

**HIZLANDIRICI UYGULAMALARINA YÖNELİK ELEKTRON
DEMETİ ÜRETİMİ İÇİN KÜME-MODLU FİBER LAZER
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

ÖNDER AKÇAALAN

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MİKRO VE NANO TEKNOLOJİ ANABİLİM DALI**

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

ARALIK 2013

ANKARA

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Necip CAMUŐCU
Müdü

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığı onaylarım.

Prof. Dr. Turgut BAŞTUĞ
Anabilim Dalı Başkanı

ÖNDER AKÇAALAN tarafından hazırlanan HIZLANDIRICI UYGULAMALARINA YÖNELİK ELEKTRON DEMETİ ÜRETİMİ İÇİN KÜME-MODLU FİBER LAZER SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Saleh SULTANSOY
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Turgut BAŞTUĞ

Üye : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY

Üye : Yrd. Doç. Dr. F. Ömer İLDAY

Üye : Doç. Dr. Hamza KURT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali BOZBEY

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Önder AKÇAALAN

Üniversitesi : TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü : Fen Bilimleri
Anabilim Dalı : Mikro ve Nano Teknoloji
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY
Tez Türü ve Tarihi : Yüksek Lisans – Aralık 2013

Önder AKÇAALAN

HIZLANDIRICI UYGULAMALARINA YÖNELİK ELEKTRON
DEMETİ ÜRETİMİ İÇİN KÜME-MODLU FİBER LAZER
SİSTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Fiber lazerlerin sahip olduğu ışın kalitesi, tekrarlanabilirlik, düşük maliyet ve yüksek kazanç güçlendirmesi gibi özelliklerden dolayı, tıp, savunma alanı, birçok sanayi uygulamasında ve özellikle hızlandırıcıların elektron demeti üretimi gibi alanlarda etkisi artmıştır. Bu çalışmada parçacık hızlandırıcıların elektron demeti üretiminde kullanılan lazer sistemlerinden biri olan küme-modlu fiber lazer sistemi incelenmiştir.

Tezin birinci bölümünde hızlandırıcılarda elektron üretimi kaynaklarından biri olan lazerlere giriş yapılacaktır. Lazerin nasıl oluştuğu anlatıldıktan sonra lazer türlerinden bahsedilecektir. Lazer türlerinden biri olan fiber lazerin diğer türlerden üstünlüklerinden bahsedilecektir. İkinci bölümde, fiberin tarihi geçmişinden ve birkaç önemli özelliklerinden bahsedilecektir. Bunlara ek olarak birkaç değişik fiber türü anlatılacak ve ikinci bölümün sonunda fiber lazer sistemlerde kullanılan birkaç önemli fiber optik bileşen açıklanmaya çalışılacaktır. Üçüncü bölümde optik fiber bileşenlerden olan pompa ve sinyal birleştirici ile fiber çıkış adaptörü bileşenlerinin nasıl yapıldığı anlatılacaktır. Dördüncü bölümde ise fiber lazer güçlendirici sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar aktarılacaktır. Bunlardan ilki normal atımlarla oluşturulan ve $100\mu\text{J}$ atım enerjisine sahip kip-modlu Yb-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemi ve diğeri küme-modlu atımlarla oluşturulan 1mJ atım enerjisine sahip kümemodlu Yb-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemidir.

Anahtar Kelimeler: Fiber, lazer, fiber lazer, küme-modlu fiber lazer, elektron demeti üretimi kaynakları.

University : TOBB University of Economics and Technology
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Micro and Nano Technology
Supervisor : Prof. Dr. Saleh SULTANSOY
Degree Awarded and Date : M.Sc. – December 2013

Önder AKÇAALAN

DEVELOPMENT OF THE BURST-MODE FIBER LASER
SYSTEM FOR ELECTRON BEAM GENERATION IN
ACCELERATORS

ABSTRACT

Fiber lasers have gained a huge significance for several applications, including medicine, defence area, industrial area and especially in accelerators for electron beam generation due to beam quality, repeatability, low cost, and high power amplification. In this work, a burst-mode fiber laser system which is one of the laser system for electron beam generation in accelerators was examined.

In the first part of the thesis, electron beam sources for accelerator will be examined and the concept of the laser will be explained. In this part, how the laser is generated will be presented. Also the advantages will be told for fiber laser system among the other types of laser. In the second part, the history of the general fiber will be tried to explain. In addition, some speciality for the fibers will be examined. After explaining some types for fibers, some important fiber optic devices will be examined. In the third part, production of some fiber optic devices such as pump and signal combiner and endcap will be presented. In the fourth part, the study for the development of the fiber laser system will be explained. The first application is $100\mu\text{J}$ pulse energy from an all Yb-doped fiber amplifier system and the other one is 1mJ pulse bursts from a Yb-doped fiber amplifier system.

Keywords: Fiber, laser, fiber laser, burst-mode fiber laser, electron beam generation sources.

TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak danışman hocamlarından olan F. Ömer İLDAY'ın ve Saleh SULTANSOY'un, çalışmamda gösterdiği ilgi ve desteklerinden dolayı teşekkür etmek istiyorum. Tez çalışma sürecinde, her türlü konuda bilgilerinden yararlanma fırsatı bulduğum için kendimi şanslı görüyorum.

Tez çalışmamda bana önderlik eden ve edindiğim bilgilerin çoğuna ona borçlu olduğum Hamit KALAYCIOĞLU'na teşekkürlerimi borç bilirim. Laboratuvarda geçirdiğimiz zaman boyunca sadece işle ilgili değil birçok konuda yardım ettiği için de kendisine minnettarım.

Seydi YAVAŞ, Levent BUDUNOĞLU, Parviz ELAHI, Sinem YILMAZ, Kutan GÜREL, Emrah İLBEY, Ihor PAVLOV, Mutlu ERDOĞAN, Çağrı ŞENEL, Can KERSE, Burak ELDENİZ, Gizem ERKİLET, Kıvanç ÖZGÖREN, Bülent ÖKTEM, Andrey RYBAK, Ebru ve Alper BAYRI ve diğer Ultrafast Optik Laboratuvar'ı çalışanlarına verdikleri her türlü destek için teşekkür ederim.

Nanoteknoloji Araştırma Merkezi yöneticisi Ekmel ÖZBAY'a tez sürecinde bana vermiş olduğu destekten dolayı minnettarım.

Mutlu GÖKKAVAS, Aylin YERTUTANOL, Serdar ÖĞÜT, Seval DÖNERTAŞ, Yasemin AŞIK, Evren ÖZTEKİN, Gamze SEĞMENOĞLU, Nursel AŞICI ve diğer Nanoteknoloji Araştırma Merkezi çalışanlarına da gösterdikleri yakın ilgi ve destekleri için teşekkürlerimi sunuyorum.

Tez jürisinde yer alan ve tezim ile alakalı önerilerde bulunan Turgut BAŞTUĞ, Hamza KURT ve Ali BOZBEY hocalarıma da teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, bu yaşıma kadar her kararımda arkamda duran, ihtiyacım olsun olmasın hiçbir zaman desteğini esirgememiş olan Yasemin AKÇAALAN, Ömer AKÇAALAN ve Tamer Yaşar AKÇAALAN'a minnettarım.

İçindekiler

1 GİRİŞ	1
1.1 Elektron Demeti Üretim Kaynakları	1
1.1.1 Termiyonik Emisyon	2
1.1.2 Fotoelektrik Emisyon	3
1.2 Lazer	5
1.3 Lazer Kazancı	6
1.3.1 2 Seviyeli Sistemler	8
1.3.2 3 Seviyeli Sistemler	9
1.3.3 4 Seviyeli Sistemler	11
1.4 Lazer Türleri	13
1.4.1 Gaz Lazerler	13
1.4.2 Katı Hal Lazerler	14
1.4.3 Kimyasal Lazerler	15
1.4.4 Fiber Lazerler	15

2 FİBER LAZERLER	17
2.1 Optik Fiberlerin Geçmişi	17
2.2 Optik Fiberlerin Karakteristikleri	19
2.3 Optik Fiber Türleri	24
2.3.1 Tek modlu fiberler	24
2.3.2 Çok modlu fiberler	25
2.3.3 İki-Kılıf Fiberler	25
2.3.4 Kutuplama Koruyan Fiberler	28
2.4 Fiber Lazer Bileşenleri	30
2.4.1 Pompa Birleştirici	31
2.4.2 Pompa ve Sinyal Birleştirici	32
2.4.3 Akusto-Optik Modülator	32
2.4.4 Çıkış Fiber Adaptörü	33
2.4.5 Optik Yalıtıcı Bileşeni	34
3 Fiber Lazerler İçin Kaynaşık Fiber Bileşen Üretimi	36
3.1 Pompa ve Sinyal Birleştirici Üretimi	36
3.2 Fiber Çıkış Adaptörü Üretimi	41
4 Fiber Lazer Güçlendirici Sistem Geliştirilmesi	45
4.1 100MHz Tekrarlama Frekanslı Osilatör	45

4.2	100 μ J Atım Enerjisine Sahip Kip-Kilitli <i>Yb</i> -Katkılı Fiber Lazer Güçlendirici Sistemi	47
4.3	1mJ Atım Enerjisine Sahip Küme-modlu <i>Yb</i> -katkılı Fiber Lazer Güçlendirici Sistemi	52
4.4	Fiber Lazer Güçlendirici Sistemlerin Karşılaştırılması	56
4.5	Elektron Demeti Üretimi İçin Yorumlar	57
4.5.1	2. Harmonik Üretimi ile Elektron Demeti Üretimi	58
4.5.2	Multifoton Etkileşimi ile Elektron Demeti Üretimi	58
5	SONUÇ	61
	KAYNAKLAR	62
	ÖZGEÇMİŞ	65

Şekil Listesi

1.1	Basit bir termiyonik emisyon düzeneği [1]	3
1.2	Fotoelektrik emisyonun oluşumu	4
1.3	Basit bir lazer şekli	5
1.4	Emilim, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon	6
1.5	Lazer Kazancı	7
1.6	Nüfus ters dönmesi için pompalama	8
1.7	2 seviyeli sistem	8
1.8	3 seviyeli sistem	10
1.9	4 seviyeli sistem	11
1.10	Tüm sistemler	12
1.11	Lazer türlerinin karşılaştırılması	16
2.1	Işık çeşmesi olarak adlandırılan ve ışığın yönlendirilebildiğini gösteren ilk deney	18
2.2	Basit bir optik fiber yapısı	19
2.3	Optik fiberde nüve ve kılıf yapısı	20

2.4	Dalgaboylarına karşılık gelen fiber optik kayıplar [27]	22
2.5	Rayleigh saçılımı	23
2.6	İki cladli optik fiber	26
2.7	İki cladli fotonik kristal fiber	27
2.8	İki kılıflı fiberlerin kaplama türleri [29]	27
2.9	Kutuplamayı koruyan fiberlerin yapısı, bowtie	29
2.10	Geçme uzunluğu ölçümünde spektrum çıkışı	30
2.11	çentik birleştirme, açılı birleştirme, incelterek birleştirme [30]	31
2.12	Pompa ve sinyal birleştirici bileşen şematığı	32
2.13	Basit bir akusto-optik modulator şematığı [31]	33
2.14	Fiber çıkış adaptörü şematığı	34
2.15	Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşen [34]	35
2.16	Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşen [34]	35
3.1	(a) Yüksek güçlü lazerlerin yükseltgeç şeması, (b) pompa-sinyal birleştirici şematığı, (c) çift kılıfa sahip fiber	37
3.2	1100 μm dış çapa ve 800 μm iç çapa sahip florin katkılı cam tüp	37
3.3	Cam tüpün inceltilmesi	38
3.4	İnceltmiş cam tüp	38
3.5	Cam tüpün temizlenmesi	39
3.6	6 adet pompa ve 1 adet sinyal fiberi	40

3.7	Cam tüpün içerisinde fiberlerle birlikte inceltilmesi	40
3.8	Tüp ucunun "0" açılı kesilmesi	41
3.9	Pompa-sinyal birleştirici üretiminde tüpten bir kesit	42
3.10	150 μm uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü (solda), 300 μm uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü (sağda)	44
3.11	Çeşitli uzunluklarda üretilen fiber çıkış adaptörleri 750 μm (üstte), 50 μm (sol altta), 400 μm (sağ altta)	44
3.12	650 μm uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü	44
4.1	Kip-kilitli mod	47
4.2	100 μJ atım enerjisine sahip kip-kilitli Yb-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemi	48
4.3	Chirped Atım Güçlendirici sistemi	49
4.4	Atım seçme (100MHz'den 25kHz'e)	50
4.5	Fiber lazer güçlendirici	51
4.6	Fiber lazer güçlendirici sonrası spektrum	51
4.7	Atım daraltma işlemi	52
4.8	Normal atım ve küme-modlu atım	53
4.9	Küme-modlu fiber lazer sistemi	54
4.10	AOM kapısının etkisi: a) homojen olmayan atımlar, b) homojen olan atımlar	54
4.11	Küme-mod fiber lazer sistem sonuçları: a) 11 atımlı küme-mod, b) 25 atımlı küme mod	55

4.12	Küme-mod fiber lazer sistem sonuçları: a) 25 atımlı küme-modun spektrum çıkışı, b) 25 atımlı küme-modun atım genişliği [41] . . .	55
4.13	Küme-modlu lazer sistemlerinde işlemlenen materyal bölgesinin zamanla sıcaklık değişimi [43]	57
4.14	25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemin (siyah), 100MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin (mavi) ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin karşılaştırması (kırmızı) [42]	58
4.15	25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemin, 100MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin dış dokusu üzerinde yapılan deney sonuçları [42]	59
4.16	İki-foton emilimi	59
4.17	(a) Aynı atım enerjilerinde değişik atım genişliklerin karşılaştırılması, (b) Atım genişliği ile elektriksel yük arasındaki ilişki	60

Tablo Listesi

1.1	Materyallerin akım, iş fonksiyonu ve sıcaklık bilgileri[3]	3
1.2	Bazı fotokatot materyellerin kuantum verimliliği ve kritik azami dalgaboyları [2]	5
2.1	Birkaç pompa birleştirici yapısı [30]	32

1. GİRİŞ

Son yıllarda lazer teknolojisinin gelişmesiyle, lazer sistemlerinin kullanım alanları oldukça genişlemiştir. Mesela tıp alanında foto-akustik mikroskop, nano-cerrahi, endüstri alanında materyal işleme, savunma alanında üç boyutlu görüntüleme sağlayan LADAR örnek olarak gösterilebilir. Hatta lazer teknolojisi, nükleer ve yüksek enerji fiziğinde, hızlandırıcıların elektron demeti üretimi kaynağı olarak da kullanılmaktadır. Bu çalışmada da elektron demeti üretim kaynaklarında kullanılan lazer sistemlerinin bir türü olan, fiber lazer sistemleri üzerinde durulacaktır.

Altbölüm 1.1'de elektron demetinin üretiminde kullanılan kaynaklar kısaca anlatılacaktır. Altbölüm 1.2'de lazerlerin nasıl oluştuğundan bahsedilecektir. Altbölüm 1.3'te lazer türlerinden kısaca bahsedilip fiber lazerlerin diğer tür lazerlere göre negatif ve pozitif yönlerine yer verilecektir.

1.1 Elektron Demeti Üretim Kaynakları

Elektron demeti kullanımı, materyal işleme, sterilizasyon, gibi birçok teknolojik alanda kendine yer bulmaktadır. Elektron demeti, bahsedilen teknolojik alanların dışında daha egzotik alanlar olan nükleer ve yüksek enerji fiziğinde de kullanılmaktadır.

Elektron demeti üretimi için kullanılan belli başlı kaynaklar sırasıyla termiyonik emisyon ve fotoelektrik emisyonudur. Bu kısımda termiyonik ve fotoelektrik

emisyonundan kısaca bahsedilecektir.

1.1.1 Termiyonik Emisyon

Metallerdeki elektronların enerji dağılımı, Fermi-Dirac dağılımı ile gösterilir. Bu dağılım metal için verilen dalga fonksiyonuna ve spin polaritesine göre sadece bir adet iletim elektronuna sahip olduğunu ispatlamaktadır. dE enerji aralığındaki $n(E)$ elektron yoğunluğu,

$$n(E)dE = \left[\frac{4\pi(2m_e)^{\frac{3}{2}}}{h^3} \right] \sqrt{E} [1 + \exp(\frac{E-E_{Fermi}}{kT})]^{-1} dE$$

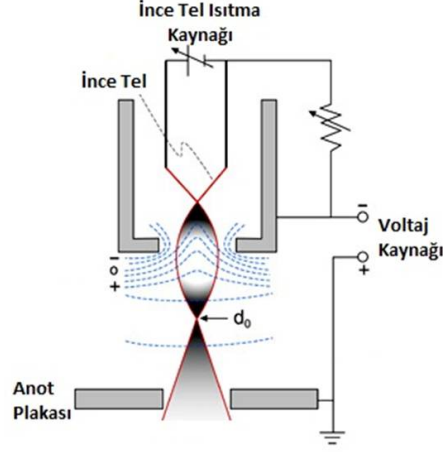
formülünden bulunur. m_e elektron kütlesi, h Planck sabiti, k Boltzmann sabiti, T metalin sıcaklığıdır. E_{Fermi} , $T = 0K$ 'deki en yüksek enerji seviyesidir. Metalin sıcaklığı arttıkça, elektronlar daha yüksek enerji konumlarına geçer ve bunlardan bazıları metalin iş fonksiyonunun üstünde olabilir. Bu metal iş fonksiyonunun üstünde olan elektronların yoğunluğu toplanırsa, metalden çıkartılan elektronların yoğunluğunun akımını veren Richardson-Dushman denklemi ortaya çıkar [2].

$$J = A_G T^2 \exp(\frac{-e\phi_{is}}{kT})$$

T : metalin sıcaklığı, ϕ_{is} : iş fonksiyonu, k : Boltzmann sabiti, A_G : $\frac{ampere}{cm^2 K^2}$ biriminde teorik bir değerdir ve katotun cinsine göre değişkenlik göstermektedir.

Akımın, materyalin sıcaklığının karesiyle doğru orantılı olduğu gözlemlenmektedir. Aynı zamanda iş fonksiyonuyla da ters orantılıdır. Yani iş fonksiyonu ne kadar düşükse akım o kadar fazla olacaktır. Tablo 1.1'de bazı materyallerin bilgileri yer almaktadır.

Tablo 1.1 incelendiğinde sıcaklığın en yüksek seviyede olduğu metal tungsten ve tantal'dır. Sezyumun ise erime sıcaklığı düşük olmasına rağmen iş fonksiyonu diğerlerine göre oldukça düşüktür. Fakat sıcaklığın etkisi, iş fonksiyonundan daha fazla olduğu için tungsten ve tantal elektron demeti üretimi kaynaklarında daha çok tercih edilmektedir [2].



Şekil 1.1: Basit bir termiyonik emisyon düzeneği [1]

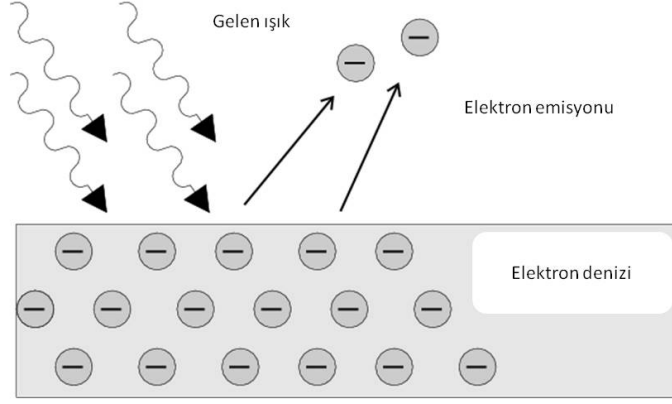
Tablo 1.1: Materyallerin akım, iş fonksiyonu ve sıcaklık bilgileri[3]

Materyal cinsi	Akım (A)	İş fonksiyonu (eV)	Sıcaklık (K)
Tungsten	60	4.54	2500
Toryum Katkılı Tungsten	3	2.63	1900
Karışık Oksitler ¹	0.01	1	1200
Sezyum	162	1.81	300
Tantal	60	3.38	2500
Sezyum/Oksijen/Tungsten	0.003	0.72	1000

Metallerin yüzeyleri kaplanarak iş fonksiyonunu düşürmek olasıdır ve böylece en iyi katotlar elde edilmiş olur. W , Ta , or Mo yüzeylerine kaplama olarak toryum veya baryum gibi oksitler kullanılabilir. Fakat bu kaplamalar katotların ömürlerini kısaltmaktadır ve dezavantaj oluşturmaktadırlar [2].

1.1.2 Fotoelektrik Emisyon

İş fonksiyonundan yüksek enerjiye sahip bir foton, materyalin üzerine çarptığı zaman bir elektron çıkartır ve buna fotoelektrik emisyon adı verilir. Emisyona sebep olan fotonun frekansı kullanılarak,



Şekil 1.2: Fotoelektrik emisyonun oluşumu

$$hv = e\phi_{is} + KE$$

h , planck sabiti, ϕ_{is} : iş fonksiyonu, v , fotonun frekansı, KE , kinetik enerji

formülü elde edilir. Fotonun sahip olduğu fazla enerji, çıkan elektronun kinetik enerjisinin artmasına neden olur. Fotoelektrik emisyonda, elektron demeti üretimi için en önemli gösterge kuantum verimliliğidir. Kuantum verimliliği ise gelen fotonlardan ne kadar elektron emisyonu oluştuğu ile alakalıdır. Bu yüzden kuantum verimliliği foton enerjisinin bir fonksiyonudur. Metaller için fotonlar ultraviyole enerji aralığındadır. Fakat metaller ultraviyole dalgaboyunda iyi bir yansıtıcı özellik gösterdiği için elektron emisyon oranı azdır. Bu da kuantum verimliliğini düşürmektedir [2].

