

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**OSİLATÖR SEL SİSTEMİNDE OPTİK KAVİTE YAPILARI VE  
LAZER KAZANÇ MEKANİZMALARI**

**Sezen TEKİN**

**FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ANKARA  
2008**

**Her hakkı saklıdır**

## ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

### OSİLATOR SEL SİSTEMİNDE OPTİK KAVİTE YAPILARI VE LAZER KAZANÇ MEKANİZMALARI

Sezen TEKİN

Ankara Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

Bu çalışmada osilatör modda serbest elektron lazeri (IR-SEL) üretimi için optik kavite sistemi ve kazanç mekanizması incelenmiştir.

İlk olarak serbest elektron lazeri (SEL) tanımlanmış ve SEL'in özellikleri, çeşitleri ve de fiziği ele alınmıştır. SEL'in çeşitleri olarak osilatör, yükselteç ve kendiliğinden genlik artımlı ışımaya (SASE, Self Amplified Spontaneous Emission) modlarının çalışma prensipleri incelenmiştir. Osilatör modda SEL' in yapısı araştırıldıktan, IR-SEL için optik kavite mekanizması incelenmiştir. Son olarak da serbest elektron lazeri için düşük kazanç yaklaşımından bahsedilmiştir.

Bu bilgilerden sonra dünyadaki önemli IR-SEL laboratuvarlarından ELBE, CLIO, JAERI, iFEL ve FELIX laboratuvarlarının temel parametreleri ile optik kavite parametreleri incelenmiştir. Ankara Üniversitesi koordinatörlüğünde yürütülen Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) konulu DPT-YUUP projesi kapsamında kurulumu planlanan kızılötesi serbest elektron lazeri (IR-SEL) laboratuvarı için optik kavite ve kazanç parametreleri belirlenmiştir.

**Temmuz 2008, 80 sayfa**

**Anahtar Kelimeler:** THM Projesi, Serbest Elektron Lazeri (SEL), Osilatör SEL, Optik Kavite, Rezonatör, Kazanç

## **ABSTRACT**

Master Thesis

### **INVESTIGATIONS ON OPTICAL CAVITIES AND GAIN MECHANISMS FOR OSCILLATOR FEL SYSTEM**

Sezen TEKİN

Ankara University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Ömer YAVAŞ

In this work, optical cavity and gain mechanism for oscillator free electron laser (IR FEL) were investigated.

At the beginning of this study, free electron laser (FEL) is explained then, mentioned about the FEL's physics and options. Oscillator FEL, Amplifier FEL and Self Amplified Spontaneous Emission (SASE) FEL are investigated with working principles. After that, some information was given about the structure of oscillator FEL and optical cavity. Finally, small gain mechanism for oscillator FEL was investigated.

After this information, optical cavity systems of ELBE, JAERI, iFEL, CLIO and FELIX IR-FEL laboratories were investigated. Optical cavity and gain parameters were obtained for TAC IR-FEL project that going on under coordination of Ankara University with the support of State Planning Organization of Turkey.

**July 2008, 80 pages**

**Key Words:** THM Project, Free electron laser, Oscillator FEL, Infrared, Optical cavity, Small Gain Parameters

## TEŞEKKÜR

Bu çalıőmam sırasında; araőtırmalarımın her aşamasında yaptığı öneriler ve hem bilimsel hem de kiőisel yardımları ile bana büyük destekte bulunan danıőmanım Sayın Hocam Prof.Dr. Ömer YAVAŞ'a, her türlü yardımı aldığım Yrd.Doç.Dr. Hatice Duran YILDIZ'a ve proje arkadaşlarım Özlem KARSLI, Avni AKSOY'a ve de eğitimim sırasında aldığım yüksek lisans bursu için TÜBİTAK'a; her zaman yanımda olup, desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

Bu alıőma “Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuarı (DPT2006K-120470)” konulu proje tarafından desteklenmiőtir.

Sezen Tekin

Ankara, Temmuz 2008

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR .....	iii
KISALTMALAR DİZİNİ .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KURAMSAL TEMELLER .....	2
2.1 Parçacık Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları.....	2
2.2 Lazer.....	4
2.2.1 Lazerin çalışma mekanizması ve özellikleri.....	4
2.2.2 Lazer türleri.....	9
2.2.3 Lazer ışının kullanıldığı yerler.....	18
2.3 Serbest Elektron Lazeri.....	19
2.3.1 SEL fiziği.....	20
2.3.2 Serbest elektron lazerinin dalgaboyu ve enerjisi.....	21
2.3.3 SEL'nin kalitesini belirleyen faktörler.....	22
2.3.4 Serbest elektron lazerinin özellikleri.....	23
2.3.5 Serbest elektron lazeri çeşitleri.....	23
2.4 Osilator Modda Serbest Elektron Lazeri.....	24
2.5 Optik Kavite.....	25
2.5.1Optik rezonatör çeşitleri.....	27
2.5.2Optik kavite tanımları.....	28
2.5.3Aynaların kaplanması.....	35
2.6 Düşük Kazanç Parametreleri .....	39
2.6.1 Düzlemsel (planar) bir salındırıcı.....	39
2.6.2 Helisel (helical) bir salındırıcı .....	40
2.6.3 Maksimum ideal kazanç.....	41
2.6.4 Kazanç düzeltme faktörleri .....	41
3. MATERYAL ve YÖNTEM .....	44

3.1 Materyal .....	44
3.2 Yöntem .....	44
4. BULGULAR.....	45
4.1 Dünyadaki IR SEL Laboratuvarları.....	45
4.1.1 ELBE laboratuvarı .....	45
4.1.2 CLIO laboratuvarı.....	47
4.1.3 FELIX laboratuvarı.....	49
4.1.4 IFEL laboratuvarı.....	52
4.1.5 JAERI laboratuvarı.....	54
4.2 THM IR SEL Projesi.....	56
4.2.1 THM IR-SEL için optik kavite parametrelerinin optimizasyonu.....	58
4.2.1.1 Rezonatör uzunluğu.....	58
4.2.1.2 Rayleigh uzunluğu.....	59
4.2.1.3 Işınmının minimum spot genişliği .....	59
4.2.1.4 $R_1$ ve $R_2$ ayna eğrilik yarıçapları.....	61
4.2.1.5 Rezonatör parametreleri.....	62
4.2.1.6 İki ayna üzerindeki demet spotlarının genişliği.....	62
4.2.1.7 Rayleigh uzunluğu.....	66
4.2.2 THM IR-SEL için kazanç, çıkış pik gücü, atma gücü ve enerjisi parametrelerinin optimizasyonu.....	69
5. TARTIŞMA ve SONUÇ .....	75
KAYNAKLAR.....	77
ÖZGEÇMİŞ.....	80

## KISALTMALAR DİZİNİ

IR	Kızılötesi
SASE	Genlik Artımlı Kendiliğinden Yayınım
SEL	Serbest Elektron Lazeri
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
THM IR-SEL	Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri
YUUP	Yaygınlaştırılmış Ulusal ve Uluslar Arası Proje

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Işının parlaklık değerlerinin ışınım nesillerine göre gelişimi.....	3
Şekil 2.2 Işınım formları.....	5
Şekil 2.3 Enerji düzeyleri ve geçişler.....	5
Şekil 2.4 İndüklenmiş soğurma, doğaçlama yayımlama ve indüklenmiş yayımlama ....	6
Şekil 2.5 Üç düzeyli lazerin oluşumu.....	7
Şekil 2.6 Lazerin çalışma prensibi.....	8
Şekil 2.7 Yakut lazerinin şematik gösterimi.....	9
Şekil 2.8 Yakut lazerinin çalışma prensibi.....	10
Şekil 2.9 He- Ne lazeri.....	12
Şekil 2.10 Dört düzeyli bir lazerin çalışma ilkesi.....	12
Şekil 2.11 Serbest Elektron Lazerinin ( SEL ) oluşumu.....	19
Şekil 2.12 Serbest elektron lazeri.....	20
Şekil 2.13 SASE SEL 'in oluşumu.....	24
Şekil 2.14 Osilatör SEL düzeneği.....	24
Şekil 2.15 Osilatör Modda SEL için Optik Kavite Yapısı .....	26
Şekil 2.16 Optik Kavite ve SEL oluşumu.....	26
Şekil 2.17 Optik kavite tipleri.....	27
Şekil 2.18 Optik Rezonatör.....	29
Şekil 2.19 Rayleigh Uzunluğu .....	30
Şekil 2.20 Demet Genişliği, $w_0$ bel genişliği .....	31
Şekil 2.21 Kararlılık diyagramı.....	33
Şekil 2.22 Kaplama örneği.....	37
Şekil 4.1 ELBE Binasının şematik olarak gösterimi.....	45
Şekil 4.2 Clio laboratuvarının şematik gösterimi.....	48
Şekil 4.3 FELIX FEL-1 ve FEL-2'nin şematik görünümü.....	49
Şekil 4.4 FELICE'nin şematik görünümü.....	50
Şekil 4.5 iFEL laboratuvarının şematik görünümü.....	54
Şekil 4.6 JAERI enerji recovery linak şematik gösterimi.....	55
Şekil 4.7 JAERI optik rezonatör şematik gösterimi.....	56
Şekil 4.8 THM IR-FEL'nin şematik planı.....	57

Şekil 4.9 THM IR –SEL U30 için dalga boyuna karşı minimum spot genişliği değişimi.....	60
Şekil 4.10 THM IR–SEL U90 için dalga boyuna karşı minimum spot genişliği değişimi.....	60
Şekil 4.11 (Confocal ) Eş Odaklı Rezonatör.....	61
Şekil 4.12 (Concentric ) Küresel Rezonatör.....	62
Şekil 4.13 THM IR–SEL U30 için dalga boyuna karşı birinci ayna spot genişliği değişimi.....	63
Şekil 4.14 THM IR–SEL U90 için dalga boyuna karşı birinci ayna spot genişliği değişimi.....	64
Şekil 4.15 THM IR–SEL U30 için dalga boyuna karşı ikinci ayna spot genişliği değişimi.....	65
Şekil 4.16 THM IR –SEL U90 için dalga boyuna karşı ikinci ayna spot genişliği değişimi.....	66
Şekil 4.17 U30 salındırıcısı için bazı dalga boylarında tek geçiş kazancı.....	69
Şekil 4.18 U90 salındırıcısı için bazı dalgaboylarında tek geçiş kazancı.....	69
Şekil 4.19 U30 salındırıcısı için kazanç grafiği.....	71
Şekil 4.20 U90 salındırıcısı için kazanç grafiği.....	71
Şekil 4.21 U30 salındırıcısı için çıkış pik gücü grafiği.....	72
Şekil 4.22 U90 salındırıcısı için çıkış pik gücü grafiği.....	72
Şekil 4.23 U30 salındırıcısı için atma gücü grafiği.....	73
Şekil 4.24 U90 salındırıcısı için atma gücü grafiği.....	73
Şekil 4.25 U30 salındırıcısı için atma enerjisi grafiği.....	74
Şekil 4.26 U90 salındırıcısı için atma enerjisi grafiği.....	74

## ÇİZELGE DİZİNİ

Çizelge 2.1 Kimyasal lazerler.....	14
Çizelge 2.2 Metal buharı lazer.....	14
Çizelge 2.3 Gaz lazerler.....	15
Çizelge 2.4 Yarıiletken lazerler.....	16
Çizelge 2.5 Boyarmaddeli lazerler.....	16
Çizelge 2.6 Diğer lazer çeşitleri.....	17
Çizelge 2.7 Kızılötesi SEL ve Kızılötesi Geleneksel Lazer Farkı.....	17
Çizelge 2.8 Kaplama çeşitleri ve özellikleri.....	38
Çizelge 4.1 ELBE elektron demeti, undulator ve lazer parametreleri.....	46
Çizelge 4.2 ELBE optik kavite parametreleri.....	46
Çizelge 4.3 CLIO demet karakteristikleri.....	48
Çizelge 4.4 CLIO optik kavite parametreleri.....	48
Çizelge 4.5 iFEL kaynakve paketleyici parametreleri.....	52
Çizelge 4.6 iFEL temel parametreleri.....	53
Çizelge 4.7 JAERI optik kavite parametreleri.....	55
Çizelge 4.8 THM IR-FEL elektron demet parametreleri.....	57
Çizelge 4.9 THM IR-FEL salındırıcı ve lazer parametreleri.....	58
Çizelge 4.10 THM IR-FEL için optik kavitenin ana parametreleri .....	67
Çizelge 4.11 ELBE -FEL için optik kavitenin ana parametreleri .....	68

## 1. GİRİŞ

2006 yılı başında Devlet Planlama Teşkilatı (DPT) tarafından kabul edilen ve Ankara Üniversitesince koordine edilen Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) konulu YUUP projesinde merkezin ilk aşamasını oluşturacak olan Serbest Elektron Lazeri (osilatör SEL) laboratuvarı kurulması ülkemizde hızlandırıcı teknolojilerinin Ar-Ge amacıyla kullanılmasının ilk adımını oluşturacaktır. Kurulacak SEL laboratuvarında 15-40 MeV enerji aralığındaki bir lineer elektron hızlandırıcısı (linak) ile 2-185 mikrometre dalga boyu aralığında kızılötesi serbest elektron lazeri elde edilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla, son bir yılda yoğunlaşan çabalar sonucu elde edilecek IR-SEL için kullanılacak optik kavitelerin yapısı ile IR SEL'in ana parametreleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Uygun karakteristikte elektron demeti elde edilmesini sağlayan bir hızlandırıcı, elektronları hızlandırıcıdan salındırıcı magnete kadar taşıyan bir demet hattı, boyuna elektron hareketini enine harekete çevirerek elektronlara eşlik eden enine elektrik alan genliğinin yükseltilmesine neden olan bir salındırıcı magnet ve klasik lazerlerle aynı görevi yapan bir optik kavite SEL'in temel kısımlarını oluşturmaktadır. Elde edilecek olan SEL'in dalga boyunun geniş bir aralığı kapsaması sebebiyle iki farklı optik kavite ve salındırıcı kullanılması planlanmıştır.

Bu tez çalışmasında osilatör modda Serbest Elektron Lazeri (SEL) üretimi ve optik kavite sistemi ele alındı, TAC IR-SEL laboratuvarı için optik kavite parametrenin optimizasyonu yapıldı, kazanç mekanizması incelendi ve yapılan optimizasyon sonucu elde edilen parametreler dünyadaki benzer laboratuvarlarla karşılaştırılarak sonuçlar tartışıldı.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1 Parçacık Hızlandırıcılara Dayalı Işınım Kaynakları

Hızlandırıcılar aracılığı ile elde edilen ışınımınlar genel olarak hafif parçacıkların rölativistik enerjilerle dairesel yörünge hareketi esnasında yapılan elektromagnetik ışımalara dayanır. Bu ışınımınlar demet yörüngesi üzerine yerleştirilen eğici (bending) magnetler, düz kısımlara yerleştirilen salındırıcı (undulator) veya zigzaglayıcı (wiggler) magnetler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir.

Işınımınlar günümüze kadar dayandıkları teknoloji ve fiziksel amaç ve parametreleri açısından 4 nesil de anılmışlardır;

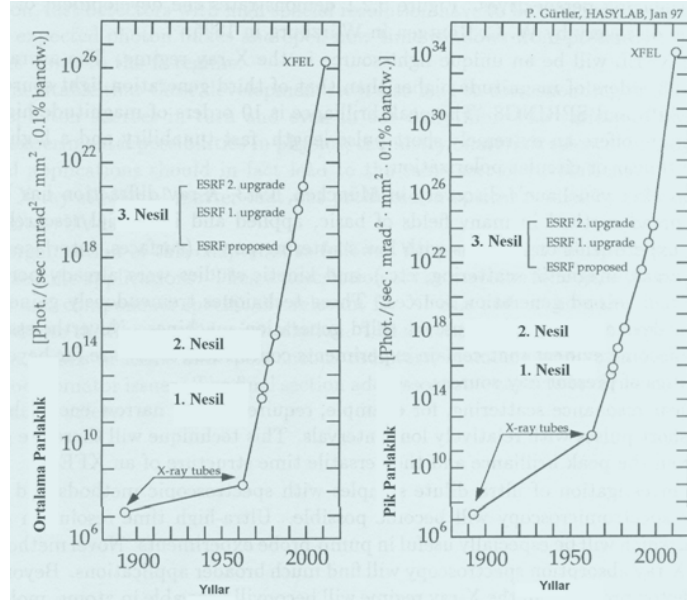
1. nesil ışınım kaynakları: Genel anlamda yüksek enerji fiziği deneyleri için kurulan halka şeklindeki hafif parçacık (lepton) çarpıştırıcılarının parazitik ışımalarını içerir. DESY (Deutsches Elektronen Synchrotron, Alman Elektron Sinkrotronu) hızlandırıcı merkezinde bulunan ve görevi çarpışma bölgesine demet sağlamak olan, depolama halkası DORIS ve PETRA ([www.desy.de](http://www.desy.de)); KEK (Japonya) bünyesindeki PEP ve TRISTAN ([www.kek.jp](http://www.kek.jp)) elektron – pozitron çarpıştırıcılarından elde edilen ışınımınlar bu nesil için örnek gösterilebilir.

2. nesil ışınım kaynakları: İlk Tokyo’da 1974’ te işleme alınan 380 MeV lik SOR ringi olan, ışınım için sadece bending magnetleri kullanan ve birden fazla demet hattına sahip olacak şekilde inşa edilmiş sinkrotronlardır 0.8 GeV’lik BESSY I (Berlin), 2 GeV’lik SRS, (Daresbury).

3. nesil ışınım kaynakları: Düşük yayınımlı (emittanslı) elektron demetlerine, salındırıcı (undulator) veya zigzaglayıcı magnetlerin yerleştirileceği düz kısımlara sahip ve iki kategoride anılan halka şekilli ışınım kaynaklarıdır (Yavaş 2001).3. nesil 1. kategori: 100-200 m çevreli 1-2 GeV’lik dairesel hızlandırıcıları ve 2 keV’den düşük spektral bölgeyi

kapsar (VUV ve yumuşak x-ışını). Örneğin 1.5-2 GeV'lik BESSY II (Berlin) ve 1.5-2 GeV'lik ELETTRA (Trieste) 3. nesil 1. kategoriye giren ışınım kaynaklarıdır. 3. nesil 2. kategori : 800-1500 m çevreli 6-8 GeV'lik dairesel hızlandırıcıları ve 2 keV'in üzerinde spectral bölgeyi (sert x-ışını bölgesi) kapsarlar. Örneğin, Avrupa Sinkrotron Işınımı Laboratuvarı (ESRF, Grenoble, Fransa) 6 GeV lik enerjisi ile bu kategoriye iyi bir örnektir (Yavaş 2001).

4. nesil ışınım kaynakları: Doksanlı yıllarda hayata geçirilen doğrusal veya dairesel hızlandırıcılarda çok düşük yayınımlı, yüksek pik akım değerli (ps mertebesinde paketçik (bunch) uzunluğu, nC mertebesinde paketçik yükü) elektron demetleri ve gelişmiş undulatör magnetler kullanılarak elde edilen ve dalga boyları nm-Angström mertesinde, yüksek akı, parlaklık ve güç değerlerine sahip ışınımlardır. Bu ışınımlar monokromatik ve koherent olmalarından dolayı Serbest Elektron Lazeri (SEL) olarak bilinmektedirler.



Şekil 2.1 Işınımın parlaklık değerlerinin ışınım nesillerine göre gelişimi (Yavaş 2001)

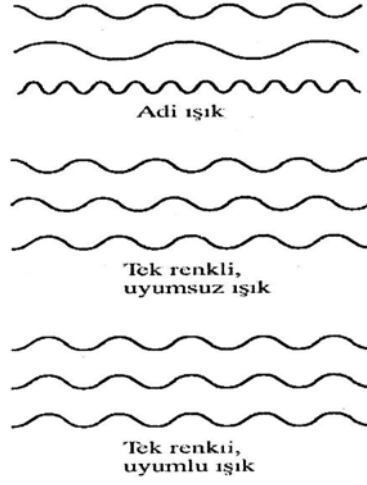
## 2.2 Lazer

### 2.2.1 Lazerin çalışma mekanizması ve özellikleri

1950'lilerin başlarında birçok bilim adamının çabası ile MAZER denilen önemli bir aygıt yapıldı. Bunların arasında en ünlüleri 1964'de, Fizik Nobel ödülünü paylaşan A.B.D'den C.Htowness ile S.S.C.B den A.M.Prokhorov ve N.G.Basv idi. MAZER, (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) uyarmalı ışınım yayınlanmasıyla mikrodalga yükseltilmesi anlamına gelir ve son derece alçak gürültülü mikrodalga yükselteci demektir. MAZER'in kullanılmaya başlanmasında hemen sonra aynı tekniğin optik bölgede uygulanıp uygulanamayacağı konusu tartışılmaya başlandı. 1958'de Townes ve A.L Schawlow, uyarmalı ışınım yayınlanmasıyla ışık yükseltilmesi (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) elde edebilmek için gereken genel fiziksel koşulları isabetli olarak öne sürdüler. Bundan sonra 1960 da T.H.Maiman bir optik mazer, ya da lazer in ilk başarılı işleyişini duyurdu (Beiser 1997).

Lazerin en önemli fiziksel özellikleri:

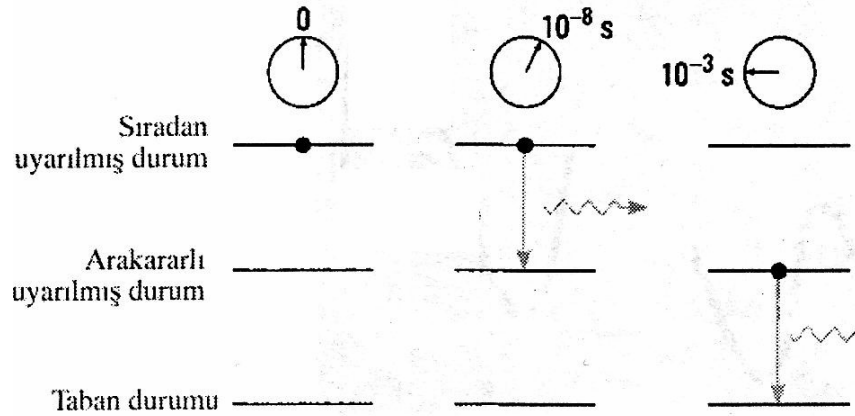
- Işığın eş fazlıdır, bütün dalgalar birbiriyle tam uyumludur.
- Işık hemen hemen tek renklidir.
- Bir lazer hüzmesinde ıraksama hemen hemen hiç yoktur. Dünyadan, Apollo 11 seferinde ayda bırakılan bir aynaya gönderilen böyle bir hüzme, bir milyon kilometrenin dörtte üçünden fazla toplam yol gittikten sonra, yeterince odaklı olarak dünyaya dönmüştür.
- Lazer ışığının şiddeti, geleneksel ışık kaynaklarına göre  $10^{3-5}$  kat daha büyüktür.



Şekil 2.2 Işınım formları (Beiser 1997)

Bir lazer, dalgalarının tümü aynı frekansa sahip (tek renkli) ve birbiri ile aynı fazda (uyumlu) bir ışık huzmesi oluşturur. Işık aynı zamanda iyi toplandığından uzun mesafeler boyunca bile yaygınlaşması çok az olur.

Lazerin sırrı, pek çok atomda, ömürleri olağan  $10^{-8}$  s yerine  $10^{-3}$  s veya daha uzun olan uyarılmış bir veya daha fazla enerji düzeyinin bulunmasıdır. Böyle, bağlı olarak uzun ömürlü durumlar ara kararlı (geçici olarak kararlı) diye nitelendirilir.



