

**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERBEST ELEKTRON LAZERİ PARAMETRELERİNİN
BELİRLENMESİ**

SERAP YİĞİT GEZGİN

Danışman: Doç.Dr. Suat ÖZKORUCUKLU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI
ISPARTA – 2009**

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğüne

Bu çalışma jürimiz tarafından FİZİK ANABİLİM DALI'nda oybirliği/oyçokluğu ile YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç.Dr. Fatma ATAMAN

S.D.Ü. Tıp Fakültesi Dahili Tıp Bilimleri Bölümü Radyasyon Onkolojisi A.B.D.

Üye : Doç.Dr.Suat ÖZKORUCUKLU

S.D.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Üye : Yrd.Doç.Dr.Abdullah KAPLAN

S.D.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

ONAY

Bu tez/...../2009 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

...../...../2009

Prof.Dr. Mustafa KUŞCU

Enstitü Müdürü

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
1.GİRİŞ	1
1.1.Serbest Elektron Lazerleri	3
1.2.Serbest Elektron Lazerinin Kullanım Alanları	5
1.2.1.Yoğun Madde Fiziği Uygulamaları	6
1.2.2.Katı Hal Uygulamaları	6
1.2.3.Kimya Uygulamaları	7
1.2.4.İzotop Ayrımı Uygulamaları	8
1.2.5.Spektroskopi Uygulamaları	8
1.2.6.Biyoloji Uygulamaları	8
1.2.7.Nano Teknoloji Uygulamaları	9
1.3.Dünyadaki Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarları	10
1.3.1.CLIO Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Orsay, Fransa)	10
1.3.2.Jefferson Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Virjinya, ABD)	12
1.3.3.Rossendorf Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Elbe, Almanya)	13
2.KAYNAK ÖZETLERİ	16
2.1.Serbest Elektron Lazerinin Fiziği	17
2.2.Hızlandırıcı İçerisindeki Elektron Demetinin Radyasyon Gücü	18
2.3.Elektron Demetinin Salındırıcı Alan İçindeki Hareket Denklemi	20
2.4.Salındırıcıdaki Elektromagnetik Dalga ile Elektron Demetinin Etkileşimi	22
2.5.Salındırıcının Işınım Özellikleri	26
2.6.Serbest Elektron Lazerinin Temel Parametreleri	28
2.6.1.Dalga boyu	28
2.6.2.Enerji	29

2.6.3.Pik Paketçik Akımı ve Ortalama Akım.....	30
2.6.4.Normalize Yayınım.....	31
3.MATERYAL ve YÖNTEM.....	34
3.1.Elektron Tabancası.....	34
3.1.1.Termiyonik Tabanca	34
3.1.2.Fotokatot Tabanca	36
3.2.Paketleyici	37
3.3.Hızlandırıcı.....	38
3.4.Salındırıcı	41
3.5.Optik Kavite	44
3.6.Serbest Elektron Lazerinin Yardımcı Parçaları.....	47
3.6.1.Vakum Sistemi	47
3.6.2.Güç Sistemleri	48
3.6.3.Soğutma Sistemleri	49
3.6.4.Diagnostik	50
3.6.5.Kontrol Sistemi	60
4.ARAŞTIRMA ve BULGULAR.....	62
4.1.Enjektör	62
4.2.Hızlandırıcı Yapı.....	63
4.3.Serbest Elektron Lazerinin (SEL) Transfer Hattı.....	66
4.4.THM Serbest Elektron Lazerinde Salındırıcı Magnet	67
4.5.Optik Kavite	74
4.6.Elektron Demet Diagnostiği.....	78
4.7.THM Serbest Elektron Lazeri Foton Demet Diagnostikleri.....	80
5.SONUÇ	82
KAYNAKLAR	86
ÖZGEÇMİŞ	88

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

SERBEST ELEKTRON LAZERİ PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

Serap YİĞİT GEZGİN

Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Juri: Doç.Dr.Suat ÖZKORUCUKLU (Danışman)
Doç.Dr. Fatma ATAMAN
Yrd.Doç.Dr. Abdullah KAPLAN

Serbest elektron lazeri veya SEL, rölativistik hızlarda hareket eden serbest elektronları kullanarak koherent bir elektromagnetik radyasyonunun elde edildiği bir sistemdir. Rölativistik hızlarda serbest olarak hareket eden elektronlar, değişken bir magnetik alana sahip olan salındırıcı içerisinde geçerken bu alandan dolayı hareket yönlerine dik bir hız kazanırlar. Hızın bu dik bileşeni elektronların radyasyon alanıyla etkileşmesini sağlar. Böylece iki alan arasında bir enerji değişimi olur.

Bu çalışmada serbest elektron lazerinin fiziği, kaynak özetlerinin anlatıldığı bölümden sonra verilmiştir. Takip eden bölümde serbest elektron lazerini oluşturan parçalar hakkında daha detaylı bilgiler verilmiştir. Son olarakda, Türk Hızlandırıcı Merkezi bünyesinde kurulması planlanan kızıl ötesi serbest elektron lazeri için teknik tasarım parametreleri verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Serbest Elektron Lazeri, Kızıl Ötesi SEL, Türk Hızlandırıcı Merkezi.

2009, 88 sayfa

ABSTRACT

M.Sc.. Thesis

DETERMINATION OF FREE ELECTRON LASER PARAMETERS

Serap YIĞİT GEZGİN

**Süleyman Demirel University Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Physics**

Thesis Committee: Assoc.Prof.Dr. Suat ÖZKORUCUKLU (Supervisor)

Assoc.Prof. Dr. Fatma ATAMAN

Asist.Prof.Dr. Abdullah KAPLAN

A Free Electron Laser, or FEL, is a system for producing coherent electromagnetic radiation using a relativistic electron beam as lasing medium. When the relativistic electrons passing the alternating magnetic field of the undulator, the undulator field generate an electron velocity component transverse to the direction on the propagation. The transverse velocity couples the electron beam to the electric field component of the radiation field, thus producing an energy exchange between them.

In this thesis, physics of the free electron laser is given after an introduction to its applications. In the following chapter more detailed parts of the free electron lasers were introduce and some main parameters defined. At the end, technical design parameters for the infrared free electron laser for Turkish Accelerator Center are given in detail.

Key Words: Free Electron Laser, Infrared FEL, Turkish Accelerator Center

2009, 88 pages

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam sűresince deęerli bilgi ve deneyimleri ile beni yűnlendiren Danıőman hocam Sayın Do.Dr. Suat ŐZKORUCUKLU'ya; deęerli arkadaőlarım Banu ve Tuba ŐZDEMİR'e; alıőmanın her aőamasında sabır ve anlayıőı ile yanımda olan eőim Bahri GEZGİN'e ve desteklerini daima hissettięim anne ve babama iten teőekkűrlerimi sunarım.

Serap YIğİT GEZGİN
ISPARTA, 2009

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. İki renk SEL ile kuantum duvarlarında optik pompalama.....	6
Şekil 1.2. CLIO'nun birbirinden bağımsız iki adet eş salındırıcı magnetleri	10
Şekil 1.3. İki renk işleminde CLIO'nun dalga boyu spektrumunun zaman evrimi ...	11
Şekil 1.4. Jefferson. Laboratuvarı SEL'in şeması.....	12
Şekil 1.5. Rossendorf (ELBE) laboratuvarının şematik görünümü	14
Şekil 2.1. Serbest elektron lazerinin çalışma sistemi	17
Şekil 2.2. Koordinat sistemi v_0 hızına sahip (*) hareket ile tanımlanır.....	19
Şekil 2.3. Eğici magnetlerden oluşan salındırıcı magnet	21
Şekil 2.4. Lazer alanı içindeki elektronun hareketi.....	23
Şekil 2.5 Kararlı ve kararsız durumun şematik gösterimi.....	32
Şekil 2.6. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi.....	33
Şekil 3.1. Termiyonik tabanca düzeneği	35
Şekil 3.2. Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar	37
Şekil 3.3. Linak içindeki drift tüpü	38
Şekil 3.4. Salındırıcının çalışma sistemi (1. Magnetler, 2. Elektron demeti.....	42
Şekil 3.5. Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşimi.....	43
Şekil 3.6. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşim	45
Şekil 3.7. Parabolik ayna görüntüsü.....	46
Şekil 3.8. OTR kameranın kullanım düzeneği	51
Şekil 3.9. CCD kameranın kullanım düzeneği.....	52
Şekil 3.10. Selenoidin iç kısmının aksenal görünüşü.....	53
Şekil 3.11. Ar gazı ile elektronun etkileşimi.....	53
Şekil 3.12. Faraday Kabı.....	54
Şekil 3.13. ELBE IR FEL foton diognastik tablasının fotoğrafı.....	55
Şekil 3.14. Czerny-Turner tipi spektrometrenin şematik diagramı.....	56
Şekil 3.15. SHG kullanan yoğunluk otokorelator için deney düzeneği	56
Şekil 3.16. Mikroatma bölücünün şematik çizimi	57
Şekil 3.17. Sürekli polarizasyon dönüştürücünün şematik düzeni.....	58
Şekil 3.18. HgCdTe PC Detektör şeması	59
Şekil 3.19. Pyroelektrik kızılötesi detektörün düzeneği.....	60

Şekil 4.1. THM IR SEL enjektör düzeni.....	63
Şekil 4.2. Modüldeki çift dokuz hücreli TESLA kaviteler	64
Şekil 4.3. SEL odasının düzeni	66
Şekil 4.4. a) Sağ ve sol yönlü dipol b) Tek yönlü magnet	67
Şekil 4.5. U30'un 3 boyutlu magnet yapısı ($x=60\text{mm}$, $y=1.68\text{mm}$)	68
Şekil 4.6. U90 salındırıcısı için pik magnetik alanın (B_0) gap'a (g) bağlı grafiği.....	69
Şekil 4.7. U90 salındırıcısı için kuvvet parametresinin (K) gap'a (g) bağlı grafiği... 70	
Şekil 4.8. U30 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği ... 70	
Şekil 4.9. U90 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği ... 71	
Şekil 4.10. U30 salındırıcısının için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği 71	
Şekil 4.11. U90 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği . 72	
Şekil 4.12. 20MeV elektron demeti için Efoton'un kuvvet parametresine grafiği .. 73	
Şekil 4.13. 40MeV elektron demeti için Efoton'un kuvvet parametresine grafiği .. 73	
Şekil 4.14. Ortak merkezli rezonatörün özellikleri	74
Şekil 4.15. Çeşitli rezonatör tipleri için Rayleigh uzunluğu	75
Şekil 4.16. U90 salındırıcısında ilk ayna için demet spotunun dalga boyuna grafiği 77	
Şekil 4.17. U30 salındırıcısında ilk ayna için demet spotunun dalga boyuna grafiği 77	
Şekil 4.18. Demet pozisyon ölçümü için THM SEL in düzeneği.....	78
Şekil 4.19. Demet boyutu ölçümü için THM SEL düzeneği	79
Şekil 4.20. Demet kaybı ölçümü için THM SEL düzeneği.....	79
Şekil 4.21. IR-FEL diagnostik tablanın şematik düzeni	81
Şekil 5.1. THM SEL tesisi ilk aşaması	82

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Dünyadaki SEL'in önemli kullanım alanları.....	5
Çizelge 1.2. CLIO SEL'e ait önemli parametreler.....	11
Çizelge 1.3. Jefferson Lab IR SEL parametreleri	13
Çizelge 1.4. ELBE Lineer hızlandırıcının dizayn parametreleri.....	15
Çizelge 4.1. THM SEL'in ana parametreleri	65
Çizelge 4.5. Sİ yapısı için helyum ve su soğutma gereksinimleri	66
Çizelge 4.7. U30 ve U90 salındırıcıları için belirlenmiş parametreler	68
Çizelge 4.8. THM IR SEL optik kavitelelerin ana parametreleri	76

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Amper
AC	Alternatif Akım
API	Uygulamalı Program Arabirimi
BLM	Demet Kayıp Monitörü
BPM	Demet Konum Monitörü
CW	Sürekli Dalga
DAQ	Veri Elde etme Sistemi
DC	Doğru Akım
DOOCS	Dağıtımli Nesne-Yönlü Kontrol Sistemi
FEL	Free Electron Laser
FIR	Uzak Kızılötesi Radyasyon
FSM	Ölçülebilir Durum Makinesi
GeV	Giga Elektron Volt
GHz	Giga Hertz
IOT	Inductive Output Tube
IR	Kızılötesi Radyasyon
IRM	PD Kızılötesi Çeşitli Foton Ayrılması
K	Kelvin
eV	Elektron Volt
Pa	Pascal
V	Volt
W	Watt
MCP	Çok Kanallı Katman
MCT	Merkür Kadmiyum Tellurid
mrاد	Mili radyan
NCW	İletken Olmayan Su
OTR	Optik Geçiş Radyasyonu
Pa	Pascal
pC	Piko Coulomb
ps	Piko Saniye

PSD	Konum Duyarlı Dedektör
RF	Radyo Frekans
SASE	Kendiliğinden Genlik Artımlı Yayınım
SEL	Serbest Elektron Lazeri
SFG	Toplam Frekans Oluşumu
SHB	Alt Harmonik Paketleyici
TCP	İletim Denetim Protokolü
THM	Türk Hızlandırıcı Merkezi
UDP	Kullanıcı Datagram Protokolü
UHF	Ultra Yüksek Frekans
UV	Ultra Viyole
VUV	Vakum Ultra Viyole

1. GİRİŞ

Radyasyon kaynakları üzerinde yapılan araştırmaların başarısı, günümüzde önemli bir yer tutmaktadır. Bu araştırmaların en önemli ürünü ise, lazerlerdir. Lazer, “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” cümlesinin baş harflerinden türetilmiştir ve uyarılmış radyasyon ile ışığın kuvvetlendirilmesi demektir. Normal ışık, dalga boyları muhtelif, rengârenk, yani farklı faz ve frekansa sahip dalgalardan meydana gelirken, lazer ışığı ise yüksek genlikli, aynı fazda, birbirine paralel, tek renkli (monokromatik), hemen hemen aynı frekanslı dalgalardan ibarettir.

Uyarılmış atomlar üzerine gönderilen ışık demeti, atomların aynı frekansta fotonlar yayımlayarak gelen ışığı daha da güçlendirmesine yol açar. Uyarılan ve uyaran fotonlar koherent (eş uyumlu – aynı fazda) oldukları için, lazer ışık demeti uzayda çok belirgin bir yönde yayılır.

Uyarılmış ışınım olayı ilk olarak 1917 yılında Albert Einstein tarafından ortaya atılmıştır (Einstein,1917). 1928’de, Rudolph W. Landerburg, negatif emilme ve uyarılmış yayınının varlığını onaylamıştır. 1947’de Willis E. Lamb ve R.C. Retherford, hidrojen spektrasında açık uyarılmış yayılımı bulmuşlar ve uyarılmış yayınının ilk gösterisini yapmışlardır (Willis ve Retherford, 1947). Uyarılmış ışınımdan faydalanmaya yönelik ilk çalışmalar mikrodalga alanında yapılmış ve bunlar maserin bulunmasını sağlamıştır. Maser ile ilgili yapılan ilk çalışmada, moleküllerin mm mertebesinde dalga boyuna sahip ışın yayabileceği sonucu ortaya çıkmıştır. 1954 yılında C.H. Townes ve çalışma arkadaşları tarafından amonyak kullanılarak maser oluşturulmuştur (Schawlow and Townes, 1958). Uyarılmış ışınımdan faydalanmaya yönelik çalışmaları geleneksel lazerler ile ilgili çalışmalar takip etmiştir. Geleneksel lazerler ile ilgili ilk çalışmalar, 1958’de Rusya’da N.Basov ve çalışma arkadaşları, Amerika’da da C.Townes tarafından yapılmıştır (Schawlow ve Townes, 1958). 1960’da Amerikan fizikçi T.H. Maiman görünür ışıkta puls lazerini oluşturmuştur (Maiman ve Elion, 1967).

Bir lazer, optik kavite içerisine konulan kazanç ortamı ve kazaç ortamına enerji

pompalamak için bir kaynaktan oluşur. Kazanç ortamı ışığın uyarılmış yayılım ile güçlenmesini sağlayacak fiziksel özelliklere sahip olmalıdır. En basit anlamda lazer, optik kavite içerisindeki birbirine paralel yüksek yansıtma özelliğine sahip olan iki aynanın üzerlerine gelen ışını kazanç ortamından defalarca geçecek şekilde yansıtmasını ve ışının bu geçişler sırasında uyarılmış yayılım ile güç kazanmasını sağlayan bir düzendir. Lazer aktif ortamındaki bu fotonlar, aynalardan geriye yansıyor atomu uyararak diğer fotonların ortaya çıkmalarına neden olurlar. Foton sayısı, ışık şiddeti belli değerlere ulaştığında fotonlar kısmi geçirgen aynadan dışarı çıkarlar. Aktif maddeye pompalanan enerji sürekli kaldığı sürece, ışın üretimi de süreklilik kazanır.

Lazerler, yaydıkları ışığın dalga boyuna, güçlerine ve kullanılan aktif maddenin cinsine göre; katı, gaz, yarı iletken ve sıvı olmak üzere dört sınıfta toplanırlar. Katı lazerler, lazer aktif ortam olarak kristal veya cam gibi katı maddeler veya toprak ve geçiş metalleri kullanırlar. Katı lazerlerin çalışma prensibinde, harici bir ışık kaynağı ile lazer aktif ortamdaki iyonlar uyarılır. Bu ışık kaynağı, atmalı veya sürekli olabilir. Genelde, Xenon flaş lambası veya yüksek basınçlı civa deşarj lambaları bu amaç için kullanılır. Işığın, iyonları daha iyi etkilemesi için lazer alanı içinde iki gümüş ayna arasında yansıtması sağlanır. Bu aynalardan biri yarı saydam olup lazer ışığı kullanılacağı yere gönderilir (Maiman ve Elion, 1967).

Gaz lazerler; nötr atom içeren lazerler, iyon lazerleri ve moleküler lazerler olmak üzere üç kısımda incelenir. Nötr atom içeren lazerler, atomun enerji düzeyleri arasındaki geçişlerden oluşur. Atom lazerlerine en güzel örnek, He-Ne gaz lazeridir. He-Ne gaz lazeri, sürekli olup, atmalı değildir. Güçleri miliwattlar mertebesinde ve düşük kayıplarından dolayı kullanımı çok yaygındır. İyon lazerlerinin çalışma prensibi, gazın iyonize olmuş enerji düzeyleri arasındaki geçişlere dayanır. Bu tür lazerler, sürekli ve atmalı şekilde çalışabilirler. İyon lazerleri ayarlanabilen boya lazerlerini pompalamak için foton kaynağı olarak kullanılabilir. Moleküler lazerlerde, moleküllerin taban enerji seviyesindeki osilasyonlarından yararlanır. En iyi moleküler lazerleri, 10µm bölgesinde osilasyon yapan CO₂ lazer ile kızılötesi ve ultraviyole bölgede ışınım yapan N₂ (moleküler nitrojen lazeri) lazerleridir. Sürekli

ya da atmalı olsun çok yüksek güçlerde ışın yayınladığı için CO₂ gaz lazeri, lazerler arasında önemli bir yere sahiptir. Endüstride, çoğunlukla kesme ve kaynak yapmada kullanılır.

Sıvı lazerlerde, bir bölme içine konmuş uygun sıvı kullanılır. Yüksek güçlerin elde edilmesi için sıvının konulduğu bölme istenildiği kadar büyük olabilir. Bu türdeki en önemli lazer, geniş frekans bölgesinde ayarlanabilme özelliği gösteren boya lazerleridir. Boya lazerleri, ışığı bazı inorganik boyar maddeler üzerine düşürerek, farklı bir renkte yayınlanmasını sağlarlar (Duarte, 1990).

Yarı iletken lazerlerde, P bölgesinden N bölgesine doğru akım geçirilerek, valans bandından iletkenlik bandına elektron geçmesi sağlanır. Elektron ve boşlukların bağlantı düzeyinde yeniden birleşmeleri sırasında ortaya çıkan enerjinin ışınım şeklinde dışarı alınması ile lazer elde edilir. Bu tür lazerler, sınırları farklı dalga boyuna sahip olup ve hem sürekli hem de kesikli modda çalışabilirler.

1.1. Serbest Elektron Lazerleri

Katı, sıvı, gaz ve yarı iletken lazerlerinden farklı olmak üzere lazer aktif ortamı olmadan da lazer elde etmek mümkündür. Rölativistik hızlarda serbest olarak hareket eden elektronların magnetik alan ile etkileşmesi sırasında elektronlar bir lazer aktif ortamı gibi davranarak lazer ışınımı oluştururlar. Bu şekilde oluşan lazerlere, Serbest Elektron Lazerleri (SEL) denir.

Dördüncü nesil ışınım kaynağı olarak da adlandırılan serbest elektron lazeri (SEL), yüksek enerjili elektron demetinin, dalgalı bir magnetik alan içerisindeki hareketi sonucu yayınladığı radyasyonun optik bir kavite içerisinde güçlendirilmesi temeline dayanır. Bu şekilde elde edilen lazerin spektrum aralığı VUV (Vacuum Ultra Violet)'den sert X-ışını bölgesine kadar uzanır (Frases, vd., 1986).

SEL ile ilgili ilk çalışmalar Stanford Üniversitesinden Hans Motz (1951) ile başlamıştır. Motz, dalgalı magnetik alandaki elektron demetinden yayınlanan ışığın spektrumunu incelemiştir (Motz, 1951). Motz ve çalışma arkadaşları yaptıkları

deneylerle, elektromagnetik spektrumun mavi-yeşil bölümünde koherent olmayan ışığa ve milimetrik dalga boylarında koherent ışığa elde etmişlerdir (Motz,1953).

John Madey'in çalışmaları ile (1971, 1974) SEL'ne ilgi yeniden artmıştır. Uzaysal periyotlu enine magnetik alanda, rölativistik elektronlar tarafından uyarılmış ışığa olayı incelenmiştir (Elias vd., 1975). Görünür dalga boylu SEL, Stanford Üniversitesi Being Aerospace / Los Alamos laboratuvarı işbirliği ile yapılmıştır.

California Üniversitesi'nde yapılan çalışmalarda; elektron demeti ve optiksel dalga arasındaki etkileşimin dinamiği Lagrange formalizmi ile açıklanmıştır. Helisel ve lineer polarize salındırıcılar kullanılarak SEL'nin kazancı hesaplanarak kazanç spektrumu çıkarılmıştır (Dattoli vd., 1984).

SEL'in yaydığı ışınımında, yüksek enerjili elektronlar geleneksel lazerlerde olduğu gibi, koherenttir. Ancak elektronlar bu kez, geleneksel lazer ortamındaki gibi atoma bağlı durumda kalmazlar. Tam tersine, vakum boyunca serbest hareket ederler. Elektronlar serbest aktıkları için, radyasyon dalgaboyu, geleneksel lazerlerde olduğu gibi, iki farklı enerji seviyesi arasındaki belirli geçişler ile sınırlı olmayıp ayarlanabilir. SEL'in dalga boyu, salındırıcının periyodikliği, magnetik alanı, demetin enerjisi gibi dış parametrelere bağlıdır. Dolayısıyla geleneksel lazer ışığı, hemen hemen tek frekansta bulunurken, SEL geniş bir frekans aralığına sahiptir. SEL'deki kazanç, ortamdaki elektromagnetik alanın ve elektronun yönüne bağlıdır. Bu durumda negatif ve pozitif yüksek kazanç değerleri elde edilebilir.

Günümüzde araştırmacılar; ayarlanabilirlik, yüksek pik gücüne bağlı olan yüksek tekrarlanabilirlik oranları, ortalama güç, yüksek mikro atma enerjileri, zaman esnekliği ve frekans modülasyonlu atmalara ihtiyaç duyduğundan geleneksel lazerlerden daha çok SEL kullanımına yönelmektedirler. SEL laboratuvarları özellikle malzeme bilimi, nanoteknoloji, foto-kimya, yarı iletken yapılar, lineer olmayan optik, atom ve molekül fiziği, yüzey ve ara yüzey fiziği, lazer optiği, biyoteknoloji alanlarında çalışan araştırmacılar ve bu alanlarda ürün geliştiren sanayi çevreleri için modern bir araştırma ortamı ve aracı olmaktadır.

1.2. Serbest Elektron Lazerinin Kullanım Alanları

Serbest elektron lazerleri, yüksek güç, frekans modülasyonlu ultra kısa atmalar, yüksek parlaklık, kolay ayarlanabilirlik gibi özelliklerinden dolayı birçok alanda kullanılabilirler. SEL'in ayarlanabilirliği ile kızıl ötesi ve X-ışını arasında yer alan bölge kullanılabilir hale getirilir. SEL'in ultra kısa atma yapısı ve yüksek pik gücü özelliği, görünür ve IR bölgesindeki uygulamaları etkinleştirir.

Kızılötesi serbest elektron lazeri (IR SEL) genel olarak malzeme bilimi, atom ve molekül fiziği, yüzey ve arayüzey fiziği, medikal fizik ve foto-kimyasal süreçlerin incelenmesi alanında kullanılır. Dünyada 17 den fazla inşa edilmiş çalışan SEL'ler vardır. Bu SEL'lerin on tanesinin üstündeki kullanıcı olarak çalışır ve çoğu kızılötesi aralığındadır (Awazu vd., 2003). Uygulamaların daha fazlası ayrıntılı olarak Çizelge 1.1'de listelenmiştir.

Çizelge 1.1. Dünyadaki SEL'in önemli kullanım alanları

Yer	Dalga boyu (μm)	Kullanım alanları
Stanford Üniversitesi (Amerika)	3–60	Yoğun madde fiziği, biyoloji, tıp
CLIO Laboratuvarı (Fransa)	3–90	Yoğun madde fiziği, yüzey kimyası, eczacılık
Duke Üniversitesi (Amerika)	2–10	Yoğun madde fiziği
Vanderbilt Üniversitesi (Amerika)	2–8	Tıp, biyoloji, yoğun madde fiziği
Jefferson Laboratuvarı (Amerika)	1,5–14	Biyoloji, tıp, kimya, nano teknoloji, mikro teknoloji
FOM Plazma Fiziği Enstitüsü (Hollanda)	5–110	Nükleer/moleküler fiziği, biyoloji, tıp,
ELBE (Germany)	4–200	Yoğun madde fiziği, yüzey kimyası, biyomoleküllerin spektrometresi

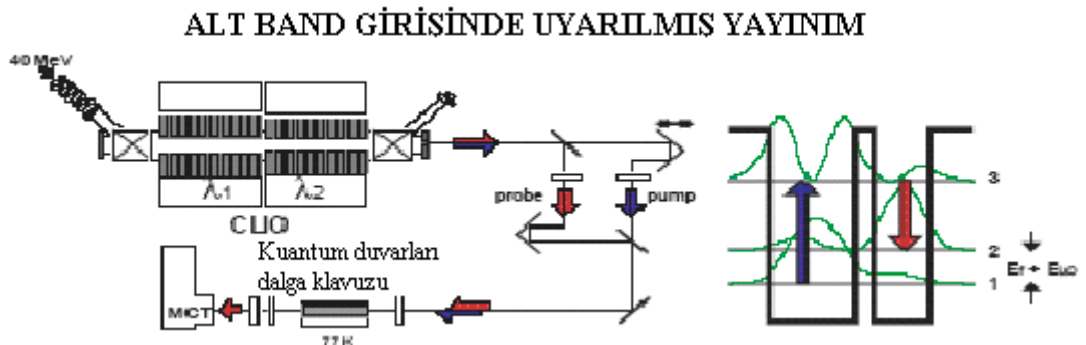
1.2.1. Yoğun Madde Fiziği Uygulamaları

Yoğun madde fiziğindeki uygulamalar, spektrumun kızıl ötesi aralığında meydana gelir. Uzak kızıl ötesi radyasyonu ile özellikle yarı iletken, süper iletken ve çeşitli malzemelerin spektrometresi oluşturulabilir. Yarı iletkenlerde, kısa atma yapısı, elektron-foton ve elektron-elektron etkileşiminin spektrometresine olanak sağlar. Kızıl ötesi ve ultraviyole ışınım sağlayan, Duke Üniversitesi'ndeki serbest elektron lazerlerinde, polimerlerin, kuantum kuyuların ve yarı iletkenlerin lineer olmayan spektroskopik çalışmalarını icra etmek için SEL'lerin ayarlanabilirliği ve yüksek pik gücünün kullanımından yararlanır (Neil et al, 2003).

CLIO ve Stanford'ın IR SEL'lerindeki radyasyonun kısa atma (piko saniye) yapısı, yarı iletken örneklerinde elektron durulma zamanı ve bant içi transfer dinamiğinin çalışmasında kullanılır. CLIO SEL'in tamamı, yüksek güç, uygun atma yapısı ya da geniş frekans ayarlamasından dolayı eşsiz bir alettir.