Metaller yerine yarı-iletken metaller kullanılarak kuantum verimliliğini artırmak mümkündür. Çünkü fotonların yarı-iletken materyellerdeki nüfuz etme oranı daha fazladır. Tabloda metallerin ve yarı-iletken materyellerin kuantum verimlilikleri karşılaştırılması yapılmaktadır. Cs_2Te elektron demeti üretiminde en çok kullanılan yarı-iletken fotokatot materyeli olmuştur. Tablo 1.2'de bazı materyellerin kuantum verimlilikleri gözlemlenmektedir [2].

Tablo 1.2: Bazı fotokatot materyellerin kuantum verimliliği ve kritik azami dalgaboyları [2]

Materyal	Kuantum verimliliği (%)	Dalgaboyu (nm)
<i>Cu</i>	0.01	267
<i>K₂CsSb</i>	29	590
<i>Cs₂Te</i>	12.4	350
<i>GaAs : Cs</i>	17	225

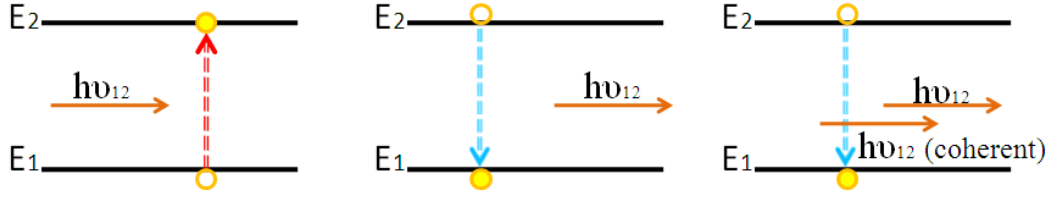


Şekil 1.3: Basit bir lazer şekli

Tez çalışmasında foton kaynağı olarak lazer sistemlerinden biri olan fiber lazer sistemleri kullanılmıştır. Fiber lazer sistemlerine geçmeden önce lazerin ne olduğundan ve çalışma prensiplerinden bahsedilecektir.

1.2 Lazer

Lazer (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation), uyarılmış emisyonu bağlı olarak ışığın optik olarak güçlendirilmesini sağlayan bir araçtır. Lazer kaynaklarının diğer kaynaklardan en önemli farkı hem uzaysal hem de zamansal olarak eş fazlı olmasıdır. Uzaysal eş fazlılık lazer kaynaklarında ışığın dağılmadan uzun mesafelerde yol almasına yardımcı olur. Zamansal eş fazlılık ise ışığın dar bir dalgaboyu genişliğine sahip olmasına yani lazer kaynağının tek bir dalgaboyuna sahip bir ışık yaymasına yardımcı olarak, femtosaniye mertebesinde atımlar elde edilmesinde etkilidir [4].



Şekil 1.4: Emilim, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyon

1.3 Lazer Kazancı

Genel bir lazer sisteminde 3 ana bileşen bulunur. Bunlar, enerji üretilen bir adet kazanç ortamı, kazanç ortamında ışığı güçlendirmek için lazer pompa enerjisi (elektriksel veya foton şeklinde olabilir), kazanç ortamı içinde kalacak şekilde, bir ucunda tam yansıtıcı diğer ucunda ışığın bir kısmını kavite dışına aktaracak iki adet aynadan oluşan bir adet kavitedir.

Bu bileşenler lazerin oluşmasına yetmemektedir. Şekil 1.3'te görüldüğü üzere eğer ışık kavite içerisinde $I_3 \geq I_0$ seviyesindeki yoğunluğa ulaşırsa lazer oluşumu gözlemlenir. Yani kazancın kayıptan daha çok olması gerekmektedir. Buna da eşik değeri denir. Bu eşik değerinin üstüne çıkılması için ışığın, sistemdeki atomlarla etkileşimi incelenmesi gerekmektedir. 1916 yılında Einstein üç adet olası etkileşim ortaya koymuştur. Bunlar emilim, kendiliğinden emisyon ve uyarılmış emisyonudur.

Eğer atom alt enerji seviyesinde ise foton emilimi oluşabilir. Eğer atom daha yüksek enerji seviyelerinde ise, uyarılmış emisyon gerçekleşerek gelen fotonla aynı özellikleri taşıyan yeni bir foton oluşabilir. Son etkileşim ise kendiliğinden emisyonudur. Bu etkileşimde ise enerji olarak üst seviyelerde bulunan atom, bağımsız olarak kendiliğinden bir adet foton emisyonu yapar. Şekil 1.4'te, 2 seviyeli sistem için bu etkileşimler basitçe gösterilmektedir.

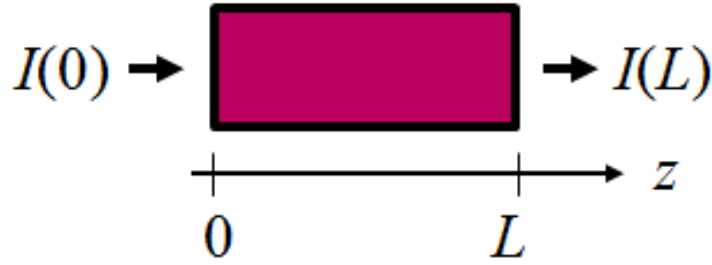
Emilim Oranı: BN_1I

Kendiliğinden Emisyon Oranı: AN_2

Uyarılmış Emisyon Oranı: BN_2I

N_i , i 'nci basamaktaki molekül yoğunluğu, I ışığın (irradiance) gücü, A ve B Einstein değişkenleridir.

Lazerde kazanç oluşması da üstte verilen etkileşimler sayesinde olmaktadır. Şekil 1.5 basit bir lazer kavitesini göstermektedir. Eğer kendiliğinden emisyon ihmal edilirse,



Şekil 1.5: Lazer Kazancı

$$\frac{dI}{dt} = c \frac{dI}{dz} = BN_2I - BN_1I = B[N_2 - N_1]I$$

Çözümü,

$$I(z) = I(0) \exp(\sigma[N_2 - N_1]z)$$

N_2 ve N_1 'in durumuna göre kayıp veya kazanç oluşur.

$N_2 > N_1$: $g = [N_2 - N_1]\sigma$ kazanç oluşur.

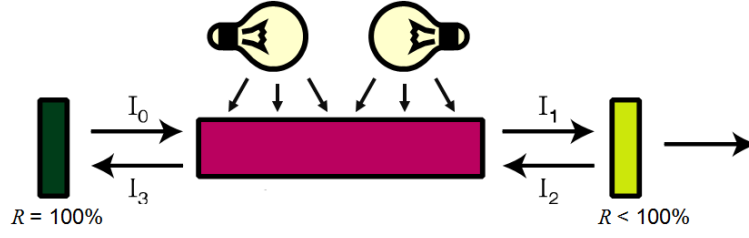
$N_2 < N_1$: $\alpha = [N_1 - N_2]\sigma$ kazanç oluşmaz.

Eğer kazanç $G > 1$ ise uyarılmış emisyon, emilimden yüksek olduğu anlaşılır. Yani

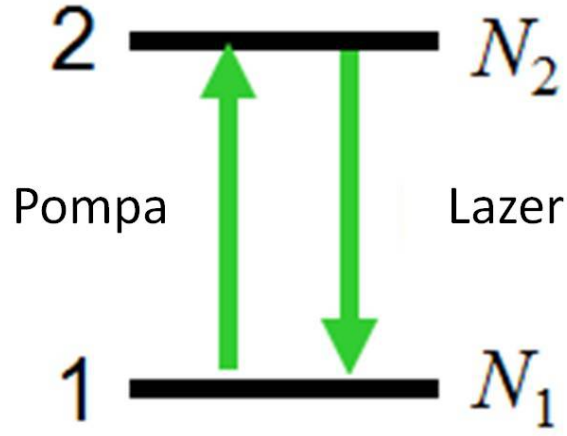
$$BN_2I > BN_1I \text{ veya } N_2 > N_1$$

Bu şarta nüfus ters dönmesi (population inversion) denir. Bu şart kararlı olan durumlarda gerçekleşmez. Bu yüzden durumu kararsızlaştırmak gerekir. Bu kararsızlaştırmayı da kavite içerisinde yer alan kazanç ortamını uyararak gerçekleştirmek mümkündür.

Şekil 1.6'da verilen ışığın yoğunluğunun yeterli olup olmadığı lazer kazanç



Şekil 1.6: Nüfus ters dönmesi için pompalama



Şekil 1.7: 2 seviyeli sistem

ortamının enerji seviyeleri belirlemektedir. Enerji seviyeleri bakımından en basit sistem, 2 seviyeli sistemlerdir. Bu sistemlerde 2 adet enerji seviyesi vardır şekil 1.7.

1.3.1 2 Seviyeli Sistemler

Her iki seviyedeki molekül yoğunlukların denklemleri

$$\begin{aligned}\frac{dN_2}{dt} &= BI[N_2 - N_1] - AN_2 \\ \frac{dN_1}{dt} &= BI[N_2 - N_1] + AN_2\end{aligned}$$

Eğer toplam molekül sayısı N ise

$$N = N_1 + N_2, \Delta N = N_1 - N_2, 2N = N + \Delta N$$

olarak bulunur.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{d\Delta N}{dt} &= -2BI \Delta N + 2AN_2 \\ \Rightarrow \frac{d\Delta N}{dt} &= -2BI \Delta N + AN - A \Delta N \end{aligned}$$

ΔN 'in zamanla değişmediği bir durum için,

$$\begin{aligned} 0 &= -2BI \Delta N + AN - A \Delta N \\ \Rightarrow (A + 2BI) \Delta N &= AN \end{aligned}$$

ΔN yalnız bırakılırsa,

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta N &= AN/(A + 2BI) \\ \Rightarrow \Delta N &= N/(1 + 2BI/A) \\ \Rightarrow \Delta N &= \frac{N}{1+2I/I_{sat}}, I_{sat} = A/B \end{aligned}$$

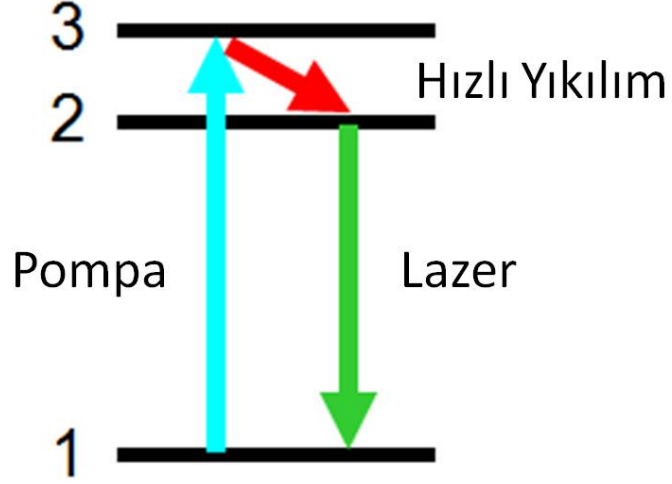
I ne olursa olsun ΔN her zaman pozitif çıkmaktadır. Bu yüzden 2 seviyeli sistemlerde nüfus ters dönmesi oluşması imkansızdır.

1.3.2 3 Seviyeli Sistemler

3 seviyeli sistemlerde üç adet enerji seviyesi bulunmaktadır. Şekil 1.8'de görüldüğü üzere, üçüncü enerji seviyesi ile ikinci enerji seviyesinde hızlı bir geçiş vardır. Bu yüzden lazer oluşması ikinci ile birinci enerji seviyeleri arasında oluşmaktadır.

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} &= BIN_1 - AN_2 \\ \frac{dN_1}{dt} &= -BIN_1 + AN_2 \end{aligned}$$

Eğer toplam molekül sayısı N ve farkları ΔN ise



Şekil 1.8: 3 seviyeli sistem

$$N = N_1 + N_2, \Delta N = N_1 - N_2$$

olarak bulunur.

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta N}{dt} &= -2BI_1 + 2AN_2 \\ 2N_2 &= N - \Delta N \\ 2N_1 &= N + \Delta N \\ \Rightarrow \frac{d\Delta N}{dt} &= -2BIN - BI \Delta N + AN - A \Delta N \end{aligned}$$

ΔN 'in zamanla değişmediği bir durum için,

$$\begin{aligned} 0 &= -2BIN - BI \Delta N + AN - A \Delta N \\ \Rightarrow (A + BI) \Delta N &= (A - BI)N \end{aligned}$$

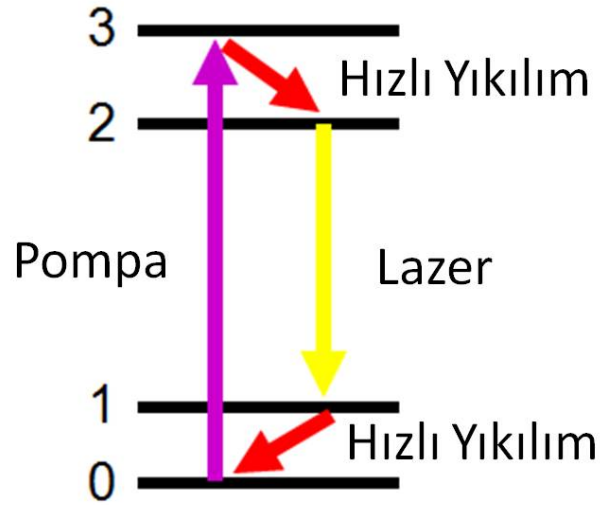
ΔN yalnız bırakılırsa,

$$\begin{aligned} \Rightarrow \Delta N &= N(A - BI)/(A + BI) \\ \Rightarrow \Delta N &= N \frac{1 - I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}, I_{sat} = A/B \end{aligned}$$

Eğer $I > I_{sat}$ ise ΔN negatif olmaktadır. Bu gibi durumlarda nüfus ters dönmesi gerçekleşir.

1.3.3 4 Seviyeli Sistemler

4 seviyeli sistemlerde dört adet enerji seviyesi bulunmaktadır. Şekil 1.9'da görüldüğü üzere, üçüncü enerji seviyesi ile ikinci enerji seviyesinde hızlı bir geçiş vardır. Buna ek olarak en alt iki enerji seviyesinde de hızlı bir geçiş evresi vardır. Bu yüzden lazer oluşması ikinci ile birinci enerji seviyeleri arasında oluşmaktadır.



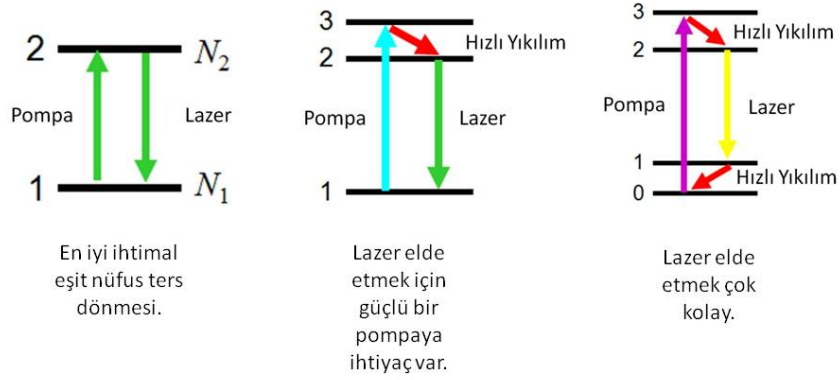
Şekil 1.9: 4 seviyeli sistem

$$\frac{dN_2}{dt} = BIN_0 - AN_2$$

Eğer toplam molekül sayısı N ise

$$N = N_0 + N_2, N_0 = N - N_2$$

olarak bulunur.



Şekil 1.10: Tüm sistemler

$$\frac{dN_2}{dt} = -BI(N - N_2) - AN_2$$

$$\Delta N \sim -N_2$$

$$\frac{dN}{dt} = BIN + BI \Delta N + A \Delta N$$

N 'in zamanla değişmediği bir durum için,

$$0 = BIN + BI \Delta N + A \Delta N$$

$$\Rightarrow (A + BI) \Delta N = -BIN$$

ΔN yalnız bırakılırsa,

$$\Rightarrow \Delta N = -BIN/(A + BI)$$

$$\Rightarrow \Delta N = -(BIN/A)/(1 + BI/A)$$

$$\Rightarrow \Delta N = -N \frac{I/I_{sat}}{1 + I/I_{sat}}, I_{sat} = A/B$$

ΔN her zaman negatif çıkar. Böylece 4 seviyeli sistemlerde, her durumda nüfus ters dönmesi oluşmaktadır.

Sonuç olarak, 4 seviyeli sistemlerde lazer ışınması elde etmek diğer iki sisteme

göre oldukça kolaydır. 3 seviyeli sistemlerde lazer ışması elde etmek için kazanç ortamını oldukça güçlü bir şekilde uyararak gerekir. 2 seviyeli sistemlerde ise her iki enerji seviyesinde de en iyi ihtimalle eşit bir nüfus elde edilir. Bu yüzden 2 seviyeli sistemlerde, lazer ışması gerçekleştirmek imkansızdır (şekil 1.10).

1.4 Lazer Türleri

Geçmişten günümüze kadar birçok lazer türü geliştirilmiştir. Geliştirilen bu lazerler azami ortalama güç, azami tepe gücü, azami atım enerjisi gibi birçok parametre ile birbirlerine göre üstünlük sağlarlar. Amaçları farklı olmasına rağmen bu lazerler çalışma prensibi olarak birbirlerine oldukça benzerdir. Bölüm 1.3'te bahsedilen kazanç tüm lazer sistemleri için geçerlidir. Yani bahsedilen bu tüm lazerler, sisteme enerji kazandırması için, bir adet kazanç ortamına sahiptir. Kazanç ortamındaki materyal, uyarılmış emisyonu gerçekleştirmek için uygun seçilmesi gerekir. Kazanç ortamından lazer ışını elde etmek için, kazanç ortamını uyaracak pompa gerekmektedir. Bu, herhangi bir ışık kaynağı olabileceği gibi elektriksel deşarj ile de kazanç ortamını uyararak mümkündür. Kazanç ortamını içinde bulunduracak bir adet kavite sayesinde geribesleme sistemi oluşturulur. Buna bağlı olarak lazer tipleri devamlı lazerler ve atım lazerler olacak şekilde iki türde kategorize edilebilir. Bu kısımda lazer sistemlerinden olan gaz lazerlerden, katı hal lazerlerden, kimyasal lazerlerden ve son olarak fiber lazerlerden bahsedilecektir.

1.4.1 Gaz Lazerler

Gaz lazerlerde kazanç ortamı olarak az yoğunlukta gaz materyalleri kullanılır. Gaz materyalleri atom, iyon veya molekül şeklinde olabilir. Gaz materyallerinin türü değişiklik gösterdikçe elde edilen lazer ışının dalgaboyu da değişiklik gösterir. Bu dalgaboyları 193 nm'den (excimer lazer) $10.7\mu\text{m}$ 'ye (karbondiyoksit lazer) kadar olabilir. Mesela Helyum, Neon, Argon veya karbondiyoksit bunlara örnek gösterilebilir. Gaz lazerlerin temel çalışma prensibi rezonant kavite sistemine

dayalıdır. Rezonant kavitesi kazanç ortamı olarak gaz materyal ile doludur. Gaz materyale temas edecek şekilde yerleştirilen elektrotlar deşarj edilerek kazanç ortamı uyarılır. Yani elektriksel enerji lazer ışımına dönüştürülür. Mesela en yaygın gaz lazer sistemi olan He-Ne lazer sisteminde Ne atomlarının uyarılması için He atomları, kazanç ortamındaki gaz materyalini oluşturur. Bu tür lazerlerin ortalama güçleri oldukça düşüktür. Bu yüzden holografi, girişim ve hizalama gibi işlemlerde kullanılabilir. Diğer bir gaz lazer türü olan karbondiyoksit lazerler ise yüz watt seviyesinde ortalama güce sahiptir. Karbondiyoksit lazerler, genelde RF deşarjı ile pompalanırlar ve devamlı ve atımlı ışınlar elde etmek mümkündür. Bu tür lazerlerin verimliliği oldukça düşüktür [5]. Bunlar daha çok kesme, delme gibi işlemlerde yani materyal işlemede kullanılırlar.

1.4.2 Katı Hal Lazerler

Katı hal lazerlerde kazanç ortamındaki materyal yoğun yapıda ve katı haldedir. Kazanç ortamı ise cam veya kristal yapıdadır. Bunlara örnek olarak Al_2O_3 , $Y_3Al_5O_{12}$ veya silica yapıdaki cam yani SiO_2 kullanılır. Cam ve kristal yapıdaki materyallerin farkı, camın kolay ve ucuz bir şekilde üretilmesi iken, kristallerin ısıl özellikleri daha iyidir. Neodymium, katı-hal lazerlerde en çok görülen dopant türüdür. Mesela, $Nd : YVO_4$, $Nd : YLF$ veya $Nd : YAG$. Bunların arasından $Nd : YAG$ -1064 nm çalışma dalgaboyuna sahip- en çok kullanılan türüdür. Yüksek ortalama güçlere - kW level - çıkılabildiği için kesme, delme veya işlemede oldukça yaygın bir şekilde kullanılır. Katı hal lazerler, devamlı veya atım şeklinde olabilir. Genel verimlilikleri, gaz lazerler gibi düşüktür. Bundan dolayı yüksek ortalama enerjilerine ulaşırken birçok ısıl problem oluşmaktadır. Fakat günümüz teknolojisi ile ısıl özellikleri daha iyi materyaller ile çalışılarak kW seviyelerine ulaşabilmektedir. Yüksek ortalama güçlere sahip en güzel örnek, ince disk lazerler olarak gösterilebilir [6].

