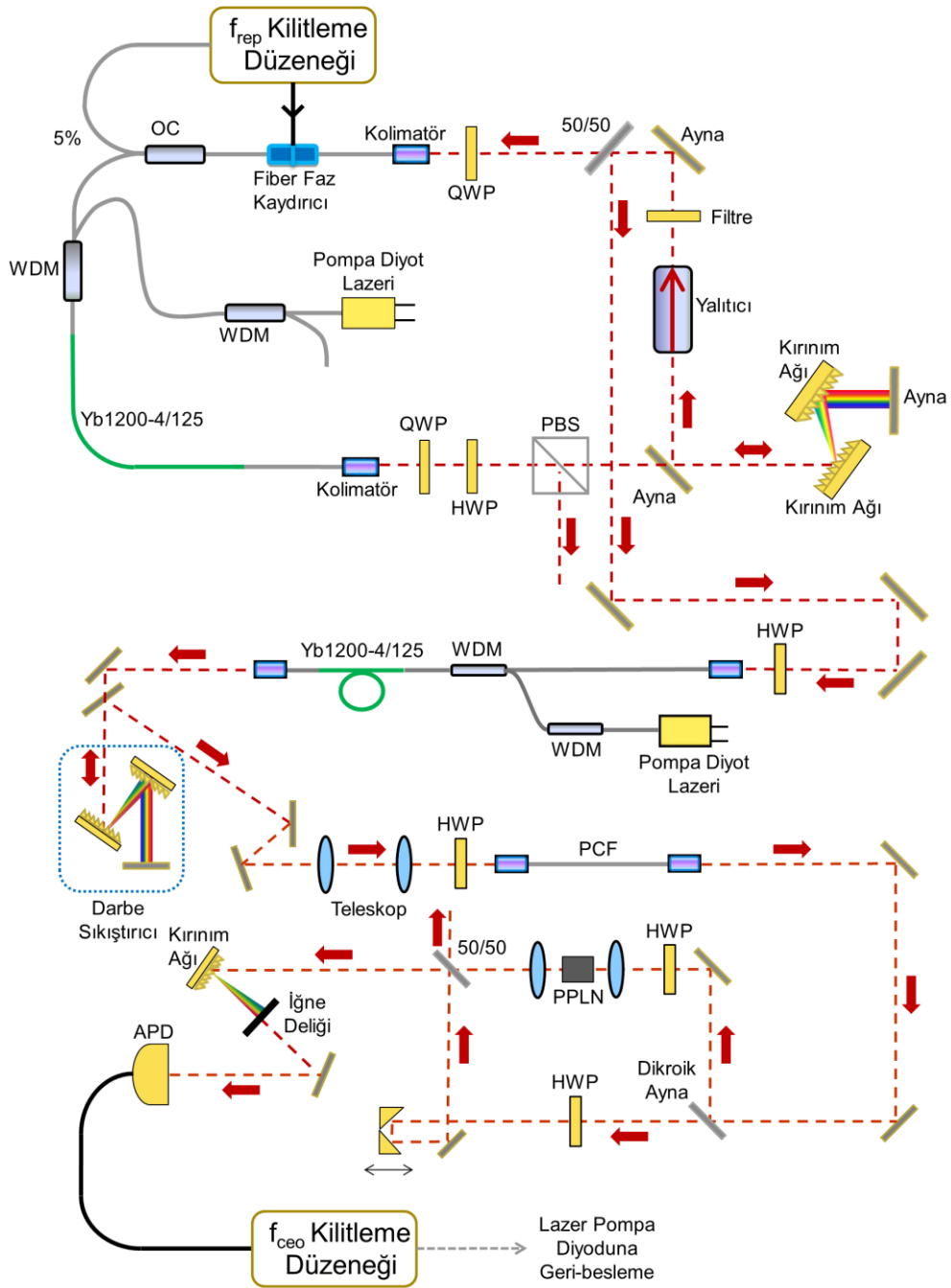
4.1. Lazer Tarak Sisteminin Optik Tasarımı ve Kurulumu

Tez çalışması kapsamında son şekliyle tasarlanan, kurulan ve optik frekans metrolojisinde uygulamaları başarı ile tamamlanan Yb katkılı lazer tarak sisteminin optik düzeneğinin blok diyagramı aşağıdaki Şekil 4.1’de verilmiştir.

Tarak sisteminde lazer osilatör kaynağı bölüm 2.5’de detaylı bir şekilde anlatılan ve 33 fs ışınım darbeleri üretebilen spektrumu gerilimli similariton lazeri kullanıldı. Lazer kavitesinin fiber kısmı 350 cm uzunluğunda tek modlu fiberden, ardından 30 cm uzunluğunda Yb12004/125 model kazanç fiberinden ve devamındaki 20 cm uzunluğundaki tek modlu fiberden oluşmaktadır. Kazanç fiberi 976 nm dalgaboyuna 600 mW çıkış gücüne sahip diyet lazer ile pompalandı. Rezonatör içindeki fiber faz

kaydırıcı rezonatör boyunu ve dolayısı ile tekrarlama frekansının ayarı ve kilitlenmesi için kullanılmaktadır. Kavite içine konulan iki adet çeyrek (QWP) ve bir adet yarı (HWP) dalga plakaları ve polarize ısınm bölücü (PBS), kavite içinde polarizasyonun doğrusal olmayan değişimini sanal doyumlu soğurucu olarak kullanılmasını sağlayarak lazerin mod-kilitli ısınm üretimini yapıldı. Lazer çıkış demetini sağlayan PBS ve %50/50 ısınm bölücülerin ardından dispersiyon kontrolü için çift kırınım ağı (600 çizgi/mm), ısınmın tek yönlü ilerlemesini sağlayan polarizör ve spektrumun gerilimini sağlayan 10 nm bant kalınlığına ve 1030 nm merkez dalgaboyuna sahip filtre kullanıldı. Lazerin %50/50 bölücüsünden çıkan ısınm demeti 3 aynadan yansıtıldıktan sonra polarizasyon ayarının yapıldığı yarı dalga plakasından (HWP) geçirilerek pompa lazer diyot ve Yb katkılı fiberden oluşan optik yükseltece gönderilir. Yükseltile lazer darbeleri çift kırınım (300 çizgi/mm) ağından oluşan lazer darbe sıkıştırıcıda sıkıştırıldıktan sonra ortalama gücü yaklaşık 150 mW, darbe genişliği 35 fs ve tekrarlama frekansı 50 MHz olan lazer ısınmı, teleskoptan geçirilerek 30 cm uzunluğundaki PCF'in içine gönderildi. Teleskop ve nümerik açıklık (NA) değeri 0.65 olan mikro objektif kullanımıyla lazer demeti %30'a varan verimle PCF içine sokulabilirdi. PCF çıkısındaki geniş spektrumlu SC lazer demetinin taraklarının "ofset" vuru sinyalinin frekansının kilitlenmesi amacıyla $\omega - 2\omega$ optik interferometresi kuruldu. Bu kapsamda PCF çıkısındaki SC lazer demeti dikroik ayna ile iki yola ayrıldı. Düşük dalgaboylu (2ω) lazer demeti optik yolun ayarlandığı optik kanaldan geçirilerek %50 ısınm bölücüye gönderildi. Yüksek dalgaboylu (ω) SC ısınm demeti ise ikinci harmoniğinin üretilmesi amacıyla doğrusal olmayan PPLN kristalin bulunduğu ikinci optik kanaldan geçirildi ve ikinci harmoniği (2ω) üretildi. Her iki optik kanaldan gelen lazer ışınmaları %50 optik bölücüde bir araya getirilerek iç-içe ilerleyen paralel demetler şeklinde f_{CEO} frekansındaki RF sinyalinin üretimi için kurulan kırınım ağına ve daha sonrada hassas foto alıcıya (APD) gönderildi. PPLN kristali dar spektral bantta ısınm ürettiği için birinci kanaldan gelen diğer dalgaboylu ışınmaların elenmesi ve hassas foto alıcıda ek gürültü üretmemesi için kırınım alıcı önünde kırınım ağı ve diyafram (iğne deliği) kullanıldı. APD çıkısındaki f_{CEO} frekansındaki RF sinyali daha sonra analiz edilmek üzere spektrum analizöre, frekans kitlemesinde kullanılmak için de elektronik servo sistemine gönderildi. $\omega - 2\omega$ optik interferometresi çıkısında bulunan %50 ısınm bölücünden diğer tarafa ayrılan milyonlarca lazer tarakları içeren

geniş spektrumlu SC ışınım demeti, CW lazerlerin mutlak frekans ölçümünde kullanılmak üzere kurulan vuru optik düzeneğine gönderildi. f_s tarak sisteminin lazer taraklarının tekrarlama frekansının (50 MHz) Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyaline kilitlenmesinde ise lazer osilatörün %5 fiber optik çıkışı kullanılmaktadır. Bu çıkıştaki lazer ışınımı foto alıcıda algılanmış ve gözlenen f_{rep} RF sinyali daha sonra analiz edilmek üzere spektrum analizöre, frekans kilitlenmesinde kullanılmak için de elektronik servo sistemine gönderildi.

