

Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Tesisi' ne Yönelik
Prototip İyon Kaynağı Tasarımı

Hakan Çetinkaya

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Mayıs 2016



Prototype Ion Source Design Intended for
Turkish Accelerator Center Proton Accelerator Facility

Hakan Çetinkaya

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

May 2016

Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Tesisi' ne Yönelik
Prototip İyon Kaynağı Tasarımı

Hakan Çetinkaya

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca

Fizik Anabilim Dalı

Nükleer Fizik Bilim Dalında

DOKTORA TEZİ

Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Emel Alğın

“Bu Tez çalışması Eskişehir Osmangazi Üniversitesi BAP 2015-19A201, 2015-19009 ve
DPT DPT2006K-120470 no’lu projeleri çerçevesinde desteklenmiştir.”

May 2016

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Hakan ÇETİNKAYA' nın DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Tesisi’ ne Yönelik Prototip İyon Kaynağı Tasarımı” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Emel ALĞIN

İkinci Danışman : -

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. Emel ALĞIN

Üye : Prof. Dr. Atalay KÜÇÜKBURSA

Üye : Doç. Dr. Kaan MANİSA

Üye : Doç. Dr. Sertaç EROĞLU

Üye : Yrd. Doç. Dr. Derya PEKER

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Emel ALĞIN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı Tesisi' ne Yönelik Prototip İyon Kaynağı Tasarımı” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 20/05/2016

Hakan ÇETİNKAYA

İmza

ÖZET

İyon kaynağı proton hızlandırıcıları için belirlenen özelliklerde iyonları üreten hızlandırıcı yapısına aktaran yapıya verilen isimdir, bir deyişle proton hızlandırıcısının kalbidir. Öncelikle iyon kaynağının hızlandırıcının uygulama alanlarına göre tercih edilmesi, daha sonra iyon kaynağının doğru çalıştırılması gerekmektedir; aksi takdirde tesisin geri kalan kısımları ihtiyaç duyulan özellikte demete sahip olamaz ve hızlandırıcı kullanışsız hale gelir. Ülkemizde MW gücünde bir proton hızlandırıcısı kurulması için yol haritası hazırlamayı kendine amaç edinen Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcı Tesisi Projesi kapsamında, ülkemizde bir proton hızlandırıcısı kurulması durumunda kullanılabilecek iyon kaynakları araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonucunda doğrusal proton hızlandırıcıları için yüksek akımda H^+ iyonu üretebilen mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının tesisimizde kullanılabileceği belirlenmiştir. Bu kapsamda bu kaynak türü hakkında tecrübe edinmek için bir prototip iyon kaynağı tasarımı ve üretimine karar verilmiştir.

Bu tez çalışmasında 2,45 GHz frekansında mikrodalga deşarj iyon kaynağı tasarımı için simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Simülasyon çalışmalarından sonra parçalar üretilip montajı gerçekleştirilmiştir. İyon sökme sisteminde farklı plazma elektrot deliği yarıçapı bulunduran iki farklı plazma elektrot tasarımı kullanılmıştır. Plazma elektrot deliklerinden birisi 2 mm yarıçapa, diğeri 4 mm yarıçapa sahiptir. Bu çalışma sonucunda 2 mm plazma elektrotu deliği bulunan sistemde 8 kV iyon sökme voltajı altında 0,75 mA demet akımı ölçülmüş, diğeri 7 kV iyon sökme voltajı altında 5,2 mA demet akımı ölçülmüştür. Demet akımı ölçüm işlemleri plazma odasından 18 cm uzakta Faraday kabı kullanarak gerçekleştirilmiştir. Atma tekrarlama frekansının 50 Hz olduğu belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: proton hızlandırıcısı, mikrodalga deşarj iyon kaynakları, 2,45 GHz, prototip.

SUMMARY

Ion source is the name of the structure for proton accelerators which is used to produce and transfer ions to beamline with desired properties, in other words it is the heart of proton accelerator. Firstly, proper ion source determination must be done with respect to application areas of accelerator, later it has to be operated properly; otherwise the rest of accelerator structure does not get the beam with necessary properties and accelerator becomes useless. We conduct a research to determine suitable ion sources for future proton accelerators which will be built in our country. This research is done under the Turkish Accelerator Center Proton Accelerator Facility Project which has an aim to prepare a road map to establish MW power proton accelerator in our country. It is determined that microwave discharge ion source can be used for our facility which produces high H^+ currents for proton linear accelerators. It is decided to design and to produce a prototype ion source to gain experience.

Simulation studies were performed to design 2.45 GHz microwave discharge ion source in this thesis study. Components were fabricated and assembled. Two different plasma electrode designs are used with different plasma electrode hole radius in the extraction system. One of the plasma electrode hole has 2 mm radius and the other has 4 mm radius. A beam current of 0.75 mA is measured under 8 kV extraction voltage by using 2 mm plasma electrode hole system and a beam current of 5.2 mA is measured under 7 kV extraction voltage by using 4 mm plasma electrode hole system. Beam current measurements were performed 18 cm away from the plasma chamber by using Faraday cup. Pulse repetition rate is determined to be 50 Hz.

Keywords: proton accelerator, microwave discharge ion source, 2.45 GHz, prototype.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarımnda benden desteğini esirgemeyen, beni yönlendiren ve yardımcı olan Tez Danışmanım Hocam Prof. Dr. Emel ALĞIN' a teşekkürü bir borç bilirim.

Beni iyon kaynakları konusunda çalışmaya ilk başta yönlendiren Hocam Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN' a, deneysel çalışmalarımnda her zaman yol gösteren Hocam Dr. Ali ALAÇAKIR' a, mikrodalga deşarj iyon kaynakları konusunda yardımcı olan INFN – LNS İyon Kaynağı grubuna, iyon kaynakları ve simülasyon programları ile ilgili ilk başta bize yardımcı olan Dr. Ashiq DOGAR ve Dr. Munir Khan' a teşekkür ederim.

Simülasyon ve deneysel çalışmalarımnda her zaman yardımcı olan arkadaşım Görkem TÜREMEN' e, deneysel çalışmalarımnda beni destekleyen arkadaşlarım Ümit DOĞAN, Ulaş IŞIK, Berat BAYTAR, Zeynep OLUK, Sertaç AKGÜN, Berna ATAN ve Semra ATAN' a teşekkür ederim. Malzeme üretimi esnasında bize yardımcı olan Demiray Makine, Kalitek Makine ve Enmak' a teşekkür ederim.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Bölümü Araştırma Görevlisi Celal AŞICI' ya Doktora Eğitimim boyunca yardımları için teşekkür ederim.

Benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri 2015-19A201 No' lu “İyon Kaynağı Elektrot Tasarımı ve Simülasyonu”, 2015-19009 No' lu “Mikrodalga Deşarj İyon Kaynağı Tasarımı ve Prototip Yapımı”, ve DPT DPT2006K-No' lu “Türk Hızlandırıcı Merkezi Teknik Tasarımı ve Test Laboratuvarları” isimli projeler tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xviii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xix
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. PLAZMA FİZİĞİ TEMEL TANIMLARI.....	20
3.1. İyon Kaynakları ve Plazma Fiziği	20
3.2. Plazma.....	20
3.3. Temel Plazma Parametreleri.....	21
3.3.1. Parçacık yoğunluğu.....	21
3.3.2. İyonlaşma derecesi, sanki nötrlük	22
3.3.3. Hız, enerji, sıcaklık	22
3.4. Plazma Kriterleri.....	24
3.4.1. Debye uzunluğu ve plazma kılıfı	24
3.4.2. Plazma kılıfı (sheath)	25
3.4.3. Plazma parametresi	26
3.4.4. Plazma salınımları.....	27
3.5. Çarpışmalar	28
3.6. İyonlaşma.....	28
3.7. Manyetik Alan Etkileri	30
3.8. Plazmada Dalga Yayılımı	33
3.8.1. B_0 ’ a dik elektrostatik elektron salınımları.....	34
3.8.2. Elektrostatik Bernstein dalgaları	35
3.8.3. Manyetik alanın yokluğunda elektromanyetik dalgalar.....	35
3.8.4. Manyetize olmuş plazmada elektromanyetik dalgalar	36

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.8.4.1. Manyetik alana dik yöndeki dalgalar	36
3.8.4.2. Manyetik alana paralel yöndeki dalgalar.....	37
3.9. Mikrodalga İyon Kaynaklarında Plazma Oluşumu	39
3.9.1. ECR kaynakları	39
3.9.2. Rezonansın olmadığı durumlar ($B < B_{\text{ECR}}$ ve $B > B_{\text{ECR}}$)	41
4. İYON SÖKME SİSTEMİ	46
4.1. Plazma Menisküsü	47
4.2. Child Langmuir Kanunu	48
4.3. Pierce Geometrisi.....	49
4.4. Bastırma Elektrotu	50
4.5. Plazmadan Pozitif İyon Sökülmesi	51
4.6. Einzel Lens	52
4.7. Vakum.....	53
4.8. Paschen Eğrisi.....	54
4.9. Elektrotlar Arasına Uygulanacak Voltaj Değeri.....	56
5. MATERYAL VE YÖNTEM	58
5.1. Mikrodalga Transfer Hattının Kurulması	59
5.1.1. Magnetron kafası.....	62
5.1.2. Saplamalı ayarlayıcı (stub tuner)	64
5.1.3. WR340' tan WR284' e geçiş	67
5.1.4. Elektriksel yalıtım (DC break).....	69
5.1.5. Vakum penceresi	71
5.1.6. Mikrodalga transfer hattı genel görünümü.....	72
5.2. Plazma Odası	73
5.3. Elektromıknatıs Tasarımı.....	73
5.3.1. Simülasyon.....	74
5.3.2. Üretim	76
5.3.3. Manyetik alan ölçümü.....	78

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
5.4. Elektrot Tasarımı	80
5.4.1. Simülasyon.....	80
5.4.2. Elektrotların üretimi	83
5.5. Faraday Kabı.....	86
5.6. Montaj.....	86
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	88
6.1. Vakum Testi.....	88
6.2. Yüksek Voltaj Sistemlerinin Testi	89
6.3. Plazma Oluşumu	92
6.4. 2 mm Yarıçaplı Plazma Elektrotlu İyon Sökme Sistemi	93
6.4.1. 6,5E-5 mbar.....	94
6.4.2. 5,3E-5 mbar.....	96
6.4.3. 3,2E-5 mbar.....	97
6.4.4. Manyetik alan optimizasyonu	98
6.5. 4 mm Yarıçaplı Plazma Elektrotlu İyon Sökme Sistemi	103
6.5.1. 2,4E-5 mbar.....	104
6.5.2. 4,4E-5 mbar.....	106
6.5.3. 5E-5 mbar.....	107
6.5.4. 5,5E-5 mbar.....	108
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	110
KAYNAKLAR DİZİNİ	115
EK AÇIKLAMALAR	122
Ek Açıklama - A: İyon Kaynaklarıyla İlgili Bu Çalışmada Kullanılan İngilizce	
Terimlerin Türkçe Karşılıkları.....	122
ÖZGEÇMİŞ	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. THM-PHT kullanıcı toplantısı sonucu kurulması düşünülen tesisler	2
1.2. Proton enerjisi ve proton akımına göre uygulama alanları	3
2.1. İyon kaynağı genel yapısı	5
2.2. İyon kaynağı temsili gösterimi	6
2.3. CRNL mikrodalga kaynağı	8
2.4. 1977'de Sakudo vd. tarafından yapılan mikrodalga iyon kaynağı	9
2.5. Ishikawa vd. tarafından 1984 yılında yapılan kalıcı mıknatıs iyon kaynağı	10
2.6. Taylor ve Wills tarafından 1991 yılında yapılan a) MDIS ve b) manyetik alan profili	12
2.7. Taylor ve Mouris tarafından 1993 yılında yapılan a) MDIS ve b) manyetik alan profili	13
2.8. Sherman vd. tarafından geliştirilen a) iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili	14
2.9. SILHI iyon kaynağının 3 boyutlu görünümü	15
2.10. a) TRIPS iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili	16
2.11. VIS mikrodalga hattı	17
2.12. VIS a) manyetik alan sistemi ve b) manyetik alan profili	18
2.13. Mikrodalga penceresi konumları	18
3.1. Doğada ve teknolojide görülen çeşitli plazmaların yoğunluk, sıcaklık ve debye uzunluğuna göre sınıflandırılması	24
3.2. Plazma kılıfı	26
3.3. B manyetik alanı etkisi altında yükü q , hızı v olan bir parçacığın hareketi	31
3.4. a) Dönme hareketi ve b) helisel yörünge	32
3.5. B_0 ' a dik yönde hareket eden boyuna düzlem dalgaların geometrisi	34
3.6. Anizotropik plazmada dalga yayılımı	36
3.7. X dalgasının eliptik olarak polarize olması	37
3.8. Manyetize olmuş plazmada dalga yayılımında olası polarizasyonlar	38
3.9. Manyetize olmuş plazmaya elektromanyetik dalgaların enjekte edilmesi	39
3.10. 1991 yılında Geller tarafından yapılan ECR iyon kaynağı şematik gösterimi	41

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
3.11. a) İlk mikrodalga deşarj iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili	42
4.1. İki elektrotlu iyon sökme sistemi	46
4.2. Üç farklı menisküs şekli	48
4.3. Elektronların Pierce geometrisi kullanarak sökülmesi	50
4.4. Bastırma elektrotu gösterimi	50
4.5. Pozitif iyon sökme işlemi	52
4.6. Einzel lens genel yapısı	52
4.7. Einzel lens modları, a) yavaşlatma – hızlandırma modu, b) hızlandırma – yavaşlatma modu	53
4.8. Hidrojen molekülünün oda sıcaklığında ortalama serbest yolu	55
4.9. Hidrojen için Paschen eğrisi	56
5.1. Tasarlanan mikrodalga deşarj iyon kaynağı genel görünümü	58
5.2. Mikrodalga transfer hattı 3 boyutlu çizimi	59
5.3. Dikdörtgen dalga kılavuzunun temsili şekli	61
5.4. Tavsiye edilen magnetron yerleştirme şekli	62
5.5. Magnetron kafası simülasyonunun kesit alanının görünümü	63
5.6. Magnetron kafası yansıma parametresi	63
5.7. Magnetron kafası imalatı	64
5.8. Magnetron anteni dalga kılavuzu içinden görünümü	64
5.9. Basit anlatımla saplamalı ayarlayıcı örneği	65
5.10. Simülasyon programında saplamalı ayarlayıcı kesit görünümü	65
5.11. Saplamalı ayarlayıcı yansıma ve iletim parametreleri	66
5.12. Saplamalı ayarlayıcı a) üstten, b) yandan, c) içten görünümü	66
5.13. WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu	68
5.14. CST yansıma ve iletim parametreleri	68
5.15. Üretimi gerçekleştirilen WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu	69
5.16. Maimone vd. tarafından INFN-LNS' te yapılan elektriksel yalıtım tasarımı	69
5.17. Elektriksel yalıtım simülasyon sonucu	70

