

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**4 GHZ FREKANSINDA KİP KİLİTLEMELİ LASER GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Hakan YERGIN**

**Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. İbrahim T. ÖZDÜR**

**NİSAN 2022**

## TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.



Hakan YERGİN



## ÖZET

Yüksek Lisans

4 GHZ FREKANSINDA KİP KİLİTLEMELİ LAZER GELİŞTİRİLMESİ

Hakan YERGİN

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. İbrahim T. ÖZDÜR

Tarih: Nisan 2022

Bu tez çalışmasında 4GHz frekansında düşük faz gürültülü aktif kip kilitlemeli fiber lazer geliştirilmesi amaçlanmıştır. Fiber lazerler ürettiği ışığın zamanla değişimine göre sürekli dalga veya darbeli olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmada kısa süreli darbe dizisi üreten lazer tasarlanmıştır.

Tezin ilk bölümünde lazerler hakkında genel bilgiler verilmiş olup kullanım alanları, gelişim süreçleri, kullanılan kavramların ve terimlerin tanıtılması hedeflenmiştir.

Tezin ikinci bölümünde geliştirilmesi hedeflenen lazer için kullanılan fiber optik teknolojisi ve çalışma prensibi tanıtılmış, lazerin darbe dizisi üretebilmesi için kullanılan metodlar belirtilmiştir. Geliştirilecek lazerde ışığın yükseltilmesinde kazanç ortamı olarak kullanılacak katkılı fiber ve ışığın yükseltilme süreci hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin üçüncü bölümünde, fiziksel olarak kurulumu gerçekleştirilen aktif kip kilitleme yapan fiber lazer gösterilmiştir. Kullanılan malzemeler tanıtılmıştır. Lazerde kararsız durum oluşmaması için lazerdeki tüm bileşenler polarizasyon korumalı seçilmiştir. Lazerde geriye doğru olabilecek Fresnel yansımalarının engellenmesi için tüm fiber optik konnektörler APC tipi 8 derece eğimli olarak seçilmiştir. Erbiyum katkılı fiber yükseltecin karakterizasyonu yapılmış ve yüksek ASE gürültüsünden dolayı lazerde optik yükselteçten sonra bant geçiren filtre kullanılarak istenmeyen ASE gürültüsü filtrelenmiştir. Optik modulatörün karakterizasyonu yapılmış olup tasarladığımız



lazerde istediğimiz frekans aralığında sorunsuz çalıştığı görülmüştür. Bileşenlerin karakterizasyonları sonrası elde edilen ölçüye göre geliştirilen lazerin başka frekansta çalışması test edilmiş ve sonuçlarla uyumlu olarak sorunsuz bir şekilde çalışmıştır. Aktif kip kilitleme yapabilmek için lazer dışından bağlanan RF sinyal kaynağı ile lazerden çıkan sinyal kaynağı faz gürültüleri kıyaslanmış ve kip kilitleme yapan lazerin faz gürültüsünü filtrelediği tespit edilmiştir.

Tezin son bölümünde kurulan lazerle yapılan deneysel çalışmaların sonuçları özetlenerek daha iyi sonuçların elde edilebilmesine yönelik ileride yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Aktif kip kilitlemeli lazer, Ring lazer, Fiber lazer, Optik modülasyon

## **ABSTRACT**

Master of Science

DEVELOPMENT OF A 4 GHZ MODE LOCKED LASER

Hakan YERGİN

TOBB University of Economics and Technology  
Institute of Natural and Applied Sciences  
Electrical and Electronics Engineering Science Programme

Supervisor: Assoc. Prof. İbrahim T. ÖZDÜR

Date: April 2022

In this thesis, it is aimed to develop an active mode locked fiber laser with low phase noise at 4GHz frequency. Fiber lasers are divided into two part according to change of the light they emit over time as continuous wave or pulsed. In this study, a laser that produces a short pulse sequence is designed.

In the first part of the thesis, general information about lasers is given and it is aimed to introduce the usage areas, development processes, concepts and used terms.

In the second part of the thesis, the fiber optic technology and working principle used for the laser, which is aimed to be developed, are introduced, and the methods used to produce the pulse sequence of the laser are specified. Information is given about the doped fiber to be used as a gain medium in the light amplification of the laser to be developed and the light amplification process.

In the third part of the thesis, the physically installed active mode locking fiber laser is shown. The materials used are introduced. All components in the laser are selected with polarization protection in order to avoid an unstable state in the laser. All fiber optic connectors have been chosen as APC type with 8 degrees inclination in order to prevent the Fresnel reflection that may be backwards in the laser. The characterization of the erbium doped fiber amplifier has been made and the unwanted ASE noise has been filtered out by using a band-pass filter after the optical amplifier in the laser due to the high ASE noise. The optical modulator has been characterized and it has been seen that the laser we designed works smoothly in the frequency range we want. The

laser, which was developed according to the measurements obtained after the characterization of the components, was tested to operate at another frequency and worked without any problems in accordance with the results. In order to make active mode locking, the phase noises of the RF signal source connected outside the laser and the signal source coming from the laser were compared and it was determined that the mode locking laser filtered the phase noise.

In the last part of the thesis, the results of the experimental studies carried out with the laser were summarized and suggestions were made for future studies in order to obtain better results.

**Keywords:** Active mode-lock laser, Ring laser, Fiber laser, Optic modulation

## TEŞEKKÜR

Çalıőmalarım boyunca katkılarıyla ve değerli bilgileriyle beni yönlendiren hocam Doç. Dr. İbrahim Tuna Özdür'a, kıymetli tecrübelerinden faydalandığım TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve destekleriyle her zaman yanımda olan canım aileme ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	v
ABSTRACT .....	vii
TEŞEKKÜR.....	ix
İÇİNDEKİLER.....	x
ŞEKİL LİSTESİ .....	xi
ÇİZELGE LİSTESİ .....	xii
KISALTMALAR.....	xiii
SEMBOL LİSTESİ .....	xiv
RESİM LİSTESİ .....	xv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Araştırması .....	1
1.2 Lazerin Kullanım Alanları.....	3
1.3 Teorik Çalışmalar .....	4
1.3.1 Lazerin çalışma prensibi.....	4
<b>2. FİBER OPTİK TEKNOLOJİSİ .....</b>	<b>9</b>
2.1 Fiber Optik Kablo Yapısı ve Çalışma Prensibi .....	9
2.2 Fiber Ring Lazerler.....	12
2.3 Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EDFA) .....	14
2.4 Faz Gürültüsü .....	16
2.4.1 Faz gürültüsü ölçümü ve analizi.....	18
<b>3. 4 GHZ FREKANSINDA DÜŞÜK FAZ GÜRÜLTÜLÜ KIP KİLİTLEMELİ LASER GELİŞTİRİLMESİ.....</b>	<b>23</b>
3.1 Amaç.....	23
3.2 Yöntem .....	23
3.3 Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar ve Elde Edilen Bulgular.....	25
3.4 EDFA Karakterizasyonu .....	30
3.5 Modülatör Karakterizasyonu .....	31
3.6 Optik Güç Akım İlişkisi .....	32
3.7 Lazer Kip Kilitlenmesi .....	33
<b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>39</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>40</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>42</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 1.1 : Normal popülasyon ve nüfus tersinmesi gösterimi .....	5
Şekil 1.2 : a) Soğurma b) Kendiliğinden emisyon c) Uyarılmış emisyon .....	5
Şekil 2.1 : Basit fiber optik kablo gösterimi .....	10
Şekil 2.2 : Fiber optik kablo yapısı ve sinyal iletimi gösterimi .....	10
Şekil 2.3 : Mod Sayısı V Değerine göre değişimi.....	11
Şekil 2.4 : Aktif kip kilitlemeli lazer prensip şeması.....	12
Şekil 2.5 : Pasif kip kilitlemeli lazer prensip şeması .....	13
Şekil 2.6 : Kip Kilitlemeli Lazer Örnek Çıkış Sinyali .....	13
Şekil 2.7 : Erbiyum iyonu ( $Er^{3+}$ ) enerji seviyeleri .....	15
Şekil 2.8 : İdeal osilatör çıktısı zaman ve frekans spektrumunda gösterimi.....	17
Şekil 2.9 : Gerçek osilatör çıktısı zaman ve frekans spektrumunda gösterimi .....	18
Şekil 2.10 : Faz gürültüsü ve hesaplanmasının gösterimi.....	19
Şekil 2.11 : Tek yan bant faz gürültüsü ölçüm sonuçları gösterimi.....	20
Şekil 2.12 : Örnek faz gürültüsü analizörü çapraz koralasyon diagramı (Keysight Technologies E5052B Signal Source Anaylzer).....	22
Şekil 3.1 : Kip Kilitlemeli Lazer ve Osilatörün Gösterimi .....	16
Şekil 3.2 : Kip Kilitlemeli Lazer ve Osilatörün Gösterimi (Mod: Modülatör, AFOG: Ayarlanabilir Fiber Optik Geciktirici, BGF: Bant Geçirgen Filtre, FOG: Fiber Optik Geciktirici, PM: Polarizasyon Koruyuculu Fiber Optik Kablo, EDFA: Erbiyum Ekli Fiber Yükselteç) .....	23
Şekil 3.3 : Test 1 Filtre kullanılmadan artan giriş gücüne göre EDFA çıkış gücü ....	30
Şekil 3.4 : Test 1 Filtre kullanılmadan artan giriş gücüne göre EDFA kazanç grafiği .....	30
Şekil 3.5 : Test 2 Filtre kullanılarak artan giriş gücüne göre EDFA çıkış gücü .....	31
Şekil 3.6 : Test 2 Filtre kullanılarak artan giriş gücüne göre EDFA kazanç grafiği..	31
Şekil 3.7 : Artan giriş sinyal frekansına göre modülatör karakterizasyonu .....	32
Şekil 3.8 : Optik güç – Akım (L-I) grafiği .....	32
Şekil 3.9 : Kavite temel frekans çarpımlarının RF spektrum analizöründe görünümü .....	34
Şekil 3.10 : Lazer çıkışının RF spektrum analizöründe 1 MHz aralıktaki görünümü	35
Şekil 3.11 : RF sinyal kaynağı ile kip kilitlemeli lazer çıkış karşılaştırılması.....	36
Şekil 3.12 : 4 Ghz frekansındaki lazerin RF spektrumu 50 MHz aralıklı görünümü	37
Şekil 3.13 : 10 Ghz frekansındaki lazerin RF spektrumu 50 MHz aralıklı görünümü .....	38

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : Spot faz gürültüsü gösterimi ..... 37



## KISALTMALAR

<b>AFOG</b>	: Ayarlanabilir Fiber Optik Geciktirici
<b>APC</b>	: Açılı fiziksel konnektör. yarılanabilir Fiber Optik Geciktirici
<b>ASE</b>	: Yükseltilmiş kendiliğinden emisyon. (Amplified spontaneous emission)
<b>BGF</b>	: Bant Geçirgen Filtre
<b>EDFA</b>	: Erbiyum Tabanlı Optik Yükselteç (Erbium-Doped Fiber Amplifier)
<b>FO</b>	: Fiber Optik
<b>FOG</b>	: Fiber Optik Geciktirici
<b>KKL</b>	: Kip kilitlemeli lazer
<b>PM</b>	: Polarizasyon Korumalı (Polarization-maintaining)
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>a</b>	: Soğurma (absorption)
<b>sp</b>	: Kendiliğinden Emisyon (spontaneous emission)
<b>SRH</b>	: Shockley Read Hall
<b>st</b>	: Uyarılmış Emisyon (stimulated emission)



## SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
$\lambda$	Dalga boyu
$f$	Frekans
$c$	Işık hızı
$N$	Atom yoğunluğu
$I$	Akım
$q$	Elektron yükü
$\tau_p$	Foton yaşam süresi
$\omega$	Açısal frekans
$h$	Plank sabiti
$k$	Boltzman sabiti

## RESİM LİSTESİ

### Sayfa

Resim 3.1 : Geliştirilen lazerin resmi.....	25
Resim 3.2 : 200mW Çıkış Gücünde Erbiyum Tabanlı Fiber Optik Yükselteç.....	27
Resim 3.3 : 1550 nm merkez frekansında 5 nm genişliğinde optik filtre.....	28
Resim 3.4 : a) Farklı uzunlardaki fiber sarımlar b) konnektörlü gösterimi .....	28
Resim 3.5 : Ayarlanabilir fiber optik geciktirici .....	29
Resim 3.6 : Optik Modulatör (Mach Zehnder Modulatör).....	29





## 1. GİRİŞ

Lazer, ışığın optik radyasyon ile yükseltilmesini sağlayan bir tür ışın kaynağıdır. Terim, İngilizce ‘Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation’ baş harflerinden oluşur. Türkçe ‘ışığın uyarılmış ışımaya ile yükseltilmesi’ anlamına gelmektedir. Işığın sahip olduğu enerji fotonlar tarafından taşınır. Lazerin çalışma prensibi bu fotonların uyarılmasına dayanır. Bir atoma elektrik, ışık veya ısı ile enerji verildiğinde bu atomun elektronları uyarılır ve düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine geçerler. Bu uyarılmış elektron sonsuza kadar yüksek enerji seviyesinde kalmaz ve yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine geçer. Bu olay ışınımsal veya ışınımsal olmayan geçiş olarak iki şekilde gerçekleşir. Işınımsal geçişte yüksek enerji seviyesi ile düşük enerji seviyesi arasındaki fark kadar enerjiyi foton olarak kazanç ortamına salınır. Işınımsal olmayan geçişte yüksek enerji seviyesi ile düşük enerji seviyesi arasındaki fark kadar enerji fonon olarak salınır. Fiber lazerler, ışığı yönlendirmek için silika camdan yapılmış bir optik fiber kablo kullanır. Bu yüzden katı hal lazerler kategorisinde değerlendirilirler. Ayrıca az yer kaplarlar, iyi elektrik verimliliğine, düşük bakıma ve düşük işletme maliyetlerine sahiptirler. Fiber Lazerlerin çalışma şekli, ürettikleri ışığın zamanla değişimine göre sürekli dalga veya darbeleri olmak üzere ikiye ayrılır. Darbeleri lazerlerde, üretilen ışık ayarlanan tekrarlama oranında çok kısa süreli (pikosaneye, femtosaniye seviyelerinde) darbeler şeklinde ortaya çıkar. Bu ultra kısa darbeler optik saat teknolojilerinden, doğanın temel sabitlerinin ölçümlerine ve ultra yüksek hızlı optik iletişimlere kadar geniş uygulama yelpazesi nedeniyle kapsamlı bir araştırma konusudur.

### 1.1 Literatür Araştırması

Lazer teknolojisinin tarihi 1917 yılında Albert Einstein’ın uyarılmış salınım olayını ilk kez açıklayan makalesi ile başladı. Bu tarihten itibaren bir müddet bu konunun üzerinde çok ilerleme sağlanmadı.

1952-1953 yılında Aleksandr Mikhailovich Prokhorov ve öğrencisi Nikolay G. Basov tarafından aynı dalga boyunda ve aynı fazda olan paralel elektromanyetik dalgaları büyütme ve yayma “maşer teorisi” geliştirildi. Maser İngilizce “Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation” baş harflerinden oluşup, Türkçesi “Mikrodalganın uyarılmış ışımaya ile yükseltilmesi” anlamına gelmektedir. Eş zamanlı ve birbirinden bağımsız olarak Chareles Townes tarafından ilk Maser aygıtı üretildi

1959 yılında Gordon Gould tarafından “Laser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” tanımlaması ilk kez yapıldı.

1960 yılında Theodero Maiman tarafından ilk Lazer icat edildi.

1961 yılında Elias Snitzer ve meslektaşları dünyanın ilk fiber optik lazerini üretti

1964 yılında L.E. Hargrove ve arkadaşları tarafından ilk kip kilitlemeli lazer üretildi [1].

1970 yılında D. Kuizenga ve A. Siegman tarafından faz (FM) veya genlik (AM) modülasyonu ile homojen olarak genişletilmiş bir lazerin mod kilitli çalışması için yeni bir genel analiz sunulmuştur. [2].

1972’de J. Fontana sistemdeki fiziksel süreçlerin devre modeli benzetimini kullanarak lazerlerde kip kilitlemeye ilişkin bir teori sunmuştur [3].

1975 yılında Hans J. Fontana’nın çalışmasındaki devreye benzer bir devre kurarak frekans alanındaki darbenin gelişimini analiz etmiş ve zorunlu mod kilitlemesi için türetilmiş diferansiyel denklemler oluşturmuştur [4].

1989 yılında D.C. Hanna ve arkadaşları tarafından ilk Yb-Er-katkılı fiber lazerde mod kilitleme yapılmıştır [5]. Yazarlar bu çalışmada AM modülatörü kullanarak lazerdeki darbe dizisinin gelişimini ayrıntılı bir analizle açıklamışlardır.

1990 yılında A. Takada ve H. Miyazawa sinyali temel frekansından modüle etmek yerine temel frekansın yüksek dereceli bir harmoniğinde yüksek frekanslı bir mikrodalga sinyali uygulayarak 30GHz’e kadar yüksek tekrarlanma oranına sahip darbe dizisi elde etmişlerdir [6].

