



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**915nm POMPALI YB KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER  
SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Gökhan TUNA

Fizik Anabilim Dalı

**OCAK 2023**

**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**915nm POMPALI YB KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER  
SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gökhan TUNA  
(20409732015)**

**Fizik Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Doc. Dr. Mehmet BÜYÜKYILDIZ**

**OCAK 2023**





20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



## ÖNSÖZ

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve tecrübeleri ile bana yardımcı olan danışmanım Doç. Dr. Mehmet BÜYÜKYILDIZ'a verdiği destek için sonsuz teşekkür ederim. Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her zaman tüm desteklerini vermeye hazır olduklarını söyleyen annem Asiye Tuna ve babam Turan Tuna'ya, iş hayatım ile eğitim hayatımı birarada götürebilme fırsatı sağlayan ve bu tez çalışmamda bana destek olan Ermaksan A.S genel müdürü sayın Ahmet Özkayan'a, deneysel kurulum ve test aşamalarında bilgi ve tecrübesi ile yardımlarını esirmeyen Buhayde Güler'e ve tüm ekip arkadaşlarıma, elektronik yazılım ve donanım yapısında verdikleri destekleri için Ahmet Bakır ve ekip arkadaşlarına, mekanik yapının kurulmasında katkıları bulunan Ercan Deniz ve ekip arkadaşlarına en derin şükranlarımı sunmak isterim.

Son olarak, en büyük takdir, sonsuz sabrı ve her konuda desteği için, eşim Gülhan Tuna'ya teşekkür eder ve bu tezi Gülhan'a ve kızımız Naz'a ithaf ediyorum.

Ocak 2023

Gökhan TUNA

## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ÖNSÖZ.....                                       | vi        |
| İÇİNDEKİLER .....                                | vii       |
| KISALTMALAR .....                                | viii      |
| SEMBOLLER .....                                  | ix        |
| ŞEKİL LİSTESİ.....                               | x         |
| ÖZET.....  | xi        |
| SUMMARY .....                                    | xiii      |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>                            | <b>15</b> |
| 1.1 Lazerin tarihi gelişimi .....                | 15        |
| 1.2 Lazer ışığının özellikleri.....              | 16        |
| 1.3 Nüfus terslenmesi .....                      | 20        |
| 1.4 Lazer cihazının yapısı.....                  | 20        |
| 1.5 Lazer türleri .....                          | 22        |
| <b>2. FİBER LAZERLER .....</b>                   | <b>24</b> |
| 2.1 Giriş.....                                   | 24        |
| 2.2 Fiber Optik Dalga Kılavuzları.....           | 25        |
| 2.3 Yb Katkılı Aktif Fiberler .....              | 29        |
| 2.4 Çift Kaplı Fiberler (DCF).....               | 29        |
| 2.5 Geniş Mod Alanlı Fiberler (LMA).....         | 30        |
| 2.6 Fiber Lazer Bileşenleri .....                | 31        |
| 2.6.1 Lazer pompa diyodları .....                | 31        |
| 2.6.2 Fiber birleştiriciler.....                 | 31        |
| 2.6.3 FBG aynalar .....                          | 32        |
| 2.6.4 Kaplama güç sıyrıcılar .....               | 32        |
| 2.6.5 Fiber tabanlı uç kapağı.....               | 32        |
| 2.7 Yüksek Güçlü Fiber Lazerlerde Sınırlar ..... | 33        |
| <b>3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>               | <b>34</b> |
| 3.1 Kurulum .....                                | 34        |
| 3.2 Fiber Lazer Üretim Süreçleri.....            | 35        |
| 3.3 Test Düzenegi Kurulumu .....                 | 39        |
| <b>4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>                 | <b>42</b> |
| 4.1 Sonuçlar.....                                | 42        |
| 4.2 Tartışma ve Öneriler.....                    | 44        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                           | <b>46</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                             | <b>51</b> |

## KISALTMALAR

|               |   |
|---------------|---|
| <b>CPS</b>    | : Kaplama Güç Sıyırıcı (Cladding power stripper)  |
| <b>DC</b>     | : Çift Kaplı (Double clad)  |
| <b>Er</b>     | : Erbiyum (Erbium)  |
| <b>FBG</b>    | : Fiber Bragg Izgara (Fiber bragg grating)  |
| <b>FP</b>     | : Fabry-Perot   |
| <b>FWHM</b>   | : Tam Genişlik Yarı Maksimum (Full width half maximum)                                  |
| <b>He</b>     | : Helyum (Helium)   |
| <b>HPFL</b>   | : Yüksek Güçlü Fiber Lazer (High power fiber laser)                                     |
| <b>HR</b>     | : Yüksek Yansımaya Kuplörü (High reflective)  |
| <b>IR</b>     | : Kızılötesi (Infrared)   |
| <b>LD</b>     | : Lazer Diyod (Laser diode)   |
| <b>LMA</b>    | : Geniş Mod Alanı (Large mode area)   |
| <b>MOPA</b>   | : Ana Osilatör Güç Yükseltici (Master oscillator power amplifier)                       |
| <b>Nd:YAG</b> | : Neodimyum Katkılı İtiryum Alüminyum Garnet (Neodymium-doped yttrium aluminium garnet) |
| <b>Ne</b>     | : Neon  |
| <b>OC</b>     | : Düşük Yansımali Çıkış Kuplörü (Output coupler)  |
| <b>OSA</b>    | : Optik Spektrum Analizörü (Optic spectrum analyzer)                                    |
| <b>QBH</b>    | : Kuvars Blok Başlığı (Quartz block head)   |
| <b>SRS</b>    | : Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman scattering)                               |
| <b>Tb</b>     | : Terbiyum (Terbium)  |
| <b>Tm</b>     | : Tulyum (Tulium)   |
| <b>TMI</b>    | : Enine Mod Kararsızlığı (Tranverse mode instability)                                   |
| <b>UV</b>     | : Mor Ötesi (Ultra viole)   |
| <b>Yb</b>     | : İterbiyum (Ytterbium)   |

## SEMBOLLER

|               |                      |
|---------------|----------------------|
| $\mu\text{m}$ | : Mikrometre         |
| $\text{cm}$   | : Santimetre         |
| $\text{dB}$   | : Desibel            |
| $E$           | : Enerji             |
| $\text{GHz}$  | : Gigahertz          |
| $\text{kW}$   | : Kilowatt           |
| $M^2$         | : Işın Kalite Değeri |
| $\text{nm}$   | : Nanometre          |
| $\Theta$      | : Aç                 |
| $V$           | : Normalize Frekans  |
| $W$           | : Watt               |
| $\lambda$     | : Dalgaboyu          |

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| Şekil 1.1 : Katıhal lazerin gösterimi. ....  | 16 |
| Şekil 1.2 : Lazer cihazı ve lambadan yayılan elektromanyetik dalgalar. ....        | 17 |
| Şekil 1.3 : Radyasyonun soğurulması olayı şematik gösterimi ....                   | 18 |
| Şekil 1.4 : Kendiliğinde emisyon olayı şematik gösterimi. ....                     | 18 |
| Şekil 1.5 : Uyarılmış emisyon olayı şematik gösterimi. ....                        | 19 |
| Şekil 1.6 : Nüfus terslenmesi ..... ..   | 20 |
| Şekil 2.1 : Standart bir fiber optik yapının gösterimi. ....                       | 25 |
| Şekil 2.2 : Fiber optik yapı ve kabul konisi. ....                                 | 26 |
| Şekil 2.3 : Tek modlu ve çok modlu fiber optik kılavuzlar ..... ..                 | 27 |
| Şekil 2.4 : İterbiyum:Silika enerji seviyeleri. ....                               | 28 |
| Şekil 2.5 : Germanosilikat camda Yb'nin emilim ve yayınım kesitleri. ....          | 29 |
| Şekil 2.6 : Kaplama pompalı çift kaplı fiber yükseltici şematik gösterimi.....     | 30 |
| Şekil 2.7 : Farklı fiber iç kaplama ve çekirdek geometrileri. ....                 | 30 |
| Şekil 2.8 : Lazer pompa diyod yapısı. ....   | 31 |
| Şekil 3.1 : Fiber lazer MOPA sistem yapısı ..... ..                                | 34 |
| Şekil 3.2 : İdeal olmayan fiber soyma görüntüsü. ....                              | 35 |
| Şekil 3.3 : İdeal fiber soyma görüntüsü. ....                                      | 35 |
| Şekil 3.4 : İdeal pasif fiber kesim görüntüsü ..... ..                             | 36 |
| Şekil 3.5 : İdeal aktif fiber kesim görüntüsü. ....                                | 36 |
| Şekil 3.6 : Diyod ve Combiner splice görüntüsü (Splice 1,8). ....                  | 37 |
| Şekil 3.7 : Combiner- HR FBG splice görüntüsü (Splice 2) ..... ..                  | 37 |
| Şekil 3.8 : 20/400 aktif fiber ile 14/ 250 OCFBG pasif fiber splice görüntüsü..... | 37 |
| Şekil 3.9 : Pasif-Aktif fiber splice görüntüsü (Splice 3,4,6,9,10).....            | 37 |
| Şekil 3.10 : Pasif- Pasif fiber splice görüntüsü (Splice 7,11) ..... ..            | 38 |
| Şekil 3.11 : Aktif fiber soğutma kanalları şematik gösterimi ..... ..              | 38 |
| Şekil 3.12 : Aktif fiber soğutma kanalları. ....                                   | 38 |
| Şekil 3.13 : Fiber lazer kurulumunun genel görüntüsü ..... ..                      | 39 |
| Şekil 3.14 : Lazer güç ölçümü ve lazer spektrum analizi şematik gösterimi. ....    | 40 |
| Şekil 3.15 : Lazer güç ölçümü kurulum görseli.....                                 | 40 |
| Şekil 3.16 : Lazer ışın kalitesi ölçümü şematik gösterimi ..... ..                 | 41 |
| Şekil 3.17 : Lazer ışın kalitesi ölçüm cihazı ..... ..                             | 41 |
| Şekil 4.1 : Lazer güç ölçümü test görseli.....                                     | 42 |
| Şekil 4.2 : Aktif fiber sıcaklık ölçümü ve lazer güç ölçümü görüntüsü ..... ..     | 43 |
| Şekil 4.3 : Dalga boyu ölçüm grafiği ..... ..                                      | 43 |
| Şekil 4.4 : Lazer ışın kalitesi sonucu ..... ..                                    | 43 |
| Şekil 4.5 : Lazer pompa gücü, çıkış gücü ve optik verimlilik ..... ..              | 44 |
| Şekil 4.6 : Lazer güç kararlılığı.....   | 44 |

## **915nm POMPALI YB KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER SİSTEMLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

### **ÖZET**

Yüksek güçlü fiber lazerler (HPFL), mükemmel ışın kalitesi, yüksek çıkış gücü ve yüksek dönüşüm verimliliği ile endüstri (metal işleme, kesme, kaynak, kazıma vb.) medikal (eklemli imalat) ve savunma alanlarında yaygın olarak kullanılan lazer kaynakları olarak yerini almıştır. Bakım ve onarım maliyetleri açısından da diğer lazer türlerine göre üstünlüklerinin bulunması, son yıllarda araştırmacılar tarafından yoğun bir şekilde çalışılan araştırma konularından biri olmuştur. HPFL'lerin güç ölçeklenebilirliği, doğrusal olmayan etkilerden olan uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve enine mod kararsızlığı (TMI) gibi etkiler ile sınırlanmıştır. SRS etkisi, fiber uzunluğu ve fiber çekirdek çapı ile orantılı olduğundan çalışmalar daha kısa fiber uzunluğu ve büyük çekirdek çapına sahip fiberler ile aşılabileceğini göstermektedir. Bu yöntemler aynı zamanda daha yüksek sıcaklık bölgelerine ve diğer modların oluşmasına neden olduğundan TMI'yı tetikleyen etkilerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ancak TMI etkisinin tam olarak oluşma sebebi bilinmemekle beraber SRS etkisinde tetikleyebildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur. Son çalışmalarda farklı dalga boyuna sahip pompalama metodlarının kullanımı (976nm, 980nm, 1018nm, 1030nm), yüksek katkı oranına sahip aktif fiber kullanımı ve ticari olarak temini zor özel bileşenlerin kullanımları görülmektedir. Aynı zamanda bu yöntemlerde fotokararma etkisi, kendiliğinde emisyonun oluşması görülmekte ve yüksek maliyetli yapıların oluşması karşımıza çıkmaktadır. Bu tezde HPFL'lerde 915nm dalga boyuna sahip, ticari olarak temini kolay ve daha düşük maliyetli bileşenler kullanarak yüksek güçte çıkış gücüne sahip bir fiber lazerin deneysel gösterimi sunulmaktadır. Sistem tamamıyla fiber yapıya sahip ve ticari olarak temin edilebilen bileşenler ile kurulmuştur. Fiberlerin sıkı sarma yöntemlerinin, TMI üzerindeki etkisinin olumlu sonuçları bildirildiğinden, aktif fiberin başlangıç sarım çapları 12cm olarak belirlenmiştir. Kurulum hibrit bir ana osilatör güç yükseltici (MOPA) konsepti üzerine tasarlanmış ve ana osilatörde üretilen sinyal gücünün yüksek ışın kalitesine sahip olması amaçlanarak hedeflenen çıkış gücüne

ulaşılabildiği gösterilmiştir. Optik verimlilik, yükselteç bölgesinde 3600W pompa gücü ile (slope efficiency) >%75, ışın kalitesi ( $M^2$ ) <1,5 olarak ölçülmüş ve herhangi bir lineer olmayan etki gözlenmemiştir. Bildiğimiz kadarıyla, kurduğumuz yapı ve sunduğumuz yöntem ile 915nm pompalı, 1080nm çıkış dalga boyuna, 3kW çıkış gücüne ve kırınım sınırlı ışın kalitesine sahip iterbiyum katkılı fiber lazer sisteminin gösterildiği ilk çalışmadır.

**Anahtar kelimeler:** Yüksek güçlü fiber lazerler, Diyod lazerler, Fiber optik, Uyarılmış Raman saçılması, Enine mod kararsızlığı, Ana osilatör g ykselteci.



