



İTERBİYUM KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ
FİBER LAZER ÜRETİMİ

Tuğba ÖZTAŞ

Yüksek Lisans Tezi

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK

2016



**T.C.
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İTERBİYUM KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ
FİBER LAZER ÜRETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba ÖZTAŞ

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

**BURSA
Temmuz 2016**

YÜKSEK LİSANS TEZİ ONAY FORMU

“TUĞBA ÖZTAŞ” tarafından “Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK” yönetiminde hazırlanan “İTERBİYUM KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER ÜRETİMİ” başlıklı tez, kapsamı ve niteliği açısından incelenmiş ve **Yüksek Lisans tezi** olarak kabul edilmiştir

Sınav Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK

Bursa Teknik Üniversitesi / Metalurji ve Malzeme Mühendisliği



Doç. Dr. Ece ÜNÜR YILMAZ

Bursa Teknik Üniversitesi / Enerji Sistemleri Mühendisliği



Doç. Dr. Ali KARA

Uludağ Üniversitesi / Kimya Bölümü



Tez Savunma Tarihi 21/07/2016

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Unvanı, Adı Soyadı

Tarihi/../.....İMZA.....

İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu Kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrenci Adı – Soyadı: Tuğba ÖZTAŞ

İmza:

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam boyunca bilgisiyle, azmiyle ve anlayiőıyla ufkumu açan ve danıőman olmanın çok ötesinde destekçim olan hocam Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK' a bana verdiği emek için sonsuz teşekkür ederim. Tezin laboratuvar çalışmaları aőamasında yardımcı olan ve ihtiyaç duyduğum her türlü imkânı sağlayan tüm mesai arkadaőlarıma müteőekkirim. Hayatımın her anını benim için daha kolay yapan, yüksek lisans sürecim boyunca beni cesaretlendiren geniş aileme teşekkür ediyorum. Ankara'dan Bursa'ya taşınan öğrenim hayatıma ve hatta bütün hayatıma kattığı anlam için Bedirhan BİLGİN 'e teşekkür ederim. Son olarak öğrenim hayatımın ne zaman biteceği konusundaki meraklarımı azimle her daim canlı tutan tanıdıklarına, hala net bir yanıt veremesem de onlara da teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

sayfa no

Dış Kapak	
İç Kapak	
Yüksek Lisans Tezi Onay Formu	
İntihal Beyanı	
Teşekkür	
İçindekiler	v
Şekil Listesi	vii
Çizelge Listesi	ix
Kısaltma Listesi	x
Sembol Listesi	xi
Özet	xii
Abstract	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Lazer Kavramının Temelleri ve Kısa Tarihçesi	1
1.2. Fiber Lazerler	4
2. TEORİK İNCELEME	6
2.1. Fiber Yapısı Ve Teorik Altyapısı	6
2.2. Aktif Fiber	10
2.2.1. Çift katmanlı (double clad) aktif fiber	14
2.2.2. Yb katkılı çift katmanlı fiberlerde inversiyon	16
2.2.3 Güç artışı	18
2.2.4. Temel limitasyonlar	18
2.3. Pompalama Diyotu	20
2.4. Fiber Birleştirici (Combiner)	23
2.5. Fiber Bragg Izgara (FBG)	25
3. FİBER HAZIRLAMA SÜREÇLERİ	28
3.1. Fiber Soyma İşlemi (Stripping)	28
3.1.1. Mekanik ve termomekanik yollarla fiber soyma	28
3.1.2. Kimyasal yollarla fiber soyma	29

3.1.3. Buharlaştırma yolu ile soyma	29
3.2. Fiber Kesme (Cleaving)	29
3.3. Fiberlerin Eritilerek Birleştirilmesi (Fusion Splicing)	30
3.4. Fiberlerin Tekrar Polimer Kaplanması (Recoating)	31
4. DENEYSEL ÇALIşMALAR	33
4.1. Simülasyon	33
4.2. Deney Düzenegi ve Sistem Kurulumu	38
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ	43
KAYNAKLAR	48
ÖZGEÇMİş	50



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa no</u>	
Şekil 1.1	Enerjinin absorplanması ve emisyonu	1
Şekil 1.2	Uyarılmış emisyon	2
Şekil 1.3	Dünyanın ilk lazeri ve bileşenleri (Campbell, 1998)	3
Şekil 2.1	Fiber Basit Yapısı	6
Şekil 2.2	Basamak indisli Fiberlerde Kırılma İndisinin Açısall Pozisyona Göre Değişimi	8
Şekil 2.3	Derece İndisli Fiberlerde Kırılma İndisinin Açısall Pozisyona Göre Değişimi	8
Şekil 2.4	Tek Modlu Fiberlerde Mod Genliğinin Açısall Pozisyona Göre Değişimi	9
Şekil 2.5	Çok Modlu Fiberlerde Mod Genliğinin Açısall Pozisyona Göre Değişimi	9
Şekil 2.6	(a) 3 aşamalı ışımaya şemasının, (b) 4 aşamalı ışımaya şemasının enerji diyagramları	11
Şekil 2.7	Yb ³⁺ İyonunun (a) ² F _{7/2} temel ve ² F _{5/2} uyarılmış enerji düzeylerinin diyagramı ve alt seviyeler arasındaki olası geçişler. (b) absorpsiyon ve emisyon kesit alanı	13
Şekil 2.8	Çift katmanlı fiber kesiti ve kırılma indisi dağılımı	14
Şekil 2.9	Sırası ile dikdörtgen, D şeklinde ve altıgen iç kabuğa sahip fiberler	15
Şekil 2.10	(a) dolaylı bant aralığına, (b) doğrudan bant aralığına sahip yarı iletkenlerin E-k grafiği	20
Şekil 2.11	Lazer diyot basit yapısı	21
Şekil 2.12	Yüksek güçlü fiber akuple lazer diyot modülü	21
Şekil 2.13	Lazer diyot modülün sistematiği	22
Şekil 2.14	Lazer diyot modülün iç yapısı	22
Şekil 2.15	Fiber birleştirici basit yapısı	23
Şekil 2.16	Fiber birleştirici içyapısı [10]	24
Şekil 2.17	Fiber bragg yansıtıcıların çalışma mekanizması	26
Şekil 2.18	Fiber bragg ızgara üretimi	26
Şekil 3.1	(a) Fiber Birleştirme öncesi hizalanmış fiber uçları; (b) Fiber uçlarının ısıtılarak şekillendirilmesi (c) Fiber birleştirme işlemi sonrası [16]	31
Şekil 4.1	Seçilen aktif fiberin mod profili	34
Şekil 4.2	976 nm pomplama ışığı kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi	35
Şekil 4.3	915 nm pomplama ışığı kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi	35
Şekil 4.4	%10 yansıtma oranına sahip fbg kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi	36
Şekil 4.5	%5 yansıtma oranına sahip fbg kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi	37
Şekil 4.6	%4 yansıtma oranına sahip fbg kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi	37
Şekil 4.7	Tasarlanan yüksek güçlü fiber lazer sisteminin şematik gösterimi	38
Şekil 4.8	Termomekanik fiber soyma yöntemi ile soyulmuş fiber örneklerinin optik mikroskop görüntüleri	39
Şekil 4.9	Başarısız bir kesim işleminin sırasıyla optik mikroskop ve interferometre görüntüleri	40
Şekil 4.10	Başarısız bir kesim işleminin sırasıyla optik mikroskop ve interferometre	

	görüntüleri	40
Şekil 4.11	İyi belirlenmemiş parametrelerle gerçekleştirilmiş birleştirme işlemi	41
Şekil 4.12	Uygun parametrelerle gerçekleştirilmiş birleştirme işlemi	42
Şekil 5.1	Pompalama diyotlarının elektrik güce karşılık optik güç grafiği	43
Şekil 5.2	Toplam pompalama gücüne karşı optik çıkış gücü	44
Şekil 5.3	Geliştirilen fiber lazer sisteminin optik çıkış gücü	45
Şekil 5.4	Geliştirilen fiber lazer sisteminin optik spektrum analizi	45



ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1.	Giriş ve çıkış fiberlerinin çap ve NA değerlerine göre geliştirilebilecek fiber birleştirici çeşitleri [27]	24
Çizelge 2.2.	Farklı çaplarda ve farklı NA değerlerine sahip fiberler ile geliştirilebilecek fiber birleştirici tipleri ve bunların iletim oranları [27]	25



KISALTIMA LİSTESİ

E	Enerji
FBG	Fiber Bragg Izgara
IR	Infrared
SBS	Uyarılmış Brillouin Saçılması
SRS	Uyarılmış Raman Saçılması
UV	Ultraviöle
Vis	Görünür Bölge
YDFL	İterbiyum Katkılı Fiber Lazer



SEMBOL LİSTESİ

μm	Mikrometre
dB	Desibel
Er	Erbiyum
h	Plank Sabitini
He	Helyum
HNO_3	Nitrik Asit
kW	Kilowatt
λ	Lazer Işığının Dalga Boyu
M^2	Işın Kalitesi Birimi
mW	Miliwatt
NA	Numerik Açıklık
Nd	Neodyum
Ne	Neon
nm	Nanometre
Θ	Lazer Işığının Saçılma Yarıçapı
Tm	Tulyum
W	Watt
w_0	Işın Odak Noktasındaki Yarıçapı
Yb	İterbiyum
ν	Frekans

ÖZET

İTERBİYUM KATKILI YÜKSEK GÜÇLÜ FİBER LAZER ÜRETİMİ

Tuğba ÖZTAŞ

Bursa Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İleri Teknolojiler Anabilim Dalı

Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK

2016, 51

İterbiyum katkılı fiber lazerler sahip oldukları; yüksek ışın kalitesi, düşük üretim/bakım maliyeti, çevre şartlarından (sıcaklık, nem, pertürbasyon, vb.) minimum etkilenme gibi özellikler sayesinde bilimden endüstriye, savunma sanayiinden sağlık sektörüne kadar pek çok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bilimsel araştırmalar ve medikal uygulamalar için düşük güçlü lazerler (mW) yeterli olsa da metal işleme gibi endüstriyel alanlar ve savunma sanayisi için kW mertebesinde optik güce ihtiyaç duyulmaktadır. Bu durum fiber lazerlerle elde edilebilecek güç baremlerinin her geçen gün biraz daha artırılması talebini doğurmuştur.

Bu tezin konusu 1070 nm dalga boyunda ve sürekli modda ışımaya yapan, 1 kW çıkış gücüne sahip tamamen fiber tümleşik bir İterbiyum fiber lazer sisteminin geliştirilmesidir. Bu fiber lazerin üretimi sırasında 915 nm dalga boyunda ışımaya yapan 40 W çıkış gücüne sahip 36 adet pompalama diyotu çift taraflı pompalama yaklaşımı ile kullanılmıştır. Aktif ortam olarak İterbiyum katkılı 20/400 µm aktif fiber kullanılmıştır. Çalışma sonucunda sisteme gönderilen toplam pompalama gücü 1440 W ve geliştirilen fiber lazerin çıkış gücü 1010 W olarak ölçülmüş ve sistemin optik verimi $\geq 70\%$ olarak kaydedilmiştir. Geliştirilen yüksek güçlü fiber lazer 1070 nm dalga boyunda ışımaya yapmaktadır. Sistemin çıkış gücü, pompalama ışığını sisteme iletmek için kullanılan fiber birleştiricinin (combiner) taşıyabileceği güç ile sınırlıdır. Daha yüksek güçleri taşıyabilen fiber birleştiriciler geliştirildiğinde, aynı yaklaşım

kullanılarak (herhangi bir termal ya da optik problem gözlenmeksizin) çok daha yüksek güçlere ulaşabileceğine inanılmaktadır.

Anahtar sözcükler: Fiber, fiber hazırlama süreçleri, fiber lazer, İterbiyum katkılı fiber lazer, yüksek güçlü lazer sistemleri



ABSTRACT

PRODUCTION OF HIGH POWER YTTERBIUM DOPED FIBER LASER

Tuğba ÖZTAŞ

Bursa Technical University

Graduate School of Natural and Applied Science

Advanced Technologies Program

Master of Science Thesis

Yrd. Doç. Dr. Ebru Devrim ŞAM PARMAK

2016, 51

Fiber laser has a wide application range, such as medical applications, industry, defense and scientific purposes, thanks to their good beam quality, low production and maintenance cost. Furthermore, fiber lasers are not affected by environmental conditions like temperature, humidity, perturbation and so on. Although lower power levels (mW) are enough for medical and scientific purposes, defense and industrial applications require kW range optical power. This situation has led to increasing demand increasing the power scale that can be achieved with fiber lasers day by day.

The aim of this study is to produce an all-fiber, continuous wave, 1 kW Ytterbium doped fiber laser. 36 pieces pump diodes, which have 915nm wavelength and 40 W output power, were used during the production process. Ytterbium doped 20/400µm active fiber was used as active medium. The total pump power and output power of the fiber laser was measured as 1440 W and 1010 W, respectively. The slope efficiency of the system is about %70 and the wavelength is 1070 nm. The output power of the system is limited by the handling capacity of the pump combiner. It is believed that when higher power level combiners will be available, the higher power fiber lasers can be produced without neither thermal nor optical problems.

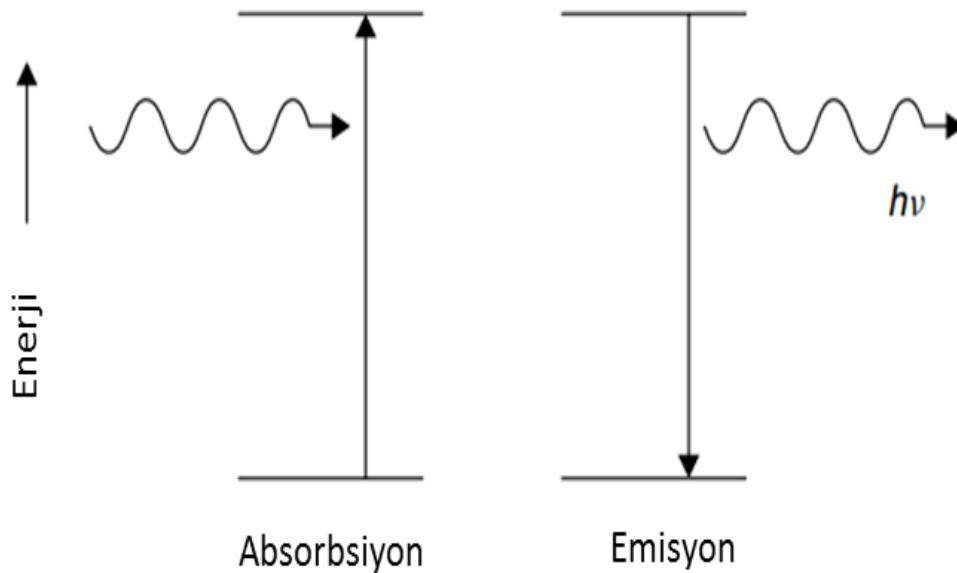
Keywords: High power laser systems, fiber, fiber laser, fiber preparing process, ytterbium doped fiber laser

1. GİRİŞ

1.1.Lazer Kavramının Temelleri ve Kısa Tarihçesi

Lazer bilimi/teknolojisi mevcut pek çok teknolojiye göre yeni olmasına rağmen, konu üzerinde oldukça fazla yol kat edilmiş ve bu teknoloji bilimden, savunmaya, endüstriden, medikal uygulamalara kadar pek çok konuda günlük hayatımıza dâhil olmuştur. Lazer kelimesi günümüzde her ne kadar lazer özelliği göstererek ışına yapan cihazları ifade etse de “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kavramından gelmektedir ve dilimize çevrilecek olursa uyarılmış ışımının yayımı ile ışığın güçlendirilmesi anlamını taşımaktadır.

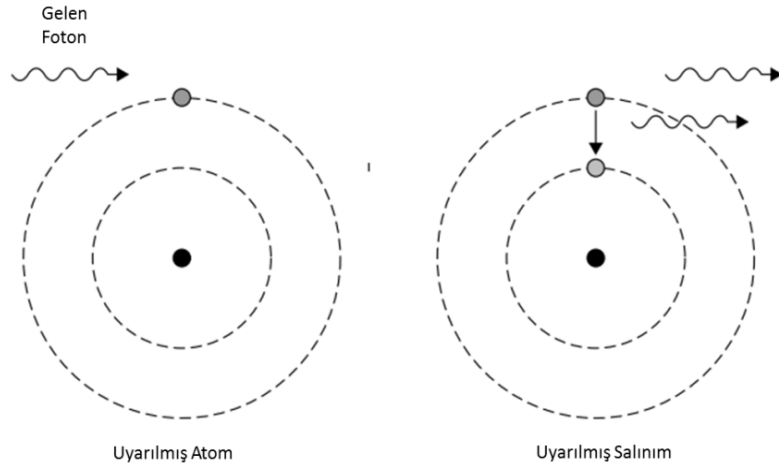
Lazer kavramının temelleri 1917 yılında Einstein tarafından ortaya atılan “Uyarılmış emisyon (Stimulated Emission)” teorisine dayanmaktadır. Bu kavramı açıklayabilmek için öncelikle absorpsiyon ve emisyon kavramlarını ele almak gerekir. Bir atoma dışarıdan bir enerji verildiğinde atom içerisindeki elektron (lar) bu enerji ile uyarılır ve bir üst enerji düzeyine geçer bu duruma absorpsiyon denir. Ancak elektronlar doğası gereği sonsuza kadar uyarılmış halde kalamazlar ve uyarılmış enerji düzeyinden temel enerji düzeyine geçerken 2 enerji seviyesi arasındaki enerji farkına eşit enerjili bir foton yayımlar (lar) bu olaya ise Emisyon adı verilir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Enerjinin absorplanması ve emisyonu

$$E = h\nu \quad (1.1)$$

Yukarıdaki denklem emisyon sonrası elde edilen fotonun enerjisini ifade etmektedir. Burada E enerjiyi, h Plank sabitini ve ν frekansı temsil etmektedir. Uyarılmış elektronların belirli bir süre sonra, temel enerji seviyelerine kendiliğinden dönmesi kavramı kendiliğinden emisyon (Spontaneous Emission) olarak adlandırılır ve burada meydana gelen fotonların uyumlu olması gibi bir durum söz konusu değildir. Ancak lazer kavramının temeli uyumlu (coherent) ışık kavramına dayanmaktadır ve uyumlu ışığın elde edilmesini sağlayan mekanizma Einstein'ın uyarılmış emisyon mekanizmasıdır. Bu mekanizma şu şekilde çalışır; uyarılmış halde bulunan bir elektron, bir foton yardımıyla tekrar uyarılırsa elektron temel enerji düzeyine dönerken kendisini uyarmak için kullanılan fotona eş bir foton yayımlar.



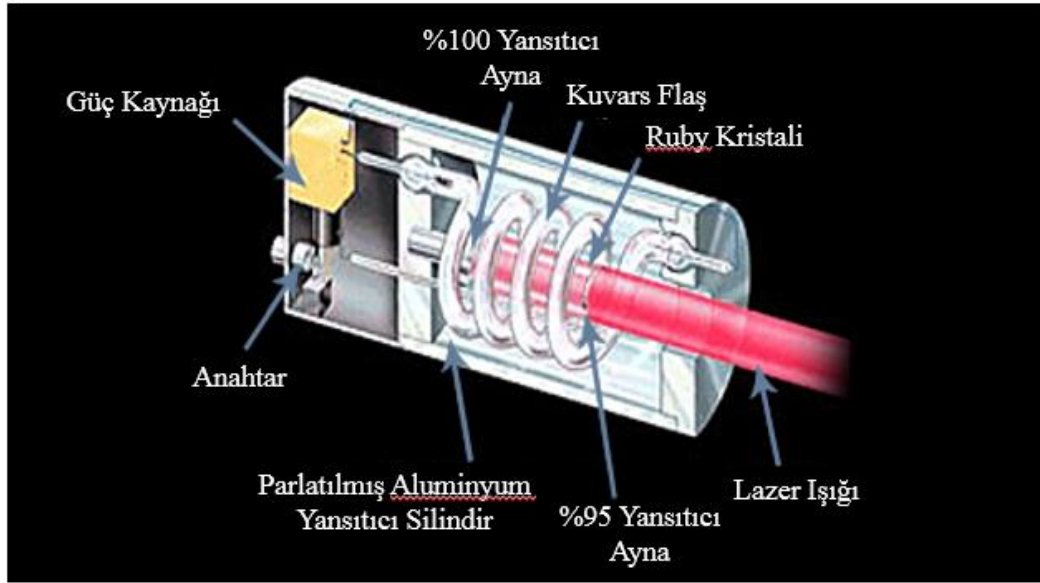
Şekil 1.2 Uyarılmış emisyon

Şekil 1.2' de, Einstein'ın uyarılmış emisyon teorisini yani uyumlu ışık elde edebilmenin yolu gösterilmiştir. Burada bahsi geçen uyumlu ışık, ışığın sahip olduğu elektrik alan değerleri farklı yerlerde ve farklı zamanlarda ölçüldüğünde elde edilen değerlerin sabit bir faz ilişkisine sahip olmasıdır.

