

KENDİLİĞİNDEN GENLİK ARTIRIMLI LAZER
SİSTEMİNDE ELEKTRON TABANCASI VE
SÜPER İLETKEN HIZLANDIRICI YAPILARIN MODELLENMESİ

Ayşe BAT

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Haziran – 2012

KENDİLİĞİNDEN GENLİK ARTIRIMLI LAZER SİSTEMİNDE ELEKTRON TABANCASI
VE SÜPER İLETKEN HIZLANDIRICI YAPILARIN MODELLENMESİ

Ayşe BAT

Dumlupınar Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca
Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman : Doç. Dr. Hatice Duran YILDIZ

Haziran - 2012

KABUL ve ONAY SAYFASI

Ayşe BAT'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı Kendiliğinden Genlik Artırımlı Lazer Sisteminde Elektron Tabancası ve Süper iletken Hızlandırıcı Yapıların Modellenmesi başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

08/06/2012

(Sınav tarihi)

Üye : Doç.Dr. Hatice DURAN YILDIZ

Üye : Yrd.Doç. Dr. Ercan UÇGUN

Üye : Yrd. Doç. Dr.Zafer ÜSTÜNDAĞ

Fen Bilimleri Enstitüsün Yönetim Kurulu'nun/...../2012 gün ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hasan GÖÇMEZ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

KENDİLİĞİNDEN GENLİK ARTIRIMLI LAZER SİSTEMİNDE ELEKTRON TABANCASI VE SÜPER İLETKEN HIZLANDIRICI YAPILARIN MODELLENMESİ

Ayşe BAT

Fizik Yüksek Lisans Tezi, 2012

Tez Danışmanı: Doç.Dr. Hatice DURAN YILDIZ

ÖZET

Bu tezde, Kendiliğinden genlik artırımı Serbest elektron lazeri elde edebilmek için kullanılacak olan elektron demetinin üretilmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. RF Fotokatot tarafından oluşturulan elektron tabancasında ilk önce, Nd:YLF lazeri tarafından fotokatotdan elektronların sökülmesi ve elektron demetine ilk hızlandırmanın sağlanması gerekir. Elektronların elde edilmesi ve hızlandırılmaları için çeşitli modelleme programları kullanılmıştır. Modelleme çalışmalarında hızlandırıcı kavitelerdeki elektrik alanın davranışları Superfish Programı, tabancanın içindeki manyetik alanın sağlandığı kısım olan selenoidin modellenmesi Poisson Kodu ile yapılmıştır. Elektron tabancasındaki yarı iletken katotdan sökülen elektronların demet yolu boyunca ve faz uzayındaki davranışları da Astra Modelleme programı ile çalışılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda tabancadan çıkan elektronlar 3.8 MeV ve ilk hızlandırıcıdan sonra 12.8 MeV değerinde artmış şekilde elde edilmiş ve hızlandırıcı kavitelerin verimli şekilde çalıştığı yapılan modelleme çalışmalarında açık şekilde görülmüştür. Ayrıca katotdan çıkan elektron demetinin enine ve boyuna yayılımı, ıraksaması, demetin büyüklüğü, dünyadaki benzer lazer laboratuvarındaki değerlerle uyumlu olacak şekilde elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Astra Modelleme Programı, Elektron Tabanca, ND:YLF Lazer , Poisson Superfish Modelleme Programı, RF Fotokatot,

SIMULATION OF ELECTRON GUN AND SUPERCONDUCTING ACCELERATING STRUCTURES AT SELF AMPLIFICATIONS OF SPONTANEOUS EMISSION LASER SYSTEMS

Ayşe BAT

Physics, M.S.Thesis. 2012

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Hatice DURAN YILDIZ

SUMMARY

In this thesis, the study has been done on the production of electron beam that is used at Self amplification spontaneous emission free electron laser. The first thing is to satisfy for the electron gun which is based on RF photocathode, the extraction of the electron beam from the photocathode by using Nd:YLF laser and then accelerate the first beam. Obtaining electrons and to accelerate them, it is utilized various simulation programs. Behaviour of the Electric field of accelerating cavities is modelled by Superfish and Poisson Code is used in order to simulate main solenoid that is supplied magnetic field for gun. For the electrons that is extracting from semiconducting photocathode in the electron, beam behaviour along the beamline and phase space is studied and modelled by Astra Simulation Program. As a result of this study, resultant electrons from gun have 1.8 MeV energy while after first accelerating cavities, the energy raise to 12.8 MeV, thus efficiency of the eccelerating cavities is seen clearly by simulation studies. On the other hand, Transverse and longitudinal emittance, beam divergence, beam size of the extracting electron beam from the cathode can be obtained in a good agreement with the similar laser laboratories in the World.

Keywords: Astra Modeling Program, Elektron Gun, ND: YLF Laser, Poisson Superfish Modeling Program, RF Photocathode

TEŞEKKÜR

Sabırlı, özverili, azimli gibi birçok özelliği kazanmamı ve kendimi yetiştirmemi sağlayarak yolumu bulmamda bana her zaman destek oldukları için babam Tahir Rüştü BAT ve annem Leyla BAT ‘a en büyük teşekkürü borç bilirim. Bir kardeşin verebileceği en güzel yol arkadaşlığı ve önderliğiyle bana daima öncü olan ablam Vildan Mert ve abim Ahmet BAT ‘a teşekkür ederim. Bilgi ve deneyimleriyle bana daima yol gösteren, Titiz çalışmaları ve hiç bitmeyecek olan merak duygusuyla kendime her zaman örnek alacağım bir öğreticinin yanı sıra bana ailesinden biri gibi hissettirdiği için tez danışmanım Doç.Dr. Hatice DURAN YILDIZ’A sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜRLER	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
1.GİRİŞ	1
2.KENDİLİĞİNDEN GENLİK ARTIRIMLI SERBEST ELEKTRON LAZERİ SİSTEMLERİ	4
3.ELEKTRON TABANCASI VE BÖLÜMLERİ	8
3.1 Elektron Tabancası	8
3.1.1 Termiyonik elektron tabanca	8
3.1.2 Fotokatot elektron tabanca	10
3.1.3 DC Elektron tabanca kaynağı	10
3.1.3.1 Termiyonik DC elektron kaynağı	11
3.1.3.2 Fotokatot DC elektron kaynağı	12
3.1.4 RF elektron kaynakları	13
3.1.4.1 Termiyonik RF elektron kaynağı	13
3.1.4.2 Fotokatot RF elektron kaynağı	14
3.2 Fotokatotlar	15
3.2.1 Fotokatot Materyalin Özellikleri	15
3.2.1.1. Kuantum verimliliği (QE)	15
3.2.1.2 Yayınım	16
3.2.1.3 Yaşam süresi	16
3.2.1.4 Dayanıklılık ve optiksel zarar eşiği	17

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.2.1.5 İşletim kolaylığı	17
3.2.1.6 Karanlık akım	17
3.2.1.7 Spektral tepki	18
3.2.1.8 Zamansal cevap	18
3.2.1.9 Transvers enerji dağılımı	19
3.2.2 Fotokatot çeşitleri	19
3.2.2.1 Metal fotokatotlar	20
3.3.2.2 Yarı iletken fotokatotlar	21
3.3 Kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazeri için elektron tabanca önerisi	26
4. MANYETİK, ELEKTRİK ALANLAR VE MODELLEME ÇALIŞMALARI	29
4.1 POISSON/SUPERFISH Programı ve Yapılan Modelleme Çalışmaları	33
4.1.1 SUPERFISH problemi	34
4.1.1.1 SUPERFISH problemi modelleme Sonuçları	38
4.1.2 POISSON problemi	42
4.1.2.1 POISSON problemi modelleme çalışmaları	43
5. ASTRA PROGRAMI	45
5.1 İlk Parçacık Dağılımının Belirlenmesi	49
5.2 ASTRA Program Sonuçları	50
5.2.1 Demet yayını	50
5.2.2. Demet boyutu	51
5.2.3 Demet ıraksaması	52
5.2.4 Demet uzunluğu	53
5.2.5 Enerji dağılımı	54
5.2.6 Ortalama parçacık enerjisi	55
5.2.7 LARMOR açısı	56
5.2.8 BETA fonksiyonu	57
5.2.9 Kavite alanı	58
5.2.10 Selenoid alanı	59

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.2.11 Enine faz uzayı	60
5.2.12 Boylamsal faz uzayı	61
5.2.13 Çekirdek yayınımları	63
5.2.14 Dilim yayınımları	64
6. SONUÇLAR	66
KAYNAKLAR DİZİNİ	67

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Atomların enerji seviyeleri arasındaki geçişler	2
1.2 Paralel aynalar arasında ışığın uyarılması	3
1.3 Lazer ışığının paralel aynalar arasında yeterli yoğunluğa ulaşması	3
2.1 Elektromanyetik spektrum.	4
2.2 SASE modlu serbest elektron lazerleri	5
2.3 “Micro-bunch’ların” doyuma ulaşması	7
2.4 Elektron demetinin doyuma ulaşması	7
3.1 1.5 hücrelik kavite içerir bir elektron tabancası	8
3.2 Dc elektrik alan üretici	10
3.3 Termiyonik DC elektron kaynağı	11
3.4 Fotokatot DC elektron kaynağı	12
3.5 RF elektrik alan üretici	13
3.6 Termiyonik RF elektron kaynağı	13
3.7 Fotokatot RF elektron kaynağı.....	14
3.8 Katot’dan elektron sökülmesi	15
3.9 Bazı fotokatot malzemelerin QE değerleri.....	16
3.10 Fotokatot çeşitleri.....	19
3.11 Cs ₂ Te fotokatodun Mo ile katkılanması.	25
3.12 Cs kalınlığına göre QE’nin değişimi	26
3.13 Fotokatot RF elektron tabanca	28
4.1 TE ve TM modları.....	32
4.2 Superfish Problemi için program algoritması	36
4.3 Eliptik kavite	37
4.4 1.5 Hücrelik kavitedeki elektrik alan davranış çizgileri	39
4.5 Elektrik alanın boylamsal ve radyal doğrultudaki davranışı	40
4.6 İlk hızlandırıcının elektrik alan çizgileri	41
4.7 Elektrik alanın ilk hızlandırıcı içerisindeki boylamsal ve radyal doğrultudaki davranışı ...	41
4.8 POISSON problemi için program algoritması	43
4.9 Selenoid ve bunch coil	43
4.10 Manyetik alanın boylamsal ve radyal doğrultudaki davranış	44

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.1 Generator programı için örnek girdi dosyası	45
5.2 Astra programı için örnek girdi dosyası	47
5.3 Enine demet yayını	51
5.4 Demetin büyüklüğü	52
5.5 Demetin ıraksaması	53
5.6 Demet uzunluğunun boylamsal uzunluğa göre değişimi	54
5.7 Enerji dağılımının boylamsal ilerlemeye göre değişimi	55
5.8 Ortalama enerji dağılımı	56
5.9 İlerleme uzunluğuna göre Larmor açısının değişimi	57
5.10 Beta fonksiyonunun değişimi. Kırmızı renk y, siyah renk x yönündeki değişimi verir. ...	58
5.11 Boylamsal olarak elektrik alanın değişimi	59
5.12 Selenoid alanın değişimi	60
5.13 Elektron demetinin enine faz uzayındaki davranışı	61
5.14 Demetin boylamsal faz uzayındaki davranışı	62
5.15 Enine koordinatlara göre demetin önden görünüşü	62
5.16 Demetin y-eksenine göre yandan ve x-eksenine göre üstten ilerleme doğrultusuna göre dağılımları	63
5.17 Çekirdek yayınımlarının enine ve boylamsal değişimleri	64
5.18 Dilimsel yayını	64
5.19 Demet yayınına dilimsel bakıldığında elipslerin büyüklükleri	65

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1 Bazı termiyonik yayıcı materyallerin önemli özellikleri	9
3.2 Boening injectorünün parametre değerleri	11
3.3 Fotokatot DC elektron tabanca parametreleri	12
3.4 Termiyonik RF elektron tabanca parametreleri	14
3.5 Fotokatot içeren RF elektron tabanca parametreleri	14
3.6 Elektron tabancası içerisindeki başlıca elementlerin iş fonksiyonu	18
3.7 Katot malzemelerin cevaplama süresi	19
3.8 Metal fotokatotların bazı özellikleri.....	21
3.9 PEA tipi yarı iletken fotokatotların bazı özellikleri	22
3.10 Farklı dalga boyu ve enerjilerde bazı alkali-halide, alkali-antimonide ve alkali-telluride fotokatotların QE verimlilik değerleri.....	23
3.11 NEA tipi yarı iletken fotokatotların bazı özellikleri	24
3.12 Metal ve yarı iletken fotokatotlar arasındaki farklar.	24
3.13 Cs ₂ Te fotokatodun avantaj ve dezavantajları.	25
3.14 FZD , HZB ve BNL 'nin elektron tabancalarının karşılaştırılması.	26
3.15 Bazı laboratuvarların elektron tabancası için parametreleri.....	27
4.1 Superfish probleminde kullanılan parametreler	36
4.2 Poisson ve Superfish problemleri için sınır şartlarını belirleyen parametreler	37
4.3 Elektron tabanca için kavite parametreleri	38
4.4 İlk hızlandırıcı için kavite parametreleri	40
5.1 Astra tarafından üretilen çıktı dosya isimleri	48
5.2 “.ini” uzantılı dosya içerisindeki referans parçacığın durumları	49
5.3 Parçacık index	49
5.4 Status flag durumları	50
6.1 L-bant RF elektron tabanca için elektron parametreleri	66

KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
ASTRA	Uzay Yüğü İzleme Algoritması
BNL	Brookhaven Ulusal Laboratuarı
CERN	Avrupa nükleer araştırma merkezi
CLIC	Elektron-Pozitron çarpıştırıcısı –CERN deneyi
FZD	Forschung Dresden-Rosendorf
HZB	Helmholtz Zentrün Berlin
NEA	Negatif Elektron Affinity
PEA	Pozitif Elektron Affinity
QE	Kuantum Verimliliğı
RF	Radyo Frekansı
SASE	Kendiliğinden genlik artırımı
SSRL	Stanford Senkrotron Radyasyonu Laboratuarı
TE	Transverse Elektrik
TM	Transverse Manyetik
UHV	Ultra Yüksek Vakum Şartları

1. GİRİŞ

Laser “Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation” kelimelerinin baş harflerinden oluşur. Uyarılmış radyasyon tarafından kuvvetlendirilmiş ışık anlamındadır ve dilimizde lazer olarak kullanılır.

İlk olarak 1916 yılında Albert Einstein uyarılmış ışımaya kavramını ortaya atmıştır. Uyarılmış ışımaya dayanan ilk alet 1951 yılında Charles H. Townes tarafından Kolombiya Üniversitesinde keşfedilmiştir. Bu keşif 1964 yılında C. H. Townes’e Nobel ödülü kazandırmıştır. 1958 yılında “Optik MAZER’ı (Microwave Amplification by Stimulated Emission)” tanımlayan ilk ayrıntılı makale Kolombiya üniversitesinden yayınlanmıştır. 16 Mayıs 1960 tarihinde Theodore Mainman, Hughes Araştırma Laboratuvarlarında, Yakut (ruby) kristali ile ilk çalışan lazer’i keşfetmiştir (Mainman, 1967).

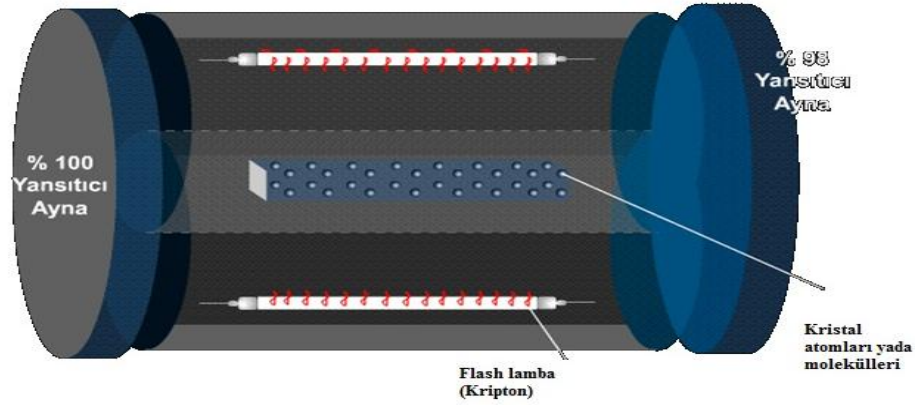
Lazer ışını normal ışıktan farklı olarak bir çok özelliğe sahiptir. Lazer ışını dağılmazdır ve yön verilebilir. Yön verilebilirlik özelliğiyle daha çok ölçmede ve fiber optik teknolojisinde kullanılır. Dağılmazlık özelliğiyle ışın kısa atmalar halinde yayınlanabilir. Kayıpsız yüksek enerji transferi yapılması bu özelliğiyle sağlanır. Lazer kendisinde bulunan yüksek enerji sayesinde kesme, kaynak, ve delme endüstrisinde de kullanılır. Ayrıca lazer ışının çok kısa atmalı olmasından dolayı yüksek hız fotoğrafçılığın da faydalanılır. Yönlü bir hareketinin olmasından dolayı da holografide faydalanılır. Holografi cisimleri üç boyutlu olarak gerçeğe çok yakın görüntülerini oluşturma tekniğidir. Lazer ışını, dalga boyu tek olduğundan monokromatik özellik taşır. Frekans dağılım aralığı, frekansının milyonda biri civarındadır. Bu sebepten dolayı istenilen frekansta çok sayıda dalgalar lazer dalgası üzerine bindirilerek haberleşmede iyi bir sinyal üreticisi olarak kullanılır. Aynı anda bir çok bilgiyi bir yerden başka bir yere gönderebilir. Ayrıca Lazer ışını tek dalga boyuna sahip olduğu için lazer cinsine göre çeşitli renkte ışınlar elde etmek mümkündür. Dalga boyunun küçük olması nedeniyle dağılmayı büyük ölçüde azaltır. Bu da lazerin çok parlak olmasını sağlar. Bütün bu özellikleriyle fizikte, kimyada, biyolojide, tıpta, bilimde ve sayısız daha bir çok alanda lazer kullanılmaktadır (Materlik ve Tschentscher, 2010).

Theodore Mainman 1960 yılında dünyanın ilk lazerini yaparken, buluşunun bütün Dünya’da böyle bir başarıya ulaşacağını tahmin etmemiştir. Ancak lazer günümüzde hem bir otomobil sacına hem de hassas insan damarlarına aynı mükemmellikte kaynak yapabilmektedir.



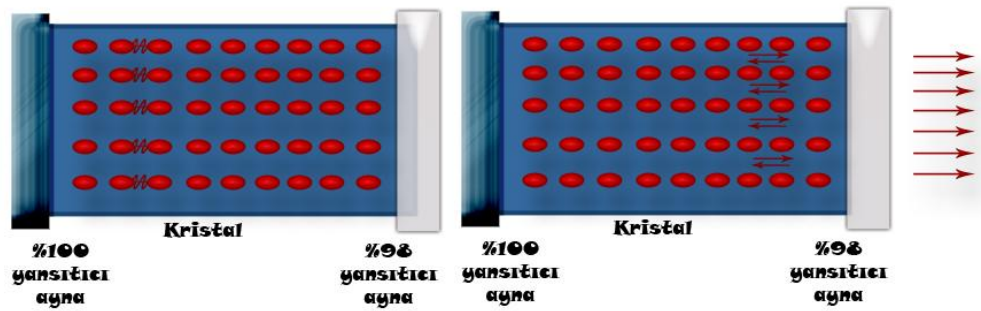
Şekil 1.1 Atomların enerji seviyeleri arasındaki geçişler

Lazer ışınının temeli, atom veya moleküllerin enerji seviyeleri arasındaki geçişlere dayanır. Kendiliğinden geçiş, soğurma ya da uyarılmış yayınlama yollarıyla uyarılmış ışınlar elde edilir. E_1 ve E_2 gibi iki enerji seviyesinin varlığında ($E_1 < E_2$), E_1 seviyesinde bulunan bir atoma dışarıdan bir foton etki ettirilirse E_1 seviyesinden E_2 seviyesine uyarılır (Şekil 1.1 (b)). Kendi haline bırakılırsa bu atom uyarılmış olduğu E_2 seviyesinden foton yayınlayarak E_1 enerji seviyesine geri döner (Şekil 1.1 (a)). E_1 seviyesinden E_2 seviyesine geçen uyarılmış atoma geri dönmesi sırasında bir foton daha çarptırılırsa atomu iki foton birden terk eder (Şekil 1.1 (c)). Bu olaylar iki paralel ayna arasına konularak aynı fazda güçlendirilmiş ışık elde edilmesiyle de lazer ışını oluşur (<http://tr.wikipedia.org>).



Şekil 1.2 Paralel aynalar arasında ışığın uyarılması (Lataryum, 2006).

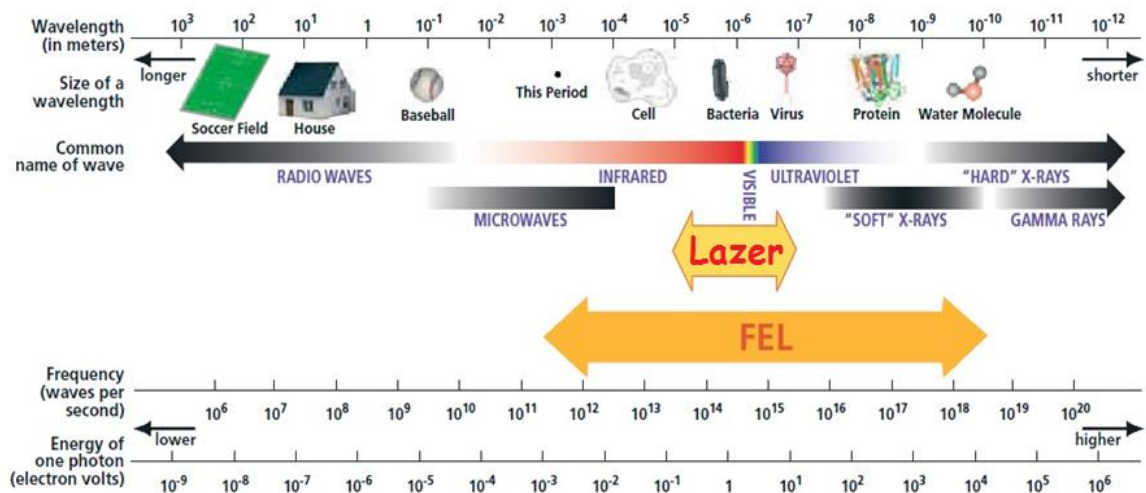
Lazerin çalışma prensibi, en temel haliyle bir ucunda %100 yansıtıcı olan ve diğeri %98 olan iki ayna sistemi arasında bir tüp içerisinde gaz, sıvı, veya katı madde konulur, sonra dışarıdan ışık verilebilir, elektrik akımı geçirilerek ya da kimyasal bir yolla bu tüp içerisindeki atomların uyarılması sağlanır. Temas eden bazı atomlar bu enerjiyi emerler. Fazla enerji atomları kararsız hale getirir. Kendine bir foton çarpan, uyarılmış ve kararsız atom, fazla enerjisini foton yayarak verir. Fotonlar benzer şekilde diğer atomların yayılmasını sağlar. % 100 yansıtan aynaya ulaşan fotonlar, aynalardan yansıyarak geri dönerler ve bu döngü ışık kuvvetleninceye kadar devam eder. Kuvvetlenen ışık kısmen yansıtan uçtan dışarı çıkar. Bu ışık lazer ışınıdır (Şekil 1.2).