# **DEVELOPMENT OF HIGH POWER YB DOPED FIBER LASER SYSTEMS WITH 915nm PUMPED**

## **SUMMARY**

High-power fiber lasers (HPFL) have taken their place as widely used laser sources in industry (metalworking, cutting, welding, engraving, etc.), medical (additive manufacturing) and defense fields, with their excellent beam quality, high output power and high conversion efficiency. Their superiority over other types of lasers in terms of maintenance and repair costs has been one of the research subjects that have been studied intensively by researchers in recent years. The power scalability of HPFLs is limited by nonlinear effects such as stimulated Raman scattering (SRS) and transverse mode instability (TMI). Because the SRS effect is proportional to the fiber length and fiber core diameter, studies show that it can be overcome with fibers with shorter fiber length and larger core diameter. These methods also cause higher temperature zones and other modes to form, resulting in TMI limit effects. However, although the exact cause of the TMI effect is not known, there are studies showing that it can also limit the SRS effect. In recent years, it is seen that pumping methods at different wavelengths (976nm, 980nm, 1018nm, 1030nm) are used, active fibers with high doping rate are used, and special components that are difficult to obtain commercially are used. At the same time, photo-darkening effect, spontaneous emission is seen in these methods and the formation of high-cost structures is encountered. This thesis presents an experimental demonstration of a high-power output fiber laser on HPFLs with a wavelength of 915nm using commercially available and lower cost components. The system is built with commercially available components with an all-fiber structure. Since the positive results of the effect of bending methods of fibers on TMI have been reported, the bend diameter of the active fiber was determined as 12 cm. The setup is designed on a hybrid master oscillator power amplifier (MOPA) concept and it has been shown that the targeted output power can be achieved by aiming the signal power produced in the master oscillator to have high beam quality. Optical efficiency was measured as >75% with

3600W pump power (slope efficiency) and beam quality ( $M^2$ ) was  $<1.5$  in the amplifier region, and no non-linear effects were observed. As far as we know, this is the first study showing a ytterbium doped fiber laser system with 915nm pump, 1080nm output wavelength, 3kW output power and diffraction limited beam quality, with the structure we established and the method we presented.

**Keywords:** High power fiber lasers, Diode lasers, Fiber optic, Stimulated Raman scattering, Transverse mode instability, Master oscillator power amplifier.



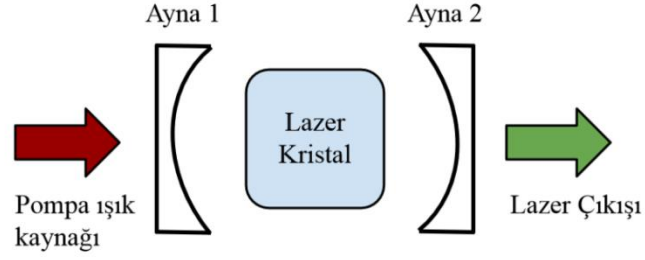
## 1. GİRİŞ

Yüksek güçlü fiber lazerlerin [1-6] avantajlı durumu, kazanç ortamı ve iletim yöntemi olarak fiber optik yapıların kullanılması sebebi ile oluşmaktadır. Bu bölümde lazer ve lazer özellikleri açıklanarak fiber optik yapıların lazer cihazı olarak kullanılmasına yönelik incelemeler sunulmuş ve ikinci bölüme hazırlık olması amaçlanmıştır.

### 1.1 Lazerin Tarihi Gelişimi

Einstein'ın, Planck dağılımından radyasyonun doğası hakkında mümkün olduğunca fazla bilgi etme çabası, 1916 tarihli "On the Quantum Theory of Radiation" adlı makalesinde görülmektedir [7]. İlk bölümde, Planck formülünün bir türevi verilir ve makalenin bu kısmı, teknik olarak neredeyse yarım yüzyıl sonra gerçekleştirilen LAZER'in teorik temeli olarak kabul edilmektedir [8].

1928 yılında uyarılmış emisyonla ilişkin dolaylı kanıtlar bildirilmiştir ancak, zamanın fizikçileri bu etkiyi "negatif soğurma" olarak adlandırmışlardır. 1940 yılında Rus fizikçi Valentin A. Fabrikant, bir gaz deşarjındaki uyarılmış emisyonun uygun koşullar altında ışığı yükseltebileceğini öne sürmüştür, ancak herhangi bir rezonatör önermemiştir [9]. 1951'de, Charles H. Townes'ın bir sonraki kavramsal adımı mikrodalga frekanslarında uyarılmış emisyonun rezonant bir boşlukta salınarak tutarlı çıktı üretebileceğini öne sürmesidir [10]. 1954'te ise Townes ve öğrencisi James Gordon, uyarılmış amonyak moleküllerinin 24 Ghz'de salındıkları bir rezonans boşluğuna yönlendiren ilk mikrodalga lazeri (MASER) göstermişlerdir [11]. Theodore Maiman, yakut kristalini ticari flaş lambalarıyla optik olarak pompalayarak yüksek kazançlı darbeli salınım elde edilebileceğini fark etti ve Mayıs 1960'ta ilk çalışan "katihal lazeri" literatüre kazandırmıştır [12].



**Şekil 1.1:** Katıhal lazerin gösterimi.

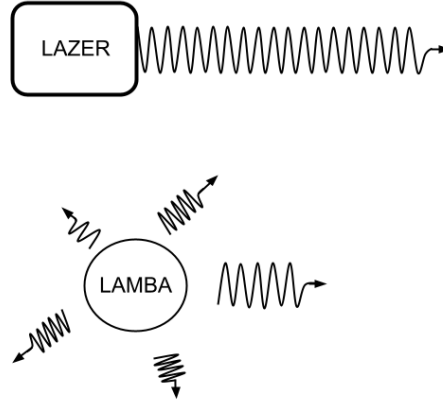
Bir katıhal lazerinin genel bir yapısı Şekil 1.1'de gösterilmektedir. Pompa ışığı, iki ayna arasında bulunan katı bir lazer kristaline odaklanır. Ayna 1, lazer dalga boyunda yüksek yansıtıcılığa ve pompa dalga boyunda yüksek geçirgenliğe sahip olacak şekilde seçilirken ayna 2, çıkış bağlantısını sağlamak için kısmen yansıtıcı özellikte seçilmiştir.

## 1.2 Lazer Işığının Özellikleri

Einstein, belirli koşullar altında fotonların, atomlar tarafından emilebileceğini (absorption) ve yayınlanabileceğini (spontan emission) varsaymaktadır [7]. Işığın, bir madde içerisinde geçerken daha fazla ışık yayılımını tetiklediğini tahmin ederek teorisini genişletmiş ve fotonların aynı durumda birlikte seyahat etmeyi tercih ettiğini öne sürmüştür. Yüksek enerji içeren bir atom durumu varsa, bunlar rastgele bir foton yaymaya hazır olacaklardır (spontaneous emission). Bununla birlikte, bir madde içerisinde belirli bir dalga boyunda bir foton geçerse, bu fotonun varlığı atomların fotonlarını erken salmaya teşvik edecek ve belirli dalga boyuna sahip aynı frekansta, aynı fazda ve aynı yönde hareket eden fotonların oluşmasına sebep olacaktır (stimulated emission). Bu durum art arda oluşan bir etki ortaya çıkartarak çok sayıda özdeş foton yayılımının oluşmasına sebep olmaktadır.

LASER kelimesi, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation ifadesinin kısaltılmış hali olarak tanımlanan, uyarılmış radyasyon emisyonu ile tutarlı elektromanyetik dalgalar üreten optik bir yükselteç olarak kabul edilmektedir [13].

Temel özellik, yükseltmenin uzaysal ve zamansal tutarlılık sağlaması, bir lazer ile sıradan ışık kaynaklarının arasındaki farkı yaratır (Şekil 1.2). Bir lamba, tüm uzamsal yönlere ilişkisiz dalga dizileri yayarken, lazer uyumlu dalgalar üretir ve dalgalar yüksek yönlülüğe sahip olabilir [14].



**Şekil 1.2:** Lazer cihazı ve lambadan yayılan elektromanyetik dalgalar.

Lazer ışığının onu sıradan ışıktan ayıran dört benzersiz özelliği bulunmaktadır.

Bunlar;

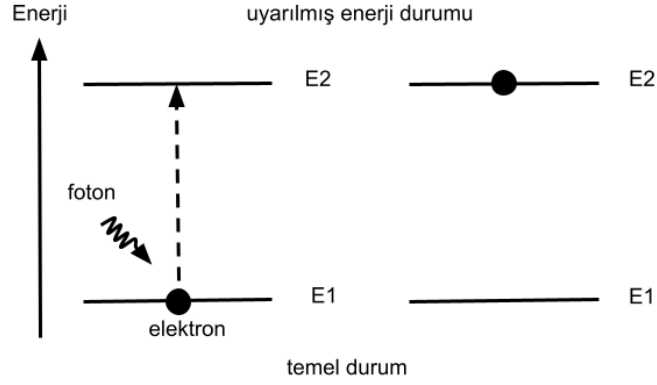
- Tutarlılık (Coherence)
- Yönlülük (Directionality)
- Tek renklilik (Monochromatic)
- Yüksek yoğunluk (High intensity) değerine sahiptirler.

Aynı zamanda lazerlerde fotonlar, atomlar ile üç şekilde etkileşime girer ve bunlar;

- Radyasyonun soğurulması (Absorption of radiation)
- Kendiliğinden emisyon (Spontaneous emission)
- Uyarılmış emisyon (Stimulated emission) olarak görülmektedir.

### **1.2.1 Radyasyonun soğurulması (Absorption of radiation)**

Temel durumdaki elektronların daha yüksek enerji seviyesine geçmek için fotonlardan enerji emdiği bir süreçtir (Şekil 1.3). Atomun iç yörüngesinde bulunan elektronlar daha düşük enerji seviyesindeyken dış yörüngede bulunan elektronlar daha yüksek enerji seviyesindedir. Düşük enerji seviyesindeki elektronların, daha yüksek enerji seviyesine geçebilmesi için ekstra enerjiye ihtiyaçları vardır.

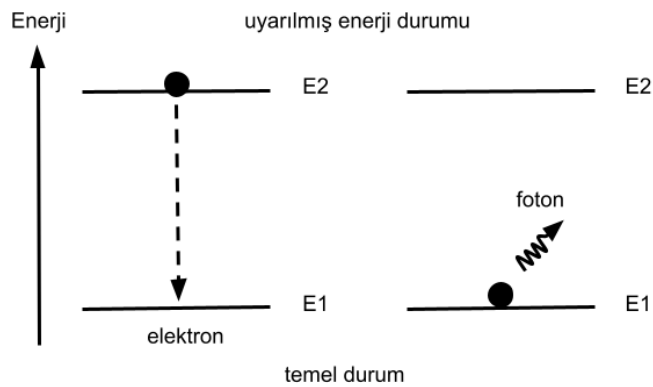


**Şekil 1.3:** Radyasyonun soğurulması olayı şematik gösterimi.

Yukarıdaki şekilde gösterildiği gibi elektronların iki enerji seviyesi E1 ve E2, sırasıyla elektronların temel durumu ve elektronların yüksek enerji durumu olarak kabul edildiğinde, atom üzerine iki enerji seviyesinin ( $E2 - E1$ ) enerji farkına eşit fotonlar geldiğinde, temel durumdaki elektronlar yeterli enerjiyi kazanır ve temel durumdan (E1) uyarılmış duruma (E2) geçiş yaparlar. Bu duruma radyasyonun soğurulması denilmektedir [15].

### 1.2.2 Kendiliğinden emisyon (Spontaneous emission)

Uyarılmış durumdaki elektronların fotonlar yayarak temel duruma geri döndüğü süreçtir. Uyarılmış durumdaki elektronlar uyarılmış enerji durumunda sadece kısa bir süre kalabilirler ve bir elektronun daha yüksek enerji durumunda (E2) kalabileceği süre, uyarılmış elektronların ömrü olarak bilinir. Kendiliğinden emisyonda, elektronlar doğal olarak veya kendiliğinden bir durumdan (yüksek enerji durumu) başka bir duruma (düşük enerji durumu) geçer, böylece fotonların emisyonu da doğal olarak gerçekleşir (Şekil 1.4).



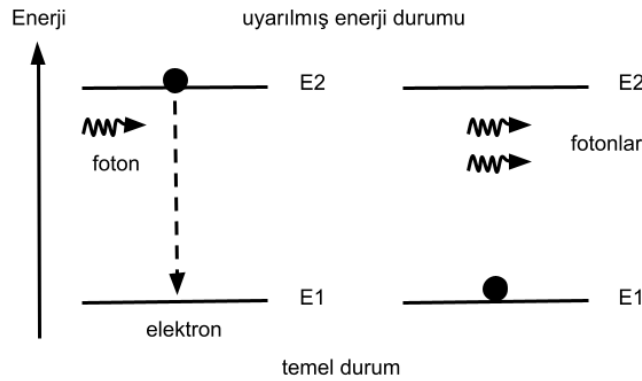
**Şekil 1.4:** Kendiliğinden emisyon olayı şematik gösterimi

Kendiliğinden emisyon sürecinde yayılan fotonlar, sıradan tutarsız ışığı oluşturur ve tutarsız ışık, aralarında sık ve rastgele faz değişimleri olan bir foton demeti olarak tanımlanır. Başka bir deyişle, kendiliğinden emisyon sürecinde yayılan fotonlar, gelen fotonlarla tam olarak aynı yönde akmazlar [15,16].

### 1.2.3 Uyarılmış emisyon (Stimulated emission)

Uyarılmış emisyon, gelen fotonun uyarılmış elektronla etkileştiği ve onu temel duruma geri dönmeye zorladığı süreçtir. Işık enerjisi temel durum elektronlarına ışık enerjisi sağlamak yerine doğrudan uyarılmış elektron ile etkileşir. Kendiliğinden emisyonun aksine, uyarılmış emisyon doğal bir süreç değil, yapay bir süreçtir.

Kendiliğinden emisyonda, uyarılmış durumdaki elektronlar ömürleri bitene kadar orada kalırlar. Ömürlerini tamamladıktan sonra ışık şeklinde enerji salarak temel duruma dönerler. Bununla birlikte, uyarılmış emisyonda, uyarılmış durumdaki elektronların ömürlerinin tamamlanması beklenmez ve ömürlerini tamamlamadan önce uyarılmış elektronu temel duruma zorla döndürmek için alternatif bir teknik kullanılır. Bu teknik uyarılmış emisyon olarak bilinir (Şekil 1.5).