Bu bilgiler ışığında yapılan çalışmalar sonucu, 1958 yılında Charles Towns ve Arthur Schawlow görünür bölgede lazer üretmenin mümkün olduğunu teorik olarak gösteren bir makale yayımladılar.

1960 yılına gelindiğinde ise Einstein 'ın teorik temellerini attığı lazer kavramı reel hayata geçirildi ve dünyanın ilk lazeri olan, Ruby lazer Theodore Maiman

tarafından üretildi. [9]



Şekil 1.3 Dünyanın ilk lazeri ve bileşenleri [9]

Şekil 1.3'te tüm bileşenleri ve detayları verilen bu lazerde aktif ortam olarak rubby kristali, bu kristaldeki iyonları uyarmak için kullanılacak olan kristalin etrafında sarmal olarak bulunan kuvars flaş tüp, %100 ve %95 yansıtma oranlarına sahip yansıtıcı ayna çifti güç kaynağı ve açma kapama butonundan oluşuyordu.

1961 yılında Ali Javan ve arkadaşları He-Ne gaz lazerini icat ettiler. Geliştirdikleri lazer 2 aşamalı uyarılma sisteminden oluşuyordu. He-Ne gaz karışımını içeren tüpe elektrik akımı uygulanıyor bu durum He atomlarını uyarıyor, uyarılmış He atomları ise Ne atomlarının uyarılmasını sağlıyordu. Her ne kadar daha sonraki çalışmalarda aynı sistemi kullanarak farklı dalga boylarının elde edilebileceği gösterilmiş olsa da geliştirilen ilk gaz lazer 1,15 μ m dalga boyunda ve sürekli salınım yapmaktadır. [6]

1961 yılında ayrıca Snizter, Nd katkılı bir fibere fiber boyunca bütün sınırlardan pompalama ışığı gönderme işlemi ile (side pumping) ilk fiber lazer sistemini geliştirdi. [13] Ancak pompalama ışığını aktif iyonların bulunduğu çekirdek kısmına odaklamanın zorluğundan dolayı sistemin verimi oldukça düşük kaldı.

1962 yılında Robert N. Hall ve arkadaşları GaAs kullanılarak ilk yarı iletken lazeri üretti.[5]

1964 yılında ise Kumar Patel, optik spektrumun uzak kızılötesi (far Infrared 9 - 11 μm) bölgesinde ışımaya yapan ve günümüzde en çok kullanılan lazer tiplerinden biri olan CO₂ lazeri geliştirdi.[11]

1988 yılına gelindiğinde ise iterbiyum katkılı fiber lazer (YDFL) Hanna ve arkadaşları tarafından geliştirildi.

Lazerleri;

- ❖ Çalıştıkları dalga boyuna göre ultraviyole (UV), görünür bölge (Vis.) ve Infrared (IR)
- ❖ Çalışma modlarına göre sürekli ve darbeli
- ❖ Güç baremlerine göre yüksek güçlü ve düşük güçlü
- ❖ Işımanın gerçekleştiği aktif ortamın türüne göre katı hal, gaz, yarı iletken, fiber vb.
- ❖ Ürettikleri ışının kalitesine göre tek modlu (single mode), az modlu (few mode) veya çok modlu (multimode) olarak

Sınıflandırmak mümkündür. Literatürde bahsi geçen yaklaşık 10.000 çeşit lazer türü vardır ancak bunların pek çoğu sadece deneysel bir çalışma olarak kalmıştır.

Bu tezde çalışılan yüksek güçlü (kW) fiber lazer sistemleri ise; üzerinde hem teorik hem de deneysel çalışmaların hızla devam ettiği, gerek bilimde gerek endüstride kullanım alanı her geçen gün artan sistemlerdir.

1.2.Fiber Lazerler

1854 yılında İngiliz fizikçi John Tantal yaptığı bir deneyde, ışığın hortum ucundan akan suyun kıvrımlı kısmı içine hapsediğini ve kıvrım boyunca hareket ettiğini yani fiber optik teknolojisinin temeli olan toplam iç yansıma (total internal reflection) kavramını keşfetti. Ancak bu keşfin teoriden pratiğe geçmesi 50 yıldan fazla sürdü. Bu teoriye dayanan ilk çalışma 1930'lerde yapıldı. Işık, dış kısmı kaplanmamış bir plastik tüpe hapsedildi ve medikal alanında gözlem yapmak için kullanıldı. [1]

Fiberler 1970'li yıllara kadar ~1000 dB/km gibi bir performansla çalışıyordu. Bundan dolayı, sadece medikal uygulamalar için kullanılabilirler. Ancak 1970'li yıllarda bu kayıp değerleri 20 dB/km (1550 nm için) değerlerine kadar çekildi bu

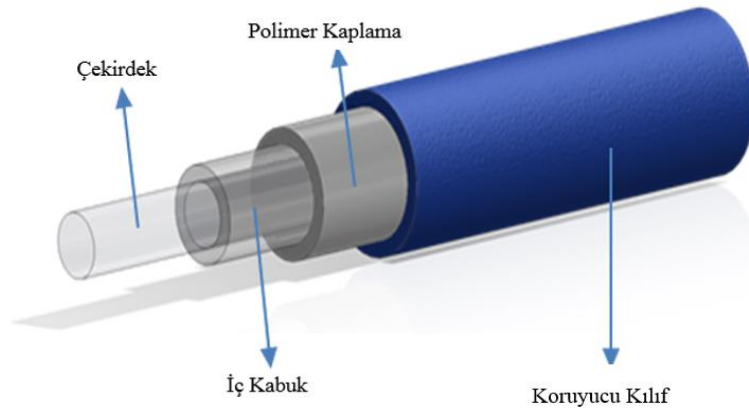
durum ise fiberlerin iletişim sektöründe kullanılmasının yolunu açtı. Günümüzde kullanılan fiberler ise buhar biriktirme (vapour – phase deposition) yöntemi sayesinde oldukça yüksek saflıkta elde edilebilen camdan yapılmaktadır. Bu sayede fiberlerdeki kayıp oranları $\leq 0,1$ dB/km mertebelerine kadar çekilmiştir. Günümüzde kullanılan modern iletişim teknolojisi bu fiber altyapısına dayanmaktadır.

İletişim, medikal gibi alanlar için ihtiyaç duyulan güç baremleri mW mertebesinde olsa da pek çok uygulama alanı bundan fazlasına ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaca cevap verebilmek için yüksek güçte fiber lazer üretilmesine dair ilk çalışma 1990'lı yıllarda yapılmış ve sonuçta 4W gibi bir değere ulaşılmıştır. O zamandan bu yana ise farklı fiber tipleri, farklı yoğunlukta iyon katkılama, farklı pompalama teknikleri, gibi yollar denenerek en yüksek güçte ve en kaliteli lazerin elde edilmesi konusundaki çalışmalar devam etmektedir. Bu çalışmalar sayesinde 10 kW mertebesinde sürekli salınım yapan fiber lazerler erişilebilir hale getirilmiştir. Ancak güç ve kalite artırma konusundaki talepler artarak devam etmektedir.

2. TEORİK İNCELEME

2.1.Fiber Yapısı ve Teorik Altyapısı

Basit bir fiber yapısı çekirdek (core), iç kabuk (cladding) ve polimer kaplama (coating) olmak üzere 3 katmandan oluşur. Fiberi mekanik olarak korumak için ise isteğe bağlı olarak koruyucu kılıf (loose buffer tube) eklenebilir. Fiber bulunduğu ilk yıllarda sadece çekirdek bölgesinden oluşacak şekilde tasarlanmış ve kullanımı denenmiştir ancak elde edilen sonuçta çok fazla güç kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun üzerine, ışığın çekirdek içerisinde herhangi bir kayba uğramadan hareket edebileceği ve çekirdeği tamamen saracak şekilde tasarlanmış ve yine çekirdek gibi silikadan yapılmış bir polimer kaplama fiber tasarımına eklenmiştir. Fakat ışığın çekirdek içerisinde herhangi bir kayba uğramadan hareket edebilmesi için, çekirdek kırılma indisinin iç kabuk kırılma indisine oranla daha fazla olması gerekmektedir. Bu isteği sağlayabilmek için kullanılan en yaygın yöntem, silikadan yapılan çekirdeğin içerisine katkı olarak, optik dağılımı oldukça düşük olan, silikadan 18 elektron daha fazla elektrona sahip ve kırılma indisi 4,06 olan ‘Germanyum’ elementini ilave etmektir. Böylelikle kırılma indisi 1,4585 olan silikanın kırılma indisi çekirdek bölgesinde yükseltilmiş olur. Ya da fiberin iç kabuk bölgesine kırılma indisi silikadan daha düşük olan fosfor ya da bor gibi elementler katkılanarak iç kabuğun kırılma indisinin çekirdeğe göre daha düşük olması sağlanır ve böylelikle toplam iç yansıma için şart olan kırılma indisi farkı yaratılmış olur.



Şekil 2.1 Fiber basit yapısı

Temel bir fiber yapısının dış katmanında koruyucu tabaka olarak görev yapan

ceket; bir veya birçok fiberi dış etkenlerden korumak, mekanik yalıtım sağlamak ve dâhil olduğu fiberi tanımlamak için kullanılır. Fiberlerin en dış katmanında bulunan koruyucu kılıflar kullanılacakları alan ve çevreye göre üzerinde bazı kimyasalları barındıran jel ile de çevrelenebilir. Bunun yanı sıra, bu kılıflar sağlamlığı artırmak ve fiberin fiziksel yapısını kemirgenlerden ve diğer dış tehditlerden korumak amacı ile floropolimer sınıfından poliviniliden florür (Kynar) veya Teflon içerebilirler.

Fiber optiklerin çalışma mekanizmasının toplam iç yansımaya prensibine dayandığı bölüm 1.2’de belirtilmişti. Toplam iç yansımaya kavramı, Snell yasasının bir sonucudur (eşitlik 1.2).

$$n_1 \sin\theta_1 = n_2 \sin\theta_2 \quad (1.2)$$

Burada n_1 ana ortamın kırılma indisi, θ_1 ışığın gelme açısı, n_2 ikinci ortamın kırılma indisi, θ_2 ise kırılarak geçen (refraction) ışığın yansımaya açısıdır. Ancak eğer ışığın gelme açısı kritik açıdan büyük ise, ışık 2. ortama geçemez ve geldiği açıya eş bir açı ile tekrar aynı ortama yansır. Bu duruma toplam iç yansımaya adı verilir. Bu durum, ışığın fibere kılavuzlanabilmesi için belirli bir açı aralığında gönderilmesi gerektiğini, aksi takdirde kılavuzlama işleminin yapılamayacağını ortaya çıkarmaktadır. Fiberin bu karakteristik özelliğini ifade eden kavram ise Nümerik Açıklık (Numerical Aperture) kavramıdır, NA ile gösterilir ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$NA = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_{\text{çekirdek}}^2 - n_{\text{iç kabuk}}^2} \quad (1.3)$$

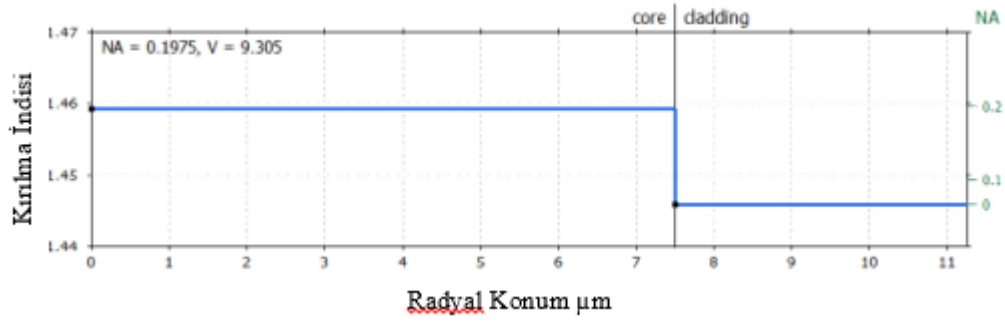
Bu denklemde n_0 fiberin etrafındaki ortamın kırılma indisidir ve hava için 1 kabul edilir.

Şu ana kadarki açıklamalar dikkate alındığında fiberin karakteristiğini belirleyen neredeyse bütün parametrelerin, ortamın kırılma indisine ve kırılma indisi farklarına dayandığı görülmektedir -ki bu durum fiberin sahip olduğu kırılma indisini oldukça önemli bir hale getirir.

Çok modlu fiberler kırılma indisi dağılımlarına göre

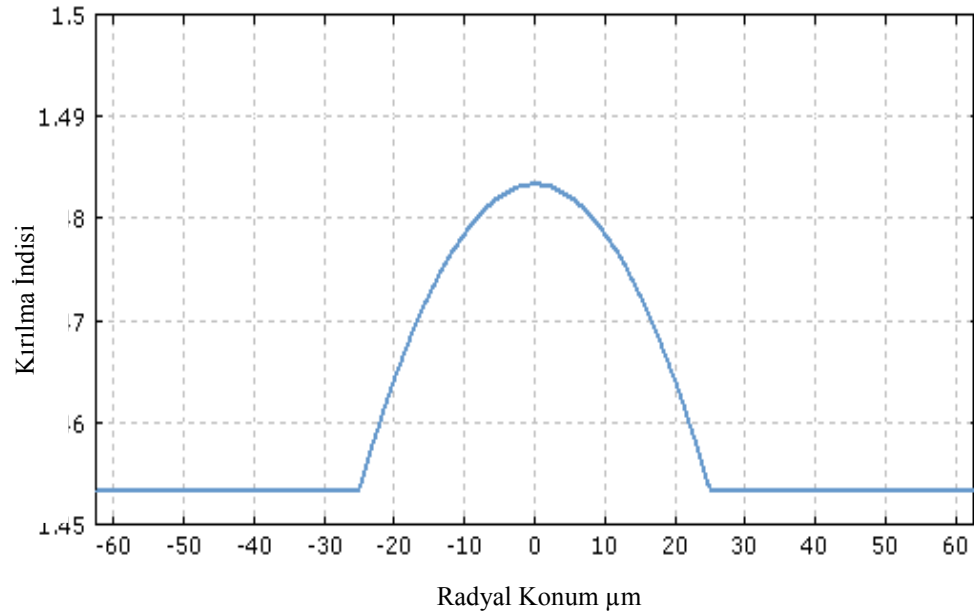
1. Basamak indisli çok modlu fiber (Step index multimode fiber)
2. Derece indisli çok modlu fiber (Graded index multimode fiber)

Olmak üzere 2 farklı gruba ayrılır.



Şekil 2.2 Basamak indisli fiberlerde kırılma indisinin radyal pozisyona göre değişimi

Basamak indisli fiberlerde, kırılma indisi çekirdek çapı boyunca değişmezken çekirdek –iç kabuk sınırında keskin bir değişime uğrar ve iç kabuk boyunca yine sabit kalır. Burada çekirdeğin kırılma indisi iç kabuğun kırılma indisinden yüksektir.



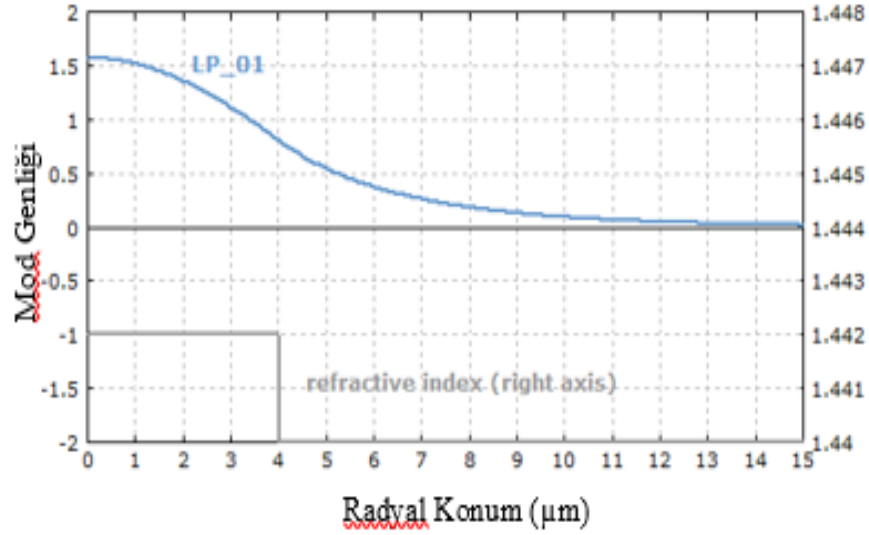
Şekil 2.3 Derece indisli fiberlerde kırılma indisinin radyal konuma göre değişimi

Derece indisli fiberlerde ise kırılma indisi çekirdek içerisinde yarıçapa bağlı olarak değişir. Kırılma indisi çekirdek merkezinde maksimum değerdedir ve iç kabuk sınırına yaklaştıkça parabolik olarak azalır.

Fiberler için bir diğer önemli parametre ise normalize dalga frekansı diğer bir adıyla “V number” (V numarası)’dır. V numarası basamak indisli fiberlerde, fiber içerisine kılavuzlanabilen mod sayısını belirlemek için kullanılır.

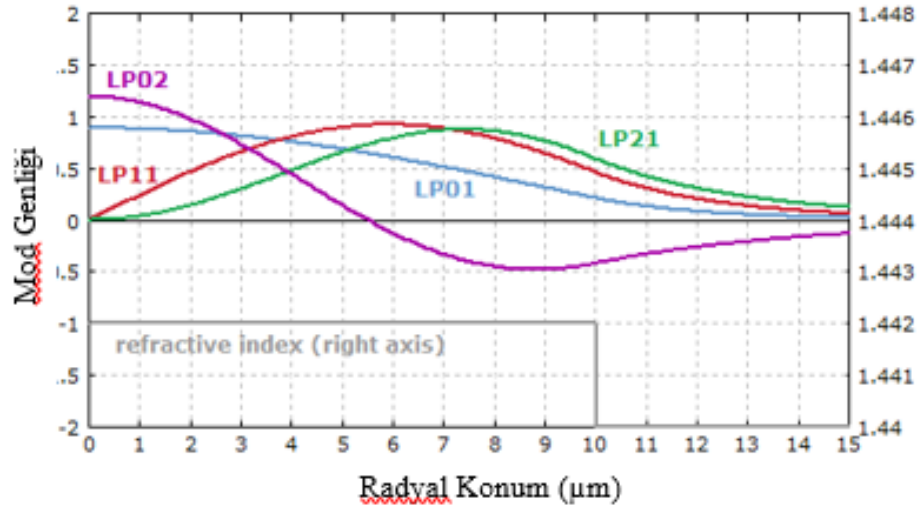
$$V = \frac{2\pi}{\lambda} a NA = \frac{2\pi}{\lambda} a \sqrt{n_{\text{çekirdek}}^2 - n_{\text{iç kabuk}}^2} \quad (1.4)$$

Burada fiberin sahip olduğu çekirdek çapını, λ ise çalışılan dalga boyunu temsil etmektedir. Eğer V numarası 2,405 ten küçük ise fiber sadece tek bir modun ilerlemesine izin verir. Bu tip fiberler tek modlu fiber olarak tanımlanır.



Şekil 2.4 Tek modlu fiberlerde mod genliğinin radyal konuma göre değişimi

V numarası 2,405 ten büyük olduğunda ise fiber birden çok modun ilerlemesini destekler hale gelir.



Şekil 2.5 Çok modlu fiberlerde mod genliğinin radyal konuma göre değişimi

Lazerin çok modlu ya da tek modlu olması geliştirilen lazerin kalitesini belirleyen faktörlerden biridir ve lazerin performansını doğrudan etkiler. Işın kalitesi kavramı,

lazer fiziğinde belli koşullar altında bir ışığın odaklanabilme potansiyeli olarak tanımlanmıştır. Işın kalitesi M^2 parametresiyle simgelenmiş olup, kırınımla sınırlı (diffraction-limited) olan TEM₀₀ modu yani ideal bir gauss fonksiyoneline uyan ışın (gaussian beam) için 1 olarak kabul edilir ve farklı lazer tipleri için hesaplanan bu değer büyüdükçe ışın kalitesinin azaldığı anlamı çıkarılır. Işın kalitesi (M^2), ışına ait olan asıl ıraksama (divergence) ile ideal olarak kabul edilen TEM₀₀ mode'una ait teorik ıraksamanın oranıdır.