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.18. Elektriksel yalıtım	71
5.19. Vakum penceresi	71
5.20. Mikrodalga transfer hattının simülasyonu	72
5.21. Mikrodalga transfer hattı üstten görünümü	72
5.22. Plazma odası	73
5.23. a) TRIPS ve b) VIS manyetik alan profili	74
5.24. Elektromıknatısların 3 boyutlu görünümü	75
5.25. Manyetik alan simülasyon sonucu	75
5.26. Elektromıknatıs içerisinde bulunan bakır sarımlar	76
5.27. Elektromıknatıs kapağı	76
5.28. Elektromıknatısların yandan görünüşü ve su kanalları	77
5.29. Elektromıknatıs kapaklarının sırla boyanmış hali	77
5.30. Elektromıknatısın dıştan görünüşü, sırla boyanmış hali	78
5.31. Manyetik alan ölçümü esnasında çekilmiş bir fotoğraf	78
5.32. Manyetik alan deneysel ölçüm sonuçları	79
5.33. Manyetik alan karşılaştırması	79
5.34. IBSIMU programına tanımlanan manyetik alan profili	80
5.35. IBSIMU programı kullanılarak yapılan 2 elektrotlu tasarımda demetin plazma elektrot voltajına göre davranışı	81
5.36. İki elektrotlu tasarım	82
5.37. Simülasyonda iki elektrotlu tasarıma einzel lens sisteminin eklenmesi a) elektrotların isimlendirilmesi ve b) uygulanan voltaj değerleri	83
5.38. Elektriksel potansiyel	83
5.39. İyon sökme kısmı üç boyutlu çizimi	84
5.40. Alumina	84
5.41. Plazma elektrotu	85
5.42. İmalatı gerçekleştirilen a) toprak elektrotu, b) ve c) einzel lensler	85
5.43. Toprak elektrotu, einzel lensler ve faraday kabı	85

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.44. Demet akımı ölçümü için kullanılan devre	86
5.45. Mikrodalga hattı, plazma odası ve iyon sökme bölgesinin montajı	87
5.46. İyon kaynağının birleştirilmiş hali	87
6.1. Vakum pompasının bağlandığı nokta	89
6.2. İyon sökme sistemi	90
6.3. Plazma oluşumu	92
6.4. Deneysel çalışmada kullanılan elektrot tasarımı	93
6.5. 6,5E-5 mbar' da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde	94
6.6. 6,5E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde	95
6.7. 6,5E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 2,5 ms ölçeğinde	96
6.8. 5,3E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde	96
6.9. 5,3E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 2,5 ms ölçeğinde	97
6.10. 3,2E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde	97
6.11. 3,2E-5 mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 2,5 ms ölçeğinde	98
6.12. Manyetik alan profilinin demet akımına etkisi; a) Manyetik alan profili A, b) Manyetik alan profili B	99
6.13. Manyetik alan profili B	100
6.14. Manyetik alan profili B kullanılarak 3,2E-5 mbar' da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri	100
6.15. Manyetik alan profili B kullanılarak 3,2E-5 mbar' da plazma elektrotuna ve einzellense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri	101

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
6.16. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2E-5$ mbar' da plazma elektrotuna ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde	102
6.17. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2E-5$ mbar' da plazma elektrotuna ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 1 ms ölçeğinde	102
6.18. $6E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri (manyetik alan profili: rezonansın altı)	103
6.19. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sistemi	104
6.20. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sisteminin simülasyon sonucu	104
6.21. $2,4E-5$ mbar' da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde	105
6.22. $2,4E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde	105
6.23. $2,4E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 250 μ s ölçeğinde	106
6.24. $4,4E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde	106
6.25. $4,4E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 250 μ s ölçeğinde	107
6.26. $5E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde	107
6.27. $5E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 250 μ s ölçeğinde	108
6.28. $5,5E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde	108

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)**Sekil****Sayfa**

- 6.29. $5,5E-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması,
osiloskopta x eksenini $250 \mu s$ ölçeğinde 109



ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
3.1. Elektronların dahil olduğu bazı gaz fazı reaksiyonları	29
3.2. İyonların ve nötrlerin dahil olduğu gaz fazı reaksiyonları	30
4.1. Vakum seviyeleri ve karşılık gelen basınç aralığı	54
A.1. İyon kaynaklarıyla ilgili bu çalışmada kullanılan İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları.....	122

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
B	Manyetik alan
c	Işık hızı
d	İki elektrot arası uzaklık
e	Elektron yükü
E	Elektrik alan
eV	Elektron volt
f	Mikrodalga frekansı
f_c	Kritik frekans
F	Lorentz kuvveti
G	Gauss
H^+	Hidrojen +
Hz	Hertz
j_{CL}	Child Langmuir kanununa göre akım yoğunluğu
I_{CL}	Child Langmuir kanununa göre akım
$\vec{k}$	Dalga vektörü
k_B	Boltzmann sabiti
KE	Parçacığın kinetik enerjisi
kV	kilo Volt
kW	kilo Watt
l	Ortalama serbest yol
L	Plazma ölçüsü
m	Parçacık kütlesi
mA	mili Amper
mT	mili Tesla
n	Parçacık yoğunluğu
n_e	Plazma elektron yoğunluğu
n_i	Plazma iyon yoğunluğu
n_{kritik}	Kritik yoğunluk
n_n	Plazma nötr yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklamalar</u>
N	Parçacık sayısı
N_D	Debye küresi içerisindeki ortalama parçacık sayısı
P	Sinyalin toplam periyodu
q	Yük
Q_i	İyon yük durumu
S_{11}	Yansıma parametresi
S_{21}	İletim parametresi
T	Sinyalin aktif olduğu süre
T_e	Elektron sıcaklığı
T_i	İyon sıcaklığı
v	Parçacık hızı
v_B	Bohm hızı
$\bar{v}_e$	Elektronların ortalama termal hızı
$\bar{v}_i$	İyonların ortalama termal hızı
V	Elektriksel potansiyel
ω	Açısal frekans
ω_c	Siklotron frekansı
ω_h	Üst hibrit frekansı
ω_p	Plazma frekansı
ω_{pe}	Elektron plazma frekansı
ω_{pi}	İyon plazma frekansı
λ	Dalga boyu
λ_D	Debye uzunluğu
ε_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
τ_n	Ortalama serbest zaman
σ	Tesir kesiti
ρ	Larmor yarıçapı
$\%D$	Sinyal oranı

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar

CEA
CRNL
EB dalgaları
EBIS
ECR
ECRIS
ESS
IBSIMU
INFN-LNS

LANL
MDIS
MEVVA
OFHC
RF
RFQ
SILHI
TE
TM
THM – PHT
TRASCO

TRIPS
VIS

Açıklamalar

Fransa Atom Enerjisi Komisyonu
Chalk River Ulusal Laboratuvarı
Elektrostatik Bernstein dalgaları
Elektron demet iyon kaynağı
Elektron siklotron rezonans
Elektron siklotron rezonans iyon kaynağı
Avrupa Spallasyon Kaynağı
İyon demeti simülatörü
İtalya Nükleer Fizik Ulusal Enstitüsü Güney Ulusal Laboratuvarı
Los Alamos Ulusal Laboratuvarı
Mikrodalga deşarj iyon kaynağı
Metal buharı vakum ark iyon kaynağı
Oksijensiz yüksek iletkenlikte bakır
Radyo frekans
Radyo frekans dört kutuplusu
Yüksek şiddetli hafif atom iyon kaynağı
Enine elektrik modu
Enine manyetik modu
Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcı Tesisi
Nükleer atık dönüşümü için hızlandırıcı tabanlı sistemlerde araştırma ve geliştirme amacı olan proje
Nükleer atık dönüştürme projesi iyon kaynağı
Çok yönlü iyon kaynağı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Atomik ya da moleküler yapıdaki maddelerden yüklü iyonlar üretmek için kullanılan elektromanyetik özelliklere sahip teknolojik aygıtlara iyon kaynağı denir. İyon kaynakları yüklü parçacıkları hızlandıran bütün teknolojik sistemlerin ilk kısmını oluşturur (Bailey, 2013b).

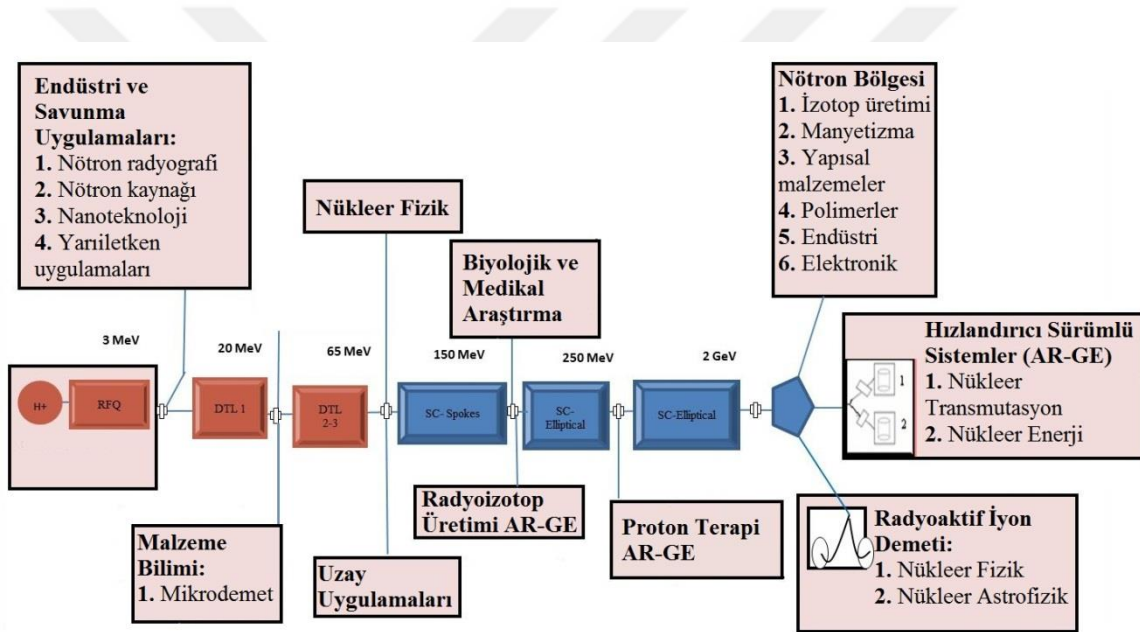
İyon kaynakları hızla gelişen uygulamalı bir bilim ve teknoloji alanıdır. İyon kaynaklarının uygulamaları başta hızlandırıcı fiziği olmak üzere birçok alanda görülmektedir: atom fiziği, plazma fiziği ve kimyası, nükleer fizik, kütle spektroskopisi, hızlandırıcılar, izotop ayırıştırma, kontrollü termonükleer füzyon, radyasyon kimyası, iyon aşılama, mikroanaliz ve mikrofabrikasyon. Hızlandırıcı fiziği ve teknolojileri ile malzeme bilimi, sağlık fiziği ve nükleer enerji gibi birçok alanda bilime ve teknolojiye yenilik getirecek çalışmalar yapmak mümkün olmaktadır. Bu alanlara uygulanabilirliğinden dolayı proton hızlandırıcıları en çok tercih edilen parçacık hızlandırıcıları arasında yer almaktadır.

Hızlandırıcılarda hangi tür iyon kaynağı kullanılacağı, hızlandırılacak olan parçacık tipine ve parçacıkların demet akımına bağlıdır. Parçacık tipi ve demet akımı, hızlandırıcının uygulama alanlarına göre belirlenir. Parçacık hızlandırıcılarının demet kalitesi, iyon kaynağının performansı tarafından belirlenmektedir. İyon kaynağının kararlılığı ve ömrü proton hızlandırıcı tesisi için ayrı bir öneme sahip olmaktadır.

İyon kaynakları üzerine çalışmalarımız, Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcı Tesisi (THM – PHT) Projesi kapsamında başlamıştır. Türk Hızlandırıcı Merkezi Projesi, Ankara Üniversitesi tarafından koordine edilen ülkemizde birçok üniversitenin işbirliği ile sürdürülen, Kalkınma Bakanlığı tarafından desteklenen bir projedir. Projenin esas bilimsel amacı, ilk adım olarak ülkemizde serbest elektron lazerini hayata geçirmektir. Bu projeye bağlı olarak aynı esnada dört farklı tesisin planlamasına başlanmıştır. THM – PHT Projesi, bu projenin alt projelerinden birisidir. THM – PHT Projesinin amacı, ülkemizde MW gücünde, 2 GeV enerjili doğrusal proton hızlandırıcısı kurmak için yol haritası hazırlamaktır. Bu tesis boyunca nükleer fizik, katıhal, malzeme bilimi, tıp, biyoloji, ... gibi uygulama istasyonları kurularak proton demetinin çeşitli

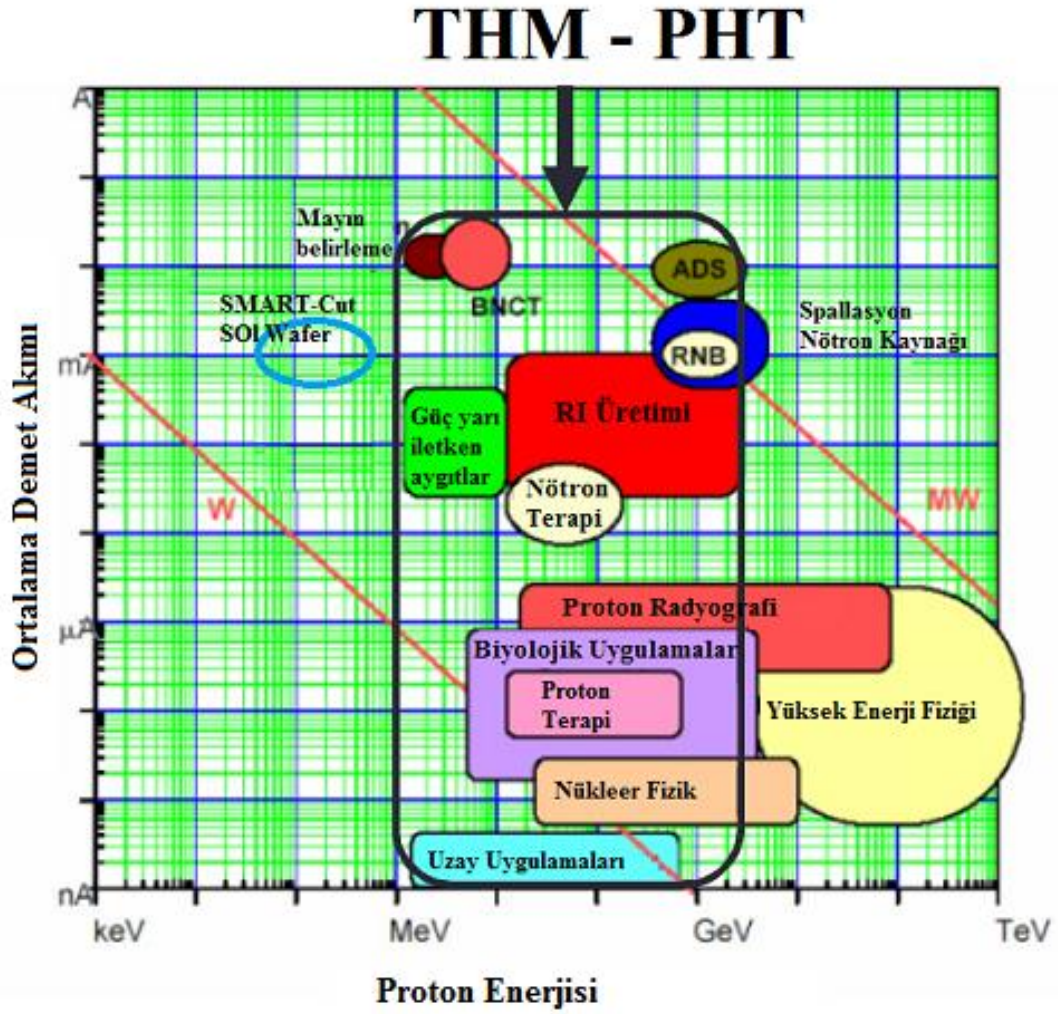
alanlarda uygulamasının gerçekleştirilmesi planlanmaktadır. Proton demetinin son aşamada nötron kaynağı olarak hizmet vermesi planlanmaktadır. Proje iki aşamaya bölünmüştür. İlk aşama 65 MeV' e kadar olan düşük enerji bölgesi ve ikinci aşama yüksek enerji bölgesidir. 65 MeV' e kadar olan normal iletken yapı için Kalkınma Bakanlığına Proje önerisi verilmesi düşünülmektedir (Ağın vd., 2014). THM – PHT Projesi' nin bu aşaması, 2015 Mart ayı itibariyle tamamlanmıştır (Şahin Yalçın vd., 2015).