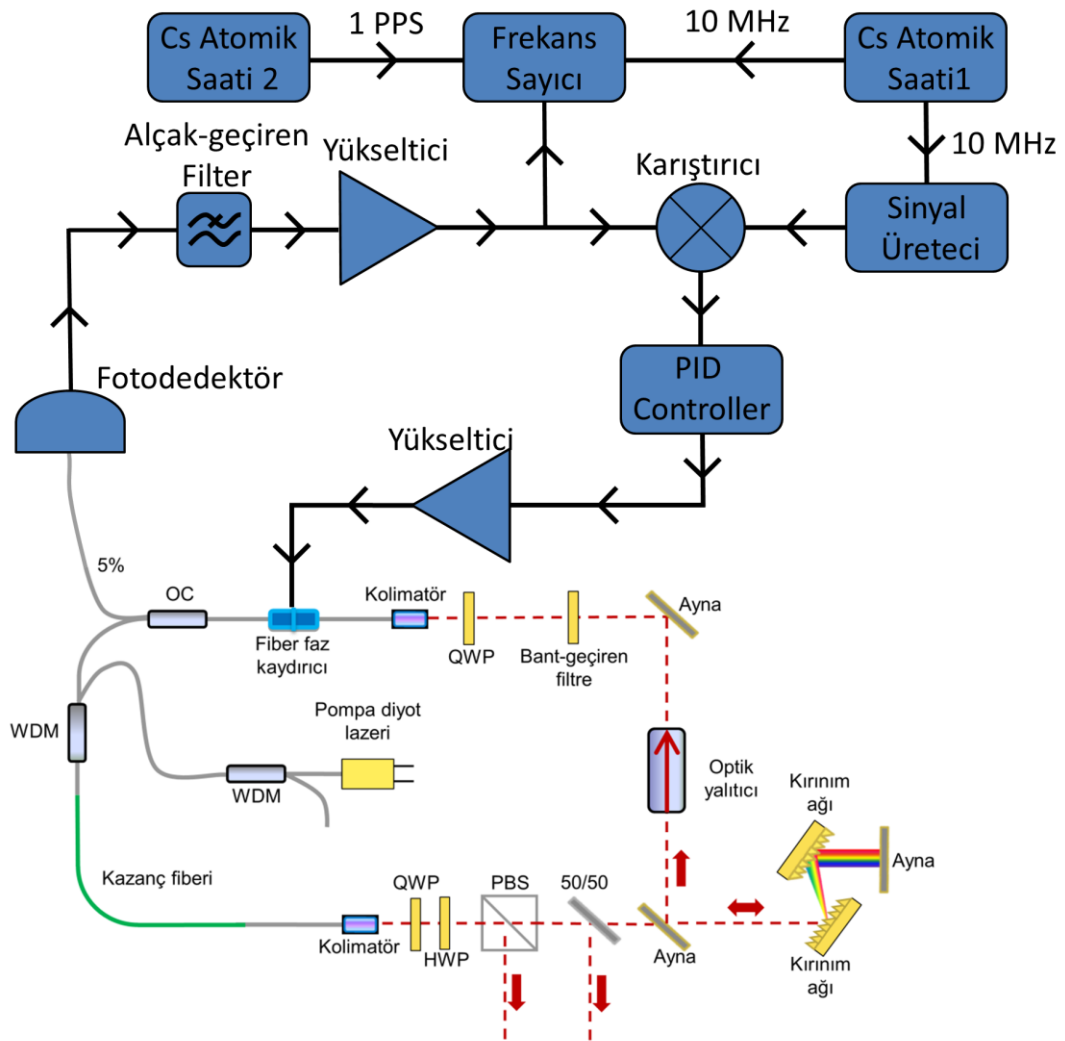


Şekil 4.1. Tasarlanan ve kurulan f_s tarak sisteminin optik blok diyagramı.

4.2. Fs Optik Frekans Tarakları Üreticisinin Tekrarlama Frekansının Cs Atomik Saatine Kilitlenmesi

Kurulan 33 fs optik frekans tarakları üreticisi ile 600 - 1600 nm spektral aralığında tekrarlama frekansı 50 MHz olan (başka deyişle 50 MHz aralıklarla) on milyondan fazla darbeleri lazer ışınımları üretildi. Giriş bölümünde (1.1) ifadesi ile verildiği gibi f_n frekans değerindeki lazer tarak taraklarının frekansı $f_n = f_{CEO} + (n \times f_{rep})$ olarak bilinmektedir. Geniş spektrumlu SC lazer ışınım taraklarının frekansının Cs atomik saatine kilitlenmesi için aynı zamanda hem f_{rep} tekrarlama frekansının hem de f_{CEO} "ofset" frekansının kilitlenmesi gereklidir [4]. Bölüm 2.4'de Yb katkılı ANDi fiber lazerinin tekrarlama frekansının Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyaline kilitlenmesi teknikleri açıklandı ve frekans kararlılık sonuçları verildi. Burada ise nihai şekliyle kurulan fs tarak sisteminde kullanılan ve sistemin ana osilatörü olarak yer alan spektrumu gerilimli similariton lazerinin tekrarlama frekansına kilitlenmesi açıklanacak ve frekans kararlılığı analiz edilecektir. Deney düzeneğinin blok şeması şekil 4.2'de verilmiştir. Lazer osilatörü olarak kullanılan spektrum gerilimli similariton lazerinin % 50 (50/50) çıkışı lazer yükseltece SC ışınımının üretimi amacıyla gönderildi. % 5'lik fiber çıkışı ise lazer taraklarının tekrarlama frekansının kilitlenmesi için kullanıldı. Lazer darbeleri hızlı (1.3 GHz) foto detektörde algılandı ve 50 MHz aralıklarla gözlenen RF sinyalleri spektrum analizörle incelendi. Genliği yaklaşık 50 db olan RF sinyal tarakları alt-geçiren filtreden (<60 MHz) geçirilerek gözlenen 50 MHz RF sinyali yükseltici (>20 dB) ile güçlendirildi. Güçlendirilen sinyalin bir kısmı frekans ölçümü ve analizi için sayıcıya diğer kısmı ise frekans kilitlenmesinde kullanılmak üzere karıştırıcıya (mixer) gönderildi. Frekans karıştırıcının diğer girişine ise Cs atomik saatinden tetiklenmiş sinyal kaynağının 50 MHz frekans değerindeki sinüzoidal sinyali verildi. Sinyal üretici Cs atomik saatinden tetiklendiği için iç osilatör frekansı Cs atomik saatinin 10 MHz referans frekansına faz kilitlenmesi sağlandı. Dolayısı ile atomik saat kararlılığına sahip referans 50 MHz sinyali kullanıldı. Frekans karıştırıcı çıkışındaki sıfır frekansa yakın fark sinyali elektronik kitleme sistemine (PID controller) verildi. Çıkıştaki hata sinyali yükseltilecek tekrarlama frekansını değiştirebilen fiber faz kaydırıcıya verilerek lazer osilatörünün rezonatör uzunluğu sabit tutuldu. Bu otomatik elektronik kitleme sistemi ile lazer tekrarlama frekansının 50 MHz referans frekansa ve

dolayısı ile Cs atomik saatine kilitlenmesi sağlandı. Lazeri dışarıdan ses ve titreşim olarak uyaran akustik dalgaları veya daha yavaş proses olan sıcaklık değişimleri tekrarlama frekansını değiştirmeye çalıştığı zaman elektronik kilitleme sistemi çıkışında oluşan ters hata sinyali ile lazer frekansının değişimi otomatik olarak engellenmektedir. Bu engellemelerin verimi ve dolayısı ile lazer frekans kararlılığı elektronik olarak engellenmektedir. Bu engellemelerin verimi ve dolayısı ile lazer frekans kararlılığı elektronik sisteme verilen sinyalin genliği ve gürültüye oranı ile, elektronik sistemin kazancı ve entegrasyon ile zamanı ayarlandı.

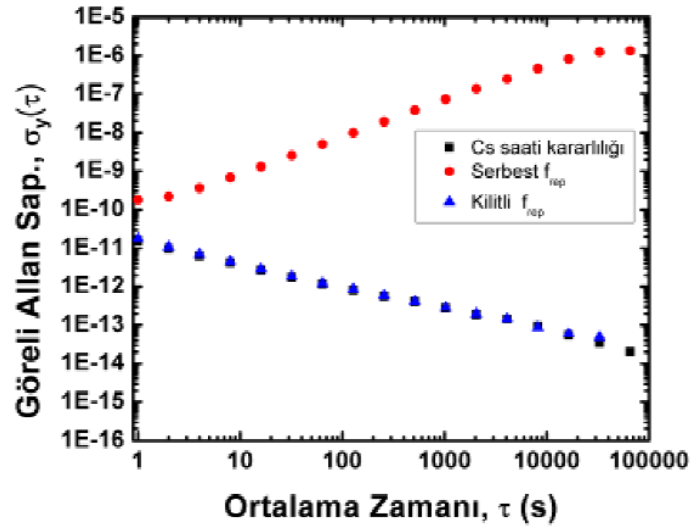


Şekil 4.2. Fs optik frekans tarakları üreticisinin tekrarlama frekansının Cs atomik saatine kilitlenmesi düzeneğinin blok şeması.

Lazer frekans kararlılık ölçümü ve analizi ise bölüm 2.4' de açıklandığı gibi yapıldı. Lazer frekans kilitlenmesi yapılmadan serbest çalışan lazerin frekansı ölçülürken

sayıcı frekans ölçüm modunda çalıştırıldı. Sayıcının iç osilatörünün salınımın engellenmesi için sayıcı, birinci Cs atomik saatinin 10 MHz referans sinyali ile tetiklendi. Sayıcı bilgisayar kontrollü çalıştırılıp serbest çalışan lazerin tekrarlama frekansı saniyede bir veri alınacak şekilde birkaç gün boyunca aralıksız ölçüldü. Veriler Allan sapması istatistiği ile analiz edilerek tekrarlama frekansının ortalama zaman göre kararlılığı hesaplandı ve sonuçlar Şekil 4.3'de verildi. Şekilden görüldüğü gibi serbest çalışan lazerin tekrarlama frekans kararlılığı 1 saniye ile 65536 saniye ortalama zaman arasında sırasıyla 1.8×10^{-10} ile 1.3×10^{-6} arasında değişmiştir. Spektrum gerilimli lazer sıcaklık kontrollü ANDi lazerinden farklı olarak dış sıcaklık ortamından daha çok etkilendiği ve lazer frekansının sistematik kayma gösterdiği görüldü. Lazerlerin bulunduğu laboratuvarın sıcaklık değişimi atomik saatlerin bulunduğu laboratuvara göre de gün boyunca daha fazla değiştiği gözlemlendi ($\pm 1^\circ$ C). Bu sebepten dolayı da atomik saatin bulunduğu laboratuvarında çalışan serbest ANDi lazerinin frekans kararlılığı daha iyi bulundu. Ancak bu farklılara rağmen fs tarak sisteminde kullanılan spektrum gerilimli similariton lazerinin serbest çalışma modundaki frekans kararlılığı Ti:Sa fs lazerine göre en az 10 kat daha iyidir. Lazerin kısa vadeli frekans salınımı 1 Hz civarında olup gün boyunca değişimi 100 Hz'i aşmamaktadır. Serbest çalışma rejiminde bu tür değişimler lazer ve fs tarak sisteminin frekansa kilitlenmesine, SC ışının üretilmesine, "ofset" vuru sinyalinin gözlenmesine ve ön analizine fazlasıyla yeterlidir. Lazer tekrarlama frekansının Cs atomik saatinin referans 10 MHz frekansına kilitlenmesi sağlandığı zaman, tekrarlama frekansının kararlılığı dramatik bir şekilde iyileştiği ve atomik saat kararlılığına ulaştığı gözlemlendi (Şekil 4.3). Lazer tarakları arasındaki frekans farkının (tekrarlama frekansının) kararlılığını Cs atomik saat kararlılığı ile kıyaslandırmak amacıyla öncelikle 2 saat arasındaki frekans kararlılığı ölçülmüş ve sonuçlar analiz edilerek Şekil 4.3'de siyah kareler şeklinde işaretlendirildi. Daha sonra lazer tekrarlama frekansı Cs atomik saatine kilitli iken ölçümleri alınmış ve sonuçlar aynı şekilde kırmızı üçgenler ile işaretlendirildi. Bu ölçümler sırasında sayıcı zaman aralığı ölçümü modunda çalıştırıldı. Bu ölçümlerde frekansı ölçülen sinüzoidal sinyalin (10 MHz 1. atomik saat için, 50 MHz lazer için) 2. Cs atomik saatinin 1 pps sinyaline göre faz kayması incelendi. Ölçüm sonuçlarından görüldüğü gibi frekans kilitli lazerin tekrarlama frekansının kararlılığı ile atomik saat kararlılığı örtüşmekte ve fs tarak sisteminin