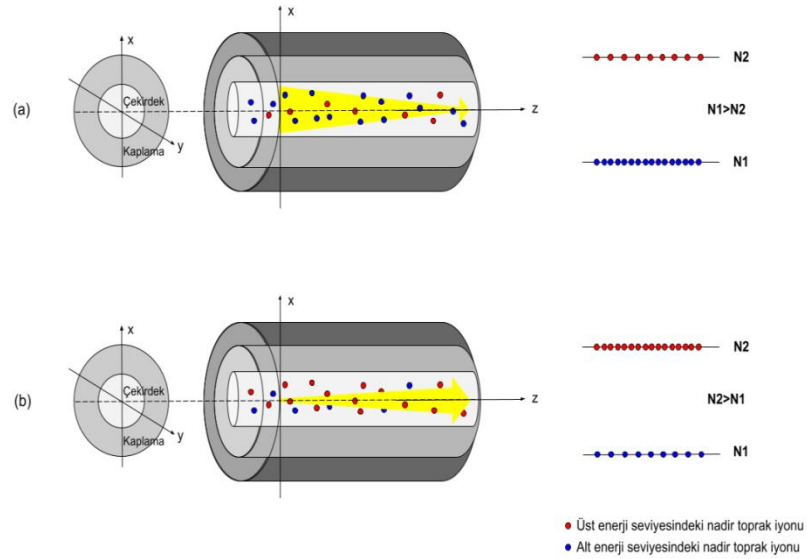
**Şekil 1.5:** Uyarılmış emisyon olayı şematik gösterimi.

Gelen foton, uyarılmış elektronla etkileştiğinde, uyarılmış elektronu temel duruma geri dönmeye zorlar. Bu uyarılmış elektron temel duruma düşerken ışık şeklinde enerji salar. Uyarılmış emisyonda, iki foton yayınlanır, biri gelen foton, diğeri ise uyarılmış elektronun enerji salımından kaynaklanmaktadır. Böylece iki foton yayınlanır. Uyarılmış emisyon süreci, spontan emisyon sürecine kıyasla çok hızlıdır. Uyarılmış emisyonda yayılan tüm fotonlar aynı enerjiye, aynı frekansa sahiptir ve aynı fazdadır. Bu nedenle, uyarılmış emisyondaki tüm fotonlar aynı yönde hareket

ederler. Uyarılmış emisyonunda yayılan fotonların sayısı, daha yüksek enerji seviyesindeki veya uyarılmış durumdaki elektronların sayısına ve gelen ışığın yoğunluğuna bağlıdır [16].

### 1.3 Nüfus Terslenmesi

Uyarılmış durumda veya daha yüksek enerji durumunda bulunan atom sayısının, temel durumda veya daha düşük enerji durumunda bulunan atom sayısından daha fazla olması, popülasyonun tersine çevrilmesi olarak adlandırılır (Şekil 1.6). Adından da anlaşılacağı gibi, bu tersine çevrilmiş bir olaydır. Bu popülasyon ters çevirme durumu, lazer eylemi için esastır. Herhangi bir uyarılmış emisyon için, üst enerji seviyesi veya metastabil durum uzun bir ömre sahip olmalıdır. Bu, atomların yarı kararlı durumda alt seviyeden daha uzun süre duraklaması gerektiği anlamına gelir.



Şekil 1.6: a) Nüfus terslenmesi olmayan ve b) Nüfus terslenmesi olan durum.

Bu, sabit bir yönde tutarlı bir şekilde hareket eden belirli bir dalga boyunu yayan enerjinin hızlı bir şekilde birikmesiyle sonuçlanır. Bu süreç, popülasyon inversiyonu kullanılarak uyarılmış emisyonun amplifikasyonudur [17].

### 1.4 Lazer Cihazının Yapısı

Bir lazer veya lazer sistemi üç önemli bileşenden oluşur: bir pompa kaynağı, lazer ortamı ve optik rezonatör.

### **1.4.1 Pompa kaynağı**

Pompa kaynağı veya enerji kaynağı, bir lazer sisteminin lazer ortamına enerji sağlayan parçasıdır. Lazer emisyonu elde etmek için önce nüfus tersini üretmemiz gerekir. Popülasyon inversiyonu, düşük enerji durumuna kıyasla daha yüksek enerji durumunda daha fazla sayıda elektron elde etme işlemidir.

Enerji kaynağı, düşük enerji durumundaki elektronları yüksek enerji durumuna uyararak için lazer ortamına yeterli miktarda enerji sağlar. Sonuç olarak, aktif ortamda veya lazer ortamında popülasyon inversiyonu elde edilir. Enerji kaynaklarına örnek olarak elektrik deşarjları, başka bir lazerden gelen ışık, kimyasal reaksiyonlar ve flaş lambaları verilebilir. Kullanılan enerji kaynağının türü çoğunlukla lazer ortamına bağlıdır. Eksimer lazer enerji kaynağı olarak kimyasal reaksiyonu, helyum lazer enerji kaynağı olarak elektrik deşarjını ve Nd:YAG lazer ise diyot lazerden odaklanan ışığı enerji kaynağı olarak kullanır [17].

### **1.4.2 Lazer ortamı**

Lazer ortamı, aktif ortam veya kazanç ortamı olarak bilinen kendiliğinden veya uyarılmış radyasyon emisyonunun gerçekleştiği bir ortamdır. Genel olarak, katı, sıvı veya gaz fazında bulunan lazer ortamları yayılan lazer ışığının özelliklerini belirlemektedirler.

### **1.4.3 Optik rezonatör**

Lazer ortamı, ışığın geri bildirimini sağlayan iki paralel ayna ile çevrilidir. Bir ayna tamamen yansıtıcı (%100 yansıtıcı), diğeri ise kısmen yansıtıcıdır (<%100 yansıtıcı). Bu iki ayna bir bütün olarak optik rezonatör olarak adlandırılır. Optik rezonatör ayrıca optik boşluk veya rezonans boşluğu olarak da bilinir.

Lazer ortamı içinde üretilen ışık, iki ayna arasında gidip gelir. Bu, temel duruma düşerken diğeri elektronları ışık salmaları için uyarır. Aynı şekilde, çok sayıda elektron ışık yayması için uyarılır. Böylece optik kazanç elde edilir. Bu güçlendirilmiş ışık, kısmen yansıtıcı aynadan kaçır. Lazer ortamındaki ışık, kısmen yansıtıcı aynadan kaçmadan önce aynalar arasında yüzlerce kez yansıtılır. Kısmen yansıtıcı aynadan kaçan ışık, uyarılmış emisyon işlemi tarafından üretilir [18].

## **1.5 Lazer Türleri**

Lazerler, kullanılan lazer ortamının türüne göre 4 türe ayrılır. Bunlar; genel olarak katıhal lazerler, gaz lazerler, sıvı lazerler, yarı iletken lazerler olarak bilinmektedir.

### **1.5.1 Katıhal lazerleri**

Katıhal lazeri, lazer ortamı olarak katı madde kullanılan bir lazerdir. Bu lazerlerde cam veya kristal gibi konak malzemelere katkılama (doping) yapılarak aktif ortam oluşturulmaktadır. İterbiyum (Yb), erbium (Er), terbium (Tb), tulyum (Tm), vb. nadir toprak elementler en yaygın katkı maddesi olarak kullanılırlar.

Katıhal lazerlerde pompalama kaynağı olarak ışık enerjisi kullanılır ve pompalamayı sağlamak için flaş tüpü, flaş lambaları, ark lambaları veya lazer diyotları gibi ışık kaynakları kullanılır [19].

### **1.5.2 Gaz lazerleri**

Bir gaz lazeri, lazer ışığı üretmek için lazer ortamı içindeki bir gazdan bir elektrik akımının boşaltıldığı bir lazerdir. Gaz lazerlerde lazer ortamı gaz halindedir.

Gaz lazerde, lazer ortamı veya kazanç ortamı, gazların karışımından oluşur. Bu karışım bir cam tüpe doldurulur. Gaz karışımı ile doldurulmuş cam tüp, aktif bir ortam veya lazer ortamı olarak işlev görür.

Gaz lazer, elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştürme prensibiyle çalışan ilk lazerdir ve bu ilk gaz lazer ile 1,15  $\mu\text{m}$ 'de bir lazer ışını üretilmiştir.

Gaz lazerlere örnek olarak, Helyum (He) – Neon (Ne) lazerler, argon iyon lazerler, karbondioksit lazerler (CO<sub>2</sub> lazerler), karbon monoksit lazerler (CO lazerler), excimer lazerler, nitrojen lazerler, hidrojen lazerler verilebilir [20].

### **1.5.3 Sıvı lazerler**

Sıvı lazer, sıvıyı lazer ortamı olarak kullanan bir lazerdir. Sıvı lazerlerde ışık, lazer ortamına enerji sağlar. Bir boya lazeri, sıvı lazerin bir örneğidir. Boya lazeri, lazer ortamı olarak organik bir boya (sıvı çözelti) kullanan, bir çözücü ile karıştırılmış organik bir boyadan oluşur. Bu lazerler, sıvı çözücülerde çözülmüş organik boyaların uyarılmış enerji durumlarından lazer ışığı üretir. Spektrumun yakın ultraviyole (UV) yakın kızılötesi (IR) bölgesine lazer ışık demeti üretir [21].

#### **1.5.4 Yarı iletken lazerler**

Yarı iletken lazerler günlük hayatımızda geniş bir kullanım alanı bulan lazer türleridir. Bu lazerler diğer lazer türlerine göre daha çok ucuz, kompakt boyutlu ve düşük güç tüketmektedirler. Yarı iletken lazerler, lazer diyotları olarak da bilinir ve katıhal lazerlerden farklıdırlar. Bir yarı iletken diyotun pn bağlantısı, aktif ortamı veya lazer ortamını oluşturulur ve optik kazanç, yarı iletken malzeme içinde üretilmektedir. Katıhal lazerlerde pompa kaynağı olarak ışık enerjisi kullanılırken, genel olarak ticari amaçlı kullanılan yarı iletken lazerlerde pompa kaynağı olarak elektrik enerjisi kullanılmaktadır [22].



## 2. FİBER LAZERLER

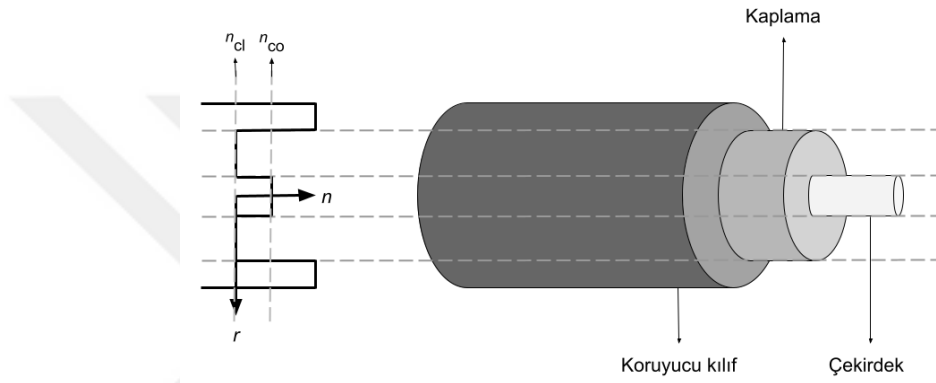
### 2.1 Giriş

Geleneksel yüksek güçlü fiber lazerlerin iki ana konfigürasyonu, fiber Fabry-Perot (FP) boşluğuna dayalı LD (lazer diyot) pompalı fiber lazer osilatörleri ve ana osilatör güç yükseltici (MOPA) yapısına dayalı fiber lazer amplifikatörleri hızlı bir gelişme elde etmiştir. 2009'da 10 kW [23] ve 2013'de 20 kW [24] gibi yüksek bir güç düzeyi Tandem yöntemi ile gösterilsede bu konuda ayrıntılı bir gösterimde bulunulmamıştır. 2018'de Fujikura Inc.'den Shima K.,  $M^2$  değeri (Işın kalite değeri veya ışın kalitesi ölçütü) 1,3 olan 970 nm LD'ler tarafından pompalanan 5,05 kW fiber lazer osilatör bildirmiştir [25]. Aynı yıl Yang ve ark. 5.2 kW çıkış gücüne sahip ve  $M^2$  değeri 2.2 olan bir 915 nm LD pompalı çift taraflı pompalı fiber lazer osilatörü rapor etmişlerdir [26]. 2019'da Ye ve ark. 5 kW maksimum güçte ışın kalitesini  $M^2$  değerini 1.6'ya yükseltmişlerdir [27]. 2020'de Krämer ve ark. bir femtosaniye lazer tarafından 20/400  $\mu\text{m}$  YDF üzerine yazılan bragg ızgaralarını benimseyen ve 4,8 kW'ta  $M^2$  değeri 1,3 ile 5 kW çıkış elde eden 976 nm'lik bir pompalı fiber lazer osilatörü rapor etmişlerdir [28]. Aynı yıl özel olarak tasarlanmış bir fiber ile 2020'de 8 kW ve 0.5 mm-mrad ışın kalitesine sahip bir yöntem sunulmuştur. [29]. 2022'de ise fiber çekirdek çapının fiber boyunca asimetric olduğu (spindle-shaped) özel bir fiber kullanılan 6 kW lık çıkış gücüne sahip bir yapı açıklanmıştır [30]. Tüm bildirilen çalışmalara bakıldığında özel fiber üretimleri ve farklı pompalama yöntemleri gösterildiği görülmektedir. Bu tezin konusu olan ticari olarak temin edilebilen bileşenler ile 915nm yüksek güçlü fiber sistemlerinin geliştirilmesi için bir yöntem sunulmuştur.

Fiber lazer yapılarının anlaşılması bir sonraki başlıklarda amaçlanarak daha sonrasında deneysel çalışma verilmiştir.

## 2.2 Fiber Optik Dalga Kılavuzları

Fiber optik dalga kılavuzları silindirik geometriye sahip olan, içinde ışık dalgasının yayılımını mümkün kılan yapılardır. En genel şekilde gösterimi Şekil 2.1 de gösterilmiştir. En iç kısımda yüksek kırılma indisine sahip olan çekirdek ve etrafını çevreleyen daha düşük kırılma indisine sahip kaplama olarak adlandırılan bölge bulunmaktadır. Koruyucu kılıf, fiber optik kılavuzları dış etkilerden kaynaklanan hasarlardan korurken aynı zamanda esnek bir yapıda kullanılmasına imkân tanımaktadır.



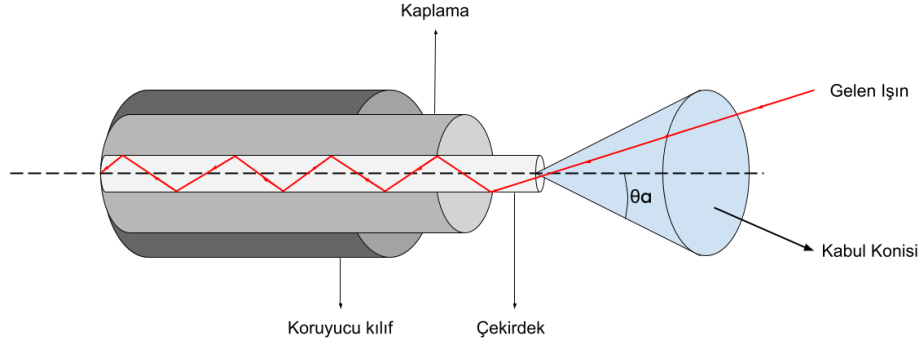
**Şekil 2.1:** Standart bir fiber optik yapının gösterimi.