2012 yılında yapılan kullanıcı toplantısı sonucunda THM – PHT Projesi' nin deneysel istasyonları belirlenmiştir. Kurulması düşünülen deney istasyonları temsili gösterimi Şekil 1.1' de verilmektedir (Ağın vd., 2014).



Şekil 1.1. THM – PHT kullanıcı toplantısı sonucu kurulması düşünülen tesisler.

Şekil 1.2' de uygulama alanlarının proton enerjisi ve demet akımına göre sınıflandırılması görülmektedir. Şekil 1.1' deki uygulama alanları göz önünde bulundurularak ve Şekil 1.2 kullanılarak 2 GeV enerjili proton hızlandırıcı tesisi için en fazla 100 mA' e kadar olan demet akımının yeterli olacağı söylenebilir.



Şekil 1.2. Proton enerjisi ve proton akımına göre uygulama alanları (Şahin Yalçın, 2013).

Kurulması düşünülen proton hızlandırıcısı tesisinin hızlandırıcı yapısı doğrusaldır, bununla birlikte uygulama alanları göz önünde bulundurulduğunda, tesisin ihtiyaçlarını H^+ iyonlarının karşılayabileceği belirlenmiştir. Böylece bu tesiste H^+ üretimi yapan iyon kaynaklarının kullanılabileceği tespit edilmiştir. Tesisin ihtiyaçlarını karşılayabilecek yüksek H^+ iyon akımı üretebilecek iyon kaynakları araştırıldığında, karşımıza duoplazmatron ve mikrodalga deşarj iyon kaynakları çıkmaktadır. Burada farklı uygulama türleri için farklı iyon kaynağı türlerinin bulunduğu unutulmamalıdır. Duoplazmatronlar 500 mA' e kadar H^+ akımı üretebilirken mikrodalga deşarj iyon kaynakları 100 mA' e kadar H^+ akımı üretebilir (Bailey, 2013a). Bu iki kaynağın avantajları ve dezavantajları kıyaslandığında, mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının bizim çalışmamız için daha uygun olduğuna karar verilmiştir. İyon kaynağı seçimi sadece literatür çalışmalarının sonucunda

gerçekleşmemiştir. 2012 yılında katıldığım CERN Hızlandırıcı Okulu iyon kaynakları kursunda bu konuda uzman kişilerle yapılan görüşmelerin de bu kararda etkisi vardır.

Hangi tür iyon kaynağının bizim için en uygun olduğunun belirlenmesinin ardından, prototip olarak mikrodalga deşarj iyon kaynağı tasarlanması ve imalatına karar verilmiştir.

Bu çalışmanın hedefi, 2,45 GHz frekansında mikrodalga deşarj iyon kaynağı prototipi tasarlayıp üretmek ve bunu çalışır hale getirmektir. Burada amacımız, hızlandırıcı fiziği konusunda çok fazla deneyimimiz olmadığını göz önünde bulundurarak eğitim amaçlı bir iyon kaynağı yapmak, bu kaynakla çalışırken tecrübe edinmektir. Böylece gelecekte ülkemizde THM – PHT gibi kurulacak proton hızlandırıcı tesislerinde kullanmak üzere mikrodalga deşarj iyon kaynakları konusunda bir alt yapı oluşturabiliriz.

Bu çalışmanın 2. bölümünde literatür araştırması, 3. bölümünde temel plazma parametreleri hakkında bilgi, 4. bölümünde iyon sökme sistemleri, 5. bölümünde iyon kaynağı tasarımı, 6. bölümünde deneysel çalışmalar ve sonuçları, 7. bölümünde ileride mikrodalga iyon kaynağı yapmak isteyenler için sonuçların özeti ve öneriler yer alacaktır.

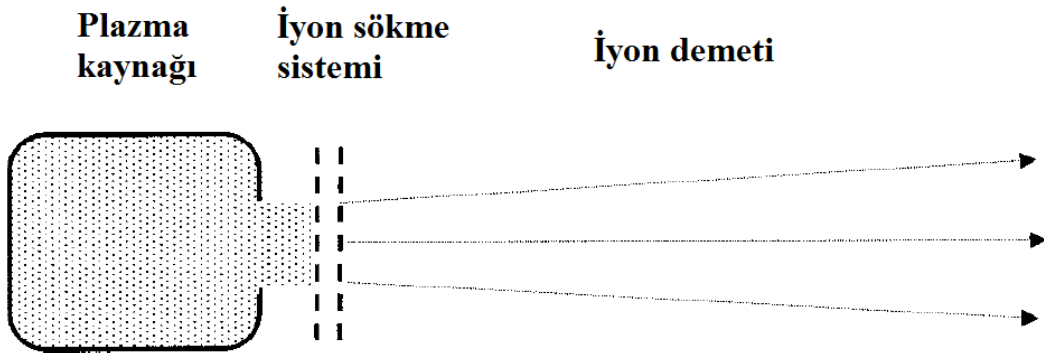
Bu çalışmada iyon kaynaklarıyla ilgili İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları kullanılmıştır. Konu hakkında kapsamlı Türkçe kaynak bulunmadığı için çalışmanın daha anlaşılabilir olması amacıyla bu çalışmada kullanılan İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları, Ek Açıklamalar – A’ da verilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

İyon kaynakları, parçacık hızlandırıcıları için gerekli iyonları üretmekte kullanılan elektromanyetik cihazlardır. İyon kaynağı, hızlandırıcı için en önemli kısımdır. Proton hızlandırıcılarında birçok araştırma ve teknik tesisin performansı iyon kaynağı tarafından belirlenir (demet akımı, yayılımı, enerji dağılımı, iyon türü, kararlılığı) (Bailey, 2013b).

Genellikle plazma kaynağı ve iyon kaynağı terimleri kullanılırken arada anlam karmaşası oluşabilir. Geleneksel anlamda iyon kaynağı terimi ile iyon demeti kaynağı veya iyon demeti üreticisi kastedilir. Çoğu iyon kaynağı plazma tabanlıdır, ana kısmında plazma üretimi önemli rol oynar (Brown, 2004).

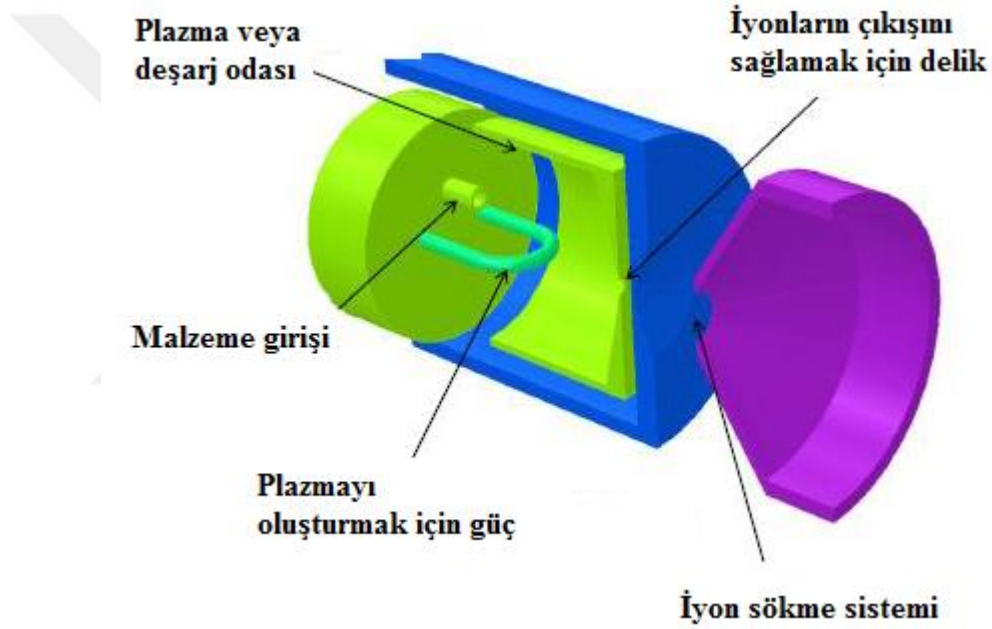
İyon kaynakları temelde iki kısım içerir: plazma üreticisi ve iyon sökme sistemi (ekstraksiyon sistemi) (Şekil 2.1). Plazma üreticisi yeterli miktarda doğru iyonu iyon sökme sistemi için üretebilmelidir. İyon sökme sistemi doğru şekilde, uygun yayılma açısında iyonları plazma odasından hızlandırıcının bir sonraki bölümüne aktarabilmelidir (Bailey, 2013b).



Şekil 2.1. İyon kaynağı genel yapısı (Brown, 2004).

Temel olarak iyon kaynaklarının yapılarında plazma üretimi için bir plazma odası, plazma oluşumu için gerekli malzeme (gaz), vakum sistemi, güç kaynağı ve plazmadan iyonları çekmek için iyon sökme sistemi bulunur. Plazma, başlangıçta gazın ısıtılması ile oluşturulur. İyon kaynağının içerisinde uygun bir kısımda vakum altında iyonlar üretilir, bu kısım plazma odası olarak isimlendirilir. İyon üretmek için plazma içerisine uygun

malzeme sağlanmalıdır, böylece istenilen türde iyonlar üretilebilir. Bu malzeme iyon kaynağı türüne göre gaz, bileşik gaz veya katı malzeme olabilir. İyonlaşmanın gerçekleşebilmesi için plazma odası içerisindeki malzemeye uygun bir şekilde enerji aktarılması gerekir, bu enerji dalga, elektrik, ... gibi formlarda olabilir. Plazma başlangıçta (genellikle) gazın ısıtılmasıyla oluşur. İyon sökme sistemi adı verilen bir elektrot sistemi kullanılarak, plazma odası içerisinden iyonlar küçük bir delik yardımıyla demet hattına aktarılır. Burada elektrotlara uygun elektriksel potansiyel uygulanır, oluşan elektrik alan altında iyonlar elektrot sisteminin şekline göre hareket eder ve demet hattına aktarılır (Şekil 2.2) (Bailey, 2013a, 2013b; Brown, 2004; Zhang, 1999).



Şekil 2.2. İyon kaynağı temsili gösterimi (Bailey, 2013b).

Birçok uygulamada ve deneysel çalışmada protonlar gibi ağır parçacıklar kullanmak gerekmektedir. Bir atoma büyük miktarda enerji vermek için, ona bir kuvvet uygulamak gerekmektedir. Elektrik ve manyetik alanları sadece iyi tanımlanmış durumlarda yaratabiliyoruz, bunun yanında kütle çekim kuvveti yeterli enerji verimi sağlamak için çok zayıftır. Bunu yapmanın en basit yolu, atomlardan bir veya daha fazla elektron kopartmak veya atomlara bir veya daha fazla elektron bağlamaktır, böylece iyonlar üretilir (Bailey, 2013b).

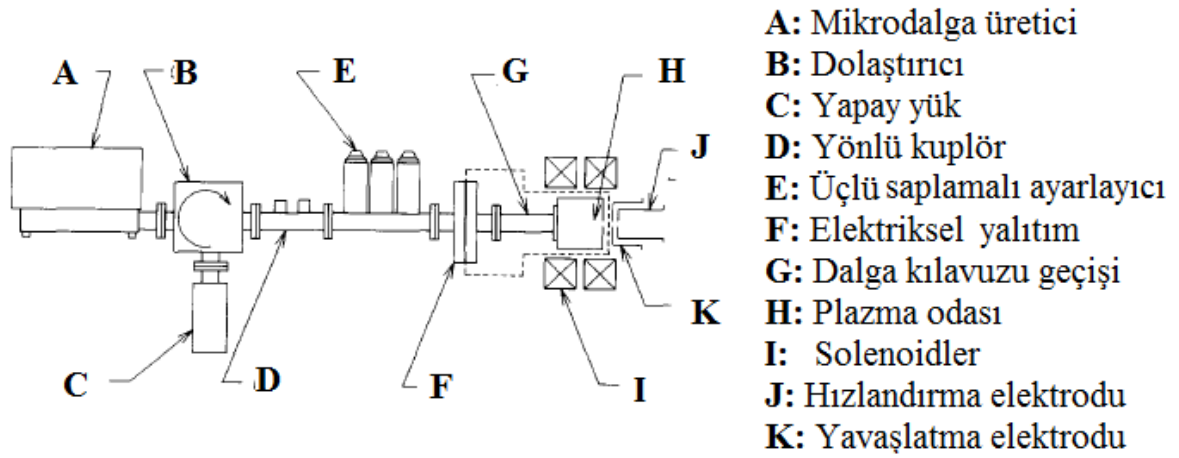
İyon kaynaklarının tarihçesine bakıldığında, gelişimi 1886 yılında Goldstein' ın kanal ışını iyon kaynağını icat etmesiyle başlar. Sonraki yıllarda elektron – atom çarpışmaları düşük akımlı iyon kaynaklarını tasarlamakta kullanıldı. 1916 yılında ilk gerçek pozitif iyon kaynağı olan elektron bombardıman iyon kaynağı tasarlandı. Daha yüksek iyon akımlarına 1930' lu yıllarda ark deşarj iyon kaynaklarının araştırılmaya başlanmasıyla ulaşıldı. 1940' lı yıllarda plazmatron iyon kaynağı ortaya çıktı. 1950' lilerin başlarında, plazmatron kaynakları geliştirilerek duoplazmatron iyon kaynakları üretildi. 1960' lı yıllarda elektron siklotron rezonans iyon kaynağı (ECRIS), elektron demeti iyon kaynağı (EBIS) üretildi; 1960' ların sonlarına doğru günümüzde bilindik anlamıyla ilk negatif iyon kaynakları üretildi. 1970' lerin başlarında lazer iyon kaynakları, penning ve magnetron iyon kaynakları üretildi, ilk çoklu manyetik hapis iyon kaynakları aslında füzyon reaktörleri için kullanıldı. 1970' lerin sonları, 80' lerin başlarında ilk mikrodalga deşarj iyon kaynakları (MDIS) kullanılmaya başlandı, 80'lerde metal buharı vakum ark iyon kaynakları (MEVVA) ortaya çıktı. 1990' ların başlarında rf kaynaklar ve günümüzde bilindik anlamıyla ilk MDIS' ler ortaya çıktı (Bailey, 2013a; Zhang, 1999; Brown, 2004).

İyon kaynaklarının tarihi gelişimi göz önünde bulundurulduğunda, kaynaklar günün ihtiyaçları doğrultusunda teknolojinin el verdiği ölçüde geliştirilmiştir. Farklı uygulama alanları için farklı iyon kaynakları bulunmaktadır. Bu kaynaklar teknolojinin ve sanayinin farklı alanları için çeşitli iyon türleri üretmekte kullanılırlar.

Günümüzde yüksek akımlı H^+ üretiminde kullanılan iyon kaynakları incelendiğinde, karşımıza duoplazmatron ve mikrodalga iyon kaynakları çıkmaktadır (Bailey, 2013a, 2013b; Brown, 2004, Zhang, 1999). Bu çalışmada mikrodalga iyon kaynakları üzerine yoğunlaşacağız.

