



**T.C.**  
**Uludağ Üniversitesi**  
**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**DÜŞÜK GÜÇLÜ FİBER LAZER DİYOTLU KESME  
SİSTEMLERİNDE IŞIN KALİTE FAKTÖRÜNÜN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Pelin SÜLE**

**Yüksek Lisans Tezi**

**DÜŞÜK GÜÇLÜ FİBER LAZER DİYOTLU KESME  
SİSTEMLERİNDE İŞİN KALİTE FAKTÖRÜNÜN  
İYİLEŞTİRİLMESİ**

**Pelin SÜLE**



T.C.  
ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜŞÜK GÜÇLÜ FİBER LAZER DİYOTLU KESME SİSTEMLERİNDE IŞIN  
KALİTE FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ

PELİN SÜLE

PROF. DR. GÜNEŞ YILMAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA 2013

## TEZ ONAYI

Pelin SÜLE tarafından hazırlanan “Düşük Güçlü Fiber Lazer Diyotlu Kesme Sistemlerinde Işın Kalite Faktörünün İyileştirilmesi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

**Başkan :** Prof. Dr. Güneş YILMAZ İmza  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi,  
Elektronik Mühendisliği Anabilim  
Dalı

**Üye :** Yrd. Doç. Dr. Sait Eser KARLIK İmza  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi,  
Elektronik Mühendisliği Anabilim  
Dalı

**Üye :** Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT İmza  
U.Ü. Mühendislik Mimarlık  
Fakültesi,  
Makine Mühendisliği Anabilim  
Dalı

**Yukarıdaki sonucu onaylarım**  
**Prof. Dr. Ali Osman Demir**  
**Enstitü Müdürü**  
.../.../...

**U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;**

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,  
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,

- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,

- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,

- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,

- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

**beyan ederim.**

**04/09/2013**

**İmza**

**Pelin SÜLE**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### DÜŞÜK GÜÇLÜ FİBER LAZER DİYOTLU KESME SİSTEMLERİNDE IŞIN KALİTE FAKTÖRÜNÜN İYİLEŞTİRİLMESİ

**PELİN SÜLE**

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**Danışman:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

Fiber lazerli kesme sistemlerinin, sac işleme sektöründe metal ve metal alaşımları kesmek için kullanılan lazerlere göre bakım maliyetinin %50 daha az olması ve çalışma ortamına zehirli gaz ve çeşitli atık bırakmamasından ötürü çevre dostu olması sebebiyle son yıllarda sektörde kullanımı artmıştır. Fiber lazer kesim sistemlerinde kullanılan fiber optik ve diyot teknolojisi nedeniyle bu sistemler bilimsel anlamda birçok çalışmanın yürütüldüğü bir alandır. Tez çalışmasında düşük güçlü, fiber kuplaj verimi %40'ın üzerinde, ışın kalite faktörü değeri bire yakın, sürekli mod rejiminde çalışan fiber lazer sistemi ve modülleri üzerinde analiz ve modellemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda, lazer ışınının oluştuğu kavite uzunluğu ve optik malzemelerin parametre değerleri önerilmiştir. Bu çalışma süresince fiber lazer alanında tamamlanan tezler, yüksek indeksli dergilerde yayınlanan makaleler, fiber lazer üretici firmaların patentleri ve fiber lazeri oluşturan komponentlerin teknik özellikleri incelenmiştir. Fiber lazer kesim sistemlerinin daha verimli kullanılması için yöntemler önerilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fiber lazer, diyot, ışın, optik

**2013, xi + 88 sayfa**

## **ABSTRACT**

MSc Thesis

### **IMPROVEMENT OF BEAM QUALITY FACTOR (BQF) IN LOW POWER FIBER LASER DIODE CUTTING SYSTEMS**

**PELİN SÜLE**

Uludag University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electronics Engineering

**Supervisor:** Prof. Dr. Güneş YILMAZ

In sheet metal processing industry, fiber laser cutting systems cost of care is less than 50% according to laser systems which cut metal and metal alloys and in recent years their using area are increased due to variety of toxic gasses and never let go of waste in environment. Owing to fiber optic and diode technology which used in fiber laser cutting systems are a popular area of scientific study.

In thesis, fiber laser with low power, fiber coupling efficiency of over 40%, the beam quality factor value close to unity, in continuous mode regime systems has been analyzed and modeled. As a result, cavity length of laser beam consist and parameter values of opticals are proposed.

During this study, completed thesis in field of fiber laser, high-indexed journals, granted patents and fiber laser components are examined.

Methods have been suggested for more efficient use of fiber laser cutting systems.

**Key words:** Fiber laser, diode, beam, optic

**2013, xi + 88 pages**

## TEŞEKKÜR

Akademik alıőmalarımda yardımlarını esirgemeyen sayın danıőmanım Prof. Dr. GÜneş YILMAZ'a teőekkürlerimi bir bor bilirim.

Tüm hayatım boyunca beni her konuda destekleyen ve yanımda bulunan babam Hayrettin SÜLE, annem Bahise SÜLE ve ağabeyim Volkan SÜLE'ye sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Pelin SÜLE

..../.../....



## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	i
ABSTRACT .....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ .....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	3
2.1 Lazerin Tarihçesi .....	3
2.2. Lazerin Tanımı ve Oluşumu.....	3
2.3.Metal İşlemede Kullanılan Lazer Çeşitleri ve Karşılaştırmalı Analizi .....	5
2.3.1 Optik pompalamalı katı lazerler .....	5
2.3.2 Sıvı lazerler .....	5
2.3.3 Boyar maddeli lazerler .....	5
2.3.4 Kimyasal lazerler .....	6
2.3.5 Yarıiletken lazerler .....	6
2.3.6 Katı hal lazerler .....	7
2.3.7 Gaz lazerler .....	7
2.3.8 Serbest elektronlu lazerler .....	8
2.4 Fiber Lazer .....	8
2.4.1 Lazer diyot ve pompalama sistemi .....	10
2.4.2 Aktif fiber ve Bragg ızgara .....	15
2.4.3 Katkı iyonu .....	16
2.5 Lazerli Kesim Sistemlerinde Çalışma Modu.....	17
2.6 Fotoelektrik Olay .....	18
3. TANIMLAMALAR/ KURAMSAL TEMELLER .....	19
3.1 Parlaklık .....	19
3.2 Gauss Işımı .....	20
3.2.1 Hermite Gauss modu .....	21
3.2.2 Laguerre Gauss modu .....	21

3.3 Mod Alan Çapı .....	22
3.4 Işın Parametre Ürünü .....	24
3.5 Malzeme Türleri ve Metaller.....	26
3.6 Lazerle Kesilebilen Farklı Türdeki Metallerin Özellikleri.....	26
3.6.1 Endüstriyel çelikler .....	26
3.6.2 Paslanmaz çelik .....	27
3.6.3 Alüminyum .....	27
3.6.4 Titanyum .....	28
3.6.5 Bakır ve pirinç .....	28
3.7 Lazerle Kesim İşlemi Analizi.....	28
3.7.1 Lazerli kesimde kullanılan önemli parametreler .....	29
3.7.2. Lazerli kesimde parça parametreleri .....	29
4. FİBER LAZER SİSTEMLERİNDE KAYIPLAR VE TANIMLARI .....	30
4.1 Fiber Optik Kablolarda Kayıplar .....	30
4.1.1 Soğurma kayıpları .....	31
4.1.2 Malzeme ya da Rayleigh saçınım kayıpları .....	31
4.1.3 Modal yayılma .....	32
4.1.4 Bağlaşım kayıpları .....	33
4.1.5 Bükülme kayıpları .....	35
5. MATERYAL VE YÖNTEM .....	36
5.1 Katkılı Fiberler .....	40
5.2 Fiber Brag Izgara .....	41
5.3 Mod Alan Çapı .....	43
5.4 Işın Kalite Faktörü Nümerik Hesaplamalar .....	43
5.4.1 Işın parametre ürünü yaklaşımı .....	43
5.4.2 Newton-Raphson yöntemi .....	44
6. BULGULAR.....	47
6.1 M2 Parametre Benzetimi .....	47
6.2 Tek Mod Fiber Optik Kuplaj Benzetimi .....	52
7. SONUÇ .....	57
KAYNAKLAR .....	59
EKLER .....	63
EK 1 ... ..	66

EK 2 .....	67
EK 3 .....	73
EK 4 .....	84
ÖZGEÇMİŞ .....	88

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
$A$	Yakın Alan Boyutu
$A_c$	Fiberin Öz Bölgesi Kesit Alanı
$\alpha$	Kayıp
$h\nu$	Foton Enerjisi
$M^2$	Işın Kalite Faktörü
$n_{eff}$	Etkin Kırılma İndisi
$P_i$	Pompa Gücü
$P(w)$	Optik Güç
$R_{TH}$	Termal Direnç
$V$	Normalize Frekans
$\nu_p$	Pompa Diyot Frekansı
$\nu_b$	Lazer Frekansı
$W(z)$	Gauss / Lazer Işın Genişliği
$w_0$	Işın Nokta Büyüklüğü
$\Theta$	Işın Ayrılma Açısı
$\theta(sr)$	Uzak Alan Açısı
$\Lambda$	Bragg Adım Aralığı
$\Delta T$	Sıcaklık Kayması
$\Delta\gamma$	Frekans Kayması
$\eta$	Fiber Kuplaj Verimi
$\Gamma_p$	Pompa Işını Fill Faktörü
$\Gamma_s$	Lazer Fill Faktörü
$\sigma_{ap}$	Pompa Işığın Soğurum Kesit Alanı

$\sigma_{ep}$	Pompa Işığın Yayılım Kesit Alanı
$\sigma_{as}$	Lazerin Soğurum Kesit Alanı
$\sigma_{es}$	Lazerin Yayılım Kesit Alanı
$\tau$	$Yb^{+3}$ En Üst Düzey Enerji Seviyesinin Ortalama Ömrü
$\mu_i^{\pm}$	Pompa Işığın Sızıntı Oranı
$\eta_i^{\pm}$	Çıkış Kayıp Oranı

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
BPP	Işın Parametre Ürünü
CW	Sürekli Dalga
Er	Erbiyum
HG	Hermite Gauss
LG	Laguerre Gauss
Nd	Neodimyum
Nm	Nanometre
QCW	Sözde Sürekli Dalga
MFD	Mod Alan Çapı
TEM	Enine Elektromanyetik Mod
Tm	Tulyum
YAG	İtriyum Alüminyum Garnet
Yb	İterbiyum

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1 Enerji band diyagramı.....	4
Şekil 2.2 Yarıiletken lazer .....	6
Şekil 2.3 Helyum Neonlu lazer .....	8
Şekil 2.4 Fiber lazer .....	10
Şekil 2.5 Lazer diyot iç yapısı üç boyutlu çizim .....	10
Şekil 2.6 Lazer bar üç boyutlu çizim .....	11
Şekil 2.7 Tipik bir fiber lazer pompalama şeması.....	12
Şekil 2.8 Fabry-Perot kavite modeli.....	12
Şekil 2.9 Fotoelektrik olay .....	18
Şekil 3.1 P-N eklem. ....	19
Şekil 3.2 Diyot çıkışı açısı modeli .....	19
Şekil 3.3 Gauss ışını ve yaklaşık değer diyagramları .....	20
Şekil 3.4 Hermite-Gauss modlarının yoğunluk profilleri .....	21
Şekil 3.5 Laguerre-Gauss modlarının yoğunluk profilleri .....	22
Şekil 3.6 Temel mod- alan genişliğinin bağımlılığı.....	23
Şekil 3.7 MFD çap oranı .....	24
Şekil 3.8 MFD ve kaynatma kayıpları .....	24
Şekil 3.9 Lazerle kesme işlemi .....	28
Şekil 4.1 Fiber optik kablo zayıflama eğrisi .....	30
Şekil 4.2 Rayleigh saçılma etkisi .....	32
Şekil 4.3 Modal dispersiyon .....	33
Şekil 4.4 Kaynatma-bağlaşım kayıpları ve ışının ilerleyişi .....	34
Şekil 4.5 Mikro bükülme kayıpları .....	35
Şekil 4.6 Bükülmüş fiberdeki güç kaybı ve yayılma.....	35
Şekil 4.7 İndüklenmiş bükülme zayıflaması .....	35
Şekil 5.1 Yüksek güçlü lazer sisteminde çift katlı fiber optik kablo .....	36
Şekil 5.2 Fiber lazer sistemi uygulama üç boyutlu çizim .....	37
Şekil 5.3.a Işın toplayıcı giriş .....	38

Şekil 5.3.b Işın toplayıcı çıkış .....	38
Şekil 5.4 Aktif fiber ve bragg izgaranın yapısı .....	39
Şekil 5.5 Aktif fiber yapısı ve iterbiyum katkılı öz .....	40
Şekil 5.6 Bragg kanunu .....	41
Şekil 6.1 Kavite uzunluklarına bağlı ışın çıkışları .....	49
Şekil 6.2 Işın kalite faktörü modelleme .....	50
Şekil 6.3 Hermite Gauss çıkışları a) #600 çıkışı b) #601 çıkışı .....	50
Şekil 6.4 Laguerre Gauss çıkışları a) #601 çıkışı b) # 600 çıkışı .....	51
Şekil 6.5 N-BK7 kırılma indis değişimi .....	51
Şekil 6.6 Optik sistem şematik diyagramı .....	52
Şekil 6.7 Kuplaj verimi, lens ve fiber arasındaki mesafe .....	52
Şekil 6.8 Tek mod sistem konfigürasyon modeli .....	53
Şekil 6.9 Arayüz ve ideal modülden sonra ışın çıkışları a) # 602 b) # 600 .....	53
Şekil 6.10 Fiber tek mod kuplaj deney düzeneği .....	55
Şekil 6.11 Tek mod kuplaj deney düzeneği üstten görünüm.....	56

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1 Lantanitler ve kazanç ortamına göre yayılım dalgaboyu.....	9
Çizelge 2.2 Lazer modları .....	17
Çizelge 5.1 Işın kalite faktörü yaklaşımı .....	46



## 1. GİRİŞ

Lazerler dünyada ve ülkemizde telekomünikasyon alanında, savunma sanayiinde, metal kesme ve delme işlemlerinde, süpermarketlerdeki ürünlerin fiyatlarını okuma gibi geniş ve çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Lazer ışını oluşumu temelde yarıiletken malzemeler ile elde edilir. Yarıiletkenler normal durumda yalıtkan halde bulunurlar. Dışarıdan uygulanan ısı, ışık, elektrik akımı gibi uyarılar ile iletken hale geçerler. Lazer diyotların temelinde özellikle GaAs gibi çeşitli tipteki yarıiletkenler kullanılır. Yarıiletken üzerine nanoteknolojik teknikler uygulanarak (MOCVD vs.) p-n jonksiyon adı verilen yarıiletken eklemeler oluşturulur. Yarıiletkenler farklı malzemeler ile katkılanarak elektriksel özellikleri değiştirilir. N ve p tipi olarak adlandırılan temel diyot yapısını oluştururlar. Elektron fazlalığı olan yarıiletken, n tipi olarak tanımlanır. N ve p tipi iki yarıiletken malzeme birleştirilerek eklem adı verilen birleşme bölgesi elde edilir. Yarıiletken eklem üzerinden elektrik akımı geçirilmesi veya optik bir uyarı yapılması malzeme üzerinden foton salınımı sağlar. Bu fotonlar uyumlu birer hüzmeye şekline getirildiklerinde ise lazer ışığı elde edilmektedir.

Lazerin icadından günümüze kadar geçen sürede çeşitli tipte ve güçlerde lazerler oluşturulmuştur. Her bir lazer sisteminin kullanım alanına göre özellikleri değişmektedir.

Tez kapsamında yapılan çalışmada, metal sanayiinde ince metal sacları kesmede kullanılan CW modda (sürekli zaman modunda) çalışan fiber lazer sistemi, çıkış ışını özellikleri ve sistemin modülleri incelenmiştir. Fiber lazerler mW güç seviyelerinden kW güç seviyelerine kadar ulaşabilmektedir.

Çalışmada istenilen düşük güçlü, 1064 nm(nanometre) dalgaboyuna sahip, sürekli zaman modunda çalışan, ışın kalite faktörü bire yakın lazer ışını elde etmektir.

Tez çalışması kapsamında optik model ve lazer sistemini oluşturmak için benzetimler yapılmıştır. Optik modelleme programı ile fiber lazer sistemlerinde çıkış ışınının modellenmesi, çıkış modlarının analizi ve ışın kalite faktörü iyileştirmeleri yapılmıştır. Sistem modellenirken; kullanılacak komponent ve modüllerin teknik özelliklerinin belirlenmesi, ışın kalitesi ve önemli parametre hesapları, odaklama parametreleri, fiber optik kablo içerisinde lazer ışınının kayıplarının minimize edilmesi ve fiber içerisinde lazer ışınının ilerleyişi çalışma konuları arasında yer almaktadır.

Fiber lazer sistemlerinin çalışma alanı, makine mühendisliği ile başlayıp elektronik mühendisliğinin fizik ile birleştiği bir noktada bulunmaktadır. Tez kapsamında geliştirilmesi planlanan lazer, ince sac metalleri kesmek için kullanılan fiber lazer makinelerinin ışın kaynağını oluşturmasıdır.

Fiber lazeri diğer lazer sistemlerinden ayıran en önemli özellik; lazer ışını oluşumunun fiber optik kablo içerisinde gerçekleşmesidir. Fiber optik kablo içerisine katılan lantanit olarak adlandırılan iyonların yardımı ile istenilen dalga boyu elde edilmektedir. Aktif fiber optik kabloların, öz kısmı özel olarak seçilen lantanit iyonu ile katkılanarak lazer kazanç ortamı oluşturulmaktadır. Fiber lazer sistemlerinde yüksek güçlere çıkıldıkça dayanım özellikleri farklı malzemelerin kullanımı gerekmektedir.

Fiber lazer sistemlerini oluşturan temel komponentler; pompa diyotlar, fiber Bragg ızgara, ışın toplayıcı, soğutucu, sürücü devreler ve istenilen dalga boyunu elde etmek için gerekli özel lantanit iyonu katkılı aktif fiber optik kablodur (Samson ve Frith 2008). Son araştırmalar fiber lazer sistemlerinin çıkış gücünü sınırlayan etkenin yalnızca pompa diyotun gücü olduğunu öne sürmektedir. Aktif fiber optik kabloların yüksek güçlere dayanım özellikleri geliştirilmesiyle, sistemin soğutma ve sürme özellikleri de geliştirilerek, sürekli dalga uygulamalarında 20 kW'a kadar, darbeli uygulamalarda ise 100 kW'a kadar olan güçlere çıkmıştır. Pompa diyotların geliştirilmesiyle gelecekte daha yüksek güçlerin elde edilmesi beklenmektedir (Tünnerman 2005).

## **2. KAYNAK ÖZETLERİ**

### **2.1 Lazerin Tarihçesi**

LASER ( Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) kelimesi "uyarılmış ışınım yayılımıyla ışığın kuvvetlendirilmesi" şeklinde ifade edilmektedir. Lazer atomik enerjiyi elektro manyetik enerjiye dönüştürür.

Lazerin icadı; ilk kez A.L. Schawlow ve C.H. Townes tarafından 1958'de "Infrared and Optical Masers" adlı yayımla maser kelimesi tarif edilmiştir. Maser, atomların, dışarıdan uyarılması neticesinde dışarıya salınan radyasyon yardımı ile elde edilen, genliği yükseltilmiş elektromanyetik dalgadır. İlk maserin mikrodalga frekansında çalışması sebebiyle İngilizce (Microvawe Amplification by Stimulated Emission of Radiation) cümlesindeki kelimelerin baş harflerinin alınmasından türetilmiştir. Çok çeşitli, koherent ve tek renk ışık elde etmek amacıyla oluşturulan optik düzenekler maserdir. Optik frekanslarda çalışan bu sistemler ise optik maser veya lazer olarak adlandırılır.

Yakut lazeri ilk olarak Maiman tarafından 16 Mayıs 1960'da sonuç raporları olarak yayınlanmıştır. 1961 yılında Sorokin ve Stevenson U:CaF<sub>2</sub> lazeri ile ilgili çalışmalarını yayınlamıştır (Tanrıverdi 1995). Mathias 1963'te N<sub>2</sub> lazerini, 1964'te Geusic YAG(iterbiyum alüminyum garnet) lazerini, Bridges Ar-Ion lazerini bulmuştur (Wendera 2010).

Geçen yıllar sonucunda 1970 yılında CO ve H<sub>2</sub>'nin O<sub>2</sub> ile yanarak CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O açığa çıkarmasıyla ışımaya yapan ilk dinamik gaz lazeri Gerry tarafından gerçekleştirilmiştir (Wendera 2010). Daha sonraki yıllarda boya lazerleri, boya lazerleri, eksimer ve diyot lazerleri bulunarak ve geliştirilerek lazer teknolojisi bugün ki savunma sanayinden endüstriye, tıp alanından, haberleşme, bilgisayar ve hatta eğlence sektörüne kadar birçok alanda kullanılmaktadır (Wendera 2010, Sprangle ve ark. 2012).

### **2.2 Lazerin Tanımı Ve Oluşumu**

Herhangi bir ortamda, belirli bir elementin atomları, molekülleri veya iyonları birçok enerji düzeyi gösterir. Bu enerji düzeyleri arasında elektronlar gidip gelirken, enerjileri iki düzey arasındaki farka eşit olan fotonlar yayımlar veya soğurur. Belirli bir frekansta bir foton yayımlamaya yatkın yüksek enerjili bir atom, tam olarak aynı frekansta bir ışıkla foton vermeye "teşvik edilebilir" ve yayımlanan ışık uyarıcı ışıkla bağdaşık (senkronize) olur (Erdoğan 2010).

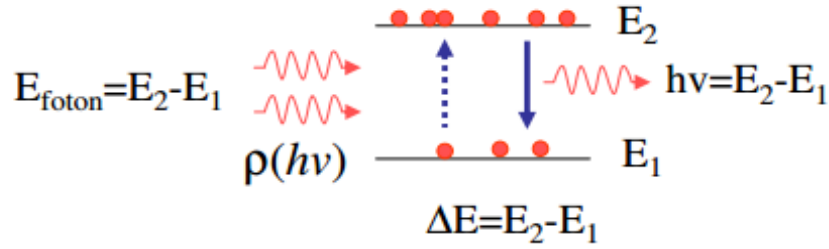
Lazer ışını oluşumu için 3 temel şartın enerji düzeyleri arasında gerçekleşmiş olması gerekmektedir.

Bu şartlar;

1. Pompalama sistemi,
2. Enerji seviyeleri arasındaki fark, invers durum,
3. Optik rezonans

olarak tanımlanır. Bu koşullar sağlandığında lazer ışını elde edilebilir.

Lazerlerin çalışma prensibini anlamak için Şekil 2.1.' de gösterilen enerjileri  $E_1$  ve  $E_2$  olan iki enerji seviyesini göz önüne alalım. Enerji seviyelerindeki elektron yoğunluklarının sırası ile  $N_1$  ve  $N_2$  olduğunu, bu sistemin aynı zamanda  $\rho(h\nu)$  foton alanı içinde olduğunu düşünelim.



**Şekil 2.1.** Enerji band diyagramı

Band diyagramına dışarıdan gönderilen  $h\nu$  enerjili fotonlar birinci pompalama koşulunu sağlamaktadır. Atomdaki bir elektron iki enerji seviyesi arasında geçiş yaparsa bir foton soğurur ya da salar. Lazer ışınının oluşması için gerekli olan ikinci koşul olan  $N_2 > N_1$  şartı, alt seviyedeki elektronların üst seviyeye uyarılarak geçiş yapmasıdır. Bu işleme nüfus terslemesi denir. Eklemde ilk ve son noktalarına ayna görüntüsü oluşturacak şekilde optik parçalar yerleştirildiğinde ise salınan fotonların bir kısmı eklemde dışarı çıkabilecek ancak bir kısmı ise aynadan geri yansıtılarak eklem içerisine döneceklerdir. Bu sayede üçüncü koşul da sağlanmış olacaktır.

Yarıiletken lazerlerde pompalama işlemi aşırı katkılanma sayesinde eklem üzerinden akım geçirerek sağlanır. Akımın belli bir değerinde  $N_2 > N_1$  şartı sağlandığında lazer özelliği gösteren ışık elde edilmiş olur.

## **2.3 Metal İşleme ve Çeşitli Teknolojilerde Kullanılan Lazer Çeşitleri ve Karşılaştırmalı Analizleri**

### **2.3.1 Optik pompalamalı katı lazerler**

Lazer etkisinin oluşması için atomları uyararak yüksek enerji düzeylerine çıkmalarını sağlamanın yollarından biri lazerde kullanılan maddeye, bu maddenin yayacağı ışığın frekansından daha yüksek frekanslı ışık düşürmektir. Optik pompalama olarak adlandırılan bu sürecin verimi düşük olduğundan güçlü bir pompalama gerçekleştirilmesi gerekir (Erdoğan 2010).

Optik pompalamalı lazerde uygun malzemeden yapılmış bir çubuk bulunur; bu çubuğun uçları düz ve birbirine paralel olacak biçimde parlatılmış ve lazer ışığının yansiyabilmesi için ayna ile kaplanmıştır.

Çubuğun yan çeperi saydamdır, böylece pompalayıcı lambadan gelen ışığın çubuğun içine girmesi sağlanır. Pompalayıcı lamba darbeli modda çalışan bir gaz boşalmalı lamba (fotoğrafçılıkta kullanılan elektronik flaş lambasının benzeri) olabilir; bu lamba çubuğun çevresine sarılmış olabileceği gibi, çubuğun yanına boylamasına yerleştirilmiş ya da ışığın bir ayna aracılığıyla çubuğa odaklanması sağlanmış olabilir. İlk yapılan lazerde yapay bir gök yakut kristali (safir, alüminyum oksit) olan pembe yakut kullanılmıştır. Sonraları birçok farklı elementler kullanılmıştır. En yaygın kullanılan element neodimyumdur. Bu tür lazerden çok güçlü, binlerce wattlık güçler elde edilebilir (Erdoğan 2010).

### **2.3.2 Sıvı lazerler**

Katı lazerlerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılmanın ve hasarın ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camlı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (örneğin; neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır.

Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi sağlanabilir(Erdoğan 2010).

### **2.3.3 Boyar maddeli lazerler**

Bazı organik boyarmaddeler flüor ışımaya özelliği gösterir. Bu maddeler üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlarlar. Atomların uyarılmış durumda bulunma süresinin çok kısa ( $\tau \sim 0.25\text{sn}$ ) olmasına ve yayımlanan ışığın dar bir bantta

toplanmasının olanaklı olmamasına karşılık, boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının nedeni geniş bir frekans bölgesinde ayarlanabilme özelliği göstermesidir(Erdoğan 2010).

Rodamin 6G gibi boyarmaddeler başka bir lazerle uyarılma sonucunda lazer etkisi gösterir. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G, sürekli zaman modunda çalışan ilk lazerin gerçekleştirilmesinde yararlanılan boyarmaddedir. Böylece frekansı ayarlanabilen sürekli bir lazer demetinin elde edilmesi olanaklı olmuştur. Bir başka boyarmadde olan metilumbelliferon, hidroklorik asitle karıştırıldığında ışık tayfının morötesinden sarıya kadar uzanan bölgesinde lazer etkisi gösterir. Tayfın bu bölgesinde istenen dalga boyunda lazer ışığı elde edilebilir (Erdoğan 2010).

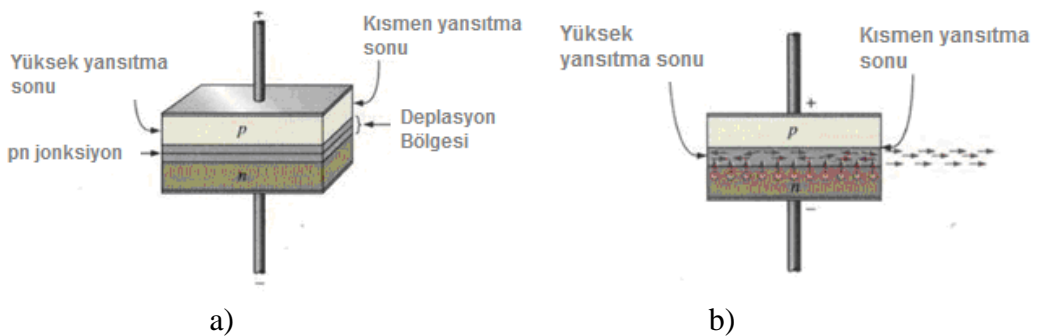
#### 2.3.4. Kimyasal lazerler

Kimyasal tepkimelerde lazer etkisinin oluşmasına yeterli olacak sayıda yüksek enerjili atomlar ortaya çıkar. Örneğin, hidrojen ve flor elementleri hidrojen florür oluşturmak üzere tepkimeye girdiğinde ortamda bulunan CO<sub>2</sub> gazında lazer etkisi oluşur. Bu tür lazerlerde az miktarda kimyasal madde kullanılarak yüksek enerjiler elde etmek olanaklıdır (Erdoğan 2010). Ek 1 'de savunma sistemlerinde kullanılan lazer resmi verilmiştir.

#### 2.3.5. Yarı iletken lazerler

Yarı iletken lazerlerde farklı türden katkılanmış iki yarı iletken madde düz bir eklem oluşturacak biçimde yan yana getirilmiştir. Böyle bir komponentden yüksek şiddette bir elektrik akımı geçirilirse eklem bölgesinde lazer ışığı ortaya çıkar. Şekil 2.2' de yarıiletken lazer yapısı görülmektedir.

Çıkış güçleri sınırlı olan yarı iletken lazerler, maliyetlerinin düşüklüğü, boyutlarının küçük olması ve verimliliklerinin yüksekliği nedeniyle kısa erimli iletişimde (telefon, televizyon vb.) ve uzaklık ölçme aygıtlarında kullanılır (Erdoğan 2010).



Şekil 2.2. Yarı iletken lazer; a) Yarı iletken lazer görünümü, b) Lazer oluşumu

### 2.3.6 Katı hal lazerler

Katı hal lazerlerde kullanılan ilk gereç yakuttur (1960). Bu, % 0.05 oranında üç değerli krom iyonlarını ( $Cr^{+++}$ ) içeren, saydam bir  $Al_2O_3$  alümina kristalidir. Krom iyonlarının enerji düzeylerinin konumu nedeniyle nüfus evirtimine olanak verir.

Uygulamada, yapay yakutlardan yontulmuş çubuklar kullanılır. Yayılım dalga boyu, kızıl bölgede 694.3 nm'dir. Serbest çalışmada bir yakut lazeri 30-40 kW, darbeli modda ise 30 ile 100 MW arası güç sağlar (Erdoğan 2010).

Neodimli cam, yakut lazerlerinden birkaç yıl sonra ortaya çıkmıştır. Neodim iyonlarıyla ( $Nd^{+++}$ ) katılanmış biçimsiz bir malzeme (cam) söz konusudur. 1060 nm de (yakın kızılötesi) yayılım yapan, 4 düzeyli bir malzeme olan neodimli cam lazerleri yalnızca darbeli modda kullanılır. Birbirinden oldukça farklı iki türü vardır. İlki askeri uzaklık ölçümünde kullanılan küçük lazerler, ikincisi ise plazmaları çekirdek kaynaşmalarını incelemede kullanılan yüksek güçlü lazerlerdir. İkinci tür lazerler ise bir lazer yükseltici bataryası biçimindedir (Erdoğan 2010).

YAG, neodimiyuma katılanmış ve aynı dalga boyu üzerinden yayım yapan bir itriyum ve alüminyum grenasıdır. Sürekli modda ya da darbeli modda çalışmaya olanak veren Er(erbiyum) ya da holmiyum iyonları gibi başka malzemeler üzerinde de incelemeler yapılmaktadır (Erdoğan 2010). Ek 1 'de yakut lazer ve YAG lazer yapısı verilmiştir.

### 2.3.7 Gaz lazerler

Lazer ortamı çoğu kez bir gaz karışımından oluşur. Karışımındaki bileşenlerden biri, uyarımını çarpışmalarla diğer bileşene aktarır. En yaygın olanları, güçleri zayıf (miliwatt düzeyinde) olmakla birlikte, helyum-neon lazerleridir. Bu lazerlerde yayılım çizgilerini veren neon gazıdır. En çok kullanılan dalga boyu, kızıl bölgede 632.8 nm'dir. 1150 ve 3390 nm'lik tayf çizgileri de kullanılabilir (Erdoğan 2010).

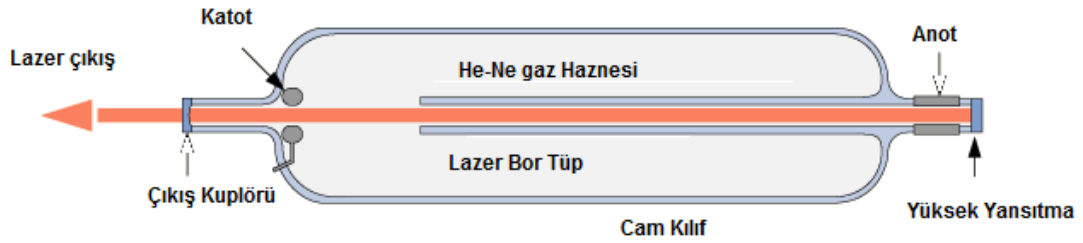
İyon lazerleri, etkin malzemesi iyonlaştırılmış bir gaz olan lazerlerdir. En yaygın olan argon lazerinde argon atomları, elektrik boşalmasının elektronlarıyla çarpışarak iyonlaşır. Bu lazerlerle çok sayıda tayf sayısı elde edilebilir (Mavi-yeşil bölgede 488 nm, 496.5 nm ve 514.5 nm) (Erdoğan 2010).

Karbondioksit lazerlerde, lazer oluşumu için karbondioksit moleküllerinin temel elektron durumundaki titreşim-dönme geçişlerinden yararlanılır. Gaz karışımı karbondioksit, azot ve helyumdan oluşur. Uyarım azot moleküllerinden karbondioksit moleküllerine aktarılır. Sürekli ya da darbeli modda kullanılabilen yayılım kızılaltı

bölgede (10.6  $\mu\text{m}$  ya da 9.6  $\mu\text{m}$ ) yapılır. Karbondioksit lazerleri %10 ile %15 arasında değişen yüksek bir verime sahiptir. Maksimum güç, sürekli çalışmada 400 kW, kısa darbeleri çalışmada ise 10 TW'dir (Erdoğan 2010). Şekil 2.3'de helyum neonlu lazerin yapısı görülmektedir. Metal buharlı lazerlerde (en yaygın olanı helyum-kadmiyum) etkin ortam, buhar halindeki kadmiyumdan oluşur.

100 mW'a kadar olan güçlerde, 441.6 nm ve 325 nm'lik dalga boylarıyla sürekli çalışma sağlanabilir (Erdoğan 2010).

En son gerçekleştirilmiş lazer tipi olan diyot lazerlerinde etkin ortam olarak atom halinde diyot kullanılır ve cam lazerinin dalga boyuna yakın, 1315 nm'lik bir dalga boyu üzerinden yayılım gerçekleştirilir. Bu tip bir lazer ile 1 TW'lık güç sağlanabilir (Erdoğan 2010).



**Şekil 2.3.** Helyum neonlu lazer

### 2.3.8 Serbest elektron lazerler

Serbest elektron lazerleri, bir hızlandırıcıdan çıkan yüksek enerjili elektron paketlerini, evirici olarak adlandırılan bir dizi mıknatısın oluşturduğu sabit, almasıık bir magnetik alanın içinden geçirerek senkrotron, bağdaşık ve tek renkli bir ışımaya kaynağı elde etmeye olanak verir. Elektronların enerjileri ya da magnetik alanın dönemi değiştirilerek, X ışınlarından uzak kızılötesinine kadar değişen dalga boyları elde edilebilir (Erdoğan 2010). Ek 1 de serbest elektron lazerin çalışma prensip şekli verilmiştir.