1993’de G.T. Harvey ve L.F. Mollenauer [7] ile 1994’de C.R. Doerr ve arkadaşları [8] aktif mod kilitli lazerlerdeki en büyük sorun olan kararsızlığı darbe enerjilerini sınırlandırmak için farklı teknik çözümler önerileri sunmuşlardır.

## 1.2 Lazerin Kullanım Alanları

Lazer ışığının bazı özellikleri ile özel bir ışık türü olması günümüzde birçok alanda kullanılmasını sağlamıştır. Tıpta lazerle yapılan ilk deneyde lazer bir tavşanın gözüne tutularak etkisi incelenmiş ve lazer ışığının tavşanın korneasına, göz merceğine ve göz sıvısına hiçbir zarar vermeden ağ tabakasında bir delik açtığını gözlemlenmiştir. Bu deneyde elde edilen bulgular ile lazerin tıp alanında insan üzerindeki ilk uygulaması 1961 yılında Columbia-Presbyterian Tıp Merkezi'nde insan ağ tabakası üzerinde büyümekte olan bir tümörün yok edilmesi ile olmuştur (Url-1). Lazerin göz merceğine, göz sıvısına ve korneasına zarar vermeden direk ağ tabakasına müdahale edilebilmesine imkân sağlayan özellik ışığın belli dalga boylarında sadece belli maddelerde soğurularak diğer maddelerde farklı davranmasından kaynaklanır. Bu özelliği ile lazer tıp alanında mikro cerrahi, göz hastalıkları, ülser, böbrek taşlarının kırılması, doku kesme, deri operasyonları, dövmelemlerin çıkarılması ve göz hastalıklarında kullanılır.

Lazerler sahip olduğu özellikler ile beraber sanayide de birçok kullanım alanı bulmuştur. Lazer ile kaynak uygulamalarında hedefine çok çabuk bir şekilde yüksek güç aktarabilir. Çok ince tellerin ( $\mu\text{m}$  seviyelerinde) hassas bir şekilde kaynaklanmasını veya iki ince filmin birbirine kaynaklanmasını gerektiren elektronik ve mikro elektronik alanlarında uygulama alanı bulmuştur. Küçük alanlarda ve yüksek hassasiyette kesim ve delme yapılabilmesi elmas ve saat endüstrileri gibi endüstrilerde de kullanım alanı bulmuştur.

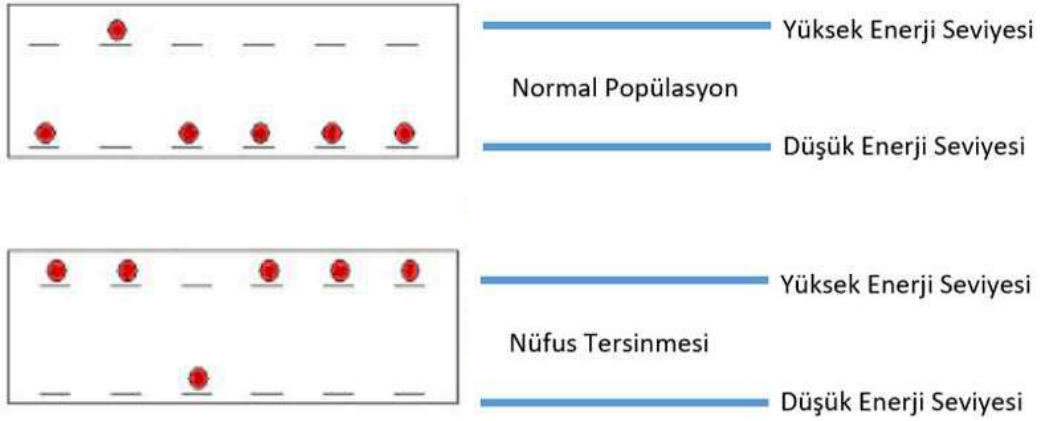
Lazer teknolojisinin en önemli uygulama alanlarından biri de iletişim alanıdır. İletişim anlamı bir bilginin verici ve alıcı arasında taşınmasıdır. Günümüzde artan nüfus ve küreselleşme ile herhangi bir bilgiye her yerden ulaşma isteği ve gelişen teknoloji ile çeşitlenen ihtiyaçlardan dolayı haberleşme sistemlerinin de teknolojik gelişmelerini zaruri kılmıştır. Lazerler, yüksek hızlı internete imkan sağlayan fiber optik ağ alt yapılarında ışık kaynağı olarak kullanılır.

Bu alanlar dışında lazerler, CD ve DVD gibi multimedya araçlarına bilgi yazılmasında, marketlerdeki barkod okuyucularda, evlerimizdeki lazer yazıcılarda, çevremizdeki uzaklık ve hız ölçümlerinde (robot süpürgelerdeki Lidar'lar dâhil), gökbilimcilerin yer yüzündeki teleskop ile dünya dışı gözlemlerinde, eğlence sektöründe ışık gösterileri ve hologramların oluşturulmasında kullanılır.

## 1.3 Teorik Çalışmalar

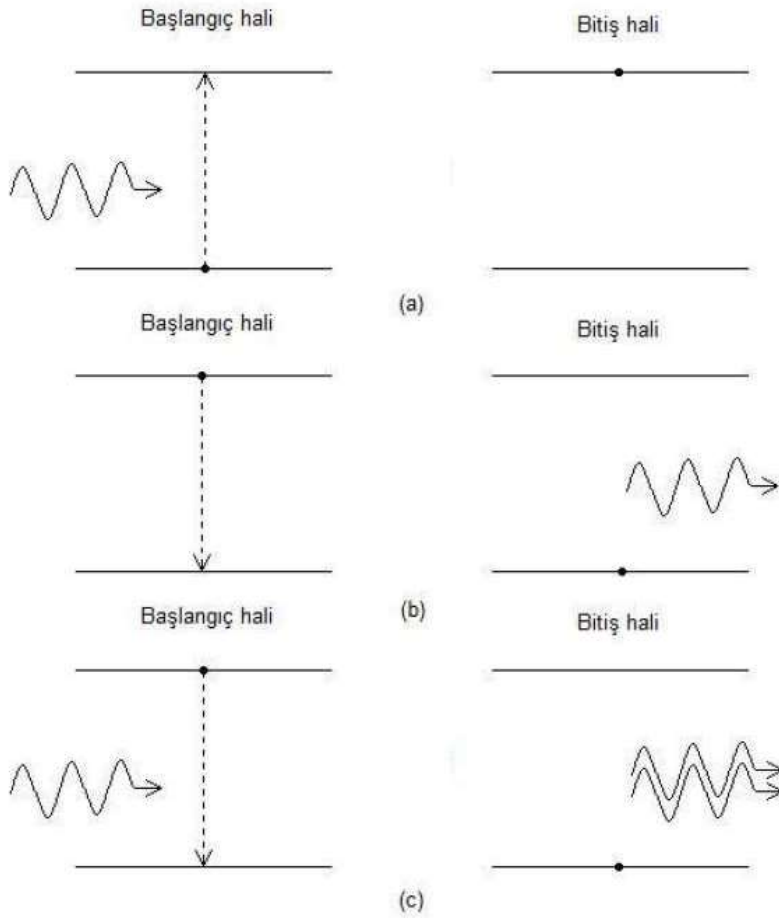
### 1.3.1 Lazerin çalışma prensibi

Daha önceki bölümde bahsedildiği üzere lazer Türkçesi “ışığın uyarılmış ışımaya ile yükseltilmesi”nin İngilizce baş harflerinden oluşmaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere lazerin ışınması için uyarılmış ışımaya ile yükseltme gereklidir. Bilim adamları 1960’lı yıllarda Maser’in icad edilmesi ile daha küçük dalga boylarındaki elektromanyetik dalgalar üzerinde çalışmalara başlamışlardır. Burada ki en büyük sorun eşvrelili ışığın üretilmesini sağlayacak bir yöntem geliştirilmesiydi. Normal şartlar altında bir atom en düşük enerji seviyesindedir. Bir foton ile uyarıldığında yüksek enerji seviyesine geçer. Bu olguya ışığın soğurulması adı verilir. Yüksek enerji seviyesine geçen atom bu enerji seviyesinde kalması çok kısa sürer ve bir foton salınımı yaparak tekrar düşük enerji seviyesine geçiş yapar. Bu süre uyarılmış salınım yapılması için çok kısa bir süredir. Uyarılmış salınım olmadan da lazer ışığı üretilmez, çünkü eşvrelili ışıklar rastgele salınım ile değil uyarılmış salınım ile üretilir. Bilim adamları bu sorunu nüfus tersinmesi denilen yöntem ile aştılar. Nüfus tersinmesi kavramı şu şekilde kısaca açıklanabilir. Normal şartlar altında bir atom nüfusunun çoğu düşük enerji seviyesinde, çok az bir kısmı da yüksek enerji seviyesindedir. Nüfus tersinmesi ile bu durum tersine çevrilerek atomların çoğu yüksek enerji seviyesine geçmesi sağlanır. Nüfus tersinmesi uyarılmış emisyon için gerekli fakat yeterli değildir. Sorun temel durumdaki bir elektronun, daha yüksek enerji durumundaki elektronların uyarılmış emisyonuna maruz kalacağı dalga boyunda fotonları soğurabilmesidir. Işımanın gerçekleşmesi için, uyarılmış emisyon olasılığının soğurma olasılığından daha yüksek olması gerekir. Temel durumdaki bir elektronun gelen fotonu soğurma olasılığı, uyarılmış durumdaki bir elektronun uyarılmış emisyonuna maruz kalma olasılığından genellikle farklıdır. Kısacası her bir durumdaki elektron sayılarının tersine çevrilmesi uyarılmış emisyonun sağlanması için yeterli değildir. Buna ek olarak gelen fotonun uyarılmış bir elektronla karşılaşması ve emisyonu uyarması olasılığının, temel durumdaki bir elektronla karşılaşması ve soğurulması olasılığından daha büyük olmasına ihtiyaç vardır. Bu nedenle, uyarılmış durumdaki elektronların sayısı ile gelen bir fotonun uyarılma olasılığı çarpımının, temel durumdaki elektronların sayısı ile gelen bir fotonun soğurma olasılığı ile çarpımını aşması durumunda uyarılmış emisyon gerçekleşebilir.



Şekil 1.1 : Normal popülasyon ve nüfus tersinmesi gösterimi

Şekil 1.1'de gösterildiği gibi bir atomik sistemin iki seviyesini ele alırsak (normalde enerji seviyeleri daha fazla ve karmaşıktır) ve sırasıyla E1 (düşük enerji seviyesi – temel seviye) ve E2 (yüksek enerji seviyesi) enerji seviyelerinde bulunan birim hacim başına düşen atom sayısı  $N_1$  ve  $N_2$  olsun. Atomik sistem elektromanyetik ışığa ile üç farklı şekilde etkileşime girebilir:



Şekil 1.2 : a) Soğurma b) Kendiliğinden emisyon c) Uyarılmış emisyon



Şekil 1.2-a'da görüldüğü üzere düşük enerji seviyesindeki E1'deki bir atom, gelen  $\omega = (E2 - E1) / h$  açılal frekansında (h plank sabiti) fotonun enerjisini soğurabilir. Soğurulan enerji bu enerji seviyeleri arasındaki farka  $(E2 - E1)$  eşittir. Bu olaya ışığın soğurulması denir.

Şekil 1.2-b'de görüldüğü üzere E2 enerji seviyesinde olan atom E2 seviyesindeki yaşama ömrü diye adlandırılan bir süre sonunda bu enerji seviyeleri arasındaki farka  $(E2 - E1)$  eşit  $h\omega$  enerjisinde ışını yayarak E1 enerji seviyesine kendiliğinden geçer. Bu olaya kendiliğinden emisyon adı verilir.

Şekil 1-2-c'de görüldüğü üzere E2 enerji seviyesinde bulunan bir atom  $h\omega$  enerjili bir foton ile uyarıldığında bu atomun enerji geçişi  $(E2 - E1) = h\omega$  geçişine izin veriyorsa uyarılan foton ile özdeş  $h\omega$  enerjili foton yayarak E1 enerji seviyesine geçer. Bu olaya uyarılmış emisyon adı verilir.

Bu üç olgu ile beraber nüfus değişimleri aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir.

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{sp} = -AN_2 \quad (1.1)$$

Bu denklem kendiliğinden emisyon dan dolayı E2 enerji seviyesindeki birim hacimdeki atom sayısı değişimini ifade eder. "A" kendiliğinden emisyon oranı olan Einstein katsayısıdır. E2 enerji seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısının zamana göre değişiminin E2 seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısı ile orantılı olduğunu ifade eder.

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{st} = -B_{21}u(\omega)N_2 \quad (1.2)$$

Bu denklem uyarılmış emisyon dan dolayı E2 enerji seviyesindeki birim hacimdeki atom sayısı değişimini ifade eder.  $u(\omega)$  ışınla enerji yoğunluğu, " $B_{21}$ " uyarılmış emisyon oranı olan Einstein katsayısıdır. E2 enerji seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısının zamana göre değişiminin E2 seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısı ile orantılı olduğunu ifade eder.

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_a = -B_{12}u(\omega)N_1 \quad (1.3)$$

Bu denklem soğurmadan dolayı E1 enerji seviyesindeki birim hacimdeki atom sayısı değişimini ifade eder.  $u(\omega)$  ışınla enerji yoğunluğu, " $B_{12}$ " soğurma oranı olan Einstein katsayısıdır. E1 enerji seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısının zamana göre

değişiminin E2 seviyesindeki birim hacime düşen atom sayısı ile orantılı olduğunu ifade eder.

Termal denge anında enerji seviyeleri arasında geçiş birbirine eşit olacağından bu denklemler birleştirilebilir.

$$B_{12}u(\omega)N_1 = B_{21}u(\omega)N_2 + AN_2 \quad (1.4)$$

Boltzman dağılımı dikkate alınırsa enerji seviyelerindeki atom sayılarının oranı (k, Boltzman sabiti);

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \frac{-(E_2 - E_1)}{kT} \quad (1.5)$$

Denklem (1.6) denklem (1.5)'te yerine,  $B_{12} = B_{21}$  eşitliği yerine konulursa ışımaya enerji yoğunluğu aşağıdaki gibi bulunur.

$$u(\omega, T) = \frac{A}{B} \frac{1}{e^{h\omega/kT} - 1} \rightarrow \frac{B}{A} \frac{1}{u(\omega, T)(e^{h\omega/kT} - 1)} \quad (1.6)$$

Denklem (1.7) ile lazer davranışı için önemli olan uyarılmış emisyonun kendiliğinden emisyonu oranı bulundu. Sadece E2 ve E1 enerji seviyeleri olan 2 seviyeli atomlarda denklem 1.7'deki sonuç göz önünde bulundurulursa uyarılmış emisyonun kendiliğinden emisyonu oranı çok küçüktür. Bu yüzden bu tip ışık kaynaklarından eş fazlı ışık elde edilmesi zayıf ihtimaldir.

Denklem (1.6) ile verilen Boltzman dağılımında E2 daima E1'den büyük olduğu için üstel fonksiyon daima negatif olur. Termal dengedeysen düşük enerji seviyesinde yüksek enerji seviyesine göre daha fazla nüfus olduğu görülür. Bu sistemin normal durumudur. T sıcaklık arttıkça yüksek enerji seviyesinde atomlar artar fakat hiç bir zaman düşük enerji seviyesindeki atom sayısına erişemez.  $T = \infty$  için üstel fonksiyon 0'a ve enerji seviyeleri arasındaki oran da 1'e eşitlenir. Kısaca nüfus tersinmesi için atomların termal dengenin olmaması gerekiyor.