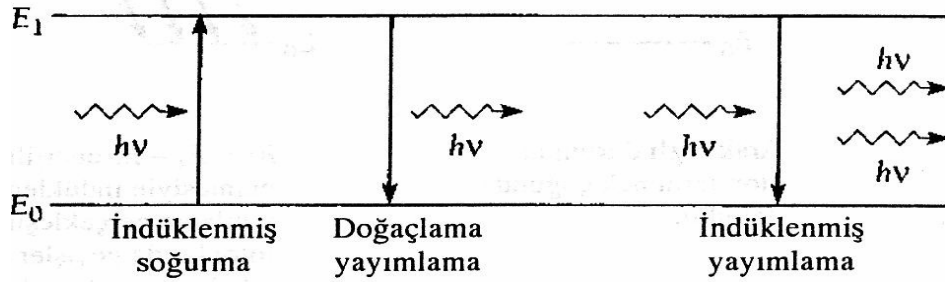
Şekil 2.3 Enerji düzeyleri ve geçişler (Beiser 1997)

Bir atomdaki iki enerji ( $E_0$  ve  $E_1$ ) arasında elektromanyetik ışınlarla ilgili üç çeşit geçiş mümkündür. Atom başlangıçta, daha düşük durum olan  $E_0$  da ise, enerjisi  $hf = E_1 - E_0$  olan bir foton soğurarak,  $E_1$  e çıkarılabilir. Bu süreç indüklenmiş soğurulma diye adlandırılır. Eğer atom başlangıçta daha yüksekteki  $E_1$  durumunda ise, enerjisi  $hf$  olan bir foton salarak  $E_0$  a düşebilir. Bu, doğaçlama yayımlama'dır.

1917'de Einstein ilk kez, bir üçüncü olasılık olarak, enerjisi  $hf$  olan bir fotonun  $E_1$  den  $E_0$  a geçişe neden olduğu, indüklenmiş yayımlanmaya işaret etti. İndüklenmiş yayımlanmada, yayılan ışık dalgaları gelenlerle tam olarak aynı fazda olduğundan, sonuç şiddetlenmiş bir uyumlu ışık hüzmesidir. Einstein indüklenmiş yayımlanmanın indüklenmiş soğurulma ile aynı olasılığa sahip olduğunu gösterdi. Yani,  $hf$  enerjili bir fotonun; daha yüksekteki durumundaki  $E_1$  durumundaki bir atom üzerine düştüğünde, enerjisi  $hf$  olan bir diğer fotonun yayımlanmasına sebep olma olasılığı ile daha düşük durumundaki bir atom üzerine düştüğündeki soğurulma olasılığı aynıdır (Beiser 1997).

(İndüklenmiş yayımlanma / doğaçlama yayımlanma) İki yoldan hangisiyle olursa olsun, atom tarafından yayımlanan fotonun enerjisi

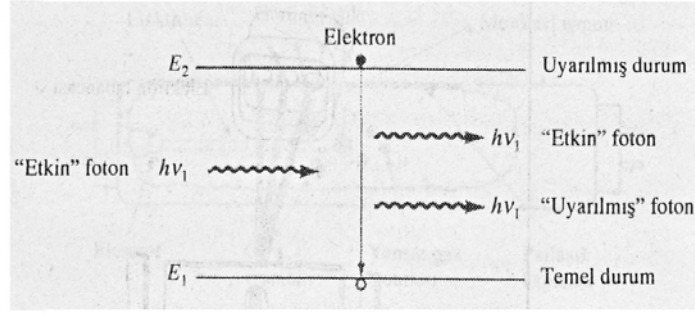
$$hf = E_1 - E_0 \quad (2.1)$$



Şekil 2.4 İndüklenmiş soğurma, doğaçlama yayımlama ve indüklenmiş yayımlama

(Beiser 1997)

Bir atomun iki enerji düzeyi arasındaki geçişler, indüklenmiş soğurma, doğaçlama yayımlama ve indüklenmiş yayımlama yoluyla olabilir.

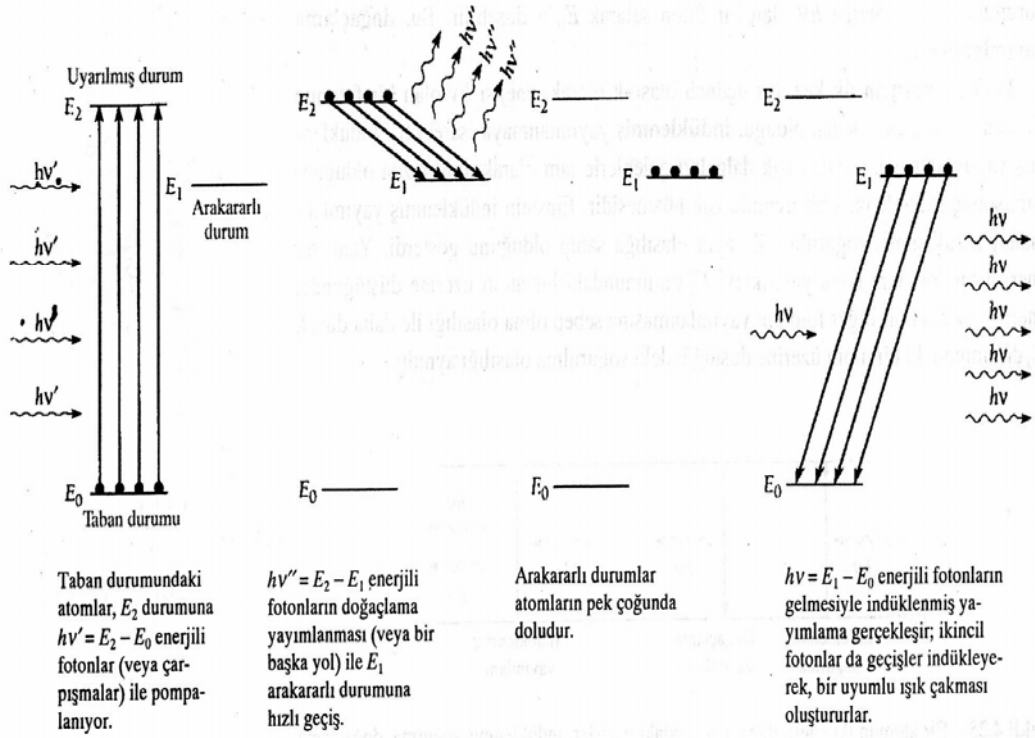


Şekil 2.5 Üç düzeyli lazerin oluşumu (Beiser 1997)

En basit tür üç düzeyli lazerdir. Bu, enerjisi taban durumun  $hf$  kadar üstünde olan bir ara kararlı durumla bu ara kararlı duruma bozunan daha yüksek bir uyarılmış durumu bulunan bir atomlar topluluğunu kullanır. İstedığımız, ara kararlı durumda, taban durumundan daha çok atomun bulunmasıdır. Bunu ayarlayabilirsek ve topluluğun üzerine frekansı  $f$  olan ışık gönderirsek, ara kararlı durumdaki atomlardan yapılan indüklenmiş yayımlama, taban durumdaki atomların yaptığı indüklenmiş soğurulmadan daha fazla olacaktır. Sonuç başlangıçtaki ışığın şiddetlenmesidir. Lazerin çalışmasının arkasındaki temel ilke budur.

Tersine birikim terimi, çoğunluğun taban durumun üstündeki enerji düzeylerinde olduğu bir atomlar topluluğunu anlatır; normalde ise taban durum en büyük oranda doludur. Bir tersine birikim yaratmanın değişik yolları vardır. Optik besleme (pompalama) bunlardan biridir. Fotonları, taban durum atomlarını, istenen ara kararlı duruma kendiliğinden bozunan bir uyarılmış duruma çıkarmak için doğru frekansa sahip olan bir dış kaynağı kullanılmaktadır. Neden üç düzeye gerek vardır? Sadece iki durumun, taban durumu ve bunun  $hf$  kadar üstünde bir ara kararlı durumun bulunduğunu varsayalım. Atomlar topluluğuna frekansı  $f$  olan fotonlardan ne kadar çok sayıda beslersek, taban durumundan ara kararlı duruma o kadar çok yukarıya doğru geçiş olacaktır. Fakat besleme aynı

zamanda ara kararlı durumdan aşağıya, taban durumuna doğru geçişleri de indükleyecektir. Her bir durumda atomların yarısı bulunduğu, indüklenmiş yayımlanma hızı, indüklenmiş soğurulma hızına eşit olacağından, bu topluluk hiçbir zaman atomların yarısından fazlasını ara kararlı durumda bulunduramaz. Bu durumda lazer yükseltmesi gerçekleşemez (Beiser 1997).



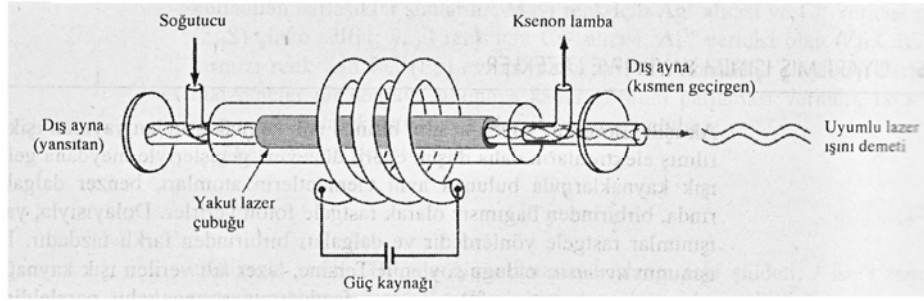
Şekil 2.6 Lazerin çalışma prensibi (Beiser 1997)

Üç düzeyli bir lazerde, indüklenmiş yayımlanmanın baskın olması için, atomların yarısından çoğu ara kararlı durumda olmalıdır.

## 2.2.2 Lazer türleri

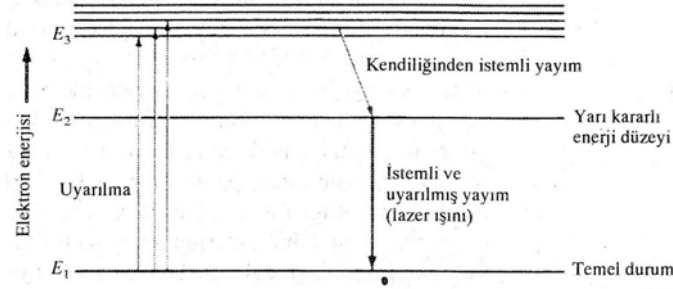
### 2.2.2.1 Katı lazerler

İlk başarılı lazer olan **yakut lazeri**, kimi  $Al^{+3}$  iyonlarının yerine, kırmızı renkten sorumlu  $Cr^{+3}$  iyonlarının geçtiği bir alüminyum oksit,  $Al_2O_3$  kristalidir. ( yaklaşık olarak % 0.05  $Cr^{+3}$  iyonu içeren bir  $Al_2O_3$  tek kristali )



Şekil 2.7 Yakut lazerinin şematik gösterimi (Smith 2001)

Yakut çubuğun uçları ışıksal yayım için paralel olarak taşlanır. Kristal çubuğun bir ucuna tam olarak yansıtıcı bir ayna, diğer ucuna ise uyumlu lazer demetinin geçmesine izin veren kısmen geçirgen bir ayna paralel olarak yerleştirilir (Smith 2001).



Şekil 2.8 Yakut lazerinin çalışma prensibi (Smith 2001)

Bir ksenon lambasından çıkan yüksek şiddetteki ışık,  $\text{Cr}^{+3}$  iyonlarının elektronlarının, temel durumdan  $E_3$  ile gösterilen yüksek enerjili bir duruma geçmesi için yeterli enerjiyi sağlar. Lazer temel biliminde bu etki **lazeri pompalamak** diye adlandırılır. Uyarılmış  $\text{Cr}^{+3}$  iyonlarının elektronları yeniden temel duruma veya yarı kararlı  $E_2$  enerji düzeyine düşebilirler.

Yeniden temel hale düşen elektronların yol açtığı kendiliğinden yayım meydana gelmeden önce, uyarılmış  $\text{Cr}^{+3}$  iyonları birkaç mili saniye yarı kararlı durumda kalır. Yarı kararlı  $E_2$  durumundan temel  $E_1$  durumuna düşen elektronlar tarafından üretilen ilk birkaç foton, uyarılmış yayım zincir tepkimesi başlatarak birçok elektronun  $E_2$ 'den  $E_1$ 'e aynı atlamayı yapmasına yol açar. Bu olay, aynı fazda ve birbirine paralel hareket eden büyük sayılarda fotonun yaratılmasına neden olur.  $E_2$  den  $E_1$ ' e atlayan elektronların yarattığı fotonların bazıları çubuğun dışına çıkarak kaybolur. Fakat çoğu, yakut çubuğun uçlarındaki aynalar tarafından ileri geri yansıtılır ve çubuk içinde, gittikçe daha fazla sayıda elektronun uyarılarak  $E_2$ 'den  $E_1$ ' e atlamasına, kuvvetli bir uyumlu ışınım demeti oluşmasına yol açar. Sonuçta, çubuğun içinde yeteri kadar şiddetli bir uyumlu ışın demeti oluştuğunda demet kısmen geçirgen aynadan geçerek dışarı çıkar.  $\text{Cr}^{+3}$  katkılanmış alüminyum oksit kristalinden elde edilen lazer ışını demetinin dalga boyu 694.3 nm olup görünür kırmızı ışık halindedir (Smith 2001).

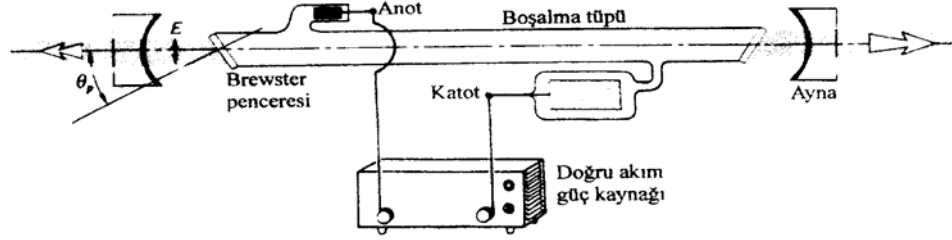
Çubuğun boyu, tam olarak yarım-dalga boyunun bir tamsayı katı kadar olarak hazırlanır, böylece içine hapsolan ışığa optik bir duran dalga oluşturur. İndüklenmiş yayımlanmalar duran dalga tarafından uyarıldığından, dalgaları hep onunla eş fazlıdır.

#### **2.2.2.2 Yarı iletken lazerler**

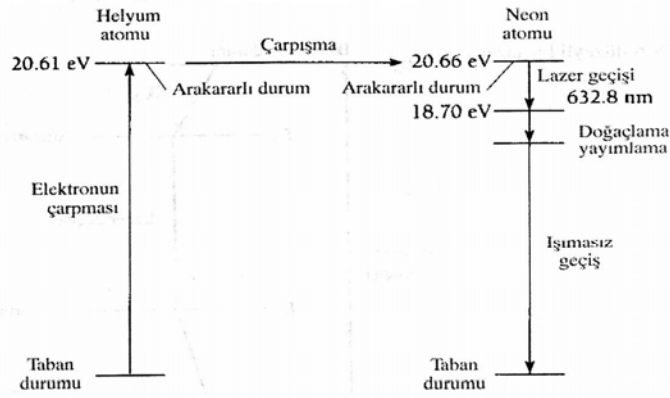
Yarı iletken malzemelerden elde edilen kristallerle de lazer yapılmıştır. Galyum arsenik kristali yarı iletken lazere örnektir. Yarı iletken diod gibi p-n malzemenin birleşmesinden meydana gelmiş olup, p-n malzemenin birleştiği yüzey yakut lazerindeki aynalar görevini yapar. Birleşim yüzeyinde pozitif voltaj p tarafına ve negatif voltaj n tarafına verildiği zaman elektronlar n malzemesinden p malzemesine geçerken enerjilerini kaybeder ve foton yayarlar. Bu fotonlar tekrar elektronlara çarparak bu elektronların daha çok foton üretmesine sebep olurlar. Neticede yeterli seviyeye ulaşan foton neşri, lazer ışığını meydana getirmiş olur. Bu tür lazerler verimli ışık kaynaklarıdır. Genellikle boyları bir milimetreden büyük değildir. Ancak çok verimli çalışma için ortam sıcaklığı oda sıcaklığının çok altına düşürülmelidir.

#### **2.2.2.3 Gaz lazerler**

Yaygın olarak kullanılan helyum –neon lazerinde tersine birikim başka yolla elde edilir. Düşük basınçta helyum ve neon karışımı, her iki ucunda, biri kısmen saydam olan iki paralel aynanın bulunduğu bir cam tüpe konur. Aynaların arasındaki uzaklık yine (bütün lazerlerde olduğu gibi)lazer ışığının dalga boyunun bir tam sayı katına eşittir. Tüpün dışındaki, yüksek frekanslı bir alternatif akım kaynağına bağlı elektrotları kullanarak gaz içerisinde bir elektriksel boşalma oluşturulur ve boşalmanın elektronları ile olan çarpışmalar, He ve Ne atomlarını, taban durumların sırasıyla 20.61 ve 20.66 eV üstündeki arakararlı durumlarına uyarırlar. Bazı uyarılmış He atomları, çarpışmalarda gerekli ek 0.05 eV'luk enerji atomların kinetik enerjileri tarafından sağlanarak, enerjilerini taban durumdaki Ne atomlarına geçirirler. He atomlarının kullanılmasındaki amaç, böylece Ne atomlarında bir tersine birikim sağlamaktır



Şekil 2.9 He- Ne lazeri (Beiser 1997)



Şekil 2.10 Dört düzeyli bir lazerin çalışma ilkesi (Beiser 1997)

Ne'deki lazer geçişi, 20.66 eV' taki ara kararlı durumdan 632.8 nm'lik bir foton yayımlayarak 18.70 eV' taki bir uyarılmış duruma olur. Daha sonra, daha aşağıdaki bir arakararlı duruma geçiş için başka bir foton kendiliğinden yayımlanır. Bu geçiş sadece uyumsuz ışık verir. He ve Ne atomlarını uyan elektron çarpışmaları, sürekli olarak gerçekleştiğinden, bir He-Ne lazeri sürekli çalışır. Dar, kırmızı hüzmesi süpermarketlerde barkotları okumakta kullanılmaktadır. Bu lazerlerin yaygın olarak kullanılmasının nedeni,

ucuz ve güvenilir olması, birçok halde tek bir anahtara basılmasıyla çalıştırılabilir olmasıdır (Beiser 1997).

#### **2.2.2.4 Kimyasal lazerler**

Ara kararlı uyarılmış durumlarda moleküllerin kimyasal tepkimeler aracılığıyla oluşturulması temeline dayanır.

#### **2.2.2.5 Sıvı lazerler**

Katı lazerlerin bir sakıncası yüksek güçte çalışırken malzeme içinde oluşan ya da pompalama lambasından kaynaklanan çok büyük ısının etkisiyle zaman zaman kırılma ve hasar ortaya çıkmasıdır. Sıvı lazerlerde, kristal ya da camı çubuk yerine saydam bir bölme içine konmuş uygun bir sıvı (örn. neodim oksit ya da neodim klorürün selenyum oksiklorürdeki eriyiği) kullanılır. Sıvının içine konduğu bölme istenildiği kadar büyük yapılabilir, böylece yüksek güçlerin elde edilmesi olanaklı olur. Ne var ki inorganik sıvıların pek azı lazerlerde kullanılmaya elverişlidir (<http://www.wikipedia.com/lasers>).

En çok kullanılan sıvı lazer türü, organik bir çözücü içindeki organik boyanın seyreltik bir çözeltisidir. Boya moleküllerinin enerji düzeyleri yükseltilerek foton üretilir.

#### **2.2.2.6 Boyarmaddeli lazerler**

Bazı organik boyar maddeler flüorışıma özelliği gösterir, bir başka deyişle üzerlerine düşen ışığı farklı bir renkte yeniden yayımlarlar. Atomlarının uyarılmış durumda bulunma süresinin çok kısa (saniyenin kesri kadar) olmasına ve yayımlanan ışığın dar bir bantta toplanmasının olanaklı olmamasına karşılık, boyarmaddelerin lazerlerde kullanılmasının nedeni bunların geniş bir frekans bölmesi içinde ayarlanabilme özelliği göstermesidir (<http://www.wikipedia.com/lasers>).

Rodamin 6G gibi boyarmaddeler başka bir lazerle uyarılma sonucunda lazer etkisi gösterir. Turuncu-sarı bir ışık yayan rodamin 6G, sürekli olarak çalışan (ışığı darbeler biçiminde değil sürekli bir demet olarak veren) ilk lazerin gerçekleştirilmesinde yaralanılan 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, böylece tayfın bu bölgesinde istenen dalga boyunda lazer ışığı elde edilebilir.

Çizelge 2.1 Kimyasal lazerler (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
<u>Hidrojen florür lazer</u>	2.7 to 2.9 µm Hidrojen florür için	U.S. 'nın yürüttüğü lazere dayana silahların araştırmaları
Döteryum <u>florür lazer</u>	~3800 nm (3.6 to 4.2 µm)	(MIRACL) orta kızılötesi gelişmiş kimyasal lazer
<u>COIL</u> (kimyasal oksijen iyot lazer)	1.315 µm	Lazere dayalı silah teknolojisi, malzeme ve bilimsel araştırmalar

Çizelge 2.2 Metal buharı lazer (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
<u>Helyum-kadmiyum</u> (HeCd)	441.563 nm, 325 nm	Bilimsel araştırmalar
<u>Helyum-civa</u> (HeHg)	567 nm, 615 nm	Nadiren, bilimsel araştırmalar, amatör lazer yapımı
<u>Helyum-selenyum</u> (HeSe)	Kızılötesi ve UV	Nadiren, bilimsel araştırmalar, amatör lazer yapımı
Bakır buharı lazeri	510.6 nm, 578.2 nm	Dermatolojik kullanımlar, yüksek hızlı fotoğrafçılık

Çizelge 2.3 Gaz lazerler (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
<u>Helyum-neon lazer</u>	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 µm, 1.52 µm, 3.3913 µm)	Interferometri, holographi, spektroskopi, barkod tarama
<u>Argon lazer</u>	454.6 nm, 488.0 nm, 514.5 nm (351 nm, 457.9 nm, 465.8 nm, 476.5 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	<u>Retinal fototerapi</u> ( şeker hastaları için ), litographi, diğer lazerlerin pompalanması
<u>Kripton lazer</u>	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Bilimsel araştırmalar, "beyaz ışık" lazerlerini yaratmak için argon ile karıştırılması, ışık şovları
<u>Xenon ion lazer</u>	Görünür bölgeden UV ve kızılötesine kadar	Bilimsel araştırmalar
<u>Nitrojen lazer</u>	337.1 nm	Boyalı lazerlerin pompası, hava kirliliğinin ölçülmesi, bilimsel araştırmalar
<u>CO2 lazer</u>	10.6 µm, (9.4 µm)	Malzeme işlemleri ( kesme, kaynak...), ameliyatlar
<u>Karbon monoksit lazer</u>	2.6 to 4 µm, 4.8 to 8.3 µm	Malzeme işlemleri ( oyma, kaynak...), fotoakustik spektroskopi.
<u>Excimer lazer</u>	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Yarıiletken üretimi için mor ötesi litographi, lazer ameliyatları.