Şekil 1.3 Lazer ışığının paralel aynalar arasında yeterli yoğunluğa ulaşması

2. KENDİLİĞİNDEN GENLİK ARTIRIMLI SERBEST ELEKTRON LAZERİ SİSTEMLERİ

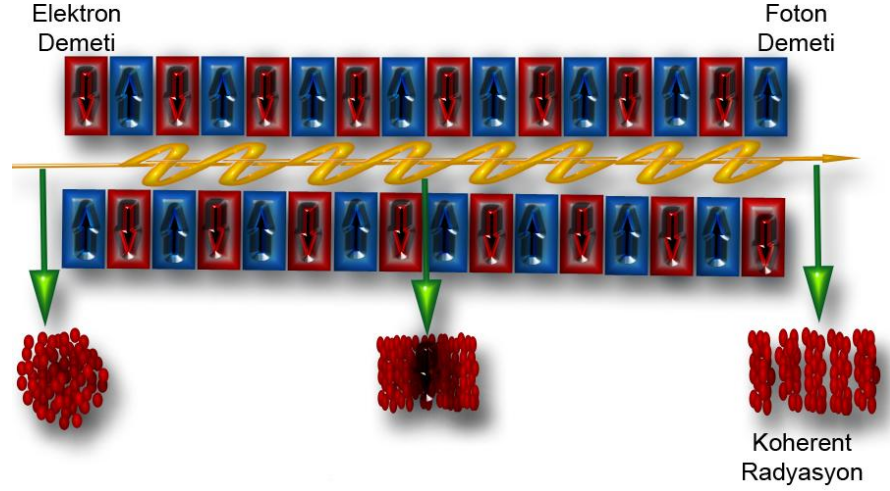
Işık tarafından binlerce yıldır birçok bilgi elde edilmiştir. Işığın farklı frekans aralıkları kullanılarak ışığın doğası hakkında araştırmalar yapılırken aynı zamanda birçok uygulama alanı da ortaya çıkarılmıştır. Bu uygulama alanlarından biride ışığı daha koherent bir yapıya getirerek elektromanyetik spektrumda kızıl ötesi bölgeden x-ışınları bölgesine kadar olan kısmı kapsayan serbest elektron lazerlerinin elde edilmesidir. Serbest elektron lazerleri yüzey araştırmalarında, atom ve molekül fiziği, malzeme bilimi, yoğun madde fiziği, tıp, biyoloji, kimya, biyomoleküllerin spektrometresi ve foto-kimyasal süreçlerin incelenmesi gibi birçok farklı alanda kullanılmaktadır.



Şekil 2.1 Elektromanyetik spektrum (Ganter et al., 2010).

SASE (Self Amplified Spontaneous Emission), kendiliğinden genlik artırımı serbest elektron lazerleri (SEL) ultraviyole, yumuşak x-ışınları ve sert x-ışınları bölgesinde lazer ışını üretebilmektedir. Doğada sadece elektromanyetik spektrumun görünür bölge diye adlandırıldığı ve 400 -700 nm dalga boyu aralığına gelen kısmı görülebilmektedir. Şekil 2.1 'de görüldüğü gibi görünür bölge çok küçük bir alanı kapsamaktadır. Bu tezde yapılan çalışmalarla ultraviyole ve bütün x-ışınları bölgesini kapsayan bir lazer elde edilmesi planlanmaktadır. Elde edilecek lazer ışını bir çok bilimsel araştırmaların yanı sıra özellikle suyun içindeki protein molekülerinin incelenmesinde, yapıların manyetik özelliklerinin (geçici ve kalıcı manyetizma) incelenmesinde, iç yapıları hakkında bilgi edinmek için çeşitli malzemelerin yüzey analizlerinin

yapılmasında, cip üretim mekanizmasında, kimyada x-ışınlarıyla ilgili uygulamalarda ve daha bir çok alanda kullanılacaktır.



Şekil 2.2 SASE modlu serbest elektron lazerleri

SASE’de genliğin kendiliğinden artımını sağlamak için uzun bir salındırıcı yapı kullanılmalıdır (Şekil 2.2). SASE SEL birçok alt sistemden oluşmaktadır. Başlangıçta elektronları elde etmek için elektron tabancası kullanılır. Elektronları katotdan söktürmek için sürücü lazer kullanılır. Elektron tabancasından çıkan elektron demetini sıkıştırmak ve birkaç kA’lık tepe akımı kazandırmak için sıkıştırıcı yapılar (Bunch Compresor), bu demetleri rölativistlik hızlara çıkarmak için de doğrusal hızlandırıcılar kullanılır. Son olarak rölativistim hızlarda hareket eden elektron demetinin foton yayınlarak koherent bir yapıya sahip olması için uzun bir undulator sistemi kullanılmaktadır.

SASE SEL’de sinkrotron radyasyonu (SR) üretmek için basit bir kural tanımlanabilir. Salındırıcı boyunca rölativistlik hızlarda ($\beta \approx 10^{-2} - 10^{-5}$) hareket ederken, elektronlar manyetik alan tarafından oluşturulan Lorentz Kuvveti sayesinde enine yönde yayılmaları için hızlandırılırlar. Yayılım boyunca sinusoidal bir yol izler ve ilerleme yönünde SR yayınlar. Bu radyasyonla bütünleşmiş dalga boyunun bir şekilde başlangıç açısı belirlenebilir.

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{m_e c^2}{E_e} \quad (2.1)$$

Denklem 2.1 (Ganter et al., 2010)'de, m_e = Elektron kütlesi (511 keV/c²) ve E_e Elektronun enerjisidir.

Salındırıcıda elektronların ilerleme yönlerinden sapmaları zıt kutuplu magnetler sayesinde olur. Bu sapma salındırıcı boyunca hareket eden elektron demetinin radyasyon üretmesiyle sonuçlanır. Salındırıcı içerisinde ilerleyen elektron demetinin dalga boyu λ_{sel} ,

$$\lambda_{sel} = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} (1 + K_{rms}^2) \quad (2.2)$$

Denklem 2.2 (Ganter et al., 2010)'de , λ_u = salındırıcının periyodu ve K_{rms} = salındırıcı parametresi,

$$K_{rms}^2 = \frac{eB_u\lambda_u}{(2\pi m_e c)} \quad (2.3)$$

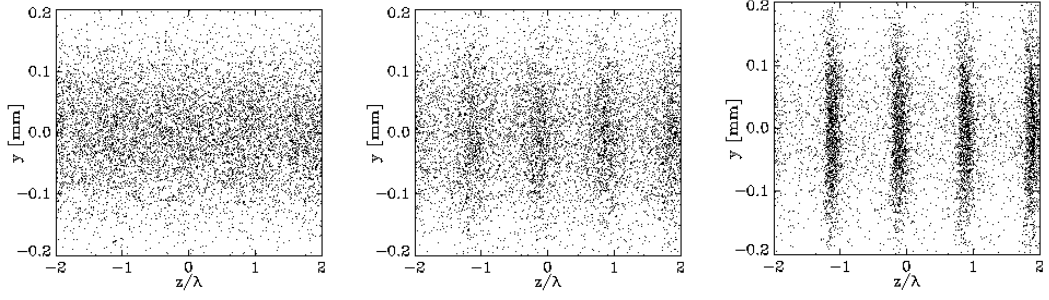
Denklem 2.3'de, B_u = rms (root mean square - kare ortalama karekök) manyetik alan, e ise elektronun yükünü temsil eder.

Elektronlar, elektromanyetik alanla salındırıcı boyunca foton yayınlıyarak ve genliğini kendiliğinden arttırarak ilerlerler. Bu serbest elektron lazerlerinde SASE için en önde gelen koşullarındandır. Hassas bir manyetik alanla birlikte düşük yayınım, düşük enerji dağılımı ve oldukça yüksek yük yoğunluğu elde etmek için salındırıcı boyunca elektron demetinin ve radyasyon atmasının üst üste binmesiyle iyi bir elektron demeti elde edilir.

Elektron demetinin salındırıcı boyunca salınımından sonra, kendiliğinden üretilen manyetik alan tarafından elektronlar etkileşir. Bu etkileşme “micro-bunching” olarak adlandırılır ve ortamdaki elektromanyetik alan tarafından büyütülür. Elektronların demetteki boylamsal dağılımı, yayılmış radyasyonun λ_{sel} dalga boyuna uygun olarak eşit büyüklükte parçalara ayrılır. “Micro-bunch” elektronlardan yayılan radyasyonun uyumlu bir şekilde üst üste binmesiyle elektronların fazı gittikçe artar. Devam eden Micro-bunch sayesinde, SASE SEL'in radyasyon gücü $P(z)$, salındırıcı boyunca z uzaklığı ile katlanarak artar.

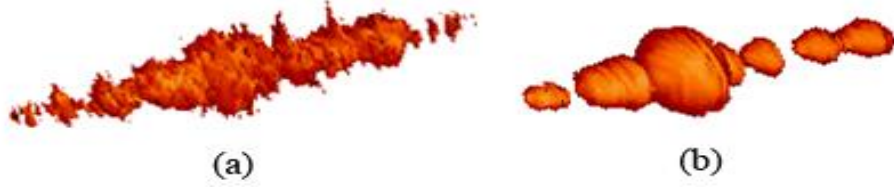
$$P(z) = A p_{in} \exp\left(\frac{2z}{L_g}\right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4 (<http://hasylab.desy.de>) ile SASE SEL'in radyasyon gücü verilir. Denklem 2.4 'de, L_g =Kazanç uzunluğu alanı, P_{in} = Giriş gücü, A = Giriş bağlaşım faktörüdür.



Şekil 2.3 “Micro-bunch’ların” doyumuna ulaşması (<http://hasylab.desy.de>)

Şekil 2.3’da SEL sisteminde salındırıcı boyunca “micro-bunching” gelişimi gösterilmektedir. Bu resim sadece elektron demetinin büyümesinin yanı sıra parçaların sayısını da ortaya koymaktadır. Şekil 2.3’de son resim demetin doyumuna ulaştığını gösterir.



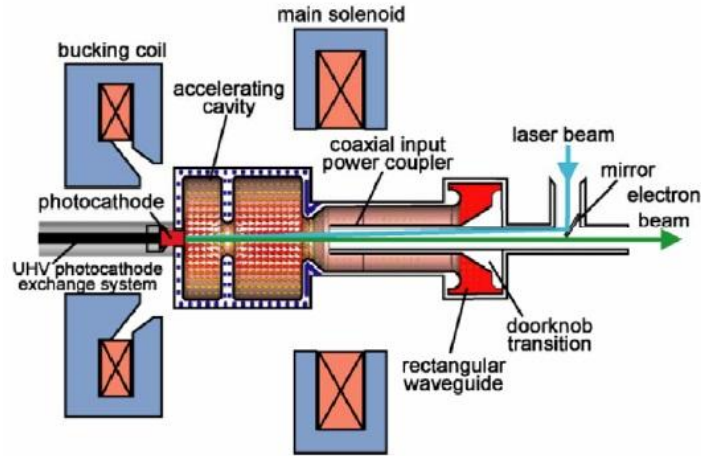
Şekil 2.4 Elektron demetinin doyumuna ulaşması (<http://hasylab.desy.de>)

Şekil 2.4’de salındırıcı boyunca elektron demetinin doyumuna ulaşması gösterilmektedir. Şekil 2.4 (a)’da salındırıcının ortalarında iken Şekil 2.4 (b)’de salındırıcının sonuna doğru elektron demetinin doyumuna yaklaşmış halini göstermektedir.

3.ELEKTRON TABANCASI VE BÖLÜMLERİ

3.1 Elektron Tabancası

Elektron tabancası katot, selenoid, kaviteler, demet bükücü (bunch coil) gibi kısımlardan oluşmaktadır. Ayrıca ek olarak, vakum, helyum ve su soğutma sistemleri, elektriksel bağlantılar, demet sıkıştırıcı, demet fokuslayıcı, demet yayıcı, demet bölücü, elektron ve foton diyagnostik kısımlarda vardır. Elektron tabancanın en önemli birimi katotlardır. Katot elektron kaynağı olarak kullanılır. Katot'dan Termiyonik yayılım ve foto yayılım olarak iki şekilde elektron elde edilebilir.



Şekil 3.1 1.5 hücrelik kaviteler içeren bir elektron tabancası

Yayılım çeşidine göre elektron tabancası fotokatot ve termiyonik elektron tabanca olmak üzere ikiye ayrılır. Elektrik alanının tipine göre DC ve RF olmak üzere yine iki çeşit elektron tabanca vardır.

3.1.1 Termiyonik elektron tabanca

Termiyonik yayımda katot'dan elektron koparmak için katot materyali ısıtılır. Elektronların materyalden ayrılabilmesi için hız bileşenlerinin yüzey ile uygun açılar yapması ve kinetik enerjileri yüzeyi boydan boya geçecek kadar büyük olması gerekmektedir. Elektronların sahip olması gereken en küçük enerjiye iş fonksiyonu denir. Materyalin iş fonksiyonunun düşük olması elektron koparılmasını kolaylaştırır. Herhangi bir T ($^{\circ}\text{K}$)

sıcaklığında materyalden koparılan elektronların yoğunluğu Richardson Dushman denklemi ile verilir.

$$J = B_0 T^2 e^{(-\Phi/kt)} \quad (3.1)$$

Denklem 3.1[(<http://hasylab.desy.de>)]’de B_0 (Richardson-Dushman sabiti) = $4\pi m_e k^2/h^3$
 = 120 Amper/cm K⁻² k (Boltzmann sabiti) = 1.371×10^{-23} Joule /Kelvin, Φ = iş fonksiyonu (eV)
 T = Sıcaklık (Kelvin)

Çizelge 3.1 Bazı termiyonik yayıcı materyallerin önemli özellikleri (Hill,1994)

Materyal	Akım (A)	İş Fonksiyonu Φ (eV)	Sıcaklık (⁰ K)	Akım Yoğunluğu J (A/cm ²)
Tungsten	60	4.54	2500	0.3
Toryum katkılı Tungsten	3	2.63	1900	1.16
Karışık Oksitler	0.01	1	1200	1
Sezyum	162	1.81	-	-
Tantal	60	3.38	2500	2.38
Sezyum/Oksijen/Tungten	0.003	0.72	1000	0.35

Termiyonik yayınım için en önemli parametrenin iş fonksiyonu olduğu tablodan da kolaylıkla görülebilir. Çizelge 3.1’de kullanılacak katodun oldukça düşük sıcaklıklarda olması gerektiği görülür.

Schottky Etkisi: Elektronların yayılmasında en önemli etkenlerden biride Schottky etkisidir. Schottky etkisi bir potansiyel ya da elektrik alan varlığında Akım yoğunluğunun (J) nasıl davrandığıyla ilgilidir. Anot katot arasına uygulanan potansiyel farkı sonucu oluşan elektrik alan arttığında vakuma doğru elektronun kaçması için gereken enerji azalır. Bu termiyonik işlem sürecini kolaylaştırır. Bu etkiye Schottky etkisi denir. Diğer bir deyişle bir iletkenin termiyonik yayınımadaki artış iletkenin yüzeyindeki elektrik alandan dolayı olur. İş fonksiyonundaki azalma ise 3.2 denklemi ile verilir.

$$\Delta\phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon_0}} \quad (3.2)$$

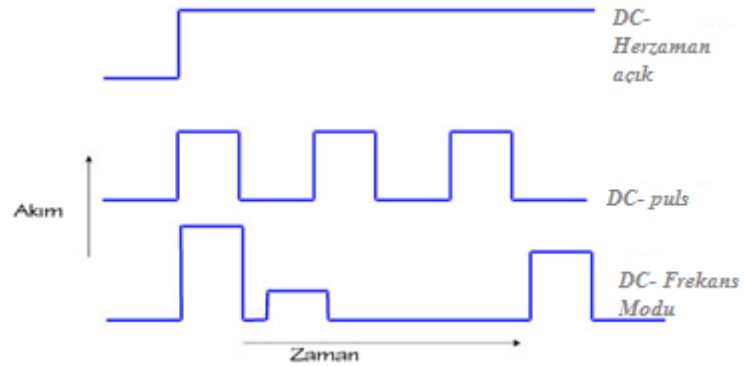
3.1.2 Fotokatot elektron tabanca

Foto yayını ışığa duyarlı bir yüzeye foton düşürülerek elektron elde etme olayına denir. Foto yayını yoluyla elektron elde edilen tabancalara fotokatot elektron tabanca denir. Foto yayınında katot'dan elektron koparabilmek için yüzeye gelen foton enerjisinin en az iş fonksiyonu kadar olması gerekmektedir.

$$E_{\text{foton}} \geq \phi \quad (3.3)$$

Foto yayını yapan elektron tabancalarının termiyonik yayını yapan elektron tabancasından daha iyi özelliklere sahip olması, bu elektron tabancasını ileri bir teknoloji olarak seçmemizi sağlar. Foto yayını yapan elektron tabancalarında yüksek elektrik alan gücü elde edilebilir. Böylece katot'dan daha fazla akım çeker. Ayrıca elektronlar çabukça hızlandırılabilir. Burada demetin kalitesinin düşürülmesi daha duyarlı bir şekilde olmaktadır. Bunun yanı sıra termiyonik yayını yapan elektron tabancasında demetin geçici profili hızlandırıcı alan tarafından belirlenir ve demetin uzaysal dağılımı katodun geometrisi tarafından kontrol edilir. Foto yayını yapan elektron tabancalarında ise akım dağılımı sürücü lazer tarafından belirlenir. Böylece elektron atması daha serbest bir şekilde ayarlanabilir (Virgo,2002).

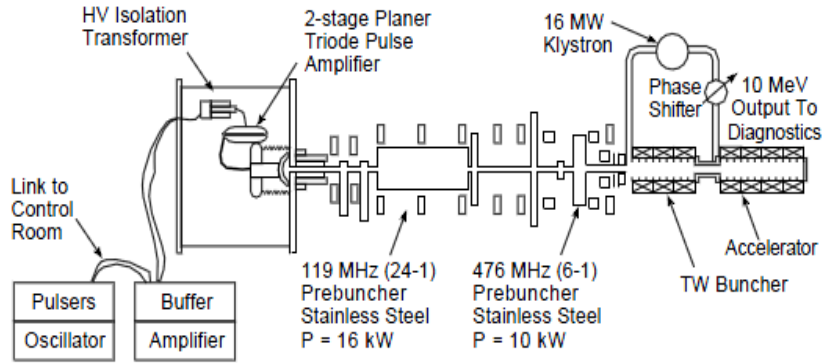
3.1.3 DC Elektron tabanca kaynağı



Şekil 3.2 Dc elektrik alan üretici (Palmer, 1988).

RF fotokatotlara kıyaslandığında DC tabancaların akım yayını genellikle küçük olur. (Yaklaşık birkaç amper değerinde) Bu sebeple RF fotokatotlar X-ışını serbest elektron lazeri üretmede daha başarılıdır.

3.1.3.1 Termiyonik DC elektron kaynağı



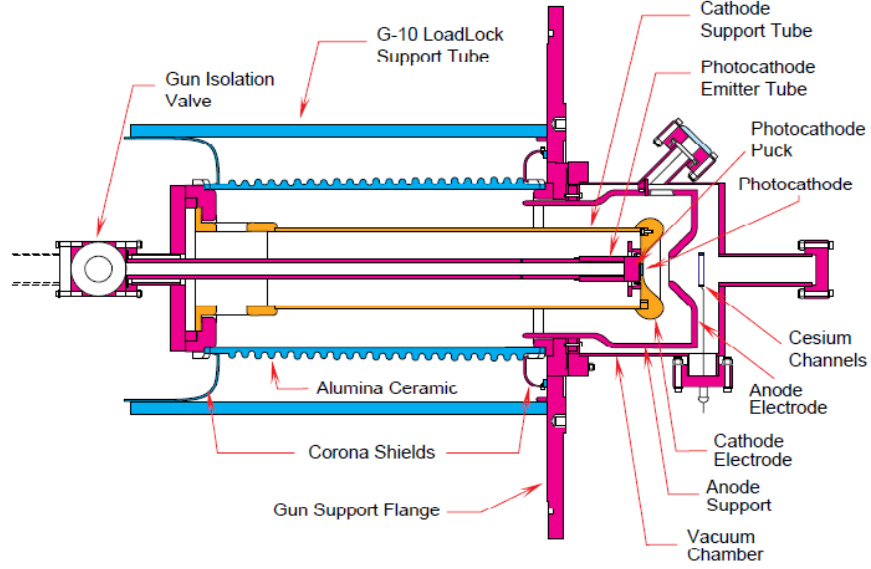
Şekil 3.3 Termiyonik DC elektron kaynağı (Palmer, 1988).

1980 Yıllarının başında serbest elektron lazer deneyleri için Boeing Şirketi bir yüksek akım injektörü geliştirdi. Yukarıdaki şekilde Boeing injectörünün grafiksel bir gösterimi verilmektedir. Bu enjektör DC elektron kaynağı ve uyumlu iki alt sistemin birleşiminden oluşmaktadır. Boening elektron kaynağı 1nC elektron yükünü sağlayabilmekte ancak boylamsal atma uzunluğunu sağlayamamaktaydı. Enine rms demet yayını 6.4 ğ mm mrad olarak ölçülmüştür (Palmer, 1988).

Çizelge 3.2 Boening injectorünün parametre değerleri (Palmer, 1988).

Q_t	1.2nC
$\hat{a}_{n,rms}$	6.44 ğ mm mrad
$\hat{o}_z$	5 psec
$\tilde{A}$	20

3.1.3.2 Fotokatot DC elektron kaynağı



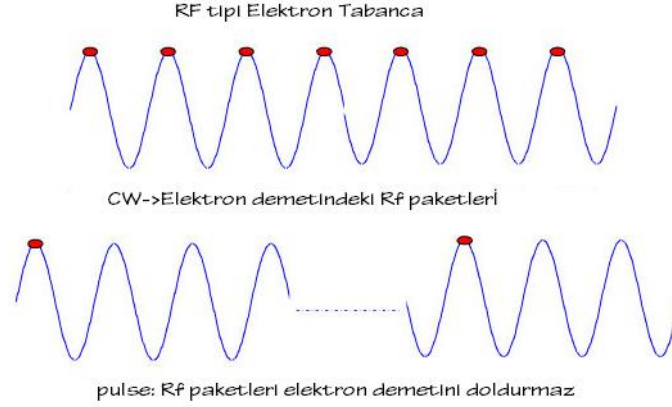
Şekil 3.4 Fotokatot DC elektron kaynağı (Palmer, 1988).

Fotokatot DC elektron kaynağında Elektron kaynağının hızlandırıcı alanı büyük DC potansiyeline sahiptir. Boening injektoründe olduğu gibi S_bana alt harmonim sistemine ve polarize olmuş DC elektron tabancaya sahiptir. Fotokatot DC elektron tabancanın sahip olduğu parametreler aşağıda Çizelge 3.3 'deki gibidir.

Çizelge 3.3 Fotokatot DC elektron tabanca parametreleri (Palmer, 1988).

Q_t	8 nC
$\tilde{a}_{n,rms}$	100 ğ mm mrad
$\acute{o}_z$	5 psec
$\tilde{A}$	80

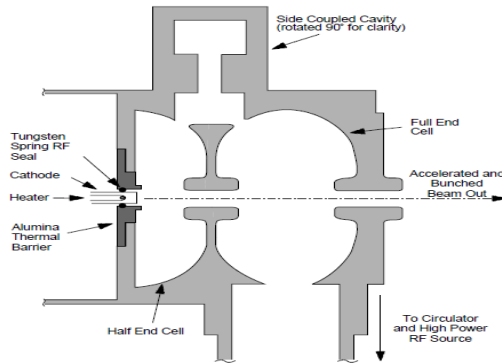
3.1.4 RF elektron kaynakları



Şekil 3.5 RF elektrik alan üretici (Palmer, 1988).

RF elektron kaynağı hem yüksek akım (KA mertebesinde) oluştururlar hem de koherentlik ve GW mertebesinde güçlü lazer ışını elde edilmesini sağlayacak şekilde elektron demetinin demet yolu boyunca ilerleyebilmesi için kaliteli üretimini sağlarlar.

3.1.4.1 Termiyonik RF elektron kaynağı



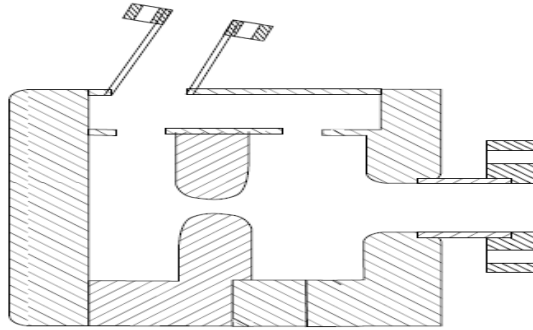
Şekil 3.6 Termiyonik RF elektron kaynağı (Palmer, 1988).