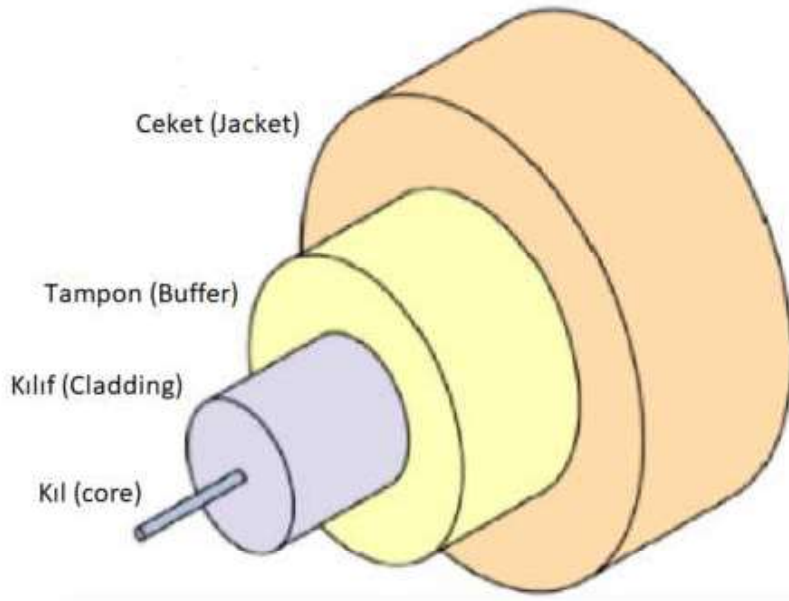
## 2. FİBER OPTİK TEKNOLOJİSİ

Haberleşme anlamlı bir bilginin verici ve alıcı arasında taşınmasıdır. Günümüzde artan nüfus ve küreselleşme ile herhangi bir bilgiye her yerden ulaşma isteği ve gelişen teknoloji ile çeşitlenen ihtiyaçlar haberleşme sistemlerinin teknolojik gelişmelerinin de önemini arttırmıştır. Bakır teller üzerinden elektrik sinyallerinin iletimiyle başlayan bu yolculuk çeşitlenerek kablolu (metalik ve fiber optik) ve kablosuz iletim olarak devam etmektedir. Kablolu iletim hatlarında metalik kablolarda iletkenler arasında kapasitans ve iletkenler boyunca indüktans meydana gelmesinden dolayı metalik kabloların, bant genişliklerini sınırlayan alçak geçiren filtreler gibi hareket etmelerine neden olur (Url-2). Fiber optik kablolar ise ışığın tam yansımaya prensibine dayalı çalışır ve elektriği iletmedikleri için kablo üzerinde kapasitans ve indüktans etki oluşmaz. Bu sayede düşük kayıp oranı ve yüksek bant genişliği ile haberleşme sağlanır (Url-2). Ayrıca fiber optik kabloların monte edilmesi ve bakımı daha kolay olup, içerisinde metal elementler bulunmadığı için çevre şartlarına daha dirençlidir. Sahip olduğu bu özelliklerle fiber optik sistemler iletişim alanında ve birçok benzer alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 2.1 Fiber Optik Kablo Yapısı ve Çalışma Prensibi

Gelişen teknoloji, artan nüfus ve artan veri hızı ihtiyaçlarına çözüm olan ışık hızlı iletişim beraberinde bazı zorluklar getirmiştir. Işığı atmosferde yaymak zor ve elverişsizdir. İletim ortamında görünen engeller ile görünmeyen ve ışığın soğurulmasına neden olan pek çok şey ışık iletimini engelleyeceği için iletişime zarar verecektir. Bunların önüne geçilmesi için ışık dostu bir ortam olan ve zayıflamanın en aza indirildiği bir ortamda aktarımın sağlayan fiber optik kablolar kullanılır. Kısaca optik haberleşmeyi mümkün kılan fiziksel altyapı fiber optik kablolardır. Fiber optik kablolar ışığın tam yansımaya prensibine dayalı çalışır. Bilgi içeren optik sinyal bir noktadan başka bir noktaya tam yansımaya uğrayan ışık ile iletilir. Fiber Optik kabloyu tek cümle ile özetleyecek olursak ışığı hapseden dalga kılavuzudur.

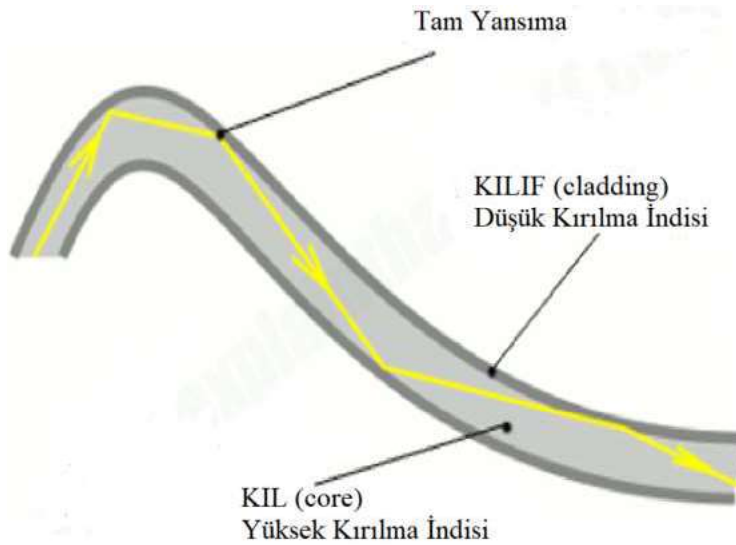
Şekil 2.1’de basit fiber optik kablo yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.1 : Basit fiber optik kablo gösterimi

Fiber optik kablolar diğer kablolar gibi silindriktir. Katmanlı yapıdadır. Optik sinyalin iletiildiği kablonun en iç kısmında, merkezinde kıl (core – çekirdek) bulunur. Saf cam yapıdadır. Malzeme mühendislerinin çalışmaları ile saflık derecesi artırılmıştır. İnsan saçından daha incedir (insan saçı yaklaşık 100µm'dir).

Kılın etrafında kılıf (cladding) vardır. Kıl gibi camdan yapılmıştır. Kılıf kırılma indisi Kıl'dan küçük olduğundan ( $N_{kıl} > N_{kılıf}$ ) tam yansıma şartları sağlandığında optik sinyalin Kıl'da kalmasını sağlar. Bu durumun basit gösterimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 : Fiber optik kablo yapısı ve sinyal iletimi gösterimi

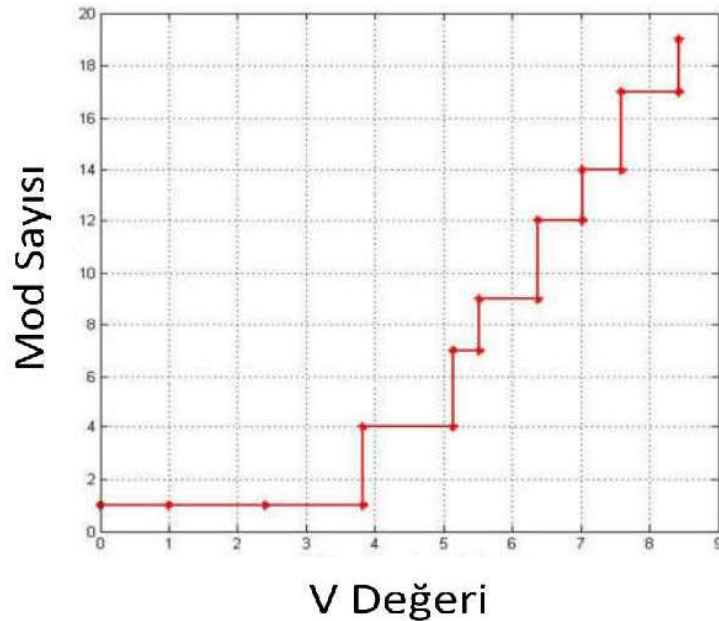
Optik sinyalin fiber optik kabloya girerken fiber eksenine ile yaptığı en büyük açıya kabul açısı denir.  $\theta_{maks}$  ile gösterilir. Bu açıdan daha büyük açıyla gelen optik sinyal tam yansıma koşulunu gerçekleştirmediği için kıl içinde iletimi gerçekleşmez. Bu açıya eşit veya daha küçük açı ile gelen sinyal yansıma koşulunu gerçekleştirdiği için kıl içinde iletimi gerçekleşir. Kabul açısının sinüsü “Sayısal Açıklık” (NA, Numerical Aperture)’a eşittir. Sayısal Açıklık kıl ve kılıfın kırılma indislerine bağlı olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\sin(\theta_{maks}) = NA = \sqrt{N_{kıl}^2 - N_{kılıf}^2} \quad (2.1)$$

Fiber optik kablo için bir başka önemli parametre de normalize edilmiş frekanstır. Boyutsuz bir parametre olduğu için “V değeri” veya “V sayısı” olarak adlandırılır [9]. Fiber optik kablonun destekleyeceği modların sayısı V değerine göre hesaplanabilir. Aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V = \frac{2\pi r}{\lambda} \cdot NA \quad (2.2)$$

Bu denklemde ‘r’ kılın yarıçapıdır. V sayısı 2.405 değerine kadar sadece tek bir mod desteklenir. V sayısı değişimine göre optik fiberdeki mod sayısı aşağıdaki Şekil 2.3 ile verilmiştir.



Şekil 2.3 : Mod Sayısı V Değerine göre değişimi

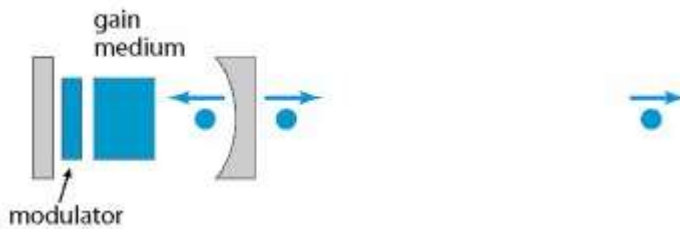
Tampon (Buffer – Koruyucu kaplama) ve Ceket (Jacket – Dış Koruyucu Siper) diye isimlendirilen kısımların optik bir özelliği olmayıp sadece darbe ve dış etkilere karşı koruyucu kaplamalardır.

## 2.2 Fiber Ring Lazerler

Fiber lazerler, ışığı yönlendirmek için silika camdan yapılmış bir optik fiber kablo kullanır. Bu yüzden katı hal lazerler kategorisinde değerlendirilirler. Ayrıca az yer kaplarlar, iyi elektrik verimliliğine, düşük bakıma ve düşük işletme maliyetlerine sahiptirler. Fiber lazer türleri, lazer kaynağının karıştırıldığı malzemeye göre “İterbiyum, Tulyum veya Erbiyum gibi nadir toprak iyonları veya “Krom veya Titanyum gibi geçiş metal iyonları katkılı [10]” değişir. Tüm bu lazer türleri, farklı dalga boyları ürettikleri için farklı uygulamalar için kullanılmaktadır.

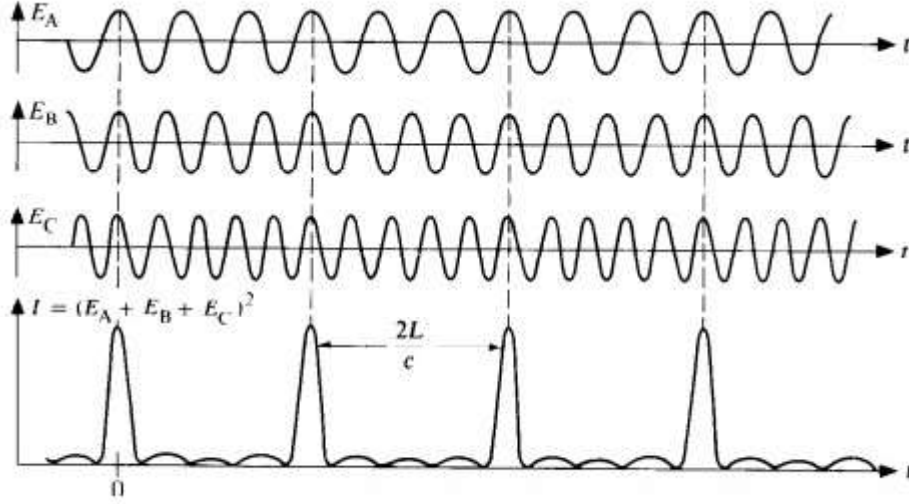
Fiber Lazerlerin çalışma şekli, ürettikleri ışığın zamanla değişimine göre sürekli dalga veya darbeli olmak üzere ikiye ayrılır. Sürekli-dalga lazerlerinden elde edilen güç, zamana göre yaklaşık olarak sabit kalır [10]. Lazer ile kaynak ve lazer ile kesim gibi uygulamalar için ideal olan sürekli, kesintisiz bir lazer ışını sağlanır. Darbeli lazerlerde, üretilen ışık ayarlanan tekrarlanma oranında kısa süreli darbeler şeklinde ortaya çıkar. Değişik yöntemler kullanarak lazerlerden ışık darbeleri üretmek mümkündür. Femtosaniye veya pikosaniye mertebelerinde son derece kısa süreli darbe üretmek için kip kilitleme adı verilen optik teknik bir yöntem kullanılır. Aktif ve Pasif olmak üzere 2 yöntem ile yapılır.

Lazerlerdeki kazanç ortamı aynı anda birden çok kipi destekleyebilir. Kip kilitleme ile lazer spektrumundaki tüm kiplerin eş fazlı olması sağlanır. Aktif kip kilitlemede akustik-optik, elektro-optik, Mach–Zehnder entegre-optik veya yarıiletken elektro-soğurma modülatörü (Şekil 2.4) gibi harici modülatörler kullanılır (Url-3).



Şekil 2.4 : Aktif kip kilitlemeli lazer prensip şeması

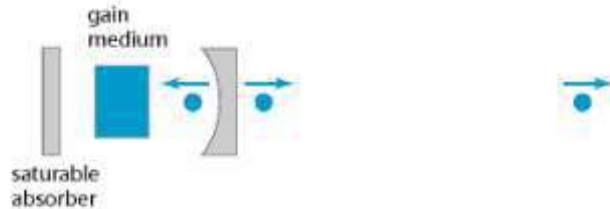
Burada amaç dolaşımdaki darbenin fazını veya genliğini harici bir RF sinyali ile modüle etmektir. Bu sinyal modülatör içinden geçen lazer ışığı modüle eder ve lazer frekansı üzerinde radyo frekans sinyali frekansında yan bantlar oluşturur. Modülasyon frekansı ile dolaşımdaki darbenin gidiş dönüş süresi senkronize olursa modların fazları kilitlenir ve periyodik olarak yapıcı girişim meydana getirir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 : Kip Kilitlemeli Lazer Örnek Çıkış Sinyali

Lazer ışığı sürekli bir döngü halinde olacağı için modülatör içinden defalarca geçerek ve her seferinde bir yan bant daha oluşarak optik spektrum genişler. Bu sayede yüksek harmonik frekansları optik frekansta oluşur. Bu yüksek harmonik frekansları sebebiyle lazerin içinde dolanan optik sinyal sadece radyo frekans sinyali frekansında bir sinüs dalgası değil içinde pek çok yüksek frekans harmoniğini de içeren kısa atımlı bir optik atım treni olacaktır.

Pasif kip kilitlemede kavite içinde doyurulabilir soğurucu kullanılır (Şekil 2.6).



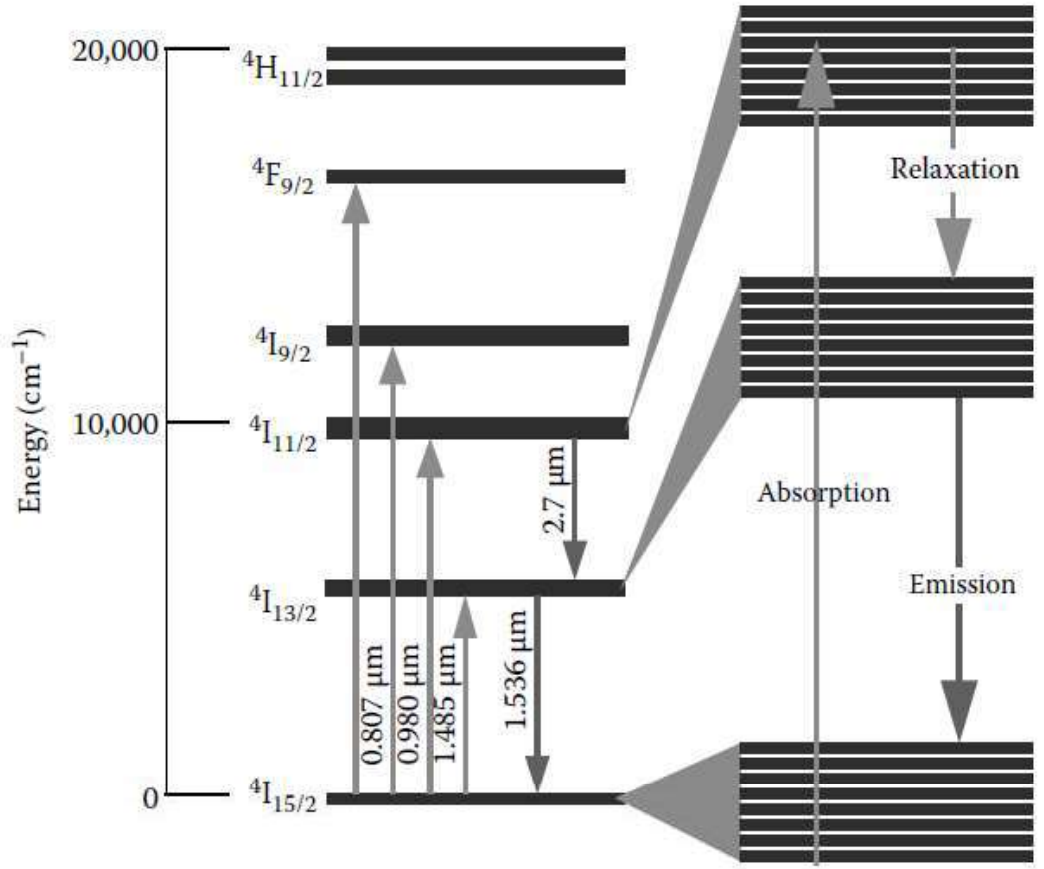
Şekil 2.6 : Pasif kip kilitlemeli lazer prensip şeması



Doyurulabilir soğurucu optik yoğunluk arttığında soğurma katsayısı azalan doğrusal olmayan optik bir bileşendir. Doğrusal olmayan faz kaymaları (Kerr lens modu kilitleme, katkı maddesi darbe modu kilitleme, doğrusal olmayan polarizasyon dönüşü) veya yoğunluğa bağlı frekans dönüşümüne (doğrusal olmayan ayna modu kilitleme) gibi çeşitleri vardır (Url-4). Pasif mod kilitlemede darbeler her hangi bir harici modülasyon sinyali olmadan lazerin içyapısı yoluyla pasif olarak oluşur. Lazerdeki normal gürültü dalgalanmalarından başlar. Bir gürültü artışı, doyurulabilir soğurucudaki kaybını önemli ölçüde azaltacak kadar güçlüdür ve bu nedenle, sonraki kavite gidiş dönüşleri sırasında daha güçlü bir şekilde yükseltilecektir, böylece daha güçlü gürültü artışı, kaybını daha da azaltmaya devam eder ve kararlı duruma ulaşana kadar büyümesini sürdürür [11],

### **2.3 Erbiyum Katkılı Fiber Yükselteç (EDFA)**

Erbium Katkılı Fiber Yükselteç fiberin çekirdeğindeki cama Erbiyum iyonları ( $Er^{3+}$ ) katkılandırılarak yapılır. Erbiyum iyonları çeşitli enerji durumlarında bulunabilir. Bir erbiyum iyonu yüksek enerji durumundayken, bir foton onu enerjisinin bir kısmını kaybederek daha düşük enerjili (daha kararlı) bir duruma dönmesi için uyaracaktır. Buna daha önceki bölümde bahsedildiği üzere “uyarılmış emisyon” denir. Uyarılmış emisyonun gerçekleşebilmesi için öncelikle erbiyum atomlarını temel seviyeden yüksek enerji seviyesine geçiş yapması gerekir. Lazer diyot ile 810, 980 ve 1480 nm dalga boylarında pompalanan fotonların enerjisini soğuran erbiyum iyonları daha yüksek enerji seviyelerine geçiş yapar. Bununla birlikte, 810 nm'lik dalgaboyu ile pompalanan fotonlar, güçlü uyarılmış soğurmaya (ESA) sebep olarak pompa foton kayıplarına neden olur. Sonuç olarak, pompalama dalga boyları olarak 980 ve 1480 nm dalga boyundaki ışınlar daha yaygın olarak kullanılır. 980 nm dalga boylu pompalanan fotonlar, küçük sinyal yükselticileri için daha yüksek kazanç verimliliği ve sinyal-gürültü oranı (SNR) sağlar [13]. Erbiyum katkılı fiberlerin optik sinyalleri nasıl yükselttiği, enerji seviyeleri ile ilişkilidir. Şekil 2.7’de verilen enerji seviyelerinin de alt durum grupları vardır. Elektronlar enerjilerine bağlı olarak her hangi bir alt durumda bulunabilir.