1.4.3 Kimyasal Lazerler

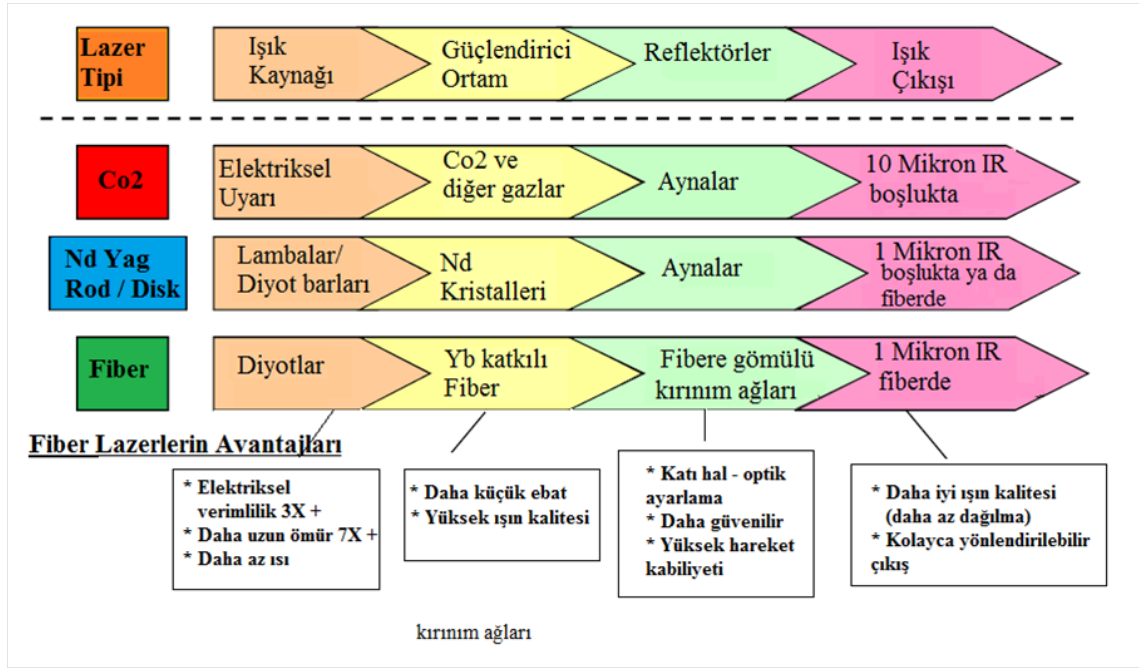
Kimyasal lazerlerde enerji sistemde yer alan kimyasal tepkimler sonucu oluşur. Bu yolla, megawattlar seviyesinde devamlı lazer elde etmek mümkündür. Sistemin dalgaboyu 1300 nm - 4200 nm arasında değişkenlik gösterebilir. Hidrojen florid en genel kimyasal lazer türlerinden biridir. Bu lazer türleri genellikle kesme ve delme gibi işlemlerin yanı sıra güçlü yüksek güçlerinden dolayı silah olarak da kullanılmaya müsaittirler.

1.4.4 Fiber Lazerler

Fiber lazerler lazer teknolojisinin son halkasıdır. Fiber lazer sistemlerinde kavite fiberdir. Pratiklik, dirençlilik, fiyat-performans, kolay taşınabilme gibi özelliklerinden dolayı diğer lazer teknolojilerinden üstündür. Fiber lazer sistemleri partik anlamda katı hal lazer sistemlere benzemekle birlikte ışığı hava yerine fiber içerisinde taşıyan bir sistemdir. Fiber teknolojisi fiber lazerlere yüksek verimlilik, güvenilirlik ve kompakt bir sistem haline getirir. Fiber lazer sistemlerde de yüksek güçlere çıkmak mümkündür. En önemli sebebi fiber lazer sistemlerde ışığın kayıpsız fiber içerisinde yol almasıdır. Fiberlerin geometrik yapısı ısıyı daha etkin bir şekilde yayarak, fiber lazer sistemlerinde yüksek güçlere çıkmasına yardımcı olur. Son geliştirmelerle fiber lazer sistemlerde 10kW ortalama çıkış gücüne ulaşılmıştır [7].

Fiber lazer sistemlerinde hem devamlı hem de atım lazer üretmek mümkündür. Elektron demeti üretimi için ya yüksek ortalama güçlere çıkılması ya da yüksek tepe güçleri elde edilmesi gerekir.

Fiber lazerler diğer lazer türlerine göre birçok alanda avantaja sahiptir. Bunlardan en önemlileri çalışma sürelerinin uzunluğu, özellikle endüstri alanı için ebatlarda oldukça küçülebilmesi, daha iyi ışın kalitesi ve ışık fiber içerisinde yol adığı için yönlendirme kolaylığıdır (şekil 1.11).



Şekil 1.11: Lazer türlerinin karşılaştırılması

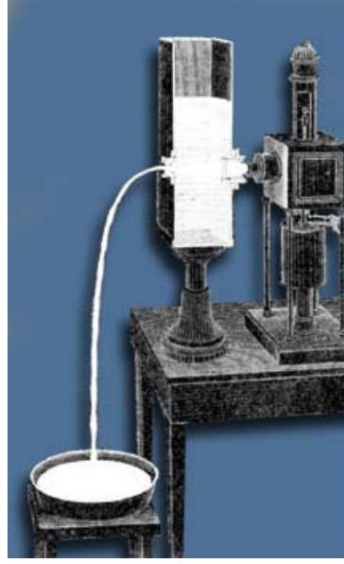
2. FİBER LAZERLER

Bir önceki bölümde lazerlerin nasıl oluştuğu ve çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Bu bölümde ise fiber lazerlerin ana kısmını oluşturan optik fiberlerin yapısından bahsedilecektir. Bunun yanında fiber lazer sistem bileşenlerinde kullanılan birkaç fiber türünden de bahsedilecektir. Son kısımda ise fiber lazer sistemlerde kullanılan birkaç önemli bileşenin işlevlerinden bahsedilecektir.

2.1 Optik Fiberlerin Geçmişi

Optik fiberler, ışık iletimi için cam veya plastik yapıda olup ve toplam iç yansımaya (total internal reflection) prensibine dayalı bir çalışma yapısına sahiptir. Toplam iç yansımaya yoluyla, ışık yönlendirme fikri ilk olarak 1854 yılında John Tyndall tarafından gösterilmiştir. Tyndall akan bir suyu kullanarak ışığa yön verilebildiğini göstermiş ve bunu “light fountain” yani ışık çeşmesi olarak adlandırmıştır [8]. 1920’lerde, cam materyali dalga kılavuzu seçilerek yapılan ilk optik fiber imal edilmiştir, ancak bu ilk üretilen optik fiberler ışığı daha iyi yönlendirmeyi sağlayan kılıf (cladding) yapısına sahip değildi [9].

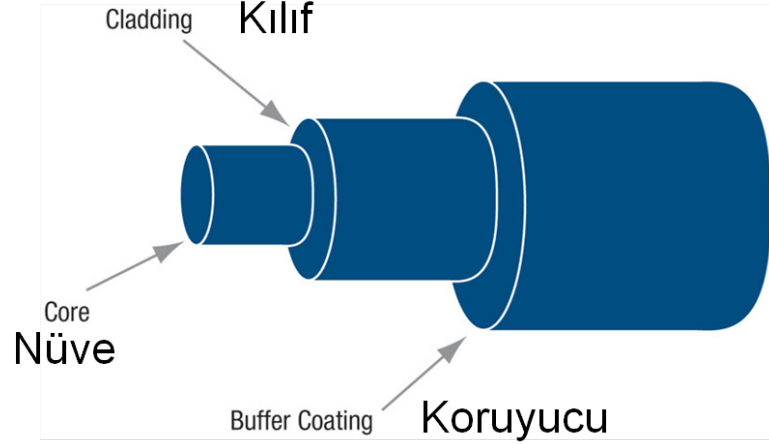
Işığı yönlendirme adına daha iyi performans gösteren, kılıfa sahip optik fiberler için 1950’lere kadar beklemek gerekti. 1950’lerde silika yapısına sahip ilk optik fiberler Hirschowitz tarafından üretildi fakat ışık bu üretilen optik fiberlerde, günümüzde kullanılan optik fiberlere göre oldukça fazla kayıplı bir şekilde yol almaktaydı [11, 12]. Bu kayıpların başlıca nedenleri Rayleigh saçılımını ve kızılotesi emilimidir. 1970’li yıllarda optik fiberlerde yeni bir teknoloji geliştirilmiş



Şekil 2.1: Işık çeşmesi olarak adlandırılan ve ışığın yönlendirilebildiğini gösteren ilk deney

ve Rayleigh saçılımını ve kızılötesi emilimini, $1.55\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip ışıklar için en düşük seviyeye düşürecek optik fiberler elde edilmiştir. $1.55\mu\text{m}$ dalgaboyu ışığı, çok az kayba uğraması sebebiyle modern telekomünikasyon teknolojisi için temel taşı olmuştur.

Bu yenilik, doğrusal olmayan fiber optik adında yeni bir alan oluşmasına neden olmuştur. 1972'lerde, uyarılmış Raman ve Brillouin saçılması keşfedilmiştir[13, 14, 15]. Bu çalışmalar birçok yeni alana önyak olmuştur. Bunlardan en önemlileri, optik olarak uyarılmış çift kırınım (optically induced birefringence) , parametrik dördü dalgı karıştırma (parametric four-wave mixing) ve kendiliğinden faz modülasyonudur (self-phase modulation) [16, 17, 18, 19]. 1973 yılında ilk kez soliton-benzeri atım oluşumları teorik olarak gösterilmiştir ve 1980 yılında optik fiberlerin, dağılım (dispersion) ve doğrusal olmayan etki (nonlinearity effect) özellikleri deneysel olarak da gösterilmiştir. Bu gelişmeleri, atımların sıkıştırılması çalışmaları izlemiş ve 1987 yılında 6 femtosaniye (fs) genişliğinde atımlar elde edilmiştir [20]. 1990'lı yıllardan sonra fiber optik yükselticiler adında yeni bir alan oluşmuştur. Bu alanın oluşmasındaki en önemli etken, nadir toprak (rare earth)



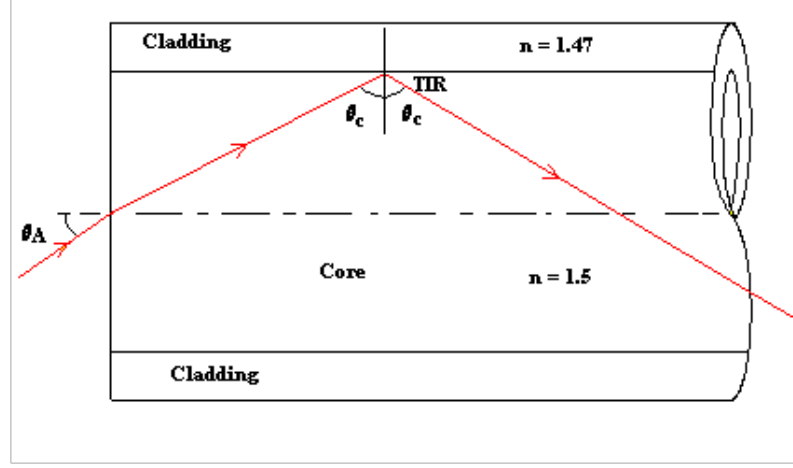
Şekil 2.2: Basit bir optik fiber yapısı

materyal katkılı optik fiberlerin üretilmesidir. Bu nadir toprak elementlerinden biri olan Erbium (Er) ile katkılanmış optik fiberlerin çıkış dalgaboyu $1.55\mu\text{m}$ olduğu için telekomünikasyon sistemleri için erbium katkılı optik fiberler çok ilgi çekici olmuştur. Fiber optik yükselticiler mod-kilitli rejimler açısından önemi yüksektir. Mesela dağılım kontrollü soliton (dispersion-managed soliton) [21], similariton [22], dağıtıcı soliton (dissipative soliton) [23], ve daha çok yeni bir rejim olan soliton-similariton [24] bunlara örnek gösterilebilir.

2.2 Optik Fiberlerin Karakteristikleri

Optik fiberler genelde bir adet ışığın yol aldığı kısım olan nüve (core), bir adet ışığı nüve içerisinde tutmaya yarayan kılıf ve bir adet fiberleri çevresel etkilerden koruyan kısım olan koruyucu (coating) bölümlerinden oluşmaktadır.

Kılıf kısmının kırılma indisi nüve kısmının kırılma indisinden biraz daha düşüktür ve böylece ışık toplam iç yansıma sayesinde nüve içerisinde çıkmadan ilerleyebilmektedir. Figur step indisli optik fiber türünü göstermektedir. Kılıf ve nüve kırılma indisleri, numerical aperture (NA) diye adlandırılan giriş veya çıkış açısını (şekil 2.3) belirler [25] ve



Şekil 2.3: Optik fiberde nüve ve kılıf yapısı

$$NA = (n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}} = n \sin(\theta)$$

şeklinde hesaplanır. n_1 nüve kırılma indisi, n_2 kılıf kırılma indisidir.

n kırılma indisini, θ da ışığın çıkış açısını göstermektedir. Step-index, graded index gibi birçok fiber türü bulunmaktadır. Bunlardan en geneli step-index fiberlerdir. Bu tür fiberler sahip olduğu V-parametresi diye adlandırılan bir değişken sayesinde hem tek-modlu ışık hem de çok modlu ışıkların yönlendirilmesinde kullanılabilir ve,

$$V = \frac{2\pi a(n_1^2 - n_2^2)^{\frac{1}{2}}}{\lambda}$$

şeklinde bulunur. λ ışığın dalgaboyu, a nüve yarıçapı, n_1 nüve kırılma indisi, n_2 kılıf kırılma indisidir. V-parametresi fiber içerisinde, ışığın hangi modları desteklediğini gösteren bir parametredir. Eğer bir optik fiberde $V < 2.405$ ise bu fiber sadece tek bir modu destekler [25]. Mesela $1\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip ışık için, genel tek-mod fiberlerin NA sı 0.16, nüve yarıçapı $2\mu\text{m}$ ise, V-parametresi 2 çıkar. $1 - 1.5\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip ışıklar için, çok-modlu fiberlerin ise nüve çapı yaklaşık $25 - 30\mu\text{m}$ 'den daha büyüktür.

Optik fiberlerdeki bir diğer parametre ise dağılımdır ve ışığın sahip olduğu değişik frekansların optik fiberde değişik hızlarda yol almasına neden olan bir parametredir. Üç adet dağılım türü vardır; materyal, dalgakılavuzu ve kipsel (modal)

dağılımdır. Bu türler arasında en etkili olan materyal dağılımdır. Ortamın emilim frekansı ile ışığın frekansının rezonansa girmesiyle oluşur. Silikamın rezonans dalgalıboyları, $0.0684\mu\text{m}$, $0.116\mu\text{m}$, $9.896\mu\text{m}$, $0.696\mu\text{m}$, $0.408\mu\text{m}$, $0.897\mu\text{m}$ 'lerdir [25]. Ancak $1\mu\text{m}$ ve $1.5\mu\text{m}$ dalgalıboyları için bu etki görülmez. Dalgalılavuzu dağılımı, optik fiber içerisinde farklı frekansa sahip ışığın, farklı yol alma hızına sahip olmasıdır. kipsel dağılım ise dalgalılavuzu dağılımına benzer şekilde, farklı modların farklı yol alma hızlarına sahip olmasıdır. Dağılım optik fiberlerde önemli bir parametredir. Çünkü kısa atımların genişlemesine sebebiyet verir. Küme-modlu fiber lazer sisteminde bu etki deneysel olarak gösterilecektir.

Optik fiberlerde bir diğer önemli parametre de doğrusal olmayan etkilerdir. Bunlar ikincil etki olan ikinci harmonik üretimi (second-harmonic generation), toplam-frekans üretimi (sum-frequency generation) ve üçüncül etki olan üçüncü-harmonik üretimi (third-harmonic generation) ve Kerr doğrusal olmayan etkisidir [26]. İkincil etkiler ortamın yapısal simetrisinden dolayı değerleri sıfırdır. Bu etkiler arasında optik fiberlerde oluşan (özellikle yüksek güçlü lazer sistemlerde) en önemli etki Kerr doğrusal olmayan etkisidir. Yoğun ışık cam gibi yapılarda ilerlerken Kerr doğrusal olmayan etki oluşur. Kerr doğrusal olmayan etki, kırılma indisini değiştiren bir etkidir ve ışığın şiddeti ile doğru orantılıdır.

$$\Delta n = n_2 I$$

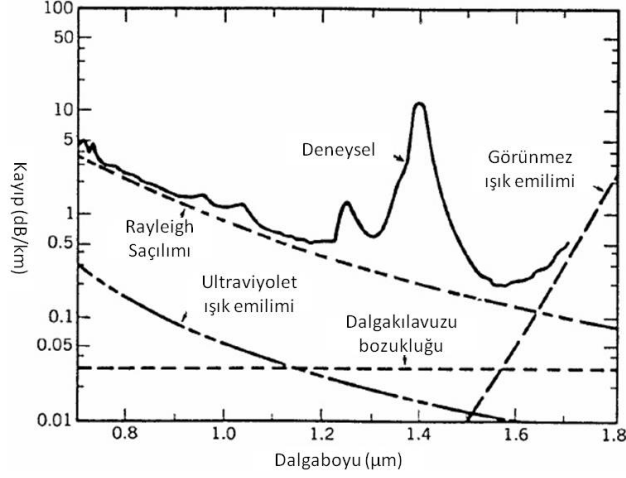
n_2 kırılma indis, I ışığın şiddeti.

Şiddeti yüksek, kısa atımlarda (geniş spektrum) bu etki oldukça belirgin bir şekilde gözlemlenebilir. Atımın en güçlü noktasındaki frekansların hızları yavaşlarken, diğer frekanslar relatif olarak daha hızlıdır. Böylece ışığın sahip olduğu spektrum genişlemeye başlar.

Bir başka önemli parametre ise optik fiberin içsel kaybıdır. İçsel kayıp ne kadar optik gücün fiberin diğer ucuna iletildiğini gösterir. İçsel kayıp,

$$\alpha = 10 \log_{10} \frac{P_{in}}{P_{out}}$$

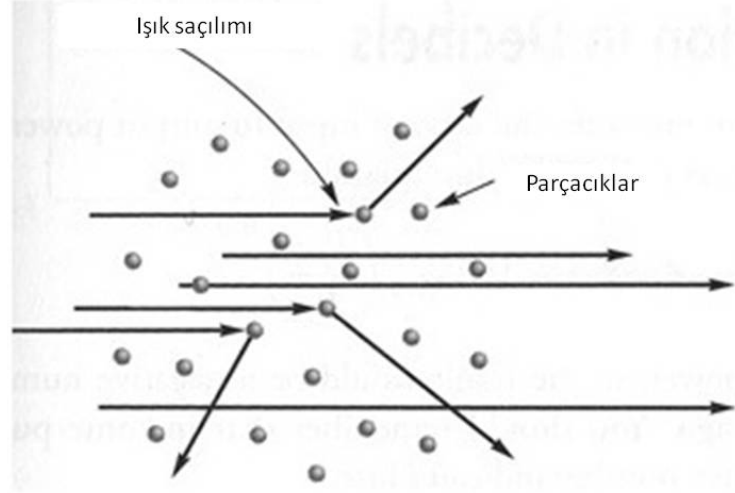
şeklinde hesaplanır. Optik fiberdeki kayıplar sırasıyla materyal emilimi, rayleigh



Şekil 2.4: Dalgaboylarına karşılık gelen fiber optik kayıplar [27]

saçılımı, dalgakılavuzunun düzgünlüğü, fiber birleştirmeden ve bükülmeden kaynaklı kayıplardır [27].

Materyal emilimi iki katagoride düşünülebilir. Birincisi içsel emilim diğeri ise dışsal emilim. İçsel emilim, bazı özel moleküllerle ışığın rezonansa girmesinden kaynaklıdır. Mesela genel fiberlerde kullanılan silika molekülleri, ultraviyole dalgaboyları $< 0.4\mu\text{m}$ ile elektronik bir rezonansa oluştururken, kızılötesi dalgaboyları ile de titreşimsel rezonans oluşturur $> 7\mu\text{m}$. Silika moleküllerinin oluşturduğu rezonans $1.3\mu\text{m}$ ile $1.6\mu\text{m}$ arasındaki dalgaboyları için oldukça azdır (Şekil 2.4). Fakat dışsal emilim fiber içerisindeki saf olmayan kısımlardan dolayı oluşur. Geçişmetallerinden olan Fe , Cu , Co , Ni , Mn , Cr $0.6 - 1.6\mu\text{m}$ dalgaboyu aralığında oldukça yüksek bir emilime sahiptir. Bu yüzden bu dışsal emilimin az olması için saf olmayan metallerin milyon bir oranına indirmek gerekmektedir. Dışsal emilimin diğeri nedeni ise fiberde OH iyonunun bulunmasıdır. OH iyonunun titreşimsel rezonansı yaklaşık $2.73\mu\text{m}$ 'dir. Bu dalgaboyu kadar da $1-2\mu\text{m}$ dalgaboyu olan genel fiberlerin desteklediği aralıkta olmasa da $2.73\mu\text{m}$ 'nin rezonansları da $1.39, 1.24$ ve $0.95\mu\text{m}$ optik güç kaybına yol açmaktadır. Günümüzdeki modern teknoloji, OH ion konsantrasyonunu oldukça az seviyeye düşürmüştü hatta bu değer neredeyse hiç yok denecek kadar azdır [27].