1.2.2. Katı Hal Uygulamaları

SEL, katı hal uygulamaları için ns ve ps aralığında çalışır. ps zaman ölçekli pompa-sonda ölçümleri, dar aralıklı yarıiletkenlerin koherent geçiş etkilerinin artışının gözlenmesine ve üçüncü merteye lineer olmayan çalışmalara olanak sağlar.



Şekil 1.1. İki renk SEL ile kuantum duvarlarında optik pompalama

SEL'in diğer bir başarısı, pompa-sonda tekniği ile elde edilen iki renk SEL kullanımı

ile kuantum kuyularına yapılan optik pompalama çalışmalarıdır. Şekil 1.1’de iki renkli serbest elektron lazeri için, 9,2µm ve 12,5µm’de pompa-sonda tekniği ile kuantum duvarlarına uygulanmış optik pompalama deney düzeneği gösterilmiştir. Burada iki salındırıcı, iki dalga boyu üretmesi için iki farklı magnetik aralıkta kurulmuştur. İki kuantum duvarı ise, uyarılmış yayınıma müsaade eder. İlk renk, ilk duvarın uyarılmış seviyesini artırır ve daha sonra ikinci duvar için beklemede kalır. Bu bekleme, ikinci renk ile uyarılır: 2mm uzunluğundaki örnek 0,7mm uzunluğundaki örneğe göre daha fazla geçiş (kazanç) sağlar ve pompalanmış yayınımlar sergiler.

1.2.3. Kimya Uygulamaları

SEL, kimya alanında endüstriyel ürün ve bilimsel araştırmalar için kullanılır. Kimyasal uygulamalar için en önemli spektral bölge, titreşimsel kızıl ötesi (3–30µm) bölgesidir. IR SEL’den elde edilen radyasyon, gaz fazında ve yoğunlaşmada kimyasal reaksiyonlar ve moleküler titreşimlerin denetlenmesinde kullanılabilir (Patel, 1982).

Yüzey kimyasında IR SEL içeren pump-probe tipi deneyler, birçok yüzey fenomenin nitelikli çalışmalarına (yayımlar, yüzey salınımı, yüzey moleküllerinin zamana bağlı yeniden dağıtımını gibi) olanak sağlar. Lazerlerin doku ve diğer materyallerle etkileşmesinin anlaşılması için pump-probe tekniği gerekmektedir. Pump probe tekniği malzemelerin lazerlerle etkileşmesinin anlaşılması için uygulanan bir tekniktir. Ticari pump-probe teknikleri bir Michelson interferometresi kullanarak demeti iki pulsa ayırır. Bunun sonucunda, bir pump demeti ve bir probe demeti ise pump demetine göre değişken bir zaman gecikmesi oluşturur. Pompa atması fiziksel ya da kimyasal değişiklikler oluşturur. Buradaki amaç durulma süreçlerini ölçmek ve probe atmaları durulma süreçlerinin görüntülenmesini sağlayabilmektedir (Couprie ve Ortega, 2000).

Moleküllerdeki titreşimsel enerji transferleri üzerindeki çalışmalar, moleküler titreşimleri uyararak yüksek güçlü kısa atmalar gerektiren mod seçici kimya gibi yeni

bir dizi deney üzerinde çalışmak için olanaklar sağlamıştır. SEL'ler, 4–12µm aralığındaki değişik soğurma bandlarının etkinliği ve tamamen moleküler titreşimlerin uyarılmasına bağlı yüksek güç ve kısa atma gibi özelliklere sahip olduğundan dolayı mod seçici kimya için çok avantajlı kaynaklardır.

1.2.4. İzotop Ayırımı Uygulamaları

Nükleer reaktör teknolojisi, SEL'lerin uygulaması için diğer umut verici alandır. SEL özellikleri, sentezlenmiş yeni stratejik malzemeler, kullanılmış nükleer yakıtın tekrar işlenmesi ve zenginleştirilmiş yakıt için elverişlidir. Böyle malzemeler, sadece nötron miktarını düzeltmek için istenmez, aynı zamanda α - parça bozulumundan dolayı malzemelerin etkinleşimi ve parçalarına ayrılmasını bastırmak içinde istenebilir. Küçük nötron soğurma kesitleri ile ilgi özel malzemeler: 90-Zr, 50-Ti, 53-Cr, 56,57,58-Fe ve 96, 97-Mo dır. Başka bir elde, 157, 155-Gd izotopları, termal nötronlar için nadiren büyük soğurma kesitlerine sahip olurlar. Elementlerin izotop kaymasına bağlı olarak, ya atomik buhar lazer ayrılığı ya da moleküler izotop ayrılık işlemi görev alabilir (Yamanaka, 1992).

1.2.5. Spektroskopik Uygulamaları

Geleneksel olarak moleküler titreşim spektroskopisi, katı, sıvı, gaz örneklerinden herhangi birini ele alarak kızıl ötesi frekansın fonksiyonu olarak soğurulmuş ışın miktarının analizi ile çalıştırılır. Bu yaklaşımın önemli sınırlaması, tür seçiciliğin eksikliği ve yaradılıştan gelen azalan duyarlılığıdır. Mor ötesi ve görünür bölgelerde, floresansa neden olmuş lazer ve çeşitli foton iyonlaştırması gibi iyi kurulmuş teknikler mevcuttur. Bu durumda, tür seçiciliği ile yüksek duyarlılık birleştirilerek daha kapsamlı çalışmalar yapılabilir.

1.2.6. Biyoloji Uygulamaları

Tutarlı ve yüksek parlaklı ışık kaynakları, uzak kızılötesi ile X-ışını dalga boylarında

sağlanan piko saniye atma özellikleri ile biofiziğin somutsal isteklerine karşılık verebilmektedirler.

SEL'in mükemmel özellikleri, fotonlar ve canlı dokular arasında bazı biyolojik etkileşimleri içerebilmektedir. SEL'in ortalama gücü, fotodinamik terapi ve en ısı pıhtılaşma terapisi için yeterlidir ve diğer belirtiler ile kanser için ışığı kullanan kemoterapisidir. İlerlemiş ateroskleroz damar tıkanıklıkları, lipidlerin büyük miktarı, özellikle atardamar duvarındaki birikimler için de ışın kemoterapisi kullanılabilir (Awazu vd., 2003).

1.2.7. Nano Teknoloji Uygulamaları

Kızıl ötesi serbest elektron lazerinin kullanımı ile kızılötesi görünür 'Toplam Frekans Oluşumu', (SFG) yüzeyler üzerindeki ışınımı soğuran türlerin spektroskopisini inceler. SEL, geniş ayarlanabilirliği ve yüksek pik gücü ile bu uygulama için çok uygundur. Ara yüzeylerdeki moleküllerin titreşim spektrumu anlamına gelen 'Toplam Frekans Oluşumu' (SFG), ilk olarak 10 yıldan uzun bir zaman önce Berkeley'den Y.R.Shen tarafından ele alınmıştır. O zamandan bu yana 20 kadar grup bu teknik üzerinde çalışarak yüzey biliminde yüzey frekans spektroskopisini geliştirmiştir. SFG, lineer olmayan yüzey kutuplanabilirliğinde elverişlidir. Bu, aydınlatılan alan ve atma süresinde ters ve üst üste bindirmeli kızıl ötesi ve görünür lazer enerjisine doğrudan bağlıdır. Ayrıca, kızıl ötesi lazer, kızıl ötesi ve Raman arasında yüzey üzerindeki titreşimler ile ayarlanırken SFG süratle gelişme haline girmiştir.

Platin-metil alkol sisteminin (yakıt pili için ilgili) deneysel sonuçları arasında, elektrokimyasal koordinasyonların yapısının anlaşılmasında görünebilir kızıl ötesi SFG'nin etkisi önemlidir. Bu anlamda, SFG, bir çözeltilerdeki elektrodun yüzeyinde meydana gelen olayların gözlenmesini sağlamış ve önemli sonuçlar elde etmiştir. Elektrot yüzeyi ile temastaki ilk katman yapısının bilgisi ise, elektro kataliz işlemlerin kapsamı için anahtar bir işlemdir (Couprie and Ortega, 2000).

1.3. Dünyadaki Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarları

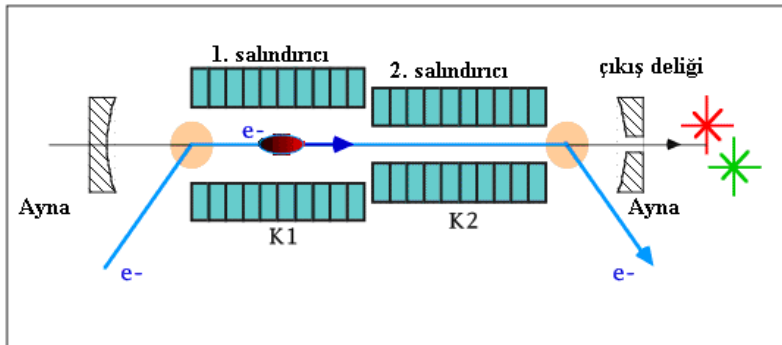
Bu bölümde dünyada hali hazırda çalışır durumda olan bir kaç kızıl ötesi serbest elektron laboratuvarı hakkında yapılan inceleme ve araştırmalar özetlenmiştir.

1.3.1. CLIO Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Orsay, Fransa)

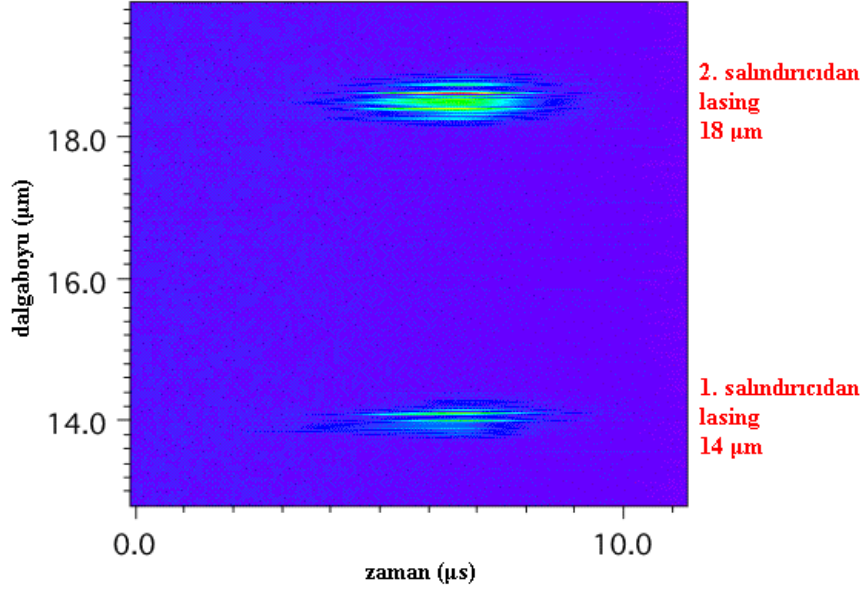
Fransa Orsay'daki CLIO Laboratuvarı büyük iki siknotron radyasyon (SR) halkası ve 20–50MeV aralığında çalışan lineer bir hızlandırıcı bulunmaktadır. CLIO, 3–60 μ m dalga boyları aralığında çalışan yüksek pik gücüne sahip kızılötesi SEL vardır.

CLIO laboratuvarında elektron kaynağı olarak kullanılan termiyonik tabanca 50–100V potansiyele sahiptir. Bu tabancalardan üretilen elektronlar, paketleyicilerde sıkıştırılarak 10ps süreli ve 5MeV enerjili demetler haline getirilir. Lazer zaman yapısı ise, 25Hz tekrarlama oranı ile 9 μ s'lik paketçikler 16ns süreli mikro atmalardan meydana gelir.

CLIO SEL'de yer alan, iki bağımsız 19 periyotlu salındırıcılar, iki farklı ve ayarlanabilir dalga boylarında eş zamanlı lazer salınımına olanak sağlarlar (Şekil1.3). Birbirinden bağımsız iki adet eş salındırıcı magnet ayarlanabilir olup 1m uzunluğundadır. İki renkte eş zamanlı olarak birbirinden bağımsız olarak oluşan ayarlanabilir ışınım 20 μ m dalga boyuna kadar ulaşabilmektedir. Farklı dalga boyları için pump-probe deneylerini gerçekleştirmesi açısından iki renkli lazer elde edilmesi CLIO'nun benzersiz bir özelliğidir (Şekil 1.2).



Şekil 1.2. CLIO'nun birbirinden bağımsız iki adet eş salındırıcı magnetleri



Şekil 1.3. İki renk işleminde CLIO'nun dalga boyu spektrumunun zaman evrimi

Çizelge 1.2'de CLIO SEL'e ait önemli parametreler verilmiştir.

Çizelge 1.2. CLIO SEL'e ait önemli parametreler

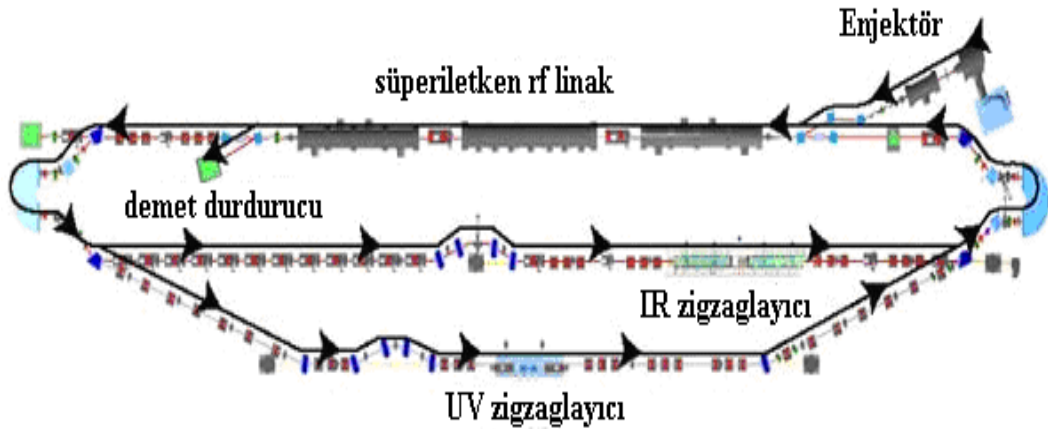
Spektral aralık	3–150 mikron
Enerji	8-50MeV
Pik akım	100A
Makro atma	10μs
Tekrarlama oranı	6,25-25Hz
Mikro atma	16ps
Emittance (rms)	40π mm.mrad
Maksimum ortalama güç	1W
Maksimum pik güç	100MW
Lazer atma uzunluğu	0,5-6ps
Periyot uzunluğu	5,04cm
Minimum spektral genişlik	%0,2–2
Işınım dalga boyu (λ_r)	3–90μm

CLIO'da çeşitli alanlarda uygulamalar için kızılötesi lazer ışınımı ile ilgili 5 oda vardır. Buralarda kuantum kuyuları, yakın alan kızılötesi mikroskop kullanımı,

moleküler fizik ve ‘Toplam Frekans Oluşumu’ (SFG) deneyi ile yüzey spektroskopisi, maddelerin biyolojiksel incelemesini üzerinde çalışılmaktadır. Bu odalarda CLIO ile birlikte eş zamanlı atmalar yayan Nd:YAG lazeri ve eş zamanlı görünür ve UV bölgede atmalar yayan bir Nd:YLF lazeri kullanılır. Ayrıca CLIO’da, SFG ile yüzey ve elektrokimya uygulamaları, yarıiletken ve kuantum kuyuları, yakın alan kızılötesi mikroskopi, yüzey foton yayını üzerinde çalışılmaktadır.

1.3.2. Jefferson Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Virginia, ABD)

Jefferson Laboratuvarı (J.Lab), Virginia’daki Newport News’de bulunan araştırma merkezidir. Jefferson Laboratuvarı, süperiletken radyo frekans (SRF) teknolojisine kullanılmaktadır. Elektron kaynağı olarak, Galyum Arsenid (GaAs) fotokatot tabancasına sahiptir. 350kV’lık fotokatot tabancadan çıkan sürekli (cw) elektron demetleri 0,5ps’lik paketçik yapısına sahiptir. Jefferson SEL, 75MHz’nin üstünde tekrarlanan oranda, 300 μ J’lik atma enerjili, yakın kızıl ötesinde 14 μ m, ultraviyolede ise 250nm aralığında ayarlanabilir dalga boyuna sahiptir. Şekil 1.4’de Jefferson Laboratuvarı’nın şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 1.4. Jefferson. Laboratuvarı SEL’in şeması

Jefferson Laboratuvarı’nda yakın kızılötesi spektral bölgesi için serbest elektron lazeri, kW mertebesinde yüksek ortalama güçte çalışır. Dolayısıyla Jefferson Laboratuvarı’ndaki SEL’de, 6 μ m dalga boyunda 10kW’lık cw işlemi başarılmıştır.

Gelişmiş Jefferson SEL için, her bir atmanın, pikosaniye süresinde, yüksek güçte, yüksek tekrarlama oranında bulunması ve oluşan ışınımın ayarlanabilir dalga boyuna sahip olması nedeniyle SEL elverişli bir mekanizmadır. Çizelge 1.3’de Jefferson Labotaruarı serbest elektron lazerine ait temel parametreler verilmiştir.

Çizelge 1.3. Jefferson Lab IR SEL parametreleri

Dalga boyu aralığı(μ)	1,5–14
Demet enerji(MeV)	80–200
Paket yükü(pC)	135
Demet gücü(kW)	2000
Enerji yayılımı(%)	%0,13
Lazer çıkış gücü/atma (μ J)	100-200
Lazer çıkış gücü(kW)	>10
Tekrarlama oranı(cw işlem, MHz)	4,7-75
Normalize edilmiş yayılım(mm-mrad)	<11
Ortalama güç(W)	1720
Mikro atma enerji(μ J)	>70
Atma uzunluğu	0,5-1,7ps

Jefferson Laboratuvarı’nın süperiletken elektron hızlandırıcı teknolojisinde kurulmuş SEL’ler, biyoloji, tıp, kimya, nano teknoloji, mikro teknoloji alanında kullanılmaktadır. Mikro devreler içeren elektroniklerin kullanılması, gelişmiş malzemeler, sentetik iplikler, plastik işlemleri, giyim ve kaplama için polimer kumaş, yeniden değerlendirilebilir meşrubat ve yemek paketlemesi alanlarında SEL kullanılabilir özelliğe sahiptir.

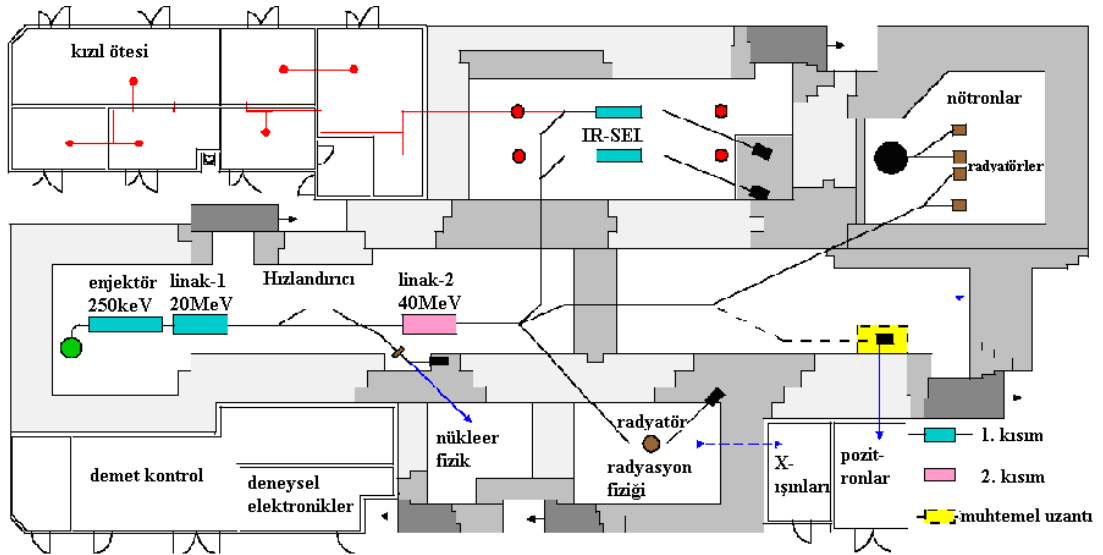
1.3.3. Rossendorf Kızıl Ötesi Serbest Elektron Lazeri Laboratuvarı (Elbe, Almanya)

Rossendorf Laboratuvarı (ELBE), Almanya Dresden-Rossendorf’da bulunan yüksek parlaklık ve düşük emittance özelliklerine sahip ve süper iletken lineer hızlandırıcı modüllerinin kullanıldığı bir SEL laboratuvarıdır. U27 (The Permanent Hybrid

Magnet) ve U100 ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ magnet Hybrid undulator) salındırıcılarından oluşan SEL-1 ve SEL-2 hatlarında ayarlanabilir, yüksek güce sahip ve koherent kızılötesi radyasyon ($4\text{--}200\mu\text{m}$) üretilir.

Rosendorf’da radyasyon kaynağı 250keV ’lik bir termiyonik DC elektron tabancasıdır. Elektronlar iki aşamalı RF paketleyici alt sistemlerde sıkıştırılırlar. Ana hızlanma, $1,3\text{GHz}$ ’de çalışan süperiletken lineer hızlandırıcı modüllerinde gerçekleştirilir.

Şekil 1.5’de, Rosendorf laboratuvarının şematik görünümü verilmiştir.



Şekil 1.5. Rosendorf (ELBE) laboratuvarının şematik görünümü

ELBE’nin salındırıcıları, orta ve kızıl ötesi bölgede koherent, yoğun, ayarlanabilir ışınlar oluşması için etkide bulunurlar. Bu ışınlar, yakın alan mikroskopisi ve spektroskopisi, ps bölgesinde pumb-probe deneyleri, yarı iletken ve kuantum yapıların incelenmesi, yüzey çalışmaları, biyomoleküllerin spektroskopisi deneyleri için kullanılır

Çizelge 1.4.’de Rosendorf kızıl ötesi serbest elektron lazeri laboratuvarının temel parametreleri verilmiştir.

Çizelge 1.4. ELBE Lineer hızlandırıcının dizayn parametreleri

Parametre	IR
Elektron demet enerjisi(MeV)	12–40
Dalga boyu aralığı (μm)	Salıncı U27 için: 4–22 Salıncı U100 için: 20–200
Maksimum paket yükü (pC)	77
Maksimum ortalama demet akımı (μA)	1000
Normalize edilmiş yatay yayılım/mm mrad(rms)	20
Normalize edilmiş düşey yayılım /keV ps(rms)	140
Mikro atma süresi (ps)	1–10
Mikro atma tekrarlama oranı (MHz)	13
Makro atma süresi (ms)	0,1–40 / cw
Makro atma tekrarlama oranı (Hz)	1–25

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Rölativistik elektron demeti, kutupları arasına sinüsel bir magnetik alan uygulanan salındırıcı magnetten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını elektromagnetik ışığa yoluyla kaybetmesi sonucu Serbest Elektron Lazeri elde edilir.

Serbest elektron lazerinin fiziğini, bir boyutta klasik elektrodinamik ve rölativistik kinematik kullanarak formülize etmiştir (Jackson, 1975). Hızlandırıcı içerisinde hareket eden elektron demetinin radyasyon gücünü tanımlamış, herhangi bir sistemde gözlenen radyasyon gücü ile hareketli sistem üzerindeki gözlemci tarafından gözlenen radyasyon gücünün aynı değerde olduğunu ifade etmiştir.

Elektron demetinin salındırıcı içindeki hareketini de incelemiştir (Duke, 2000). Bu çalışmaya göre, salındırıcıdaki elektromagnetik dalga ile elektron demetinin etkileşimi sonucunda elektronlar lazer alanına enerji bırakırlar. Böylece enerji kaybeden elektronlar, serbest elektron lazerinde kazanç oluşturlar.

Elde edilen ışınım demetinin kalitesini parlaklık ve aydınlık terimleri ile de açıklamak mümkündür (Wille ve Mcfaal, 2000). Buna göre, yüksek konum çözünürlüğü gerektiren deneyler için ışınım kaynağı noktasal olarak kabul edilir yani ışınımın enine genişliği ve diverjansı küçük olmalıdır.

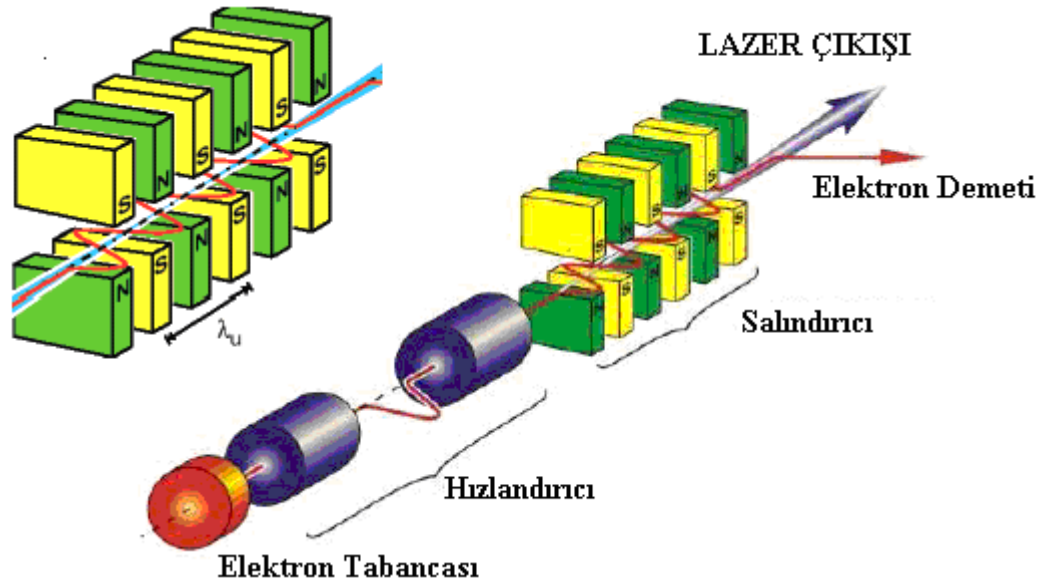
Salındırıcı içerisinde oluşan ışımada koherent şartını sağlamak için optik kavite geometrisini kullanmıştır (Siegman, 1986). Bunun için enine modda gaussian demet elde edilmiş, R_1 , R_2 aynaların yarıçapları, g_1 ve g_2 optik rezonatör parametreleri, ω , gaussian demet spotunun genişliği, Z_R , Rayleigh uzunluğu gibi parametreler ile ışınımın koherentlik özelliği incelenmiştir.

Salındırıcı alan içerisindeki elektron hareketinin rezonans durumu incelemiştir (Colson, 1980). Bu çalışmaya göre salındırıcı alanından etkilenen elektronlar elektromagnetik dalga yayınlırlar. Salındırıcı alanı ile bu elektromagnetik dalga birleşerek lazer alanı oluşturur. Lazer alanı hareket ettirici dalga özelliğine sahiptir.

Hareket ettirici dalga ile eş zamanlı hareket eden elektronlar rezonansa kabul edilir.

2.1. Serbest Elektron Lazerinin Fiziği

Serbest elektron lazeri (SEL), rölativistik hızdaki elektron demetinin, kutupları arasında sinüsel bir magnetik alan oluşturan salındırıcı magnetten geçerken kinetik enerjisinin bir kısmını lazer alana bırakarak, yüksek parlaklık değerine sahip tek dalga boylu (monokromatik) ışınım oluşumudur. Fiziksel olarak SEL'in en önemli elemanları elektron kaynağı (tabancası), paketleyici, elektron hızlandırıcısı, salındırıcı ve optik kavitedir. Kaynaktan çıkan elektronlar, elektron hızlandırıcı yardımıyla rölativistik hızlara çıkarılırlar. Hızlandırıcıdan geçiş sırasında elektronların sahip olduğu enerji 510keV'den daha büyük değere ulaştığında rölativistik hızlara erişmiş olurlar. Bu elektronlar, λ_u periyodu ile sıralanmış N_u tane magnet boyunca, yatay salınım hareketi yaparlar. Şekil 2.1'de SEL'in çalışma prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 2.1. Serbest elektron lazerinin çalışma sistemi

Serbest elektron lazerleri; SEL Amplifier, SEL Osilatör ve Kendiliğinden Genlik Artırmalı Yayınım (SASE SEL) olarak üç çalışma türünde gruplanabilir. SEL Amplifier'ler, en basit aygıtlardır. Burada dıştan bir radyasyon alan uygulanır ve bu

radyasyon alan elektron demetleri ile etkileşime girerek SEL daha güçlü hale getirilir. Aynalar ile kuşatılmış salındırıcı içerisindeki radyasyon, aynalar ile ileri geri yansıtılırsa, SEL'in çalışma şekli SEL Osilatör olarak adlandırılır. Elektron demeti optik kavitesiz uzun bir salındırıcıdan geçerse, geçiş sırasında lazer alanla etkileşmesi sonucunda ışınım üretir. Bu işlemde, Kendiliğinden Genlik Arttırımlı Yayınım (SASE) olarak adlandırılır (Winick, 1998).