Şekil 3.6'daki elektron kaynağı SSRL (Stanford Synchrotron Radiation Laboratory)'nin termiyonik RF elektron tabancasıdır. Elektron injektörü, RF elektron tabancayı, alfa magneti ve chopper'ı içerir. Chopper, çok kısa, düşük akımda elektron demeti üretebilir. Fakat rms demet yayınımları fazladır. Aşağıdaki Çizelge 3.4'de termiyonik RF elektron tabanca için demet parametreleri verilmektedir.

Çizelge 3.4 Termiyonik RF elektron tabanca parametreleri (Palmer, 1988).

Q_t	0.3 nC
$\hat{a}_{n,rms}$	30 ğ mm mrad
$\acute{o}_z$	1 psec
$\tilde{A}$	4

3.1.4.2 Fotokatot RF elektron kaynağı



Şekil 3.7 Fotokatot RF elektron kaynağı (Palmer, 1988).

Günümüzde, bazı ileri teknolojide çalışan laboratuvarlarında , Fotokatot RF elektron tabancasında, 1nC’luk yük ve 1 ğ mm mrad’lık demet yayınımlı elektron demeti elde edilebilmektedir. BNL (Brookhaven National Laboratory) fotokatot RF elektron tabanca 1.hücreli ve yarım hücrelerinde yan çıkışı ile şekil 3.7’da görülmektedir. Fotokatotlardan elektron sökmek için genellikle görünür bölge veya ultraviyole lazer ışını kullanılır. Lazerlerde daha kısa dalga boyları elde etmek için frekans dönüştürücü kristaller kullanılır. Bu dönüşme sırasında çok fazla enerji kaybı olur. Fotokatot içeren RF elektron tabanca için olası demet parametreleri aşağıda tablo’da verilmiştir.

Çizelge 3.5 Fotokatot içeren RF elektron tabanca parametreleri (Palmer, 1988).

Q_t	1 nC
$\hat{a}_{n,rms}$	2.5 ğ mm mrad
$\acute{o}_z$	4.5 psec
$\tilde{A}$	80

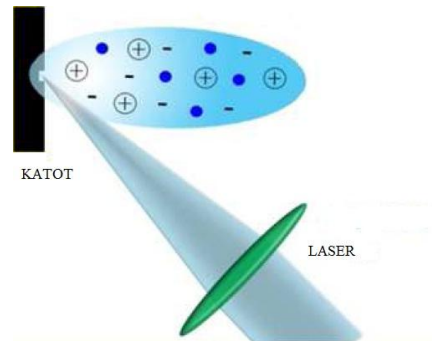
3.2 Fotokatotlar

3.2.1 Fotokatot Materyalin Özellikleri

Elektron tabancasında kullanılacak olan katot malzeme seçilmeden önce fotokatot malzemenin seçilmesi için avantaj oluşturacak önemli özelliklerin bilinmesi gerekir.

3.2.1.1. Kuantum verimliliği (QE)

Kuantum verimliliği, katoda gelen fotonlar tarafından söktürülen elektronların oranı ile ölçülüdür. Düşük kuantum verimliliği daha güçlü bir lazer gerektirir. Ayrıca düşük kuantum verimliliği olan katot malzeme üretilen elektronların dağılmasına sebep olur. Bu yüzden kullanılacak olan katot malzemenin yüksek kuantum verimliliği olmasına dikkat edilmesi gerekir. Çünkü yüksek kuantum verimliliği uzun dalga boyu sağlamaktadır [8].



Şekil 3.8 Katot'dan elektron sökülmesi

Denklem 3.4'de foton sayısının katot'dan ayrılan elektron sayısına oranı QE'yi ifade etmek için kullanılmıştır.

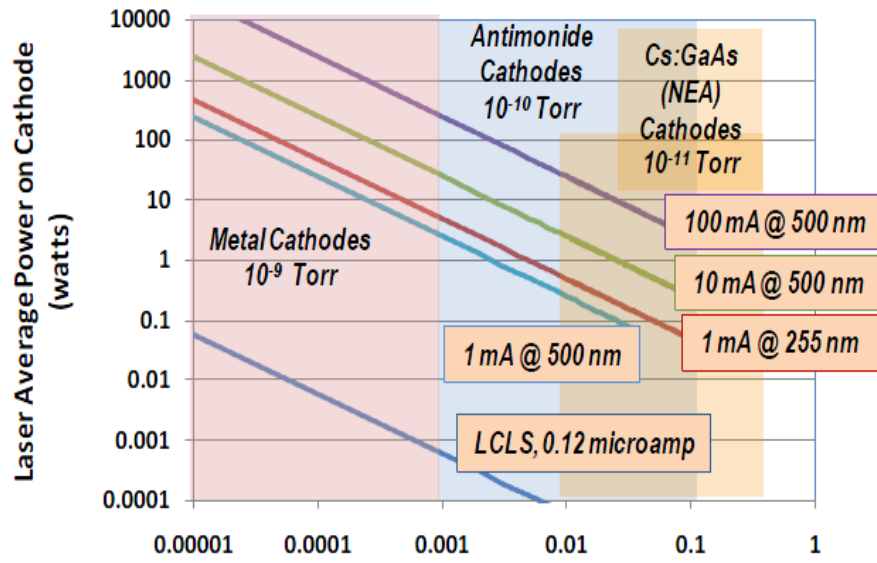
$$QE = \frac{N_{foton}}{N_{elektron}} \quad (3.4)$$

$$E_{Lazer} = h\nu_{eV} (1.6 \times 10^{-19}) N_{foton} \quad (3.5)$$

$$Q_{yük} = (1.6 \times 10^{-19}) N_{elektron} \quad (3.6)$$

$$OE = \frac{N_{foton}}{N_{elektron}} = \frac{E_{Lazer}}{h\nu_{eV}Q_{yük}} \quad (3.7)$$

Denklem 3.4 (Virgo, 2002)'de QE = kuantum verimliliği, N_{Foton} = Gelen fotonların sayısı, $N_{Elektron}$ = Üretilen elektronların sayısı, Denklem 3.5[8]'de E_{Lazer} = Lazerin atma başına enerjisi, Denklem 3.6[8]'da $Q_{yük}$ = Elektron demetindeki yük, Denklem 3.7'de $h\nu_{eV}$ = foton enerjisi (eV)



Şekil 3.9 Bazı fotokatot malzemelerin QE değerleri (Dowell, 2011).

3.2.1.2 Yayınım

Katot yapılar düşük yayınıma sahip olmadıkları durumda üretilen elektron demeti büyük olur ve geniş bir alanı kaplar. Demetin kaliteli olması için elektron demetinin küçük bir yapıya sahip olması gerekir.

3.2.1.3 Yaşam süresi

Katot üzerine ister lazer gönderilerek isterse ısıtılarak elektron elde edilsin katot bir süre sonra zarar görür. Katodun uzun ömürlü olması birçok çevresel etkene ve operasyonel değişkenlere bağlıdır. Katodun yaşam süresi hem maliyet açısından hem de deneyin sürekliliği açısından önemlidir. Bu nedenlerden dolayı kullanılan katot malzemenin ömrü önem taşımaktadır. Katodun ömrünü etkileyen en önemli etkenler: vakum basıncı, kirlenici gazların

kısmi basıncı (kısmi oksitlenme), iyonların varlığı, katodun ısınması, yüzeyin kaplama evoparasyonu, sürücü lazerin etkilediği materyal değişiklikleri şeklinde sıralanabilir.

3.2.1.4 Dayanıklılık ve optiksel zarar eşiği

Dayanıklılık katotlarda daha az zarar meydana gelmesi açısından tercih sebebidir. Şiddetli lazerler yüzeyde çabuk ısınmaya sebebiyet verdiği için ve özellikle ısıya duyarlı kaplanmış yüzeylerde veya düşük termal iletkenliğe sahip materyallerde zarar verme durumu olasıdır. Bölgesel aşırı ısınma veya şiddetli lazerlerde yüzeyde plazma formunun oluşması kaçınılmazdır. Tipiksel lazerler tehlikeli şiddete sahip değildirler.

3.2.1.5 İşletim kolaylığı

Elektron tabancası üzerinde deneye başlandığında katot üzerinde oluşan zarardan sonra katot kullanılamaz duruma geldiğinde değiştirilmesi gerekir. Bu değiştirilme ne kadar kısa sürede ve çevresindeki şartları değiştirmeden yapılabilirse o kadar iyi olur.

3.2.1.6 Karanlık akım

Ortamda elektron sökme işlemi yapılmazken cihazlarda ölçülen akım karanlık akımın göstergesidir. Katot malzeme üzerinde bir müddet sonra bir tahribat oluşur. Bu tahribatlı bölgeden oluşan elektronlarda elektron demeti için uygun değildir. Bu zarardan sonra ortamda oluşan elektronlar karanlık akıma sebebiyet verirler.

Bu nedenle katot malzemede ne kadar düşük karanlık akıma sahip olunursa o kadar uzun süre ve kararlı elektron demetleri üretilir. Katot üzerine 50MV/m üzerinde yüksek bir elektrik alan uygulandığında alan emisyonu önemli bir rol oynar. Akım emisyonu yüzünden oluşan akım yoğunluğu Fowler –Nordheim bağıntısı ile verilir.

$$J \propto (\beta \cdot E)^{5/2} \cdot \exp\left(-\frac{B}{\beta \cdot E}\right) \quad (3.8)$$

Denklem 3.8 (Sertore et al., 2000)'de E elektrik alanın genliği, β kaynağın geometrisi yüzünden oluşan artış faktörü, B materyale bağlı parametredir. Karanlık akımın kaynağı kullanılan katot yüzeyinin maruz kaldığı elektrik alandır. Malzemenin geometrisi β parametresinin artışına sebep olabilir. Bu kısımda elektron üretilmektedir daha sonra lineer hızlandırıcı boyunca hızlandırılınca karanlık akımın kaynağı olacaktır (Sertore et al., 2000).

3.2.1.7 Spektral tepki

Elektron tabancası içerisinde sürücü lazerin dalga boyu fotokatodun performansını etkiler. Metallerin ve kaplanmış metallerin kuantum verimliliği iş fonksiyonunun azlığına ve foton enerjisine bağlı olarak kuadratik şekilde değişir. Katot malzemenin iş fonksiyonu ne kadar düşükse elektroni katotdan ayırmakta o kadar çabuklaşır. Hızlı tepki zamanı katot seçiminde avantaj oluşturmaktadır. Aşağıdaki tabloda bazı materyaller için iş fonksiyonu verilmektedir.

Çizelge 3.6 Elektron tabancası içerisindeki başlıca elementlerin iş fonksiyonu

Element	ϕ (eV)
Cu	4.65
Mo	4.6
Te	4.95
Cs	2.14

3.2.1.8 Zamansal cevap

Hızlı tepki zamanı, katot malzeme lazer tarafından uyarıldığında elektronların hemen katotdan ayrılmaları ve hızlandırılmasıdır. Yeterli ve kısa lazer puls uygulandığında, materyalden elektronların sonlu yayınımlarından dolayı foto yayılım olmayacaktır. Sonlu elektron yayılım zamanı materyaldeki optiksel sızma derinliği ve elektronların kaçış derinliği tarafından bastırılmaktadır. Katotlardaki uzun optiksel sızma derinliği ve uzun elektron kaçış derinliği yüzeyden yayılan elektronların transferi için sonlu zaman gerektiğinden uzun cevaplama süresi sergiler. Çizelge 3.7’de bazı katot materyallerinin cevaplama süreleri verilmektedir.

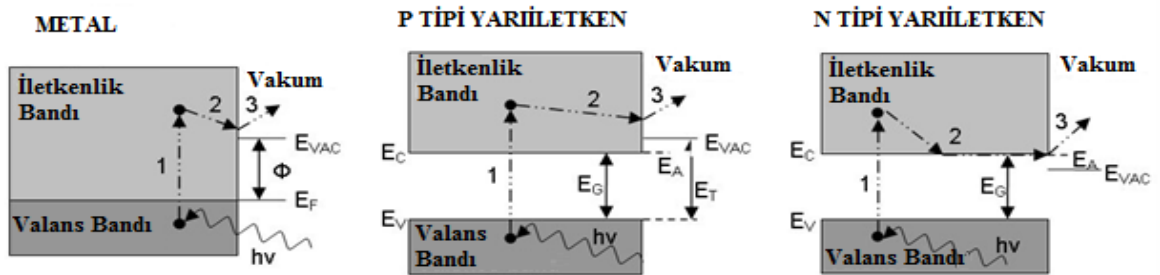
Çizelge 3.7 Katot malzemelerin cevaplama süresi

<i>Katot</i>	Optical Penetration Depth @ λ (nm)	Escape Depth / Mean Free Path (nm)	Dominant Scattering Process	<i>Yanıt zamanı</i>
Cu	~13 @ 263	~1	electron-electron	<<ps
K2CsSb	~60 @ 532	~30	<i>elektron -foton</i>	~1ps
Cs3Sb	~100 @ 532 ~20 @ 375	~30	<i>elektron -foton</i>	~1ps
Cs2Te	~12 @ 254	-	<i>elektron -foton</i>	~3ps
(Cs)GaAs	~1000 @ 532	~1000	<i>elektron -foton</i>	~40 ps ~10ps with 150nm epilayer

3.2.1.9 Transvers enerji dağılımı

Yayınlanan elektron demetinin transvers enerji dağılımı hızlandırıcıya gönderilen demetin kalitesini etkiler. Bu dağılım fotokatodun yüzey enerji bariyerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Bir elektron yayınlanabilmesi için yüzey bariyerini geçen kinetik enerjiye eşdeğer yüzeye dik momentum bileşeninin olması gerekir.

3.2.2 Fotokatot çeşitleri



Şekil 3.10 Fotokatot çeşitleri (Loch, 2005).

Fotokatotlar metal fotokatot ve yarı iletken fotokatot olmak üzere 2 farklı tipte kullanılır. Yarı iletkenler PEA (Positive Elektron Affinity) ve NEA (Negative Elektron Affinity) olmak üzere iki kısma ayrılır. Elektronların katot'dan yayılımı bu malzemelerin Elektron affinity (EA) özellikleriyle doğrudan ilgilidir. Elektronların fotokatotdan yayılımı 3

adım modeli (Three-Step model (Sertore, 2011)) ile açıklanabilir. Bu model ayrıca metal ve yarı iletken arasındaki performans farkını da açıklayabilir. Şekil 3.10'da metal ve yarı iletkenlerin tipik bant yapısını göstermektedir. Foto emisyonun ilk adımı valans bandındaki elektronların uyarılarak boş olan iletkenlik bandına geçişleri sağlanır. İkinci adım, katı yüzeylere göç eden bu elektronların bir kısmı, ya direk olarak ya da diğer elektronlar veya örgüyle saçılırlar. Son adım ise, vakum içindeki yüzey potansiyel engelinden kaçan bu elektronlar enerjilerinin önemli bir kısmını burada bırakırlar (Loch, 2005).

3.2.2.1 Metal fotokatotlar

Metal fotokatotlar yarı iletken fotokatotlara göre daha fazla avantajlara sahiptir. Bunlardan birincisi, yüzey kirlenmesinden dolayı oluşan bozunmalara karşı en dayanıklı fotokatotlardır. Bu yüzden ultra yüksek vakum (UHV) gerekmemektedir. İkinci olarak havalandırma ve ısıtmadan kaynaklı meydana gelen zararlara karşıda dayanıklıdır. Ayrıca yüksek elektrik yüzey alanlarına karşı dirençlidirler. Metal fotokatotların diğer avantajları da çok kısa yanıt zamanlarının ve çok uzun ömürlerinin olmasıdır. Fakat metal fotokatotlardaki ana problem, düşük QE ve UV lazerle uyarılmalarıdır. Ayrıca metal fotokatotlarda iş fonksiyonu valans bandı ve vakum seviyesi arasındaki fark ile ölçülendirilir. Fotonların enerjisi iş fonksiyonundan büyük olduğunda uyarılma gerçekleşir (Loch, 2005).

Hızlandırıcı için bakır en yaygın olarak kullanılan foto katottur. Çünkü kolay hazırlanır ve belirsiz ömürleri vardır. Bakır katotları çalıştırmadan önce sadece işlemek, parlatmak ve temizlemek gereklidir. Ayrıca bakır fotokatotlar femtosaniyelerde yanıt zamanına sahiptirler, bu sebeple çabuk yayılırlar. Bakır katodun kuantum etkililiği 10^{-5} ile 10^{-4} arasındadır. Bu yüzden önemli ölçüde yük üretir. Ayrıca iş fonksiyonu 4 eV'un üzerinde olduğundan UV lazerlere ihtiyaç duyarlar. Bakıra alternatif olarak Mg kullanılabilir. Yaklaşık olarak aynı özelliklere sahiptirler fakat Mg'un kuantum verimliliği 10 kat daha büyüktür. Aşağıdaki tabloda metal katotların özellikleri görülmektedir (Loch, 2005; Cultrera, 2011).

Çizelge 3.8 Metal fotokatotların bazı özellikleri (<http://photocathodes.chess.cornell.edu>)

Metal katot	Dalga Boyu(nm)	QE	İş Fonksiyonu	Vakum (Toor)
Cu	250	1.4×10^{-4}	4.6	10^{-9}
Mg	266	6.4×10^{-4}	3.6	10^{-10}
Pb	250	6.9×10^{-4}	4.0	10^{-9}
Nb	250	$\sim 2 \times 10^{-5}$	4.38	10^{-10}
CsBr:Cu	250	7×10^{-3}	~ 2.5	10^{-9}
CsBr:Nb	250	7×10^{-3}	~ 2.5	10^{-9}

3.3.2.2 Yarı iletken fotokatotlar

Yarı iletken fotokatotlar yüksek kuantum verimliliğine ve düşük karanlık akıma sahip olmalarına rağmen vakum kirliliğine karşı oldukça hassastırlar, ayrıca ısı yayılımları yüksektir.

Yarı iletken fotokatotlar metallere göre daha yüksek bir kuantum verimliliğine sahiptir. Fakat ömürleri daha kısadır. Diğer bir dezavantaj ise ultra yüksek vakum şartlarında çalışan fotokatotlarda ortaya çıkan oksijen, CO₂ ve su kirliliğine karşı duyarlıdır. Buna ek olarak yanıt zamanları uzundur. Yarı iletken fotokatotlar, PEA ve NEA şeklinde yarı iletkenlerdir.

İlk kullanılan yarı iletken fotokatot CsK₂Sb (Cesium Potassium Antimonide)' dir. Bu katot RF tabancada en yüksek kuantum verimliliğine sahiptir. Yeşil ışık ile %5'in üzerinde ve UV ışık ile %10'nun üzerinde kuantum verimliliği elde edilebilir. Ayrıca piko saniyeler mertebesinde yanıt zamanına sahiptirler. En yaygın kullanılan yarı iletken fotokatot Cs₂Te'dir. UV lazer ile uyarılması gerekmektedir (Loch,2005).

- **PEA tipi yarı iletken**

PEA tipi yarı iletkenlerde, elektronların enerjileri, bant aralığı elektron affinitesinden (E_a) daha yüksek olursa elektron kaçabilir. Vakum seviyesi iletim bandı üzerinde uzanır. Böylece termal elektronlar vakum içinde yayılamaz fakat tipik olarak birkaç ns içerisinde iletim bandına geri dönerek yeniden birleşebilirler (Loch,2005).

PEA tipi yarı iletkenler arasında alkali-telluride, alkali antimonide ve alkali-halide vardır. Alkali-telluride fotokatotlar, alkali-antimonid fotokatotlara göre daha büyük QE ve daha uzun ömre sahiptirler. Dezavantaj olarak UV lazer kullanılması gerekmektedir. Alkali-telluride fotokatotlardan Cs₂Te en yaygın olarak kullanılan fotokatotdur. Cs₂Te diğer fotokatotlara göre uzun yaşama potansiyeli ve yüksek QE'liğine sahiptir. Ayrıca lazer zararlarına karşı dayanıklıdır. Ek olarak Alkali-antimonide katotları, Katotda meydana gelen kirliliğe karşı daha hassastırlar. Diğer katotlarla karşılaştırıldığında kısa yanıt zamanına, yüksek akım yoğunluğuna

ve düşük karanlık akıma sahiptirler. Fakat, özellikle Katotda akım yüksek oldukça işletim ömrü çabucak azalır (Loch,2005).

K-Te fotokatotlar, alkali yarı iletken fotokatotlar arasında en dayanıklı olanlardır ve uzun işletim ömrüne sahiptirler. Fakat düşük QE'ye sahiptirler ve yüksek iş fonksiyonları yüzünden 5. Harmonik ND lazerlerle üretilmesi gerekmektedir. CsKTe fotokatotlar yüksek QE'ye sahiptir. Fakat işletim süresi Cs₂Te kadar iyi değildir. Bu yüzden kullanılmaya başladıktan 20 saat sonra QE verimliliği Cs₂Te'nin sahip olduğundan daha aşağılara düşer[12].

Alkali –antimode fotokatotlar, onların küçük band aralıkları sayesinde yeşil lazer ışığına kadar iyi cevaplama avantajına sahiptirler. Dezavantajları ise yüksek kirlilik yüzünden sadece birkaç saat işletim ömürleri vardır. En iyi alkali-antimode fotokatotlar arasında K₂CsSb ve Cs₃Sb vardır (Loch,2005).

Çizelge 3.9 PEA tipi yarı iletken fotokatotların bazı özellikleri (<http://photocathodes.chess.cornell.edu>)

Katot Tipi	Katot	Dalga Boyu(nm)	QE	Vakum (Torr)	EA+EG(eV)
PEA : mono-alkali	Cs ₂ Te	211,264,262	~0.1	10 ⁻⁹	3.5
	Cs ₂ Sb	432	0.15	-	1.6+0.45
	K ₃ Sb	400	0.07	-	1.1+1.6
	Na ₃ Sb	330	0.02	-	1.1+2.44
	Li ₃ Sb	295	0.0001	-	-
PEA: Multi alkali	Na ₂ KSb	330	0.1	10 ⁻¹⁰	1+1
	Na ₃ KSb(Cs)	390	0.2	10 ⁻¹⁰	1+0.55
	K ₂ CsSb	543	~0.1	10 ⁻¹⁰	1+1.1
	K ₂ CsSb(O)	543	0.1	10 ⁻¹⁰	1+<1.1

Çizelge 3.10 Farklı dalga boyu ve enerjilerde bazı alkali-halide, alkali-antimonide ve alkali-telluride fotokatotların QE verimlilik değerleri (<http://photoinjector.web.cern.ch>)

Alkali-halide					
Dalga Boyları(nm)	193	213	266	355	Ea+Eg
Enerji(eV)	6.42	5.82	4.66	3.49	(eV)
CsI	9.6×10^{-2}	6.8×10^{-2}	7.1×10^{-5}	1.9×10^{-6}	6.4
CsI-Ge	-	7.3×10^{-3}	1.3×10^{-3}	2.0×10^{-6}	5.0
Alkali-antimonide					
Dalga boyları(nm)	213	266	355	532	Ea+Eg
Enerji(eV)	5.82	4.66	3.49	2.33	(eV)
Cs₃Sb	3.5×10^{-2}	2.0×10^{-2}	1.8×10^{-2}	3.8×10^{-3}	2.0
K₃Sb	1.4×10^{-4}	1.6×10^{-2}	7.6×10^{-3}	2.3×10^{-4}	2.3
Na₂KSb	7.7×10^{-2}	6.1×10^{-2}	3.5×10^{-2}	2.0×10^{-4}	2.0
Alkali telluride					
Dalga boyları (nm)	213	266	355	532	Ea+Eg
Enerji(eV)	5.82	4.66	3.49	2.33	(eV)
Cs₂Te	2.1×10^{-1}	1.3×10^{-1}	1.8×10^{-3}	9×10^{-5}	3.5
Rb₂Te	1.3×10^{-1}	4.5×10^{-2}	4.8×10^{-4}	5.7×10^{-5}	4.1
K₂Te	-	1.6×10^{-2}	-	-	-
RbCsTe	-	7.7×10^{-2}	-	-	-

- **NEA tipi yarı iletken**

NEA tipi yarı iletkenlerde ise vakum enerji seviyesi iletkenlik bandının aşağısında yer alır. NEA tipi foto katotlarında vakum enerji düzeyi iletken bandının altında kalır. Termal elektronlar elektron fonon çarpışmalarıyla iletim bandının altındaki vakuma doğru yayılırlar. Buradaki elektronlar yarı durgun durumdadır. Valans bandına dönmek için birleşmeden önceki zaman uzundur, (ns). Böylece kaçış uzunluğu NEA foto katotlar için oldukça uzundur ki bu durum uzun cevaplama süresi ve yüksek QE'nin birlikteliğine yol açar(Loch,2005).