Mikrodalga iyon kaynakları, diğer iyon kaynaklarına göre plazma odasının içerisinde elektrot bulundurmadığı için daha az bakım gerektirir ve daha uzun ömürlüdür. Bu, iyon kaynağı türünün tercih edilmesinde başlıca sebeptir. Diğer iyon kaynaklarına göre sistem içerisinde gaz varken $10^{-4} - 10^{-5}$ torr gibi daha yüksek vakumda çalışırlar. Manyetik alan profiline göre mikrodalga iyon kaynakları değişik isimlerle anılırlar ve değişik amaçlarda kullanılırlar, temelde yapıları birbirlerine benzemektedir. Uygun frekansta mikrodalga üretmek için magnetron, gücü magnetrondan plazma odasına aktarmak için

dalga kılavuzları, plazma odası, kaynağın türüne göre manyetik alan oluşturmakta kullanılacak mıknatıslar, iyonları plazma odasından demet odasına aktarmak için uygun geometri ve yapıda elektrotlar, vakum pompası, yüksek voltaj kaynakları gibi bileşenlerden oluşurlar. Mikrodalga enerjisini mikrodalga üreticiden plazma odasına aktarmakta kullanılan dalga kılavuzları ve bileşenleri bir diğer mikrodalga iyon kaynağına göre farklı olabilir, Taylor ve Mouris tarafından üretilen mikrodalga deşarj iyon kaynağında kullanılan bileşenler Şekil 2.3' te verilmektedir (Bailey, 2013b; Taylor ve Mouris, 1993).



Şekil 2.3. CRNL mikrodalga kaynağı (Taylor ve Mouris, 1993).

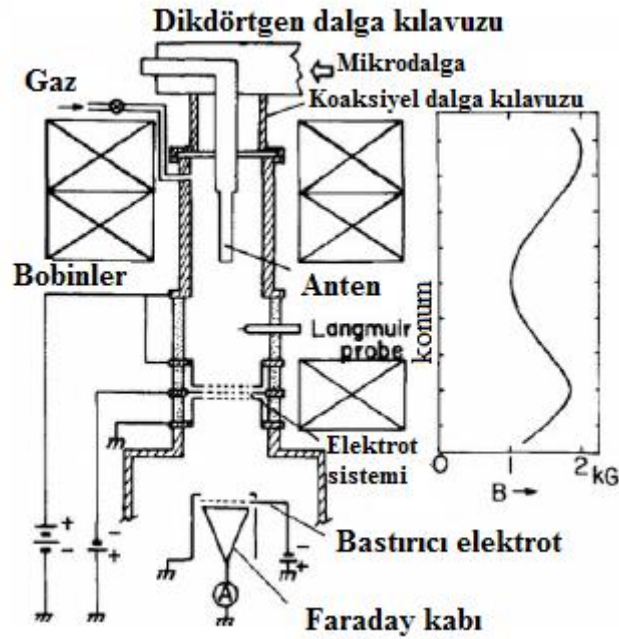
İyon kaynağından sökülen demet akımı ile plazma elektron yoğunluğu orantılıdır. Demet akımını yükseltmek için plazmadaki elektron yoğunluğunu arttırmak gerekir. Mikrodalgaların enerjisi, dalga kılavuzu aracılığı ile plazma odasına aktarılarak serbest elektronlara transfer edilir, enerji kazanan bu elektronlar gazı iyonlaştırmaktadır. Herhangi bir ortam serbest elektronlar veya serbest iyonlar içerir. Bunlar kozmik ışınların etkileşmesi, gaz atomlarının çevresel radyasyonla etkileşmesi sonucunda oluşur. Plazma yoğunluğunu arttırmak ve farklı eşleşme mekanizmalarını etkin hale getirmek amacıyla mıknatıslar kullanılmaktadır. Yüksek akımlı iyon kaynakları uygulamalarında kritik yoğunluk yetersizdir. Plazma odasına manyetik alan uygulanması, farklı ısıtma mekanizmalarını harekete geçirir. Mikrodalga iyon kaynaklarında manyetik alan profili değiştiğinde, plazma ısıtma mekanizmaları değişiklik gösterir, bu kaynaklar manyetik alan profiline göre isimlendirilir. Uygulanan manyetik alan, elektron siklotron frekansı ile rezonansa ise elektron siklotron rezonans (ECR) iyon kaynakları olarak isimlendirilir. Uygulanan manyetik alan, ECR frekansının üzerindeyse mikrodalga deşarj iyon kaynakları

veya rezonansa olmayan (MDIS) ve ECR frekansının altındaysa rezonansın altında olan mikrodalga iyon kaynakları olarak isimlendirilmektedirler (Taylor ve Mouris, 1993, Çınar, 2011, Bailey, 2013a).

ECR iyon kaynaklarının ve mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının uygulama alanları farklılık gösterebilir, MDIS' ler sadece tek yüklü iyon üretiminde kullanılırken ECR iyon kaynakları yüksek yük durumlu iyon üretiminde kullanılabileceği gibi tek yüklü iyon üretiminde de kullanılabilir (Taylor, 1991; Popov, 1991; Castro vd., 2012; Celona vd., 2010).

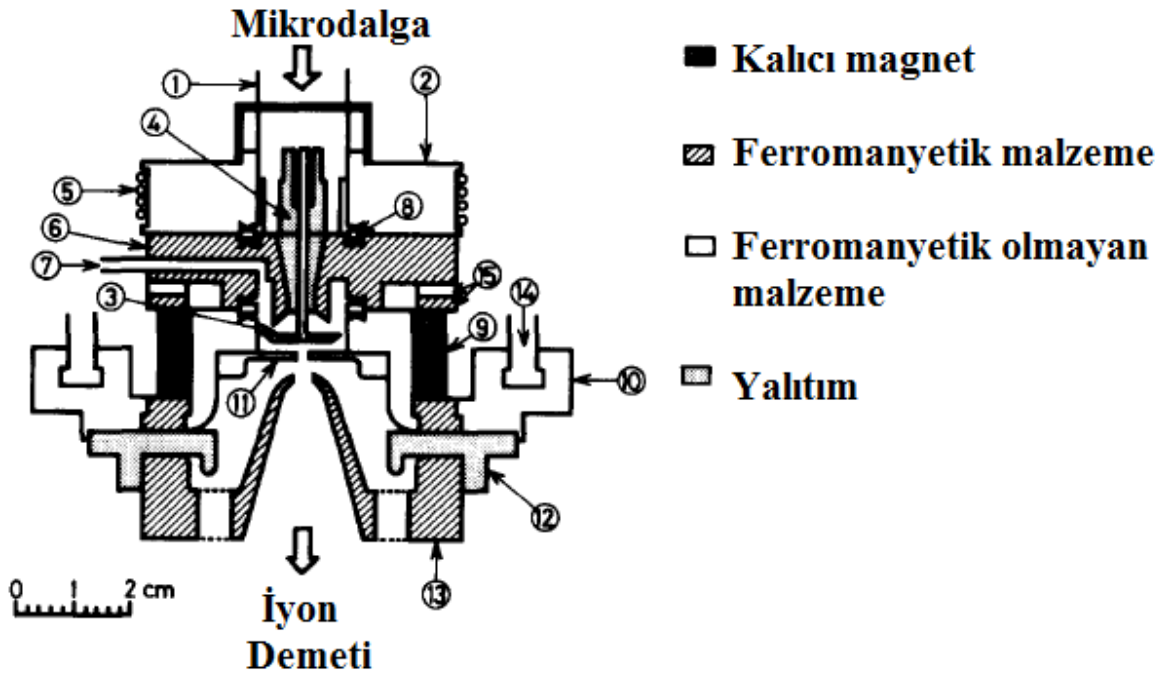
Literatür taramasının bundan sonraki kısmında temel mikrodalga deşarj iyon kaynakları incelenerek hangi bileşenlerden oluştuğu, gereken parçalar ve dikkat edilmesi gereken hususlar belirlenmiştir.

2,45 GHz mikrodalga iyon kaynaklarının tarihi yaklaşık 35 yıl önce Sakudo ve Ishikawa' nın endüstri uygulamaları için ortaya koydukları farklı tasarımları ile ortaya çıkmıştır. Çıkan sonuçlar sadece protonlar için değil, aynı zamanda döteronlar ve tek yüklü hafif iyonlar için kayda değer sonuçlar üretmiştir (Bailey, 2013b).



Şekil 2.4. 1977' de Sakudo vd. tarafından üretilen mikrodalga iyon kaynağı (Sakudo vd., 1977).

Sakudo vd. tarafından 1977' de Hitachi Şirketi Merkezi Laboratuvarı' nda iyon aşılama için üretilen iyon kaynağında 2 kW magnetron kullanılmış, yapıda kullanılan izolatör, magnetronu yansıyan güçten korumuştur. Yansıyan ve iletilen güç, yönlü kuplöre bağlanan RF metrelerle ölçülmüştür. Burada kullanılan manyetik alan, 2,45 GHz mikrodalga frekansı için rezonansa karşılık gelen 875 G' tan daha fazladır. Bu manyetik alan, plazmanın seramik plazma odasını bombardıman etmesini engellemiştir. Plazma odası temelde koaksiyel dalga kılavuzu şeklindedir. Sakudo vd.' nin dizaynı plazma odası, üç solenoid tarafından desteklenen aksel manyetik alan ve koaksiyel dalga kılavuzundan oluşmaktadır (Şekil 2.4). Bu çalışmada koaksiyel dalga kılavuzu su soğutmalıdır. Plazma odasının empedansını mikrodalga empedansı ile eşleştirmek için koaksiyel kablo boyunca manyetik indüksiyon değişmiştir. İyon sökme sistemi çok delikli plazma elektrotu içeren üç elektrottan oluşmuştur. 4,5 kV iyon sökme voltajında 380 mA hidrojen akımı ölçüldüğü, 5 kV iyon sökme voltajında 200 mA argon akımı ölçüldüğü rapor edilmiştir (Sakudo vd., 1977; Brown, 2004; Bailey, 2013b).



Şekil 2.5. Ishikawa vd. tarafından 1984 yılında yapılan kalıcı mıknatıs iyon kaynağı (Ishikawa vd., 1984).

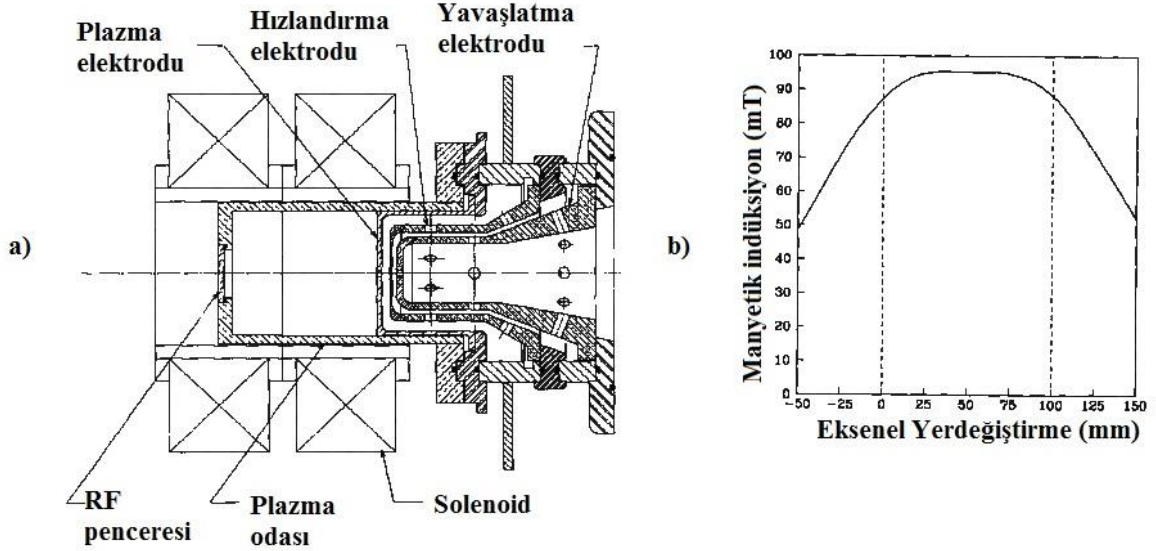
Ishikawa tarafından 1984 yılında üretilen kaynaktaki plazma odasının çapı 50 mm ve yüksekliği 65 mm' dir. Bu sistemde elektromıknatısların çok fazla güç tüketiminden dolayı kalıcı mıknatıslar kullanılmıştır. Plazma elektrotu ile plazma odası arkasındaki çıkıntı

arasındaki manyetik alanın 850 G ile 1200 G arası olduğu belirtilmektedir (Şekil 2.5). İstenilen herhangi bir tür için mA mertebesinde iyon demeti üretilebildiği belirtilmiştir. Çalışmada Ar, N₂, CO₂, Cs, Rb ve O₂ gazları kullanılarak 2 mm çaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sisteminde 2-3 mA demet akımı elde edildiği rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda bu iyon kaynağının sadece iyon aşılama için değil, aynı zamanda hızlandırıcı uygulamaları için de kullanışlı olduğu rapor edilmiştir (Ishikawa vd., 1984; Brown, 2004; Bailey, 2013b).

Taylor ve Wills tarafından Chalk River Ulusal Laboratuvarı'nda (CRNL) 1991 yılında yapılan yüksek akımlı ECR iyon kaynağı çalışması Şekil 2.6' da verilmektedir. Bu çalışmada 2,45 GHz 1 kW güçlü magnetron mikrodalga güç kaynağı olarak kullanılmıştır. Mikrodalga güç WR284 dikdörtgen dalga kılavuzu kullanılarak plazma odasına aktarılmış, ikili yönlü kuplörle iletilen ve yansıyan güç izlenmiş, üçlü saplamalı ayarlayıcı ise empedans eşleştirme işleminde kullanılmıştır. Mikrodalga güç, plazma odasına iki katmanlı pencereden iletilmiştir. İlk tabaka 10 mm ince kuvars plakadır, vakum oluşturmak için dalga kılavuzu ile plazma odası arasında conta görevi görmüştür. İkinci tabaka ise 4 mm boron nitrit tabakadır, bu kısım plazma ile bitişiktir ve iyon sökme kısmından geri saçılan elektronların oluşturduğu ısıyı uzaklaştırmakta kullanılmıştır. Su soğutmalı OFHC (yüksek iletkenlikte bakır) plazma odasının 90 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda olduğu belirtilmiştir (Taylor ve Wills, 1991).

2 solenoid tarafından 100 mT' ya kadar eksenel manyetik alan oluşturulmuştur. Solenoidler, eksenel olarak manyetik alanı değiştirmek için yerleri değiştirilebilecek şekilde tasarlanmıştır. İyon sökme kısmında üç elektrot kullanılmıştır. Plazma ve yavaşlatma elektrotlarının çapı 4 mm iken hızlandırma elektrotunun çapının 3,5 mm olduğu belirtilmiştir. Hızlandırma boşluğu 6,5 mm iken yavaşlatma boşluğu 2 mm olacak şekilde tasarlanmıştır. Elektrotlar OFHC bakır üzerine molibdenyum alaşımı ile kaplanmıştır, bu geri saçılan elektronlardan kaynaklanan elektrik atlamasına karşı direnci artırır. Plazma odası girişindeki mikrodalga penceresinde 2,45 GHz mikrodalga frekansı için manyetik alan ECR şartını sağlayacak şekilde 87,5 mT olarak tasarlanmıştır. İyon sökme elektrotları yerleştirilmeden önce plazma odasında yapılan ölçümlerde maksimum iyon akım yoğunluğunun 300 mA/cm² yi, elektron sıcaklığının 20 eV' u geçtiği

belirtilmiştir. İyon akım yoğunluğunun artan mikrodalga gücü ve azalan hidrojen kütle akış oranı ile azaldığı rapor edilmiştir (Taylor ve Wills, 1991).