2.2. Hızlandırıcı İçerisindeki Elektron Demetinin Radyasyon Gücü

Klasik elektrodinamiğe göre, ivmeli hareket yapan elektron, elektromagnetik radyasyon yayımlar ve bu radyasyonun gücü

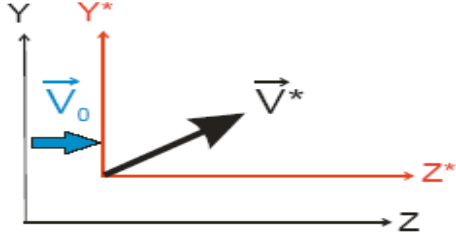
$$P_\gamma = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} (\dot{v}^*)^2 = P_\gamma^* \quad (2.1)$$

şeklinde verilir (Jackson, 1975). Burada ϵ_0 , vakumun dielektrik geçirkenlik katsayısı, c , ışık hızı ve \dot{v}^* , elektronun laboratuvar referans sistemindeki ivmesidir. Denklem (2.1)'e göre, herhangi bir sistemde gözlenen P_γ gücü, hareket edilen sistem üzerindeki gözlemci tarafından hesaplanmış P_γ^* gücü ile aynı değerdedir. Bu gerçek, laboratuvar sisteminde gözlenmiş radyasyon gücünü hesaplamak için kolaylık sağlar. Dolayısıyla \dot{v}^* ivmesi, laboratuvar sisteminde ölçülmüş değerler ile ifade edilebilir. Lorentz dönüşümleri uygulanarak hesaplanan ivmenin x-, y- ve z- yönündeki bileşenleri,

$$\dot{v}_z^* = \gamma^3 \dot{v}_z, \quad \dot{v}_y^* = \gamma^2 \dot{v}_y, \quad \dot{v}_x^* = \gamma^2 \dot{v}_x \quad (2.2)$$

eşitlikleri ile gösterilebilir. Denklem (2.2)'de, rölativistik hız faktörü $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$

değerine sahip olup, $\beta = v_0/c$ 'dir. Laboratuvar sistemine bağlı olarak, hareket sisteminin (*) v_0 hızı, Şekil 2.2'de gösterildiği gibi z- ekseninde bulunmaktadır.



Şekil 2.2. Koordinat sistemi v_0 hızına sahip (*) hareket ile tanımlanır

Elektron demetinin rölativistik hareketine dik olan ivmelenme, dış magnetik alan varlığında elektronların hareketi ile başlar. Örneğin, düşey eksenindeki ivmelenme için radyasyon gücü ise,

$$P_\gamma = \frac{e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \dot{v}_y^2 \quad (2.3)$$

olarak ifade edilir. Elektronlar ultra rölativistik hızlar ($\gamma \gg 1$) için hızlandırıldığı takdirde Denklem (2.3) radyasyon gücünde büyük bir artış olacaktır. Burada, SEL prensibinin terimlerine göre, radyasyon gücünün, yükün karesi ile ölçülmesi Denklem (2.1)'in önemli bir sonucudur.

e parçacık yükü, N tane e_0 giriş yükünden oluşmak üzere Denklem (2.2),

$$P_\gamma = \frac{N^2 e_0^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \dot{v}_y^2 \quad (2.4)$$

formunda tekrar yazılabilir. Burada, her bir elektronun radyasyon gücü,

$$P_\gamma = \frac{P_\gamma}{N} = \frac{N e_0^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} \gamma^4 \dot{v}_y^2 \text{ değerine sahiptir. Denklem (2.4) için ana koşul, N tane}$$

elektronun yük dağılımlarının nokta şeklinde tutulması gerekliliğidir. Ultra rölativistik hızlarda hareket eden ışın yapmış elektron paketçikleri için, paketçinin uzunlamasına boyutu radyasyonun dalga boylarından daha kısa olmalıdır.

2.3. Elektron Demetinin Salındırıcı Alan İçindeki Hareket Denklemi

Elektronlar salındırıcı magnet boyunca hareket ederken salınım hareketi yaparlar. Lineer ve helissel gibi çeşitlere sahip olan bu salındırıcı magnetler içerdiği periyodik eğici magnetler ile sinkrotron ışınımının yoğun ve daha çok koni özelliğinde oluşmasını sağlarlar (Wille ve Mcfaal, 2000).

Salındırıcı içerisinde hareket eden elektron, salındırıcının çeşitine göre (lineer, helissel) magnetik alan bileşenlerinden etkilenecek yatay, dikey ve dairesel hareketler yapabilirler. Elektronun bu hareketlerini gözlemleyebilmek için helissel salındırıcısı ele alınabilir: SEL içerisindeki, λ_u periyot uzunluğuna sahip bir helissel salındırıcı

$$\vec{B} = B \begin{pmatrix} -\sin(k_u z) \\ \cos(k_u z) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \left(k_u = \frac{2\pi}{\lambda_u} \right) \quad (2.5)$$

eşitliğinde gösterildiği gibi magnetik alan bileşenlerine sahiptir. Burada, λ_u salındırıcının magnetler arasındaki periyodik uzunluğu, k_u salındırıcı magnetin dalga sayısı olarak ifade edilir. Elektron bu magnetik alan bileşenlerine sahip salındırıcı içerisinde geçerken ileri yönde ilerlemesini sağlayan Lorentz kuvvetinin etkisinde kalır. Lorentz kuvveti altındaki elektronun hareket denklemi,

$$F = \dot{p} = m\gamma\dot{v} = m\gamma \begin{pmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{z} \end{pmatrix} = e \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{pmatrix} \times \vec{B} = eB \begin{pmatrix} -\dot{z} \cdot \cos(k_u z) \\ -\dot{z} \cdot \sin(k_u z) \\ \dot{x} \cdot \cos(k_u z) + \dot{y} \cdot \sin(k_u z) \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir. Denklem (2.6)'nın çözümünde, helissel hareket için, elektronun z- eksenini boyunca hızı, $v_z = \text{sabit}$, $z = v_z t = \beta_z ct$ olarak alınır. β_z , elektronun z- eksenindeki hız faktörüdür. x- eksenini ve y- eksenindeki elektronun hareketi için hız bileşenleri ise;

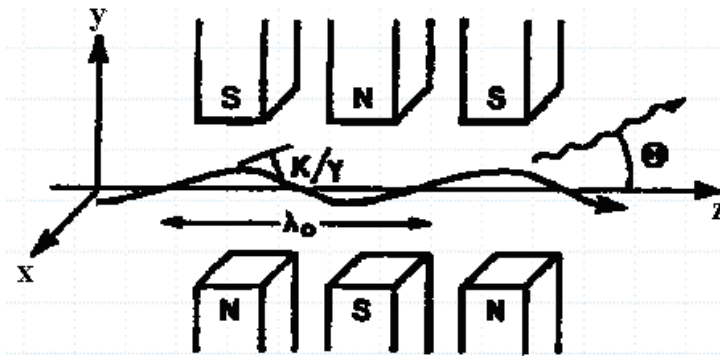
$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \end{pmatrix} = c \frac{K}{\gamma} \begin{pmatrix} -\sin(k_u z) \\ \cos(k_u z) \end{pmatrix}, \quad (2.7)$$

şeklinde verilir. Burada γ , elektronun rölativistik faktörü, K ($K \sim 1$) salındırıcı magnet parametresidir. Denklem (2.7)'ye bağlı olarak, elektronun z- eksenindeki hız faktörü $\beta_z = v_z / c$ olarak alınırsa,

$$\beta_z = \frac{1}{c} \sqrt{v^2 - \dot{x}^2 - \dot{y}^2} = \sqrt{\beta^2 - \left(\frac{K}{\gamma}\right)^2} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2} - \left(\frac{K}{\gamma}\right)^2} \approx 1 - \frac{1}{2\gamma^2} (1 + K^2) \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilebilir (Duke, 2000).

Salındırıcı magnet içerisinde yatayda hareket etmek isteyen elektron, salındırıcının boyuna magnetik alan ile karşılaştığında ise boyuna hız bileşeninde periyodik değişime uğrar. Bu durum eksen boyunca hız bileşeni ile birleştiğinde yatay eksen yönünde eğilmelere neden olur. Parçacığı ideal yörüngesine götürecektir olan maksimum açı Θ , Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Eğici magnetlerden oluşan salındırıcı magnet

İdeal yörüngesinde seyahat eden parçacığın ulaşacağı en maksimum sapma açısı

$$\Theta = \dot{x}_{\max} = \frac{K}{\gamma} \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir.

Salıdırıcı veya zigzaglayıcı magnet içerisinde K parametresinin $K = 1$ değeri için $\Theta = 1/\gamma$ 'dir. Θ açısı sinkrotron ışınımının doğal yayılma açısı olarak tanımlanır. Salıdırıcı magnetlerde K parametresine bağlı olarak eğicilik çok zayıftır ve dolayısıyla Θ , çok küçük yayılma açısı gösterir. Zigzaglayıcı magnetlerde eğicilik daha kuvvetli olduğundan geniş bir spektrum ışımaya oluşur.

2.4. Salıdırıcıdaki Elektromagnetik Dalga ile Elektron Demetinin Etkileşimi

Elektron ve lazer alan arasındaki enerji değişimi elektronun hareket eden elektron, lazer alanla karşılaştığı takdirde sahip olduğu yönüne bağlı olarak enerjisinde enine hız bileşeni ile mümkün olur.

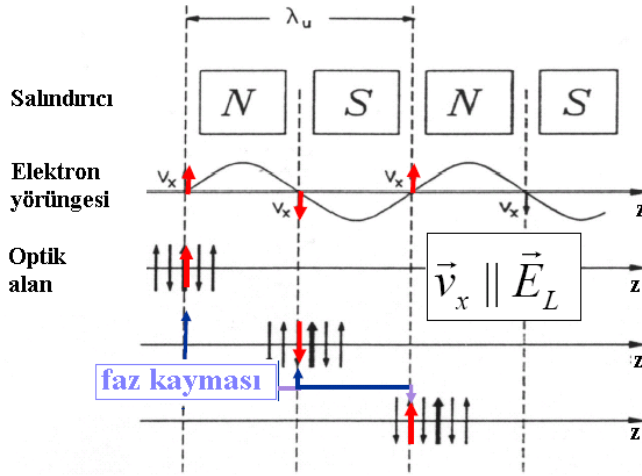
Helissel bir salıdırıcıdaki elektrik alan \vec{E} ,

$$\vec{E} = E_0 \begin{pmatrix} \cos(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ \sin(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2.10)$$

olarak tanımlanır. z- eksenindeki elektron demetlerine paralel olarak dışarıdan uygulanan elektromagnetik dalganın hareketi incelenirse, dalga düzleminin elektrik alan vektörünün z- bileşenine sahip olmadığı görülür ($E_{L,z} = 0$). Lazerin elektrik alanının x- eksenindeki bileşeni,

$$E_{L,x} = E_{L,0} \cos(\omega_L t - k_L z - \varphi_0) \quad (2.11)$$

düzlem dalga şeklinde ele alınır. ω_L , lazer alanının frekansı, $k_L = 2\pi/\lambda_L$, lazerin alanının dalga sayısı, φ_0 , herhangi başlangıç fazıdır. Lazerin $E_{L,x}$ elektrik alanı, elektronun yatay hız bileşeni ile etkileşime girer. Salıncının magnet periyodu ve lazer alanı arasındaki faz, pozitif enerji kazancına dönüşür. Örneğin, v_x yatay hız bileşenine sahip elektron, yatay hızıyla aynı yönde olacak şekilde lazerin elektrik alanının maksimumu ile karşılaşırsa negatif yüklü elektron bu alan tarafından yavaşlatılır ve elektronun enerjisi lazer alanına transfer edilir. İkinci yarı periyodunda ise elektron $-v_x$ hızına sahip olur. Elektronu ileri doğru hareketlendiren salıncı magnet kuvvetindeki eğilim ve lazer elektromagnetik alanının elektrondan daha hızlı hareket etmesinden dolayı, lazer alanı elektronun önünde hareket eder. Eğer ki faz kayması π değerinde ayarlanırsa, elektrik alanı negatif değerde olur. Böylece elektron enerji kaybederek, lazer alanına enerji aktarır. Salıncının sonuna kadar bu işlem tekrar ederek, ışınımda pozitif enerji kazancı elde edilir (Wille ve Mcfaal, 2000). Şekil 2.4'te bu durum şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Lazer alanı içindeki elektronun hareketi

Salıncı içerisinde sinüsel hareket yapan elektronun enerjisindeki değişim dE olarak alınır. En yüksek frekanslar için, enerjinin zamana göre değişimi dE/dt çok hızlı gerçekleşir (Duke, 2000).

$$\begin{aligned}\frac{dE}{dt} &= mc^2 \frac{d\gamma}{dt} = \vec{v} \cdot \vec{F} = e \cdot \vec{v} \cdot \vec{E}_L = e(\dot{x}E_{L,x} + \dot{y}E_{L,y}) \\ &= -ec \frac{KE_0}{\gamma} \sin\{(k_u + k_L)z - \omega_L t + \varphi_0\} = -ec \frac{KE_0}{\gamma} \sin \psi\end{aligned}\quad (2.12)$$

Denklem (2.12)'de salındırıcı içerisindeki elektronun yatay hız bileşeni ile elektromagnetik dalga arasındaki faz açısı (ponderomotive fazı) ψ ,

$$\psi = (k_u + k_L)z - \omega_L t + \varphi_0 \quad (2.13)$$

olarak tanımlanır. Denklem (2.13)'de $z = v_z t = \beta_z c t$ olarak alınırsa,

$$\psi = (k_u + k_L)z - \frac{\omega_L z}{\beta_z c} + \varphi_0 \quad (2.14)$$

eşitliği elde edilir. Bu ponderomotive faz açısı, sabit kaldığı sürece lazer alanı ile elektron arasındaki enerji transferi devam eder. Böylece sabit ponderomotive faz açısı ψ ile rezonans koşulu oluşur ve lazer alanına göre faz kayması olmayan durum

$$\frac{d\psi}{dz} = (k_u + k_L) - \frac{\omega_L}{\beta_z c} = 0 \quad (2.15)$$

şeklinde ifade edilir. $\omega_L = ck_L$ olarak alınılırsa, Denklem (2.15) $k_u + k_L - \frac{k_L}{\beta_z} = 0$

biçimini alır. $\lambda_L = 2\pi/k_L$ için çözümde rezonans koşulu yerine getirilirse lazer dalga boyu,

$$\lambda_L = \lambda_u \frac{1 - \beta_z}{\beta_z} \approx \lambda_u (1 - \beta_z) \approx \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K^2) \quad (2.16)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklem, dalga boyu λ_L için çok önemli koherent şartı

sahiptir (Duke, 2000).

Elektron demetinden elektromagnetik dalgaya sürekli enerji aktarımı için Denklem (2.16)'da koşul sağlanmalıdır. Buna göre, bütün elektronlar sahip olacakları enerjileri ile salındırıcıya girdikleri zaman enerji aktarımından dolayı hızla rezonans enerjisini dalgaya bırakırlar. Böylece, rezonansı önemsenmeyecek kadar az olan enerjiler ile elektron parçacıkları için, ψ faz açısı kayacaktır.

Rezonans enerji, lazer alanına göre faz kayması olmayan ($\frac{d\psi}{dz} = 0$) enerji olarak açıklanır. Rezonans enerji koşulu,

$$\gamma_r^2 = \frac{k_L}{2k_u} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (2.17)$$

şeklinde ifade edilir. SEL, rezonans enerjilerine çok yakın değerlerde bulunan elektron enerjilerinden oluşturulur. $\Delta\gamma$, elektronun enerji değişimi olmak üzere, toplam enerji transferini rezonans enerji ile ilişkilendirmek ve rezonans enerjisinden sapmayı bir değişken olarak kullanmak SEL elde etmek için avantajlıdır (Duke, 2000).

$$\gamma = \gamma_{res} + \Delta\gamma, \quad \Delta\gamma \ll \gamma_r \quad (2.18)$$

Denklem (2.18)'e göre, elektronların toplam enerjisi, rezonans enerjisinden küçük olduğu durumda ($\gamma < \gamma_r$) elektronlar enerji kazanırken, tam tersi durumda ($\gamma_r < \gamma$) enerji kaybederler. $\gamma = \gamma_r$ durumunda ise lazer alanı ile elektronlar arasında enerji geçişi olmaz. Işığın kavite içerisindeki olası kayıpları göz önünde bulundurulursa, elektromagnetik dalga enerjisindeki kaybın kazanca eşit olduğu duruma kararlı durum denir.

Denklem (2.18)'de öngörülen koşul ile

$$\begin{aligned} \frac{d\psi}{dz} &= (k_u + k_L) - \frac{\omega_L}{c \left(1 - \frac{1 + K^2}{2(\gamma_{res} + \Delta\gamma)^2}\right)} \approx k_u + k_L - \frac{\omega_L}{\beta_z(\gamma_{res})c} + \frac{\omega_L}{c} \frac{1 + K^2}{\gamma_{res}^3} \Delta\gamma \\ &= \frac{\omega_L}{c} \frac{1 + K^2}{\gamma_{res}^3} \Delta\gamma = k_u \frac{2}{\gamma_{res}} \Delta\gamma \end{aligned} \quad (2.19)$$

eşitliği sağlanır. Burada ψ faz açısının z ye bağlı ikinci derece türevinden

$$\frac{d^2\psi}{dz^2} = k_u \frac{2}{\gamma_{res}} \frac{d\gamma}{dz} \text{ ifadesi elde edilir.}$$

$$\frac{d\gamma}{dz} = -\frac{eE_0 K}{m_0 c^2 \gamma \beta_z} \sin\psi \text{ formunda, } \frac{dE}{dz} = -\frac{eE_0 K}{\gamma \beta_z} \sin\psi \text{ eşitliği kullanarak,}$$

$$\frac{d^2\psi}{dz^2} = -\frac{2e}{m_0 c^2} \frac{E_0 K k_u}{\gamma_{res}^2 \beta_z} \sin\psi = -\Omega^2 \sin\psi \quad (2.20)$$

$$\Omega^2 = \frac{2e}{m_0 c^2} \frac{E_0 K k_u}{\gamma_{res}^2 \beta_z} \quad (2.21)$$

frekans denklemi elde edilir. Bu eşitlik, $\Delta\gamma - \psi$ faz uzayındaki sarkaç denklemdir. Denklem (2.21)'e göre, elektronlar ya rezonans enerjisinden ya da senkronize fazdan küçük sapmalar ile periyodik salınımlar icra ederler (Duke, 2000).

2.5. Salındırıcının Işınım Özellikleri

Işınım demetin kalitesi genel olarak, akı, parlaklık (brightness) ve aydınlık (brilliance) nicelikleri ile incelenir. Akı, saniye başına bir enerji aralığında yayılan foton sayısı anlamına gelmektedir. Foton akısı,

$$F = \frac{\text{foton}}{s \times \%0.1bg} \quad (2.22)$$

olarak ifade edilir. Burada F , foton akısı, genel olarak 1A'lik demet akımına normalizedir.

Salındırıcı içerisinde yer alan demet kesit alanı $\sigma = \sqrt{\varepsilon\beta}$ eşitliği ile açıklanır. β terimi, demetin odaklandığı noktayı açıklayan pozisyon bağımlılık ifadesidir.

Yüksek konum çözünürlüğü gerektiren deneyler için ışınım kaynağı noktasal olarak kabul edilir. Buna göre, ışınımın enine genişliği ve diverjansı küçük olmalıdır. Bu özellik göz önünde bulundurularak demetin kalitesi brilliance (parlaklık) ve brightness (aydınlık) terimleri ile açıklanabilir. Aydınlık terimi ile demetin açısız diverjansı, $\sigma'_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z}\beta_{x,z}}$ bağıntısına bağlı olarak,

$$S = \frac{F}{2\pi\sigma'_x\sigma'_z} = \frac{F\sqrt{\beta_x\beta_z}}{2\pi\sqrt{\varepsilon_x\varepsilon_z}} = \text{foton} / s / \text{mrad}^2 / \%0.1bg \quad (2.23)$$

şeklinde tanımlanır. Parlaklık ise, enine demet boyutlarını veren, $\sigma_{x,z} = \sqrt{\varepsilon_{x,z}\beta_{x,z}}$ bağıntısına bağlıdır (Wille ve Mcfaal, 2000).

$$B = \frac{F}{4\pi^2\sigma_x\sigma_z\sigma'_x\sigma'_z} = \frac{F}{4\pi^2\varepsilon_x\varepsilon_z} = \text{foton} / s / \text{mm}^2 / \text{mrad}^2 / \%0.1bg \quad (2.24)$$

Pratik birimler cinsinden, σ_z paketçik uzunluğu olmak üzere, doygun parlaklık,

$$B_s \cong 3.9777.10^{42} \left(\frac{E[\text{GeV}]}{N} \right)^4 \frac{\sigma_z[\text{mm}]}{(\lambda_u[\text{cm}][kf_b(k)])^2} \quad (2.25)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik kavite içi parlaklık için bir referans değer olarak

kullanılabilir.

Genel anlamda, doygun parlaklık değeri, ışınımdaki doymuş yoğunluğu veren

$$I_s \left[\frac{W}{cm^2} \right] \cong 10^{22} \frac{E^4 [GeV]}{N^4} \frac{1}{[\lambda_u [cm] k f_b (k)^2]} \quad (2.26)$$

fonksiyonu ile,

$$B_L \simeq 6.4 \cdot 10^{37} \frac{\hat{I} [A]}{N} \frac{E [GeV]^3}{\lambda_u [cm] L_c [cm]} \frac{\sigma_z [mm]}{1 + \frac{k^2}{2}} \quad (2.27)$$

şeklinde pik lazer parlaklığı olarak tanımlanabilir. \hat{I} pik akımı değeri alır. Burada belirtilmelidir ki, ışınım özelliklerinde parlaklık ve aydınlık terimlerinin demet yayılımına bağlı oluşu önemli bir noktadır (Ciocci, 2000).

2.6. Serbest Elektron Lazerinin Temel Parametreleri

2.6.1. Dalga boyu

Bir düzlemsel salındırıcı magnetten elde edilen serbest elektron lazeri için, oluşan foton demetinin dalga boyu,

$$\lambda_{lazer} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right) \quad (2.28)$$

olarak ifade edilir. λ_u , düzlemsel salındırıcının periyot uzunluğu, γ , elektron demetinin Lorentz faktörü, θ , elektronun geliş açısı ile gözlem açısı arasındaki açıdır.

Lazerin dalga boyu pratik birimler cinsinden,

$$\lambda_{SEL}(A^{\circ}) = 13,056 \frac{\lambda_u(cm)}{E^2(GeV^2)} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad (2.29)$$

ile verilir.

Farklı spektral bölgeler için elde edilen serbest elektron lazeri dalga boyu aralıkları; uzak kızıl ötesi bölgesi (1000 μ m–10 μ m), yakın kızıl ötesi, görünür ve ultraviyole bölge (10 μ m–200nm), vakum ultraviyole ve daha ileri ultraviyole bölge (200nm–100nm), X ışını bölgesi (100nm-1nm)'dir.

Endüstri amaçlı lazerler, 10 μ m–200nm aralığında çalışmaktadır. Fakat bu lazerlerin çalışma aralığı 10 μ m–100nm'ye genişletilmiştir. Bu aralık, foton kaynakları ve detektörlerin gelişmişliği, bilimsel araştırmalar için çok önemlidir.

2.6.2. Enerji

Serbest elektron lazerlerinde, salındırıcı içerisinde hareket eden elektronun sahip olduğu enerji

$$E = \gamma m_e c^2 \quad (2.30)$$

eşitliği ile ifade edilebilir.

Elektromagnetik spektrumdaki bölgelere göre elektron enerjileri; uzak kızıl ötesi bölgede 5–10MeV, orta kızıl ötesi bölgede 10–50MeV, UV-VUV bölgede 500–1000MeV ve X ışınları bölgesi 10–20GeV'dir.

Lazer dalga boyunun ayarlanabilirliği, gerek duyulduğunda elektron enerjisinin değişimi ile yapılabilir. Denklem (2.30)'a göre, SEL'in kısa dalga boyları için elektron demetinin yüksek enerjilerine ihtiyaç duyulur (Kulipanov, 1990).

2.6.3. Pik Paketçik Akımı ve Ortalama Akım

Elektron demeti için en küçük birim, hızlandırıcı gerilimin bir dalga boyu veya bunun katları kadar aralığa sahip olan mikro paketçiklerdir. Hızlandırılan elektronların mikro paketçik yapıda oluşturduğu akımın pik değeri,

$$\hat{I} = \frac{qc}{(2.35\sigma_z)} \quad (2.31)$$

olarak tanımlanır. q , paketçik yükü, c ışık hızı, σ_z paketçik uzunluğudur. Demetteki elektronlar ortak bir referans noktası etrafında faz salınımları yaparak boyuna kararlı dağılım oluştururlar. Buna da paketçik uzunluğu denir.

Ortalama akım ise, elektron paketçiklerinin hızlandırıcı sonunda oluşturduğu ortalama demet akımıdır.

$$\langle I \rangle = \frac{n_\mu q}{T_r} \quad (2.32)$$

n_μ , bir atma içindeki mikro paketçik sayısı, q paketçik yükü, T_r ardışık iki mikro atma arasındaki zaman farkıdır ve

$$T_r = \frac{1}{f_{linak}} \quad (2.33)$$

eşitliği ile ifade edilir. f_{linak} , saniyede linak tarafından üretilen atma sayısıdır. Bu RF frekansı, güç kaynağının verimliliğine bağlı olarak 50MHz ile 9GHz arasında değer alabilir.

Elektron demetinin zaman yapısı, oluşacak ışımının zaman yapısını ve dolayısıyla serbest elektron lazerinin zaman yapısını belirler. Bu yüzden, SEL'de elde edilecek ışımının kullanım alanları belirlenerek uygun bir elektron demet zaman yapısı oluşturulmalıdır.

2.6.4. Normalize Yayınım

Demetlerin kalitesi, elektronların yoğunluğunun paketçik içerisinde homojen olarak dağılması ve demetlerin enine boyutunun küçük olup değişmez kalmasıyla ölçülür. Elektronların paketçik içerisindeki konumu ve yörüngesinin eğimi zamanla elektron yörüngesi ideal yörüngeden sapacak şekilde biçimlenir. Bu gelişme, demeti oluşturan elektronların kapladığı alanı arttırmaya çalışır. Bu kesit alanı ise, emittans (yayınım) olarak bilinir. Kinematik faktörlerden bağımsız olarak, normalize yayınım

$$\varepsilon_n = \gamma\beta\varepsilon \quad (2.34)$$

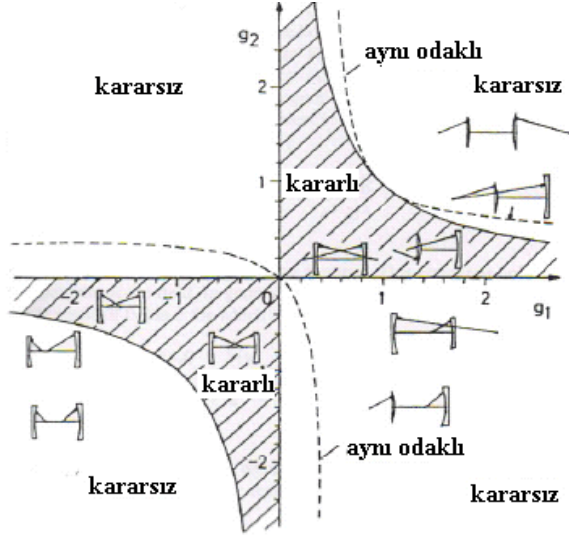
olarak ifade edilir. Günümüzde, ulaşılan en küçük enine emittans değeri nm-mrad mertebesinde dir

Serbest elektron lazerinin bir diğer önemli özelliği olan koherent ışınım ise, Osilatör SEL'in optik kavite parametresine bağlıdır. Optik kavite, salındırıcı ve elektron demetinden oluşan Osilatör SEL'deki optik kavitede foton demetinin çoklu geçişleri sebebiyle demet iyi şekilde enine koherentlik gösterir. Optik kavitenin fiziksel boyutları, kavite uzunluğu ve aynaların yarıçapları optimize edilerek koherentlik şartı sağlanabilir.

Kararlılık parametresi olarak bilinen g , her bir ayna için,

$$g_1 = 1 - \frac{L}{R_1} \quad \text{ve} \quad g_2 = 1 - \frac{L}{R_2} \quad (2.35)$$

olarak ayarlandığında $0 < g_1 \times g_2 < 1$ olduğu durumda eksen kararlı durum gösterir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5 Kararlı ve kararsız durumun şematik gösterimi

Kullanılabilecek minimum salındırıcı magnet aralığı gausyen demet spotu ile belirlenir. Salındırıcı aralığı için kriter:

$$g > \pi\omega \quad (2.36)$$

Denklem (2.36)'da ω , gausyen demet spotunun genişliğidir. Bu koşul sağlandığı zaman elektron demetinin %99'dan büyük bir kısmı salındırıcı magnet boyunca iletilebilir. Ayrıca, gausyen demet kavite içerisinde salındırıcı magnet gap aralığından (g) geçebilecek büyüklükte, her bir kavite aynası üzerindeki demet spot boyutu ise aynalardaki kayıpları önlemek için küçük değerde olmalıdır. Bu sebeplerden dolayı, optik kavite uzunluğu kısa tutulmalıdır.