NEA fotokatotlar, Cs veya onun birleşimi gibi elektropozitif elementler tarafından yüzeye tutunmak için hazırlanılır. Tipik olarak NEA tip yarı iletkenlere örnek: Si, GaAs, GaN ve GaP vardır. Kuantum verimliliği genelde diğer yarı iletkenlerden yüksektir. Fakat yanıt zamanı uzundur. Ayrıca yüzeye zarar vermeden katotdan elektronları koparmak için yüksek akıma sahip değildirler(Loch,2005).

Çizelge 3.11 NEA tipi yarı iletken fotokatotların bazı özellikleri (<http://photoinjector.web.cern.ch>)

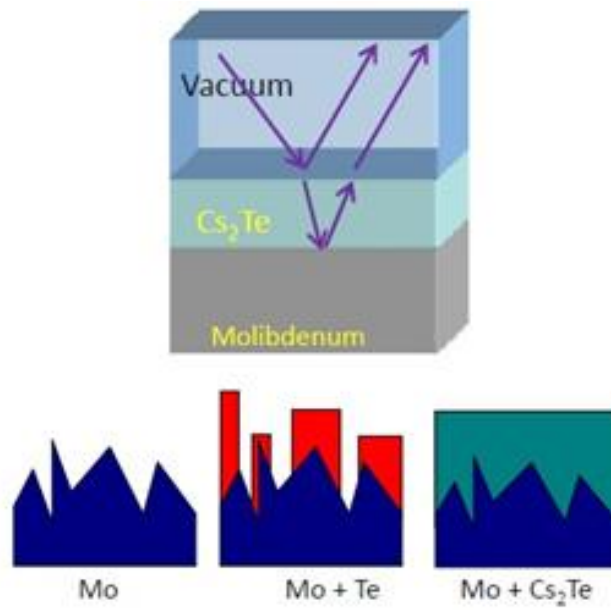
Katot Tipi	Katot	Dalga Boyu(nm)	QE	Vakum	EA+EG(eV)
NEA tipi yarı iletken	GaAs(CSI)	260	-	?	1.96
	GaN(Cs)	532	-	?	1.96
	Ag-O-Cs	900	0.01	?	0.7

Çizelge 3.12 Metal ve yarı iletken fotokatotlar arasındaki farklar (Cultrera 2011; Schubert, 2011).

METAL	YARI İLETKENLER	
- Düşük ısı yayınımlı - Hızlı yanıt zamanı - Vakum kirliliğine iyi tolere edilmiş	- Yüksek kuantum verimli(QE) - Düşük karanlık akım	
Düşük kuantum verimli (QE)	- Uzun yanıt zamanı - Yüksek ısı yayınımlı - Vakum kirliliğine çok duyarlı	
SAF METAL	PEA	NEA
Pb	CsK ₂ Sb	GaAs
*Cryogenic sıcaklıklar da süper iletken yapılarda kullanılabilir. *Hızlı yanıt zamanı *Uzun çalışma-yaşam ömrü *Az bir karanlık akım ve yüksek hızlandırma eğilimi	*Yüksek kuantum verimli (~400 nm’de %45) *532 nm’de çalıştırmak mümkün (%15 QE) *Hızlı tepki zamanı *Kısa atmalar üretmek mümkün	*532 nm’de %10, 800 nm’de %5 kuantum verimli (QE) *800nm’de transverse momentum yayınımlı daha düşük. *Düşük ısı yayınımlı
*Yüksek iş fonksiyonu(3.95 eV) *Yüksek yansıtıcı -> Düşük kuantum verimliliği	*UHV şartları gerekli (10⁻¹⁰-10⁻¹¹ mbar) *Kirliliğe karşı duyarlı *Yaşam zamanı	*Kirliliğe karşı çok duyarlı (10⁻¹² mbar için UHV gerekli) *Temizlenemez fakat katot SRF elektron tabanca içerisinde çalıştırılabilir (HZDR/ELBE deneyleri)

- **Cs₂Te fotokatot**

Cs₂Te PEA tipi yarı iletken malzemelerin alkali telluride sınıfında yer almaktadır. Genellikle telleryum film ile sezyum buharı platinyum ya da molibdenyum üzerinde ısıtılarak hazırlanır. 262 nm’de QE > %2’dir. CERN, Genevre’de CLIC, DESY-Zeuthen’da PITZ, Berlin ve FZ Rossendorf, Dresden gibi tesislerin RF elektron tabancaları için Cs₂Te kullanmaktadırlar.



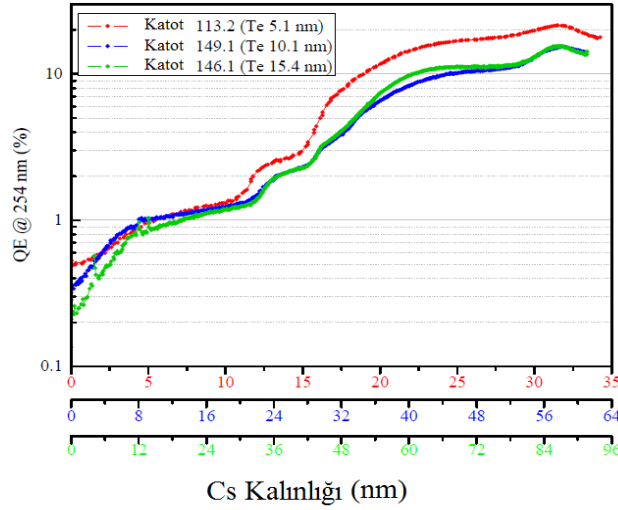
Şekil 3.11 Cs₂Te fotokatodun Mo ile katkılanması (Sertore, 2011).

Çizelge 3.13 Cs₂Te fotokatodun avantaj ve dezavantajları (Dowell, 2011; Barbiero, et al., 2007).

AVANTAJLARI	DEZAVANTAJLARI
• Yüksek kuantum verimliliği • Uzun çalışma, yaşam ömrüYüksek elektrik alana, gradyente dayanıklı (100 MV/m’e kadar) • Yüksek akım yoğunluğu üretebilir. • Kısa cevaplama zamanı (ps)	• UV lazer gerekli • Çok yüksek vakuma(UHV) ihtiyaç duyar • Kirliliğe karşı duyarlı • Düşük sıcaklıklarda (2-4 K) fizik performansının bilinmemesi

Cs₂Te katot, lazer ışını zararlarını azaltmak için katman katman hazırlanır. 99.9999 saf Te elementi ve Cs elementi kullanılır. UHV sistemlerinde (10⁻¹⁰ mbar başına) bir katman Cs,

bir katman Te ve son olarak Cs_2Te kullanılır. Kullanılan Te/Cs oranına göre katodun kuantum verimliliği (QE) değişir. Cs kalınlığının artması kuantum verimliliğini de artırır.



Şekil 3.12 Cs kalınlığına göre QE'nin değişimi (Sertore, 2011).

3.3 Kendiliğinden genlik artırımlı serbest elektron lazeri için elektron tabanca önerisi

Çizelge 3.14 FZD , HZB ve BNL'nin elektron tabancalarının karşılaştırılması (Lewellen, et al., 2009).

Laboratuvarların Elektron Tabanca Resimleri						
Laboratuvar	FZD(Forschung Dresden-Rossendorf)		HZB(Helmholtz Zentrur Berlin)		BNL(Brookhaven National l Lab.)	
Modu	ELBE	Yüksek yük	HoBiCa T Etap 1	BerLinPro Etap 2	Yüksek Akım	Yüksek Yük
Hücre Sayısı	3+1/2		1+1/2		1/2	
Katot	Cs_2Te		Pb	$\text{Cs}_2\text{K}_2\text{Sb}$	$\text{Cs}_2\text{K}_2\text{Sb}$	
İletkenlik Özelliği	Süper iletken		Süper iletken		Süper iletken	

Elektron Enerjisi	9.5 MeV		1.5			
RF frekansı	1300 MHz		1300MHz		703MHz	
Dizayn Tepe Akımı	50 MV/m		40MV/m		30 MV/m	35MV/m
Demet Yüğü	77pC	1000pC	77-1000pC	77pC	1400pC	5000pC
Lazer Dalga Boyu	262nm		258nm	355-532nm	355 nm	
Ortalama Akım	1µm	2,5µm	30.10 ⁻³ µm	100 µm	500 µm	50 µm
Tepe akımı	20 A	67 A	6 A	5 A	70 A	166 A

Elektron tabanca da üretilen elektronlar için demet parametreleri ve elektron tabancada kullanılan malzemeler için dünya laboratuvarları Çizelge 3.14’de verilmiştir. Elektron sökücü lazer olarak Nd:YLF (Neodymium doped Yttrium Lithium Fluoride) lazer kullanımı yaygındır. Nd:YLF lazerleri 1053 nm ye kadar lazer ışını üretebilmektedir. Fakat bu dalga boyları genellikle sanayi uygulamalarında kullanılır. Elektron tabancasında 263 nm civarında bir kullanımı mevcuttur. ND:YLF lazerleri düşük atma oranlarında yüksek atma enerjisi ile kullanılır. Nd:YLF lazerleri genellikle laboratuvarlarda kullanılır; sanayide kullanımı sorunlara yol açabilir.

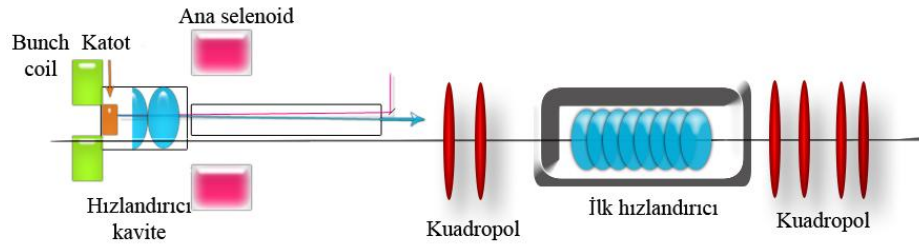
Çizelge 3.15 Bazı laboratuvarların elektron tabancası için parametreleri (Mete, 2011).

Laboratuvar	SLAC (LCLS)	FNAL	DESY (TESLA 500)	DESY (PITZ)	DESY (FLAS H)	INFN (SPARC)	PSI (SRF Gun)	ELBE (SRF Gun)	CERN (PHIN)
Tasarımı	FEL	Linear Collider	Linear Collider	X-FEL	X_FEL	X-FEL	X-FEL	FEL	DB
Frekans(M Hz)	2856	1300	1300	1300	1300	2856	2997.8	1300	2997.8
Katot tipi	Cu/Mg	CS ₂ Te	CS ₂ Te	CS ₂ Te	CS ₂ Te	CU/Mg	Cu	CS ₂ Te	CS ₂ Te
Lazer	Nd:YLF	Nd:YLF	Nd:YLF	CE:YAG	Nd:YLF	Ti:Sa	Ti:Sa	Nd:YLF	Nd:YLF
Dalga boyu(nm)	255	263	262	257	262	266	250-300	262	266
Işın enerjisi(MeV)	5	3.8	3.8	6.6	5	5.6	6.6	9.5	5.5
Yük/ Bunch(nC)	1	8	8	1	1	1.1	0.2	1	2.33

Elektron tabancası için optimize parametreler belirlenirken yayılım, parlaklık, uzay yükü, demet boyutu gibi parametrelere dikkat edilmelidir. Bu nedenle de öncelikle katot seçimi yapılırken yüksek kuantum verimliliği, uzun ömürlü, yüksek elektrik alan gradyentine olanak veren, kısa cevaplama zamanına sahip Cs₂Te (Bkz. 5.2.2.3) fotokatot seçilmesi düşünülmüştür.

Cs_2Te fotokatotdan daha kolay elektron koparmak için ve termal denge olarak daha iyi olan fotokatot elektron tabanca tercih edilmelidir. Cs_2Te fotokatotlarda 266 nm’de en iyi kuantum verimliliği değerine sahip ND:YLF lazerler elektron söktürmek için kullanılmalıdır.

Elektron tabancası için süper iletken, normal iletken seçimi yapılmalıdır. Normal iletken RF kaviteler yüksek RF güç kayıpları yüzünden kabul görmemektedir. Ayrıca tabancada kullanılacak olan kavite sayısı ve tipide belirlenmelidir. Bunun için dünya’ki elektron tabancalar incelenerek 1.5 kaviteli süper iletken elektron tabanca için simülasyon çalışmaları yapılmıştır.



Şekil 3.13 Fotokatot RF elektron tabanca

4. MANYETİK, ELEKTRİK ALANLAR VE MODELLEME ÇALIŞMALARI

Dalga kılavuzları mükemmel bir iletkenidir. Materyalin içinde iken, $E=0$ ve $B=0$ verirler. Elektromanyetik Teori'deki Maxwell Denklemlerini sağlarlar ve tek renkli dalgalarla işlem yaparlar. Dalga kılavuzları içerisinde elektrik ve manyetik özelliklerle bu alanların maddeyle etkileşimlerini açıklayan Maxwell Denklemlerini boş uzayda inceleyeceğiz.

$$\nabla \cdot E = 0 \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (4.3)$$

$$\nabla \times B = \frac{1}{c^2} \frac{\partial E}{\partial t} \quad (4.4)$$

Gauss yasası olarak bilinen Denklem 4.1 (Griffiths, 1999)'da Elektrik alanın elektrik yükler tarafından oluşturduğu alanın boş uzayda (yük yok iken) gösterilmiş halidir. Denklem 4.2'de ise manyetik alanın skaler kaynağı yoktur veya manyetik alanın hep kendi üzerine sonlandığı durumudur. Herhangi bir kapalı yüzeydeki manyetik akı sıfırdır. Denklem 4. 3 Faraday Yasası'dır. Faraday Yasası, değişken manyetik alanın elektrik alan ürettiğini gösterir. Son olarak denklem 4.4[22]'de Ampere Yasası'nda ise manyetik alanın kaynağının manyetik yük olmadığını, yüklerin ve zamanla değişen elektrik alanın manyetik alan ürettiğini gösterir.

$$E_0 = E_x \hat{i} + E_y \hat{j} + E_z \hat{k} \quad (4.5)$$

$$B_0 = B_x \hat{i} + B_y \hat{j} + B_z \hat{k} \quad (4.6)$$

Denklem 4.5 (Griffiths, 1999) ve denklem 4.6 (Griffiths, 1999)'da de Elektrik alan ve Manyetik Alan Bileşenlerini Faraday Yasası'nda (4.3) yerine konulacak olursa,

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} - \frac{\partial E_x}{\partial y} = i\omega B_z \quad (4.7)$$

$$\frac{\partial E_z}{\partial y} - \frac{\partial E_y}{\partial z} = iwB_x \quad (4.8)$$

$$ikE_x - \frac{\partial E_z}{\partial x} = iwB_y \quad (4.9)$$

Elektrik alan bileşenleri için denklem 4.7 (Griffiths, 1999), denklem 4.8 (Griffiths, 1999) ve denklem 4.9 (Griffiths, 1999) elde edilir. Daha sonra Ampere Yasasında (4.4) (Griffiths, 1999) yerine yazılacak olursa manyetik alan için aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

$$\frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} = -\frac{iw}{c^2} E_z \quad (4.10)$$

$$\frac{\partial B_z}{\partial y} - ikB_y = -\frac{iw}{c^2} E_x \quad (4.11)$$

$$ikB_x - \frac{\partial B_z}{\partial x} = -\frac{iw}{c^2} E_y \quad (4.12)$$

Denklemler (4.7), (4.8), (4.9) (Griffiths, 1999) ile denklemler (4.10), (4.11), (4.12) (Griffiths, 1999)'da değerler yerine yazıldığında Denklem (4.13), (4.14), (4.15) ve (4.16) (Griffiths, 1999) elde edilir.

$$B_x = \frac{\hat{i}}{(w/c)^2 - k^2} \left(k \frac{\partial B_z}{\partial x} + \frac{w}{c^2} \frac{\partial E_z}{\partial y} \right) \quad (4.13)$$

$$B_y = \frac{\hat{i}}{(w/c)^2 - k^2} \left(k \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{w}{c^2} \frac{\partial E_z}{\partial x} \right) \quad (4.14)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(\frac{w}{c} \right)^2 - k^2 \right] B_z = 0 \quad (4.15)$$

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \left(\frac{w}{c} \right)^2 - k^2 \right] E_z = 0 \quad (4.16)$$

Elektrik alanın sıfır olması duruma göre TE (Transvers Elektrik) modu (4.17) (Griffiths, 1999), Manyetik alanın sıfır olması durumuna göre TM (Transvers Manyetik) modu (4.18) (Griffiths, 1999) olarak isimlendirilir.

$$E_z = 0 \Rightarrow TE \quad (4.17)$$

$$B_z = 0 \Rightarrow TM \quad (4.18)$$

$$E_z = 0, B_z = 0 \Rightarrow TEM \quad (4.19)$$

TEM, dalgaları boş bir dalga kılavuzunda bulunmaz. TE dalgaları için TEM modları vardır. Bu modlarda $E_z = 0$ ve $B_z = 0$ durumlarında farklılık göstermektedir. TEM iki boyutlu elektromanyetik problemin bir çözümüdür. Bunun 3 tane sonucu vardır.

1-Eksensel (axial) dalga sayısı sonsuz olması.

$$k = k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (4.20)$$

Verilen bir frekans (ω) için yalnızca dalga sayısının belli değerleri vardır. Bu tipiksel dalga kılavuzu durumu olarak adlandırılır. Verilen bir k değeri için yalnızca ω 'nin belli değerleri izinlidir. Bu da tipiksel rezonant kavite durumu olarak adlandırılır.

$$2- \left[\nabla_t^2 + \left(\frac{\omega}{c} - k^2 \right) \right] \{E\} = 0 \quad (4.21)$$

$$\left[\nabla_t^2 + \left(\frac{\omega}{c} - k^2 \right) \right] \{B\} = 0 \quad (4.22)$$

Denklem 4.21 (Griffiths, 1999) ve denklem 4.22 (Griffiths, 1999)'ye göre;
 $\vec{B}_{TEM} = \pm \hat{k} \times \vec{E}_{TEM} e^{ikz}$ yönünde ilerleyen bir dalgadır.

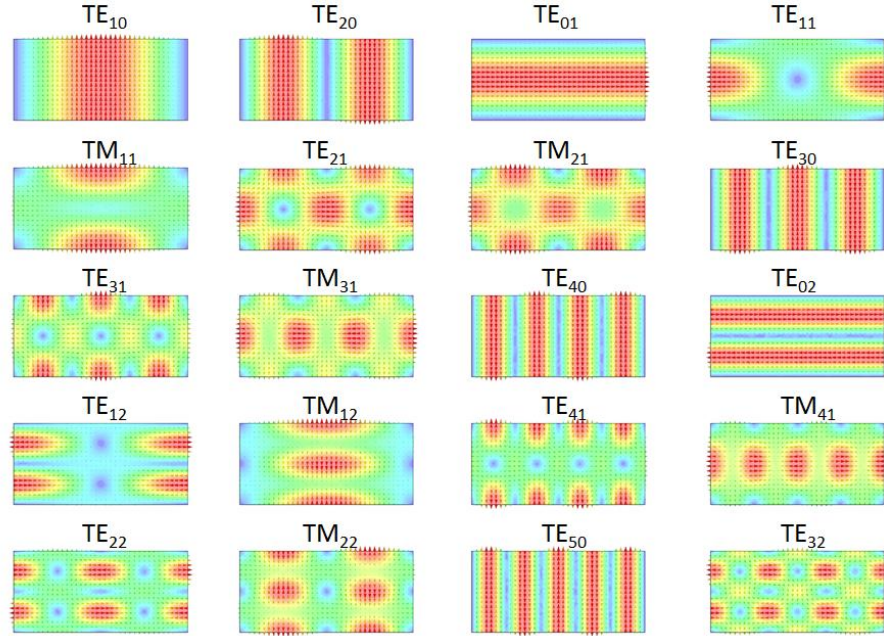
3-TEM modu, sonsuz iletkenliğe sahip tek, boş, iletken bir silindirin içinde olamaz. Yüzey bir eş potansiyeldir böylece içerde elektrik alan kaybolur. TEM modunu destekleyebilmek için 2 veya daha fazla silindiriksel yüzey alınmalıdır.

Uniform tesir kesitinin olduğu boş bir dalga kılavuzun içindeki dalgalar denklem 4.23 (Griffiths, 1999) ile ilerler.

$$\vec{H}_t = \pm \frac{w}{ck} \hat{k} \times \vec{E}_t \quad (4.23)$$

Denklem 4.23'de w/ck TM ve TE modlarının dalga empedansıdır. $\pm$ dalgaların e^{ikz} , e^{-ikz} durumlarından kaynaklanmaktadır.

Buradaki TEM, TM ve TE Modları elektron demetinin kaviteler içerisinde nasıl davranacağını ve kavitelerin sahip olduğu elektrik alanın demet üzerinde etkilerini direkt belirleyen faktörlerdir. Örneğin kavite içerisinde TM modu kullanılıyorsa, $B_z=0$ olacağından elektrik alanın sadece E_z bileşeninden söz edebiliriz ve buradaki demet sadece elektrik alanın z bileşenine yani boylamsal elektrik alana sahip olarak devam edecektir (Griffiths, 1999).



Şekil 4.1 TE ve TM modları (Jensen, 2010).

4.1 POISSON/SUPERFISH Programı ve Yapılan Modelleme Çalışmaları

POISSON SUPERFISH programı durgun elektrik alan, durgun manyetik alan ve RF alanları için yapılan tasarımlarda kullanılan içinde birçok programı barındıran bir grup programlar topluluğudur. Burada özel Superfish Kodları (Autofish, Automesh, Fish, CFish, Poisson ve Pandira) ve ardişlemciler (WSFplot, SFO, SF7 ve Force), otomatik ayar programları (CCLfish, CDTfish, DTLfish, ELLfish, MDTfish, RFQfish, ve SCCfish), çizim programları (Quikplot and Tablplot); utulity programları (List35, Beta, Kilpat, ConvertF, FScale, SF8, SegField, ve SFOtable) şeklinde verilebilir (Billen and Young, 2006).

Bu tezde, Poisson Superfish programı $KROP = 1$ Superfish problem çözücüsü ile elektron tabancasındaki hızlandırıcı kaviteelerin elektrik alan davranışlarının görülmesi için kullanılmıştır. $KROP=0$ olan Poisson problemi de selenoid ve bunch coil yapılarında manyetik alan üretmek için kullanılmıştır.

Autofish, Automesh, Fish ve SFO program kombinasyonlarını içinde barındıran radyo-frekansı (RF) problemleri çözücüsü olan tek bir programdır. Bütün kodların ayrı ayrı çalışması için disk alanı ve yükleme zamanı gerekmektedir. Autofish programı Poisson ve Pandira problemleri için kullanılamaz (Billen and Young, 2006).

Automesh, statik manyetik alan veya RF problemlerinden hangisi çözülüyor olunursa olsun ilk çalıştırılacak program her zaman Automesh programıdır. Automesh programı girdi dosyasını okur ve TAPE36 dosyasının içine problemin ayarladığı sınır şartları boyunca bütün mesh noktalarını yazar. Automesh bu verileri ve başka birçok detaylı bilgileri OUTAUT.TXT dosyasına yazar. Çözücü program tarafından girdi dosyasının “reg namelist” bölümünde bütün değerlerin tanımlanması gerekir. Sonra girdi dosyasındaki bütün bölgeleri ve materyal tablosunu Fish, CFish, Poisson, ya da Pandira için işler. Mesh üretildikten sonra TAPE36 dosyası silinir. Bütün problem değerlerinin yanı sıra mesh geometrisinin tamamını tanımlayan T35 uzantılı ikinci bir çözüm dosyası kendiliğinden üretilir (Billen and Young, 2006).