Şekil 2.5: Rayleigh saçılımı

Bir diğer optik güç kaybına neden olan etki Rayleigh saçılımıdır. Bu etki, fiberi oluşturan moleküllerle ilgilidir. Fiberin yapımı sırasında, silika molekülleri rastgele bir şekilde erir ve o şekilde donarlar. Bu rastgelelik bazı kırılma indisinde mikron seviyesinde farklılıklara yol açar. Bu rastgele oluşan silika moleküllerinin büyüklüğüne ve ışığın dalgaboyuna bağlı olarak, saçılım fazla veya az olabilir. Şekil 2.4'te de görüldüğü gibi ışığın dalgaboyu arttıkça saçılım azalmaktadır [27].

Dalgakılavuzunun mükemmelliyeti de optik güç kaybı bakımından çok önemlidir. Mükemmellik nüve çapının ve kırılma indisinin değişkenliğini içerir. Bu değişkenlikler ışığı yanlış yöne yönlendirerek optik güç kaybına neden olur.

Fiber birleştirme ve bükülme yarıçapından kaynaklı optik güç kayıpları genellikle mekanik problemlerdir. Yani fiber üretimi sırasında değil fiberi kullanırken ortaya çıkarlar. Fiber birleştirme, iki veya daha fazla fiberi, bir başka bir veya daha fazla fiber ile elektriksel bir ark aracılığıyla birleştirme işlemidir. Eğer birleştirme yapılan fiberlerin NA , kip alanı (Mode Field Area) veya fiber yapısı gibi

parametreler arasında farklılıkların olması, optik güç iletiminde oldukça fazla kayba neden olabilir. Bunun yanında bükülmeden kaynaklı optik güç kayıpları da özellikle endüstriyel alanlarda oldukça önem kazanmaktadır. Endüstri için yapılan fiber optik sistemlerde bir yere sığmak için fiberler bükülme durumunda kalabilir. Aşırı optik güç kaybı istenmiyorsa bu bükülme yarıçaplarının iyi bilinmesi gerekir. Bu yarıçapı yukarıdaki bölümlerde anlatılan NA belirler. NA ne kadar büyükse bükülme yarıçapı da o kadar azaltılabilir.

2.3 Optik Fiber Türleri

Fiber lazer sistemlerinde amaca yönelik birçok optik fiber türü geliştirilmiştir. Genel yapıları benzer olmasına rağmen kullanım alanına göre bazı farklı özelliklere sahiptirler. Bu kısımda tek ve çok modlu fiberler, iki-kııflı fiberler, kutuplama koruyan fiberler anlatılacaktır. Bu anlatılan fiber türleri küme-modlu fiber lazer sistemlerinde de yoğun bir şekilde kullanılmaktadır.

2.3.1 Tek modlu fiberler

Tek-mod fiberler optik fiber türleri arasında en yaygın olarak kullanılan basit bir optik fiber türüdür. $1\mu\text{m}$ ve $1.5\mu\text{m}$ dalga boyları için nüve çapları $3 - 20\mu\text{m}$ arasında değişiklik gösterebilir. $15\mu\text{m}$ ve üzeri çapa sahip olan optik fiberler geniş kip alanlı (Large Mode Area) olarak adlandırılmaktadır. Geniş kip alanlı türündeki optik fiberler genelde yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde sinyali iletmede kullanılırken pompa ışığını elimine etmek için de kullanılabilir. Tek modlu fiberlerde nüve çapı arttıkça Kerr-doğrusal olmayan etkisi azalmaktadır. Bunun sebebi birim alana düşen ışığın gücünün geniş çaplı nüvelerde daha az olmasıdır. Tek-modlu fiberler Yb , Er gibi nadir toprak materyaller kullanılarak doped edilebilir. Yani tek-modlu fiberler kazanç fiberi olarak da kullanılabilir. Bunlar ön yükseltgeç ismi verilen fiber lazer güçlendirici öncesi optik gücü artırmada kullanılır. Bu tür kazanç fiberleri nüve-pompa güçlendirici sistemleri

olarak da adlandırılırlar. Işın demeti, tek-modlu fiberlerde ışığın odaklanabilirliğini belirleyen ışığın kalitesi bozulmadan ilerleyebilmektedir. Bu yüzden fiber lazer sistemlerinde oldukça tercih edilir.

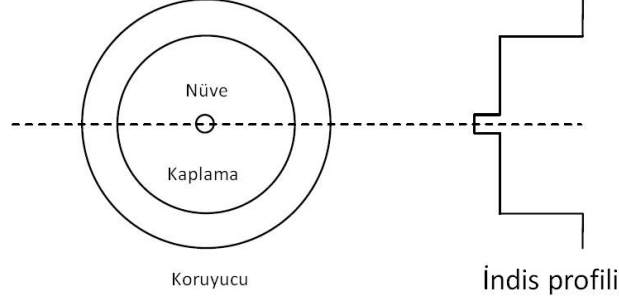
2.3.2 Çok modlu fiberler

Çok modlu fiberler genelde yüksek güçlü pompa diyotlarında kullanılırlar. Yüksek güçlü pompa diyotlarının sahip olduğu modların önemi yoktur. Tek-modun önemli olmadığı yerlerde kullanılabilirler. Bu tür fiberlerin nüve çapları geniş olduğu için yüksek güçlü sinyallerin iletiminde oldukça yararlıdırlar.

2.3.3 İki-Kılıf Fiberler

Fiber lazerlerde daha güçlü ışık elde etmek için katı hal pompa diyotları gerekmektedir. Günümüzde, 500W'a kadar güç sağlayan pompa diyotlar olmasına karşın tek-modlu fiberlerin nüve kısmına bu gücü aktarmak imkansız olduğu için fiber lazer güçlendiricilerde yaklaşık 50W'lık pompa diyotlar kullanılmaktadır. Bu seviyedeki güçler genellikle nüve çapı $105\mu\text{m}$ olan fiberlerle aktarılmaktadır. 500W'lara doğru gidildikçe nüve çapı $600\mu\text{m}$ 'lara kadar çıkabilmektedir. Ancak sinyalinizi güçlendirmek için kullanılan tek-modlu fiberler V -parametresine göre en fazla $15\mu\text{m}$ 'ye sahip olabilmektedir. Sinyal tek-modda kalacak şekilde $15\mu\text{m}$ nüve çapının artırılması mümkündür. Bunu NA parametresi belirler. Fiberlerin NA 'sını düşürmek için nüve çapları arttırılmak zorundadır. Ancak bu da tek modda kullanımı zorlaştırmaktadır. $15\mu\text{m}$ nüve çapına sahip bir fiberin NA 'sı yaklaşık 0.05'lerde olur. Bu değer altında fiberler bükülme, birleştirme gibi kayıplarda çok hassas bir hale gelmektedir.

Bu sorun için iki-kılıf fiberler geliştirilmiştir [28]. Pompa birinci kılıfta ilerlerken sinyal nüve kısmında çoklu moda girmeden ilerleyebilmektedir. Genellikle birinci kılıfın NA 'sı 0.46 iken nüve NA 'sı 0.07'lere (nüve çapı $20\mu\text{m}$) kadar inebilmektedir. Çünkü pompanın çok-modlu ilerlemesinde hiçbir problem yoktur.

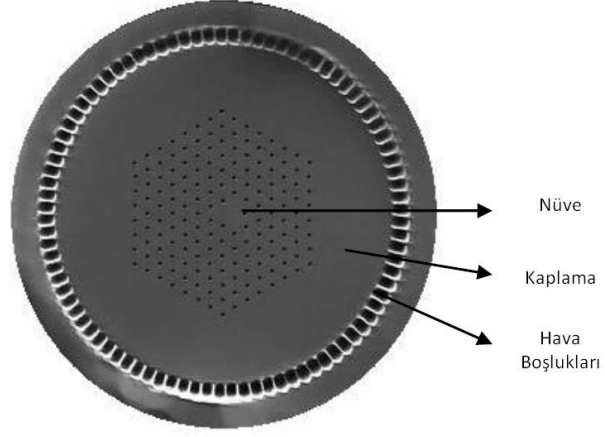


Şekil 2.6: İki cladli optik fiber

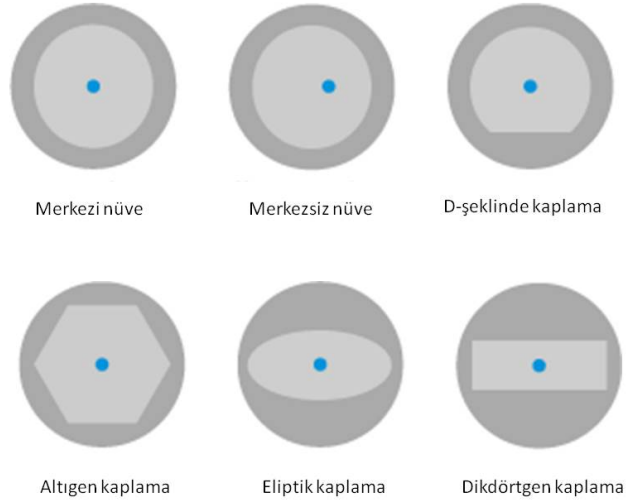
Bir başka fiber türü ise fotonik kristal fiber olarak adlandırılan ve nüve ile birinci kılıf etrafında hava boşluklu bir yapıya sahip fiberlerdir. Bu tür fiberler bükülme hassasiyeti bakımından oldukça iyi olmasına rağmen hava boşlukları aşırı derecede yalıtkan olduğu için ısıl problemler meydana gelmektedir. Bir diğer problem ise fiberleri birleştirirken ortaya çıkmaktadır. Hava boşlukları ışığın yol almasını sağladığı için herhangi bir noktada hava boşluğuna zarar gelmesi çok yüksek kayıplara yol açmaktadır. Bunun için bu tür fiberlerin birleştirilmesi oldukça zahmetlidir.

Fiberlerin birinci kılıf yapısına dikkat edilirse yuvarlak olmayan bir yapıda olduğu gözlemlenir. Bunun amacı pompa ışığının nadir-toprak iyonları tarafından daha iyi soğurulmasına yardımcı olmaktır. Eğer pompanın ilerlediği kılıf yapısı tam olarak yuvarlak olsaydı pompa ışığında desteklenen bazı modların gücü fiberin merkezinde sıfıra yaklaşacaktı. Bu yüzden yuvarlak olmayan yapılar kullanılarak bu sorun çözülmektedir [29].

Birinci kılıfın çapını büyüterek, fibere daha fazla pompa girişi sağlanabilir. Ancak bu durumda daha uzun fiber kullanmak gerekir. Çünkü pompa emilimi, nüvenin kılıfa oranıyla doğru orantılı şekilde artar. Daha uzun fiber kullanımı ise fiberlerde



Şekil 2.7: İki cladli fotonik kristal fiber



Şekil 2.8: İki kılıflı fiberlerin kaplama türleri [29]

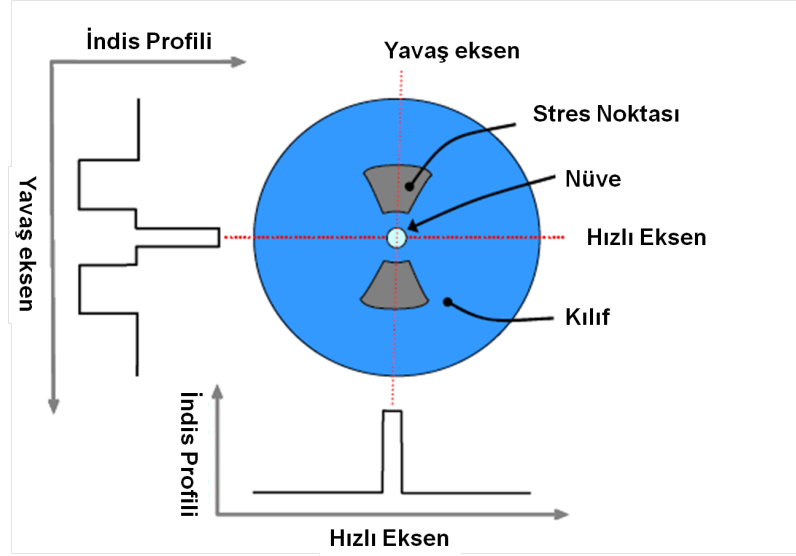
oldukça baskın olan doğrusal olmayan etkilerin doğmasına sebep olur. Bu da diğer bölümlerde anlatılacak olan atım daraltmada büyük bir engel teşkil eder.

Sinyalin tek modda ilerlemesini istememizin sebebi ise, işlem yapılacak noktada ışığın kalitesini belirleyen parametre olmasıdır ve M^2 olarak belirtilir. M^2 ideal ışık demeti için 1 kabul edilir ve 1 'den uzaklaştıkça ışık tek-modluktan yavaş yavaş çıkar. Fiber lazerin diğer lazer türlerine göre avantajı da tek modda ışığın gücünü arttırabilmesidir.

2.3.4 Kutuplama Koruyan Fiberler

Işığın kutuplanması elektrik alanı belirlemektedir. Işığın elektrik alanı eksenleri hızlı ve yavaş olmak üzere iki şekilde adlandırılır. Bunların kombinasyonlarından doğrusal, yuvarlak, eliptik gibi kutuplu veya kutupsuz olabilmektedir. Kutuplama koruyan fiberler tek-modlu fiber olmak zorundadırlar. Çünkü her bir modun kutuplanmasını aynı oranda optik fiberde desteklemek imkansızdır. Kutuplama koruyan fiberlerin amacı ışığın giriş kutuplanmasını koruyarak optik fiber sonuna kadar taşınmasıdır. Kutuplama korumayan fiberlerde de bu durum geçerlidir fakat bu tür fiberler çevresel etkilere oldukça duyarlıdır ve herhangi küçük bir eğilme veya sıcaklık değişiminden dahi hızlı ve yavaş eksenler sürekli eksen değiştirirler ve böylece ortalama hızları aynı olmaktadır. Kutuplayıcı korumayan fiberlerde kutuplama değeri (polarization extinction ratio) 0dB olarak görülür. Bunun sebebi kutuplanmanın sürekli ve hızlı bir şekilde rastgele değişmesidir.

Kutuplama koruyan fiberlerdeki yavaş ve hızlı eksenlerin ayrılmasındaki sebep çiftkırınım denilen bir prensiptir. Bu prensibe göre, optik fiberlerde iki farklı kırılma indisi oluşur. Bu iki farklı kırılma indisi de farklı eksenlerin farklı hızlarda yol almasına sebep olur. Eğer eksenlerde biri yavaş ise bu yüksek kırılma indisine maruz kaldığı anlamına gelirken hızlı eksen ise düşük kırılma indise maruz kaldığı anlamına gelir. Bu kırılma indisi farkı ise şekil 2.9'da gösterilen stres noktalarından dolayıdır. Bu kırılma indislerinin farkına bağlı olarak eksenler birbirleri ile etkileşim içerisindedirler. Bir optik fiberde çiftkırınım değeri ne kadar yüksekse bu etkileşim de o kadar azdır. Yani çiftkırınım yavaş ve hızlı indislerin



Şekil 2.9: Kutuplamayı koruyan fiberlerin yapısı, bowtie

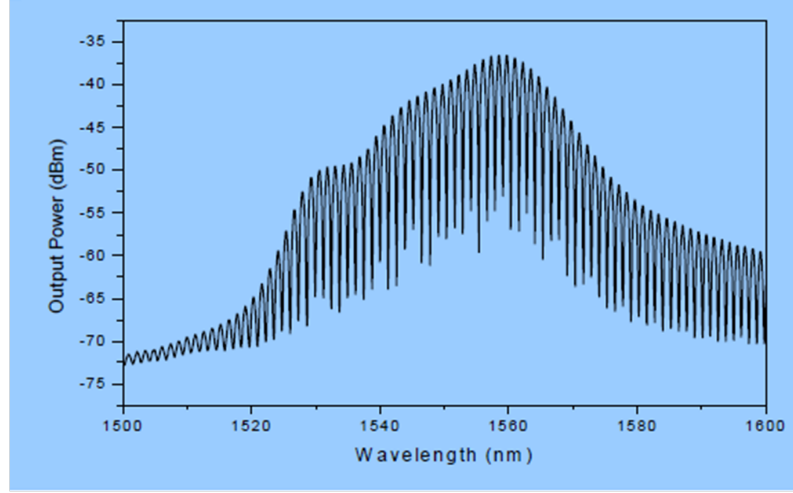
farkıdır.

$$B = n_{slow} - n_{fast}$$

Kutuplama koruyan fiberlerin ne kadar iyi kutuplama koruduğuna dair bir diğer parametresi ise geçme uzunluğu (beat length) parametresidir. Geçme uzunluğu eksenlerin optik fiberde ne kadar yol boyunca birbirleriyle etkileşim halinde olduğunu gösteren bir parametredir. Geçme uzunluğu dalgaboyuna bağlı bir parametre olup çift kırınım parametresi ile de ters orantılı bir şekilde değişir.

$$L_B = \lambda/B$$

Kutuplama koruyan optik fiberlerin geçme uzunluğu değerleri kolay bir düzencele ölçülebilir. Bunun için test edilecek olan kutuplama koruyan optik fiberin içerisine her iki ekseninde (yavaş ve hızlı) de yeterince güç olacak şekilde ışık gönderilir. Işığın geniş bir spektruma sahip olması ölçümdeki hataları en aza indirecektir. Çünkü geçme uzunluğu ölçümünde yavaş eksen ile hızlı eksen birbirleri ile etkileşime girip girişim olayını gerçekleştirirler. Optik spektrum analizör çıkışına bakılırsa bu girişimlerin oluştuğu gözlemlenebilir.



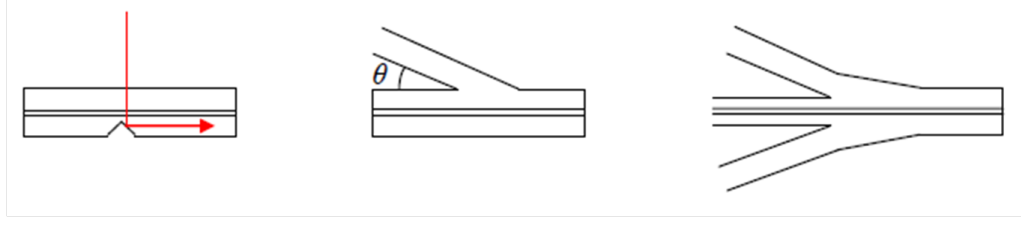
Şekil 2.10: Geçme uzunluğu ölçümünde spektrum çıkışı

$$L_B = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} L$$

Bu formülde, $\Delta\lambda$ saçak aralığı, λ merkez dalgaboyu, L kutuplama koruyan optik fiber uzunluğu

2.4 Fiber Lazer Bileşenleri

Fiber lazer türünün diğer lazer türlerine göre en önemli özelliği ışığın fiber içerisinde ilerlemesini sağlayarak, herhangi bir hizalama zorunluluğu olmamasıdır. Hizalama sorununun olmaması fiber lazerleri kompakt bir düzeye taşıırken, ışığı istediğimiz yere taşımaya olanak vermektedir. Işığın fiber dışına çıkmadan yoluna devam edebilmesi için fiber lazer sistemleri için bazı bileşenler üretilmiştir. Bunlar en basit yapıda olan ayırıcılardan, en komplike olan akusto-optik modulatörlere kadar yapılacak işe göre çeşitlilik göstermektedir. Bu kısımda, fiber lazer güçlendirici sistemlerine özel bileşenlerden bahsedilecektir.



Şekil 2.11: çentik birleştirme, açılı birleştirme, incelterek birleştirme [30]

2.4.1 Pompa Birleştirici

Pompa birleştirici adından da anlaşılacağı gibi birçok pompa fiberinin bir araya getirilerek tek bir fiber üzerinde toplamasına yardımcı olan bir bileşendir.

Pompa fiber birleştirmenin birçok metodu (şekil 2.11) olsa da en geneli incelterek birleştirmedir. Fiberlerin hepsini tek bir fibere yerleştirmek için iki seçenek vardır. Birincisi, birleştirilecek tüm fiberleri içine alacak büyüklükte bir fiber ile birleştirmek diğeri ise birleştirilecek fiberleri incelterek daha küçük çapa indirilerek uygun çaptaki tek bir fiberle birleştirmektir. İkinci öneri daha çok kullanılmaktadır. Birleştime verimliliği ise yüksek oranda fiberler arasındaki NA farkına bağlıdır. Yani pompa fiberlerinin NA 'sı, tüm fiberleri birleştirdiğimiz fiberin NA 'sından küçük veya eşit olması gerekmektedir.

$$NA_{pump} \leq NA$$

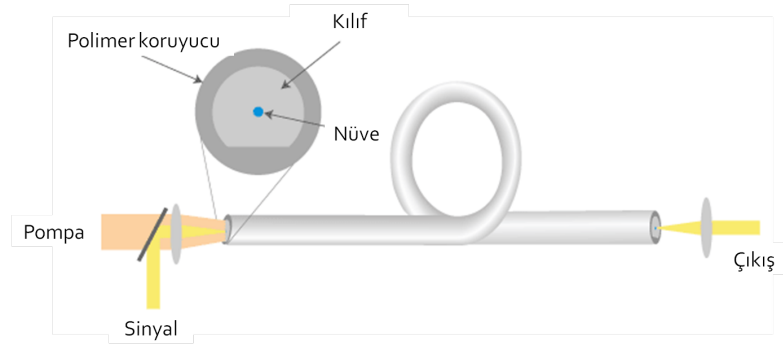
Birleştirilen fiberlerin çapları da formüle girerse

$$d_b NA_{pump} \leq d_o NA_o$$

d_b inceltirme işlemi öncesindeki bütün fiberlerin toplam çapı, NA_o fiberler içerisindeki en büyük NA , d_o ve NA_o çıkış fiberinin çapı ve NA 'sıdır. Mesela, $125\mu\text{m}$ 'ye ve $0.15NA$ 'ya sahip kaç fiber, $125\mu\text{m}$ ve NA 'sı 0.46 olan çıkış fiberine fazla kayıp olmadan birleştirilebilir. Hesap yapıldığı zaman 9 veya daha az fiberle bu işlemin yapılabileceği sonucuna varılır.