Optik kavite tasarımı için her iki ayna üzerindeki demet spot değerleri

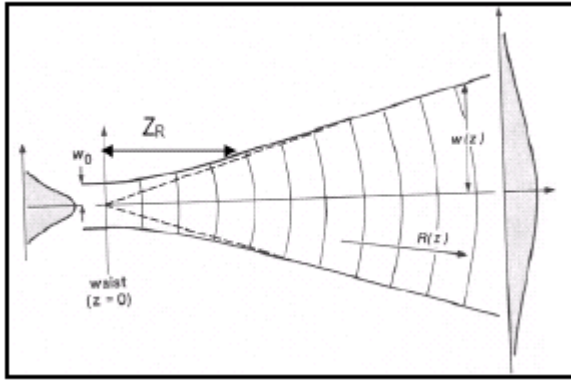
$$\omega_1 = \sqrt{\frac{L\lambda_r}{\pi}} \left(\frac{g_2}{g_1(1-g_1g_2)} \right)^{1/4} \quad (2.37)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{L\lambda_r}{\pi}} \left(\frac{g_1}{g_2(1-g_1g_2)} \right)^{1/4} \quad (2.38)$$

eşitlikleri ile verilir. Işınımın minimum spot genişliği (en düşük etkili modun bel yarıçapı)

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{L\lambda_r}{\pi} \left(\frac{g_1 g_2 (1 - g_1 g_2)}{(g_1 + g_2 - 2g_1 g_2)^2} \right)^{1/4}} \quad (2.39)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada, λ_r , radyasyonun dalga boyu, Z_R , Rayleigh uzunluğu olarak tanımlanır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Rayleigh uzunluğunun şematik gösterimi

Son durumda, bir ışınım için Rayleigh uzunluğu,

$$z_R = \frac{\pi\omega_0^2}{\lambda_r} \quad (2.40)$$

olarak ayarlanmalıdır. Gaussyen bir demetin Rayleigh uzunluğu, demetin ilerleme yönündeki demet yarıçapının, merkezi bel kalınlığından $\sqrt{2}$ ($\sqrt{2}\omega_0$) katı kadar arttığı uzunluktur. Optik demet, Rayleigh uzunluğunu geçtikten sonra kırılır ve demet boyutu iki katına çıkar (Siegman, 1986).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Serbest elektron lazeri elde edebilmek için bir elektron kaynağı (elektron tabancası), bu elektron kaynağından çıkan elektronları sıkıştırmak için paketleyici, paketlenmiş elektronları rölativistik hızlara çıkarabilecek bir hızlandırıcı, hızlandırılan bu elektronların salınım yapmasını sağlamak için bir salındırıcı ve oluşacak ışınımı yönlendirmek için optik kaviteye ihtiyaç vardır. Bu parçalar detaylı olarak bu bölümde tartışılmıştır.

3.1. Elektron Tabancası

Elektron tabancası elektron demetini üreten elektriksel bir cihazdır. Bir elektron tabancası, elektronların üretildiği katod ve odaklandığı elektrodlardan oluşur.

Elektron tabancaları, elektronları yayma şekillerine göre termiyonik ve fotokatot tabanca olarak iki şekilde incelenebilir.

3.1.1. Termiyonik Tabanca

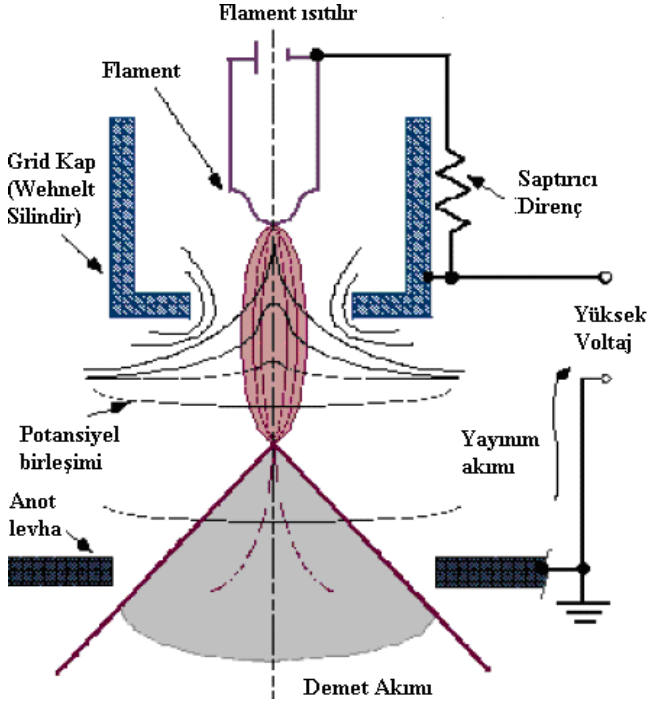
Termiyonik tabanca, elektronların oluşturulduğu katot, elektronları odaklayan Wehnelt kapağı ve anottan oluşmaktadır (Şekil 3.1). Termiyonik tabancanın katottunda bulunan elektronlar, genel olarak yüzeye yakın yerde birikirler. Katot ısıtıldığı zaman, elektronlar bağlı oldukları atomları bırakmaya yönelirler ve maddeden tesirli olarak sökülürler.

Katottan sökülme için ısı enerjisi alan elektronlar harekete başlarken yüzeye belirli açılar yapan hız bileşenlerine sahip olurlar. Bu hız bileşenlerine bağlı olarak elektronların kinetik enerjisi, belirli bir zaman aralığında yüzey boyunca yapılan işe eşit bulunmalıdır. Bu minimum enerji, 'iş fonksyonu' olarak bilinir. Isıtılmış yüzey katot formundaysa, verilen sıcaklıkta T ($^{\circ}\text{K}$), yayılmış maksimum akım yoğunluğu,

Richardson/Dushman denklemleri ile verilir.

$$J = A.T^2 . e^{(-11600.\phi/T)} \quad (3.1)$$

Burada, ϕ iş fonksiyonu (eV) ve A, 120A/cm²'lik teorik değere sahiptir.



Şekil 3.1. Termiyonik tabanca düzeni

Şekil 3.1’de termiyonik tabancanın çalışma düzeni gösterilmektedir. Burada, katot yani flament, yayılan birçok elektronlar için, ϕ düşük iş fonksiyonuna bağlı yüksek erime noktalı malzemelerden yapılmıştır. Wehnelt silindiri, yönlendirici klavuz kabıdır ve potansiyelde flamentten (katot) birkaç yüz volt farklıdır. Bu, anot çıkış noktasının üzerinde kesişen elektron yollarına neden olur. Saptırıcı direnç, Wehnelt silindiri içinde negatif sapma sağlamak için kullanılır. Bu direnç, tabanca için kontrol mekanizması olarak görev yapar. Öyleki yayılan akım arttığı için saptırıcı direnç tarafından bastırılır. Anot ise, pozitif yüklü metal plakadır. Sistem içerisinde anodun görevi, elektron demetini kendine doğru hızlandırmaktır.

Termiyonik tabancanın işleyiş şekline göre, pozitif elektriksel potansiyel anoda,

negatif potansiyel Wehnelt kapağına uygulanır. Katot için hızlandırıcı potansiyel (kV biriminde) seçilir. Katottan (flamentden) çıkan elektronlar, pozitif potansiyelli anot tarafından dışarıya doğru hızlandırılır. Bu elektronlar anotun etkisiyle dışarıya doğru hareket ederken negatif potansiyelli Wehnelt silindiri ile ortaya doğru odaklandırılır. Bu durumun sonucunda elektronlar Wehnelt silindiri ile flament (katot) ucu arasında birikir. Buna uzay yükü denir. Uzay yükünün altındaki elektronlar anota yakın bölgede olduğundan Wehnelt silindirinin ucundaki çıkış noktasından çıkarak tabanca alanını terk ederler. Son durumda, elektronlar 10A/cm²'lik akım yoğunluğuna ulaşırlar (Ozansoy, 2007).

3.1.2. Fotokatot Tabanca

Metal yüzey (fotokatot) üzerinde bulunan elektronlar, metalin ısıtılması dışında metalin üzerine ışık gönderilmesi yolu ile de sökülebilir. Bu durumda yüzey üzerine gönderilen fotonların enerjisi elektronların iş fonksiyonundan büyük ise,

$$\frac{1}{2}mV^2 = h\nu - e\phi \quad (3.2)$$

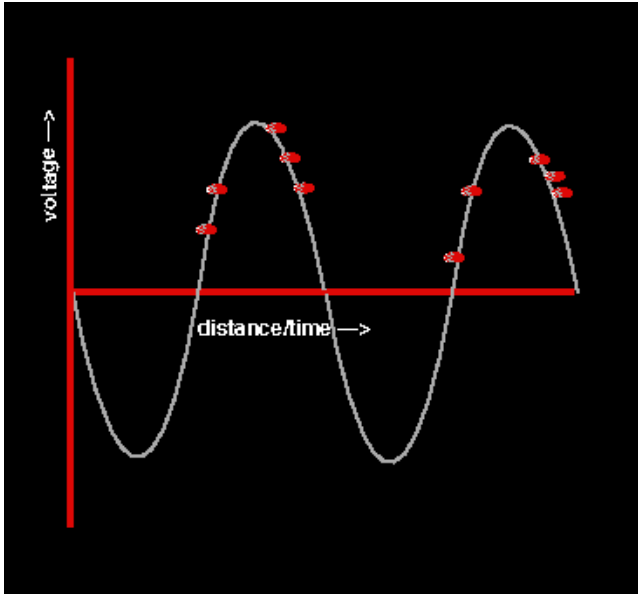
elektronlar, Denklem (3.2) içerisinde verilen ilk hızla yayılırlar. Fakat elektronlar tabancadan düşük hızlarda yayıldıklarından, yüksek hız değerlerini hızlandırıcı içerisinde hareket ederken kazanırlar.

RF alan içerisine yerleştirilmiş fotokatotlar, düşük emittanslı ve kısa atmalı elektron demetleri üretirler. Elektron demetlerin atma yapısı RF yapı ile kontrol edilir. Fotokatot üzerine gönderilen lazer atmasının genişliği, katottan çıkan elektron demetinin atma süresini belirler. Lazer atma süresi yaklaşık olarak 10⁻⁸ – 10⁻¹¹s (0.01-10ns) arasındadır. Bu süre içinde de 100A/cm²'lik elektron akım yoğunluğu elde edilir. Ayrıca, metal yüzeyden sökülen elektron demetinin yoğun olması içinde yüzeyi aydınlatan ışık kaynaklarının yoğun olması gerekir (Ozansoy, 2007).

3.2. Paketleyici

Elektron tabancasından çıkan elektron demeti, sıkıştırılarak etkin bir şekilde hızlandırılmak için sub harmonik paketleyici adı verilen RF oyuklara aktarılır. Paketleyicinin amacı, elektron tabancasından çıkan elektron demetini paketlemek, frekans değerini artırarak dalga boyunu küçültmek ve demeti hızlandırmaktır.

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi elektronlar, mikrodalganın tepesinde iken dalgadan daha fazla enerji alırlar ve daha fazla hızlanırlar. Öyle ki, dalga üzerinde yüksek seviyelerde bulunan elektronlar, daha alçakta yavaş ilerleyen elektronlara yetişirler. Dalganın alçak seviyelerinde bulunan elektronlar ise, hızlarını yavaşlatırlar ve elektron paketçisine geri çekilirler. Böylece mikrodalganın etkisiyle paketçikler biçimlenmeye başlarlar.



Şekil 3.2. Mikrodalga içinde hareket eden elektronlar

Alt harmonik paketleyicide biçimlenen elektron paketçiklerinin frekans değerleri lineer hızlandırıcıya girmek için yeterli değildir. Alt harmonik paketleyiciden çıkan paketçikler daha yüksek frekans değerlerine çıkmak için ana paketleyiciye girerler. Ana paketleyici ile alt harmonik paketleyicinin çalışma sistemi benzerdir. Fakat ana paketleyiciler, daha yüksek RF frekansına sahiptir ve elektron demetlerinin

yayınımını daha da küçülterek paketçiği sıkıştırmaya çalışırlar. Dolayısıyla sıkışan paketçiklerin hızları bir miktar daha artar. Daha sonra elektronlar artan hızları ile lineer hızlandırıcıya sokulurlar.

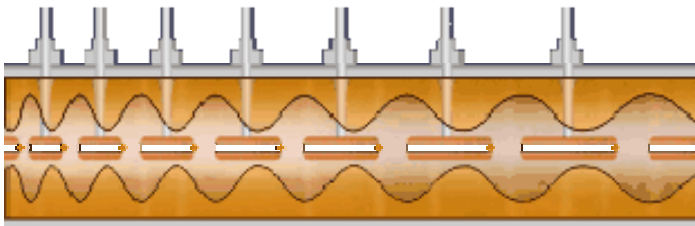
3.3. Hızlandırıcı

Ana paketleyiciden çıkan elektron paketçikleri rölativistik hızlara çıkmak için dairesel veya lineer hızlandırıcılarda hızlandırılırlar.

Dairesel hızlandırıcılarda, elektron demetleri daireye defalarca tur atarak rölativistik hızlara ulaşırlar. Ancak burada elektron demetleri sinkrotron ışınımına yol açarak enerjilerini kaybedebilirler. Elektron demetlerinin istenilen hızlara ulaşabilmeleri için daireyi yüksek sayıda tur atmaları gerekir.

Lineer hızlandırıcılarda ise elektron demetleri hızlandırıcıyı bir kez geçerek rölativistik hızlara ulaşırlar. Lineer hızlandırıcılar (linak), yüklü parçacıkları rölativistik hızlara çıkaran hızlandırıcılarıdır. Linak, demetin hareket doğrultusu boyunca sıralanmış bir dizi sürüklenme (drift) tüplerinden meydana gelir. Bu tüpler, yüksek frekanslarda alternatif voltaj sağlayan bir RF (radyo frekans) kaynağına bağlıdır.

Linak, elektronların hızını arttırmaya devam etmek için ilave RF gücü alır ve onları ana paketleyiciye göre daha dar paketçiklere sıkıştırır (Şekil 3.3.). Buna göre, paketleyicinin RF frekansı, hızlandırıcı kavitenin çalışma frekansı ile uyum içerisinde olmalıdır.



Şekil 3.3. Linak içindeki drift tüpü

Hızlandırıcıya giren elektronlar, elektriksel alan ile birinci drift tûpüne doğru hızlandırılırlar. Sürekli demet, birinci drift tûpünden geçerken, hızlandırma alanının fazına bağlı olarak parçacıkların bir kısmı hızlanırken bir kısmı yavaşlar. Bir sonraki aralığa vardıklarında, diğer drift tûpü uzadıkça RF mertebesindeki elektromagnetik alan elektronları hızlandırır. Elektronlar hızlandırıcıdan dışarıya çıkıncaya kadar, her bir aralıkta daha fazla enerjili ve daha fazla paketçikler halinde hareketlerine devam ederler. Sonuçta, elektron demeti, drift tûpleri ile yüksek hızlara (ışık hızına yakın rölativistik hızlara) ulaştıktan sonra hızlandırıcıdan çıkarak optik kaviteye giriş yapar.

Lineer hızlandırıcılarının süperiletken (Sİ) ve normaliletken (Nİ) olmak üzere çeşitleri vardır. Süperiletken kavite teknolojisinin kullanımı, hızlandırıcılarda ihtiyaç duyulmuş gücü azaltmak için umut verici bir durumdur. Sİ hızlandırıcılar çok düşük öz dirence sahip olduğundan RF güç kayıpları çok düşüktür ve sürekli mikro paketçikle oluşturabilirler. Mikro paketler 1,3GHz oranına kadar sıkıştırılabilirler yani 1,3GHz'de yaklaşık 43 elektron paketi sıkıştırılabilir.

RF alanı kullanan Sİ hızlandırıcılarda, atmalar mikro paket yapısında olduğundan düşük pik akımı oluşur. Hızlandırılmış paketçik yükü de düşük değere sahiptir. Paketler arası mesafe sürekli ayarlanabilir olduğundan birçok paketçik hızlandırılabilir ve ortalama akım yüksek olmaktadır.

Hızlandırıcılarda, kavite direncinden dolayı oluşacak RF güç kayıpları

$$P_{dis} = \int_{kavite_du\ var} R_s |H(r, \theta, z)|^2 dz \quad (3.3)$$

eşitliği ile verilir (Lapotolle ve Septier, 1970). Burada $H(r, \theta, z)$ kavite içinde salınan RF alanının magnetik alan bileşeni, R_s kavite yüzey direncidir.

Sİ hızlandırıcılar için yüzey direnci

$$R_s (\Omega) = 9.10^{-9} \frac{f_{RF}^2 (GHz)}{T(K)} \exp\left(-\alpha \frac{T_c}{T}\right) + R_{res} \quad (3.4)$$

ile ifade edilir. Burada, $\alpha = 1,92$, $T_c = 9,2K$ kritik sıcaklık, $R_{res} \sim 10^{-9} \Omega$ değerindedir. Sİ hızlandırıcılarda yüzey direnci çok küçük olduğundan, RF güç kayıpları nerede ise sıfırdır ve hızlandırma gradyeni 10MV/m ile 20MV/m mertebesindedir.

Nİ hızlandırıcılarındaki kavite yüzey direnci ise,

$$R_s = \sqrt{\mu_0 \pi f_{RF} / \sigma} \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir (Wangler, 1998). Burada, σ iletkenlik katsayısıdır. Normal iletken hızlandırıcılarında yüzey direnci yüksek değerlerde olduğundan kavite içerisinde yüksek RF güç kaybından dolayı, kavite içerisine belirli aralıklar ile RF alanı pompalanır ve atmalı mikro paketçik yapıda elektron demeti hızlandırılır. Bundan dolayı, hızlandırıcı gradyeni 50MV/m mertebesine kadar çıkabilir.

Nİ hızlandırıcılarda RF oyuğu içerisinde RF varlığı 10 μ s ile sınırlı olduğundan sadece bu süre içerisinde makro paketçikler hızlandırılabilir. Daha sonraki 0,1s boyunca tekrar RF dolması beklenir ve bu 0,1s boyunca hızlandırma yapılamaz. Nİ hızlandırıcılar, atmalı mikro paketçik yapısında çalıştığından yüksek değerlerde pik akımı oluştururlar. Ancak az sayıda paketçik hızlandığından dolayı, ortalama akım düşüktür. Hızlandırılmış paketçik yükü ise, yüksek değere sahiptir. Nİ hızlandırıcılarda atma içerisinde mikro paketler 3GHz oranına kadar sıkıştırılabilir. 3GHz frekansı ile 100 elektron paketi elde edilir. Nİ hızlandırıcılarında bu elektron paketlerinin yüksek sayıda bulunmasının sebebi elektron demetinin dolayısıyla lazer demetinin ortalama gücünü arttırmaktır.

Sİ hızlandırıcılarında, atmanın tekrarlama oranı 13MHz iken, Nİ hızlandırıcılarında ise 1GHz'dir. Bu yüzden Sİ hızlandırıcılarında elde edilen lazerin ortalama gücü Nİ

hızlandırıcılarından elde edilen lazerden yaklaşık 100 kat daha fazladır.

RF’de çalışan hızlandırıcılardan elde edilen lazerin bütün dinamiği elektromagnetik atma yapısına bağlıdır. Lineer hızlandırıcı içerisinde, elektron atması ışık hızından daha yavaş hareket ettiği için elektron paketçisi ile elektromagnetik dalga arasındaki faz farkı “kayma mekanizması”nın bir etkisidir (Dattoli vd., 2000).

3.4. Salındırıcı

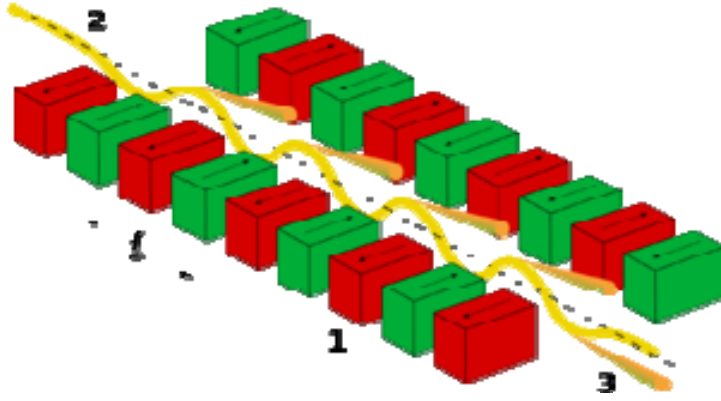
Salındırıcılar (Şekil 3.4.), elektron demetinin sinüsel hareket yapmasını sağlamak için zıt kutuplu magnetlerden oluşur. Salındırıcı içerisindeki magnetlerin özelliği, ana eksen boyunca eşli magnetler dizisi olmasıdır. Her biri zıt kutuplu olarak karşılıklı dizilir ve g gap aralığı ile birbirlerinden ayrılırlar.

Salındırıcının en önemli faktörü magnetik alandır. Magnetik alan, salındırıcı boyunca titreşim yapan sinüzoidal dalga halinde hareket eder. Dolayısıyla bu magnetik alan, salındırıcı içerisinde geçen elektronun hareketinde titreşimli şekle getirir.

Salındırıcının şiddeti elde edilecek lazerin dalga boyunu doğrudan etkiler. Bir salındırıcı için şiddet çarpanı,

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc} \quad (3.6)$$

olarak ifade edilir. Burada e parçacık yükü, B magnetik alan, m elektronun kütlesi, c ışık hızıdır. $K \ll 1$ için, elektronun titreşim hareketinin genliği küçüktür ve radyasyon dar enerji bantları boyunca girişim desenleri sergiler. Eğer $K \gg 1$ ise elektronun titreşim genliği büyüktür ve elektronlar kararlı bir yörünge izleyemezler.



Şekil 3.4. Salındırıcının çalışma sistemi (1. Magnetler, 2. Elektron demeti
3. Elektronun titreşim hareketi)

Türk Hızlandırıcı Merkezi'nde kullanılması düşünülen somaryum kobalttan yapılmış salındırıcının magnetik alanı,

$$B_u [T] = 3,381 \exp \left(-4.73 \frac{g}{\lambda_u} + 1.198 \left(\frac{g}{\lambda_u} \right)^2 \right) \quad (3.7)$$

ile verilir. Burada g salındırıcı aralığı, λ_u salındırıcı periyodudur.

Salındırıcılar, magnetik alanın sapma gücünde farklılık gösterirler. Eğer maksimum sapma açısı, kendiliğinden radyasyon yayınının yaptığı açıdan daha büyükse, ileriye doğru sürekli yayınım olmaz ve salındırıcı içerisinde yayınım son bulur (Halbach, 1983).

Salındırıcı alanından geçen elektron demetleri, salındırıcıdaki alandan etkilenerek elektromagnetik dalgalar yayınlırlar. Salındırıcı alanı ve elektromagnetik dalganın uzaysal varyasyonları birleşerek hareket ettirici dalga olarak adlandırılan atmaları oluştururlar. Elektronlar ile bu atmalar arasındaki etkileşim, SEL'deki uyarılmış ışımaya sebep olur. Atmalar, ivmeli elektronların yayınladığı elektromagnetik dalgalar ile aynı frekansa sahiptir, ancak atmaların dalga sayısı elektromagnetik ve salındırıcı alanlardaki dalga sayısının toplamı kadardır. Aynı frekansa ve daha fazla

dalga sayısına, dolayısıyla da daha kısa dalga boyuna sahip olan atmalar, elektromagnetik dalgalardan daha yavaş hareket ederler. Bu sebeple atmalar, hareket ettirici dalga olarak adlandırılır. Buna ek olarak; hareket ettirici dalga, ışık hızında hareket eden elektromagnetik dalgadan daha yavaş hareket ettiğinden, hızları ile sınırlandırılan elektronlarla eş zamanlı olabilir. Hareket ettirici dalga ile eş zamanlı hareket eden elektronlar rezonansta kabul edilir.

Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşim, kıyıya yaklaşan bir grup sörfçü ile dalgalar arasındaki ilişkiye benzer (Şekil 3.5). Eğer sörfçüler suda durağan olarak kalırsa, dalga ile sörfçülerin hızları arasındaki fark fazla olur. Gelen bir dalga, sörfçüleri yalnızca havaya kaldıracak ve daha sonra eski seviyelerine indirecektir. Sörfçüler ve dalga arasında hacimsel veya ortalama bir yer değişimi olmayacaktır. Eğer sörfçüler dalgayı yakalayabilirler ve hızlarını dalganın hızına uydurabilirlerse, dalga ile aynı frekansa sahip olup, dalgadan momentum kazanacak ve sahile taşınacaklardır. Bu durum, SEL'deki rezonans etkileşiminin altında yatan fiziksel temeldir ancak SEL'de elektronlar dalgayı güçlendirirler.



Şekil 3.5. Elektronlar ve hareket ettirici dalga arasındaki etkileşimi

Rezonans etkileşimi, ω açısal frekanslı ve k dalga sayılı elektromagnetik dalga ile aynı frekansta dalga üreten k_0 dalga sayılı salındırıcı magnetik alanı ile karakterize edilir. Salındırıcı ve elektromagnetik dalgaların dalga sayılarının toplamına eşit

$k + k_{\omega}$ sayıda atmalar üretilir. Hareket ettirici dalganın hızı, dalganın açısai frekansının, dalga sayısına oranı ile verilir. Sonuç olarak bu hızı, elektron demetine uygularsak, SEL'deki rezonans durumu, z- yönündeki hızı v_z olan demet için

$$\frac{\omega}{k + k_{\omega}} \approx v_z \quad (3.8)$$

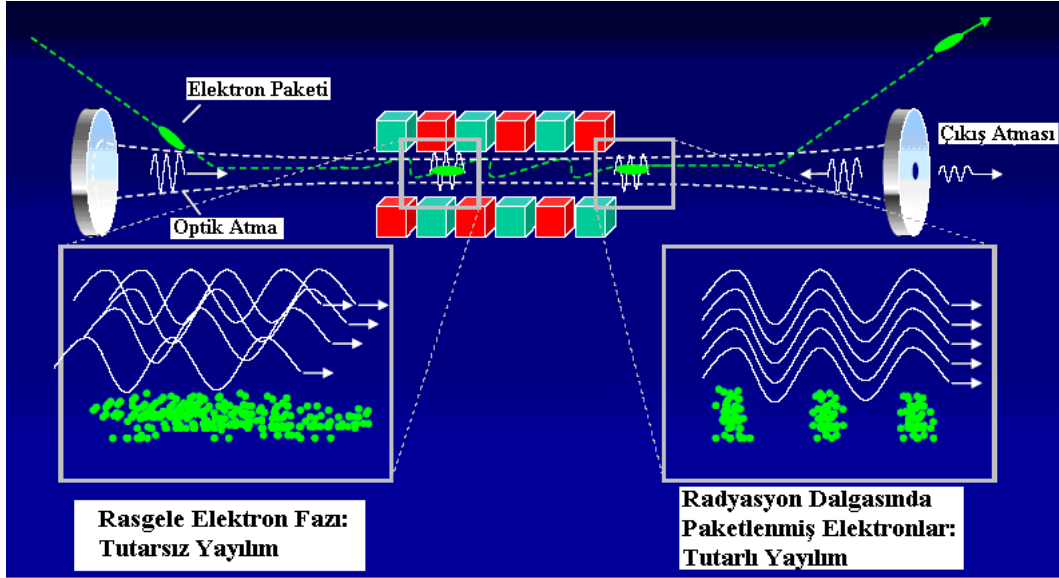
şeklinde ifade edilir. Burada, z- yönü elektron demetinin akış yönünü ve salındırıcı alanının simetri eksenini belirtir. Hızları rölativistik hızlara yakın olan elektronlar, z- eksenini boyunca hareket ederken, z'ye dik yönlerde dalgalanmaya zorlanırlar (Colson, 1980).

SEL'de elektronlar atom içinde bağılı durumda bulunmadığından enerji düzeyleri de sabit değildir. SEL'de ayarlanabilirlik, çıkış dalga boyunun kolaylıkla değiştirilebilmesi ile mümkündür. Uyarılmış yayılma özelliğı ile çalışan atom ve ya moleküler lazerler, çalışma frekansı düzeyleri arasındaki enerji farkı ile sınırlıdır. Hâlbuki SEL'in çalışma frekansı (ω_0), hızı bağılı elektron enerjisi (E), dalgalandırıcının magnetik alanı (B), salındırıcının periyodu (T) değiştirilerek ayarlanabilir. Uygulamada, salındırıcının yapısını değiştirmektense, elektron enerjisini değiştirmek daha kolaydır. Ayarlanabilirlik, SEL'in en önemli özelliğıdir. SEL, mm dalgalarından UV dalgalara kadar bütün spektrumu kapsayabilir. 100nm gibi kısa dalga boylarında aynaların yansıtıcılıklarının azalması nedeni ile (yaklaşık %50) lazer ortamında yüksek kazanç ihtiyacı vardır. Bunun içinde salındırıcıda büyük alan kuvvetine ve küçük periyoda gerek duyulur. Ancak salındırıcılar genelde kalıcı magnetlerden oluştuğundan, serbest elektron lazerlerinin ayarlanabilirliğı sadece elektronların demet enerjileri ile sağlanır.