### 2.4 Fiber Lazer

Fiber lazerin tarihi net bir şekilde bilinmese de 1962 yılında Fred Brech ve Lloyd G. Cross tarafından Jarrell-Ash & Trion Instruments laboratuvarlarında kimyasal analiz sistemi dağılı spetrokopisi adı altında ortaya çıkmıştır. İlerleyen zamanda 1987 yılında David Payne tarafından ilk erbiyum katkılı fiber lazer yükseltici geliştirilmiştir. Böylelikle fiber lazer sistemlerin ana teması ve kendisini oluşturan modüller



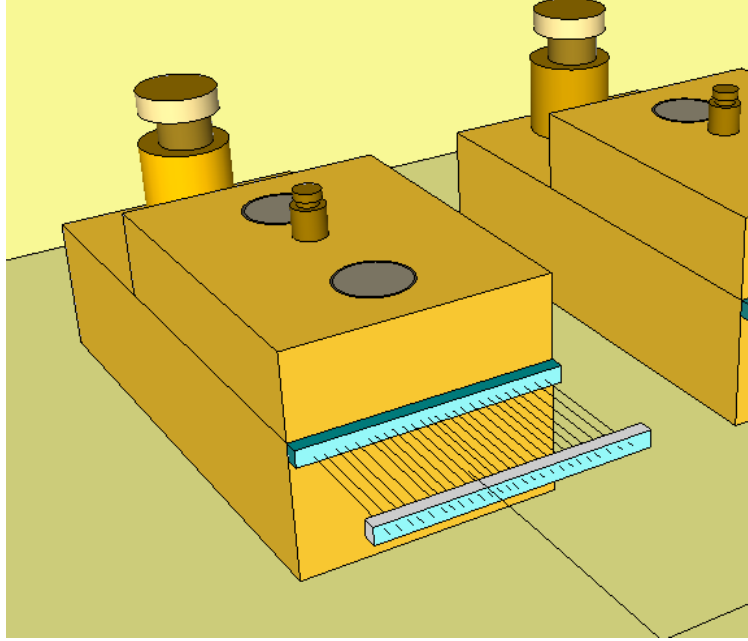
belirginleşmeye başlamıştır. Fiber lazer sistemlerinin, sürekli dalga modunda ve yüksek güçlerdeki temel çalışma prensibi lazerin kaynağını oluşturan pompa diyotlara ve lazer ışınının olduğu kavite bölgesine dayanır. Lazer ışını oluşumu için üç temel şartın sağlanması gerekir. Fiber lazer sistemlerinde lazer ışınının invers durumu, lantanit olarak bilinen ve toprakta eser miktarda bulunması sebebiyle nadir toprak elementi olarak adlandırılan İterbiyum(Yb), Er, Tm(tulyum) ve Nd (neodimyum) gibi iyonlarla belirli oranlarda katkılanmış aktif fiber optik kablo öz bölgesi içerisinde oluşturulur. Çeşitli özellikteki lazer diyotlar ile pompalanan aktif fiber, fiber optik kablo giriş ve çıkışına kuple edilmiş fiber Bragg ızgaralar sayesinde ayna görevini üstlenerek, oluşan lazer ışınının fiber optik kablo içerisinde gidip gelmesi ve katkı elementi iyonları tarafından soğurulup istenilen dalga boyunun elde edilmesini sağlar. Şekil 2.4’de görüldüğü üzere lazer diyotlar 1064 nm dalga boyu elde edilmesi ve özel seçilen İterbiyum iyonu ile etkileşmesi için 915 nm veya 976 nm dalga boyunda seçilirler. İterbiyum iyonu bu özel dalga boylarında uyarıldığı zaman 1010 nm ile 1150 nm dalga boyu aralığında foton salınmasını sağlar. İstenilen dalga boyuna göre katkı elementi ve pompa diyotun dalga boyu seçilmektedir(Kurkov ve ark. 1999, 2004, 2010).

**Çizelge 2.1.** Lantanitler ve kazanç ortamına göre yayılım dalga boyu

İyon	Kazanç Ortamı	Yayılım Dalga boyu
Neodimyum	YAG, YVO4 (Yttrium Vanadate Crystal), YLF, silika	1.03-1.1. um, 0.9-0.95 um, 1.32-1.35 um
İterbiyum	YAG, Silika	1-1.1 um
Erbiyum	YAG, silika, florit, cam	1.5-1.6 um, 2.7 um, 0.55 um
Tulyum	Silika, florit cam	1.7-2.1 um, 1.45-1.53 um, 0.48 um, 0.8 um
Holmiyum	YAG, YLF (yttrium lithium fluoride), silika	2.1um, 2.8-2.9 um
Praseodmiyum	Silika florit cam	1.3 um, 0.635 um, 0.6 um, 0.52 um, 0.49 um
Seryum	YLF, LiCAF, LiLuF, LiSAF(Lazer kristalleri)	0.28-0.33 um



Lazer diyot Şekil 2.6’da görüldüğü üzere içerisinde bulunan diyot barlar ve çeşitli mercekler vasıtasıyla optik gücü arttırmak üzere lazer ışınını çıkışa yönlendirirler.

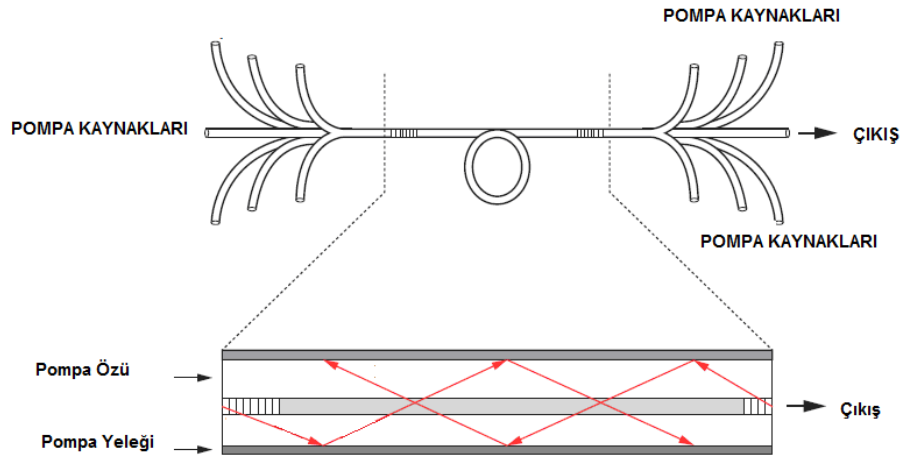


**Şekil 2.6.** Lazer bar üç boyutlu çizim

Lazer barlardan dağınık şekilde çıkan ışın, yatay eksen ve dikey eksen paralelleştirme lensleri vasıtasıyla düz doğrultuda ışına dönüştürülür. Polarize olan ışın demeti yönlendirilmek üzere tek tarafı yansıtıcı prizmalara gönderilir. Prizmalardan yansıyan lazer ışını toplayıcı lens yardımı ile odaklama optiğine yönlendirilir. Lazer ışını odaklama optiği ile fiber optik kabloya en az kayıpla kuple edilir. Lazer diyot içerisinde kullanılan barların ne kadar güç ihtiva ettiği ve elde edilen dalga boyu, diyotun kalitesini belirler. Fiber lazer sistemlerinde 50 W güce sahip, CS paketleme (Teo 2012) olarak adlandırılan 915 nm veya 976 nm dalga boyunda lazer barlar tercih edilir. Soğutma ve elektriksel olarak sürme işlemi bu tip paketlerde kolayca yapılabildiklerinden tercih nedenidir (Faucher ve ark. 2008, Anonim 2012).

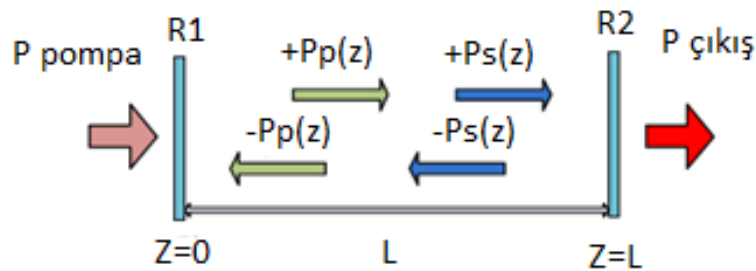
Lazer ışınının oluşması ve ışının sürekliliğinin sağlanması dışarıdan gelen uyarıya bağlıdır. Lazer ışını oluşurken pompalama sistemi sürekli olarak çalışır. Şekil 2.7’de tipik bir sürekli zaman modunda bir pompalama ve Bragg ızgara yapısı ile fiber lazer sistemi görülmektedir. Lazer ışınının fiber optik kablo içerisinde ilerlerken fiberden ve optik güç kaynaklı lineer olmayan etkiler meydana gelebilir. Ancak iyi yapılandırılmış yüksek güçlü fiber lazerler için lineer olmayan etkiler lazer ışınının ve çıkış gücü kayıpları için ana sınırlayıcı etken değildir.

Uygulamada, lazer sistemi gerçekleştirilirken, modüllerin birleştirilmelerinde; pompa diyot fiber optik kablo kuplajı ve ısı yönetimi çıkış ışını için temel kayıp faktörlerini oluşturur. Şekil 2.7’de görüldüğü üzere çift taraflı pompalama yönteminde, maksimum pompa gücü sağlanır (Zintzen ve ark. 2008). İki taraflı pompalama sisteminde, her iki yönde de pompalama kaynağı olması, pompa diyotların geri yansıma korumalı girişleri olmasını sağlar. Aktif fiber içerisinde yansıyacak olan lazer ışını, pompa diyot girişinde bozulmalara ve dalga boyunda değişimlere neden olabilir. Yüksek güç açısından avantajlı olan bu sistemin, kayıp analizi ve önlemi olmadan kullanılması avantajı dezavantaja dönüştürür.



**Şekil 2.7.** Tipik bir fiber lazer pompalama şeması (Injeyan ve ark. 2011)

Fiber lazer sistemleri analizinde Şekil 2.8’de görüldüğü gibi tipik Fabry-Perot kavite modeli teorik model olarak alınmaktadır (Jin ve ark. 2012).



**Şekil.2.8.** Fabry-Perot kavite modeli

$P_p$  ve  $P_{out}$  sırasıyla giriş ve çıkış güçleri,  $P_p^+(z)$  ve  $P_p^-(z)$  kavite içinde; ileri ve geri yönde pompa gücü dağılımı,  $P_s^+(z)$  ve  $P_s^-(z)$  lazer güç dağılımı,  $R1$  ve  $R2$  aynanın yansıtma katsayıları ve  $L$  kavite uzunluğudur.

İterbiyum katkılı sondan pompalı bir fiber lazer sistemi için oran denklemleri (Jin ve ark. 2012);

$$\frac{dP_p^+(z)}{dz} = -\Gamma[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^+(z) - \alpha_p P_p^+(z) \quad (2.1)$$

İleri yönde pompalama gücü dağılımının  $z$  ye göre türevi alınır ve kavite uzunluğuna bağlı olarak lazerin enine kesit soğurum ve yayılım katsayısına göre oluşturulan denkleme eşitlenir.

$$\frac{dP_p^-(z)}{dz} = \Gamma[\sigma_{ap}N - (\sigma_{ap} + \sigma_{ep})N_2(z)]P_p^-(z) + \alpha_p P_p^-(z) \quad (2.2)$$

Aynı yöntem geri yönde pompalama gücü dağılımı için tekrarlanır.

$$\frac{dP_s^+(z)}{dz} = \Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^+(z) + \Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^+(z) \quad (2.3)$$

Lazer güç dağılımı parametresinin türevi ile pompa diyotun ileri yönde pompalama gücünün, lazer ile orantılı denklemi elde edilir.

$$\frac{dP_s^-(z)}{dz} = -\Gamma_s[(\sigma_{es} + \sigma_{as})N_2(z) - \sigma_{as}N]P_s^-(z) + \Gamma_s\sigma_{es}N_2(z)P_0 - \alpha_s P_s^-(z) \quad (2.4)$$

(2.3) e göre geri yönde lazer güç dağılımı denklemi elde edilir.

$$\frac{N_2(z)}{N} = \frac{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)]\sigma_{ap}\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{\Gamma_s\sigma_{as}[P_p^+(z) + P_p^-(z)]}{h\nu_s A_c}}{\frac{[P_p^+(z) + P_p^-(z)](\sigma_{ap} + \sigma_{ep})\Gamma_p}{h\nu_p A_c} + \frac{1}{\tau} + \frac{\Gamma_s(\sigma_{es} + \sigma_{es})[P_p^+(z) + P_s^-(z)]}{h\nu_s A_c}} \quad (2.5)$$

Her iki denklem için partikül konsantrasyon oranı (2.5)'teki gibi oluşturulur.

(2.1), (2.4) arasındaki denklemler farklı bölgelerdeki ileri ve geri pompa güçlerinin varyasyonlarını temsil etmektedir.

$\sigma_{as}$  ve  $\sigma_{es}$  lazerin soğurum ve yayılım enine kesit ölçüsüdür.

(2.5) denklemi, kazanç alanının üst seviye partikül konsantrasyonu ' $N_2(z)$ ' ile pompa gücü ( $P_p^+(z)$  ve  $P_p^-(z)$ ) arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bunun yanı sıra ' $N_2(z)$ '

( $P_s^+(z)$  ve  $P_s^-(z)$ ) fiberdeki farklı bölgelerdeki lazer gücü arasındaki ilişkiyi de ifade etmektedir. N kazanç ortamı katkı konsantrasyonunu,  $\Gamma_p$  ve  $\Gamma_s$ , pompa ışını ve tek ışının fill faktörünü,  $\sigma_{ap}$  ve  $\sigma_{ep}$  : pompa ışınının soğurum ve yayılım kesit alanını;  $\sigma_{as}$  ve  $\sigma_{es}$  : ise lazerin soğurum ve yayılım kesit alanlarını temsil eder.

$A_c$ , fiberin öz bölgesinin kesit alanını,  $\tau$  ve  $YB^{+3}$  en üst düzey enerji seviyesinin ortalama ömrünü ve iterbiyum katkı oranını,  $\nu_p$  ve  $\nu_b$  ise pompa diyotun ve lazerin frekansını ifade eder.

$\mu_i^\pm$ , pompa ışığın sızıntı oranını,  $\eta_i^\pm$ , çıkış kayıp oranını ve  $P_i$  pompa gücü, m değeri pompa noktalarının yerini tutan numarayı ifade eder.

Lineer kavite için sınır koşulları:

$$P_s^+(0) = R_1 P_s^-(0), \quad P_s^-(L) = R_2 P_s^+(L) \quad (2.6)$$

$R_1$  ve  $R_2$  kavite aynasının yansıtma katsayıları,  $L$  kavite uzunluğudur. Tek pompa noktası için;  $z = 0$  ve  $z = L$  pompa noktalarında, çift-sondan için, pompa noktaları fiber sonundadır. Çoklu çift taraflı çift katlı fiber, ileri ve geri pompalama ışığı, pompa noktası m-1 ve m arasında yayılır ve çift denklemleri koşulları sağlar;

$$\frac{dP_{Pm}^\pm}{dz} = k_m f_P^\pm(P_{Pm}^+, P_{Pm}^-, P_{Sm}^+, P_{Sm}^-) \quad (2.7)$$

İleri yönde pompa gücü denklemi fiberin oranı ile doğru orantılı olarak verilir.

$$\frac{dP_{Sm}^\pm}{dz} = k_m f_S^\pm(P_{Pm}^+, P_{Pm}^-, P_{Sm}^+, P_{Sm}^-) \quad (2.8)$$

İleri yönde lazer gücü fiberin oranı ile doğru orantılı olarak verilmiştir.

Sınır koşulları;

Pompa ve lazer güçleri ileri ve geri yönde,

$$P_{Pm}^{\pm}(0) = (1 - \mu_{m-1}^{\pm})P_{P(m-1)}^{\pm}(L) + p_{m-1}^{\pm} \quad (2.9)$$

Pompa ışığın sızıntı oranı ve pompa konsantrasyonu ile sıfıncı mertebede verilmiştir.

$$P_{Pm}^{-}(L) = (1 - \mu_{m+1}^{-})P_{P(m+1)}^{-}(0) + p_m^{-} \quad (2.10)$$

Pompa ışığın geri yönde  $L$  kavite uzunluğu için verilen denklem, (2.10) 'da görülmektedir.

$$P_{sm}^{+}(0) = (1 - \eta_{m-1}^{+})P_{S(m-1)}^{\pm}(L) \quad (2.11)$$

Lazer gücü,  $L$  kavite uzunluğunda kaynak ile oranıtıdır.

$$P_{sm}^{-}(L) = (1 - \eta_m^{+})P_{S(m+1)}^{-}(0) \quad (2.12)$$

Lazer gücü geri yönde  $L$  kavite uzunluğundan bağımsızdır.

Fiber lazer çıkışı:

$$P_{out} = (1 - R_2)P_2^{+}(L) \quad (2.13)$$

ile verilir. Çıkış gücü ileri yönde pompa gücünün  $L$  kavite uzunluğuna bağlı, doğru orantılı olarak değişir.

(2.13) son ve yan pompalama temelli, pompa ışığı ve çift katlı fiber lazer için sınır koşullarını içeren oran denklemlerini verir.  $k_m$  tüm çift kaplı fiber içinde fiberin oranıdır.

#### 2.4.2 Aktif fiber ve Bragg ızgara

Fiber lazer sistemlerinde, telekomünikasyonda kullanılan fiber optik kablolardan farklı olarak üç katmanlı bir yapı kullanılır. En üst katmanda kaplama, altında ceket ve yelek ve onun altında öz bulunur. Öz bölgesi katkı iyonunun ve Bragg ızgaranın bulunduğu bölümdür. Lazer ışını pompalama diyotundan yelek ve öz içerisine yapılır. İlerleyen lazer ışını bragg ızgarayı geçtikten sonra öz içerisinde hapsolarak lazer ışını oluşturur. Fiber lazer sistemindeki bir diğer önemli komponent olan Bragg ızgaralar, elde edilmek istenen dalga boyunu oluşturmakta kullanılırlar. Bragg ızgaralar aktif fiber optik kablunun öz bölgesine 400 nm lik arklar uygulanarak silika malzemesinin bölgesel olarak kırılma indisinde değişimler elde edilmesidir (Jeong ve ark. 2004, Zenteno 1993).

Lazer ışını fiber optik kablo içerisinde ilerlerken, Bragg ızgara bölgesine geldiğinde, ışının dalga boyu ve kırılma indisindeki değişim oranına göre, ışının bir kısmı fiber optik kablo içerisinde geri yansır, bir kısmı ise fiber kablodan çıkarak yoluna devam eder.

İstenilen dalga boyunun geri yansıtılması için Bragg adımlarının ölçüsü hesaplanarak oluşturulur.

Fiber bragg ızgaralarda fiber optik kablonun kırınım indisinin değişimi Bragg şartını sağlayan dar bir dalga boyu aralığına sahip ışığın yansımaları sağlar (Guan ve Marcianite 2007).

$$\frac{2\pi}{\Lambda} = 2 \cdot \frac{2\pi \cdot n_{eff}}{\lambda} \Rightarrow \lambda = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (2.14)$$

Burada  $\Lambda$  ızgaranın periyodu,  $\lambda$  dalga boyu ve  $n_{eff}$  fiber efektif kırılma indisidir (Senior 1992).

### 2.4.3 Katkı iyonu

Lantanitler olarak adlandırılan katkı iyonları geçiş metallere bir alt serisini oluştururlar ve toprakta eser miktarda bulunmaları nedeniyle nadir toprak elementi olarak da isimlendirilirler. En önemli ortak özellikleri, elektron değişiminin yalnızca 4f orbitaline elektron katılımıyla gerçekleşmesidir. Özellikle +3 değerlikli hallerinde, birbirlerine çok benzeyen özellikler gösterirler. Kuvvetli elektropozitif olmaları nedeniyle, üretilmeleri zordur. Çoğunun iyon hallerinin karakteristik renkleri vardır. İterbiyum iyonu elektron konfigürasyonu  $1s^2 2s^2 p^6 3s^2 p^6 d^{10} 4s^2 p^6 d^{10} f^{14} 5s^2 p^6 6s^2$  şeklindedir. Atom numarası 70, nötron numarası 103, periyodu 6 dır. Eneji seviyeleri dizilimi 2,8,18,32,8,2 dir. Dolu orbitalleri  $4f^{14}$ , valans elektron dizilimi  $4f^{14} 6s^2$  dir. Ek 1 de iterbiyum iyonu elektron dağılımı verilmiştir.

Aktif fiber optik kablonun öz bölgesine belirli oranlarda ve yardımcı iyonlar ile katkı yapılması elde edilecek olan dalga boyu ve verimli ışın için önem teşkil etmektedir.

915 nm ve 976 nm dalga boyunda lazer ışını ile iterbiyum iyonunun etkileşmesinden 1010 nm ile 1150 nm arasında çıkış ışını elde edilebilir.






Farklı lazer sistemlerinde farklı iyonlar kullanılmaktadır. Erbiyum elementi haberleşmede, Tulyum ve Neodimyum gibi elementler katı hal darbeli lazerlerde sıklıkla kullanılan iyonlardır.



## 2.5. Lazerli Kesim Sistemlerinde Çalışma Modu

Lazer sistemlerinde mod kavramı iki farklı türde bahsedilmektedir. Bunlardan birincisi lazerin çalışma modu, diğeri ise lazer ışınının modu olarak bilinmektedir. Lazerin modundan bahsedilirken çoğunlukla çalışma modu anlaşılır. Burada mod kavramı, lazer ışınının yoğunluk değişimi olarak adlandırılmaktadır. Gauss'a benzetilen bir lazer ışınının en küçük odak çapına ve dolayısıyla en küçük enerji yoğunluğuna sahip olması için temel moda mümkün olduğu kadar yaklaştırılmaya çalışılır. Çalışma prensibinde yapılacak olan işlem için lazer modu seçilir. Sürekli zamanda ya da darbeleri rejimde olan lazer modları Q anahtarlamalı da olabilmektedir. Sürekli zaman modunda kullanılan lazerler düz kesim ve yüzey pürüzsüzlüğü açısından idealdir. Darbeleri rejimde kullanılan lazerler ise hızlı ve kısa süreli kesimlerde kullanılmaktadırlar. Çizelge 2.2'de çeşitli lazer modları ve benzetim şekilleri görülmektedir.

**Çizelge 2.2** Lazer modları (Bystronic 1996) (Erdoğan 2010)

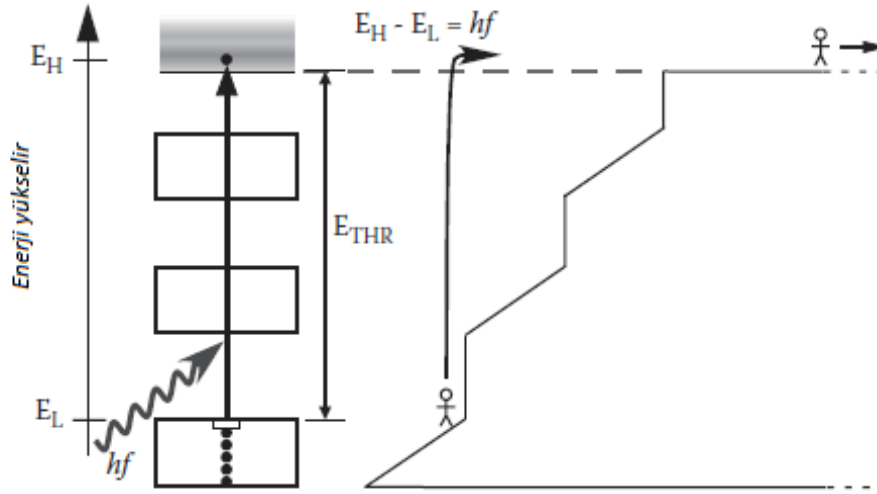
Mod	Grafik Gösterimi	Uygulama	Örnek
Sürekli Mod (CW)		Düşük basınçlı normal, yüksek basınçlı kesme	O2 ile alüminyum N2 ile paslanmaz sabit güç ile hassas kesme elde edilir.
Modülasyon Mod		Köşeleri kesme hızlanma ve durma	Lazer gücü eksen hızına ayarlanır. Böylece sivri köşelerdeki yanık izlerinden kaçınılır.
Normal Darbe Sp		Delme ince saclardaki hassas konturlar	Sac üzerindeki başlama delikleri, küçük delikler, hassas deliklere uygulanır.
Süper Darbe Sp		Delme yüksek yansıtma özelliğine bağlı malzemeler	Bakır N2 ile ve paslanmaz O2 ile kesilir.
Meg Darbe Sp		Delme kalın saclarda hassas konturlar	Kalın malzemelerde az artık ile hızlı delme yapılır.

## 2.6 Fotoelektrik Olay

Çoğu parlak metal yüzeyi üzerine ışık düşürüldüğünde, yüzey üzerinden ışık geri yansır. Işığın çoğu geri yansır ancak enerjisinin küçük bir kısmı metal yüzeyinde elektronlar tarafından soğurulur. Metallerde eşik enerjisi ve ışığın frekansı arasındaki bağıntı:

$$f = \frac{E_{THR}}{h} \quad (2.15)$$

$E_{THR}$ , metallerin eşik enerjisini,  $f$ , frekansı,  $h$  ise Planck sabitini tanımlar. Eğer ışığın frekansı yeterince yüksek ise foton metalden elektron koparıp bir üst seviyeye çıkarır. Elektronun üst seviyeye çıkartılması Şekil 2.9'daki enerji band diyagramında görülmektedir.



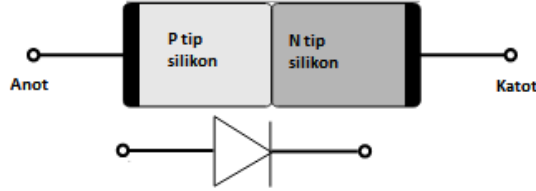
**Şekil 2.9** Fotoelektrik olay

Şekil 2.9 'da görüldüğü üzere  $E_H$  ve  $E_L$  seviyeleri sırasıyla iletim ve valans bandını tanımlar.  $hf$  enerjili bir foton metal yüzeyi üzerine düşürüldüğünde, bu enerji metalin eşik enerjisi  $E_{THR}$  den büyük olduğunda yüzeyden elektron kopararak iletim bandına taşır. Farklı metallerin eşik enerjileri farklı olduğu gibi, alaşımların eşik enerjileri de farklılık göstermektedir. Ancak alüminyum çoğunluklu saclarda kesim  $1064 \pm 5$  nm civarındaki dalga boylarında pürüzsüz kesimler yapılabilmektedir. Sac kesim sektöründe bu dalga boyunun tercih edilme nedeninin temeli fotoelektrik etki ile açıklanmaktadır.

### 3. TANIMLAMALAR / KURAMSAL TEMELLER

#### 3.1 Parlaklık

Fiber lazer sistemlerinin pompa kaynağını oluşturan lazer diyotların temeli yarıiletken elementlere dayanır. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yarıiletken lazerler p-n eklem olarak üretilirler. P-N eklem üzerine bir gerilim uygulandığında ışının çıkış açısı yatay veya dikey olarak üretilen lazer diyotun özelliğine bağlıdır. Dikey ve yatay eksen toplama olarak adlandırılan bu eksenler, lazer ışınının çıkış şeklini ifade eder. Lazer ışınını fiber optik kablo içerisine yönlendirmek için çeşitli lenslerden geçirerek odaklamak gerekir. Ancak bu odaklama sırasında çeşitli kayıplar meydana gelmektedir. Optik güç kaybı lazerin parlaklık terimi ile ölçülür.

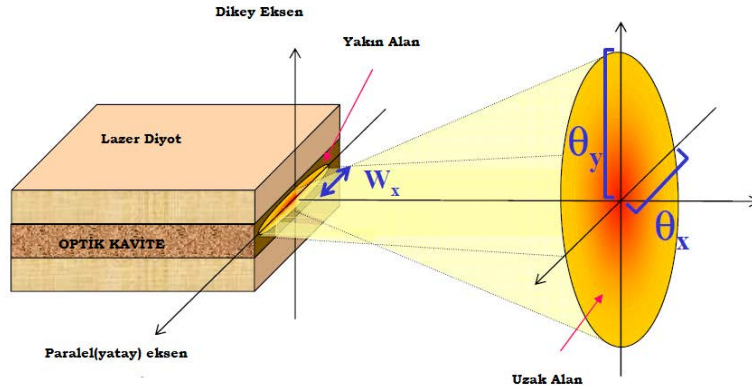


Şekil 3.1. P-N eklem

Parlaklık terimi, bir ışık kaynağının verdiği ışığın göz gibi bir alıcının üzerinde yaptığı etki olarak tanımlanabilir. Parlaklık, uzaysal ışın kalitesine,  $M^2$  ışın kalite faktörüne, yakın alan boyutu ve ışının uzak alan açısına bağlıdır (Limpert ve ark. 2003).

$$P3D(Wcm^{-3}sr^{-1}) = \frac{P(W)}{A(cm^2) \times \theta(sr)} \quad (3.1)$$

$P(W)$ , Lazerin optik gücünü,  $A$ , yüzey alanı,  $\theta$  ise diverjans açısını tanımlar.



Şekil 3.2. Diyot çıkışı açısı modeli

### 3.2 Gauss Işını

Gauss ışını optik biliminde, enine elektrik alan ve yoğunluk dağılımı Gauss fonksiyonu ile tanımlanmış elektromanyetik ışık olarak tanımlanır. Birçok lazer yaklaşık Gauss profiline uyumlu ışın üretir. Lazerlerin optik modu,  $TEM_{00}$  (temel enine mod) olarak tanımlanır. Lazer ışını bir optik üzerinde düşürüldüğünde, mercek tarafından kırınım gerçekleşir ve Gauss ışını Şekil 3.4 ve Şekil 3.5'deki gibi başka tip bir Gauss ışınına dönüşür. Bu dönüşüm ile lazer ışını matematiksel olarak tanımlayan değişkenler seti farklılaşır. Gauss ışını lazer optiğinde modları tanımlama, ışın kalite faktörünün belirlenmesi için referans olarak kullanılan bir modeldir. Gauss ışını parametrelerinden ışın radyal ekseninde maksimum değerinin yarıya düştüğü yarıçap  $W(z)$  ile ifade edilir.

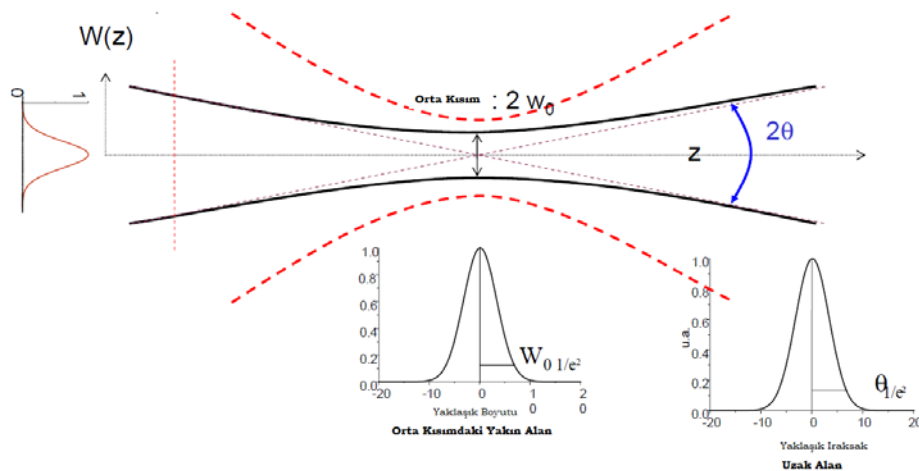
$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left( \frac{M^2 \lambda (z - z_0)}{\pi W_0^2} \right)^2} \quad (3.2)$$

$W_0$  ışın belini,  $M^2$  ışın kalite faktörünü,  $\lambda$  lazer ışını dalga boyunu tanımlar.

Işın dalga boyu, ışın kalite faktörü ve ışın belinin sıfır noktasındaki eğrine bağlıdır.

$W_{0 \frac{1}{e^2}}$  ışının maksimum değerinin ve  $\theta_{\frac{1}{e^2}}$  diverjans açısının  $\frac{1}{e^2}$ 'ye düştüğü değerler olarak tanımlanır.

$$M^2 = \left( \frac{\pi}{\lambda} \right) \theta_{\frac{1}{e^2}} W_{0 \frac{1}{e^2}} > 1 \quad (3.3)$$



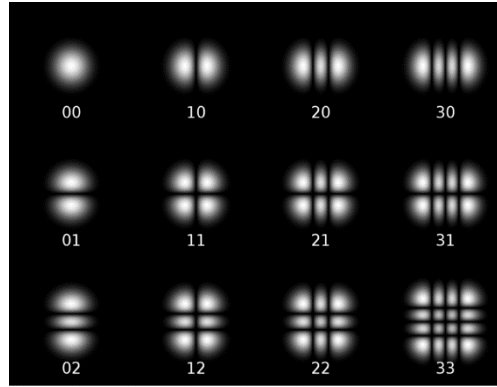
Şekil 3.3. Gauss ışını ve yaklaşık değer diyagramları

### 3.2.1 Hermite Gauss modu

Hermite Gauss modu yayılma eksenini boyunca dikdörtgen şeklinde yapısal olarak kararlı bir lazer modudur. Bu modları elde etmek amacıyla en basit yaklaşım genlik fonksiyonuna ilave bir modülasyon formu olan  $m$  ve  $n$  indislerinin eklenmesidir.

$$E_{nm}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} \cdot H_n \left( \sqrt{2} \frac{x}{w(z)} \right) \exp \left( -\frac{x^2}{w(z)^2} \right) H_m \left( \sqrt{2} \frac{y}{w(z)} \right) \dots$$
$$\dots \exp \left( -\frac{y^2}{w(z)^2} \right) \exp \left( -i \left[ kz - (1+n+m) \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{k(x^2 + y^2)}{2R(z)} \right] \right) \quad (3.4)$$

Hermite Gauss modu elektrik alan yoğunluğu denklemi, ışın belisi,  $x$ ,  $y$ ,  $z$  koordinatlarında, hermite polinomu katsayısı ve mod tamsayıları ile ifade edilir.



**Şekil 3.4.** Hermite - Gauss modlarının yoğunluk profilleri

Gauss modunun özel bir hali olan HG modları normalde genel haldedir. HG modları aynı zamanda enine elektromanyetik veya TEM modu olarak adlandırılırlar. TEM modları  $m$  ve  $n$  indisli olarak ifade edilir.  $m$  elektrik alanının salınım yönünde minimum yoğunluk,  $n$  manyetik alanının salınım yönünde minimum olan sayıdır. Şekil 3.4'te HG modu profilleri görülmektedir.

Bir HG mod, nokta ızgara veya lekeler gibi görünür. Bir Gauss modu TEM00 ve HG00 şeklindedir.

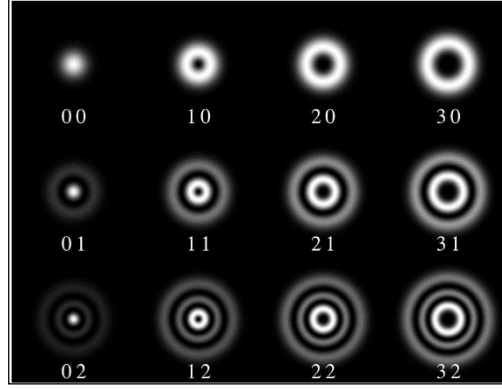
### 3.2.2 Laguerre Gauss modu

Laguerre Gauss modları Gauss ışınına benzer ancak dairesel simetriye sahiptir. LG00 modu dışındaki tüm LG modlarının içi boşluk şeklinde ifade edilir. En önemli özelliği

vida şeklindeki faz çıkık görüntüsüdür. Bu yörüngesel ve açılal momentuma sahip olduğu anlamına gelir. Bu parçacık için momentum transferi dönmesini (spin) sağlar. Bu faz varlığı boşluğun merkezidir. Bu tip fazlar koyu renkli nokta şeklinde görülür.

$$u(r, \phi, z) = \frac{C_{lp}^{LG}}{w(z)} \left( \frac{r\sqrt{2}}{w(z)} \right)^{|l|} \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right) L_p^{|l|} \left( \frac{2r^2}{w^2(z)} \right) \exp\left(ik \frac{r^2}{2R(z)}\right) \dots \exp(il\phi) [-i(2p + |l| + 1)\zeta z] \quad (3.5)$$

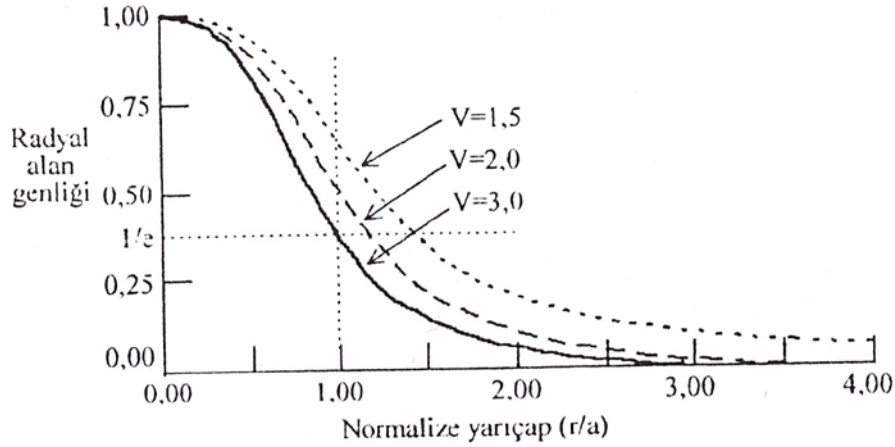
Laguerre Gauss modu denklemleri silindirik koordinatlarda, genlik fonksiyonu, Laguerre polinomu  $L_p^{|l|}$ , normalleştirme sabiti  $C_{lp}^{LG}$ ,  $R$  eğrilik yarıçapı, Gouy faz kayması  $\zeta(z)$  ve ışın belii  $W$  ile ifade edilir.