Belirtilen TEM₀₀moduna ait ıraksama;

$$\theta_{teorik} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (1.6)$$

İken, ışının asıl ıraksaması,

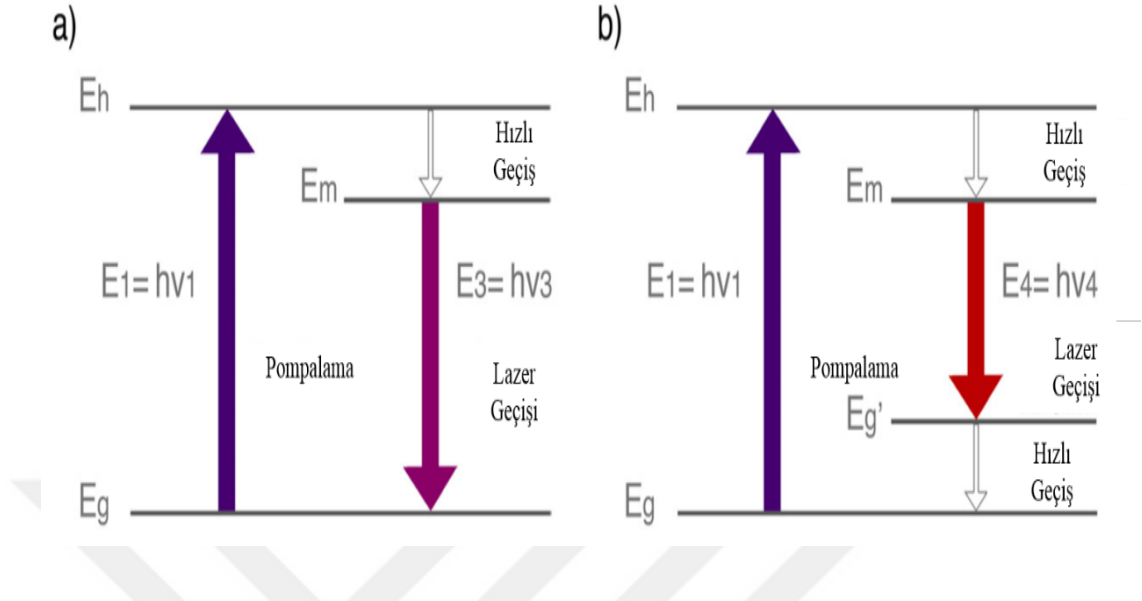
$$\theta_{asıl} = M^2 \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (1.7)$$

Olarak ifade edilir. Burada θ lazer ışığının saçılma yarıçapını, λ lazer ışığının dalga boyunu ve w_0 ise ışığın odak noktasındaki yarıçapını temsil etmektedir. Yani bir lazerin kalitesi lazerin odaklanabilirliği ile doğrudan ilintilidir. Kısacası yüksek ışın kalitesi, daha iyi odaklanabilen bir lazer ışığı ve bunun doğal sonucu olarak ta odak noktasında daha yüksek güç anlamına gelmektedir. Bu durum metal işleme gibi yüksek odak gücü gerektiren uygulamalarda fiber lazerlerin CO₂ lazerlere ya da diyot lazerlere göre neden bu kadar avantajlı olduğunu açıklamaktadır.

2.2.Aktif Fiber

Bölüm 1'de detaylı olarak anlatıldığı üzere fiber lazerler aktif ortam olarak çekirdek kısmı nadir bulunan (rare-earth) elementler ile katkılanmış ve "Aktif Fiber" olarak tanımlanan fiberlere dayanır. Fiber çekirdeğine katkılanan elementler, periyodik tablonun atom numarası 57 ila 71 arasında değişen lantanit sınıfından 15 kimyasal elementten oluşmaktadır. Bu elementlerden en çok ilgi çekenleri İterbiyum (Yb), Erbiyum (Er), Neodyum (Nd) ve Tulyum (Tm) elementlerinin +3 iyonlarıdır. Bu lazer aktif iyonlar pompalama diyotlarından sisteme iletilen ışığı absorplar ve sonrasında "uyarılmış emisyon" yaparak istenilen spesifik bir dalga boyunda lazer elde edilebilmesini sağlar. Lazerin ışınma süreci aktif ortam olarak seçilen iyona ve pompalama için tercih edilen dalga boyuna bağlı olarak farklı şemalarda gerçekleşse

de genel olarak 3 aşamalı sistemler ve 4 aşamalı sistemler olarak sınıflandırmak mümkündür [22].



Şekil 2.6. (a) 3 aşamalı ışıma şemasının, (b) 4 aşamalı ışıma şemasının enerji diyagramları

Üç aşamalı sistemlerde, lazer geçişi temel halde sona erer ve pompalanmamış aktif ortam lazer geçişi sürecinde yüksek oranda tekrar absorplama özelliği sergiler. Bu sebeple net kazanç ancak toplam aktif iyonların yarısından fazlası uyarıldığında elde edilmeye başlanır. Bu durum üç aşamalı sistemlerde pompalama eşiğinin yüksek olmasının sebebidir. Dünyanın ilk lazer olan ve Maiman tarafından geliştirilen Ruby lazer 3 aşamalı sistemlerin en net örneğidir.

Lazer geçişinin temel halin hemen üstünde sonlandığı dört aşamalı lazer sistemlerinde ise daha düşük pompalama eşiği elde etmek mümkündür. Bu sistemlerde. Bu sistemlerden elde edilen optik güç, genellikle absorplanan pompalama gücü ile doğru orantılıdır.

Aktif iyonlar tarafından absorplanan pompalama dalga boyu ve ışıma yapılan dalga boyu kullanılan aktif iyon ve bu iyonun katkılı olduğu malzemeye bağlıdır. Neodyum, fiber lazerde kullanılan ilk elementtir. [13] Ayrıca dünyanın ilk tek modlu fiber lazeri yine Neodyum katkılı aktif fiber kullanılarak elde edilmiştir günümüzde hala en yaygın kullanılan lazer aktif elementlerden biridir. Neodyum katkılı aktif fiberler 0,8 ve 0,9 μm dalga boyu ile pompalandıklarında 0,9, 1,06 ve 1,35 μm dalga boyunda ışıma yaparlar. Ancak verimi en yüksek olan geçiş 0,8 μm ile pompalama

sonucu, 1,06 μm ışığa yapıldığında elde edilir –ki bu yapı tamamen 4 aşamalı bir ışığa yapısıdır. Ancak Neodyum katkılı fiberlerin enerji verimleri oldukça düşüktür bu da yüksek güç uygulamalarında kullanılamamalarının başlıca nedenidir.

Erbiyum - katkılı fiberler, telekomünikasyon sektöründe kullanılan 1,55 μm dalga boyunda ışığa yapmaları sebebiyle en önemli aktif fiberlerden biridir. Bu dalga boyunu bu kadar önemli kılan şey ise silikanın bu dalga boyunda sergilediği minimum kayıpla iletim özelliğidir. İlk Erbiyum katkılı fiber lazer denemeleri yapılırken, daha yüksek dalga boyları erişilebilir olmadığından, pompalama kaynağı olarak görünür bölgede ışığa yapan (541 nm) pompalama diyotları kullanılmıştır. [17]. Bununla birlikte, zamanla erişilebilir hale gelen 980 ve 1480 nm dalga boylarında ışığa yapan diyot lazerler daha yüksek verimde enerji geçişine ve daha düşük gürültüye sahip Er^{+3} katkılı fiber lazerin eldesini mümkün kılmıştır.[18]. Erbiyum fiber lazerler verimleri düşük olduğu için yüksek güç uygulamalarında kullanılamazlar. Sahip oldukları düşük verimin ise temelde 3 sebebi vardır:

1. Er^{+3} iyonu 980 nm ile pompalandığında, pompalama ve ışığa dalga boyları yani enerjileri arasındaki fark yüksektir ve bu durum enerji verimini düşürür.
2. Er^{+3} iyonunun 980 ve 1480 nm’de sahip olduğu absorplama bandı oldukça düşüktür.
3. Er^{+3} iyonlarının sergiledikleri yüksek etkileşim, fibere katkılanabilecek iyon miktarını kısıtlamaktadır.

Bu durumların üstesinden gelebilmek için bulunan çözümlerden biri Er^{+3} katkılı fiberlere ekstra bir katkı maddesi olarak Yb^{+3} eklenmesi olmuştur. [19]

İterbiyum katkılı fiber lazerler ise sahip oldukları basit enerji bant yapısı ve yüksek pompalama – ışığa verimi sebebiyle yüksek güçlü fiber lazer uygulamalarında en çok kullanılan aktif fiber türüdür.

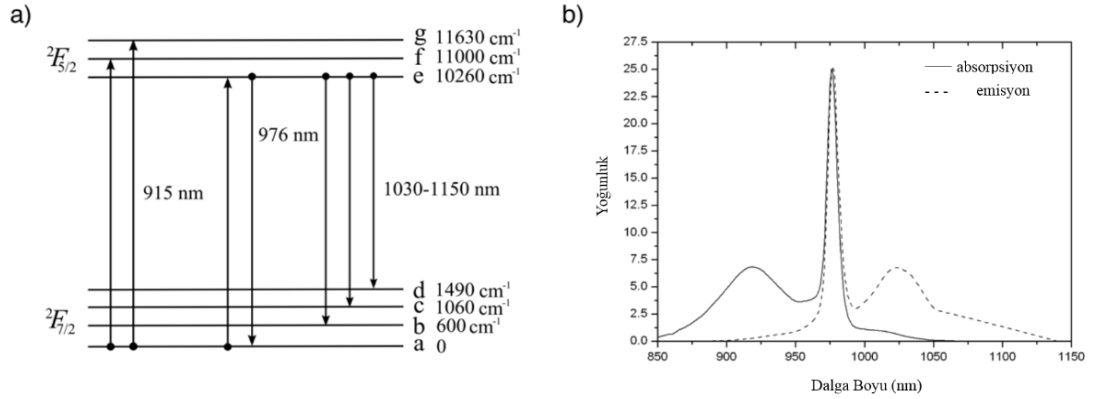
İterbiyum atom numarası 70 olan ve periyodik tablonun nadir bulunan elementler grubunda yer alan bir elementtir ve elektron yapısı $[\text{Xe}] 4f^{14} 6s^2$ şeklindedir. İterbiyum atomu kimyasal reaksiyonlarda elektro-pozitif özellik sergiler ve oksitlenme düzeyi genellikle +3 veya +2’dir. Yb^{+3} iyonun elektron yapısı $[\text{Xe}] 4f^{13}$ şeklindedir,

yani 4f kabuğu 1 tane elektron eksikliği dışında tamamen doludur – ki bu durum Yb^{+3} iyonun basit bant yapısının temelidir. Yb^{+3} iyonunun ${}^2F_{5/2}$ ve ${}^2F_{7/2}$ (Şekil 2.7. -a) olmak üzere sadece 2 enerji düzeyi vardır. Uyarılmış enerji bandı (${}^2F_{5/2}$) 3, temel enerji bandı (${}^2F_{7/2}$) 4 adet Stark seviyesine yarılr. 2 enerji düzeyi arasındaki geçişler, alt seviyelerin kombinasyonu halinde gerçekleşir.

Şekil 2.7 – b de verilen absorpsiyon ve uyarılmış emisyon grafiğindeki kesit alanları, absorpsiyon ve uyarılmış emisyonun gerçekleşme olasılığına aittir. Ve absorplanan ve salınan ışığın gücü aşağıdaki denklemlerle ifade edilir.

$$P_{a,e} = \sigma_{a,e} I \quad (1.8.)$$

Burada σ_{ae} sırası ile absorpsiyon kesit alanına, I ise gelen ışığın yoğunluğuna karşılık gelmektedir ve birimleri sırası ile m^2 ve W/m^2 'dir. Şekil 2.7-b de görüldüğü gibi en güçlü absorpsiyon ve emisyon piki 975 nm' dedir ve bu geçiş 2.7.-a da verilen a ve e enerji düzeylerine karşılık gelmektedir.



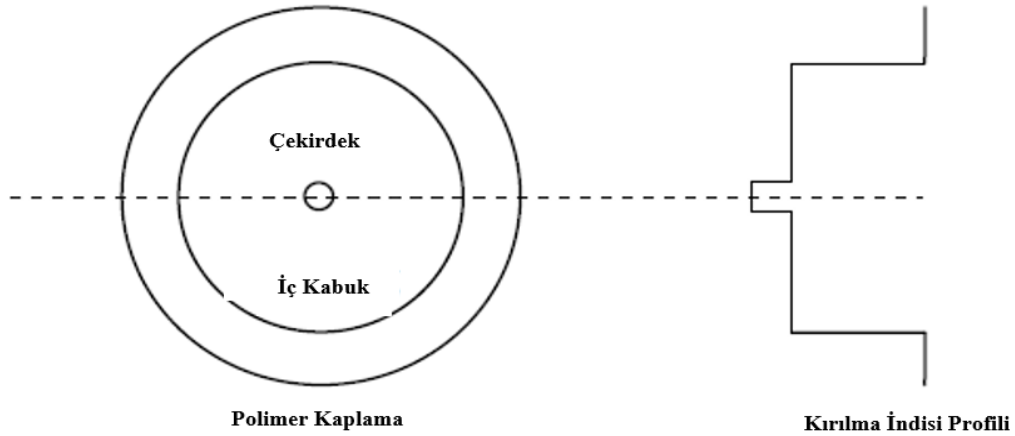
Şekil 2.7 Yb^{+3} İyonunun (a) ${}^2F_{7/2}$ temel ve ${}^2F_{5/2}$ uyarılmış enerji düzeylerinin diyagramı ve alt seviyeler arasındaki olası geçişler. (b) absorpsiyon ve emisyon kesit alanı

Çift katmanlı Yb^{+3} katkılı fiberlerin 975 nm de sahip oldukları yüksek absorplama oranı nedeniyle bu dalga boyu çoğunlukla tercih sebebidir ancak 915 nm deki geniş absorblama bant aralığı 915 nm dalga boyuna sahip pompalama diyotlarını da tercih sebebi haline getirmektedir ve bu geçiş olasılığı en yüksek geçiştir. Pompalama dalga boyu olarak 915 nm, 975 nm ya da 1030-1150 nm aralığı seçilebilir olsa da değişmeyen tek şey elde edilecek lazer ışığının dalga boyunun pompalama dalga boyundan yüksek olacağı gerçeğidir. Ayrıca absorpsiyon ve emisyon kesit

alanları aktif iyonların katkılındığı ortama bağlıdır ve aynı iyon farklı ana ortama katkılındığında bu kesit alanlarının %30'a kadar değişebildiği gözlemlenmiştir [20]

2.2.1. Çift katmanlı (Double Clad) aktif fiber

Fiber lazerleri pompalamak için katı hal lazerlerin kullanıldığı bilinmektedir. Son yıllarda tekli yayıcıdan (single emitter) elde edilen optik güç 50 W mertebesinde iken çoklu yayıcı (multi emitter) barlar 500 W mertebesinde çıkış gücü sağlayabilmektedir. Ancak burada değinilmesi gereken konu bu kadar yüksek bir pompalama gücünü tek modlu bir fiberin çekirdeğine odaklayabilmek imkânsızdır. Bu sebeple bu diyotların çıkışı, çıkış güçlerine göre 105 µm ila 600 µm arasındaki fiberlere gönderilmektedir. Buradan çıkan sonuca göre, katı hal lazerlerde fiber akuple çıkış gücünü artırabilmek için, fiber çekirdek çapını da artırmak gerekir ancak çekirdek çapının artması, beraberinde parlaklığın azalması sonucunu da getirir. Bütün bunları özetlemek gerekirse fiber akuple katı hal lazerlerde güç arttıkça, parlaklık (ışın kalitesi) azalmaktadır.

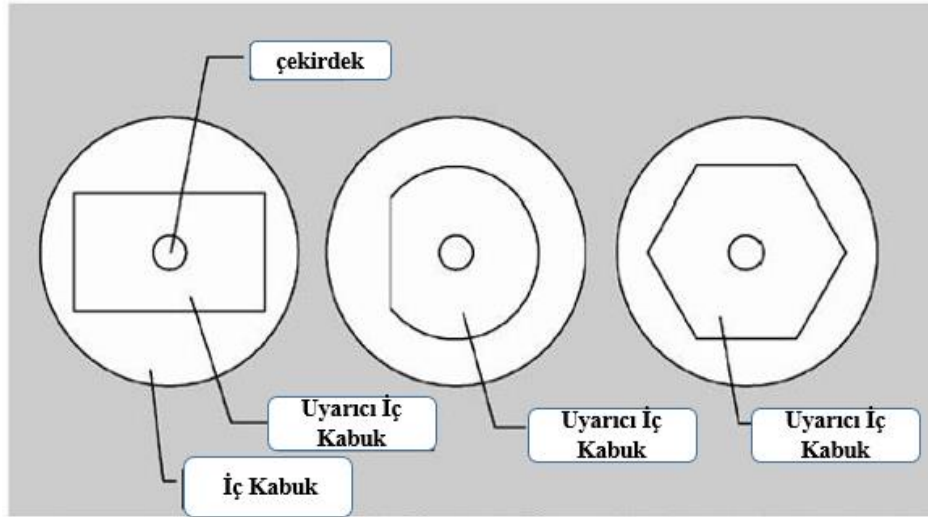


Şekil 2.8 Çift katmanlı fiber kesiti ve kırılma indisi dağılımı

Peki bir “parlaklık dönüştürücümüz” olsaydı ne olurdu? İşte bu ihtiyaca cevap olarak bulunan teknoloji çift katmanlı (double-clad) aktif fiber teknolojisidir. Çift katmanlı aktif fiberler kendilerine, fiber akuple lazer diyotlar ya da fiber birleştiriciler sayesinde gönderilen düşük parlaklığa sahip lazer ışığını, yüksek parlaklığa sahip lazer ışığına dönüştürür. [19] Her ne kadar fiberlere çift katmanlı fiberler dense de gerçekte 2 adet iç kabuk yoktur. Yani fiber yapısı içerik bakımından değişmemiştir.

Burada NA değeri çekirdek – iç kabuk sınırındaki kırılma indisi farkına bağlı olduğundan çekirdeğin NA değeri, iç kabuğun NA değerinden çok daha küçüktür. Bu fiberlerde polimer kaplama olarak kırılma indisi iç kabuğun kırılma indisinden küçük olan polimerler kullanılır.

Çift katmanlı fiberlerin çalışma prensibi şu şekildedir; Pompalama ışığı çok modlu iç kabuk bölgesine kılavuzlanır ve pompalama ışığı iç kabukta ilerlerken, çekirdeğe katkılanmış lazer – aktif iyonlar tarafından absorplanır ve bunun sonucu elde edilen lazer ışığı ise çekirdekte ilerlemeye devam eder. Bu sayede yukarıda bahsedilen düşük parlaklığa sahip bir lazer ışığının, yüksek parlaklığa sahip bir lazer ışığına dönüşümü sağlanmış olur. Çift katmanlı fiberlerde dikkat edilmesi gereken bir diğer nokta ise fiber geometrisidir. Eğer iç kabuk kusursuz bir dairesel yapıya sahip ise, pompalama ışığının bir kısmı çekirdek bölgesi ile hiç etkileşmeden fiber boyunca ilerleyebilmektedir. Bu problemi çözebilmek için çift katmanlı fiberler genellikle asimetric ya da en azından dairesel olmayan bir yapıda üretilirler. Bu şekilde üretilen fiberlerin, absorpsiyon verimleri, dairesel yapıda iç kabuğa sahip fiberlere göre en az %30 daha fazladır. Aşağıdaki şekil farklı iç kabuk geometrisine sahip fiberlere örnekler göstermektedir.



Şekil 2.9 Sırası ile dikdörtgen, D şeklinde ve altıgen iç kabuğa sahip fiberler

Toplam pompalama gücünü artırmak için iç kabuk çapını arttırmamız gerektiği belirtilmiştir ancak çift katmanlı aktif fiberin absorplama katsayısı,

$$\left(\frac{\text{çekirdek yarıçapı}}{\text{iç kabuk yarıçapı}}\right)^2 \quad (1,9)$$

ifadesi ile orantılı olduğundan iç kabuk yarıçapının artması, absorplama katsayısının düşmesi anlamına gelmektedir. Bu durum daha uzun aktif fiber kullanımı gerektirir ancak daha uzun aktif fiber kullanımı lineer olmayan etkileri de beraberinde getirmektedir. Bundan dolayı fiber boyunda meydana gelecek artıştan kaynaklanacak olası problemlerden kaçmak için çekirdek çapını da büyötmek gerekir. Örneğin geri kalan her şey sabit tutulmak kaydı ile fiber çapının 2 kat artırılması, aynı güç baremini absorplamak için 4 kat daha kısa fiber kullanılması anlamına gelmektedir. Burada lineer olmayan (nonlinear) etki probleminden kaçılmış olur ancak bu çekirdek çapının artması da çok modlu lazere geçiş, yani ışın kalitesinin yavaş yavaş düşmesi anlamına gelmektedir. Bununla birlikte, çok modlu çift katmanlı fiberleri daha yüksek ışın kalitesi ile geliştirebilmek için bazı yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bunun için geliştirilen en kolay yöntem, temel modun (fundamental mode) fiber bükümünden en az etkilenen mod olması gerçeğine dayanır. Yani çift katmanlı fiberler uygun çaplarda ve tekrarlı bir şekilde büküldüğünde ışın kalitesinin bozulmasına sebep olan bazı istenmeyen modlar kontrollü bir şekilde fiber dışına atılabilecek böylelikle büyük çekirdek çapına rağmen yüksek kaliteli ışın elde edilmesi sağlanabilecektir. [21]

2.2.2. Yb katkılı çift katmanlı fiberlerde inversiyon

Inversiyon (Invertion) ve popölasyon inversiyonu (Population Invertion) terimleri, uyarılmış iyonların, toplam iyon yoğunluğu içerisindeki fraksiyonunu ifade etmek için kullanılan 2 terimdir. Yb katkılı fiberler 2 lazer seviyesi göz önünde bulundurularak analiz edilebilir. Seviye 1, iyonların normalize popölasyonlarının N_1 olarak belirlendiği temel seviye ve iyonların normalize popölasyonlarının N_2 olarak belirlendiği metastabil seviye.