Yukarıdaki şekildedeki gibi çekirdek kırılma indisi kaplama kırılma indisine göre yüksektir. Ve bu özellik ışığın çekirdek bölgesinde ilerleyebilmesine ve Snell yasasının çalışmasına imkân tanımaktadır. Snell Yasası, bir lazer kaynağının bir optik fibere nasıl gireceğini ve ardından fiber boyunca nasıl ilerleyeceğini modellemede büyük bir rol oynar. Snell Yasası şu şekilde ifade edilir;

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1.1)$$

Denklem 1.1'de,  $n_1$  gelen ışığın bulunduğu ortamın kırıcılık indisi,  $\theta_1$  gelen ışığın normal ile yaptığı açı,  $n_2$  ışığın geçtiği ortamın kırıcılık indisi,  $\theta_2$  ışığın geçtiği ortamdaki normal ile yaptığı açı olarak tanımlanır. Toplam iç yansımanın gerçekleşebilmesi için  $\theta_2$ 'nin kritik açıdan daha düşük olması ile gerçekleşir ve bu yasa fiber lazerin temelini oluşturur. Aynı zamanda fiber optik yapının iç kısımdaki maddenin kırılma indisi dış kısımdaki maddenin kırılma indisinden daha büyük olmalıdır. [31]

Fiber optik dalga kılavuzlarının parametrelerinden bir diğeri olan sayısal açıklık değeri (NA veya kabul konisi) dalga kılavuzunun ışık toplama kapasitesini belirler (Şekil 2.2). Bu değer dışında kalan ışık dalgaları fiber optik yapının içerisine giremez veya tek modlu olarak yayılamazlar.



**Şekil 2.2:** Fiber optik yapı ve kabul konisi.

Yukarıdaki şekilde gösterilen kabul konisi bir ışının çekirdek bölgesinde ilerleyebilmesi için gerekli kabul açısını ifade etmektedir. Bu açı değeri dışında gelen ışınlar fiber optik yapı içerisindeki çekirdek kısmında ilerleyemeden sönmülenir yada çekirdek kısmına hiçbir şekilde bağlanamaz. Kabul konisinin sınırları içerisinde gelen ışınlar çekirdek bölgesinde ilerleyerek fiber çekirdek bölgesine ilerleyebilir. Nümerik açıklık veya kabul konisi aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

NA değeri aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir.,

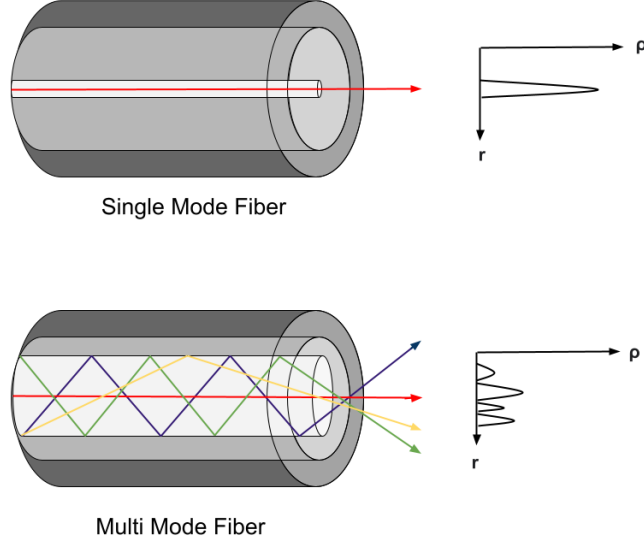
$$NA = \sqrt{n_{co}^2 - n_{cl}^2} = n_o \sin(\theta_a) \quad (1.2)$$

Denklem 1.2'de gösterildiği gibi NA, Nümerik açıklık (kabul konisi) olarak tanımlanan,  $n_{co}$  çekirdek bölgesinin kırıcılık indis değerini,  $n_{cl}$  kaplama bölgesinin kırıcılık indis değerini belirtmektedir.  $n_o$  fiber dışındaki ortamın kırıcılık indis değerini (hava için 1'dir) ve  $\theta_a$  kabul açısını ifade etmektedir.

Fiber optik yapıların diğeri bir özelliği V parametresi olarak tanımlanan normalize frekans, çekirdek çapının büyüklüğüne ve NA değerine bağlı olarak tek modlu ( $V < 2,45$ ) veya çok modlu ( $V > 2,45$ ) özelliği aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$V = krNA = \frac{2\pi}{\lambda} rNA \quad (1.3)$$

Denklem 1.3'de  $V$  normalleştirilmiş frekans,  $\lambda$  vakum dalga boyu,  $k$  vakum dalga sayısı ve  $r$  fiber yarıçapı olarak tanımlanmaktadır.



**Şekil 2.3:** Tek modlu ve çok modlu fiber optik kılavuzlar.

Şekilde 2.3'de gösterildiği gibi  $V$  parametresine bağlı olarak fiber optik yapı içerisinde ilerleyen ışınlar çekirdek içerisinde tek modlu ve çok modlu olarak ilerlemektedirler.

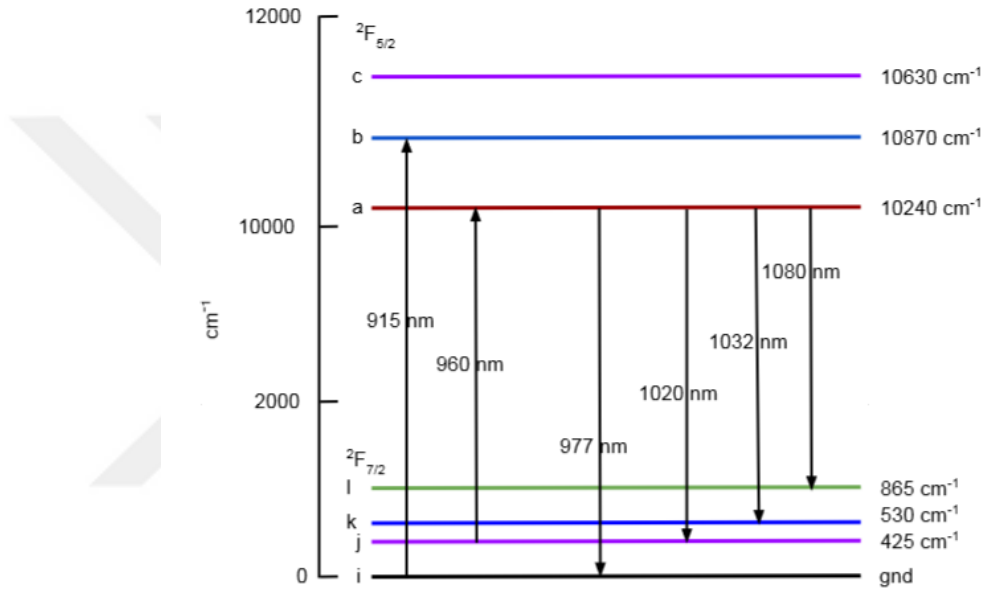
Fiber lazerlerin en önemli karakteristik özelliği yüksek ışın kalitesi ve tek modlu ışın yapısına sahip olmalarına dayanmaktadır. Teorik olarak çekirdek bölgesi çapı  $<15\mu\text{m}$  olan fiberler tek modlu (temel) ışın yaymaya,  $20\mu\text{m}$  ile  $50\mu\text{m}$  arası fiberler temel modu ve az derecede çoklu modları,  $50\mu\text{m}$  büyük çekirdek yapıları ise çoklu modları desteklemektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar ve geniş mod alanlı (LMA; Large mode area) fiberlerin gelişmesi ile büyük çaplı fiberlerde tek modlu yayılımlar desteklenmekte ve fiber lazer güç sınırlarının aşılmasına imkan tanımaktadır. LMA fiberler düşük NA değerine sahip fiber üretimleri de tek modlu yayılımı destekleyici çalışmalara imkan tanımaktadır.

### 2.3 Yb Katkılı Aktif Fiberler

İlk iterbiyum (Yb) katkı fiber lazer 1988 tarihinde gösterilmiş [32] ancak Yb katkı fiberler Erbiyum ve Neodimyum katkı fiberler kadar yaygın olarak kullanım alanı

bulamamıştır. Bunun ana nedeni neodimyum ve erbiyum katkılı fiberlerin o zaman da daha popüler olması olarak açıklanmaktadır. Ancak erbiyum katkılı fiberlerde uyarılmış durum absorpsiyonunun görülmesi ve neodimyum katkılı fiberlerde sınırlı emisyon bant genişliği sebebi ile bu tür fiberlerin uygulamalarını sınırladığı için araştırmacılar dikkatini diğer nadir toprak katkılı fiberlere çevirmişlerdir [33]. İterbiyum katkılı fiberlerin çeşitli avantajlarına ilişkin ayrıntılı bir çalışma [34] bu fiberlere olan ilginin yeniden canlanmasına sebep olmuştur.

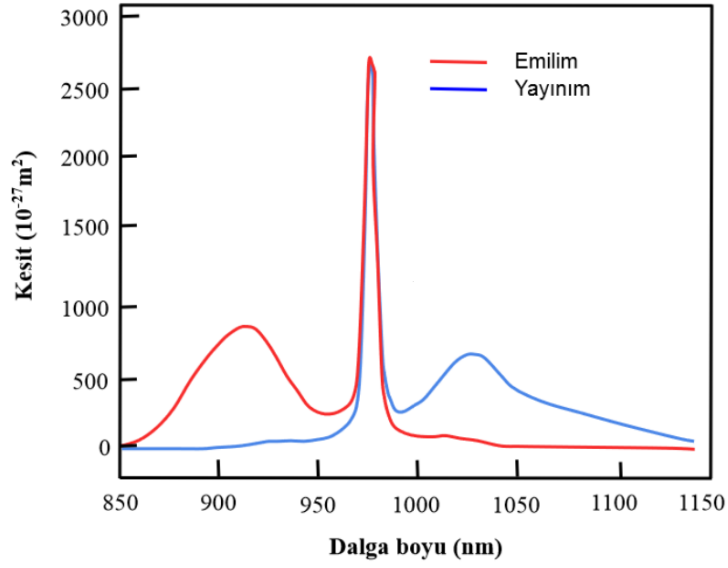
$Yb^{3+}$  iyonlarının elektronik yapısı [35] Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: İterbiyum:Silika enerji seviyeleri.

İterbiyum katkılı kazanç ortamının ana avantajları yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi lazer geçişinde yalnızca bir uyarılmış durum manifoldunun yer almasıdır. Zemin ve uyarılmış durum arasındaki nispeten küçük enerji aralığı, son derece düşük kuantum kusurları ile sonuçlanır ve %100 yakın kuantum verimliliği ile sonuçlanır. Mevcut pompa kaynaklarıyla birlikte bu yüksek kuantum verimliliği, Yb katkılı fiber lazerin güç seviyesinin, neredeyse kırınımla sınırlı ışın kalitesiyle yüksek çıkış güçlerine ulaşmasını sağlamaktadır.

Ayrıca Yb-iyonlarının basit elektronik yapısı, aynı zamanda  $Yb^{3+}$  iyonlarının konak ortamına da güçlü bir şekilde bağlı olan, oldukça belirgin absorpsiyon ve emisyon kesitlerine yol açar (Şekil 2.5). Germanosilikat cam, tipik olarak Yb katkılı fiber çekirdeklerde kullanılan malzeme olan en yaygın ana ortamdır.



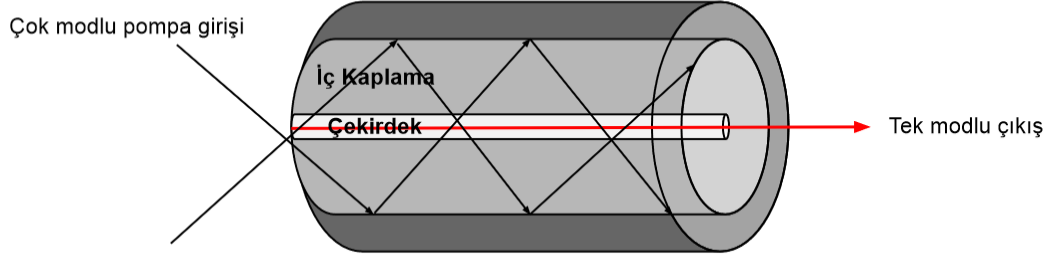
**Şekil 2.5:** Germanosilikat camda Yb'nin emilim ve yayınım kesitleri [34]

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi 915 nm ve 976 nm de iki yüksek emilim kesiti bulunmaktadır. 976 nm'de daha yüksek emilim kesitine ancak daha dar bir alana sahiptir. Bu da sıcaklıkla değişen dalga boyu kaymalarında dramatik emilim düşüşüne sebep olmaktadır. Bu tez de kullanılan 915 nm bölgesi daha düşük emilim kesitine sahip olsada daha geniş bir alana sahip olması basit termal yönetim sebebi ile avantajlı durumunu göstermektedir.

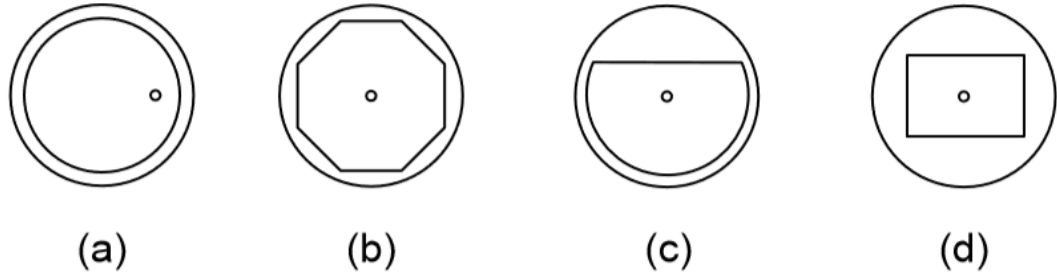
## 2.4 Çift Kaplı Fiberler (DCF)

Fiber lazerlerin önemli özelliklerinde biri olan yüksek ışın kalitesi, lazer ortamının tek moda sahip fiber çekirdeğinde oluşması ile elde edilmektedir. Pompa kaynağı olarak kullanılan tek modlu lazer diyodlar tek modlu fiberlerle mükemmel örtüşme sağlar. Ancak bu pompa diyodlarının güçleri sınırlıdır. Çok modlu diyodlar ile tek modlu fiber pompa yapısı ise verimsiz olduğundan bu sorun ilk olarak 1988'de Snitzer ve arkadaşları tarafından önerilen 'çift kaplamalı' fiber tasarımının geliştirilmesiyle çözülmüştür [36]. Bu tasarım ile bir çok yüksek güçlü çok modlu diyod lazer güçleri kırılma indisi çekirdekten daha düşük ve dış kaplamasında daha büyük olan kaplama bölgesinde toplam iç yansıma kuralına uyarak ilerleyebilmektedir. Böylece daha yüksek güçlerde pompa ışığı fiber çekirdek bölgesi ile etkileşime girebilmektedir ve yüksek güçlerde tek modlu ışın kalitesini koruyan çıkış güçleri elde edilebilir hale gelmektedir (Şekil 2.6). Çift kaplı fiberler

kullanılarak çekirdek bölgesindeki en büyük etkileşimi sağlayabilmek için Şekil 2.7 bazı iç kaplama geometrileri önerilmiştir [37].