Şekil 3.5. Laguerre-Gauss modlarının yoğunluk profilleri

### 3.3 Mod Alan Çapı

Fiber optik kablolarda mod tanımı fiber kablonun öz ve yelek çap boylarına ve kullanılan dalga boyuna göre değişir. Genellikle 10 um ve altı çap ölçüsüne sahip bir fiber optik kablo tek modludur.  $V$  (Normalize frekans),  $NA$  (nümerik açıklık), ve dalga boyu ile bir tek mod fiberin çap ölçüsü hesaplanabilmektedir. Ancak fiber optik kablo içerisinde ilerleyen bir ışın (lazer veya farklı optik bir kaynaktan) öz bölgesinden taşarak yelek bölgesine doğru genişleme gösterir. Işık ışınları ilerlerken her zaman saçılma durumu gösterirler. Bu sebeple ışığın ne kadar dağıldığı ve çapın ne kadar değiştiği ışın kalitesi açısından önem teşkil etmektedir (Limpert ve ark. 2003). Tek modlu bir fiberde temel modun ışık dağılımı, fibere giriş, bükülme ve ek kayıplarının değerlendirilmesinde önemli bir etkidir. Bu dağılımı tasvir etmek için, mod alanı yarıçapı ( $w$ ) veya mod alanı çapı ( $2w$ ) tanımlanmıştır.



**Şekil 3.6.** Temel mod-alan genliğinin bağımlılığı

Mod alanı yarıçapı  $w$ , ışının radyal alan genliğinin, optik eksen üzerinde ( $r=0$ ) maksimuma ulaştığı noktadaki değerinin %37 'e ( $1/e$ ) düştüğü yarıçaptır. Mod alan çapı dalga boyuna doğrusal olarak bağlıdır ve dalga boyu arttıkça artar.

Normalize frekansı  $1.6 < V < 2.6$  değerleri arasındaki tek modlu fiber optik kablo için;  $MFD$ (mod alan çapı),  $V$  normalize frekans,  $a$  ile tanımlanan fiber optik kablo öz yarıçapı arasındaki bağıntıyı veren ifade;

$$W \approx \frac{2.6}{V} a \quad (3.6)$$

Fiber optik kablonun nümerik açıklığı olarak tanımlanan ifade, bir fiber optik kablo içerisinde gönderilen ışının ne kadarlık kısmını alabildiğini ifade eder.

Nümerik açıklık;

$$NA = \sqrt{(n_1^2 - n_2^2)} \quad (3.7)$$

Normalize frekans olan  $V$ ,  $n_1$ , fiber optik kablonun öz bölgesi kırılma indisini,  $n_2$  ise yelek kısmının kırılma indisini ifade eder. ;

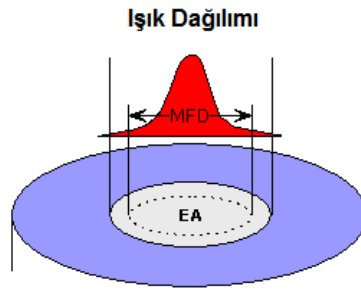
$$V = \frac{2\pi a NA}{\lambda} \quad (3.8)$$

Lazer ışını, bir yüzey üzerine düşürüldüğünde, ışın hüzmesinin özelliğinden dolayı nokta boyutunda bir şekle sahip olacaktır. Bu tanım lazer sistemlerinde kullanılan nokta boyutu tanımını oluşturmuştur. Normalize frekans ve fiber optik kablonun öz yarıçapı ile orantılıdır. Nokta büyüklüğü;

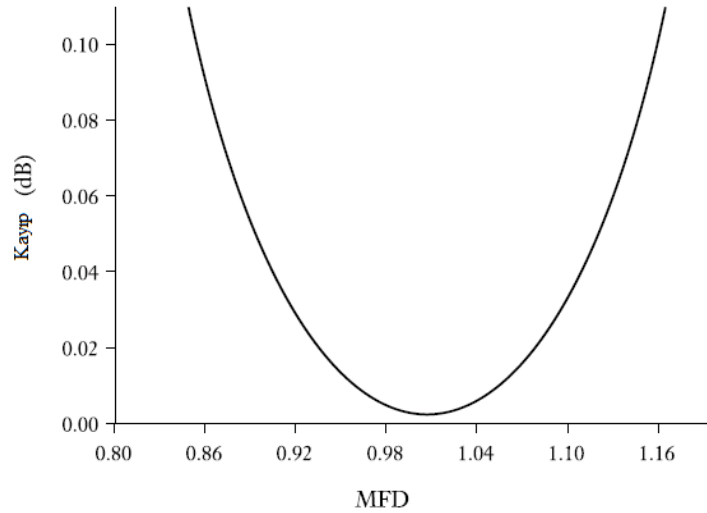
$$w_0 = a(0,65 + 1,619V^{-1.5} + 2,879V^{-6}) \quad (3.9)$$

Nokta boyutu ile fiber optik kablo içerisinde ilerlerken yelek kısmına yayılan ışının mod alan çapı nokta boyutu ile de ifade edilebilmektedir. Şekil 3.7’de mod alan çapının temsili gösterimi verilmiştir. Gauss ışını dağılımına benzeyen ışın fiber kablo içerisinde ilerlerken öz kısmından yelek kısmına doğru yayılım yapar. Bu yayılımın oluşması lazer ışınında kayıplara neden olmaktadır. Fiber optik kablo uzunluğu arttıkça ışın ilerler ve yayılım artar. Şekil 3.8’de fiber kablonun mod alan çapı dağılımı ve kayıpların(dB) oranını gösteren grafik verilmiştir.

$$MFD = 2 w_0 \quad (3.10)$$



Şekil 3.7. MFD çap oranı



Şekil 3.8. MFD ve kaynatma kayıpları

### 3.4 Işın Parametre Ürünü

Birçok endüstriyel uygulamada, teoride de olduğu gibi, lazer ile çelik malzemelerin işlenmesi esnasında lazer ışın kalitesinin iyi olması gereklidir. Işın kalitesi lazer sistemlerinin çıkışında elde edilen ışının; fiber kuplajını, ışın yönlendirmesini ve ışını



odaklamayı kolaylaştırmak için en önemli parametredir. Lazer ışın kalite faktörü, BPP (ışın parametre ürünü) olarak tanımlanan terim ile ifade edilebilir. Lazer sistemlerinde elde edilen çıkış ışınının, optik yol üzerinde ilerlerken, ışının dağılım yaptığı eksen ile yaptığı ıraksak açının yarı değerine düştüğü tamsayı değeri ile ışının malzeme üzerinde odaklandığı en dar noktadaki yarıçapı ile çarpımı teoride ışın parametre ürünü(BPP) verir. BPP, uygulamada bir lazer ışınının ne kadar küçük noktaya odaklanabilirliğini gösterir. Teorik tanımdan yola çıkılarak (3.11) yazılabilir. Gauss ışını için verilen ışın parametre ürünü lazer ışınının dalga boyu ile ters orantılıdır.  $\Theta$  ile verilen parametre Gauss ışını diverjans açısıdır.

$$BPP = w_0 \frac{\Theta}{2} \quad (3.11)$$

Gauss ışını en düşük BPP' ye sahiptir.

$$BPP_q = \frac{\lambda}{\pi} \quad (3.12)$$

Lazer ışını ile Gauss ışınının, ışın parametre oranları basit bir ifade ile ışın kalite faktörünün,  $M^2$  değerinin matematiksel ifadesini verir.

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_q} \geq 1 \quad (3.13)$$

Lazer sistemlerinde optiksel olarak tek mod uygulamalarında ışın kalite faktörü sayısal olarak 1 değerine ne kadar yakın hesaplanır ise lazer işleme için kullanılacak çıkış ışını değeri o kadar kalitelidir. Çok modlu uygulamalarda ışın kalitesi 1 değerinden büyük değerler alır. Ancak ışın parametre ürünü belli bir değere kadar sınırlandırılabilir; malzeme üzerine odaklanan lazer ışığının minimum bir noktaya kadar daralabileceği bir değer olduğunu gösterir. Bu ifade kırınım sınırlı ışın kalitesi olarak bilinen bir tanım ile sınırlanmış olduğunu gösterir.

Fiber lazer sistemlerinde lazer ışınının olduğu bölge olan aktif fiber optik kabloların ince yapıya sahip olması termal merceklenme olarak adlandırılan kaybın az görülmesini sağlar. Fiber lazer sistemlerini ve aktif fiber optik kabloyu soğutmak diğer tip lazerlere göre daha kolay ve başarılıdır. Bu nedenlerden ötürü fiber lazer sistemlerinde ışın kalitesinin yüksek olması ve bu kaliteyi elde etmek daha kolaydır.

### 3.5 Malzeme Türleri ve Metaller

Lazerli kesim sistemleri çeşitli yapılarıdaki malzemeleri eritmek, kaynatmak ve kesmek için sanayide sıklıkla tercih edilirler. İşlemesi yapılan bu malzemeler çoğunlukla metal ve saclardan oluşur; ancak, plastik, ahşap gibi malzemelerde de çeşitli amaçlarda kullanılmak üzere kesim yapılır.

Malzemelerin sınıflandırılması yapılacak olursa;

- Metaller
- Seramikler
- Polimerler
- Kompozitler
- Yarıiletkenler olarak 5 grupta toplayabiliriz.

Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğunu metal veya metal alaşımlar oluşturur.

Metallerin karakteristik özellikleri;

- Kristal yapı,
- Yüksek dayanım,
- Kolay şekillendirilme,
- Yüksek tokluk,
- Basma dayanımının, çekme dayanımına eşit olması,
- Korozyon dayanımı düşüklüğü,
- Yüksek elektrik ve ısı iletkenlikleri

olarak sıralanabilir.

### 3.6 Lazerle Kesilebilen Farklı Türdeki Metallerin Özellikleri

#### 3.6.1. Endüstriyel çelikler

Lazerler iyi kesim kalitesi için CW modda, sözde anahtarlamalı modda veya darbeli modda kullanılır. Kesme gazı olarak oksijen kullanıldığında kesim kenarı çok az olmak üzere oksitlenir. 4 mm'ye kadar kesme gazı olarak yüksek basınçlı azot kullanmak mümkündür. Kesim kenarlarında bu halde oksit görülmez. Kesme hızı, oksijen ile elde edilen maksimum kesme hızının sadece %10 ile %30'una erişebilir (Tanrıverdi 1995). Daha zor şekilli parçalar için lazer ünitesi darbe modunda çalıştırılır. Bu dar açılı ve ince kesitli bağlantılardaki yanıkları önler. Çelikteki daha çok karbon ihtivası, kesim kenarlarındaki sertleşmeye ve köşelerdeki yanık izlerinin oluşmasına neden olacaktır.

Sertliğin kesme hızı üzerinde hiçbir etkisi yoktur. Alaşım yüzdesi yüksek olan malzemeleri kesmek düşük alaşım malzemeleri kesmekten zordur

Oksitli ya da kumlanmış yüzeyler daha düşük kesme kalitesine izin verecektir. Malzeme yüzeyinde oluşan, kalan sıcaklık kesme kalitesine negatif yönde etki eder (Tanrıverdi 1995). Çelikleri keserken gerilmelerin giderilmesi önemlidir. Haddelene ile oluşmuş iç gerilme de delme işlemine etki eder. Küçük boyutlu parçalarda ve 15-20 mm kalınlıklarda ince tane yapısına sahip çelik tavsiye edilir. Örneğin, %0.03 silikon ve maksimum %0.012 karbon ihtiva eden Reax-250-lazer çeliğinin çekme dayanımı 360-440 N/mm<sup>2</sup> 'ye eşittir.

Bu çelik aşağıdaki özelliklere sahiptir.

- Lazer delme ve kesme sırasında cüruf oluşumunu yok eder.
- Optimum büküm sağlar.
- Geri yaylanma azaltılmıştır.
- Kaynak kabiliyeti yüksektir.
- Bu çelikten 30 mm'ye kadar mevcuttur.

St 52-3 kullanıldığında artık malzeme ve yapışkan cürufun yarattığı çapaklar gibi ikinci sınıf kesme sonuçları elde edilir (Tanrıverdi 1995).

### **3.6.2. Paslanmaz çelik**

Bu malzemeyi delmek için eğer oksitli kenarlar önemli değil ise oksijen ile başka müdahaleye gerek kalmaksızın oksitsiz ve çapaksız bir delme için azot ile yüksek lazer gücü kullanarak yapılabilir. 5 mm'den itibaren tüm tabla yüzeyindeki paslanmaz çeliği azotla çapaksız delmek için odak pozisyonunun ayarı gerekmektedir. Odak noktasının yeniden ayarı temiz delme yapabilmeyi mümkün kılar. Plaka üzerinde yağ filmi tabakası oluşturmak, işleme kalitesini azaltmadan başlangıç deliklerindeki sonucun daha iyi olmasını sağlayacaktır (Tanrıverdi 1995).

### **3.6.3. Alüminyum**

Alüminyum alaşımların sürekli modda delinmesi tavsiye edilmektedir. Çok yüksek yansıtma özelliğine ve ısıtma transferine rağmen, lazer gücüne bağlı olarak 6 mm'ye kadar olan plakalar delinebilir. Azot ile delme yüzeyi daha temiz olur. 4 mm'ye kadar olan uygulamalarda optimum regülasyon sağlama ve çapaksız kesme elde etmek mümkündür. Daha kalın parçalarda temizlenmesi zor çapaklar oluşacaktır (Tanrıverdi 1995).

### 3.6.4. Titanyum

Titanyum saclar argon ve azot kesme gazları ile kesilebilir. Krom-nikel parametreleri kullanılabilir (Tanrıverdi 1995).

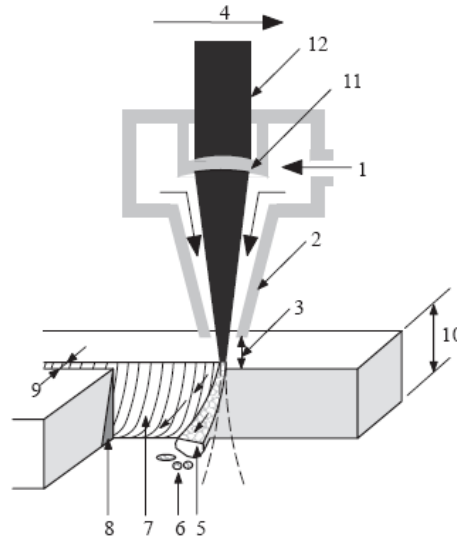
### 3.6.5. Bakır ve pirinç

Her iki malzeme de çok iyi yansıtma ve ısı iletkenliğine sahiptir. Pirinç ancak 3 mm'ye kadar azot ile kesilebilir. Bakır kesme gazı oksijen kullanıldığında 3 mm'ye kadar kesilebilir (Tanrıverdi 1995).

### 3.7 Lazerle Kesim İşlemi Analizi

Lazer ile kesim gerçekte ısıl bir işlemdir. Bu kısımda lazer ışını, ısı kaynağı yani kesici görevini yapmaktadır. İyi bir kesimin elde edilebilmesi için lazer ışınının malzemeye tam olarak nüfuz etmesi gerekir, böylece eriyen malzeme dışarı atılarak yapışması engellenir.

Lazerde oluşan paralel lazer ışınları lenslere yönlendirilir. Daha sonra ışın malzeme yüzeyine odaklandırılıp doğrultulur. Şekil 3.9'da CO2 lazerin kesim şekli görülmektedir.



Şekil 3.9. Lazerle kesme işlemi

Şekil 3.9'da verilen kesim işleminde, 1. İşlem gazı, 2. Nozul, 3. Nozul-Yüzey arası boşluk, 4. İlerleme, 5. Dışarıya akan erimiş malzeme, 6. Dışarıya atılmış malzeme, 7. Kesme çizgileri, 8. Isı tesiri altında kalan bölge (ITAB), 9. Kesme aralığı, 10. Malzeme kalınlığı, 11. Odaklama lensi, 12. Lazer ışını olarak verilir.

### **3.7.1 Lazerli kesimde kullanılan önemli parametreler**

Makine operasyonu boyunca sabit güç sağlanması üniform kesme kalitesiyle sonuçlanır. Uygulanacak lazer gücünün miktarı kesme kalitesi açısından son derece önemlidir. Lazer oluşumuna başladıktan sonra sabit çıkış gücü elde edilmesi için 5-10 dakikaya ihtiyaç vardır. Bu olaya geçici güç değişmezliği denir. Sıcaklıktan ve (CO2 lazerlerde) gaz basıncından bağımsızdır. Işın profili, ulaşılabilir odak çapı, lensin odaklama mesafesine bağlıdır. 2,5 inç lenste 0.12 mm'den küçük ve 5 inç lenste ise 0.2 mm'den küçük odaklama çapına müsaade edilebilir. Uzaklaşma açısı, 1 mm'lik kırılma bir metre uzunluğundaki ışında 1 mm'lik genişlemeye neden olur. Işığın kırılma açısı sabit bir ışın çapı ve kararlı ışın özellikleri sağlayabilmek için mümkün olduğu kadar küçük tutulmalıdır. İyi bir kesme kalitesi elde etmenin ön şartlarından biri de doğru odaklama noktası tayin edebilmektir. Çeliğin alev kesiminde 6 mm'ye kadar olan sac kalınlıklarında uygun odaklama yüzeyde olmalı -8 mm- ve üzerindeki sac kalınlıklarında odaklama sac yüzeyinin üzerinde olmalıdır

### **3.7.2 Lazerli kesimde parça parametreleri**

Malzemenin ışını ve ısıyı soğurabilme etkisi, kesmede kullanılacak malzeme çeşidini ve diğer parametreleri etkilemesi açısından önemlidir. Çünkü bir bakır malzeme uygulanan lazer etkisini iş parçasının noktalarına diğer malzemelere göre daha fazla ve hızlı bir şekilde iletebilmektedir. Saf alüminyum gibi parlak yüzeye sahip malzemeler büyük yansıtma potansiyeline sahiptir ve kötü kesme sonuçlarıyla karşılaşılır. Kesilen parçanın kalınlığı, lazerli kesimde, iş parçası kalınlığı çeliklerde 15mm'ye kadar çıkabilmektedir. Ayrıca malzeme kalınlığına bağlı olarak iletilecek olan ısının, kalınlığın artmasıyla azaldığı, böylece buharlaşan metal miktarı ve yüzey kalitesini etkilediği tespit edilmiştir. Kesilen parçanın yüzeyi, yüzeyin boyalı olması, cilalı olması ya da plastik malzeme ile kaplı olması ters yönde etki yapar. Kaba ve sönük yüzeyler yüksek kesme hızlarına müsaade ederler. % 100 lazer gücüyle yapılan kesme işlemlerinde yüzeyin yağ filmiyle kaplı olması olumlu yönde katkı yapar. Sonuç olarak yüzeydeki cüruf tabakası miktarı azalır. Yüzeyin pas tabakasıyla kaplı olması yüzeyde yanmalara neden olur ve (CO2 lazerde) gaz tüketimi artar. Bu sebeple enerji tüketimi de artmış olur. Soğuk haddelenmiş, rengi ağartılmış sacları kesmek daha kolaydır.

#### 4. FİBER LAZER SİSTEMLERİNDE KAYIPLAR VE TANIMLARI

Fiber lazer sistemi modülleri bir araya getirilirken uygulamada karşılaşılabilecek kayıplar;

- Isıl kayıplar,
- Fiber optik kablodan kaynaklı kaynatma kayıpları (Yin ve ark. 2011),
- Fiber bükülme kayıpları,
- Soğutucu sistem ve ısı plakası kaynaklı soğutma kayıpları, termal etkiler (Anonim 2011),
- Pompa diyot çıkışı lazer ışını iletim kayıpları,
- Lineer olmayan olaylar

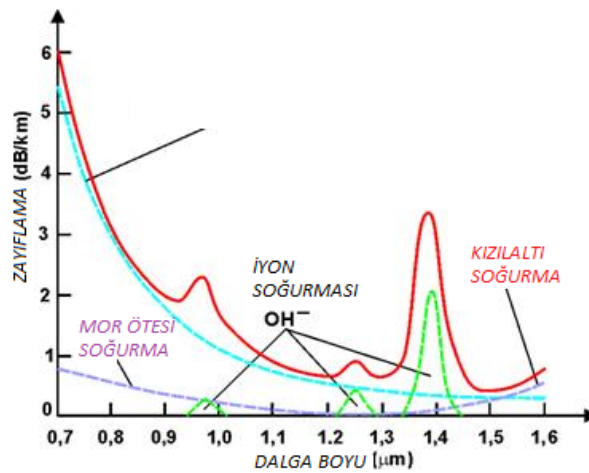
olarak sıralanabilir.

##### 4.1 Fiber optik kablolarda kayıplar

Fiber optik kablolarda iletim kayıpları, lazer ışınının fiber optik kablo içerisinde ilerlerken üzerinde meydana getirdiği kayıptır. Fiberdeki kayıplar, ışık gücünde bir azalmaya neden olur. Başlıca fiber kayıpları;

- Soğurma kayıpları
- Malzeme ya da Rayleigh saçınım kayıpları
- Renk ya da dalga boyu ayrılması
- Yayılım kayıpları ve modal yayılma
- Bağlaşım kayıpları

olarak sıralanabilir.



Şekil 4.1. Fiber optik kablo zayıflama eğrisi

#### 4.1.1 Soğurma kayıpları

Fiber optikteki soğurma (yutma) kaybı, bakır kablolardaki güç kaybına benzer; fiberin saf olmaması nedeniyle fiberde bulunan maddeler, ışığı soğurur ve ısıya dönüştürür. Fiber optik kabloları imal etmede kullanılan saf cam, yaklaşık %99.99 luk saflıktadır.

1 dB/km arasındaki soğurma kayıpları tipik değerlerdir. Fiber optik kablodaki soğurma kayıplarına yol açan üç faktör vardır: morötesi soğurma, kızılaltı soğurma ve iyon rezonans soğurmasıdır.  $P_G, P_C$  parametreleri sırası ile fibere giriş ve çıkış güçlerini tanımlar.  $L$  fiberin uzunluğudur. Birim uzunluk başına zayıflama kaybı,

$$\alpha = \frac{1}{L} \log\left(\frac{P_C}{P_G}\right) dB / km \quad (3.14)$$

olarak verilir.

- Morötesi soğurma

Morötesi soğurmaya fiberin imal edildiği silika malzemesindeki valans elektronları neden olur. Işık, valans elektronlarını iyonize ederek iletkenlik yaratır. İyonizasyon, toplam ışık alanındaki bir kayba eş değerdir ve bu nedenle fiberin iletim kayıplarından birini oluşturur.  $A_0, \lambda_M, \lambda$  parametreleri sırası ile fiber yüzey alanı, morötesi ışığın ve gönderilen ışığın dalgaboyunu tanımlar. Öz içli soğurum olarak da adlandırılan soğurum miktarı;

$$A_M = A_0 \exp(\lambda_M / \lambda) \quad (3.15)$$

olarak verilir.

- Kızılaltı soğurma

Kızılaltı soğurmaya, cam çekirdek moleküllerinin atomları tarafından soğurulan ışık fotonları neden olur. Soğurulan fotonlar, ısınmaya özgü rastgele mekanik titreşimlere dönüştürülür.

- İyon rezonans soğurması

İyon rezonans soğurmasına, malzemedeki OH-iyonları neden olur. OH iyonlarının kaynağı, imalat sürecinde cam malzemenin içerisinde sıkışık kalan su molekülleridir. İyon soğurmasına demir, bakır ve krom molekülleri de neden olabilir.

#### 4.1.2 Malzeme ya da Rayleigh saçınım kayıpları

Fiber optik kablo imalat sürecinde, silika cam çekilerek çok küçük çaplı uzun fiberler haline getirilir. Bu süreç esnasında, cam eriyik haldedir. Cama uygulanan germe

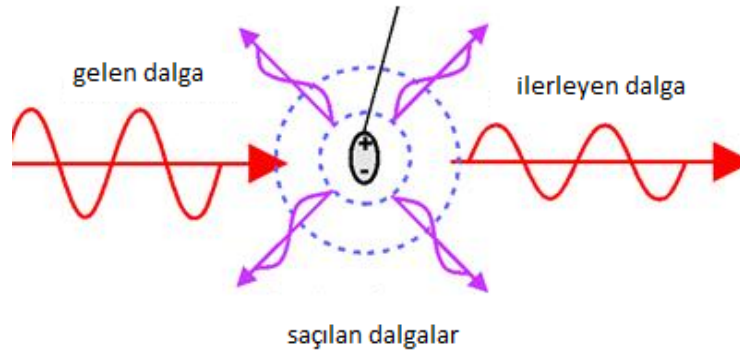
kuvveti, soğuyan camda mikron seviyesinde görülemeyecek kadar küçük düzensizliklerin oluşmasına neden olur. Bu düzensizlikler fiberde kalıcı olarak oluşur. Işık ışınları, fiberde yayılım yaparken bu düzensizliklerden birine çarparsa kırınım meydana gelir. Rayleigh saçılması büyük miktarda dalga boyuna dayanır. Şekil 4.2’de saçılma etkisi görülmektedir.

$$\alpha = \frac{1}{\lambda^4} \quad (3.16)$$

(3.16) da kaybın dalga boyunun 4. kuvveti ile ters orantılı olduğu görülmektedir.

Rayleigh saçılması kayıpları (3.17) deki gibi ifade edilir.

$$\alpha_R [dB/km] = 1.7 \left( \frac{0.85}{\lambda(\mu m)} \right)^4 \quad (3.17)$$



**Şekil 4.2.** Rayleigh saçılma etkisi

Kırınım, ışığın birçok yönde dağılmasına ya da saçılmasına yol açar. Kırınım yapan ışığın bir kısmı fiberde yoluna devam eder, bir kısmı da koruyucu kaplama üzerinden dışarı kaçar. Kaçan ışık ışınları, ışık gücünde bir kayba karşılık gelirler. Buna Rayleigh saçılımı kaybı denir.

#### 4.1.3 Modal yayılma

Modal yayılmanın ya da darbe yayılmasının nedeni, bir fiber optik kablodaki farklı yolları izleyen ışık ışınlarının yayılım sürelerindeki farktır. Modal yayılmanın yalnızca çok modlu fiberlerde meydana gelebileceği açıktır. Dereceli indisli fiber optik kablolar kullanılmasıyla modal yayılma önemli ölçüde azaltılabilir; tek modlu kademe indisli fiberler kullanıldığında ise hemen hemen bütünüyle yok edilebilir. Modal yayılma, bir fiberde yayılım yapmakta olan bir ışık darbesinin yayılarak dağılmasına neden olabilir.

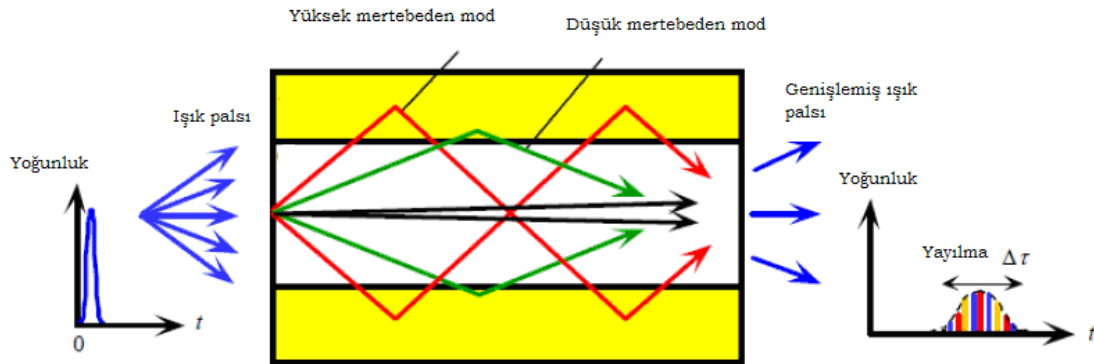


Eğer darbe yayılması yeterince ciddiye, bir darbe bir sonraki darbenin tepesine düşebilir.

Çok modlu kademe indisli bir fiberde, doğrudan fiber eksenini üzerinden yayılım yapan bir ışık ışını, fiberi bir ucundan diğer ucuna en kısa sürede kat eder. Kritik açıyla çekirdek/koruyucu kaplama sınırına çarpan bir ışık ışını, en çok sayıda dâhili yansımaya maruz kalacaktır. Dolayısıyla fiber optik kablunun bir ucundan diğer ucuna en uzun sürede kat edecektir. Şekil 4.3’de fiber içerisindeki dispersiyon görülmektedir.

Modal yayılmayı azaltmanın 3 yolu vardır:

- Kullanılacak fiberi daha az moda izin verecek şekilde seçmek, dolayısıyla daha dar bant genişliğine katlanmaktır.
- Dereceli indis fiber kullanmak: Dereceli indis fiber kullanıldığında bütün ışınlar dalga boyu ne olursa olsun özün yapısından dolayı aynı yolu izleyeceklerdir. Bu en etkili yöntemdir. Bant genişliği açısından da kısıtlama getirmez.
- Tek modlu fiber kullanmaktır.



Şekil 4.3. Modal dispersiyon

#### 4.1.4 Bağlaşım kayıpları

Fiber kablolarında, üç optik eklem türünden birinde bağlaşım kayıpları meydana gelebilir: ışık kaynağı-fiber bağlantıları, fiber-fiber bağlantıları ve fiber fotodedektör bağlantıları. Eklem kayıplarına çoğunlukla ayar sorunlarından biri neden olur: yanal ayarsızlık, açısal ayarsızlık, aralık ayarsızlık ve kusursuz olmayan yüzeydir. Şekil 4.4’de şekilsel fiber kaynatma kayıpları gösterilmiştir.

- Yanal ayarsızlık

Yanal ayarsızlık, bitişik iki fiber kablo arasındaki yanıl kayma ya da eksen kayması olarak adlandırılabilir. Kayıp miktarı, bir desibelin beş ila onda biri ile birkaç desibel arası olabilir. Eğer fiber eksenleri, küçük fiberin çapının yüzde beşi dâhilinde ayarlanmışsa, bu kayıp ihmal edilebilir.

- Açısal Ayarsızlık

Açısal ayarsızlığa bazen açısal yer değıştirme de denir. Açısal ayarsızlık 2 den az ise, kayıp 0.5 dB'den az olur.

- Aralık Ayarsızlığı

Aralık ayarsızlığına uç ayrılması da denmektedir. Fiber optiklerde ekler yapıldığında, fiberlerin birbiri ile temas etmesi gerekir. Fiberler birbirinden ne kadar ayrı olursa, ışık kaybı o kadar fazla olur. İki fiber birbirine bağlantı parçasıyla birleştirilmişse, uçlar temas etmemelidir. Bunun nedeni, iki ucun bağlantı parçasında birbiri ile sürtünmesinin fiberlerden birine ya da her ikisine birden hasara yol açabilecek olmasıdır.

- Kusursuz Olmayan Yüzey

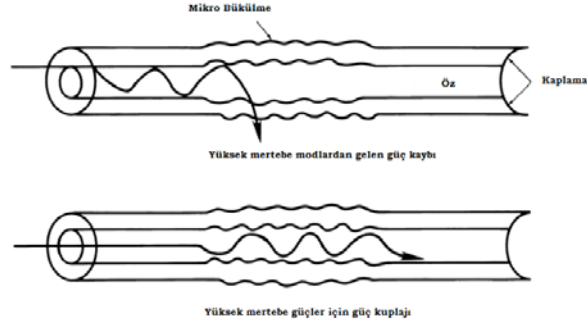
İki bitişik kablonun uçlarının bütün pürüzleri giderilmeli ve iki uç birbirine tam olarak uymalıdır. Fiber uçların dikey çizgiden açıklıkları 3'den az ise, kayıplar 0.5 dB'den az olur.



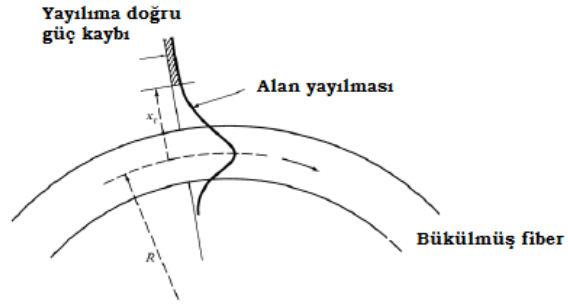
**Şekil 4.4.** Kaynatma-bağlaşım kayıpları ve ışının ilerleyişi

#### 4.1.5 Bükülme kayıpları

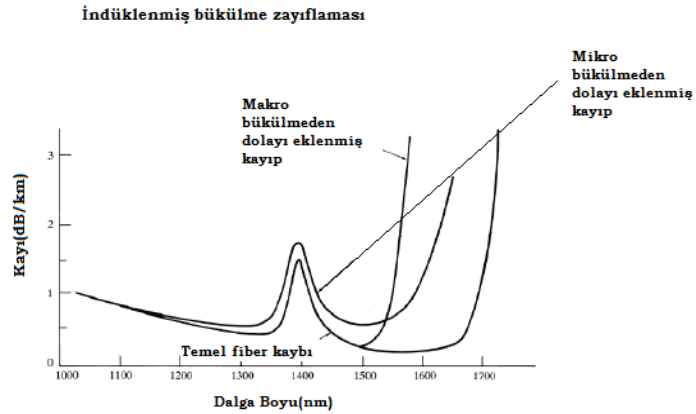
Mikro bükülme ve makro bükülme kayıpları olmak üzere iki çeşittir. Mikro bükülme kayıpları kablunun çeşitli sebeplerden bükülmesinden dolayı oluşur. Eğer ciddi boyutlarda bir bükülme varsa ışının tamamen yok olması söz konusu olabilir. Bu nedenle fiber kablolar genelde çok katmanlı olarak korumalı imal edilir. Şekil 4.5 ve 4.6'da fiber üzerinde gerçekleşebilecek mikro ve makro bükülme kayıpları gösterilmiştir. Bükülme kaybı dalga boyu grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.5. Mikro bükülme kayıpları



Şekil 4.6. Bükülmüş fiberdeki güç kaybı ve yayılma

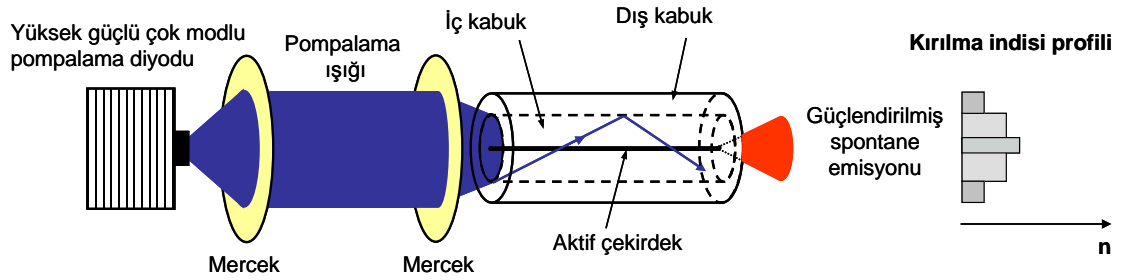


Şekil 4.7. İndüklenmiş bükülme zayıflaması

## 5. MATERYAL VE YÖNTEM

Yüksek güçlü sürekli zaman modunda iterbiyum katkılı fiber lazer sisteminde kullanılacak çift katlı fiber optik kablo yapısı Şekil 5.1 'de gösterilmektedir(Jeong ve ark. 2004).