N_2 ve N_1 seviyelerine karşılık gelen popölasyon oranı:

$$\frac{dN_2}{dt} = (R_{12} + W_{12})N_1 - (R_{21} + W_{21} + A_{21})N_2 \quad (2.1)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -(R_{12} + W_{12})N_1 + (R_{21} + W_{21} + A_{21})N_2 \quad (2.2)$$

Burada R pompalama geçiş oranı, W üretilen sinyalin geçiş oranı, A kendiliğinden emisyonun oran katsayısına karşılık gelmektedir. Durağan durumda popölasyonlar zamandan bağımsızdır. Örneğin: $\frac{dN_i}{dt} = 0$ ($i=1,2$) ve dahası bu formüller aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$N_2 = \frac{R_{12} + W_{12}}{R_{12} + W_{12} + R_{21} + W_{21} + A_{21}} \text{ ve} \quad (2.3)$$

$$N_1 = 1 - N_2 \quad (2.4)$$

Geçiş oranları;

$$R_{12,21} = \sigma_{a,e}(v_p) \frac{I_p}{h_p v_p} \quad (2.5)$$

$$W_{12,21} = \sigma_{a,e}(v_s) \frac{I_s}{h_p v_s} \quad (2.6)$$

$$A_{21} = \frac{1}{\tau_{21}} \quad (2.7)$$

Bu ifadelerde σ_a ve σ_e sırası ile aktif absorpsiyon ve emisyon kesit alanlarını, v_p ve v_s sırası ile pompalama ve sinyal frekanslarını, I_p ve I_s pompalama ve sinyal yoğunluklarını göstermektedir. h_p Plank sabitine ve τ_{21} uyarılmış haldeki ömre karşılık gelmektedir. Uyarılmış haldeki ömür, pompalama ve uyarılmış ışımaya yokluğunda üst seviyedeki elektron popülasyonunun $1/e$ kadar azaldığı zaman olarak tanımlanır.[22]

Çift katmanlı Yb^{+3} katkılı aktif fiberler için pompalama yoğunluğu I_p ; pompalama gücünün (W), iç kabuk alanına bölünmesi ile hesaplanır. [24] Kullanılan fiber boyu kısa tutulursa ($\leq 2\text{cm}$) bunun sonucu olarak kendiliğinden ışımaya ihmal edilebilir ($W_{12,21} = 0$) [23]. Bu şartlar altında normalize popülasyon dönüşümü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$N_2 = \frac{\sigma_a(v_p)}{\sigma_a(v_p) + \sigma_e(v_p)} \cdot \frac{1}{1 + \frac{I_{sat}}{I_p}} \quad (2.8)$$

$$I_{sat} = \frac{h_p(v_p)}{(\sigma_a(v_p) + \sigma_e(v_p)) \tau_{21}} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki denklemler göz önünde bulundurulursa sistemin inversiyonu pompalama gücü ile kontrol edilebilir. 915 nm' de yüksek güçlü bir pompalama yapıldığında inversiyon seviyesi %90'ın üzerindedir ancak aynı güçte 975 nm ile pompalama yapılırsa inversiyon seviyesinin %50 civarında olduğu görülmektedir. Bunun sebebi 975 nm' de Yb^{+3} iyonunun absorpsiyon ve emisyon seviyelerinin eşit olmasıdır.[20]

2.2.3. Güç Artışı

Geçtiğimiz 10 yıl içerisinde fiber tümleşik lazer sistemlerinden elde edilebilen güç konusunda ciddi gelişmeler yaşanmış ve elde edilebilen güç 10 kW mertebesinin üzerine çıkmıştır. Bu inanılmaz güç seviyelerine ulaşılabilmesini sağlayan şey ise mükemmel termo-optik özelliklere sahip çift katmanlı fiber optiklerin dizaynı ve üretilmesi ayrıca da yüksek güçte pompalamaya olanak sağlayan pompalama diyotlarının geliştirilmiş olmasıdır. [25] Yb katkılı aktif fiberler kendilerine gönderilen pompalama ışığının %80'inden fazlasını lazer ışığına çevirebilmektedir. Bu mükemmel verimin sebebi, pompalama ışığı ile elde edilen lazer arasındaki enerji farkının çok yüksek olmaması ile açıklanabilir. Örneğin, kuantum kusuru (quantum defect) aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$q = h_p v_p - h_p v_s = h_p v_p \left(1 - \frac{\lambda_p}{\lambda_s}\right) \quad (2.10)$$

Burada h_p , Planck sabitidir ve değeri $6,623 \cdot 10^{-34}$ dür. v_p ve v_s sırası ile pompalama ve sinyal frekanslarıdır. Kuantum kusuru genellikle absorplanan enerjinin, ısıya dönüşen kısmı olarak tanımlanır. Yb katkılı aktif fiberlerde kuantum kusuru % 10'un altındadır.

2.2.4. Temel limitasyonlar

Fiber lazer sistemlerinde güç baremlerinin artırılmasında 2 temel sınırlama vardır. Bu sınırlamalar, lineer olmayan etkiler ve ısı kontrolüdür. Lineer olmayan etkiler tamamen fiberin kendi yapısıyla ilgilidir. Fiberlerin küçük efektif mod alanına sahip olması: Uyarılmış Raman Saçılması (Stimulated Raman Scattering - SRS) ve Uyarılmış Brillouin Saçılması (Stimulated Brillouin Scattering-(SBS) gibi lineer olmayan etkileri artırır. SRS'in eşik gücü aşağıdaki denklem ile hesaplanır:

$$P_{th}^{SRS} = \frac{16 A_{eff}}{g_R L_{eff}} \quad (2.11)$$

Burada A_{eff} ilerleyen modun efektif mod alanını, g_R Raman pik katsayısını (silika da 1um dalga boyu için 10^{-13} m/W) ve L_{eff} lineer olmayan efektif uzunluğa karşılık gelmektedir. Benzer bir ifade SBS için de yazılabilir.

$$P_{th}^{SBS} = \frac{21 A_{eff}}{g_B L_{eff}} \quad (2.12)$$

Bu ifade de g_B dalga boyundan bağımsız bir ifade olan Brillouin pik katsayısını temsil etmektedir ve silika için bu değer 5.10^{-11} m/W'tır. Bu iki lineer olmayan etkiyi azaltmanın yolu, kullanılan fiber boyunu kısaltmak, ilerleyen modun efektif mod alanını arttırmak, sinyalin spektral aralığını genişletmek ve özel fiberler geliştirmektir.

Fiberde oluşan aşırı ısı, fiberin polimer kaplamasına hasar vermek ya da fiber çekirdeğini yaralamak hatta eritmek gibi problemlere yol açabilir. [26] Yb katkılı fiber lazerlerde absorplanan ve ısıya çevirilen pompalama gücü miktarı %15 civarındadır. Bu 1 kW çıkış gücüne sahip bir fiber lazer için 150 W'lık ısı çıkışı anlamına gelmektedir.

Brown ve Hoffman çift katmanlı fiberlerde radyal ısı dağılımını gösterebilmek için 2 boyutlu bir model geliştirmiştir. [26] Bu model Yb iyonlarının kuantum kusurlarından kaynaklanan ısının fiber çekirdeği boyunca homojen bir şekilde yayıldığını ve çekirdek ve iç kabuğun aynı termal ve mekanik özelliklere sahip olduğunu farz etmektedir. Çekirdek ve iç kabuk için ısı denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir. (çekirdek ve iç kabuk silindirik olarak alınmıştır)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{çekirdek}}(r)}{\partial r} \right) = - \frac{Q_0}{k}, (0 \leq r \leq a) \quad (2.13)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{\text{iç kabuk}}(r)}{\partial r} \right) = - \frac{Q_0}{k}, (a \leq r \leq b) \quad (2.14)$$

İfadelerde geçen k termal iletkenlik (W/mK) ve Q_0 ısı yoğunluğudur. Bu iki denklem kullanılarak ve sınır koşulları gözetilerek sıcaklık dağılımı türetilir. Burada bahsi geçen sınır koşulları, sıcaklıkların ve bu sıcaklık değerlerinin türevlerinin sınır değerlerinde sürekli olması kavramıdır. Buna ek olarak, Newton'un soğuma yasası da $T(r=b)$ göz önünde bulundurulmalıdır.

$$\frac{\partial T_{\text{iç kabuk}}(r=b)}{\partial r} = \frac{h}{k} (T_c - T(r=b)) \quad (2.15)$$

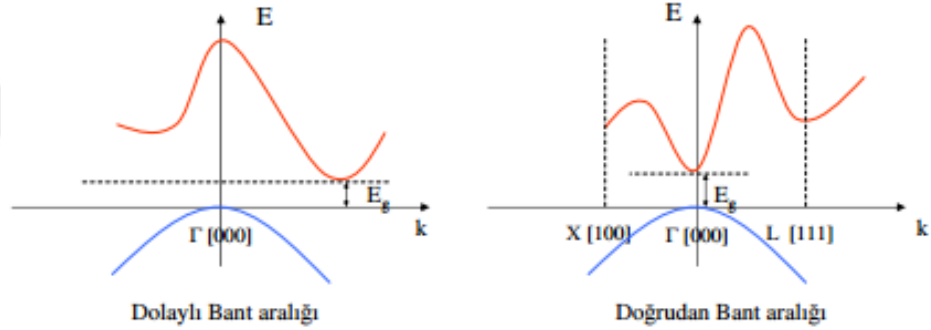
Eşitlikte bahsedilen h , fiberin havayla temas eden yüzeyinden taşınan ısı katsayısı, T_c ise soğutma bloğunun sıcaklığıdır.

2.3.Pompalama Diyotu

Lazer ışınının üretimi için farklı yöntemler ve malzemeler kullanılmaktadır. Yarıiletken kristallerden elde edilen lazerler, “lazer diyot” olarak adlandırılmaktadır. Yarıiletkenlerin elektronik ve optik özelliklerini şematize edebilmek için kristal içindeki taşıyıcıların dalga vektörüne (k) (momentuma) karşı enerji (E) grafiğini çizdirmek gerekir.

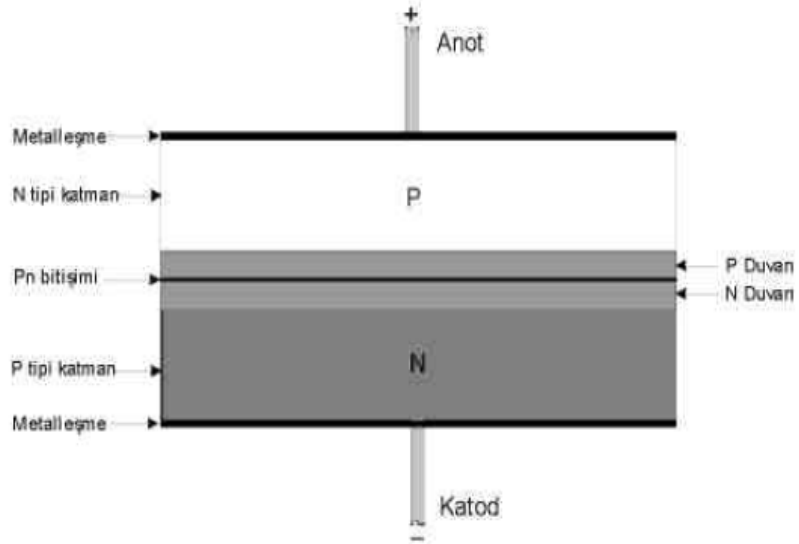
Yarı iletkenlerdeki taşıyıcıların E - k grafiği bize önemli bilgiler verir. Enerji bantlarının şekline göre yarıiletkenleri iki sınıfa ayırabiliriz.

- ❖ Eğer iletim bandı ile değerlik bandı arasındaki enerji en düşük değere $k=0$ 'da sahip ise bu yarıiletkenlere doğrudan bant aralıklı (direct bandgap) yarıiletkenler denir (örnek: GaAs)
- ❖ Eğer iletim bandı en düşük enerjiye $k \neq 0$ 'da sahip ise bu yarıiletkenlere dolaylı bant aralıklı (indirect bandgap) yarıiletkenler denir (örnek: Si, Ge).



Şekil 2.10 (a) dolaylı bant aralığına, (b) doğrudan bant aralığına sahip yarı iletkenlerin E - k grafiği

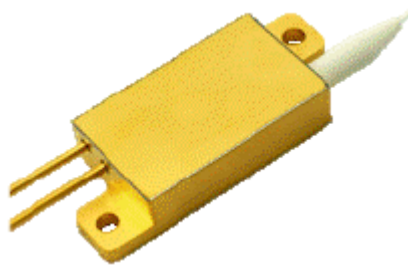
Doğrudan bant yapısına sahip yarı iletken malzemelerde elektronlar iletim bandından valans bandına geçerken foton yayımlar ancak, dolaylı bant aralığına sahip yarı iletkenlerde bu geçiş sırasında momentumun korunabilmesi için fonon salınımı gereklidir. Bu sebeple bir yarıiletken malzemenin ışıma yapabilmesi için doğrudan bant aralığına sahip olması gerekir. Doğrudan bant aralığına sahip GaAs gibi maddelerde, elektron ve hollerin radyasyon yayacak şekilde bir araya gelme ihtimalleri çok yüksektir.



Şekil 2.11 Lazer diyot basit yapısı

Birleşim yüzeyinde, P tarafına pozitif gerilim, N tarafına ise negatif gerilim verildiği zaman elektronlar N malzemesinden P malzemesine geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonlar tekrar elektronlara çarparak bu elektronların daha çok foton üretmesine farklı bir değişle uyarılmış salınımına sebep olurlar. Bu tür lazerler verimli ışık kaynaklarıdır.

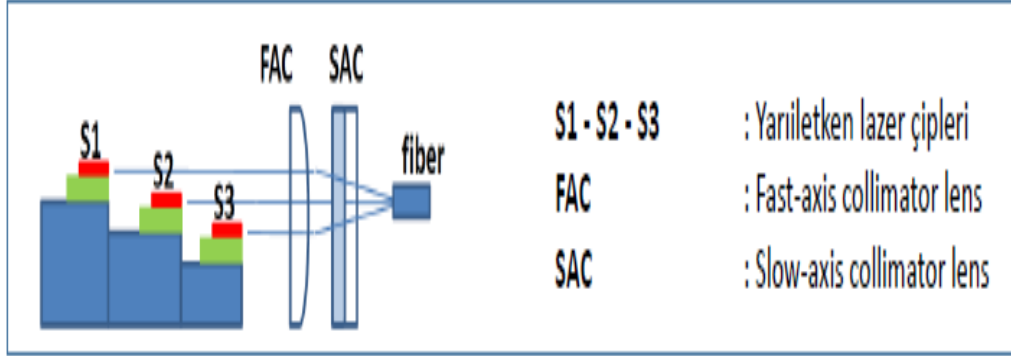
Bünyesinde bir ya da birden fazla yarı iletken lazer çip barındıran, gerekli optik elemanlar yardımıyla bu çiplerden çıkan lazer ışını fiber optik kabloya odaklayan ve fiber optik kablonun ucunda optik güç elde edilmesini sağlayan sistemin bütününe lazer diyot modülü denir.



Şekil 2.12 Yüksek güçlü fiber akuple lazer diyot modülü

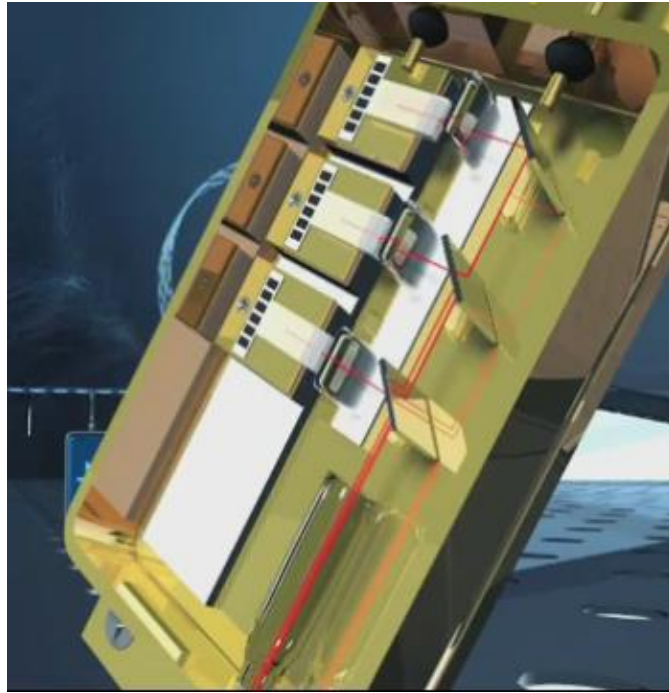
Bu diyot modüllerden elde edilen optik güç genel lazer sistemleri ile kıyaslandığında yüksek güçlü ve kararlı yapıda karşımıza çıkar. Sistemimizde kullanılma amacı ise, sağladığı optik güç ile aktif fiberdeki Yb^{+3} iyonlarını uyarmaktır.

Bu amaç için seçilecek diyotlar Yb^{+3} iyonunun absorplama spektrumunda (900 – 980 nm) ışına yapmalıdır.



Şekil 2.13 Lazer diyot modülün sistematiği

Diyot modüllerin genel çalışma prensibi, yarı iletken lazer çiplerinden çıkan ışığın gerekli karakteristik özellikleri sağlanacak şekilde paralelleştirilmesi ve fiber ucuna odaklanması ile fiber optik kablunun çıkışında optik güç elde edilmesi şeklindedir. Diyot modül tasarımının şekil 2.13 ve Şekil 2.14’de gösterildiği gibi yapılmış olmasının; kaynağın modül haline dönüştürülebilmesi, tek ısı yayıcı üzerinde iyi ısı iletimi sağlanabilmesi, sistemin uzun ömürlü hale getirilebilmesi gibi yararları vardır.

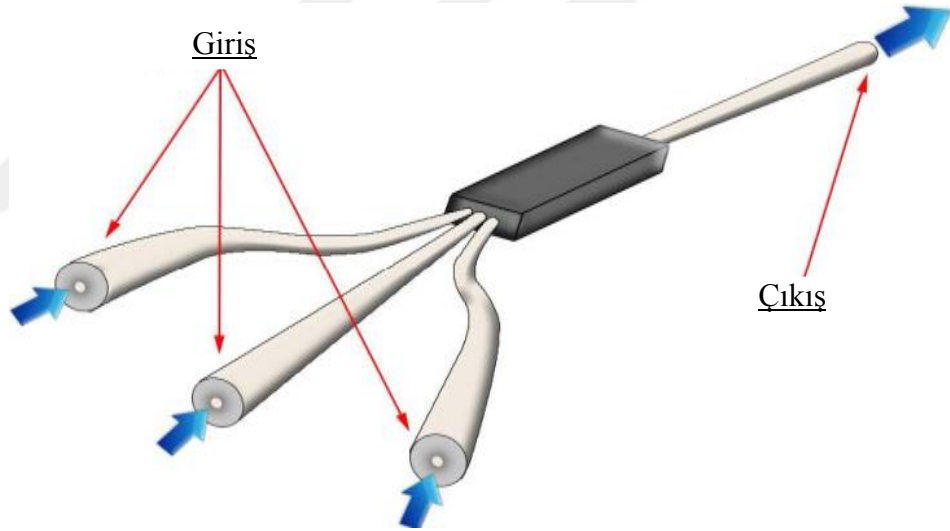


Şekil 2.14 Lazer diyot modülün iç yapısı

2.4.Fiber Birleştirici (Combiner)

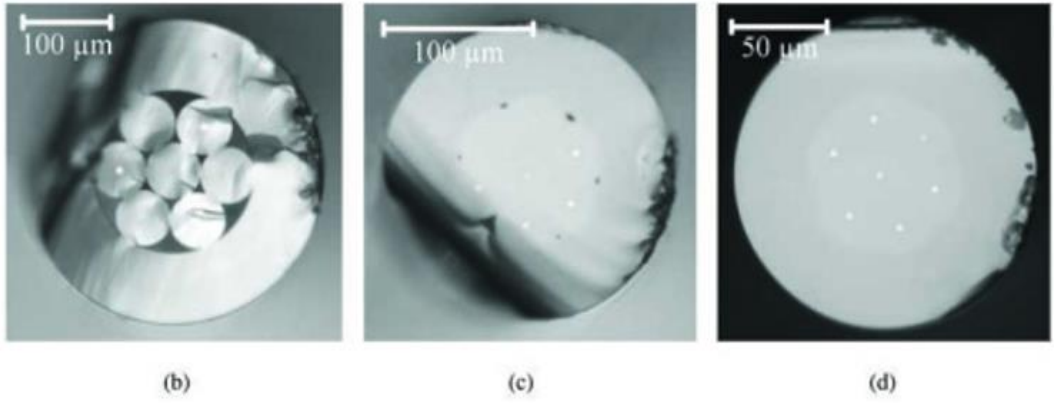
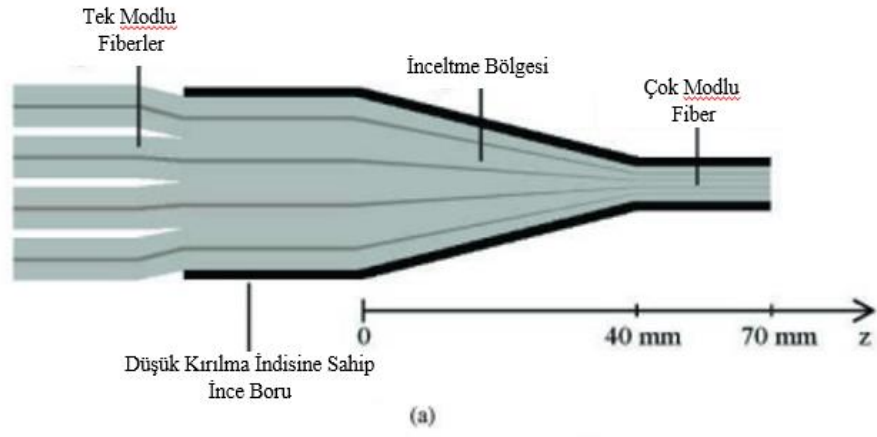
İnceltilmiş fiber demeti (Tapered Fiber Bundle-TFB) tekniği ile üretilen ‘Fiber Birleştirici Sistemleri’ en temelde birden fazla fiber optik kabloyu birleştirmek suretiyle her bir optik fiberde ayrı ayrı ilerleyen lazer ışınlarını toplayarak tek bir fibere eşleyen, pasif fiberlerden oluşan optik bir sistemdir.