Tablo 2.1: Birkaç pompa birleştirici yapısı [30]

Giriş fiberi/Çıkış Fiberi	125 μm 0.46NA	250 μm 0.46NA	400 μm 0.46NA
105/125 μm 0.15 NA	7x1	19x1	61x1
105/125 μm 0.22 NA	4x1	7x1	37x1
200/220 μm 0.22 NA	1x1	4x1	7x1
400/440 μm 0.22 NA	-	1x1	3x1



Şekil 2.12: Pompa ve sinyal birleştirici bileşen şematiği

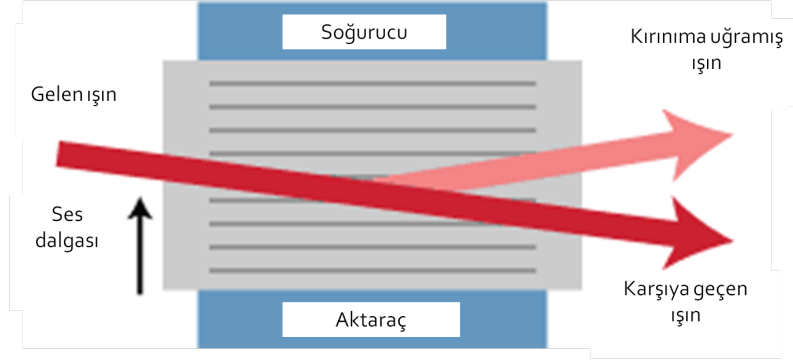
2.4.2 Pompa ve Sinyal Birleştirici

Pompa ve sinyal birleştirici bileşeni, pompa birleştirici bileşenine çok benzemektedir (şekil 2.12). Tek farkı pompa fiberler bütününün içerisinde sinyal fiberininde olmasıdır.

Pompa ile sinyal fiberleri bir bütün haline getirileceği için genellikle bu bütüne birleştirilen fiber iki kılıflı fiber olmaktadır. İki kılıflı fiberlerde sinyal merkezden yol aldığı için sinyal fiberini pompa fiberlerinin arasında olacak şekilde pompa fiberlerinin tam merkezine yerleştirmek gerekir. Böylece sinyal iki kılıflı fiberle birleşince iki kılıflı fiberin nüve kısmında yol alacaktır ve sinyalin çoklu moda geçişi engellenmiş olacaktır.

2.4.3 Akusto-Optik Modülatör

Akusto-optik modülatör akusto optik etkiyi kullanarak ışığı kırarak dağıtmak veya ışığın frekansını kaydırmak için kullanılan bir bileşendir. Genellikle bu tür



Şekil 2.13: Basit bir akusto-optik modulator şematığı [31]

işlemler için ses dalgaları kullanılır. Sinyal modüle etmek için veya spektroskopi için frekans kontrol etmede de kullanılır [31].

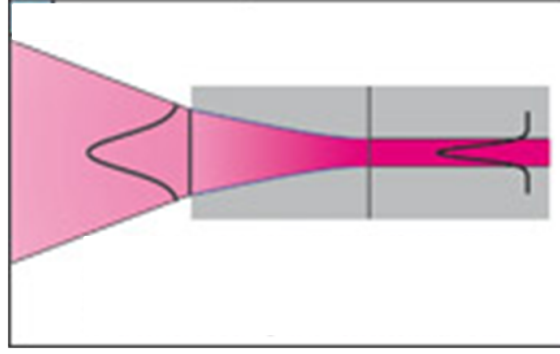
Yapısında bir adet piezoelektrik transdüser bulunur ve bu kristal bir yapıya tutturulmuştur (şekil 2.13). Megahertzler mertebesinde bir radyo frekansında olan elektriksel bir sinyal aktarıcıyı titretilir ve kristalde ses dalgaları oluşur. Kristal yüzeyindeki genişlemeler veya daralmalar sonucu kristalin kırılma indisini değiştirir. Böylece sinyal başka yöne kırılarak dağılmış olur.

AOM'lerin genel kullanım açısından beş adet kullanma amacı vardır. Bunlar, sinyali saptırma, sinyal şiddeti kontrolü, sinyalin frekansının ayarlanması, sinyal fazını değiştirme ve de sinyalin polarizasyonu ile oynamadır [32]. Bu tezde AOM'in en önemli işlevi atım seçici olarak kullanılmasıdır. Bir diğer işlevi ise sinyal ile güçlendirilmiş kendiliğinden emisyonun oranını tespit etmektir. Bundan sonraki bölümlerde nasıl kullanıldığı anlatılacaktır.

2.4.4 Çıkış Fiber Adaptörü

Çıkış fiber adaptörü birim alana gelen yüksek güç veya enerjiyi daha geniş bir alana yayarak fiberlerde oluşması muhtemel zararları engellemek için kullanılır (şekil 2.14).

Çıkış fiber adaptörünün genel fiberlerden farkı nüveye sahip olmamalarıdır. Bu fiber birleştirmede oldukça avantaj sağlamaktadır.



Şekil 2.14: Fiber çıkış adaptörü şematığı

2.4.5 Optik Yalıtıcı Bileşeni

Optik yalıtıcı bileşenler, ışığın tek yönlü geçmesine izin veren bileşenlerdir. Bu tür bileşenler lazer kavitesi içerisinde, geri dönen ışığın zarar verebileceği kısımlardan hemen sonra veya kavite gibi iki yönlü ışığın olduğu noktalarda istenmeyen dalga boyuna sahip ışığı engellemek için kullanılırlar. Bu tür bileşenlerde Faraday çevirici (Faraday Rotator) adı verilen bir mekanizma kullanılır [33].

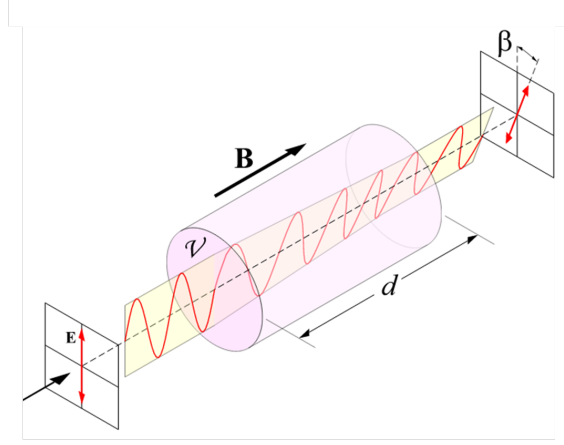
Faraday çevirici mekanizmasının çalışma prensibi, magnetik alanın ışığın kutuplanmasını değiştirmesine bağlıdır.

$$\beta = vBd$$

β kutuplanmanın dönüş açısı, v Verdet sabiti (materyalden materyale göre değişkenlik göstermektedir.), B magnetik alan, d magnetik alanın uygulanan uzunluğudur.

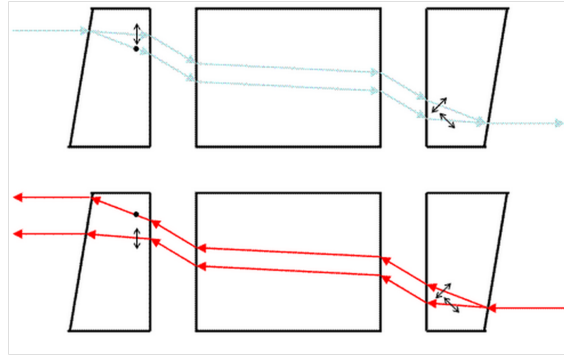
İki tür optik yalıtıcı bileşeni bulunur. Biri kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşenler (şekil 2.15), diğeri ise kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerdir (şekil 2.16).

Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerde gelen ışığın, optik yalıtıcıya gelmeden önce doğrusal kutuplanması gerekmektedir. Şekil 2.15’de görüldüğü üzere doğrusal kutuplanma ile gelen ışığın kutuplanması faraday çevirici bölgesinde 45^0 döndürülerek yalıtıcıdan çıkması sağlanır. Geri dönen ışık



Şekil 2.15: Kutuplanmaya bağlı olarak yalıtıcı özellik gösteren bileşen [34]

45° dönmüş kutuplanmaya sahip olduğu için tekrar Faraday çevirici bölgesinden geçince kutuplanmanın yönü değişmiş olarak yalıtıcının girişine gelir. Burada bulunan kutuplayıcı aynı yönde olmadığı için bu kutuplanmayı geçirmez ve yalıtım sağlanmış olur [34].



Şekil 2.16: Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşen [34]

Kutuplanmaya bağlı olmadan yalıtıcı özellik gösteren bileşenlerde ise gelen ışığın yavaş ve hızlı eksenleri, ilk çiftkırınım yarığında farklı açılarda kırılırlar. Faraday çevirici bölgesinde bu kutuplanmalar 45° döndürülür. İkinci çiftkırınım yarığında ise ışıklar toparlanarak yalıtıcı bileşeninden dışarı çıkarlar. Geri gelen ışık aynı yolları tekrar geçtiği zaman optik yalıtıcı bileşenin girişine gelmez ve yalıtım sağlanmış olur [34].

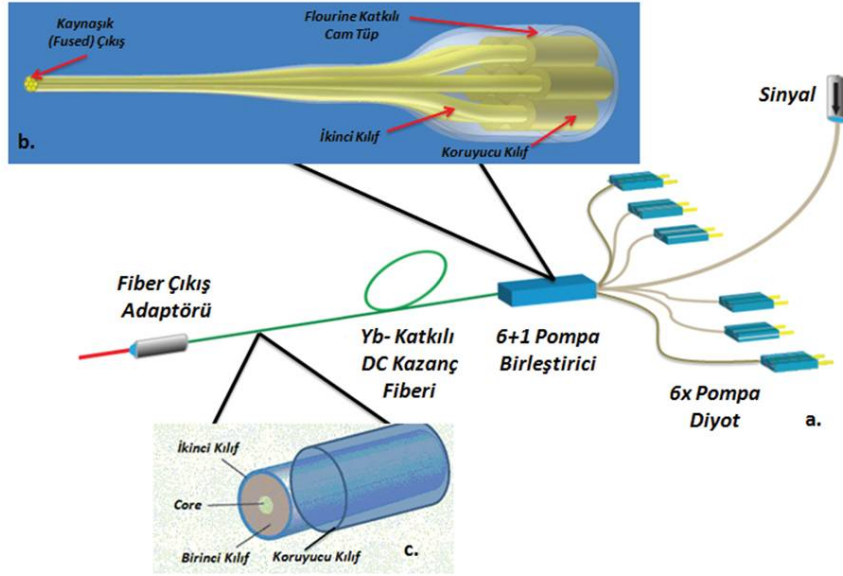
3. Fiber Lazerler İçin Kaynaşık Fiber Bileşen Üretimi

Tez alışması sırasında, yüksek enerjili fiber lazer sistemi için iki farklı bileşen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki, pompa ve sinyal birleştirici diğeri ise çıkış fiber adaptörüdür. ıkış fiber adaptörü sistemde aktif olarak kullanılmasına rağmen pompa ve sinyal birleştirici bileşeni henüz sistemde denenmemiştir. Pompa ve sinyal birleştiricinin sistemde denenmemesinin en önemli sebebi ticari olanların daha verimli olması ve herhangi bir sorunla karşılaşılmamasıdır. Fakat fiber çıkış adaptörü sisteme uygun ticari ürün bulmak oldukça zordur. Bu yüzden üretimi gerçekleştirilip sisteme eklenmiştir.

Daha yüksek enerjilere ulaşılmasında en kritik adımlardan biri tümleşik fiber bileşen teknolojisidir: pompa birleştirici, ayırıcı, fiber ek (fiber splicing) teknikleri, çıkış fiber adaptörü, vb. Bileşenler üretilirken kullanılan başlıca methodlar; hizalama, inceltme (tapering), kesim ve fiber ekidir. Bu kısımda bu iki bileşenin nasıl yapıldığı ve sonuçları paylaşılacak ve birleştirme tekniklerinden bahsedilecektir. Tez çalışmasındaki bu alışmalar Vytran adlı bir cihazla yapılmıştır.

3.1 Pompa ve Sinyal Birleştirici Üretimi

Yüksek güçlü lazerlerde sinyal, pompa diyot, pompa birleştirici ve iki kılıfa sahip kazanç fiberleri kullanılır (Figür 3.7-a). Pompa birleştirici, yüksek güçlü lazer sistemlerinde, birden fazla pompayı iki kılıflı kazanç fiberinin (Figür 3.7-b) birinci

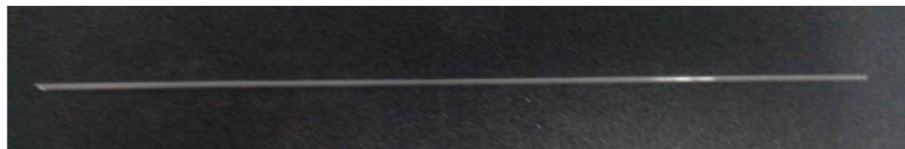


Şekil 3.1: (a) Yüksek güçlü lazerlerin yükseltgeç şeması, (b) pompa-sinyal birleştirici şematığı, (c) çift kılıfa sahip fiber

kılıf bölümünün içinde birleştirmeyi amaçlayan bileşendir (Figür 3.7-c).

Tez çalışmasında 6+1 pompa ve sinyal birleştirici bileşeni yapılmıştır. Pompa ve sinyal birleştirici üretimi için aşağıdaki adımlar gerçekleştirilmiştir.

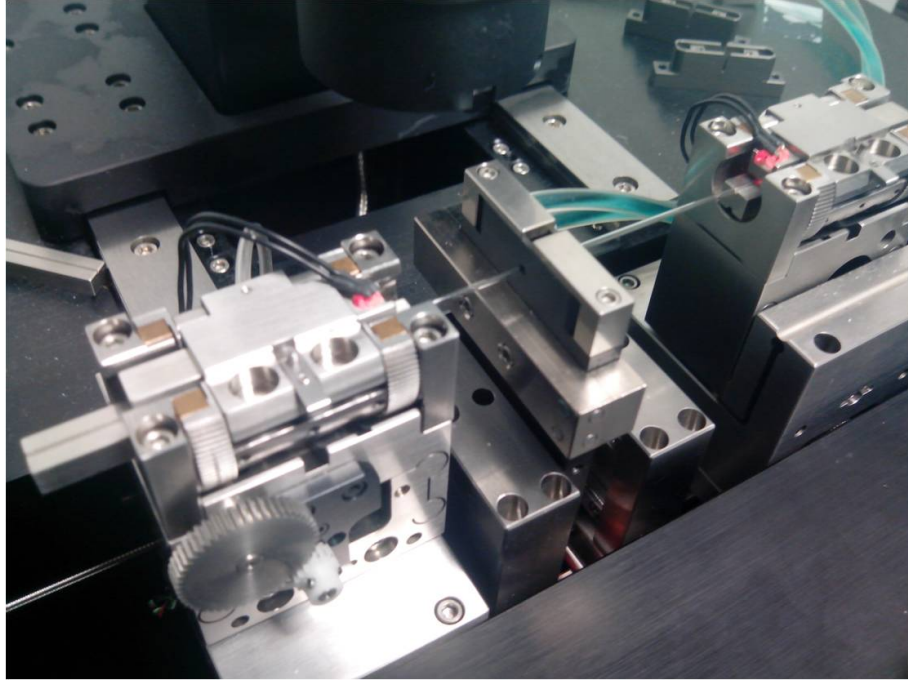
- Kırılma indisi pompa fiberlerin kırılma indisine yakın olan bir boş bür tüp alınır. Tüp içerisine sinyal ve pompa fiberleri yerleştirilip bütün inceltme işlemleri tüpün üzerinden yapılacağı için tüpün erime sıcaklığı ile fiberlerin erime sıcaklıklarının yakın olması gerekmektedir. Tez çalışmasında pompa fiberleri dışarıda yer alacağı için pompa fiberinin kırılma indisine yakın bir değer olan ve NA'sı 0.22 olan bir cam tüp seçilmiştir.



Şekil 3.2: 1100µm dış çapa ve 800µm iç çapa sahip florin katkılı cam tüp

- Üretilen pompa ve sinyal bileşeninde 1100µm dış çapa ve 800µm iç çapa sahip

flourin katkılı cam tüp seğilmiştir (şekil 3.2). Sebebi tüm fiberlerin ve tüpün inceltme işlemi öncesinde 6 adet pompa, 1 adet sinyal fiberinin sığabileceği en küçük çap seğilmiştir. Ancak daha geniş bir tp alıp, fiberleri yerleştirmeden önce tp üzerinde inceltme işlemi yaparak istenilen çapa getirilebilir (şekil 3.3 ve şekil 3.4). Tüpün etrafını fakat yaklaşık 2 – 3mm kesitini saran bir yapıda olan ısıtıcı, ileri geri hareket yaparak inceltme işlemi yapılmıştır.



şekil 3.3: Cam tüpün inceltilmesi



şekil 3.4: İnceltmiş cam tüp

- İçi boş olan tüpün içi iyice temizlenir (şekil 3.3). Sebebi tüpün içerisine fiberler yerleştirildikten sonra inceltme işlemi yapılacak olmasıdır. Yani inceltme işleminde eğer tp içerisinde herhangi bir atık kalırsa bu hem tüpün kırılma

indisini bozar hem de fiberlere zarar verebilir. Temizleme işlemi propanol ile kolayca yapılabilir.



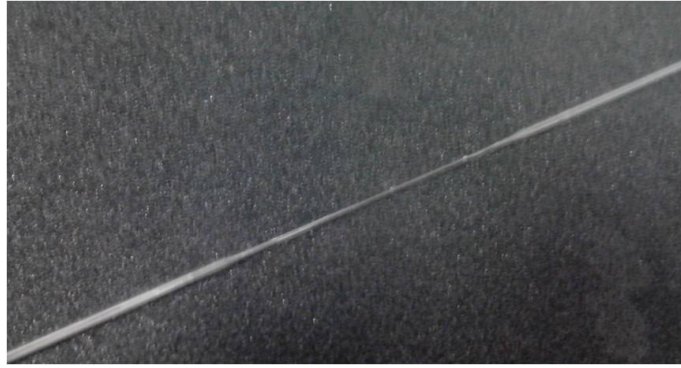
Şekil 3.5: Cam tüpün temizlenmesi

- Sinyal ve pompa fiberlerinin koruyucu kısımları stripper yani soyucu ile soyulur ve temizlenir (şekil 3.5). Sebebi, koruyucu kısmın yapısı sadece fiberi çevresel etkilerden korumak olduğu için silikon yapıdadır ve inceltme işleminde yanmaya sebep olur. Temizleme amacı, kontaminasyonu en aza indirmek ve böylece inceltme sırasında olabilecek herhangi bir yanmayı veya mekaniksel problemi engellemektir. Soyulan kısmın uzunluğu inceltilecek olan bölgeden birkaç cm uzun olması gerekir ki inceltme işlemi koruyucu kısma ısısal bir takım erime etkileri yaratmasın.

- Ortada sinyal fiberi ve etrafında pompa fiberleri (şekil 3.6) olacak şekilde fiberler toparlanıp soyulan kısımlar hizalanır ve tüpün içerisine yerleştirilir. Yerleştirme sırasında sinyal fiberinin ortada kaldığına emin olmak gerekir. Eğer sinyal fiberi merkezde değilse, inceltilmiş tüp ile yapılacak olan diğer bir fiber birleştirilmesinde, birleştirilen fiberin nüve kısmına denk gelmeyip sinyal iletimi istenilen şekilde gerçekleştirilmez.



Şekil 3.6: 6 adet pompa ve 1 adet sinyal fiberi



Şekil 3.7: Cam tüpün içerisinde fiberlerle birlikte inceltilmesi

- Tüp, içerisinde hizalanmış fiberlerle birlikte inceltme işlemi gerçekleştirilir. Bu işlem birçok şekilde yapılabilir. Önemli olan inceltme işleminde tüpün homojen bir şekilde incelmesidir. Tüp inceltildiği zaman kesin bir incelik oluşmaz. Tüpte yavaş yavaş daralan ve tekrar genişleyen bir yapı oluşur. Fakat eğer ısı düzgün verilirse tüpün orta bölgesinde çapı değişmeyecek şekilde 2 – 3cm uzunlukta bir bölge oluşacaktır. Bu kısmın oluşması önemlidir. Çünkü bir sonraki adımda bu düzgün olan kısım kullanılacaktır (şekil 3.7).
- Tüpün sabit olan çap bölgesi sıfır açılı olacak şekilde kesilir (şekil 3.8). Çünkü tüpün ucuna iki kılıflı fiber birleştirilecektir. Böylece pompanın ve sinyalin aynı fiberde ilerlemesi sağlanacaktır.
- İçerisinde 6 adet pompa fiberi ve merkezde 1 adet sinyal bulunan ve inceltilmiş



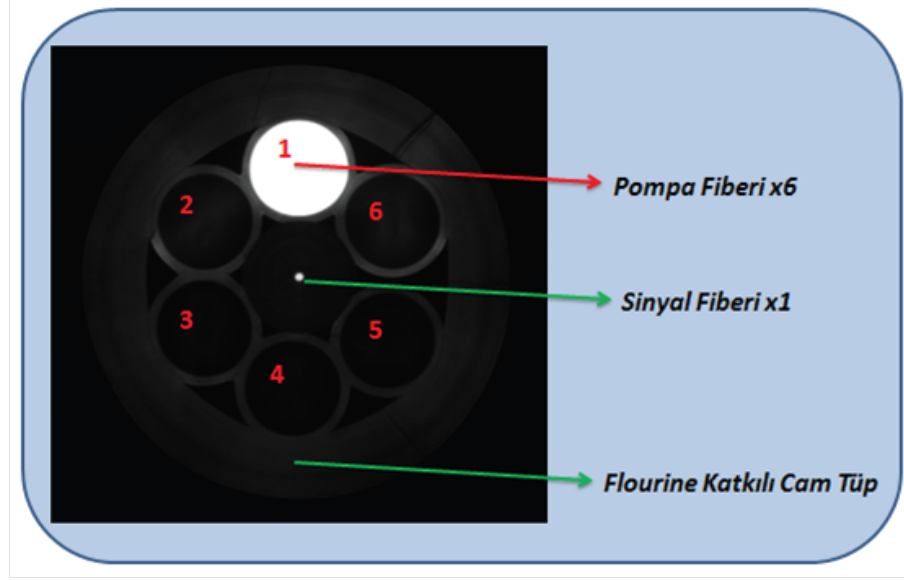
Şekil 3.8: Tüp ucunun "0" açılı kesilmesi

tüp ile iki kılıflı fiber birleştirmesi çok kritiktir. İlk kritik nota kayıplardır. Eğer birleştirme düzgün yapılmassa hem sinyalde hem de pompa da kayıplar yaşanacaktır. Ticari olarak bu kayıplar her iki ışık için de yaklaşık %10 civarındadır. Bir diğer kritik nokta ise birleştirme anında sinyalin çok modlu hale gelmesidir. Bunu engellemek için cam tüple birleştirilecek olan fiberin nüve çapı önem kazanmaktadır. Bu çalışmada $20\mu\text{m}$ çapa sahip $250\mu\text{m}$ kılıf çapına sahip iki kılıflı fiber kullanılmıştır.