Çizelge 2.4 Yarıiletken lazerler (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
Yarıiletken lazer diyot (genel bilgi)	0.4-20 $\mu\text{m}$ , kullanılan malzemeye bağlı olarak	Telekomünikasyon, holografi, silahlar, kaynak.
<u>GaN</u>	0.4 $\mu\text{m}$	Optik diskler.
<u>AlGaAs</u>	0.63-0.9 $\mu\text{m}$	Optik diskler, lazer pointers, bilgi iletişimi
<u>InGaAsP</u>	1.0-2.1 $\mu\text{m}$	Telekomünikasyon, medikal..
VCSEL lazer	850 - 1500 nm,	Telekomünikasyon
Kuantum çukur lazer	Orta kızılötesinden uzak kızılötesine	araştırma
<u>Hibrit silikon lazer</u>	Orta kızılötesi	araştırma

Çizelge 2.5 Boyarmaddeli lazerler (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
Boya lazer	390-435 nm (stiben), 460-515 nm (kumarin102), 570-640 nm (rodamin 6G)	Spektroskopi, doğum lekesi ameliyatları, izotop ayırma

Çizelge 2.6 Diğer lazer çeşitleri (<http://www.wikipedia.com/lasers>)

Lazer çeşidi	Dalgaboyu aralığı	Uygulamaları
Serbest elektron lazeri	Ayarlanabilir dalga boyu	Atmosfer araştırmaları, malzeme bilimi, medikal araştırmalar
<u>Samarium</u> lazer	7.3 nm	ilaçların ve virüslerin hücre üstündeki etkisinin araştırılması, DNA araştırmaları,mikroskopi,holographi
<u>Raman lazer</u>	1-2 µm	telekomünikasyonda optik sinyal yükselteci

Çizelge 2.7 Kızılötesi SEL ve Kızılötesi Geleneksel Lazer Farkı

Özellik	IR Lazer	IR SEL
Dalgaboyu	Tek dalga boyludur, belli dalga boyunda çıkış verir(1-10 µ m)	Tek dalga boyludur, geniş bir aralıkta dalga boyu değiştirilebilir.
Faz	Işınım aynı fazdadır	Işınım aynı fazdadır
Güç	Güçlü ve yoğun	Çok güçlü pik ve ortalama güç
Puls	Sürekli veya ns mertebesinde pulslu	Ps-ns mertebesinde pulslu

### 2.2.3 Lazer ışınının kullanıldığı yerler

Lazer cihazları, süpermarketlerde ambalajların üzerindeki kontrol çizgilerini okumadan, fabrikalardaki montaj hatlarında kalite kontrolüne kadar hemen her alanda kullanılmaktadır. Lazerler kompakt disk çalardaki, laboratuvar cihazlarında ve ameliyat aleti olarak da kullanılır. Bazı özel örnekler verilecek olursa, yırtılmış göz retinası dikilmesi, füzyon nötronları oluşturulması, uyarma yoluyla tohum büyütülmesi, iletişim hatları olarak kullanılması, elmaslara delikler delinmesi sayılabilir.

Lazer, haberleşmede kullanılacak özelliklere sahiptir. Lazer ışını da güneş ışını gibi atmosferden etkilenir. Bu sebeple atmosfer, radyo yayınlarında olduğu gibi lazer yayını için uygun bir ortam değildir. Bu bakımdan lazer ışınları, içi ayna gibi olan lifler içinden gönderilirse, lifler ne kadar uzun, kıvrıntılı olursa olsun kayıp olmadan bir yerden diğerine ulaşır. Bu liflerden istifade edilerek milyonlarca değişik frekanstaki bilgi aynı anda taşınabilmektedir. Bu maksatla foto diyot kullanılmakta ve elektrik enerjisi foto diyotta ışık enerjisine çevrilmektedir. Dünyanın birçok telefon şirketleri bu tatbikata geçmişlerdir. Karbondioksit lazerleri metal, cam, plastik kaynak ve kesme işlerinde kullanılır.

Lazer, uzayda mesafe ölçmede kullanılır. Peykler arasındaki mesafeyi 25cm hata ile ölçebilmektedir. Lazerle ilk mesafe ölçümü, 1962 senesinde, Ay'a yerleştirilen argon-iyon lazeri ile yapıldı. Lazer, inşaatlarda, boru ve tünel yapımında, yön ve doğrultu tayininde ve tespitinde klasik teodolitlerden çok daha mükemmel ve kullanışlıdır.

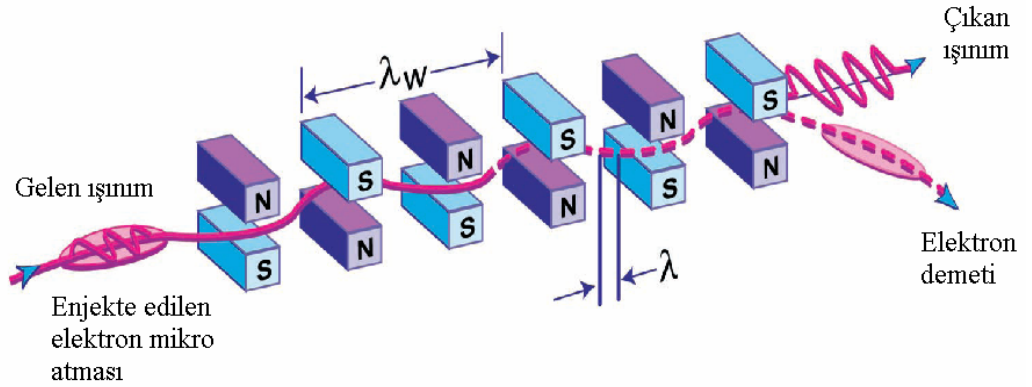
Lazerin askeri alandaki tatbikatları çoktur. Mesafe bulma ve yer tanıma maksadıyla kullanıldığı bilinmektedir. Hedefe gönderilen güdümlü mermiler, hedef yakalanınca lazer ışını ile infilak ettirilmektedir. Gece karanlığında gece görüş dürbünleri sayesinde gündüzmüş gibi operasyon yapılabilir. Çok başlıklı füzelerin hafızalarına yerleştirilen hedef resmi, füze hedefe yaklaşınca lazer ışını ile tanınır. ABD'nin 1984 yılında geliştirdiği füze savunma sistemi, düşman füzesini havada iken uzaydan gönderilen lazer ışını ile tahrip edebilmektedir (<http://www.wikipedia.com/lasers>).

Holografi ve fotoğrafçılıkta çok önemli yeri vardır. Lazerle görüntü kaydetme süresi saniyenin 10 trilyonda biri zamanda mümkün olur. Holografi, lazer ışınları ile üç boyutlu resim çekme ve görüntüleme tekniğidir.

Tıpta lazer “kansız ameliyat” maksatları ile kullanılır. Yırtılmış göz retinası, lazer ışını ile acısız ve süratle dikilir. Vücudun çeşitli bölgelerindeki tümörler bıçakla açılmadan yerinde kesilerek tedavi edilebilir. Damardaki dokular, lazer ışını ile kaynar ve kanama olmaz. Çürük diş çukurları dolgu yapılmak üzere acısız delinebilir.

### 2.3 Serbest Elektron Lazeri

Serbest Elektron Lazerlerin ( SEL ) tarihi 1950’ lere dayanır. Stanford’ da Hans Motz’ un bu lazerlerin dayandığı salındırıcıları tasarlaması ilk adım olmuştur. SEL’ in tasarımı ise ilk olarak 1970’ da yine Stanford’ da John Madey tarafından yapılmıştır. SEL ile yapılan ilk deney ise 1976’ da lineer hızlandırıcıdan alınan bir elektron demetinin kullanılması ile yapılan deney olmuştur (Tural 2006).



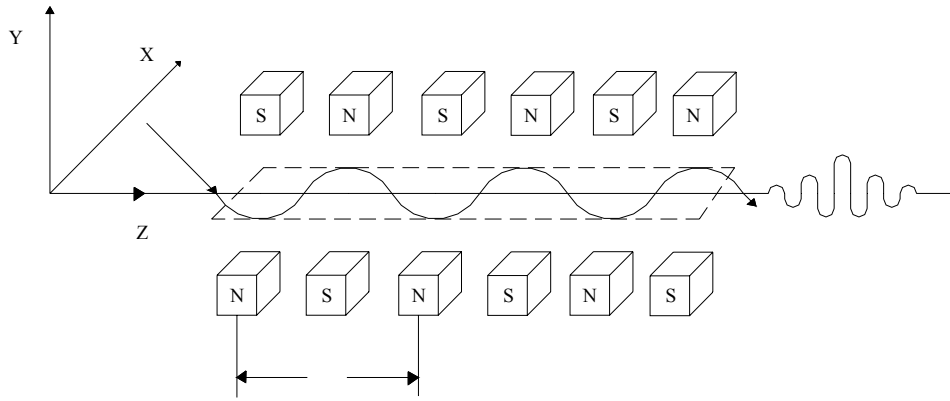
Şekil 2.11 Serbest Elektron Lazerinin ( SEL ) oluşumu (Tural 2006)

Serbest Elektron Lazeri (SEL), atomik ve moleküler sistemlerde bağlı olmayan elektronların kullanıldığı yeni tip lazer türlerindedir. Buradaki serbest elektronun kaynağı,

lineer hızlandırıcılar (linak) veya sinkrotron tipi elektron hızlandırıcılarıdır. Serbest Elektron Lazeri, temelde elektronun kinetik enerjisini koherent elektromanyetik ışımaya dönüştürme prensibi ile çalışmaktadır. Bu dönüşüm salıncı adı verilen ve manyetik alan oluşmasını sağlayan manyetik undulatör ile gerçekleştirilmektedir (Tural 2006).

### 2.3.1 SEL fiziği

Serbest elektron lazeri (SEL), göreceli bir elektron demetinin, kutupları arasında sinüsel bir manyetik alan uygulanan salıncı magnetten (undulator) geçerken, kinetik enerjisinin bir kısmı elektromagnetik ışımaya yoluyla ayarlanabilir dalgaboylu, yüksek akı ve parlaklık değerlerine sahip monokromatik (tek enerjili) ışınım olarak elde edilir. Bu şekilde elde edilen lazerin spektrum aralığı VUV (Vacuum Ultra Violet) dan sert X-ışını bölgesine kadar uzanır (Dattoli *et all* 1993).



Şekil 2.12 Serbest elektron lazeri

### 2.3.2 Serbest elektron lazerinin dalga boyu ve enerjisi

Elde edilen foton demetinin (lazer) dalga boyu esas olarak elektron demetinin enerjisine, salındırıcı kutup dalga boyu  $\lambda_u$  'ya ve salındırıcı kuvvet parametresi  $K$  'ya bağlıdır:

$$\lambda_{SEL} = f(E_e, \lambda_u, K) \quad (2.2)$$

Böyle bir düzenele elektron demetinin enerjisinin elektromagnetik ışınım dönüşüm yüzdesi %1 ile %50 arasında değişebilir. Işınım elektron demetinin yapısına bağlı olarak sürekli formda veya çok kısa (ns veya ps) uzunluklu atımlar şeklinde olabilir. Günümüzde tipik serbest elektron lazerlerinin gücü 1-100 kW aralığındadır. Asıl katkının salınımların birinci harmoniklerinden geldiği salındırıcılarda SEL için dalga boyu,

$$\lambda_{SEL} = \frac{\lambda_u}{2\gamma_e} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma_e^2 \theta^2 \right) \quad (2.3)$$

şeklinde verilir. Burada,  $\lambda_u$  düzlemsel salındırıcının kutup dalga boyu,  $\gamma_e$  elektron demetinin Lorentz faktörü,  $\theta$  elektronun geliş doğrultusu ile gözlem doğrultusu arasındaki açı ve  $K$  ise salındırıcının kuvvet parametresidir.  $B_u$  salındırıcının pik manyetik alan değeri olmak üzere,  $K$  salındırıcı kuvvet parametresi,

$$K = eB_u \lambda_u / 2\pi m_e c = 0.9337 B_u [T] \lambda_u [cm] \quad (2.4)$$

olarak tanımlanır. Burada  $m_e$  elektronun durgun kütlesi,  $c$  ışık hızı ve  $e = \sqrt{4\pi\alpha}$ ,  $\alpha = 1/137$  ince yapı sabitidir. Salındırıcı (undulator) magnet için  $K \approx 1$  'dir ve ışımaya katkı özellikle 1. harmoniklerden gelir. Zigzaglayıcı (wiggler) magnetler için ise  $K \geq 3$  'tür ve özellikle monokromatiklik açısından geniş bant karakteri taşırlar. Düzlem salındırıcı için serbest elektron lazerinin dalga boyu ve enerjisi pratik birimler cinsinden sırasıyla,

$$\lambda_{SEL}^o ( \text{\AA} ) = 13.056 \frac{\lambda_u ( cm )}{E^2 ( GeV^2 )} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2.5)$$

ve

$$E_{SEL} ( eV ) = 950 \frac{E_e^2 ( GeV^2 )}{\lambda_u ( cm ) \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right)} \quad (2.6)$$

olarak tanımlanır. Tipik serbest elektron lazerleri için enerji aralığı 1-10000 eV' tur

### 2.3.3 SEL'in kalitesini belirleyen faktörler

Elde edilecek SEL'in kalitesi için elektron demeti ve salındıracı parametrelerinin göstereceği sapma (belirsizlik) değerleri son derece önemlidir. Lazerin bant genişliğini yayılım yönünde etkileyen faktörler

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{2\Delta\gamma}{\gamma} + \frac{2K\Delta K}{1+K^2} + \frac{\gamma^2(\Delta\theta)^2}{1+K^2} \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Sağ tarafta ilk terim elektron demeti enerji yayılımının, ikinci terim salındıracı kuvvet parametresindeki sapmaların, son terim ise  $\Delta\theta$  yarı açılı genişlemesinden gelen katkıyı belirtmektedir. Sonuç olarak dalga boyundaki bu yayılım bant yarı genişliği olarak bilinen  $1/2N_u$  dan küçük olmalıdır. Burada,  $L_u$  salındıracının boyu olmak üzere,  $N_u = L_u / \lambda_u$  salındıracının kutup sayısıdır. Serbest elektron lazeri düzeneğinin etkin bir şekilde çalışması için salındıracı ve elektron demetinin parametreleri arasında aşağıda belirtilen koşullar sağlanmalıdır:

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = \frac{1}{4N_u} \quad (2.8)$$

$$\frac{K\Delta K}{1+K^2} < \frac{1}{4N_u}$$

$$\Delta\theta < \frac{1+K^2}{2\gamma^2 N_u}$$

Sonuç olarak, çizgi genişliği  $1/N_u$  olan,  $\lambda_{SEL}$  dalga boylu serbest elektron lazeri üretmek için elektron demetinin emittansı  $\varepsilon$ ,  $\lambda/4\pi$  den küçük olmalıdır. (Dattoli *et all* 1993).

### 2.3.4 Serbest elektron lazerinin özellikleri

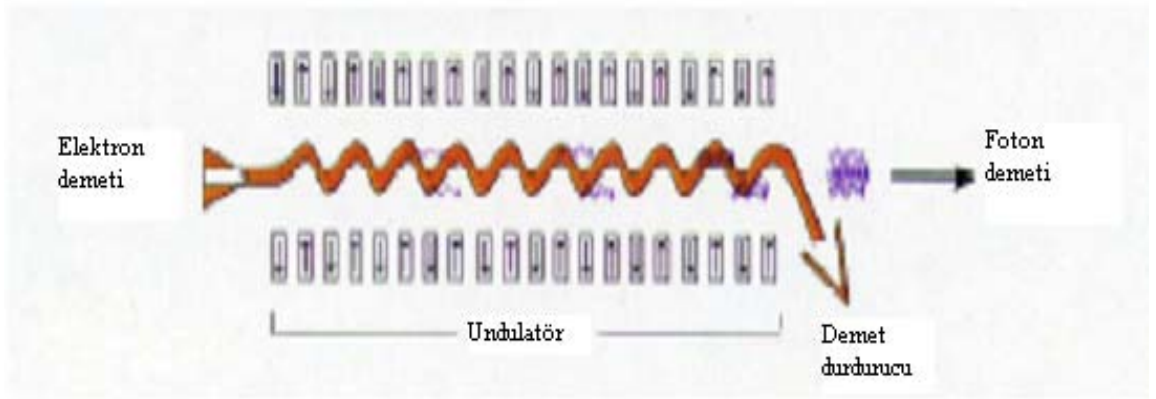
- Ayarlanabilir dalga boyu:  $\lambda_{lazer} : f(\lambda_u, \gamma_e, K)$
- Geniş dalga boyu aralığı: uzak kızılötesinden hard X- ray bölgesine kadar
- Atma yapısı: ps mertebesinde
- Ortalama parlaklığı:  $\sim 10^{16}$  ( foton / smrad<sup>2</sup> mm<sup>2</sup> %0,1bg )
- Yüksek pik gücü: MW mertebesinde
- Ortalama güç: ~W

### 2.3.5 Serbest elektron lazeri çeşitleri

Prensiplerine göre üç çeşit serbest elektron lazeri bulunmaktadır.

1. Osilatör SEL
2. SASE SEL

SASE SEL, kendiliğinden genlik artımlı yayınım (SASE) modu ile rölativistik elektron demetinin kutupları arasında sinüsel bir magnetik alan uygulanan salındırıcı magnetten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını ışığa yoluyla kaybetmesi sonucu elde edilen serbest elektron lazeridir.

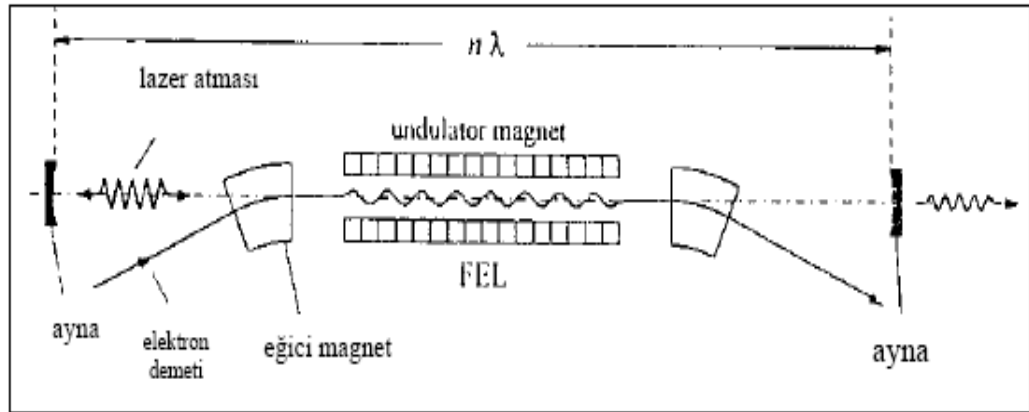


Şekil 2.13 SASE SEL'in oluşumu

### 3. Yükselteç SEL

Yükselteç SEL, ışınının dışarıdan verilen başka bir ışınım ile güçlendirilme prensibine dayanır.

#### 2.4 Osilator Modda Serbest Elektron Lazeri



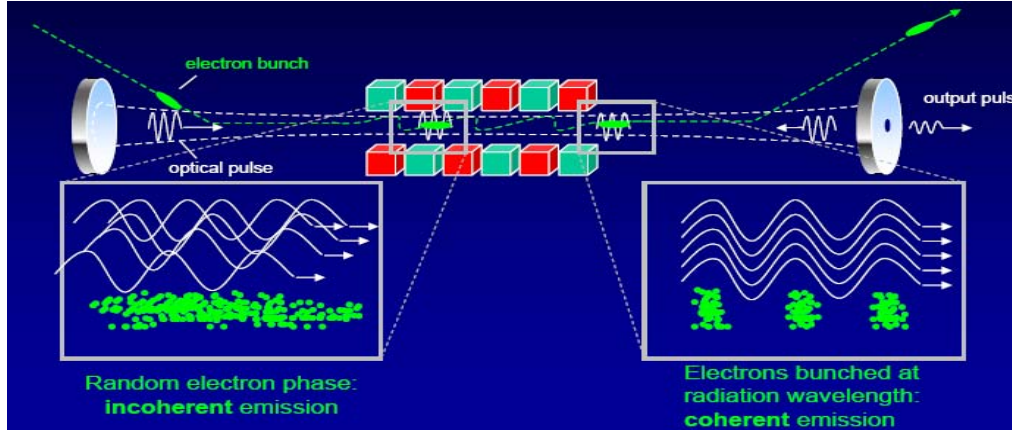
Şekil 2.14 Osilator SEL düzeneği

SEL Osilator'ün ana donanımları elektron demeti, salındırıcı magnet (undulator) ve optik kavitedir. IR-SEL elde etmek için bazı şartların sağlanması gerekmektedir. Bunlar uygun enerji sağlayabilen bir linak (lineer hızlandırıcı), değişken aralıklı bir salındırıcı magnet ve uygun karakteristiklerde bir elektron demetidir (düşük faz uzayı yayınımlı, kısa paketçik uzunluğu, yüksek pik akımı ve düşük enerji yayınımlı).

Bir osilator SEL'de linak veya depolama halkasından elde edilen elektron demeti salındırıcı magneteye gönderilerek undulator ekseni boyunca ani bir undulator ışıması yayınlanması sağlanır. Bu ışımaya optik kavite içerisindeki iki ayna arasında tuzaklanarak undulatore eş zamanlı gönderilen yeni elektron demetleri ile etkileşir. Bu şekilde kaviteye giren elektron demetlerinden kavite içerisindeki optik alana bir enerji aktarımı sağlanmış olur. Optik kaviteden bu şekilde elde edilen ışımaya Serbest Elektron Lazeri olarak adlandırılır (Chesworth 2000).

## **2.5 Optik Kavite**

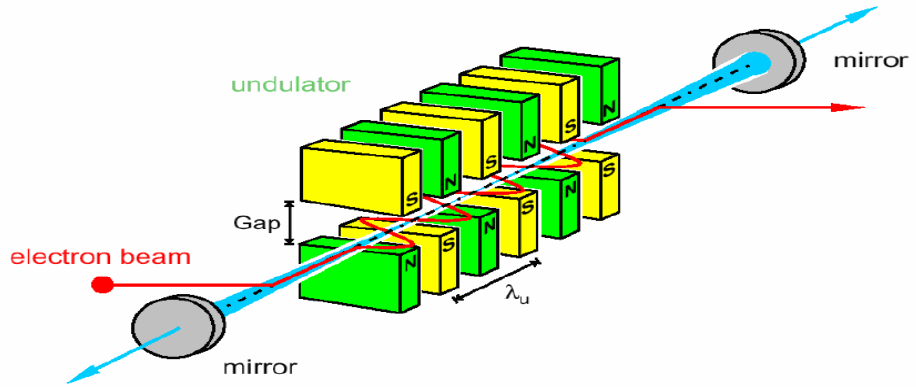
Bir optik kavite kazanç ortamının iki ucuna yerleştirilen eğim yarıçapları belli iki aynadan oluşmaktadır. SEL optik kavitelemi diğer lazer kavitelemi birçok benzer özelliğe sahiptir. Fakat bu tür kavitelemi, diğer kavitelemi farklı çalışmalarını sağlayan bir takım karakteristik özelliklere sahiptir. Optik kavite içerisinde lazer dalgası iki küresel ayna arasında pek çok kez yansıtılır ve lazer dalgası ile elektron demeti arasında enerji alışverişi gerçekleşir (Karlı 2006).



Şekil 2.15 Osilator Modda SEL için Optik Kavite Yapısı (Karlı 2006)

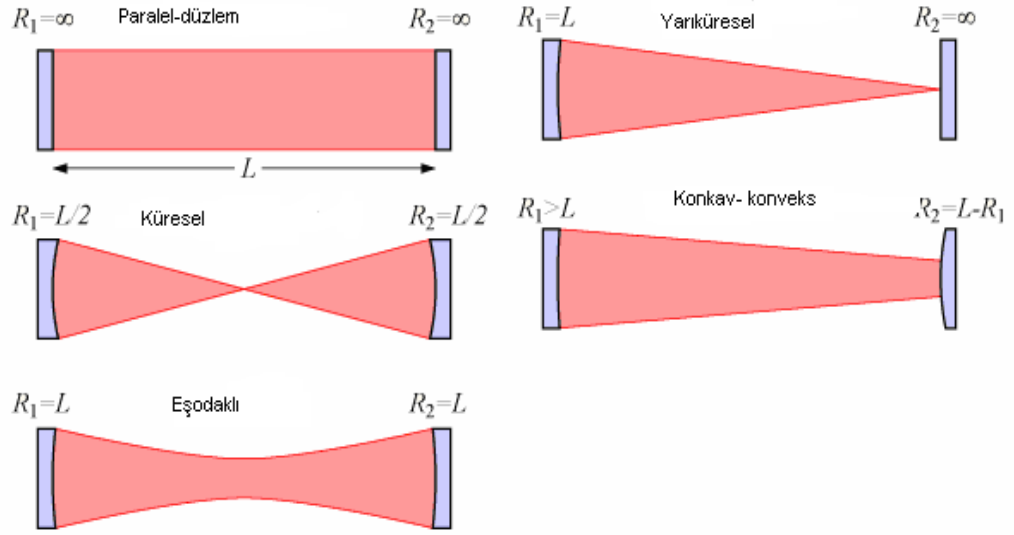
Optik kavite, çevredeki büyük kazanç ve lazer ışığının geri beslenmesini sağlayan, lazerin büyük bir bileşenidir. Aynı zamanda optik parametrik osilatörlerde ve bazı interferometrelerde kullanılırlar.