Fiber birleştirici, göreceli olarak daha düşük güce ve ışın kalitesine sahip olan diyot lazer modüllerinden gelen lazer ışınlarını, fiberleri birleştirmek suretiyle toplar. Sonrasında ise bütün pompalama diyotlarından gelen ışınları, aktif fibere iletir. Fiber birleştiriciler, endüstri uygulamalarından askeri uygulamalara kadar birçok alanda kullanılan fiber lazer sistemlerinin yüksek güçlere çıkabilmelerine ve bu yüksek güçlere ulaşırken yüksek ışın kalitesini korumalarına olanak sağladığı için hangi alanda olursa olsun fiber lazer sistemlerinin olmazsa olmaz parçasıdır.



Şekil 2.15 Fiber birleştirici basit yapısı

Şekil 2.16 toplamda 7 adet fiber girişi olan bir fiber birleştiricinin üretim şemasını sembolize etmektedir. Düşük güçlü lazer ışınlarını birleştirmek için test edilen ve uygulanan birçok yöntem mevcuttur. Tamamen kapalı bir sistem sunması, güvenilir olması, gerçekleştirilebilir olması, yüksek güçlere ulaşma imkânı sağlaması ve daha küçük boyutlu ürünlerin geliştirilebilmesine imkân tanması gibi nedenlerden dolayı fiber birleştiriciler, dünyada tek yöntem olarak kabul görmüş, ileri teknoloji ile üretilen ekipmanlardır.



Şekil 2.16 Fiber birleştirici içyapısı [10]

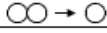

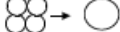
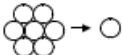
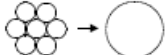
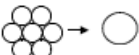
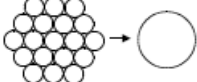
Fiber birleştiricilerinin toplam giriş sayısı, giriş fiberlerinin çapına, nümerik açıklık (NA) değerine ve çıkış fiberinin çapına göre değişiklik göstermektedir.

Çizelge 2.1. Girişi ve çıkış fiberlerinin çap ve NA değerlerine göre geliştirilebilecek fiber birleştirici çeşitleri [27]

Input fibers\ Output fiber	125 μm PCF, NA =0.46	250 μm PCF, NA = 0.46	400 μm PCF, NA =0.46
105 / 125 μm , NA = 0.15	7 x 1	19 x 1	61 x 1
105 / 125 μm , NA = 0.22	4 x 1	7 x 1	37 x 1
200 / 220 μm , NA = 0.22	1 x 1	4 x 1	7 x 1
400 / 440 μm , NA = 0.46	N/A	1 x 1	3 x 1

Çizelge 2.1, farklı çap ve NA değerlerine sahip fiberler kullanılarak geliştirilebilen fiber birleştirici türlerini göstermektedir. Fiber birleştiricilerde önemli olan bir diğer nokta ise toplamda elde edilebilen giriş sayısından ziyade, üzerine aktarılan gücü iletebilme oranıdır ve bu değer de giriş – çıkış fiberlerinin özellikleriyle doğrudan ilişkilidir.

Çizelge 2.2. Farklı çaplarda ve farklı NA değerlerine sahip fiberler ile geliştirilebilecek fiber birleştirici tipleri ve bunların iletim oranları [27]

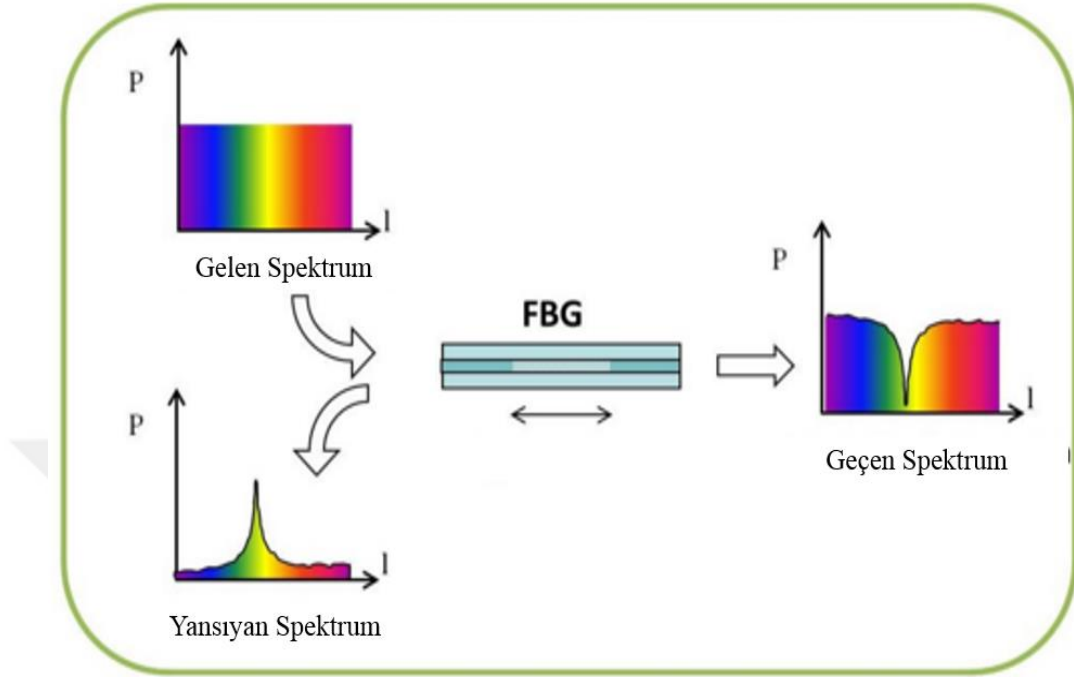
Configuration	Input fibers	Output fiber	Average insertion loss (dB)
2x1 	105/125 μm , NA= 0.12	105/125 μm , NA= 0.22	0.8
3x1 	400/440 μm , NA= 0.22	400 μm , NA= 0.46	0.75
4x1 	200/220 μm , NA= 0.22	400/420 μm , NA= 0.22	0.67
7x1 	105/125 μm , NA= 0.15	125 μm , NA= 0.46	0.32
7x1 	105/125 μm , NA= 0.22	400/440 μm , NA= 0.22	0.25
7x1 	200/220 μm , NA= 0.22	400 μm , NA= 0.46	0.09
19x1 	105/125 μm , NA= 0.22	400 μm , NA= 0.46	0.1

Çizelge 2.1 ve 2.2 incelenecek olursa, gerek yüksek güçlü fiber lazer tasarımı gerekse geliştirilen fiber lazerin verimi çok önemli iki konuda fiber birleştirici ekipmana bağımlı olduğumuzu görebiliriz.

2.5.Fiber Bragg Izgara (FBG)

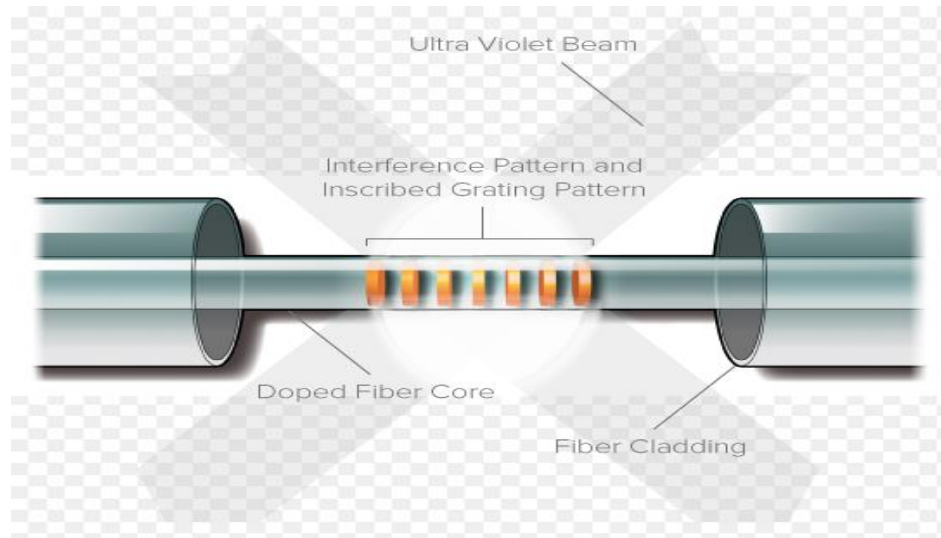
Lazer kavitesi oluşturabilmek için sistemin bir ucunda yüksek yansıtma oranına sahip, diğer ucunda ise düşük yansıtma oranına sahip yansıtıcı yüzeylere ihtiyaç duyulur. Katı-hal lazer sistemlerinde bu amaca hizmet etmek için dikroik aynalar kullanılır. Bu aynaların özelliği belirli bir dalga boyu için yansıtıcı iken diğer tüm dalga boyları için geçirgendir. Dikroik aynaların fiber lazer için de kullanımı mümkündür ancak fiber lazerlerde ayna kullanmak sistemi fiber tımleşik yapıdan uzaklaştırır ve katı-hal lazer sistemlerinin mustarip olduğu bütün problemler (ısı, nem, titreşim vb.) artık fiber lazerinde problemi haline gelir. Bu sebeple fiber tımleşik lazer

sistemlerinde tıpkı dikroik aynanın çalışma prensibi ile çalışan Fiber Bragg Izgaralar kullanılır.



Şekil 2.17 Fiber bragg yansıtıcıların çalışma mekanizması

Fiber Bragg Izgaranın üzerine gelen spektrumun sadece spesifik bir dalga boyunu (Bragg dalga boyu) yansıttığı, spektrumun geri kalanı için ise geçirgen bir özellik sergilediği görülmektedir(Şekil 2.17). Bu yansıtma geçirme oranları ve bant aralıkları FBG'ler için kaliteyi belirleyen faktörlerdir.



Şekil 2.18 Fiber bragg ızgara üretimi

Şekil 2.18’ da, Fiber Bragg Izgara üretimi şematik olarak gösterilmektedir. FBG ,bir fiber optik kablonun çekirdek kısmının, fiber optik kablo boyunca belirli bir mesafede yoğun UV ışınının periyodik girişimine maruz bırakılması ile elde edilir. Bu işlem kalıcı bir kırıcılık indisi değişimi ve sabit bir indis modülasyonu elde etmeyi sağlar. Bu sabit indis modülasyonuna ızgara (grating) denmektedir.



3. FİBER HAZIRLAMA SÜREÇLERİ

Fiber lazer sistemlerinde pompalama diyotu –fiber birleştirici, fiber birleştirici – yüksek yansıtıcılı FBG,FBG – aktif fiber, aktif fiber – FBG; FBG – çıkış fiberi arasındaki ışın aktarımını sağlamanın, konnektörleme, mekanik birleştirme (mechanical splicing) veya boş ortamda (free space) odaklama gibi yolları mevcuttur. Ancak bu işlemi en az kayıpla, en dayanıklı ve en uzun ömürlü yapmanın yolu eriterek birleştirmedir (fusion splicing). Eriterek birleştirme işlemi, iki fiber ucunun birbirine yaklaştırılmak suretiyle, yüksek sıcaklıkta (>2000 °C) eritilerek birleştirilmesi temeline dayanır.

Eriterek birleştirme işlemi; optik dalga kılavuzlama teorisi, ısı transferi, malzeme bilimi, makine mühendisliği, akışkanlar mekaniği ve hatta görüntü işleme teknolojilerini birleştiren disiplinler arası bir konudur ve kendi içinde Fiber soyma (Stripping), fiber kesme (Cleaving), birleştirme (Splicing) ve tekrar kaplama (Recoating) olarak 4 alt başlığa ayrılır.

3.1.Fiber Soyma işlemi (Stripping)

Eriterek birleştirme işlemi sırasında bu işleme maruz kalan fiberlerin sıcaklığı yüzlerce dereceye ulaşır ancak fiberlerin dışında bulunan polimer kaplamaların erime sıcaklıkları maksimum 85 °C 'dir. Bu sebeple sağlıklı bir birleştirme işlemi için ön koşul fiber üzerindeki bu polimer tabakayı sıyrarak işlem sırasında erimesine ve iki fiberin birleşme noktasında yaratacağı kirliliğe engel olmaktır. Çalışılan fiberin türüne, fiber üretici firmanın kullandığı polimerin türüne, elde edilmek istenen temizlik oranına ve işlemin gerçekleşeceği ortamın şartlarına göre 3 farklı fiber soyma yöntemi vardır.

3.1.1. Mekanik ve termomekanik yollarla fiber soyma

Mekanik ve termomekanik yollarla fiber soyma (mechanical and thermo-mechanical stripping) yöntemi diğer yöntemlere göre daha kolay, daha ucuz ve daha hızlı bir yöntemdir. Bu sebeple en çok kullanılan fiber soyma yöntemidir. Yöntem temel olarak kullanılan fiberin iç kabuk çapına göre ayarlanmış özel bir cihazla iç kabuk üzerindeki polimerin bir hare şeklinde kırılması ve daha sonrasında bu kırılan

kısmın fiber ucu boyunca çekilerek fiberden uzaklaştırılması temeline dayanır.[4]

Termo-mekanik soyucular ise mekanik soyuculara bir ısıtıcı yerleştirilmesi sonucu elde edilen ve ortaya çıkardıkları düşük ısı (70 °C) sayesinde çekme işlemini biraz daha kolay hale getiren küçük aletlerdir. Her iki yönteminde en büyük dezavantajı polimeri kırma ve çekme sırasında fiber iç kabuğunda noktasal kusur oluşturma riskidir.

3.1.2. Kimyasal yollarla fiber soyma

Kimyasal yollarla fiber soyma işlemi, polimer tipi ayırt etmeksizin neredeyse bütün fiber kaplayıcı polimerler üzerinde işe yarayan bir yöntemdir. Mekanik soyucuların aksine fiber iç kabuğunda herhangi bir hasara neden olmaz ve bölgesel kusur oluşturmaz. Kimyasal yollarla fiber soyma işleminde, fiberin soyulmak istenen kısmı çoğunlukla sert asit içeren bir çözeltinin içerisine batırılarak, çözelti, polimeri cam yüzeyden tamamen sıyrana kadar beklenir. Bu işlem için kullanıldığı bilinen pek çok kimyasal olmasına karşın 200 °C' de sülfürik asit ya da sülfürik asit – nitrik asit karışımı (%95 H₂SO₄ – HNO₃ nitrik asit) en çok kullanılan çözelti türleridir.[15]

Kimyasal yollarla fiber soyma işleminin dezavantajı ise kullanılan çözeltilerin neredeyse hepsinin sağlık açısından riskli olması ve işlem süresinin mekanik yollara kıyasla daha uzun sürmesidir. Ancak işlem sonucunda elde edilen fiber hem temizlik açısından kusursuz hem de herhangi bir hasar görmemiş olduğu için yöntem tercih sebebidir.

3.1.3. Buharlaştırma yolu ile soyma

Bu yöntem fiber üzerindeki polimeri sıcak gaz ya da lazer gibi farklı kaynaklarla ısıtarak, fiberden uzaklaştırma temeline dayanır. Ancak ekstra ekipmanlara ihtiyaç duyulduğu için en az kullanılan fiber soyma yöntemidir.

3.2.Fiber Kesme (Cleaving)

Neredeyse bütün eriterek fiber birleştirme prosedürleri, ucu olabildiğince düz ve

pürüzsüz kesilmiş bir fiber gerektirmektedir. Fiberi düz ve pürüzsüz kesebilmek için özel elmas bıçaklar ve/veya bu bıçaklar kullanılarak üretilmiş cihazlar kullanılmaktadır. Fiber kesme işlemi için fiberin 2 ucu da sabitlenir ve kesilecek bölgede herhangi bir bükülme ya da harekete izin vermeyecek kadar gerdirilir ve tek bir bıçak hamlesi ile kesim işlemi gerçekleşir. Burada bahsi geçen gerilim miktarı kullanılan fiber türüne göre değişmekte ve bu gerilimi ifade etmek için birim olarak Newton yerine gram kullanılmaktadır.

Kesim işlemi için kullanılan ve farklı çalışma prensiplerine dayanan farklı kesici (cleaver) tipleri mevcuttur ve her biri farklı kesim hızları, farklı kesim kalitesi sunarken farklı ortam şartları gerektirir. Fiber kesici tiplerindeki bu farklılığa rağmen, gerçekleştirilen kesim sonrası elde edilmek istenen özellik aynıdır. Bir kesim işlemi sonrasında elde edilen kesim yüzeyi “ayna bölgesi” (mirror zone), “gölge” (mist) ve “çapak” (hackle) olmak üzere 3 bölgeden oluşur ve sağlıklı bir kesim işlemi gerçekleştiğinde; fiber 0° lik bir açı ile ve neredeyse tamamı ayna bölgesi olacak şekilde kesilmiş olur.

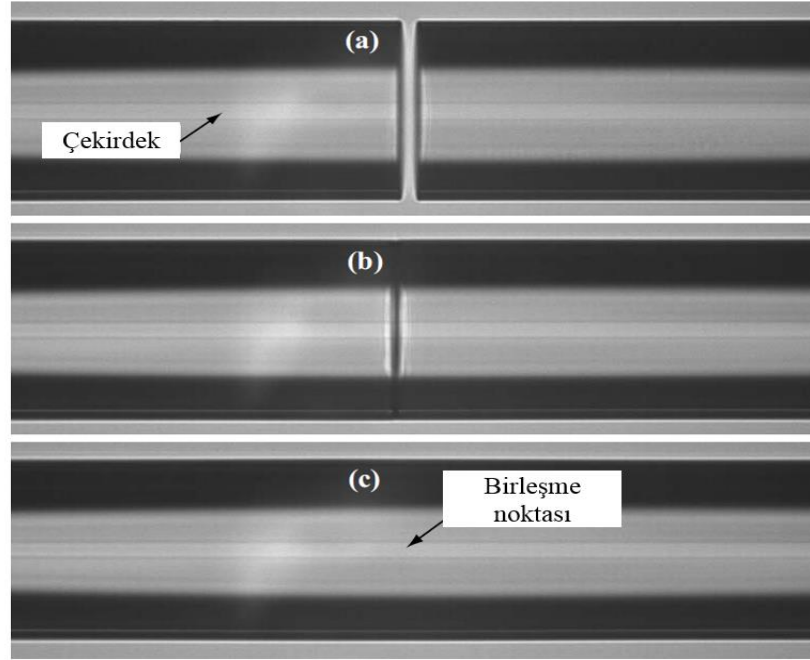
3.3.Fiberlerin Eritilerek Birleştirilmesi (Fusion Splicing)

Eriterek birleştirme işlemi tek bir iş adımı olarak görünse de birden çok alt başlıktan oluşmaktadır.