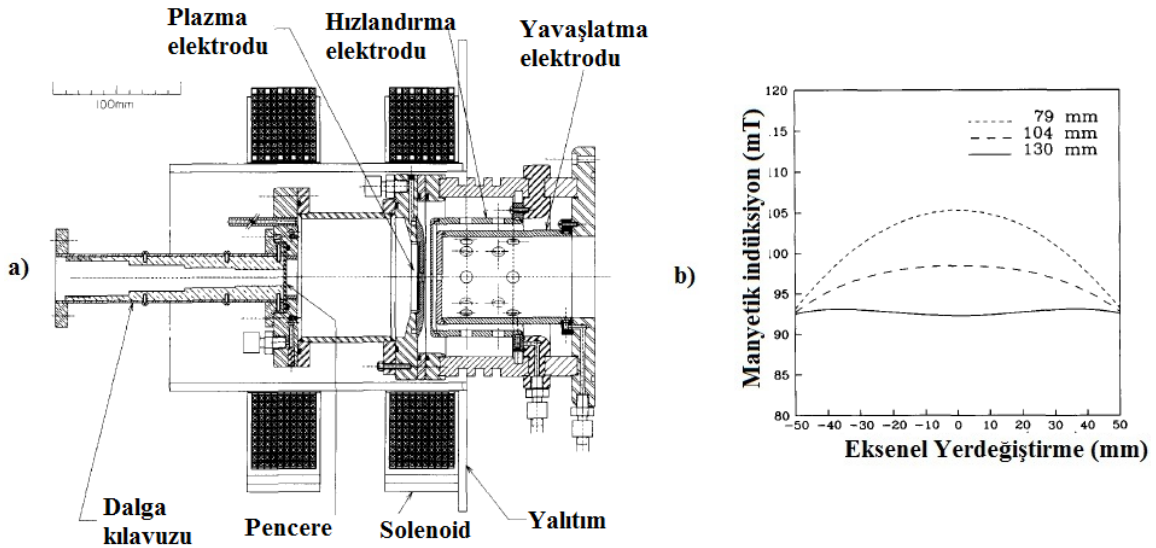
Şekil 2.6. Taylor ve Wills tarafından 1991 yılında yapılan a) MDIS ve b) manyetik alan profili (Taylor ve Wills, 1991).

Bu çalışmada rezonansın altında bile tatmin edici sonuçlara ulaşıldığı ancak iyon kaynağının kararlı olarak rezonansın üstünde çalıştığı belirtilmiştir. Boron nitrit plazma elektrotunun eklenmesi ile proton kesrinin %55'ten %90'lara yükseldiği gözlemlenmiştir. Yayınım (emittans) $0,7 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ olarak ölçülmüştür. Bu çalışma sonucunda 130 mA' e kadar hidrojen iyonlarının demet hattına aktarıldığı, elektrotların uygun kaplama ile kaplanması sonucunda proton kesrinin %90' lara ulaştığı rapor edilmiştir (Taylor ve Wills, 1991; Brown, 2004; Bailey, 2013b).

1993 yılında Taylor ve Mouris tarafından yine CRNL' de yapılan DC mikrodalga iyon kaynağı, yaklaşık son 25 yıldır önerilen değişik tasarımların temeli olarak kabul edilmektedir. Bu kaynağın gösterimi Şekil 2.7' de verilmektedir (Taylor ve Mouris, 1993).

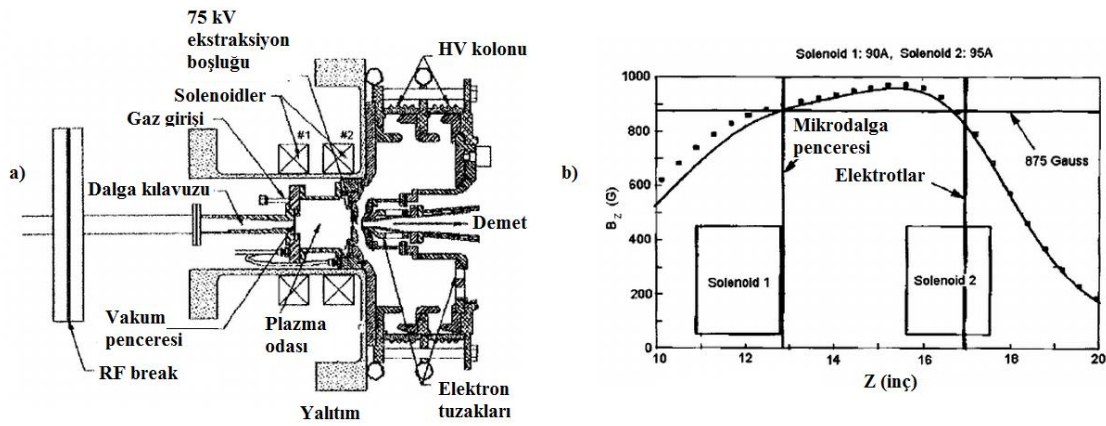
Bu kaynak, 1991 yılında Taylor ve Wills tarafından yapılan kaynağın geliştirilmiş versiyonu olarak görülebilir. Burada 50 kV' luk elektriksel yalıtım (DC break) eklenmiştir. Böylece tüm aktif elemanlar topraklanmıştır. Burada ayrıca uyumlama transformatörü (matching transformer) kullanılmıştır. Bu transformatör mikrodalga penceresinin önüne mikrodalga verimini arttırmak için yerleştirilmiştir. Bu transformatörün amacı WR284

dalga kılavuzu ile plazma empedansını eşleştirmektedir. Ayrıca bu sistem ile elektrik alan hem plazma odasının ortasına odaklanabilir hem de vakum contası üzerindeki termal yükü yeniden dağıtabilir. Empedans eşleşmesi plazma yoğunluğunu arttırmış, bu da demet hattına aktarılan iyonların akımında artış olarak karşımıza çıkmıştır. Vakum penceresi olarak alüminyum nitrit kullanılmıştır. Plazma odasının hacmi korunmuştur. Önceki yapıya göre manyetik alan tasarımı önemli derecede iyileştirilmiştir. Manyetik alan profili simetrik hale getirilmiştir. Her bir solenoid, plazma odasının uçlarına yerleştirilmiştir. Elektrot sistemi 50 kV' a göre tasarlanmıştır. 600 W mikrodalga gücü için demet akım yoğunluğu önceki çalışmaya göre 3 veya 4 kat yükselmiştir. Artışın asıl sebebi uyumlama transformatördür. Mikrodalga giriş penceresindeki en uygun manyetik alan 92 veya 93 mT olduğu durumda ölçülen akım değerinde en iyi sonucun elde edildiği belirtilmiştir. Sistemdeki vakum 4×10^{-5} torr seviyesindedir. Bu çalışma sonucunda 500 W mikrodalga gücü ile %85' in üzerinde proton kesri, 475 mA/cm² hidrojen iyon akım yoğunluğu, 95 mA üzerinde akım ölçüldüğü rapor edilmiştir. Bu tasarımda sadece plazma odası yüksek voltajdadır, böylelikle tasarım daha basit hale gelmiştir. Yayınım değeri 0,13 π .mm.mrad değerinin altında ölçülmüştür, bu değer RF dört kutuplusu (RFQ) girişi için gerekli olan 0,2 π .mm.mrad değerinden küçüktür. Tasarlanan bu iyon kaynağının RF dört kutuplusu için kullanılabilir olduğunu göstermektedir (Taylor ve Mouris, 1993; Brown, 2004; Bailey, 2013b).

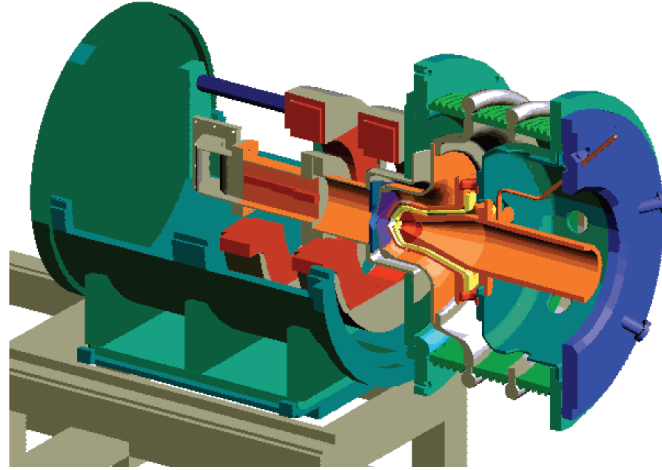


Şekil 2.7. Taylor ve Mouris tarafından 1993 yılında yapılan a) MDIS ve b) manyetik alan profili (Taylor ve Mouris, 1993).

J. Sherman vd. tarafından CRNL' deki tasarım daha sonra demetin RF dört kutuplusu ile eşleşmesi için Los Alamos Ulusal Laboratuvarı' nda (LANL) geliştirilmiştir, CRNL' deki plazma odası LANL' deki 75 kV'lık hızlandırıcı yapısına uyumlu hale getirilmiştir (Şekil 2.8). Plazma yaklaşık 875 G' luk eksenel manyetik alan varlığında 2,45 GHz frekanslı mikrodalgaların H_2 gazı ile etkileşmesi sonucu üretilmiştir. Bu çalışmada iyon kaynağı sonrasında düşük enerji demet aktarım bölgesinde 2 tane solenoid kullanılmıştır. İyon sökme sistemi dörtlü elektrot yapısından oluşmuştur, baskı elektrotu kullanarak elektronların plazma kaynağına ulaşması önlenmiştir. 1995' teki tasarımda 110 mA sürekli proton akımı ve %85 proton kesri ile RF dört kutuplusu öncesi 0,20 π .mm.mrad yayılım ölçüldüğü rapor edilmiştir. 1997' de yapılan iyileştirmede proton akımı ve proton kesri yükseltilmiştir. 2001' de sunulan çalışmada iyon kaynağının hem sürekli hem de atmalı (pulsu) yapıda çalışabildiği rapor edilmiştir. Sürekli modda iyon kaynağı plazma odasının ömrünü belirlemeye yönelik yapılan çalışmada iyon kaynağının 2,45 GHz mikrodalga frekansı, 570 W mikrodalga gücü, 47 kV iyon sökme voltajı altında 170 saat boyunca çalıştığı rapor edilmiştir. Bu testte 250 mA/cm² proton yoğunluğu ve %83 proton kesri ölçüldüğü rapor edilmiştir. Bu test sırasında plazma odasında herhangi bir problemle karşılaşılmadığı, buna karşın elektriksel atlamalardan kaynaklı olarak yüksek voltaj kısmında ve gaz kontrol akış kısmında problemler yaşandığı rapor edilmiştir (Sherman vd., 1998, 2002; Hansborough vd., 1997, 2001; Brown, 2004; Bailey, 2013b).



Şekil 2.8. Sherman vd. tarafından geliştirilen a) iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili (Sherman vd., 1998).

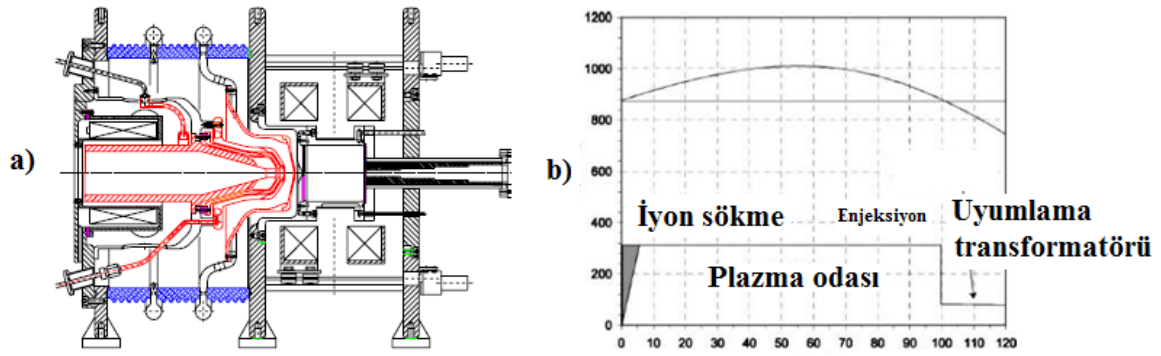


Şekil 2.9. SILHI iyon kaynağının 3 boyutlu görünümü (Miracoli, 2010).

Fransa Atom Enerjisi Komisyonu (CEA) yüksek şiddetli hafif atom iyon kaynağı (SILHI) benzer yolu izleyerek 1990' ların ikinci yarısında yüksek kararlılık elde etmiştir (Şekil 2.9). Bu çalışmada yayının $0,2 \pi \text{ mm.mrad}$ ' dan düşüktür. SILHI' de kurulan hızlandırıcının amacı spallasyon reaksiyonları için nötron demeti üretmek ve nükleer atık uygulamasıdır. ECR kaynağının 875 G ve 2,45 GHz mikrodalga frekansında çalıştığı rapor edilmiştir. Mikrodalga kaynağı standart dikdörtgen dalga kılavuzu vasıtasıyla kuvars pencere üzerinden aralarında dörtlü otomatik saplamalı ayarlayıcı olacak şekilde plazma odasını beslemiştir. Geri saçılan elektronların kuvars pencereye zarar vermesini engellemek için, kuvars pencere bükümlü dalga kılavuzunun (E-bend dalga kılavuzu) arkasına yerleştirilmiştir. Üç aşamalı uyumlama transformatörü, plazma odasındaki aksel radyo frekans (RF) alanı arttırmak için kullanılmıştır. Beşli elektrot sistemi kullanılmış ve bu sistemin simülasyonları AXCEL – INP programı ile yapılmıştır. Mevcut durumda 120 mA' in üzerinde iyonun %83 proton kesri ile demet hattına aktarıldığı, benzer şekilde 130 mA' in üzerinde iyonun %96 döteron kesri ile demet hattına aktarıldığı rapor edilmektedir (Gobin vd., 1998, 1999; Miracoli, 2010; Bailey, 2013b).