Sel verimi, kararlılığı ve çiftlenmiş çıkış sinyalinin demet kalitesini maksimize etmek için mod kontrollü optik bir kaviteye sahip olmak gerekir.



Şekil 2.16 Optik Kavite ve SEL oluşumu (Karlı 2006)

## 2.5.1 Optik rezonatör çeşitleri



Şekil 2.17 Optik kavite tipleri (Yıldız 2007)

Optik kaviteilerin en yaygın tipleri iki düzlem ya da küresel aynadan meydana gelir. Bunların en basiti karşılıklı iki aynadan oluşan paralel-düzlem ya da Fabry-Perot kavitesidir. Bu düzen nadiren zorluk sıralamasıyla büyük ölçekli lazerlerde kullanılır, aynalar arkın birkaç saniyesi içinde paralel olarak sıraya konmalıdır, aksi halde kavite içi demetin kavite kenarlarına çarpmasıyla sonuçlanacaktır. Ancak bu problem küçük bir ayna ayırma mesafesiyle ( $L < 1$  cm) çok kısa kavite için fazla azaltılır. Paralel düzlem rezonatörleri bu yüzden yaygın olarak mikroçip ve mikro kavite lazerleri ile yarı iletken lazerlerinde kullanılırlar. Bu durumlarda, ayırma aynaları kullanılmasına rağmen, yansıtıcı bir optik kaplama doğrudan lazerin ortasına uygulanabilir. Paralel-düzlem rezonatörü aynı zamanda Fabry-Perot interferometresinin temelini oluşturur.

$R_1$  ve  $R_2$  yarıçaplı iki aynalı bir rezonatör için çok sayıda yaygın kavite konfigürasyonu vardır. Eğer iki eğrisel kavite uzunluğunun yarısına eşitse ( $R_1=R_2=L/2$ ) ortak merkezli ya da küresel bir rezonatör oluşur. Bu kavite tipi, tüm ayna aralığını dolduran aynalardaki büyük demet çaplarıyla kavitenin merkezinde bir sınırlı-kırınım demet waist'i oluşturur. Bu, kavite uzunluğuna eşit eğrisel bir ayna ve bir düzlem aynayla yarıküresel bir kavitedir.

Başka bir yaygın ve önemli bir dizayn, kavite uzunluğuna eşit ( $R_1=R_2=L$ ) özdeş eğrisel aynalarda bir eş odaklı rezonatördür. Bu dizayn, verilen bir kavite uzunluğu için kavite aynalarında olası en küçük demet çapını meydana getirir ve sık sık enine mod örneğinin önemli olduğu lazerlerde kullanılır (Yıldız 2007).

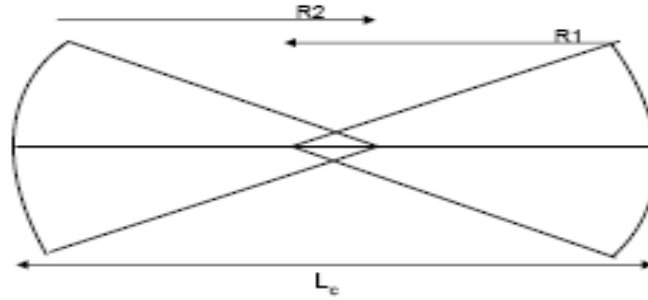
Bir konkav-konveks kavite negatif bir eğrilik yarıçapıyla bir konveks aynaya sahiptir. Bu dizayn demetin kavite içi odağını oluşturmaz, ve aynı zamanda bir odağa getirdiğinde kavite içi ortamı bozabilen kavite içi ışık şiddetinin olduğu çok yüksek şiddetli lazerlerde yararlıdır.

## **2.5.2 Optik kavite tanımları**

### **2.5.2.1 Gaussiyen demet**

Gaussiyen demet enine elektrik alan ve şiddet dağılımları Gaussiyen fonksiyonlarla tanımlanan demetlerdir. Birçok lazer Gaussiyen profil de demet yayar.

Optik rezonatör aralarında  $L_c$  uzaklığı bulunan,  $R_1$  ve  $R_2$  eğrilik yarıçapına sahip iki küresel aynanın bileşiminden oluşur (<http://www.wikipedia.com/gaussian function>).



Şekil 2.18 Optik Rezonatör (<http://www.wikipedia.com/gaussian function>)

### 2.5.2.2 Lazer dalga boyu

Au salındırıcı magnet periyodu, K salındırıcı magnet kuvvet parametresi ve  $\gamma$  elektron demetini Lorentz faktörü olmak üzere elde edilen serbest elektron lazerinin dalga boyu;

$$\lambda_R = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (2.9)$$

Burada,

$K = \frac{eB_0}{k_u m_e c} = 0.934 B_0 [\text{tesla}] \lambda_U [\text{cm}]$  ile tanımlanan salındırıcı magnet kuvvet parametresidir, ve  $B_0$  salındırıcı magnet kutupları arasındaki magnetik alan,  $k_u$  undulator dalga sayısıdır.

### 2.5.2.3 Rezonatör uzunluğu

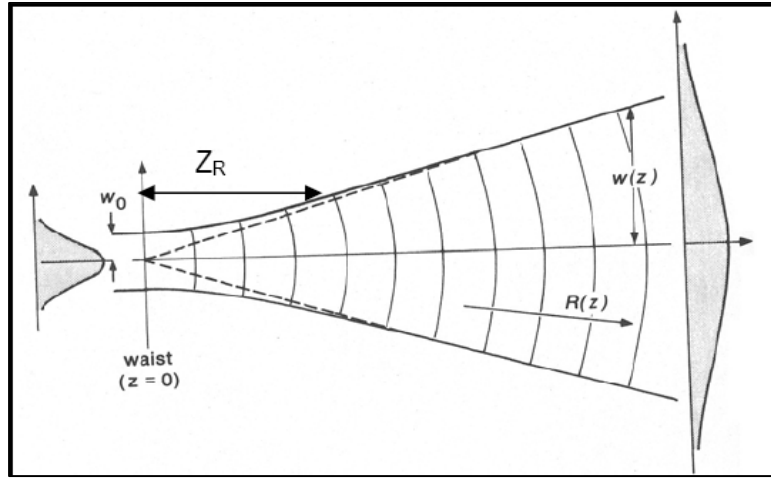
Aynalar arası mesafe olarak tanımlanan rezonatör uzunluğu,

$L_c = \frac{vT}{2} = \frac{v}{2f}$  ile ifade edilir. Burada, T paketçik aralığı; f mikro paketçik tekrarlama

frekansı ;  $v$  elektron demetinin hızıdır.

### 2.5.2.4 Rayleigh uzunluğu

Rayleigh uzunluğu, demetin ilerleme yönündeki demet yarıçapının, merkezi bel kalınlığından  $\sqrt{2}$  katı kadar arttığı uzunluktur (<http://www.wikipedia.com/rayleigh length>)



Şekil 2.19 Rayleigh Uzunluğu ( $Z_R$ ) (<http://www.wikipedia.com/rayleigh length>)

### 2.5.2.5 Demet genişliği ya da spot büyüklüğü

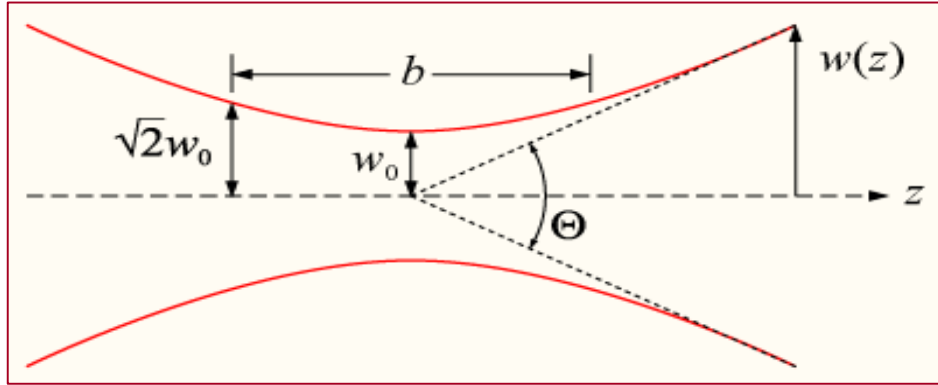
Gausyen demetin bel kalınlığı olarak bilinen ve ışının aynalar üzerine düştüğü alanın yarıçapı ile de gösterilen  $w$  dir (<http://www.wikipedia.com/rayleigh length>).

Serbest uzayda yayılan Gausyen demet için spot genişliği  $w(Z)$  demet ekseninde demet beli olarak bilinen bir yerde minimum bir değere ( $w_0(Z)$ ) sahip olacaktır.

Demet belinden  $z$  kadar uzaklıkta  $\lambda_R$  dalgaboylu demet için spot büyüklüğünün değişimi

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2.10)$$

Rayleigh uzunluğu  $z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_R}$  olarak tanımlanır.



Şekil 2.20 Demet Genişliği,  $w_0$  bel genişliği ve  $b = 2z_R$

### 2.5.2.6 Rezonatör parametreleri

$L_c$  optik kavitenin boyu,  $R_1$  ve  $R_2$  ise kavitenin her iki ucuna yerleştirilen aynaların eğrilik yarıçapları olmak üzere  $g_1$  ve  $g_2$  aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$g_1 = 1 - \frac{L_c}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L_c}{R_2} \quad (2.11)$$

### 2.5.2.7 Kararlılık

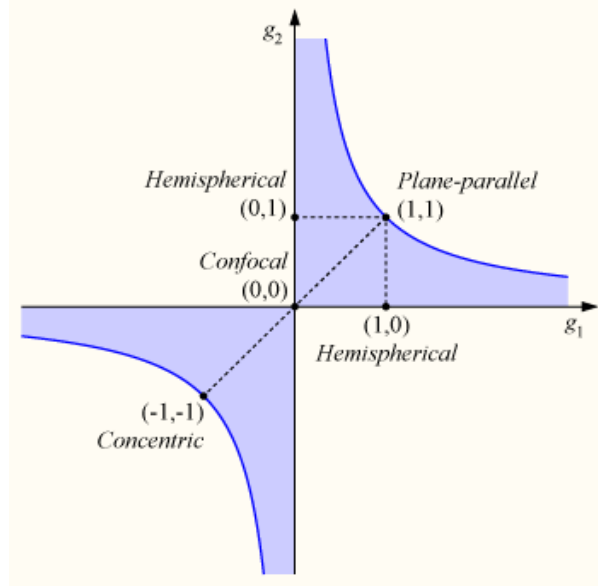
$R_1$ ,  $R_2$  ve  $L$  için olası değerlerin dar bir bölgesi, kavite içi demetin üretildiği periyodik odaklamadaki kararlı rezonatörleri oluşturur. Kavite kararsız ise, demet boyutu sınır olmaksızın büyüyecek, sonunda kavite aynalarından daha büyük olup kaybolacaktır. Işın transfer matris analizleri gibi metotlar kullanarak bir kararlılık kriteri hesaplamak mümkündür:

$$0 < \left(1 - \frac{L_c}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L_c}{R_2}\right) < 1 \quad (2.12)$$

Değerler kararlı rezonatörlere karşılık gelen eşitsizlikleri doğrular. Kararlılık grafiksel olarak bir kararlılık parametresi şeklinde gösterilebilir,  $g$  kararlılık parametresi olmak üzere her bir ayna için,

$$g_1 = 1 - \frac{L_c}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L_c}{R_2} \quad (2.13)$$

$g_2$ 'ye karşılık  $g_1$  çizilir. Alanlar  $g_1 \cdot g_2 = 1$  bölgesine bağlıdır ve eksenler kararlıdır. Hat üzerindeki noktalarda kavite tamami az şekilde kararlıdır; kavite uzunluğunda küçük varyasyonlar rezonatörlerin kararsız hale gelmesine yol açabilir, ve böylece bu kaviteyi kullanarak lazerler pratik olarak kararlılık hattı içinde çalıştırılır.



Şekil 2.21 İki aynalı bir kavite için kararlılık diyagramı verilmektedir. Mavi olanlar kararlı durumlara karşılık gelir. (<http://www.wikipedia.com/stability>)

### 2.5.2.8 Optik kavitenin ana parametreleri

- Rezonatör uzunluğu (  $L_c$  )

$$L_c = \frac{cT}{2} = \frac{c}{2f} \quad (2.14)$$

- Rayleigh uzunluğu (  $Z_R$  )

$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_R} \quad (2.15)$$

$$Z_R^2 = \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} L_c^2 \quad (2.16)$$

$$2Z_R = \sqrt{L_C(2R - L_C)} \quad (2.17)$$

- Demet genişliği ya da spot büyüklüğü ( $w(Z)$ )

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (2.18)$$

- Işınının minimum spot genişliği ( $w_0$ )

$$w_0^2 = \frac{\lambda_R}{\pi} \frac{\sqrt{L_C(R_1 - L_C)(R_2 - L_C)(R_1 + R_2 - L_C)}}{R_1 + R_2 - 2L_C} \text{ formülünde } R_1=R_2=R \text{ alınırsa,}$$

$$w_0^2 = \frac{\lambda_R}{2\pi} \sqrt{L_C(2R - L_C)} \text{ olarak ifade edilir.}$$

- İki ayna üzerindeki demet spotları ( $w_1$  ve  $w_2$ )

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left( \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.19)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left( \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.20)$$

- Rezonatör parametreleri (  $g_1$  ve  $g_2$  )

$$g_1 = 1 - \frac{L_C}{R_1} \quad g_2 = 1 - \frac{L_C}{R_2} \quad (2.21)$$

### 2.5.3 Aynaların kaplanması

Yansıtıcılık ve geçirgenlik özelliklerini istenilen değerlerde elde edebilmek için hem ayna malzemesi hem de kaplaması önem taşımaktadır Ayna malzemesi genelde altın veya gümüş ile kaplanmış bakır veya Si olabilir.

Kaplama metodları:

- \* Buharlaştırma ( Evaporation )
- \* Tortulaştırma ( Ion Assisted Deposition )
- \* Püskürtme ( Ion Beam Sputtering )

Metal aynalar üzerinde oluşan deformasyonlar yüksek SEL gücünden kaynaklanmaktadır. Çok katmanlı aynalarda deformasyon çok hızlı bir şekilde ve optik kavitede depolanan yüksek ortalama gücün soğurulması ile meydana gelmektedir. Aynı zamanda yüksek ışınım gücü bazı tabakalar üzerinde soğurma kusurları oluşturabilmektedir.

Son zamanlarda ayna deformasyonlarının üstesinden gelinebilmiştir. Çok katmanlı aynalarda: aynaların üretiminde iyon katkılama teknolojisi kullanılmaktadır. Bu teknoloji şu an endüstriyel ayna üreticilerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Ayrıca bu katmanlar ısıl hasardan kaçınmak için safir üzerine katılabilir.

Metal aynalarda daha dirençli bir yüzey tabakası ve alt tabaka seçilmeli ve kullanılmalıdır. En iyi çözümün (IR bölgede) saf bakır, gümüş ya da altının bakır ya da molibdenyum üzerine katkılanması olduğu gözükmemektedir. Koruyucu (izolasyonlu) tabakalardan kaçınılması gerekmektedir (Karslı 2006).

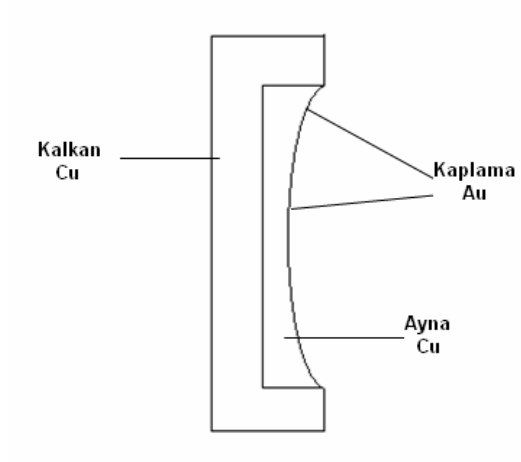
Basit, etkili fakat çok pahalı bir çözüm ise optik kaviteyi uzatarak aynalar üzerindeki gücü azaltmaktır.

Ayna yüzeyi dielektrik bir tabaka ile kaplanırsa kaplama termal ısınmalarla ayna karakteristiklerini değiştirecektir. İndüklenmiş ayna hasarı ise SEL kazancını etkileyecek ve SEL için zararlı olabilecektir. Gümüş ve altın kaplama olarak tercih edilen iki aynanın da kazanç aralığı yaklaşık olarak aynıdır. Ancak burada göz önünde bulundurulması gereken, ısıya daha dayanıklı olan aynanın daha büyük avantaj oluşturacağıdır.

Metalik aynaların dielektrik olanlara göre daha kolay soğutulabilme gibi bir avantajları vardır. Isınma tabii ki salındırıcı magnetteki yüksek harmoniklerden ve ışınımın ayna üzerindeki etkisinden kaynaklanmaktadır. Aynalar metalikse aynanın arkasındaki su soğutucusu ya da aynaya monte edilen su kanalları ile ayna yüzeyinde daha etkin bir soğuma oluşturulacaktır. Bu olay tam yansıtma sağlayan arkadaki ayna için kullanılabilir. Ortasında bir delik olan aynalarda ayna hasarından kaçılabilir ve soğutucuya ihtiyaç kalmaz (Karslı 2006).

THM IR-FEL optimizasyonunda örnek alınan ELBE FEL laboratuvarında kullanılan tüm aynaların yapısı BAKIR, kaplamaları ise ALTIN'dır. Ayna ve kaplama malzemesinin elde edilecek FEL'in dalga boyu ve gücü ile orantılı olduğu öğrenilmiştir.

- En iyi kaplama gerek yansıtıcılık gerek verim bakımından altın.
- Aynaları korumak için de kaplama malzemesi olarak altın. (Çünkü bakır altına göre daha iyi iletkenidir)
- Ayrıca 20  $\mu\text{m}$ 'den daha büyük dalga boyları üretmek için altın.



Şekil 2.22 Kaplama örneği (www.fzd.de)

Çizelge 2.8 Kaplama çeşitleri ve özellikleri (Mete *et all* 2006)

Kaplama türü	Dalgaboyu aralığı (nm)	Yansıtma	Özellik
<b>Metalik aynalar</b>			
UV zenginleştirilmiş aliminyum	250-600	$R_{aug} > 90\%$	UV yansıtırlığı $MgF_2$ kaplama ile artırılmış
Korumalı Aliminyum	400-700	$R_{aug} > 88\%$	$SiO$ kaplama ile görünür yansıtırlığı artırılmış
Zenginleştirilmiş aliminyum	450-700	$R_{aug} > 93\%$	Çok katlı dielektrik tabaka görünür ve yakın kızılötesi yansıtırlığı artırılmış
Korumalı Gümüş	0,48-20 $\mu m$	$R_{aug} > 96\%$	Görünür ve kızılötesi performansı aliminyum kaplamaya göre daha iyi
Korumalı Altın	0,65-20 $\mu m$	$R_{aug} > 96\%$	Yakın kızılötesi ve kızılötesi performansı gümüşe göre daha iyi
<b>Dielektrik aynalar</b>			
Geniş band aynaları	488-694 700-950	$R > 98-99\%$	Geniş bir band aralığı için yüksek yansıtırlık
Lazer çizgi aynaları	325-1550	$R > 99\%$	Dar bir band aralığı için yüksek yansıtırlık
Yüksek enerji excimer lazer aynaları	193, 248, 308, 352	$R > 99\%$	Excimer lazerler için yüksek yansıtırlık
Yüksek enerji Nd:YAG lazer aynaları	266, 354.7, 532, 1064	$R > 99\%$	Nd:YAG lazerler için yüksek yansıtırlık
Geniş band süper aynaları	485-700 700-910	$R > 99\%$	Geniş band aynalar için en yaygın ve yüksel yansıtırlık
Düşük kayıplı süper aynalar	583-1659	$R > 99\%$	Ticari aynalar içinde en yüksek yansıtırlık ve en az kayıp

## 2.6 Düşük Kazanç Parametreleri

Kazanç modellemelerinde genel yöntem, sürekli bir ideal elektron demeti varsayarak düşük kazanç parametresini hesaplamak, elektron demetinin doğal yapısını düşünerek değişik kazanç azaltma faktörlerini hesaba katmak ve elektron ve optik demet arasındaki etkileşimi etkileyen belirli sınırlamaları modellemektir (Thompson 2004).

Düzeltilmiş kazanç parametresi frekansın bir fonksiyonu olan tüm kazanç spektrumunu modellemek için kullanılabilir ya da maksimum ulaşılabilir kazanç hesaplanabilir. Düşük kazançta elektronların salındırııcıdan gidiş gelişleri sırasında optik alanın sabit kaldığı varsayılmaktadır. Daha yüksek kazançlarda daha yüksek mertebelerde düzeltmeler uygulandığından bu varsayım geçersiz kalmaktadır (Thompson 2004).

### 2.6.1 Düzlemsel (planar) bir salındırııcı

Bakker düşük tek geçiş parametresini;

$$g_o = 4\pi \frac{J}{I_A} K_{rms}^2 N^3 \frac{\lambda_U^2}{\gamma^3} F(\xi) \quad (2.22)$$

olarak vermektedir.  $g_o$  kazanç parametresi,  $J$  elektron akım yoğunluğu ve  $I_A$  Alfven akımı,  $N$  salındırııcı magnet periyod sayısı,  $\lambda_U$  salındırııcı magnet periyodu ve  $F(\xi)$  planar bir salındırııcı magnetde periyodik kavite ayar parametresinden kaynaklanan kazanç azalmasını hesaplayan bir parametredir.

$$F(\xi) = [J_0(\xi) - J_1(\xi)]^2 \quad (2.23)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_{rms}^2}{1 + K_{rms}^2} \quad (2.24)$$

$J_0$  ve  $J_1$  birinci mertebeden Bessel fonksiyonları ve

$$K_{ms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{eB_u \lambda_U}{2\pi mc} \quad (2.25)$$

Ciocci ve Dattoli düşük kazanç parametresine farklı bir tanımlama kazandırmışlardır (Thompson 2004).

$$g_O = \frac{16\pi}{\gamma} \lambda_R(m) L_U(m) \frac{J}{I_A} N^2 \xi F(\xi) \quad (2.26)$$

$$\xi = \frac{1}{4} \frac{K^2}{1 + K^2/2} \quad \lambda_R = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad K = \frac{eB_u \lambda_U}{2\pi mc} \quad (2.27)$$

### 2.6.2 Helisel (helical) bir salındırıcı

Helisel bir salındırıcı için de benzer eşitlikler kullanılmaktadır. Aşağıdaki eşitlik daha önce verilen kazanç eşitliğinin yeniden düzenlenmiş halidir.

$$g_{O, helisel} = \frac{16\pi}{\gamma} \lambda_R(m) L_U(m) \frac{J}{I_A} N^2 \xi \quad (2.28)$$

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K^2}{1 + K^2} \quad \lambda_R = \frac{\lambda_U}{2\gamma^2} (1 + K^2) \quad (2.29)$$

Bu eşitliklerde salındırıcı kuvveti  $K$ ,  $2K$  ile yer değiştirmiştir ve kavite ayar parametresi helisel duruma uygulanamaması sebebiyle kaldırılmıştır (Thompson 2004).