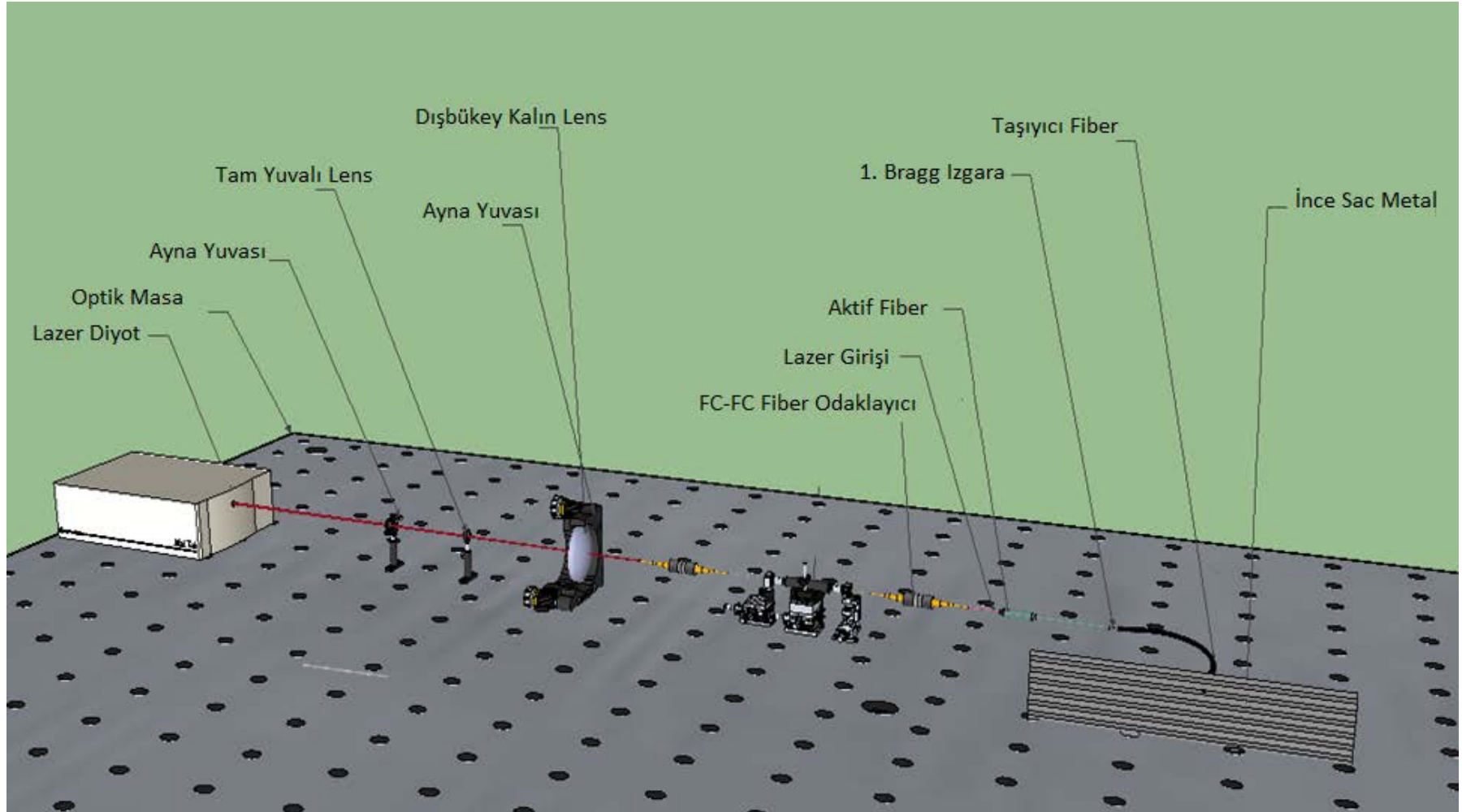
Lazer ışını üretilirken, ilk olarak yüksek güçlü ve çok modlu pompalama diyodundan çıkan yüksek enerji fiber optik kabloya yönlendirilmektedir. Pompalama diyotlarından çıkan çok modlu ışık, öncelikle çok modlu başka bir fiber optik kabloya kılavuzlandırılmakta ve kılavuzlanan ışık aktif ortam olarak kullanılan fiber optik kabloya taşınabilmektedir. Bu yöntemin en büyük avantajı, pompalama diyodundan çıkan ışığın çok az bir kayıp ile aktif ortama yönlendirilmiş olmasıdır (Jeong ve ark. 2004, Liu ve Liu 2006, Khitrov ve ark. 2008).



**Şekil 5.1.** Yüksek güçlü lazer sisteminde çift katlı fiber optik kablo

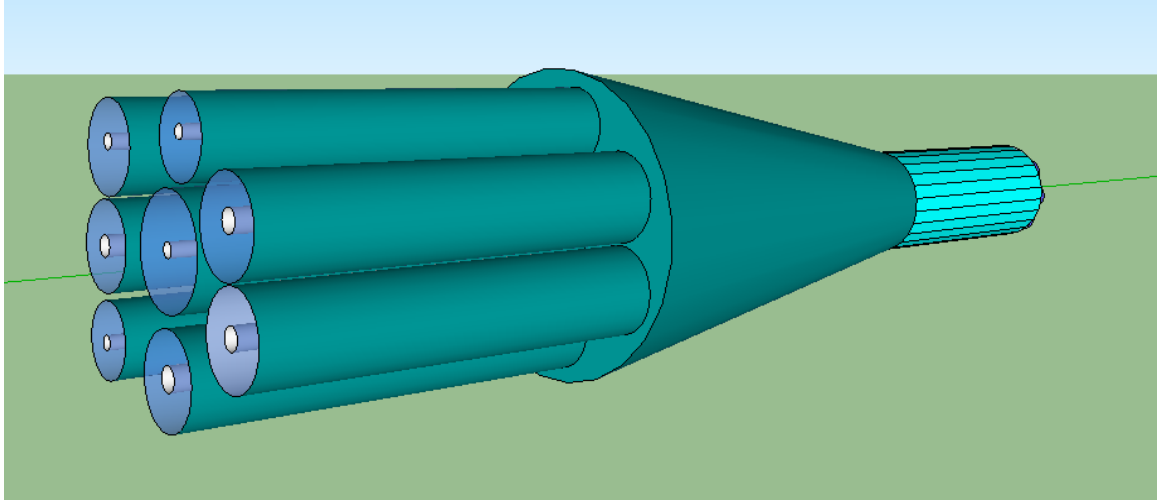
Fiber lazer sistemini oluşturan ana modüller, pompa diyot, odaklayıcı lensler, aktif fiber optik kablo ve Bragg ızgaradır. Şekil 5.2 'de temsili deneysel düzeneğinin üç boyutlu çizimi görülmektedir. Optik masa üzerindeki deney düzeneğinde, lazer diyottan çıkan ışın ilk aynadan geçerek ikinci odaklayıcı lense yönlendirilmektedir. Fiber optik kablo içerisine yönlendirilmek üzere dışbükey lensten geçen lazer ışını bir optomekanik parça olan fiber odaklayıcıya gelerek fiber optik kablo içerisine girer. Optomekanik düzenekten Bragg ızgara ve aktif fibere yönlendirilen lazer ışını sac levha üzerinde düşürülerek kesim yapması sağlanır (Goldberg 1997, Ripin ve Goldberg 1995).

Ek 2 'de deney düzeneği temel komponentleri verilmiştir.

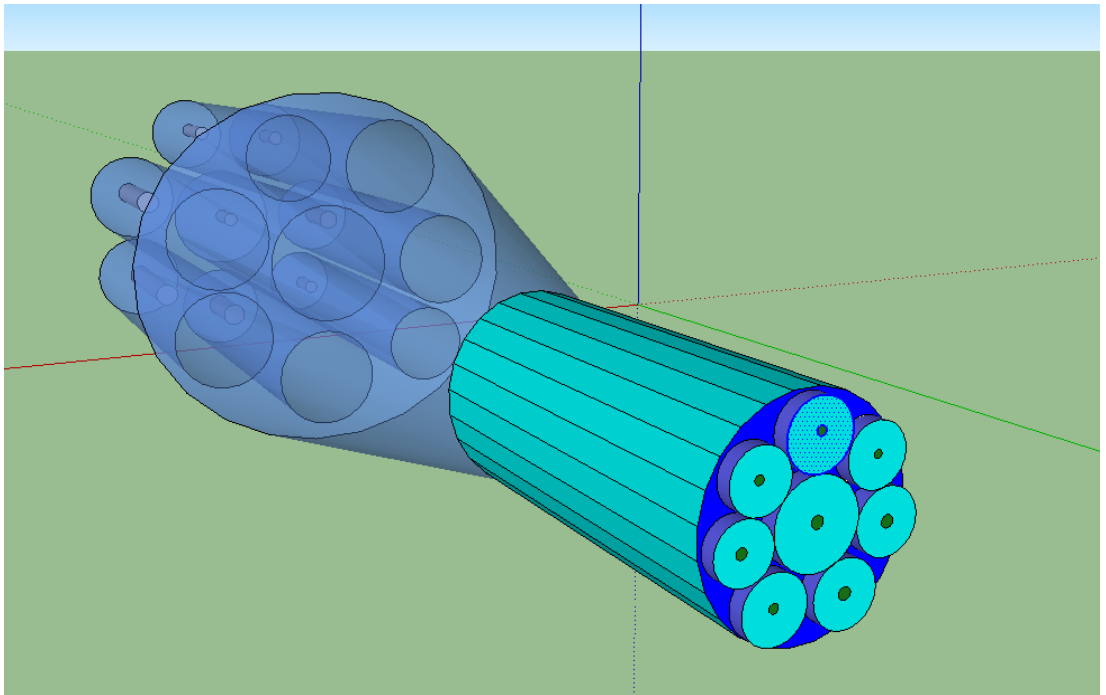


Şekil 5.2. Fiber lazer sistemi uygulama üç boyutlu çizim

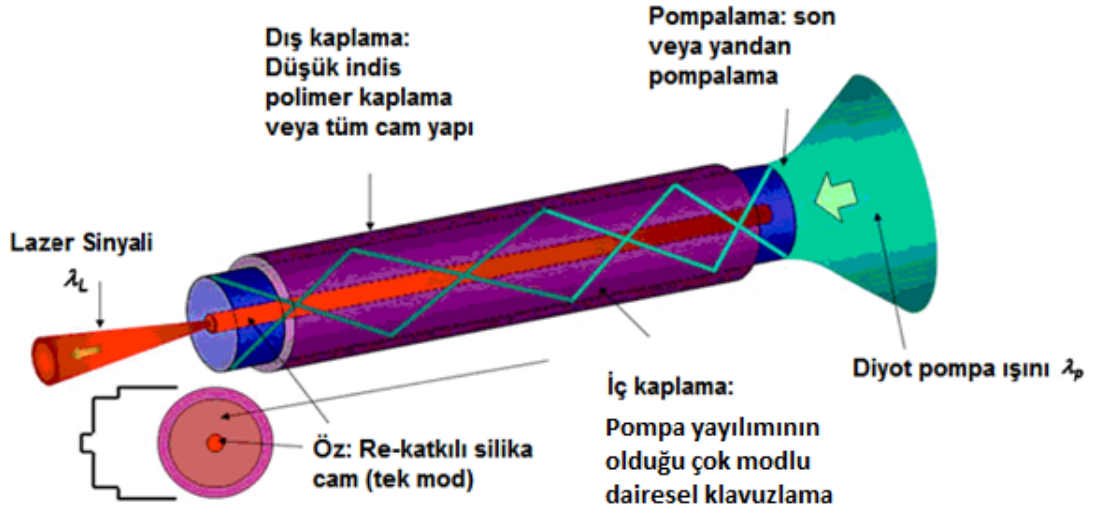
Deney düzeneğinde tek pompa diyot kullanılmıştır. Birden fazla pompa diyotu bir araya getirebilmek için ışın toplayıcılar kullanılmaktadır. Şekil 5.3.a ve b’de görüldüğü üzere optik toplayıcılar, birden fazla fiber optik kablo girişinden oluşur. Bu girişlerden sürülecek olan pompalama enerjilerinin tamamı fiber optik kablo çıkışına yönlendirilir. Işın toplayıcısının girişlerinde bulunan fiber optik kablolar, birbirlerine yakın özelliklere sahiptir. Her bir pompalama enerjisindeki kayıp 0.5 dB mertebelerindedir (Noordegraaf ve ark. 2011).



Şekil 5.3.a. Işın toplayıcı giriş



Şekil 5.3.b. Işın toplayıcı çıkış

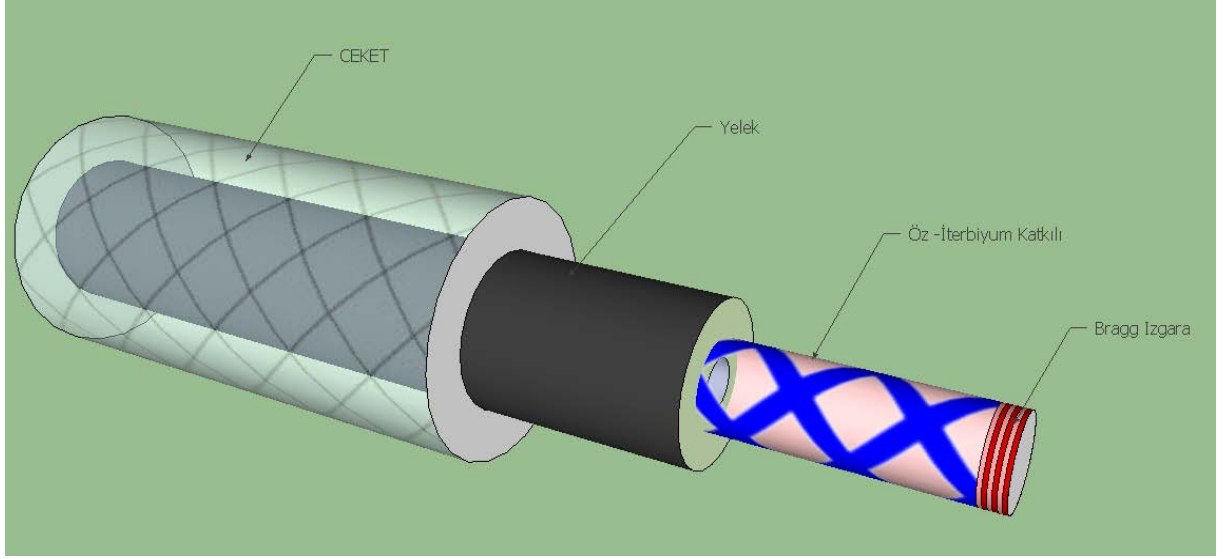


**Şekil 5.4.** Aktif fiber ve Bragg ızgaranın yapısı

Pompalanan ışığın aktif çekirdek tarafından soğurulma özelliği fiber optik kablunun geometrik yapısına bağlıdır. İlk üretilen silindirik şekilde iç kabuklu fiber optik kablolarda emilme randımanı % 10 mertebelerindedir. Bu tip kablolarda yüksek pompalama kayıplarından dolayı yüksek enerji seviyelerine çıkılamamaktadır. Bu nedenle fiber optik kablunun öz yapısı farklı geometrik yapılarda tasarlanarak üretilirler. Bu kabloların kullanımı ile pompalama diyotu tarafından üretilen ışığın emilim oranı % 80 seviyelerine kadar yükseltilerek, yüksek güçlü fiber lazer sistemleri geliştirilebilmiştir (Zenteno 1993). Şekil 5.4 'te pompa ışınının fiber kablo içerisindeki ilerleyişi görülmektedir.

Fiber optik kabloların pompalama diyotu ile uyumlu olması ve fiber optik kablo çekirdeğinde bulunan aktif maddenin yoğunluğu sistemin verimli çalışmasında önemli bir rol oynamaktadır (Alvarez-Chavez ve ark. 2007).

Tez çalışmanın uygulamasından önce, çeşitli modellemeler ve simülasyonlar ile sistemin çıkışının ışın kalite faktörü hesaplanmıştır. Üç boyutlu çizim kullanılarak deneysel çalışmanın modellemesi yapılmıştır.



Şekil 5.5. Aktif fiber yapısı ve iterbiyum katkılı öz

### 5.1 Katkılı fiberler

Fiber optik kablonun katmanlı yapısı ve Bragg ızgara ile bütünleşik hali Şekil 5.5'te görülmektedir. Düşük kayıplı bir sistem için aktif fiberin öz çapının tek mod şartını sağlaması için, normalize frekansının 2.405 den küçük olması ve Bragg ızgaranın adım aralıklarının kullanılan daga boyuna ve fiberin kırılma indisine göre hesaplanması gerekmektedir. Fiber optik katmanlı yapısı, ceket, yekek ve özün kırılma indislerinin farklı olmasını gerektirir.  $n_{c0}, n_{c1}$ , sırası ile öz ve yeleğin kırılma indislerini tanımlar. Basamak indisli optik fiberin bağıl kırılma indisi farkı:

$$\Delta = \frac{n_{c0} - n_{c1}}{n_{c0}} \quad (5.1)$$

şeklinde yazılır. Fiber optik kablo içerisine yönlendirilen lazer ışını belirli bir açı ile gelir. Bu açının değerinin fiber optik kablonun kritik açısı ve numerik açıklığına bağlı olarak hesabı (3.7) ile verilen eşitlik ile fiberin kırılma indislerine bağlıdır.

$$NA = \sqrt{n_{c0}^2 - n_{c1}^2} \quad (3.7)$$

$n_{eff}$  fiberin etkin kırılma indisini,  $\lambda$  ise ışığın dalga boyunu tanımlar. Lazerin fiber içerisinde ilerlerken propagasyon (yayılm) sabiti:

$$\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda} \quad (5.3)$$



Elde edilecek lazer ışınının tek mod olarak kullanılmasında normalize frekansının hesabı için belirli kabuller yapılması gerekmektedir.

Kullanılacak olan fiber optik kablonun 10-20 µm öz çapına sahip olduğu, 0.08 ve 0.22 NA aralığında ve 1064 nm dalga boyunda olduğu varsayılarak, (3.8)'de bu değerler yerlerine konulduğunda;

$$V_1 = \frac{2\pi 5\mu m}{1064nm} 0.08 = 2,362$$

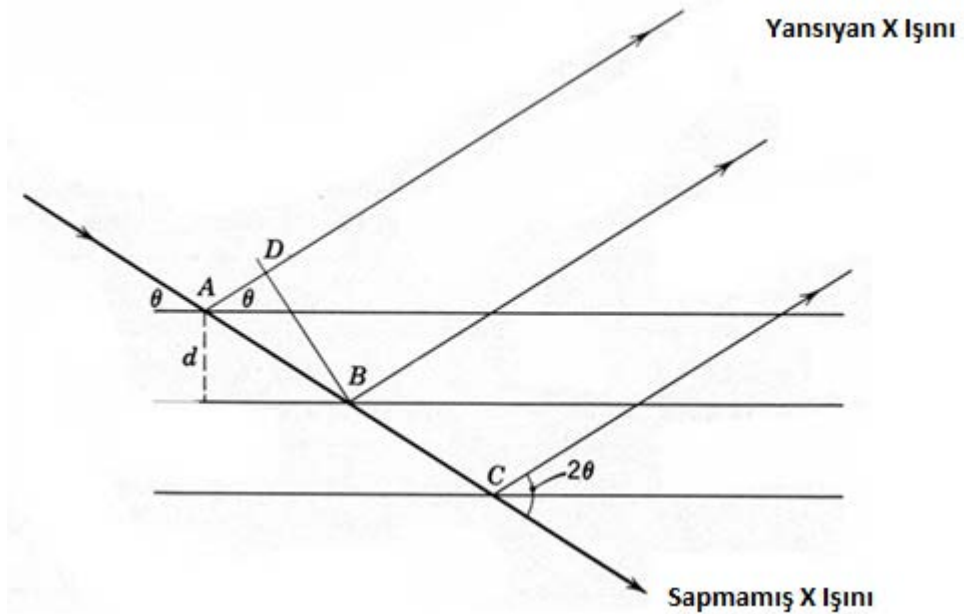
$$V_2 = \frac{2\pi 15\mu m 0.22}{1064nm} = 1,948$$

bulunabilir. Fiber optikte tek mod şartı  $V < 2.405$  ile sağlanır. Bulunan değer alınan kabullerin doğruluğunu ispatlar.

## 5.2 Fiber Bragg Izgara

Fiber optik kablo üzerine UV ışın arkları uygulanarak kırılma indisinde değişimler meydana getirilir. Bu indis değişimi, fiber optik kablo içerisinde ilerleyen lazer ışınının dalga boyuna göre geri yansıtılmasını veya iletilmesini sağlar. İstenilen dalga boyunun geçirilip geçirilmemesi Bragg olayına dayanmaktadır.

Kristal örgü yapısına sahip bir malzeme üzerine bir ışık düşürüldüğünde, Snell kanununa göre ışının bir kısmı geri yansiyacak bir kısmı ise malzemeden geçecektir (Archambault ve Grubb 1997). Şekil 5.6'da görülen yapıya göre;



Şekil 5.6. Bragg kanunu

Kristal üzerine gelen X ışını için, AB ve AD doğruları farkı gelen ışının dalga boyunun tam sayı katına eşit olacaktır.

$$AB-AD = n\lambda \text{ (n Tamsayı)} \quad (5.4)$$

$$AB = \frac{d}{\sin \theta} \quad (5.5)$$

ABD üçgeni içerisinde sinüs teoremi uygulanırsa (5.5) elde edilir.

$$AD - AB \cos 2\theta = \frac{d}{\sin \theta} \cos 2\theta \quad (5.6)$$

Aynı üçgen içerisinde kosinüs teoremi uygulanarak (5.4)'te yerlerine konur ve (5.7)'de elde edilir.

$$n\lambda = \frac{d}{\sin \theta} - \frac{d}{\sin \theta} \cos 2\theta = \frac{d}{\sin \theta} (1 - \cos 2\theta) = \frac{d}{\sin \theta} (2 \sin^2 \theta) \quad (5.7)$$

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5.8)$$

Bragg kanunundan yola çıkılarak adım aralığı ( 2.14) denkleminde;

$$\Lambda = \frac{\lambda}{2\pi n_{eff}} \quad (2.14)$$

$$\text{Etkin kırılma indisi } n_{eff} = \frac{2}{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}} \quad (5.9)$$

olarak yazılır.  $n_{eff}$ , fiberin etkin kırılma indisi,  $n_1$  ve  $n_2$ , sırasıyla kullanılan dalga boyu için silika ve saf silisyumun kırılma indisleridir.

Buradan yaklaşımla, lazer sistemi 976 nm dalga boyuna sahip pompa diyotlar ile pompalanıp, çıkışta 1064 nm'lik bir dalga boyu elde edilmesi için, silika için, bu dalga boyundaki kırılma indisi  $n_1 = 1.80$  Saf silisyum için kırılma indisi,  $n_2 = 1.82$  dir.

$$(5.9)'a \text{ göre; } n_{eff} = \frac{2}{\frac{1}{1,80} + \frac{1}{1,82}} = 1,8 \quad \text{olarak bulunur.}$$

(2.14) kullanılarak 1064 nm dalga boyundaki bir lazer için adım aralığı;

$$\Lambda = \frac{1064nm}{2\pi 1.8} = 94 \text{ nm}$$

olarak bulunur.

### 5.3 Mod alan çapı

Telekomünikasyon sistemlerinde kullanılan optik fiberlerde tek mod şartı için 8 µm öz çapına sahip veya daha küçük öz çapına sahip fiber optik kablolar kullanılır. Buradan yola çıkılarak aynı şart için lazer sistemlerinde, 1064 nm çıkış dalga boyuna sahip, 10 µm öz çapı ve 0.08 nümerik açıklığa sahip bir ışın için fiber optik kablo içerisinde ilerlerken ışının ne kadar genişleyeceği mod alan çapı ile hesaplanır. (3.8) ve (3.9)'dan hareketle, kabul edilen değerler ile;

$$V = \frac{2\pi 5\mu m}{1064nm} 0.08 \Rightarrow V = 2.362 \text{ bulunur.}$$

$$w_0 = 5\mu m(0.65 + 1.619 * 2.362^{-1.5} + 2.876 * 2.362^{-6}) \Rightarrow w_0 = 5.56\mu m \text{ bulunur.}$$

O halde, mod alan çapı  $2 \times 5.56 \mu m = 11.12 \mu m \sim 12 \mu m$  bulunur. 10 µm öz çap değerine sahip bir fiber için 12 µm lik mod yayılması kabul edilebilir sınırlar içerisinde dir.

Ek 2 ,de mod alan çapının fiber optik kablo üzerinde oluşum şekli verilmiştir.

### 5.4 Işın Kalite Faktörü Nümerik Hesaplamalar

#### 5.4.1 Işın parametre ürünü yaklaşımı

İterasyondan önce kabul ve hesaplamalar ile elde edilen değerler ve lazer ışınının odaklama merceğinden sonra Gauss ışınına en yakın olduğu ölçüm noktasındaki ıraksama açısı sabit bir değer kabul edilerek nümerik hesaplama yapılabilir (Kim ve ark. 2000). Işın kalite faktörü; lazer ve Gauss ışını ışın parametre ürünü değeri ile ifade edildiği (3.13)' de elde edilmiştir. (3.8), (3.9), (3.11), (3.12) ve (3.13) denklem takımları ile;

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_q} \geq 1$$

$$BPP_g = \frac{\lambda}{\pi}, BPP = w_0 \frac{\theta}{2}$$

$$w_0 = a(0.65 + 1.619V^{-1.5} + 2.876V^{-6})$$

$$V = \frac{2\pi aNA}{\lambda}$$

ışın kalite faktörü bulunur.

10  $\mu\text{m}$  öz çapı ve 0.08 NA değerlerine sahip fiber ve yakınsama açısı  $\theta = 0.19$  sabit değeri için için, normalize frekans değeri ve  $w_0$  değeri (3.11) ve (3.12) denklemlerinden bulunarak, ışın kalite faktörü;

$$BPP_g = \frac{1064nm}{\pi} = 338.817nm ,$$

$$BPP = 5.56\mu m \frac{0.19}{2} = 0.5282\mu m = 528.2 \text{ nm}$$

$$M^2 = \frac{528.2}{338.817} = 1.559 \geq 1$$

bulunur.

Elde edilen ışın kalite faktörü mükemmel bir değerdedir. Denklemler üzerinde kullanılan fiber kablonun ve lazer ışınının özellikleri bire yakın ışın kalite faktörünü elde etmek için özel olarak seçilmiştir.

#### 5.4.2 Newton-Raphson yöntemi

$f(x) = 0$  denkleminin  $x$  kökü  $[a_0, b_0]$  aralığında olsun.  $f(a_0) \cdot f(b_0) < 0$  ve  $f$  sürekli türevlenebilir olsun.  $\alpha$  'nın bir yaklaşık değeri  $x_0$  olsun. ( $x_0 \in [a_0, b_0]$ )  $f(x)$  fonksiyonunun  $(x_0, f(x_0))$  noktasındaki teğetini bulalım(Karagöz 2011).

$$y - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x - x_0) \quad (5.10)$$

1.)  $(x_0, f(x_0))$  noktasından  $f(x)$  fonksiyonuna çizilen teğetin  $x$  eksenini kestiği yer  $x_1$  olmak üzere:

$$y=0 \text{ için } 0 - f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x_1 - x_0) \Rightarrow x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad (5.11)$$

olarak bulunur.

2.)  $(x_1, f(x_1))$  noktasından geçen teğet denkleminde teğetin  $x$  eksenini kestiği nokta  $x_2$  olmak üzere:

$$x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)}, \dots, x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (5.12)$$

Böylece  $x_0, x_1, x_2, \dots, x_n$  dizisi elde edilir. Amaç bu dizinin yakınsak olması ve limitinde  $f(x) = 0$  denkleminin çözümü olmasıdır.

**Teorem:** Eğer bir  $[a_0, b_0]$  aralığında;

i.)  $f(a_0) \cdot f(b_0) < 0$

ii.)  $\forall x \in [a_0, b_0]$  için  $f'(x)$ 'in işareti aynı yani  $f'(x) > 0$  veya  $f'(x) < 0$

iii.)  $(a_0, f(a_0))$  ve  $(b_0, f(b_0))$  noktalarından çizilen teğetler x eksenini  $[a_0, b_0]$

aralığının içinde kesiyorsa  $f(x) = 0$  denkleminin  $[a_0, b_0]$ 'da bir tek çözümü vardır ve

Newton-Raphson yöntemi:  $\forall x_0 \in [a_0, b_0]$  için  $\alpha$  'ya yakınsar.

Buradan hareketle, ışın kalite faktörü için verilen eşitlik, iterasyon için düzenlenirse, (Shao ve ark. 2013)

$$M^2 = \frac{BPP}{BPP_q} \geq 1 \tag{3.13}$$

$$M^2 \geq 1 \rightarrow M^2 - 1 \geq 0 \tag{5.13}$$

şeklini alır.

*Newton-Rapshon a göre;*

$$f(x) = x^2 - 1 \geq 0 \tag{5.14}$$

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \Rightarrow x_{n+1} = x_n - \frac{x_n^2 - 1}{2x_n} \tag{5.15}$$

$$x \neq 0 \text{ ve } x_0 \neq 0$$

$$x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)} \quad x_2 = x_1 - \frac{f(x_1)}{f'(x_1)} \quad x_3 = x_2 - \frac{f(x_2)}{f'(x_2)}$$

$$x_4 = x_3 - \frac{f(x_3)}{f'(x_3)} \tag{5.16}$$

$x_0 = x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = 1$  için;

$x_0 = 2$  için;

$x_1 = 1.25$

$x_2 = 1.025$

$x_3 = 1.003$

$x_4 = 1$  e yakınsar.

**Çizelge 5.1.** Işın kalite faktörü yaklaşımı

$x_0$	$x_0 = 1$	$x_0 = 2$
$x_1$	1	1.25
$x_2$	1	1.025
$x_3$	1	1.0003
$x_4$	1	1

Lazer sistemin çıkışında ölçülen  $M^2$  ışın kalite faktörü değeri için basit başlangıç değerleri seçilerek, iterasyon yöntemi ile yaklaşık bir değer elde edilmiştir. Verilen başlangıç değerleri ile ışın kalite faktörü fonksiyon dizisinin yakınsak olduğu ve limitinin sıfıra yaklaştığı kabul edilmiştir. Bu yaklaşım ile elde edilen  $M^2$  değeri dört iterasyon adımı sonrasında sonuca ulaşmıştır.

## 6. BULGULAR

### 6.1 $M^2$ Parametre Benzetimi

Virtual Lab LightTrans optik modelleme programı ile, Gauss ışınının kaynak olarak kullanılmasıyla bir optik düzenek oluşturularak 1 değerine yakın ışın kalite faktörü elde edebilmek için optik komponentin parametre değerleri bulunmuştur.

Kartezyen ve silindirik koordinatlarda işlem yapılmasını sağlamak amacı ile giriş değeri Hermite Gauss ve Laguerre Gauss modlarında kullanılmıştır. Lazer kavite uzunluğu arttıkça mod sayısı da artar. (6.1)'de N mod sayısını, L, kavite uzunluğunu v, frekansı temsil eder.

$$N = \frac{\Delta \nu}{\left(\frac{c}{2L}\right)} \quad (6.1)$$

İdealleştirme operatörü ile lens arasındaki mesafeye 1 mm ile 16 mm arasında sayısal değerler verilerek Laguerre Gauss modunda çıkışlar gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre 15.2 mm lik uzaklık en iyi odaklama ve ışın kalite faktörü değerini verir. Bu başlangıç değerleri seçimi ile Laguerre Gauss modu girişli çıkış diyagramı Şekil 6.3.b'de görülmektedir. Şekil 6.2 'de sistemin modeli, Şekil 6.3 ve 6.4 'te Gauss çıkışları görülmektedir.

Işın kalite faktörü teoride 1.3 değerini alır (Jeong ve ark. 2004). Yapılan araştırmalarda görülmüştür ki fiber öz çapı 200  $\mu\text{m}$  ile 340  $\mu\text{m}$  olan lazer sistemlerinde ışın kalite faktörü  $1.2 < M^2 < 1.5$  değerleri arasındadır (Gundu ve ark. 2010).

Simülasyon sonucu elde edilen  $M^2$  değeri için; fiber çapı 10  $\mu\text{m}$ , NA değeri 0.16, diverjans açısı 0.19 alınarak hesaplanmıştır. Kavite uzaklığı 15.2 mm, lens çapı 5.5 mm, merkez kalınlık 2 mm, küresel yüzeyin yarıçapı 8.614916 mm, cam özelliği bakımından N-BK7 (Thorlabs Inc.) kullanılmıştır.

Kavite uzunluğu 15.1 mm ve 15.2 mm için sırasıyla TEM 11 ve TEM10 modları bulunmuştur. (3.4)'te Gauss modu elektrik alan yoğunluğu verilmektedir. Denklemden mod tamsayı değerleri girilerek elektrik alan yoğunluk dağılımları için denklem takımları bulunur.

$$E_{nm}(x, y, z) = E_0 \frac{w_0}{w(z)} H_n \left( \sqrt{2} \frac{z}{w(z)} \right) \exp \left( -\frac{x^2}{w(z)^2} \right) H_m \left( \sqrt{2} \frac{y}{w(z)} \right) \dots$$

$$\dots \exp \left( -\frac{y^2}{w(z)^2} \right) \exp \left( -i \left[ kz - (1+n+m) \arctan \frac{z}{z_R} + \frac{k(x^2 + y^2)}{2R(z)} \right] \right) \quad (3.4)$$

n=1 ve m=1 ve

$$H_0 = 1$$

$$H_1 = x$$

$$R(1) = 8,6$$

k=1 parametre değerleri verilerek TEM 11 modu için;

$$E_{1,1}(1,1,1) = \frac{w_0}{w(1)} \cdot x \left( \sqrt{2} \frac{1}{w(1)} \right) \exp \left( -\frac{1^2}{w(1)^2} \right) H_1 \left( \sqrt{2} \frac{1}{w(1)} \right) \dots$$

$$\dots \exp \left( -\frac{1^2}{w(1)^2} \right) \exp \left( -i \left[ k - (1+1+1) \arctan \frac{1}{1_R} + \frac{k(1^2 + 1^2)}{2R(1)} \right] \right) = 2 \exp(2+1,2i)$$

bulunur.

TEM 10 Modu için; n=1, m=0 ve digger parameter değerleri de aynı sayısal değerler ile;

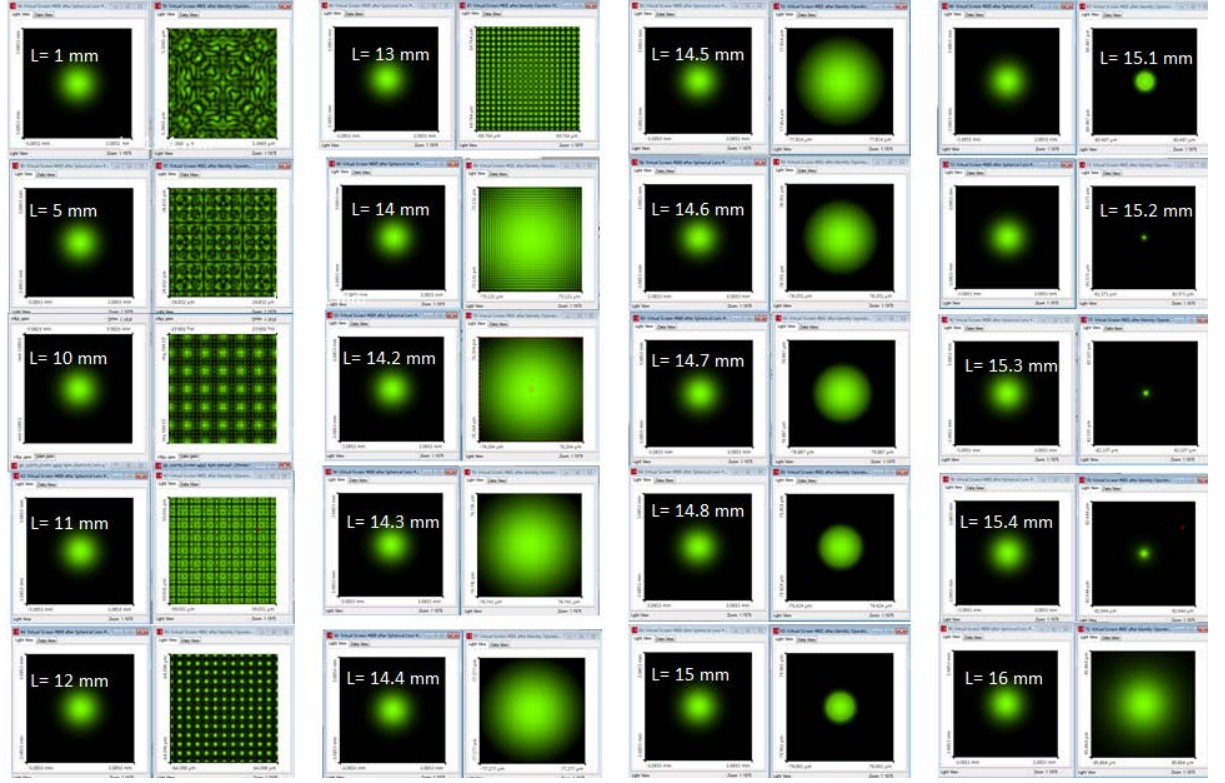
$$E_{1,0}(1,1,1) = \frac{w_0}{w(1)} \cdot x \left( \sqrt{2} \frac{1}{w(1)} \right) \exp \left( -\frac{1^2}{w(1)^2} \right) H_0 \left( \sqrt{2} \frac{1}{w(1)} \right) \dots$$

$$\dots \exp \left( -\frac{1^2}{w(1)^2} \right) \exp \left( -i \left[ k - (1+1+0) \arctan \frac{1}{1_R} + \frac{k(1^2 + 1^2)}{2R(1)} \right] \right) = 2 \exp(2+0,44i)$$

bulunur.

Elde edilen sonuçlar ışığında, kavite uzaklığı belirli bir değerden sonra arttırıldığında gerçek (reel) değer değişmez iken, sanal(imajiner) kısım azalmıştır. Ek 3 'te kavite uzunluklarının çıkış diyagramları verilmiştir. Şekil 6.1 'de kavite uzunluğuna bağlı olarak ışın çıkış görüntüleri verilmiştir.