3.5. Optik Kavite

Osilatör serbest elektron lazerinin temel bileşenleri iki ayna, elektron demeti ve salındırıcı magnetdir. SEL Osilatör içinde ivmelendirilen elektronlar ileri yönde ışığa yaparlar. Geleneksel lazerlerdekine benzer olarak kendiliğinden yayılım olarak

adlandırılan bu ışıma, iki ayna arasında depolanır. Sonradan magnete giren elektron paketçikleri ile etkileşime girer. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşme sonucunda koherent ışıma meydana gelir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6. Elektron paketçikleri ile elektromagnetik alan arasındaki etkileşim

Elektronların yatay hız bileşenlerinden, dolaylı olarak elektronlarla lazer alanı arasında enerji alış verişi yer alır. Salıncı boyunca hareket eden elektronlar ışıma boyunca, enerjilerinin bir kısmını lazer alanına aktarırlar. Elektronlar, enerji aktarımına devam etmek için ilave faz hızına ihtiyaç duyarlar. Bu durum ise salıncı eksenini boyunca magnetik alan ve salıncı periyodunun düzgün değişimi ile sağlanabilir. Ağır ağır değişen alan genliğini ele alan Maxwell denklemlerinin çözümü ile kavite içerisindeki etkileşim boyunca kuvvetlendirilmiş ışığın dalga denklemi sağlanır.

SEL osilatöründe lazer alanı ile elektronun etkileşimi sonucunda enerji değiş tokuşu, ışınım alanının artmasına ve elektron demetinin yavaşlamasına (pozitif kazanç) ya da ışınım alanının azalmasına ve elektron demetinin hızlanmasına (negatif kazanç) neden olabilir. Pozitif ya da negatif kazanç, elektron demeti ile ışıma alanı arasındaki faz belirler.

Her salındırıcıdan geçişteki lazer alanına aktarılan radyasyon enerji miktarı, elektronların salındırıcıdan geçmeden önceki radyasyon enerjisi E_i ve kazanç faktörü ile

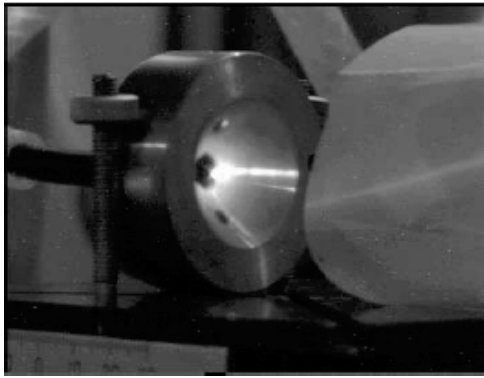
$$\Delta E = G.E_i \quad (3.9)$$

olarak ifadelendirilir.

Bir çift ayna ve salındırıcı ile biçimlenmiş rezonatör, art arda üretilen koherent ışığı biriktirir. N tane dönüşlü yansımada sonra, toplam güç kazancı $G_{\text{toplam}}=G^N$ eşitliği sonucunda elde edilen değer çok büyük sayılara karşılık gelebilir. Bu işlemin sonucunda rezonatörde depolanmış çok fazla radyasyon enerji varolur.

SEL'in yüksek verimlilikte ve kaliteli özellikte olması için, optik kayıplar çok küçük olmalıdır. Bunu sağlamak için optik demet ile elektron demeti birbiriyle iyi örtüşmeli ve tekrarlama frekansına bağlı olarak değişen kavite uzunluğu (L) iyi ayarlanmalıdır.

Optik kavite içerisinde kazanılan radyasyonun bir kısmı ise, yarı saydam yapılan aynalardan biri tarafından dışarıya çıkmasına izin verilir (Şekil 3.7). Burada ayna saydamlığı iyi ayarlanmış olmalıdır. Öyle ki yansıma ya da soğurma ile optik kavitenin toplam güç kayıpları güç kazancını geçmemelidir (Turner, 1990).



Şekil 3.7. Parabolik ayna görüntüsü

Yansıtıcılık ve geçirgenlik özelliklerini istenilen değerlerde elde etmek için ayna malzemesi ve kaplaması önemlidir. Ayna malzemesi genelde Altın veya gümüş ile kaplanmış bakır, silisyum olabilir.

3.6. Serbest Elektron Lazerinin Yardımcı Parçaları

Serbest elektron lazeri, bir önceki bölümde açıklanmış olan elektron tabancası, paketleyici, hızlandırıcı, salındırıcı ve optik kavite ana parçalarının dışında vakum sistemi, güç sistemi, soğutma sistemi, diagnostik ve kontrol sistemi gibi alt parçalarda sahiptir.

3.6.1. Vakum Sistemi

Vakum sistemi, elektronları enerji kaybına uğramadan rölativistik hızlara çıkarabilmek için gereklidir. Elektron demetinin hareketi bounc vakumlu bir ortam sağlanması gereklidir ve vakum seviyeleri farklılıklar gösterebilir. Vakum elde edebilmek için farklı özellikler sahip vakum pompaları kullanılabilir. Ön vakum oluşturmak için döner pompalar (10^{-3} mbar seviyelerine kadar), yüksek vakum elde edebilmek için ise turbo moleküler pompalar (10^{-9} mbar) kullanılabilir (Hahn vd., 2004).

Hızlandırıcılarda türlerine bağlı olarak, hızlandırıcı performansını etkileyen birçok ışın kayıpları oluşabilmektedir. Işın kayıplarının en önemli nedeni, vakum borularındaki artık gaz ile ışınların etkileşmesidir. Bu etkileşmeler elektronların ya da artık gaz moleküllerinin çekirdek ile elastik ya da elastik olmayan saçılmasından kaynaklanır. Coulomb saçılması ve Bremsstrahlung saçılması örnek olarak verilebilir. Bu etkileşmeler elektronların kaybına, ışın ömrünün azaltılmasına ve yüksek enerjili ikincil parçacıkların (fotonlar, nötronlar) oluşmasına neden olabilir.

Hızlandırıcılardaki vakum sistemi, ışın kararlılığı ve ışının ömrünün uzun olmasını amaçlar. Örneğin sinkotron ışınım kaynakları için 10^{-9} mbar basınç, iyi bir ışın ömrüne sahip olmak için tipik bir değerdir. Gerekli vakum değerlerine ulaşmak için,

iyi bir vakum sistemi tasarlanmalıdır; düşük miktarda gaz çıkışı ve düşük vakum elde etmek için, iyi ve verimli pompalama sistemi, iyi takip sistemi, iyi temizleme ve bu temizliğin korunması gereklidir. Bu şartlar altında, ortamdaki gaz moleküllerinin yoğunluğunun azalması sağlanmış olur.

Vakum sisteminde; rough (kaba) pompalar, turbo moleküler pompa ve iyon pompa çeşitleri kullanılmaktadır. Rough pompalar, sistemdeki basıncı 10^{-6} atm'in altına düşürmek için gereklidir. Rough pompalama bölgeleri, ön vakum pompası ve turbo moleküler pompadan oluşur. Ön vakum pompası, basıncı atmosfer basıncından 10^{-3} mbar'a pompalamayı gerçekleştirdikten sonra turbo moleküler pompa devreye sokulur. Turbo moleküler pompalar, momentum prensibine dayalı olarak çalışırlar. Hava moleküllerini isabet alan ve döndüren vanalar, bu molekülleri aktarırlar ve moleküller rough pompanın himayesinden çıkarılır. Bu durumda sistemdeki gaz basıncı 10^{-6} atmosfer basıncına kadar düşebilir.

İyon pompaları ve titanyum süblimleşme pompaları ise, yüksek vakum oluşturmada yaygın kullanılan vakum pompalarıdır. İyon pompaları sistemdeki basıncı 10^{-12} atm'e düşürmek için gereklidir. İyon pompası, pompa içindeki gaz moleküllerini iyonlaştırır. Magnetik alan bu molekülleri pompa içinde küçük bir hacme hapseder ve iyonlaştırma sürecinde üretilen elektronlarla çarpışma sayısını artırarak pompanın verimi artırılır. Oluşan iyonlar katoda (titanyum) doğru hızlandırılırlar; katoda tutulmaya yetecek bir enerji aktarırlar ve böylece aktif pompalama sağlanmış olur.

3.6.2. Güç Sistemleri

Serbest elektron lazeri elde etmek için elektronları hızlandıran hızlandırıcı yapılarda kullanılan güç kaynakları klistron veya Inductive Output Tubes (IOTs)'den oluşmaktadır.

Süperiletken kavite, elektron paketçiklerin hızlanmasını sağlayan elektromagnetik alan ile doldurulur. Elektronlar için enerji, yüksek güç mikrodalga klistron tüpünden elde edilir. Gerekli olan güç, sistemin doyma noktasına yakın seviyeler için

klistronlardan alınır. Elektron demetinin, sürüklenmeden sonra ilk kavitede düşük RF güç ile hızı ayarlanır. Daha iyi paketlenme için, giriş gücünün değeri, daha yüksek RF gücüne dönüşür ve kavite içerisine doldurulur. Daha sonra paketleyici, biçimlenmiş elektron demetini alır. RF alan yardımıyla yüksek frekans değerlerinde sıkışan paketçikler, atmalar halinde daha hızlı şekilde yol alır (Jacob, 2006).

Sİ hızlandırıcılarda paketçikleri hızlandırmak için düşük kW mertebesinde RF gücüne ihtiyaç duyulurken Nİ hızlandırıcılar için bu MW mertebesinde dir.

Bir süperiletken RF oyuğunda demete aktarılabilecek maksimum ortalama güç,

$$P_{RF} = P_{beam} \quad (3.10)$$

ile sınırlıdır. Oyuk içinde güç kaybının olmadığı göz önüne alındığında her bir 9 hücreli oyuktan maksimum 10kW ortalama gücünde demet elde edilebilir. Sürekli kipte paketçik hızlandırmak için sürekli kipte RF kaynağına (klistron) ihtiyaç duyulur. Teknolojik olarak sürekli kipteki RF kaynağı 10kW ya da 16kW klistronlar ile sınırlıdır. Bununla birlikte atmalı yapıda yüksek RF gücü üretebilen klistronlar mevcuttur ve oyuk içinde yüksek güç kaybından dolayı normaliletken RF oyuklarında kullanılır.

3.6.3. Soğutma Sistemleri

Sİ hızlandırıcılarının çalışma sıcaklığı 1,8K'dir. Bu kaviteler süperfluid helyum ile soğutulurlar. Helyum soğutma sisteminde basınç dengelenmesi, helyum buzdolabının soğutma kutusunda bulunan soğutma kompresörleri ile elde edilir. Gaz olarak alınmış helyum, kompresörler yardımıyla 1,3MPa'lık basınç uygulayarak önce 4K'e daha sonra 1,6kPa'lık basınç uygulanarak 1,8K'e düşürülür.

Kriyostat, 1,8K sıcaklığının aşağısında çalıştırılabilir olup standart çalışma sıcaklığı 2K (31mbar)'dir. Bundan dolayı, helyum kriyostat içine 80K termal kalkanın yerleştirilmesi ve hızlandırıcının tüm bileşenlerin süper yalıtımlı olması gerekir.

Süperiletken kaviteleeri, işlem şekillerine uygun olarak soğutmak için, 0,1mbar'lık yüksek sabit basınç gereklidir.

Lineer hızlandırıcı kullanımı için üç arabirimde su soğutumuna ihtiyaç duyulur: Biri, klistronlar için elektronik odalarda, biri linakta (Nİ hızlandırıcılar), diğeri ise, ihtiyaç duyulursa güç kaynağının soğuması için güç kaynağındadır.

Birçok elektriksel ve RF bileşenler (klistron, magnetler) su ile soğutulur. Önemli olan buradaki bileşenlerde iletken olmayan suyun (Non Conductivity Water, NCW) kullanılması gerektiğidir. Su soğutma sistemi kurulurken şu noktalar hesaba alınmalıdır: Bütün malzemeler su (NCW) direncine dayanıklı olmalıdır. Tüm borular, kaynak yapıldıktan ve bağladıktan sonra asitle yakılarak temizlenmelidir. Boru boyunca damla basıncı, 100Pa/m'nı geçmemelidir.

3.6.4. Diagnostik

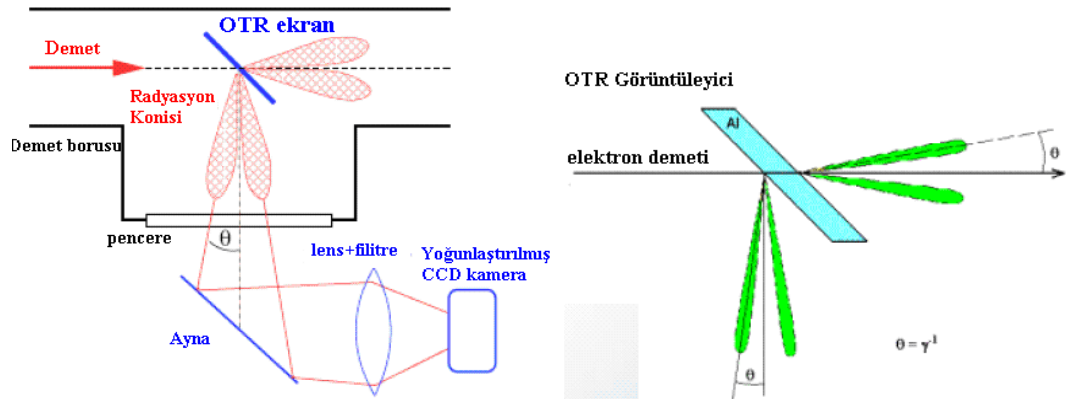
Demet diagnostiğı, demet hattı boyunca demetin özelliklerini izleyen, demetin herhangi bir uygulama alanında kullanılabilmesi için önceden belirlenmiş özelliklerin korumasını sağlayan, donanım ve kontrol sistemlerinin bütünüdür. Bu tür sistemler hızlandırıcı laboratuvarlarının performans ve kararlılığını hızlı ve güvenli bir şekilde kontrol etmektedirler. Böylece deneyiciler ile birlikte, makine operatörlerinin ve teknisyenlerin iş yükü azalmaktadır.

Hızlandırıcı laboratuvarlarında, yapısal olarak farklı iki diagnostik sistem vardır: Demet diagnostik sistemi ve foton demet diagnostik sistemi. Elektron demet diagnostik sistemi hızlandırılan yüklü parçacıkların analizi için, foton demet diagnostik sistemi ise Cerenkov ışınımı, sinkrotron ışınımı, serbest elektron lazeri gibi foton demetlerinin analizi için gereklidir. Elektron demet diagnostiğı, elektron demetine zarar vermeden ölçümlemeyi ve hızlandırıcı için doğru demet ayarlarını yapmayı amaçlar. Bu işlem sırasında elektronları, demet hattı olarak adlandırılan vakumlu borular taşır. Vakum sistemi, demetin en az kayıpla ilerlemesi için demet hattı içerisindeki havayı emer. SEL laboratuvarında demet hattı, kaynaktan başlayıp

elektronlar için dump edildiği yere kadar gider.

Elektron demet kontrolü, elektron demetinin, elektron tabancasından çıkıp durduruluncaya (DUMP) kadar tüm hat boyunca, elektron pozisyonunun tespiti ve görüntülenmesi, akımın ölçümü, yükün ölçümü, demet uzunluğunun ölçümü, demet kaybı, yönlendirilmesi, odaklanması ve sıkıştırılması işleminin tümünü kapsar.

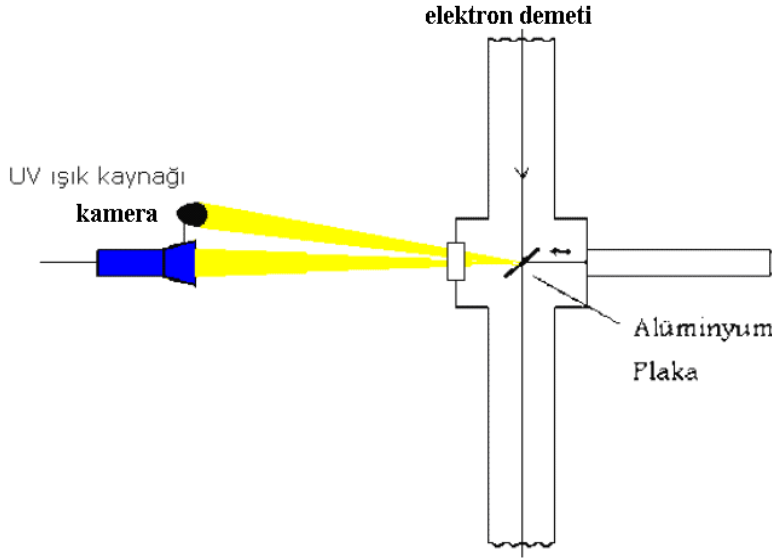
Demet hattı boyunca demet varlığını tespit etmek için OTR (Optik Geçiş Radyasyonu) ve CCD kameralar kullanılır. Bu kameralar, demet boyunun ölçülmesini ve elektron demetinin pozisyonunun tespitini sağlarlar. Bunun için, demet hattı içerisinde ilerleyen elektron demeti, hareket edebilen ve 45 derecelik açıda bulunan Alüminyum plaka yardımıyla CCD kamera tarafından optik olarak incelenir (Şekil 3.8).



Şekil 3.8. OTR kameranın kullanım düzeni

Demet profili, OTR olarak adlandırılan ince metalik levha üzerine düşen elektromagnetik radyasyonundan belirlenir. Başka bir deyişle, yüklü bir parçacık, farklı bir ortamdan geçerken ortam içerisindeki alandan farklı olarak elektromagnetik alan yapısına sahip olur. Bu elektromagnetik dalga ise levha üzerine düşerek, demet profilinin görüntülenmesine olanak sağlar. Levha, çoğu durumda demet yoluna bağlı olarak 45°'nin altında konum alır (Şekil 3.8). Elektromagnetik dalga metalik levhadan etkilenmeden yoluna devam ettiği gibi, levhadan 90° açıyla yansır. Çünkü metalik yüzey düzlem ayna gibi davranır. Levha ile yansımaya uğrayan bu elektromagnetik dalga uygun optik araçlar yardımıyla CCD kamera

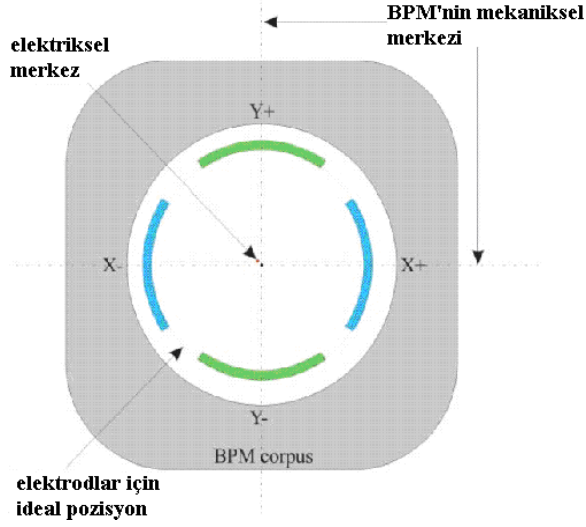
tarafından kaydedilir. CCD kameralar, elektron demet enerjisinden çok etkilenirler ve bu enerji değerini ölçemezler. Elektron demetinin pozisyonunu ve varlığını incelemek için demet gözlem penceresine gönderilen UV ışığının yansımasını optik olarak görüntüye dönüştürülürler. CCD kameralar (Şekil 3.9) OTR kameralara göre daha net görüntü verirler.



Şekil 3.9. CCD kameranın kullanım düzeneği

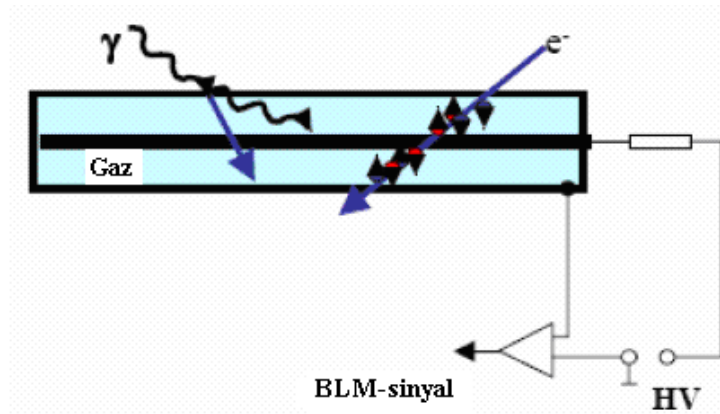
Demet hattı içerisinde demetin pozisyonu çok önemli olduğundan demet pozisyonu sürekli olarak takip altındadır. Demet pozisyonundaki en ufak değişiklik demetin yanlış yönlendirilmesine ve hatta uygulama alanlarına taşınmamasına sebep olur.

Demet pozisyon monitörleri (BPM) için, elektron demeti selenoidler ve magnetler yardımıyla hizalanır ve odaklanırlar. Selenoidler, elektron demetinin demet hattı içerisinde simetrik merkezde tutulmasını sağlarlar. Hareket halindeki demetin oluşturduğu elektrik alanı (+x,-x,+y,-y) eksenler üzerindeki striplerce algılanmaktadır. Böylece demetin odak merkezine göre konumu sürekli takip altında tutulur (Şekil 3.10).



Şekil 3.10. Selenoidin iç kısmının aksenal görünüşü

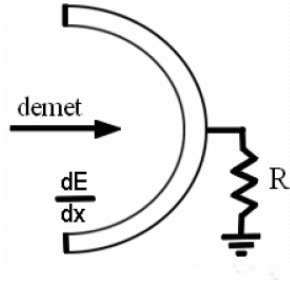
Hızlandırıcılarda, demet kayıplarının yerini ve büyüklüğünü görebilmek için demet kayıp monitörü kullanılır (Şekil 3.11). Burada kullanılan detektörler, demet borusunun çevresine yerleştirilir ve boru malzemesi tarafından soğurulmayan yüklü parçacıkları ve ışınları dedekte etmek için kullanılır. Bunun için, içerisine Ar gazı doldurulmuş ince bir tüp tüm demet hattı boyunca paralel olarak yerleştirilir. Böylece demette meydana gelebilecek en küçük elektron kaybı dedektörden geçerek gaz ile etkileşip gazı iyonlaştırır. Bu iyonlaşma sırasında elektron-iyon çiftleri oluşur. Oluşan elektronlar anoda doğru sürüklenir ve bir akım değeri elde edilir.



Şekil 3.11. Ar gazı ile elektronun etkileşimi

Demetin taşıdığı yük miktarına bağlı olarak demet akımını ölçmek için Faraday odacıkları (kap) kullanılır (Şekil 3.12). Burada, kap doğrudan demetin önüne

konulduğu için demet yok olacaktır. Kap, bir veya birden çok kalın iletken malzemeden oluşmaktadır. Demetteki parçacıkların tamamen soğurulması için malzemenin türü ve kalınlığı demetin enerjisine bağlı olarak seçilir. Buna göre, yaklaşık ~0,4m kalınlığındaki bakır, 1GeV enerjili elektronları durdurmak için yeterlidir.



Şekil 3.12. Faraday Kabi

Kaba bağlı bir R direnci üzerinden ölçülen V voltajı, soğurulan anlık akımın değerini verir. Böylece demet yükü, karşılık gelen bir akıma dönüştürülmüş olur.

Foton demet diagnostiği, lazerde elde edilen foton demetinin ayarlanabilmesi, kavranıp karakterize edilebilmesi ve demetin spektral dağılımı, şiddeti, dalga boyu, istatistiksel özellikleri, konumu, varış zamanı, atma aralığı, koherentliği gibi ihtiyaç duyulan temel parametreleri hakkında bilgi verir.

Lazerden elde edilen foton demeti önce demet hatları üzerinde ölçülür, sonra detaylı ölçümler yapılmak üzere kullanıcı laboratuvarlarından önce kurulan foton diagnostik istasyonuna taşınır. Demet hatları, foton demetinin lineer polarizasyonunu koruyup, ortamdaki hava tarafından soğurulmaya uğramadan taşınmasını sağlayan yüksek vakumlu borulardır. Detaylı ölçümler için, foton demeti, demet hatları içerisinde mercekler tarafından odaklanır ve aynalar yardımı ile diagnostik ve deney istasyonlarına taşınır.

Diagnostik için tüm optik bileşenler ve aygıtlar, bölgedeki granit tablasına yerleştirilirler (Şekil 3.13). Fotonun, hava bileşenleri tarafından soğurulmasını

önlemek için, granit tabla He-Ne veya N₂ gibi gazların bulunduğu kapalı bir hacim ya da vakum tarafından kapsanır.



Şekil 3.13. ELBE IR FEL foton diognastik tablasının fotoğrafı

Granit tabla, optik bileşenler ve diognastik aygıtlar; optik otokorrelator, spektrometre, zayıflatıcı (Atenuator), düzlemsel ve eğrisel aynalar, polarizasyon dönüştürücü, Nd:YAG lazer sistemi gibi elemanları içerir.

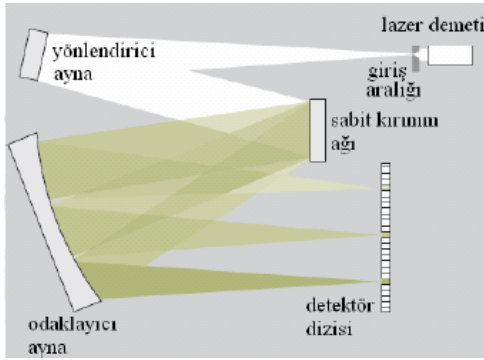
Aynalar ve optik mercekler foton demetinin odaklanmasında ve taşınmasında kullanılır. Örneğin 2–185 mikron aralığında dalga boyuna sahip bir foton demeti için Quartz, CaF₂, Ge, Si ve Polyethylene Fresnel mercekler ile Al, Au veya Ag gibi metaller ile kaplanmış yüksek yansıtma gücüne sahip aynalara gereksinim duyulur. Mercekler, demet hatları boyunca paralel foton demetini oluşturmak ve diagnostik işlemleri sırasında ışığı odaklamak veya dağıtmak amacıyla kullanılır.

Kısmi geçirgen metal filmler veya prizmalardan yapılan demet ayırıcı, gelen demetin bir kısmını yansıtıp bir kısmını geçirir. Demet ayırıcılar genellikle demetin önüne 45°'lik açılar ile yerleştirilir. Bu konumda gelen ışığın bir kısmı demet ayırıcıdan geçerek yoluna devam eder bir kısmı ise dik açı ile ayırıcıdan yansır.

İnce demet zayıflatıcı (Attenuators), kullanıcılar için ortalama demetin gücünü istenilen kademelerde azaltmada kullanılır. Bunun için metal ızgaralar tarafından

demetin belirli bir kısmı yansıtılır. Yansıyan demet, su soğutmalı zayıflatıcının duvarlarında soğurulur.

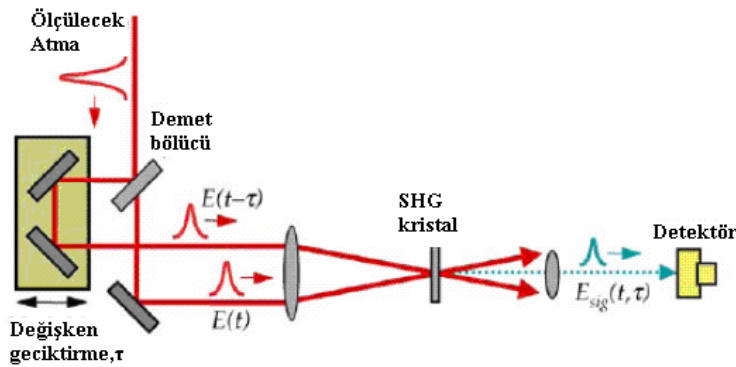
Spektrometre, spektrum ölçümleri için kullanılır. Genelde Czerny-Turner tipi spektrometre tercih edilir. Czerny-Turner spektrometresi, Şekil 3.14'de gösterildiği gibi, grating yolu ile farklı dalga boyları içinde ışık yayar.



Şekil 3.14. Czerny-Turner tipi spektrometrenin şematik diagramı

Burada yönlendirici ayna, özel dalga boylarında maksimum yeterliliği elde etmek için tasarlanırlar. İşlem aşamasında SEL ışığı, yarık boyunca optik sıraya girer. Yönlendirici ayna, paralellenmiş ışığı yansıtarak yayar. Odaklayıcı ayna, kırılarak yayılan ışığı odaklar. Sonuçta spektrumun görüntüsü, bir boyutlu doğrusal detektör dizisi üstünde oluşur.