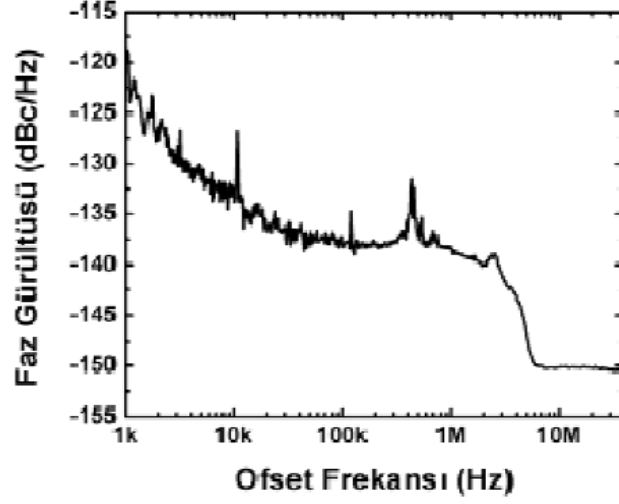
tarakları arasındaki frekans farkının (f_{rep}) kararlılığı 1 saniye ile 32768 saniye arasında atomik saatte olduğu gibi 1.8×10^{-11} ile 4.9×10^{-14} arasında değişmiştir. Göreli Allan sapmasının, başka deyişle frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişim grafiğini incelediğimizde kilitlenmiş lazerin frekansındaki değişimler veya salınımlar beyaz gürültü gibi davrandığı gözlemlendi. Ortalama zaman arttıkça kararlılık logaritmik ölçekte doğrusal olarak artmaktadır. Frekansın kilitlenmesi sırasında fliker salınımları ve frekans kaymaları elektronik kitleme sistemi ile yok edildi. Sonuç olarak kurulan Yb fiber lazer temelli fs optik frekans tarağı üreticinin tarakları arasındaki frekans farkı ulusal Cs atomik saatine kilitlenmesi sağlandı.



Şekil 4.3. Fs optik frekans tarakları üreticisinin veya lazer osilatörünün tekrarlama frekansının ortalama zamana göre frekans kararlılığı.

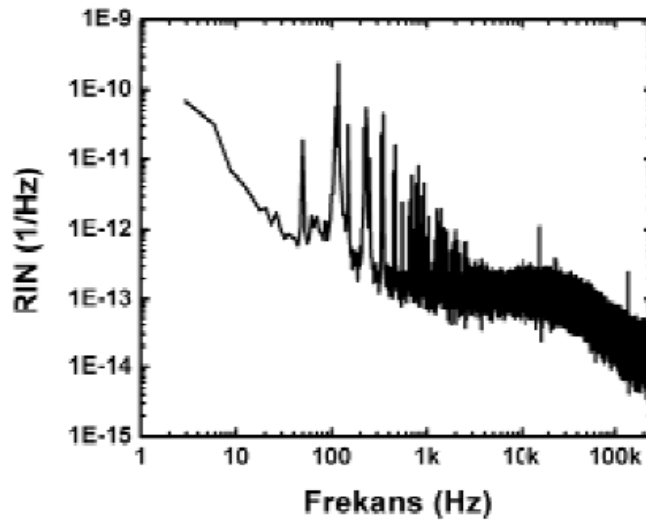
Kurulan fs tarak sisteminde lazer osilatörünün tekrarlama frekansının kararlı hale getirilmesinin yanı sıra bu lazer osilatörü ile üretilen geniş spektrumlu SC ışınımının koherentliğinde çok büyük önem taşıyan frekansın çok kısa zaman aralığındaki (1 ns - 1 ms) hızlı salınımları veya faz gürültüsü, lazer ışınımının genlik gürültüsünün de araştırılması ve analizi önemlidir. Bu sebeplerden dolayı spektrumu gerilimli similariton lazer osilatörünün de faz gürültüsü ölçüldü ve ölçüm sonuçları şekil 4.4'de verildi. Lazerin faz gürültü ölçümlerinde tekrarlama frekansının 16. harmoniğindeki (800 MHz) RF sinyali kullanılmış ve gürültü analizi 1 kHz - 25 MHz frekans aralığında yapıldı. Sonuçlardan görüldüğü gibi faz gürültüsü -120 dBc/Hz ile -150 dBc/Hz arasında değişmiştir. 1 kHz - 25 MHz ölçüm aralığında toplam hızlı

salınım değeri 76 fs olarak hesaplandı. Başka bir deyişle 40 ns - 1 ms ölçüm aralığında 20 ns periyotla üretilen lazer darbelerinin yaklaşık 76 fs hızlı salınım yaptıkları tespit edilmiştir.



Şekil 4.4. Yb katkı spektrumu gerilimli similariton fiber lazerin 800 MHz frekans değerindeki RF sinyalinin faz gürültüsü spektrumu.

Lazer darbelerinin genlik gürültüsü 3 Hz ve 250 kHz arasında ölçüldü (Şekil 4.5) ve integralenmiş ışınım gürültüsü sinyalinin gücünün toplam güce oranı olarak bilinen bağıl gürültü oranı (relative intensity noise) $RIN = 0.017\%$ olarak ölçüldü. Bu değer ANDi lazerine göre yaklaşık 5 kat daha küçüktür.

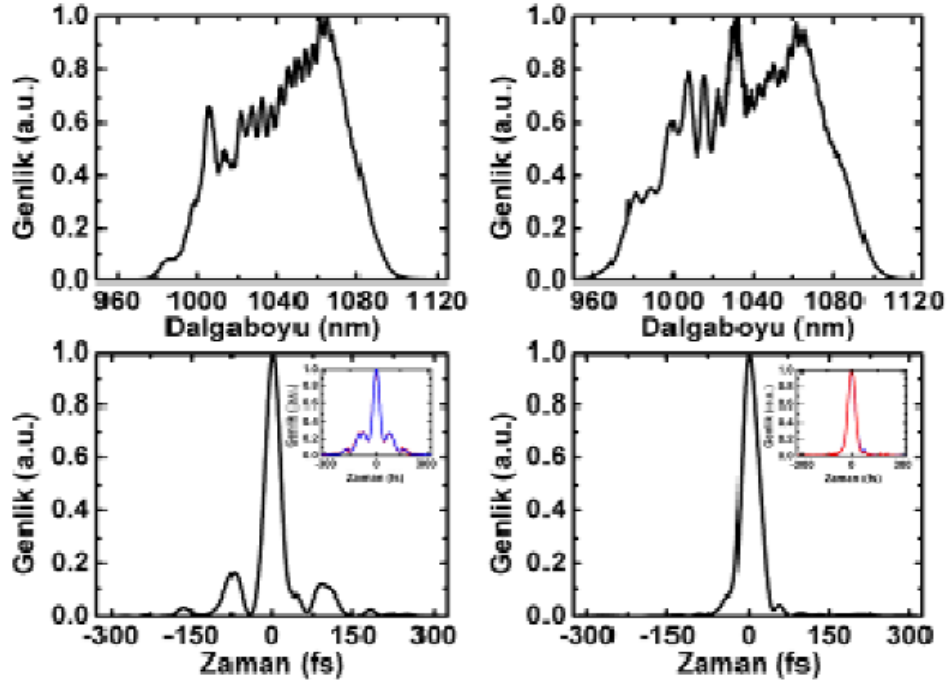


Şekil 4.5. Yb katkı spektrumu gerilimli similariton fiber lazerin bağıl gürültü oranının (RIN) spektrumu.

4.3. $\omega - 2\omega$ İnterferometrik Sistem ile "Ofset Vuru" Sinyalinin Gözlenmesi ve Frekansının Cs Atomik Saatine Kilitlenmesi

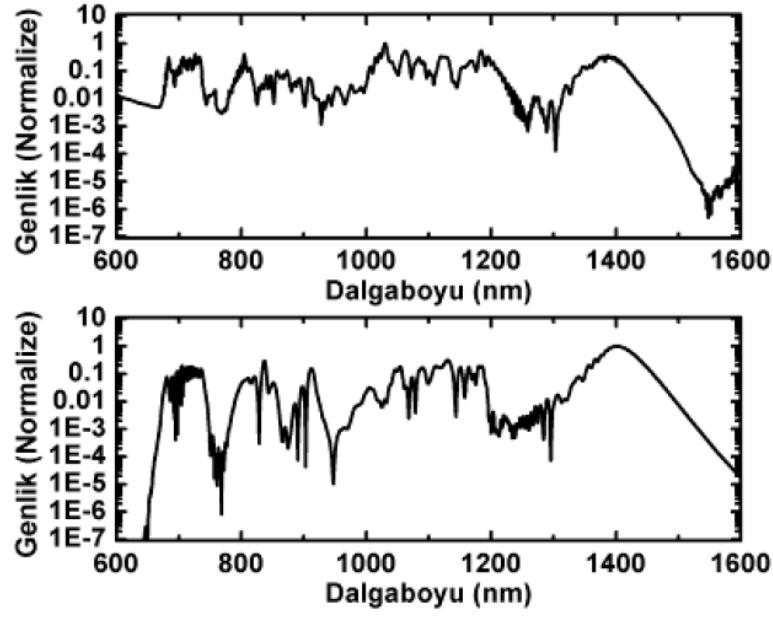
Fs tarak sisteminin optik deney düzeneğinin blok diyagramında gösterildiği gibi (Şekil 4.1) frekansı kilitli lazer osilatörünün çıkış ışınımı yükseltilerek sıkıştırılan ve geniş spektrumlu ışımının üretimi için PCF'e gönderildi. Daha önce de vurgulandığı gibi fs tarak sisteminin üretiminde en önemli kriter koherent SC ışımının üretimi ve bu ışınımın $\omega - 2\omega$ interferometrik sistemde yeterli seviyede "ofset vuru" sinyalinin gözlenmesidir. Koherent SC ışımın üretimi düşük gürültülü ve dar (<100 fs) darbeleri lazer ışımının uygun PCF'e gönderilmesi ile elde edilmektedir. Genelde lazer osilatörü ile dar darbeler üretilebilirse bile özellikle fiber lazerlerin çalışma prensibi için temel teşkil eden doğrusal olmayan etkiler, bu darbelerin elde edilmesi için çok zor bir problem olarak ortaya çıkmaktadır [26].

Şekil 4.1'de lazer osilatör sonrasında kurulan yükselteç parametreleri lazer osilatör parametrelerine yakın tutularak osilatörden gelen ana sinyali taklit edip atımların koherentliği için avantaj sağladı. Lazer çıkış demeti kolimatörden ve 250 cm uzunluğundaki HI-1060 model fiberden, 650 mW pompa lazer ışımının verdiği 980/1030 nm dalgaboyu çoklayıcıdan geçtikten sonra ana lazerde olduğu gibi toplam 350 cm yol ilerlememiş olur. Daha sonra darbeler 40 cm uzunluğundaki Yb1200-4/125 kazanç fiberinde yükseltildi. Lazer osilatörden farklı olarak bu kazanç fiberi 10 cm daha uzun seçildi ve bu yöntemle darbe şekli ve spektrumu çok bozulmadan ışımın güçlendirildi. Kazanç fiberinden sonra 18 cm uzunluğunda fiber sonrasında çıkış kolimatörde 335 mW ortalama lazer gücü elde edildi ve bir çift kırınım ağı yardımıyla sıkıştırıldı. Şekil 4.6'de hem lazer osilatörünün (sol taraftaki grafikler), hem de lazer yükselteç sistemi ile birlikte elde edilen (sağ taraftaki grafikler) spektrumları ve sıkıştırılmış darbeleri verildi. Lazer osilatör darbeleri 600 çizgi/mm kırınım çifti 33 fs değerine kadar sıkıştırılırken yükselteç sonrasında elde edilen daha simetrik şekilli darbeler 300 çizgi/mm kırınım çifti 35 fs değerine kadar sıkıştırılabildi. Böylece lazer atımları, bilinen kuantum limit değerlerine yaklaşarak en kısa olduğu hale yaklaştı.