Şekil 2.7 : Erbiyum iyonu (Er<sup>3+</sup>) enerji seviyeleri

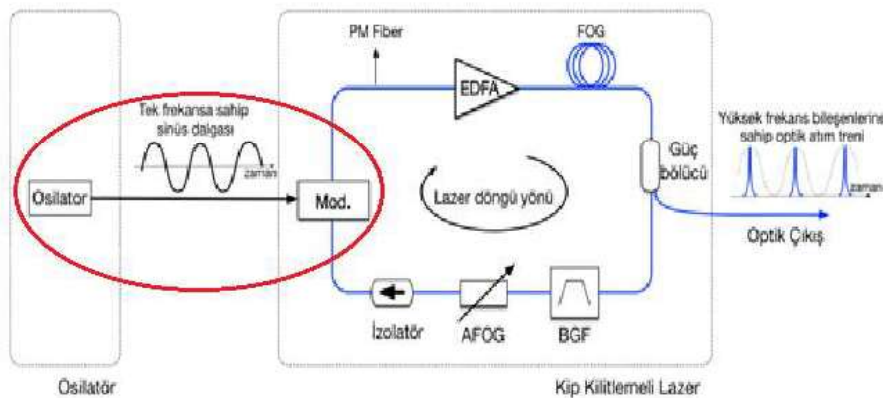
Erbiyum iyonlarının 980nm dalga boyundaki pompa fotonu ile uyarılması sonrası yükseltme özet şeklinde aşağıya verilmiştir.

- 980 nm'deki bir foton, I15/2 durumundaki bir elektronla etkileşir. Elektron fotondan enerjiyi emer ve I13/2 bandına geçer. Foton yok olur.
- I13/2 bandı kararsızdır ve bu durumda elektronlar, yaklaşık bir mikrosaniyelik bir yarı ömürle aşağıdaki banda (I11/2 bandı) bozunur. Bu bozunma ile açığa çıkan enerji, kafes titreşimlerine (fononlar denir) emilir.
- I11/2 durumu yarı kararlıdır. Bu durumdaki elektronlar bir süre orada kalabilirler.
- Bir elektron bu durumdan kendiliğinden bozunursa, 1550 nm dalga boyu civarında bir foton yayar.

- Bir sinyal ışığı fotonu geldiğinde ve I11/2 bandındaki uyarılmış elektronla etkileşime girdiğinde, elektron temel duruma atlar (aslında temel durum içindeki alt durumlardan biridir). Bu olduğunda bir foton verir.
- Anlamlı bir yükseltmenin gerçekleşebilmesi için nüfus tersinmesinin olması gerekir. Bu, uyarılmış durumda temel duruma göre daha fazla erbiyum iyonu olması gerektiği anlamına gelir. Bunun nedeni erbiyum iyonlarının salınan fotonları pompa fotonunu soğurduğu gibi soğurmasıdır.
- Gelen bir fotonunun uyarılmış bir erbiyum iyonu ile karşılaşma ve yükseltme olma olasılığı, temel durumdaki bir erbiyum iyonu ile karşılaşması ve soğurulma olasılığından daha büyük olmalıdır.

Buradaki önemli bir nokta, erbiyum iyonlarının yalnızca özel bir dalga boyundaki fotonun enerjisini soğurup daha yüksek enerjili bir duruma geçmesidir. Yaklaşık 1525 nm ile 1570 nm arasındaki dalga boyları aralığındaki fotonlar uyarılmış erbiyum iyonlarını uyarılmış emisyonu maruz kalmasına neden olacak ve bu nedenle sinyal güçlendirilecektir. Diğer dalga boylarındaki fotonlar etkilenmeden cihazdan geçecektir.

## 2.4 Faz Gürültüsü



Şekil 3.1 : Kip Kilitlemeli Lazer ve Osilatörün Gösterimi

Geliştirilen lazer aktif kip kilitleme yapacaktır. Aktif kip kilitleme yapılabilmesi için lazer kavitesinde dolaşımdaki ışının RF sinyali ile Mach Zehnder modülatöründe modüle edilmesi planlanmıştır. Bunun için Şekil 3.1'deki osilatör kullanılmıştır. Bu

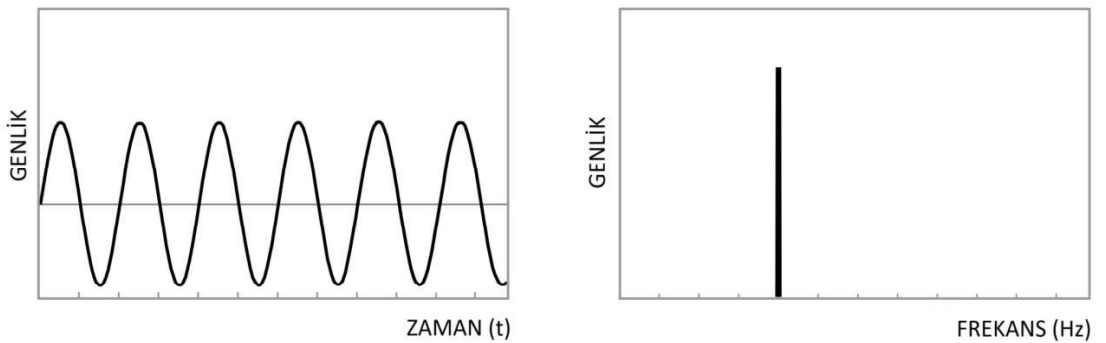
Osilatör, belirli frekansta sinyal üreten bir cihazdır. Birçok elektronik cihazda kritik bir bileşendir ve tek bir RF cihazının birden fazla osilatöre sahip olması yaygındır. Bu nedenle, osilatörün frekansı veya faz kararlılığı çok önemlidir. İdeal olarak osilatör çıktısının mümkün olduğu kadar kararlı olmasını isteriz.

Tahmin edilebileceği gibi, tüm osilatörler bir miktar frekans veya faz değişimi sergilerler ve bu değişimi en aza indirmenin yolları olmasına rağmen, asla tamamen ortadan kaldırılamaz. Bir miktar kararsızlık genellikle kabul edilebilir ancak aşırı frekans kararsızlığı birçok uygulamada ciddi sorunlar yaratabilir. Bu nedenle, bu istikrarsızlık seviyesini doğru bir şekilde ölçmek veya ölçmek için bir yol bulunması önemlidir. Osilatörler genellikle birincil etkenlerden biri olsa da, sinyal zincirindeki diğer bileşenler veya cihazlar da sinyalin frekans veya fazında istenmeyen değişikliklere neden olabilir.

İdeal bir osilatörün çıktısı, genellikle şu şekilde tanımlayabileceğimiz tamamen sinüzoidal bir sinyaldir.

$$V(t) = V_0 \cdot (\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)) \quad (2.3)$$

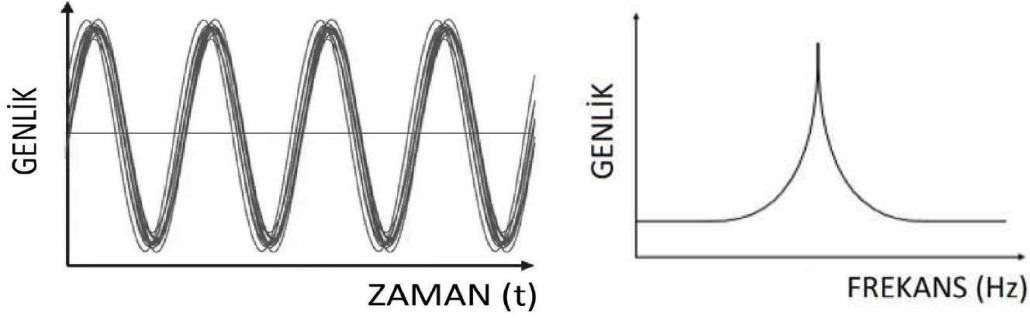
Bu denklemde sinüzoidin genliği sabit  $V_0$ 'dır. Radyal frekans  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  sabittir. Frekans alanındaki bu ideal sinyale bakarsak, saf sinüsoidimiz, Şekil 2.8'de gösterildiği gibi tüm gücü tek bir frekansta olan tek bir dar spektral çizgi olarak görünecektir.



Şekil 2.8 : İdeal osilatör çıktısı zaman ve frekans spektrumunda gösterimi

İdeal olmayan veya gerçek bir osilatör sinyali, ideal sinyalden iki şekilde farklıdır. Radyal frekans  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  hala bir sabittir, ancak genlik ve faz kayması zamanın her ikisi de fonksiyonudur. Başka bir deyişle, sinyalin genliği ve fazı sabit

değildir. Zaman alanı fazındaki varyasyonlar, sinüzoidin x eksenini kırdığı yerin kaymasına neden olur ve bu fenomene titreşim (jitter) denir. Frekans alanında bu varyasyonlar, Şekil 2.9'da gösterildiği gibi taşıyıcının her iki tarafında yan bantlar veya etekler oluşturur.



Şekil 2.9 : Gerçek osilatör çıktısı zaman ve frekans spektrumunda gösterimi

Bu durum aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$V(t) = (V_0 + \alpha(t)).(\sin(2.\pi.f.t + \theta(t))) \quad (2.4)$$

Bu denklemde  $\alpha(t)$  genlik gürültüsünü,  $\theta(t)$  ise faz gürültüsünü ifade eder.

Faz gürültüsü, faz veya frekans kararlılığındaki kısa vadeli değişiklikleri tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Sinyalin fazındaki ve genliğinde meydana gelen değişiklikler istenmez ancak çoğu durumda faz varyasyonunun etkileri genlik varyasyonlarının etkilerinden çok daha büyük ve daha önemlidir. Bu yüzden faz gürültüsü ne kadar düşükse sinyal o kadar kusursuzdur denebilir. Haberleşme sistemlerinde faz gürültüsünün düşük olması önemli bir tasarım ölçütüdür.

Faz gürültüsü tanımlamanın veya tanımlamanın başka bir yolu, rastgele veya kasıtsız faz modülasyonudur. Kısa süreli kararlılık veya iyi faz gürültü performansı, çeşitli RF uygulamalarında çok önemlidir. Ancak bu kısa vadeli kararlılığı elde etmek, çoğunlukla faz gürültüsü performansındaki artışlarla bağlantılı olarak zor ve önemli bir maliyet kalemidir.

#### 2.4.1 Faz gürültüsü ölçümü ve analizi

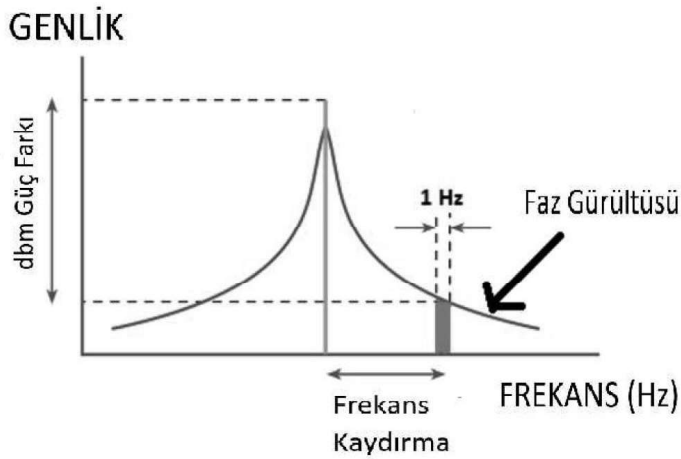
Faz gürültüsünü ölçmek için spektrum analizörü ve faz gürültüsü analizörleri olmak üzere kullanılacak iki tür cihaz vardır.

Bu cihazlar genellikle çok benzer görünürler ve sonuçları benzer şekillerde gösterirler ancak aralarında önemli farklar vardır. Spektrum analizörler, faz gürültüsünü ölçmek

için kullanılan geleneksel araçlardır. Faz gürültüsünü elle ölçmek neredeyse her durumda mümkün olsa da, spektrum analizörlerinde faz gürültüsü ölçümleri, otomatik faz gürültüsü ölçüm uygulaması veya seçeneği kullanılarak yapılır. Spektrum analizörü kullanmanın en büyük avantajı, çeşitli diğer ölçümlerde kullanılabilen esnek, genel amaçlı bir cihaz olmasıdır.

Faz gürültüsü analizörü, genellikle geleneksel spektrum analizörlerinden daha yüksek hıza ve hassasiyete sahiptirler, artan hassasiyet çoğunlukla çapraz korelasyon yönteminden kaynaklanmaktadır. Ek olarak birçok modern faz gürültüsü analiz cihazı, genlik gürültüsünü ve sahte emisyonları ölçme yeteneği veya voltaj kontrollü osilatörleri karakterize etme yeteneği gibi osilatörleri test ederken yardımcı olan başka işlevlere de sahiptir.

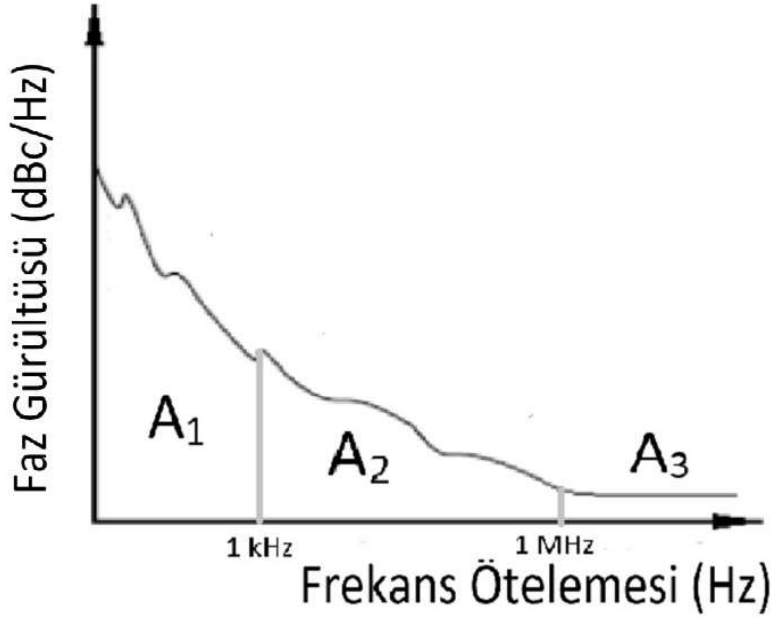
Spektrum analizörü ile faz gürültüsü ölçümleri aynı zamanda temel faz gürültüsü ölçüm kavramlarını ve ölçüm sonuçlarını anlaşılmasına da yardımcı olur. Spektrum analizör yöntemindeki ilk adım, nominal osilatör çıkış sinyali olan taşıyıcının gücünün dbm cinsinden mutlak güç olarak ölçülmesidir. Daha sonra taşıyıcı sinyalden belirli bir frekans uzaklığında ve 1 hertz bant genişliği içindeki gürültü gücü ölçülür (Şekil 2.10). Gürültü gücünden taşıyıcı sinyal gücü çıkarılır ve sonuç hertz başına dbc biriminde faz gürültüsü olur. Bu değerler tüm durumlarda her zaman negatiftir. Bu işlem taşıyıcı sinyal frekansından farklı frekans sapmalarında tekrarlanır ve sonuçlar genellikle farklı sapmalarda farklı olur, genellikle taşıyıcıdan uzaklaştıkça azalır.