Fish, $KPROB=1$ olan Problemler Automesh çalıştırıldıktan sonra, radyo frekans alan çözücü olarak bu program (Fish) çalıştırılır. Automesh tarafından oluşturulan ikili çözüm dosyası Fish tarafından okunur ve çözümleri yine aynı, Fish dosyasına yazılır. Yani, T35 üzerine elektrik alan çözümleri yazılır. Bu çözümler elektromanyetik alanın her bir mesh noktasında elektrik alanın çözümünü içerir. Fish sonuçları OUTFIS.TXT dosyasına yazılır ki bu dosya, problem değerlerinin listesini, her bir bölge için materyal özelliklerini, rezonans durumunun kayıtlarını ve kodun çalıştığı zamanda, kod tarafından hesaplanan özelliklerin kısa

bir listesini içermektedir. Eğer bir hata oluşursa OUTFIS.TXT genellikle hata mesajı ve bazen de yardım araçlarını içerecektir (Billen and Young, 2006).

CFish ,RF alanlar, dielektrik ve geçirgenlik katsayısı olan durumlar için karmaşık değerleri kullanan Fish kodunun bir versiyonudur. Kod bazı dosyaları Fish gibi okur ve yazar (Billen and Young, 2006).

Poisson, KPROB=0 değerine sahip olan problemlerde Automesh programından sonra çalışan statik alan çözücülerden biridir. Poisson durgun alanlar için çözücü programdır. Automesh tarafından oluşturulan ikili çözüm dosyasını okur. Çözüm dosyası her bir mesh noktası için vektör ya da skaler alanların çözümünü içerir. Poisson sonuçlarını OUTPOI.TXT dosyasına yazar. OUTPOI.TXT dosyası problem değerlerinin listesini, her bir bölge için materyal özelliklerini, harmonik analiz sonuçlarını içerir. Eğer bir hata oluşursa bu dosya içerisine yazılır. OUTPOI.TXT dosyası hata mesajlarını ve bazı yardımcı araçları içerir (Billen and Young, 2006).

Pandira, KPROB=0 değerine sahip olan problemlerde Automesh programından sonra çalışan statik alan çözücülerden biridir. Pandira durgun alanlar için çözücü programdır. Automesh tarafından oluşturulan ikili çözüm dosyasını okur. Çözüm dosyası her bir mesh noktası için vektör ya da skaler alanların çözümünün içerir. Poisson sonuçlarını OUTPAN.TXT dosyasına yazar. OUTPAN.TXT dosyası problem değerlerinin listesini, her bir bölge için materyal özelliklerini, harmonik analiz sonuçlarını içerir. Eğer bir hata oluşursa bu dosya içerisine yazılır. OUTPAN.TXT dosyası hata mesajlarını ve bazı yardımcı araçları içermektedir (Billen and Young, 2006).

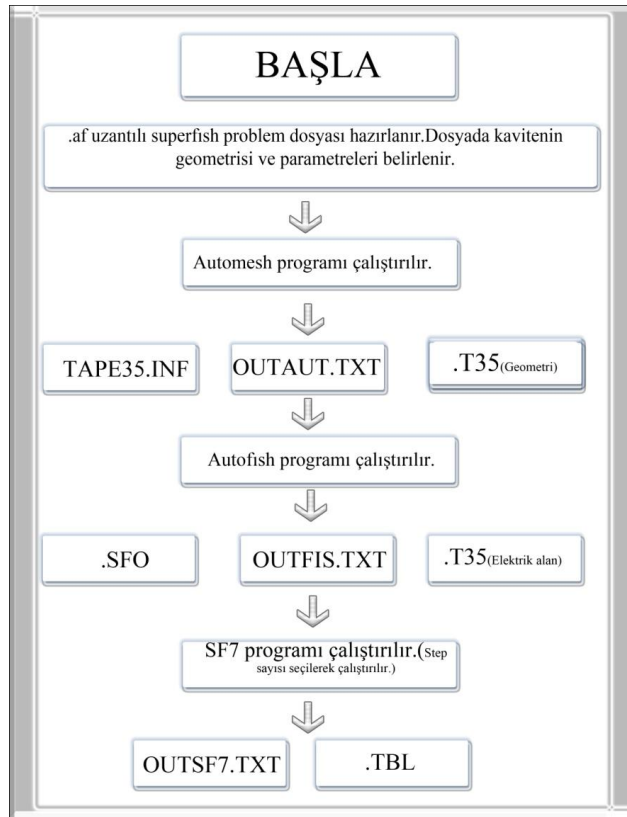
WSFplot,WSFplot Poisson Superisfh çizim programıdır. Eğer WSFplot Automesh'den sonra çalıştırılırsa sadece mesh noktaları görülebilir ancak çözücü bir programdan sonra çalıştırılırsa esas çözüm görülür (Billen and Young, 2006).

SFO, SFO Poisson Superfish ardışılmcı programlarından birisidir. Çözücü programlar tarafından çözülmüş ikili çözüm dosyalarını okur. Çözüm manyetik alan (RF problemleri için), vektör potansiyeli (magnet problemleri için) veya skaler potansiyel (elektrik alan problemleri için) her bir mesh noktası için ikili çözümleri içermektedir (Billen and Young, 2006).

4.1.1 SUPERFISH problemi

Elektron tabancası içerisindeki kavitelerde elektrik alan davranışını görmek için Superfish problemi çözülmelidir. Şekil 4.2'de kaviteler için program algoritmasını göstermektedir. Superfish problem çözümü için “.af” uzantılı bir girdi dosyası hazırlanır. Girdi

dosyasında geometri belirlemesi, mesh belirlenmesi, frekans değerleri, kavitenin ortamı, problemin çeşidi ve daha birçok kavitenin özelliklerini belirleyen parametreler bu girdi dosyasına yazılır. İlk önce Automesh programı çalıştırılır. Program çalıştırıldıktan sonra çıktı olarak TAPE35.INF, OUTAUT.TXT, .T35 uzantılı dosyalar oluşur. TAPE35.INF dosyası Automesh programının girdi dosyasını okuduğunu göstermektedir. OUTAUT.TXT dosyası girdi dosyasında bütün parametreleri okuyarak bu OUTAUT.TXT dosyaya yazar. Ayrıca bir hata oluştuğunda hata mesajı yine bu OUTAUT.TXT dosyası içine yazılır. Son olarak .T35 uzantılı dosya kavitenin geometrisini oluşturur. Superfish problem çözümü için Autofish programı çalıştırılmalıdır. Autofish programı .SFO, OUTFIS.TXT dosyalarını oluşturur ve .T35 dosyasının üzerine Superfish probleminin çözümünü yapar. Problemin sınır şartlarına göre problem için parametre ve elektrik alan değerleri .SFO dosyasına yazılır. OUTFIS.TXT dosyası Fish ya da Cfish programlarının program çıktılarını verir. Program tarafından hesaplanan değerleri bu OUTFIS.TXT dosyası içine yazar. Elektrik alanı gösterecek şekilde .T35 uzantılı dosya üzerine veriler yazılır. Bu dosya sayesinde kavitelerdeki Superfish problemi çözülür ve elektrik alan davranışı gözlemlenir. Son olarak SF7 programı çalıştırılarak OUTSF7.TXT ve .TBL uzantılı dosyalar elde edilir. Çizilen kavitenin her bir noktası için ayarlanan adım sayısı kadar veriyi ve karşılık olarak elektrik alan değerleri bu dosya içerisine yazılır. OUTSF7.TXT'deki verilerin grafik halinde gösterimini vermektedir.



Şekil 4.2 Superfish Problemi için program algoritması

Çizelge 4.1 Superfish probleminde kullanılan parametreler (Billen and Young, 2006).

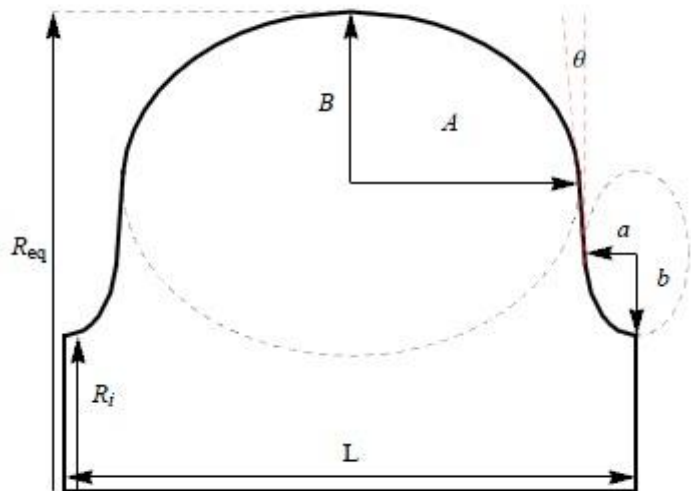
KPROB=1	Superfish problemi
MAT=1	Kavitelerin ortamı hava yada boş uzay olarak belirlenir.
IRTYPE=1	Süper iletken kavite
FREQD=1300 MHz	Kavitelerin dizayn frekansı
TEMPK=2 TC=9.2 RESIDR=1.0E-08	Parametreleri süper iletken olması durumunda REG namelist bölümüne yazılması gerekmektedir.
XDRI = YDRI=	Kavite içerisinde parçacığın konumunun x,y koordinatlarını göstermektedir.
NBSUP, NBSLO, NBSRT, NBSLF	Problem geometrisinin sınırı boyunca sınır şartlarını tanımlar. Değer 0 olduğunda Dirichlet sınır şartlarını, 1 olduğunda Neumann sınır şartlarını tanımlamaktadır.
BETA	Parçacığın hızıdır ve KMETHOD=1 olduğunda SFO değerlerini hesaplamak için kullanılır.

DPHI	Geometrinin faz uzunluğu
DX= DY=	X ve Y yönündeki mesh aralığı

Çizelge 4.2 Poisson ve Superfish problemleri için sınır şartlarını belirleyen parametreler (Billen and Young, 2006).

Parametre	Superfish	Poisson
NBSUP	1	0
NBSLO	0	1
NBSRT	1	0
NBSLF	1	0

Kavitelerin şeklini belirlerken dikkat edilmesi gereken nokta, şekilde başlanılan noktaya geri dönülmesidir. Yani şeklin kapalı bir şekilde, kontur olması gerekir. Eliptik kaviteleri oluştururken elipslerden faydalanılır. Öncelikle elipsin merkez noktası belirlenmelidir. Elipsin boylamsal yönde ve dikey yönde yarıçapı belirlenir. Boylamsal yönde yarıçap değeri ve bu iki değer oranı yazılır. En son olarak x ve y yönünde ilerleme uzaklığı verilerek kapalı bölgenin tamamlanması sağlanır. Bir kaviteyi oluşturmak için iki farklı elips oluşturulur. Yani kavite oluşturulur ve simetrisi olacak şekilde devam edilir.



Şekil 4.3 Eliptik kavite

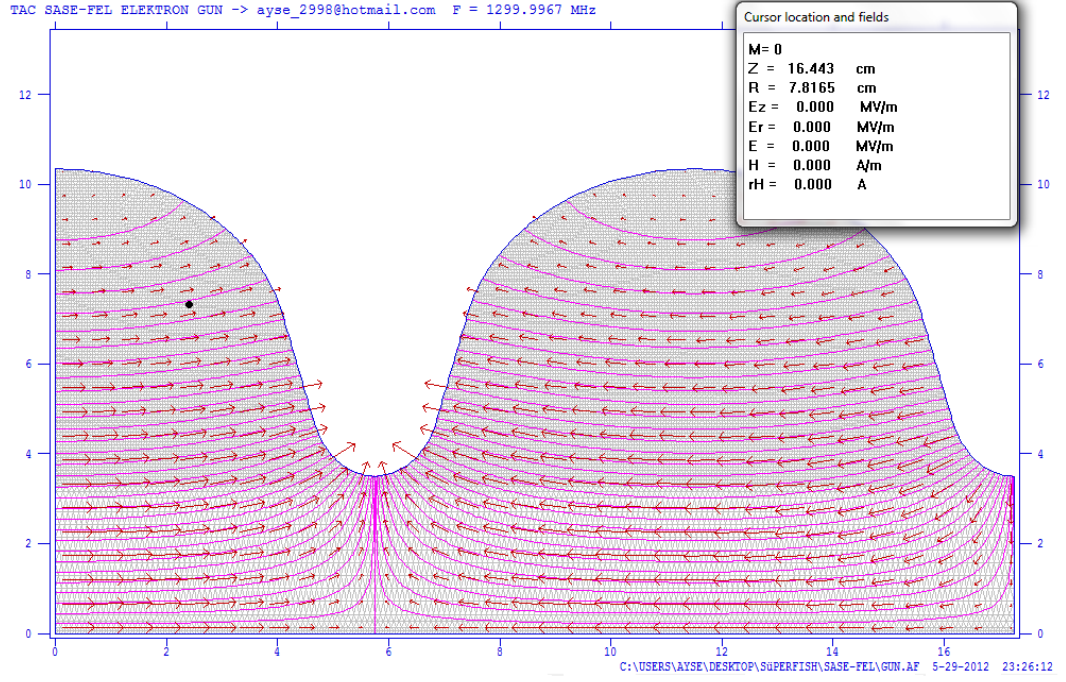
4.1.1.1 SUPERFISH problemi modelleme Sonuçları

Elektron tabancasında katotdan çıkan elektronların ilk anda hızlandırılması için katotdan hemen sonra ilk hızlandırıcı kaviteler vardır. Kavitelere elektrik alan uygulanmaktadır. Elektronların davranışı, elektron sökmek için kullanılan lazerin dalga boyuyla, kullanılan katot malzemelerin temizleme sıklığıyla, ortamın vakumuyla yakından ilgili olduğu gibi elektronun elektrik alanında hızlandırıldığı kavitelerin parametreleriyle de direkt ilgilidir. Aşağıdaki Çizelge 4.3 ‘de SASE SEL elektron tabanca için tasarlanan kavitenin parametreleri verilmektedir.

Çizelge 4.3 Elektron tabanca için kavite parametreleri

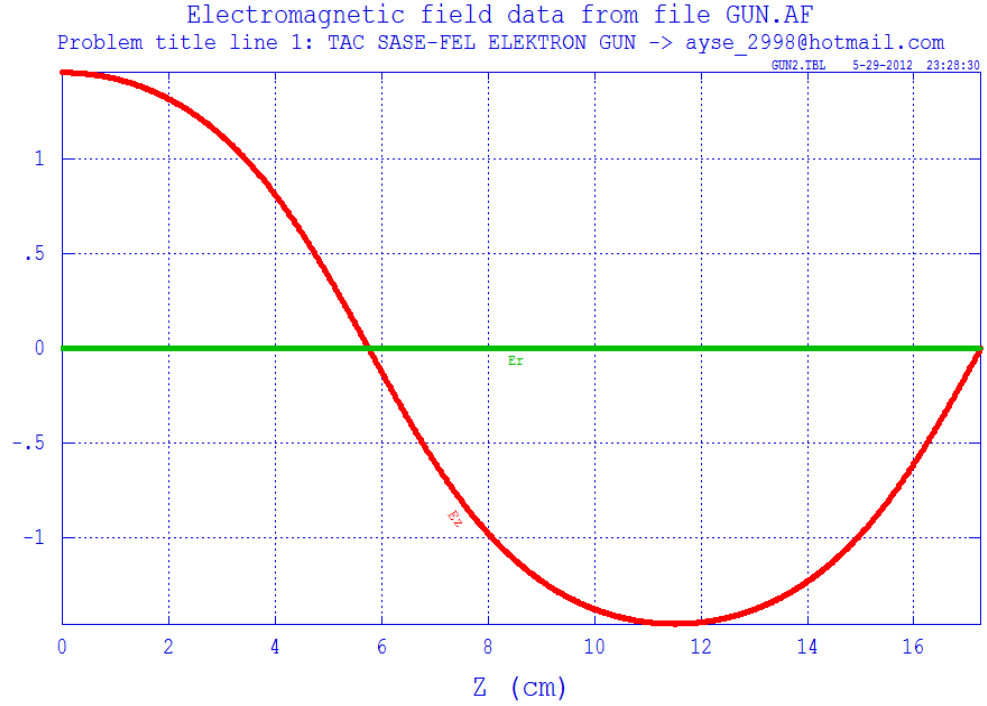
Kavite tipi	Süper iletken
Dizayn Frekansı	1.3 GHz
Gradyent	40MV/m
Hücre Sayısı	1.5
İris Çapı (R_{iris})	3.9 cm
$R_{equator}$	10,3385 cm
Yarım Hücre Uzunluğu ($L/2$)	5,7535 cm
Aktif Uzunluk	17,2611 cm

Kavitelerin içerisindeki elektrik alan davranışını görmek için Poisson Superfish programında KPROP=1 olan superfish problemi tanımlarız. Superfish probleminde Automesh, Fish ve SFO program kombinasyonlarını içeren Autofish programını çalıştırmak yeterlidir. Oluşan “.T35” uzantılı dosyadan elektrik alan çizgilerini görmek mümkündür. “.T35” uzantılı dosyadan SF7 programı çalıştırılarak oluşturulmuş üçgen mesh geometrinin her bir noktası için elektrik alan değerlerini “OUTSF7.TXT” dosyasında çıktı olarak vermektedir. Ayrıca belirlediğimiz her nokta için bir tablo da oluşturulmuştur.



Şekil 4.4 1.5 Hücrelik kavitedeki elektrik alan davranış çizgileri

Yukarıdaki şekil 4.4 fotokatot tabancada oluşturulmuş 1.5 hücrelik kavitenin elektrik alan çizgilerini, aşağıdaki Şekil 4.5'te ise bu hücrelerdeki elektrik alanın boylamsal ve radyal bileşenlerinin davranışı görülmektedir.



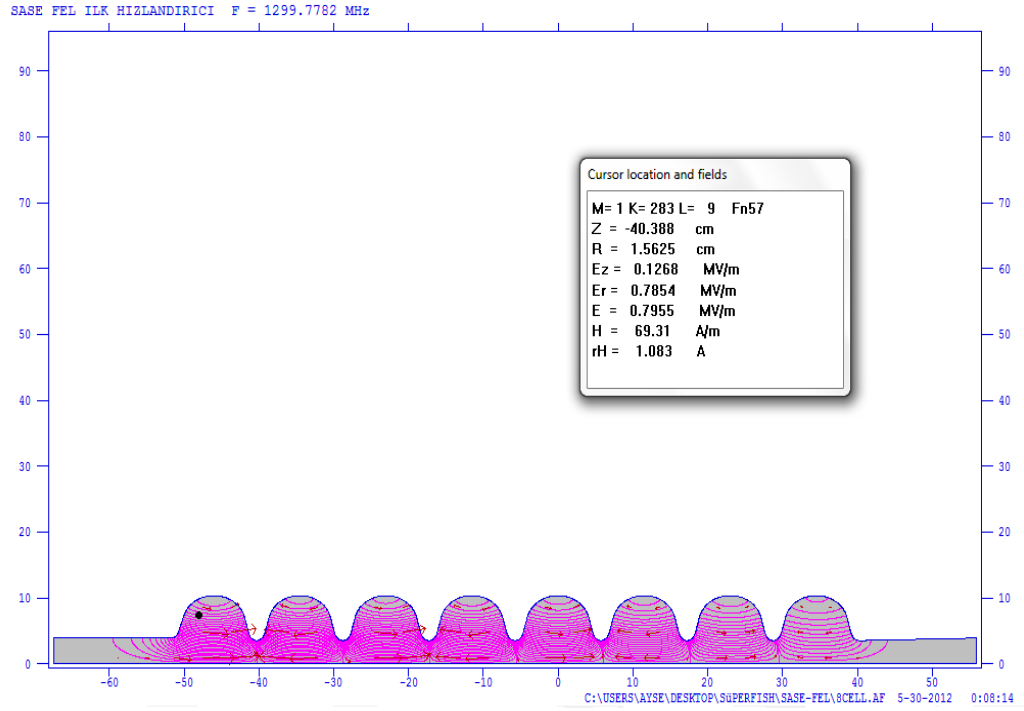
Şekil 4.5 Elektrik alanın boylamsal ve radyal doğrultudaki davranışı

E_r , elektrik alan bileşeni, z ilerleme ekseni boyunca sabit kalır. E_z elektrik alan bileşeni, yarım kavite boyunca pozitifken, diğer kavitede elektrik alanın yön değiştirmesinden dolayı negatif değerler almaktadır.

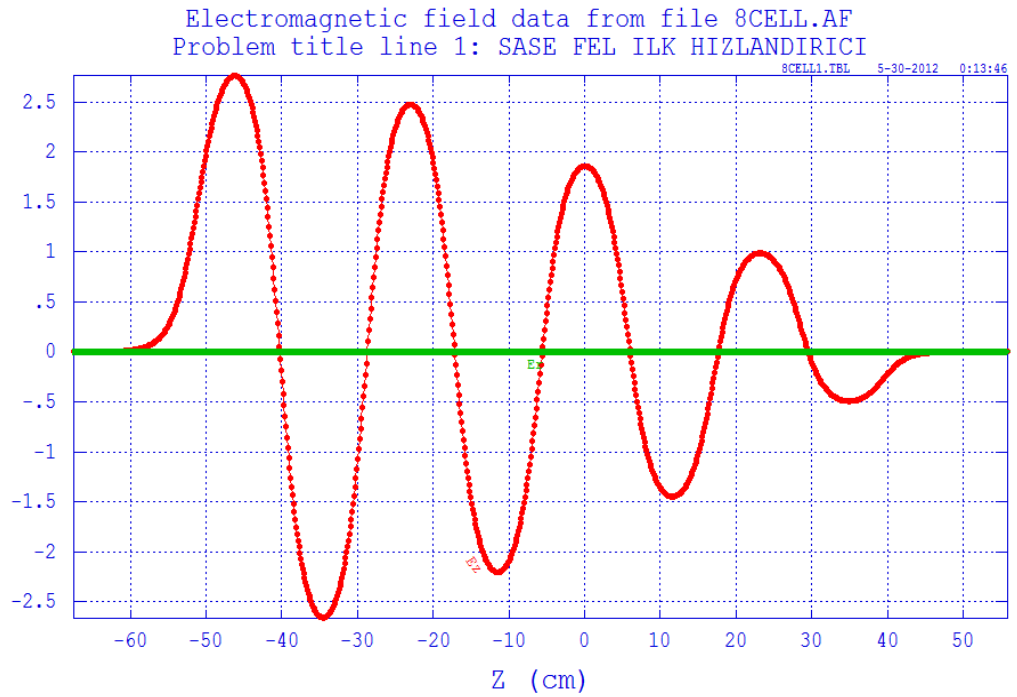
Elektron tabancasından hemen sonra ilk hızlandırıcı kaviteleri tasarlamak içinde aynı şekilde Superfish programı kullanılmaktadır. 8 hücreli eliptik kavite tasarlanarak buradaki elektrik alan çizgilerine bakılmıştır.

Çizlege 4.4 İlk hızlandırıcı için kavite parametreleri

Kavite tipi	Süper iletken
Dizayn Frekansı	1.3 GHz
Ortalama Gradyent	MV/m
Hücre Sayısı	8
İris Çapı(R_{iris})	3.9 cm
$R_{equator}$	10,3385 cm
Yarım Hücre Uzunluğu ($L/2$)	5,7535 cm
Aktif Uzunluk	123.392 cm



Şekil 4.6 İlk hızlandırıcının elektrik alan çizgileri



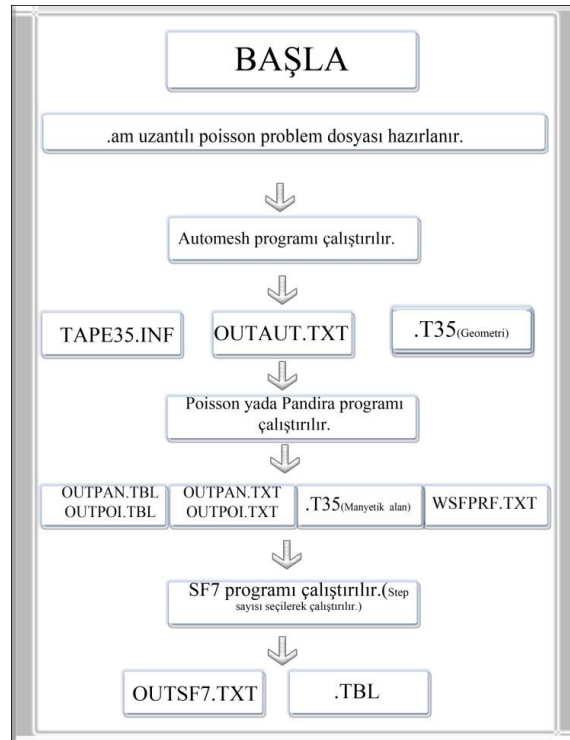
Şekil 4.7 Elektrik alanın ilk hızlandırıcı içerisindeki boyamsal ve radyal doğrultudaki davranışı

Elektron tabancasında elektron demetini odaklamak için manyetik alan kullanılmaktadır. Bu tezde, manyetik alan üretmek için solenoid yapıları tasarlanmıştır. Elektron demetleri üzerinde solenoid tarafından oluşturulan etkiyi nötürlemek için bunch coil yapıları ile birlikte tasarlanmalıdır. Durgun manyetik alan davranışını görmek için $KPROP=0$ olan Poisson problemi çözülmelidir. Superfish probleminde x eksenini ilerleme doğrultusu kabul ederken, Poisson probleminde y eksenini ilerleme yönü olarak kabul edilmektedir. Poisson problemi için “.am” uzantılı bir girdi dosyası oluşturulur. Bu girdi dosyasında geometri belirlenmesi, selenoid ve bunch coil yapıları için materyel ortamının belirlenmesi ve akım değerleri belirlenmektedir. Problemi çözmek için ilk önce, geometriyi oluşturacak olan Automesh programı çalıştırılır. Oluşan “.T35” uzantılı dosyada sağ tıklanarak Poisson ya da Pandira programları durgun manyetik alan problemini çözmek için çalıştırılabilmektedir.