Şekil 4.6. Spektrumu gerilimli similariton lazer osilatörünün (sol taraftaki grafikler) ve optik yükselteç sisteminin (sağ taraftaki grafikler) spektrumları ve sıkıştırılan darbeleri.

Güçlendirilen 35 fs lazer darbeleri 30 cm uzunluğundaki SC-3.7-975 model tek saçılımlı PCF'e gönderilerek 62 mW ortalama güce sahip SC ışması elde edildi. 600 nm - 1750 nm aralığında çalışan optik spektrum analizör ile ölçülen SC ışması spektrumu şekil 4.7'de verilmiştir. Lazer darbe parametrelerinin ve PCF özelliklerinin dikkate alınması ile simülasyonu yapılarak hesaplanan SC ışmasının spektrumu simülasyon sonuçları ile uyum sağlanmaktadır [27]. Deneysel spektrumun alt tarafında 600 nm - 700 nm sinyal yüksekliği cihazın ölçüme etkisi ile yorumlanabilir. Diğer dalgaboyu değerlerinde deneysel ve teorik spektrumlar üzerindeki özelliklerin çakışması sonuçların uyumunun çok iyi göstergesidir. Üretilen SC ışması 700 nm - 1400 nm aralığından fazla olduğu için bu spektrum ofset vuru sinyalinin gözlenebilmesi şartını sağlar. SC ışması üretilirken 1400 nm dalgaboyundaki ışmanın ikinci harmoniğini üreten PPLN kristalinin özelliği dikkate alındı. Başka bir deyişle 700 nm - 1400 nm bölgesinde ışınım gücünün yüksek olması $\omega - 2\omega$ daha güçlü RF "ofset vuru" sinyalinin gözlenmesini sağlayacaktır.

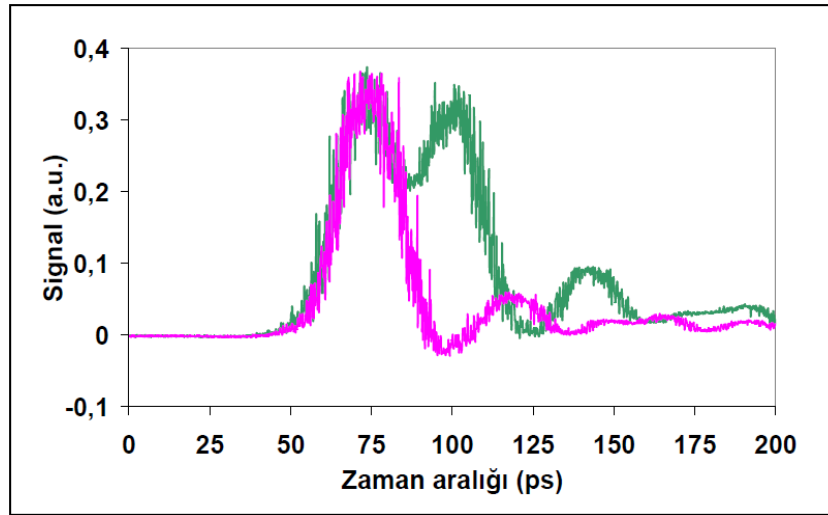


Şekil 4.7. 35 fs lazer darbeleri ile 30 cm uzunluğundaki SC-3.75-975 model PCF çıkışında ölçülen SC spektrumu (üstteki grafik) ve simülasyon sonuçları (alttaki grafik).

PCF çıkışındaki geniş spektrumlu SC lazer ışınımı dikroik ışın bölücü ile iki kısma ayrıldı. Dikroik ışın bölücünden yansıyan ışınımın spektrumu 1000 nm ve üstü dalgaboyunu kapsamakta olup geçen ışınımın spektrumu ise 1000 nm ve alt dalgaboyu bölgelerini kapsamaktadır. Yansıyan lazer ışınımı 1400 nm değerinde etkin ikinci harmonik üreten 1 cm uzunluğundaki PPLN kristalinden geçirilerek 700 nm dalgaboyunda ikinci harmonik üretildi. Dikroik ışınım bölücünden geçen lazer demeti ile PPLN kristal kanalından gelen lazer demetleri ışın bölücüde birleştirilerek paralel ilerlemesi sağlandı. İnterferometrenin iki kanalından gelen ve iç içe ilerleyen lazer ışınimleri kırınım ağı üzerine düşürülerek uzayda spektruma göre ayrışımı saplandı. Ayrışan ışınımlardan 700 nm dalgaboyunda olan ışınımlar hızlı fotodetektör üzerine düşürülerek iki kanaldan gelen lazer demetleri arasındaki $\omega - 2\omega$ RF vuru (ofset vuru) sinyali analiz edebilmesi için spektrum analizöre gönderildi. Ofset vuru sinyalinin gözlenebilmesi için dar lazer darbeleri ile üretilen koherent SC ışınımın yanı sıra ek üç önemli temel şartın yerine getirilmesi gereklidir: Bunlardan birincisi her iki koldan gelen lazer ışınımlarında yeterli gücün olması, ikincisi geometrik olarak her iki demetin iç içe paralel şekilde ilerlemesi ve üçüncüsü ise her iki koldan gelen lazer darbelerinin zaman ölçeğine hızlı fotodiyotta üst üste

gelebilmelidir. Birinci ve ikinci şartların sağlanmasının ardından üçüncü şartın yerine getirilmesi amacıyla lazer darbeleri 25 GHz frekansa sahip hızlı fotodiyot üzerine düşürüldü ve her iki optik koldan gelen lazer darbe sinyalleri 50 GHz frekans bandına sahip dijital osiloskopta algılandı.

Aşağıdaki şekil 4.9’de hızlı osiloskopta ölçülen lazer darbe sinyalleri verilmiştir. Lazer demetlerinin ilerlediği optik yollar 3 mm yol farkı gösterdiğinde darbeler bir birine göre 10 ps geçikme gösterdiğinden bu yol farklarının hassas bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Lazer darbe genişliği 1 ps ve altı durumlarda bu ayarlar çok daha hassasiyet gerektirmektedir. Bu ölçümlerde yapılan ön ayarlardan sonra algılanan lazer darbe genişliği daha çok kullandığımız fotodiyodun frekansı ile sınırlanmaktadır ve yaklaşık 25 ps olarak ölçüldü. Şekil 4.8’de kırmızı renk ile gösterilen sinyal birinci koldan algılanan lazer darbesidir. Yeşil renk ile her iki koldan gelen lazer darbelerinin fotodiyotta algılanması oluşan kümülatif sinyaldir. Görüldüğü gibi birinci koldan gelen darbeler ikinci koldan gelen darbelere göre yaklaşık 30 ps geri kalmaktadır. Bu zaman farkı iki kol arasındaki 9 mm yol farkına uygun gelmektedir.

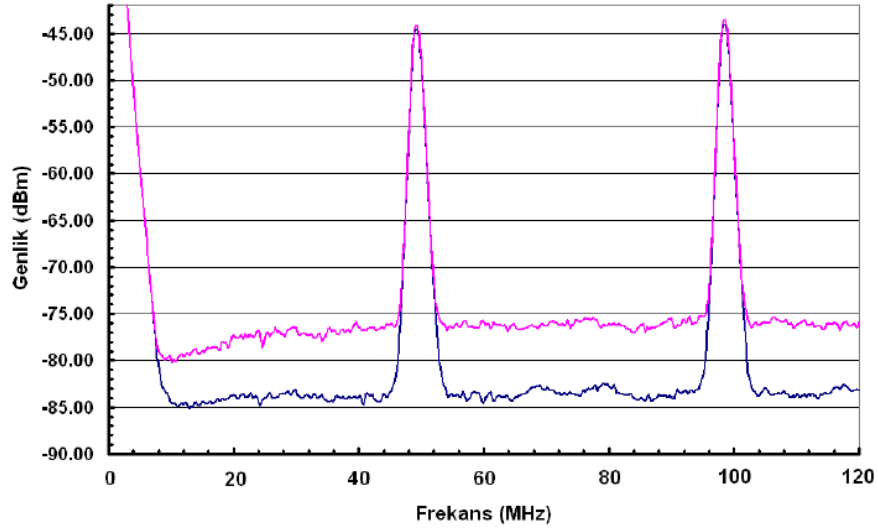


Şekil 4.8. $\omega - 2\omega$ interferometresinin iki optik yolunda ilerleyen lazer darbe sinyallerinin zaman ölçeğindeki durumları.

Deney sırasında interferometrenin $\omega - 2\omega$ iki kanalından gelen lazer darbelerinin aynı zamanda hızlı detektöre ulaşmasını sağlamak amacıyla ω kanalı uzunluğu mikron hassasiyetle ayarlanabilir hareketli platform üzerine montaj edilmiş retro yansıtıcı ayna kullanımıyla ayarlanmıştır. Lazer darbe genişliği 100 fs ve üzeri olduğunu esas

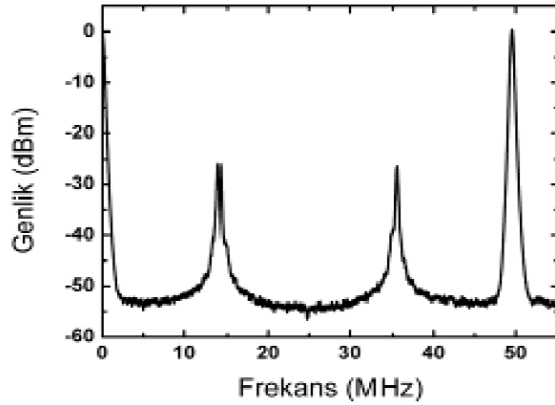
alırsak mesafenin en az 30 mikrometre belirsizlikle ayarlanması ve kanalların optik uzunluğunun eşitlenmesi gereklidir.