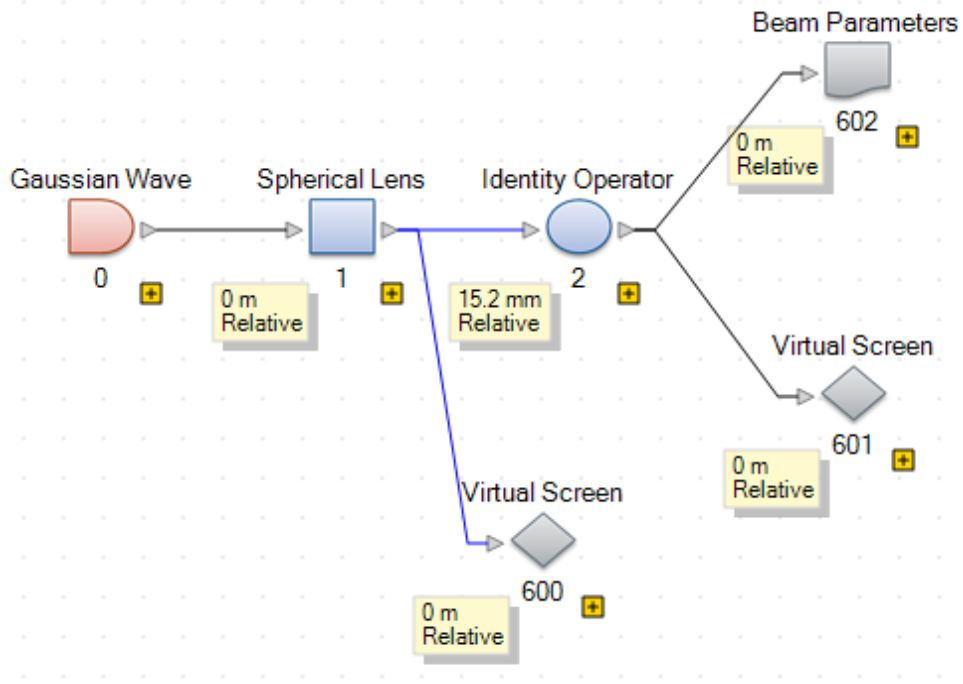




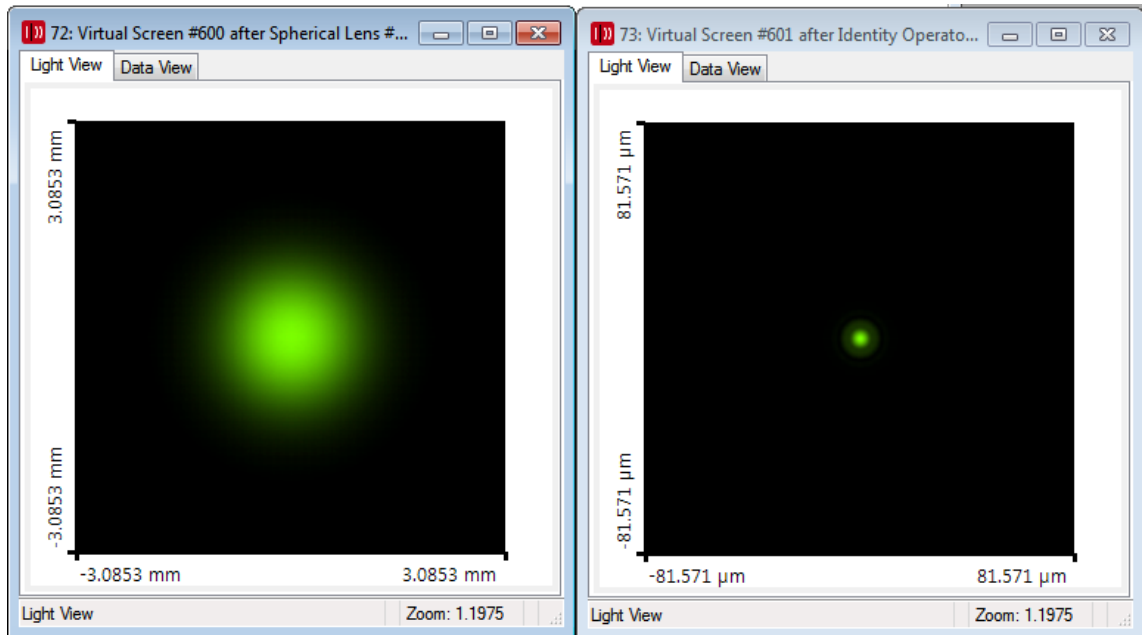
**Şekil 6.1** Kavite uzunluklarına bağlı ışın çıkışları

Sol taraftaki grafik lensten önceki, sağ taraftaki grafik lensten sonraki ışının durumu göstermektedir.  $M^2$  parametre benzetiminde, kavite uzunluğu değerleri 1 mm'den başlatılarak ışın profil değişimine göre arttırılmıştır. L=1 mm için, sağ taraftaki çıkışın karışık desenlerden oluştuğu görülür. L=5 mm için, desenin bir önceki uzaklığa oranla düzeldiği görülmektedir. L=10 mm için ışın taneler halinde görülmektedir. L=14 mm ve sonrası için ışının dairesel yapısı ortaya çıkmaya başlamıştır. 14 mm'den sonra ışın çapı daralmakta ve odaklanma özelliği artmaktadır.

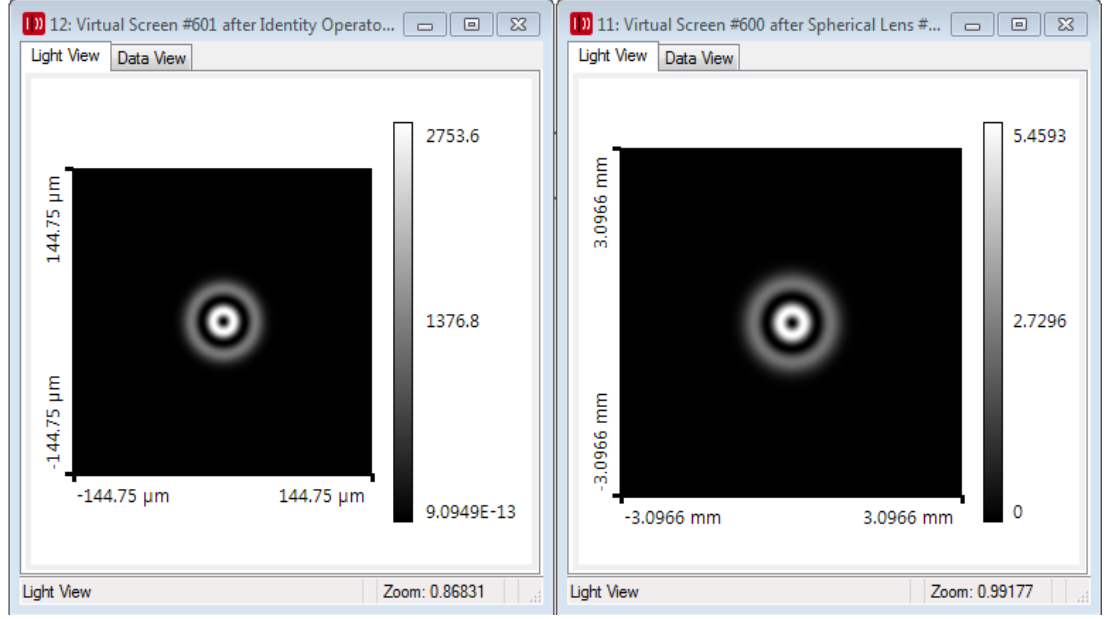
L=15.2 mm için, ışının odaklanma özelliği en yüksek değerindedir. Bu uzaklık için simülasyon sonucunda  $M^2$  değeri 1.2633 bulunmuştur. Kavite uzaklığı 15.2 mm'den fazla olmaya başladığında ise ışın çapı büyümektedir. Şekil 6.1'de L= 16 mm için, ışının odaklanma özelliğinin bozulduğu görülmektedir.



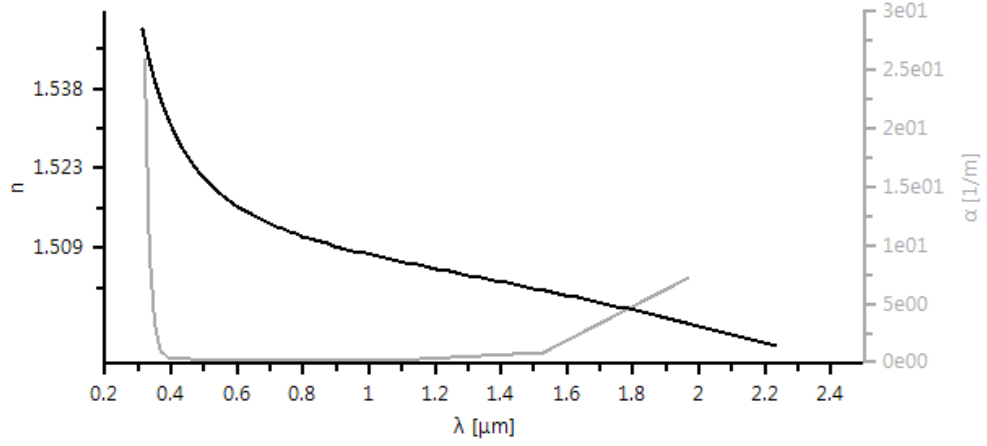
Şekil 6.2. Işın kalite faktörü modelleme



Şekil 6.3. Hermite Gauss çıkışları a) # 600 çıkışı b) #601 çıkışı



Şekil.6.4. Laguerre Gauss çıkışları a) #601 çıkışı b) #600 çıkışı



Şekil 6.5. N-BK7 kırılma indis değışimi

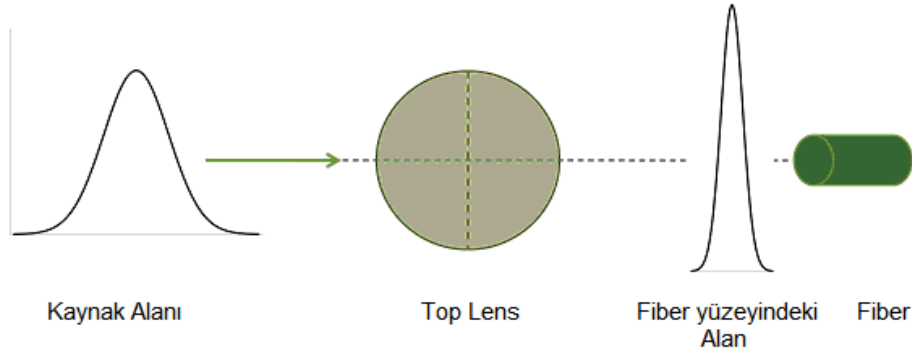
N-BK7 kodlu odaklama lensi özelliği bakımından, lazer optik sistemlerinde sıklıkla kullanılır. Uygulamada da bulunması sebebiyle optik modellemede tercih edilmiştir. Şekil 6.5 'te lens kırılma indisinin çeşitli dalga boylarına göre değışimi görülmektedir. Modellemede 980 nm dalga boyu kullanılmıştır.

## 6.2 Tek Mod Fiber Optik Kuplaj Benzetimi

Tek mod özelliğe sahip fiber optik kablo içerisinde mod özelliği bozulmadan lazer ışını odaklandırılması özel lens ve optomekanik gereçler ile yapılan üç boyutlu deney modeli Şekil 6.10 'da gösterilmiştir.

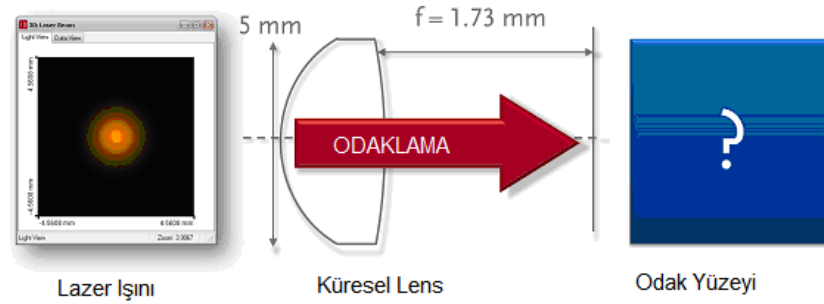
Tek mod fiber kuplajı basitçe, küresel bir lens üzerinden lazer ışığının fiber optik kablunun girişine odaklandırılmasıdır. Fiber kuplaj verimi teoride %10 dan daha azdır(Senior 1992). Ancak çeşitli optiksel iyileştirmeler ve hesaplamalar ile bu verim değeri arttırılmış ve %29 seviyelerine çekilmiştir(Anonim 2010). Teorik çalışmalarda odak uzaklığı 10  $\mu\text{m}$  ile 15  $\mu\text{m}$  arasında olan lazerden fibere kuplaj verimi 15  $\mu\text{m}$  için %43 değerini alır(Özyazıcı 2004).

Lazer diyot üreticisi firmaların pazara sunduğu ürünlerden 10 W, 105  $\mu\text{m}$  fiber öz çapına sahip 0.15 ile 0.22 NA değerine sahip lazer diyot için kuplaj verimi %90 civarındadır (Yalamanchili ve ark. 2008, Treusch ve ark. 1998).



Şekil 6.6. Optik sistem şematik diyagramı

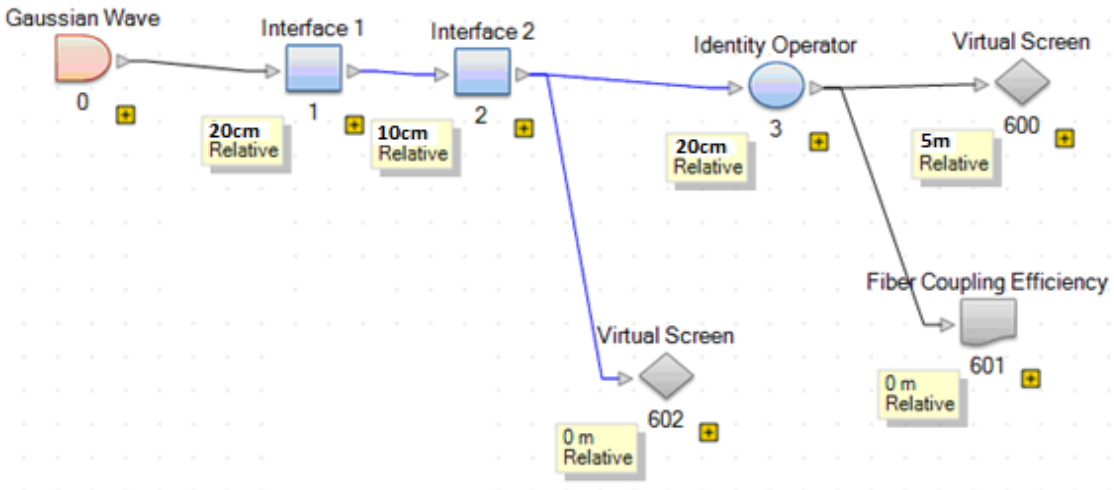
Modellemede maksimum fiber kuplaj verimi için lens ve fiber arasındaki mesafe optimize edilmiştir (Langrock ve Zhang 2001).



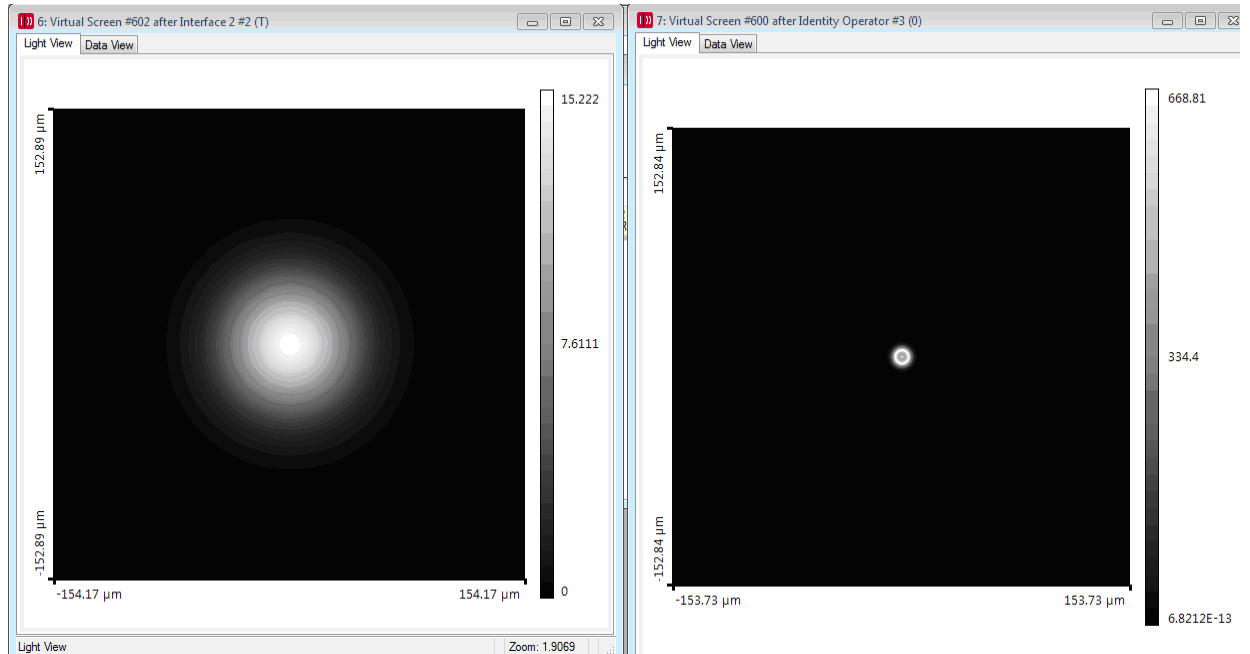
Şekil 6.7. Kuplaj verimi, lens ve fiber arasındaki mesafe

Şekil 6.8 simülasyon modelinde görüldüğü üzere temel Gauss giriş ışını iki arayüzden geçirilerek idealleştirme ve odaklama operatörüne gönderilir. Odaklayıcı optomekanik komponent içerisinde küresel lens bulunmaktadır.

Şeki 6.9b 'de görüldüğü üzere lazer ışını kuplaj için odaklandırılmış ve nokta boyutu küçültülmüştür.



Şekil 6.8. Tek mod sistem konfigürasyonu modeli



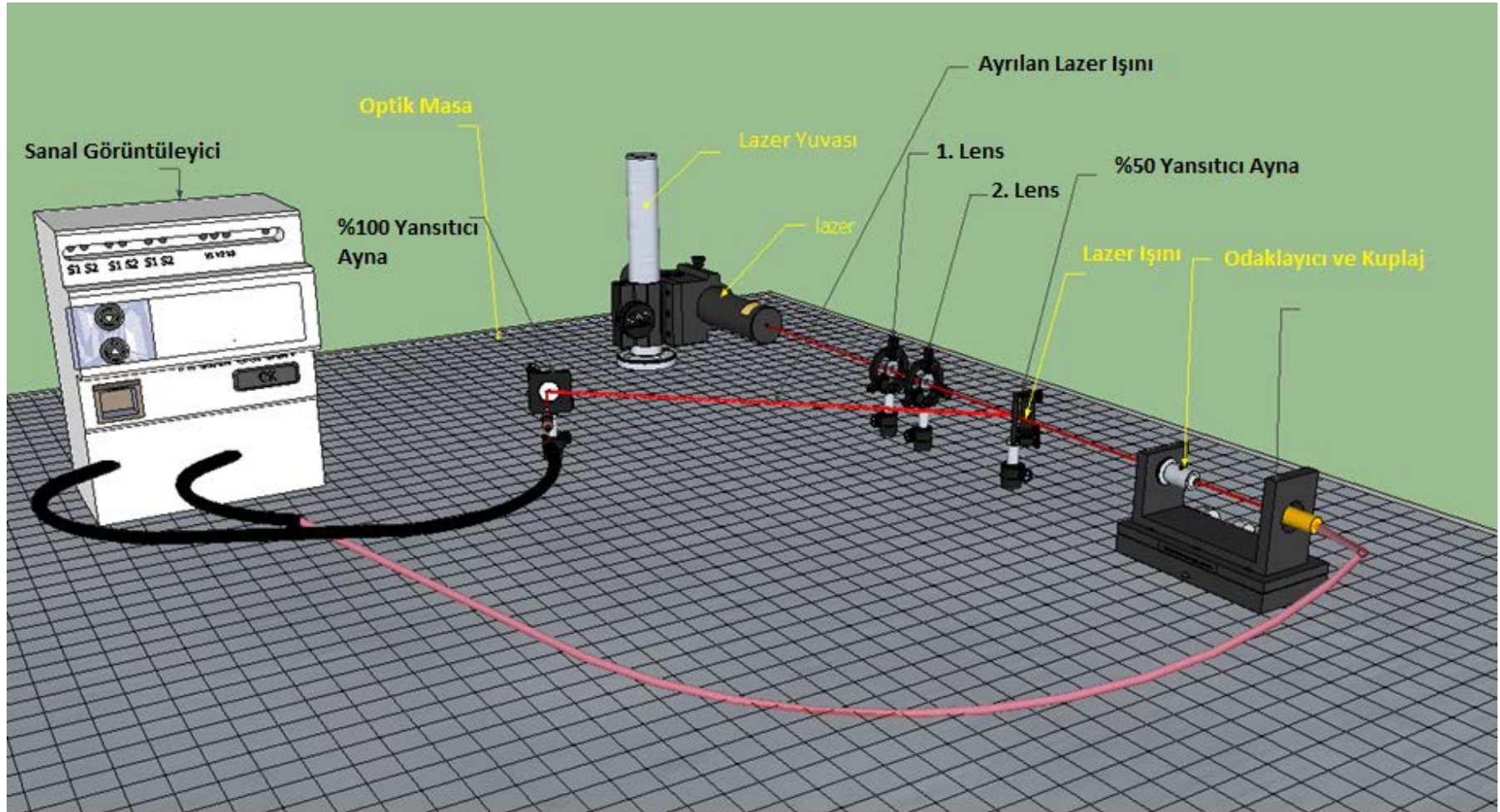
Şekil 6.9. Arayüz ve ideal modülden sonra ışın çıkışları a) #602 b) #600

Fiber kuplaj sisteminde paraksiyel olmayan asperik lens sayesinde odaklanan lazer ışınının fiber kablo içerisine yönlendirilmesi modellenmiştir. Model üzerinde 2 yüzeyle bikonveks asperik lens kullanılmıştır. Lens özelliği bakımından kalınlığı 3.15 mm dir. Modelleme üzerinde optik komponent olan özel lens Schott's marka N-SK5 cam serisinden küresel top lens örneği kullanılmıştır.

Lens, dalga boyu 980 nm ve lens çapı 2 mm olan ideal Gauss lazer ışını ile aydınlatılmıştır. Lazer ışını X yönünde lineer polarizedir.

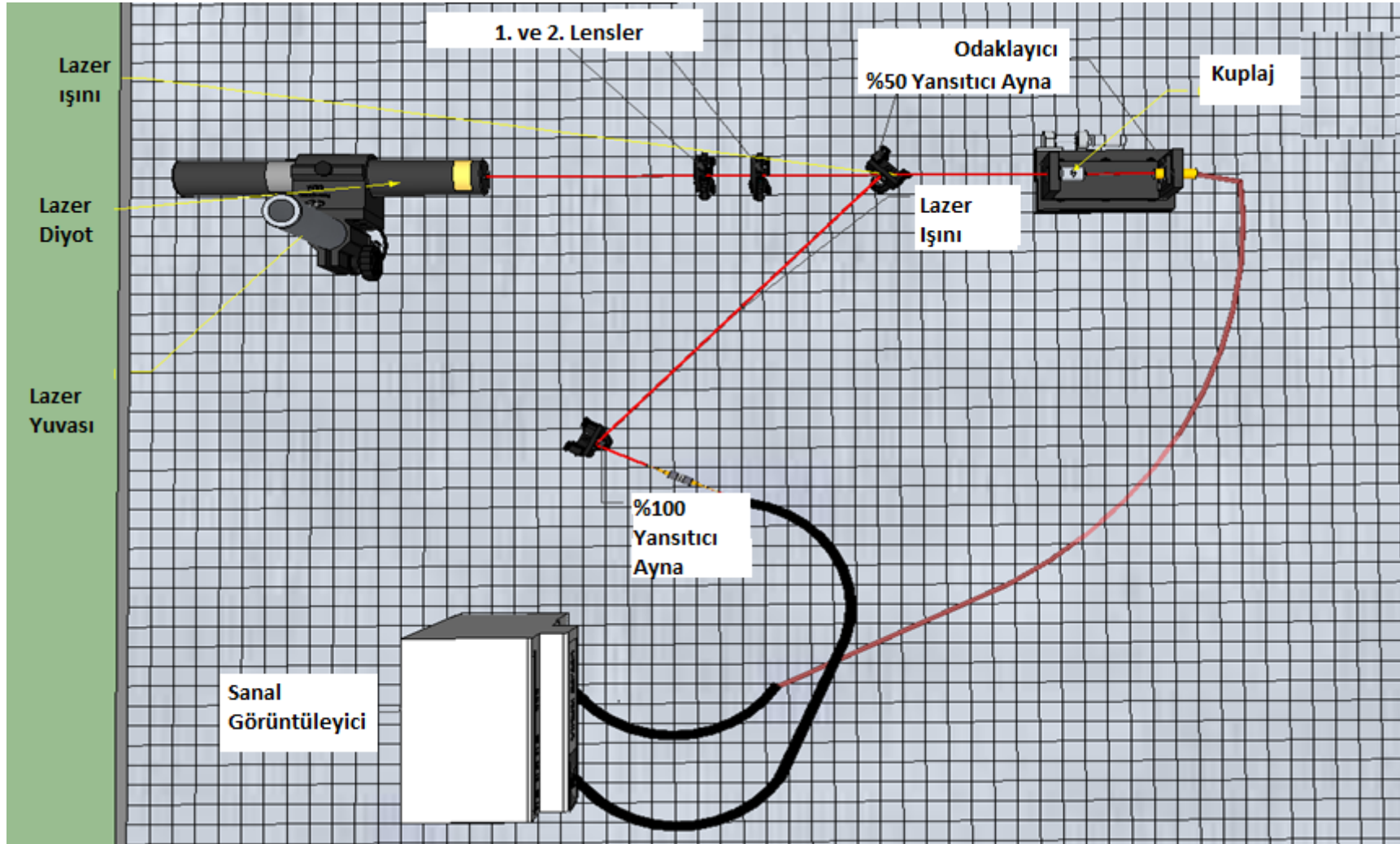
Işığın yayılım doğrultusundaki simülasyonu için farklı bölgelerde farklı fiziksel optik sistem modelleri kullanılmıştır. Yayılım doğrultusunda lens, geometrik optik ile modellenmiştir. Bu simülasyon, vektörel etkiler ile lens yüzeylerindeki kırınım ve Fresnel kayıplarını içermektedir. Lensin odak yüzeyinden yayılım, paraksiyel olmayan uzak alan yayılımı ile modellenmiştir. Odak yüzeyindeki elektrik alanın X parçası lazer ışın parametresi değerlendirilmiştir. Genlik ve faz diyagramlarında lensten sonra sapmalar görülmektedir. Şekil 6.10 ve Şekil 6.11'de kuplaj için verilen üç boyutlu çizim görülmektedir. Tüm sistemin ana parçaları Ek 4 'te verilmiştir.

Modelleme sonucunda elde edilen verilere göre, fiber kuplaj verimi: %74.619 dur.



Şekil 6.10. Fiber tek mod kuplaj deney düzeneği





Şekil 6.11. Fiber kuplaj tek mod deney düzeneği üstten görünüm üç boyutlu çizim



## 7. SONUÇ

Yüksek güçlü sürekli zaman modunda çalışan fiber lazerlerde kayıp analizi büyük önem taşımaktadır. Sac metallerin kesimi esnasında lazer sistemi çıkışında elde edilen ışının kayıpsız bir şekilde elde edilmesi ve odaklandırılması ile kaliteli kesimler yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında ışın kalite faktörü, temel kayıplar ve fiber optik kablo özellikleri bakımından sayısal hesaplamalar, optik modelleme ve üç boyutlu deney düzeneği tasarlanmıştır. Nümerik iterasyon yöntemlerinden Newton-Rapshon yöntemi ile ışın kalite faktörü değeri için yaklaşık değerler elde edilmiştir.

Optik modelleme programı ile ışın kalite faktörü ölçümü ve lazer ışınının tek mod fiber optik kablo içerisinde kuplajı yapılmıştır.

Elde edilen veriler ışığında;

- Fiber içerisinde ilerleyen ışığın darbeli rejimde olması halinde modal yayılma meydana gelmektedir. Bu etkinin giderilmesi için; kullanılacak fiber daha az moda izin verecek şekilde seçilebilir, dereceli indis fiber kullanılır veya tek modlu fiber kullanılabilir.
- Elde edilen sayısal veriler ışığında söylenebilir ki; fiber optik kablolarda tek mod şartının sağlanması için, nümerik açıklık değeri artırılarak fiber kablonun öz çapı küçültülür.
- $M^2$ , ışın kalite faktörü değeri, 1'e yakın ve 1'den büyük olması şartları, odaklanan merceğin parametreleri ve ışının özelliklerine bağlıdır.

Fiber lazer sistemlerinde ışın kalite faktörü üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Fiber öz çapı 200  $\mu\text{m}$  ile 340  $\mu\text{m}$  arasındaki bir fiber lazer sisteminde ışın kalite faktörü 1.2 ile 1.5 arasındadır. kW seviyesinde çalışan bir fiber lazer sisteminde ışın kalite faktörü tek mod uygulamalarda 1.3 ile oldukça iyi bir değer alır.

Lazerden çıkan ışının fibere kayıpsız şekilde odaklandırılması için fiber öz çapı, fiber ile lens arası odak uzaklığı değiştirilerek verim arttırılabilir.

Tez çalışmasında, simülasyon sonucunda,  $M^2$  parametreleri: X ve Y yönünde 1.2633 bulunmuştur. Elde edilen  $M^2$  değeri; fiber çapı 10  $\mu\text{m}$ , diverjans açısı 0.19 alınarak hesaplanmıştır. Kavite uzaklığı 15.2 mm, nüremik açıklık değeri; 0.16, lens çapı 5.5 mm, merkez kalınlık 2 mm, küresel yüzeyin yarıçapı 8.614916 mm alınmış, cam özelliği bakımından N-BK7 (Thorlabs Inc.) kullanılmıştır. Kavite uzunluğu 15.1 mm ve 15.2 mm için sırasıyla TEM 11 ve TEM 10 modları bulunmuştur.

İkinci yapılan simülasyonda tek mod özelliğinde fiber optik kuplaj için, paraksiyel olmayan asperik lens sayesinde odaklanan lazer ışını modellenmiştir. 2 yüzeyle bikonveks asperik lens kullanılmıştır. Lens kalınlığı 3.15 mm dalga boyu 980 nm ve çapı 2 mm olan ideal Gauss lazer ışını ile aydınlatılmıştır. Lazer ışını X yönünde lineer polarizedir. Fiber kablonun nümerik açıklığı 0.22 ve öz çapı 100  $\mu\text{m}$  alınarak fiber kuplaj verimi: %74.619 olarak bulunmuştur.

## KAYNAKLAR

- Alvarez-Chavez, J.A., Mart'inez-Rios, A., Torres-Gomez, I., Offerhaus, H.L. 2007.** Wide wavelength-tuning of a double-clad Yb<sup>3+</sup>-doped fiber laser based on a fiber Bragg grating array. *Laser Physics Letters*, vol. 4, 12:880-883
- Anonim, 2010.** Laser diode to single mode fiber coupling efficiency, Maxim Integrated, USA
- Anonim, 2011.** Thermal considerations in design of water-cooled DPSS laser systems, Coherent Inc., USA
- Anonim, 2012.** Wavelength beam combined laser diode arrays, MIT Lincoln Laboratory, USA
- Archambault, J.L., Grubb, S.G., 1997.** Fiber gratings in lasers and amplifiers. *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 15, 8: 1378-1390
- Artyushenko, V.G., Fram, Y. 1999.** High efficient cladding on an ytterbium doped optical fibre and a fibre Bragg grating. *IOP Science Quantum Electron.* 29: 516
- Erdoğan, Ş. 2010.** Lazerle delmede işleme parametrelerinin delik kalitesine olan etkisinin deneysel araştırılması. *Yüksek Lisans Tezi*, G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği, Ankara
- Goldberg. C. 1997.** V-Groove side pumped 1.5 µm fiber amplifier. *Electron. Lett.*, vol. 33, 25: 2127-2129
- Guan, W., Marciante, J. R. 2007.** Dual-frequency operation in a short-cavity ytterbium-doped fiber laser. *Photonics Technology Letters*, IEEE Vol.19, 5:261-263
- Gundu, K. M., Yaradi, P. G., A. M. 2010.** Beam quality factor of single mode gain guided fiber lasers. *Optics Info Base*, Vol. 35, 24: 4124-4126
- Hagop Injeyan, Ph. D, Gregory D. Goodno, Ph. D. 2011.** High-power laser handbook. McGrawHill Companies Inc., USA, 591 pp.
- Jeong, Y., Sahu, J.K., Payne, D.N., Nilsson, J. 2004.** Ytterbium-doped large-core fiber laser with 1.36 kW continuous-wave output power. *Optics Express*, Vol. 12, 25: 6088-6092.
- Jeong, Y., Sahu, J., Payne, D., Nilsson, J. 2004.** Ytterbium-doped large-core fiber lasers with kW level continuous-wave output power. OSA, Conference on Lasers and Electro-Optics/International Quantum Electronics Conference and Photonic Applications Systems Technologies, CMS1.

**Jin, L., Zou, Y., Ma, X., Yang, Z., Xue, Z., Jin, Y., Xu, L. 2012.** Simulation and optimization of pump technology on high-power fiber laser. IEEE, Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), International Conference

**Karagöz, İ. 2011.** Sayısal analiz ve mühendislik uygulamaları. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 498 s.

**Khitrov, V., Samson, B., Machewirth, D., Tankala K. 2008.** 50W single-mode linearly polarized high peak power pulsed fiber laser with tunable ns- $\mu$ s pulse durations and kHz-MHz repetition rates. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering 6873:11

**Kim, N. S., Hamada, T., Prabhu, R.M. 2000.** Numerical analysis of output performance of Nd-doped double-clad fiber lasers. Proc. SPIE, , Vol. 3889, pp.:583.

**Kurkov, A.S., Medvedkov, O.I., Karpov, V.I., Vasiliev, S.A., Lexin, O.A., Dianov, E.M. 1999.** Photosensitive Yb-doped double clad fiber for fiber lasers. IEEE Optical Fiber Communication Conference, Vol. 2: 205 - 207

**Kurkov, A.S., Medvedkov, O.I., Karpov, V.I., Vasiliev, S.A., Lexin, O.A., Dianov, E.M., Laptev, A.Yu., Guryanov, A.N., Paramonov, V.M., Umnikov, A.A., Protopopov, V.N., Vechkanov, N.N., Perchina, E.V. 2010.** Yb 3+ doped double clad fibers and lasers. *Proc. SPIE* 4083, Advances in Fiber Optics, 10.1117/12.385638

**Kurkov, A.S., Dianov, E.M. 2004.** Moderate power CW fibre laser. IOP Science Quantum Electron, 2004, 34 (10): 881–900.

**Kurkov, A.S., Medvedkov, O.I., Karpov, V.I., Vasiliev, S.A., Lexin, O.A., Dianov, E.M., Laptev, A.Yu., Guryanov, A.N., Paramonov, V.M., Umnikov, A.A., Protopopov, V.N., Vechkanov, N.N., Perchina, E.V., Medvedkov, O.I., Langrock, C., Zhang, J. 2001.** Laser-to-fiber coupling. Stanford University, Lab 4, EE234 Photonics Laboratory

**Liu, G., Liu, D. 2006.** Optimization of pumping mode for double clad fiber lasers. Huazhong University of Science and Technology, Department of Optoelectronics, Wuhan, China

**Limpert, J., Liem, A., Zellmer, H., Tunnermann, A. 2003.** 500 W continuous wave fiber laser with excellent beam quality. Electron Lett. 39- 8:645–7.

**Lizé, Y.K., Holehouse, N., Faucher, M., Villeneuve, E., Seigniny, B., Wetter, A., Perreault, R. 2008.** High power monolithically integrated all-fiber laser design using single-chip multimode pumps for high reliability operation. Proc. SPIE 6873, Fiber Lasers V: Technology, Systems, and Applications, 68731T 10.1117/12.775087

**Noordegraaf, D., Maacka, M. D., Skovgaard, P. M. W., Johansena, J., Beckerb, F., Belkeb, S., Blomqvistc, M., Lægsgaardd, J. 2011.** All-fiber 7x1 signal combiner for incoherent laser beam combining. Proc. SPIE, 10.1117/12.875078

**Özyazıcı, M.S. 2004.** Increasing semiconductor laser optical fiber coupling efficiency by introducing microlens. *Gaziantep, Elektrik ve Elektronik, Optica Applicata*, Vol. 34, No.2, 2004

**Ripin, D. J., Goldberg. L. 1995.** High efficiency side-coupling of light into optical fibers using imbedded v-grooves. *Electron. Lett.*, Vol. 31, 2204-220.