Nükleer atık dönüştürme projesi iyon kaynağı (TRIPS) İtalya Nükleer Fizik Ulusal Enstitüsü Güney Ulusal Laboratuvarı' nda (INFN-LNS) tasarlanmış ve üretilmiştir (Şekil 2.10). Bu iyon kaynağı aşırı yoğun ve düşük sıcaklıkta plazma oluşturmak için rezonansın üzerinde çalışan mikrodalga deşarj iyon kaynağı türüdür, yüksek akımda 1+ demetlerini üretmek için oldukça etkindir. Bu kaynağın tasarım aşamasında SILHI' nin referans alındığı belirtilmektedir. SILHI ve CRNL kaynaklarına benzer bir şekilde plazma odası

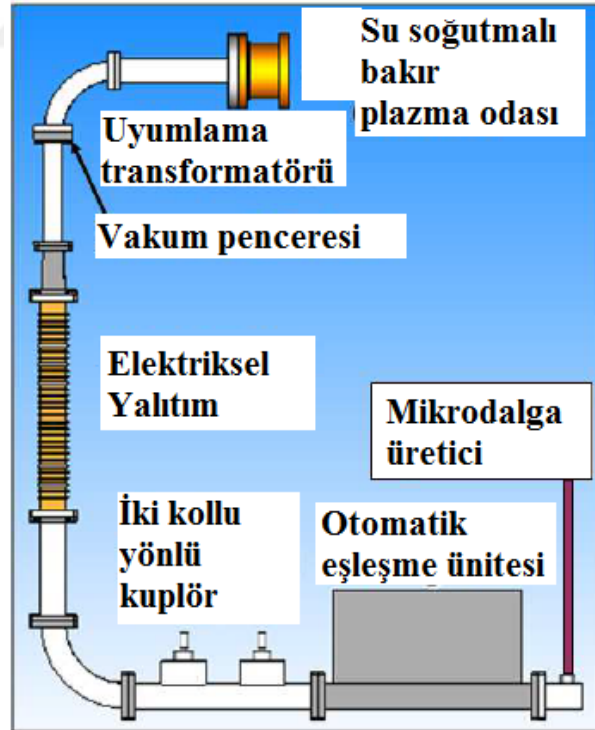
kullanılmıştır. Mikrodalga basınç penceresi geri saçılan elektronların verdiği hasardan korunmak adına su soğutmalı bükümlü dalga kılavuzunun arkasına yerleştirilmiştir. Manyetik alan birbirinden bağımsız güç sağlanabilen ve yerleri değiştirilebilen iki solenoid tarafından üretilmiştir. TRIPS kaynağında iki ECR bölgesi plazma odasının içerisinde boron nitrit disklerinin yerleştirildiği yere gelecek şekilde ayarlanmıştır. Beşli elektrot sisteminin SILHI' ye benzer olarak tasarlandığı belirtilmiştir. İyon sökme sisteminin SILHI' den temel olarak farkları elektrot şekilleri, elektrot delikleri, hızlandırma boşlukları ve uygulanan potansiyel fark olarak sıralanabilir. Demet enerjisi 80 keV, toplam demet akımı 60 mA, proton kesri %90, 35 mA' deki demet yayını 0,07 π .mm.mrad olarak rapor edilmiştir (Celona vd., 2000; Ciavola vd., 2000, 2002a, 2002b; Gammino vd., 2006; Bailey, 2013b; Miracoli, 2010).



Şekil 2.10. a) TRIPS iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili (Bailey, 2013b).

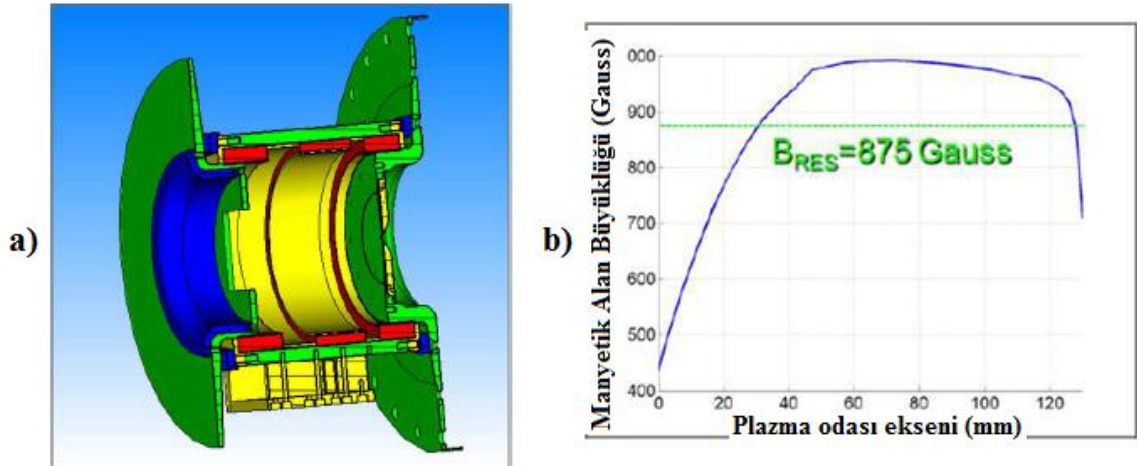
TRIPS kaynağı TRASCO (nükleer atık dönüşümü için hızlandırıcı tabanlı sistemlerde araştırma ve geliştirme amacı olan proje) projesinin gereksinimlerini karşıladıktan sonra kaynağı basitleştirmek için 2006 yılında çok yönlü iyon kaynağı (VIS) yapılmıştır. Bu çalışmanın mikrodalga transfer hattı Şekil 2.11' de, manyetik alan sistemi ve plazma ekseninde manyetik alan profili Şekil 2.12' de verilmektedir. VIS' te elektromıknatıslar kalıcı mıknatıslarla değiştirilmiş, iyon sökme sistemi geometrisi basitleştirilmiştir. Manyetik sistem üç tane kalıcı mıknatıs ile oluşturulmuştur. Manyetik alan iyon sökme bölgesinde diğer kaynak tasarımlarından farklı olarak hızlı bir şekilde sıfıra düşürülmüştür. Burada amaç, yayını küçültmek ve iyon sökme bölgesinde iyonlaşmalardan kaynaklı elektrik atlamalarını engellemektir. Tüm cihazlar topraklanmıştır. Tüm cihazlar topraklandığı için yüksek voltaj bölgesini toprak bölgesinden ayırmak amacı ile elektriksel yalıtım tasarımı yapılmıştır. Plazma elektrotuna

yüksek voltaj uygulandığında plazma odası da yüksek voltaj altındadır; eğer aradaki elektrik iletimi kesilmezse plazma odasından yüksek voltaj dalga kılavuzu aracılığı ile magnetrona ulaşabilir. Bunun sonucunda magnetron bozulabilir, ya da sistemin ömrünü kısıtlanır. Bunu engellemek için plazma odası çıkışında genellikle dalga kılavuzu ile aradaki iletimi kesmek için yalıtkan konulur, böylece plazma elektrotuna uygulanan yüksek voltajın magnetrona ulaşması engellenir. Ayrıca geri saçılan elektronların vakum penceresi camına zarar vermesini engellemek adına, vakum penceresi kıvrık dalga kılavuzunun gerisine yerleştirilmiştir. Bu tasarımda magnetrondan gelen mikrodalganın empedansı ile dalga kılavuzunun empedansını eşleştirmek için otomatik eşleşme ünitesi kullanılmıştır; yalnız göz ardı edilmemesi gereken konu, otomatik eşleşme ünitesinin atmalı yapıda problem çıkartmasıdır. Ayrıca elektrik alanı plazma odasının merkezine odaklamak için uyumlama transformatörü kullanılmıştır. Bu kaynak 40 mA’ de çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Bu çalışma sonucunda proton akımının 30 mA’ den büyük olduğu, demet yayınının 0,2 π .mm.mrad’ dan küçük olduğu rapor edilmiştir (Miracoli, 2010; Miracoli vd., 2012a, 2012b; Bailey, 2013b).



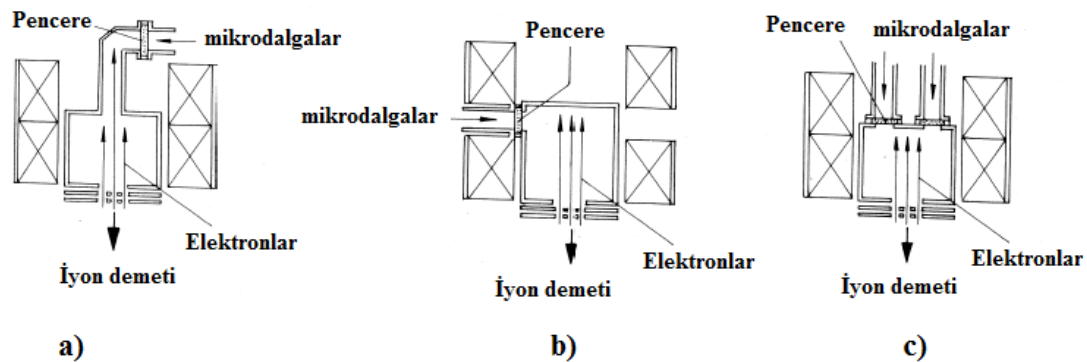
Şekil 2.11. VIS mikrodalga hattı (Miracoli, 2010).

Bu çalışmalara ek olarak günümüzde 2,7 GHz frekanslı mikrodalga deşarj iyon kaynağı üretiminin geliştirmesi Avrupa Spallasyon Kaynağı (ESS) projesi için devam etmektedir (Neri vd., 2014).



Şekil 2.12. VIS a) Manyetik alan sistemi (kızılar NdFeB mıknatıslar, sarılar paslanmaz çelik bileşenler, maviler alüminyum, yeşiller demir) ve b) manyetik alan profili.

Mikrodalga iyon kaynaklarında vakum penceresinin yeri önemlidir. Vakum penceresi doğrudan plazma elektrotunun karşısına yerleştirildiğinde, iyon sökme işlemi sırasında geri saçılan yüksek enerjili elektronlar vakum penceresi camına hasar vermekte, bunun sonucunda vakum penceresinin camı ve dolaylı olarak kaynağın ömrü kısalmaktadır. Geri saçılan elektronların vakum penceresi camına zarar vermesi engellenebilir. Bunun için mikrodalga hattı boyunca vakum penceresinin konumu değiştirilir. Vakum penceresinin zarar görmesini engellemek için vakum penceresinin farklı konumlarda yerleştirilmesi Şekil 2.13' te verilmektedir (Stockli ve Han, 2014).



Şekil 2.13. Mikrodalga penceresi konumları (Stockli ve Han, 2014).

Bu kısımda yüksek akımlı H^+ mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının tarihi gelişimi göz önüne alınarak literatürde yer alan temel çalışmalardan bahsedilmiştir. Ayrıca yukarıda özet verilen temel çalışmaların dışında, literatürde farklı uygulama alanları için benzer veya farklı tasarımda mikrodalga iyon kaynağı çalışmaları bulunmaktadır (Spence ve Lykke, 1995; Leitner vd., 1999; Schneider vd., 2000; Cui vd., 2001; Bogomolov vd., 2002; Reijonen vd., 2003; Jain vd., 2004; Jackson vd., 2004; Tanaka vd., 2004, 2008; Kobayashi vd., 2007; Iga vd., 2010; Waldmann ve Ludewigt, 2010; Wolf, 1995; Xu vd., 2013). Kaynak tasarımı sırasında bu çalışmalardan da faydalanılmıştır.



3. PLAZMA FİZİĞİ TEMEL TANIMLARI

3.1. İyon Kaynakları ve Plazma Fiziği

İyon kaynaklarında ihtiyaç duyulan türde iyon üretmek önemlidir. İyonların üretildiği yer, doğru tasarlandığında iyon deposu gibi davranır. Plazma iyon kaynaklarında bir gaz türü, genellikle gaz deşarjı ile plazma haline getirilir, daha sonra plazma içerisinden istenilen özellikte iyonlar demet hattına iyon sökme sistemi kullanarak aktarılır (Zhang, 1999).

Demet hattına aktarılan iyon akımı, plazma ve iyon sökme elektrotları tarafından belirlenir. Mesela iyon demet akımını belirleyen parametreler plazma yoğunluğu, plazma elektron sıcaklığı, iyon sökme elektrotlarına uygulanan voltaj ve iyon sökme elektrotlarının geometrisidir. Demet yayılımını belirleyen parametreler ise plazma yoğunluk dağılımı, plazma iyon sıcaklığı, iyon sökme geometrisidir ve demet bileşimleri de plazma bileşimi tarafından belirlenir (Brown, 2004).

Plazma iyon kaynaklarında plazma üretmenin bu derece önemli olması, iyon kaynaklarının performansı açısından hem plazma üretiminde, hem de elektrot tasarımında önemlidir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, bu kısımda iyon kaynaklarının çalışmasını anlatmakta kullanmak amacıyla plazma fiziği ile ilgili temel parametreleri ele alacağız.

3.2. Plazma

Plazma katı, sıvı ve gaz halinden sonra maddenin dördüncü hali olarak tanımlanabilir. Bu tanım malzemenin parçacık enerjisi veya sıcaklığına atıfta bulunur; genel anlamda malzemenin sıcaklığı arttırıldığında malzeme önce katıdan sıvıya, sonra sıvıdan gaza, son olarak gazdan plazmaya dönüşür (Brown, 2004).

Eğer bir gazın (veya malzemenin) sıcaklığı yeterince yükseltirse veya yeterince şiddetli bir elektrik alanın etkisi altında kalırsa, gazın atomları ve molekülleri iyonlaşmaya

başlar, elektronlar kopartılır. Plazma içerisinde plazmayı oluşturan bireysel parçacıklar genelde üç türdür, iyonlar, elektronlar ve nötr paracıklar (atomlar, moleküller, radikaller) (Bailey, 2013b; Brown, 2004). Elektronlar, iyonlar ve nötr parçacıklar topluluğuna belirli şartlar altında plazma adı verilir (Inan ve Golkowski, 2011; Goebel ve Katz, 2008; Freidberg, 2007). Herhangi bir iyonlaşmış gaz, plazma olarak isimlendirilemez. Herhangi bir gazda hatta havada bile her zaman çok küçük derecede olsa da iyonlaşma vardır (Chen, 1983). İyonlaşmış bir gazın plazma olarak isimlendirilebilmesi için üç kriteri sağlaması gerekmektedir: 1) Debye uzunluğu plazma boyutundan küçük olmalıdır, 2) Debye küresi içindeki parçacıkların sayısı birden büyük olmalıdır, 3) plazma frekansı ortalama elektron-nötr çarpışma frekansından büyük olmalıdır (Chen, 1983; Kalvas, 2013; Freidberg, 2007).

Plazma doğada sıcaklığın yeterince yüksek olduğu güneş, yıldızlar, iyonosfer ve dünyada geçici olarak yıldırım gibi ortamlarda bulunur. Floresan lambası, neon ışıkları, yüksek voltaj atlamaları, ... insan yapımı plazmalara örnektir (Brown, 2004; Chen, 1983).

Laboratuvar plazmaları çeşitli şekillerde meydana getirilebilir. Plazma genelde basitçe bir kaptaki gazı ısıtarak oluşmaz. Tipik olarak laboratuvarda küçük bir miktar gaz üzerinden elektrik akımı geçirmek, üzerine elektromanyetik dalga yollamak gibi çeşitli yollarla ısıtılır ve iyonlaştırılır. Plazma oluşumunda plazma içerisindeki serbest elektronlara enerji doğrudan aktarılır, elektron-atom çarpışması daha fazla elektronu serbest bırakır, işlem yeterli iyonlaşma sağlayıncaya kadar çığ gibi büyür. Elektronlar elektrik akımını taşıdığı ve/veya mikrodalga/rf dalgalarıyla doğrudan etkileştiği için bazen elektronlar iyonlara göre daha sıcak olur (Goldston ve Rutherford, 1995).

3.3. Temel Plazma Parametreleri

3.3.1. Parçacık yoğunluğu

Plazmayı oluşturan bileşenler iyonlar, elektronlar ve genellikle iyonlaşmamış nötrlerdir. Plazma elektron yoğunluğu n_e , plazma iyon yoğunluğu n_i ve nötr parçacık yoğunluğu n_n olarak ifade edilir. Yoğunluğu cm^3 başına parçacık sayısı biriminden ifade etmek genel bir yaklaşımdır (Bailey, 2013b).

3.3.2. İyonlaşma derecesi, sanki nötrlük

Plazmanın sanki nötr olması demek, negatif ve pozitif yüklerin yoğunluklarının neredeyse eşit olması demektir (Bailey, 2013b; Chen, 1983; Brown, 2004). Plazmanın temel özelliğidir. Debye uzunluğu ile kıyaslandığında büyük uzunluklarda, plazma hemen hemen yük nötrlüğünü sağlar. Nötrlükten ayrıldığında elektrik alan yükselir ve bu da yük oluşumunu sınırlar (Brown, 2004).