Her iki kanaldan gelen 700 nm lazer ışınımlarının güçleri yaklaşık 30 μ W değerine ayarlandı. Daha önce belirttiğimiz gibi yeterli güçte lazer darbelerinin spektral olarak çakışması ve aynı zamanda algılanması $\omega - 2\omega$ vuru sinyalinin gözlenmesi için yeterli değildir. Her iki kanaldan gelen 700 nm ışınımları koherent değilse ve gürültü seviyesi yüksek ise vuru sinyali gözlenmeyebilir. Şekil 4.9'da koherent olmayan SC ışınması ile bu durumu kanıtlayan örnek sonuçlar verilmiştir. Lazerin istenilen rejimde çalışmadığı durumda ve lazer darbelerinin geniş olduğu durumlarda geniş spektrumlu SC ışınmasının üretilmesine rağmen hızlı detektörde 50 MHz ve 100 MHz frekans değerinde - 45 dBm lazer tekrarlama vuru sinyalleri gözlenmektedir. Lazer darbeleri zaman ölçeğinde örtüşmüyorsa veya aynı anda hızlı detektörle algılanmıyorsa $\omega - 2\omega$ vuru sinyali gözlenmiyor ve spektrum analizördeki gürültü seviyesi - 85 dBm civarındadır (mavi renkli spektrum). İnterferometre kanal uzunluğu eşitlendiğinde ve lazer darbeleri aynı anda algılandığında gürültü seviyesinin yaklaşık 10 dB arttığı gözlenmektedir (kırmızı renkli spektrum). Aslında bu durumda tekrarlama sinyalleri arasında beklenen $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalleri geniş spektrumlu koherent olmayan gürültü olarak ortaya çıkmıştır. Lazerinin çalışma rejimi optimize edilerek dar ve düşük gürültülü lazer darbeleri ile uygun seçilen PCF çıkışında koherent SC ışınması üretmek mümkündür. Yapılan araştırmamızda darbe kalınlığı <100 fs olan similariton lazer darbeleri ve <30 cm uzunluğundaki SC-3.7-975 model PCF çıkışında koherent SC ışınması üretmek ve 20 dB'nin üzerinde $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalini gözlemek mümkün olmuştur. Burada belirtmemiz gereken önemli bir husus vardır. Yb fiber lazer tarak sisteminin kurulmasının ve bu sistem ile CW lazerlerin mutlak frekans ölçümünün yapılması için hem lazer tekrarlama frekansı, hem $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalinin frekansı sayıcı ile hassas bir şekilde ölçülmesi (<100 Hz) gereklidir. Şu anda laboratuarda yaygın olarak kullanılan sayıcıların düşük belirsizlikle bu frekansları ölçebilmeleri için giriş sinyalinin genlikleri 25 dB'den yüksek olması gerektiği tecrübe ile bilinmektedir.



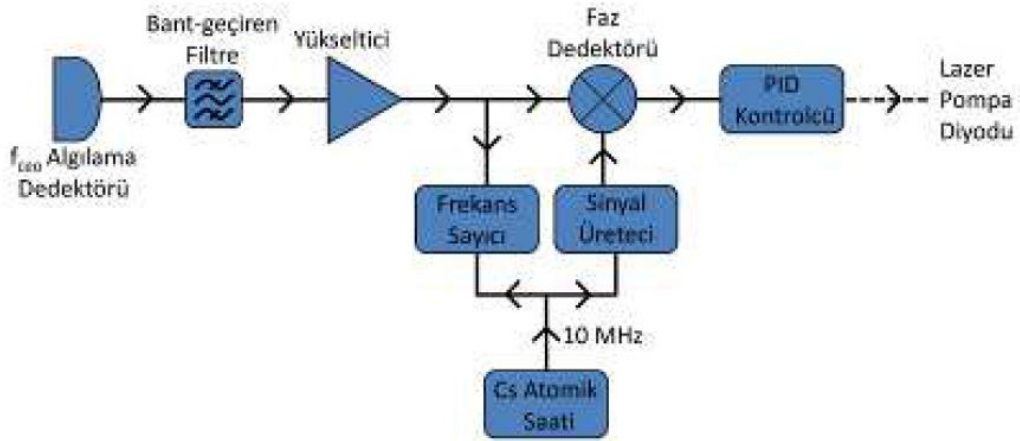
Şekil 4.9. Koherent olmayan SC ışması ile gözlenen lazer tekrarlama sinyalinin RF spektrumu ve gürültülü $\omega - 2\omega$ ofset vuru sinyalleri.

Tasarlanan 35 fs darbeleri lazer sisteminin kullanımıyla 30 dB $\omega-2\omega$ ofset vuru sinyalleri gözlemlendi. Bu sonuç 95 fs darbeleri similariton lazer sistemiyle gözlenen 22 dB vuru sinyalinden 8 dB daha fazladır ve frekans sayıcı için gerekli olan kritik değerden büyüktür. Şekil 4.10'da 50 MHz değerindeki f_{rep} , RF sinyali fs tarak üreticinin lazer taraklarının arasındaki vuru sinyaline uygun gelmektedir. Bu sinyalin genliği 50 dB'den fazladır ve lazer tekrarlama frekansının kilitlenmesinde kullanılmaktadır. $\omega-2\omega$ interferometresi ile algılanan ve f_{CEO} frekansındaki $\omega-2\omega$ RF vuru sinyali ise tekrarlama sinyalinin arasında gözlenmektedir. Taraklar arasındaki simetrik iki ofset RF sinyalinin gözlenmesi ise bu sinyal ile tekrarlama sinyalleri arasındaki sinyal karışımı sonucunda ortaya çıkmaktadır [28,29].



Şekil 4.10. 35 fs lazer darbeleri ile üretilen SC ışmasının tekrarlama sinyallerinin ve $\omega-2\omega$ ofset vuru sinyallerinin RF spektrumları.

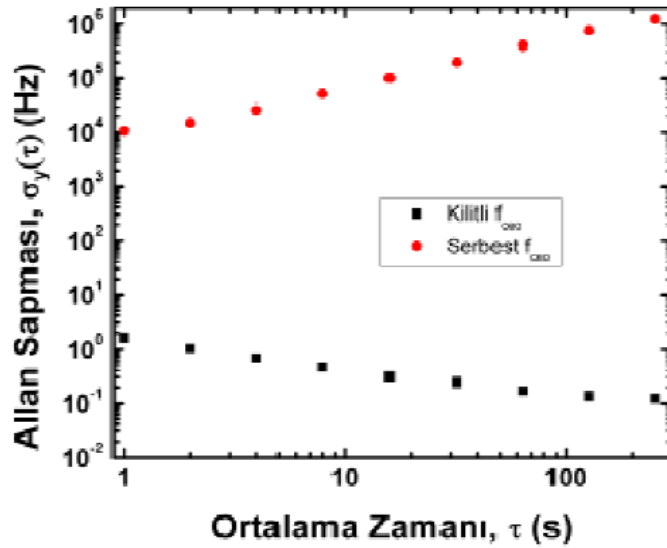
f_s tarak sisteminin tüm lazer tarak kümesinin $f_n = f_{CEO} + (n \times f_{rep})$ frekansını Cs atomik saatin 10 MHz referans frekansına kilitlemek için f_{rep} tekrarlama frekans kilitlemesinin yanı sıra f_{CEO} "ofset" frekansının da kilitlemesi gereklidir [30]. Bu amaçla blok şeması aşağıdaki Şekil 4.11'de gösterilen elektronik sistem kuruldu. Öncelikle lazer akımının değişimi ile detektörde algılanan f_{CEO} RF sinyalinin frekansı spektrum analizör kullanımıyla 30 MHz frekans değerine ayarlandı ve elektronik sistemde kullanılan bant geçiren filtreden geçirilerek <20 dB daha güçlendirildi. Bant geçiren filtrenin kullanımıyla diğer RF sinyallerinin faz detektöre ve tekrarlama frekansını ölçen sayıcıya girişi engellenir. Faz detektöre Cs atomik saatinden tetiklenmiş sinyal üreticiden 30 MHz frekans değerinde sinüzoidal verildi. Faz detektörü çıkışında oluşan fark sinyali ise PID kontrolcüye verilerek çıkışta oluşan hata sinyali lazer osilatörü besleyen pompa diyot lazerin akımı kaynağına verildi.



Şekil 4.11. f_{CEO} RF sinyalinin frekansının Cs atomik saatinde kilitlemesinde kullanılan elektronik sistemin blok şeması.

Bu yöntemle pompa diyot lazerin gücü ve dolayısıyla osilatör lazerin ofset vuru sinyalinin f_{CEO} frekansına etkisi otomatik olarak kontrol altına alındı. Herhangi bir sebepten dolayı f_{CEO} frekansı Cs atomik saatinden tetiklenmiş sinyal kaynağının üretmiş olduğu 30 MHz frekans değerinden farklı olduğunda elektronik sistem çıkışında oluşan hata sinyali pompa lazerin akımına ters yönde etki ederek f_{CEO} frekansının 30 MHz değerine otomatik ayarı sağlamaktadır. f_{CEO} frekans değerindeki "ofset" RF sinyalinin Cs atomik saatinde kilitlemeden önceki ve sonraki frekans kararlılık sonuçları Şekil 4.12'de verildi. Ölçümler sırasında RF sinyalinin f_{CEO}

frekansı Cs atomik saatinden tetiklenmiş bilgisayar kontrollü sayıcı kullanıldı ve sonuçlar Allan sapması istatistiksel analiz yöntemi ile ele alındı. Bu ölçümler sırasında ayrıca lazerin tekrarlama frekansı da Cs atomik saatine kilitlendi. f_{CEO} frekansı Cs atomik saatinin referans 10 MHz frekansında kilitlenmeden önce 1 saniye ile 300 saniye ortalama zaman aralığında 10 kHz ile 1 MHz arasında kayma göstermiştir. Aslında sistemin serbest çalışma modunda ölçülen bu değer çok iyi bir değer olup, Ti:Sa femtosaniye tarak ile kıyaslandığımızda en az 10 kat daha olduğu tespit edildi. Lazer frekansı Cs atomik saatine kilitlendiği zaman bu frekans salınımları beklendiği gibi ciddi bir şekilde azaldığı gözlemlendi. Kilitli lazerin frekans kararlılığı serbest lazere göre 10^4 ile 10^8 kat daha iyi olduğu ölçüldü. Kilitli lazerin frekans kararlılığı 1 saniye ile 300 saniye ortalama zaman aralığında 10 Hz ile 0.1 Hz arasında değiştiği gözlemlendi. Sonuç olarak tez çalışması kapsamında frekansı Cs atomik saatine kilitli taşınabilir Yb fiber optik frekans tarağı üretici sistemi geliştirildi ve kuruldu.

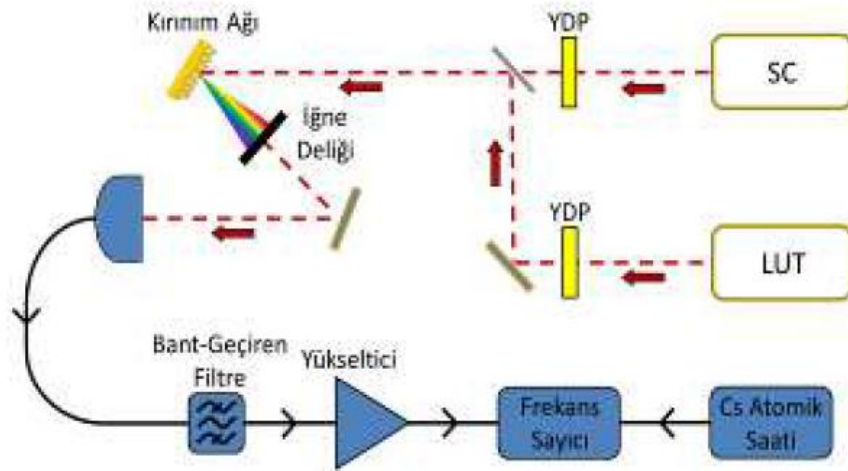


Şekil 4.12. f_{CEO} frekans değerindeki "ofset" RF sinyalinin Cs atomik saatine kilitlenmeden önceki ve sonraki frekans kararlılığının ortalama zamana göre değişimi.