### 2.6.3 Maksimum ideal kazanç

$$G_{\max} = 0.27\pi g_0 \quad (2.30)$$

eşitliği ile verilir. Gerçek SEL kazancının hesaplanması için kazanç parametresine uygun düzeltmelerin uygulanması gerekmektedir (Thompson 2004).

### 2.6.4 Kazanç düzeltme faktörleri

Düzeltilme faktörlerinde standard K değerleri kullanılmıştır (Thompson 2004).

#### Demet enerji yayılımının düzeltilmesi;

$$C_e = \frac{1}{1+1.7\mu_e^2} \quad \mu_e = 4N \frac{\sigma_\gamma}{\gamma} \quad (2.31)$$

#### Demet yayılımının düzeltilmesi;

$\varepsilon$  demet yayılımı ve tamamen eşleşmiş silindirik demetler  $\varepsilon = \varepsilon_x = \varepsilon_y$  için,

$$C_{x,y} = \frac{1}{1+\mu_{x,y}^2} \quad \mu_x = \pi N \frac{\gamma\varepsilon}{\lambda_U} \frac{K}{1+K^2/2} \quad \mu_y = \sqrt{2}\pi N \frac{\gamma\varepsilon}{\lambda_U} \frac{K}{1+K^2/2} \quad (2.32)$$

#### Boyuna kayma düzeltmesi;

Elektronlar salıncıyı geçerken salıncı periyodu başına bir ışın dalgası oluştururlar. Bu şekilde oluşan toplam kayma  $N\lambda$ 'dır. Elektron paketinin uzunluğu kayma uzunluğuna yakın büyüklükteyse bu durumda optik atma daha kısa olan elektron paketçisinden daha baskın gelir ve etkileşme süresi azalır. Bu sebeple seçilen elektron

paketçinin boyu kayma uzunluğundan büyük olmalıdır.  $\sigma_z$  elektron paketçik uzunluğu ise kazanç azaltma faktörü;

$$C_c = \left(1 + \frac{\mu_c}{3}\right)^{-1} \quad \mu_c = \frac{N\lambda_R}{\sigma_z} \quad (2.33)$$

**Doldurma faktörü;**

Elektron ve optik demetlerin etkileşmesinin hesaplanmasında da düzeltme yapılması gerekmektedir. Değişik doldurma faktörleri önerilebilir. En basit doldurma faktörü elektron ( $\Sigma_e$ ) ve optik ( $\Sigma_L$ ) demetlerin enine kesit alanlarının oranıdır.

$$\Sigma_e < \Sigma_L \text{ ise } F = \frac{\Sigma_e}{\Sigma_L} \text{ diğer durumda } F = 1 \text{ 'dir.}$$

Bakker doldurma faktörünü;

$$F_1 = \frac{3}{2} \frac{\Sigma_e}{N\lambda_U\lambda_R} \text{ olarak verir.}$$

Gerçek kazancın hesaplanmasında ideal kazanç, katsayısı verilen düzeltme faktörleri ile çarpılır;

$$\hat{g}_0 = g_0 C_e C_x C_y C_c F \quad (2.34)$$

Maksimum kazanç;

$$G_{\max} = 0.85 \hat{g}_0 + 0.19 \hat{g}_0^2 \quad (2.35)$$

Bu açıklama  $\hat{g}_0 \leq 0.2$  için 5% oranında doğrudur. Dattoli'ye göre, daha yüksek değerler için üçüncü mertebe açıklaması kullanılmalıdır (Thompson 2004).

$$G_{\max} = 0.85 \hat{g}_0 + 0.19 \hat{g}_0^2 + 4.12 \times 10^{-3} \hat{g}_0^3 \quad (2.36)$$

### **3. MATERYAL ve YÖNTEM**

#### **3.1 Materyal**

Osilatör SEL sisteminde optik kavite yapıları ve lazer kazanç mekanizmaları konulu tez çalışmasında IR-SEL konulu kaynak kitaplardan, yayınlanmış makalelerden, YUUP proje sonuç raporlarından ve dünyadaki IR-SEL laboratuvarlarının internet sitelerinden yararlanılmıştır. Bu kaynaklardaki denklemler ve optimizasyonda kullanılan parametreler dikkate alınarak, Mathematica 5.2 ve FELO programlarından yararlanılarak SEL ile ilgili çeşitli grafikler elde edilmiştir.

#### **3.2 Yöntem**

Türk Hızlandırıcı Merkezi projesinde elde edilmesi planlanan IR-SEL'in optik kavite parametreleri ve kazanç mekanizması incelenmiştir. Bu incelemeler sırasında dünyadaki çeşitli IR- SEL laboratuvarlarının temel parametreleri ve optik kavite yapıları belirlenmiştir . Parametreleri örnek alınan laboratuvarlar ELBE, CLIO, iFEL, JAERI ve FELIX laboratuvarlarıdır. Bu laboratuvarların parametrelerine, laboratuvarların internet sayfalarından ve laboratuvarlar ile ilgili internetten yayınlanan makalelerden ulaşılmıştır.

Optimizasyon çalışmalarında elde edilen ışınının karakteristiğinin incelenmesi amacıyla ASTeC CCLRC Daresbury Laboratuvarı tarafından geliştirilen SDDS uyumlu, zamana bağlı bir boyutlu osilatör serbest elektron lazer kodu (FELO) kullanılarak ışınının kavite içerisindeki doyum süreci kullanılarak bazı parametreleri gözlemlenmiştir. FELO programı kullanılarak, Kazanç-Geçiş Sayısı ve elde edilen ışınının, Çıkış Pik Gücü-Paketçik Boyu, Atma Enerjisi-Geçiş Sayısı ve Maksimum Yoğunluk (Atmanın)-Geçiş Sayısı grafikleri çizdirilmiştir.

## 4. BULGULAR

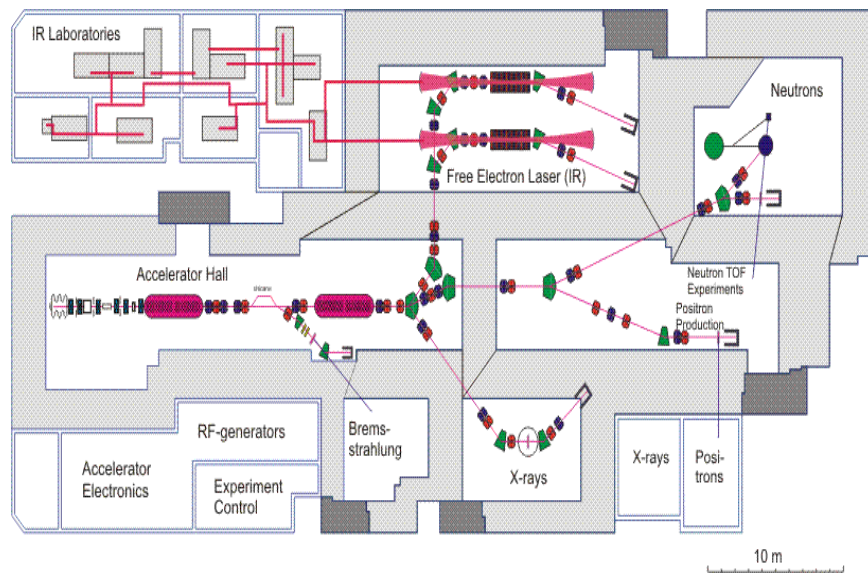
### 4.1 Dünyadaki IR-SEL Laboratuvarları

IR-SEL elde edilen ve optik kavite sistemi baz alınan ELBE laboratuvarı, CLIO, FELIX, iFEL ve JAERI laboratuvarları örnek olarak alt başlıklar halinde verilmiştir. Ayrıca Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) konulu YUUP projesinde merkezin ilk aşamasını oluşturacak olan Serbest Elektron Lazeri ( osilatör SEL) laboratuvarının optik kavite parametreleri ve de kazanç mekanizması FELO programından yararlanılarak incelenmiştir.

#### 4.1.1 ELBE (Almanya)

Almanya 'da bulunan eski adı Rossendorf Bilim Merkezi (FZR) olan Dresden Bilim Merkezi (FZD) altı enstitü ve iki temel bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerden biri de ELBE ışınım kaynağıdır (radiation source ELBE) (<http://www.fzd.de> 2008).

ELBE (Electron Lineer accelerator with high Brilliance and low Emittance) SEL laboratuvarı, 5  $\mu\text{m}$  ile 150  $\mu\text{m}$  arasında kızılötesi bölgede koherent ışınım üretmektedir. Alınan ışınımın geniş bir aralığa sahip olması bu lazer ile uygulamaları arttırmaktadır.



Şekil 4.1 ELBE Binasının şematik olarak gösterimi (<http://www.fzd.de> 2008)

Çizelge 4.1 ELBE elektron demeti, undulator ve lazer parametreleri

<b>ELBE elektron demet parametreleri</b>		
Kinetik enerji ( MeV )	12-34	
Paketçik yükü ( pC )	77	
Paketçik tekrarlama frekansı ( MHz )	13	
Ortalama demet akımı ( mA )	1	
Boyuna demet yayını ( keV*ps )	50	
Enine demet yayını ( mm*mrad )	13	
<b>Undulator parametreleri</b>	<b>U27</b>	<b>U100</b>
Undulator periyodu ( mm )	27.3	100
Periyod sayısı	68	38
Undulator parametresi	0.3-0.8	0.3-2.7
<b>Lazer parametreleri</b>	<b>U27</b>	<b>U100</b>
Dalga boyu ( $\mu\text{m}$ )	4-25	20-200
Ortalama güç ( W )	0.1-25	0.1-25
Atma enerjisi ( $\mu\text{J}$ )	0.01-2	0.01-2

Çizelge 4.2 ELBE optik kavite parametreleri (<http://www.fzd.de> 2008)

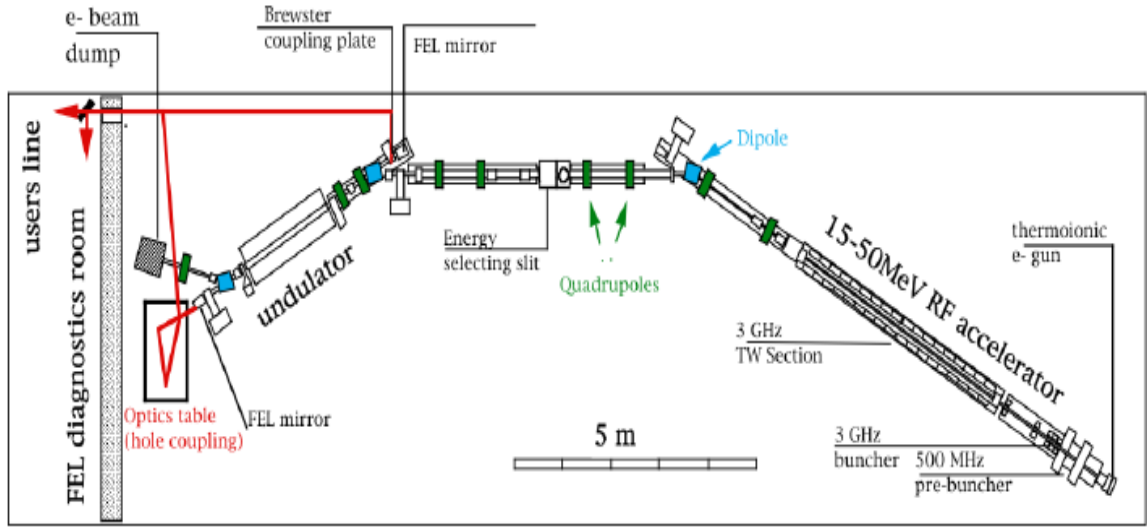
<b>Undulator</b>	<b>U27</b>	<b>U100</b>
Dalga kılavuzu	açık	parçalı
Rezonator uzunluğu ( m )	11.53	
Rayleigh uzunluğu ( m )	1	1.8
Delik yarıçapı ( mm )	1.5	2.0
	2.0	4.5
	3.0	7.0
	4.0	

#### 4.1.2 CLIO (Fransa)

Fransız Ulusal Sinkrotron Merkezi'nin LURE laboratuvarının ışınım kaynaklarından biri olan CLIO, LURE kapandıktan sonra LCP laboratuvarının bir parçası haline geldi. CLIO FEL, yüksek pik güçlü ve ayarlanabilir dalga boylu, orta-kızılötesi (MIR) spektral bölgede çalışan bir laboratuvardır.

CLIO Laboratuvarında elektron üreteç kaynağı olarak elektron 'termo iyonik gun' yaklaşık 50-100 Voltaj değeri aralığında kullanılır. CLIO Laboratuvarında electron Gun'dan üretilen demet 500 MHz bunchers ve 2 ns periyod'a sahiptir. Daha sonra 2 tane sıkıştırıcıda demet sıkıştırılarak sonuçta 250 MHz ve 1 ns elde edilmiştir. Demet hızlandırıcıdan geçtikten sonra ise 5 MeV ve 10 ps'e sahip olarak alınabilir. CLIO Laboratuvarında ayrı bir odada bulunan undulatör sistemi içerisindeki kavite kısmında 3 ayna bulunmaktadır. Bunlardan ikisi değişken yerli, birisi sabittir. Sabit blandan demet 2 mm'lik delikten dışarı alınabilir. CLIO sistemi çalıştırılmadan önce Helyum-neon lazeri ile sistem çalıştırılmış demet yolunda problem olmadığı anlaşıldıktan sonra FEL sistemi çalıştırılmıştır. Optik kavite uzunluğu CLIO'da 12 metredir. CLIO'da undulatör uzunluğu 4.8 metredir. CLIO'da pik akımı makro için 300 mA ve mikropuls için 100 A'dır. CLIO Sistemindeki FEL için toplam güç ihtiyacı saatte 100 kW kadardır. Soğutma sistemi için yaklaşık olarak 10-20 kW civarı güç çekmektedir. Bu güç normal santralden sağlanmaktadır. Çalışma odaları bu güç tüketiminin dışındadır. CLIO Laboratuvarında normal iletken RF yapısındaki soğutma ihtiyacı yenilenen su ile karşılanmaktadır. RF sistemlerden demetin kararlı bir şekilde geçmesi için suyun soğutma derecesi 0.1 C derece tutulmak zorundadır (Yıldız 2007).

CLIO Laboratuvarında beş tane uygulama odası vardır. Çalışılan konular, SEL'den alınan demeti sıvı formdaki örnek ile bozmak suretiyle örneğin kütlelerinin durumuna göre elementel ayrışım yapmaktadırlar ve maddelerin biyolojik incelemesini araştırmaktadırlar. Fourier Transform of Infrared Radiation (FTIR), Atomic Force Microscope (AFM) ile ele alınan örneklerin molekül sel, elementel, veya da lazerin geldiği noktadaki yüzey gelişimi ve değişimi üç boyutta belirleme çalışmaları yapan araştırmacıları bulunmaktadır.



Şekil 4.2 CLIO laboratuvarının şematik gösterimi ([http://www.lcp.u-psud.fr/clio/clio\\_eng/clio\\_eng.htm](http://www.lcp.u-psud.fr/clio/clio_eng/clio_eng.htm))

Çizelge 4.3 CLIO demet karakteristikleri

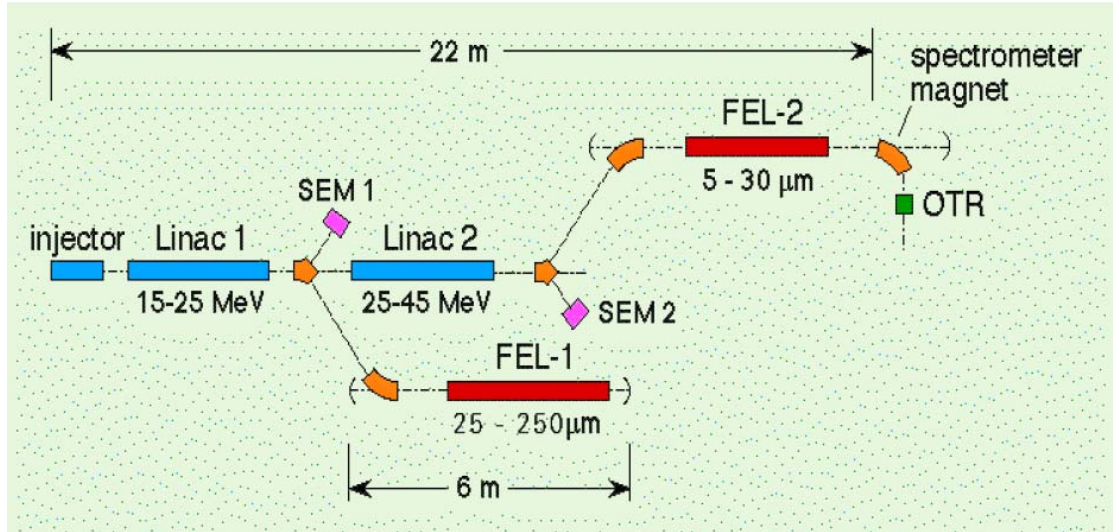
Enerji aralığı (MeV)	8 - 50
Mikro atma uzunluğu (ps)	10 -15
Makro atma uzunluğu ( $\mu$ s)	12
Pik akımı (makro atma) (mA)	300
Pik akımı (mikro atma) (A)	100
Elektrik yükü (nC)	1
Makro atma tekraralama oranı (Hz)	12.5 – 25 - 50
Normalize emittans ( $\pi$ mm mrad )	150

Çizelge 4.4 CLIO optik kavite parametreleri

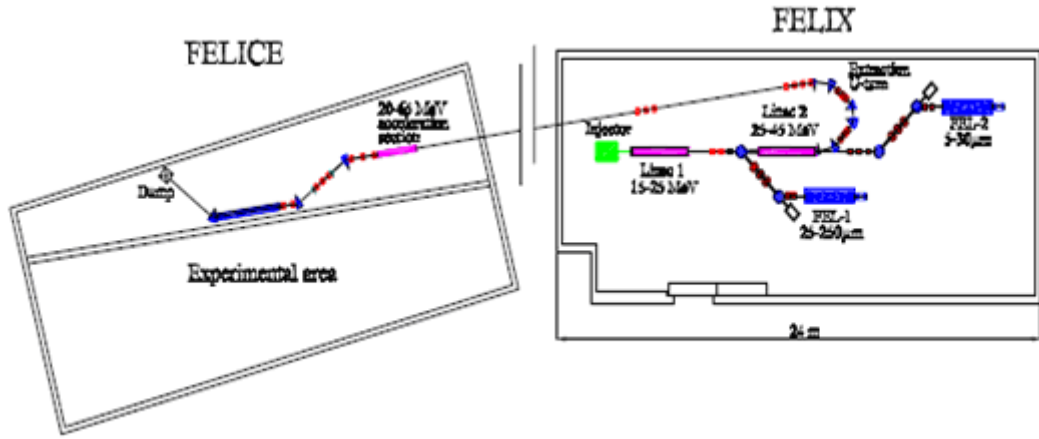
Uzunluk (m)	4.8
Aynalar	Gümüş kaplamalı, çapı 38mm
Rayleigh uzunluğu(m)	1.2
Delik çapı (mm)	1-3

### 4.1.3 FELIX (Hollanda)

FOM (Fundamental Research on Matter)-Institute for Plasma Physics Rijnhuizen, FELIX / FELICE (Free Electron Laser for Intra-Cavity Experiments) normal iletken teknolojisiyle çalışan, uygulama alanları büyük bir laboratuardır. FELIX Laboratuvarı, elektron tabancasından, normal iletken RF sistemlerinden, lineer hızlandırıcıdan, kuadrupol magnetlerden, bending magnetlerden ve üç tane undulatör sisteminden oluşmaktadır. Bu laboratuarda birbirini takip eden iki tane 6'şar metrelik undulatör sistemi vardır. Üçüncü undulatör bu iki undulatörün paralelinde yerleştirilmiş bulunmaktadır ve 9 m. uzunluğundadır (Yıldız 2007).



Şekil 4.3 FELIX FEL-1 ve FEL-2'nin şematik görünümü (<http://www.rijnh.nl/felix>)



Şekil 4.4 FELICE'nin şematik görünümü (<http://www.rijnh.nl/felix>)

FELIX Laboratuvarında elektron üreteç kaynağı olarak elektron 'termo iyonik triode gun' kullanılmaktadır ve bu yaklaşık olarak 600 V katod-grid voltaj değerine sahiptir. Elektron gun, polietilen insulator kapak ile korunmaktadır.

FELIX Laboratuvarındaki klystron 15-20 MWatt güce sahiptir. FELIX'te üretilen demetin dalga boya aralığı 4-250  $\mu\text{m}$  aralığındadır. Makro atma enerjisi 50-100 mJ aralığındadır. RF normal iletken yapıda olduğundan dolayı önem kazanan mikro atma duration 6 ile maksimum 100 optical cycles ki bu değer minimum band genişliği (0.4%) değerindedir ve mikro atma enerjisi ise 1-50 mikro joule değerlerindedir. FELIX demetine ait mikro atma gücü 0.5 ile pik şiddeti olan 100 MW ve mikro atma tekrarlama oranı 25-1000 MHz arasında olup, mikro atma duration 10 mikro saniyeden küçüktür. FELIX'de soğutma deionize su ile sağlanmaktadır. Laboratuvar sistemi içinde kapalı bir devre halinde deionize su kullanılmaktadır. Belli bölgelerde deionize su ile karıştırılmadan etkileşmesi sağlanarak soğutulma işlemi için kullanılan tep ve yeraltı suyundan yararlanılır.

FELIX1 Laboratuvarında bulunan undulator sistemi içerisindeki kavite kısmında 6 ayna bulunmaktadır. Bunlardan beşi upstream, birisi ise waveguide durumu için downstream'dir. Demetin dışarı alınabildiği 2 mm'den başlayan delikler vardır. FELIX2'de 3 ayna upstream, 3 aynada downstream yerleştirilmiştir. Bunlar 3'üncü harmoniklerde demet üretir, yani dar banda sahiptirler. FELIX sistemi çalıştırılmadan

önce görünür bölgede bulunan Helyum-neon lazeri ile sistem çalıştırılmış ve demet yolunda problem olmadığı anlaşıldıktan sonra FEL sisteminden demet alımı başlamıştır. Daha büyük dalga boylarını kapsadığı için aynalar altın kaplama seçilmiştir.

FELIX/FELICE Laboratuvarındaki çalışma istasyonları çok çeşitli uygulamalara sahiptir. FELIX'ten elde edilen FEL demetinin 25% kadarı FELIX'teki bilim adamlarının çalışmasına sunulmakta, diğer kalan kısımda dışarıdan (Hollanda dışı veya içi) gelen uygulamalarına hizmet vermektedir. FELIX'teki bilim adamlarının çalışma odalarına FEL demeti odanın tavanından taşınarak paslanmaz çelik içerisinde gelmekte ve 5'e ayrılmaktadır (Yıldız 2007).

- Bu 5 demetten birisi incelenecek madde üzerine gönderilerek maddenin ışığı soğurum durumu TOF (Time of Flight) kütle spektroskopisi kullanılarak iyonların gausyen dağılımı gözlemlenebilir.
- Gaz fazı deneyleri yapılabilmektedir. Örneğin benzin gibi gaz moleküllerinin yapılarını anlamak için kullanılan kütle spektrometresi endüstride fazla kullanılan ve katalizör görevi yapan Vannadyum gibi veya da kimyada katalitik proseslerde kullanılan  $Al_{10}O_{15}$  gibi örnekler üzerine FELIX'den elde edilen demet gönderilerek oluşan etkiler incelenmekte ve katalizörleri iyileştirme çalışmaları yapılmaktadır.
- Diğer bir demette kuadropol kütle spektrometresi, RF alanı iyonları bir kuadropol içinde etkilemekte ve bu etki iyonların rezonans durumunda sayılabilmektedir.
- Yine FELIX'ten gelen demet ile biyolojik-moleküler çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmada moleküllerin yapısal bilgisi elde edilebilmektedir.