- ✓ Hizalama (Alignment): Fiber uçları soyulduktan ve olabilen en kusursuz halde kesildikten sonra gelen aşama hizalamadır. İki fiberi birbirine hizalamak için kullanılan 3 yöntem vardır; pasif hizalama, aktif hizalama ve ışık göndererek hizalama (“Light Injection and Detection LID”). Modern eriterek birleştirme cihazları görüntü işleme tekniklerini de kullanarak aktif hizalama yöntemini kullanırlar. Fiber uçlarında meydana gelebilecek herhangi bir pürüzlülük ya da yüksek kesim açısı hizalama işleminin hatalı yapılmasına sebep olacağından bütün birleştirme işleminin sonucunu kötü yönde etkileyecektir.
- ✓ Ek Yeri Oluşturma (Joint Formation): Hizalama işleminden sonraki işlem fiber uçlarına ısı vererek, uç kısımları şekillendirmektir.
- ✓ Eritme Öncesi Temizlik (Prefusion Cleaning): İşlem başlarken kısa süreli bir flaş uygulanır. Bu flaşın amacı fiber uçlarında kalan herhangi bir toz veya parçacık varsa uzaklaştırmak ve eğer kalan bir kimyasal varsa

buharlaştırmaktır. (Fiber uçlarında kalacak herhangi bir kirlilik birleştirme sürecini ve sonuç olarak ta birleştirme kalitesini kötü yönde etkileyecektir).

- ✓ Sıcak İtme (Hot Push): Fiber uçlarının yumuşama sıcaklığına kadar ısıtıldığı süreçtir.
- ✓ Eriterek Birleştirme: fiberler birbirlerine doğru yaklaştırılır ve uygulanan ekstra sıcaklıkla birleşmeleri sağlanır. Burada yüzey gerilimi, akışkanlık ve fiberdeki katkılama yoğunluğu gibi fenomenler devreye girerek eriterek birleştirme işlemini etkiler. [16]



Şekil 3.1 (a) Fiber birleştirme öncesi hizalanmış fiber uçları; (b) Fiber uçlarının ısıtılarak şekillendirilmesi (c) Fiber birleştirme işlemi sonrası [16]

Eriterek birleştirme işleminin yukarıda bahsedilen ve sistem karmaşıklığı sebebiyle bu kısımda tüm detayları ile bahsedilemeyecek yüzlerce parametresi vardır Bu işlemi gerçekleştirebilmek için öncelikli olarak bu parametrelerin optimize edilmesi gerekir. Yapılan birleştirme işleminin kalitesi ise birleştirme noktasında kayıp olup olmadığı, eğer varsa ne kadarlık bir kayıp olduğu ve mekanik dayanıklılığı ile belirlenir.

3.4.Fiberin Tekrar Polimer Kaplanması (Recoating):

Eriterek birleştirme işlemi bittikten sonra uygulanması gereken adımdır. Bu

aşamada, gerçekleşen soyma işlemi sonucu polimersiz kalan ve eriterek birleştirme işlemi ile birleştirilen polimersiz fiber kısmı uygun polimer ile

- ❖ Tek katmanlı fiberler için kırılma indisi iç kabuğun kırılma indisinden yüksek olan (high index) bir polimer ile
- ❖ Çift katmanlı fiberler için kırılma indisi iç kabuğun kırılma indisinden daha düşük (low index) bir polimer ile tekrar kaplanması işlemidir.

Bu işlem süresince dikkat edilmesi gereken husus ise fiber ek noktasının herhangi bir şekilde bükülmeden olabildiğince düz bir şekilde kaplayıcı cihaza veya bir zemine sabitlenmesi ve sonrasında fiber birleştirme noktasında hiç çıplak bölge kalmayacak şekilde tekrar kaplanmasıdır.



4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

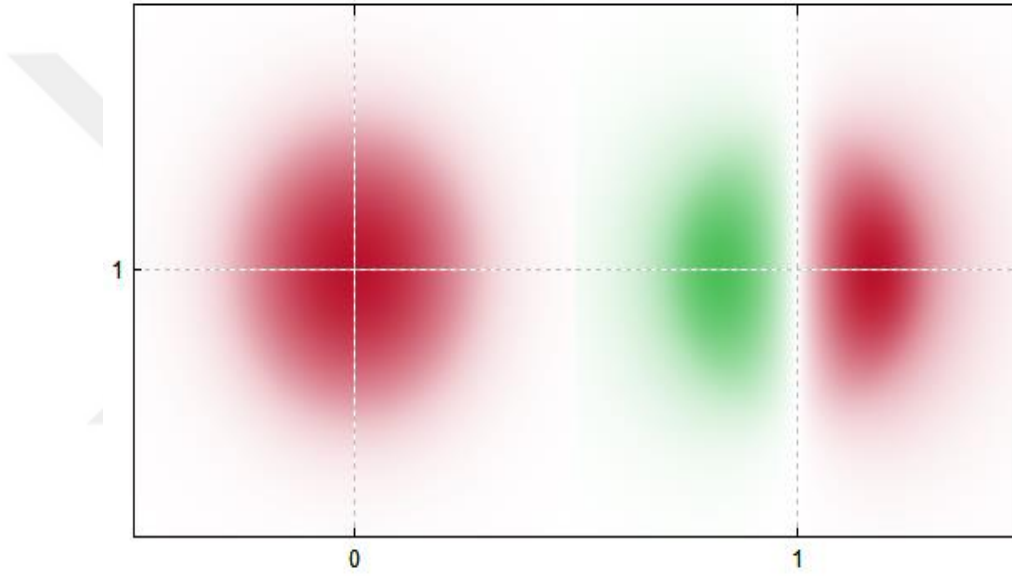
Fiber lazerler sahip oldukları kompakt yapıları, çevre etmenlerine karşı sergiledikleri minimum hassasiyet ve yüksek güçlere çıkabilme konusundaki avantajları sayesinde endüstriyel ve akademik pek çok uygulama alanına sahiptir. Lazerler için kullanılan “yüksek güç” ibaresi oldukça genel bir terimdir. Telekom standardı olan mW mertebesindeki tüm lazerler “yüksek güçlü lazer” olarak sınıflandırılır ve güç baremleri kullanım amacına göre yüzlerce W’tan, onlarca kW lık güce kadar ulaşır. Literatürdeki en güçlü (100 kW) CW fiber lazer ise Fomin ve arkadaşları tarafından 2014 yılında geliştirildi. [3].(bu kısım literatürde yer alsa daha iyi olur)

Lazerleri kullanarak bir yüzey üzerinde işlem yapabilmek için ihtiyaç duyulan şey birim alana düşen gücü olabilen en yüksek seviyeye taşımaktır. Bu sebeple fiber lazerlerin gelişimi sürecinde iki temel amaç vardır. Birincisi gücü mümkün olan en yüksek seviyeye taşımak, ikincisi ise ışın kalitesini olabildiğince yükseltmektir. Bu çalışmada ise 1 kW, CW ve ışın kalitesi yüksek bir fiber lazer geliştirilmiştir. Sistemde kW mertebesinde yüksek kaliteli lazer ışığı elde edilmesine olanak sağlayan LMA (Large Mode Area) aktif fiber, her biri 37W çıkış gücüne sahip 38 adet lazer diyot, yüksek yansıtıcılı ve düşük yansıtıcılı FBG (Fiber Bragg Grating) çifti ve 2 adet 19 girişli fiber birleştirici kullanılmıştır.

4.1. Simülasyon

Bir fiber lazer sistemini kurabilmek için; aktif fiberin çekirdek / iç kabuk çapı, çekirdeğin katkılama yoğunluğu, kullanılan aktif fiberin uzunluğu, kullanılacak pompalama diyotunun dalga boyu, toplam pompalama gücü, kullanılacak yansıtıcıların yansıtma oranları, elde edilecek ışın kalitesi, sistem verimi ve tüm bu parametrelerin birbirleri üzerine olan etkilerini önceden belirlemek gerekir. Ancak parametre sayısının oldukça fazla olması ve tüm parametrelerin birbirini etkiliyor olması sebebiyle bu işlemi yapabilmek için özel yöntemler ve hatta simülasyon programları geliştirilmiştir. Bu programlardan en çok kabul göreni ise oldukça yaygın bir programlama dili olan MATLAB dilini kullanan “RP Fiber Power” programıdır ve bu çalışmanın bütün benzetimleri bu program kullanılarak yapılmıştır.

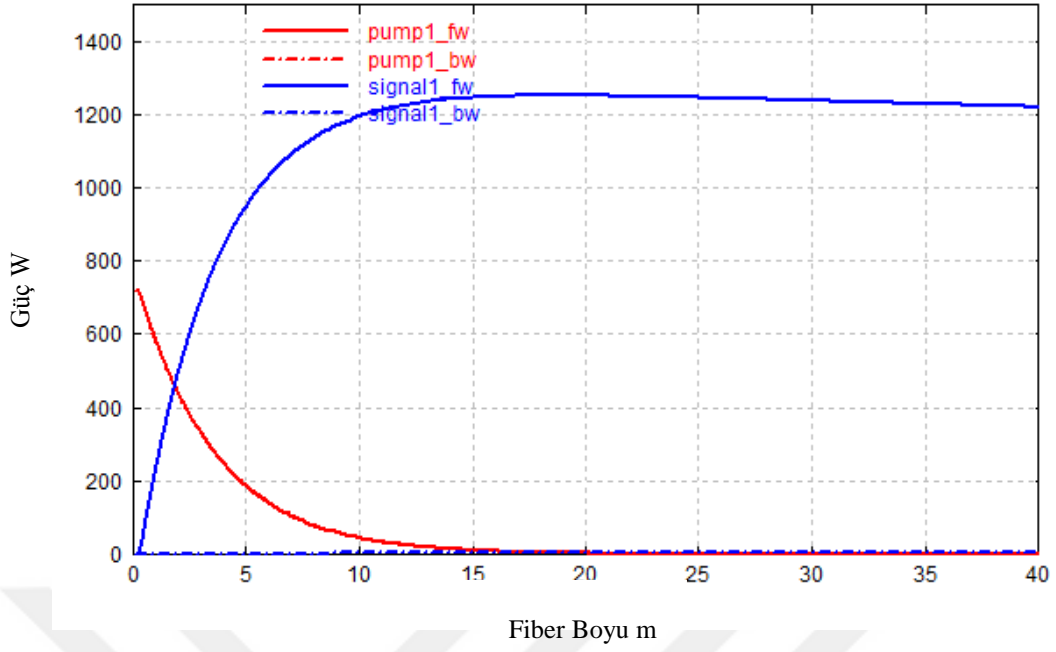
Sistemde aktif ortam olarak Yb^{+3} katkılı, 20/400 μm , iç kabuk NA değeri 0,065 ve dış kabuk NA değeri 0,22 olan bir aktif fiber seçilmiştir ve sonrasında diğer tüm parametreler eklenerek ayrı ayrı ve bütün olarak sistemi nasıl etkiledikleri incelenmiştir. Şekil 4.1, bu fiber kullanılarak geliştirilen bir fiber lazerin ideal şartlarda sahip olacağı mod sayısını ve bu modların görüntüsünü vermektedir. Toplamda 2 mod oluşuyor olması geliştirilen lazerin oldukça yüksek bir ışın kalitesine sahip olması anlamı taşımaktadır. kW mertebesinde ve neredeyse tek modlu lazer üretebilme imkanı sunuyor olması, çalışmada bu fiberi aktif ortam olarak seçmemizin başlıca sebebidir.



Şekil 4.1 Seçilen aktif fiberin mod profili

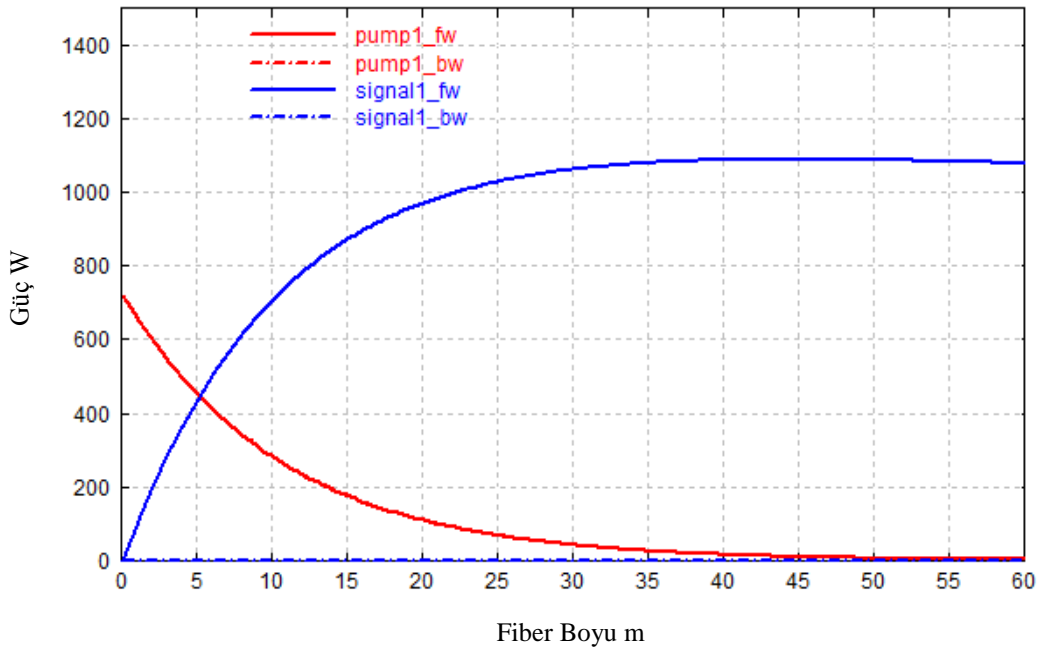
Kullanılacak aktif fiber belirlendikten sonra belirlenmesi gereken ilk parametre çalışılacak pompalama dalga boyunun belirlenmesidir. Çalışmada istenilen pompalama gücüne ulaşabilmek için çift taraflı pompalama konsepti kullanılacağı için sistem her iki uçtan 720 W olacak şekilde toplamda 1440 W'lık bir pompalama gücüne sahiptir ve amaç bu pompalama ışığının tamamen absorplanarak sinyale dönüşmesidir.

Bölüm 2.1' de detaylı olarak anlatıldığı üzere Yb^{+3} iyonlarını uyarmak için kullanılacak 2 temel dalga boyu 915 nm ve 976 nm'dir. Sistem 976 nm dalga boyu ile pompalanırsa



Şekil 4.2 976 nm pompalama ışığı kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi

Toplamda 20 metre aktif fiberin yeterli olduğu görülmektedir. Ancak sistem 915 nm pompalama diyotları kullanılarak pompalandığında;

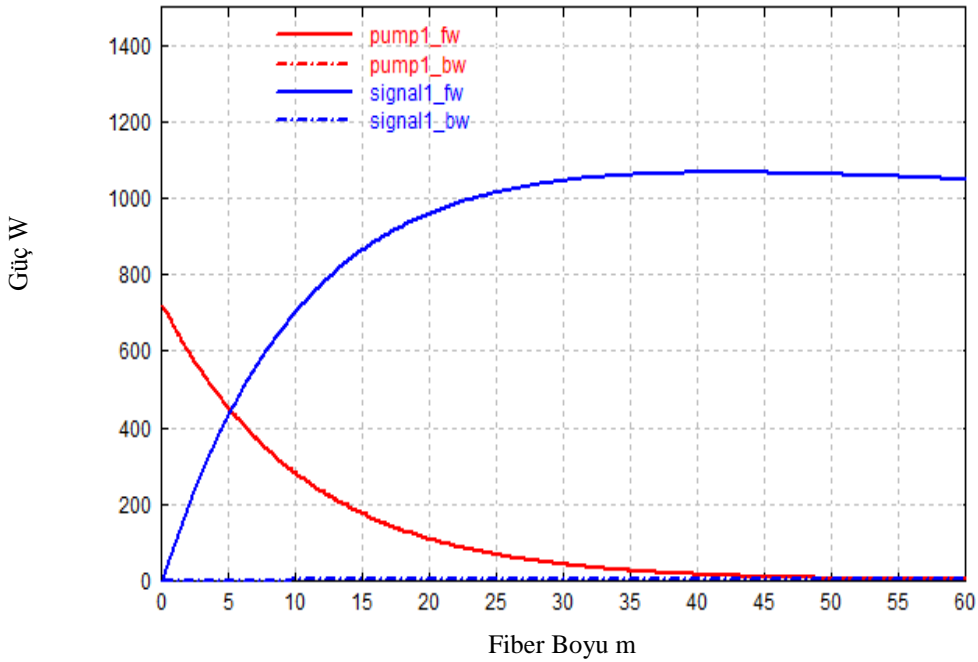


Şekil 4.3. 915 nm pompalama ışığı kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi

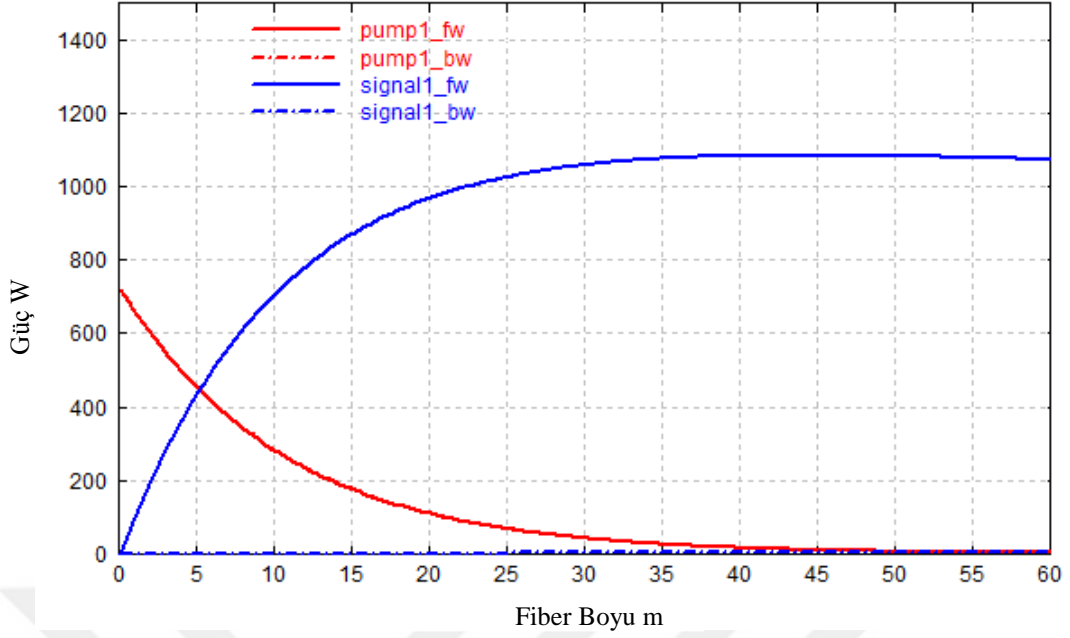
Bütün pompalama ışığının Yb^{+3} iyonları tarafından absorplanabilmesi için 40 metre aktif fiber kullanılması gerekmektedir. Bu iki durum göz önünde bulundurulduğunda 976 nm'yi pompalama dalga boyu olarak seçmek, ilk etapta daha makul görünse de, daha kısa fiberden bu gücü elde etmek demek sistemdeki ısıl yükün daha kısa bir alanda birikmesi anlamını taşımaktadır. Bu ısıl yükü 40 metreye yaymak yani 915 nm dalga boyunu pompalama için kullanmak termal problemleri azaltmak için daha makul bir seçimdir.

Simülasyon işleminde son adım ise sistemde kullanılacak FBG çiftinin, sistem verimine etkisini gözlemlemek ve en uygun FBG'yi seçebilmek için, simülasyona dâhil edilmesidir. FBG çiftlerinden yüksek yansıtıcılı olanın amacı, kendi üzerine gelen ışığı, maksimum miktarda sisteme geri gönderebilmektir. Bu sebeple temin edilebilen en yüksek yansıtma oranı olan %99,8 oranındaki FBG, yüksek yansıtıcılı FBG olarak seçilmiştir. Düşük yansıtıcılı FBG'nin amacı ise sistem dalga boyunu belirlemek ve elde edilen lazer ışığının sürekliliğini sağlamaktır. Bu sebeple farklı yansıtma oranları sistem verimini doğrudan etkileyecektir.