4.4. Cs Atomik Saatine Kilitli Yb Fiber Tarak ile Frekansı Stabilize Lazerin Mutlak Frekans Ölçümü

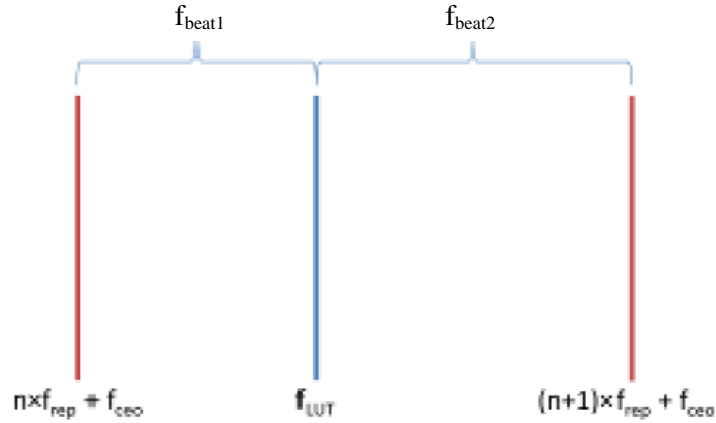
Tez çalışması kapsamında geliştirilen frekansı Cs atomik saatine kilitli optik frekans üreticinin en önemli uygulamalarında biri bu sistemin optik frekans metroloji

uygulamasıdır. Metrolojide RF ve mikrodalga kaynaklarının (<50 GHz) frekansları Cs atomik saatinden tetiklenmiş frekans sayıcıları ile doğrudan ölçülebilmektedir. Daha yüksek frekans değerlerindeki mikrodalga sinyallerinin (<300 GHz) frekans karıştırıcılar ile ölçülebilmektedir. Son 10 yılda geliştirilen ve 2006 yılında Nobel ödülü ile onurlandırılan femtosaniye lazer tarak sistemleri optik frekans sayıcı olarak kullanılabilir olup yaklaşık 500 THz frekans değerlerine sahip elektromanyetik dalga üreten lazer osilatörlerinin mutlak frekansının Cs atomik saatine izlenebilir bir şekilde ölçümüne olanak sağlamıştır. Tez çalışmasında geliştirilen Yb tarak ile lazerlerin mutlak frekans ölçüm düzeneğinin blok şeması Şekil 4.13’de verilmiştir. Femtosaniye Yb lazer tarak üretici çıkış demeti ile frekansının ölçülmesi istenilen lazerin, örneğin frekansı atom veya moleküllerin enerji geçişine kilitli CW lazerin, ışınım demetleri ışınım bölücüsünde bir araya getirilerek iç içe ilerleyecek şekilde kırınım ağı üzerine gönderilir. Yb cobm üreticinin geniş spektrumlu SC ışımalarının kırınım ağındaki 1. derece difraksiyon demetleri lazer taraklarının farklı dalgaboylarında olmasından dolayı uzayda dağılırarak ilerlemektedir. Frekansı sabit CW lazerin 1. derece difraksiyon ışınması ile aynı yönde ilerleyen Yb tarakları iğne deliğinden geçirilerek hızlı detektörde bir araya getirilir. Detektörün hızına veya frekansına bağlı olarak detektör çıkışında CW lazer ile Yb tarak sisteminin tarakları arasında oluşan RF vuru (beat) sinyalleri gözlenmektedir. RF sinyalinin gözlenmesi ve genliğinin en yüksek değere ayarlanması amacıyla her iki lazer çıkışında yarım dalga plakası (YDP) kullanılmış ışınım demetlerinin polarizasyonları eşitlenmiştir.



Şekil 4.13. Geliştirilen Yb tarak ile lazerlerin mutlak frekans ölçüm düzeneğinin blok şeması.

Frekans ölçüğünde, frekansı ölçülecek lazer (f_{LUT}) spektrumu ile Yb tarak üreticinin yakın taraklarını incelediğimizde (Şekil 4.14), hızlı detektör çıkışında iki yakın frekanslı RF vuru sinyalleri gözlenecektir. Bunlardan birincisi (f_{beat1}), frekansı $f_n = (n \times f_{rep}) + f_{ceo}$ olan tarak ile lazer arasındaki vuru sinyali, İkincisi ise (f_{beat2}), frekansı $f_{n+1} = [(n+1) \times f_{rep}] + f_{ceo}$ olan tarak ile lazer arasındaki vuru sinyalidir.



Şekil 4.14. Yb fiber tarak tarakları ve frekansı ölçülen lazer spektrumunun frekans ölçüğündeki durumu.

Deneyler sırasında Yb tarak sisteminin Cs atomik saatine kilitlenmesi sırasında aracı osilatör olarak kullanılan sinyal jeneratörünün frekansını değiştirerek frekans kilitli lazer taraklarının tekrarlama ve ofset frekanslarını belirli değere kadar değiştirmek mümkündür. Bu yöntemle fs tarak ile frekansı ölçülecek lazer arasındaki vuru sinyallerden birinin frekansını (örneğin, f_{beat1}) detektör çıkışında kullanılan bant-geçiren filtre frekansına ayarlamak mümkündür. Daha sonra filtre çıkışındaki RF vuru sinyali yükseltilerek Cs atomik saatinden tetiklenmiş sayıcı ile ölçüldü ve Allan sapması istatistiği ile incelendi.

Geliştirilen Yb tarak sistemiyle ölçümü yapılan lazerin frekansı aşağıdaki formüllere göre hesaplandı;

$$f_{LUT} = (n \times f_{rep}) + f_{CEO} + f_{beat} \quad (4.1)$$

$$f_{LUT} = [(n + 1) \times f_{rep}] + f_{CEO} - f_{beat} \quad (4.2)$$

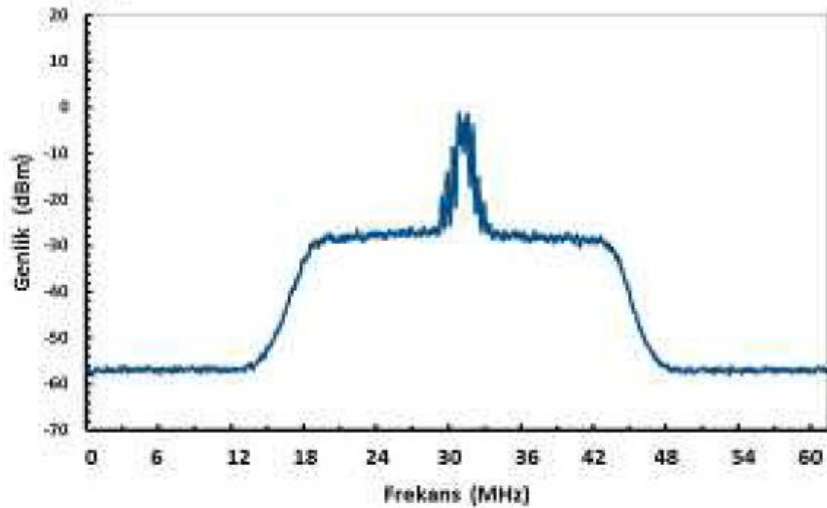
Ölçümler sırasında lazer frekansı hakkında ön bilgi yoksa lazer dalga boyu, monokromatör veya diğer dalga ölçer ile ölçülerek formülde kullanılacak n katsayısı belirlenir. Daha sonra f_{rep} , f_{CEO} ve f_{beat} frekanslarının paralel ölçümleri yapılarak

formülde kullanılacak vuru sinyalinin frekansının işaretinin belirlenmesine yönelik olarak ek çalışmalar yapılır. Bu kapsamda frekansı kilitli tarak sisteminde f_{rep} ve f_{ceo} frekansları sinyal kaynağının kullanımıyla kontrollü olarak değiştirilerek vuru sinyalinin frekansındaki değişim izlenir ve lazer frekans hesaplamasında kullanılacak uygun formül seçilir.

Frekansı 50 MHz'den az belirsizlikle bilinen veya frekansı atom ve moleküllerinin enerji geçişlerine kilitlenmiş lazer ölçümlerinde n katsayı değeri doğrudan ön hesaplama ile belirlenir. Sayıcılar ile f_{rep} , f_{CEO} ve f_{beat} frekans değerleri ölçülerek araştırılan lazerin frekansı hesaplanır. Geliştirilen Yb optik frekans tarağı üreticisinin optik frekans metrolojisi uygulaması olarak frekansı I_2 moleküllerinin R(56)32-0 geçişinin a_{10} rezonansına kilitlenmiş Nd:YAG/ I_2 lazerinin frekansı ölçüldü. Deneylerde kullanılan Nd:YAG lazerinin 1064 nm ve ikinci harmoniği olan 532 nm dalgaboyunda iki çıkış ışınımı vardır. Lazerin 532 nm dalgaboyundaki ışınım demeti içerisinde I_2 gazı olan 10 cm uzunluğundaki kuvars cam küvetten geçirilerek geri yansıtılmış ve foto detektörle algılandı. Nd:YAG lazerinin pompa diyotunun akımının ve sıcaklığının değişimi ile lazer dalgaboyu moleküler geçişe ayarlandı. Daha sonra lazer rezonatör boyu PZT'ye verilen gelim ile taranarak moleküler soğurum rezonansı gözlenmiştir. Lazer frekansı 1 kHz değerinde modüle edilerek ve senkron yükselteç (lock-in amplifier) kullanılarak moleküler soğurum rezonansının 3. türevi elde edildi. Lazer frekansı elektronik servo sisteminin ve soğurum rezonansının 3. türevinin kullanımıyla moleküler geçişe kilitlendi. İki adet benzer parametrelere sahip Nd:YAG/ I_2 lazeri kullanılarak vuru tekniği ile lazerlerin frekans kararlılığı ölçülen ve frekansı etkileyen parametreler araştırıldı. Lazer frekansı, soğurum rezonanslarının kullanımıyla atom veya moleküllerin enerji geçişlerine kilitlendiği zaman lazer-atom/molekül etkileşimi sırasındaki lazer ışınım şiddeti, rezonans gaz basıncı ve atomlar arası çarpışmalar, lazer modülasyon tekniğinde kullanılan modülasyon frekansı ve genliği gibi parametrelerden etkilenmekte ve kaymaktadır. I_2 moleküllerinin R(56)32-0 geçişinin a_{10} rezonansına kilitlenen Nd:YAG/ I_2 lazerleri veya Rb ve Cs atomlarının enerji geçişlerine kilitli dış kaviteli diyot lazerler, I_2 moleküllerine kilitlenmiş He-Ne lazerleri çok sayıda metroloji enstitülerinde uzunluk ve optik frekans standardı olarak kullanıldığı ve karşılaştırıldığı için bu lazerin frekans kitlemesi sırasında uluslar arası ölçüler ve

ayar komitesinin (CIPM) belirlediği parametreler kullanılmaktadır. CIPM'in önerdiği parametrelerde frekansı kilitlenmiş ve TÜBİTAK UME'de uzunluk standardı olarak kullanılan Nd:YAG/l₂ lazerinin frekansı Cs atomik saatine kilitlenmiş femtosaniye Ti:Sa tarak sistemiyle ölçülmüş ve ölçülen (563 260 223 516.4 ± 5) kHz frekans değeri ±5 kHz belirsizlikle CIPM'in önerdiği (563 260 223 513.0 ± 5) kHz değeri ile uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Ölçümlerde kullanılan ve Max-Plank Enstitüsü ile Menlo System firmasının ortaklaşa geliştirdiği Ti:Sa tarak sisteminin SC ışımaya spektrumu 530 nm - 1060 nm aralığındadır ve bu sistem ile 532 nm dalgaboyunda çalışan Nd:YAG/l₂ lazeri arasında yeterli seviyede RF vuru sinyali elde etmek çok zordur ve bu sorun mutlak frekans ölçüm belirsizliğine yansımaktadır.