Atomdan sadece bir tane elektron koparıldığında (iyonlaştığında), iyon için bir defa iyonlaşmış denir ve iyon yük durumu $Q_i = +1$ ’ dir. Gaz deşarj olayında bu en çok karşılaşılan durumdur. Burada Q harfini yük durumu olarak yazdık ve q ise yüküdür, $q = eQ$ olarak ifade edilir. Bu durum ele alındığında sanki nötrlük şu şekilde yazılabilir (Brown, 2004; Bailey, 2013b):

$$n_i \approx n_e \quad (3.1)$$

Daha genel bir durumda bir atomdan birden fazla elektron koparıldığını düşünelim, bu durumda iyon bir defadan fazla iyonlaşmış olur, iyon çoklu iyonlaşmış veya çok yüklüdür denir, iyon yük durumu birden fazladır: $Q_i = 2, 3, \dots$ (veya $2+, 3+, \dots$). Benzer şekilde iyonlar negatif yüklü de olabilir. En genel durum bir ve birden fazla iyonlaşmış pozitif ve negatif iyonların bulunmasıdır (Brown, 2004; Bailey, 2013b).

Eğer plazmada hiç nötr parçacık yoksa, plazma tamamen iyonlaşmış denebilir. Yüksek oranda iyonlaşmış kelimesi, %10 ve üzerinde iyonlaşan plazmaları tanımlamakta kullanılır (Brown, 2004; Bailey, 2013b).

3.3.3. Hız, enerji, sıcaklık

Hızı v , kütlesi m olan bir parçacığın kinetik enerjisi $KE = \frac{1}{2}mv^2$ ’ dir. N tane parçacıktan oluşan bir demetin parçacık başına ortalama kinetik enerjisi şu şekilde ifade edilir (Inan ve Golkowski, 2011):

$$KE_{ort} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N m_i v_i^2 \quad (3.2)$$

Plazma içindeki parçacık hareketi dağılım fonksiyonları ile tanımlanır. Plazma türlerinin termal dengede olduğu durumlarda, dağılım Maxwellian' dır. Basitlik açısından parçacıkların tek bir yönde hareket edebildiği bir gaz ele alalım. Tek boyutlu Maxwellian dağılımının genişliği, T sabiti ile karakterize edilir, buna sıcaklık denir (Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011; Brown, 2004).

Elektronların ve iyonların ortalama termal hızları şu şekildedir:

$$\bar{v}_e = 67\sqrt{T_e} \text{ cm } \mu\text{s}^{-1}$$

ve

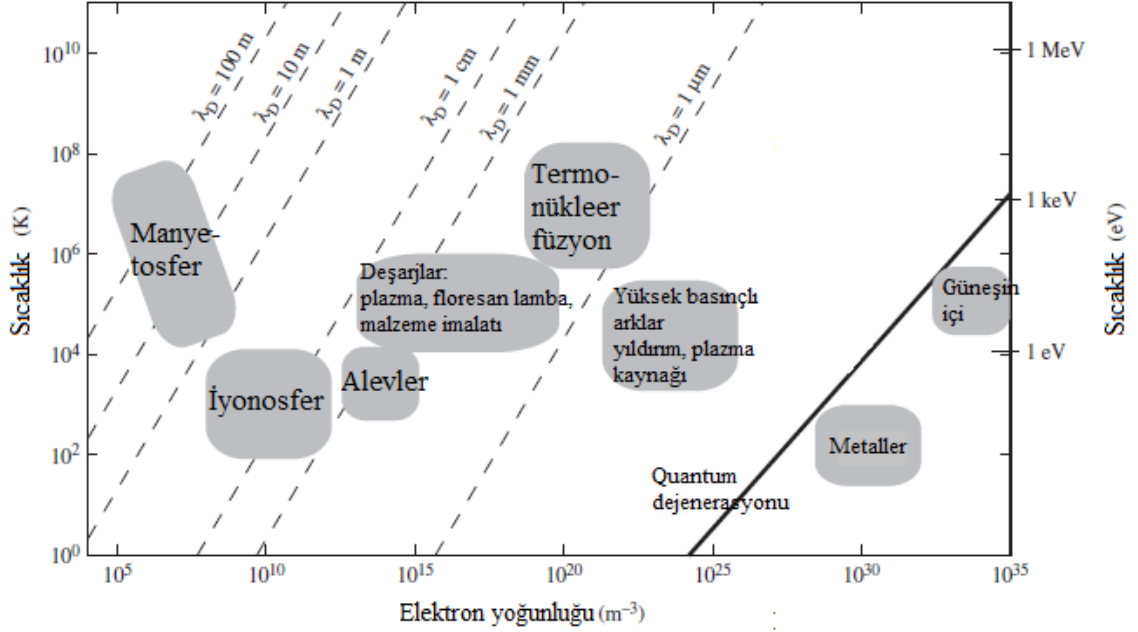
$$\bar{v}_i = 1,57 \sqrt{\frac{T_i}{A}} \text{ cm } \mu\text{s}^{-1} \quad (3.3)$$

Burada T_e ve T_i eV biriminde sıcaklık, A amu biriminde iyon kütesidir. Bazen biraz farklılık gösteren ifadeler parçacık sürati için kullanılır (Brown, 2004).

Sıcaklık (T) ve ortalama kinetik enerji (KE_{ort}) ifadeleri birbirleriyle çok yakından ilişkili olduğu için, plazma fiziğinde sıcaklığı eV biriminde vermek gelenekseldir. Dönüşüm faktörü, $1 \text{ eV}/k_B = 11600 \text{ Kelvin}$ ' dir, burada k_B Boltzmann sabitidir. (Brown, 2004).

Eksenler yoğunluk ve sıcaklık olarak alınırsa, farklı türde plazmaları üzerinde gösterebileceğimiz bir plazma haritası çizilebilir (Şekil 3.1). Burada gösterilen birçok plazma türü için elektron sıcaklığı iyon sıcaklığına eşit değildir (Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011; Brown, 2004).

Tipik bir düşük güçlü iyon kaynağı plazmasında, elektron sıcaklığı T_e 30 – 40.000 K mertebesinde, iyon sıcaklığı T_i ise 500 – 1000 K civarındadır. Elektron yoğunluğu n_e , 10^{10} cm^{-3} ve üzerindedir (Bailey, 2013b).



Şekil 3.1. Doğada ve teknolojiye görülen çeşitli plazmaların yoğunluk, sıcaklık ve debye uzunluğuna göre sınıflandırılması (Inan ve Golkowski, 2011).

3.4. Plazma Kriterleri

3.4.1. Debye uzunluğu ve plazma kılıfı

Plazma davranışının temel karakteristiği, uygulanan elektriksel potansiyeli perdeleme yeteneğidir. Plazma içerisinde bulunan iyonlar ve elektronlar, yüklü parçacıklardır. Bu nedenle elektrik ve manyetik alanlarının uzaklığındaki bir diğeri ile etkileşirler. Bir test parçacığı elektrik alanının sınır uzaklığını tanımlar, bu uzunluktan yakındaki alan parçacıkları test parçacığını bilir, benzer şekilde bu uzaklığın ardındaki parçacıklar test parçacığını bilmez. Aynı olgu plazma üzerine elektrik alan dış bir kaynaktan etki ettirildiğinde de gerçekleşir – iç bölgede alan perdelenir. Perdelemenin aslı yüklü parçacıkların yeniden dağılımında yatar, bu durum uygulanan alana bir cevaptır. Bu uzaklık zırhlama veya perdeleme uzaklığı olarak adlandırılır, etkin bir şekilde plazma içerisine dışarıdan uygulanan elektrik alanı dışarıda bıraktığı uzaklık veya kendisini

uygulanan elektrik alandan perdeleyen uzaklık olarak adlandırılır. Plazma için bir ölçek uzunluğu vardır, bu uzunluk Debye uzunluğu olarak isimlendirilir (Brown, 2004). Perdeleme uzaklığı veya kılıfın kalınlığı olarak tanımlanır. Debye uzunluğu λ_D olarak gösterilir ve aşağıdaki şekilde ifade edilir (Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011; Brown, 2004):

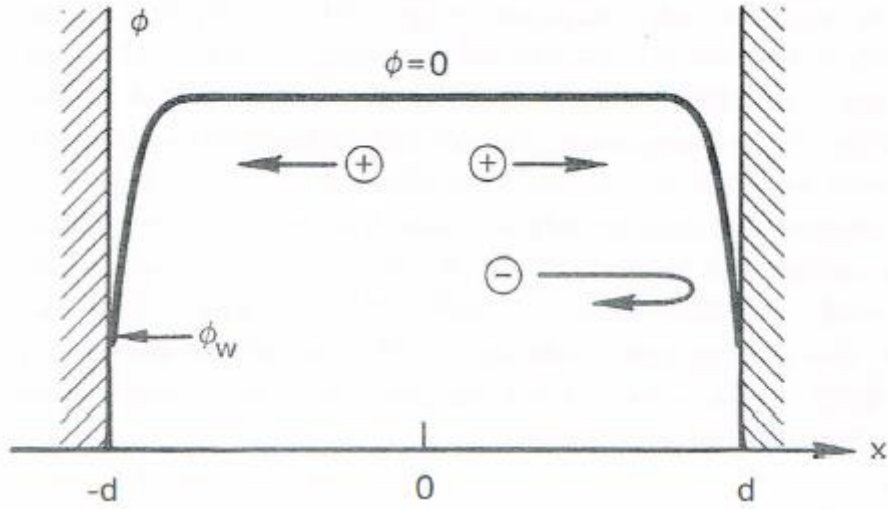
$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e}} = 743 \sqrt{\frac{T_e}{n_e}} \quad (3.4)$$

Burada ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliği, T_e eV biriminde elektron sıcaklığı, e elektron yükü, n_e cm⁻³ biriminde elektron yoğunluğu, λ_D ise cm biriminde Debye uzunluğudur.

Plazmanın yeterince yoğun olma şartı, iyonlaşmış bir gazın plazma olması için gereken kriterlerden birisidir. Böylelikle λ_D , L ile gösterilen plazma ölçüsünden çok çok küçük olur.

3.4.2. Plazma kılıfı (sheath)

Tüm plazma aygıtlarında, plazma sonlu uzunluktaki bir vakum odası içerisinde bulunur. Duvarda plazmaya ne olur? sorusunu cevaplarken basitlik açısından manyetik alanın bulunmadığı tek boyutlu model ele alınır (Şekil 3.2). Plazma içerisinde hissedilebilir derecede elektrik alanının olmadığı varsayılır, burada potansiyel sıfır olarak bırakılır. Elektronlar ve iyonlar duvara çarptığında yeniden birleşir ve yok olur. Elektronların iyonlara göre daha fazla termal hızları olduğundan, daha hızlı yok olurlar. Plazma duvara göre pozitif potansiyelli olmak zorundadır, duvar potansiyeli negatiftir. Bu potansiyel tüm plazma üzerine dağılamaz. Bu potansiyel değişimi Debye perdelemesi tarafından birkaç Debye uzunluğu mertebesinde bir tabakada hapsedilir. Bir sınır, plazma ve plazmayı saran duvar arasında oluşur ve buna kılıf adı verilir. Kılıfın fonksiyonu bir potansiyel bariyeri oluşturmaktır, böylece daha fazla çeşit (genellikle elektronlar) hapsedilir (Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011).



Şekil 3.2. Plazma kılıfı (Plazma potansiyeli duvar kenarlarında kılıflar oluşturur, böylece elektronlar geri yansır) (Chen, 1983).

Plazmanın sanki nötr olması sadece büyük ölçeklerde tanımlanır. Plazmayı mikroskobik ölçekte incelediğimizde, azalan ölçek uzunluğu ile nötrlükten artan sapmalar bulabiliriz (Bailey, 2013b). Plazma kılıfı içerisinde plazma nötr yüklü değildir. Bu bölge plazma parçacıklarının (genellikle elektronların) bir dağılıma sahip olduğu, mesela dış alanı yok ettiği veya plazma ile sınırları arasında denge geçiş bölgesi oluşturduğu bölgedir. Kılıfın keskin sınırları yoktur, kullanışlı bir demet oluşturmak için iyi tanımlı plazma sınırları ve uygulanacak elektrik alan istenir, böylece iyonlar hızlanır ve kullanışlı demet haline dönüşür (Brown, 2004).

3.4.3. Plazma parametresi

Daha önce bahsedilen Debye perdelemesi yüklü bulutta yeterli parçacık varsa geçerlidir. Açıkça, eğer kılıf bölgesinde bir veya iki parçacık varsa, istatistiksel olarak doğru bir kavram olmaz. Yarıçapı λ_D olmak üzere Debye küresi içerisindeki ortalama parçacık sayısı N_D ' yi hesaplayabiliriz:

$$N_D = n_e \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \quad (3.5)$$

Burada T Kelvin biriminde olmak üzere N_D plazma parametresi olarak bilinir. İyonlaşmış bir gazın plazma olarak adlandırılması için plazma parametresinin birden çok çok büyük olması gerekmektedir (Chen, 1983; Kalvas, 2013).

3.4.4. Plazma salınımları

Plazmanın elektriksel olarak neredeyse nötrlüğü sağlamasının plazmanın temel özelliği olduğundan bahsetmiştik. Debye uzunluğu ile kıyaslandığında büyük uzaklıklarda plazma yaklaşık yük korunumunu sağlar. Plazma içerisinde elektronların yerleri değiştirilirse, elektrik alan nötrlüğü sağlayacak şekilde yönelimini ayarlar ve elektronları orijinal konumlarına geri çeker. Bu durum bir geri çağırıcı kuvvet oluşturur (elektrik alan). Elektronlar eylemsizliklerinden dolayı orijinal konumda duramaz ve bu noktadan öteye geçer, denge konumu etrafında salınım yapmaya başlar, bu plazma salınımı olarak bilinir. Bu salınım çok hızlıdır, iyonların kütesi daha fazla olduğu için salınım alanına tepki verecek süreleri olmaz, bundan dolayı iyonlar sabit olarak düşünülür. Plazmanın çeşitli doğal salınım modları bulunmaktadır, bunlardan en temeli elektron plazma frekansı ω_{pe} 'dir. Şu şekilde verilir (Brown, 2004; Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011; Kalvas, 2013):

$$\omega_{pe}^2 = \frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \quad (3.6)$$

İyonlar da kendi doğal frekanslarında titreşir. Bu frekansa iyon plazma frekansı (ω_{pi}) adı verilir:

$$\omega_{pi}^2 = \frac{Q^2 e^2 n_i}{\epsilon_0 m_i} \quad (3.7)$$

Burada m_e elektron kütlesi m_i ise iyon kütlesidir. Genellikle elektron plazma frekansı plazma frekansı olarak isimlendirilir.

İyonlaşmış bir gazın plazma olarak isimlendirilmesi için üçüncü şart çarpışmalarla alakalıdır. Kısmi iyonlaşmış bir gazda çarpışmalar önemlidir. Nötr parçacıklarla

çarpışmalar arasındaki ortalama serbest zaman τ_n , salınım periyodu ile karşılaştırıldığında yeterince büyükse plazma salınımları oluşabilir. Bir iyonlaşmış gazın plazma olarak davranması için $\omega\tau > 1$ olmalıdır (Chen, 1983; Inan ve Golkowski, 2011; Kalvas, 2013).

3.5. Çarpışmalar

Plazma içerisinde yüklü parçacıklar arasında gerçekleşen çarpışmalar, sıradan bir gaz içerisinde nötr parçacıklar arasında gerçekleşen çarpışmalardan temel olarak farklıdır (Brown, 2004). Plazmanın çarpışmalı olma durumu, bazı işlemlerde önemli roller oynar. Manyetik olarak hapsedilmiş plazmada hapis zamanlarını düzenler, düşük sıcaklık deşarjlarda elektronların termal dengeye ulaşmalarını sağlar, iyon kaynakları için kullanılan plazmalarda iyonlaşma oranlarını belirler (Miracoli, 2010).