Foton demetin mikro atma süresinin tanımlanması için otokorelator kullanılmaktadır. Otokorelator, zamana bağlı ultra kısa atmanın boyunu ölçer ve atmaların sürekliliğini belirler (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. SHG kullanan yoğunluk otokorelator için deney düzeneği

Sisteme gelen foton atmaları bir demet ayırıcı kullanılarak eşit şiddette iki kola ayrılır. Atmalardan biri yoluna devam ederken, diğeri hareketli bir optik geciktirici ile ilk atmaya göre geciktirilir. Daha sonra her iki atma, geniş bir spektrum aralığında ölçüm yapabilen ve ikinci harmonik üreten (SHG) kristal üzerine düşürülür. SHG kristal,

$$E_{sig}^{SHG}(t, \tau) \propto E(t)E(t - \tau) \quad (3.11)$$

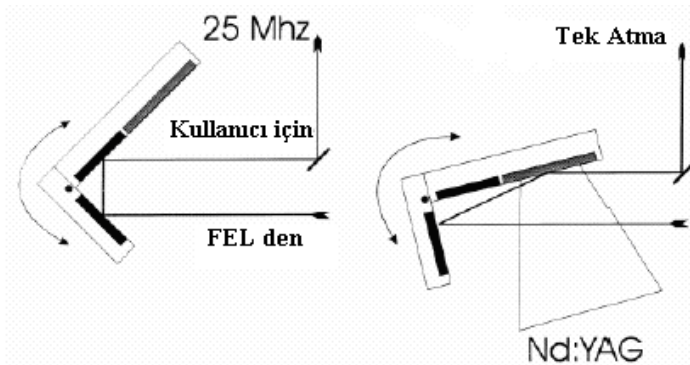
alanı ile giriş ışığın iki misli frekansında “sinyal ışığı” üretir. Burada τ , gecikme süresidir. Bu alanın oluşturduğu ışığın yoğunluğu

$$I_{sig}^{SHG}(t, \tau) \propto I(t)I(t - \tau) \quad (3.12)$$

giriş ışığının yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

SHG'nin ürettiği ikinci harmonikler ölçüm için odaklanarak detektör üzerine düşürülür. Detektörler ise, zaman içerisinde bu harmonikleri çözerler.

Nd:YAG lazer sistemi, tekrarlanan atma frekansını azaltmak için kullanılır. Demetten gelen puls seçimi, Nd:YAG lazer ve dönebilen bir geri yansıtıcı alet kullanılarak gerçekleştirilebilir (Knippels ve van der Meer).

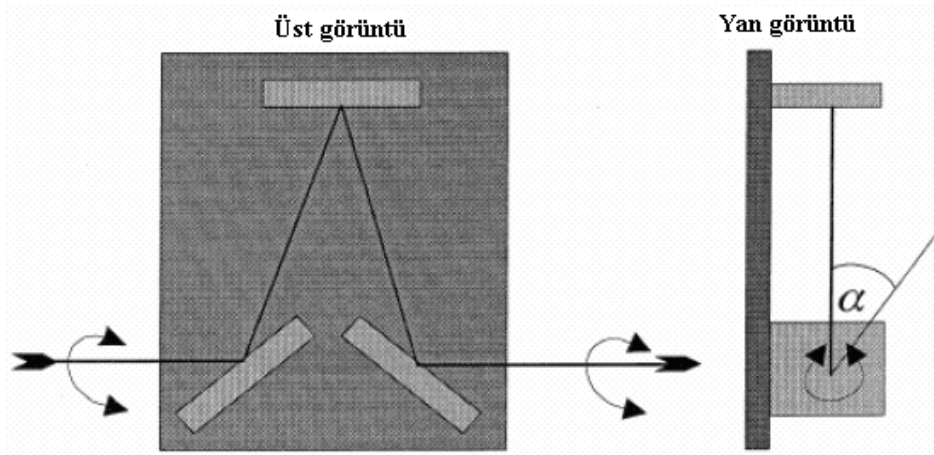


Şekil 3.16. Mikroatma bölücünün şematik çizimi

Atma seçim sistemi, birbirine bağlı iki bakır ayna, 0,5mm kalınlığındaki silisyum

parça ile bunların dışında geri yansıtıcı bir aynadan ibarettir. Bakır aynalar, Şekil 3.16'da gösterilen eksen etrafında döndürülebilir. Bu aynalar Şekil 3.16'nın sol tarafında gösterilmiş konumda iken, full atma dizisi kullanıcıya iletilir. Kullanıcı bir tek optik atma tecih ettiğinde ise aygıt sağ tarafta gösterilmiş konuma döndürülür. Bu durumda, demet artık ikinci yansıtmaya vurmaz, ama full atma dizisinden arta kalan yansımayı küçültmek için Brewsterin açısı altında silisyum kalın parçasına vurur. Daha sonra, güçlü Nd:YAG atması ile kalın parça aydınlatılarak 'geçici ayna' oluşturulur. Demetin bu parçadan ve diğer aynadan yansımasıyla, kullanıcılar için sürekli demetler oluşur (Knippels ve Van der Mer, 1998).

Polarizasyon dönüştürücü, 45° ya da 90° 'lik döndürme miktarı ile ışığın doğrusal polarizasyonun yönlenmesini sağlar. FELIX SEL'de kullanılan polarizasyon dönüştürücü, Şekil 3.17'de gösterildiği gibi üçlü ayna sistemi ile tüm IR aralığında polarizasyon yönünün sürekli dönüşünü sağlar. Sistem içerisinde sadece yansıtıcı optikler kullanılır. İki çaprazlanmış tel-grid kutuplayıcılar yüksek nakle sahip olup $50\mu\text{m}$ altındaki demeti önemli şekilde soğurur. Polarizasyon dönüştürücü, diğer tek tel-grid kutuplayıcı ile demet boyutunu $300\mu\text{m}$ 'ye uzatan sürekli zayıflatıcı olarak davranabilir. $300\mu\text{m}$ 'deki demet boyutu, zayıflatıcının kullanılabilir açıklığını geçtiği için, polarizasyon dönüştürücü diagnostik düzenek için gereklidir.

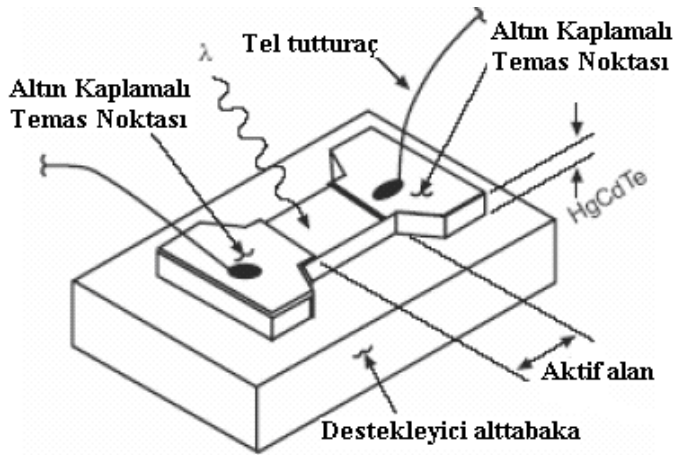


Şekil 3.17. Sürekli polarizasyon dönüştürücünün şematik düzeni

Polarizasyon dönüştürücüye kızıl ötesi ışın gönderildiğinde, ışın üç bakır aynadan oluşan sistem arasından geçer ve Şekil 3.17'de gösterilen eksen etrafında

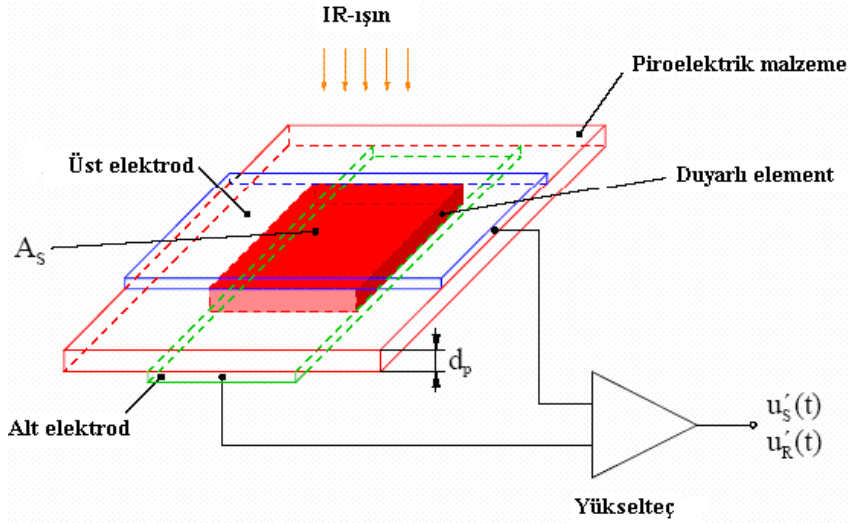
döndürülebilir. Sistem, α açısının üstünde döndürülürse, polarizasyon 2α 'nın üstündeki açı ile döndürülür. Bu yüzden, 45° 'in üstündeki dönüş, düşeyden yataya doğru polarizasyonu döndürür (Knippels ve Van der Meer, 1998).

Detektörler, SEL spektrumunun tüm alanı için daha yüksek duyarlılıkta kazanç ve kayıp ölçümleri yapmakta kullanılır. HgCdTe detektörü, üç yarıiletkenin oluşturduğu bir alaşımdır. Bu detektör 10mm ile 20mm arasında değişen kalınlığa sahip ince bir HgCdTe tabakadan ve üzerine oturtulmuş metal kontak yüzeylerden oluşur. İşlem aşamasında yarı iletken band enerjisinden daha büyük enerjiye sahip fotonlar, iletim bandı içerisinde elektronları uyarır. Uyarılan elektronlar değerlik bandından iletkenlik bandına çıkarak maddenin iletkenliğini artırır. Bu durumda iletkenlikteki değişim hissedilsin (yüklerin kontaklara iletilmesi) diye eğimli akım ya da voltaj gerekir. Bunu sağlayan 10–150ohm arasındaki düşük öz dirençli HgCdTe detektörleri, aktif bölge boyunca eğimli akımı sürdürmek için dikdörtgenel ya da karesel yapılardan oluşur (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. HgCdTe PC Detektör şeması

Pyro-elektrik detektörler, termal radyasyonu elektriksel sinyale dönüştürür. Bu dönüşüm şu aşamada gerçekleşir: Sisteme gelen lazer ışığı, α yüksek soğurma katsayısına sahip duyarlı alana çarparak soğurulur. Bu soğurulma pyroelektrik malzemenin sıcaklığında değişime sebep olur. $\Delta T(t)$ sıcaklık değişimi ile pyroelektrik malzeme de oluşan elektriksel yükler elektrodlar tarafından toplanarak bir çıkış sinyali elde edilir (Şekil 3.19).



Şekil 3.19. Pyroelektrik kızılötesi detektörün düzeneği

Elektriksel sinyal, ön amplifikatör ya da öz direnç dönüştürücüsü ile oluşturulur. Sistem içerisinde elde edilen akım I ,

$$I(t) = pA\Delta(t)/dt \quad (3.13)$$

ile verilir. Burada A , detektör alanı, p , pyroelektrik sabitidir ve maddeye bağlıdır (Shankar, 2006).

3.6.5. Kontrol Sistemi

Kontrol odası, bilgisayarlar, sunucu sistemleri ve optik fiber hattına bağlı ağ sistemi gibi donanımlardan oluşur.

Demet borusundaki vakum seviyesi, klistronlardan kavitelere aktarılan RF alan gücü ile fazının kontrolü ve ayarlanması, elektron demetinin ne kadarının hızlandırıcı boyunca iletilebildiği veya kaybedildiği, kuadropol magnet gibi elemanların oluşturduğu akım değerlerinin ve buna bağlı olarak odaklama güçlerinin ayarlanması, lazer diyagnostik elemanlarından alınan lazer demetinin gücü, kontrol odasından sürekli izlenmesi gereken parametrelerdir. Kontrol sistemleri, işlemler ve incelemeler için kolaylık sağlayıp teknik ve fiziksel hesaplamalar için kullanılabilir

lazer parametrelerini ve bunların grafiklerini oluştururlar. Ayrıca, bu sistem son değerlendirmeler için ölçülmüş değerleri depolar, dosyalar ve farklı makine parametreleri için veri ayarları yaparlar.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

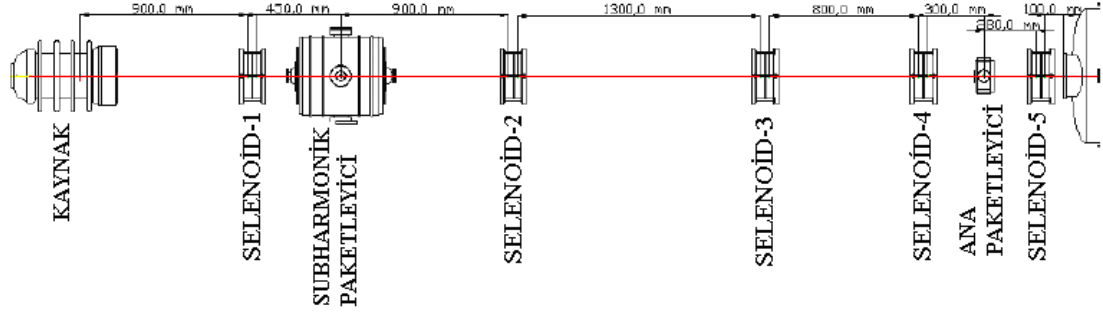
Türk Hızlandırıcı Merkezi, kızıl ötesi serbest elektron lazeri ve Bremsstrahlung laboratuvarını kapsıyacak şekilde planlanmıştır. 1,3GHz frekansında çalışan süperiletken RF kaviteyi 20MeV'lik elektron enerjisi için lineer hızlandırıcı birimi olarak alınır. Tez çalışmasında elektron demet enerjisi, 2–190 mikron daga boylarında oluşan SEL için 20-40MeV olarak seçilmiştir. Bu elektron enerjilerine bağılı olarak optik kavite içerisinde oluşan ışınımın enerjisine ve dalga boyuna bağılı parametreleri belirlenmiş ve grafikleri çizilmiştir.

THM SEL için elektron kaynağı olarak, termiyonik tabanca düşünülmektedir. Elektronları hızlandıran sistem, enjektör sistemi ve süperiletken hızlandırıcıdan ibarettir. SEL sistemi ise, optik kavite, salındırıcı ve demet taşıma hattı ile ifade edilebilir. Optik rezonatörler, farklı iki salındırıcı ve benzer ayna mesafelerini kapsarlar. Salındırıcılar, aynı malzemedden yapılmışlardır fakat 3cm ve 9cm periyota (sıra ile U30 ve U90) ve farklı uzunluğa sahiptirler. Tez çalışmasında, U30 ve U90 salındırıcıları için gerekli optimizasyonlar yapılmış ve bunlara bağılı grafikler çizilmiştir.

4.1. Enjektör

THM SEL için enjektör kısmı, termiyonik elektron tabancası, 5 selenoid ve iki paketleyici içerir (Şekil 4.1). Termiyonik tabanca, grid katota sahip olup $7,61A/cm^2$ akım yoğunluğu için dizayn edilecektir. Anotun voltajı 300kV olarak seçilmiştir elektron tabancasından çıkan elektron demetleri 300keV mertebesinde olacaktır.

Tüm selenoidler, 150–400 Gauss arasında selenoidin merkezinde ayarlanabilir magnetik alana sahiptir. Selenoidler, içerisinde geçen elektron demetlerinin eksen üzerinde düzgün ilerlemeleri için magnetik alanın etkisiyle elektron demetlerini simetrik merkeze odaklıyacaktır.



Şekil 4.1. THM IR SEL enjektör düzeni

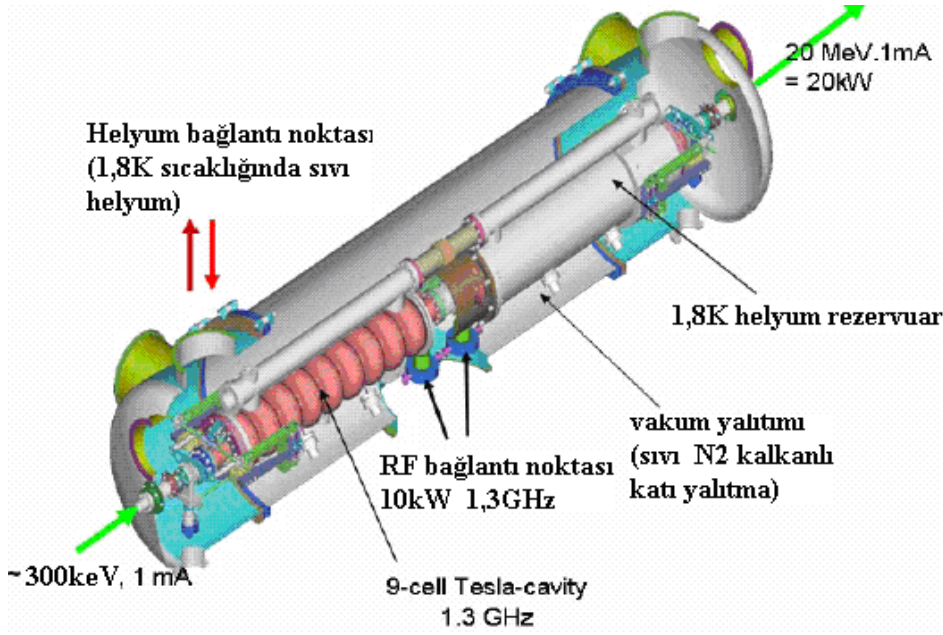
Enjektörde kullanılacak paketleyicilerden biri 260MHz’de çalışan sub harmonik diğeri 1300MHz’de çalışan ana paketleyicidir. Sub Harmonik Paketleyici(SHB)’de, maksimum $\pm 35\text{keV}$ enerji kazanmak için elektron tabancasından çıkan elektron demeti paketleyici içerisine girer. SHB, 260MHz’de çalışır ve içerisindeki paketçikler 10 kez sıkışır. SHB’den çıkan elektron paketçikleri 3,3m sürüklenme yolu ile ana paketleyiciye ulaşır. Ana paketleyici(FB)’nin çalışma sistemi ise, SHB ile benzerdir. FB’de, elektron demeti maksimum $\pm 15\text{keV}$ enerji kazanmak için paketleyiciye girer. Bu enerji sapsması, paketlenme faktörünü artıracak kadar iyi olup enerji yayınımasını azaltacaktır. Ayrıca, FB’nin çalışma frekansı, ana linak frekansı ile aynı olmalıdır. Bu paketleyici içerisindeki elektron demetleri 1,3GHz frekansına kadar sıkıştırılır.

4.2. Hızlandırıcı Yapı

THM’de kullanılması düşünülen hızlandırıcı için Nİ (normaliletken) ve Sİ (süperiletken) yapıdaki hızlandırıcılar avantajlarına göre incelenmiştir. Buna göre, seçimi yapılacak hızlandırıcının hangi tür olacağı (Nİ veya Sİ), SEL’in hangi amaç için kullanılacağına bağlıdır. Elde edilecek SEL’in dalga boyu aralığının belirli olmasına rağmen, sürekli demet ya da atmalı demet yapısı, ortalama ya da pik gücü ve enerji değerleri gibi parametreler tamamen kullanıcılar tarafından planlanan uygulamalara yönelik olarak belirlenmelidir. Örneğin sürekli demet yapısındaki SEL’in kullanılacağı bir uygulama için Sİ yapıları bir elektron hızlandırıcı gerekirken (ki Nİ yapısında sürekli formda SEL elde etmek mümkün değildir), kısa atmalar içerisinde çok sık sayıda demet elde etmek için Nİ yapıda bir elektron hızlandırıcısı kullanmak

gereklidir (ki buda Sİ yapılı bir elektron hızlandırıcısı ile elde edilemez). Ancak Nİ yapıdaki SEL ile yapılan deneylerin %70-80'i Sİ yapıdaki SEL ile yapılabilirken bunun tam tersi pek mümkün değildir.

Sİ ve Nİ hızlandırıcılarının özelliklerinin incelenmesi sonucunda THM'in ana hızlandırıcısında, Rossendorf kızıl ötesi serbest elektron lazeri laboratuvarında kullanılan TESLA hızlandırıcısı (Sİ hızlandırıcı) kullanılmasına karar verilmiştir. Şekil 4.2'de gösterilen Sİ hızlandırıcı 1,3GHz frekansında çalışacaktır. RF kaviteeler 1,8K sıcaklığında çalışan süperiletken Nebyum yapılarıdır. Her bir kryostatda çift 9 hücreli kaviteeler yer alır. Böylece sürekli demetlerin 20MeV'lik çıkış enerjisi, her kryostat-kavite modülü ile arttırılmış olur.



Şekil 4.2. Modüldeki çift dokuz hücreli TESLA kaviteeler

1,3GHz'de çalışan Sİ hızlandırıcı, 15-20MV/m hızlandırıcı gradyente ve 3,26m toplam uzunluğa sahiptir. Bu Sİ hızlandırıcısından yüksek nitelikli SEL sağlamak için, yüksek pik akımı, kısa paketçikler, minimum enerji yayılımı ve düşük emittance elde edilmelidir. Elektron demetinin atma yapısı, geniş deneysel alanlarda kullanılması için, sürekli moddadır. Lineer hızlandırıcı ve SEL için parametreler Çizelge 4.1'de ifade edilmiştir.

Çizelge 4.1. THM SEL'in ana parametreleri

Maksimum demet enerjisi	40MeV	40MeV
Paket yükü	80pC	120pC
Ortalama akım	1mA	1,6mA
RMS paket uzunluğu	3-10ps	3-10ps
Paket ayrımı	77ns	77ns
Normalize edilmiş rms yatay yayılım	15mm.mrad	15mm.mrad
Normalize edilmiş rms boyuna yayılım	35keV.deg	35keV.deg
Rms enerji yayılımı	%0,05	%008
Salındırıncılar	U30	U90
SEL dalga boyu aralığı (μm)	2,32–27	9–190
SEL maksimum pik gücü (MW)	8	10
SEL ortalama güç (W)	571	64
SEL atma uzunluğu (ps)	1–10	1–10

Planlanan THM SEL tesisinde 40MeV elektron demeti için Sİ durumunda en az 4 adet 1,3GHz'lik RF güç kaynağına, ihtiyaç vardır. Sİ hızlandırıcılardaki oyuk içerisinde ısı ve mekaniksel kayıp ihmal edilebilecek kadar az olduğundan oyuğa aktarılan RF gücü, %100 oranında demete aktarılabilir. Bundan dolayı her bir 9 hücreli kavite, 10kW klistron gücü ile beslenirse, 10kW demet gücü sağlanmış olur. Böylece 1mA ortalama demet akımı elde edilebilir. Eğer kaviteler 16kW klistron gücü ile beslenirse 16kW demet gücü elde edilir ve 1,6mA ortalama demet akımı sağlanır.

Sİ hızlandırıcılarının kavite yüzey direncinden geçen yüksek akımlara karşı verimli şekilde çalışması için Sİ hızlandırıcının oyukları 1,8K sıcaklığında tutulması gereklidir. Dolayısıyla Sİ hızlandırıcıları, saflık derecesi yüksek helyum ile soğutulmalıdır. 1,8K sıcaklığındaki bu yapılar için soğutma ihtiyacı 200W güç ister. Sİ sistem için sıcaklık $\pm 0,2^\circ$ 'de kararlı olmalıdır. THM'de kullanılacak Sİ hızlandırıcısı için gerekli olan helyum ve soğutma gereksinimleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.

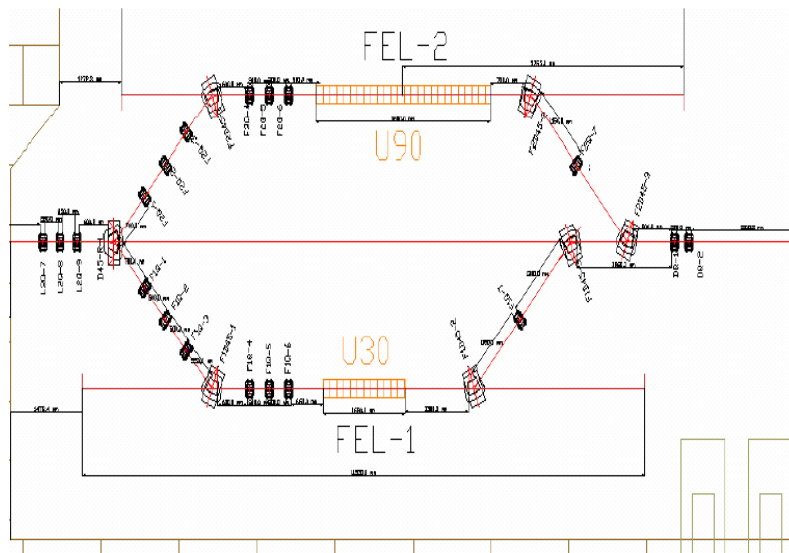
Çizelge 4.2. Sİ yapısı için helyum ve su soğutma gereksinimleri

Yer	Su ve helyum tüketimi [litre/min]	Soğutma gücü
Klistron alan ¹	Su @20C ⁰ 150 (5klystron)	~200 [kW]
LİNAK	Helyum @1.8K ⁰ 4.8 /sec Helyum @ 70 K ⁰ 10 g/sec	200 [W] -----
LİNAK*	Enjektör ve magnetler için su soğutma	-----
Güç kaynak birimi	Su @20C ⁰ 30	4[kW]

THM'nin alt yapısında uygun jeneratör ve UPS sistemleri tasarlandığından dolayı sistem elektrik kesintilerine veya dalgalanmalarına karşı dayanıklı olacaktır.

4.3. Serbest Elektron Lazerinin (SEL) Transfer Hattı

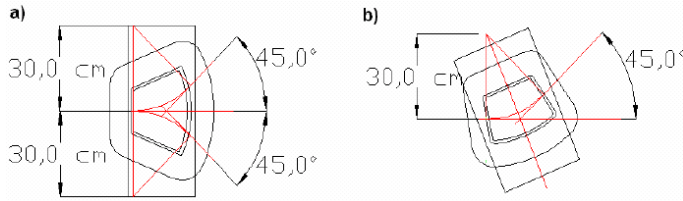
Lineer hızlandırıcıdan çıkan elektron demeti, ortak transfer hattını kullanan SEL odası için, özel kıvrımlı magnet ile ± 45 derece saptırılıp sıra ile U30 ve U90'ı kapsayan SEL-1 ve SEL-2 rezonatörlerine transfer edilecektir. Transfer hattı, U30 için SEL-1 hattı, U90 için SEL-2 hattı olarak adlandırılır.



Şekil 4.3. SEL odasının düzeni

Şekil 4.3'de görüldüğü gibi, salındırııcıların arasından geçen elektron demeti,

kuadropol magnetlerle 45 derece saptırılarak genel yığın içerisinde dump edilir. U30 salındırıcısının U90 salındırıcısından daha kısa olması sebebiyle elektron demeti, SEL-2 hattına göre SEL-1 hattına doğru erken kıvrılır.



Şekil 4.4. a) Sağ ve sol yönlü dipol b) Tek yönlü magnet

Optik kaviteye girmeden önce ve kaviteden çıktıktan sonra kullanılan kuadropoller ise, hızlandırılmış demet hattında kullanılmış olanlarla özdeştir. Kullanılmış kıvrımlı magnetlerin şematik gösterimi, Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

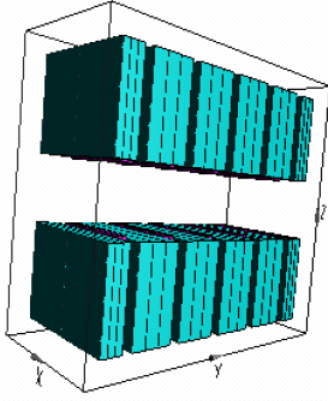
4.4. THM Serbest Elektron Lazerinde Salındırıcı Magnet

THM SEL dizaynı için permanent ve hybrid magnetler tercih edilecektir. Salındırıcının magnetleri arasında oluşan magnetik alan ise,

$$B_0 = 2B_r \frac{\sin(E\pi / M)}{(\pi / M)} (1 - e^{-2\pi h / \lambda_u}) e^{-\pi g / \lambda_u} \quad (4.1)$$

eşitliği ile hesaplanır. M, her bir periodik bloğun numarası (genelde 4’dür), E, paketleme faktörü ($0.95 < E < 1$), h, salındırıcı yüksekliği, B_r , magnet blokların malzemesine bağlı artan alandır.

THM SEL’in dizaynında aynı malzemeden ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) yapılmış U30 ve U90 salındırıcıları kullanılacaktır. U30 ve U90 salındırıcıları 30mm ve 90mm salındırıcı periyoduna sahip olup, 2–190 mikron dalga boyu aralığını sağlamak için tasarlanmıştır. U30 ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$) salındırıcısı için, magnet yapısı Şekil 4.5’de verilmiştir.