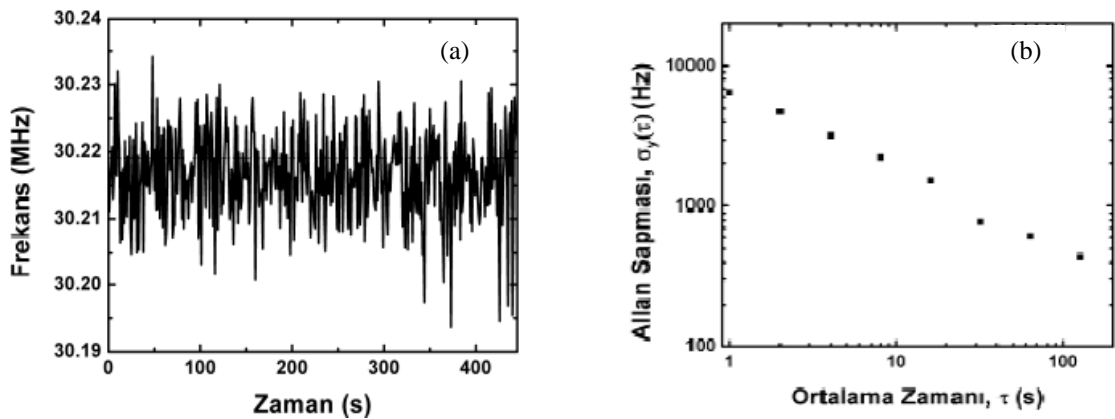
Tez çalışması kapsamında geliştirilen Cs atomik saatine kilitli Yb fiber lazer tarak üretici ile l₂ moleküllerinin R(56)32-0 geçişinin a₁₀ rezonansına kilitlenmiş Nd:YAG/l₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyali lazerin 1064 nm çıkış ışınının kullanımıyla araştırılmış ve frekansı ölçülmüştür. Filtreden geçirilerek güçlendirilmiş Yb tarak ve Nd:YAG/l₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyalinin spektrumu Şekil 4.15'da verilmiştir. Spektrumun ortasındaki ince modülasyonlu RF sinyali tarak ile frekans modülasyonlu Nd:YAG/l₂ lazeri arasındaki vuru sinyalidir. Geniş spektrum ise filtre çıkışındaki sinyalin yükselteç ile güçlendiği göstermektedir.



Şekil 4.15. Filtreden geçirilerek güçlendirilmiş Yb tarak ve Nd:YAG/l₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyalinin spektrumu.

Nd:YAG/l₂ lazerinin mutlak frekans ölçümleri sırasında Yb tarak sisteminin frekansı Cs atomik saatine kilitlenmiş ve paralel olarak üç sayıcı f_{rep} , f_{CEO} ve f_{beat}

frekanslarının ölçümleri bilgisayar kontrollü sayıcılar ile gerçekleştirildi. Tarak ve lazer arasındaki vuru sinyalinin f_{beat} frekansının zamana göre değişim sonuçları ve Allan sapması ile yapılan kararlılık analizi sırasıyla Şekil 4.16'da verildi. Şekilden görüldüğü gibi vuru sinyal frekansının tepeden tepeye salınımları 30 kHz değerinden küçük olup 1 saniye ortalama zaman aralığındaki kararlılığı ve verilerin 1 saniyedeki standart sapması yaklaşık 7 kHz'dir. Bu salınım değeri hem Nd:YAG/I₂ lazerinin ve hem de Yb tarak sisteminin frekans salınımını içermektedir. Ölçümlerin ortalama zamanını artırdıkça vuru sinyalinin frekans kararlılığı artmakta ve 100 saniye ortalama zamanda 300 Hz'e yaklaşmaktadır. Alınan sonuçları incelediğimizde salınımın büyük çoğunlukla beyaz gürültü ile karakterize edildiği ve kararlılığın ortama t zamanına göre $\sigma(t) = 6.9 \times t^{-1/2}$ [kHz.s^{1/2}] formülüne göre değiştiği tespit edilmiştir. Benzer beyaz gürültü davranışı tekrarlama frekans kararlılığında ($\sigma(t) = 7.2 \times 10^{-4} \times t^{-1/2}$ [s^{1/2}]) ve ofset vuru sinyal kararlılığında ($\sigma(t) = 1.4 \times t^{-1/2}$ [Hz.s^{1/2}]) tespit edilmiştir. Bu şartlarda 445 saniye ortalama zaman aralığında f_{ceo} ofset frekansı, $n \times f_{\text{rep}}$ tekrarlama ve f_{beat} vuru frekansı için hesaplanan Allan sapmaları sırasıyla 0.06 Hz, 131 Hz ve 202 Hz olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak I₂ moleküllerinin R(56)32-0:a₁₀ rezonansına kilitlenmiş 1064 nm dalgaboylu Nd:YAG/I₂ lazerinin frekansı (281 630 111 757 442 ± 333) Hz olarak ölçülmüş ve CIPM'in önerdiği (281 630 111 756 500 ± 5 000) çok iyi uyum içinde olduğu tespit edilmiştir. Böylece yapılan hassas ölçümlerin CIPM değerleri içinde kaldığı gösterilerek sistemin uluslararası verilerle kontrolü ve uyumu sergilenmiştir.



Şekil 4.16. Yb fiber tarak ve Nd:YAG/I₂ lazeri arasındaki RF vuru sinyalinin f_{beat} frekansının zamana göre değişimi (a) ve kararlılık analizi (b).

Bu çalışmalara ek olarak, kurulan Yb lazer tarak sistemi ile 852 nm dalgaboyunda çalışan ve Cs atomlarının D₂ enerji geçişine kilitlenen dış kaviteli diyot lazer (ECDL) arasında da < 20 dB vuru sinyali gözlendi ve lazerin mutlak frekans ölümüne yönelik çalışmalar yapılmıştır. Kurulan mevcut Yb tarak sisteminin spektral bölgesinde çalışan tek modlu veya dar bantlı diyot lazerlerin kullanımıyla bölgesel olarak yüksek spektral güce sahip lazer tarakları üreterek zayıf güce sahip lazerlerin mutlak frekans ölümleri sırasındaki vuru sinyallerini artırmak ve daha hassas ölümler yapmak mümkündür. Bölgesel olarak yükseltilmiş lazer taraklarının ikinci harmoniğini üreterek de kurulan Yb tarak sisteminin spektral bölgesi içinde (He-Ne/I₂,633 nm), veya dışında da (Nd:YAG/I₂, 532 nm) lmler yapmak mümkündür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

2010 ve 2013 yılları arasında TÜBİTAK tarafından desteklenen 109T350 numaralı proje kapsamında gerçekleştirilen bu tez çalışması başarılı bir şekilde tamamlanarak Cs atomik saatinin 10 MHz referans frekansına kilitlenmiş Yb fiber temelli optik frekans üretici tasarlanarak kuruldu, parametreleri araştırılıp ve optik frekans metroloji uygulaması yapılarak Max-Planck Enstitüsü ile Menlo System firmasının geliştirdiği Ti:Sa optik frekans üreticisi ile karşılaştırıldı.

Tez çalışması çalışmaları kapsamında alınan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

Yb tarak sisteminde optik osilatör olarak kullanılmak amacıyla farklı parametrelere sahip tam normal dispersiyonlu (ANDi), anormal dispersiyonlu, similariton ve spektrumu gerilimli similariton lazerleri geliştirilerek ışımının darbe genişliği, spektrumu, faz be siddet gürültüsü araştırıldı. 20 nm bant aralığında ısımaya üreten ve darbeleri 150 fs değerine kadar sıkıştırılan ANDi lazerinin 108 MHz tekrarlama frekansı DRO osilatörü üzerinden Cs atomik saatine 1s – 104 saniye ortalama zaman arasında 2×10^{-11} – 1×10^{-13} kararlılıkla kilitlenerek atomik saat kararlılığına ulaşımı sağlandı.

Sıcaklık kontrollü ANDi lazeri tasarlanarak kuruldu. Lazerin sıcaklığı <15 mK kararlılıkla stabilize edildi ve bu şartlarda 104 saniye serbest çalışma süresince tekrarlama frekansının 1 Hz'den az değiştiği ölçüldü.

Kurulan ve araştırılan similariton, anormal dispersiyonlu ve spektrumu gerilimli Yb fiber lazerleriyle üretilen darbeler sırasıyla 55 fs, 42 fs ve 33 fs değerine kadar sıkıştırıldı. Merkez dalgaboyları yaklaşık 1 µm olan bu lazerlerin spektral genişlikleri sırasıyla 50 nm, 55 nm ve 80 nm olarak ölçüldü.

Farklı özelliklerde optik güçlendiriciler tasarlanarak kurulan ve 350 mW ile 9 W arasında ortalama güç değerine sahip lazer darbeleri üretildi. Güçlendirilen lazer darbeleri kırınım ağı ile sıkıştırılarak analiz edildi ve daha sonra PCF içine gönderilerek 600 – 1750 nm aralığından geniş spektrumlu lazer ışınları

(supercontinuum, SC) üretildi. Lazer merkez dalgaboyunun, darbe genişliğinin, PCF uzunluğunun ve dispersiyon özelliklerinin, ısıma polarizasyonunun SC ısıma spektrumuna etkisi araştırılmış, ilgili teorik ve deneysel sonuçları karşılaştırıldı. Farklı şartlarda üretilen SC ışınının Nd:YAG lazeri ile vuru sinyali ve $\omega - 2\omega$ optik interferometresinde algılanan “ofset” vuru sinyali ölçülerek SC spektrumunun koherentliği araştırıldı.