**Ronnie, T.J.W. 2012.** Advances in high power laser diode packaging. Chapter 17 "Semiconductor Laser Diode Technology and Applications", ISBN 978-953-51-0549-7, 10.5772/37581

**Samson, B., Frith, G. 2008.** Diode pump requirements for high power fiber lasers. Nufern 501, USA

**Shao, H., Duan, K., Zhu, Y., Yan, H., Yang, H., Zhao, W. 2013.** Numerical analysis of ytterbium-doped double-clad fiber lasers based on the temperature-dependent rate equation. *ScienceDirect, Optik - International Journal for Light and Electron Optics*, Vol. 124, 16: 2277-2576

**Sprangle, P., Ting, A., Penano, J., Fischer, R., Hafizi, B. 2008.** High power fiber lasers for directed- energy applications. *NRL REVIEW* 89-99

**Senior, J.M. 1992.** Optical fiber communications: Principles and Practice Second Edition, NY, Prentice Hall, pp.348

**Tanrıverdi M.A. 1995.** Çelik malzemelerin lazer ile kesilmesinde kesme bölgesinin yapı ve özelliklerinin incelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi*, U. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa

**Tünnermann, A. 2005.** High power CW fiber laser, present and future. *Wiley Laser Technik Journal* Vol. 2, 2: 54–56

**Treusch, H.G., Keming, D., Baumann, M., Sturm, V., Ehiers, B., Loosen, P. 1988.** Fiber-coupling technique for high-power diode laser arrays. *Proc SPIE*, vol. 3267, 98-106

**Wandera, C. 2010.** Performance of high power fibre laser cutting of thick-section steel and medium-section aluminium. *Ph.D Thesis*, Department of Metal Technology, Lappeenranta University of Technology, , Lappeenranta, Finland

**Yalamanchili, P., Rossin, V., Skidmore, J., Tai, K., Qiu, X., Dueterberg, R., Wong, V., Bajwa, S., Duncan, K., Venables, D., Verbera, R., Dai, Y., Feve, J. P., Zucker, E. 2008.** High power high efficiency fiber coupled multimode laser diode pump module (9xx nm) with high reliability. *JDSU Corp.*

**Yang, H., Duan, K., Zhao, B., Zhang, E. 2013.** Theoretical study of stimulated Brillouin scattering in high-power dual-clad fiber lasers. *ScienceDirect Optik - International Journal for Light and Electron Optics* Vol.124, 11: 1049–105

**Yin, S., Yan, P., Gong, 2011.** Influence of fusion splice on high power ytterbium doped fiber laser with master oscillator multi-stage power amplifiers structure. ScienceDirect Optics and Lasers in Engineering Vol. 49, 8: 1054–1059

**Zenteno L. 1993.** High-power double-clad fiber lasers. J. Lightwave Technology 1993;11(9):1435–46.

**Zintzen, B., Langer, T., Geiger, J., Hoffmann, D., Loosen P. 2008.** Optimization of the heat transfer in multi kW fiber lasers. Proc. SPIE 6873, Fiber Lasers V: Technology, Systems, and Applications 10.1117/12.764450

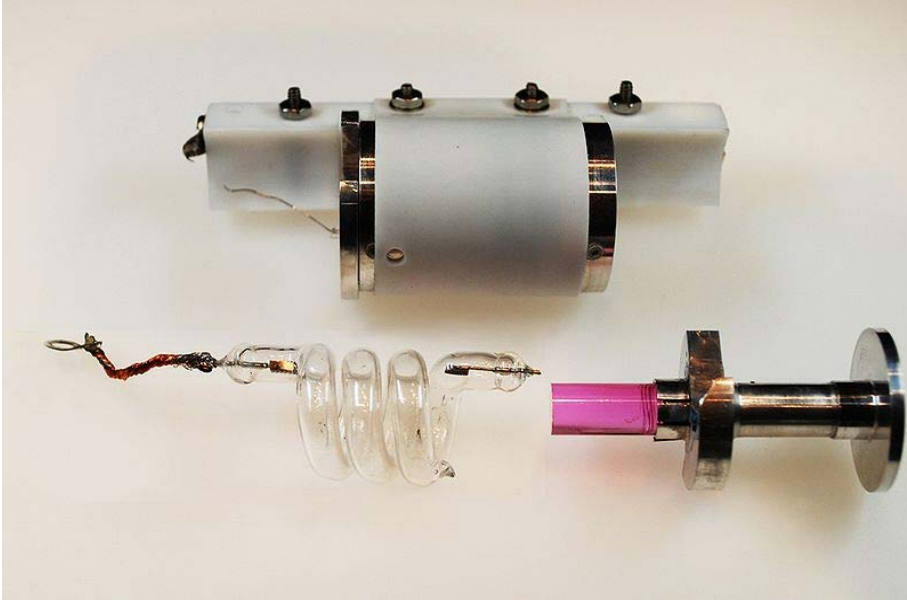
# **EKLER**

## EK 1 : Lazer Çeşitleri

Doteryum florid lazer

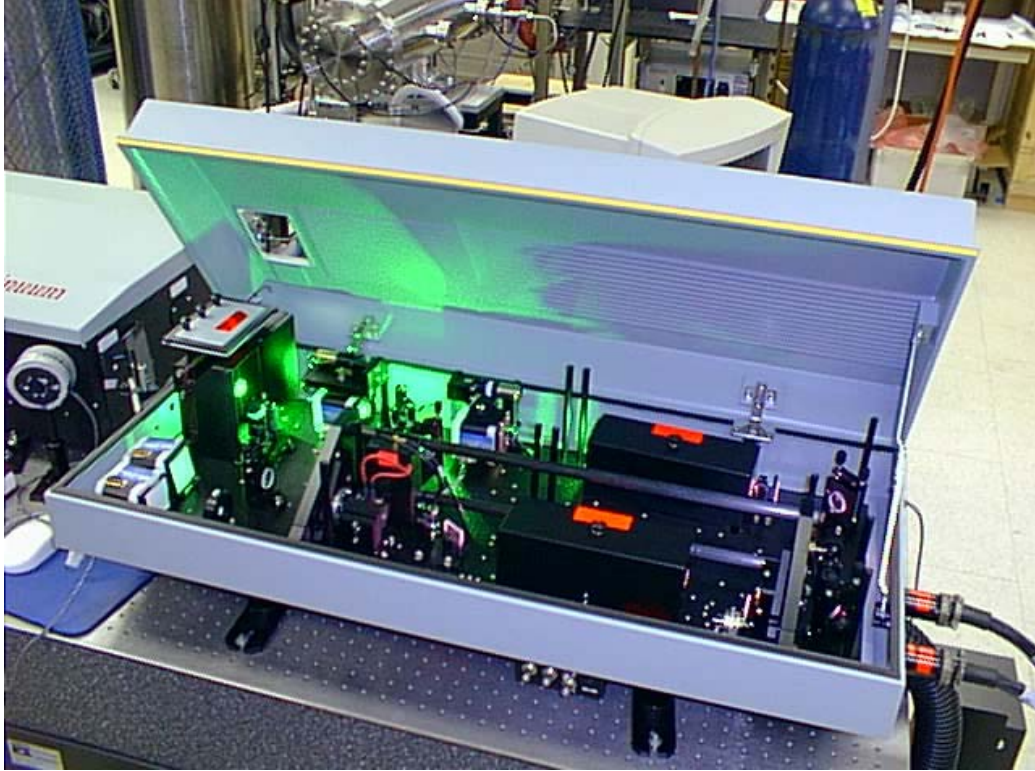


Yakut lazer

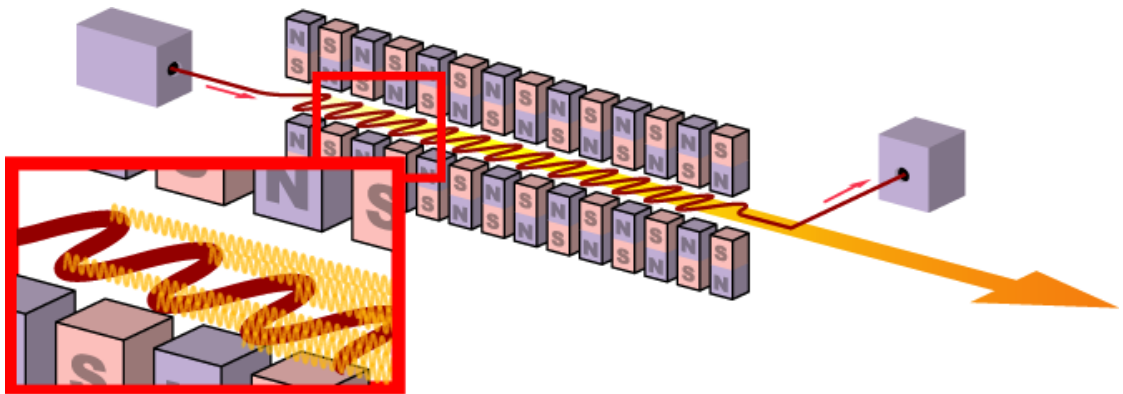




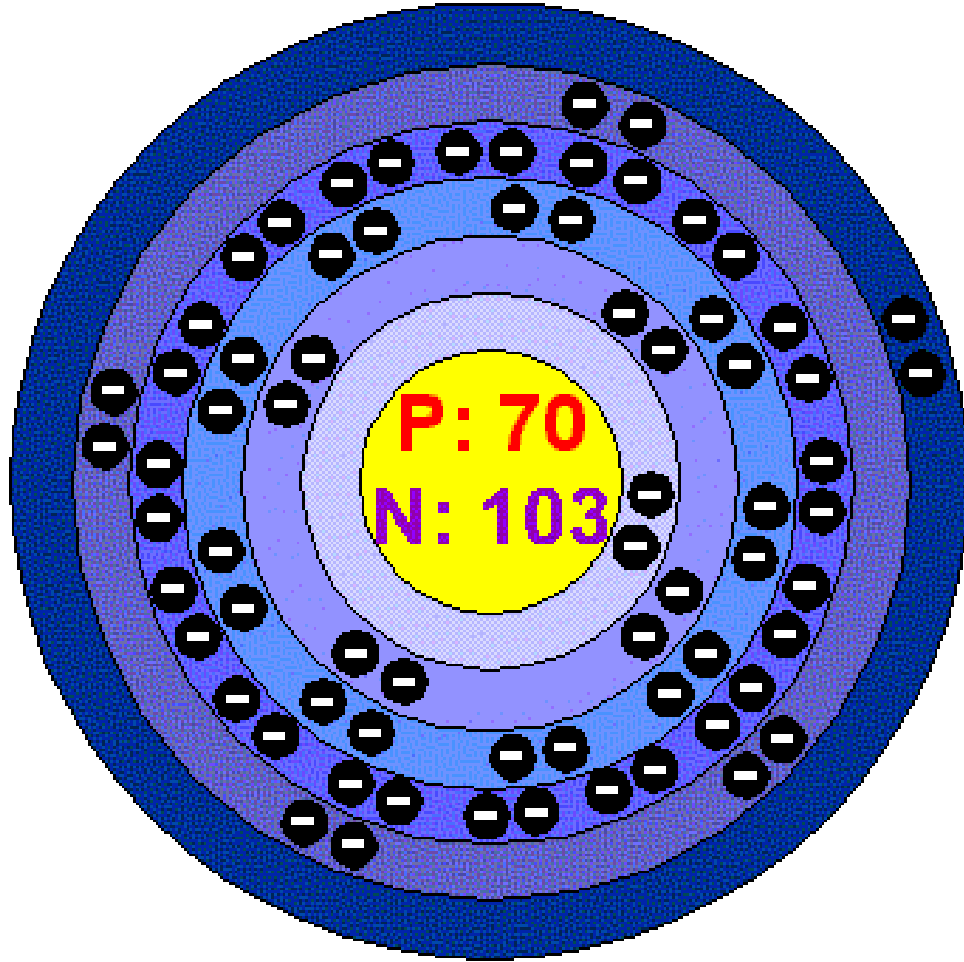
Nd: YAG lazer



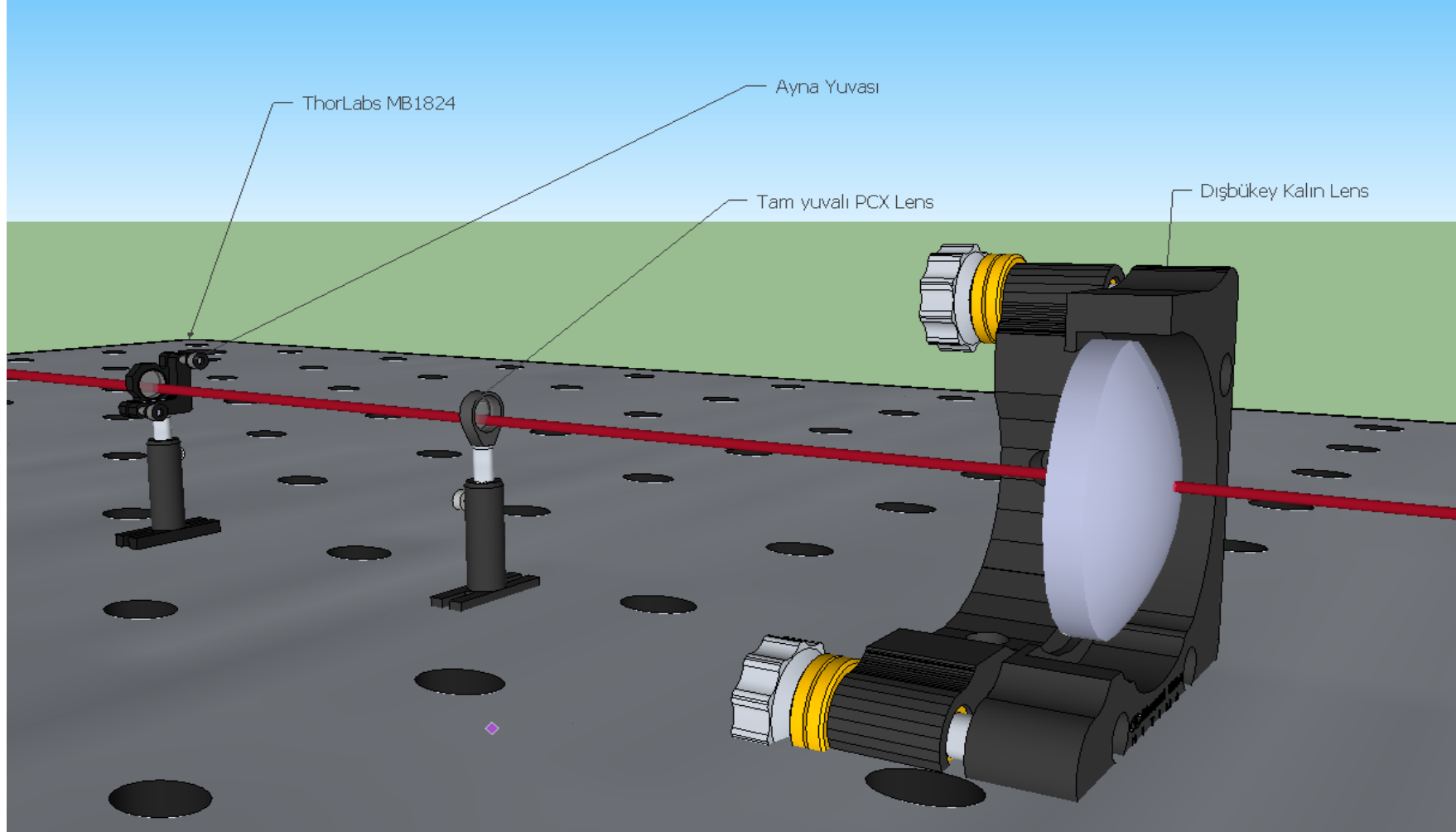
Serbest elektron lazeri



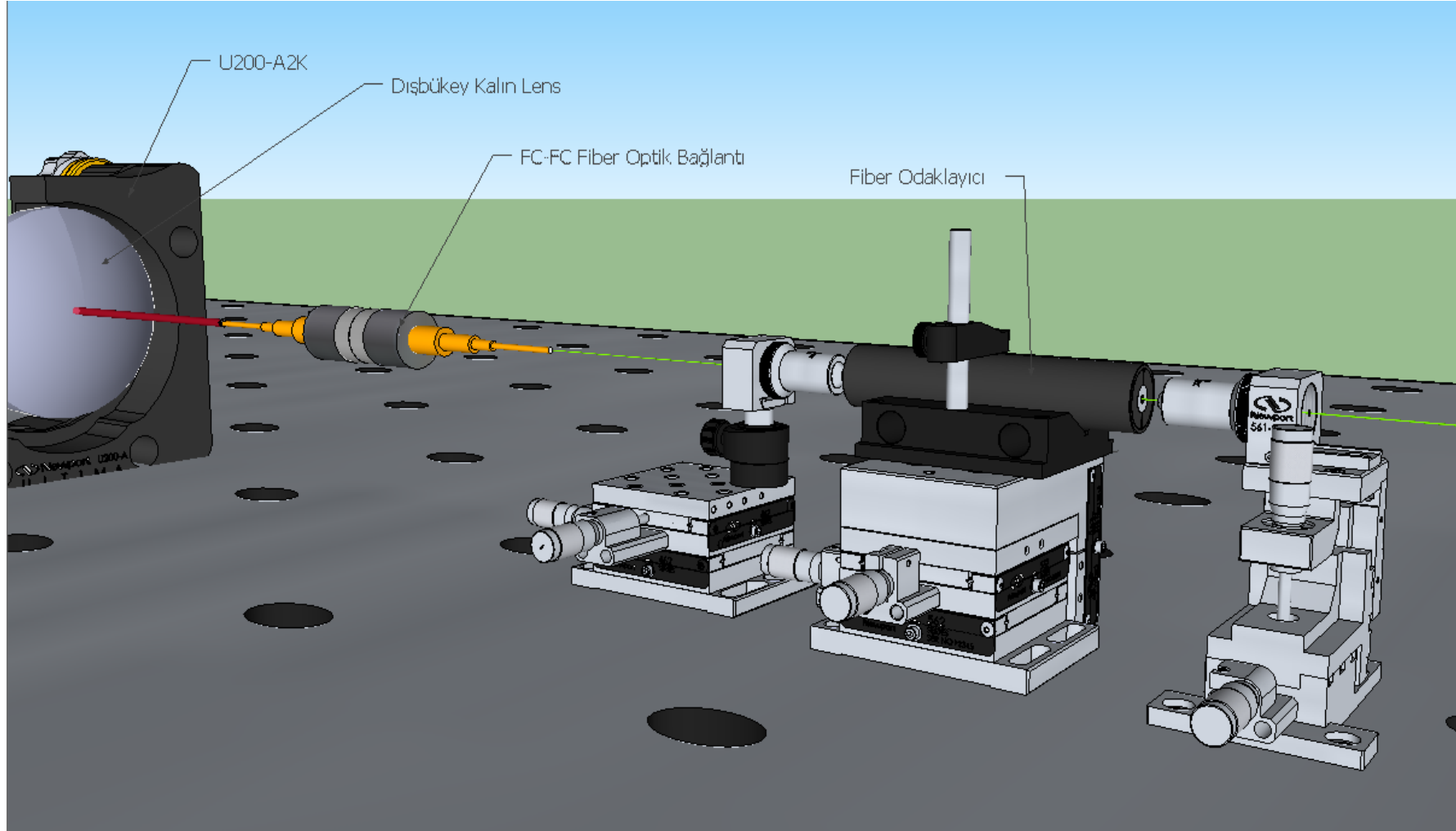
İterbiyum iyonu elektron dağılımı



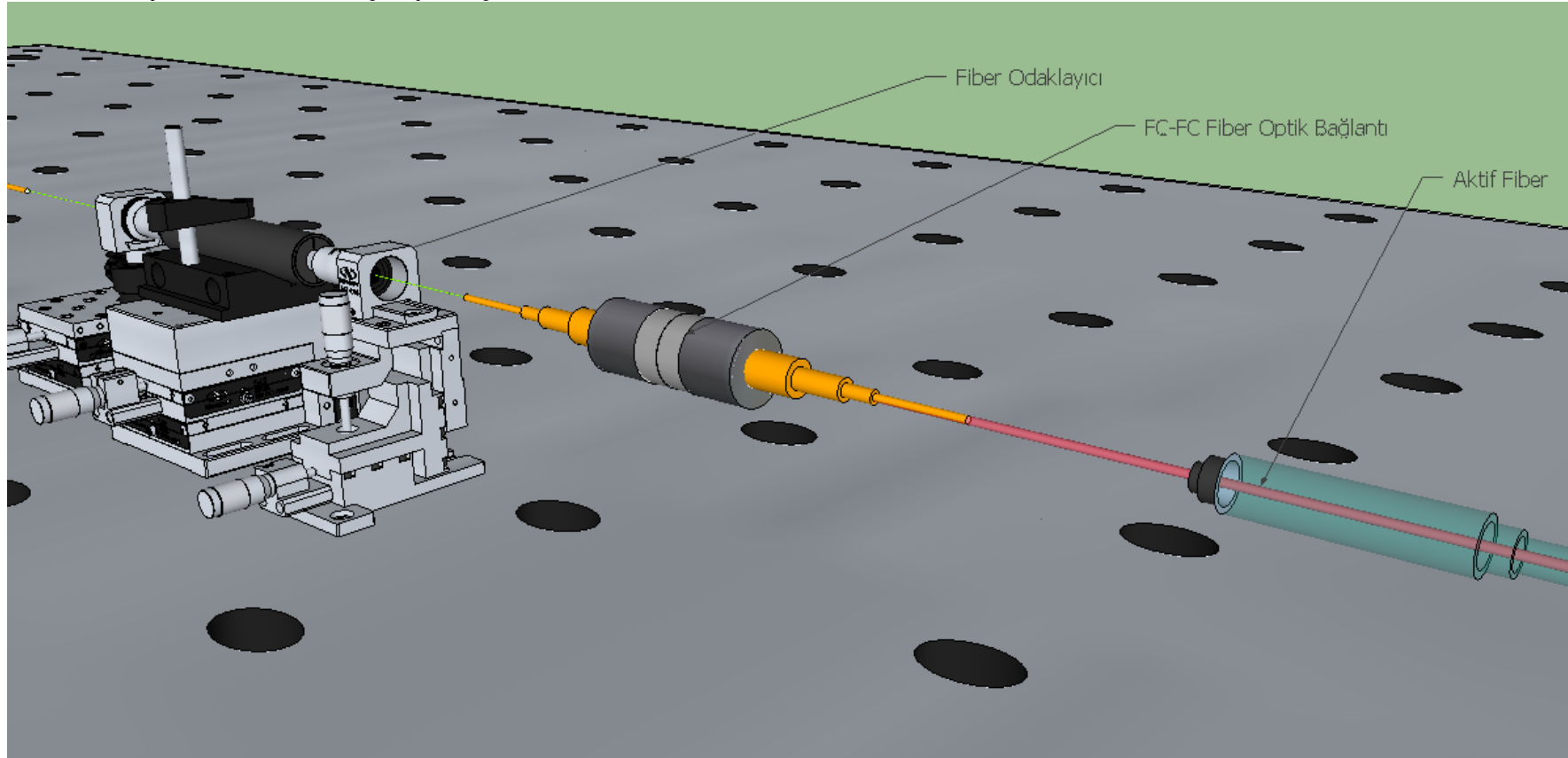
**EK 2: Üç Boyutlu Çizimler**  
Odaklama optikleri üç boyutlu çizim



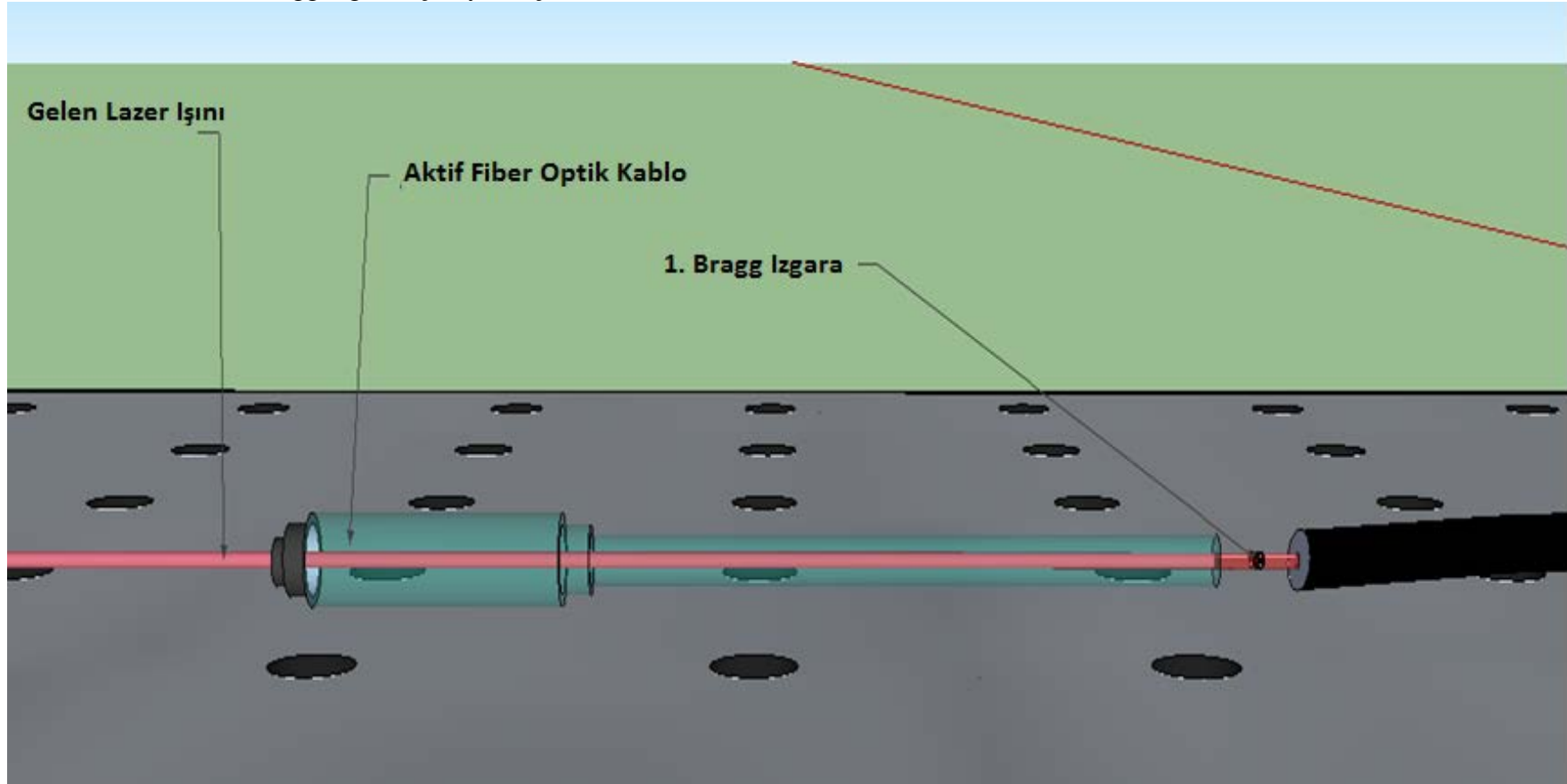
## Fiber odaklayıcı- kupa üç boyutlu çizim



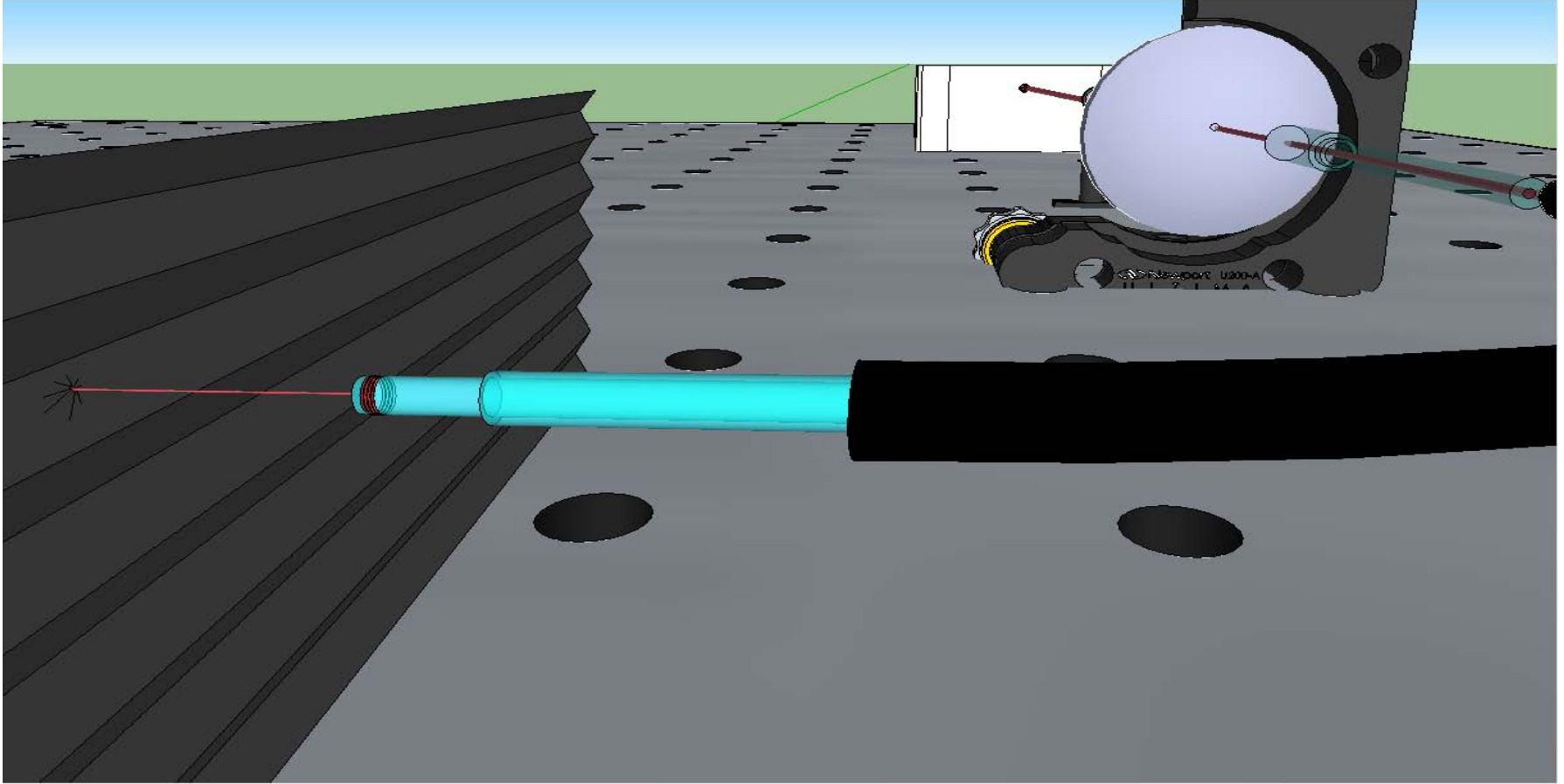
Fiber odaklayıcı ve aktif fiber üç boyutlu çizim



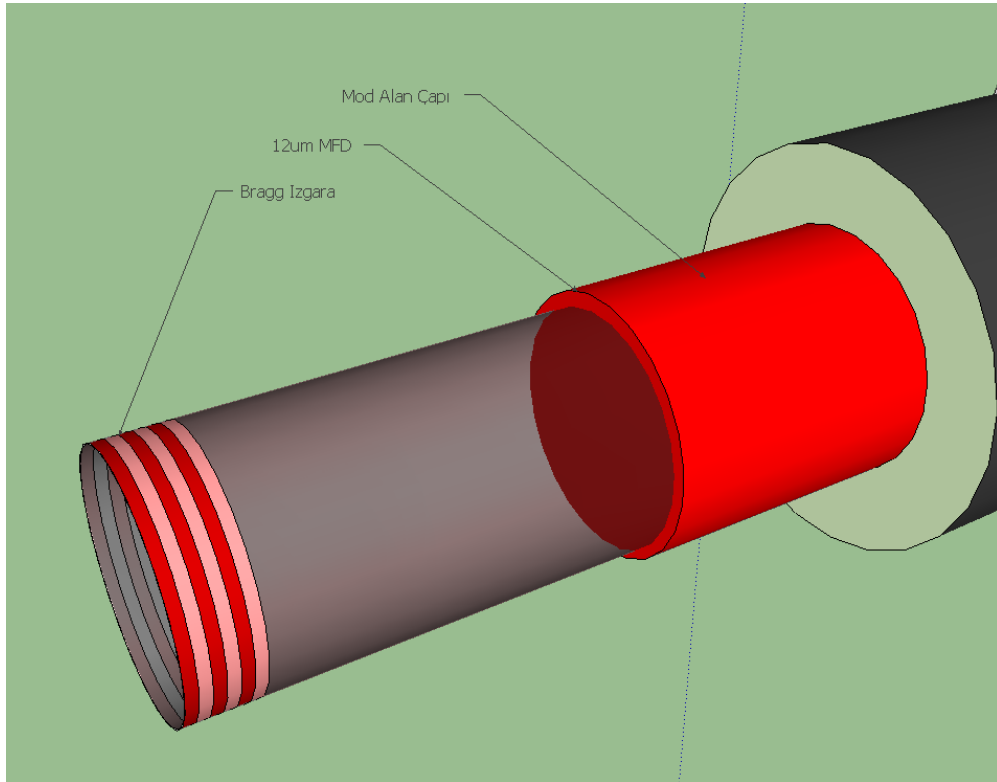
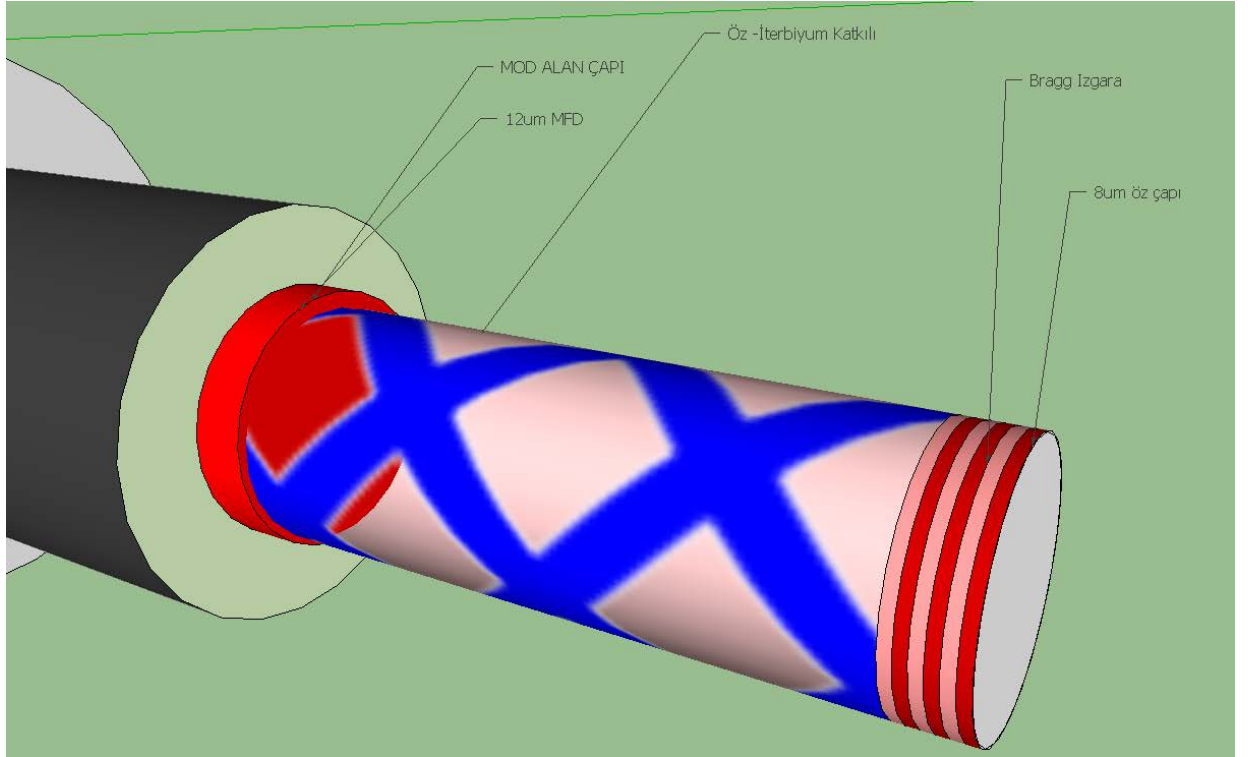
Aktif fiber ve birinci Bragg ızgara üç boyutlu çizim