Şekil 2.10 : Faz gürültüsü ve hesaplanmasının gösterimi

Yukarıdaki örnekte faz gürültüsü tarafından oluşturulan yan bantlar genellikle taşıyıcı sinyal frekansı etrafında simetrik olduğundan, faz gürültüsü taşıyıcı sinyal frekansından pozitif bir frekans sapması ile ölçülür. Ölçülen faz gürültüsü taşıyıcı sinyal frekansından belirli bir pozitif ve negatif sapma için aynı olacaktır. Bu nedenle faz gürültüsü normalde taşıyıcı sinyal frekansından yalnızca bir tarafında ölçülür ve buna geleneksel pozitif kaymalar tarafından tek yan bant faz gürültüsü denir.

Tek yan bant faz gürültüsü ölçülür ve tanımlı öteleme aralığı üzerinde çizilir (Şekil 2.11). 1 kHz ile 1 MHz geniş bir frekans aralığını kapsadığı için logaritmik ölçek kullanılır.



Şekil 2.11 : Tek yan bant faz gürültüsü ölçüm sonuçları gösterimi

Grafikte logaritmik ölçek kullanıldığından taşıyıcı sinyal frekansına yakın frekans ötelemelerinde daha iyi çözünürlüklü sonuçlar görülür. Genellikle yakın frekans ötelemelerinde ölçülen faz gürültüsüyle uzak frekans ötelemelerinde ölçülen faz gürültüsüne göre daha fazla ilgilenilir. Faz gürültüsü sistemler üzerinde istenmeyen bir etki olduğundan, faz gürültüsü ölçüm grafiklerinde daha düşük değerler daha iyi faz gürültüsü performansı anlamına gelir. Faz gürültüsü grafiğinde frekans ötelemelerine göre ölçüm sonuçlarının farklı eğimlere sahip olduğu gözlemlenir (Bknz A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub> alaları). Bunun nedeni faz gürültüsünün nedenleri veya kaynaklarının farklı olmasıdır. Genellikle taşıyıcı frekansından uzaklaştıkça faz gürültüsü azalır.

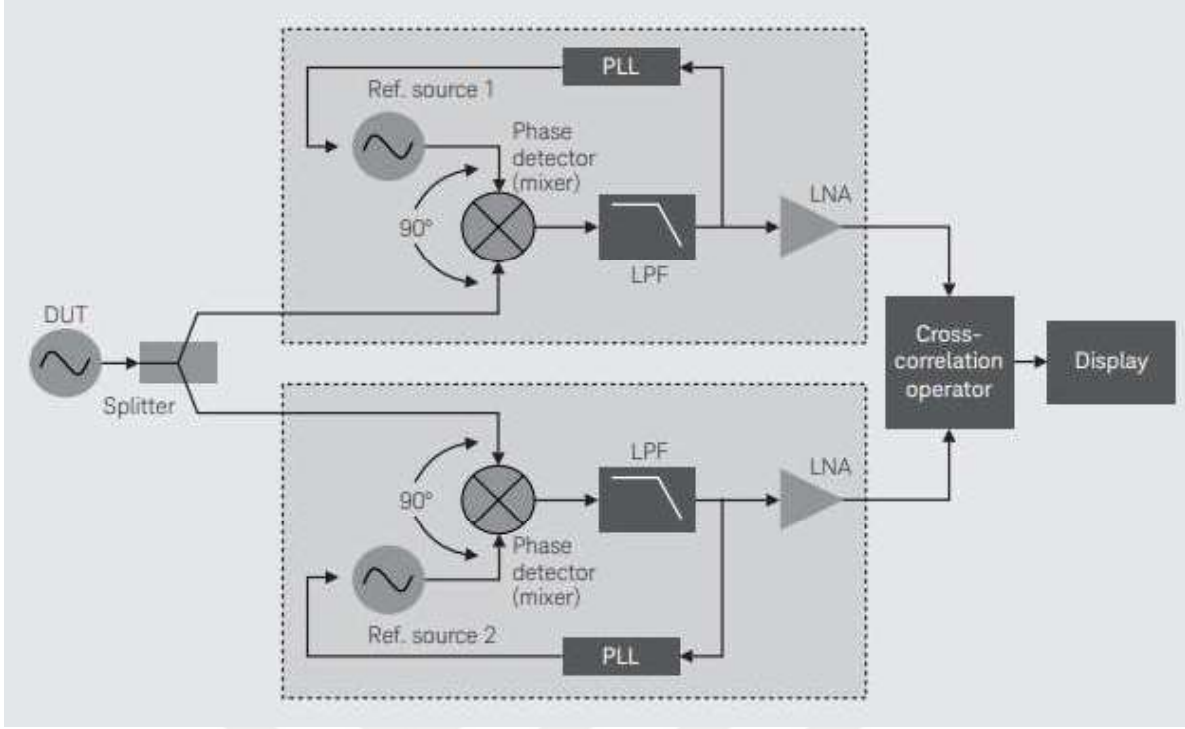
Tek yan bant faz gürültüsü grafiğine ek olarak, faz gürültüsü ölçüm sonuçlarını temsil etmenin başka bir yaygın yolu da spot gürültüdür. Spot gürültü varsayılan olarak belirli frekans ötelemelerinde ölçülen faz gürültüsüdür. Bu ötelemeler genellikle onlu ötelemeler olarak adlandırılır, yani 1 kilohertz, 10 kilohertz ve 100 kilohertz vb. gibi 10'un katları olan ötelemelerdir. Spot gürültüyü isteğe bağlı olarak farklı ötelemelerde de ölçmek mümkündür. Spot gürültüler genellikle tablo biçiminde verilir ve çoğunlukla belirli bir ötelemelerde faz gürültüsünün belirli bir eşğin altında olduğunu doğrulamak için kullanılır.

Çizelge 2.1: Spot faz gürültüsü gösterimi

Öteleme Frekansı	Faz Gürültüsü
1 kHz	-115.33 dBm/Hz
10 kHz	-125.41 dBm/Hz
100 kHz	-128.65 dBm/Hz
1 MHz	-129.88 dBm/Hz
10 MHz	-130.11 dBm/Hz

Faz gürültüsü sonuçlarını benzer şekilde göstermesine rağmen, faz gürültü analizörü spektrum analizöründen farklı şekilde ölçüm yapar. İlk fark faz gürültüsü analizörlerinin özel bir dijital faz demodülatörü kullanarak faz gürültüsünü doğrudan ölçmesidir. Diğer önemli fark ise faz gürültüsü analizörlerindeki çapraz korelasyon fonksiyonu ile ilgilidir. Çapraz korelasyon iki sinyal arasındaki benzerliğin bir ölçüsüdür ve maksimum benzerlik için gerekli zaman gecikmesini de sağlayabilir. Faz gürültüsü analizörlerinde çapraz korelasyon fonksiyonunun kullanılması için iki bağımsız osilatörü olan özdeş ölçüm yolu vardır. Test edilecek sinyal öncelikle güç bölücü ile iki özdeş sinyale bölündüğü için her iki yola giren sinyalde ilişkili faz gürültüsü ve bağımsız osilatörlerden kaynaklanan ilişkisiz faz gürültüsü vardır. Bu iki sinyale daha sonradan çapraz korelasyon fonksiyonu uygulanarak bağımsız osilatörlerden kaynaklanan ilişkisiz faz gürültüleri ortadan kaldırılır ve sonuç olarak sinyalin ilişkili faz gürültüsü ölçülür. Çapraz korelasyon tekrarlanan bir süreç olarak gerçekleştirilebilir ve tekrarlanan çapraz korelasyonlar sinyalin korelasyonlu ve korelasyonsuz kısımlarını daha açık bir şekilde ayırır. Korelasyonların sayısını artırmak toplam ölçüm süresini de artırır. Şekil 2.12 ile örnek çapraz korelasyon diagramı gösterilmiştir (Url-5).





Şekil 2.12 : Örnek faz gürültüsü analizörü çapraz korelasyon diagramı (Keysight Technologies E5052B Signal Source Anaylzer)

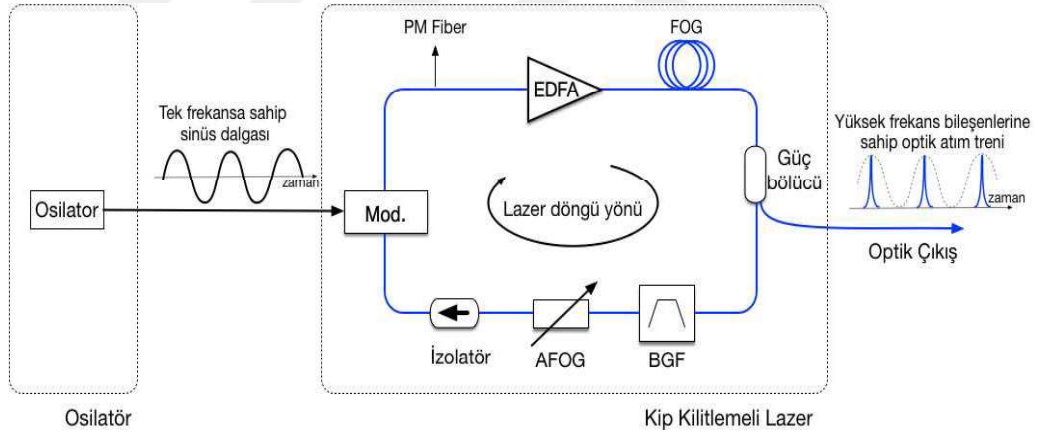
### 3. 4 GHZ FREKANSINDA DÜŞÜK FAZ GÜRÜLTÜLÜ KIP KİLİTLEMELİ LASER GELİŞTİRİLMESİ

#### 3.1 Amaç

Bu çalışmada aktif kip kilitleme yapan fiber lazer geliştirilmesi amaçlanmıştır. Lazerde izolatör ve eğimli sonlandırılmış konnektörler kullanılarak fresnel yansımalarının ve potansiyel geri yansımaların optik yükseltece ulaşarak lazerde kararsızlık durumlarının oluşmasına engel olunması hedeflenmiştir.

#### 3.2 Yöntem

Lazerin şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Kip Kilitlemeli Lazer ve Osilatörün Gösterimi (Mod: Modülasyon, AFOG: Ayarlanabilir Fiber Optik Geciktirici, BGF: Bant Geçirgen Filtre, FOG: Fiber Optik Geciktirici, PM: Polarizasyon Koruyucu Fiber Optik Kablo, EDFA: Erbiyum Ekli Fiber Yükselteç)

Lazer aktif bir şekilde kip kilitleme yapacaktır. Bunun için harici bir RF sinyaline ihtiyaç vardır. Bu sinyal lazer kavitesindeki optik modülasyon yapmaya yaran Mach-Zehnder modülátöre ulaştırılacaktır. Bu modülátör içinden geçen lazer ışığı modüle edecek ve lazer frekansı üzerinde RF sinyali frekansında yan bantlar oluşturacaktır. Lazer ışığı sürekli bir döngü halinde olacağı için modülátör içinden defalarca geçecek ve her seferinde bir yan bant daha oluşarak optik spektrum genişleyecektir. Bu sayede

yüksek harmonik frekansları optik frekansta oluşmuş olacaktır. Bu yüksek harmonik frekansları sebebiyle lazerin içinde dolanan optik sinyal sadece Rf sinyali frekansında bir sinüs dalgası değil içinde pek çok yüksek frekans harmoniğini de içeren kısa atımlı bir optik atım treni olacaktır. Bu çok dar optik atımların lazer kavitesinden dışarıya alınması içinde bir optik güç bölücü kullanılacaktır. Kip kilitlemeli lazer polarizasyon koruyuculu (PM) fiber optik kablodan yapılacaktır. Lazer kavitesindeki optik modülatör belli bir polarizasyonda çalıştığı için polarizasyonun lazer kavitesinde bir tam tur dönüşünde polarizasyonun değişmemesi gerekir. Bunun içinde lazer kavitesindeki bütün bileşenlerin polarizasyon koruyucu özelliği olması gerekmektedir.

Lazerde kazanç ortamı olarak bir EDFA (erbiyum tabanlı optik yükselteç) kullanılacaktır. EDFA'dan sonra lazer kavitesinin kalite faktörünün (Q factor) artırılması için uzun bir fiber optik geciktirici kablo yer alacaktır. Kalite faktörünün literatürde bant genişliği ve depolanan enerji yaklaşımı olarak iki farklı tanımı vardır. Bu iki tanımda kalite faktörü değer olarak aynı sonucu vermese de yüksek kalite faktörü değerinde birbirine yaklaşır (Url-6). Yüksek kalite faktörü sinyalin daha az kayıba uğradığı dolayısıyla daha az sönümlenmesi demektir. Fiber optik kablo geciktiriciler; optik sinyalin merkez frekansının yüksek olması, kavitedeki modun yarı maksimum güç bant genişliğinin dar olması ve bu iki değerlerin oranının yüksek olması ile kalite faktörünün bant genişliği yaklaşımı tanımında yüksek değer verirken [16], düşük optik zayıflama oranı ile kavitede daha uzun süre depolanan enerjinin bir tam turdaki enerji kaybına oranının yüksek olması sebebiyle depolanan enerji yaklaşımı tanımında da yüksek değer verir (Url-6). Bu kablonun çok fazla uzun olması bazı karakteristik süpermod gürültüleri oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple farklı uzunlukta fiber optik kablolar denenerek en düşük faz gürültüsü (jiter) değerini sağlayan uzunluk seçilecektir.

Fiber Optik Geciktiriciden sonra lazer kavitesindeki lazer ışığını dışarıya almak için bir güç bölücü kullanılacaktır. Devamında optik spektrumun yerinin ve genişliğinin kontrol edilebilmesi için bir bant geçirgen filtre kullanılacaktır. Bu filtrenin merkez dalga boyu 1550 nm'de olacaktır. Farklı Bant genişliği değerlerinde bant geçirgen filtreler denenerek yine en düşük faz gürültüsünü veren değer bulunacak ve bu değerdeki bant geçirgen filtre proje için kullanılacaktır.

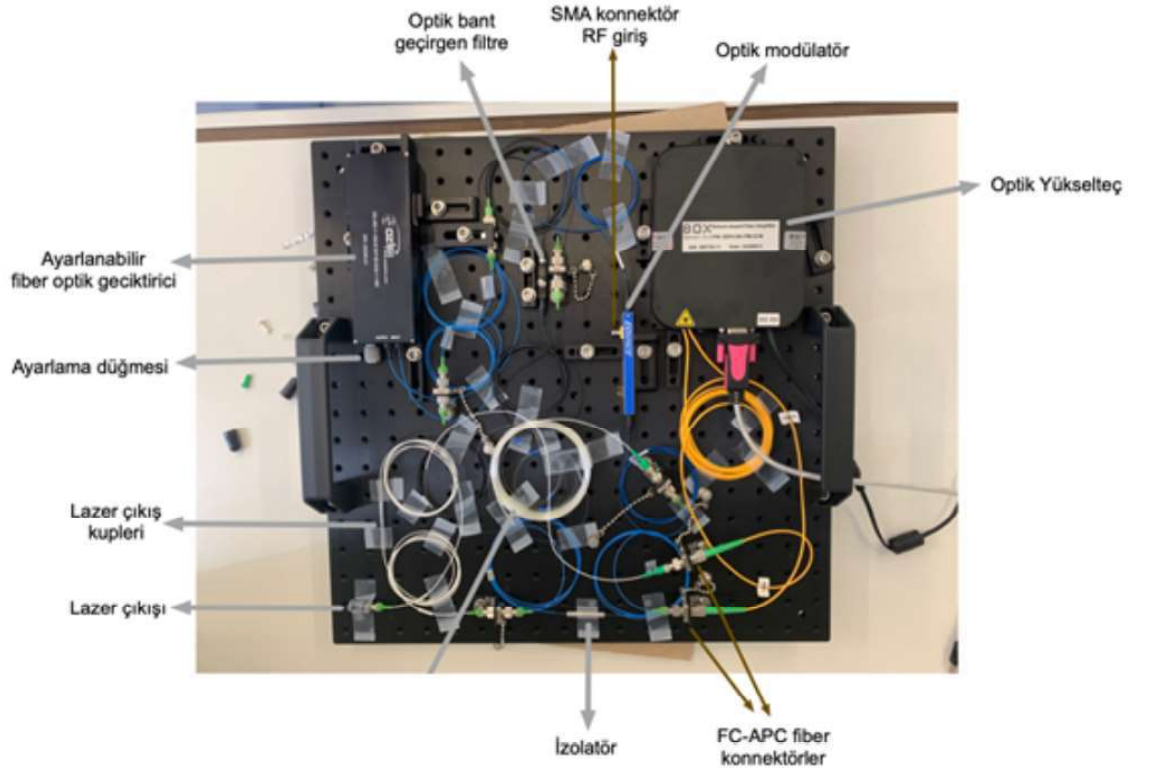
Bant Geçiren Filtre'den sonra ayarlanabilir fiber optik geciktirici (AFOG) yer almaktadır, bu geciktiricinin görevi fiber optik kablonun uzunluğunu  $1/RF$  süresinin tam katlarına ayarlamaktır, aksi takdirde bir tam tur döndükten sonra optik atımlar üst üste binmez ve lazer kararlı olmayan bir duruma girer.