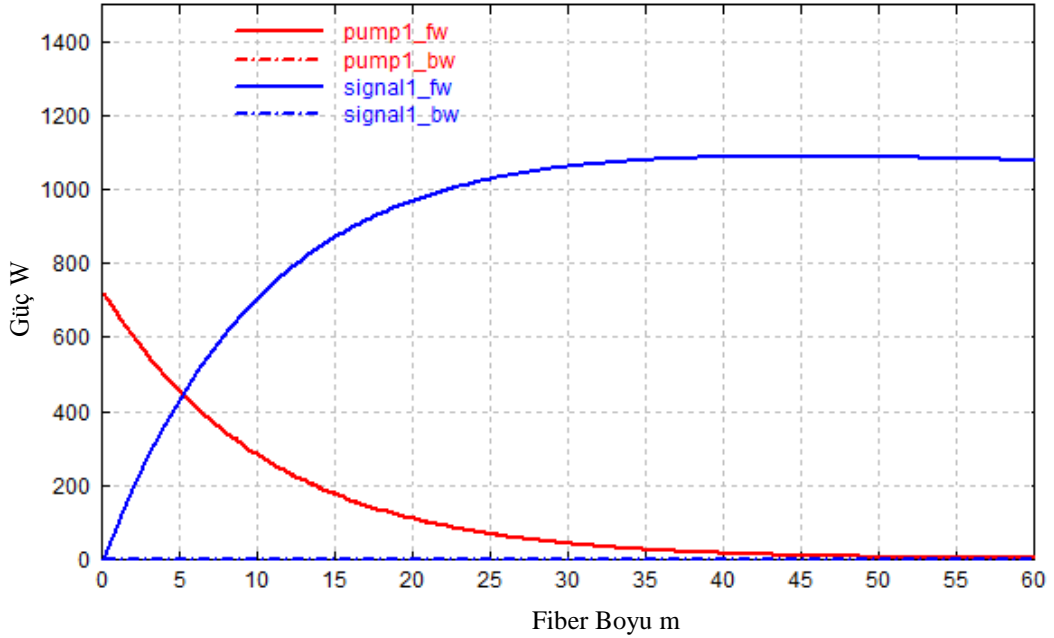
Düşük yansıtıcılı FBG sırasıyla %10, %5 ve %4 oranında yansıtıma sahip olduğunda; Sırasıyla Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'daki grafikler elde edilmektedir.



Şekil 4.4. %10 yansıtma oranına sahip fbg kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi



Şekil 4.5. %5 yansıtma oranına sahip fbg kullanıldığında pompalama ışığının ve geliştirilen lazer ışığının fiber boyuna göre değişimi



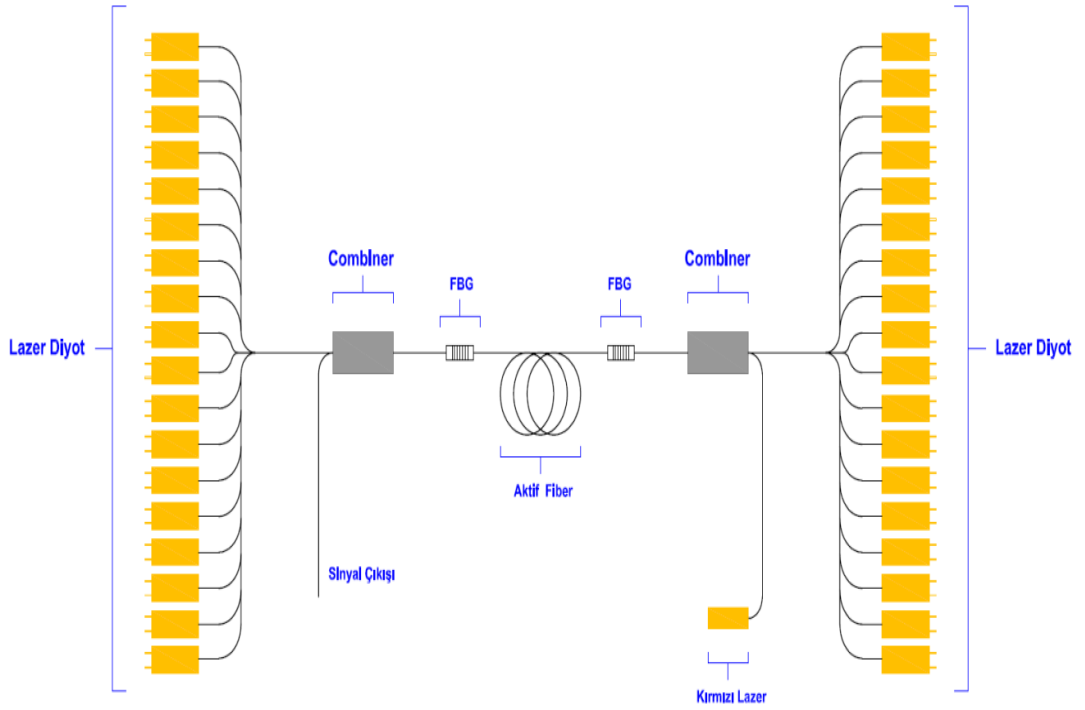
Şekil 4.6. %4 Yansıtma Oranına Sahip FBG Kullanıldığında Pompalama Işığının ve Geliştirilen Lazer Işığının Fiber Boyuna Göre Değişimi

Bu grafikler pompalama gücünün ve sinyalin (elde edilen lazerin) fiber boyunca değişimini göstermektedir ve 1440 W 'lık pompalama gücüne karşılık, sistemin çıkış gücü sırasıyla 1070 W, 1080 W ve 1090 W olmaktadır. Bu veriler

doğrultusunda %4' lük yansıtma sahip FBG kullanmak sistem verimini artırmak açısından uygun görülmüştür.

4.2. DeneY Düzeneyi ve Sistem Kurulumu

Lazer modülü, tek bir osilatör olacak şekilde Şekil 4.7.' de şematik olarak gösterildiği gibi tasarlanmıştır. Yb⁺³ iyonu katkılanmış 40 metre 20/400 geniş mod alanlı (Large Mode Area-LMA) aktif fiber, 18 pompalama girişi olan 2 adet fiber birleştirici yardımıyla 37W optik çıkış gücüne sahip ve 915 nm dalga boyunda ışımaya yapan 38 adet pompalama diyotu kullanılarak çift taraflı olarak pompalanmıştır. Sistemde lazer kavitesini oluşturabilmek için yansıtıcı olarak %99,8 ve %4 yansıtma oranlarına sahip FBG çifti kullanılmıştır.

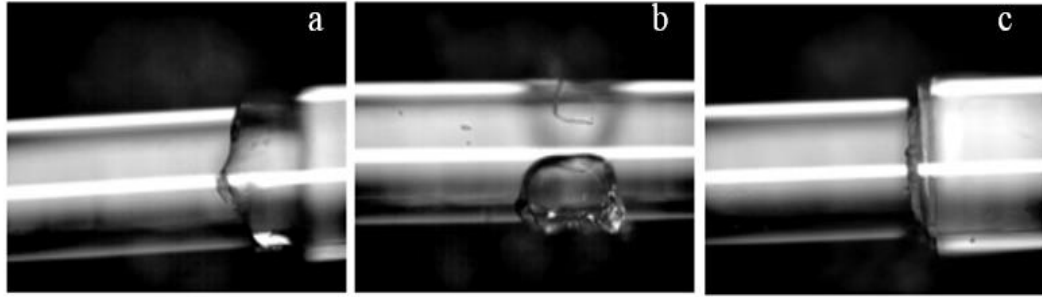


Şekil 4.7 Tasarlanan yüksek güçlü fiber lazer sisteminin şematik gösterimi

DeneY düzeneyi kurulurken öncelikli olarak yüksek güçlü pompalama diyotları, kendilerinin soğutulması için özel olarak tasarlanmış soğutma bloğuna sabitlenmiştir. Diyotlar plakaya sabitlendikten sonra 18 adet pompalama girişi olan 2 adet fiber birleştirici, yüksek yansıtıcılı ve düşük yansıtıcılı FBG çifti ve aktif fiber kavite plakasına kendileri için tasarlanan özel bölmelere sabitlenmiştir. Sistemde

kullanılan bütün komponentler fiber tümleşik yapıya sahip olduğundan sistem kurulumu süresince fiber hazırlama süreçlerine sadık kalarak sırası ile diyot – fiber birleştirici, fiber birleştirici – FBG, FBG – aktif fiber bağlantıları yapılmıştır.

Bu süreçte fiber soyma işlemi için termo-mekanik fiber soyma yöntemi kullanıldı. Şekil 4.8’de fiber soyma işlemi sırasında alınan optik mikroskop görüntülerine gösterilmektedir.



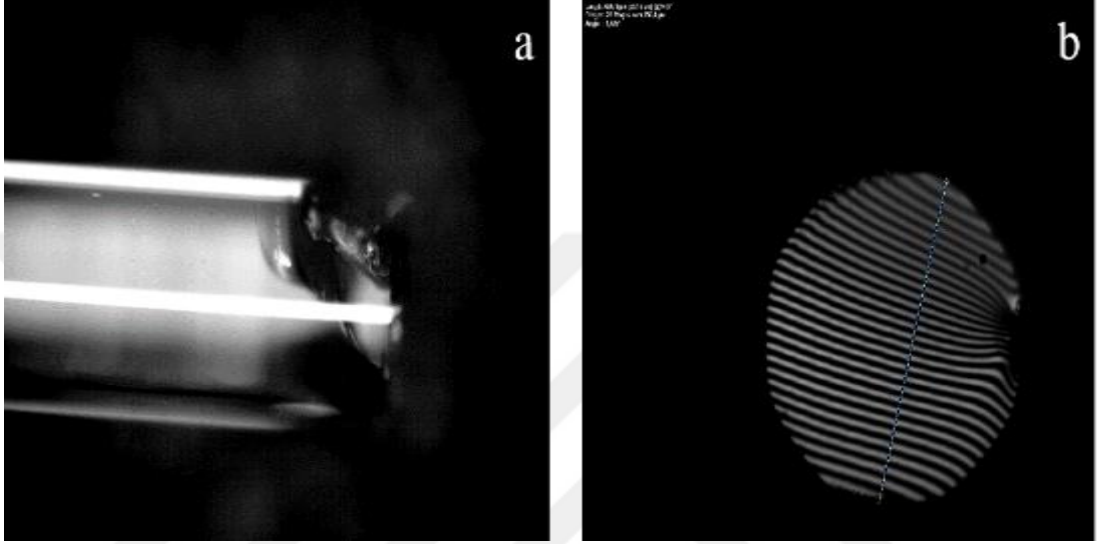
Şekil 4.8 Termo-mekanik fiber soyma yöntemi ile soyulmuş fiber örneklerinin optik mikroskop görüntüleri

Şekil 4.8 - a, b ve c incelenecek olursa a ve b’de elde edilmiş olan sonuçlar yüksek güçlü lazer uygulamaları için kabul edilebilir değildir. Çünkü fiber üzerinde kalan bölgesel polimer parçaları ve ayrıca kirlilikler hem birleştirme işlemi etkileme riskini hem de üzerinden geçen yüksek güç baremlerinde bölgesel ısınma riskini beraberinde getirmektedir. Hedeflenen sonuç, soyma sınırı olabildiğince düz ve soyulmuş bölgesi hasarsız ve temiz bir fiber elde etmektir ve yapılan optimizasyonlar sonucu elde edilen sonuç Şekil 4.8’ de gösterilmiştir.

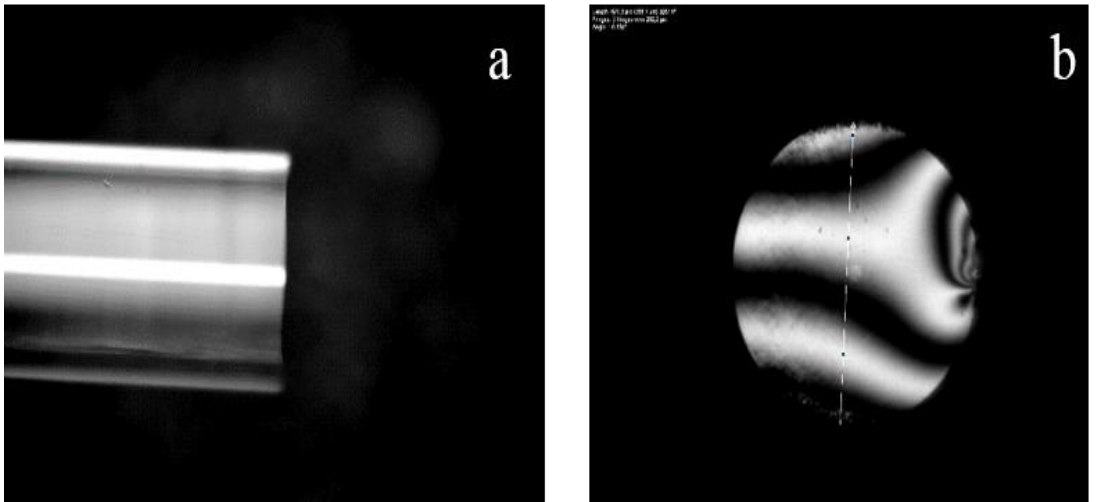
Fiberlerin soyulmasından sonra gelen adım ise fiberlerin olabildiğince düz ve pürüzsüz kesilmesi işlemidir. Şekil 4.9’ da, kötü kesilmiş bir fiberin optik mikroskop ve interferometre görüntüleri gösterilmektedir. Interferometre ile yapılan ölçüme göre bu fiberin kesim açısı $1,4^\circ$ dir. Bu değer yüksek kaliteli bir birleştirme yapabilmek için hedeflenen 0° ile kesim yapma hedefinden çok uzaktır.

Şekil 4.9a’da verilen Optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde ise bu şekilde kesilmiş 2 fiberi bütün kesiti birbirine paralel ve eşit mesafede olacak şekilde yaklaştırmamanın imkânsız olduğu açıkça görülmektedir.

Şekil 4.10’da başarılı bir kesim örneğinin optik mikroskop ve interferometre dataları görülmektedir. Şekil 4.10a’ daki görüntüde fiberin kesim yüzeyinin düz, temiz ve pürüzsüz olduğu görülmektedir. Aynı fiberin interferometre datasına göre kesim açısı 0,1 derecedir. Bu değer başarılı bir birleştirme işlemi için oldukça kabul edilebilir bir değerdir.



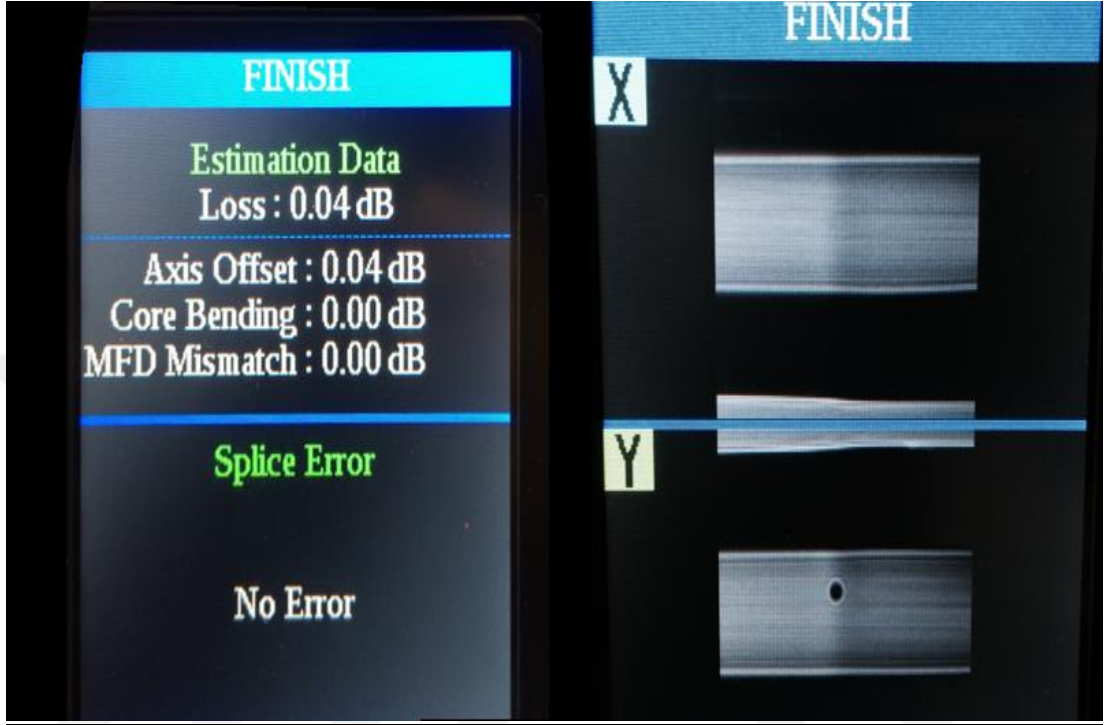
Şekil 4.9 Başarısız Bir Kesim İşleminin sırasıyla optik mikroskop ve interferometre görüntüleri



Şekil 4.10 Başarısız bir kesim işleminin sırasıyla optik mikroskop ve interferometre görüntüleri

Soyma ve kesme işlemi bittikten sonra fiber hazırlama süreçlerinde gelen adım fiberleri birleştirme işlemidir. Bu çalışmada bu işlemi gerçekleştirmek için eriterek

birleştirme yöntemi kullanılmıştır. Bu işlem fiber tümleşik fiber lazer sistemi kurulumunun en dikkat edilmesi gereken ve en zorlayıcı basamağıdır. Örneğin aşağıdaki görselde verilen birleştirme işleminin sonucunda 0,04dB' lik bir kayıp vardır.



Şekil 4.11 İyi belirlenmemiş parametrelerle gerçekleştirilmiş birleştirme işlemi

Yukarıdaki örnekte verilen 0.04 dB değerindeki kaybın sisteme etkilerini kabaca incelemek için bu birleşme noktasından 1000 W' lık bir güç geçtiğini hesaba katarak denklem 4.1' de verilen kayıp formülünü kullanacak olursak

$$10 \log \frac{\text{Giriş Gücü}}{\text{Çıktı Gücü}} = dB \quad (4.1)$$

Bu işlem sonucunda sadece tek bir bağlantı noktasından kaybedilen optik gücün 10 W mertebesinde olduğu görülmektedir. Buda bütün birleştirme noktaları hesaba katıldığında toplamda onlarca vatlık optik gücün ısıya dönüşmesi anlamı taşır. Bu durum hem sistemin soğutulmasını sorunlu hale dönüştürür hem de verimi düşürür. Bütün bu problemlerden kaçabilmek adına yapılması gereken kullanılacak fiberlerin uygun biçimde soyulması, düzgün bir açıyla kesilmesi ve birleştirme işlemi için ihtiyaç duyulan reçetenin çalışılacak fibere göre optimize edilmesidir.

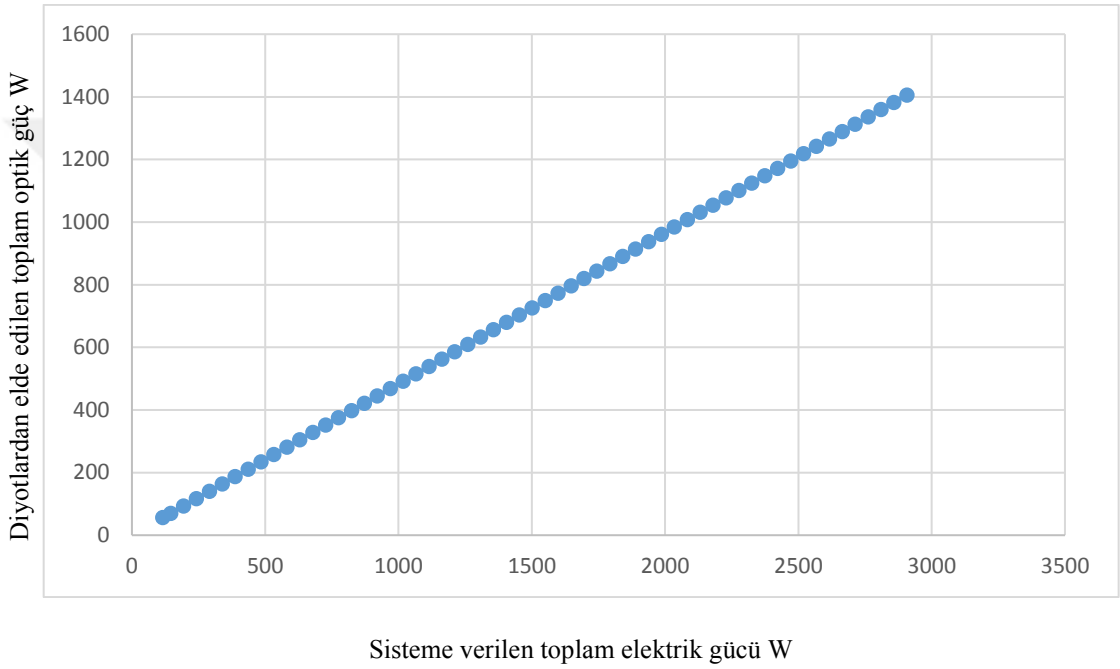
Bütün bu adımlar gerçekleştirildikten sonra elde edilen ve sistem kurulumu boyunca kullandığımız parametrelerle elde edilen birleştirme işleminin görüntüleri ise şekil 4.12’de gösterilmiştir.



Şekil 4.12 Uygun parametrelerle gerçekleştirilmiş birleştirme işlemi

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

Fiber tımleşik lazer sisteminin kurulumu sırasında ve sonrasında yapılan test sonuçları aşağıda tüm detayları ile verilmiştir. Sistemden elde edilmek istenen ilk bilgi, sisteme gönderilen toplam elektrik gücüne karşılık, fiber birleştirici çıkışından elde edilen optik güç miktarının ne kadar olduğudur. Yapılan testte diyotlara verilen akım değeri yani toplam elektrik güç kademeli olarak arttırılmış ve bu değerlere karşılık gelen toplam pompalama gücü fiber birleştirici önüne konulan optik güç ölçer yardımı ile ölçülmüştür.