Lazer ışını ve sac kesim-2 üç boyutlu çizim



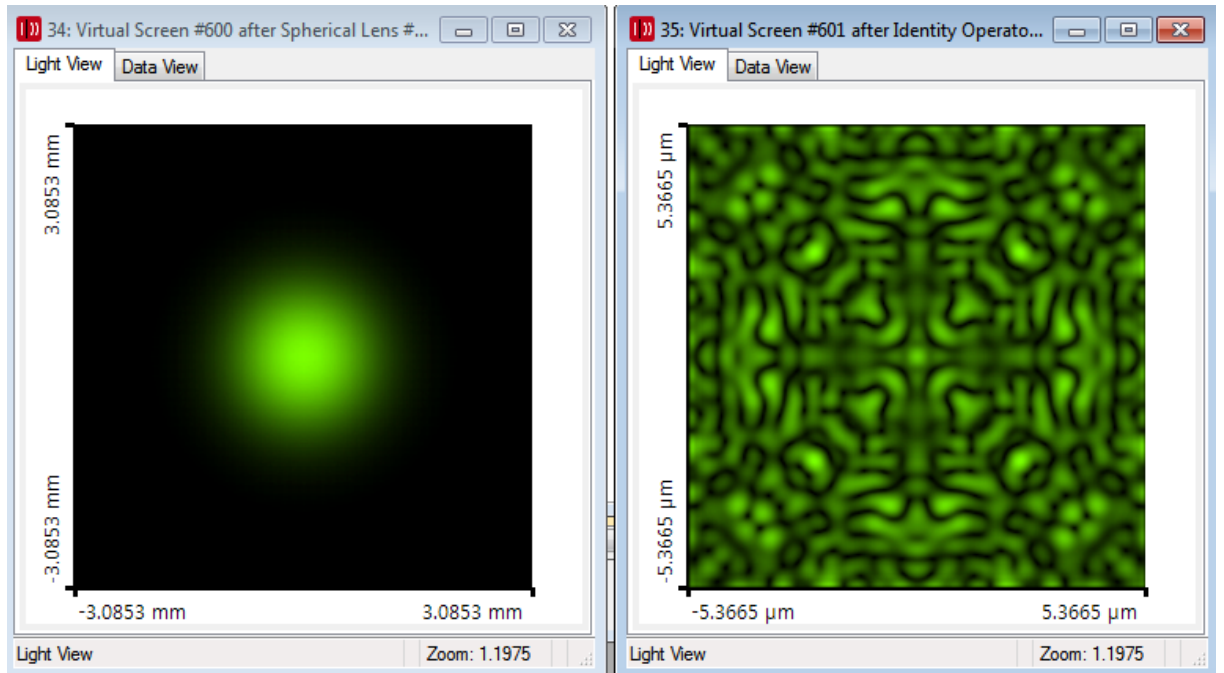
## Mod alan çapının aktif fiber üzerindeki oluşumu