Lazer kavitesinde yer alan izolatör ışığın bir yönde gitmesini sağlarken diğer yönde ilerlemesini engelleyerek lazer ışığının sadece tek yönde ilerlemesini sağlayacaktır. Bu sayede lazerin çıkışından olabilecek potansiyel geri yansımaların optik yükseltece ulaşarak lazerde kararsızlık durumuna sebep olmasını engellenecektir

İzolatörden sonra optik modülatör yer almaktadır. Bu modülatör dışarıdaki bir osilatörden gelen RF sinyali optik sinyal üzerinde bindirecektir.

### 3.3 Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar ve Elde Edilen Bulgular

Geliştirilen lazerin bir resmi Resim 3.1'de gösterilmektedir.



Resim 3.1: Geliştirilen lazerin resmi

Resim 3.1’de gösterilen lazer 45 cm x 45 cm bir tabla üzerine kurulmuştur. Lazerde ışık kaynağı olarak bir erbiyum tabanlı optik yükselteç kullanılmıştır. Bu lazerin çıkış fiberi ilk önce bir izolatörden geçmektedir. Bunun sebebi hem tek yönlü ışımının sağlanması hem de lazerin çıkışından olabilecek potansiyel geri yansımaların optik yükseltece ulaşarak lazerde kararsızlık durumuna sebep olmasını engellemektir. Optik yükselteçten çıkan fiber optik kablo, izolatörün giriş fiberine FC-APC fiber konnektör ile bağlanmıştır. Bu konnektörler özel olarak 8 derece eğimli bir şekilde sonlandırılmış fiberleri birleştirmek için kullanılmaktadırlar. Bu fiberlerin 8 derece eğimli olarak sonlandırılmalarının sebebi geriye olabilecek bir Fresnel yansımasının fiber optik kabloda ilerlemesini engellemektir. FC-APC konnektörler lazerdeki bütün fiber optik kabloların birleştirilmesinde kullanılmıştır; resimde ise sadece iki tanesi gösterilmiştir. İzolatörden çıkan fiber optik kablo bir lazer kuplerine girmektedir. Kullanılan kuplerin tek girişi ve iki çıkışı vardır; bu iki çıkışdan birine giren ışığın %10’unu diğerine de %90’ını göndermektedirler. Kuplerin %10 çıkışı lazerin çıkışı olarak kullanılmaktadır. Geriye kalan %90 çıkışı ise lazer kavitesine tekrar geri gönderilerek döngünün tamamlanması sağlanmaktadır. Kupler’den çıkan %90 optik güç ayarlanabilir fiber optik geciktiriciye gönderilmektedir. Ayarlanabilir fiber optik geciktiricinin giriş ve çıkışı fiber optik kablo olursa da içerisindeki ayna düzenekleri ile sürekli bir değişen geciktirme uygulamaktadır. Bu bileşen ön tarafındaki düğmenin dönmesi ile farklı değerlerde fiber geciktirici sağlanabilmektedir. Bu cihazın kullanılmasındaki sebep lazerin oluşturduğu optik atımların 4 GHz frekansında olmasının amaçlanmasıdır. Lazerden çıkan optik atımların tekrar frekansının 4 GHz olması için lazer kavitesinde optik atımların bir tam tur dönmesi için gereken süre  $1 / (4 \text{ GHz})$  ‘in tam katı olmasıdır. Bu sürenin ayarlanması içinde bu ayarlanabilir geciktirici kullanılmaktadır. Bu bileşenden çıkan fiber kablo optik bant geçiren filtreye ulaşmaktadır. Bu bant geçiren filtrenin merkez frekansı 1550 nm’dir. Bu sayede lazerin merkez frekansı farklı değerlere kaymayacak ve sabit bir yerde bulunacaktır. Bunun yanında bu filtre lazer spektrumun kontrolsüz bir şekilde genişlemesinin de önüne geçecektir. Bu filtreden geçen optik sinyal yüksek hızlı bir elektro-optik modülatöre gönderilmiştir. Bu modülatörün RF girişinden gönderilecek olan 4 GHz frekansında RF sinyali ile ışık modüle edilecek ve kip kilitlemesi sağlanacaktır. Modülatörden çıkan optik sinyal uzun bir fiber optik sarımdan geçirilmiştir, bu sayede lazerin kalite faktörü artırılmış

ve daha düşük faz gürültüsü elde edilebilecektir. Fiber optik kablodan çıkan sinyal tekrar optik yükseltece gönderilir ve lazer döngüsü böylece tamamlanmış olur.

Lazerin geliştirilmesi için kullanılan bileşenler aşağıda açıklanmıştır:

Optik yükselteç (Erbiyum Doped Fiber Amplifier - EDFA), bir Çin firması olan Box Optronics'den alınmıştır. Tedarik edilmesi tamamlanan bu yükseltecin en yüksek çıkış gücü 200 mW'dır. Bu çıkış gücünün büyük bir bölümü lazer içerisinde dolanmaya devam edecektir ve küçük bir kısmı dışarıya çıkış olarak alınacaktır. Tedarik edilen optik yükselteç Resim 3.2 'de gösterilmiştir.



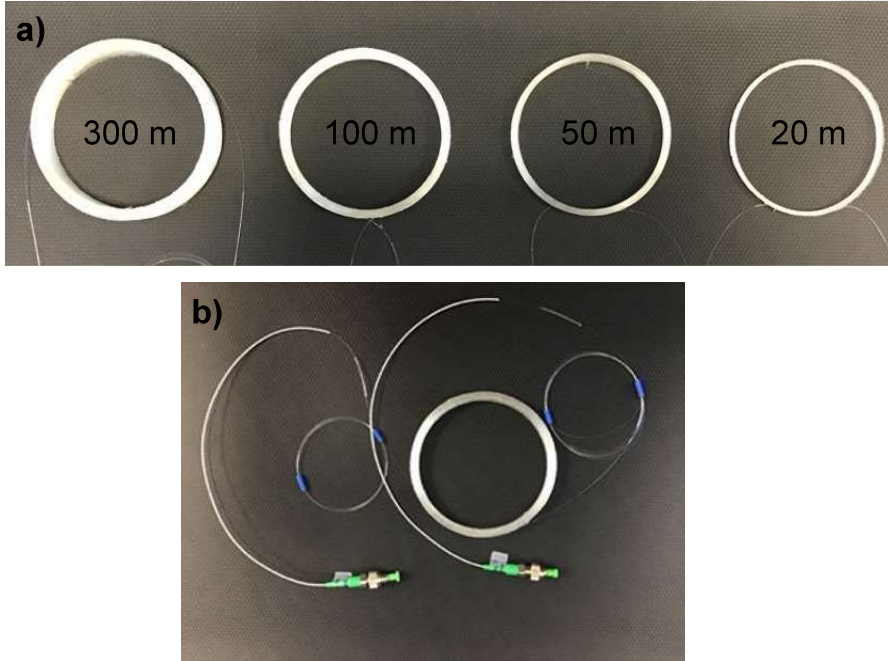
Resim 3.2: 200mW Çıkış Gücünde Erbiyum Tabanlı Fiber Optik Yükselteç

Lazerin bant genişliğinin kontrol edilebilmesi için farklı optik filtreler tedarik edilmiştir. Bu filtrelerden birisi 5 nm genişliğinde olup diğeri 3 nm genişliğindedir. Bu filtrelerden 5 nm genişliğinde olanın resmi Resim 3.3'de gösterilmiştir.



Resim 3.3: 1550 nm merkez frekansında 5 nm genişliğinde optik filtre

Sistem optimizasyonu sırasında test edilen diğer bir parametrede fiber optik geciktiricidir. Bu geciktirici fiberlerin resimleri Resim 3.4'de gösterilmiştir.

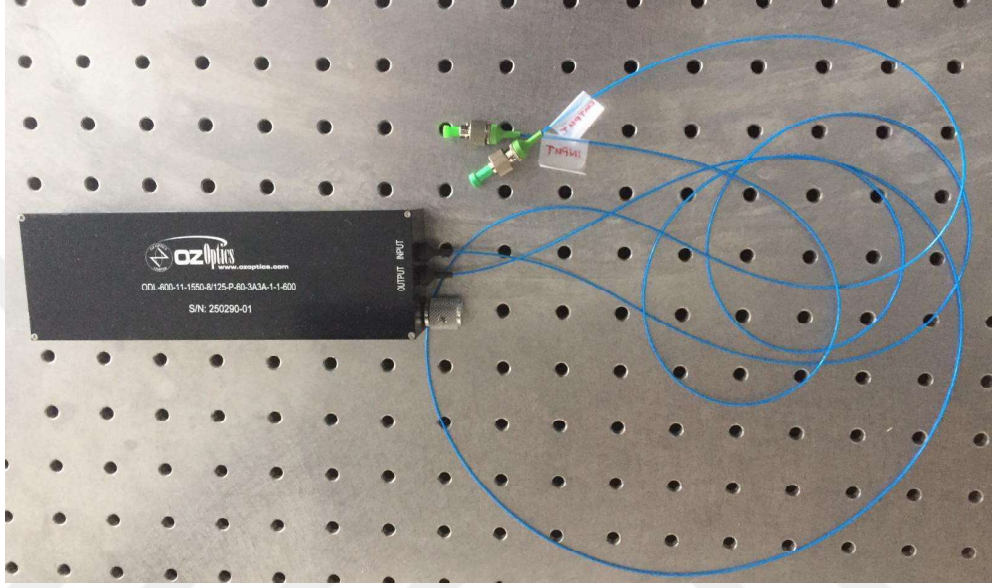


Resim 3.4: a) Farklı uzunlardaki fiber sarımlar b) konnektörlü gösterimi

Geliştirilecek olan kip kilitlemeli lazerin frekansı 4 GHz olacaktır. Bu lazerin 4 GHz frekansında çalışabilmesi için optik sinyalin lazer döngüsü içinde bir tam tur dönmesi



için gereken süre  $1 / 4$  GHz'in tam katları olmak zorundadır. Lazerin içindeki ışığın bir tam tur dönmesi için gereken koşulun sağlanması için ayarlanabilir fiber optik geciktirici kullanılmıştır. Bu geciktiricinin fotoğrafı Resim 3.5'de gösterilmiştir. Bu geciktiricinin ön tarafındaki düğme döndürüldükçe giren ve çıkan optik sinyalin gecikme değeri değişmektedir.



Resim 3.5: Ayarlanabilir Fiber Optik Geciktirici

Osilatörden çıkan RF sinyali, ayarlanabilen fiber optik geciktiriciden geçen lazer ışınını Mach Zehnder optik modülöründe modüle ederek lazer frekansı üzerinde yan bantlar oluşturur. Lazer ışığı sürekli bir döngü halinde olacağı için modülör içinden sürekli geçecek ve her seferinde bir yan bant daha oluşarak optik spektrum genişleyecektir. Bu modülörün fotoğrafı Resim 3.6'de gösterilmiştir.

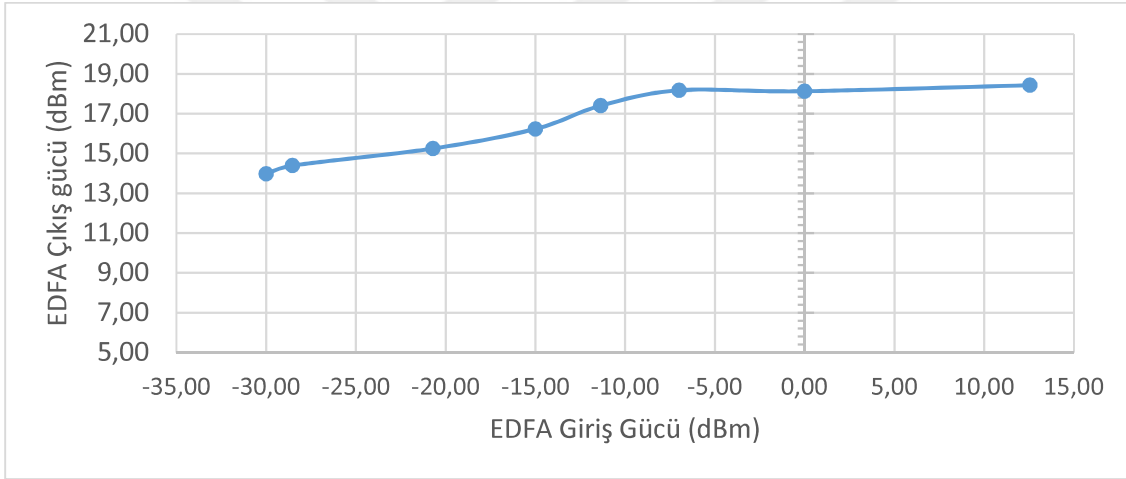


Resim 3.6: Optik Modülör (Mach Zehnder Mod.)

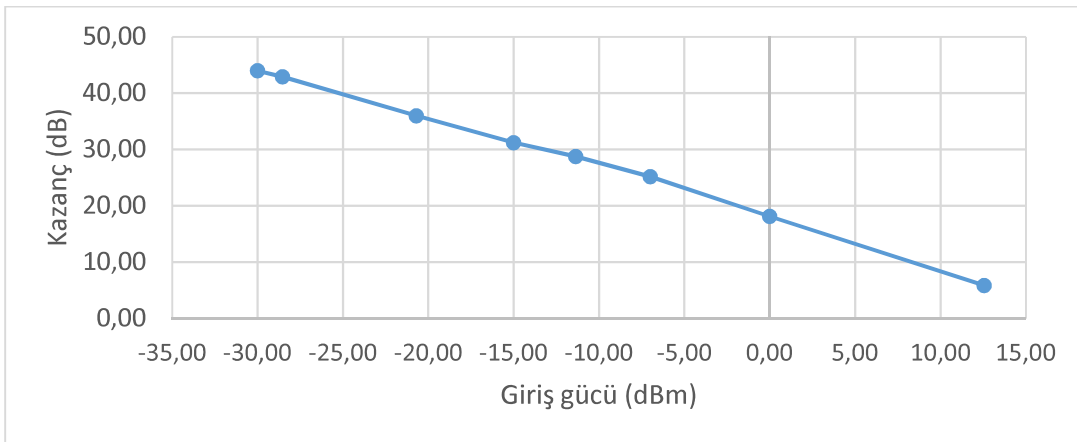


### 3.4 EDFA Karakterizasyonu

Sistemde kullanılan optik yükselteç (EDFA) oldukça kritik bir öneme sahiptir. Kullanılan optik yükseltecin doğru çalışıp çalışmadığını anlamak, istenilen verim ve yeterlilikte optik sinyali güçlendirdiğini ölçmek ve sistemin filtreye ihtiyaç duyup duymadığını kontrol etmek için bazı testler yapılmıştır. İlk test düzeneğinde herhangi bir bant geçiren filtre kullanılmadan optik giriş sinyal gücü kademeli bir şekilde artırılarak çıkış gücü optik güç ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Teste ait sonuçlar Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre optik yükselteç düşük optik sinyal gücünde çok yüksek güç düzeyinde çıkış sinyali göndermektedir. Bunun sebebi sistemde meydana gelen ASE gürültüsüdür. Bu gürültü bastırılmak için sisteme mutlaka bir bant geçiren filtre eklenmelidir. Ayrıca bu teste ait kazanç – giriş gücü grafiği de Şekil 3.3’de verilmiştir.