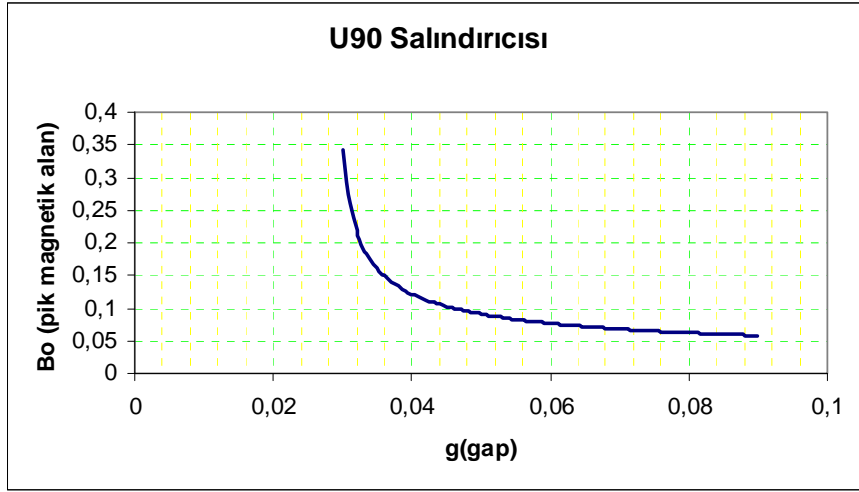
Şekil 4.5. U30'un 3 boyutlu magnet yapısı (x=60mm, y=1.68mm)

THM'de kullanılacak salındırıcının yapıldığı $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ malzemesi için artan magnetik alan değeri $B_r = 1.05\text{T}$ 'dir. Bu sistemde, 20–40MeV'lik ayarlanabilir enerjili elektron demeti bağımsız olarak iki salındırıcıya enjekte edilebilir. Salındırıcıların magnetler arası uzaklığı, 3 ve 9cm periyot sayıları ile dizayn edilmiştir. g/λ_u , $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ malzemesi için $0.1 \leq g/\lambda_u \leq 1$ aralığındadır. U30 ve U90 salındırıcıları için belirlenmiş parametreler Çizelge 4.3'de verilmektedir.

Çizelge 4.3. U30 ve U90 salındırıcıları için belirlenmiş parametreler

Parametreler	U30	U90
Salındırıcı Malzemesi	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$	$\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
Salındırıcı periyodu[cm]	3	9
Magnetik Alan[T]	0,083–0,0232	0,075–0,579
Salındırıcı aralığı(gap)[cm]	2–3	3–9
Salındırıcı şiddeti(K)[rms]	0,16–0,47	0,44–3,46
Periyot sayısı	56	40
Salındırıcı uzunluğu	1,68	3,6
Elektron demet enerjisi	40MeV	40MeV
Dalga boyu aralığı(μm)	2,32–27	9–190
Elektron demet enerjisi	20MeV	20MeV
Dalga boyu aralığı(μm)	9–190	290–300

Bu tez çalışmasında verilen parametreleri simüle etmek için FELO programından yararlanılmıştır. FELO Programı, Free Electron Laser Oscillator kelimelerin kısaltılmışı olup zamana bağlı SEL Osilatör kodudur. FELO ile akım, kavite uzunluğu, elektronlar arasındaki etkileşimlerin SEL üzerindeki etkileri simüle edilebilir. FELO programı kullanılarak elde edilmiş, $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ malzemesi için pik magnetik alanının U90 salındırıcısı aralığına bağlı grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.



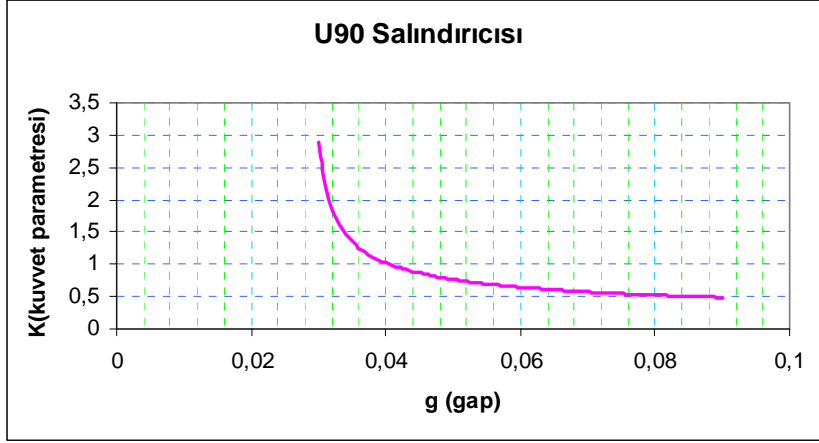
Şekil 4.6. U90 salındırıcısı için pik magnetik alanın (B_0) gap’a (g) bağlı grafiği

Denklem (4.1)’e göre salındırıcının pik magnetik alanı ile gap aralığı ters orantılı gelmektedir. Yani salındırıcının gap aralığı arttıkça magnetik alan azalış gösterir. Bu ifade U90 salındırıcısı için Şekil 4.6’daki grafik üzerinde gösterilmiştir.

Salındırıcının kuvvet parametresi ise,

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi mc} \quad (4.2)$$

ifadesi ile verilir. Bu denklem kuvvet parametresinin magnetik alana bağlı olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla kuvvet parametresi ile gap aralığı arasındaki bağıntı ters orantılıdır. Salındırıcının gap aralığı arttıkça kuvvet parametresi azalış gösterir. Bu ifadeyi veren grafik Şekil 4.7’de gösterilmektedir.

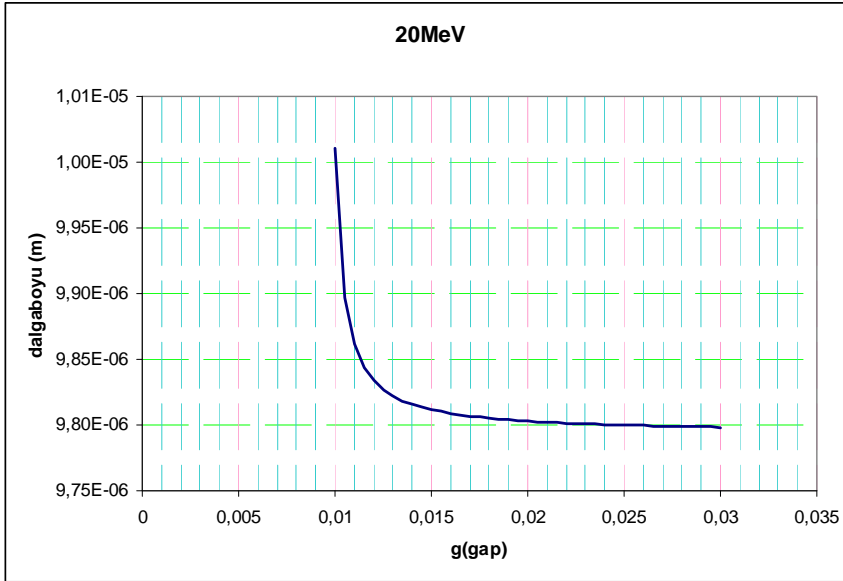


Şekil 4.7. U90 salındırıcısı için kuvvet parametresinin (K) gap'a (g) bağlı grafiği

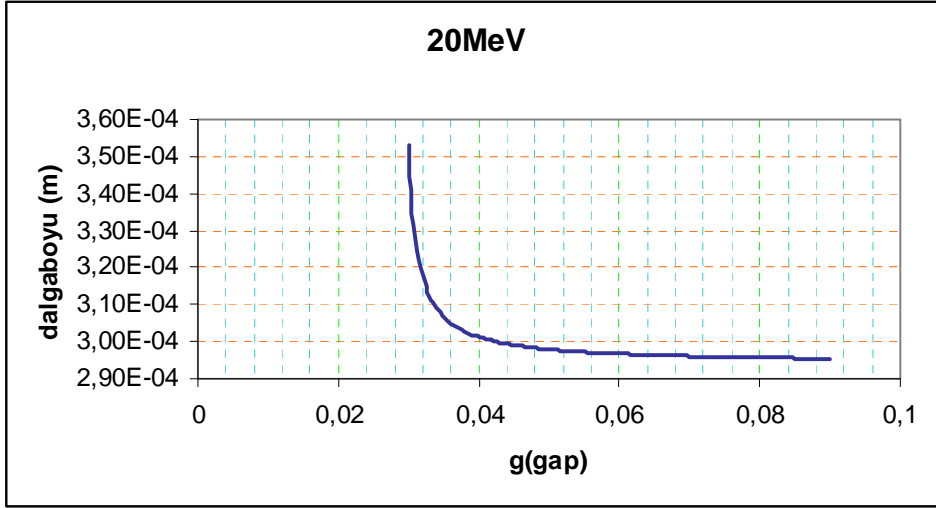
Daha öncede belirtildiği gibi, osilatör moddaki SEL'in dalga boyu ise,

$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (4.3)$$

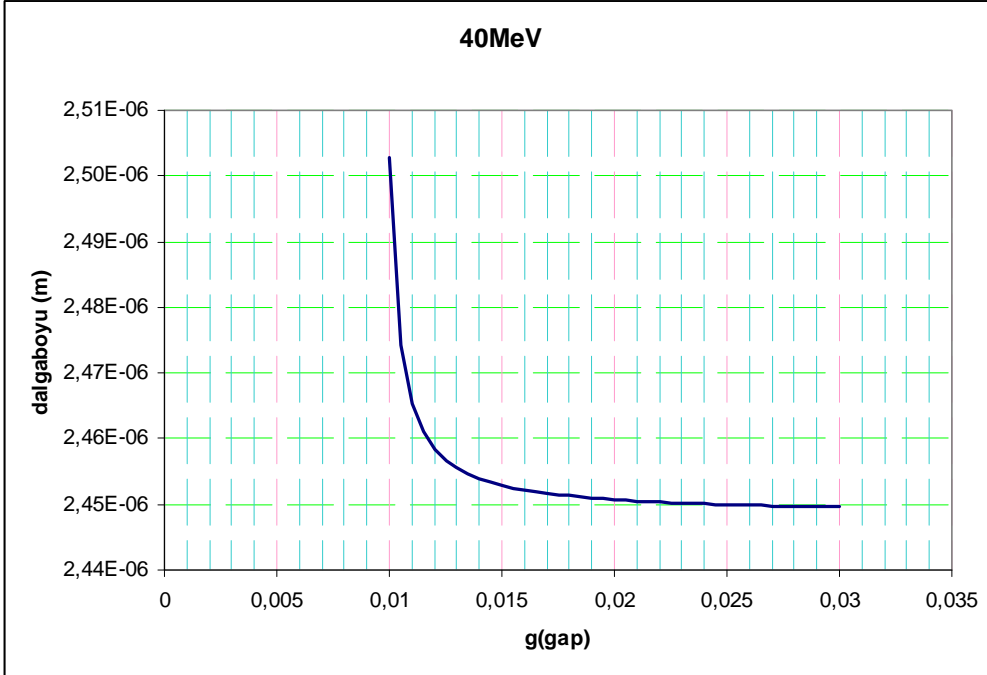
eşitliği ile ifade edilir. 20-40MeV enerjilerine sahip elektron demetlerinin oluşturduğu ışınımın ayarlanabilir dalga boyu aralığı, 3 ve 9cm periyot uzunluğuna sahip iki farklı Sm₂Co₁₇ salındırıcısı için Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil4.11'de gösterilmektedir.



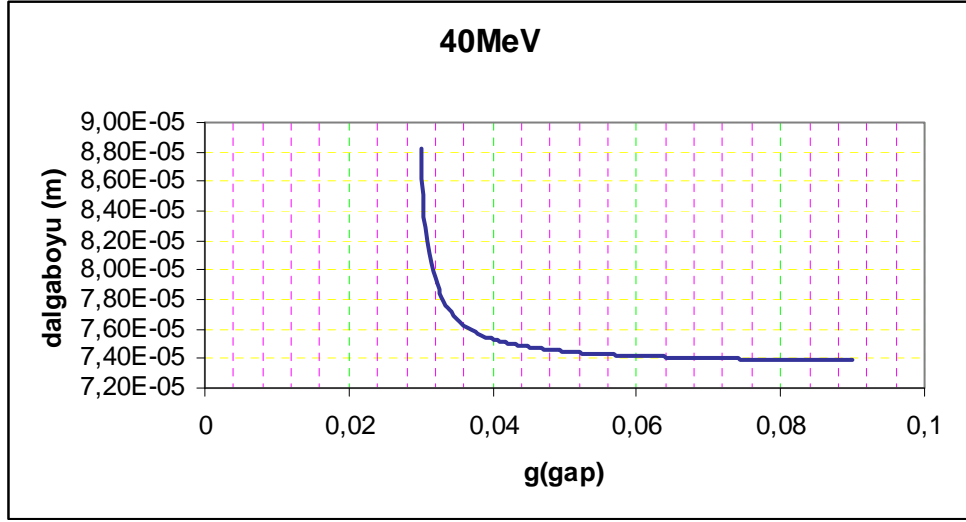
Şekil 4.8. U30 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği



Şekil 4.9. U90 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği



Şekil 4.10. U30 salındırıcısının için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği



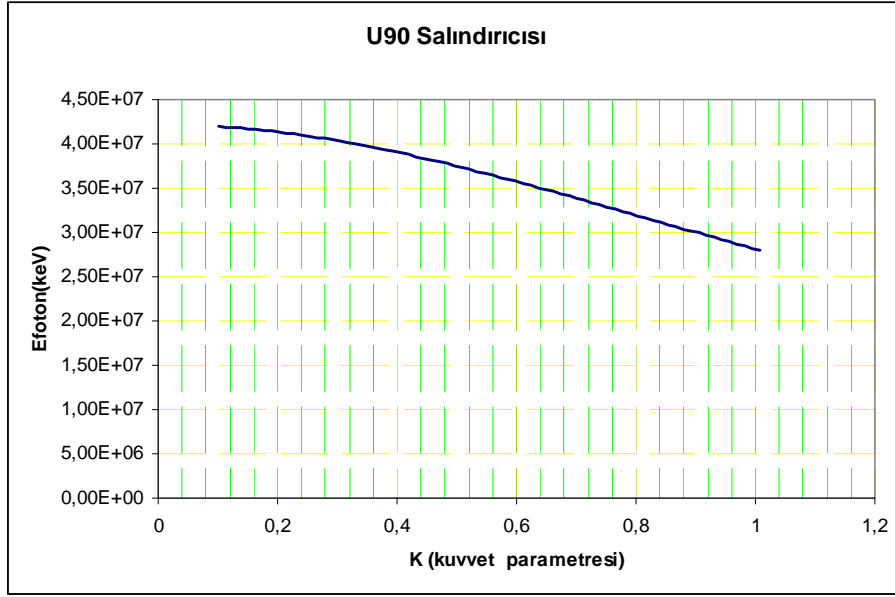
Şekil 4.11. U90 salındırıcısı için dalga boyu aralığının salındırıcı aralığına grafiği

Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10, Şekil 4.11'deki grafiklerde, elektron demetleri salındırıcı içerisine büyük enerjilerle girdikçe elde edilen lazer ışınımının dalga boyunun küçük olacağı görülmektedir. Ayrıca U30 ve U90 salındırıcılarındaki aynı elektron demet enerjisi için elde edilen lazer ışınım dalga boylarının farklı oluşu salındırıcılar için farklı kuvvet parametresine bağlıdır.

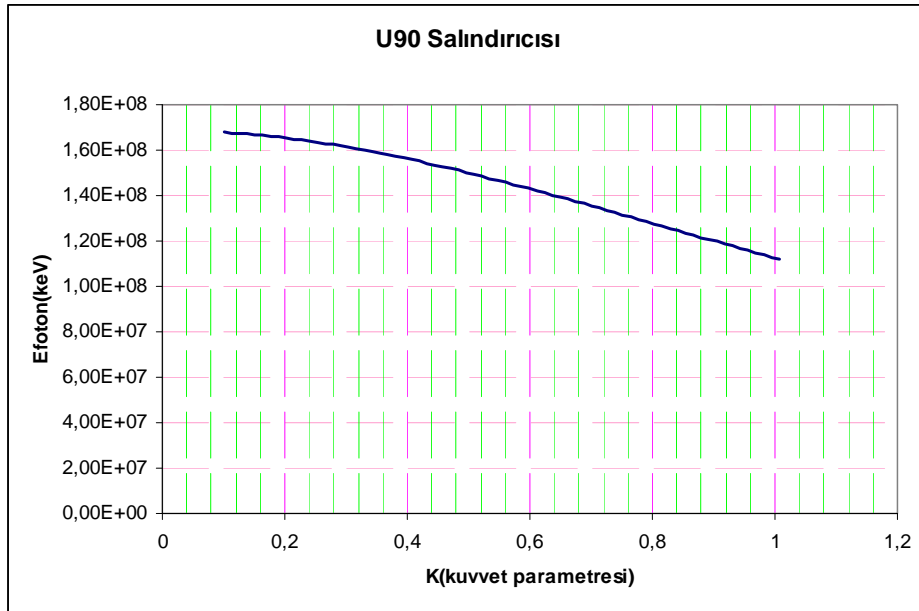
Salındırıcı içerisinde hareket eden elektron demetleri lazer alanı ile etkileşmesi sonucunda oluşan foton demetinin enerjisi

$$\varepsilon[keV] = \frac{0,9496E^2[GeV]}{\left(1 + \frac{K^2}{2}\right)\lambda_u[cm]} \quad (4.4)$$

eşitliği ile verilir. Burada E, elektron demetinin enerjisi, K kuvvet parametresi, λ_u magnet arası periyot uzunluğudur. Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de 20MeV ve 40MeV elektron demet enerjisi için, elde edilen foton enerjisinin kuvvet parametresine bağlı grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.12. 20MeV elektron demeti için E_{foton} 'nun kuvvet parametresine grafiği



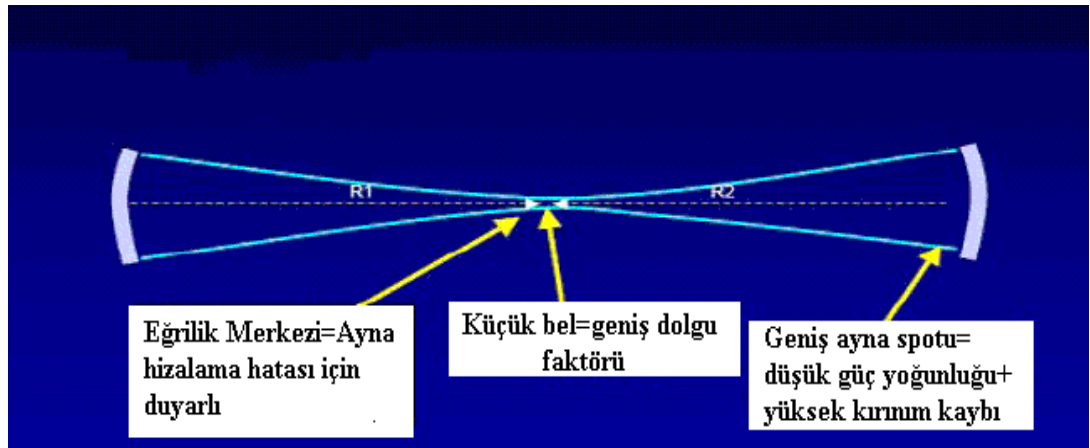
Şekil 4.13. 40MeV elektron demeti için E_{foton} 'nun kuvvet parametresine grafiği

Denklem (4.4)'de kuvvet parametresi artarken foton demet enerjisinin azalacağı gözükmemektedir. Bu ifadeyi gösteren grafikler, U90 salındırıcısı için 20MeV ve 40MeV elektron demet enerjisi için Şekil 4.12 ve Şekil 4.13'de elde edilmiştir.

4.5. Optik Kavite

THM IR SEL Osilatörü, Gaussian Modda olacaktır. Osilatör mod iki ayna sistemi içerir. THM Osilatör sisteminde, ayna tasarımı, 11,856m ve 13,028m çapla, kısmen düşük termal seviyesinde yapılır. Korumalı gümüş ve altın kaplamalı aynalar, gümüş için 0,428–20µm ve altın için 0,65–20µm dalga boyu aralığında kullanılabilir. Dağılımı minimize etmek için, ayna çapları demet yarıçapının üç ve ya daha fazla katı kadardır.

SEL’de optik kavite, foton demetlerini aynı odak ve ortak merkezde toplamak için demeti odaklamaya çalışırlar. Bunun için THM’in optik kavitesinde ortak merkez seçilir. Şekil 4.14’de optik kavitenin ortak merkezli yapısı gösterilmektedir.



Şekil 4.14. Ortak merkezli rezonatörün özellikleri

Rezonatör, optik kavite ve salındırıcıdan oluşur. İstikrarlılıklarına bağlı olarak rezonatörler, kararlı ve kararsız rezonatörler olarak sınıflandırılır. Kararlı bölgedeki ışınlar, sürekli olarak yeniden odaklanırlar ve rezonatörün ışın içeriği sabittir. Fakat kararsız rezonatörlerde ışınlar çok fazla oluşup çok fazla yayılırlar ve rezonatörün dışına kaçarlar. Rezonatör sınıflandırmasında ima edilen kararlılık, kavite dizaynında ileri geri güçlenmiş geometriksel ışımadır. Kararlı rezonatörler için kararlılık şartı,

$$0 < \left(1 - \frac{L_c}{R_1}\right) \left(1 - \frac{L_c}{R_2}\right) < 1 \quad (4.5)$$

eşitliği ile verilir. Burada R_1 ve R_2 aynaların yarıçapları ve L_c rezonatör uzunluğudur.

L_c rezonatör uzunluğu ise,

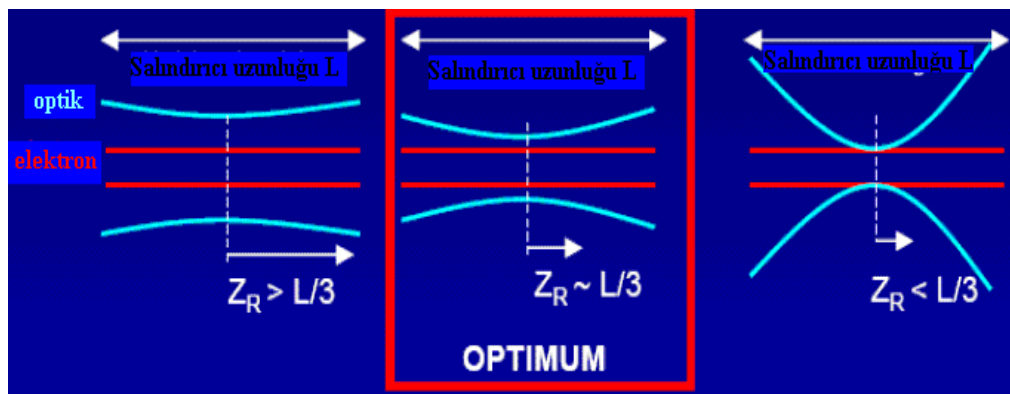
$$L_c = \frac{cT}{2} = \frac{c.1}{f.2} = \frac{3 \times 10^8}{2 \times 13 \times 10^6} = 11,53m \quad (4.6)$$

olarak ifade edilir. Burada minimum paket aralığı $T=77ns$ ve atma tekrarlama frekansında $f(1/T) = 13 MHz$ 'dir.

Rayleigh uzunluğu Z_R ,

$$Z_R = 2 \times \frac{L_u}{2\sqrt{3}} \quad (4.7)$$

eşitliği ile hesaplanmış değere sahiptir. Rayleigh uzunluk seçenekleri Şekil 4.15'de gösterilmiştir. Burada, salındırıcı uzunluğu (L_u) salındırıcıdaki kutup sayısının ve periyot sayısının çarpımı ile bulunur: Magnetler arası periyot uzunluğu $\lambda_u=3cm$ için $L_u = 3cm \times 56 = 1,68m$ ve $\lambda_u=9cm$ için $L_u=3,6m$ 'dir. Ayrıca, $\lambda_u=3cm$ için Rayleigh uzunluğu $Z_R=0,9699m$, $\lambda_u=9cm$ için $Z_R=2,078m$ olarak bulunur.



Şekil 4.15. Çeşitli rezonatör tipleri için Rayleigh uzunluğu

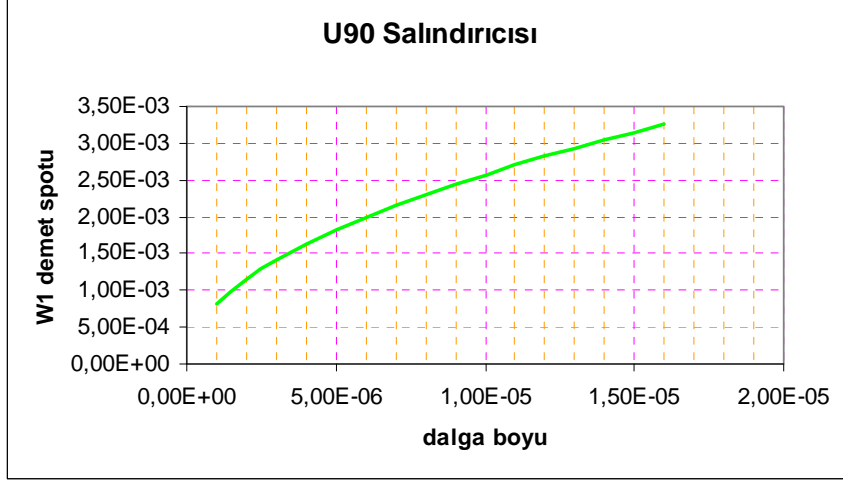
THM IR SEL için gerekli olan optik kavite parametreleri, Bölüm 2.6.5’de gösterilen optik kavitedeki eşitlikler kullanılarak elde edilmiş ve Çizelge 4.4’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. THM IR SEL optik kaviteletin ana parametreleri

Parametreler	U30	U90
Rezonatör Tipi	Simetrik, eşmerkezli	Simetrik, eşmerkezli
Salındırıcı periyodu(cm)	3	9
Salındırıcı uzunluğu(m)	1,68	3,6
Optik kavite uzunluğu, L_c (m)	11,53	11,53
1. aynanın eğrilik yarıçapı R_1 (m)	5,9281	6,5140
2. aynanın eğrilik yarıçapı R_2 (m)	0,9699	2,078
İstikrarlılık parametresi, $g_1 \times g_2$	(-0,9449)	(-0,770)
Mimumum spot boyutu, ω_0 (m)	$9,214 \times 10^{-4}$ ($\lambda_R=2,75 \mu\text{m}$)	$2,697 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=11 \mu\text{m}$)
Mimumum spot boyutu, ω_0 (m)	$2,887 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	0,0110 ($\lambda_R=185 \mu\text{m}$)
Aynada demet spot boyutu, ω_1 (m)	$5,5525 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=2,75 \mu\text{m}$)	$7,9544 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=11 \mu\text{m}$)
Aynada demet spot boyutu, ω_1 (m)	0,01739 ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	0,03262 ($\lambda_R=185 \mu\text{m}$)
Aynada demet spot boyutu, ω_2 (m)	$5,5525 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=2,75 \mu\text{m}$)	$7,9544 \times 10^{-3}$ ($\lambda_R=11 \mu\text{m}$)
Aynada demet spot boyutu, ω_2 (m)	0,01739 ($\lambda_R=27 \mu\text{m}$)	0,03262 ($\lambda_R=185 \mu\text{m}$)

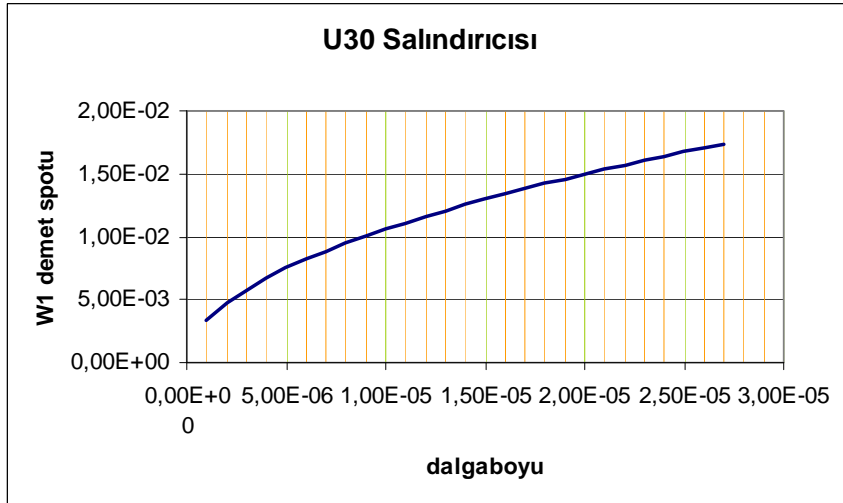
Yukarıda elde edilen parametreler kullanılarak U30 ve U90 salındırıcıları için aynadaki demet spot boyutu ω_1 'in dalga boyu aralığına göre grafikleri Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de elde edilmiştir.