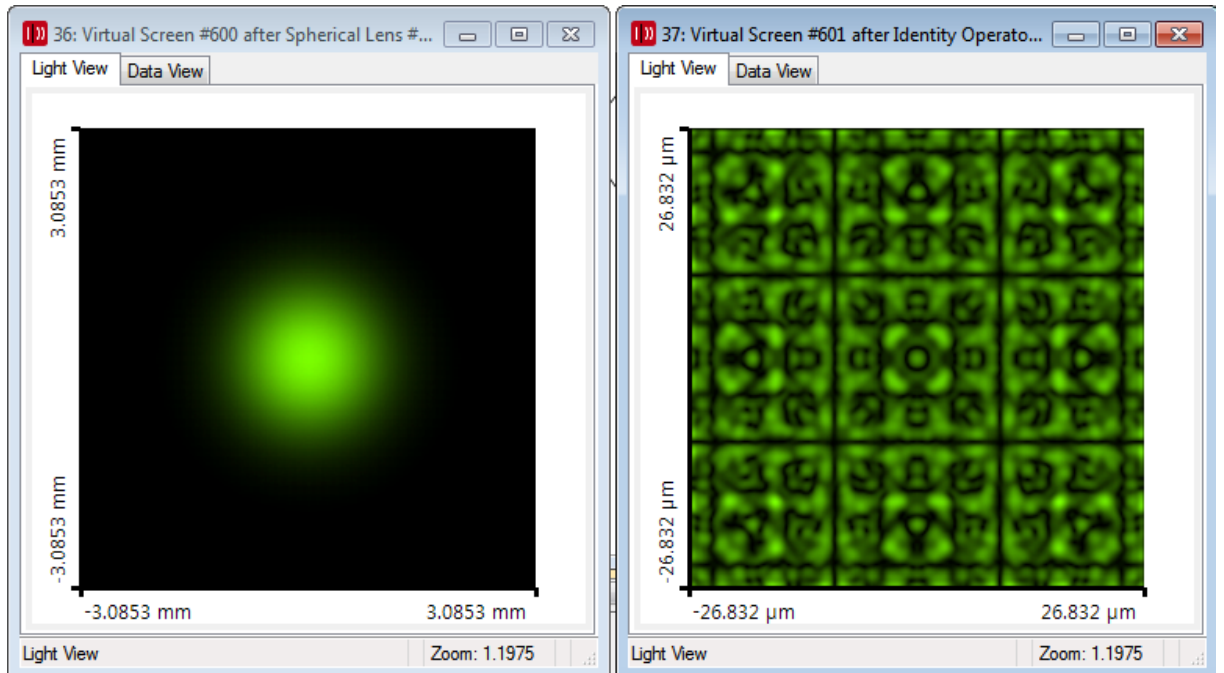


### EK 3: Laguerre Gauss çıkışları

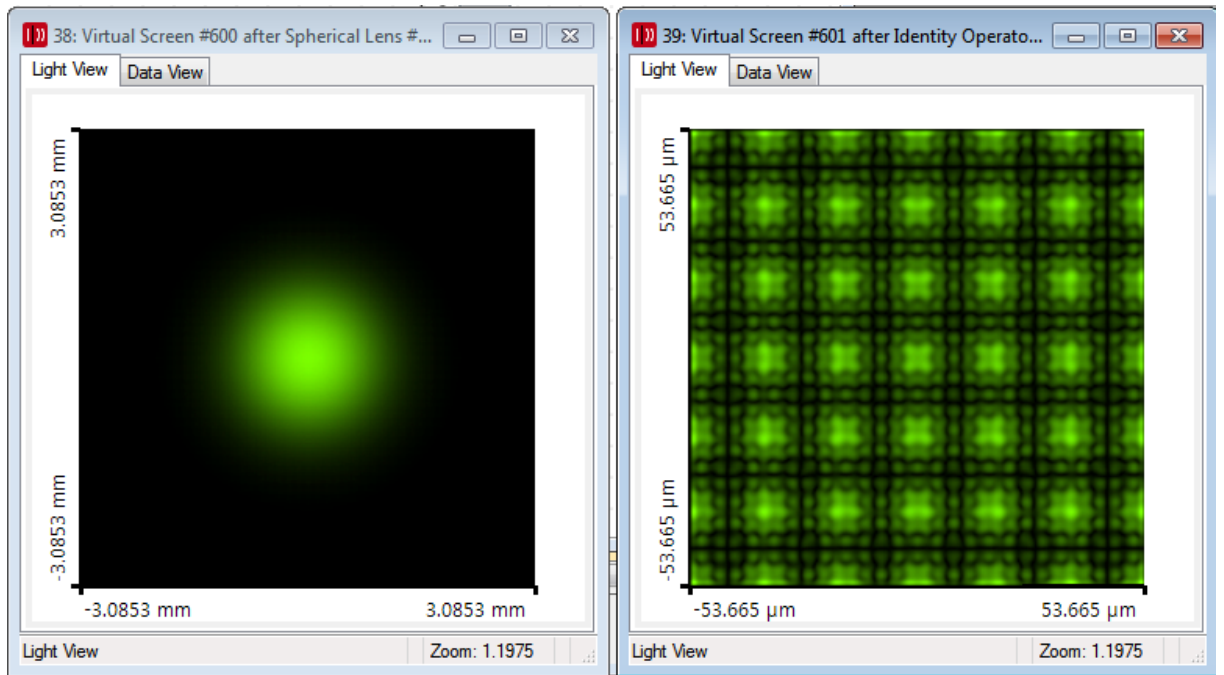
L: 1 mm



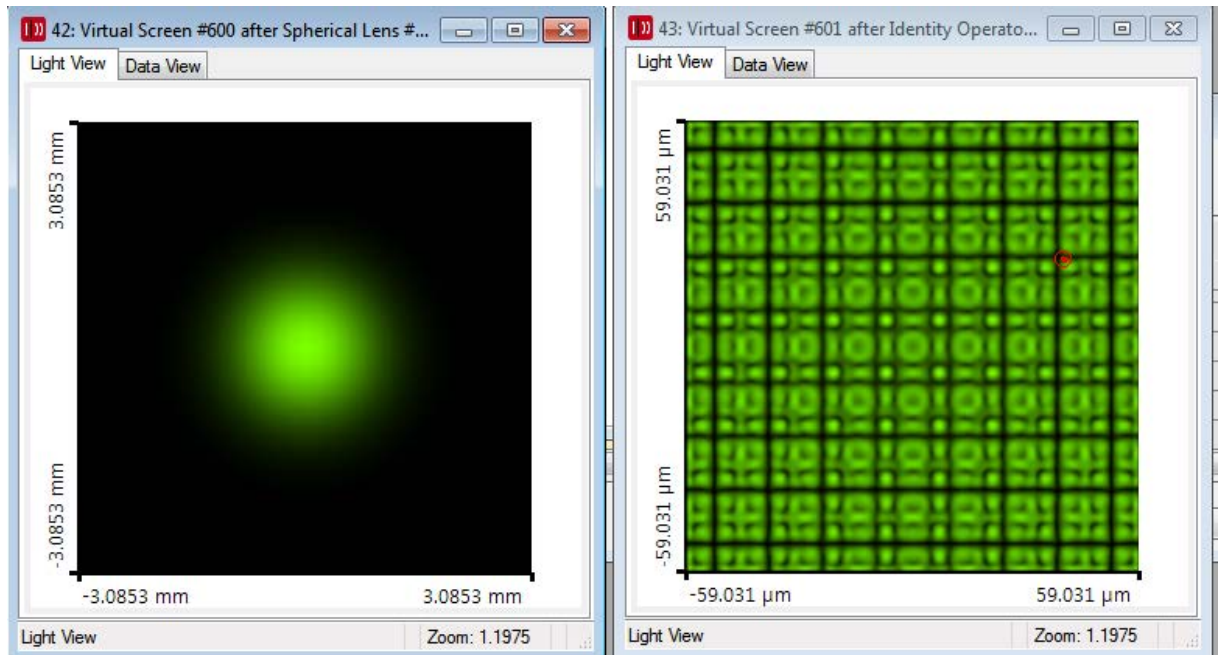
L: 5 mm



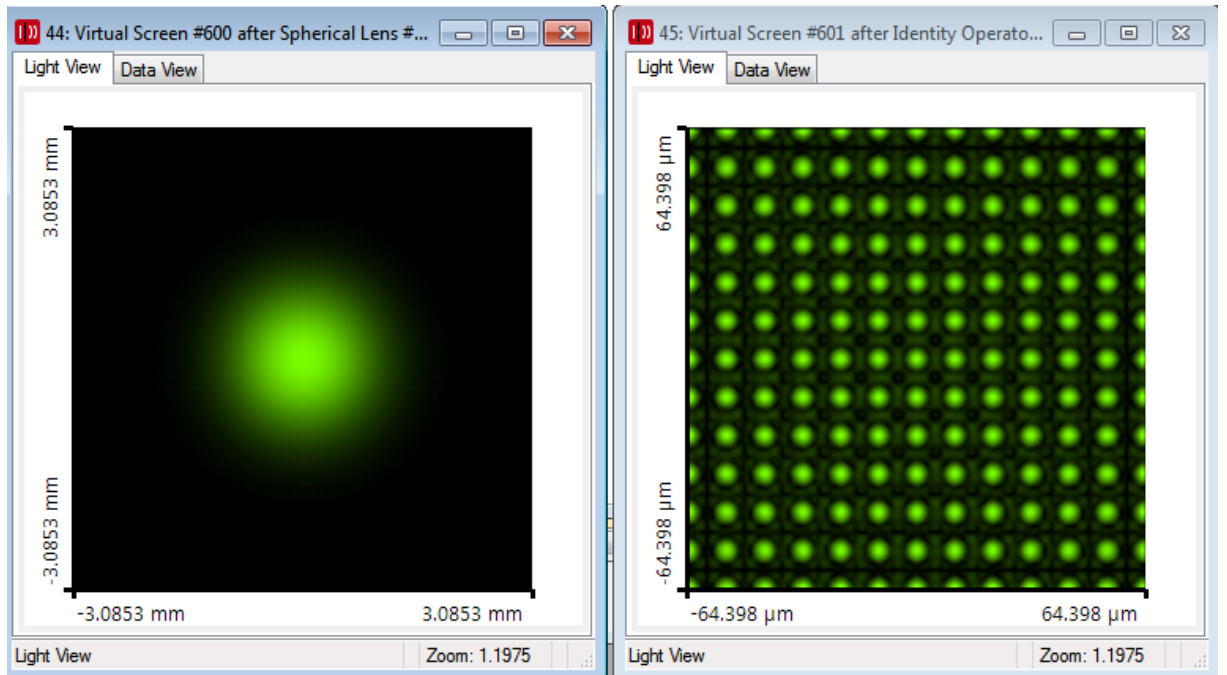
L: 10 mm



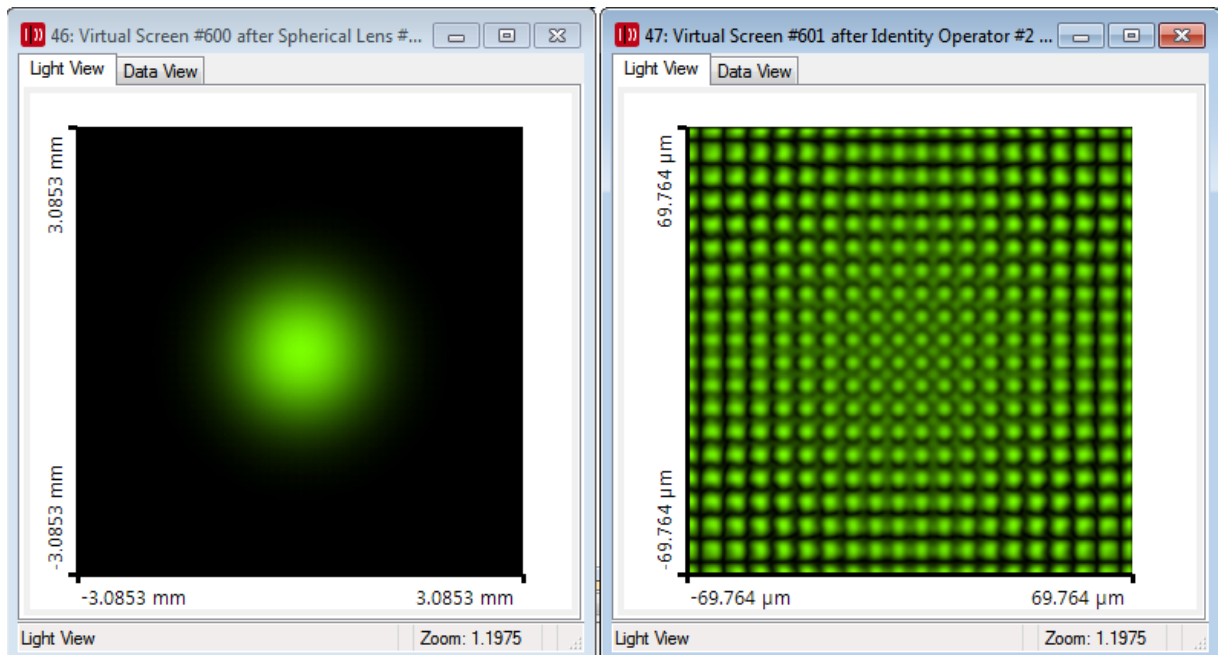
L: 11 mm



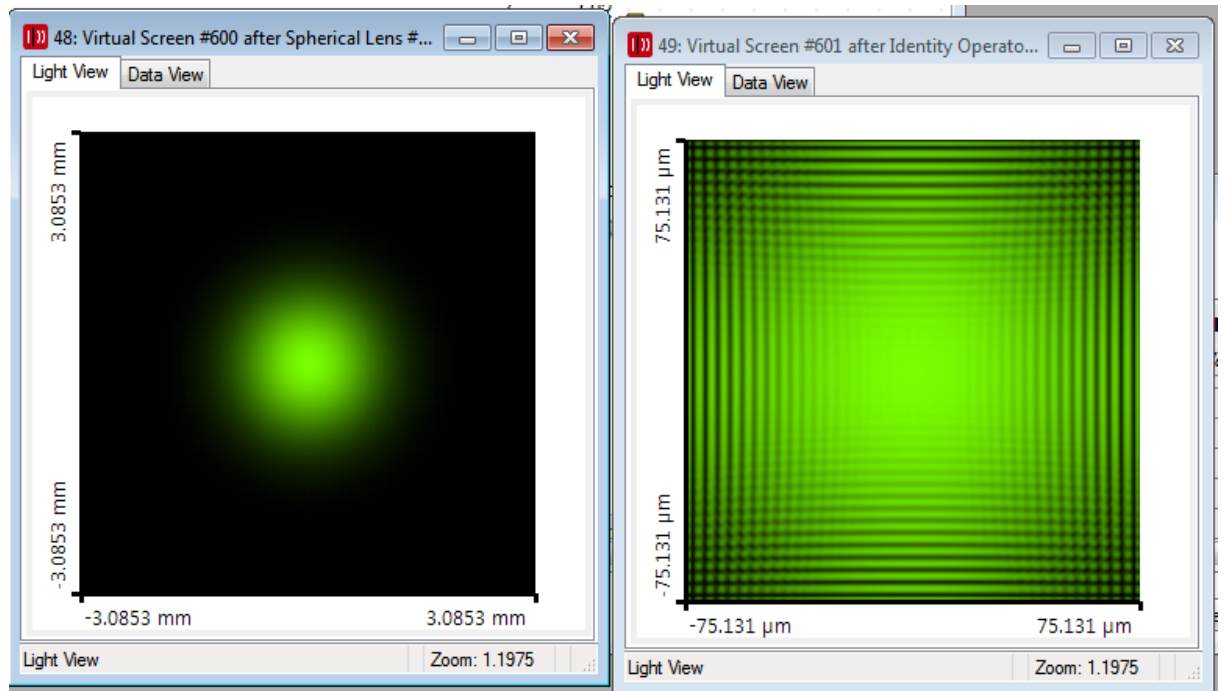
L: 12 mm



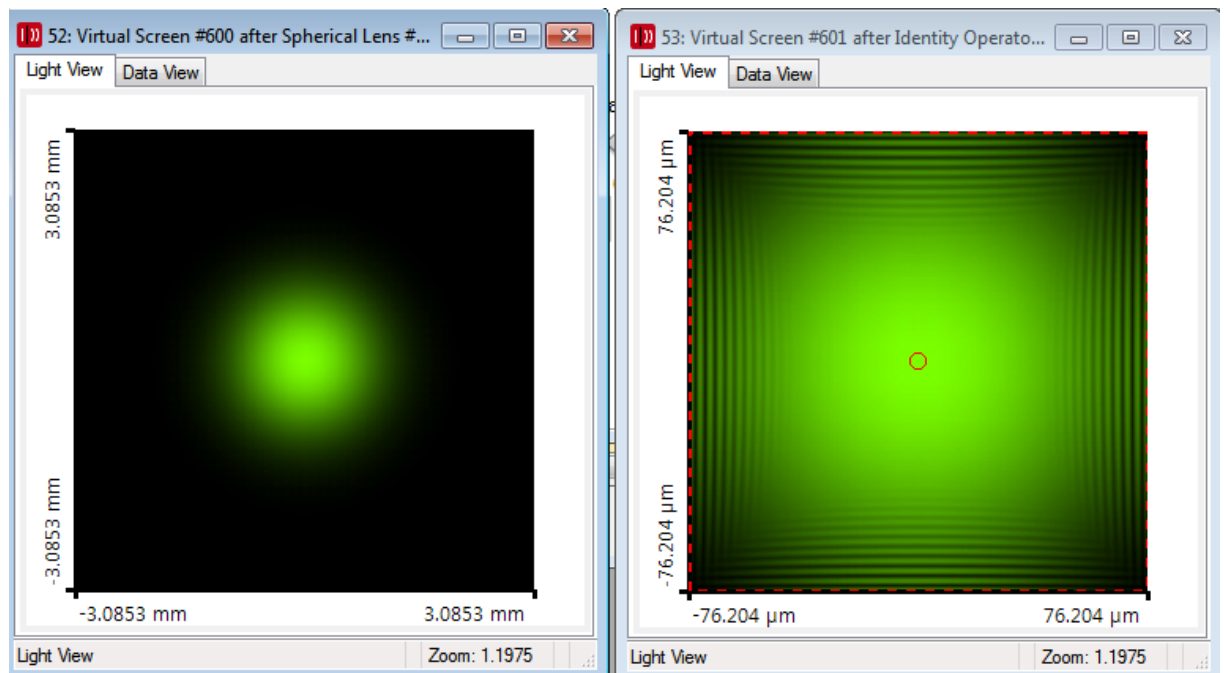
L: 13 mm



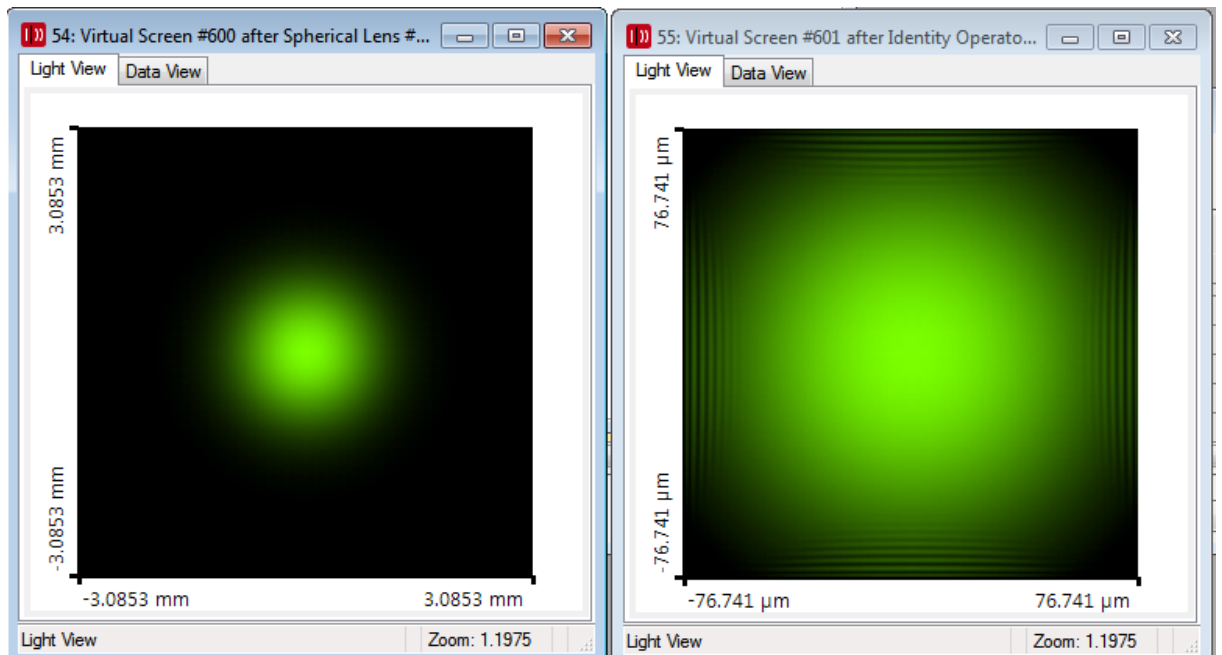
L: 14 mm



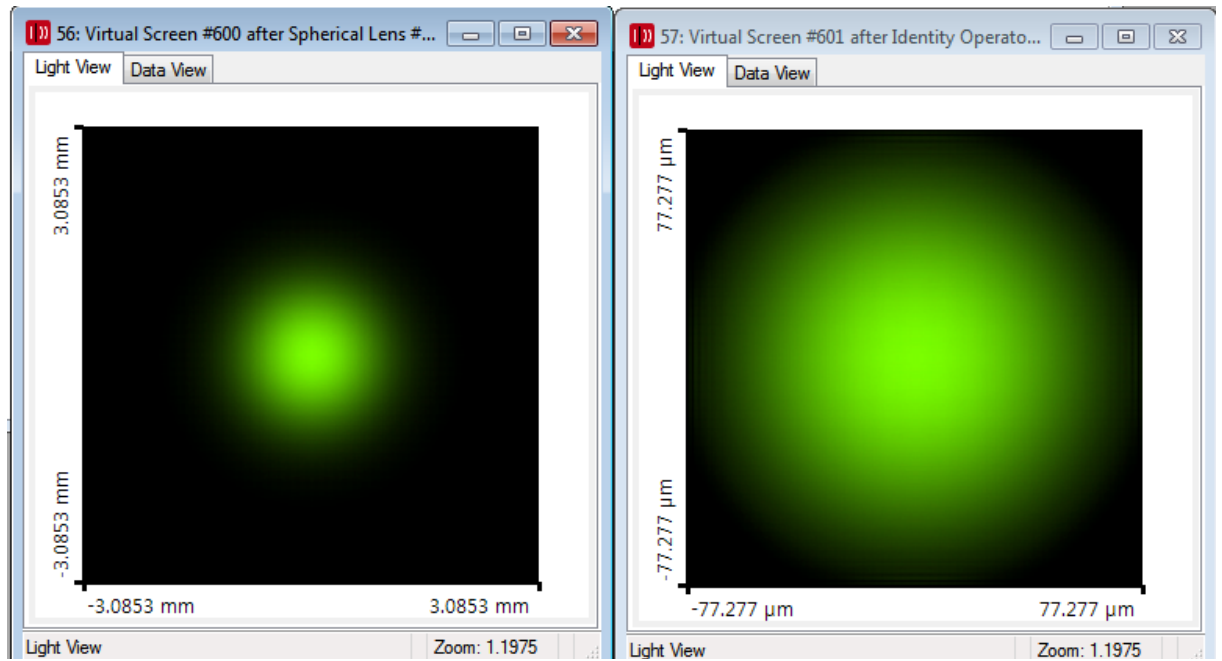
L: 14.2 mm



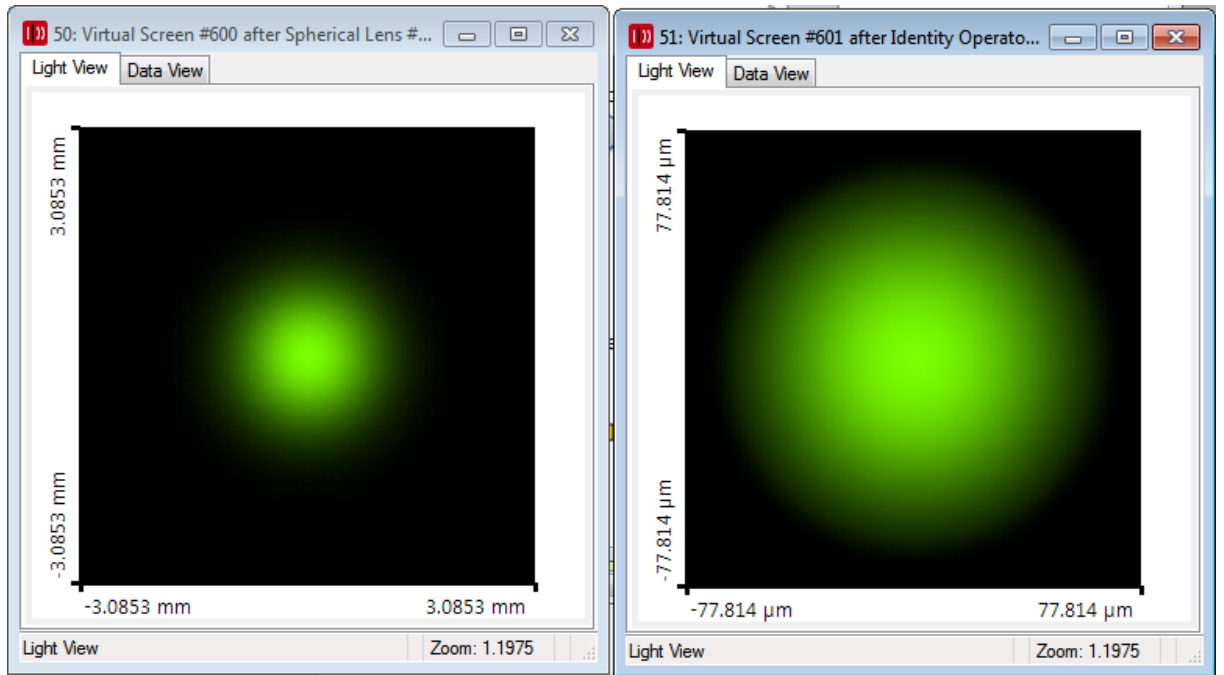
L: 14.3 mm



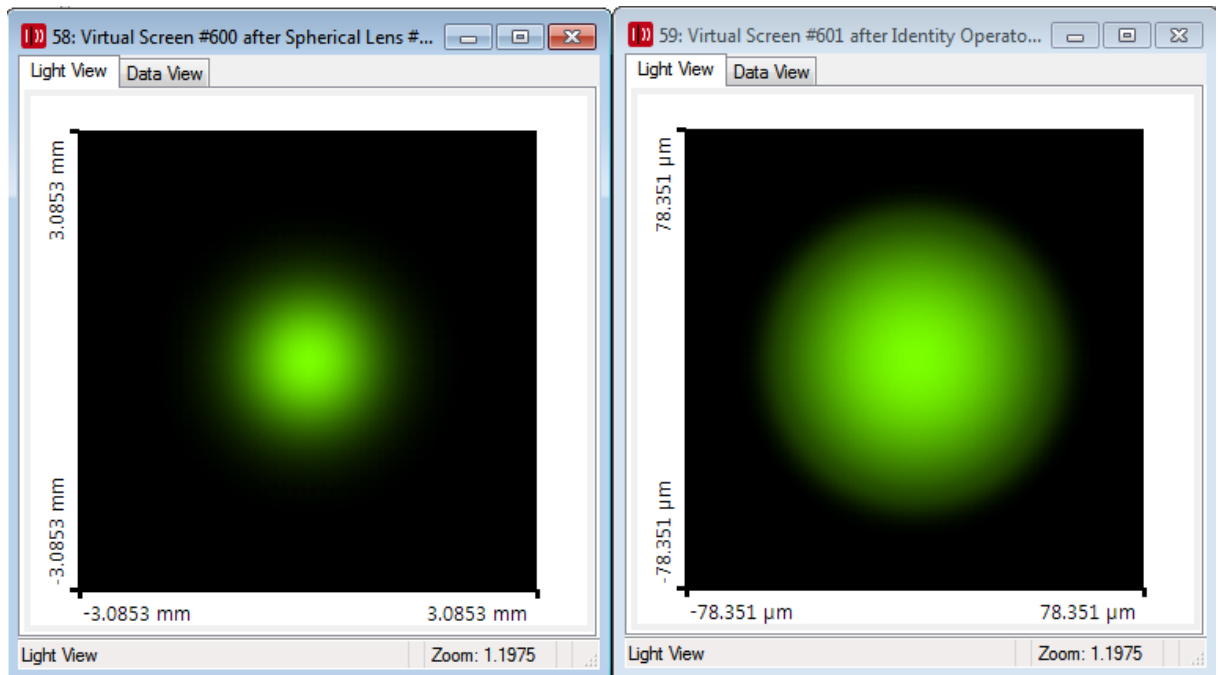
L: 14.4 mm



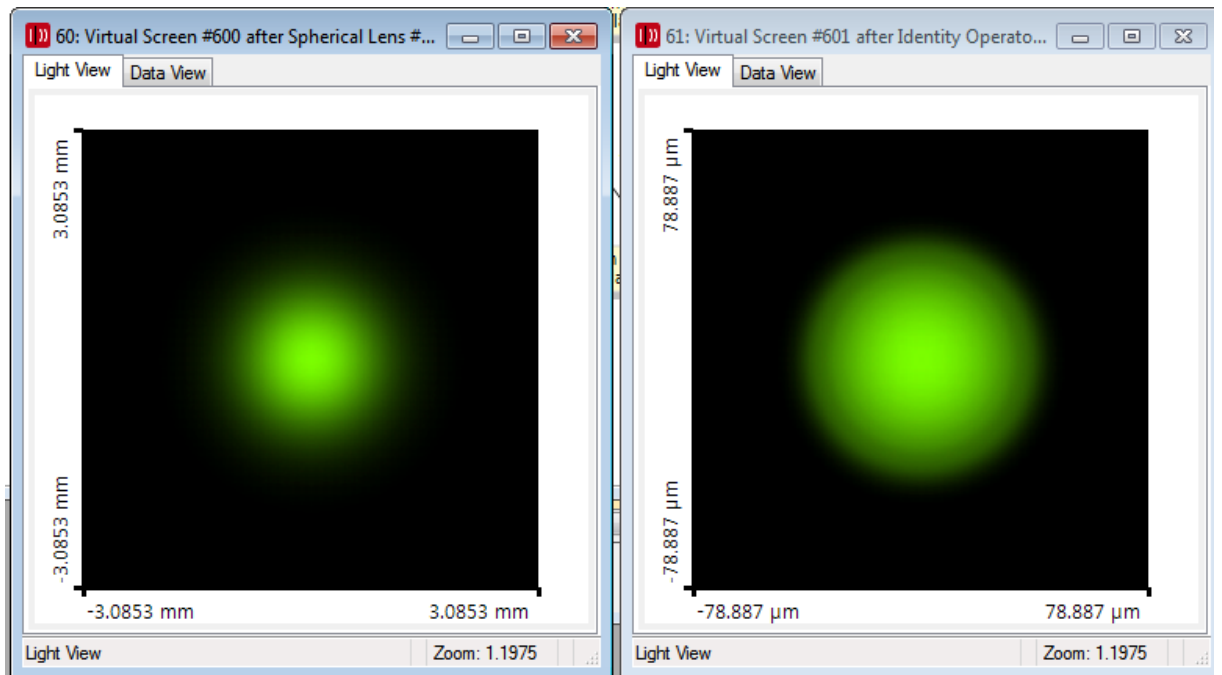
L: 14.5 mm



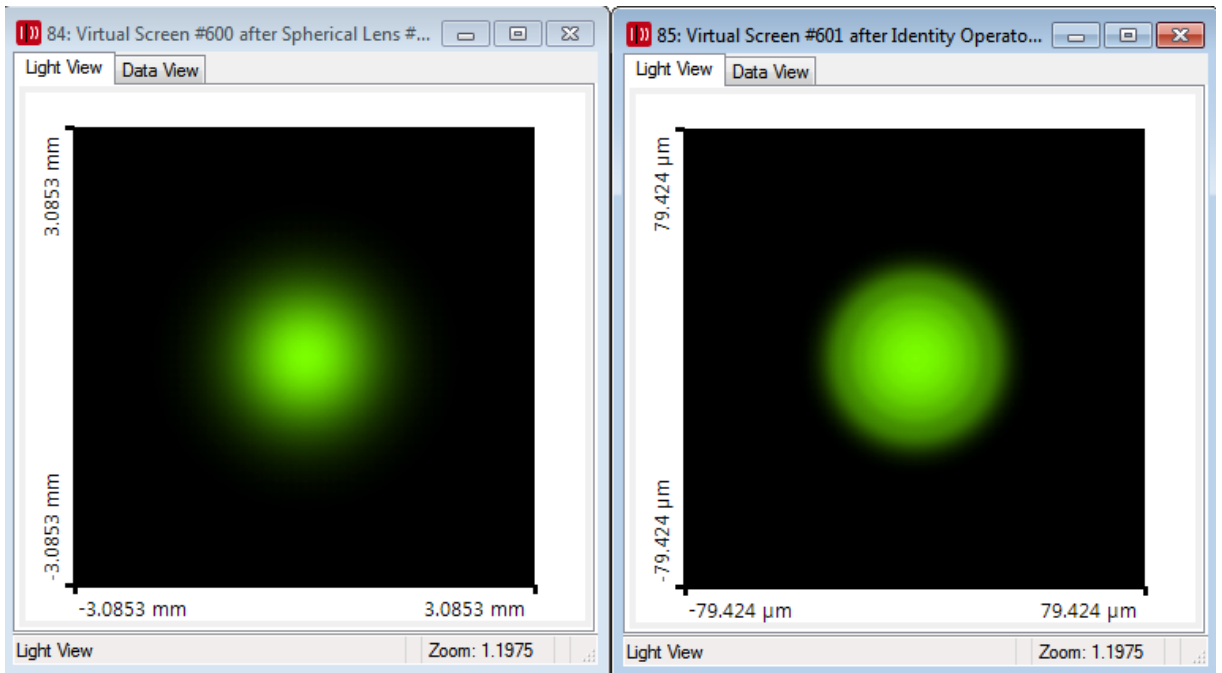
L: 14.6 mm



L: 14.7 mm

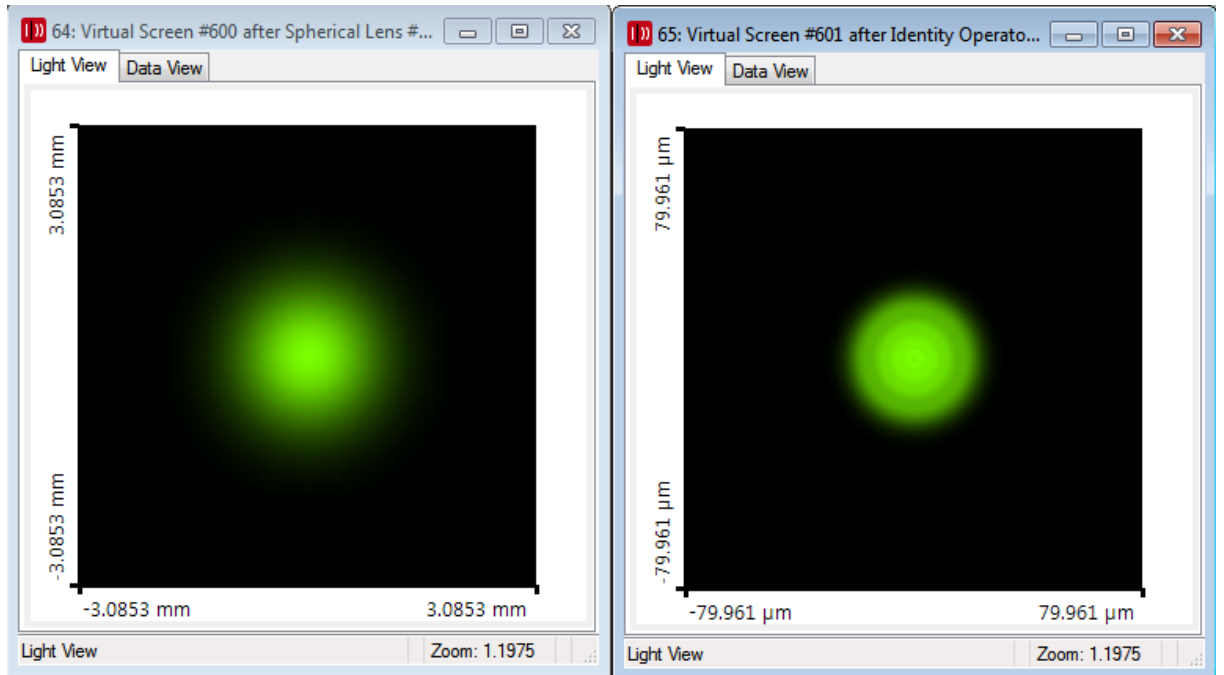


L: 14.8 mm

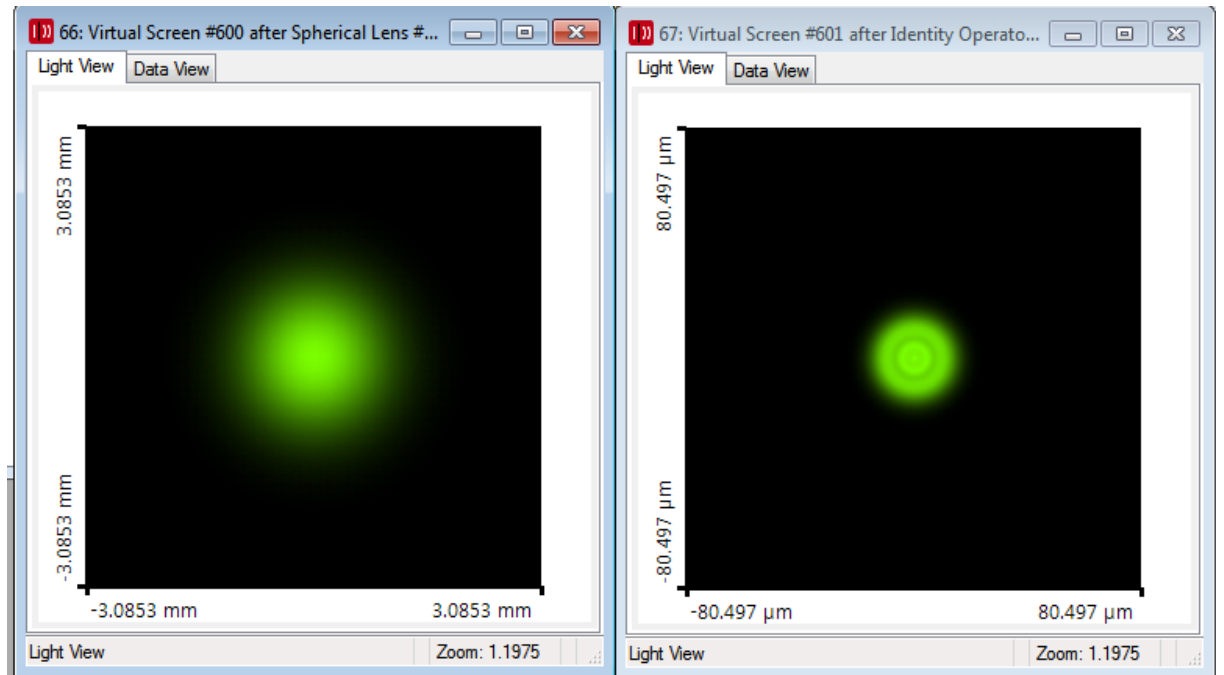




L: 14.9 mm

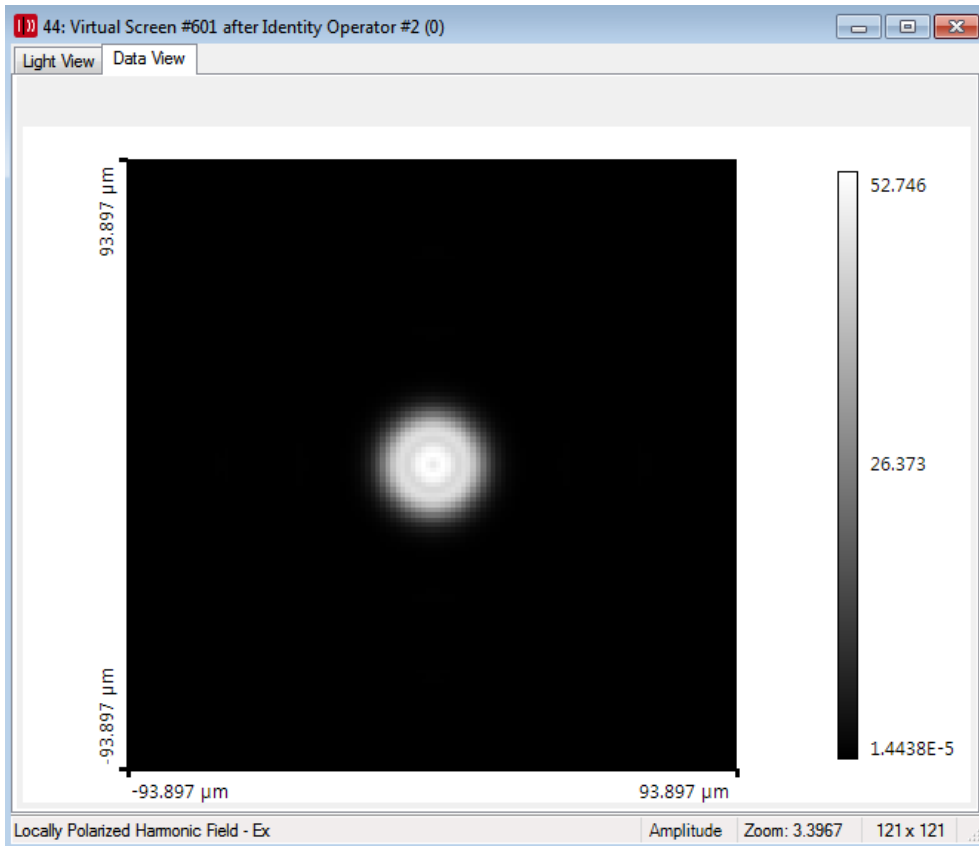


L: 15 mm

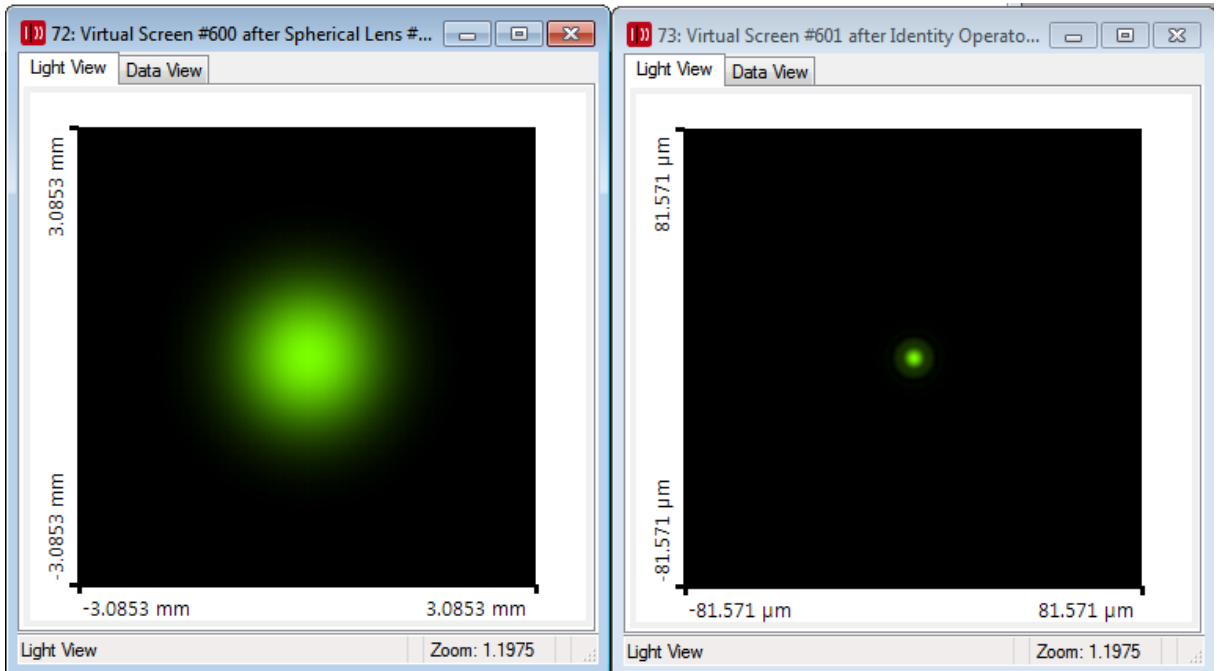




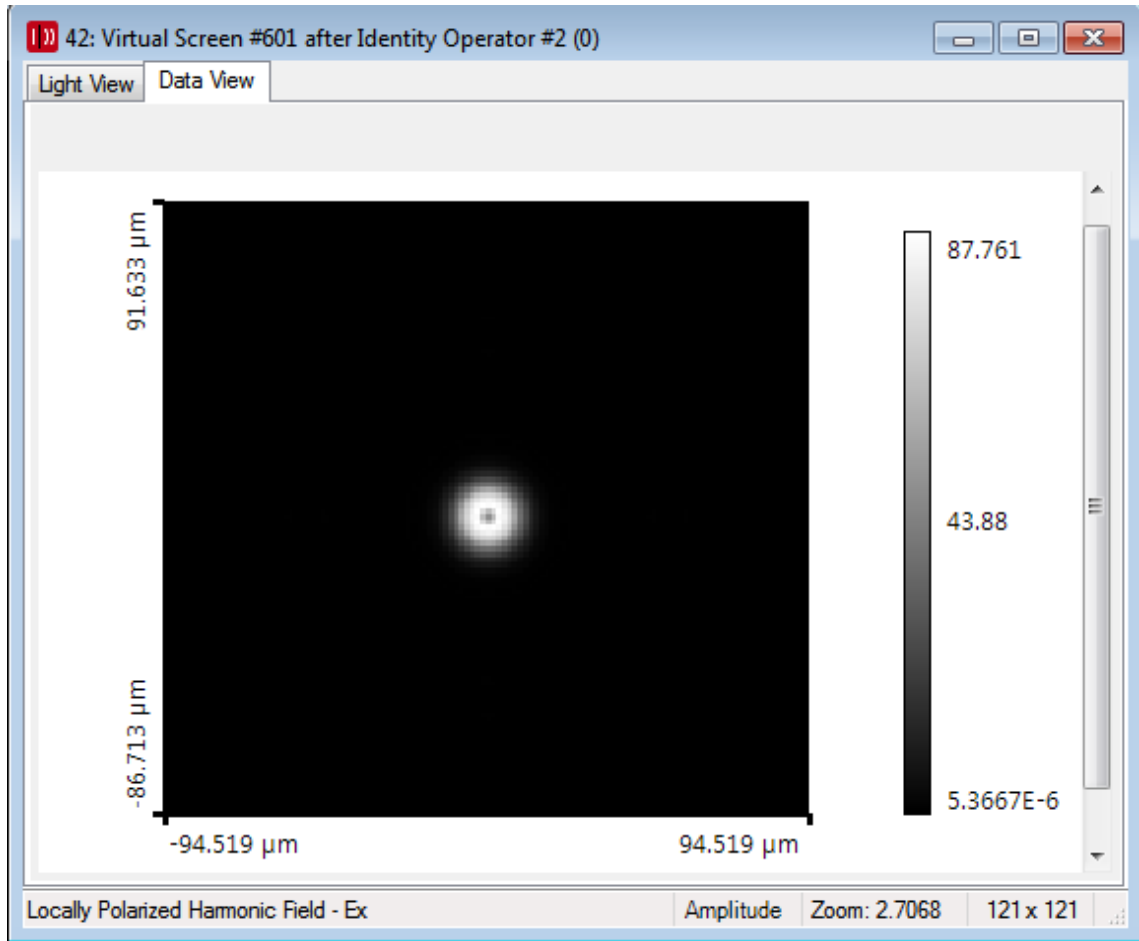
L: 15.1 mm TEM 11



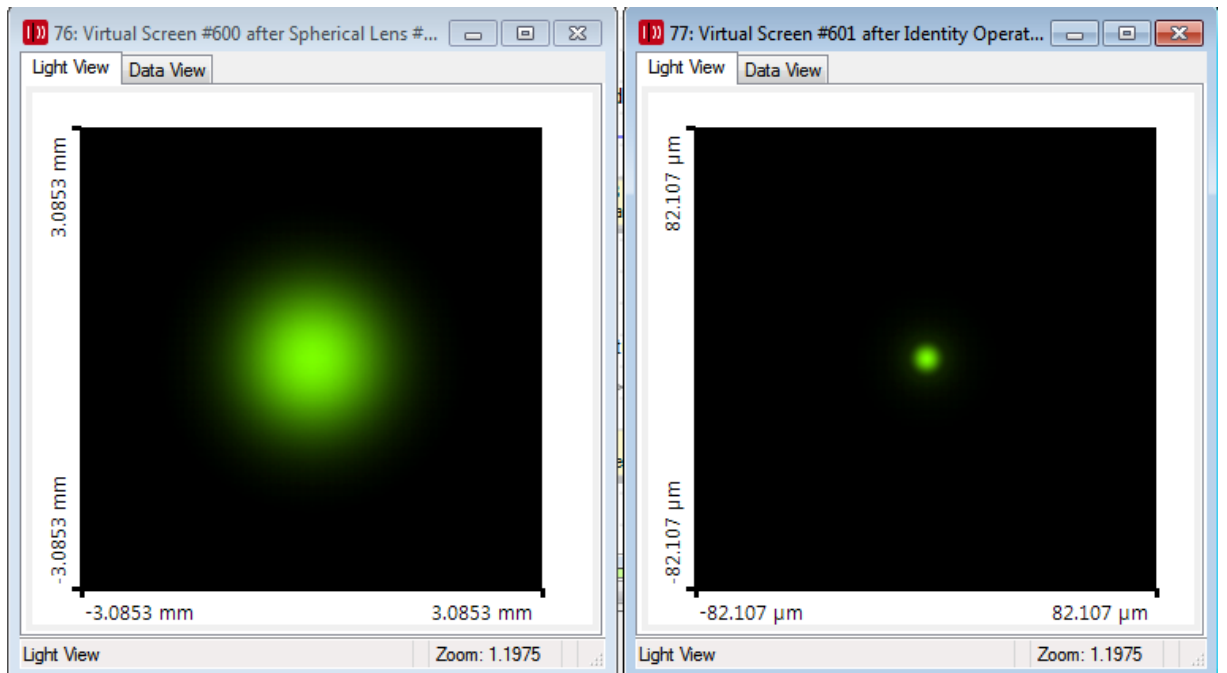
L: 15.2 mm



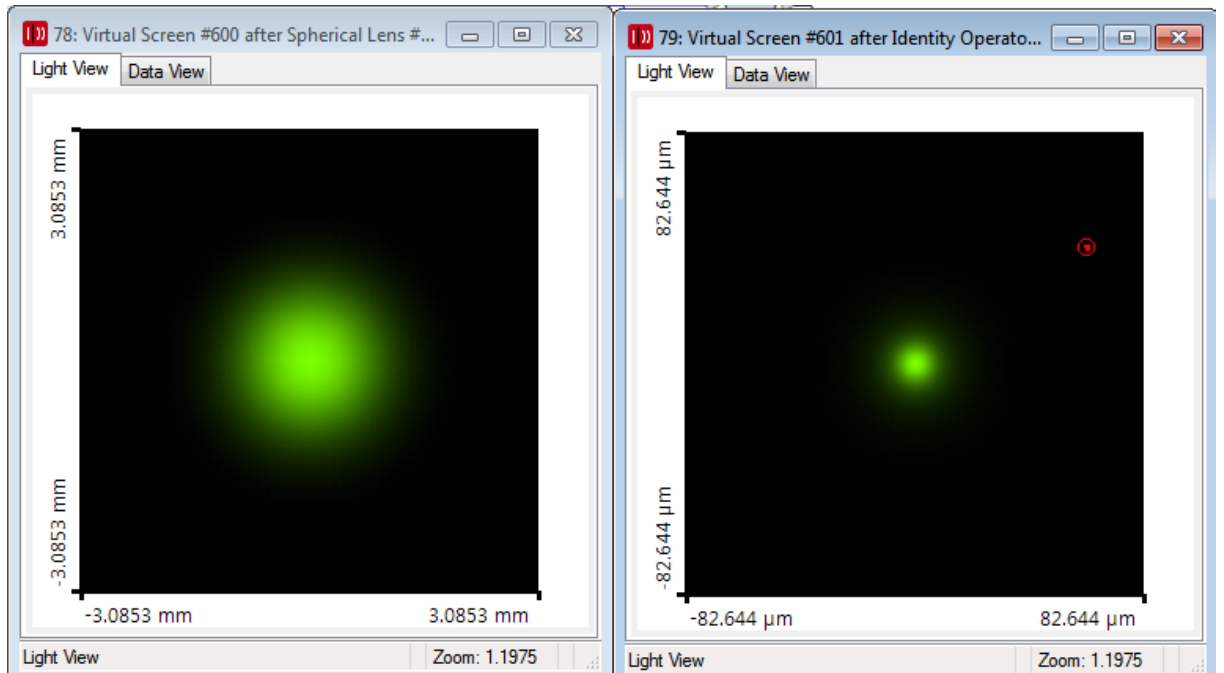
L: 15.2 mm TEM 10



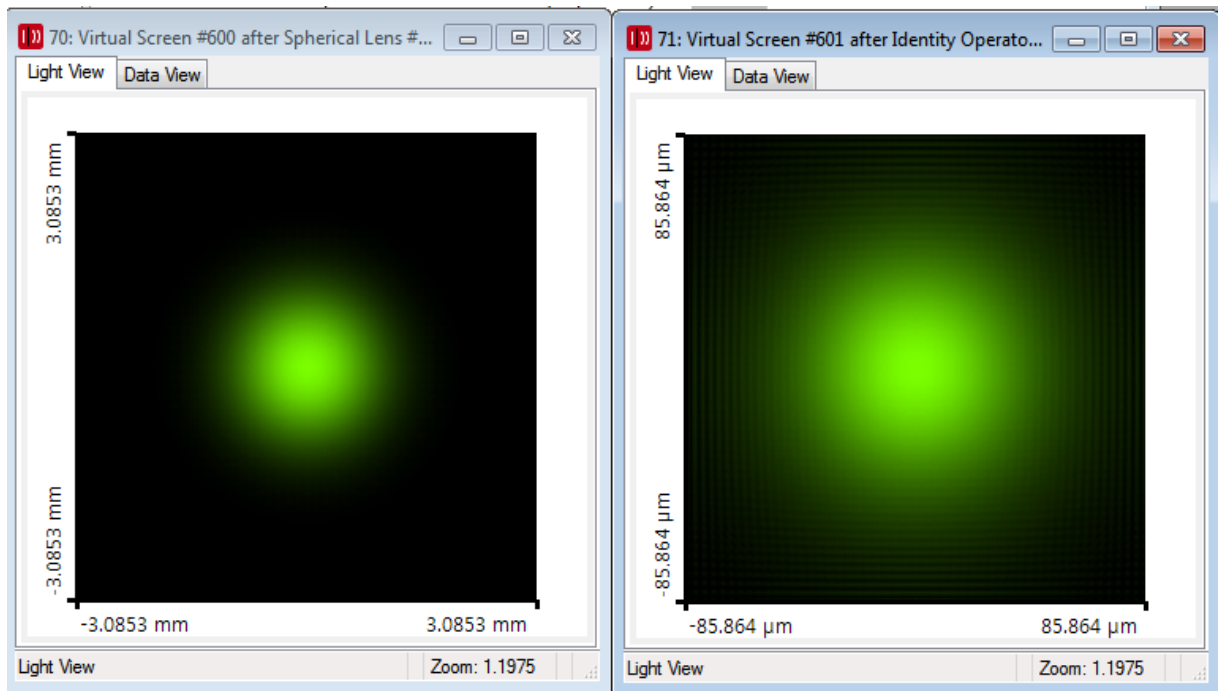
L: 15.3 mm



L: 15.4 mm

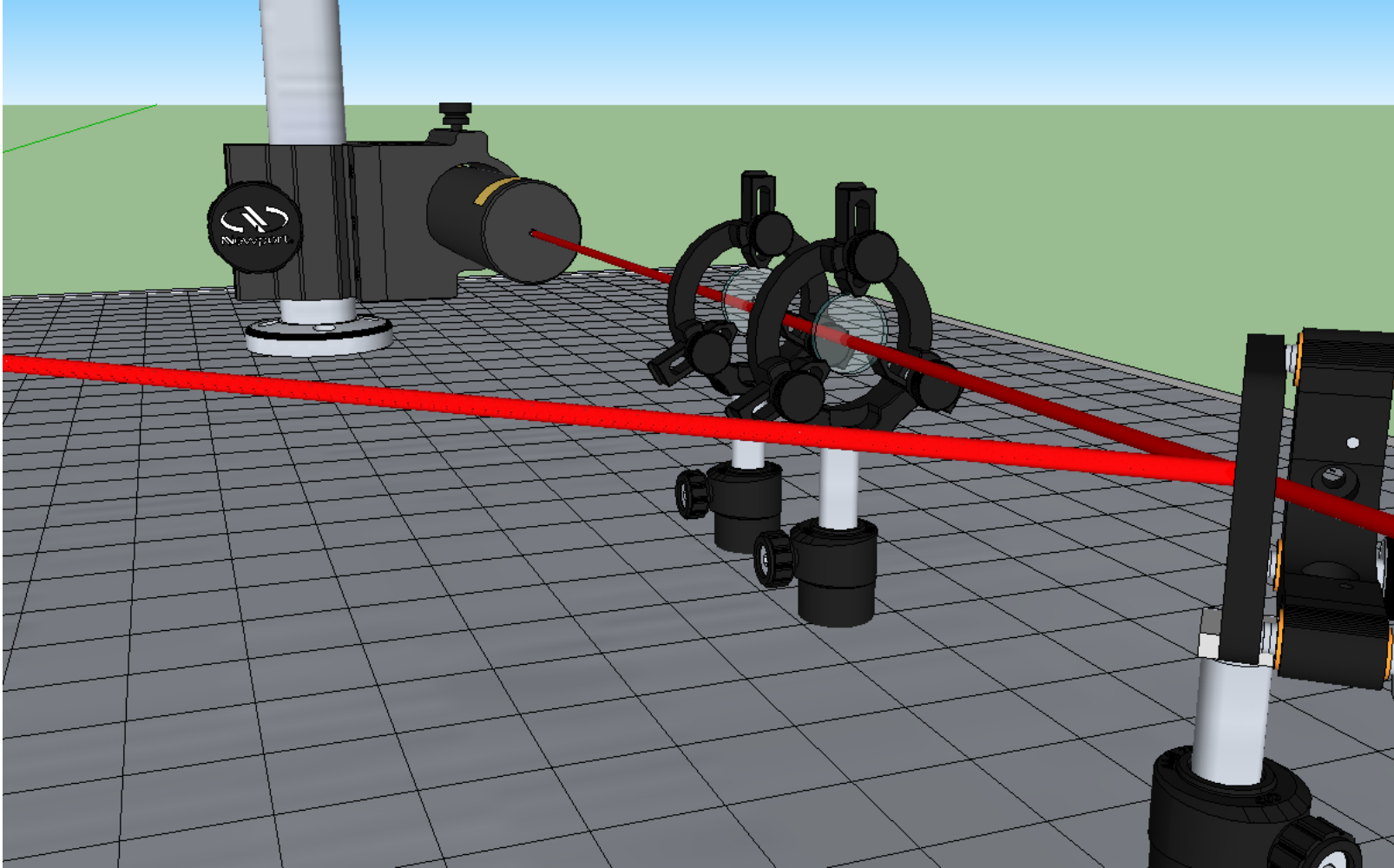


L: 16 mm

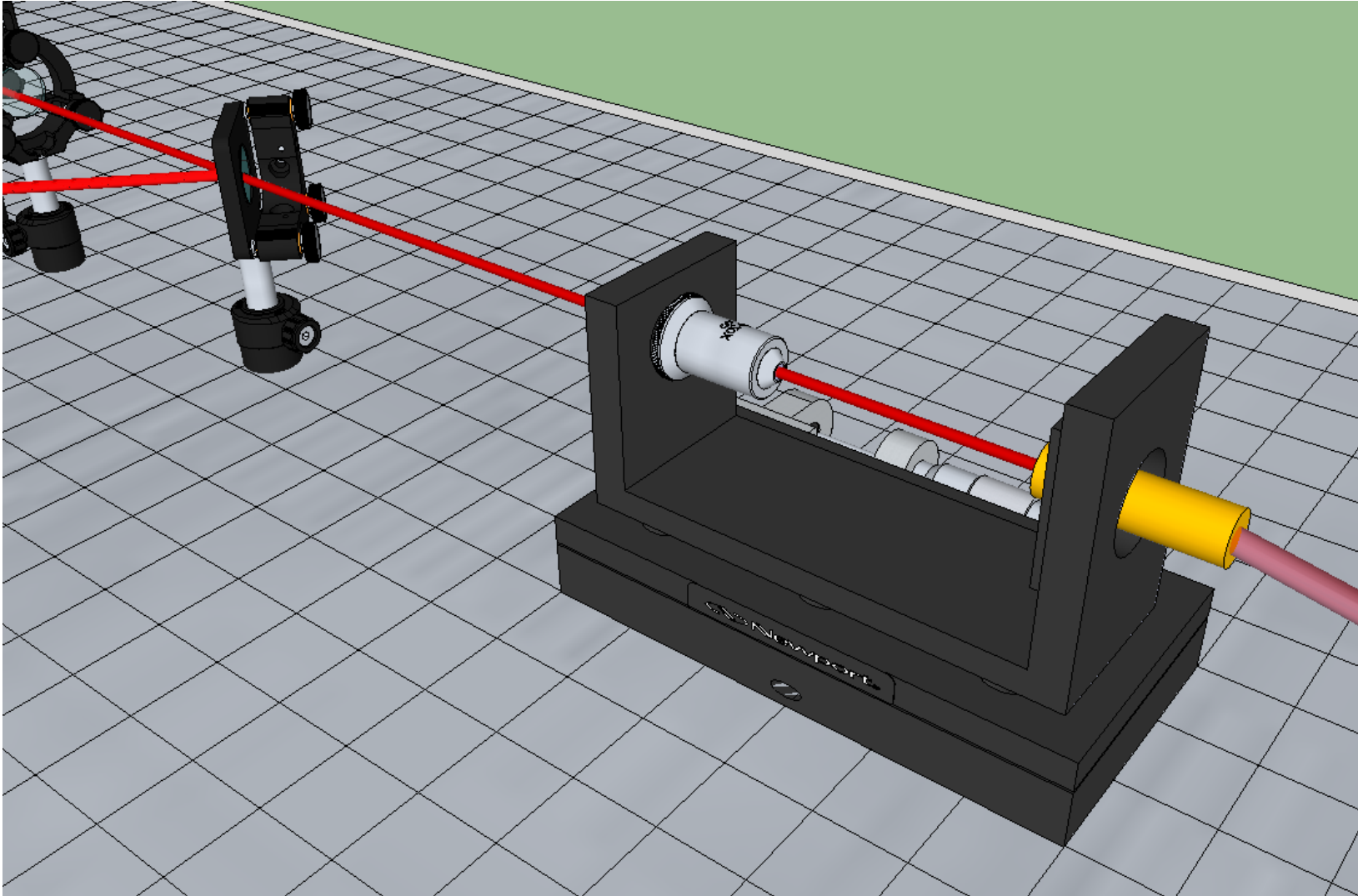


#### EK 4: Fiber odaklama üç boyutlu çizim

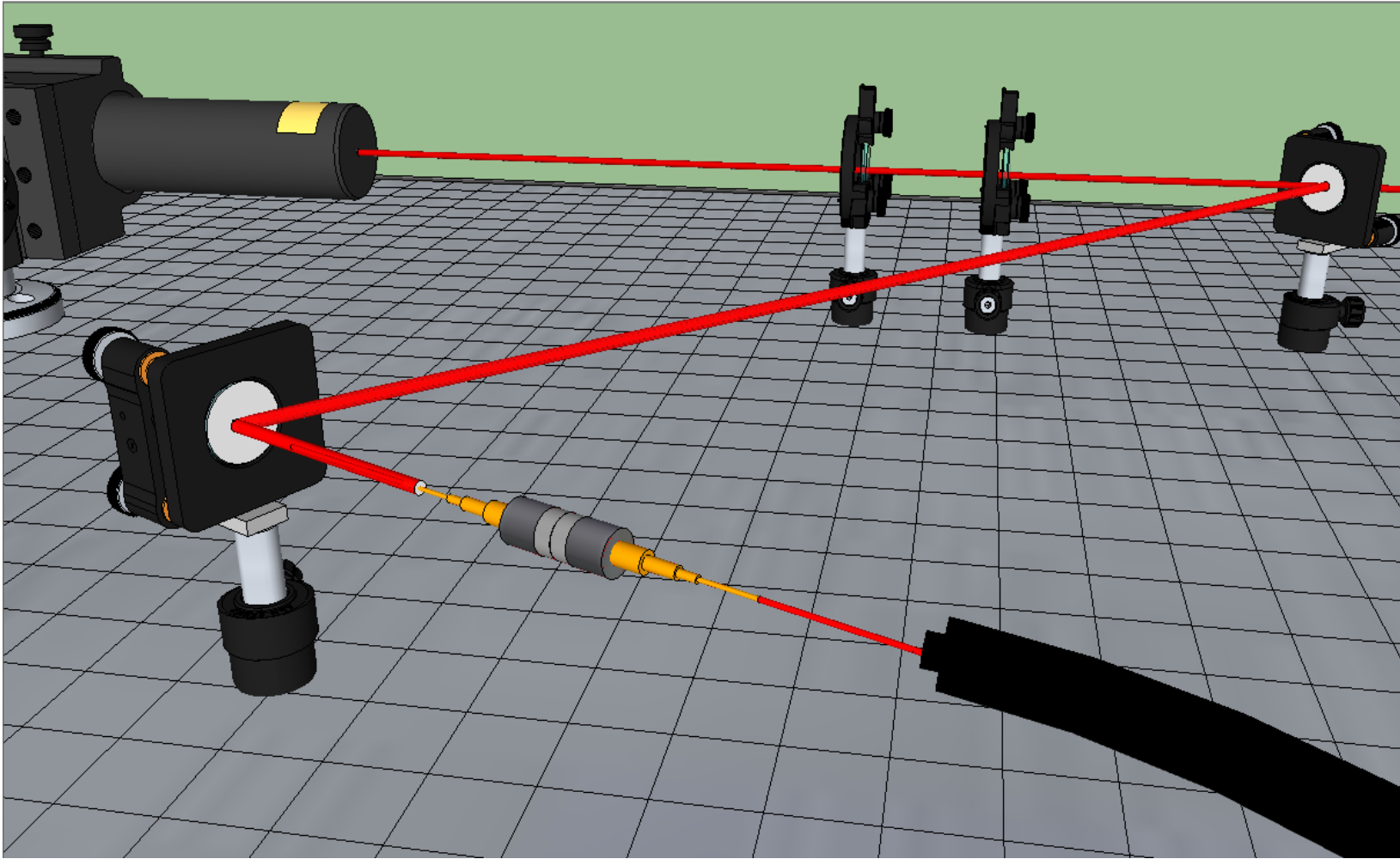
Lazer çıkışı ve ideal mercekler



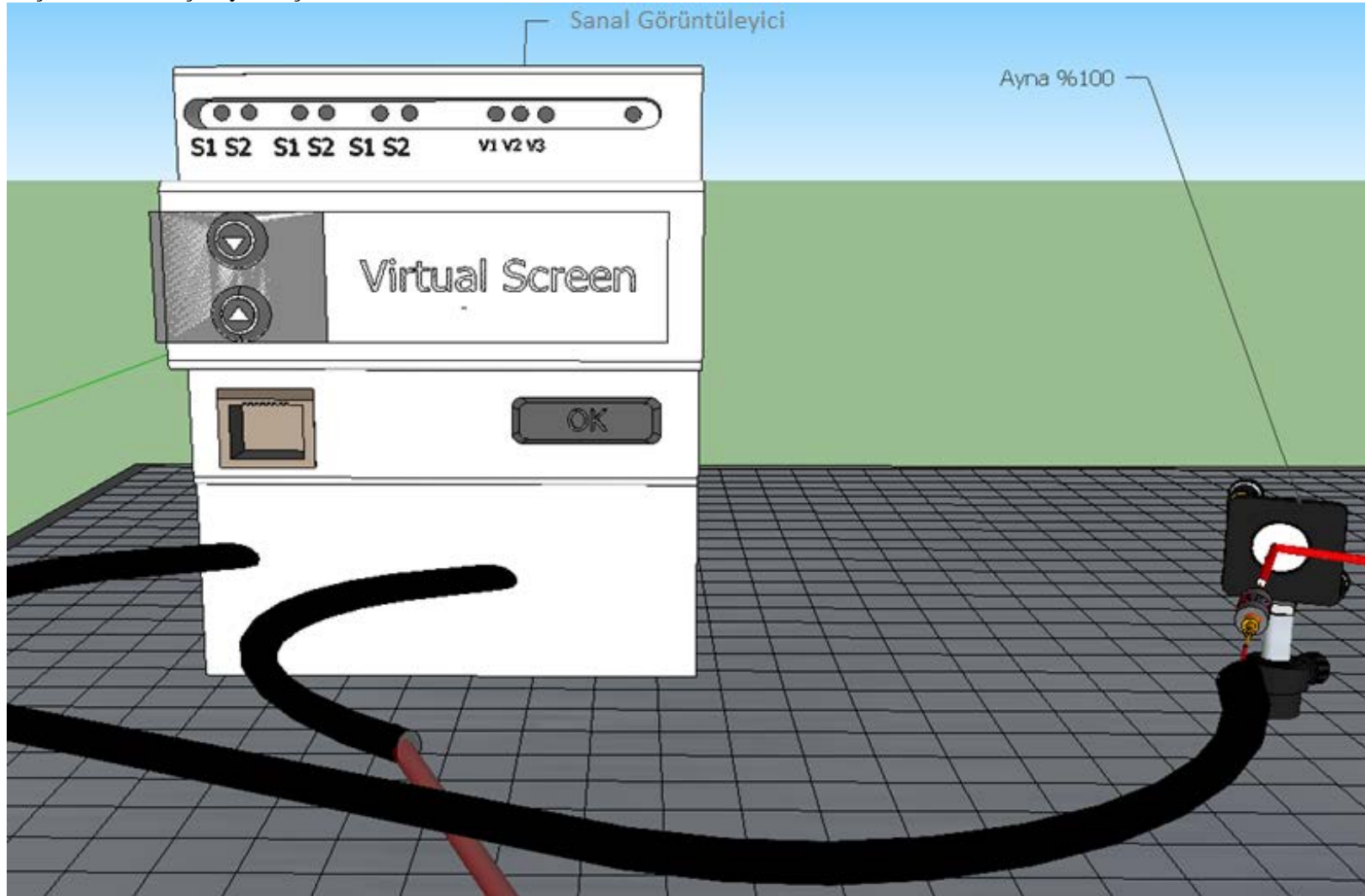
Fiber odaklayıcı üç boyutlu çizim



Fiber odaklama öncesi ışın ayrılması üç boyutlu çizim



Ölçüm sistemi üç boyutlu çizim



## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : PELİN SÜLE

Doğum Yeri ve Tarihi : ŞIRNAK- 03.01.1988

Yabancı Dili : İNGİLİZCE

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : ANITTTEPE ANADOLU LİSESİ – ANKARA  
2003-2004  
BALIKESİR ANADOLU LİSESİ – BALIKESİR  
2004-2006

Lisans : ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK MİMARLIK FAKÜLTESİ  
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ 2006-2010

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : SECOL ELEK. MÜH. TİC.  
Üretim Sorumlusu- 2010-2011

ERMAKSAN MAK. SAN. ve TİC. A.Ş  
Optik Lazer Sorumlusu- Ar-Ge 2012-...

İletişim (e-posta) : [pelinsule@gmail.com](mailto:pelinsule@gmail.com)