Spektrumu gerilimli similariton lazeri ile benzer yapıya sahip optik yükselteç sisteminin kullanımıyla üretilen 36 fs darbeleri 30 cm uzunluğundaki SC-3.7-975 model tek saçılımlı PCF’e gönderilerek 62 mW ortalama güce ve 600 nm – 1600 nm spektral aralığa sahip SC ışınması elde edildi.

Kurulan $\omega - 2\omega$ optik interferometresi ile 30 dB genliğinde RF “ofset” vuru sinyali ölçüldü.

Geliştirilen femtosaniye Yb optik frekans tarağı üreticisinin hem f_{rep} tekrarlama frekansı hem de f_{CEO} “ofset” vuru frekansı aynı zamanda Cs atomik saatinin referans 10 MHz frekansına kurulan elektronik sistem ile kilitlendi. Tekrarlama frekans kararlılığının Cs atomik saat kararlılığına ulaştığı gösterildi. Beyaz gürültü davranışları sergileyen tekrarlama frekans kararlılığı ortalama t zamanına göre $\sigma(t) = 7.2 \times 10^{-4} \times t^{-1/2}$ [Hz x s^{1/2}] fonksiyonuyla ve f_{CEO} “ofset” vuru frekansı kararlılığı ise $\sigma(t) = 1.4 \times t^{-1/2}$ [Hz x s^{1/2}] fonksiyonuyla ifade edildikleri tespit edildi. Bu ifadeye göre kilitli fs tarak sisteminin f_{CEO} frekans kararlılığı 1 saniye ile 100 saniye ortalama zaman aralığında 1.4 Hz ile 0.14 Hz arasında değiştiği gözlemlendi.

Kurulan Yb optik frekans tarağı üreticisinin optik frekans metrolojisi uygulaması olarak frekansı I2 moleküllerinin R(56)32-0 enerji geçişinin a_{10} rezonansına kilitlenen Nd:YAG/I₂ (1064 nm) lazerinin frekansı (281 630 111 757 442 ± 333) Hz olarak ölçülüp ve sonuçların uluslar arası ölçüler ve ayarlar komitesinin (CIPM) bu geçiş için belirlediği (281 630 111 756 500 ± 5 000) Hz değeriyle çok iyi uyum içinde olduğu tespit edildi. Deneyler sırasında frekansı ölçülen Nd:YAG/I₂ lazerinin parametreleri CIPM’in belirlediği değerlere ayarlanmıştır ve Yb tarak ile yaklaşık 30 dB yükseltilmiş vuru sinyali gözlemlendi. Nd:YAG/I₂ lazerinin mutlak frekansı ayrıca Cs atomik saatine kilitli femtosaniye Ti:Sa tarak ile de ölçüldü ve sonuçlar ± 5 kHz belirsizlikle CIPM değeri ile uyum içinde olduğu gözlemlendi. Bu sonuçlar ile Cs

atomik saatine kilitli taşınabilir optik frekans tarağı üreticinin hem Max-Planck Enstitüsü ve Menlo System firmasının ortak geliştirdiği Cs atomik saatine kilitli Ti:Sa optik üretici ile başarılı bir şekilde karşılaştırması sağlanıp hem yapılan hassas ölçümlerin CIPM değerleri içinde kaldığı gösterilerek sistemin uluslararası verilerle kontrolü ve uyumu sergilendi.

KAYNAKLAR

- [1] Diddams S. A., The Evolving Optical Frequency Comb, *J OPT SOC AM B*, 2010, 27, 51 - 62.
- [2] Udem T., Holzwarth R., Hänsch T. W., Optical Frequency Metrology, *NATURE*, 2002, 416, 233 - 237.
- [3] Newbury N. R., Washburn B., Theory of Frequency Comb Output From A Femtosecond Fiber Laser, *IEEE J QUANTUM ELECT*, 2005, 41, 1388 - 1402.
- [4] Tauser F., Leitenstorfer A., and Zinth W., Amplified femtosecond pulses from an Er:fibersystem: Nonlinear pulse shortening and selfreferencing detection of the carrier-envelope phase evolution, *OPT EXPRESS*, 2003, 11, 594-600.
- [5] Diddams S. A., Jones D. J., Ye J., Cundiff S. T., Hall J. L., Ranka J. L., Holzwarth R. S., Udem T., Hänsch T. W., "Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb", *PHYS REV LETT*, 2000, 84, 5102 - 5105.
- [6] Ye J. and Cundiff S. T., *Femtosecond Optical Frequency Comb Technology*, Springer, 2005.
- [7] Cundiff S. T. and Ye J., Colloquium: Femtosecond optical frequency combs, *REV. MOD. PHYS.*, 2003, 75, 325- 342.
- [8] Washburn B., Diddams S., Newbury N., Nicholson J. W., Yan M. F., Jørgensen C. G., A selfreferenced, erbium fiber laser-based frequency comb in the near infrared, *OPT. LETT.*, 2004, 29, 252 – 254.
- [9] Tauser F., Leitenstorfer A., Zirth W., Amplified femtosecond pulses from an Er:Fiber system: Nonlinear pulse shortening and self-referencing detection of the carrier envelope-phase evolution, *OPT. EXPRESS*, 2003, 11, 594 - 600.
- [10] Stumpf M. C., Pekarek S., Oehler A. E. H., Südmeyer T., Dudley J. M., Keller U., Self-referencable frequency comb from a 170 fs, 1.5 μm solid-state laser oscillator, *APPL PHYS*, 2009, 99, 401 - 408.
- [11] Meyer S. A., Squier J.A., Diddams S. A., Diode pumped Yb:KYW femtosecond laser frequency comb with stabilized carrier carrier-envelope offset frequency, *EUR. PHYS. J. D*, 2008, 48.
- [12] Schibli T. R., Yost D. C., Martin M. J., Ye J., Hartl I., Marcinkevicius A., and Fermann M. E., Optical frequency comb with sub-mHz linewidth and >10 W average power, *NAT PHOTONICS*, 2008, 2, 355 - 359.

- [13] Agrawal G. P. , Nonlinear Fiber Optics. San Diego, CA, USA, Elsevier Inc., 2007.
- [14] Paschotta R., Noise of mode-locked lasers: Timing jitter and fluctuations", APPL PHYS B, 2004, 79, 163 - 173.
- [15] Inaba H., Daimon Y., Hong F. L., Onae A., Minoshima K., Schibli T. R., Matsumoto H., Hirano M., Okuno T., Onishi M., and Nakazawa M., Long-term measurement of optical frequencies using a simple, robust and low-noise fiber based frequency comb, OPT. EXPRESS, 2006, 14, 5223-5231.
- [16] Prochnow O., Paschotta R., Benkler E., Morgner U., Neumann J., Wandt D., Kracht D., Quantum-limited noise performance of a femtosecond all-fiber ytterbium laser, OPT. EXPRESS, 2009, 17, 15525 -15533 .
- [17] Budunoğlu İ. L., Ülgüdür C., Oktem B., and İlday F. Ö., Intensity noise of mode-locked fiber lasers, OPT. LETT., 2009, 34, 2516 - 2518.
- [18] Rieger S, Hellwig T, Walbaum T, Fallnich C., Optical repetition rate stabilization of a mode-locked all-fiber laser, OPT. EXPRESS, 2013, 21, 4889-4895.
- [19] Newbury N., Swann W., Low-noise fiber laser frequency combs, J OPT SOC AM B, 2007, 24, 1756 - 1770.
- [20] Chong A., Renninger W. H., Wise F. W., Properties of normal-dispersion femtosecond fiber laser, J OPT SOC AM B, 2008, 25, 140 - 148.
- [21] Hauss H. A., Noise of mode-locked laser, IEEE J QUANTUM ELECT, 1993, 29, 983 - 996.
- [22] Nicholson J. W., Yan M. F., Wisk P., Fleming J., DiMarcello F., Monberg E., Yablon A., Jorgensen C. and Veng T., "All-fiber, octave-spanning supercontinuum", OPT. LETT, 2003, 28, 643-645.
- [23] Agrawal G. P., Nonlinear Fiber Optics, Elsevier, 183 - 187, 2007.
- [24] Agrawal G. P., Nonlinear Fiber Optics, Elsevier, 387 - 411, 2007.
- [25] NKT Photonics , SC-3.7-975 Nonlinear Fiber for Supercontinuum generation manual, www.nktphotonics.com/files/files/SC-3.7-975.pdf, 2012.
- [26] Hong F., Minoshima K., Onae A., Inaba H., Takada H., Hirai A., Matsumoto H., Sugiura T., Yoshida M., Broad-spectrum frequency comb generation and carrier envelope offset frequency measurement by second harmonic generation of a mode-locked fiber laser, OPT. LETT., 2003, 28, 1516 - 1518.
- [27] Şenel Ç., İlday F. Ö., Ultrafast Pulse Propagator Version 2.2.2, Bilkent Üniversitesi Ultrahızlı Optik ve Lazerler Laboratuvarı Simülasyonu, 2011.

- [28] Dudley J. M. , Genty G. , Coen S., Supercontinuum Generation in Photonic Crystal Fiber, REV MOD PHYS, 2006, 78, 1135-1183.
- [29] Fermann M. E., Hartl I., "Ultrafast fiber laser technology", IEEE J QUANTUM ELECT, 2009, 15, 191 - 206.
- [30] Paschotta R., Encyclopedia for Photonics and Laser Technology, RP Photonics, www.rp-photonics.com/optical_heterodyne_detection.html, Mayıs 2013.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

- [1] Şenel Ç., İlday F. Ö., **Kara O.**, Hamid R., and Erdoğan C., Development and characterization of all-normal dispersion fiber laser for frequency comb generation, Advanced Solid-State Photonics (ASSP) Conference, Optical Society of America (OSA), February 2011.
- [2] Şenel Ç., İlday F. Ö., **Kara O.**, Birlikseven C., Erdoğan C., and Hamid R., All-normal dispersion fiber lasers for frequency metrology, Conference for Laser and Electro-Optics (CLEO) - Laser Applications to Photonic Applications, Optical Society of America (OSA), May 2011.
- [3] Şenel Ç., Hamid R., Erdoğan C., Çelik M., **Kara O.**, İlday F. Ö., 33 fs Yb-fiber laser comb for optical frequency metrology applications, Ultrafast Optics '13 Conference, March 2013.
- [4] Şenel Ç., Hamid R., Erdoğan C., Çelik M., **Kara O.**, İlday F. Ö., 33-fs Yb-fiber laser comb locked to Cs-atomic clock, Conference for Laser and Electro-Optics (CLEO), May 2013.

ÖZGEÇMİŞ

1987 yılında İstanbul'da doğdu. İlköğretimini ve lise eğitimini İstanbul'da tamamladı. 2006 yılında girdiği Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği Bölümü'nden 2011 yılında Fizik Mühendisi olarak mezun oldu. 2011 - 2013 yılları arasında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektro-Optik Sistem Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimini tamamladı. Yüksek lisans eğitimi süresince TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü (UME) Elektromanyetik Laboratuvarı'nda proje bursiyeri olarak görev aldı. İlgili alanları optik frekans metrolojisi, fiber lazerler ve uygulamalarıdır.