$\lambda_u = 9cm$ için, $Z_R = 2,078m$, $L_c = 11,53m$, $g_1 = g_2 = -0,770$, $\lambda_R = 185\mu m$ ile aynadaki demet spotu $\omega_1 = 0,01739m$ Şekil 4.16'da ifade edilmektedir.



Şekil 4.16. U90 salındırıcısında ilk ayna için demet spotunun dalga boyuna grafiği

$\lambda_u = 3cm$ için, $Z_R = 0,9699m$, $L_c = 11,53m$, $g_1 = g_2 = -0,9449$, $\lambda_R = 27\mu m$ ile aynadaki demet spotu $\omega_1 = 0,01739m$ Şekil 4.17'de ifade edilmektedir.



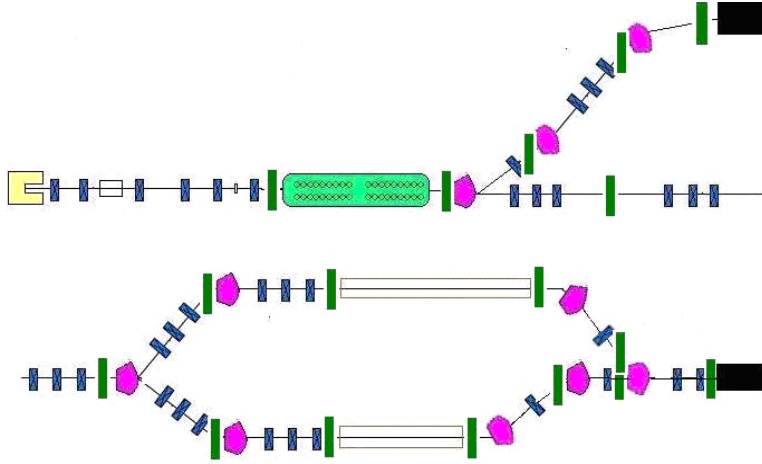
Şekil 4.17. U30 salındırıcısında ilk ayna için demet spotunun dalga boyuna grafiği

Yukarıdaki grafiklere göre, elde edilen lazerin dalga boyu artışına göre ω_1 demet spot boyutuda artış göstermektedir. Buna göre elde edilen foton demetinin çapıda dalga boyu ile birlikte artış gösterir.

4.6. Elektron Demet Diagnostiği

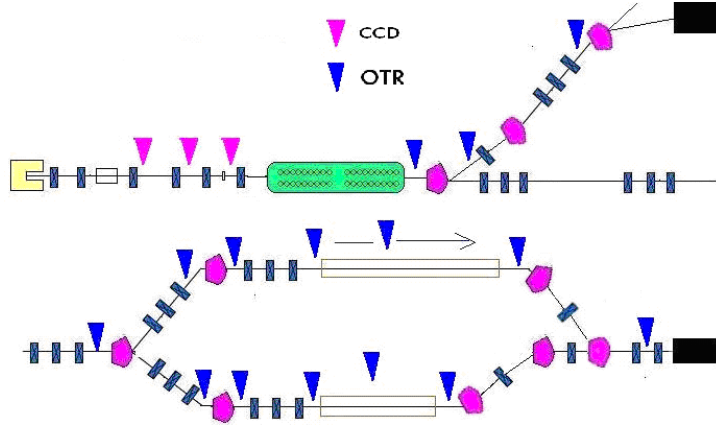
Demet diagnostiği, Türk Hızlandırıcı Merkezi kızıl ötesi serbest elektron lazeri (THM IR-FEL) projesinin önemli bir öğesidir. Yeterli demet diagnostiği olmadan, hızlandırıcı ayarları ve hızlandırıcı içerisindeki gelişmeler başarılı olamaz.

Demet diagnostiği için demetinin elektron tabancasından (GUN) çıkıp, durduruluncaya (DUMP) kadar katettiği yol boyunca; pozisyonun, akımın, taşıdığı yükün, uzunluğunun, enine ve boyuna emittanslarının, enerji dağılımlarının ve demet kayıplarının belirlenmesi gerekir.



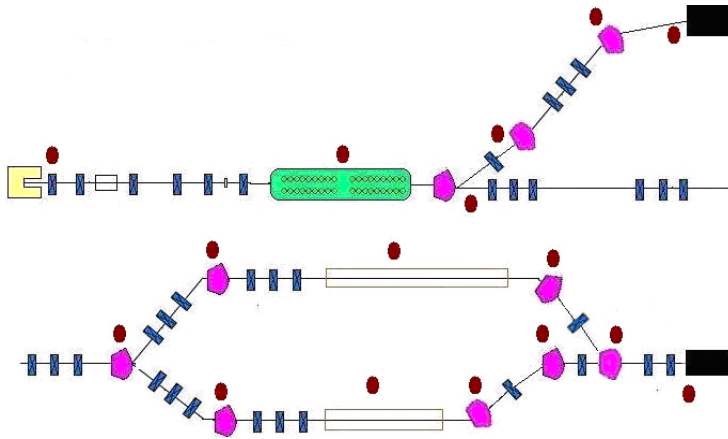
Şekil 4.18. Demet pozisyon ölçümü için THM SEL in düzeneği

THM SEL'in demet diagnostiğinde, Şekil 4.18'de mavi ile gösterilen yerlere selenoidler yerleştirilir. Burada selenoid, magnetik alan etkisiyle elektron demetini odaklamak için kullanılır. Selenoid etkisi ile elektronlar merkeze odaklanır. Pempe ile gösterilen yerlerde bulunan cihazlar ise kuadropol magnetlerdir. Genelde SEL demet hattının kıvrım noktalarında bulunan bu magnetler, hızlandırılmış elektron demetlerinin belirli açılarda yönlenerak yoluna devam etmesini sağlar. Yeşil kısımlarda ise, demet pozisyon monitörleri (BPM) bulunur. Demet pozisyon monitörleri, SEL düzeneğinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Burada demet hattı borusu içerisinde simetrik olarak yerleştirilen toplayıcılar, hem aralarından geçen demetteki toplam yükü hem de demet konumunu belirlemek için kullanılır.



Şekil 4.19. Demet boyutu ölçümü için THM SEL düzeneği

Şekil 4.19’da gösterilen yerlerde bulunan OTR ve CCD kameralar, THM SEL için demet hattı boyunca demetin varlığını tespit eder. Bunun için, radyasyon ortamında kullanılan OTR tübü, demet enerjisini puls ederek elektron demetini teşhis eder. Bu puls, kamera içerisinde optik görünüme çevrilerek demet boyutu ölçülür. CCD kameralar ise, elektron demet enerjisini ölçemezler ve radyasyondan etkilendikleri için kurşun blokların içerisinde muhafaza edilirler. Burada, elektron demetinin varlığını ve boyutunu incelemek için, demet gözlem penceresine gönderilen UV ışığının yansımalarını optik olarak görüntüye dönüştürülürler. CCD kameralar OTR kameralara göre çok daha net görüntü verirler.



Şekil 4.20. Demet kaybı ölçümü için THM SEL düzeneği

Şekil 4.20’de kırmızı noktalar halinde gösterilen yerlere ise demet kaybı monitörleri (BLM) konumlandırılır. Demet kaybı monitörleri, demet hattındaki elektron

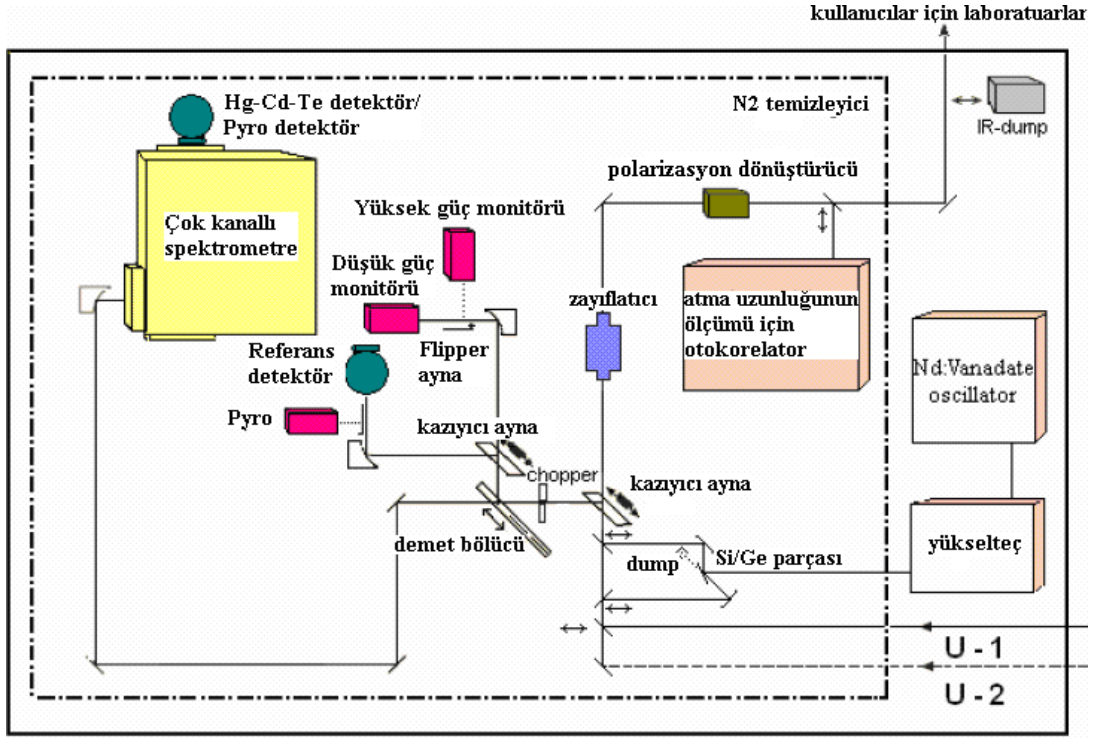
demetlerinin elektron kayıplarını veya artışlarını takip etmek için kullanılır. Dolayısıyla, demette meydana gelebilecek sapmalar durumunda sistem için olası bir kazaya karşı önlem alınabilir.

4.7. THM Serbest Elektron Lazeri Foton Demet Diagnostikleri

Foton demet diagnostikleri, THM SEL'in foton demet hattının çalışması için önemli cihazları içerir. U30 ve U90 salındırıcılarından (salındırıcı-1 ve salındırıcı-2) üretilmiş IR SEL fotonları, etkili optiklerin kullanımı ile ayrı iki boşaltım foton demet hattı arasında foton diagnostik kısmına taşınırlar. Foton diagnostik kısmı, atma süresi, yoğunluk, dalga boyu gibi lazer demet özelliklerini uygun biçimde karakterize etmek için kullanım laboratuvarları arasında yer alır. Diagnostikten sonra SEL demeti kullanım laboratuvarlarına dağıtılır.

Foton demet diagnostik kısmı, kullanım deneyleri için lazer demetini uygun şekilde karakterize ve diagnoze etmek için tasarlanır. Diagnostik amaçlar için bütün optik bileşenler ve aygıtlar, granit tablasına yerleştirilirler. Tabladaki diagnostik sistem, 2–190 mikron ayarlanabilir dalga boyu aralığı ile uyumlu olmalıdır. Aynalar, kristal optikler, demet ayırıcılar, farklı duyarlıktaki detektörler ve spektrometreler ana foton demetinin kesimini ayırmak için diagnostik tablada kullanılır.

THM IR SEL diagnostik tabla, Dresden'deki ELBE radyasyon kaynağına benzer olarak tasarlanmıştır. Tabladaki optik bileşenler ve ana diagnostik aletler, optik otokorelatör, HgCdTe ve Pyro detektörleri, Nd:Vanadat lazer sistemi, kusursuz güç detektörleri, zayıflatıcı, polarizasyon dönüştürücü, silisyum anahtar tabaka, kazıyıcı aynalar, mercekler, demet ayırıcılar, IR dumpları mevcuttur. Tabladaki bileşenlerin çoğu, uzaktan kontrol edilmiş işlemler için tasarlanır. Havadaki bileşenler tarafından ışın soğurulmasını diye, diagnostik tabla, kuru N₂, He ve Ne gazları ile temizlenir. Tasarlanmış IR SEL diagnostik tabla Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



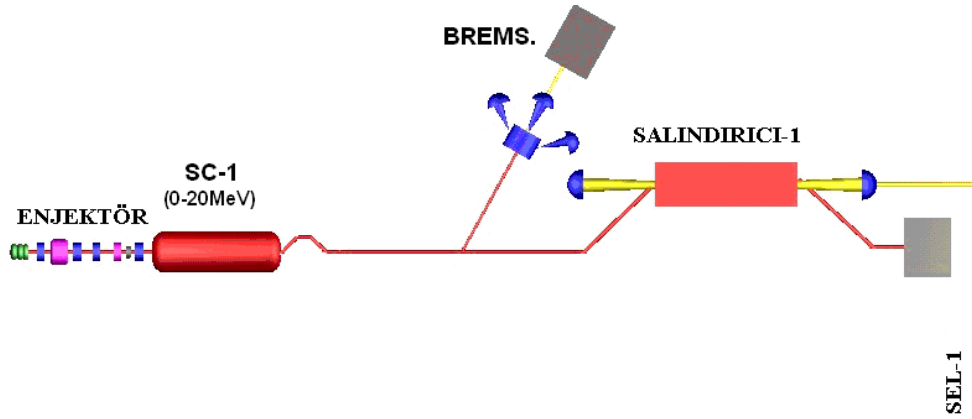
Şekil 4.21. IR-FEL diagnostik tablanın şematik düzeni

U30 ve U90 salındırıicılarında elde edilen SEL demet hattının ikisi de, diagnostik tablada birleştirilir. Demet ayırıcılar ile diagnostik demetin bir kısmı geniş aralıklı spektrometre arasına diğer kısmı ise kazıyıcı aynalara gönderilir. SEL demeti, kazıyıcı aynadan HgCdTe ya da Pyro detektörlerine ve güç ölçümleri için iki güç detektörlerin çıkışına yönlendirilir. HgCdTe ve Pyro detektörü, çok uzun dalga boyları ya da yüksek duyarlılıktaki ölçümler için kurulur. Bu detektörler, foton demetinin başlangıç durumunu izlemek için kullanılır. Czerny-Turner tipi spektrometre, spektrum ölçümleri için üç farklı yönlendirici aynadan oluşur. Mikro atma süresi karakterize olsun diye otokorelatör kullanılır. Otokorelatörde, ikinci harmonik üretiminin sağlanması için Cd_2Te single kristalinin kullanılması ile geniş dalga boyu aralığı, elde edilir. Bu kristal, FIR bölgesindeki geniş dalga boyu aralığı için saydamdır. SEL'in gücünün azaltılması için foton demeti, zayıflatıcıya iletilir. Buradaki zayıflatıcı, demetin çıkış gücünü kırarak yaymak için metal ızgaralara sahiptir. İstenmeyen güç, zayıflatıcının duvarlarında emilir. Foton demeti zayıflatıcıdan sonra kullanım laboratuvarlarına teslim edilir.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada kızıl ötesi serbest elektron lazeri (IR SEL) elde etmek için kurulacak Türk Hızlandırıcı Merkezi; elektron tabancası, paketleyici, lineer hızlandırıcı, salındırıcı ve optik kavite gibi ana parçaları açısından incelenmiştir.

THM’de 20-40MeV enerjili elektron demetini kullanarak 2–190 mikron dalga boyunda SEL üretilmesi amaçlanmıştır. Ancak ilk aşama olarak THM için sistemin maliyeti, kurulum süreci ve eğitim dönemi açısından tek bir Sİ hızlandırıcı kullanarak 20MeV enerjili elektron demeti ile Bremsstrahlung deneylerinin yapılmasına ve tek bir salındırıcı-rezonatör sistemi kullanılmasına karar verilmiştir (Şekil 5.1). Ayrıca, THM laboratuvarında yapılacak uygulamalar, hızlandırıcı seçimini etkileyen önemli unsurlar arasındadır. Genel spektroskopi ve mikroskopi, genel pompa-sonda deneyleri, yüksek dalga boyunda genel THz spektroskopi yöntemleri kullanım laboratuvarında yapılması öngörülen deneylerdir.



Şekil 5.1. THM SEL tesisi ilk aşaması

THM SEL için elektron kaynağı olarak termiyonik tabanca kullanılacaktır. Termiyonik tabanca grid katoda sahip olup, tabancadan çıkan elektron akımının yoğunluğu $7,61A/cm^2$ değerinde olacaktır. Anot voltajı 300kV olarak seçilmiştir. Elektron tabancasından çıkan elektron demetleri dağınık fazda bulunacağından eş fazlı duruma getirilmesi gerekir. Ana hızlandırıcıya girmek için yüksek frekans değerlerinde sıkıştırılmak üzere Sub Harmonik paketleyicide 260MHz, Fundamental paketleyicide 1,3GHz’de sıkıştırılacaktır.

Paketleyiciden çıkan elektron demetlerinin 1,3GHz frekans mertebesinde çalışan dokuz hücreli Sİ hızlandırıcısında 20MeV'lik enerjiye sahip olarak rölativistik hızlara ulaştırılması düşünülmektedir. Çalışma içerisinde, Sİ hızlandırıcıdan sağlanacak elektron demetinin yükü, yayını, enerjisi, çıkış rms enerji yayını gibi parametreler belirtilmiştir.

THM'de kullanılacak Sİ hızlandırıcıya, Nİ ve Sİ yapıdaki hızlandırıcıların özelliklerinin karşılaştırılması sonucunda karar verilmiştir. Buna göre, Sİ hızlandırıcılarda RF kaybı olmadığı için hızlandırıcı oyuk içerisinde sürekli salınan elektromagnetik alan mevcut olup elektron demetinin zaman yapısı hızlandırıcının çalışma frekansına bağlı olarak değişir. Ancak ortalama akım sabit kalır. Nİ hızlandırıcıların oyuklarında ise RF kayıpları yüksek olduğundan elektromagnetik dalga belirli aralıklarda salınır. Dolayısıyla atmalı yapıdaki RF varlığı Sİ hızlandırıcılarına göre ortalama akımı düşürür. THM'nin laboratuvarında yapılacak deneyler için, yüksek ortalama güçte ve kararlı yapıda SEL demetine ihtiyaç duyulur. Dolayısıyla Sİ hızlandırıcılarıyla elde edilen SEL demetinin 77ns aralıklı atma yapısı bu deneyler için oldukça uygun olduğu görülmüştür.

Planlanan THM SEL tesisinde 40MeV elektron demeti için Sİ durumunda en az 4 adet 1,3GHz RF kaynağına, Nİ durumunda ise en az 3 adet 3GHz RF güç kaynağına ihtiyaç vardır. Nİ opsiyonunda gerekli olan MW mertebesinde RF üretmek, Sİ opsiyonu için gerekli olan kW mertebesindeki RF üretimine nazaran çok daha zordur ve daha fazla elektriksel güç gerektirmektedir.

Soğutma sistemi bakımından Sİ hızlandırıcı oyuklarının 1,8K sıcaklığında tutulması zorunlu iken Nİ hızlandırıcılar oda sıcaklığında çalışmaktadır. Bundan dolayı Sİ yapı saflık derecesi yüksek helyum ile soğutulurken Nİ yapı saflık derecesi çok yüksek su ile soğutulmaktadır. Nİ için toplam soğutma ihtiyacı 20 derecede 60kW iken Sİ yapı için 1,8 Kelvin derecede 200W'tır. Sİ sistem için sıcaklık $\pm 0,2^\circ$ de kararlı olması gerekirken Nİ sistem için bu değer $\pm 2^\circ$ dir. Bununla birlikte Sİ hızlandırıcı yapı $\pm 0,1$ mbar basınç toleransı gerektirirken Nİ hızlandırıcıda bu değer çok hassas değildir.

Sİ ve Nİ yapıdaki hızlandırıcılar için yapılan bütün bu incelemelerin sonucunda THM için kurulacak donanımın Sİ teknolojiye dayanması her açıdan avantajlı ve verimli olacağına karar verilmiştir. Buna göre, ELBE laboratuvarı için geliştirilen iki adet TESLA kavitesi içeren sürekli elektron paketini hızlandırabilen modül, THM’de ana hızlandırıcı yapı olarak kullanılacaktır. Toplam uzunluğu 3,6m olan bu modül 20MV/m hızlandırma gradyenine sahiptir ve sürekli kipte 10kW’lık klistronlar ile beslenmektedir. Tek bir modül kullanarak 20MeV enerjili ve 1mA ortalama akımlı elektron demeti elde etmek mümkündür. Eğer sonuçlar tamamen başarılı olursa aynı modülü kullanarak 20MeV enerjide, 1,6mA ortalama akımında elektron demeti elde edilebilecektir.

Çalışma içerisinde, 20MeV ve 40MeV enerjili elektron demetleri için optik kavitenin parametreleri belirlenmiştir. Optik kavite içerisinde kullanılacak olan U30 ve U90 salındırıcıları için sistemde elde edilecek olan ışınımın enerjisi, gerekli hesaplama ve grafiklerle ifade edilmiştir. Bu hesaplar sonucunda 20MeV ve 40MeV elektron demet enerjisi için elde edilecek foton demet enerjisi, kuvvet parametresine göre azalış göstermektedir. Yüksek foton enerjisi elde edebilmek için kuvvet parametresi (K) tipik olarak, U30 salındırıcısı için 0,16–0,47, U90 salındırıcısı için 0,44–3,46 arasında bulunmalıdır.

Tez içerisinde 20MeV ve 40MeV elektron demet enerjisi için U30 ve U90 salındırıcılarında elde edilen lazer ışınımın dalga boyu aralığı hesaplanmış ve grafikleri çizilmiştir. Buna göre, büyük elektron demet enerjilerinden küçük lazer ışınım dalga boyları elde edileceği görülmüştür. Ayrıca U30 ve U90 salındırıcı için aynı elektron demet enerjileri için farklı dalga boylarının elde edilmesi bu salındırıcıların farklı magnetik alana bağlı olmasına bağlıdır.

Serbest elektron lazerinin ayarlanabilirliği ise, sadece salındırıcıya giren elektronun enerjisine bağlıdır. Salındırıcının magnetleri sabit olarak yerleştirildiğinden dolayı, salındırıcının magnetik alanı, kuvvet parametresi, salındırıcı gap aralığı, magnet periyodu gibi parametreler kurulum aşamasında belirlenmesi gereken değerlerdir. Dolayısıyla, SEL’in ayarlanabilirliği bu parametrelere bağlı değildir.

Optik kavite içerisinde elde edilen foton demeti gaussian moda olacaktır. R_1 ve R_2 yarıçaplı aynalar tarafında foton demetleri, ω_1 ve ω_2 demet spot boyutuna sahiptir. Tez çalışmasında optik kavite içerisinde elde edilecek koherent ışınım için gerekli parametreler hesaplanmıştır. U30 ve U90 salındırıcısı için ω_1 demet spot boyutunun dalga boyuna bağı grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklere göre, foton demetinin dalga boyu arttıkça demet spot boyutunun da arttığı görülmüştür.

Elektron demet diagnostiği için elektron demetinin elektron tabancasından (GUN) çıkıp, durduruluncaya (DUMP) kadar katettiği yol boyunca; pozisyonu, akımı, taşıdığı yükü, uzunluğu, enine ve boyuna emittansları, enerji dağılımları ve demet kayıpları belirlenmesi gereken önemli parametrelerdir. Bu parametrelerin belirlenmesi için, THM'nin demet hattı üzerinde bulunması gereken teknik aletlerin tümü çalışma içerisinde ifade edilmiştir.

Foton demet diagnostik kısmı, kullanım deneyleri için lazer demetinin atma süresi, yoğunluk, dalga boyu gibi niceliklerini uygun biçimde karakterize etmek için kullanım laboratuvarları arasında yer bulur ve salındırıcı ayarları için demet özelliklerini diagnoze etmek için tasarlanır. Diagnostik amaçlar için bütün optik bileşenler ve aygıtlar, granit tablasına yerleştirilirler. Tabladaki diagnostik sistem, 2–190 mikron ayarlanabilir aralığı ile uyumlu olmalıdır. Aynalar, kristal optikler, demet ayırıcılar, farklı duyarlılıktaki detektörler ve spektrometreler ana foton demetinin kesimini ayırmak için tablada kullanılır.

KAYNAKLAR

- Awazu, K., Asakawa, M. and Horike, H., 2003, Status Report and Biomedical Applications of the Institute of FEL, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 547s.
- Coupric, M.E. and Ortega, J.M., 2000, Free Electron Lasers for Scientific Applications, Analysis, 725s.
- Colson, W.B., 1980, Energy Transfer in Constant Period Free Electron Lasers, Space Physics Department, Rice University, USA.
- Ciocci, F., Dattoli, G., Torre, A., Renieri, A., 2000, Insertion Devices for Synchrotron Radiation and Free Electron Laser, World Scientific.
- Dattoli, G., Ciocci, F., Colson, W.B., 1984, Angular Gain Spectrum of Free Electron Lasers, Phys. Rev. A., 31s.
- Dattoli, G., Ciocci, F., Torre, A. and Renieri, A., 2000, World Scientific, ISBN 981 02 38329, 358, London.
- Duarte, F.J., and Hillman, L.W., 1990, Dye Laser Principles.
- Duke, P.J., 2000, Synchrotron Radiation, Oxford Science Publications.
- Einstein, A., 1917, On the Quantum Mechanics of Radiation, 121-128s.
- Elias, L.R., Fairbank, W.M., Madey, J.M.J., Ramian G.J. Schwettman, H.A. and Smith, T.I., 1975, Observation of Stimulated Emission of Radiation by Relativistic Electron in Spatially Periodic Transverse Magnetic Field, Phys.Rev. Letters, 36s.
- Fraese, J.S., Sheffield, R.L., Gray, E.R., 1986, A new high-brightness electron injector for free electron lasers driven by RF linacs, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Volume 250, 71-76s.
- Hahn, U., Hesse, M., Remde, H. and Zapfe, K., 2004, Vacuum 73, 231s.
- Halbach, K., 1983, Variable-Wiggler Free-Electron-Laser Oscillation, C1 44, 211s, Paris.
- Jackson, J.D., 1975, Classical Electrodynamics, 848s.
- Jacob, J., 2006, New Developments On Rf Power Sources, Grenoble, France, Proceedings of EPAC, Edinburgh, Scotland.
- Knippels, G.M.H. and Van der Meer, A.F.G., 1998, FEL Diagnostics and User

- Control, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, B 144, 32s.
- Kulipanov, G., et al, 1990, Observation of Self-Amplified Spontaneous Emission in the Mid-Infrared in a Free Electron Laser, Nuclear Instruments and Methods, 3s.
- Lapotolle, P.M., Septier, A.L., 1970, Linear Acceleration., North Holland Publishing Company, Amsterdami.
- Maiman, T.H. and Elion, H.A., 1967, Lasers System and Applications, Pergaman Pre Oxford.
- Motz, H., 1951, Applications of the Radiation from Fast Electron Beams, J.Appl Phys., 335s.
- Motz, H., Than W., and Whitehurst, R.N., 1953, Experiments on Radiation by Fast Electron Beams, J.Appl Phys., 24s.
- Neil, G. R. et al., 2003, Production of High Power Femtosecond Terahertz Radiation, Nuclear Instruments and Methods, 537s.
- Ozansoy, A., 2007, IR SEL Elektron Kaynağı, III.YUUP Çalıştay1, Ankara.
- Schawlow, A.L. ve Townes, C.H., 1958, Infread and optical masers.
- Shankar, M., 2006, Human-tracking systems using pyroelectric infrared detectors, Optical Engineering, 45s.
- Siegman, A.E., 1986, Lasers, University Science Books.
- Turner, S., 1990, CERN European Organization for Nuclear Rasearch, CAS CERN Accelerator School, Synchrotron Radiation and Free Electron Lasers, Geneva.
- Wangler, T.P., 1998, Principles of RF Liar Acceleration., New York.
- Wille, K., Mcfaal, J., 2000, The Physics of Particle Accelerators, Oxford University Pres ISBN 0198505493, 315s, USA.
- Willis E.L. and Retherford, R.C., 1947, Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method, Columbia Radiation Laboratory, New York.
- Winick, H., 1998, Fourth Generation Light Sources, IEEE, 37-41, USA.
- Yamanaka, C., 1992, Future İndustrial Application of FEL,1s.

ÖZGEÇMİŞ



Adı Soyadı : Serap YİĞİT GEZGİN
Doğum Yeri : ANTALYA
Doğum Yılı : 06.01.1980
Medeni Hali : Evli

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise :1995 – 1998 Antalya Lisesi
Lisans :1998–2002 Süleyman DEMİREL Üniversitesi Fen-Ed. Fak. Fizik
Tezsiz Yüksek lisans: 2002–2004 Süleyman DEMİREL Üniversitesi Eğitim Fak.
Y. Dil : İngilizce