Dışarıdan gelenlerde (Hollanda içi ve dışı olarak bunlarda genelde 5'e ayrılmaktadır, böylece toplam 10 çalışma alanı bulunmaktadır.)

#### 4.1.4 IFEL (Japonya)

Osaka Üniversitesi'ndeki Serbest Elektron Lazer Enstitüsü, demet fiziği ve SEL ışınımının uygulama araştırmalarının çalışıldığı bir SEL araştırma kuruluşudur. Enstitüdeki ana araştırma alanları, yüksek kalitede ve daha uzun dalga boylarında ışınım elde etme amaçlı demet fiziği, yarıiletken uygulamaları, çevre kimyası ve demet fiziği çalışmalarının demet kalitesini desteklemesinden faydalanılarak çalışılan biyomedikal uygulamalardır.

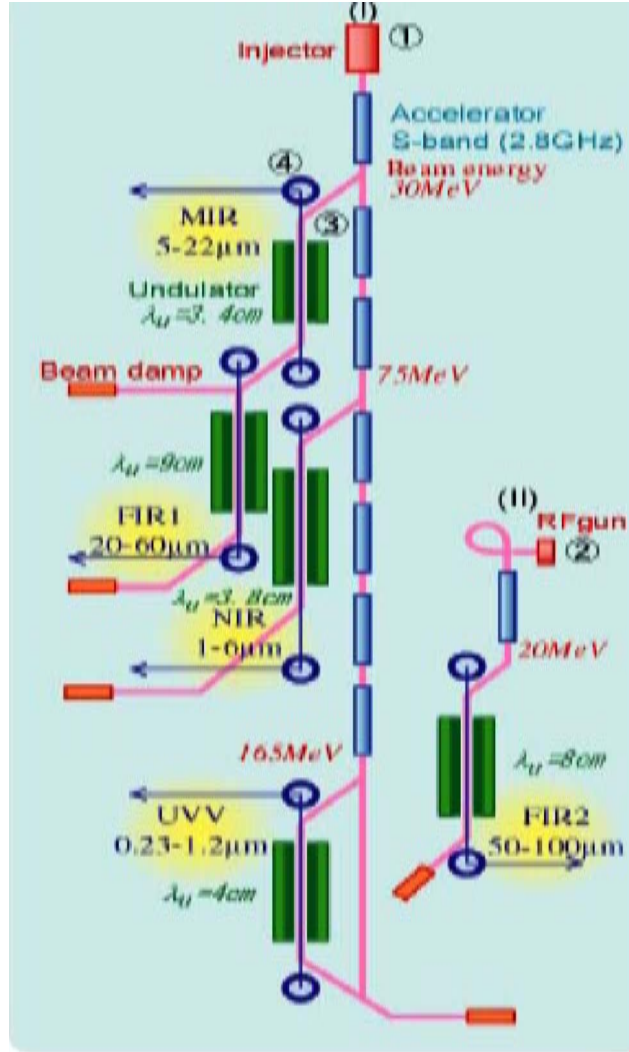
Osaka iFEL'de iki adet lineer hızlandırıcı bulunmaktadır. Bunlardan biri 165 MeV enerjili diğeri ise 20 MeV enerjilidir. Bu hızlandırıcılarla 0.28  $\mu\text{m}$ 'den 60  $\mu\text{m}$ 'ye kadar bir spektral bölgede çalışılabilmektedir.

Çizelge 4.5 iFEL kaynakve paketleyici parametreleri (Tapan 2006)

<b>KAYNAK</b>	
Tip	Thermionic triode
Enerji ( keV )	$\leq 150$
Mikro atma ( ns )	0.5
Mikro yük ( nC )	1.2
Normalize yayınım ( $\pi$ mm mrad )	< 10
Makro atma tekrarlama frekansı ( $\mu\text{s}$ )	24 $\mu\text{s}$ 1-10Hz
<b>ÖN PAKETLEYİCİ</b>	
Tip	Re-entrant kavite
Frekans ( MHz )	714
Q değeri	$\sim 2000$
Pik alanı ( kV )	$\sim 50$
<b>PAKETLEYİCİ</b>	
Tip	Standing wave
Uzunluk ( cm )	49
Enerji ( MeV )	$\sim 5.8$

Çizelge 4.6 iFEL temel parametreleri (Tapan 2006)

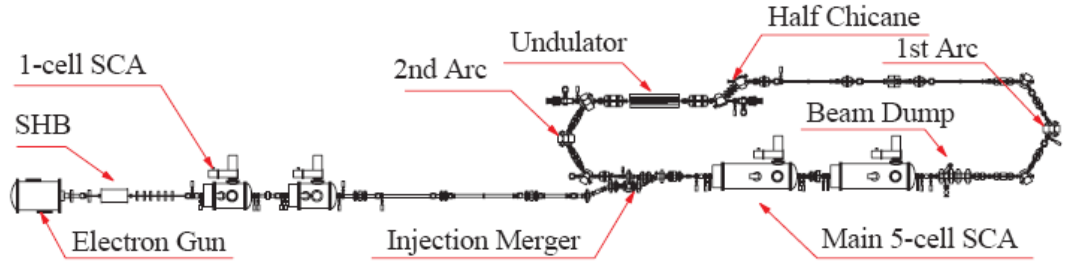
<b>HIZLANDIRICI</b>	<b>UV</b>	<b>NIR</b>	<b>MIR</b>	<b>FIR1</b>	<b>FIR2</b>
Enerji ( MeV )	$\leq 165$	$\leq 75$	$\leq 30$	$\leq 30$	$\leq 20$
Frekans ( MHz )	2856	2856	2856	2856	2856
Pik akımı ( A )	80	60	40	40	40
Normalize yayınım ( $\pi$ mm mrad )	30	30	30	30	30
Mikro atma duration ( ps )	5	7	10	10	10
Mikro atma seperation ( ns )	44.8/5.6	44.8/5.6	44.8/5.6	44.8/5.6	11.2
Makro atma duration ( $\mu$ s )	24	24	24	24	10
Makro atma frekansı ( Hz )	10	10	10	10	10
Ortalama güç ( kW )	2.5	1.3	0.5	0.5	0.5
<b>UNDULATOR</b>					
SEL dalga boyu ( $\mu$ m )	0.23-1.2	1-6	5-22	20-60	50-100
SEL pik gücü ( MW )	10	15	5	5	5
Ortalama güç ( W )	2	3	1	1	1
Tip	Halbach	halbach	halbach	hibrid	halbach
Toplam uzunluk ( m )	2.68	3	2	2.7	2.24
Periyod uzunluğu ( cm )	4	3.8	3.4	9	8
Periyod sayısı	67	78	58	30	28
Aralık uzunluğu ( mm )	16	20	15	30	30
Pik magnetik alan ( T )	0.60	0.40	0.48	0.32	0.31
K parametresi	0.5-2.3	0.5-1.4	0.5-1.5	1-2.7	1-2.3
<b>OPTİK KAVİTE</b>					
Uzunluk ( m )	6.72	6.72	6.72	6.72	5.04



Şekil 4.5 iFEL laboratuvarının şematik görünümü (Tapan 2006)

#### 4.1.5 JAERİ ( Japonya )

JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) laboratuvarında elektron üreteç kaynağı olarak 'termo iyonik katot' kullanılmaktadır ve bu yaklaşık olarak 600 kV DC voltaj değerine sahiptir. JAERI 2002 yılında geliştirmekte oldukları enerji recovery linak, ERL'i tamamladı. (JAERI-ERL)

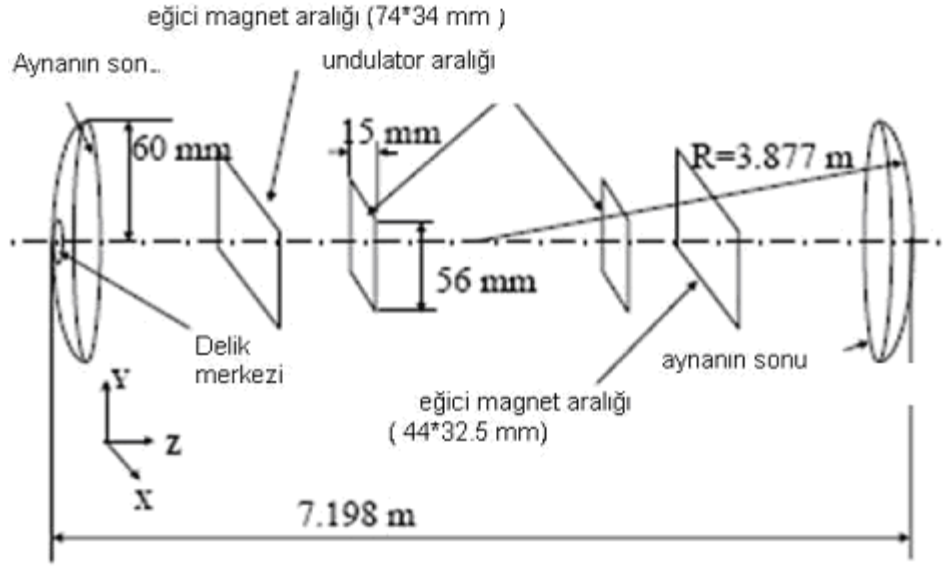


Şekil 4.6 JAERI enerji recovery linak şematik gösterimi (Nagai *et all* 2004)

Elektron tabancasından üretilen elektron demeti 2.5 MeV' e kadar hızlandırılır ve enerji recovery bölmesine enjekte edilir. Elektron demeti süper iletken kaviteeler tarafından 17 MeV' e kadar hızlandırılır ve salındırıcıya gönderilir. Buradan demet tekrar ana kaviteeye aktarılır, enerjisi 2.5 MeV' e düşürülür ve demet durdurucu tarafından toplanır. Bütün süper iletken kaviteeler 499.8 MHz de çalışmaktadır.

Çizelge 4.7 JAERI optik kavite parametreleri (Nagai *et all* 2004)

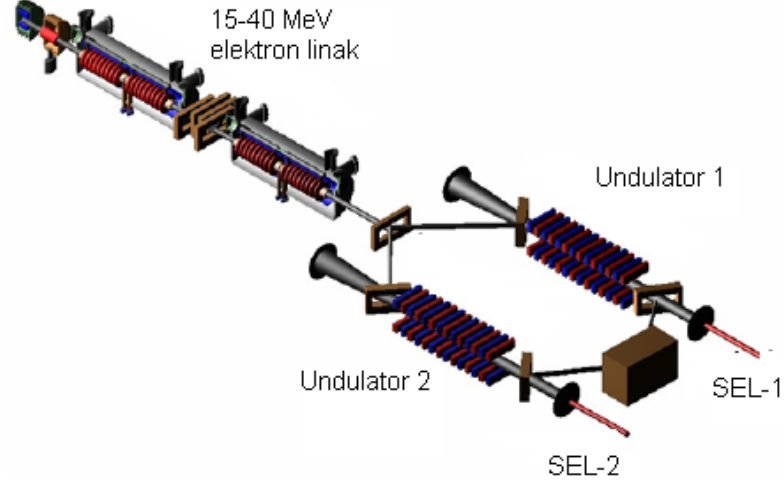
Rezonatör uzunluğu (m)	7.198
Rayleigh uzunluğu (m)	1
Ayna yarıçapı (mm)	60
Ayna yansıtıcılığı	% 99.4
Delik yarıçapı (mm)	1



Şekil 4.7 JAERI optik rezonatör şematik gösterimi (Nagai *et all* 2004)

#### 4.2 THM IR SEL Projesi ( Ankara )

THM projesinin ilk aşamasını osilatör modda çalışacak olan bir Ulusal Serbest Elektron Lazeri Test Laboratuvarı oluşturmaktadır. Amaç, iki farklı optik kavite kullanılarak geniş bir dalga boyu aralığında IR-SEL elde etmektir. SEL Test Laboratuvarında 15-40 MeV enerji aralığındaki bir lineer elektron hızlandırıcısı (linak) ile 2-185 mikrometre dalga boyu aralığında bir kızılötesi serbest elektron lazeri elde edilmesi planlanmaktadır ([www.thm.ankara.edu.tr](http://www.thm.ankara.edu.tr)).



Şekil 4.8 THM IR-FEL'nin şematik planı ([www.thm.ankara.edu.tr](http://www.thm.ankara.edu.tr))

Çizelge 4.8 THM IR-FEL elektron demet parametreleri ([www.thm.ankara.edu.tr](http://www.thm.ankara.edu.tr))

Demet Parametreleri	10 kW güç kaynağı	16 kW güç kaynağı
Enerji ( MeV )	15-40	15-40
Paketçik yükü ( pC )	80	120
Ortalama demet akımı ( mA )	1	1.6
Paketçikler arası mesafe ( ns )	77	77
Paketçik uzunluğu ( ps )	1-10	1-10
Normalize RMS enine yayınım ( mm mrad )	<15	<15
Normalize RMS boyuna yayınım ( mm mrad )	<100	<100

Çizelge 4.9 THM IR-FEL salındırıcı ve lazer parametreleri

<b>THM IR-FEL Salındırıcı Parametreleri</b>	<b>U30</b>	<b>U90</b>
Salındırıcı malzemesi	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>
Salındırıcı (undulator) periyodu (cm)	3	9
Magnetik alan ( T )	0.083 - 0.232	0.075- 0.579
Salındırıcı gap aralığı ( cm )	2 - 3	3 - 9
K parametresi (rms)	0.16 – 0.47	0.44 - 3
Kutup sayısı ( N )	56	40
Salındırıcı uzunluğu ( m )	1.68	3.6
<b>THM IR-FEL Ana Parametreleri</b>	<b>U30</b>	<b>U90</b>
Dalga boyu aralığı ( μm )	2.32 - 27	9- 185
Maksimum pik gücü ( MW )	8	10
Atma enerjisi ( μJ ) (max)	2	4

#### 4.2.1 THM IR-SEL için optik kavite parametrelerinin optimizasyonu

##### 4.2.1.1 Rezonatör uzunluğu

$$L_c = \frac{vT}{2} = \frac{v}{2f} \quad T \longrightarrow 77 \text{ ns}$$

$$f = 1/T \longrightarrow 13 \text{ MHz}$$

$$L_c = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 13 \times 10^6} = 11.53 \text{ m.}$$

#### 4.2.1.2 Rayleigh uzunluğu

En düşük düzeydeki TEM Modu için minimum mod büyüklüğü etkileşme uzunluğu  $L_U$ ,  $Z_R = L_U/(2\sqrt{3})$  olduğunda elde edilir. Buradan THM için Rayleigh uzunlukları,

- a)  $\lambda_u = 3$  cm. için  $L_U = \text{Salındırıcı periyodu} \times \text{Periyod sayısı} = 3 \text{ cm} \times 56 = 1.68 \text{ m}$
- b)  $\lambda_u = 9$  cm. için  $L_U = \text{Salındırıcı periyodu} \times \text{Periyod sayısı} = 9 \text{ cm} \times 40 = 3.6 \text{ m}$

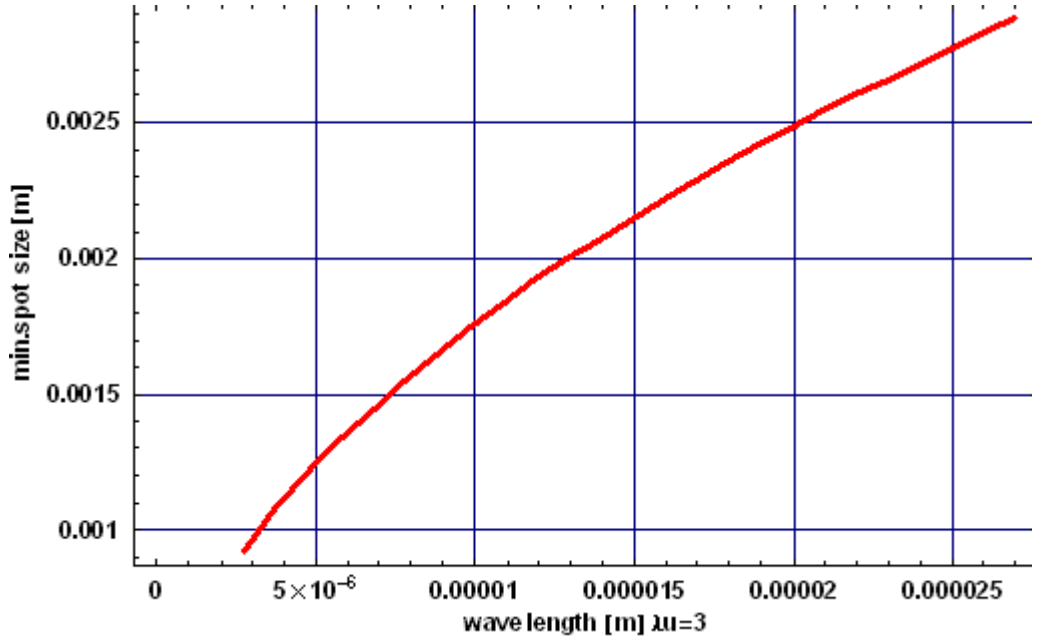
Orta merkezli ya da küresel rezonatör durumunda doldurma faktörü demet çıkış dalga boyu aralığının ( $\lambda_u = 3$  cm için  $\lambda = 2.75 - 27 \mu\text{m}$  ve  $\lambda_u = 9$  cm için  $\lambda = 11 - 185 \mu\text{m}$ ) 50% sinden daha büyük olacağından,

- a)  $\lambda_u = 3$  cm. için Rayleigh uzunluğu  $Z_R = \frac{2 \times L_U}{2\sqrt{3}} = \frac{2 \times 1.68}{2\sqrt{3}} = 0.9699 \text{ m}$ .
- b)  $\lambda_u = 9$  cm. için Rayleigh uzunluğu  $Z_R = \frac{2 \times L_U}{2\sqrt{3}} = \frac{2 \times 3.6}{2\sqrt{3}} = 2.078 \text{ m}$ . bulundu.

#### 4.2.1.3 Işınlamanın minimum spot genişliği

$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_R}$  formülü ile ifade edilen Rayleigh uzunluğu bağıntısından yararlanılarak minimum spot genişliği için sınır değerleri,

- a)  $\lambda_u = 3$  cm ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $\lambda_R = 2.75 \mu\text{m}$  için,  
 $w_0 = 9.214 \times 10^{-4} \text{ m}$ .
- b)  $\lambda_u = 3$  cm ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $\lambda_R = 27 \mu\text{m}$  için minimum spot genişliği,  
 $w_0 = 2.887 \times 10^{-3} \text{ m}$ .

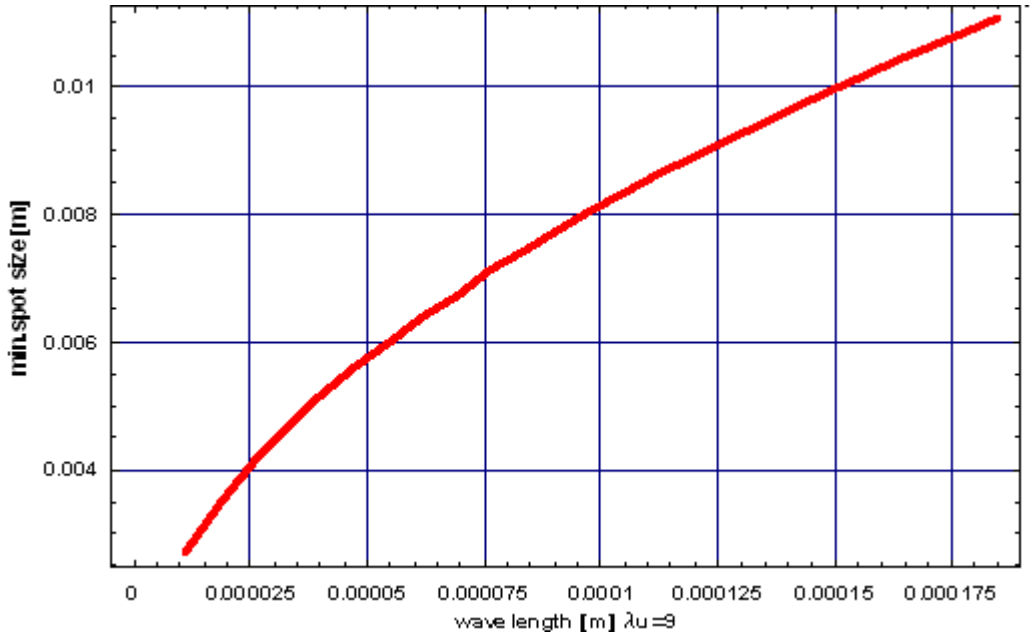


Şekil 4.9 THM IR –SEL U30 için dalga boyuna karşı minimum spot genişliği değişimi

c)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $\lambda_R = 11 \text{ } \mu\text{m}$  için,

$$w_0 = 2.697 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

d)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $\lambda_R = 185 \text{ } \mu\text{m}$  için,  $w_0 = 0.0110 \text{ m}$ . bulundu.



Şekil 4.10 THM IR –SEL U90 için dalga boyuna karşı minimum spot genişliği değişimi

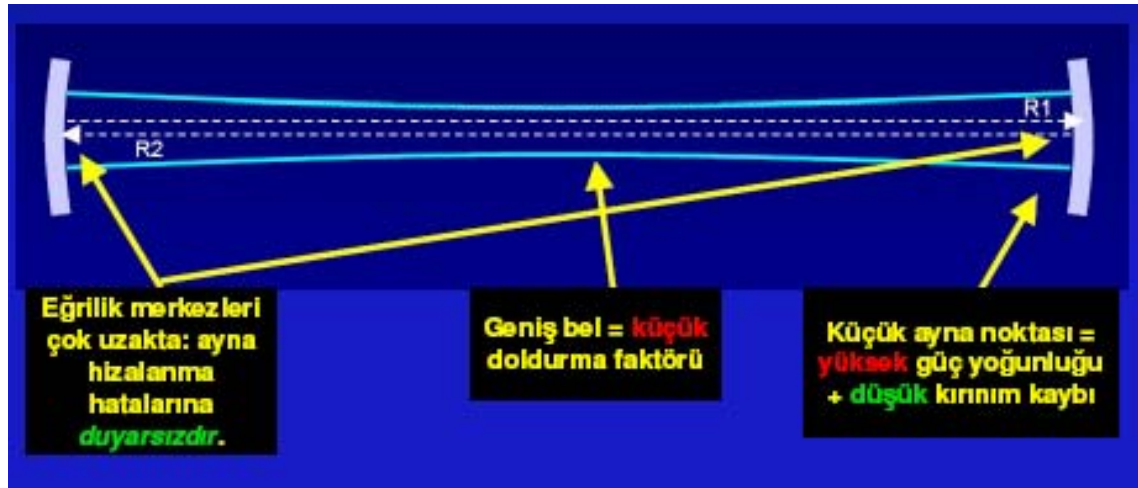
#### 4.2.1.4 $R_1$ ve $R_2$ ayna eğrilik yarıçapları

$Z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda_R}$  ile ifade edilen Rayleigh uzunluğu ve  $w_0^2 = \frac{\lambda_R}{2\pi} \sqrt{L_C(2R - L_C)}$  verilen minimum spot genişliği bağıntılarından yararlanılarak elde edilen  $2Z_R = \sqrt{L_C(2R - L_C)}$  bağıntısı eğrilik yarıçaplarının hesabında kullanıldı ve,

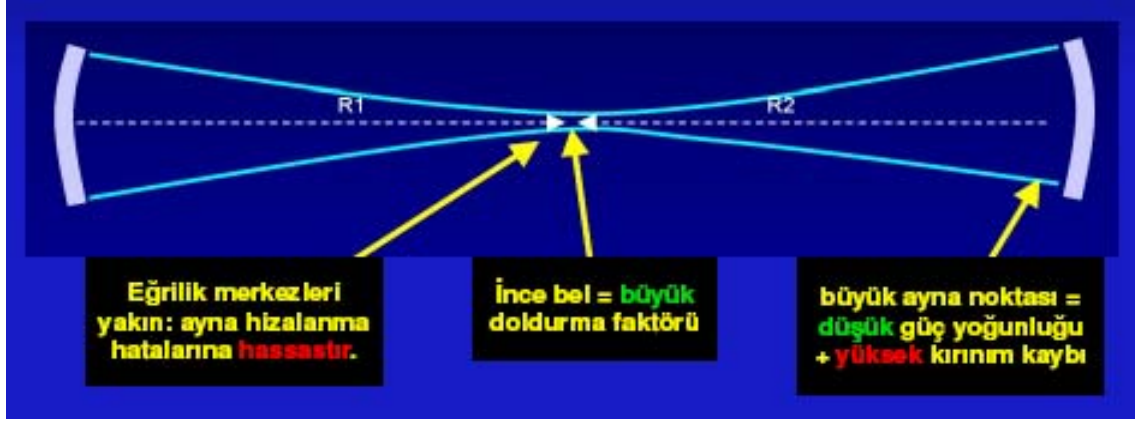
a)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$ ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$ . için,  
 $R_1 = R_2 = R = 5.9281 \text{ m}$ .

b)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$ ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$ ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$ . için,  
 $R_1 = R_2 = R = 6.5140 \text{ m}$ . olarak hesaplandı.