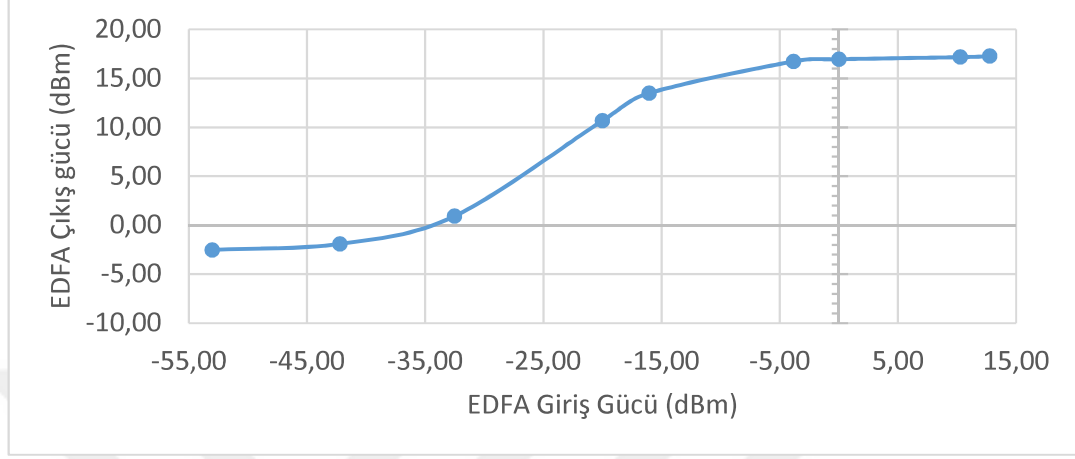


Şekil 3.2 : Test 1 Filtre kullanılmadan artan giriş gücüne göre EDFA çıkış gücü

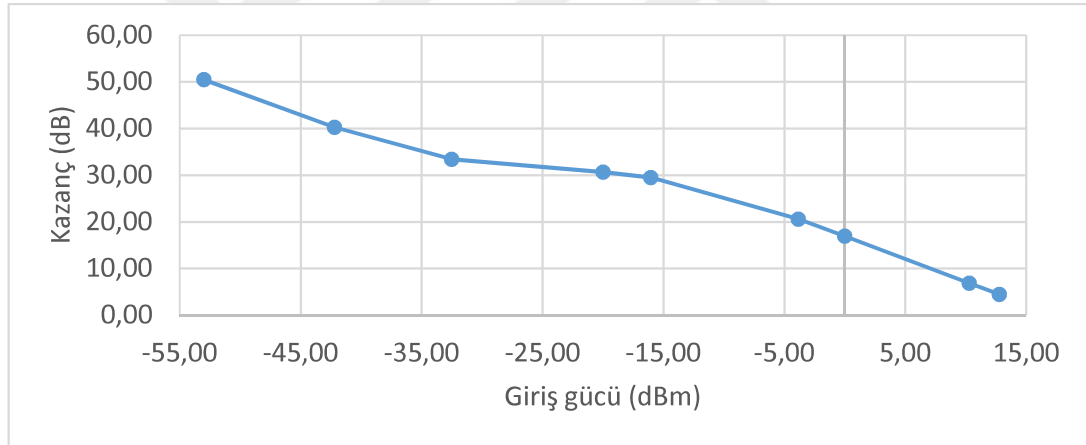


Şekil 3.3 : Test 1 Filtre kullanılmadan artan giriş gücüne göre EDFA kazanç grafiği

Optik sistemi daha kararlı hale getirmek için ikinci test düzeneğinde ise, bir bant geçiren filtre kullanılarak, giriş optik sinyal gücü kademeli bir şekilde artırılarak çıkış gücü optik güç ölçer kullanılarak ölçülmüştür. Teste ait sonuçlar Şekil 3.4’de verilmiştir. Ayrıca, bu teste ait kazanç – giriş gücü grafiği de Şekil 3.5’de verilmiştir.



Şekil 3.4 : Test 2 Filtre kullanılarak artan giriş gücüne göre EDFA çıkış gücü

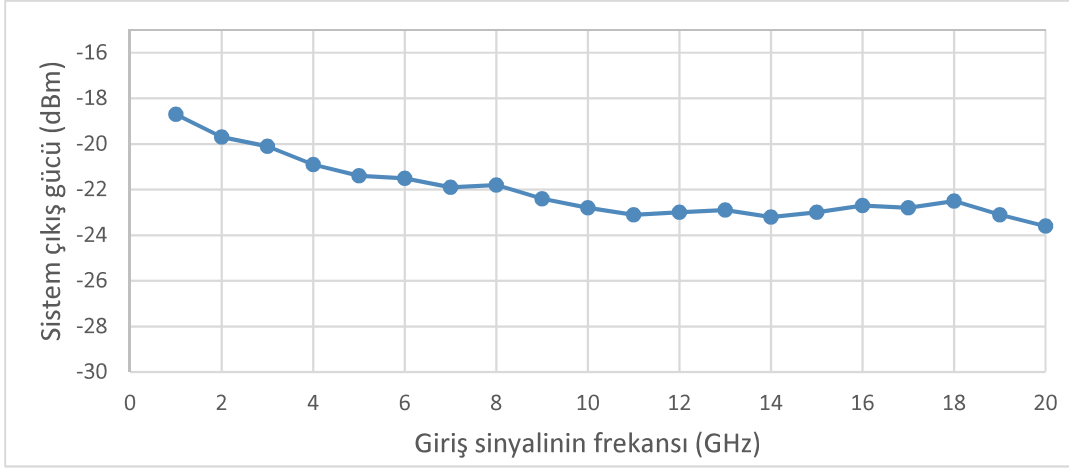


Şekil 3.5 : Test 2 Filtre kullanılarak artan giriş gücüne göre EDFA kazanç grafiği

### 3.5 Modülatör Karakterizasyonu

Bu bölümde, sistemde kullanılan elektro-optik modülatörün karakterizasyonu için yapılan test hakkında bilgi verilmiştir. Sistemde kullanılan elektro-optik modülatörün RF sinyal giriş portu bir sinyal üreticisine bağlanır. Modülatörün girişinden optik sinyal verilir. Ayrıca, DC bağlantı noktalarından ise voltaj uygulanarak modülatörün sinyali taşıyıcı olarak ilettiği nokta belirlenir. Sinyal üreticinden verilen sinüs dalgası halindeki sinyalin frekansı kademeli olarak artırılarak sistemin bu değişime verdiği tepki bir foto detektör ve frekans spektrum analizörü kullanılarak incelenmiştir. Bu

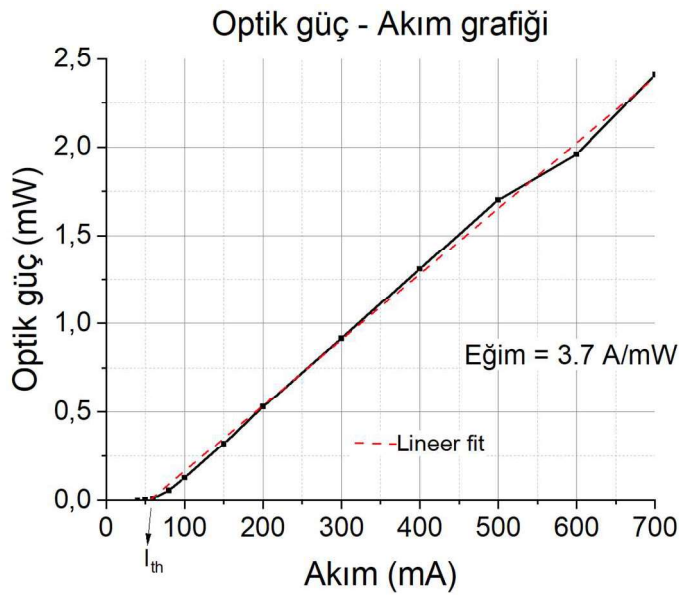
teste ait sonuçlar aşağıda Şekil 3.6’da verilmiştir. Bu sonuçlara göre sistemde kullanılacak elektro-optik modülatör oldukça iyi bir şekilde çalışmaktadır.



Şekil 3.6 : Artan giriş sinyal frekansına göre modülatör karakterizasyonu

### 3.6 Optik Güç Akım İlişkisi

Geliştirilen lazer kip kilitlemesi yapılmadan önce sürekli dalga modunda çalıştırılmış ve güç akım ilişkisi incelenmiştir. Bu ölçüm yapılırken ilk önce elektro optik modülatöre uygulanan voltaj değeri ayarlanarak en yüksek çıkış gücüne ulaşılmıştır. Daha sonra akım 50 mA değerinden başlanarak arttırılmış ve her bir akım değeri için optik güç ölçülmüştür. Ortaya çıkan optik güç – akım grafiği Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7 : Optik güç – Akım (L-I) grafiği

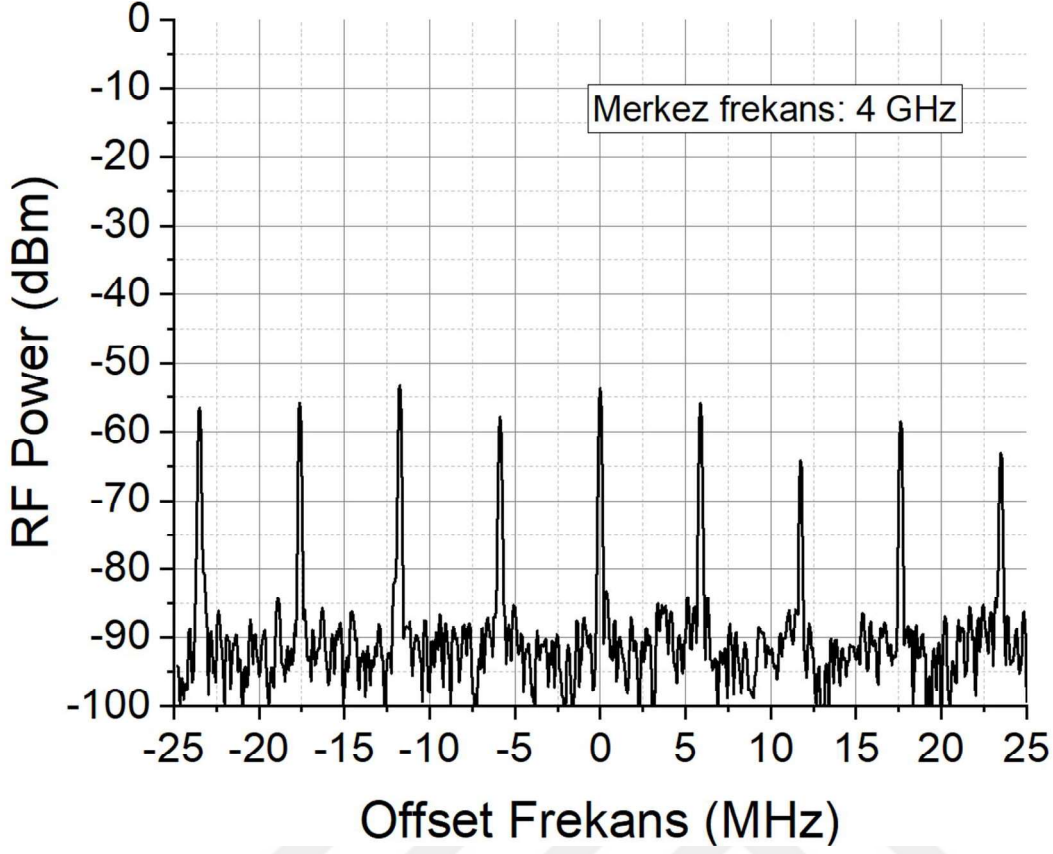
Yukarıdaki grafik incelendiğinde sürekli dalga modunda lazere en yüksek 700 mA akım verildiğinde yaklaşık 2.5 mW değerinde optik güç elde edilmiştir. Bu grafiğe lineer fit yapıldığında eğim 3.7 A/mW olarak bulunmuştur.

Bu grafikten aynı zaman da lazerin eşik akım değeri bilgisi de çıkarılmıştır ve bu değer yaklaşık 60 mA olarak bulunmuştur.

### **3.7 Lazer Kip Kilitlenmesi**

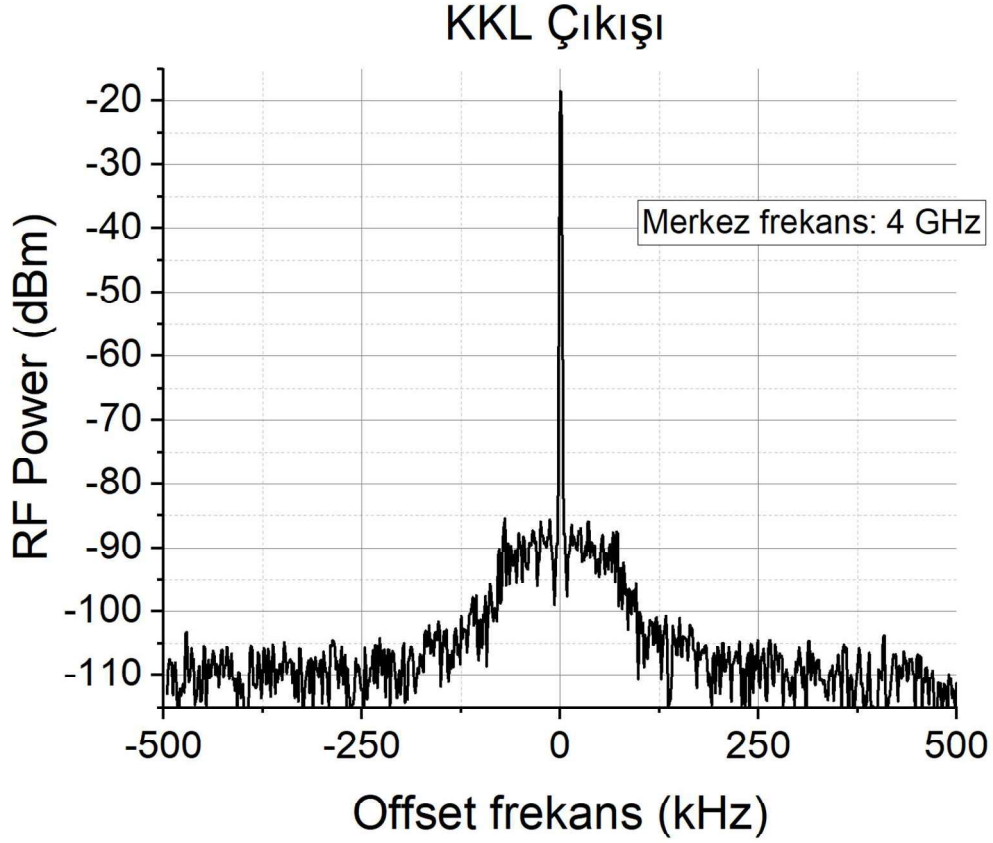
Geliştirilen Resim 3.1’de gösterilen lazer aktif kip kilitleme mekanizmasına sahip bir lazerdir. Bunun içinde dışarıdan bir frekans kaynağından bir sinüs dalgası ile beslenmesi gerekmektedir.

İlk önce dışarıdan bir RF besleme olmadan sadece lazerin içerisinde bulunan optik yükseltece 300 mA değerinde akım gönderilmiştir. Lazer çıkış fiberi yüksek hızlı bir fotodetektöre bağlanmış ve sonrasında 30 GHz bantgenişliğinde Rohde-Schwartz FSV model bir RF spektrum analizör ile 4 GHz etrafındaki spektrum gözlenmiştir. Gözlemlenen spektrum Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Bu spektrumda belli aralıklarla gözlemlenen RF sinyaller bulunmaktadır. Bu sinyaller lazerin desteklediği optik modların birbirleri ile fotodetektörde çarpımında meydana gelmektedir. Bu modların aralık frekansına kavite temel frekansı adı verilir (cavity fundamental frequency). Şekil 3.8’deki grafiğe göre kavite temel frekansı yaklaşık 5.8 MHz değerindedir. Bu frekansın hesaplanması için kullanılan formülün  $c/nL$  olduğu düşünüldüğünde, kavite toplam uzunluğunun 34.5 metre olduğu bulunur (c: ışık hızı, n: kırınım endeksi).



Şekil 3.8 : Kavite temel frekans çarpımlarının RF spektrum analizöründe görünümü

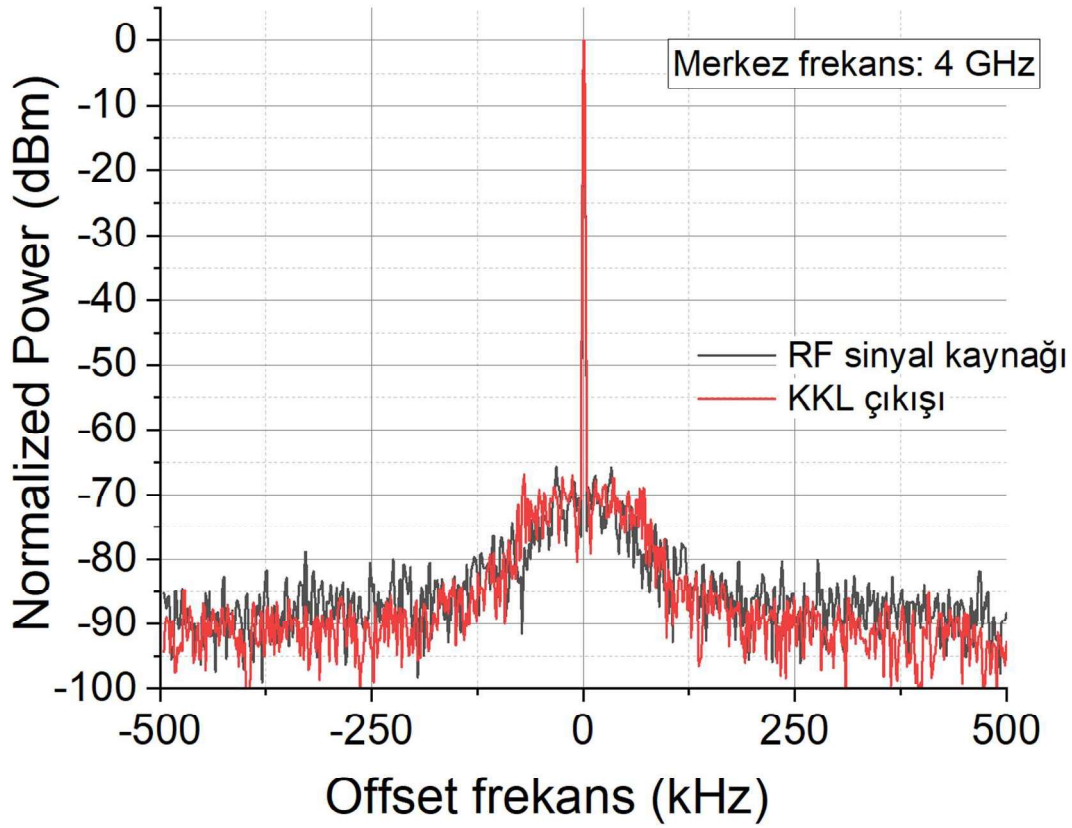
Kavite temel frekansları gözlemlendikten sonra Rohde-Schwartz SMW200A model sinyal üretici kullanılarak 4 GHz frekansındaki sinyal lazer kavitesine gönderilmiştir. Daha sonra yine lazer çıkış fiberinden çıkan sinyal yüksek hızlı fotodetektör ile algılanmış ve rf spektrum analizörü ile gözlemlenmiştir. Şekil 3.9'da lazerin çıkış frekansının 1 MHz aralık frekansındaki görünümü gösterilmektedir. Bu grafikte merkezde görülen ton 4 GHz frekansındadır ve her iki yana doğru 500 kHz gürültü özellikleri görülmektedir. Bu grafikte yaklaşık 90 dB sinyal gürültü oranı elde edilmiştir.