4.1.2 POISSON problemi

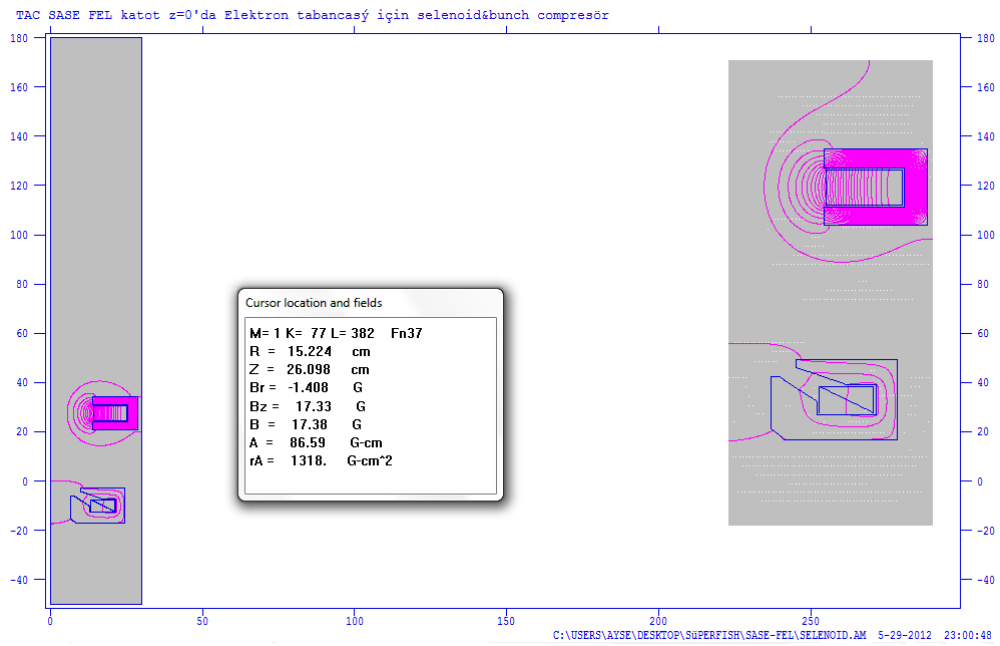
Elektrik tabancasında selenoid ve bunch coil yapılarında manyetik alan davranışını görmek için poisson problemlerinin çözülmesi gerekir. Selenoid ve bunch coil yapılarında manyetik alana izin vermek için $MAT=2$ parametresi seçilir. Böylece ortamın manyetik alan dağılıma olanak verir. Akım değerleri ve geometri belirlenerek poisson probleminin girdi dosyası hazırlanır.

“.am” uzantılı girdi dosyası hazırlandıktan sonra geometriyi oluşturmak için Automesh programı çalıştırılır. Superfish probleminde olduğu gibi TAPE35.INF,OUTAUT.TXT, .T35 uzantılı dosyalar oluşur. Oluşturulan geometri dosyası üzerinde Poisson ya da Pandira programı çalıştırılarak, çalıştırılan programa göre text ve tablo dosyalarının adı farklılık gösterir. Daha sonra SF7 programı çalıştırılarak her bir nokta için manyetik alan değeri elde edilir ve çıkan “.TBL” ve OUTSF7.TXT dosyalarındaki verilerin grafiği elde edilir (Billen and Young, 2006).

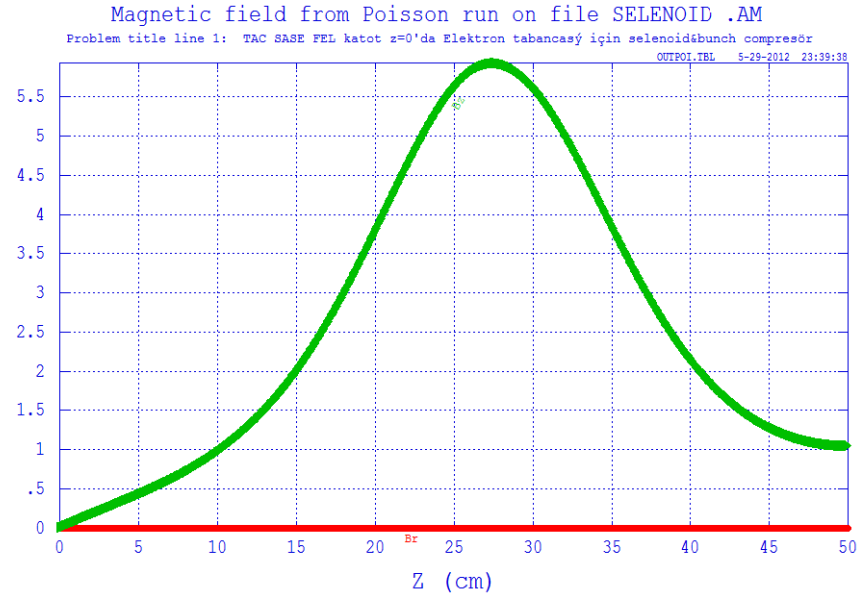


Şekil 4.8 POISSON problemi için program algoritması

4.1.2.1 POISSON problemi modelleme çalışmaları



Şekil 4.9 Selenoid ve bunch coil



Şekil 4.10 Manyetik alanın boylamsal ve radyal doğrultudaki davranış

5. ASTRA PROGRAMI

Astra (A Space_Charge Tracting Algorithm) programı elektronun davranışını inceleyen bir programdır. Astra programıyla elektron tabancası ve hızlandırıcı yapı modellenenebilir. Astra programı 4 alt programla birlikte çalışmaktadır. Astra ve generator programları için girdi dosyaları oluşturulur. Fieldplot, Postpro ve Lineplot programları Astra ve Generator tarafından oluşturulan çıktıların grafiksel olarak görüntüsünü vermektedir.

Generator, başlangıç durumda ilk parçacık dağılımı için kullanılır. Fieldplot, demet hattı elemanlarını, uzay yük dağılımını, dilim yayınımlarını göstermek için kullanılır. Postpro, parçacık dağılımlarının faz uzayı grafiklerini görüntülemek için kullanılır ve faz uzayı dağılımlarının ayrıntılı analizine olanak sağlar. Lineplot, demet boyutlarını, emittans, uzunluk, enerji, boyuna demet hattı konumunu bir parametreye bağlı olarak görüntülenmesi için kullanılır (Floettmann, 2011).

Generator tarafından ilk parçacık dağılımı “.ini” uzantılı dosyaya yazılır. Parçacık izleme programı Astra ilk parçacık dağılımının koordinatlarını “.ini” dosyasından okur. “.ini” uzantılı çıktı dosyasında ilk parçacıkların konumları (x, y, z) ve momentumları (px, py, pz) ayrıca yük değerleri, hangi parçacığın dağılıma uğradığı (elektron, pozitron, ...) ve parçacıkların katotdaki durumları verilmektedir (Floettmann, 2011).

```
&INPUT
  FNAME = 'Example.ini'
  Add=FALSE,      N_add=0,
  IPart=500,      Species='electrons'
  Probe=True,     Noise_reduc=T,      Cathode=F
  Q_total=1.0E0

  Ref_zpos=0.0E0, Ref_Ekin=2.0E0

  Dist_z='gauss',  sig_z=1.0E0,      C_sig_z=2.0
  Dist_pz='g',     sig_Ekin=1.5,     cor_Ekin=0.0E0

  Dist_x='gauss',  sig_x=0.75E0,
  Dist_px='g',     Nemit_x=1.0E0,    cor_px=0.0E0
  Dist_y='g',      sig_y=0.75E0,
  Dist_py='g',     Nemit_y=1.0E0,    cor_py=0.0E0
/
```

Şekil 5.1 Generator programı için örnek girdi dosyası (Floettmann, 2011).

Generator programı için örnek dosyada ilk parçacık dağılımını ‘Example.ini’ dosyasına yapmaktadır. Default dosya adı ‘generator.in’ dir. Bu dosyada “I Part”; parçacık sayısını, species; katotdan sökülen parçacık türünü , “ Q_total” yük değerini vermektedir. “ Cathode=F(false)” parçacıkların daha katotdan yayınlanmadığı kabul edilir. “Noise_reduc = T(true)”, Hammersley dizisi olarak bilinen gelişigüzel olmayan ama yarı gelişigüzel olan bir dağılımı izler. Eğer “Track=True” olursa bu parçacıklar ve uzay yükü alanının yörüngeleri bu parçacıklarda hareketleri korunacaktır. Parçacıkların x ve y boylamsal dağılımları için 0.75 mm ve gaussiyen bir dağılım kurulmuştur. Demet 0.0 noktasında 2 MeV enerji değerindedir. Generator çalıştıktan sonra postpro programı çalıştırılarak sonuçlara bakılabilir. Gelişigüzel sayı üretici her zaman “generator” tarafından güncellenecektir (Floettmann, 2011).

Astra girdi dosyası uzantısı ‘.in’ olmalıdır. Default dosya adı ‘rfgun.in’ olarak tanımlanmıştır. Demet hattı elemanlarının her biri parametre setleri ile tanımlanmıştır. Buna ilaveten NEWRUN parametre seti ile de parçacıkların demet hattı boyunca izlenmesi için genel açıklamalar yapılmıştır. CHARGE, uzay yük hesaplamaları için ayarlar içerir. SCAN, rutin taramalar için açıklamalar içerir (Floettmann, 2011).

NEWRUN parametre seti bir başlık metniyle ve ardından programın çalışma sayısını belirterek başlar. Bu çalışma sayısı Astra tarafından oluşturulmuş bütün çıktı dosyalarının uzantısı olarak bulunacaktır. “Auto_Phase = T” girdi dağılım dosyası içinde ilk üretilen parçacıkları demet hattı boyunca demet hattı ayarlarını kontrol etmek için izleyecektir. İkinci adım $X=X_{rms}$ ve $Y=Y_{rms}$ şeklinde dengelendiğinde referans parçacık tekrar izlenmeye başlayacaktır. Eğer “Track_ALL=False” olarak ayarlanırsa izleme burada duracaktır. Runge-Kutte integer için son adım, eğer uzay yük alanını hesabın içine alınırsa sadece H_min aktifken H_max parametreleri belirlenebilecektir (Floettmann, 2011).

İkinci parametre seti OUTPUT çıktı üretimi için ayrılmıştır. Astra’nın bir önceki versiyonunda bu kısım NEWRUN parametre seti içerisindeydi ve hala bu kısmı kapsamaktadır. İlk parçacık dağılımının olduğu herhangi bir yerde izleme başlatılacakken, sonuçlar Zstart ve Zstop arasında üretilcektir. İzleme, demetin pozisyonu bütün aktif parçacıkların ortalama pozisyonu Zstop’dan daha büyük olduğunda duracaktır (Floettmann, 2011).

```

&NEWRUN
Head=' Example of ASTRA users manual'
RUN=1
Distribution = 'Example.ini',      Xoff=0.0,   Yoff=0.0,
TRACK_ALL=T,      Auto_phase=T

H_max=0.001,      H_min=0.00

&OUTPUT
ZSTART=0.0,      ZSTOP=1.5
Zemit=500,      Zphase=1
RefS=T
EmitS=T,      PhaseS=T
/

&CHARGE
LSPCH=F
Nrad=10, Cell_var=2.0, Nlong_in=10
min_grid=0.0
Max_Scale=0.05
/

&CAVITY
LEfield=T,
File Efield(1)='3_cell L-Band.dat', C_pos(1)=0.3
Nue(1)=1.3,      MaxE(1)=40.0,      Phi(1)=0.0,
/

&SOLENOID
LBfield=T,
File Bfield(1)='Solenoid.dat', S_pos(1)=1,2
MaxB(1)=0.35, S_smooth(1)=10
/

```

Şekil 5.2 Astra programı için örnek girdi dosyası (Floettmann, 2011).

Çizelge 5.1 Astra tarafından üretilen çıktı dosya isimleri (Floettmann, 2011).

Project.ref.run	RefS
Project.track.run	TrackS
Project.Cathode.run	CathodeS
Project.Fields.run	Automic1
Project.tcheck.run	TcheckS
Project.Xemit.run Project.Yemit.run Project.Zemit.run	EmitS
Project.Xemit2.run Project.Yemit 2.run	Lsun_cor
Project.TRemit.run	TR_emitS
Project.Sub_emit.run	Sub_emitS
Project.Cemit.run	C_EmitS
Project.C99emit.run	C99_EmitS
Project.Larmor.run	LarmoS
Project.Sigma .run	SigmaS
Project.Density.run	DensityS
Project.zpos.run	Phase S
Project.tstep.run	T_PhaseS
Project.Lost_Part.run	LClean_Stack
Project.Log.run	PhaseS
Project.e.Log.run	Log_Error
Project.LandF.run	LandFS
Project.PScan.run	Phase_scan
Project.Scan.run	LScan
Project.lab.run	LScan
Project.Error.run	Error S

Astra tarafından üretilmiş bütün çıktı dosyalarının isimleri proje ismi ile başlar, girdi dosyasının ismi ve çalışma numarası ile son bulur. Aşağıdaki çizelge 5.1 Astra tarafından üretilmiş bütün çıktı dosyaların isimlerini verir. Project oluşturulan Astra dosyasının ismi, run programı çalıştırma sayısıdır.

Astra, demet hattının farklı uzunluk ölçeklerinde çıktısını üretir. “RefS=T” her bir Runte-Kutte adımıında enerji kazancını ve referans yörüngesi gibi eksen dışı çıktıları üretir. Eğer “EmitS=True” ise demet yayınının çıktısı ve diğer istatistiksel parametreleri üretilir, bu Zstart –Zstop arasındaki uzaklığı Zemit aralığa bölünerek yapılır. İstatistiksel demet parametrelerinin üretimi hesaplanır. Eğer “Phase=True” alınırsa Zphase farklı yerlerde tam parçacık dağılımıyla korunur. Zstart –Zstop, Zphase aralığa bölünür ve Zemit sayesinde yakın bir yer belirlemek için seçilir. Bu yüzden Zemit = n·Zphase önerilmektedir (Floettmann, 2011).

CAVITY parametre seti dalga yapısına ve elektrik alan etkilerinin efektif olmasına izin verir. İlerleme doğrultusunda her bir adım için elektrik alan değerleri bir tablo şeklinde verilmelidir. “File Efield(n)” dosya adını içerir. Kaviteilerin hangi pozisyonda başlayacağını belirler. “Nue(n)” frekans durumu, “Max(E)” kavitelere uygulanan gradyenti, “Phi (n)” dalganın fazını belirlemektedir (Floettmann, 2011).

SOLENOID parametre seti solenoid alanı hakkında bilgi içermektedir. Kavite alanında olduğu gibi manyetik alan değerlerinin bir tablo şeklinde olması gereklidir. “File BField (n)” dosya adını içerir. Kavite parametre setinde olduğu gibi pozisyonu ayarlanabilir. “Max(B)” solenoid alanının en büyük değerini vermektedir (Floettmann, 2011).

5.1 İlk Parçacık Dağılımının Belirlenmesi

İlk parçacık dağılımını üretmekten, çok takip programı olan Astra bir dosyadan ilk üretilen parçacıkların koordinatlarını okur. Bu dosya generator tarafından ve ya bir kullanıcı tarafından yazılan program olabilir. İlk üretilen parçacıkların koordinatlarını gösteren bu dosya ‘.ini’ uzantılıdır. Bu dosya yapısal olarak aşağıdaki gibidir.

Çizelge 5.2 “.ini” uzantılı dosya içersindeki referans parçacığın durumları (Floettmann, 2011).

Parametreler	X	Y	Z	P _x	P _y	P _z	Clock	Macro Charge	Particle Index	Status Flag
Birimi	M	m	m	eV/m	eV/m	eV/m	ns	nC		

Çizelge 5.2’de referans parçacığın koordinatlarını belirler. Referans parçacık için boylamsal parçacık koordinatları örneğin z, P_z ve t ile ilişkilidir. Eğer katot da bir parçacık üretilirse onun boylamsal konumu z = 0.0 olarak adlandırılır.

Parçacıkların Makro Yük Parametresi nano Columb birimi ile verilir. Program her parçacığın farklı yüklerini belirlemeyi mümkün kılar. Parçacıkların yayılımının hesaplanması uygun pozisyonlar için yapılacaktır.

Çizelge 5.3 Parçacık index (Floettmann, 2011).

1	Elektron
2	Pozitron
3	Proton
4	Hidrojen iyonu
5-14	Kullanıcılar tarafından belirlenir.

Generator dosyasına hangi parçacığın izlenmesi gerektiği yazılır. “ini” uzantılı dosyanın Parçacık index kısmında verilen numaralar hangi parçacık türünün izlendiğini gösterir.

Status flag , parçacık durum bilgilerini içerir. Negatif status flag, ya bazı mekanizmalar tarafından kaybedilmiştir ya da henüz başlamamıştır. Pozitif parçacıklar normal parçacıklar gibi takip edilir fakat demet yayını hesaplama ve uzay yük alanı hesaplamada dikkate alınmaz.

Çizelge 5.4 Status flag durumları (Floettmann, 2011).

Status flag	Açıklama	Durum
-3	Katotda probe parçacığının yörüngesinde	Henüz başlamadı
-1	Kapatotda standart parçacık	Henüz başlamadı
0	Pasif inceleme parçacığı	İzleniyor
1	Pasif parçacık	İzleniyor
3.....35		izleniyor
-4 ... -95	Sadece referans parçacık $Z_0 > Z_{stop}$	kayıp
-99	Ortalama pozisyon dağılımı	izlenmeyecek

5.2 ASTRA Program Sonuçları

5.2.1 Demet yayını

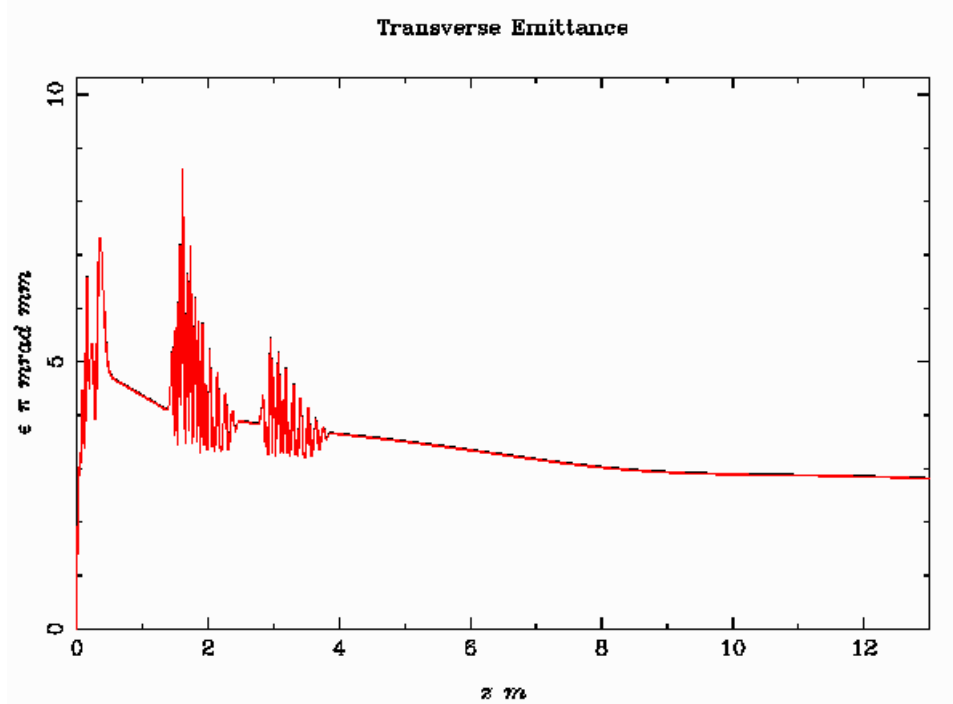
Demetin bölgesel olarak içinde bulunduğu alanın belirlenmesi gerekmektedir. Demet dışında kalan parçacıklar yayını olarak isimlendirilir. Elektronlar katot da ilk çıktıklarında dağılma eğilimi gösterirler uygulanan manyetik alanla odaklanırlar. Elektronlar, tabancada ilk yarım kavite’ye yani elektrik alanın en yoğun olduğu bölgeye gelerek hızlandırılırlar. Elektron tabancasında demet yayını büyük olabilir fakat ilerledikçe düşmesi beklenmektedir.

Demet yayını; ışıklık, parlaklık, dalga boyu aralığı, twiss parametreleri gibi değerleri doğrudan etkilediğinden, demet yayınının oldukça küçük değerlerde tutulması önemlidir. Dünyada bir çok laboratuarda yayını değerlerini düşürmek için optimize çalışmaları yapılmaktadır.

Demet yayını etkileyen faktörlerden bazıları; selenoid alanı, dalganın faz farkı, gradyent, parçacık sayısı gibi değerler değiştirilerek yayını değeri küçültülebilmektedir. Grafik’te elektronların katot’daki kararsız durumlarından sonra enine demet yayınının 2.8 mm mrad değerine kadar azaldığı görülmektedir.

Grafikte, ortalama demet yayını, elektron demetinin takip edildiği 12.99 m boyunca ortalama değeri 3.458 mm mrad’dır. Elektron demeti 1.612 m’de yayınının en yüksek değeri

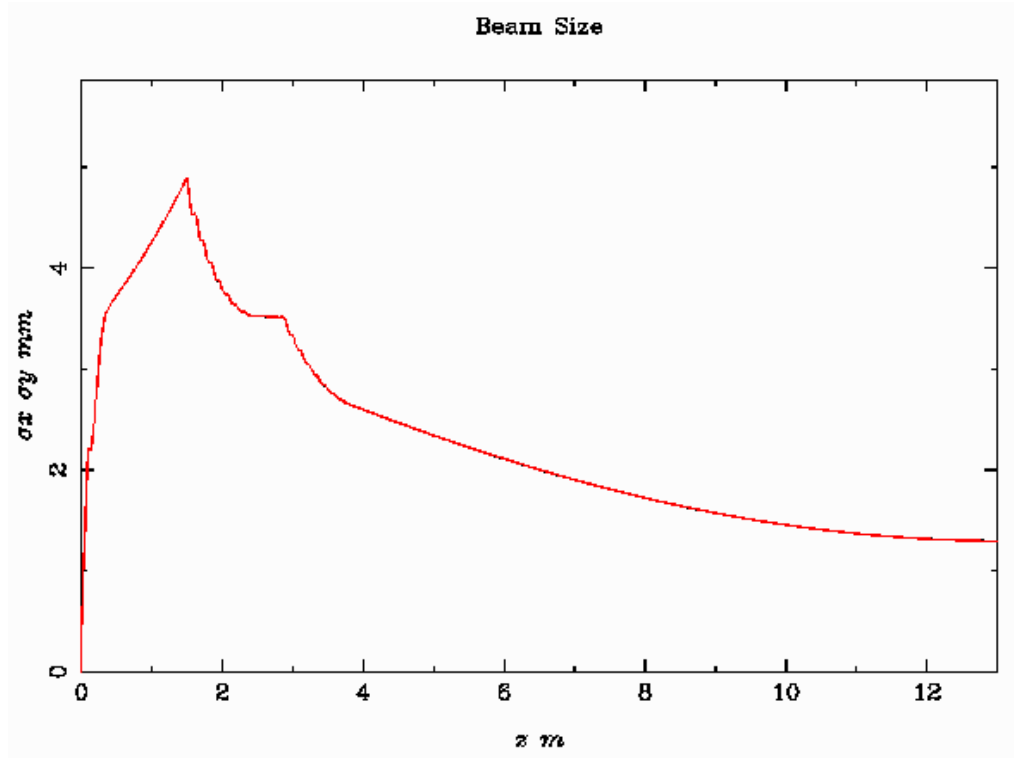
olan 8.596 mm mrad değerine ulaşmıştır. Astra input dosyasında 1.467 m'ye defokusing 1.717 m'ye de fokusing kuadropoller konulmuştur. Demet'de fokusing noktasından sonra en yüksek noktaya ulaşılmış fakat kuadropoldeki fokuslama yardımıyla yayılımı azaltılmıştır.