Şekil 2.6: Kaplama pompalı çift kaplı fiber yükselteci şematik gösterimi.



Şekil 2.7: Pompa emilimini artırmak için kullanılan farklı fiber iç kaplama ve çekirdek geometrileri: (a) çekirdek offsetli fiber, (b) sekizgen iç kaplama, (c) "D" şeklinde iç kaplama, (d) kare iç kaplama.

Sekizgen iç kaplama, ticari olarak temin edilebilen çift kaplamalı fiberlerde kullanılan en yaygın geometrilerden biridir. Ve bu tezde sekizgen iç kaplama geometrisine sahip aktif fiberler kullanılmıştır.

## 2.5 Geniş Mod Alanlı Fiberler (LMA Fiberler)

Kaplama pompalı fiber yapılarının keşfi ve geliştirilmesi ile fiber lazerlerin çıkış gücü hızla artış göstermiştir. Ancak yüksek güçlü çalışmalarda lineer olmayan etkilerin ortaya çıkması ve termal yönetim zorlukları geniş mod alanlı fiberlerin (LMA fiberlerin) geliştirilmesine yol açmıştır. LMA fiberler, fiber çekirdeğinin sayısal açıklığının küçük tutularak ve aynı zamanda yüksek dereceli modların yayılmasını engelleyerek tek modlu çalışmaya imkan sağlamıştır.

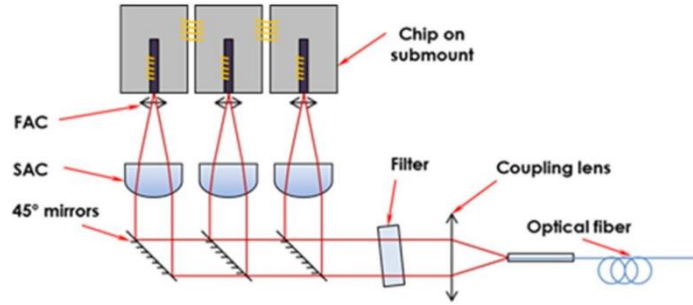
## 2.6 Fiber Lazer Bileşenleri

Çift kaplı ve LMA fiberlerin gelişmesi ile HPFL'lerin artan çıkış güçleri aynı zamanda da tamamen fiber yapıya sahip olmaları sebebi ile fiber optik bileşenlerin geliştirilmesi bu başarıyı desteklemektedir.

Genel fiber sistemlerinin ana bileşenleri, lazer pompa diyodları, yüksek güçlü fiber birleştiriciler, yüksek güçlü fiber bragg ızgaralar, kaplama güç sınırlayıcıları, fiber tabanlı uç kapakları vb. yapılardan oluşmaktadır.

### 2.6.1 Lazer pompa diyodları

Yarı iletken lazerler grubuna dahil olan lazer diyodlar, yarı iletken malzemeler kullanılarak oluşturulan bir çok lazer ışığının optik yapılar ile fibere bağlandığı ve pompa diyodu olarak kullanıldığı sistemlerdir (Şekil 2.8) [38]. Genel olarak tek modlu ve çok modlu yapılarda bulunan lazer diyodlarından çok modlu yapılar yüksek güçlü fiber lazerlerin pompalanması için kullanılmaktadır. Buradaki motivasyon bir çok lazer çipinden elde edilen lazer ışığını büyük çapta fibere bağlayabilmek ve çift kaplamaya sahip fiberlere yüksek güçlü lazer ışınını pompalayabilmektir [39].



Şekil 2.8: Lazer pompa diyod yapısı [28]

### 2.6.2 Fiber birleştiriciler (Combiner)

Çift kaplı fiberlere bağlanan pompa gücü fiber lazerlerin ulaşabileceği güç seviyesini belirlemektedir ve daha yüksek güçte pompalama yeteneği daha kompakt yapıların oluşmasını imkan sağlamaktadır. Yüksek güçte pompa kapasitesini artırma görevi pasif fiber bazlı birleştiriciler ile sağlanır ve bir çok diyod lazerin çift kaplı fibere bağlanabilmesi görevini yerine getirmektedir. [40,41]

Üretim yöntemlerine göre uç pompalamalı ve yan pompalamalı iki yöntem bulunmaktadır ve pompalama yönüne göre de aşağıda combiner yapıları verilmektedir.

- Sinyal pompa birleştirici
- İleri yönlü birleştirici
- Geri yönlü birleştirici

### **2.6.3 FBG aynalar**

Bir FBG fiber çekirdek bölgesine UV ışınlarının maruziyeti sebebi ile kalıcı kırıcılık indisi değişimlerinin oluşturulması ile üretilmektedir. Boşluk içi rezonatörler için geleneksel boş alan aynalarının yerini alarak fiber lazerlerin tüm fiber yapısının korunmasına yönelik geliştirilen önemli bir fiber optik bileşendir. FBG ler rezonans geri bildirim görevi haricinde aynı zamanda merkez dalga boyu ve band genişliğini özelleştiren benzersiz avantajları sebebi ile fiber lazer yapılarına esnek kurulum özellikleri sağlamaktadır. İdeal olarak, FBG tabanlı fiber osilatörlerin muazzam bir potansiyeli vardır ve temel olarak MOPA konfigürasyonlarına eşit veya daha yüksek bir güç düzeyine ulaşmayı vaat etmektedirler [42].

### **2.6.4 Kaplama güç sınırlayıcılar (CPS)**

CPS'ler kaplama pompalı yüksek güçlü fiber lazerlerin çıkış gücü kilovat düzeyine çıktıkça eksik emilimden kalan pompa ışığının sistemden uzaklaştırılması görevini üstlenmişlerdir. Fiber lazerlerin kararlı yapıda çalışmasını, termal sorunların oluşmamasını ve yüksek kaliteli ışın çıktısı elde etmek için kritik öneme sahiptir [43]. Genellikle çalışma prensipleri fiber kaplama bölgesinin farklı metodlar ile aşındırılması veya kaplanması ile kaplama bölgesinde ilerleyen ışınların dışarıya saçılması prensibine dayanmaktadır [44,45].

### **2.6.5 Fiber tabanlı uç kapağı (QBH)**

Fiber tabanlı uç kapağı (kuvars blok kafası, QBH) genellikle füzyon yöntemi ile çıkış fiberinin kuvars bloğuna bağlanması ile elde edilir. Yüksek çıkış güçlerine sahip fiber lazerlerde uç kapakları kullanılarak lazer ışın profilini genişletilir ve uç hasar sorununu engellemiş olur. Aynı zamanda uç kapağın yayan yüzeyinin yansıma önleyici film ile kaplanması yüksek güçlü lazer ışının geçirgenliğini artırarak çıkış

verimliliğini arttırır ve geriye doğru yansıyan ışığı azaltmış olur. Fiber tabanlı uç kapağı yapısına aynı zamanda kaplama modu sıyrıcı ve su soğutma yapısı, güvenlik kilidi gibi özelliklerde eklenmektedir [46,47,48].

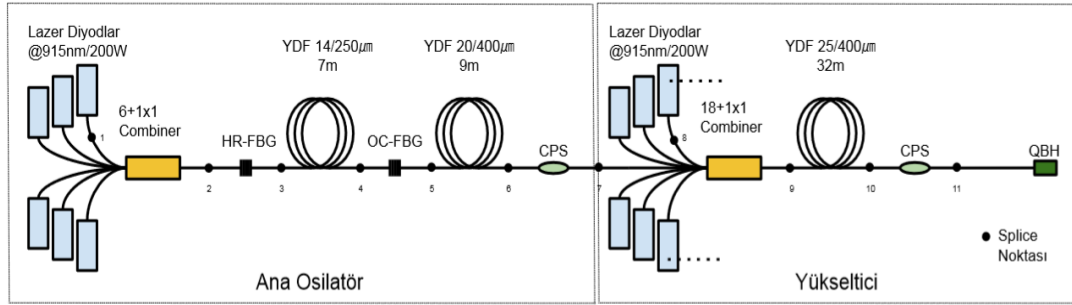
## **2.7 Yüksek Güçlü Fiber Lazerlerde Sınırlar**

Yüksek güçlü fiber lazer uygulamalarında optik fiberler için, fiber lazerlerin daha fazla güç ölçeklemesini sınırlayan doğrusal olmayan etkilerden en problemlilerden olanları uyarılmış Raman saçılması (SRS) ve enine mod kararsızlığıdır (TMI) [1,49,50,51]. Uyarılmış Raman saçılması enerjinin, cam ortamdaki moleküllerin titreşim modları veya termal fononları aracılığıyla bir optik pompa ışınından daha uzun dalga boylarına aktarıldığı lineer olmayan bir etkidir. Eşik değeri fiber uzunluğu ve fiber çekirdek çapı arttığından etkilerini hafifletmeye yönelik çalışmalar arasında daha kısa fiber kullanımı, geriye doğru pompalama [52], iki yönlü pompalama, yeni fiber tasarımları [53,54], bant içi pompalama (tandem) yöntemleri yer almaktadır [42,55].

### 3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

#### 3.1 Kurulum

Bu tezde oluşturulan fiber lazer sistem yapısı Şekil 3.1 de gösterildiği gibi bir ana güç osilatörüne ve bir güç yükselticiye sahip MOPA yapısı ile kurulmuştur.



Şekil 3.1: Fiber lazer MOPA sistem yapısı.

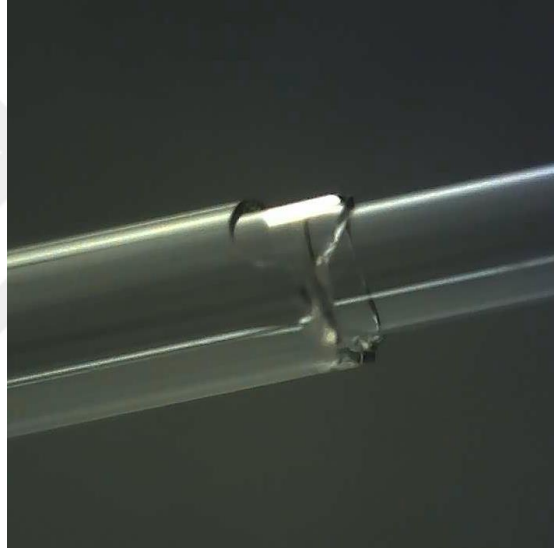
Ana osilatörde 6 adet 140W, ışın dalgı boyu 915nm olan ve 105/125µm fiber özelliklerine sahip diyod lazerler kullanılmıştır. Diyod lazerler, 14/250µm çıkış fiberine sahip olan ve pompa bacak verimliliği %99.9 olan 6+1x1 pompa birleştiriciye bağlanmıştır. Kullanılan HR FBG, merkez dalgı boyu 1079.99 nm, FWHM 3.02nm ve %99.9 yansıtma özelliğine sahiptir. Kullanılan OC FBG, merkez dalgı boyu 1080.02nm, FWHM 1nm ve %11.5 yansıtma özelliğine sahiptir. Ana osilatörde kullanılan aktif fiberler, 7 metre aktif fiber YB1200-14/250DC (nLIGHT, Liekki) 0.70dB/m@915nm ve 9 metre aktif fiber LMA-YDF-20/400-HP-M (Nufern) 0.42dB@915nm kullanılmıştır. Güç yükseltici bölgesinde 18 adet 200W, ışın dalgı boyu 915nm olan ve 135/155µm fiber özelliklerine sahip diyod lazerler, giriş fiberi 20/400µm çıkış fiberi 25/400µm fiber olan 18+1x1 sinyal pompa birleştirici kullanılmıştır. Aktif fiber LMA-YDF-25/400-HP-M (Nufern) 0.55dB@915nm 32 metre fiber kullanılmıştır.

Sistemde emilmeyen lazer ışını uzaklaştırmak için kullanılan kaplama modu sıyrıcılar (Cladding power stripper, CPS) 200W@915nm özelliğine sahiptir. Çıkış fiberi veya iletim fiberi uzunluğu 5 metredir ve bir quartz blok ile sonlandırılmıştır.

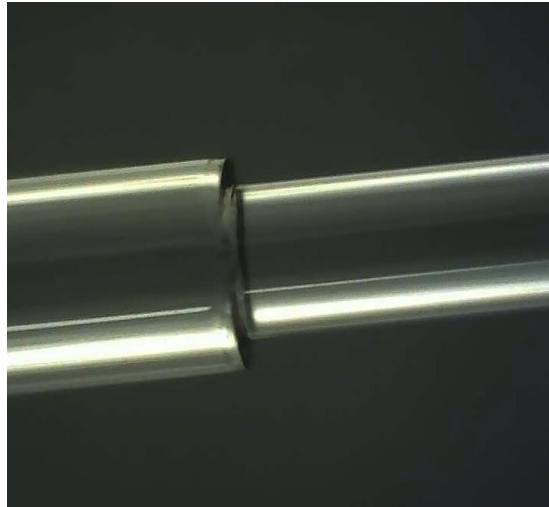
### 3.2 Fiber Lazer Üretim Süreçleri

Sistem tasarımı yapılan fiber lazerlerin kurulum süreçlerinde fiber soyma, fiber kesme, fiber birleştirme ve tekrardan kaplama işlemleri yapılarak tasarımda kullanılan fiber optik bileşenlerin birbirleri ile entegrasyonu yapılmıştır. Aşağıda ideal fiber optik işlemlerin örnekleri ve Şekilde 3.1 de verilen splice noktalarının sonuçları verilmiştir.