Şekil 3.9 : Lazer çıkışının RF spektrum analizöründe 1 MHz aralıktaki görünümü

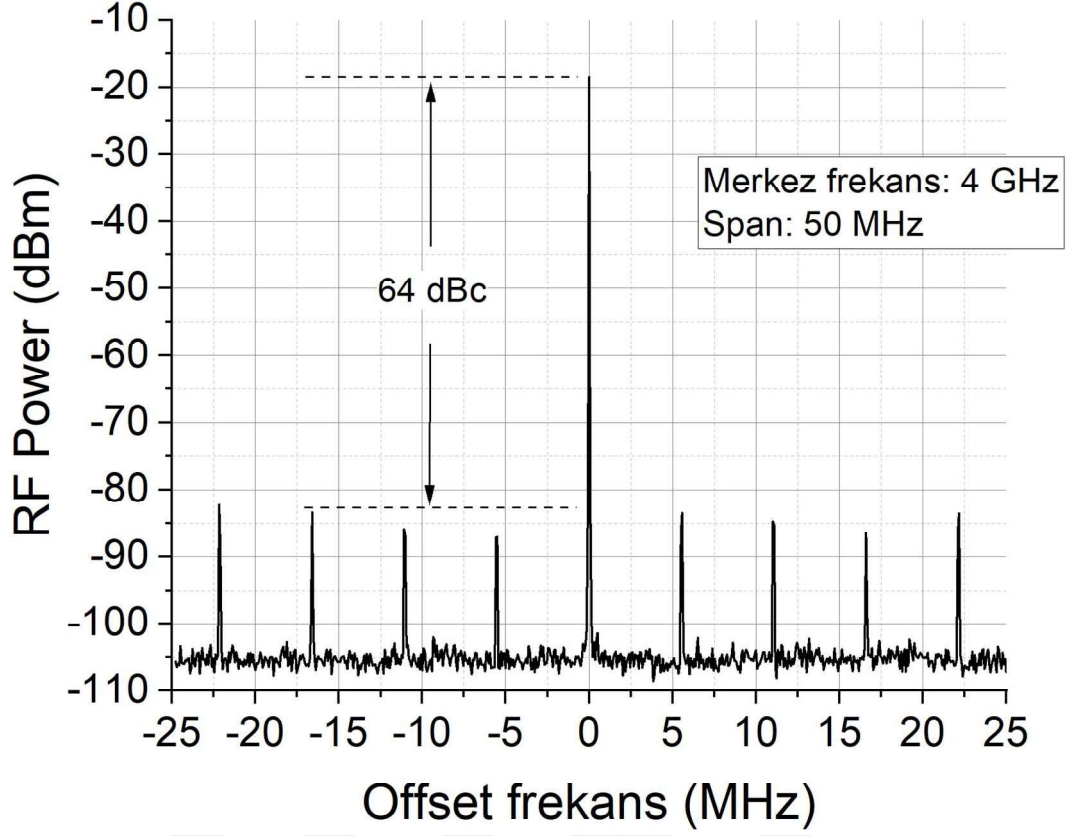
Daha sonra Şekil 3.12’de görülen gürültülerin ne kadarının RF sinyal kaynağından ne kadarının ise lazerin kendisinden kaynaklandığını görmek için RF sinyal kaynağı ile karşılaştırılmıştır.

Şekil 3.10’da kırmızı ile gösterilen kip kilitlemeli lazerden çıkan spektrum, siyah ile gösterilen ise RF sinyal kaynağının doğrudan RF spektrum analizörüne bağlanarak gözlemlenen sinyalidir. Bu ölçümler daha iyi karşılaştırma yapılabilmesi için normalize edilerek çizilmiştir. Bu karşılaştırmada görüldüğü gibi 4 GHz’e çok yakın frekanslarda (< 100 kHz) lazerin gürültüsü ile RF sinyal kaynağının gürültüsü aynıdır. Fakat daha uzak frekanslara gidildiğinde lazerin gürültüsü RF sinyal kaynağının altına inmektedir. Bu olayın sebebi ise kip kilitlemeli lazerlerin faz gürültüsü filtreleme özelliğinden gelmektedir.



Şekil 3.10 : RF sinyal kaynağı ile kip kilitlemeli lazer çıkış karşılaştırılması

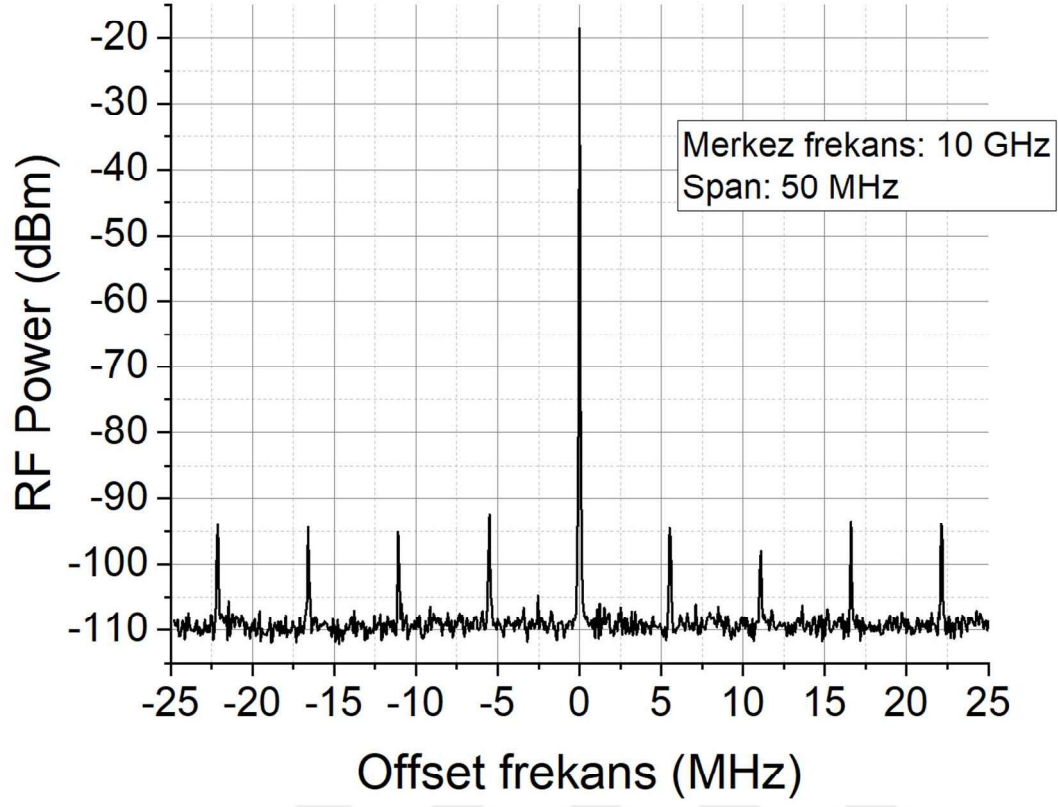
Daha sonra ölçüm aralığı artırılarak 50 MHz aralıkta RF spektrum ölçülmüştür. Burada süpermod gürültüleri adı verilen, lazer frekansının kavite temel frekans ve tamsayı farklarında gürültüler gözlemlenmiştir, Şekil 3.11. Bu gürültülerin görülmesi normaldir fakat ne kadar çok azaltılabilirlerse o kadar iyi bir performans elde edilir. Geliştirilen lazerde merkez frekans ve süpermod gürültüleri arasında 64 dB değerinde bir fark ölçülmüştür.



Şekil 3.11 : 4 Ghz frekansındaki lazerin RF spektrumu 50 MHz aralıklı görünümü

En son olarak lazerin 10 GHz merkez frekansındaki performansı ölçülmüştür. Bunun için sinyal üreticiden alınan RF frekansı 10 GHz'e ayarlanmıştır. 10 GHz frekansındaki kip kilitlemeli lazer RF spektrum özellikleri Şekil 3.12'de görülmektedir. 10 GHz frekansındaki lazerin performansı 4 GHz'dekine oldukça benzemektedir. Lazerde kullanılan bütün bileşenlerin 20 GHz'e kadar yüksek frekanslarda çalışabildiği düşünüldüğünde bu beklenen bir durumdur.





Şekil 3.12 : 10 Ghz frekansındaki lazerin RF spektrumu 50 MHz aralıklı görünümü

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada erbiyum eklenmiş fiber yükseltici kazanç ortamı olarak kullanan bir kip kilitlemeli lazer geliştirilmiş ve bu lazerin RF özellikleri incelenmiştir. Geliştirilen lazer erbiyum eklenmiş fiber yükselteç, optik filtre, elektro-optik modülatör, ayarlanabilir optik geciktirici, izolatör gibi bileşenler kullanarak geliştirilmiştir. Lazerin optik spektrumu incelenememiş olmasına rağmen kullanılan optik filtrenin 1550 nm merkez frekansında olması sebebi ile bu dalga boyunda olması beklenmektedir. Geliştirilen lazer 4 GHz frekansında bir RF sinyali ile beslenmiş ve böylece kip kilitlenmesi sağlanmıştır. Kip kilitlenmiş olan lazerin çıkışı yüksek hızlı bir fotodetektöre gönderilmiş oradan da 30 GHz bant genişliğindeki bir RF spektrum analizör ile gözlemlenmiştir. RF spektrumunda, gönderilen sinyalin gürültüsünün filtrelendiği gözlemlenmiş ve yaklaşık 90 dB sinyal gürültü oranı elde edilmiştir.

Lazer kaviteleri dış etkenlerden çok fazla etkilenmektedir. Deneylede kullanılan lazer ise geliştirilmesi yeni tamamlanmış ve fiberleri tamamen dışarıda bir lazerdir. Bu sonuçların geliştirilmesi için lazerin sıcaklık ve akustik izolasyonunun yapılması önerilmektedir. Ayrıca lazerin daha iyi bir şekilde karakterize edilmesi için optik spektrum analizörü ve yüksek hızlı osiloskop ile gözlenebilmesi gerekmektedir. Bu yeni gözlemlerde yapılarak lazerin daha iyi ayarlanması ve nihayetinde daha düşük gürültülere ulaşılabilmesi beklenmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] **L.E. Hargrove, R.L. Fork, and M.A. Pollack**, (1964) Locking of He-Ne laser modes induced by synchronous intracavity modulation, *Appl. Phys. Lett.*, 5, 4–5.
- [2] **D. Kuizenga and A. Siegman**, (1970) FM and AM mode locking of the Homogeneous Laser Part I: Theory, *IEEE J. Quantum Electron.*, 6, 694–708.
- [3] **J. Fontana**, (1972) Theory of spontaneous mode locking in lasers using a circuit model, *IEEE J. Quantum Electron.*, 8, 699–703.
- [4] **H. Haus**, (1975) A theory of forced mode locking, *IEEE J. Quantum Electron.*, 11, 323–330.
- [5] **D.C. Hanna, A. Kazer, M.W. Phillips, D.P. Shepherd, and P.J. Suni**, (1989) Active mode-locking of an Yb:Er fibre laser, *Electron. Lett.*, 25, 95–96.
- [6] **A. Takada and H. Miyazawa**, (1990) 30GHz picosecond pulse generation from actively mode-locked erbium-doped fibre laser, *Electron. Lett.*, 26, 216–217.
- [7] **G.T. Harvey and L.F. Mollenauer**, (1993) Harmonically mode-locked fiber ring laser with an internal Fabry–Perot stabilizer for soliton transmission, *Opt. Lett.*, 18, 107.
- [8] **C.R. Doerr, H.A. Haus, E.P. Ippen, L.E. Nelson, M. Shirasaki, and K. Tamura**, (1994) Additive-pulse limiting, *Opt. Lett.*, 19, 31.
- [9] **Ali ÇETİN, Hamza Yaşar OCAK** (2017) Optik fiber dalga kılavuzlarının yapı parametrelerinin incelenmesi *J. BAUN Inst. Sci. Technol.*, 19(3) Special Issue, 70-76
- [10] **Alphan Sennaroğlu** (2010) Kathal Femtosaniye Lazerleri *Bilim ve Teknik*
- [11] **Remziye Pınar Yılmaz**, (2008) Timing Issues In A Terawatt Laser System, *Yüksek Lisans Tezi*, ODTÜ, Ankara
- [12] **D. Y. Tang, L. M. Zhao and B. Zhao**, (2005) Soliton collapse and bunched noise-like pulse generation in a passively mode-locked fiber ring laser, *Optik Ekspres Vol. 13, Sayı 7*, 2289-2294
- [13] **Le Nguyen Binh, Nam Quoc Ngo**, (2011) *Ultra-Fast Fiber Lasers Principles and Applications with MATLAB Models*, CRC Press
- [14] **M.J.F. Digonnet**, (2001) *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers*, Marcel Dekker Inc., New York.

- [15] **Mbonde, H, Ozharar, S, Ozdur, I.** (2018) RF phase noise filtering properties of an actively mode-locked laser. *Microw Opt Technol Lett.*; 60: 519– 523.]
- [16] **K. Saleh, A. Fernandez, O. Llopis** (2013) Fiber ring resonators with Q factors in excess of 1010 for Time and Frequency Applications, *International Frequency Control Symposium (IFCS) and European Frequency and Time Forum* Czech Republic
- [17] **P. Becker, N. Olsson, J. Simpson** (1997) *Erbium-Doped Fiber Amplifiers Fundamentals and Technology* Academic Press
- [18] **Orazio Svelto,** (2010) *Principles of Lasers*, Fifth Edition Springer Science + Business Media, LLC
- [19] **K. Thyagarajan, Ajoy Ghatak,** (2010) *Lasers Fundamentals and Applications* Second Edition, Springer Science + Business Media, LLC
- [20] **Harry J. R. Dutton,** (1998) *Understanding Optical Communications* IBM Corporation, International Technical Support Organization
- [21] **Yasemin Pepe,** (2014) Tm<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Katkılı TeO<sub>2</sub>-GeO<sub>2</sub> Cam Malzemelerin Yapısal ve Spektroskopik Özelliklerinin İncelemesi, *Yüksek Lisans Tezi*, İTÜ, İstanbul
- [22] **Ayşe Erol,** (2002) Yüzey Işıması Yapan Düşük Boyutlu Yapılarda Bragg Yansıma Olaylarının İncelenmesi, *Doktora Tezi*, İstanbul Üniversitesi, İstanbul
- [23] **Barış Altın,** (2009) Erbiyum Katkılı Fiber Kuvvetlendiricilerin Modellenmesi ve Simülasyonu, *Yüksek Lisans Tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
- [24] **Günseli ATEŞ,** (2013) Hidrojene Benzer Atomlarda Işıma Şiddetinin ve Einstein Katsayılarının Guseinvun-Eto Fonksiyonu Kullanılarak Hesaplanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat
- Url-1** <[https://www.photonics.com/Articles/A\\_History\\_of\\_the\\_Laser\\_1960\\_-\\_2019/a42279](https://www.photonics.com/Articles/A_History_of_the_Laser_1960_-_2019/a42279)> Alındığı tarih:10.03.2022
- Url-2** <<https://www.radartutorial.eu/03.linetheory/tl04.tr.html>> Alındığı tarih:11.04.2022
- Url-3** <[https://www.rp-photonics.com/mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/mode_locking.html)> Alındığı tarih:10.03.2022
- Url-4** <[https://www.rp-photonics.com/passive\\_mode\\_locking.html](https://www.rp-photonics.com/passive_mode_locking.html)> Alındığı tarih:10.03.2022
- Url-5** <[https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02528/technical\\_overviews/5990-5729.pdf](https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-02528/technical_overviews/5990-5729.pdf)> Alındığı tarih:25.03.2022
- Url-6** < [https://www.rp-photonics.com/q\\_factor.html](https://www.rp-photonics.com/q_factor.html)> Alındığı tarih:18.03.2022