THM IR-FEL için simetrik ve hemen hemen küresel (küçük bel genişliği, büyük ayna spotu) rezonatör seçildi. ( $R_1 = R_2$ )



Şekil 4.11 (Confocal) Eş Odaklı Rezonatör



Şekil 4.12 (Concentric) Küresel Rezonatör

#### 4.2.1.5 Rezonatör parametreleri

$g_1 = 1 - \frac{L_c}{R_1}$  ve  $g_2 = 1 - \frac{L_c}{R_2}$  formülleri ile ifade edilen rezonatör parametreleri

bağıntılarından yararlanılarak,

a)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$ ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $R_1 = R_2 = R = 5.9281 \text{ m}$  için,

$$g_1 = g_2 = -0.9449$$

b)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$ ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $R_1 = R_2 = R = 6.5140 \text{ m}$  için,

$$g_1 = g_2 = -0.770 \text{ hesaplandı.}$$

#### 4.2.1.6 İki ayna üzerindeki demet spotlarının genişliği

Spot genişlikleri lazer dalga boyuna bağlı olduğu için ve lazer dalga boyu da 2 ile 185  $\mu\text{m}$  arasında değiştiğinden dolayı sınır değerleri dikkate alınarak hesaplama yapıldı.

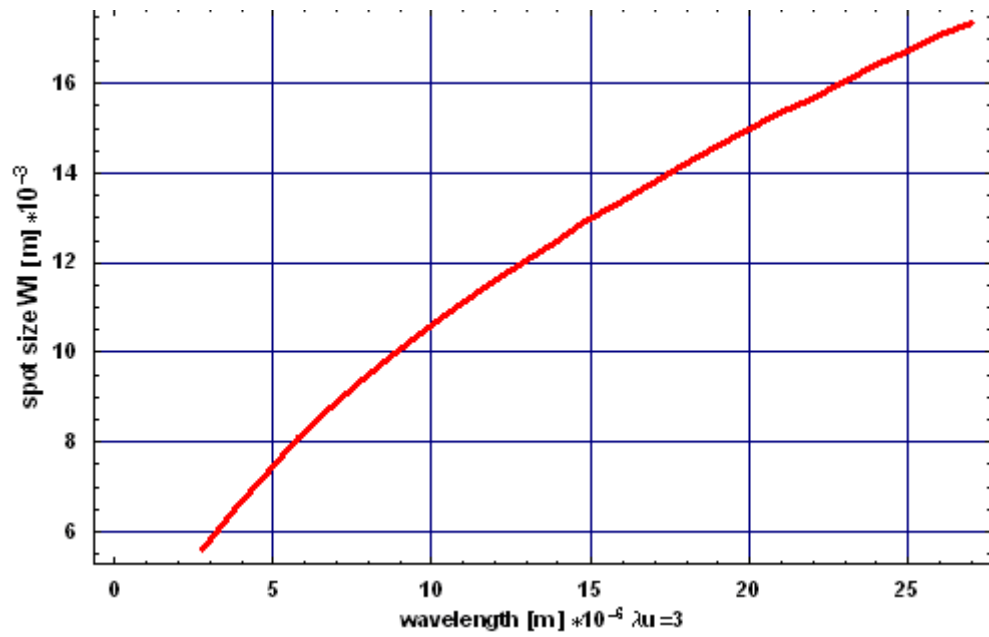
$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left( \frac{g_2}{g_1 (1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ ifadesinden yararlanılarak,}$$

a)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.9449$  ,  $\lambda_R = 2.75 \text{ }\mu\text{m}$   
için ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 5.5525 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

b)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.9449$  ,  $\lambda_R = 27 \text{ }\mu\text{m}$   
için ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 0.01739 \text{ m. bulundu.}$$



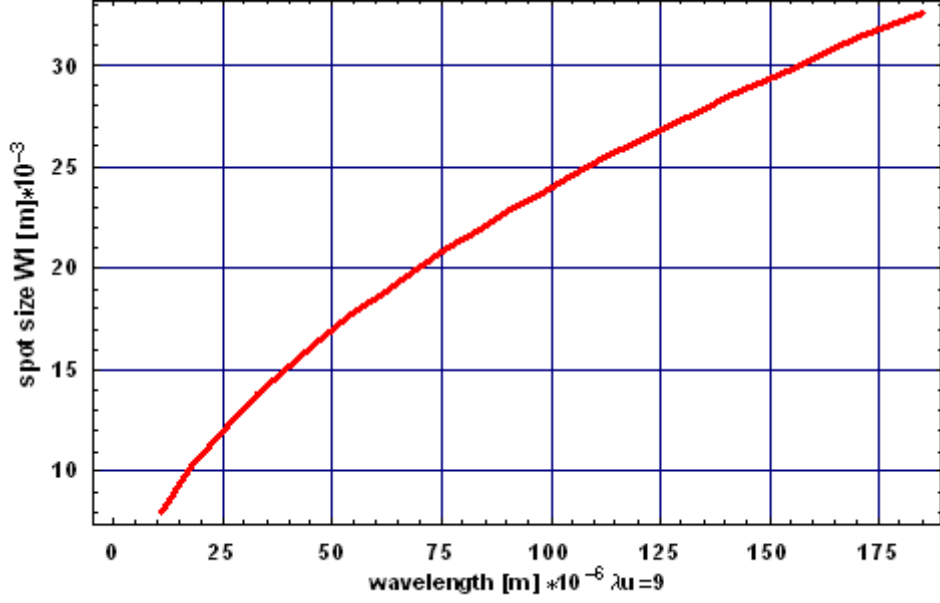
Şekil 4.13 THM IR –SEL U30 için dalga boyuna karşı birinci ayna spot genişliği değişimi

c)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.770$  ,  $\lambda_R = 11 \text{ }\mu\text{m}$  için  
ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 7.9544 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

d)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.770$  ,  $\lambda_R = 185 \text{ }\mu\text{m}$  için  
ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 0.03262 \text{ m. bulundu.}$$



Şekil 4.14 THM IR –SEL U90 için dalga boyuna karşı birinci ayna spot genişliği değişimi

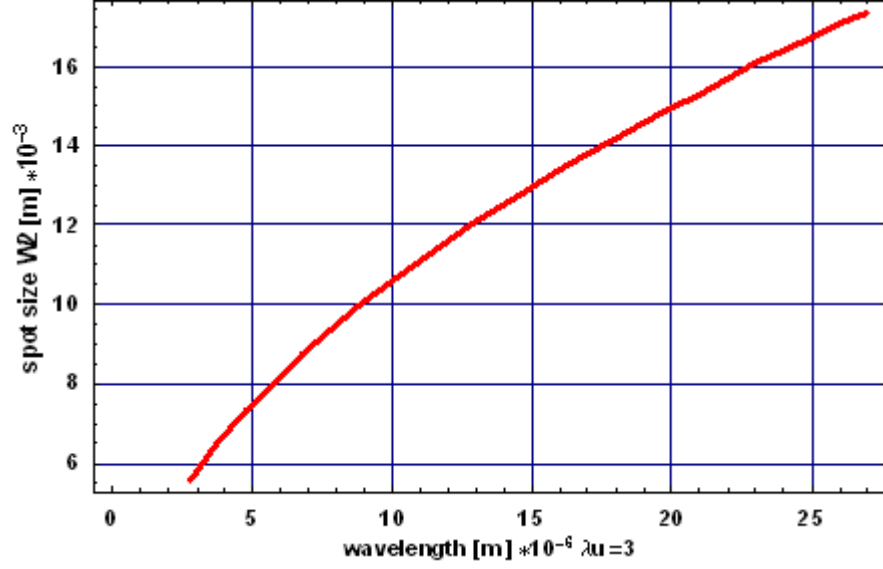
$$w_2 = \sqrt{\frac{L_c \lambda_R}{\pi}} \left( \frac{g_1}{g_2 (1 - g_1 g_2)} \right)^{\frac{1}{4}} \text{ ifadesinden yararlanılarak,}$$

a)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $g_1 = g_2 = -0.9449$  ,  $\lambda_R = 2.75 \text{ }\mu\text{m}$   
için ikinci ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 5.5525 \times 10^{-3} \text{ m.}$$

b)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 0.9699 \text{ m}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $g_1 = g_2 = -0.9449$  ,  $\lambda_R = 27 \text{ }\mu\text{m}$   
için ikinci ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 0.01739 \text{ m. bulundu.}$$



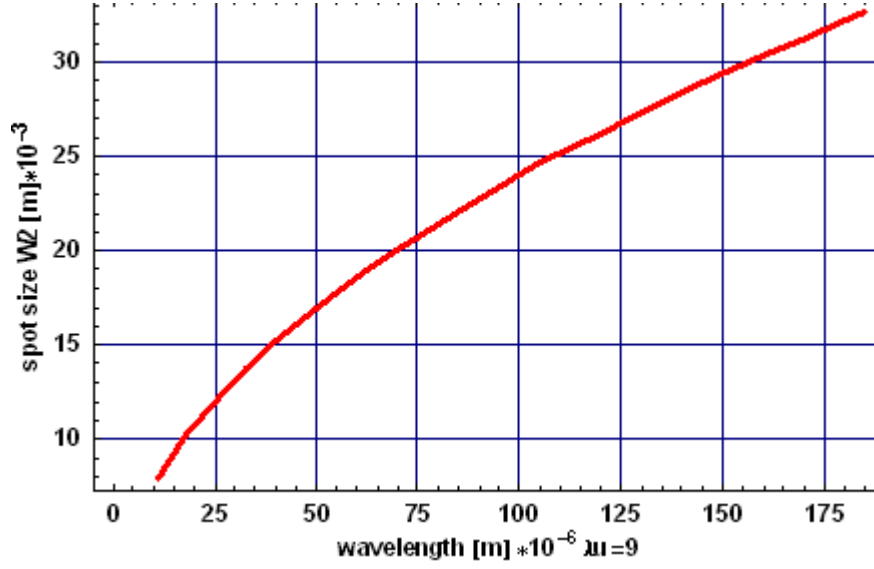
Şekil 4.15 THM IR –SEL U30 için dalga boyuna karşı ikinci ayna spot genişliği değişimi

c)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.770$  ,  $\lambda_R = 11 \text{ } \mu\text{m}$  için ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 7.9544 \times 10^{-3} \text{ m}.$$

d)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$  ,  $Z_R = 2.078 \text{ m}$  ,  $L_C = 11.53 \text{ m}$  ,  $g_1 = g_2 = -0.770$  ,  $\lambda_R = 185 \text{ } \mu\text{m}$  için ayna üzerindeki demet spotu,

$$w_1 = 0.03262 \text{ m} \text{ bulundu.}$$



Şekil 4.16 THM IR –SEL U90 için dalga boyuna karşı ikinci ayna spot genişliği değişimi

#### 4.2.1.7 Rayleigh uzunluğu

Daha önce hesapladığım Rayleigh uzunluğu parametresini, rezonatör parametrelerini

$(g_1, g_2)$  elde ettikten sonra  $Z_R^2 = \frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} L_c^2$  ifadesinden yararlanarak

tekrar hesapladım.

a)  $\lambda_u = 3 \text{ cm}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $g_1 = g_2 = -0.9449$  için Rayleigh uzunluğu,  
 $Z_R = 0.970 \text{ m}$ .

b)  $\lambda_u = 9 \text{ cm}$ ,  $L_c = 11.53 \text{ m}$ ,  $g_1 = g_2 = -0.770$  için,

$Z_R = 2.078 \text{ m}$  bulundu ve  $Z_R = \frac{2 \times L_u}{2\sqrt{3}}$  bağıntısı kullanılarak elde edilen

değerlerle uyum içinde olduğu gözlemlendi.

Çizelge 4.10 THM IR-FEL için optik kavitenin ana parametreleri

<b><u>Parametre</u></b>	<b><u>U30</u></b>	<b><u>U90</u></b>
Rezonatör Tipi	Simetrik, küresel	
Undulatör periyodu, $\lambda_U$ (cm)	3	9
Undulatör boyu, $L_U$ (m)	1.68	3.6
Optik kavite uzunluğu, $L_c$ (m)	11.53	
1. ayna eğrilik yarıçapı, $R_1$ (m)	5.9281	6.5140
2. ayna eğrilik yarıçapı, $R_2$ (m)	5.9281	6.5140
Rayleigh uzunluğu, $Z_R$ (m)	0.9699	2.078
Kontrol parametresi, $g_1^*g_2$	(-0.9449)* (-0.9449)	(-0.770)* (-0.770)
Minimum spot genişliği, $w_0$ (m)	$9.214 \times 10^{-4}$ ( $\lambda_R = 2.75 \mu m$ için)	$2.697 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 11 \mu m$ için)
Minimum spot genişliği, $w_0$ (m)	$2.887 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 27 \mu m$ için)	0.0110 ( $\lambda_R = 185 \mu m$ için)
Ayna üzerindeki demet spot genişliği, $w_1$ (m)	$5.5525 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 2.75 \mu m$ için)	$7.9544 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 11 \mu m$ için)
Ayna üzerindeki demet spot genişliği, $w_1$ (m)	0,01739 ( $\lambda_R = 27 \mu m$ için)	0.03262 ( $\lambda_R = 185 \mu m$ için)
Ayna üzerindeki demet spot genişliği, $w_2$ (m)	$5.5525 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 2.75 \mu m$ için)	$7.9544 \times 10^{-3}$ ( $\lambda_R = 11 \mu m$ için)
Ayna üzerindeki demet spot genişliği, $w_2$ (m)	0,01739 ( $\lambda_R = 27 \mu m$ için)	0.03262 ( $\lambda_R = 185 \mu m$ için)

THM IR-FEL optimizasyonunda örnek alınan ELBE FEL laboratuvarına ilişkin optik kavite parametreleri çizelge 4.11’de verilmiştir.

Çizelge 4.11 ELBE -FEL için optik kavitenin ana parametreleri (www.fzd.de)

<b>Parametre</b>	<b>U27</b>	<b>U100</b>
Rezonatör Tipi	Kararlı, simetrik, küresel	
Undulatör periyodu (cm)	2.73	10
Undulatör boyu (m)	2.26	3.92
Optik kavite uzunluğu, $L_c$ (m)	11.53	
1. ayna eğrilik yarıçapı, $R_1$ (m)	5.94 (yatay)	6.33(yatay) 3.61(dikey)
2. ayna eğrilik yarıçapı, $R_2$ (m)	5.94 (yatay)	6.33(yatay) sonsuz(dikey)
Rayleigh uzunluğu, $Z_R$ (m)	1.00	1.8(yatay)

ELBE FEL laboratuvarında U27 salındırıcısı için 3  $\mu\text{m}$  dalga boyunda minimum spot genişliği ( $w_0$ ) 1mm. olarak belirlenmiştir. THM IR-FEL’de U30 salındırıcısı ve 3  $\mu\text{m}$  dalga boyu için minimum spot genişliği ise 0.962 mm. olarak hesaplandı.

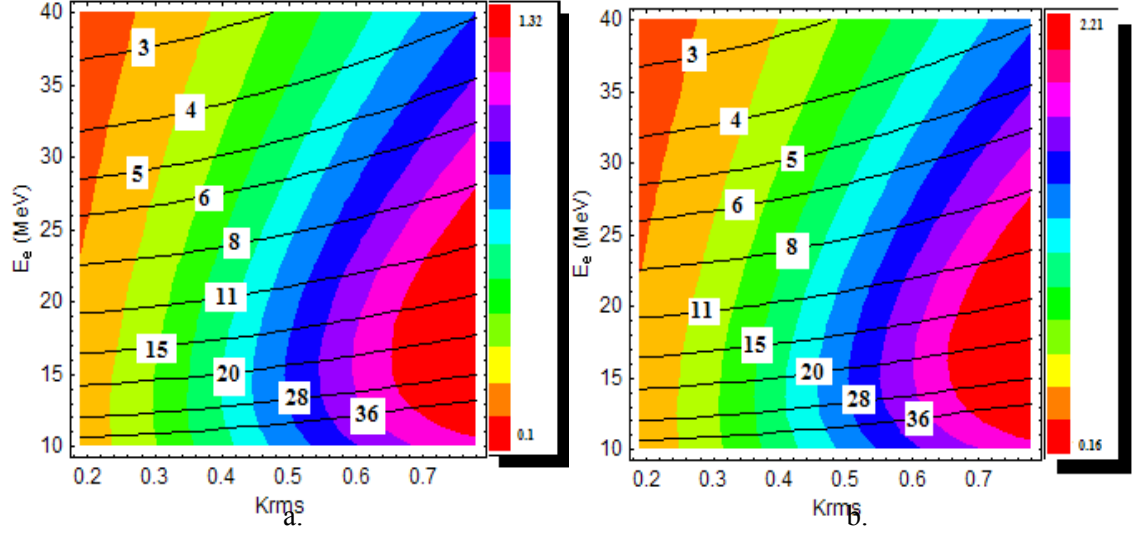
a) ELBE FEL, U27 salındırıcısı için  $L_c = 11.5\text{ m.}, Z_R = 1\text{ m.}, \lambda_R = 3\ \mu\text{m.},$

$$w_0 = 1\text{ mm.}$$

b) THM IR- FEL, U30 salındırıcısı için  $L_c = 11.53\text{ m.}, Z_R = 0.9699\text{ m.}, \lambda_R = 3\ \mu\text{m.},$

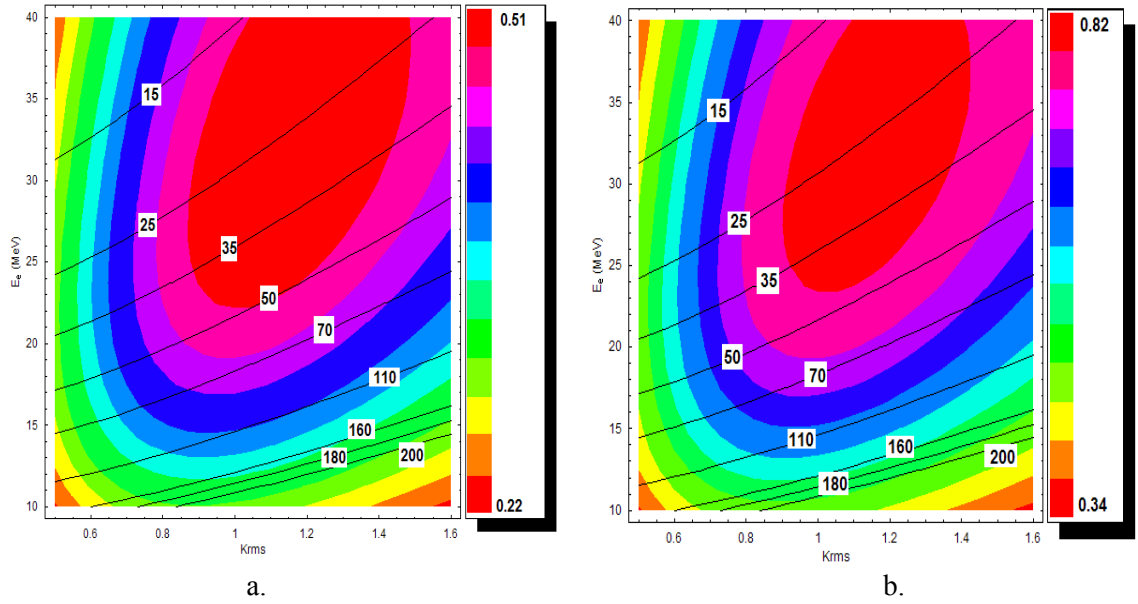
$$w_0 = 0.962\text{ mm.}$$

#### 4.2.2 THM IR-SEL için Kazanç, Çıkış Pik Gücü, Atma Gücü ve Enerjisi Parametrelerinin Optimizasyonu



Şekil 4.17 U30 salıncırcısı için bazı dalga boylarında tek geçiş kazancı

a. 1 mA ortalama elektron demet akımı, b. 1.6 mA ortalama elektron demet akımı



Şekil 4.18 U90 salıncırcısı için bazı dalga boylarında tek geçiş kazancı

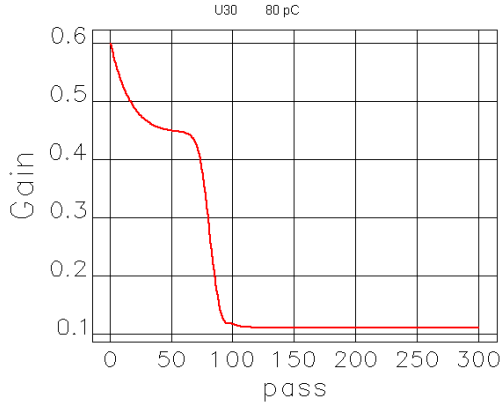
a. 1 mA ortalama elektron demet akımı, b. 1.6 mA ortalama elektron demet akımı

Şekil 4.17 ve 4.18’de açıkça görüldüğü gibi 1.6 mA ortalama elektron demet akımı için elde edilen SEL kazancı 1 mA ortalama akımına göre daha fazladır. Tasarımın iki farklı ortalama akım için yapılmasının nedeni teknolojik sınırlamaların dışında (1.6 mA ortalama elektron demet akımı elde edebilecek olan klystronun halen test aşamasında olması), ortalama akım etkisinin sonuçlarının incelenerek sonuçların görsel olarak ortaya konması ve ülkemizdeki olası SEL kullanıcı potansiyeline göre ilgili opsiyonun tercih edilebilmesidir.

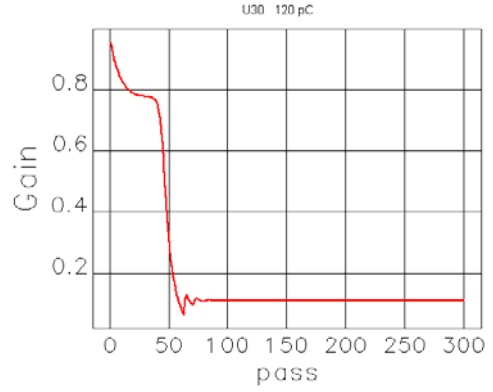
Optimizasyon çalışmalarında elde edilen ışınımın karakteristiğinin incelenmesi amacıyla ASTeC CCLRC Daresbury Laboratuvarı tarafından geliştirilen FELO yazılımından yararlanıldı ve ışınımın kavite içerisindeki doyum süreci dikkate alındı.