Şekil 5.3 Enine demet yayılımı

5.2.2. Demet boyutu

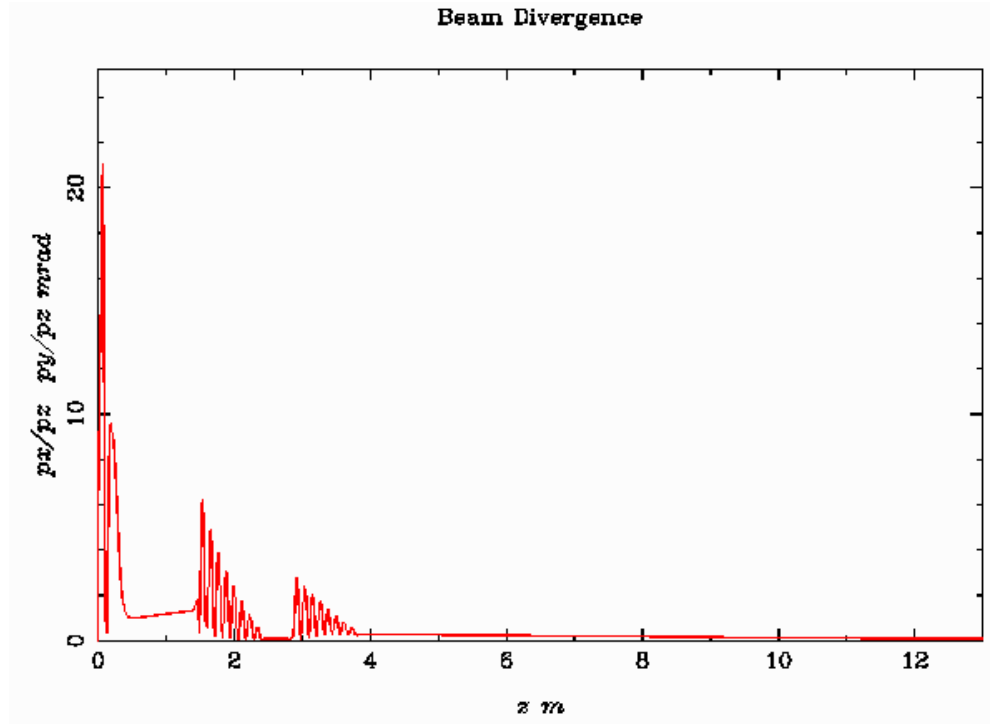
Demet boyutu , elektron demetinin kalitesini önemli derecede etkileyen faktörlerden biridir. Demet boyutunu doğrudan etkileyen faktörlerin başında ise uygulanan manyetik alan gelir. Demet boyutunu optimize etmek için selenoid alanın maximum değeri için bir çok değer denenmiştir. Demet yayılımını arttırmadan, demet boyutunu eşzamanlı azaltmak amaçlı 0.125 T değerinde selenoid kullanılmıştır. Bu selenoid ile demet boyutunda azalma eğilimi gösterdiği gözlenmiştir. Demet boyunun elektron tabancadan çıkarken giderek arttığı ilk hızlandırıcı yapıya girdikten sonra azalmaya başladığı görülmektedir. Demet boyutunun 1 mm'ye yakın olması beklenmektedir. Grafikten görüldüğü üzere demet boyutu 1 mm yaklaşmakta ve azalmaktadır.



Şekil 5.4 Demetinin büyüklüğü

5.2.3 Demet ıraksaması

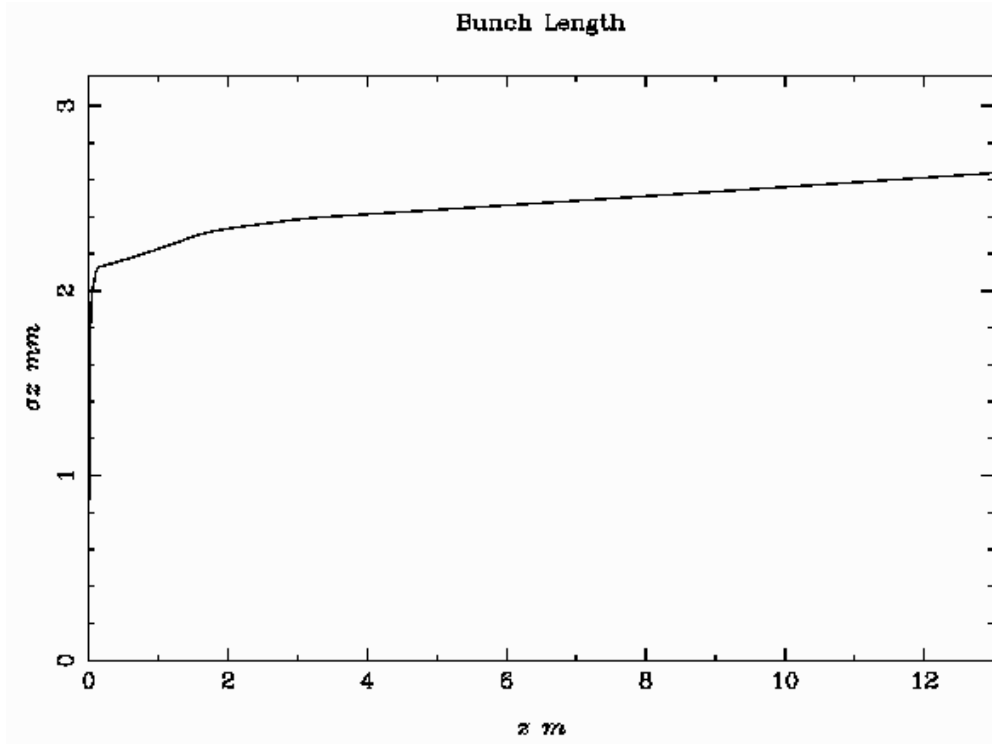
Demetin ıraksaması demetin olması gereken boylamsal eksenden ne kadar uzaklaştığının ölçüsüdür. Elektron tabancasından ilk çıktığında yaklaşık olarak 20 mrad değerine çıkmıştır. Daha sonra selenoid etkisinden ve kuadropol etkisinden dolayı sabit olmaktadır. İlk hızlandırıcı içerisinde demet yapısı bir titreşim gösterdikten sonra beklenen dengede devam etmiştir.



Şekil 5.5 Demetinin ıraksaması

5.2.4 Demet uzunluğu

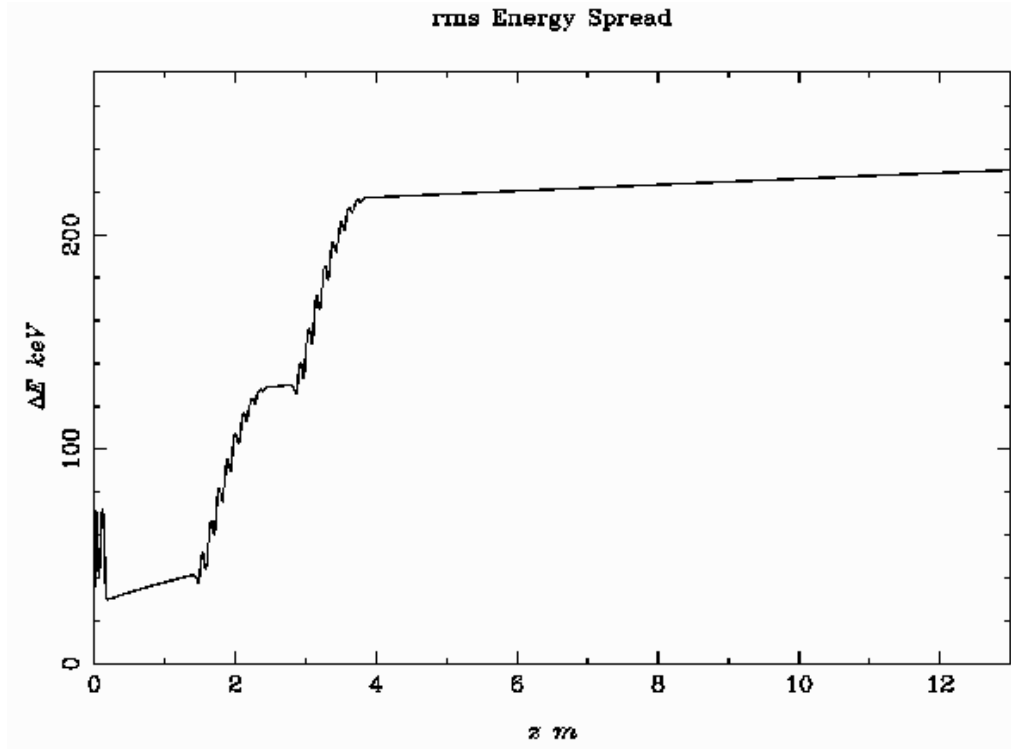
Bu bölümde demet uzunluğunun elektron tabancası ve ilk hızlandırıcı yapıdaki profiline bakılmaktadır. Demet uzunluğu 2 mm'den hemen sonra çok az bir artışla ve hemen hemen durağan durumda devam etmektedir. Bu sistem çıkışında elde edilecek lazer için elektron demetinin kalitesine dikkat edilmelidir. Elektron demetinin daha elektron tabancadan çıkarken küçük bir demet uzunluğuna sahip olması istenir.



Şekil 5.6 Demet uzunluğunun boylamsal uzunluğa göre değişimi

5.2.5 Enerji dağılımı

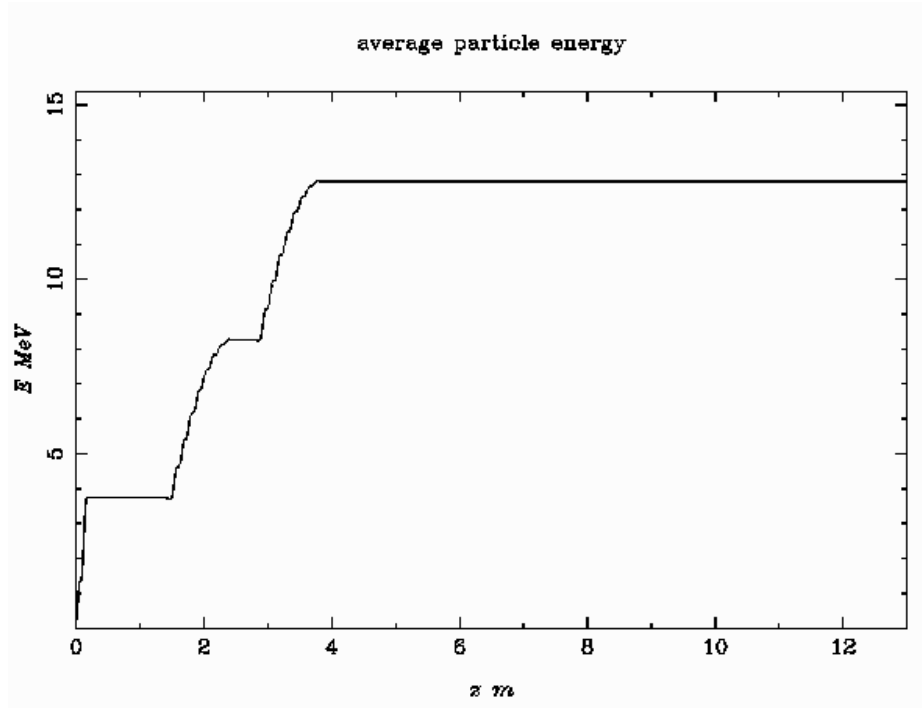
Elektron demetinin dağılımı gösterilmektedir. Elektron demetinin enerjisi, elektron tabancasında değilde ilk hızlandırıcı yapıdan geçerken daha fazla bir enerji dağılımına uğramıştır. İlk hızlandırıcı yapı içerisinde yaklaşık 150 keV'lik bir enerji dağılımı olmuştur. Elektron demetinin enerji dağılımı 200 keV'de sabitlenmiştir.



Şekil 5.7 Enerji dağılımının boylamsal ilerlemeye göre değişimi

5.2.6 Ortalama parçacık enerjisi

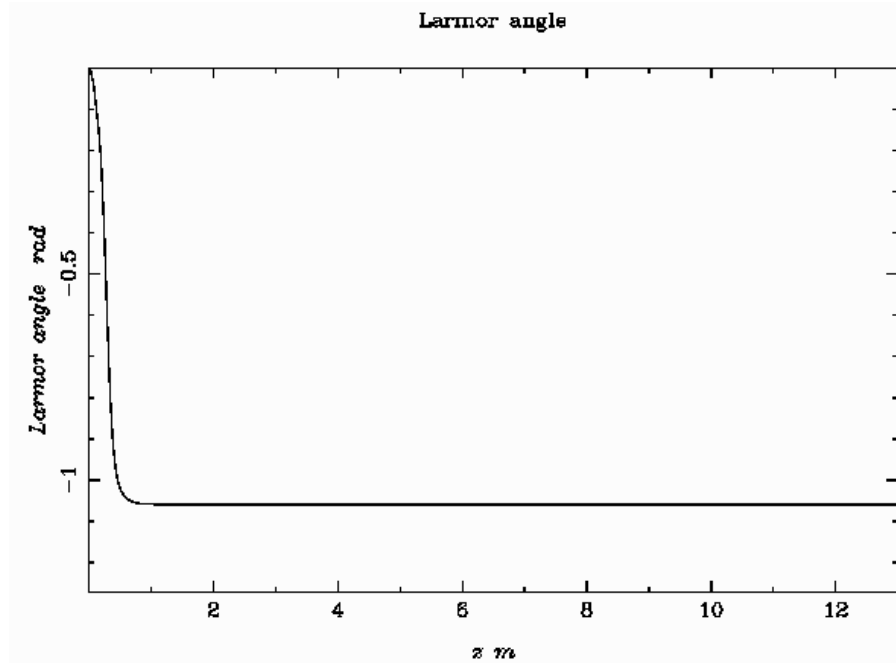
Parçacıkların ortalama enerjilerini MeV cinsinden göstermektedir. Elektron tabancadan çıkıldığında yaklaşık 4 MeV'lik bir enerji elde edilmiştir. Daha sonraki hızlandırıcı yapıda ise enerji değeri 13 MeV civarındadır. 13MeV'de enerji sabitlenmiş görülmektedir. Sistemin bundan sonrasında hızlandırıcı ve salındırıcı yapılarıyla 1GeV lik enerjiye çıkması beklenmektedir. Fakat bu sabit aralıkta hızlandırıcı olmadığından demetin enerjisinin sabit kalması beklenebilir bir durumdur.



Şekil 5.8 Ortalama enerji dağılımı

5.2.7 LARMOR açısı

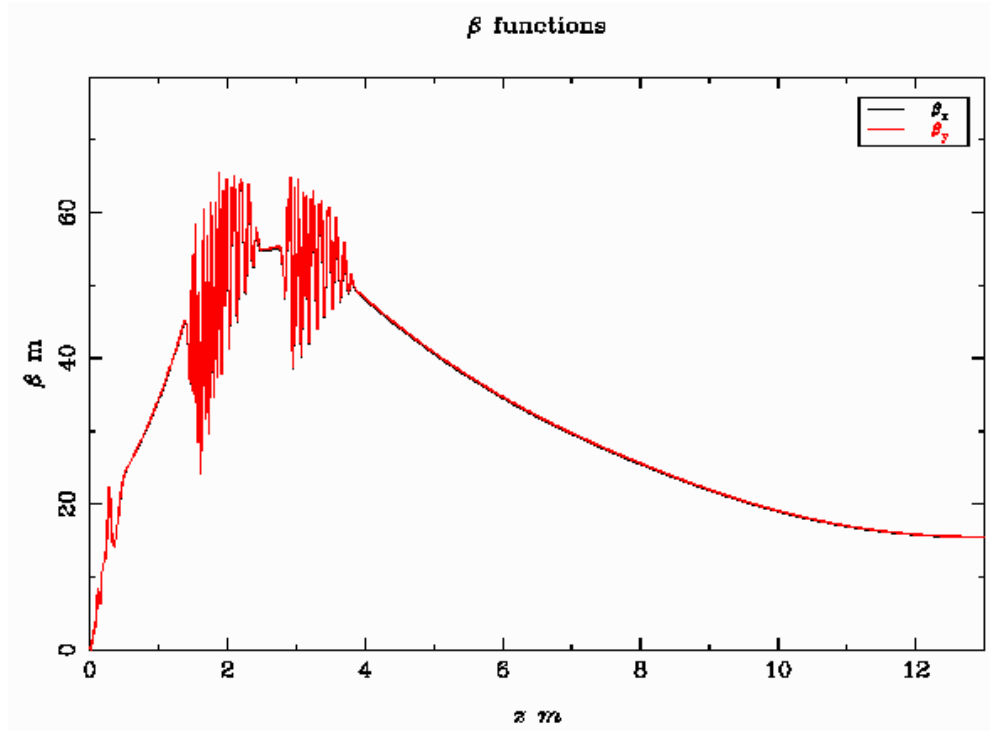
Larmor açısı , $Q = \int_{z_1}^{z_2} \frac{QB}{2\gamma m\beta c}$ ile gösterilir. B manyetik alanı selenoid tarafından sağlanan manyetik alandır. Denklemdaki parametreler kullanılarak katot'dan çıkan elektronlardan elips şeklinde bir demet oluşturulmaya çalışılır. Larmor açısı burada oluşturulacak olan demetin yönünü ifade eder. Denklem'den z yönde ilerlemesinden dolayı denklemin sonucunun daima negatif olduğu görülmektedir. Elektronlar için bir Larmor açısının pozitif değişimi pozitif bir manyetik alan yaratmaktadır. Grafikten selenoid alan değerinin pozitif olduğu sonucuna ulaşılabilmektedir.



Şekil 5.9 İlerleme uzunluğuna göre Larmor açısının değişimi

5.2.8 BETA fonksiyonu

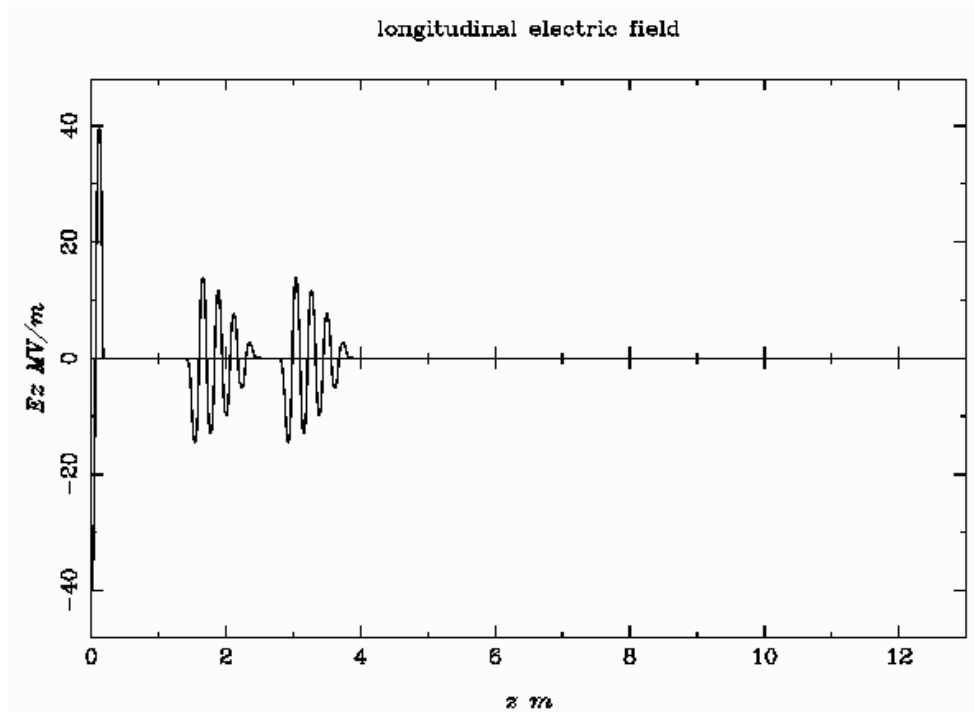
Beta fonksiyonu demet boyutunun rms alınarak, demet ıraksamasında, yayınının beta fonksiyonu tarafından bölünmesiyle değer alır. Elektron demetinin boyutunun ve ıraksamasının optimizasyonu beta fonksiyonunun optimizasyonu ile sağlanır. Beta fonksiyonunu optimize etmek için yayını küçültmek ve sistem boyunca yayınının kontrolünü sağlamak ve elde tutmak gerekir. Demet parametreleri ciddi bir değişim göstermeksizin beta fonksiyonunun değeri 5-50 m arasında olabilir. Beta fonksiyonun optimize etmek için elektron demeti odaklanarak daha yoğun bir hale getirilmelidir. Grafikte beta fonksiyonunun ortalama değeri yaklaşık 30 metre civarındadır. Yayınım, demet boyutu ve demet ıraksama grafikleriyle uyum içersindedir.



Şekil 5.10 Beta fonksiyonunun değişimi. Kırmızı renk y, siyah renk x yönündeki değişimi verir.

5.2.9 Kavite alanı

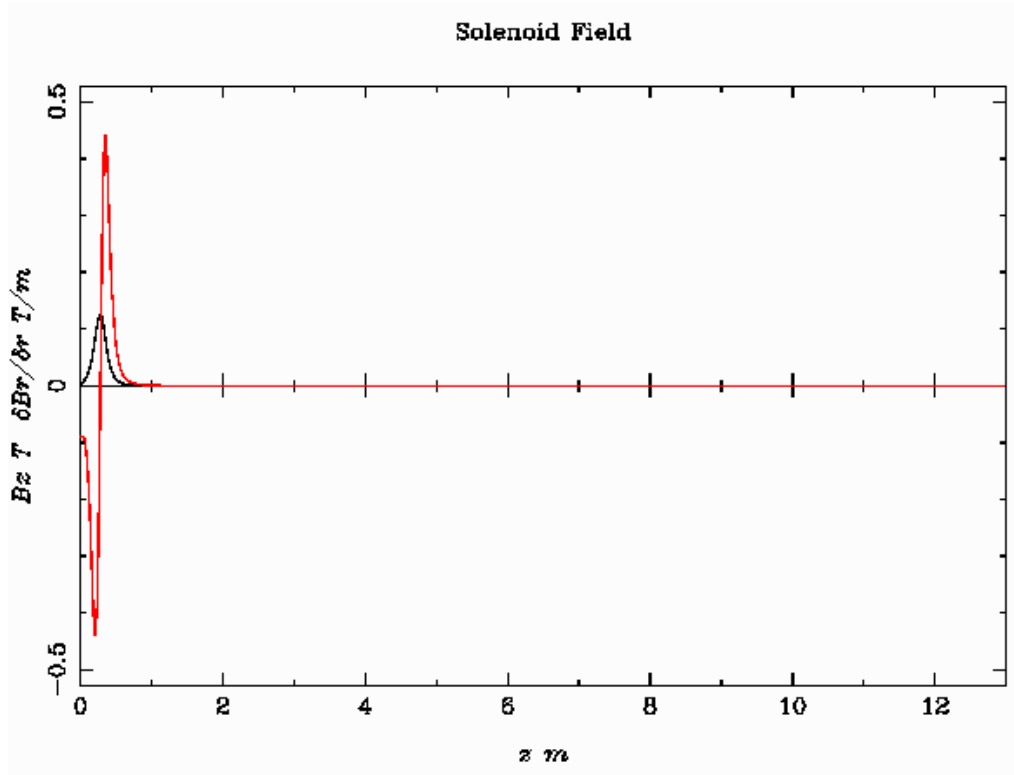
Demet hattı boyunca bütün TM Mod ($B_z=0$ ve E_z ile ilerleyen) kavite alanlarının boylamsal elektrik alanının genliğini gösterir. Grafikte görüldüğü üzere 40 MV/m genliğe ulaşan kısım elektron tabanca içerisindeki 1.5 kavitenin olduğu kısımdır. Daha sonra 2 m’de konumlandırılan ilk hızlandırıcı yapının genliği’de yaklaşık 15 MV/m civarındadır.