Dünyada sadece birkaç firma tarafından üretilen bu bileşen, bildiğimiz kadarıyla, Türkiye'de üretilen ilk sinyal ve pompa birleştiricidir. Yapılan deneylerde sinyal ve pompa geçirgenliğinde %90 seviyelerine ulaşılmıştır (şekil 3.9). Ancak yüksek ortalama güçlerinde denenmemiştir. Birleştirme noktasının geliştirilmesi gerekmektedir [35].

3.2 Fiber Çıkış Adaptörü Üretimi

Yüksek tepe güçlü lazerlerde, ışık fiber dışına çıkarken çıktığı noktada tepe gücünden dolayı plazma oluşmakta ve bu yüzden fiber çıkışı hasar görebilmektedir [36]. Bu sorunu ışığın fiberi terk ettiği yüzey alanını genişleterek gidermek



Şekil 3.9: Pompa-sinyal birleştirici üretiminde tüpten bir kesit

mümkündür. Bu da fiber çıkış adaptörü olarak adlandırılan, daha geniş yüzey alanına sahip nüvesiz fiber, çıkış fiberi ile kaynaştırılarak elde edilebilir.

Fiber çıkış adaptörü, çıkış sinyali alacağımız fibere önce birleştirilir. Bu birleştirme işlemi, genel fiber birleştirme işlemine benzemektedir. Tek farkı kılıf çapları farklı olduğu birkaç birleştirme değişkeni ile ayar yapmak gerekmektedir.

Fiber birleştirme işlemi tamamlandıktan sonra, nüvesiz fiberi kesme işlemi yapılmaktadır. İki tür fiber ucunu kesme işlemi vardır. Bunlardan ilki, genelde birleştirme işlemi öncesi fiber uçlarını hazırlarken yapılan 0 derece kesme, diğeri ise NA 'ya bağlı olarak açılı kesme işlemidir. Açılı kesmenin birçok avantajı vardır. Bunlardan en önemlisi fiberin ucundan geri yansımayı önleyerek kazanç fiberinde oluşacak herhangi bir etkiyi engellemektir.

Üretim aşamalarında karşılaşılan birkaç problem vardır [37]. Bunlar sırasıyla, yüksek güçlere dayanabilme, optik özelliklerin korunması ve nüveden nüveye izolasyondur.

Yüksek güçlere dayanabilme: Bu maddedeki en önemli özellik eğer fiber çıkış adaptörü ile birleştirilen fiberin (bu noktada kazanç optik fiberi oluyor genellikle)

kip-alana çapı ne kadar düşük olursa, fiber çıkış adaptöründe ışığın açılma açısı da ters oranda büyüyeceği için hava hasarı (air damage) limiti daha yüksek olabilmektedir.

Sinyalin optik özelliklerinin korunması: Sinyal fiber çıkış adaptöründen sonra hem kutuplanma hem de M^2 yani ışın kalitesinde herhangi bir değişiklik oluşup oluşmama durumudur. Bu iki parametrenin de fiber çıkış adaptörünün sonunda korunmuş olması gerekmektedir.

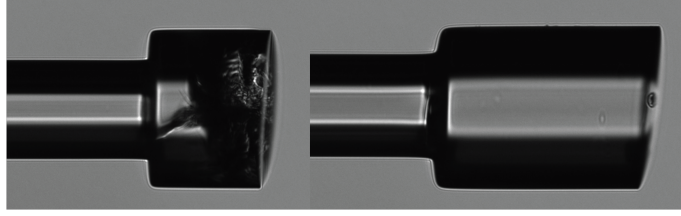
Nüve-nüve izolasyonu: Fiber çıkış adaptörleri 0 derece açılı kesilirse ve fiber optik yükseltgeçlerin hemen sonrasında yalıtıcı takılmıyorsa, bu hem fiber optik yükseltgeçlerin verimini düşürecek hem de bu geri yansıma, sistemdeki birçok bileşene zarar verebilecektir. Bu yüzden fiber çıkış adaptörünün 0 derece açılı kesimi birçok sorun doğurmaktadır. Açılı kesilmesi halinde ise 60dB'lere kadar geri yansıma düşebilmektedir. Eğer 0 derece açılı kesilirse, AR coating denilen bir sıvı kaplanması gerekir ve bu işlem ile geri yansıma 50dB'lere kadar düşürülebilmektedir.

Fiber optik yükseltgeçiniz geriden pompalama şeklinde çalışıyorsa, fiber çıkış adaptörünün boyu da önem kazanmaktadır. Çünkü böyle bir sistemde, hem geriden gelen siyali fibere aktarılmak zorundadır hem de ileri yönlü sinyalinizin fibere zarar vermemesi için geniş bir çapta ışının fiberden çıkması gerekmektedir.

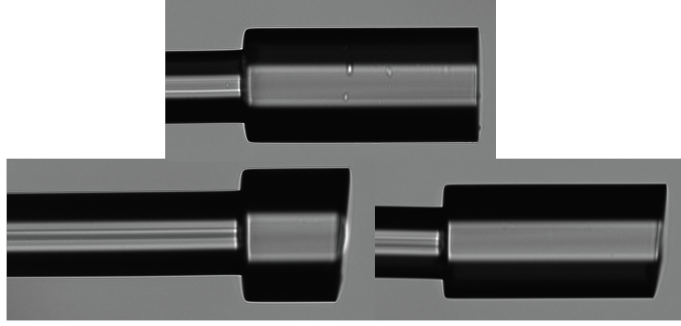
Fiber çıkış adaptörünün uzunluğu sistem için çok önemlidir. Amaç ışığın fiberi terk ettiği yüzey alanın en geniş olmasıdır fakat eğer sisteminiz geri yönlü pompalama şeklinde çalışıyorsa bu da sizin fiber çıkış adaptörünüzün uzunluğunu etkileyen ikinci önemli parametre olmaktadır. Şekil 3.10'da fiber çıkış adaptör uzunluklarının yetersiz oldukları, fiber çıkış adaptörlerinin uç kısımlarında yer alan hasarlar görülmektedir.

Çeşitli uzunluklarda fiber çıkış adaptörü yapılabilmektedir (şekli 3.11).

Yapılan deneylerde fiber çıkış adaptörünün uzunluğu azami $740\mu\text{m}$ olarak görülmüştür. Eğer fiber adaptörünün uzunluğu $740\mu\text{m}$ olursa ışığın yüzey alanı $20\mu\text{m}$ 'den $100\mu\text{m}$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Bu değerlerde size 25 kat alan avantajı

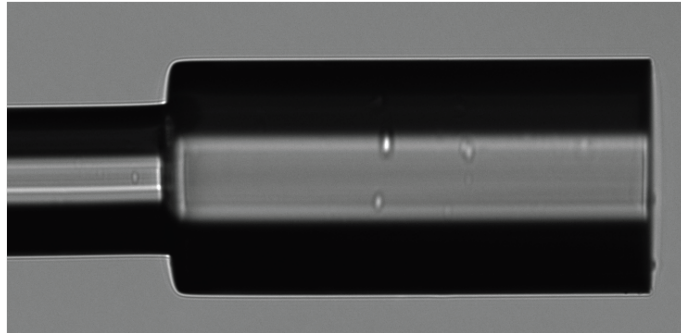


Şekil 3.10: $150\mu m$ uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü (solda), $300\mu m$ uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü (sağda)



Şekil 3.11: Çeşitli uzunluklarda üretilen fiber çıkış adaptörleri $750\mu m$ (üstte), $50\mu m$ (sol altta), $400\mu m$ (sağ altta)

sağladığımızı göstermektedir.



Şekil 3.12: $650\mu m$ uzunluğa sahip fiber çıkış adaptörü

200ps atım genişliğine ve $100\mu J$ atım enerjisine sahip tüm fiber entegre lazer sisteminde $650\mu m$ uzunluğunda (şekil 3.12) çıkış fiber adaptörü uygulanmış ve nüvesiz fiber çıkışında yaklaşık $25GW/cm^2$ tepe şiddetine ulaşılmıştır. Bildiğimiz kadarıyla, bu tepe şiddeti tüm fiber entegre lazer sistemlerde rekor bir düzeydedir [38].

4. Fiber Lazer Güçlendirici Sistem Geliştirilmesi

Bu bölümde fiber lazer güçlendirici sistemlerin geliştirilmesine yönelik tez döneminde yapılan çalışmalardan bahsedilecektir. İlk olarak fiber lazer güçlendirici için sinyali oluşturan 100MHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemi anlatılacaktır. Sonrasında bu lazer sistemi üzerine kurulan iki farklı fiber lazer güçlendirici anlatılacaktır. Bunlardan ilki $100\mu\text{J}$ atım enerjisine sahip kip-kilitli *Yb*-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemi diğeri ise 1mJ atım enerjisine sahip küme-modlu *Yb*-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemidir. Son olarak elektron demeti üretimi için birkaç yol üzerinde durulacaktır.

4.1 100MHz Tekrarlama Frekanslı Osilatör

Fiber lazer güçlendirici uygulamalarında kullanılmak üzere kaynak sinyal olarak *Yb*-katkılı tamamı-normal dağılım kip-kilitli osilatör seçilmiştir. Soliton, gerilmiş atım (stretched pulse), similariton, tamamı-normal dağılım gibi birçok kip-kilitli rejim içerisinde tamamı-normal dağılım kip-kilitli osilatör seçmenin birkaç nedeni vardır. Bu tür osilatörlerdeki kavitenin tamamı pozitif dağılıma sahip fiberlerden oluşur. Kavite içerisinde oluşan atımlar çok yüksek yayılıma (chirp) sahip oldukları için, zaman alanındaki şekli ve frekans alanındaki şekli bozulmadan aynı kalır. Bu da bant geçiren kullanarak atımın kenar kısımlarını keserek, zaman ve frekans alanlarındaki orijinal durumuna geri döndürülebilir [39]. Bu tür kip kilitli osilatör sistemleri daha çok $1\mu\text{m}$ dalgaboyuna sahip

osilatörlerde tercih edilir. Bunun sebebi de genel fiberlerin $1\mu\text{m}$ dalgaboyunda pozitif dispersiona sahip olmalarıdır. Tez çalışmasında da *Yb*-katkılı osilatör kurulacağı için tamamı-normal dağılım türünde osilatör yapılmıştır. Hatta bu tür osilatörlerden diğer türlere göre daha fazla atım enerjisi elde edilebilmektedir [40].

Tez çalışmasında yapılan osilatörün tekrarlama frekansı 100MHz seçilmiştir. Bu tekrarlama frekansı kavitenin ne kadar uzun olduğunu da gösteren bir ibaredir. Işık hızının kavite içerisinde dolaşma zamanını gösterir. Mesela bu çalışmada yapılan kavitede yaklaşık 25cm boşluk ve yaklaşık 180 *cm* fiberden oluşmaktadır. Işığın boşluktaki hızı $3 \times 10^8 \text{m/sn}$ yani 300MHz alınır ve fiberin indisinin 1.5 olduğu düşünülürse,

$$f_{\text{tekrarlama}} = \frac{300\text{MHz}}{n_{\text{fiber}}L_{\text{fiber}} + L_{\text{air}}}$$

sonuç olarak tekrarlama frekansı 100MHz olarak bulunur.

Osilatör bölümünde kullanılan bileşenler sırasıyla pompa diyot, dalgaboyu bölücü-birleştirici (wavelength-division multiplexed (WDM)), çoklayıcı, *Yb*-katkılı kazanç fiberi, ve pasif kip-kilitlenmesini sağlayan dalga levhaları (wave-plate), filtre, kutuplama demet ayırıcı (Polarization Beam Splitter (PBS)) ve yalıtıcıdır.

Pompa diyot 976nm merkez dalgaboyuna ve 600mW ortalama optik güce sahip bir bileşendir. Bu bileşen *Yb*-katkılı kazanç fiberini pompalamak için kullanılmıştır. *Yb*-katkılı kazanç fiberinin kazancı 976nm'de 500dB/m'dir. Nüve çapı fiber eklemeleri kolay olsun diye genel tek-mod fiberlerin nüve çapıyla aynı seçilmiştir. $6\mu\text{m}$ çaplı nüveye ve $125\mu\text{m}$ kılıfa sahip bir *Yb*-katkılı kazanç fiberi seçilmiştir. Kavite içerisinde yaklaşık 60cm uzunluğunda kullanılmıştır.

Dalgaboyu bölücü-birleştirici bileşeni 975/1030nm dalgaboylarında ayırmak/birleştirmek görevini üstlenmektedir. Pompa diyotun ucu WDM'in 976nm dalgaboyunu destekleyen portuna eklenmiştir. *Yb*-katkılı kazanç fiberi de her iki dalgaboyunu da destekleyen portuna yani genel porta eklenmiştir. Çıkış alınan port ise sinyal portudur. Çoklayıcı bileşeni ise kavitedeki sinyali kontrol etmek için kullanılmıştır.

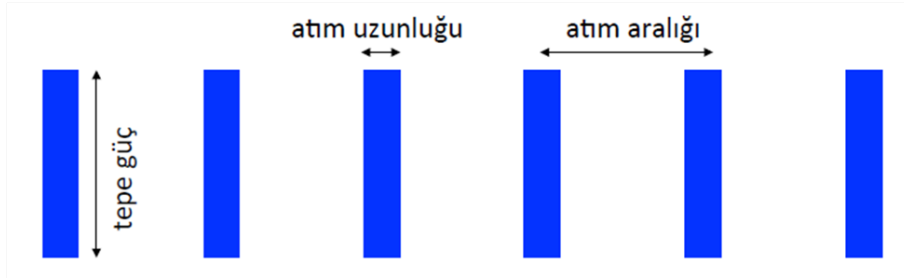
Bu çalışmada pasif kip-kilitlenmeli osilatör seçilmiştir. Bu, doğrusal olmayan kutuplanma evrimi (nolinear polarization evolution) olayının gerçekleştiği doymalı emilimle (saturable absorber) meydana gelir. Bu olay kavite içerisinde ışığın boşlukta gittiği 25cm'lik bölgede gerçekleştirilmiştir. Burada yer alan wave-plate'ler, filtre ve kutuplama demet ayırıcı, doymalı emilim içindir. Yalıtıcı ise ışığın kavite içerisinde tek yönde ilerlemesini sağlar.

Sonuç olarak fiber lazer güçlendirici sistemleri için 100MHz tekrarlama frekansına sahip ve ortalama optik gücü $85mW$ olan bir adet kip-kilitli osilatör sistemi kurulmuştur. Atım genişliği yaklaşık 1.2ps'dir. 1035nm merkezli dalgaboyuna sahip sinyalin spektrum genişliği 19nm'dir.

Bu bölümün kalan altbölümlerinde bu altbölümde bahsedilen osilatör sistemi kullanılarak oluşturulan, iki farklı modda fiber lazer güçlendirici sistemi anlatılacaktır. Bunlardan ilki normal atımlı Yb-katkılı fiber lazer güçlendirici sistemi diğeri ise küme-modlu fiber lazer güçlendirici sistemidir.

4.2 $100\mu J$ Atım Enerjisine Sahip Kip-Kilitli Yb-Katkılı Fiber Lazer Güçlendirici Sistemi

Fiber lazer sistemlerinin iki farklı çalışma şekli vardır. Bunlardan ilki sürekli mod, diğeri ise kip-kilitli moddur. Sürekli modda sinyal kesintisiz bir şekilde fiberde devam ederken kip-kilitli modda sinyal atımlar şeklinde ilerler.



Şekil 4.1: Kip-kilitli mod

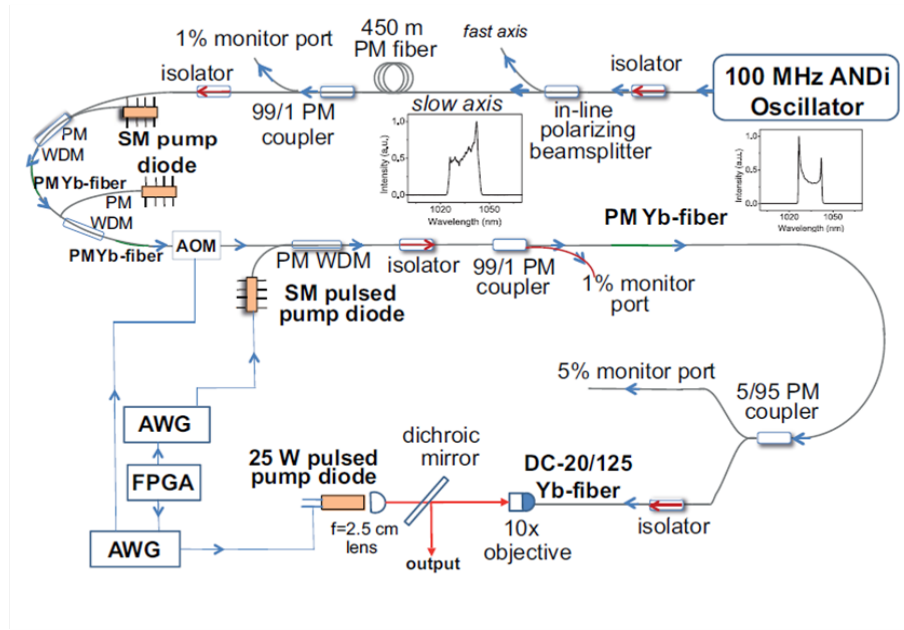
$$E_{atim} = P_{ortalama} / f_{tekrarlama}$$

E_{atim} atım enerjisi, $P_{ortalama}$ ortalama optik güç, $f_{tekrarlama}$ tekrarlama frekansdır.

$$P_{tepe} = E_{atim} / \tau_{atim}$$

P_{tepe} tepe güç, τ_{atim} atım uzunluğudur.

Bu kısımda normal atımlarla oluşturulan $100\mu J$ atım enerjisine sahip kip-kilitli Yb -katkılı fiber lazer güçlendirici sisteminden bahsedilecektir.

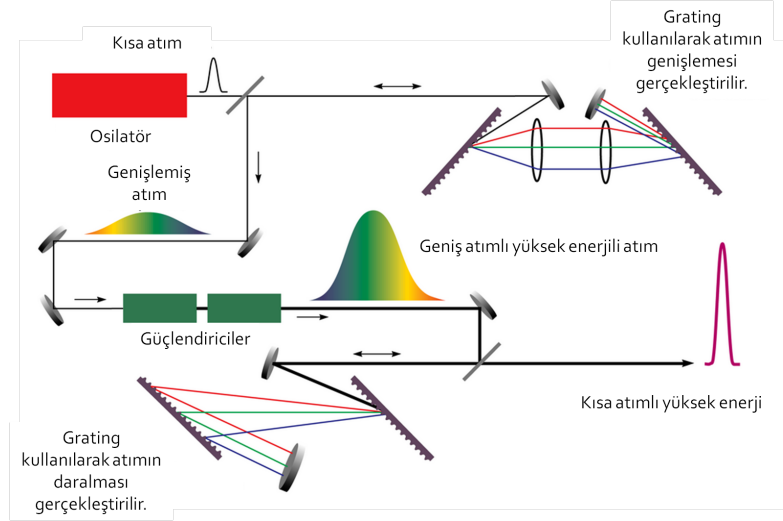


Şekil 4.2: $100\mu J$ atım enerjisine sahip kip-kilitli Yb -katkılı fiber lazer güçlendirici sistemi

Şekil 4.2'de yer alan parçalar kısımlar sırayla anlatılacaktır.

Kaynak sinyali olarak altbölüm 4.1'de bahsedilen merkez dalgaboyu $1035nm$ ve ortalama optik gücü yaklaşık $85mW$ olan all-normal dispersion osilatör kullanılmıştır. Osilatör bu tür sistemler için en kritik nokta olduğu için bu bölgeyi koruma altına almak adına 3. bölümde bahsedilen kutuplanmaya bağlı olmayan yalıtıcı özellik gösteren bileşen (isolator) kullanılmıştır. Kutuplanmaya bağlı olmayan yalıtıcı kullanılmasının sebebi osilatör çıkış sinyalinin kutupsuz olmasıdır. Sistemin devamında sinyalin kutuplanmasını sağlayacak bir adet kutuplayıcı (in-line polarizing beamsplitter) takılmıştır. Bu bileşen sayesinde sinyal lineer kutuplanmaya çevrilmiştir. Sistemin bu noktadan sonra yer alan

bütün bileşenleri kutuplanmayı koruyan türdedir.