Fiberler önceki bölümlerde gösterildiği gibi çekirdek, kaplama ve bu bölgeleri dış etkenlerden koruyan koruyucu tabaka ile örtülüdür. Bu tabaka genellikle akrilik yapıdadır ve fiber birleştirme işlemlerinden önce bu katmanın soyulması gerekmektedir (Şekil 3.2-3.3).

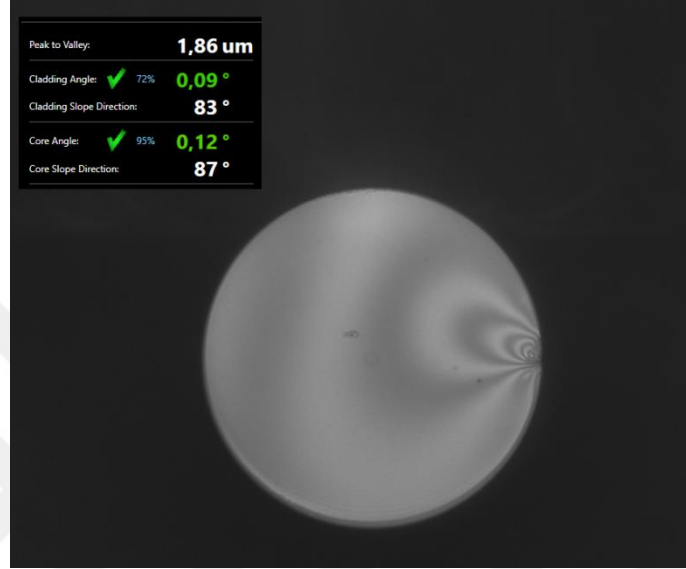


Şekil 3.2: İdeal olmayan fiber soyma görüntüsü.

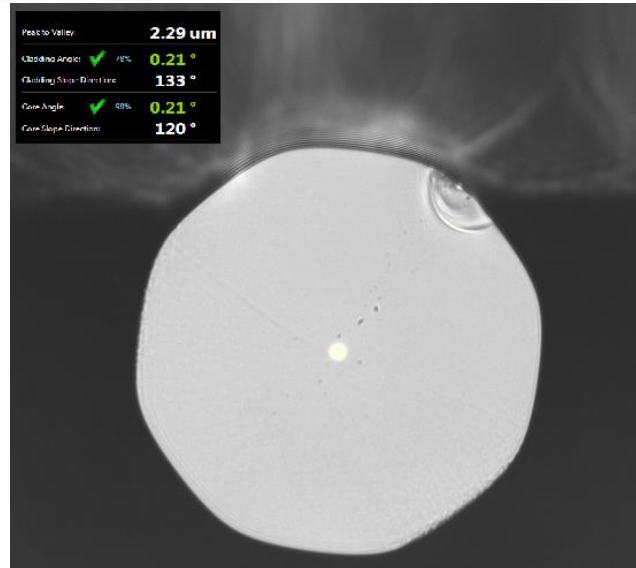


Şekil 3.3: İdeal fiber soyma görüntüsü.

Yukarıdaki şekilde de görüldüğü gibi ideal bir fiber koruyucu tabaka soyma işlemi fiber birleştirme işlemi sonrasında tekrardan kaplama yapıldığında, kaplama malzemesinin boşluk kalmadan homojen bir şekilde yayılmasına imkan tanır ve ekstra ısı oluşumu engellenmiş olur. Fiber soyma işlemi sonrasında fiberlere uygun çaplarda kesim yapabilen cihazlar ile kesim açısı  $<0.5^\circ$  olacak şekilde kesim işlemi yapılır ve bir interferometre yardımı ile kesim açısı ölçülür (Şekil 3.4-3.5).



**Şekil 3.4:** İdeal pasif fiber kesim görüntüsü.



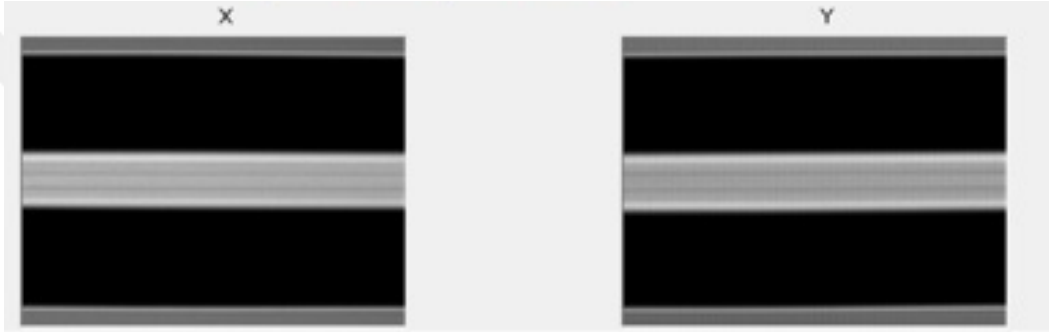
**Şekil 3.5:** İdeal aktif fiber kesim görüntüsü.

Tüm pasif ve aktif fiber kesimleri, yukarıdaki görsellere yakın değerlerde kesilerek yüksek kalitede ve en az kayıp ile kaynak (splice) işlemlerinin yapılabilmesi için en önemli adımlardan biridir.

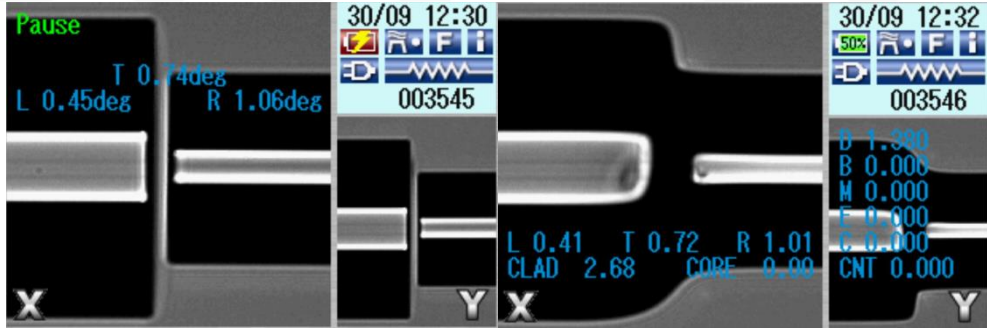
Kesim standartlarına uygun işlem yapılan fiberler füzyon arkı kaynağı (Arc fusion splicer) ile uygun birleştirme reçeteleri hazırlanarak kaynak işlemleri yapılmıştır (Şekil 3.6-3.10).



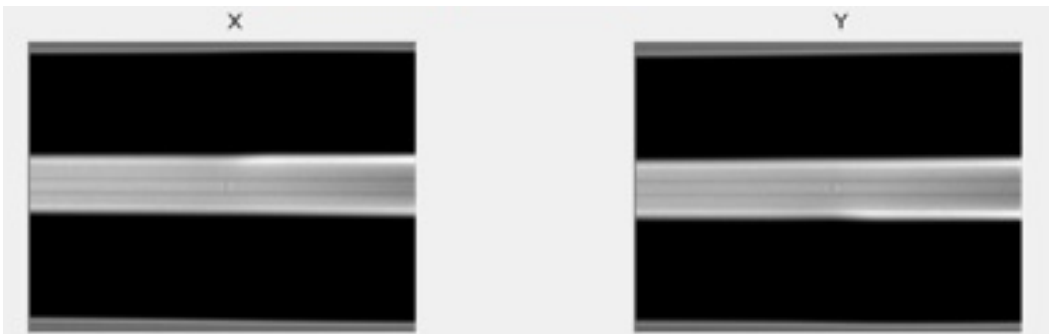
Şekil 3.6: Diyod ve Fiber birleştirici (Combiner) fiber kaynak görüntüsü (Splice 1,8).



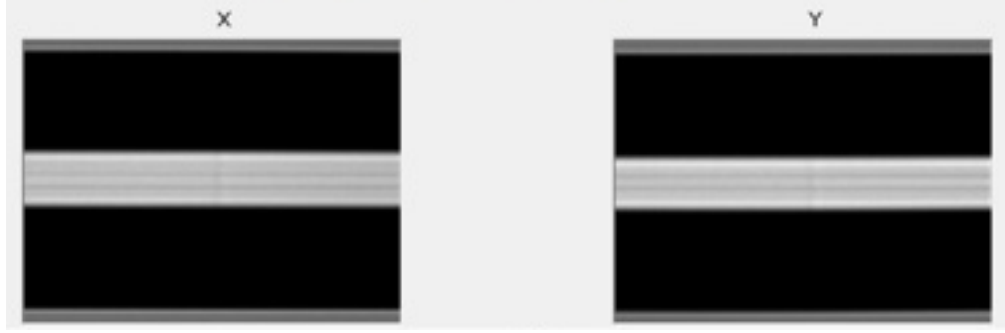
Şekil 3.7: Fiber birleştirici ile HR-FBG fibelerinin kaynak görüntüsü (Splice 2).



Şekil 3.8: 20/400 aktif fiber ile 14/ 250 OC-FBG pasif fiber kaynak görüntüsü.

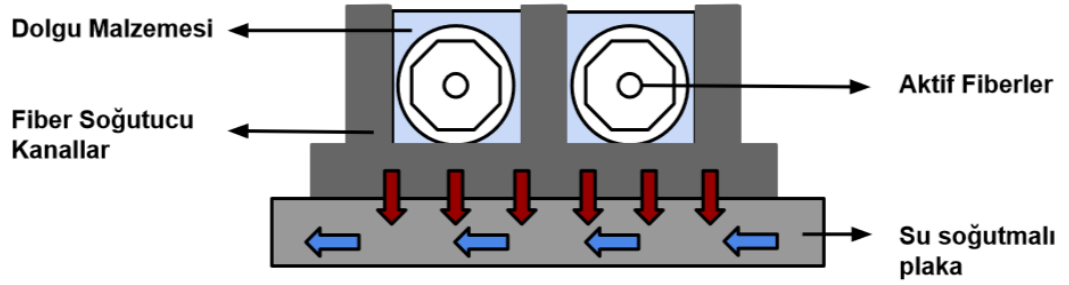


Şekil 3.9 Pasif-Aktif fiber kaynak görüntüsü (Splice 3,4,6,9,10).



**Şekil 3.10:** Pasif- Pasif fiber kaynak görüntüsü (Splice 7,11).

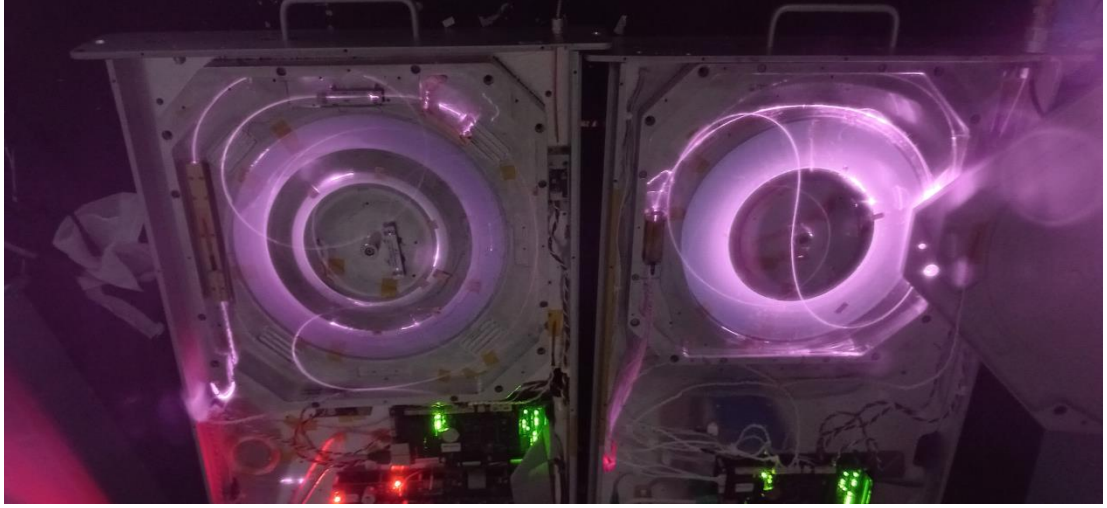
Fiber lazer sistem kurulum yukarıdaki görsellerde verildiği gibi uygun soyma, kesim, kaynak ve yeniden kaplama işlemleri yapılarak kaynak bölgeleri soğutucu plaka üzerine sabitleme işlemleri yapılmıştır. Aktif fiberler en ideal sarım çapları belirlenerek (14/250 $\mu$ m için 12cm sarım çapı, 20/400 $\mu$ m için 15cm, 25/400 $\mu$ m için 12cm) soğutucu kanal içine sarılmış ve silikon tabanlı dolgu malzemesi ile homojen ısı transferi olması sağlanmıştır (Şekil 3.11-3.12).



**Şekil 3.11:** Aktif fiber soğutma kanalları şematik gösterimi.



**Şekil 3.12:** Aktif fiber soğutma kanalları.



**Şekil 3.13:** Fiber lazer kurulumunun genel görüntüsü.

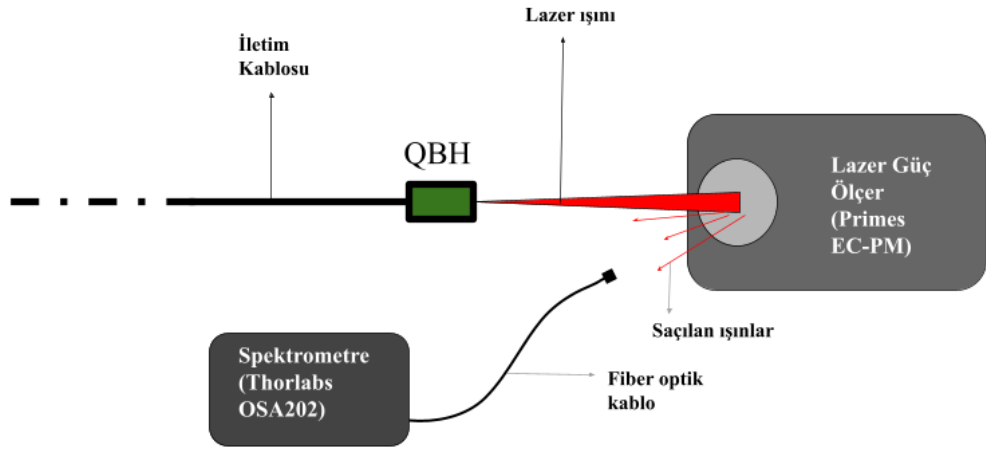
Şekil 3.13 Aktif fiber, pasif fiber, splice noktaları ve fiber optik bileşenlerin soğutucu plaka ve kanallara yerleştirilerek sistem kurulumunun tamamlanmış halini göstermektedir.