Simülasyonlar U30 salındırıcısı kullanılarak 3.84 mikrometre dalga boyu, U90 salındırıcısı kullanılarak 13 mikrometre dalga boyu için tek geçiş kazancı, çıkış pik gücü, maksimum atma gücü ve atma enerjisi grafikleri elde edildi.

Simülasyonlar sırasında enine normalize emittans 15 mm mrad ve paketçik uzunluğu U30 salındırıcı için 1 ps, U90 salındırıcı için 2 ps kabul edilmiş ve gürültü (elektron paketçigi içerisindeki elektronların birbirleriyle etkileşmesi) ihmal edildi. Işınımın dışarı alındığı ayna yansıtıcılığı %10 olarak düşünülmüş, yani ışınımın %5’inin dışarıya alındığı kalan %5’inin ise kavite içerisinde kayba uğradığı kabul edilmiştir. Her iki salındırıcı için de 80 pC ve 120 pC paketçik yükü seçeneklerinin simülasyonu yapılmıştır.

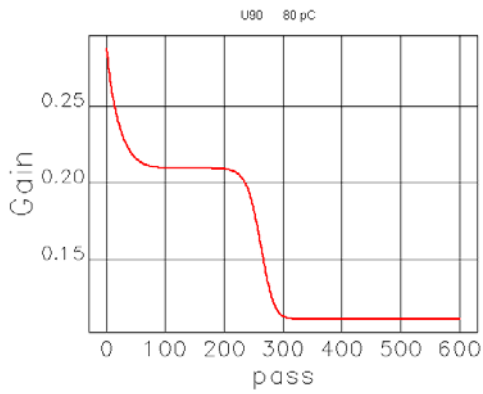


a.

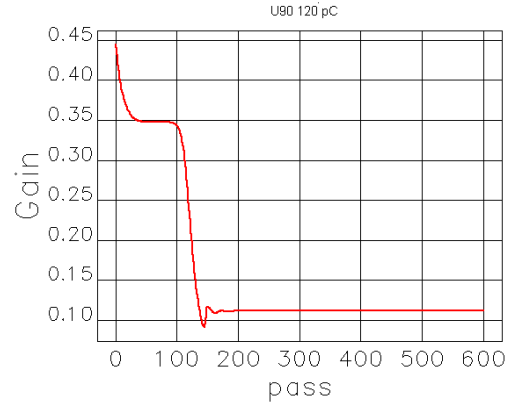


b.

Şekil 4.19 U30 salındırıcısında 3.84 mikrometre dalga boyu için elde edilen kazanç  
a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü



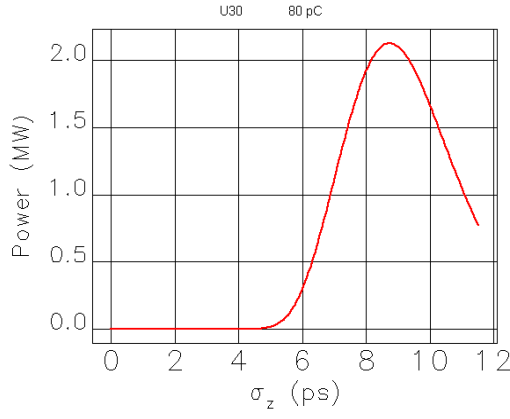
a.



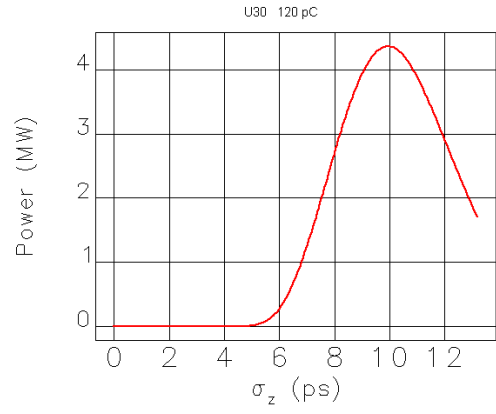
b.

Şekil 4.20 U90 salındırıcısında 13 mikrometre dalga boyu için elde edilen kazanç  
a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü

Her iki salındırıcı için de 80 pC paketçik yükü seçeneğine göre 120 pC paketçik yükü seçeneğinde kavite içerisinde daha az sayıda yapılan geçiş sayısı için ışınımın doyuma ulaştığı görülmektedir. Ayrıca U90 salındırıcı seçeneğinde elde edilebilen daha uzun dalgaboyları için U30 seçeneğine göre kavite içerisinde ışınımın doyuma ulaştığı süre artmaktadır. Her iki salındırıcı için de beklendiği gibi 120 pC seçeneğindeki kazancın daha yüksek olduğu görülmektedir.



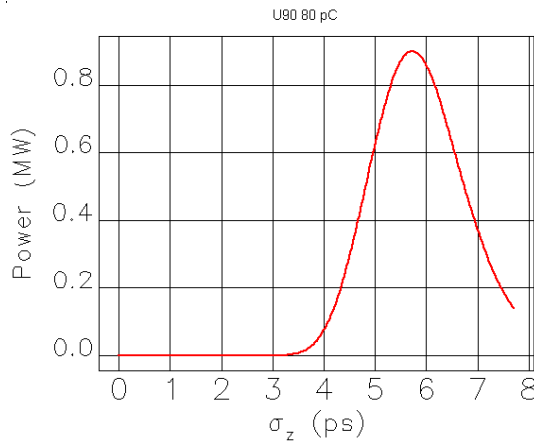
a.



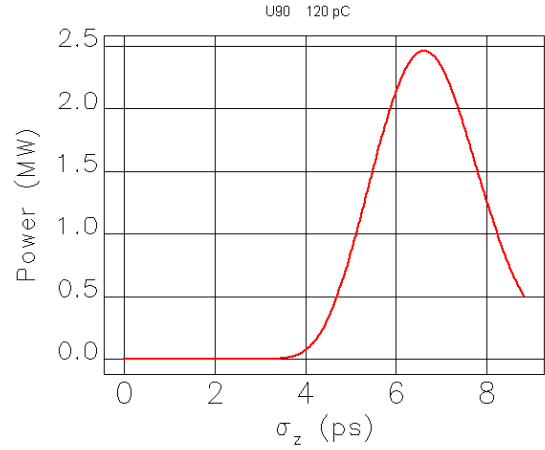
b.

Şekil 4.21 U30 salındırıcısında 3.84 mikrometre dalga boyu için çıkış pik gücü

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü



a.

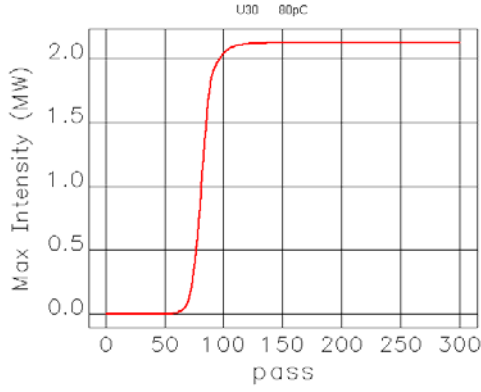


b.

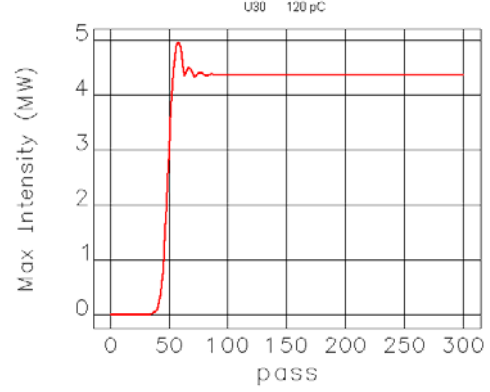
Şekil 4.22 U90 salındırıcısında 13 mikrometre dalga boyu için çıkış pik gücü

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü

3.84 ve 13 mikrometre dalga boyları için U30 ve U90 ile elde edilen çıkış pik gücü grafikleri incelendiğinde her iki salındırıcı için de 120 pC paketçik yükü seçeneğinde 80 pC paketçik yükü seçeneğine göre, daha az kavite içi gidiş geliş sonrası ışımının doyuma ulaşarak daha yüksek lazer çıkış pik gücü elde edildiği gözlemlenmiştir.



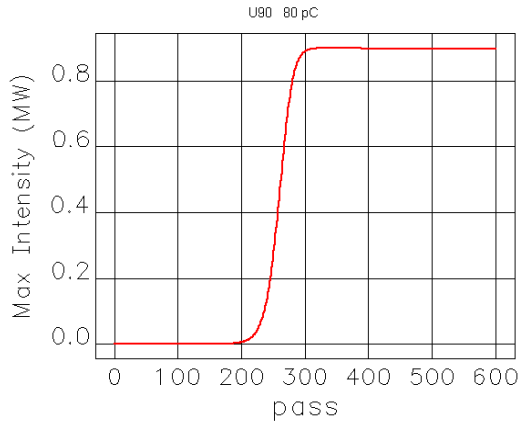
a.



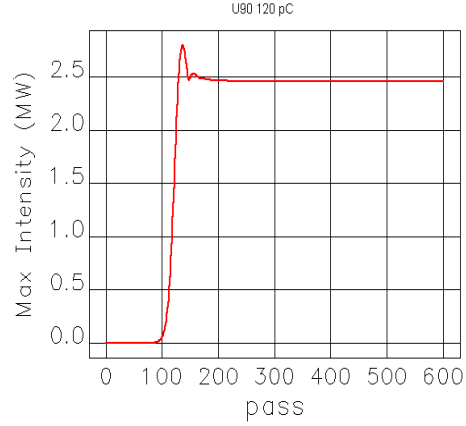
b.

Şekil 4.23 U30 salındırıcısında 3.84 mikrometre dalga boyu için atma gücü

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü



a.

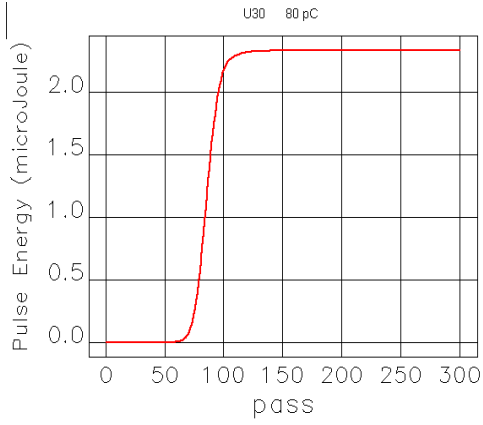


b.

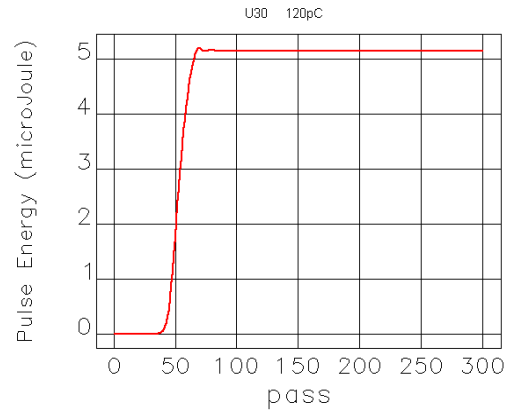
Şekil 4.24 U90 salındırıcısında 13 mikrometre dalga boyu için atma gücü grafikleri

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü

3.84 ve 13 mikrometre dalga boyları için U30 ve U90 ile elde edilen atma gücü grafikleri incelendiğinde, beklendiği gibi atmanın maksimum gücünün lazer çıkış pik gücü ile aynı olduğu görülmüştür; 120 pC paketçik yükü seçeneğinin 80 pC paketçik yükü seçeneğine göre daha kısa sürede ve daha yüksek güç elde edildiği görülmektedir.



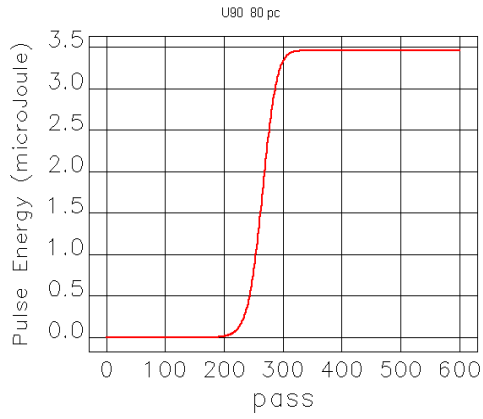
a.



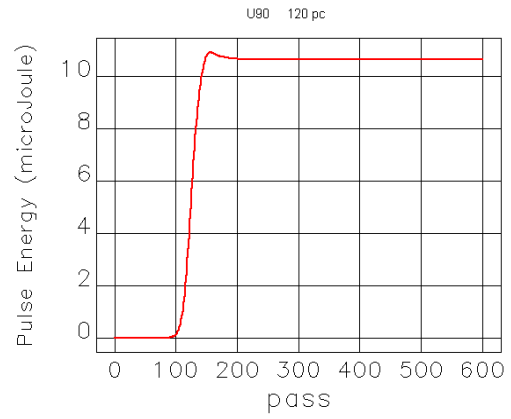
b.

Şekil 4.25 U30 salındırıcısında 3.84 mikrometre dalga boyu için atma enerjisi

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü



a.



b.

Şekil 4.26 U90 salındırıcısında 13 mikrometre dalga boyu için atma enerjisi

a. 80 pC paketçik yükü, b. 120 pC paketçik yükü

3.84 ve 13 mikrometre dalga boyları için U30 ve U90 ile elde edilen atma enerjisi grafikleri incelendiğinde, 120 pC paketçik yükü seçeneğinin 80 pC paketçik yüküne göre daha az kavite içi gidiş gelişle daha yüksek atma enerjisi elde edildiği görülmüştür.

## 5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Devlet Planlama Teşkilatı tarafından desteklenen ve 2006 yılından beri çalışmaları sürdürülen Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Projesi'nde (TAC IR-FEL) 15-40 MeV enerjili süper iletken lineer bir hızlandırıcıdan elde edilen elektron demetleri kullanılarak 2-185 mikrometre dalga boyu aralığını tarayan bir IR-SEL elde edilmesi planlanmaktadır.

Uygun karakteristikte elektron demeti elde edilmesini sağlayan bir hızlandırıcı, elektronları hızlandırıcıdan salındırıcı magnete kadar taşıyan bir demet hattı, boyuna elektron hareketini enine harekete çevirerek elektronlara eşlik eden enine elektrik alan genliğinin yükseltilmesine neden olan bir salındırıcı magnet ve klasik lazerlerle aynı görevi yapan bir optik kavite SEL'in temel kısımlarını oluşturmaktadır. Elde edilecek olan SEL'in dalga boyunun geniş bir aralığı kapsaması sebebiyle iki farklı optik kavite ve salındırıcı kullanılması planlanmıştır.

Bu amaçla dünyadaki örnek kızılötesi serbest elektron lazeri üreten laboratuarlardan ELBE (Almanya) baz alınmış ve buranın temel parametreleri, optik kavite sistemi incelenmiştir. Çalışmada ayrıca normal iletken teknolojiye dayanan iFEL, CLIO ve FELIX laboratuvarları ile süper iletken teknolojili ELBE'nin yanı sıra JAERI laboratuvarı da incelenmiştir.

Kurulması planlanan Türk Hızlandırıcı Merkezi Kızılötesi Serbest Elektron Lazerinin optik kavite parametrelerinin optimizasyonu yapılmış ve baz alınan ELBE (Almanya) laboratuvarı ile sonuçların uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Bu amaçla rayleigh uzunluğu, aynaların eğrilik yarıçapları, kavite uzunluğu, kararlılık parametreleri ve de aynaların kaplaması belirlenmiştir. Spot genişliklerinin dalga boyuna göre değişimi Mathematica 5.2 programından yararlanılarak elde edilmiştir.

Elde ettiğimiz optimizasyon sonuçları dünyadaki diğer kızılötesi serbest elektron lazeri üreten laboratuvarlarla uyum içinde olsa da, teknolojik bazı kısıtlamalar parametrelerimizde değişikliğe neden olabilir. Örneğin, iki farklı ortalama akım (80 ve

120 pC paketçik yükü veya 1 ve 1.6 mA ortalama akım) için optimizasyonun yapılmasının nedeni teknolojik sınırlamaların yanı sıra (1.6 mA ortalama elektron demet akımı elde edebilecek olan klystronun halen test aşamasında olması), ortalama akım etkisinin sonuçlarının incelenerek sonuçların görsel olarak ortaya konması ve ülkemizdeki olası FEL kullanıcı potansiyeline göre ilgili opsiyonun tercih edilmesidir.

Optimizasyon çalışmalarında elde edilen ışınımın karakteristiğinin incelenmesi amacıyla ASTeC CCLRC Daresbury Laboratuvarı tarafından geliştirilen SDDS uyumlu, zamana bağlı bir boyutlu osilatör serbest elektron lazer kodu (FELO) kullanılarak, ışınımın kavite içerisindeki doyum süreci kullanılarak bazı parametreleri gözlemlenmiştir. FELO programı kullanılarak, Kazanç-Geçiş Sayısı ve elde edilen ışınımın, Çıkış Pik Gücü-Paketçik Boyu, Atma Enerjisi-Geçiş Sayısı ve Maksimum Yoğunluk (Atmanın)-Geçiş Sayısı grafikleri iki farklı ortalama akım (80 ve 120 pC paketçik yükü veya 1 ve 1.6 mA ortalama akım) için çizdirilmiştir.

Optik kavite optimizasyonu ve kazanç mekanizmasının belirlenmesi undulator ve elektron demeti parametreleriyle yakından alakalıdır. Bu parametrelerde meydana gelecek değişiklikler optimizasyon sonuçlarımızda da değişikliğe neden olacaktır.

Hızlandırıcıya dayalı ışınım kaynağı olan IR-SEL'i hayata geçirebilmek ülkemizde hızlandırıcı teknolojileri ile tanışmanın ilk adımını oluşturacaktır. Hızlandırıcı teknolojileri ile tanışmak ve bu teknolojiyi AR-GE amaçlı kullanmak üzere ülkemizde bir IR-SEL kurulması yüksek teknolojiye dayalı malzeme, yarıiletken, medikal ve fotokimyasal araştırmalarının dünya ölçeğinde yapılmasını sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

Anonymous. 1999. Web Sitesi: <http://www.fzd.de> Erişim tarihi: 05.11.2007

Anonymous. 2000. Web Sitesi: <http://www.fel.eng.osaka-u.ac.jp/index.html>, Erişim Tarihi: 22.04.2008

Anonymous. 2000. Web Sitesi: <http://www.rijnh.nl/felix/> Erişim tarihi: 05.04.2008

Anonymous. 2001 Web Sitesi: [http://www.lcp.u-psud.fr/cliio/cliio\\_eng/cliio\\_eng.htm](http://www.lcp.u-psud.fr/cliio/cliio_eng/cliio_eng.htm)  
Erişim tarihi: 15.11.2007

Anonymous. 2006. [http://www.astec.ac.uk/id\\_mag/FELO.htm](http://www.astec.ac.uk/id_mag/FELO.htm), Erişim Tarihi: 15.11. 2007

Anonymous. 2006. [http://www.wikipedia.com/gaussian\\_function](http://www.wikipedia.com/gaussian_function) Erişim Tarihi: 05.12. 2007

Anonymous. 2006. [http://www.wikipedia.com/rayleigh\\_length](http://www.wikipedia.com/rayleigh_length) Erişim Tarihi: 05.12.2007

Anonymous. 2008 Web Sitesi: <http://thm.ankara.edu.tr/> Erişim Tarihi: 25.05.2008

McNeil, B.W.J. and Robb, G.R.M., 2005 FELO User manual, Department of Physics,  
University of Strathclyde, Glasgow, UK. R. Thompson, D.J. Dunning, ASTeC,  
CCLRC Daresbury Laboratory, UK

Beiser, A. 1997 Modern Fiziğin Kavramları. Çeviren Öngüt, G. ISBN 0-07-115440-  
XMcGraw-Hill-Akademi. Ankara

Chesworth, A.A., 2000. A Feasibility Study for placing an Infrared Free-Electron Laser on  
DIAMOND.

- Colson, W. B. and Williams, B. W. 2004. Free Electron Lasers In 2004. Proceedings of the 2004 FEL Conference.
- Dattoli, G., Renieri, A. and Torre, A. 1993. Lectures On The Free Electron Laser Theory and Related Topics. World Scientific ISBN 981-02-0565-1, 637, Singapore.
- Ciocci, F., Dattoli, G., Torre, A. and Renieri, A. Insertion Devices For Synchrotron Radiation And Free Electron Laser. World Scientific ISBN 981-02-3832-0, Singapore.
- Karlı, Ö. 2006. Hızlandırıcılara Dayalı Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri IR SEL Optimizasyonu. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi Ankara
- Mete, Ö., Karlı, Ö. and Yavaş, Ö. 2006. An optimization Study of an Oscillator FEL as TAC Test Facility. European Particle Accelerators Conference EPAC06, Edinburgh, England
- Militsyn, B.L. and Van der Meer, A.F.G. 2002. FOM Institute of Plasma Physics Rijnhuizen. Design Aspects Of Felice. The Free Electron Laser For Intra-Cavity Experiments Proceedings of EPAC 2002. Paris. France
- Nagai, R., Hajima, R., Kikuzawa, N., Minehara, E., Nishimori, N. and Sawamura, M. 2004. Misalignment Tolerance Of A Hole-Coupling Optical Resonator For Jaeri Erl-Fel Proceedings of the 2004 FEL Conference,
- Smith, F.W. 2001. Malzeme Bilimi ve Mühendisliği. Çeviren: Kınıkoğlu, G.N. ISBN 975-8431-61-7. İstanbul
- Tapan, İ. 2006. THM Test Laboratuvarı: Normal İletken RF Seçeneği ve Institute of Free Electron Laser iFEL Osaka. II. YUUP Çalıştayı. 01-03 2006 Bolu

- Thompson, N. 2004. Calculating The Free Electron laser Gain. ASTeC Daresbury Laboratory.
- Tural, M. 2007. Kızılötesi SEL ile Mikroskopi ve Spektroskopi Uygulamaları. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Semineri Ankara
- Yavaş Ö. 2001. 4. Nesil Işınım Kaynakları Olarak Serbest Elektron Lazerleri. I. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi (UPHUK I), TAEK, Ankara.
- Yıldız, H. 2007 Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri Optik Kavite İçin Ayna Mekanizması Bodrum. Türkiye
- Yıldız, H. 2007. Normal İletken Rf Teknolojisine Dayalı Serbest Elektron Lazerlerinin Yapıları Ve Temel Özellikleri. III. Uluslararası Katılımlı Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi Bodrum. Türkiye

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sezen TEKİN

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Tarihi: 25.02.1982

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

### Eğitim Durumu

Lise : Atakent Anadolu Lisesi, İzmir (2000)

Lisans : Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Mühendisliği  
Bölümü(2005)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği  
Anabilim Dalı (Eylül 2006 – Temmuz 2008)

### Çalıştığı Kurum

Tübitak yüksek lisans bursu (2007)

### Yayınlar

- A. Aksoy, Ö. Karşlı, Z. Nergiz, S. Tekin, Ö. Yavaş  
Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Kızılötesi Serbest Elektron Lazeri (SEL) için  
Optik Kavitenin Yapısı ve SEL Parametreleri  
3. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 17-19 Eylül 2007  
( UPHUK-III )
- Ö. Karşlı, Ç. Kaya, S. Tekin, M. Tural, Ö. Yavaş  
Türk Hızlandırıcı Merkezi (THM) Kızılötesi Serbest Elektron Lazerinin (SEL)  
Uygulama Alanları ve Ar-Ge Potansiyeli  
3. Ulusal Parçacık Hızlandırıcıları ve Uygulamaları Kongresi, 17-19 Eylül 2007  
( UPHUK-III )