Şekil 4.3: Chirped Atım Güçlendirici sistemi

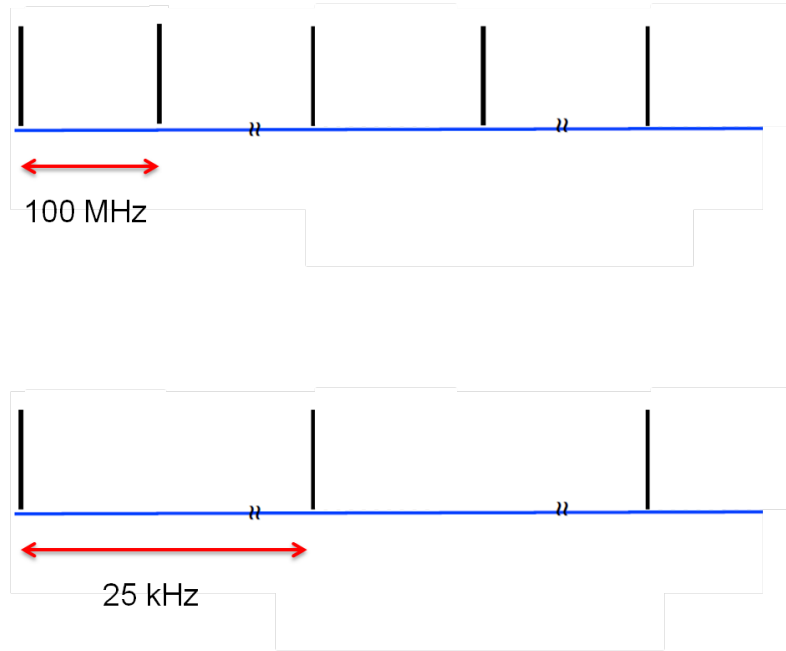
Kısa atımların genişletilmesi yüksek güçlü fiber lazer sistemlerinde oldukça fazla uygulanan bir yöntemdir. Amacı atımların tepe güçlerini atımları genişleterek düşürmek ve böylece sinyal güçlendirmesini yaptıktan sonra fiber içerisinde meydana gelebilecek olan nonlinear etkileri en aza indirmektir. Hatta tepe gücün düşürülmesi ile herhangi bir noktadan geri yansıma sonucu da bileşenlerin zarar görmesi engellenmiş olur.

Şekil 4.3 atımların kırınım ağırları (grating) kullanılarak genişletimesini (stretch) ve tekrar daraltılarak atımların güçlendirilmesi anlatmaktadır. Kısa atımlar pozitif dağılım ile genişletilir. Genişletilen atımlar yükselticilerde güçlendirilir ve tekrar kırınım ağırları kullanılarak atımlar kısaltılır. Böylece sistem içerisinde hem istenmeyen yüksek doğrusal olmayan etki oluşumu engellenmiş olurken hem de bazı yüksek güce hassas bileşenler koruma altına alınmış olur. Atımlar genişletilmesinde pozitif dağılım kullanıldığı için bu tez çalışmasında atım genişletme kısmı normal fiberle yapılmıştır. Bunun için 450m uzunluğunda fiber kullanılarak atımlar 360ps'ye kadar uzatılmıştır. Ortalama optik güç 10mW olarak ölçülmüştür.

Akusto-optik modulator öncesi iki adet nüve-pompa güçlendirici ile 10mW

ortalama güce sahip sinyal yaklaşık 700mW'a kadar güçlendirilmiştir. Bu güçlendiricilerde 976nm dalagaboyuna ve ortalama optik güçleri 600mW olan pompa diyotlar kullanılmıştır. Her bir güçlendiricide 50cm uzunluğunda Yb-katkılı kazanç fiberleri kullanılmıştır.

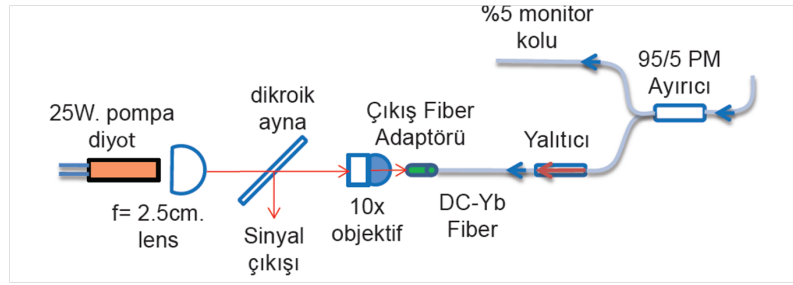
FPGA tabanlı olarak akusto-optik modulator sayesinde atım sıklığı değiştirilebilmektedir. Osilatör çıkışında 100MHz tekrarlama frekansına sahip olan sistem AOM sonrasında 25kHz kadar düşürülmüştür. Yani tekrarlama frekansı 4000 kat azaltılmıştır. Atım enerjisi sabit kaldığı için ortalama optik güç de 4000 kat azalmıştır. AOM sonrasındaki ortalama optik güç 0.1mW'lara kadar düşmüştür. Yüksek atım enerjilerine ulaşmak için ya ortalama gücü artırmak gerekmektedir ya da aynı ortalama optik güçte tekrarlama frekansını düşürmek gerekir. Ortalama optik güç seviyesi W seviyelerine ulaştıktan sonra güç atım enerjisini yalnızca ortalama gücü artırarak 4000 kat artırmak neredeyse imkansızken atım tekrarlama sıklığını düşürerek oldukça düşük ortalama güçlerde yüksek enerji seviyelerini yaklamak mümkündür.



Şekil 4.4: Atım seçme (100MHz'den 25kHz'e)

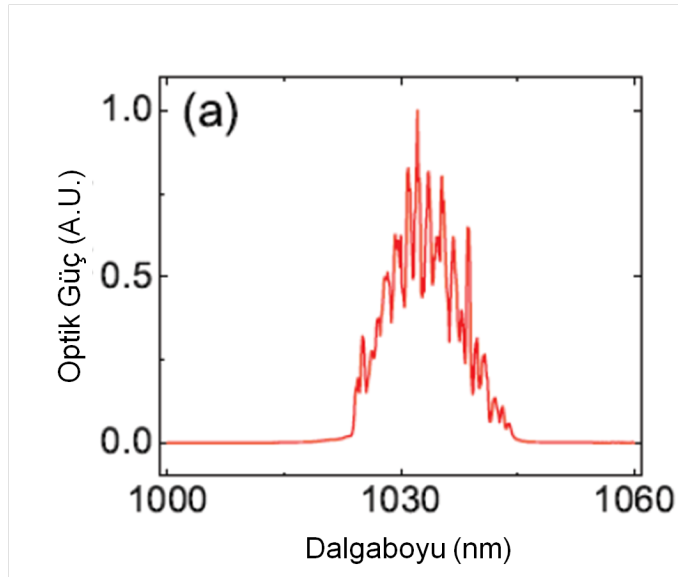
AOM sonrasında ortalama optik gücün 0.1mW seviyelerine düşmesi bir sorunu ortaya çıkarmaktadır. Bu ortalama güç seviyeleri ile güçlendirici sistemin kazanç

fiberinde saturasyon sağlamak mümkün olmadığı için sistem kendiliğinden uyarılmış emisyon yapmaktadır. Bu da sistem çıkışında gürültü elde etmekten başka birşey değildir. Bunu için AOM sonrasında da iki adet nüve-pompa güçlendirici sistemi kurularak ortalama optik güç 0.1mW seviyesinden 5mW seviyelerine getirilmiştir. Bu güçlendiricilerde de 976nm dalgaboyuna ve ortalama optik güçleri 600mW olan pompa diyotlar kullanılmıştır. Her bir güçlendirici de 50cm uzunluğunda *Yb*-katkılı kazanç fiberleri kullanılmıştır.



Şekil 4.5: Fiber lazer güçlendirici

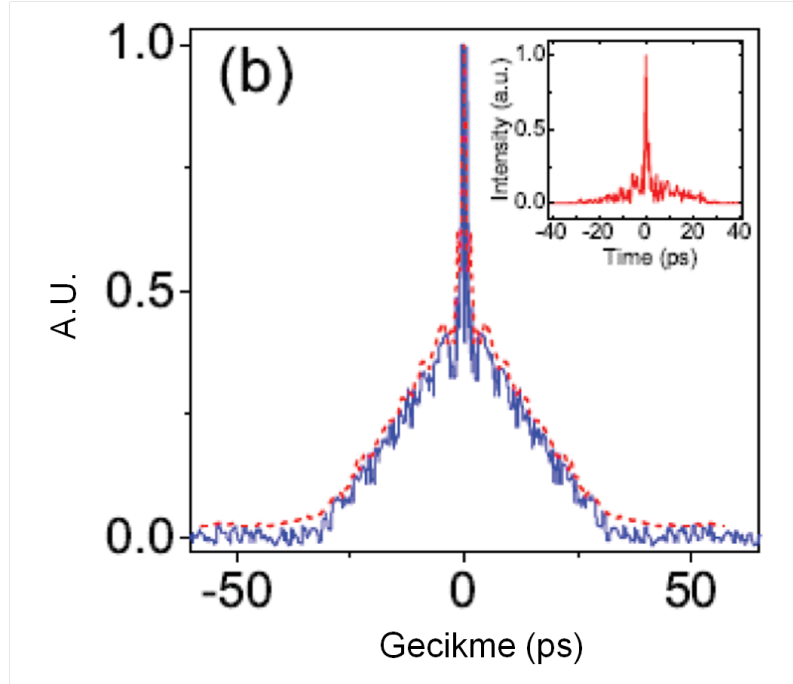
Fiber optik güçlendirici kısmında ise, sinyal iki kılıflı *Yb*-katkılı kazanç fiberi kullanılarak güçlendirilmiştir. Güçlendirme işleminde kullanılan pompa diyot 976nm dalgaboyu merkezli ve 25W ortalama optik güce sahip bir diyottur. Sinyal 2.5W'a kadar güçlendirilmiştir.



Şekil 4.6: Fiber lazer güçlendirici sonrası spektrum

Şekil 4.6'da da görüldüğü üzere sistem çıkışında spektrumda bir değişiklik olmamıştır. 1035nm dalgaboyu merkezli 2.5W ortalama optik güce ve 200ps atım genişliğine sahip $100\mu\text{J}$ atım enerjisinde lazer sistemi kurulmuştur.

Şekil 4.3'ün son kısmında yer alan atım daraltma işlemi bu tez çalışmasında da yapılmıştır. Kırınım ağı aracılığı ile atımlar 2.1ps'ye kadar daraltılmıştır.



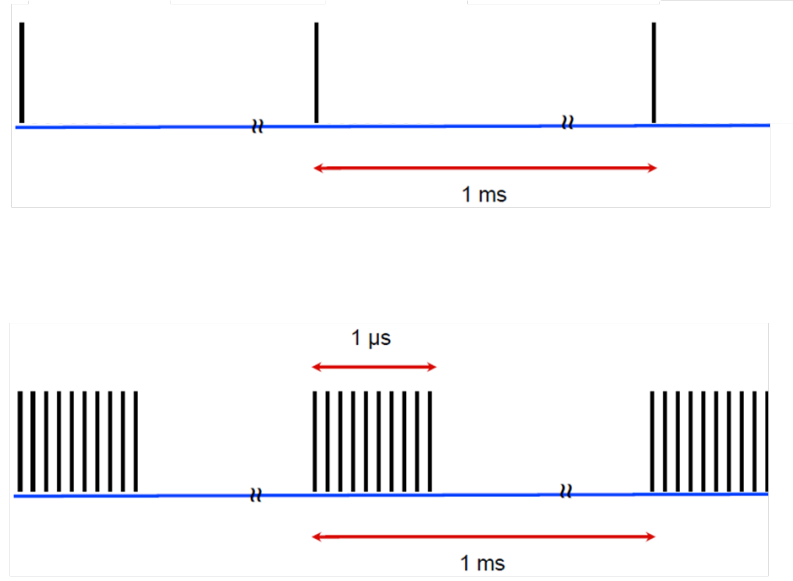
Şekil 4.7: Atım daraltma işlemi

Şekil 4.7'de içinde yer alan küçük grafik ise PİCASO ile elde edilmiş atım genişliğidir. Bu işlem sırasında spektrum ve oto korelasyondan yararlanılmıştır.

4.3 1mJ Atım Enerjisine Sahip Küme-modlu Yb -katkılı Fiber Lazer Güçlendirici Sistemi

Kip-kilitli fiber lazer sistemlerinde normal atımların dışında bir birçok atımın paketler halinde verildiği küme-modlu olarak adlandırılan bir vardır. Küme-modlu atım türü normal moda göre tek farkı herbir tekrarlama frekansında bir adet atım

yerine bir demet atımdan oluşmasıdır. Demet içerisindeki atım sayısı değişkenlik gösterebilmektedir.

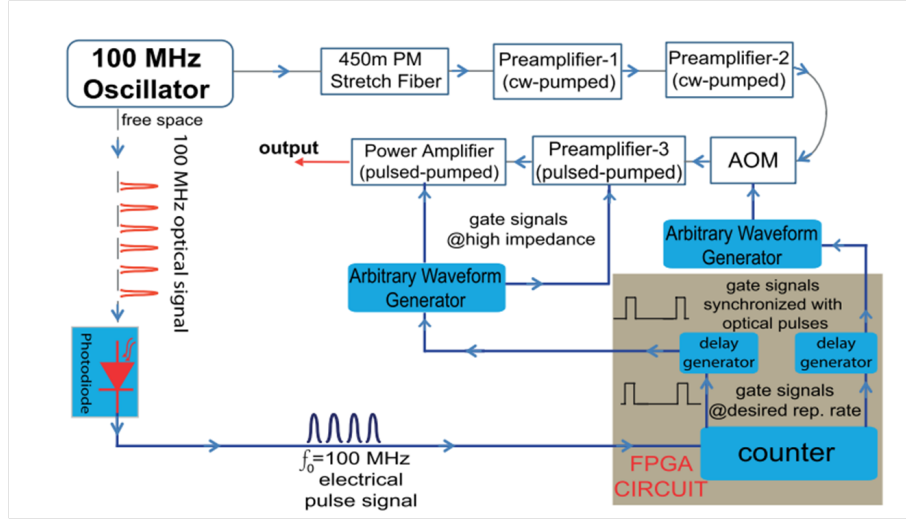


Şekil 4.8: Normal atım ve küme-modlu atım

Bu altbölümde de 1mJ atım enerjisine sahip küme-modlu *Yb*-katkılı fiber lazer güçlendirici sisteminden bahsedilecektir. Sistem düzeneği altbölüm 4.2'de bahsedilen sistemle aynı olup diğer sistemden farkları, AOM elektroniğini sürüş devresi ve pompa diyotların sürülme şekilleridir.

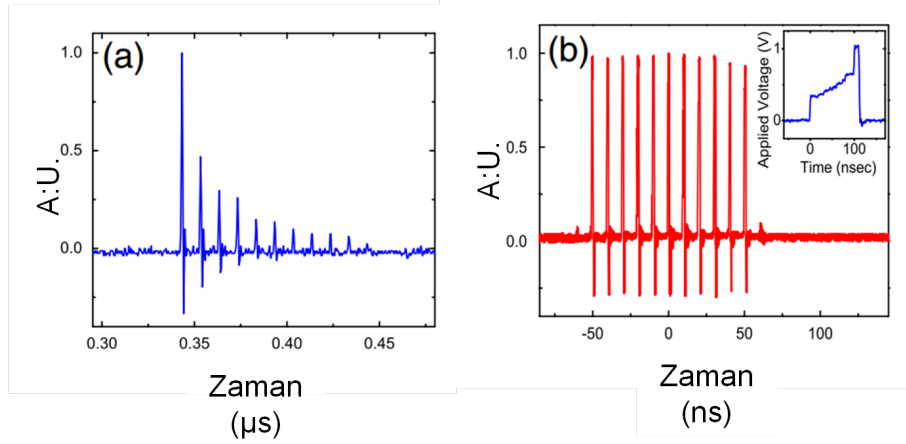
Kaynak sinyali olarak altbölüm 4.1'de bahsedilen 1035nm merkez dalgaboyuna 19nm band genişliğine ve 85mW ortalama optik güce sahip sistem seçilmiştir. Sinyal kutuplandırılarak, stretch kısmında 450m optik fiberle 360ps genişliğinde atımlar elde edilmiştir. Sonrasında sinyal iki adet nüve-pompa güçlendiricilerle 600mW'a kadar çıkarılmıştır. AOM sayesinde istenilen küme-mod elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında iki farklı küme-mod denenmiştir. Bunlardan ilki 11 atımdan, diğeri ise 25 atımdan oluşmaktadır.

Sistemdeki elektronikler şu şekilde sürülmektedir. AOM, Alanda Programlanabilir Kapı Dizileri (Field Programmable Gate Array, FPGA) ile sürülerek istenilen sayıda atım içeren küme-modu oluşturmaktadır. Bunlarla senkronize olarak sürülen nüve-pompa güçlendiricilerle ilk güçlendirme yapılmaktadır. Pompa diyotlar kendiliğinden emisyon oluşturmasını engellemek için kazanç fiberlerinin



Şekil 4.9: Küme-modlu fiber lazer sistemi

uzunluğu genel uzunluğundan daha kısa tutulmuşlardır. Fiber lazer güçlendirici kısmı da gelen sinyallerle senkronize edilerek sürülmüşlerdir.

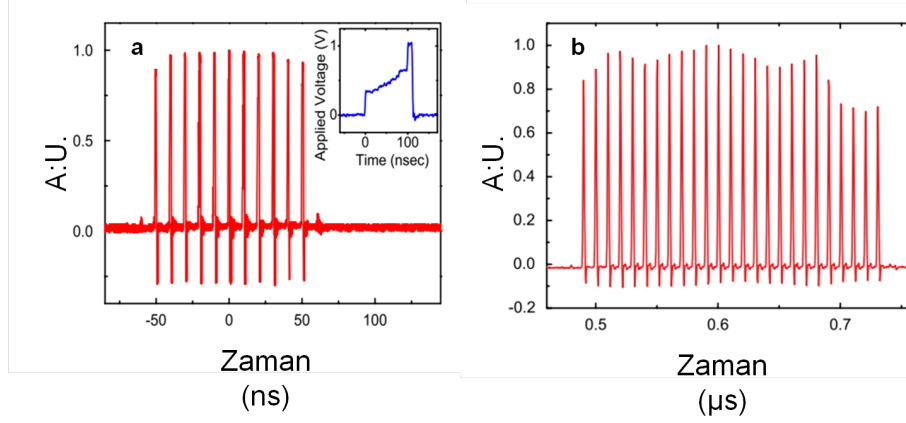


Şekil 4.10: AOM kapısının etkisi: a) homojen olmayan atımlar, b) homojen olan atımlar

AOM sürülümü dikkat edilmesi gereken bir noktadır. Eğer homojen bir küme-mod isteniyorsa AOM normalden farklı bir şekilde sürülmesi gerekmektedir. Yapılan deneylerde küme-modun içinde yer alan tüm atımların homojen olduğu bir AOM sinyali elde edilmiştir. Bu sürüş atım sayısına göre değişiklik gösterebilmektedir. Yani her sistem için kendine özel AOM kapı sinyaline gerek vardır.

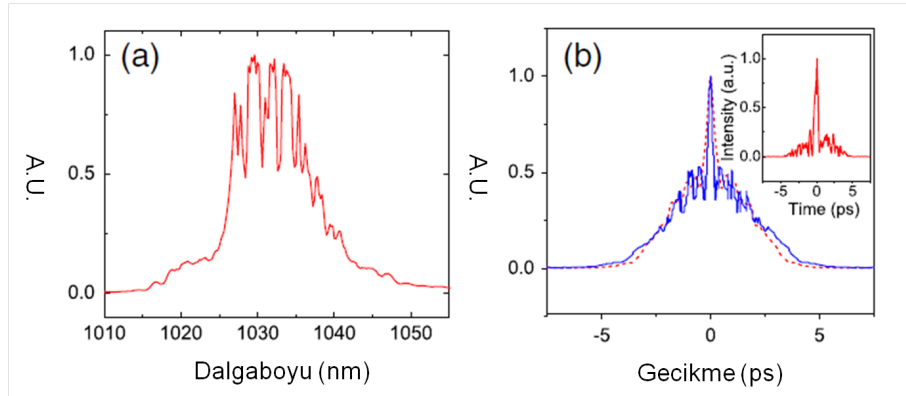
Şekil 4.11 (a) da 11 atımla oluşturulmuş küme-mod fiber lazer sistemin çıkış

atımlarıdır. Herbir atımın $60\mu\text{J}$ 'den oluşmaktadır ve 11 adet olduğu toplamda $660\mu\text{J}$ küme-mod atım enerjisi elde edilmiştir. Şekil 4.11 (b) de ise küme-mod 25 atımdan oluşmaktadır. Buradaki atımların herbiri $25\mu\text{J}$ 'e sahip olup toplamda 1mJ 'lük bir küme-mod atım enerjisine ulaşılmıştır [41].



Şekil 4.11: Küme-mod fiber lazer sistem sonuçları: a) 11 atımlı küme-mod, b) 25 atımlı küme mod

Şekil 4.12'de de görüldüğü üzere 25 atımlı küme-mod fiber lazer sistemin spektrum çıkışında herhangi bir bozulma yoktur. Altbölüm 4.2'de anlatılan sistemde kullanılan kırınım ağlar bu sistemde de kullanılarak atım daraltılması yapılmıştır. Atım genişliği 1.2ps 'ye kadar düşürülebilmektedir [41].