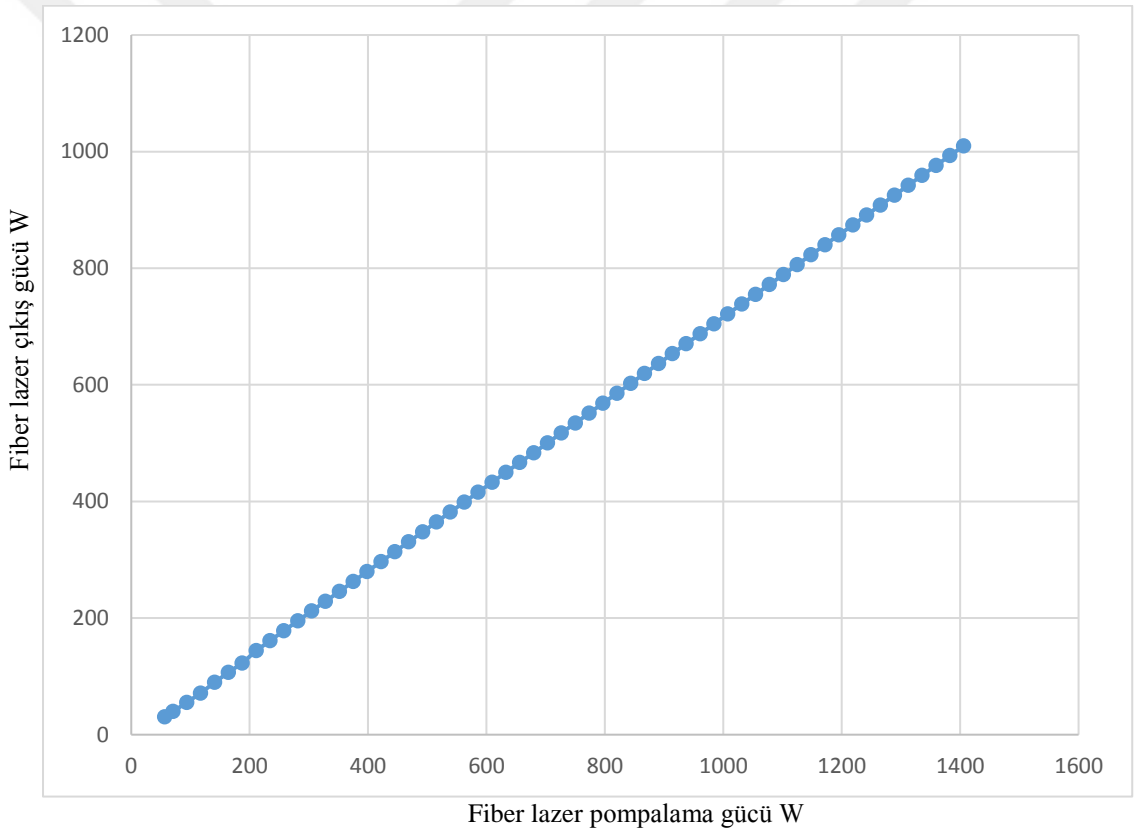
Şekil 5.1 Pompalama diyotlarının elektrik güce karşılık optik güç grafiği

Şekil 5.1’de görüldüğü gibi 38 diyot için sisteme verilen toplam elektrik gücü 2907W’ tır. Sisteme verilen 2907 W’ lık elektrik gücüne karşılık diyotlardan elde edilen toplam optik güç 1406W’ tır ve buda diyotların toplam elektro-optik veriminin %48 olduğu bilgisini verir.

Diyot – fiber birleştirici bağlantıları tamamlandıktan ve ilgili testler yapıldıktan sonra sistemde kullanılacak 40 metrelik aktif fiber kavite için özel tasarlanan plakaya yerleştirilmesi ve sabitlenmesi sağlanmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, aktif fiberin paketlenme şeklidir. Daha önceki bölümlerde kullanılan aktif fiberin bükülmesinin ışın kalitesini artıracakı belirtilmişti. Bununla birlikte, bu bükümün oranı arttıkça, dışarı alınabilen güç miktarı da artacağından bu sisteme ekstra ısı yük

olarak dönecektir. Bu sebeple sistem gücünü kademeli olarak arttırmak ve bu sırada ortaya çıkan ısıyı gözlemlemek oldukça önem taşımaktadır. Fiber yapısal olarak camdan oluştuğu ve camın erime sıcaklığı oldukça yüksek olduğu için normal şartlarda çok yüksek sıcaklıkların bile sorun oluşturmaması beklenir ancak fiber dışındaki polimer kaplama 75°C' nin üzerinde deforme olmaya başladığından bu sıcaklık değeri sistem için belirleyicidir.

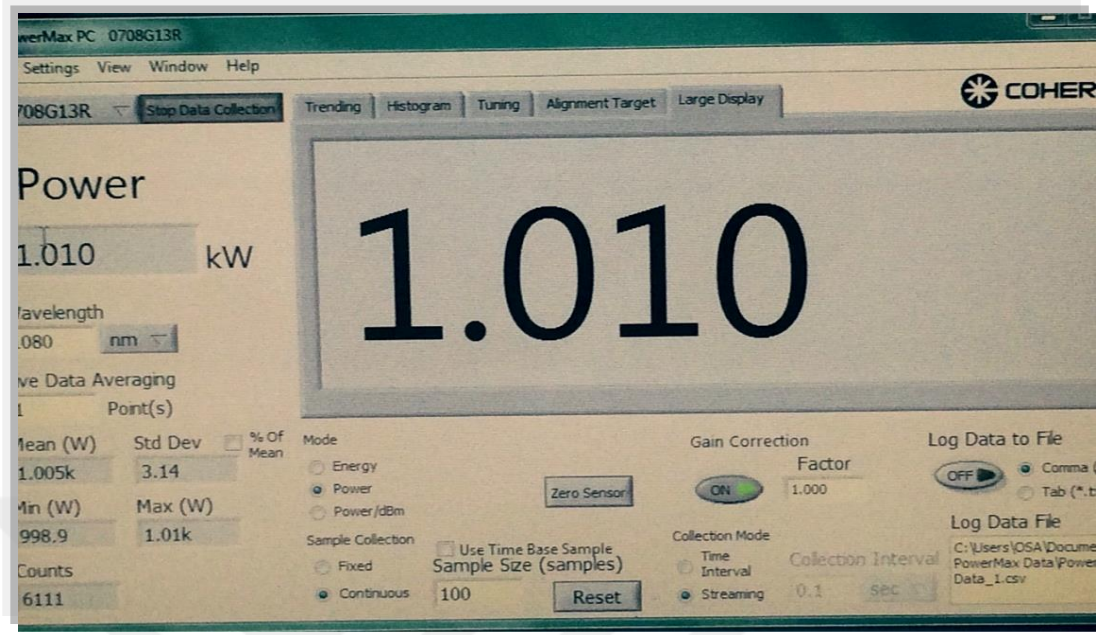
Sistemde kullanılan bütün bileşenler uygun fiber lazer hazırlama süreçlerine bağlı kalarak birleştirildikten sonraki ilk test; fiber lazer sistemine gönderilen pompalama gücünün kademeli olarak arttırılması ve gönderilen pompalama gücüne karşılık gelen çıkış gücünün ölçülmesi olmuştur.



Şekil 5.2 Toplam pompalama gücüne karşı optik çıkış gücü

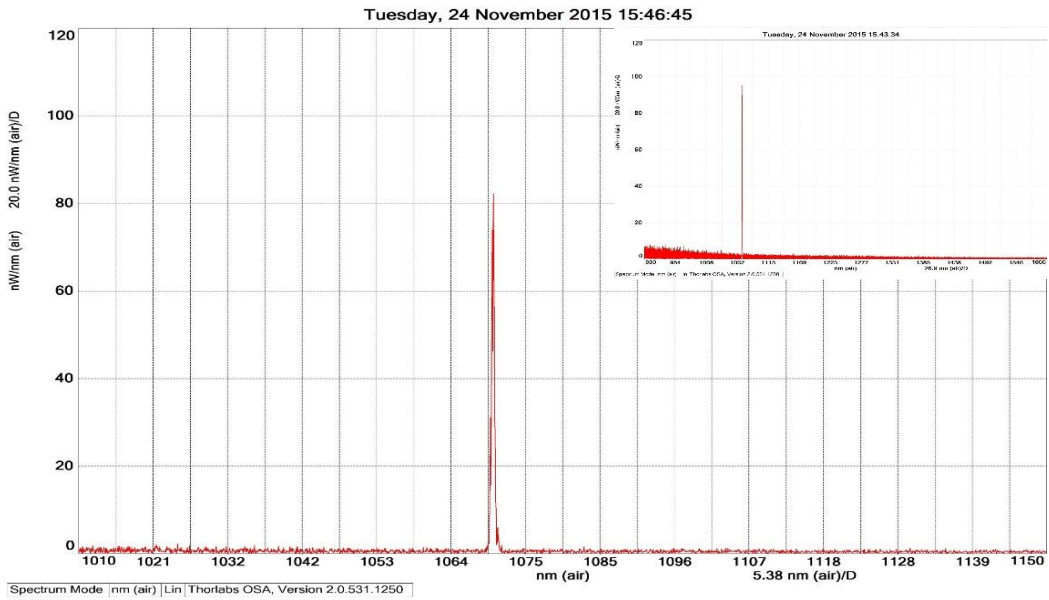
Şekil 5.2 incelenecek olursa verilen maksimum pompalama gücü olan 1440 W' a karşılık elde edilen optik çıkış gücünün 1010 W olduğu açıkça görülmektedir. Bu da geliştirilen fiber lazer sisteminin optik veriminin %71,8 olduğunu göstermektedir. Sistemin optik verimi sistemde kullanılan aktif fiberin boyuna, fiber soyma, fiber kesme ve polimer kaplama işlemlerinin kalitesine ve sistemin paketlenmesine

doğrudan bağlıdır. Sistemin bütününe elektro-optik verimi ise %34 olarak kaydedilmiştir.



Şekil 5.3 Geliştirilen fiber lazer sisteminin optik çıkış gücü

Lazer sistemini spektroskopik olarak incelemek için ise spektrum analizörü kullanılmıştır.



Şekil 5.4 Geliştirilen Fiber Lazer Sisteminin optik spektrum analizi

Şekil 5.4' te, geliştirilen lazerde ana ışınım dalga boyu olan 1070 nm dışında herhangi bir ışınım olmadığı görülmektedir. Fiber lazer sistemlerinde kullanılan aktif fiber boyunun kısa olması, pompalama ışığının bir kısmının absorplanmadan kalması

ve sistem çıkışına ulaşması anlamına gelir. Geliştirilen lazerin spektrum datası incelendiğinde pompalama dalga boyu olan 915 nm'ye rastlanmamaktadır. Bu durum fiber boyunun tüm pompalama gücünü absorplamaya yetecek kadar uzun olduğunun göstergesidir. Ayrıca sistemde herhangi bir lineer olmayan etki gözlemlenmemiştir. Bu durum ise kullanılan fiber boyunun ideal olduğunu göstermektedir.

Elde edilen sonuçlar gerek FBG'lerin, gerekse kullanılacak fiber türünün ve boyunun tespiti konusunda yapılan simülasyonların elde edilen verilerle kusursuz bir şekilde uyduğunu göstermektedir. Simülasyonda elde edilmesi öngörülen çıkış gücü 1090 W iken gerçekte elde edilen çıkış gücünün 1010 W' tır. Bu çıkış gücü farkının aşağıdaki sebeplerden kaynaklanabileceği düşünülmektedir:

- ❖ Sistemde kullanılan bütün alt bileşenlerin bir iletim oranı vardır. Hiçbiri üzerine gelen ışığı %100 verimle iletememekte veya yansıtamamaktadır. Bu sebeple üzerlerinden ışın geçerken bu ışının küçük bir kısmı ısıya dönüşmektedir.
- ❖ Mükemmel bir birleştirme işlemi bile kusursuz değildir. Bu sebeple sistemdeki bağlantı noktaları aslında birer kayıp noktasıdır ve bu bölgeler üzerinden geçen ışının bir kısmı ısıya dönüşerek kayba sebep olur.
- ❖ Geliştirilen fiber lazerde aktif ortam olarak 40metre aktif fiber kullanılmıştır. Sistemin makul ölçülerde paketlenbilmesi için aktif fiber sarmal formda bükülerek kullanılmıştır. Aktif fiberi bükerek kullanmak, fiberin kırılma indisi profilini değiştirerek fiber lazer içinde oluşan istenmeyen modların fiber boyunca dışarı sızmasını sağlar –ki bu yöntem geniş çaplı fiberler kullanarak, ışın kalitesi yüksek fiber lazer sistemi geliştirmek için en çok kullanılan yöntemidir. Ancak bu işlem ışın kalitesinde artış sağlarken toplam güçte azalmaya sebep olur. Fiber bükümü, tasarım sırasında simülasyonlara dâhil edilmemiştir, simülasyonla deney düzeneği arasındaki güç farkının en net sebebi bu durumdur.

Yukarıda detaylı olarak değinilen parametreler göz önünde bulundurulduğunda meydana gelen 80 W'lık farkın oldukça kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta aradaki bu güç farkının bir noktada lokalize olarak sistemde ısıl probleme sebep olup olmadığıdır. Yapılan uzun vadeli testlerde, fiber lazer sistemi çalıştırılırken güç baremi kademeli olarak arttırılmış ve

güç artışına bağı olarak gerek aktif fiberin gerekse fiber temelli bileşenlerin sıcaklıkları düzenli olarak gözlemlenmiştir. Güç maksimum değerinde ve soğutma suyu 20 °C iken soğutucu plaka üzerindeki en sıcak noktanın 26 °C, aktif fiber üzerinden okunan en yüksek noktasal sıcaklığın ise 45 °C mertebesinde olduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler eşliğinde sistemin termal olarak hiçbir problemle karşılaşmadığını söylemek doğru olacaktır.



KAYNAKLAR

- [1] Allan, W. Waveguide properties of optical fibres, in fibre optics, Springer. 1973, 177
- [2] ALLAN, W. Fibre optics: theory and practice. London and New York, Plenum Press, 1973. 254
- [3] Fomin, V. et al. 100 kw cw fiber laser for industrial applications, Laser optics 2014 International Conference IEEE. 2014.
- [4] Gebizlioglu, O. J. Mann, and C. Kurkjian. An overview of optical fiber strippability, Proceeding of National Fiber Optic Engineers Conference. 1999.
- [5] Hall, R.N, Semiconductor devices. 1962, Google Patents.
- [6] Javan, A, W. Bennett Jr, and D. Herriott, Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge. Essentials of lasers The Commonwealth and International Library, 2013, 167.
- [7] Jelger, P., Seger, K., Pasiskevicius, V., & Laurell, F, Highly efficient temporally stable narrow linewidth cryogenically cooled yb-fiber laser. Optics express, 2009, (10), 8433.
- [8] Kao, K. and G.A. Hockham. Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies, Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966.
- [9] Maiman, T.H. Stimulated optical radiation in ruby, 1960.
- [10] Noordegraaf, D., et al., Efficient multi-mode to single-mode coupling in a photonic lantern. Optics Express, 2009. (3), 1988.
- [11] Patel, C.K.N. Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO_2 . Physical review.(5A), 1187. 1964
- [12] Siegman, A. How to (maybe) measure laser beam quality. Optical society of America 1998.
- [13] Snitzer, E. Optical maser action of Nd^{3+} in a barium crown glass. Physical Review Letters, (12), 444, 1961.
- [14] Stone, J. and C.A. Burrus, Neodymium-doped silica lasers in end-pumped fiber geometry. Applied Physics Letters,(7) 388, 1973.
- [15] Walraven, C.E. and R.G. Wiley, Method for heat stripping optical fibers, Google Patents, 1999
- [16] Yablon, A.D., Optical fiber fusion splicing, Springer Science & Business Media, (103), 2005

- [17] R.J. Mears, L. Reekie, I.M. Jauncey, D.N. Payne, low-noise erbium-doped fibre amplifier operating at 1.54 μ m, Electronics letters, 1987
- [18] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, and B. C. McCollum, Erbium fiber laser amplifier at 1.55 μ m with pump at 1.49 μ m and yb sensitized Er oscillator, OSA, 1988
- [19] E. Snitzer¹ and R. Woodcock, Yb³⁺ – Er³⁺ glass laser, Appl. Phys. Lett., 1965
- [20] Paschotta, Rüdiger, et al. ytterbium-doped fibre amplifiers. IEEE Journal of quantum electronics, 1049, 1997
- [21] Koplow, Jeffrey P., David V. Kliner, and Lew Goldberg. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier. Optics letters, 442, 2000
- [22] Becker, Philippe M., Anders A. Olsson, and Jay R. Simpson. Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology, Academic press, 1999.
- [23] Koponen, Joonas, et al. Photodarkening rate in yb-doped silica fibers. Applied optics, 1247, 2008.
- [24] Zenteno, Luis. High-power double-clad fiber lasers. Journal of Lightwave Technology, 1435, 1993.
- [25] Richardson, D. J., J. Nilsson, and W. A. Clarkson. High power fiber lasers: current status and future perspectives , B63-B92, 2010.
- [26] Brown, David C., and Hanna J. Hoffman. Thermal, stress, and thermo-optic effects in high average power double-clad silica fiber lasers. IEEE Journal of quantum electronics 207, 2001
- [27] Gonthier, Francois. Method and device for optically coupling optical fibres. U.S. Patent No. 8,891,920. 18 Nov. 2014.

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı SOYADI : Tuğba ÖZTAŞ
Doğum Tarihi ve Yeri : 10 / 07 /1988 – ANKARA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : tugbaoztass@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

<u>Derece</u>	<u>Alan</u>	<u>Üniversite Adı</u>	<u>Mezuniyet Yılı</u>
Lisans	Fizik Bölümü	Anadolu Üniversitesi	2012

İŞ TECRÜBESİ:

<u>Yıl</u>	<u>Firma / Kurum</u>	<u>Görevi</u>
1. 01/02/2012 – 20 / 03 / 2013	Bilkent Üniversitesi	Proje Mühendisi
2. 20/03/2013 -	ERMAKSAN	Ar-Ge Mühendisi

BİLİMSEL ÇALIŞMALARI:

• **Makaleler**

1. Alkis, S., Öztaş, T., Aygün, L. E., Bozkurt, F., Okyay, A. K., & Ortaç, B. (2012). Thin film MoS₂ nanocrystal based ultraviolet photodetector. Optics express, 20(19), 21815-21820.
2. Oztas, T., Sen, H. S., Durgun, E., & Ortaç, B. (2014). Synthesis of Colloidal 2D/3D MoS₂ Nanostructures by Pulsed Laser Ablation in an Organic Liquid Environment. The Journal of Physical Chemistry C, 118(51), 30120-30126.
3. Demirel, A., Öztaş, T., Kurşungöz, C., Yılmaz, İ., & Ortaç, B. (2016). Synthesis of blue-shifted luminescent colloidal GaN nanocrystals through femtosecond pulsed laser ablation in organic solution. Journal of Nanoparticle Research, 18(5), 1-10.

• **Sözlü Bildiriler**

1. “Generation of Gallium Nitride Nano Particles in Organic Solution Using

Pulse Laser Ablation” A.Demirel, T. Öztaş, B. Ortaç and İ. Yılmaz, ICECCO 2012, Turgut Özal University, Ankara, Turkey, 1-3 November (2012)

2. “Synthesis of Colloidal 2D/3D MoS₂ Nanostructures by Pulsed Laser Ablation in Different Liquids” T. Öztaş, B. Ortaç, NanoTR 9, Ataturk University, Erzurum, Turkey, 24-28 June 2013
3. “Comparison of GaN nanoparticle generation through nanosecond and femtosecond laser ablation in organic liquid environment” A.Demirel, T. Öztaş, B.Ortaç and İ. Yılmaz, NanoTR 9, Ataturk University, Erzurum, Turkey, 24-28 June (2013)

- **Yazılı Bildiriler**

1. “Generation of 2D and 3D MoS₂ Nanosturctures for Photonic Applications” T.Öztaş, S. Alkış, L.E. Aygün, F. Bozkurt, A.K. Okyay, B.Ortaç, 15. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı / Aselsan/ Ankara / Turkey/ 06 september (2013)
2. “WS₂ Nanomaterials Generation by Using Pulsed Laser Ablation in Organic/Inorganic Mediums” E.G. Özkan, T. Öztaş and B.Ortaç , 15. Ulusal Optik, Elektro-Optik ve Fotonik Çalıştayı / Aselsan/ Ankara / Turkey/ 06 september (2013)

- **Projede görev alma**

1. “500 W Fiber Lazer Rezonatör ve Lazer Kesme Sistemlerinin Geliştirilmesi” SAN-TEZ (2012 – 2014) Tamamlandı
2. “Metal Kesim Sektöründe Kullanılmak Üzere Yüksek Güçlü Fiber Lazer Rezonatör Tasarımı Ve Prototip İmalatı” TEYDEP 1501 (2013-2016) Tamamlandı