### 3.3 Test Düzeneginin Kurulması

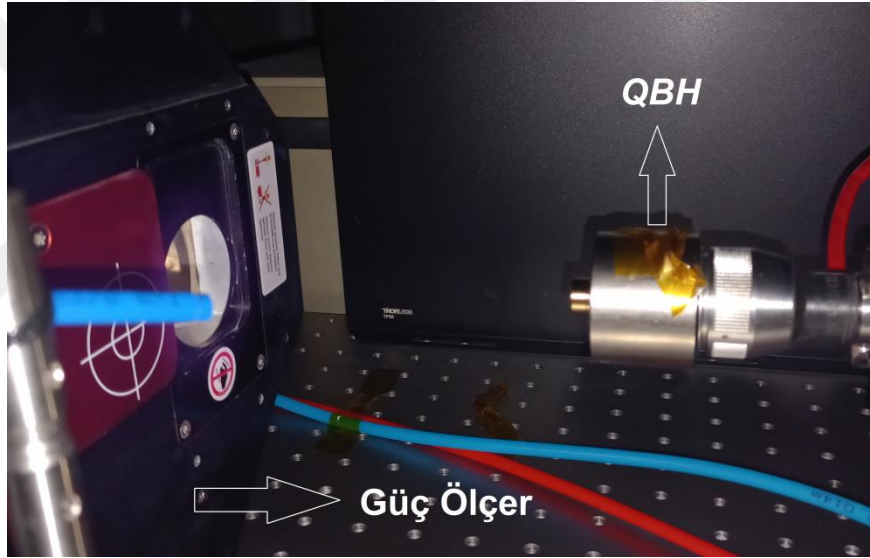
Kurulan lazer sisteminin test aşamasına geçildiğinde çıkıştan alınacak lazer ışınının dört temel karakteristik özelliği ve türevlerinin incelenmesi gerekmektedir. Bunlar

- Lazer Çıkış Gücü
- Lazer Dalga boyu ve özellikleri
- Lazer Işın Kalitesi
- Lazer Güç Kararlılığı

Bu temel karakteristik özelliklerden çıkış gücü, dalga boyu ve güç kararlılığı ölçümünün yapılabilmesi için Şekil 3.14 ve Şekil 3.15 deki kurulumlar gerçekleştirilmiştir. Primes EC-PM lazer güç ölçer ve dalga boyu analizi için thorlabs OSA202 ölçüm cihazı kullanılmıştır.

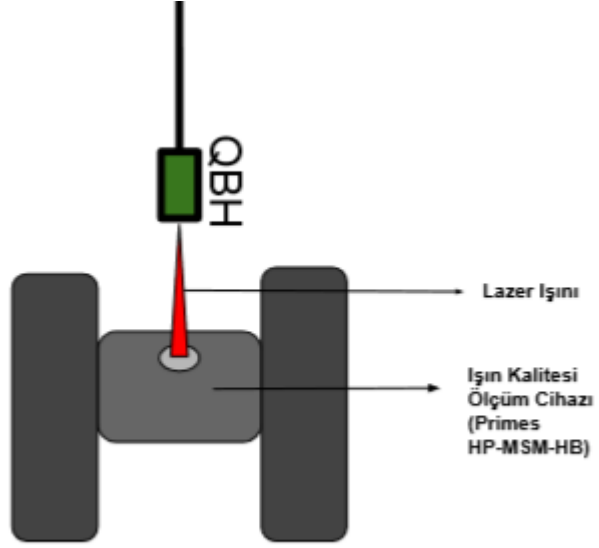


**Şekil 3.14:** Lazer güç ölçümü ve lazer spektrum analizi şematik gösterimi.

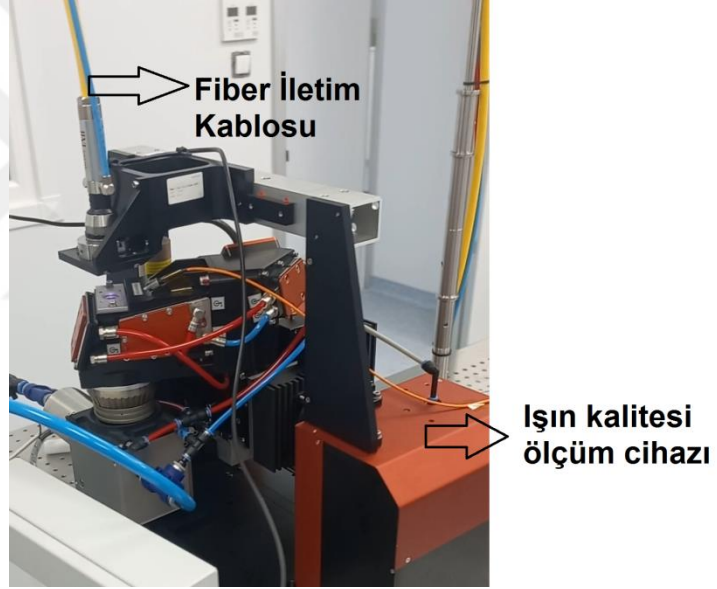


**Şekil 3.15:** Lazer güç ölçümü kurulum görseli.

Fiber lazer sisteminde diğer belirlenmesi gereken karakteristik özellik olan ışın kalitesi ölçümü Primes HP-MSM-HB cihazı kullanılarak ölçülmüştür (Şekil 3.16-3.17).



**Şekil 3.16:** Lazer ışın kalitesi ölçümü şematik gösterimi.



**Şekil 3.17:** Lazer ışın kalitesi ölçüm cihazı (Primes HP-MSM-HB).

## 4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

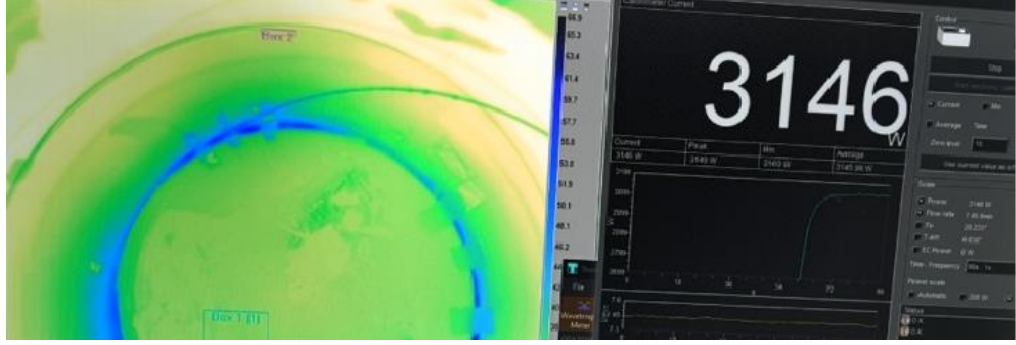
### 4.1 Sonuçlar

Yüksek güçlü fiber lazerlerin güç ölçeklenebilirlik sınırları lineer olmayan etkiler ile sınırlanmış olsa da hala popülerliğini korumaktadır. Teknolojik gelişmeler ile lazer pompa diyodlarının çıkış güçleri artmakta ve fiber optik bileşen bağlantı verimlilikleri daha iyi hale gelmektedir. Tandem pompalama yöntemi şimdilik yüksek güçlü tek modlu çıkış için tek örnek olsa da yükseltilmiş spontan yayılımı (ASE) gibi diğer lineer olmayan etkilerin görülmesi, karmaşık sistem yönetimleri ve yüksek maliyetleri sebebi ile endüstriyel alanlarda kullanımı görülmemektedir. MOPA yapıları ise daha esnek ve kolay kurulumları ile endüstriyel, savunma ve diğer alanlarda kullanımı yaygın mimariler olarak görülmektedir.

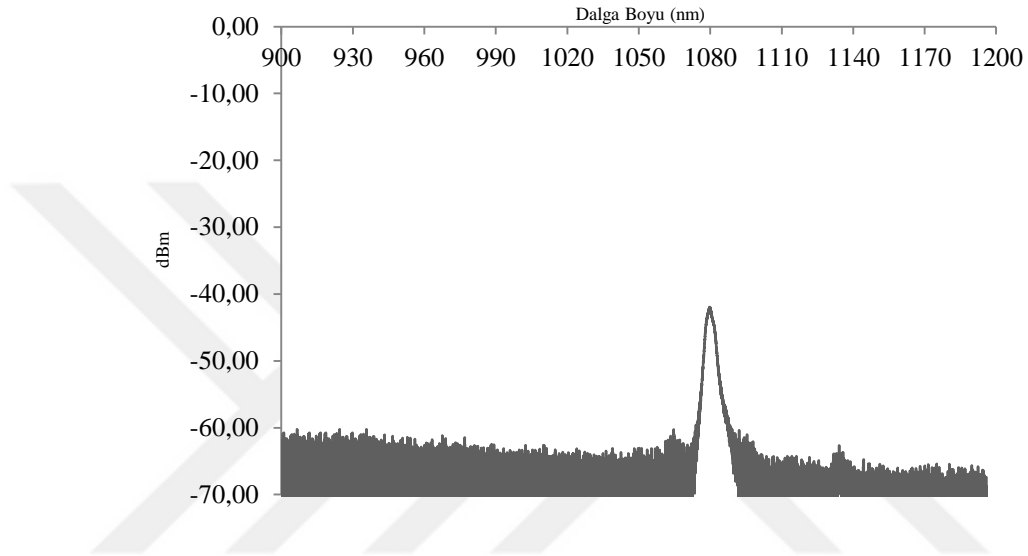
Bu tez kapsamında hibrit MOPA fiber lazer sistemi ve test düzeneği kurularak karakteristik özellikleri ölçülmüştür. Ayrıca sistemin uzun süreli çalışabilmesi ve istenen çıkış gücüne ulaşılabilmesi için kaynak noktaları ve aktif fiber sıcaklıkları termal kamera ile kontrol edilmiştir (Şekil 4.1-4.2). Aktif fiber sıcaklığı 3000W çıkış gücünde en fazla 66°C olarak ölçülmüş ve akrilik kaplı fiberler için güvenli olan çalışma sıcaklığı (<80°C) içinde kaldığı görülmüştür. Şekil 4.3 de çıkış merkez dalga boyu 1080nm ve FWHM<4nm sonucu gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Lazer güç ölçümü test görsel



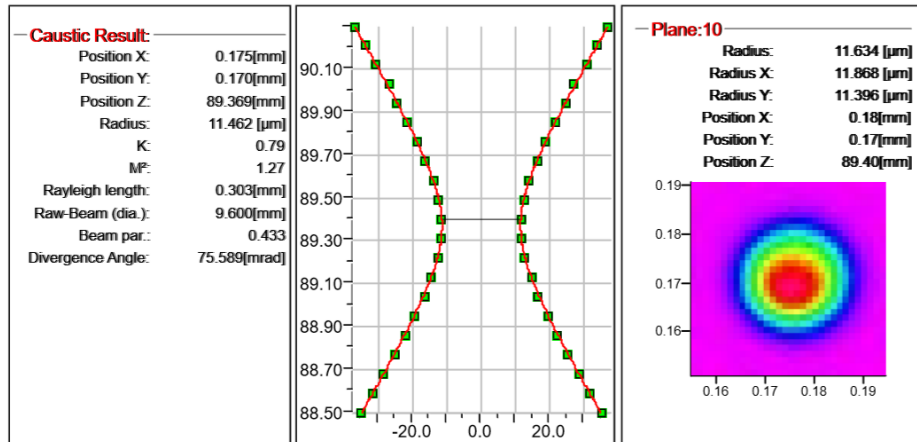
Şekil 4.2:., Aktif fiber sıcaklık ölçümü ve lazer güç ölçümü görüntüsü.



Şekil 4.3: Dalga boyu ölçüm grafiği.

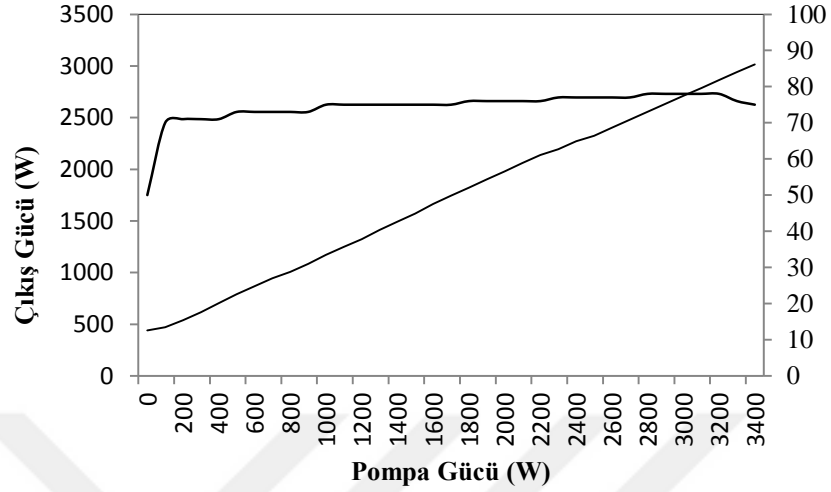
Lazer ışın kalitesi test sonucu Şekil 4.4 de verilmiştir ve  $M^2$  değeri 1.27 olarak ölçülmüştür.

Presentation: 2nd Moment



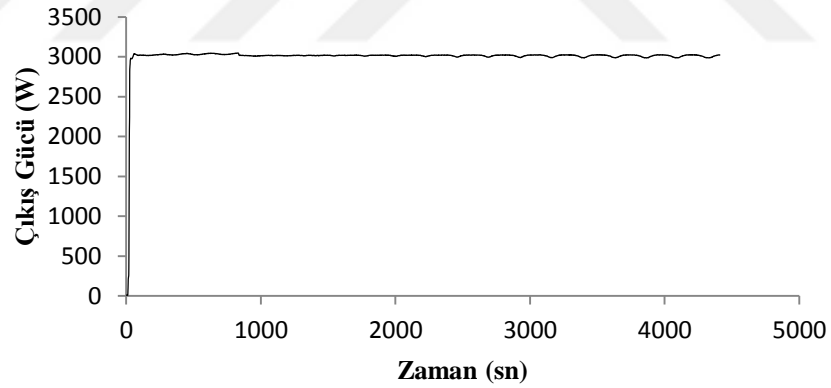
Şekil 4.4: Lazer ışın kalitesi sonucu.

Lazer sisteminin yükselteç bölgesinde kullanılan pompa lazerler (18x200W) 3600W pompa gücüne karşılık dönüştürülen çıkış gücü grafiği Şekil 4.5 de verilerek optik verimlilik (slope efficiency)  $>75\%$  olarak bulunmuştur.