Şekil 4.12: Küme-mod fiber lazer sistem sonuçları: a) 25 atımlı küme-modun spektrum çıkışı, b) 25 atımlı küme-modun atım genişliği [41]

4.4 Fiber Lazer Güçlendirici Sistemlerin Karşılaştırılması

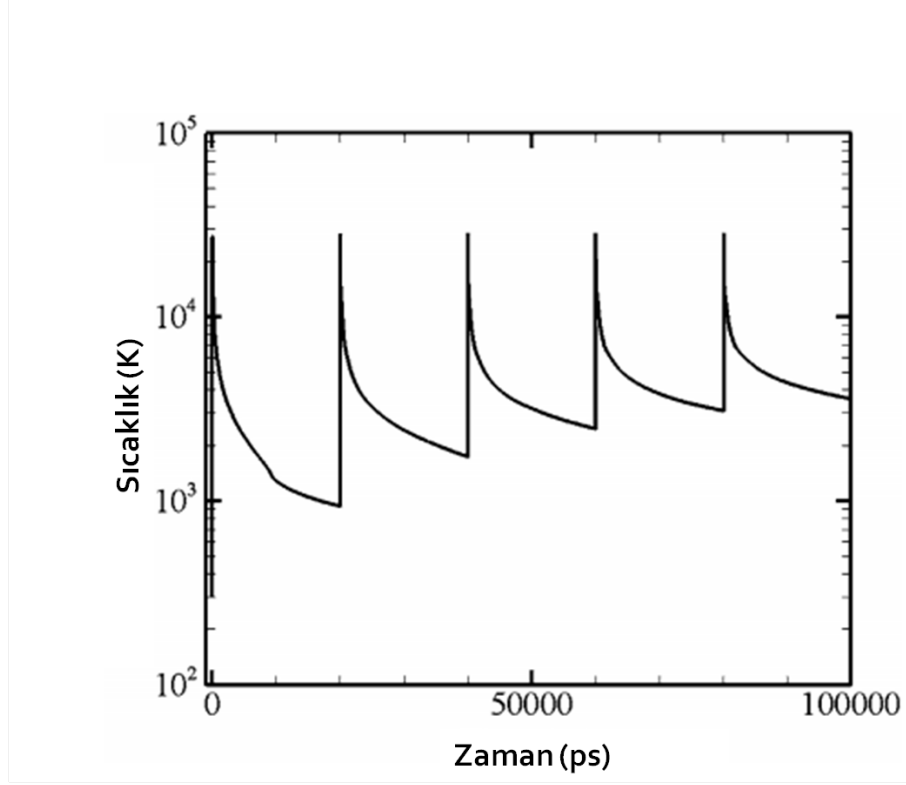
Bu kısımda 25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemi, 100MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemi ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin karşılaştırması yapılacaktır. Yapılan deneyler, elektron demeti üretimi için yapılmamıştır. Deneylerde, materyalden atom koparma yapılarak hanig sistemin daha verimli olduğu gözlemlenmiştir. Atom koparma işlemi ile elektron demeti üretimi arasında konsept olarak fark bulunmamaktadır. Atom koparma işleminde kullanılan atım enerjisinden daha az bir enerji ile elektron demeti üretimi yapılabilmektedir.

Hu ve dig. [43] ilk defa küme-modun teorik ve deneysel çalışmalarını yapmış ve küme-modlu lazer sistemlerinde atom koparılan bölgenin sıcaklığının, tamamen ısıyı kaybetmeden işlem yapılabilmesini göstermiştir (şekil 4.13). Yani tek atımlı lazer sistemlerinde ilk atım ile ikinci atım arasında materyalin sıcaklığı tekrar eski haline dönmekte ve hem ısı etrafa yayılarak işlem görmesini istemediğimiz yüzeylerin zarar görmesine sebep olur hem de ikinci atımın tekrar işlem yapılan bölgeyi ısıtması için enerji harcar. Ancak küme-modlu lazer sistemlerinde işlem yapılan bölge tam olarak soğumadığı için iki küme atım işlem yapılacak bölgeyi daha az ısıtarak enerji kaybını aza indirerek enerjisini atom koparmaya harcar.

Yukarıda bahsedilen üç sistem ile aynı atım enerjileri elde edilecek şekilde fiber lazer sistemleri kurulmuş ve atım enerjileri eşit olduğu halde ablasyon derinliklerine bakılmıştır (şekil 4.14).

Deney sonucunda, 100MHz ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemlerinin ablasyon derinlikleri yaklaşık olarak aynı çıkarken 25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemi diğer sistemlere göre daha verimsiz sonuçlar vermektedir.

Diş dokusu üzerinde yapılan deneyde de [?]can1) (şekil 4.15) 500MHz tekrarlama frekansına sahip fiber lazer sisteminden daha verimli sonuçlar alınmıştır. 25kHz tekrarlama frekansına sahip fiber lazer sisteminde işlem gören kısımlara komşu

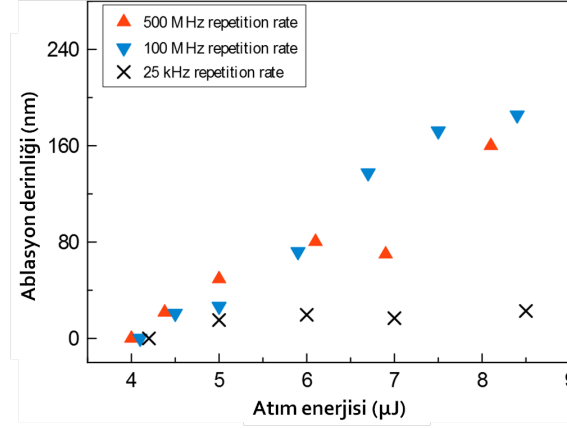


Şekil 4.13: Küme-modlu lazer sistemlerinde işlemlenen materyal bölgesinin zamanla sıcaklık değişimi [43]

olan bölgelerde ısınmadan dolayı oluşan bozulmalar gözlemlenmiştir.

4.5 Elektron Demeti Üretimi İçin Yorumlar

Kip-kilitli veya küme-modlu fiber lazer sistemlerle yapılan deneyler atom koparmaya yönelik çalışmalardır. Bu yapılan çalışmalarda elektron demeti üretimi gerçekleştirilmemiştir. Ancak elektron demeti üretimi ile atom koparma işlemleri birbirlerine oldukça benzemektedir. Elektron demeti üretiminde malzeme yüzeyini ablasyona uğratmamak gerekir. Atom koparma işlemi birim alana düşen enerjiye bağlıdır. Yani elektron demeti üretimini daha az enerjili bir sistemle yapmak gerekmektedir. Bu kısımda da elektron demeti üretimi için yapılabilecek iki farklı metod açıklanmaya çalışılacaktır.



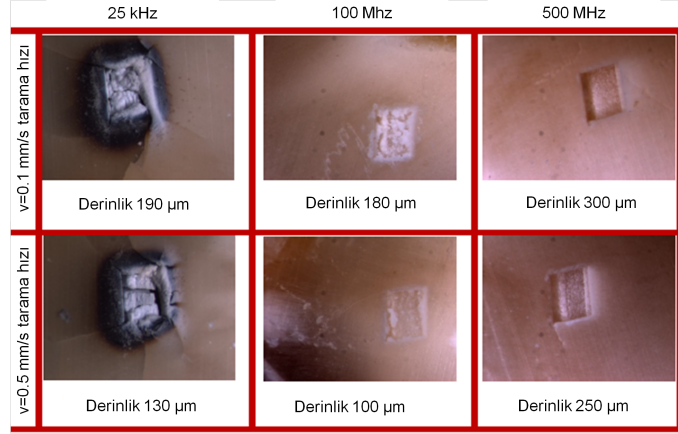
Şekil 4.14: 25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemin (siyah), 100MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin (mavi) ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin karşılaştırması (kırmızı) [42]

4.5.1 2. Harmonik Üretimi ile Elektron Demeti Üretimi

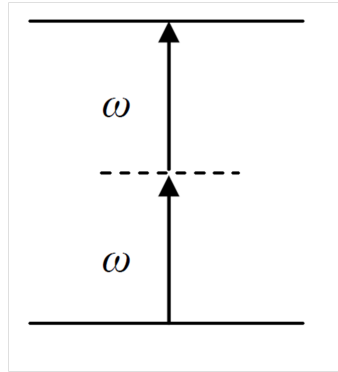
Küme-modlu lazer sistemi frekans katlama tekniği yani 2. harmonik üretimi ile 1030nm'den 515nm'ye aktarılabilir. Bu aktarım sırasında Lithium triborate (LBO) veya barium borate (BBO) kristalleri kullanılarak yapılabilir. 500MHz tekrarlama frekansına sahip pikosaniye atımlı küme-modlu fiber lazer sistemi ile %50'ye varan bir verimlilikle gerçekleştirilmiştir. Ancak kullanılan sistemde ortalama güç yaklaşık 1W seviyesindedir. Bu değerlerin üstüne çıkılmaya başladıktan sonra kristallerin zarar görmeleri olasıdır. Bir diğer sorun ise pikosaniye atımlar elektron demeti üretimi için yeterli olmayacağı için atım genişliğini 100fs mertebelerine çekmek gerekmektedir.

4.5.2 Multifoton Etkileşimi ile Elektron Demeti Üretimi

Multifoton etkileşimi n adet fotonun aynı anda tek bir atom ile etkileşmesine dayalı bir prensiptir. Elektron üretimi yapılacak materyalin aktivasyon enerjisine yetecek kadar fotonun bir araya gelmesiyle oluşturulur. Şekil 4.16'da iki foton emiliminin basit bir örneği gösterilmektedir.



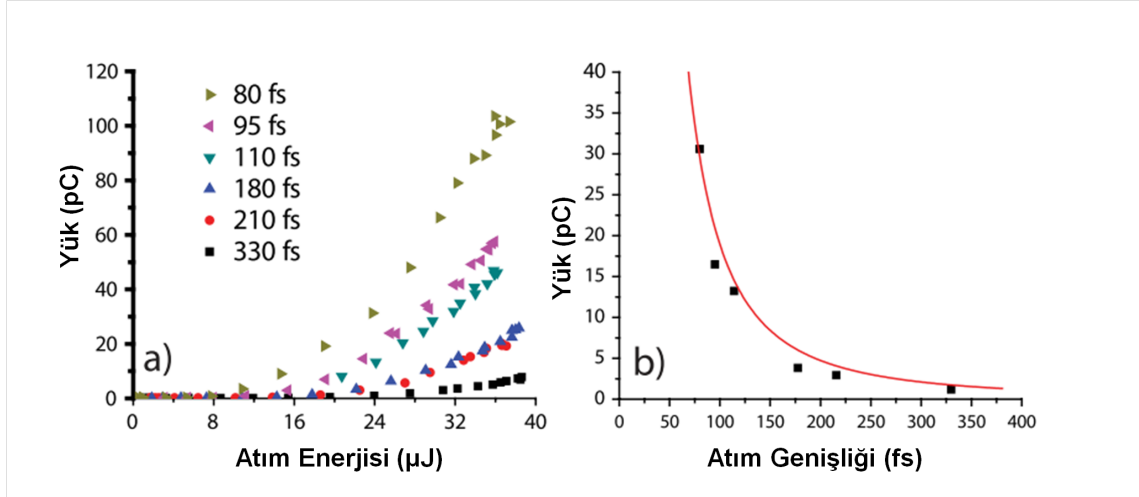
Şekil 4.15: 25kHz tekrarlama frekansına sahip kip-kilitli lazer sistemin, 100MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin ve 500MHz tekrarlama frekansına sahip küme-modlu lazer sistemin dış dokusu üzerinde yapılan deney sonuçları [42]



Şekil 4.16: İki-foton emilimi

Mesela 4.7eV aktivasyon enerjisine sahip bir metal için (*Cu*) 1040nm dalgaboyunda (1.2eV) lazer kullanıldığında 4 foton, 780nm dalgaboyunda (1.6eV) lazer için 3 foton, 520nm (yeşil) dalgaboyunda (2.4eV) lazer kullanıldığında 2 foton etkileşimi gerekmektedir. Bu etkileşim ise lazer şiddetine ile doğrudan bağlıdır. Hu ve diğ. yaptıkları çalışmada 30pC mertebesindeki fotoelektron üretimini ($n = 3$ için) Ti:yakut lazeri kullanarak $2\mu\text{J}$ enerji ve $< 100\text{fs}$ atımlarla elde edebilmişlerdir [43]. Bunun anlamı 10^6 fotondan bir fotoelektron üretimi gerçekleşebilir demektir.

Hu ve diğ. yaptıkları çalışmada da elektron demeti üretimi için atım enerjisinin değil tepe gücünün önemli olduğu anlaşılmıştır (şekil 4.17).



Şekil 4.17: (a) Aynı atım enerjilerinde değişik atım genişliklerin karşılaştırılması, (b) Atım genişliği ile elektriksel yük arasındaki ilişki

Şekil 4.17 (a)'da sistemin atım enerjilerini sabit tutup farklı atım genişliklerinde ne kadar elektriksel yük elde edildiği görülmektedir. Bu durumda en kısa atım genişliğine sahip olan sistem en verimli sistem olmuştur. Tepe gücünün atım genişliği ile ters orantılı olduğu için elektron demeti üretimi atım enerjisinden daha çok tepe gücüne bağlıdır. Bu durum şekil 4.17 (b)'de açık bir şekilde görülmektedir. $20\mu\text{J}$ atım enerjisine sahip sistemin atım genişliği küçüldükçe veya tepe gücü arttıkça elde edilen elektriksel yük de artmaktadır.

5. SONUÇ

Bu tez çalışmasında hızlandırıcı uygulamalarına yönelik küme-modlu fiber lazer sistemlerinin geliştirilmesine yönelik çalışılmıştır. Bu çalışmalarda iki farklı sistem geliştirilmeye çalışılmıştır. Bunlardan ilki $100 \mu J$ atım enerjisine sahip kip-kilitli Yb-katkılı fiber lazer sistemi diğeri ise $1 mJ$ atım enerjisine sahip küme-modlu Yb-katkılı fiber lazer sistemidir. $100 \mu J$ atım enerjisine sahip kip-kilitli Yb-katkılı fiber lazer sisteminde atım genişlikleri çift kırınım ağları ile $200 ps$ 'den $2.1 ps$ 'ye kadar düşürülerek tepe gücü yaklaşık 100 kat artırılmıştır. Aynı şekilde $1 mJ$ atım enerjisine sahip küme-modlu Yb-katkılı fiber lazer sisteminde de atım genişlikleri çift kırınım ağları sayesinde $200 ps$ 'den $1.2 ps$ 'ye kadar düşürülerek tepe gücü yaklaşık 200 kat artırılmıştır. Tez çalışmasında bunlara ek olarak yukarıda bahsedilen lazer sistemlerine özel birkaç fiber optik bileşen üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki pompa ve sinyal birleştirici bileşenidir. 6+1 pompa ve sinyal birleştirici bileşeni üretilerek geçirgenliklerinde %90 mertebelerine kadar ulaşılmıştır. Ancak bu bileşenin geliştirilmesi gereken birkaç noktası vardır ve bu yüzden sistemlerde aktif olarak kullanılmamıştır. Sistemler için üretilen bir diğeri optik bileşen ise fiber çıkış adaptörüdür. Bu bileşen, tez çalışmasında olduğu gibi çok yüksek ışık şiddetine sahip ışık fiberden dışarıya çıkarken plazma oluşturmakta ve fibere zarar vermektedir. Fiber çıkış adaptörü ile birim alana düşen ışık şiddetini düşürerek bu sorun çözülmüştür. Yapılan deneylerle fiber çıkış adaptörünün boyu belirlenmiş ve sisteme yaklaşık $650 \mu m$ uzunluğunda fiber çıkış adaptörü takılmıştır. Geliştirilen sistemlerle diğeri dokusu üzerinde deneyler yapılmış ve küme-modlu fiber lazer sistemin, normal atımlı lazer sistemine göre oldukça verimli olduğu gösterilmiştir.

Kaynakça

- [1] <http://www4.nau.edu/microanalysis/Microprobe-SEM/Instrumentation.html>
- [2] <http://cds.cern.ch/record/941321>
- [3] C.J. Smithells, Metals Reference Book, Vol III Butterworths, London, 1967.
- [4] P.A. and Sands, R.H. Eds, "The LASER, Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation", *The Ann Arbor Conference on Optical Pumping*, p.128,1959.
- [5] A.D.Colley H.J.Baker, Planar waveguide, "1 kW CW, Carbon Dioxide Laser Excited by a Single Transverse RF Discharge", *Applied Physics Letters*, vol. 61, no. 2, 1959.
- [6] C.Steven, M.Larionoy and A.Giesen, "Yb:YAG thin disk laser with 1 kW output power", *Optical Society of America*, pp. 35,41, 2000.
- [7] E.Stiles, "New developments in IPG fiber laser technology", *5 th International Workshop on Fiber Lasers*, 2009.
- [8] Bates, Regis J (2001) *Optical Switching and Networking Handbook* p. 10.
- [9] J. L. Baird, British Patent 285,738 1928.
- [10] H. Lamm, "Biegsame optische gerate", *Z. Instrumenten*, 50, 579, 1930.
- [11] B. I. Hirschowitz, U. S. Patent 3,010,357 1961.
- [12] A. C. S. van Heel, *Nature*, 173, 39 1954.

- [13] R. G. Smith, *Appl. Opt.* 11, 2489 1972.
- [14] E. P. Ippen and R. H. Stolen, *Appl. Phys. Lett.*, 21, 539 1972.
- [15] R. H. Stolen, E. P. Ippen, and A. R. Tynes, *Appl. Phys. Lett.* 20, 62, 1972.
- [16] R. H. Stolen and A. Ashkin, *Appl. Phys. Lett.* 22, 294 (1973)
- [17] R. H. Stolen, J. E. Bjorkholm, and A. Ashkin, *Appl. Phys. Lett.* 24, 308, 1974
- [18] K. O. Hill, D. C. Johnson, B. S. Kawaski, and R. I. MacDonald, *J. Appl. Phys.* 49, 5098, 1974
- [19] R. H. Stolen and C. Lin, *Phys. Rev.*, A 17, 1448, 1978.
- [20] R. L. Fork, C. H. Brito Cruz, P. C. Becker, and C. V. Shank, *Opt. Lett.* 12, 483, 1987.
- [21] N. J. Smith, F. M. Knox, N. J. Doran, K. J. Blow, and I. Bennion, *Electron. Lett.* 32, 54 1996.
- [22] F. Ö. Ilday, J. R. Buckley, W. G. Clark, and F. W. Wise, "Self-similar evolution of parabolic pulses in a laser", *Phys. Rev. Lett.*, 92, 3902-3905 2004
- [23] A Chong, J Buckley, W Renninger, F Wise, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser", *Opt. Exp.* 14, 10095-10100 2006
- [24] B. Oktem, C. Ülgüdür and F. Ö. Ilday, "Soliton-similariton fibre laser", *Nature Photonics*, 4, 307, 2010.
- [25] G. P. Agrawal, San Diego, CA, *Nonlinear Fiber Optics*, 2007.
- [26] R. W. Boyd, *Nonlinear Optics*, 2003.
- [27] <http://www.fiberoptics4sale.com/wordpress/optical-fiber-attenuation>
- [28] E. Snitzer, H. Po, F. Hakimi, R. Tumminelli, B. C. McCollum, "Double clad offset core Nd fiber laser", *Optical Fiber Sensors Topical Meeting*, New Orleans, Louisiana/USA, paper PD 5, 1988.

- [29] <https://www.rp-photonics.com/>
- [30] <http://www.itflabs.com/>
- [31] <http://www.rp-photonics.com/acoustoopticmodulators.html>
- [32] <http://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic-modulator>
- [33] A. E. Turner, R. L. Gunshor, and S. Datta, "New class of materials for optical isolators", *Appl. Opt.* 22, 3152-3154 1983.
- [34] <http://en.wikipedia.org/wiki/Optical-isolator>
- [35] Ö. Akçaalan, "100 μJ Pulse Energy From an All Yb-doped Fiber Amplifier", FOTONİK, Ankara, 2013
- [36] V. Arlee, "Bulk and surface laser damage of silica by picosecond and nanosecond pulses at 1064 nm", *Appl. Opt.* 47, 4812 (2008).
- [37] <http://www.3spgroup.com/data/File/ITFLabs/Posters>
- [38] Ö. Akçaalan, "Fiber Lazerler için Kaynaşık Fiber Bileşen Üretimi", FOTONİK, İstanbul, 2012
- [39] A Chong, J Buckley, W Renninger, F Wise, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser", *Opt. Exp.* 14, 10095-10100 2006.
- [40] A. Chong, W. H. Renninger, and F. W. Wise, "All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20 nJ", *Opt. Lett.*, 32, 2408-2410 2007.
- [41] H. Kalaycıoğlu, Y. B. Eldeniz, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, K. Gürel, M. Efe, and F. Ö. Ilday, "1 mJ pulse bursts from a Yb-doped fiber amplifier", *Opt. Lett.*, 37(13), 2586–2588 2012.
- [42] C. Kerse, "Non-thermal Tissue Ablation With Bursts of 1-ps Pulses at $1\mu m$ ", FOTONİK, İstanbul, 2012
- [43] P. Musumeci, et al., "Multiphoton Photoemission from a Copper Cathode Illuminated by Ultrashort Laser Pulses in an rf Photoinjector", *Phys. Rev. Lett.* 104, 084801 (2010).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : AKÇAALAN, Önder
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 25.12.1987 İstanbul
Medeni hali : Bekar
Telefon : (0505) 652 64 97
Faks :
e-mail : akcaalan@bilkent.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Bilkent Üniversitesi	2010
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi	2013

Yabancı Dil

İngilizce (Çok iyi)

Yayımlar

H. Kalaycıoğlu, “1 mJ pulse bursts from a Yb-doped fiber amplifier,” Opt. Lett. 37, 2586 (2012).

P. Elahi, Doping management for high-power fiber lasers: 100 W , few-picosecond pulse generation from an all-fiber-integrated amplifier, Opt. Lett. 37, 3042–3044 (2012).