Şekil 5.11 Boylamsal olarak elektrik alanının değişimi

5.2.10 Selenoid alanı

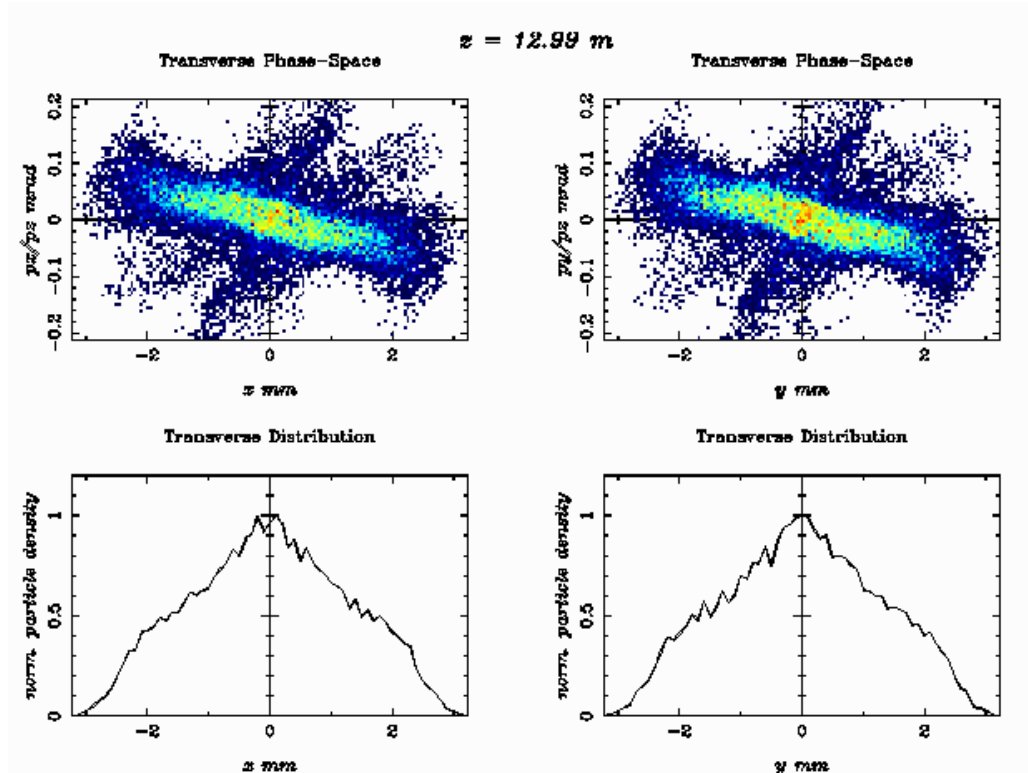
Demet hattı içerisinde bütün selenoidlerin radyal alan gradyentlerini ve boylamsal manyetik alanlarını gösterir. Sadece elektron tabanca içerisine selenoid konulduğundan 1m manyetik alan etkisi görülmektedir. Selenoid alanı için ayarlanan maksimum 0.125 T değerine kadar çıkmaktadır. Bu grafikten selenoidin konumlandırılması ve selenoide uygulanan manyetik alan görülebilmektedir.



Şekil 5.12 Selenoid alanının değişimi

5.2.11 Enine faz uzayı

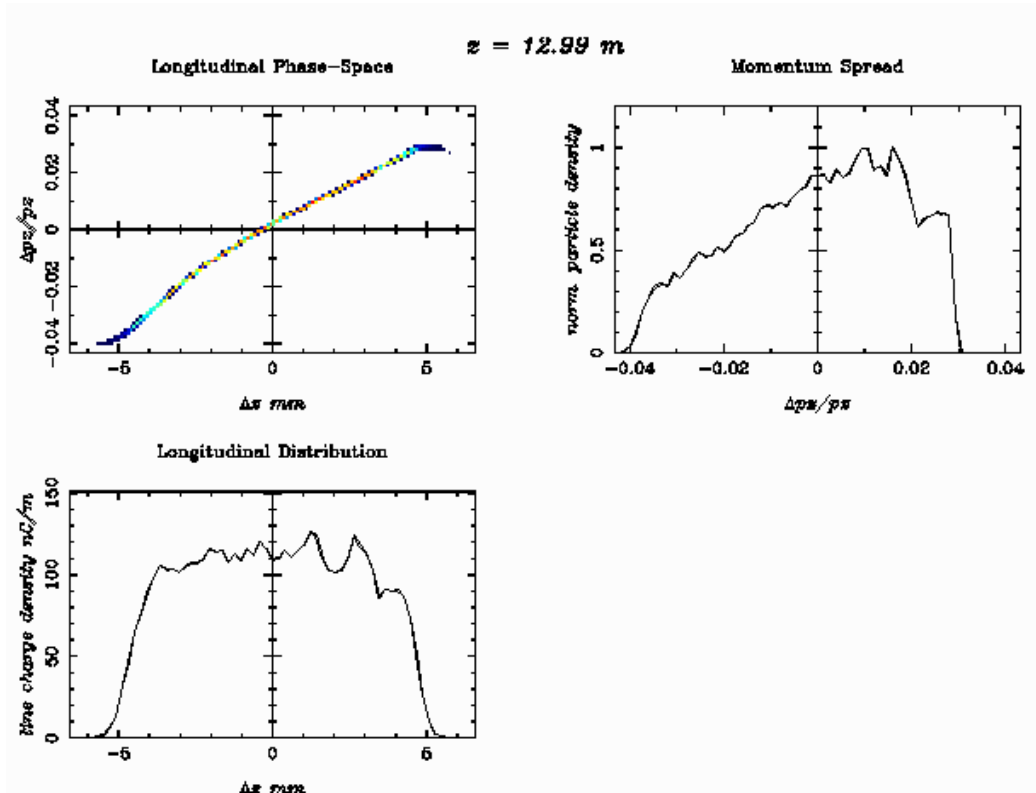
Aşağıdaki grafikler faz uzayı analizlerinin detaylarını göstermektedir. Şekil 5.13 'de üstteki ilk iki grafik enine elektron demetinin demet yayınının dikey ve yatay eksenler üzerindeki görüntüsüdür. En içteki kısım demetin en yoğun olduğu merkezidir. Kırmızı parçacıklar işaretlenmiş parçacıklardır. Yeşil renkli olanlar pasif parçacıklar. En dışardaki koyu mavi parçacıklar da kayıp parçacıklardır. Şekil 5.13 'de Altaki iki grafik ise elektron demetindeki elektronların enine dağılımı, dikey ve yatay eksen etrafındaki dağılımını göstermektedir. Enine demet dağılımı gaussiyen bir yapıya çok yakındır. Bu da demetin dikey ve yatay eksenlerdeki dağılımının iyi olduğunun bir göstergesidir.



Şekil 5.13 Elektron demetinin enine faz uzayındaki davranışı

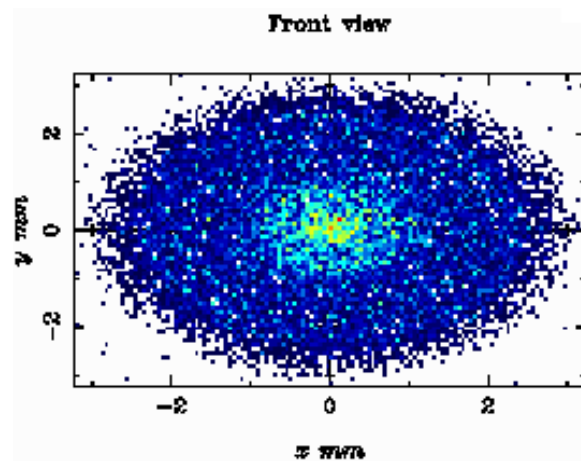
5.2.12 Boylamsal faz uzayı

Demetin ilerleme doğrultusundaki faz uzayı, momentum dağılımı, boylamsal dağılımını göstermektedir. Elektron demetinin boylamsal olarak 10 mm olacak şekilde bir dağılım göstermektedir. Demetin momentum dağılımı, parçacık yoğunluğu arttıkça beklenildiği gibi gaussiyen şekle benzemektedir. İlerleme yönündeki dağılım ise parçacık yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir.



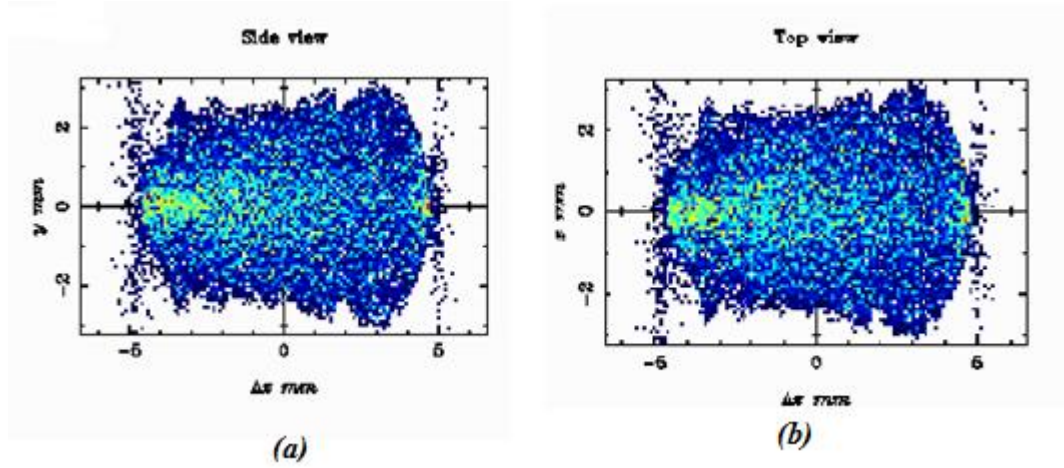
Şekil 5.14 Demetin boylamsal faz uzayındaki davranışı

Grafik demetinin önden bakıldığındaki görüntüsü aşağıdaki grafikte verilmektedir. Demet merkezde yoğun bir yapı oluşturmaktadır.



Şekil 5.15 Enine koordinatlara göre demetin önden görünüşü

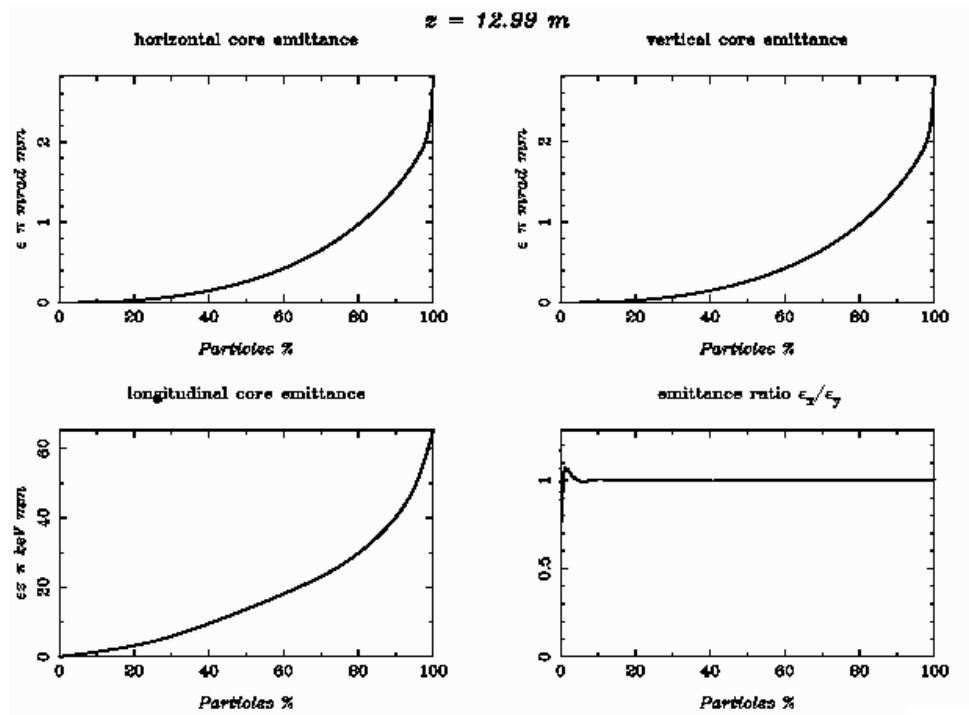
Şekil 5.16 (a) demete yeksenine göre yandan baktığımızdaki görüntüsü ve Şekil 5.16 (b) 'de ise elektron demetine üstten bakıldığındaki görüntüsüdür.



Şekil 5.16 Demetin y-eksenine göre yandan ve x-eksenine göre üstten ilerleme doğrultusuna göre dağılımları

5.2.13 Çekirdek yayını

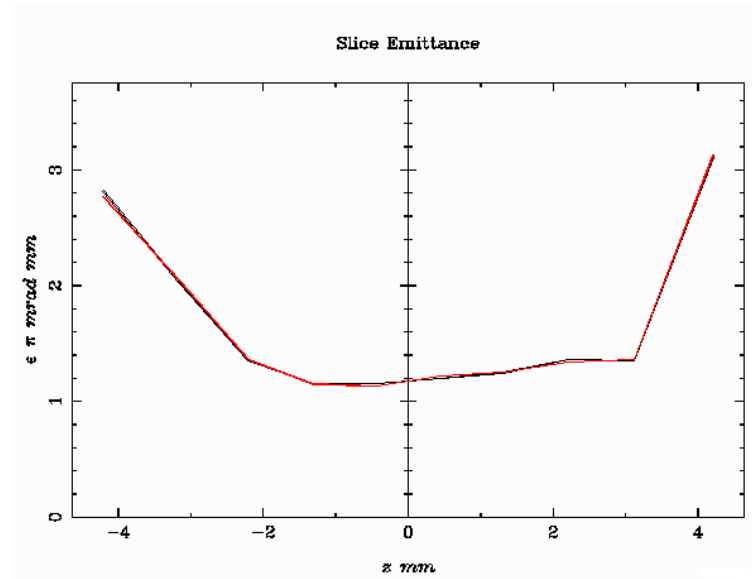
Grafiklerde, parçacık sayısı arttıkça demetin çekirdeğinde x, y ve z eksenleri için demet yayını göstermektedir. Parçacık sayısı arttıkça demetin çekirdeğindeki yayını artmaktadır. Ancak bu artış bütün eksenler üzerinde aynı şekilde olduğundan yayının oranı belli bir artıştan sonra sabit kalmaktadır.



Şekil 5.17 Çekirdek yayınımlarının enine ve boylamsal değişimleri

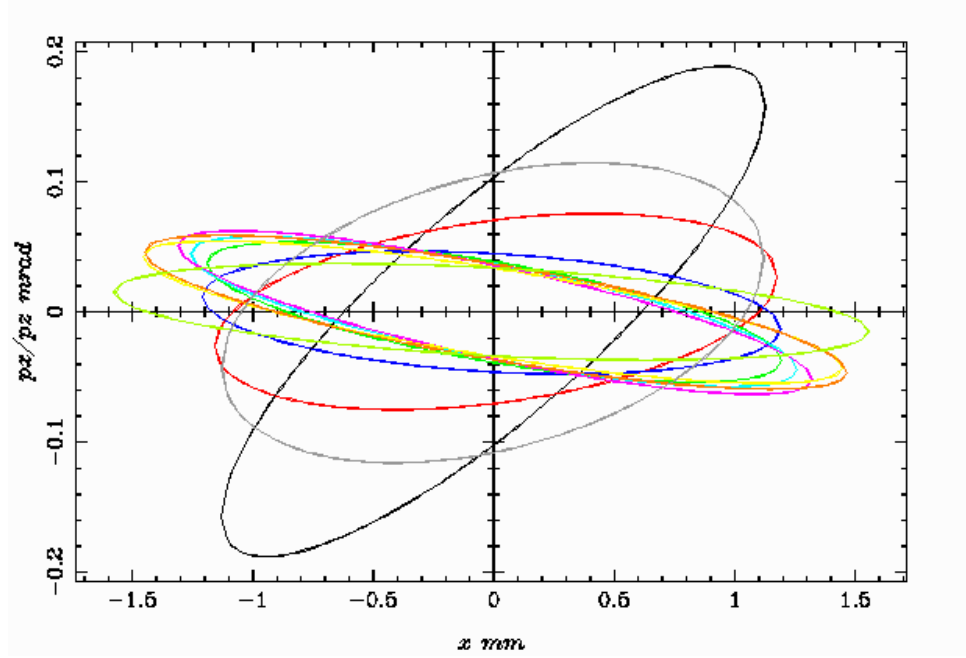
5.2.14 Dilim yayınımları

Elektron demetini dilimlere ayırarak yayınımlarına bakıldığında; 1-3 mm mrad arasında yayılım gösteren bir elektron demetine sahip olduğumuz görülmektedir.



Şekil 5.18 Dilimsel yayılım

Dilimlerde, demet yayınının oluşturduğu elipsleri göstermektedir. Oluşturulan demetlerin boyu 4 mm'yi geçmemektedir.



Şekil 5.19 Demet yayınına dilimsel bakıldığında elipslerin büyüklükleri

6. SONUÇLAR

Bu tezde, serbest elektron lazeri kullanılarak elde edilecek olan 1-150 nm dalga boylu lazer için elektronların üretilmesi ve ilk hızlandırmanın elektronlara verilerek hızlanmalarının sağlanması ve diğer davranışlarının boylamsal ve enlemsel olarak gelişimi gözlenmiştir. Elektron tabancası olarak kullanılan fotokatot Cs₂Te materyalinden yapılmış olup, ND:YLF lazeri üzerine gönderilerek elektron sökülüştür. ND:YLF lazerinin dalga boyu 1047 ve 1053 nm değerindedir. Demet bölücü ile 4 defa bölünmek suretiyle elektron sökmek için kullanılmaktadır. Elektronlar elde edilmiş ve yapılan modelleme çalışmalarında Astra ve Poisson/Superfish kullanılmış, 20 000 parçacık için modellemeler yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur. Elektron demetinin yayını, büyüklüğü, enine ve boyuna ilerlemesi, açısal davranışları dünya'daki serbest elektron lazer laboratuvarlarının değerleriyle uyumluluk göstermektedir.

Çizelge 6.1 L-bant RF elektron tabanca için elektron parametreleri

Parametre	Değer
Demet Enerjisi (GeV)	1 GeV
Elektron Tabanca	Fotokatot RF elektron tabanca
Normalize Yayınım (mm mrad)	2.8
Termal Sıcaklık Tahmini (mm. mrad)	< 0.2
Bunch Yüğü (nC)	1 nC
Bunch Akımı (KA)	2
Bunch Frekansı (MHP)	9
Bunch uzunluğu σ_z (mm)	~ 1.3
Boylamsal Lazer Profili	Gausssan
Lazer Puls Uzunluğu (ps)	1 (FWHM)
Tekrarlama Oranı (Hz)	10
Elektron Tabancadan Sonraki Demet Enerjisi (MeV)	5
Rms Demet Uzunluğu (mm)	8
Enerji Dağılımı	0.2 %
Katot Materyali	Cs ₂ Te
Katot Yarıçapı (mm)	~ 1.2
Sezyum İş Fonksiyonu (eV)	
RF Elektron Tabancadaki Maksimum Elektrik Alan (MV/m)	40
Lazer Materyali	ND:YLF
Lazer Dalga Boyu (nm)	263
Elektron Tabanca Hücre Sayısı	1.5 –hücreli
Kavite Materyali	Bakır kaplamalı neobyum
RF Frekansı (GHz)	1.3
Kavite Yarım Hücre Uzunluğu (cm)	5.7535
Solenoid Uzunluğu (cm)	17
Ana solenoid Max.Alanı (T)	0.125
İlk Hızlandırıcı Fazı (°)	15.0
İlk Hızlandırıcı Gradyenti (MV/m)	14.5

KAYNAKLAR DİZİNİ

- [1] Barbiero,A., Chevallay,E., Elsener,K. and Losito,R.,2007, Cesium-Telluride Photocathode No. 166, European organization for nuclear research , 8 p.
- [2] Billen, H. J and Young,M. L.,2006, Poisson Superfish Manuel, Los Alamos National Labratory ,614 p.
- [3] Cultrera.L., 2011, Overwiev of photocathodes for high brighness beams, Eurofel workshop on photocathodes for RF guns ,31 p.
- [4] Dowell, D.H.,2011, Photocathode Properties and Requirements for Photoinjectors, Eurofel workshop on photocathodes for RF guns, 20 p.
- [5] Dowell, D.H.,2011, Photocathode Properties and Requirements for Photoinjectors, Eurofel workshop on photocathodes for RF guns, 20 p.
- [6] Floettmann, K., 2011 Astra versiyon 3.0,Desy, Germany,103 p.
- [7] Ganter,R ., Abela,R., Braun,H.H., Garvey,T., Patterson,B., Pedrozzi,M and Reiche,S., 2010,SwissFEL conceptual desing report,Paul Scherrer Institut., Switzerland, 132 p.
- [8] Griffiths, D.J ,1999, İntroduction to electrodynamics
- [9] Hill,C.H., 1994, Ion and elektron source , European organization for nuclear research cern - ps division , 19 p
- [10][http://hasylab.desy.de/facilities/sr_and_fel_basics/fel_basics/tdr_from_synchrotron radiation _ to_a_sase _fel/index_eng.html](http://hasylab.desy.de/facilities/sr_and_fel_basics/fel_basics/tdr_from_synchrotron_radiation_to_a_sase_fel/index_eng.html)
- [11] http://photocathodes.chess.cornell.edu/wiki/Cathode_properties#Metal_Cathodes
- [12] http://photoinjector.web.cern.ch/photoinjector/cathodes_alcalines.htm
- [13] Jensen,E., 2010, RF cavities, CERN accerelator scholl ,11-58 p.
- [14] Lazer teknolojileri uygulama ve araştırma merkezi , Lazerler, Lataryum ,2006, 4 p.
- [15] Lewellen, J. W., Bluem,H., Burrill,A., Grimm, T. L., Kamps, T ., Legg, R ., Lui, K ., Rao,T ., Smedley , J ., Teichert and J ., Zhang, S ., 2009, ERL 2009 WG1 Summary Paper: Drive Lasers and RF Gun Operation and Challenges, Proc. ERL Workshop, 11p.
- [16] Loch, R.A., 2005 , Cesium-Telluride and Magnesium for high quality photocathodes, Care- Thesis, 100 p.
- [17] Mainman,T.H., Ruby laser systems, United States patent office, 1947
- [18] Materlik,G., Tschentscher,T., The X-ray free elektron laser, Tesla technical desing report,2010, 343 p.
- [19] Mete,Ö., 2011, Study and experimental characterization of a novel photo injector for the clic drive beam, École Polytechnique Fédérale De Lausanne, 175 p.
- [20] Palmer,T.D., 1998, The next generetion photoinjector , Standford University , 202 p.
- [21] Schubert,S., 2011, Cathode preparation for high average current ERL accelerator, Eurofel workshop on photocathodes for RF guns , 23 p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- [22] Sertore,D., 2011, High Quantum efficiency photocathodes at INFN, Eurofel workshop on photocathodes for RF guns, 44 p.
- [23] Sertore,D., Schreiber,S., Floettmann,K., Stephan,F., . Zapfe,K., and Michelato, P., 2000, First operation of cesium telluride photocathodes in the TTF injector RF gun, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 5 p.
- [24] tr.wikipedia/wiki/Lazer
- [25] Virgo,M., 2002, Dispenser photocathodes for accelerator, University of Maryland, 55 p.