Şekil 4.5: Lazer pompa gücü, çıkış gücü ve optik verimlilik.

Karakteristik ölçümler ve doğrulamalar sonrasında maksimum güçte 1 saatten fazla çalıştırılarak güç kararlılığının  $\pm 2\%$  olduğu görülmüştür (Şekil 4.6)



Şekil 4.6: Lazer güç kararlılığı.

## 4.2 Tartışma ve Öneriler

Bu tezin konusu olan 915nm pompalı yüksek güçlü iterbiyum katkılı 1080nm bir fiber lazerin kırınım sınırlı ışın kalitesine ( $M^2$  1.27) ve 3000W çıkış gücüne sahip kurulumu deneysel olarak gösterilmiştir. Elde edilen optik verimlilik ( $>75\%$ ) değeri yükseltici bölgesinde elde edilmiştir ve optikten optiğe dönüşüm olarak bilinen (915nm'den 1080nm'ye) aktif fiber üreticilerinin standart olarak sağladığı  $>70\%$  verimlilik değerlerinde elde edildiği görülmüştür. Bu durum ayrıca yükseltici

bölgesinde kullanılan aktif fiber uzunluğunun ideal seviyede olduğunu göstermektedir. Ayrıca sistemdeki fiber bileşenlerin ve kaynak noktalarının kalitesi teknolojik üretim kalitesi arttıkça optik verimliliğinde artacağı bilinmektedir. 1 saatlik çalışmada sistemde zaman ile değişen termal ve lineer olmayan etkilerin oluşmadığı ve istenmeyen güç salınımlarının gözlenmemiş çıkış gücünün  $\pm\%2$  ile kararlı bir çalışma yapısına sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda lazer güç kararlılığı grafiğinde (Şekil 4.6) görülen periyodik salınımların lazer güç ölçer cihazının soğutucu su döngüsü ile ve lazer sistem soğutucusunun (chiller) soğutma döngüsü ile bağıntılı olduğu belirlenmiştir. Lazer ışın kalitesini tanımlayan  $M^2$  değeri 1.27 olarak ölçülmüş ve kırınım sınırlı olduğu gösterilmiştir. Kurulan sistemin çıkış gücü pompa gücü ile sınırlıdır ve yükseltici bölgesinde kullanılan combiner giriş bacak sayısı, pompa diyod lazerlerin güç değerleri ve aktif fiber katkı oranları artırılarak daha yüksek güçte kırınım sınırlı ışın çıkışına sahip 915nm pompalı fiber lazer sistemlerinin kurulabileceği ön görülmektedir.

## 5. KAYNAKLAR

- [1] **Zervas, M. N., & Codemard, C. A.** (2014). High Power Fiber Lasers: A Review. *IEEE journal of selected topics in Quantum Electronics*, VOL. 20, NO. 5, 219-241.
- [2] **Richardson, D. J., Nilsson, J., & Clarkson, W. A.** (2010). High power fiber lasers: current status and future perspectives. *JOSA B*, 27(11),B63-B92.
- [3] **Ye, Y., Wang, X., Shi, C., Zhang, H., Xi, X., Zhou, P., & Xu, X.** (2019). Research progress in high power ytterbium doped fiber laser oscillator. *Laser & Optoelectronics Progress*, 55(12), 120006.
- [4] **Galvanauskas, A.** (2004). High power fiber lasers. *Optics and photonics news*, 15(7), 42-47.
- [5] **Hecht, J.** (2018). High-power fiber lasers. *Optics and Photonics News*, 29(10), 30-37.
- [6] **Quintino, L., Costa, A., Miranda, R., Yapp, D., Kumar, V., & Kong, C. J.** (2007). Welding with high power fiber lasers—A preliminary study. *Materials & Design*, 28(4), 1231-1237.
- [7] **Einstein, A.** (2016). 7 On the Quantum Theory of Radiation. *The Old Quantum Theory: The Commonwealth and International Library: Selected Readings in Physics*, 167.
- [8] **Straumann, N.** (2017). Einstein in 1916:" On the Quantum Theory of Radiation". *arXiv preprint arXiv:1703.08176*.
- [9] **Lukishova, S. G.** (2010). Valentin A. Fabrikant: negative absorption, his 1951 patent application for amplification of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible, infrared and radio spectral regions) and his experiments. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 5.
- [10] **Townes, C. H.** (2002). How the laser happened: Adventures of a scientist. Oxford University Press.
- [11] **Gordon, J. P., Zeiger, H. J., & Townes, C. H.** (1955). The maser—new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer. *Physical review*, 99(4), 1264.
- [12] **Hecht, J.** (2010). A short history of laser development. *Applied optics*, 49(25), F99-F122.
- [13] **Hitz, C. B., Ewing, J. J., & Hecht, J.** (2012). *Introduction to laser technology*. John Wiley & Sons.

- [14] **Renk, K. F.** (2012). *Basics of laser physics*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- [15] **Corney, A.** (1978). *Atomic and laser spectroscopy*. Oxford: Clarendon Press.
- [16] **Stenholm, S.** (2012). *Foundations of laser spectroscopy*. Courier Corporation.
- [17] **Svelto, O., & Hanna, D. C.** (1998). *Principles of lasers (Vol. 4)*. New York: Plenum press.
- [18] **Injeyan, H., & Goodno, G. D.** (2011). *High power laser handbook*. McGraw-Hill Education.
- [19] **Koechner, W.** (2013). *Solid-state laser engineering (Vol. 1)*. Springer.
- [20] **Endo, M., & Walter, R. F. (Eds.)**. (2018). *Gas lasers*. CRC Press.
- [21] **Webb, C. E., & Jones, J. D. (Eds.)**. (2004). *Handbook of Laser Technology and Applications: Laser design and laser systems (Vol. 2)*. CRC Press.
- [22] **Agrawal, G. P., & Dutta, N. K.** (2013). *Semiconductor lasers*. Springer Science & Business Media.
- [23] **Stiles, E.** (2009, October). New developments in IPG fiber laser technology. In *Proceedings of the 5th International Workshop on Fiber Lasers (Vol. 2)*.
- [24] **Shiner, B.** (2013, June). The impact of fiber laser technology on the world wide material processing market. In *CLEO: Applications and Technology* (pp. AF2J-1). Optica Publishing Group.
- [25] **Shima, K., Ikoma, S., Uchiyama, K., Takubo, Y., Kashiwagi, M., & Tanaka, D.** (2018, February). 5-kW single stage all-fiber Yb-doped single-mode fiber laser for materials processing. In *Fiber Lasers XV: Technology and Systems (Vol. 10512, pp. 45-50)*. SPIE.
- [26] **Yang, B., Shi, C., Zhang, H., Ye, Q., Pi, H., Tao, R., ... & Liu, Z.** (2018). Monolithic fiber laser oscillator with record high power. *Laser Physics Letters*, 15(7), 075106.
- [27] **Ye, Y., Xi, X., Shi, C., Zhang, H., Yang, B., Wang, X., ... & Xu, X.** (2019). Experimental study of 5-kW high-stability monolithic fiber laser oscillator with or without external feedback. *IEEE photonics Journal*, 11(4), 1-8.
- [28] **Krämer, R. G., Möller, F., Matzdorf, C., Goebel, T. A., Strecker, M., Heck, M., ... & Nolte, S.** (2020). Extremely robust femtosecond written fiber Bragg gratings for an ytterbium-doped fiber oscillator with 5 kW output power. *Optics letters*, 45(6), 1447-1450.
- [29] **Wang, Y., Kitahara, R., Kiyoyama, W., Shirakura, Y., Kurihara, T., Nakanish, Y., ... & Shima, K.** (2020, February). 8-kW single-stage all-fiber Yb-doped fiber laser with a BPP of 0.50 mm-mrad. In *Fiber Lasers XVII: Technology and Systems (Vol. 11260, pp. 273-278)*. SPIE.

- [30] **Zeng, L., Yang, H., Xi, X., Ye, Y., Huang, L., Yang, B., ... & Xu, X.** (2023). Optimization and demonstration of 6 kW oscillating-amplifying integrated fiber laser employing spindle-shaped fiber to suppress SRS and TMI. *Optics & Laser Technology*, 159, 108903.
- [31] **Çetin, A., & Ocak, H. Y.** (2017). Optik fiber dalga kılavuzlarının yapı parametrelerinin incelenmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(3), 70-76.
- [32] **Hanna, D. C., Percival, R. M., Perry, I. R., Smart, R. G., Suni, P. J., Townsend, J. E., & Tropper, A. C.** (1988). Continuous-wave oscillation of a monomode ytterbium-doped fibre laser. *Electronics Letters*, 24(17), 1111-1113.
- [33] **Durairaj, V.** (2013). *Amplification in Ytterbium-doped fibers* (Master's thesis).
- [34] **Paschotta, R., Nilsson, J., Tropper, A. C., & Hanna, D. C.** (1997). Ytterbium-doped fiber amplifiers. *IEEE Journal of quantum electronics*, 33(7), 1049-1056.
- [35] **Newell, T. C., Peterson, P., Gavrielides, A., & Sharma, M. P.** (2007). Temperature effects on the emission properties of Yb-doped optical fibers. *Optics communications*, 273(1), 256-259.
- [36] **Snitzer, E., Po, H., Hakimi, F., Tumminelli, R., & McCollum, B. C.** (1988, January). Double clad, offset core Nd fiber laser. In *Optical fiber sensors* (p. PD5). Optical Society of America.
- [37] **Muendel, M. H.** (1996, June). Optimal inner cladding shapes for double-clad fiber lasers. In *Summaries of papers presented at the Conference on Lasers and Electro-Optics* (p. 209). IEEE.
- [38] **Url-1** <<https://www.aerodiode.com/fiber-coupled-laser-diode-basics/>>, erişim tarihi 22.10.2022
- [39] **Zucker, E., Zou, D., Zavala, L., Yu, H., Yalamanchili, P., Xu, L., ... & Sako, H.** (2014, March). Advancements in laser diode chip and packaging technologies for application in kW-class fiber laser pumping. In *High-Power Diode Laser Technology and Applications XII* (Vol. 8965, pp. 38-51). SPIE.
- [40] **Stachowiak, D.** (2018, October). High-power passive fiber components for all-fiber lasers and amplifiers application—Design and fabrication. In *Photonics* (Vol. 5, No. 4, p. 38). MDPI.
- [41] **Lei, C., Li, Z., Zhang, H., Chen, Z., & Hou, J.** (2020). Taper-fused side pump combiner for all-fiber lasers and amplifiers: A review. *Optics & Laser Technology*, 130, 106353.
- [42] **Chen, X., Yao, T., Huang, L., An, Y., Wu, H., Pan, Z., & Zhou, P.** (2022). Functional Fibers and Functional Fiber-Based Components for High-Power Lasers. *Advanced Fiber Materials*, 1-48.
- [43] **Yan, P., Sun, J., Huang, Y., Li, D., Wang, X., Xiao, Q., & Gong, M.** (2017). Kilowatt-level cladding light stripper for high-power fiber laser. *Applied Optics*, 56(7), 1935-1939.

- [44] **Yin, L., Yan, M., Han, Z., Wang, H., Shen, H., & Zhu, R.** (2017). High power cladding light stripper using segmented corrosion method: theoretical and experimental studies. *Optics express*, 25(8), 8760-8776.
- [45] **Yıldırım, E. Y., Karatutlu, A., Balk, E. T., Midilli, Y., & Ortaç, B.** (2019). Combined method for the fabrication of high-power cladding light stripper using a buffered oxide etchant. *Applied Optics*, 58(25), 6926-6933.
- [46] **Xin-Yu, Z., Guo-Zheng, W., & Wang, Y.** (2015, July). Production and splicing technology of large diameter fiber end cap. In *2015 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)* (pp. 135-137). IEEE.
- [47] **Boehme, S., Beckert, E., Eberhardt, R., & Tünnemann, A.** (2009, February). Laser splicing of end caps: process requirements in high power laser applications. In *Laser-based Micro-and Nanopackaging and Assembly III* (Vol. 7202, pp. 43-53). SPIE.
- [48] **Steinke, M., Theeg, T., Wysmolek, M., Ottenhues, C., Pulzer, T., Neumann, J., & Kracht, D.** (2018, July). CO<sub>2</sub> laser radiation as a versatile tool for the fabrication of fiber-based components. In *Specialty Optical Fibers* (pp. SoW3H-5). Optical Society of America.
- [49] **Eidam, T., Wirth, C., Jauregui, C., Stutzki, F., Jansen, F., Otto, H. J., ... & Tünnemann, A.** (2011). Experimental observations of the threshold-like onset of mode instabilities in high power fiber amplifiers. *Optics express*, 19(14), 13218-13224.
- [50] **Smith, A. V., & Smith, J. J.** (2011). Mode instability in high power fiber amplifiers. *Optics express*, 19(11), 10180-10192.
- [51] **Tao, R., Wang, X., & Zhou, P.** (2018). Comprehensive theoretical study of mode instability in high-power fiber lasers by employing a universal model and its implications. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 24(3), 1-19.
- [52] **Li, R., Wu, H., Xiao, H., Leng, J., & Zhou, P.** (2022). More than 5 kW counter tandem pumped fiber amplifier with near single-mode beam quality. *Optics & Laser Technology*, 153, 108204.
- [53] **Ma, X., Zhu, C., Hu, I. N., Kaplan, A., & Galvanauskas, A.** (2014). Single-mode chirally-coupled-core fibers with larger than 50 $\mu$ m diameter cores. *Optics express*, 22(8), 9206-9219.
- [54] **Stutzki, F., Jansen, F., Otto, H. J., Jauregui, C., Limpert, J., & Tünnemann, A.** (2014). Designing advanced very-large-mode-area fibers for power scaling of fiber-laser systems. *Optica*, 1(4), 233-242.

- [55] **Wu, H., Li, R., Xiao, H., Huang, L., Yang, H., Pan, Z., ... & Zhou, P.** (2021). High-power tandem-pumped fiber amplifier with beam quality maintenance enabled by the confined-doped fiber. *Optics Express*, 29(20), 31337-31347.



## ÖZGEÇMİŞ

TARANMIŞ  
VESİKALIK  
FOTOĞRAF

**Ad-Soyad** : Gökhan TUNA

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik
- **Yüksek Lisans** : 2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Fizik

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2016-2020 Fiber Lazer Sistem Mühendisi, Ermaksan  
.....
- 2020- Lazer Sistem Mühendisliği Müdürü, Ermaksan  
.....

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- .....
- .....
- .....

### DİĞER ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- .....
- .....