Ortalama serbest yol l , tesir kesiti σ ile şu şekilde ilişkilidir:

$$l = \frac{1}{n\sigma} \quad (3.8)$$

Burada n , parçacık yoğunluğudur. Çarpışma süresi, ortalama serbest yol ve tesir kesiti ile şu şekilde ilişkilendirilir (Brown, 2004):

$$\tau = \frac{\lambda}{v} \quad (3.9)$$

Burada v , ortalama parçacık hızıdır. İyon kaynağı plazmalarında τ , genellikle nanosaniye ile milisaniye mertebeleri arasında yer alır (Miracoli, 2010).

3.6. İyonlaşma

Plazma, iyonlaşma mekanizması sayesinde oluşur. İyon kaynakları da dâhil tüm plazma aygıtlarında plazma hazırlama önemlidir. İyonlaşma çeşitli yöntemlerle gerçekleşir, bunlara elektron etki iyonlaşması, fotoiyonlaşma, alan iyonlaşması, yüzey iyonlaşması, ... olarak sayılabilir. Genelde iyon kaynağı ismi plazmanın oluşum yönteminden gelmektedir (Brown, 2004).

Momentum ve enerji korunumunu sağlayan iki temel iyonlaşma işlemi vardır: a) Etki ile iyonlaşma; elektron atoma çarpar, bunun sonucunda iyon ve iki elektron kopartılır. b) Işınımsal iyonlaşma; yeterli enerjideki foton atom tarafından soğurulur, daha sonra atom bir iyon ve elektrona ayrılır. Bu işlemlerin tersi ile iyonlar atomlara dönüşebilir: a) Üç cisim birleşmesi; iki elektron ve iyon birleşir ve nötr bir atomla elektron oluşur, b) Işınımsal yeniden birleşme; bir elektron ve iyon birleşerek atomu oluşturur ve foton yayımlanır. Çoğu laboratuvar plazması ultraviyole radyasyonu tuzaklamak için çok küçüktür. Bu durumda plazmalarda yüksek yoğunluklarda yerel termodinamik denge vardır, etki iyonlaşması ve üç cisim birleşmesi ışınımsal iyonlaşma ve/veya yeniden birleşme işleminden daha önemlidir. Ancak üç cisim birleşmesinin ışınımsal yeniden birleşmeyi aşması için plazma yoğunluğunun çok yüksek olması gerekmektedir (Goldston ve Rutherford, 1995).

Gaz fazında plazma içerisinde gerçekleşen iyonlaşma reaksiyonlarından bazıları, Çizelge 3.1 ve 3.2’ de verilmektedir (Braithwaite, 2000). Burada Çizelge 3.1’ de elektronların dahil olduğu reaksiyonlar, Çizelge 3.2’ de ise iyonların ve nötrlerin dahil olduğu reaksiyonlar gösterilmektedir.

Çizelge 3.1. Elektronların dahil olduğu bazı gaz fazı reaksiyonları (Braithwaite, 2000).

Reaksiyonlar		Tanım
$e^- + A$	$\rightarrow A + e^-$	Elastik saçılma
$e^- + A$	$\rightarrow A^+ + e^- + e^-$	İyonlaşma
$e^- + A$	$\rightarrow A^* + e^-$	Uyarma
$e^- + A$	$\rightarrow e^- + A^* \rightarrow e^- + A + h\nu$	Uyarma
$e^- + A^*$	$\rightarrow A^* + e^- + e^-$	İki basamaklı iyonlaşma
$e^- + A^* + B$	$\rightarrow A + B$	Hacim yeniden birleşmesi

Çizelge 3.2. İyonların ve nötrlerin dahil olduğu gaz fazı reaksiyonları (Braithwaite, 2000).

Reaksiyonlar		Tanım
$A^+ + B$	$\rightarrow B^+ + A$	Yük değişimi
$A^+ + B$	$\rightarrow B + A^+$	Elastik saçılma
$A^+ + B$	$\rightarrow A^+ + B^* + e^-$	Uyarma
$A^+ + B$	$\rightarrow A^+ + B^+ + e^-$	İyonlaşma
$A+B^*$	$\rightarrow A^+ + B + e^-$	Penning iyonlaşma
$A^+ + BC$	$\rightarrow A^+ + B + C$	Ayrılma
$e^- + A^+ + B$	$\rightarrow A + B$	Hacim yeniden birleşmesi

3.7. Manyetik Alan Etkileri

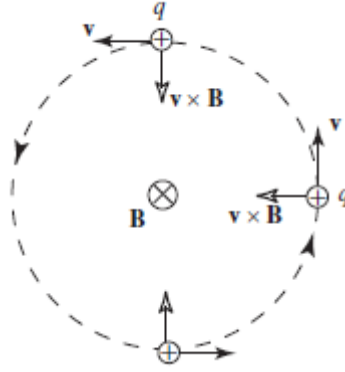
Hareket halindeki yükler manyetik alanın bulunduğu durumda bir kuvvet etkisi altında kalır, plazma içerisindeki iyonlar ve elektronlarda bu kuvvetin etkisi altında hareket eder (Şekil 3.3). Manyetize olmuş plazmada iyonların ve elektronların hareketi, manyetik alana dik olarak dairesel bir yörüngedir.

Diğer plazma parçacıkları ile olan çarpışmaları bir kenara bırakırsak, ortaya çıkan parçacık hareketi heliseldir, bu enine dairesel hareket ile boyuna sabit hızın bileşimidir. İyonlar ve elektronlar sanki elektrik alan çizgilerine bağlıymış gibi hareket eder. Plazmanın manyetik alandaki davranışı, manyetik alan yokluğundaki davranışından farklıdır. Yükü q , hızı v olan bir parçacık elektrik alan E ve manyetik alan B ' nin varlığında hareket ederse, bir kuvvete maruz kalır:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.10)$$

Bu kuvvet Lorentz kuvveti olarak adlandırılır. Elektrik alanın sıfır olduğu en temel durum ele alındığında denklem tekrar şu şekilde yazılabilir:

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.11)$$



Şekil 3.3. B manyetik alanı etkisi altında yükü q , hızı v olan bir parçacığın hareketi.

Bu durumda yüklü parçacıkların basit siklotron (dönme) hareketi vardır. Bu kuvvet merkeze doğru yönelmiştir, parçacık manyetik alanın paralel bileşenine göre dik bir hızla hareket etmektedir. Düzgün bir $\mathbf{B}$ manyetik alanını z yönünde alırsak, Denklem 3.11' i şu şekilde yeniden yazabiliriz:

$$m\dot{v}_x = qBv_y, \quad m\dot{v}_y = -qBv_x, \quad m\dot{v}_z = 0 \quad (3.12)$$

Bu denklemlerden görüleceği üzere manyetik alanın, manyetik alan doğrultusunda parçacık hareketine bir etkisi yoktur. Burada siklotron frekansı

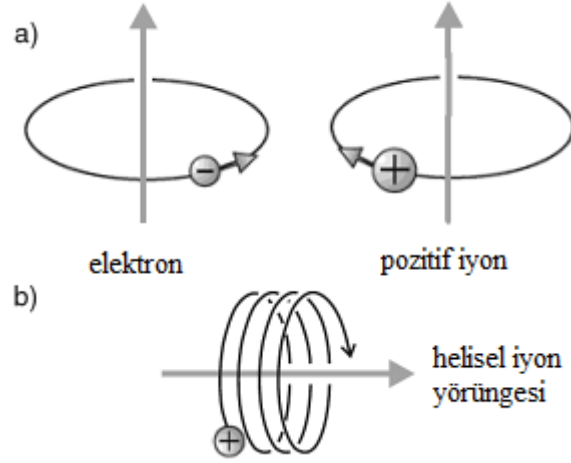
$$\omega_c = \frac{qB}{m} \quad (3.13)$$

olarak tanımlanır. Burada q paracık yükünü, m parçacığın kütlesini, B ise uygulanan dış manyetik alanın büyüklüğünü simgeler. Siklotron frekansı (dönme frekansı), merkezci kuvvet $m\omega^2 r$ ile Lorentz kuvveti $q\omega r B$ eşitlendiğinde elde edilir. Denklem 3.13' ten parçacığın z yönündeki başlangıç hızının değişmediği görülür, kılavuz merkezi z yönünde doğrusal olarak sabit hız ile hareket eder. Bu hareket sonucunda parçacık yörüngesi helisel olur (Şekil 3.4).

Lorentz kuvvetini merkezci kuvvetle eşitlersek, dairesel yörüngenin yarıçapı için bir ifade elde edilir:

$$\rho = \frac{mv_{\perp}}{eQB} \quad (3.14)$$

Bu siklotron yarıçapı, Larmor yarıçapı veya dönme yarıçapı olarak tanımlanır.



Şekil 3.4. a) Dönme hareketi ve b) helisel yörünge (Piel, 2010).

Manyetik alan etkisi altında oluşan dönme hareketi parçacık işaretine bağlıdır. Elektronlar sağ eli, pozitif iyonlar sol eli yörüngede hareket eder (Piel, 2010). Bu dönme hareketleri plazma içerisine bazı tür dalgaları eşleştirmek için önemlidir, aksenal yayılan dalgalar (doğru frekansta) eğer dalga sağ eli polarize ise elektronlar aracılığı ile gücü plazma ile eşleştirebilir, eğer dalgalar sol eli polarize ise iyonlar aracılığı ile gücü plazma ile eşleştirebilir (Brown, 2004).

İyonlar / elektronlar dönme hareketi yaptığında, iyonlar / elektronlar manyetize olmuş denir. Dönme yörüngesi çarpışmalar tarafından bozulmadığında durum bu şekildedir. Bunun oluşması için iyon / elektron çarpışma frekansı, iyon / elektron siklotron frekansından küçük olmalıdır. Bu durum genelde elektronlar için sağlanır (Piel, 2010).

En basit durumda elektron siklotron frekansında mikrodalga gücün rezonans soğurulması elektron yoğunluğu belirli bir kritik yoğunluğun (n_{kritik}) altındaki plazmalarda görülür, buna aynı zamanda sınır yoğunluğu denir: $n < n_{kritik}$. Aksi halde mikrodalga gücü plazma içerisine aktarılmaz, geri yansır. Bu şart aynı zamanda mikrodalga frekansındaki şart olarak ifade edilebilir, bu frekans elektron siklotron frekansından büyük olmalıdır:

$\omega > \omega_p$. Verilen bir yoğunluk için bu kritik frekans olarak adlandırılır. Verilen bir mikrodalga frekansı için kritik yoğunluk şu şekilde ifade edilir (Brown, 2004):

$$n_{kritik} = 1,25 \times 10^{10} f^2 \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (3.15)$$

Burada mikrodalga frekansı f , GHz biriminde ifade edilmektedir. Bu limite rağmen, bazı şartlar altında mikrodalga ile üretilmiş plazma yoğunluğu kritik yoğunluğun üstünde oluşabilir. Bu tür plazmalara aşırı yoğun plazma denir (Brown, 2004).

3.8. Plazmada Dalga Yayılımı

Plazmanın manyetik alan etkisinde olması veya olmaması durumları göz önünde bulundurulduğunda birçok dalga tipi olasıdır. Çok fazla matematiksel işlem vardır ve bu işlemler karmaşıktır. Biz burada, konunun amacından sapmasını engellemek adına mikrodalga iyon kaynaklarının çalışma prensibini açıklamakta kullanılan elektromanyetik ve elektrostatik dalgaların tanımlarını ele alacağız, detaylı analizlere girmeyeceğiz. Konuya giriş yapmadan önce dalga vektörü, dik, paralel, enine, boyuna, elektrostatik, elektromanyetik, kırılma indeksi kavramlarını ele alalım.

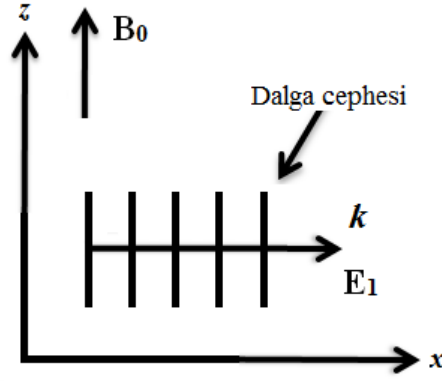
$\vec{k}$ dalga vektörü, dalganın yayılım yönünü belirtir. $\vec{k}$ 'nın büyüklüğü dalga boyuyla $k = 2\pi/\lambda$ bağıntısı ile ilişkilidir (Piel, 2010). Paralel ve dik, dış manyetik alan B_0 ' a göre dalga vektörünün yönünü göstermekte kullanılacaktır. Boyuna ve enine, salınım yapan elektrik alan E_1 'in yönüne göre k 'nın yönüdür. Salınım yapan manyetik alan B_1 sıfırsa, dalga elektrostatiktir, sıfır değilse dalga elektromanyettir. Burada E_1 dalganın salınım yapan elektrik alan bileşeni ve B_1 dalganın salınım yapan manyetik alan bileşenidir. (Chen, 1983).

Optikte bir ortamın kırma indeksi, vakumdaki ışık hızının o ortamdaki hıza bölünmesi olarak tanımlanabilir. Bu kavram benzer şekilde plazma içerisindeki elektromanyetik dalgalara uygulanabilir. Kırma indeksi şu şekilde tanımlanır (Piel, 2010):

$$N = kc/\omega \quad (3.16)$$

3.8.1. B_0 ' a dik elektrostatik elektron salınımları

Yüksek frekanslı, elektrostatik, manyetik alana dik yönde hareket eden elektron salınımlarının geometrisi Şekil 3.5' te verilmektedir.



Şekil 3.5. B_0 ' a dik yönde hareket eden boyuna düzlem dalgaların geometrisi (Chen, 1983).

B_0 ' a dik elektron salınımlarında iyonların elektronlara göre hareket etmeleri için çok ağır olduğunu varsayabiliriz, bu durumda iyonlar yük nötrlüğünü korumak için pozitif yüklerden oluşan sabit bir arka fon oluşturur. Teorinin basitliği açısından termal hareketi ihmal edebiliriz, bu durumda $k_B T_e = 0$ olur.

Sadece $k \parallel E_1$ olan boyuna dalgalar dikkate alındığında dispersiyon bağıntısı şu şekilde verilir:

$$\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2 \equiv \omega_h^2 \quad (3.17)$$

ω_h üst hibrit frekansı olarak isimlendirilir. Sadece B_0 yönünde ilerleyen elektronlar $\omega = \omega_p$ ile plazma salınımı yapar, bu yönde elektronlar dönme hareketi yapmaz. B_0 ' a dik yönde ilerleyen elektronlar ω_h ile salınım yapar. Elektronların üzerine etkiyen iki geri çağırıcı kuvvet vardır: elektrostatik alan ve Lorentz kuvveti. Geri çağırıcı kuvvet, frekansları plazma salınımlarında daha büyük yapar. Manyetik alan sıfıra gittiğinde ω_c sıfıra gider, bu durumda sadece plazma salınımı vardır. Plazma yoğunluğu sıfıra gittiğinde elektrostatik kuvvet kaybolur; sadece basit dönme hareketi vardır (Chen, 1983).

3.8.2. Elektrostatik Bernstein dalgaları

Elektron siklotron dalgalarının özel bir türü, elektrostatik Bernstein (EB) dalgalarıdır; bunlar manyetize olmuş sıcak plazmadaki kısa boylu elektrostatik dalgalardır (Laqua, 2007). Yüksek yoğunluklu plazmalarda, plazma elektromanyetik elektron siklotron dalgaları için ulaşılabilir değildir, bu durumda EB dalgaları plazmayı ısıtmakta kullanılır (Bailey, 2013).

EB dalgaları, elektron siklotron frekansı harmonikleri arasındaki frekansta ortamın manyetik alanına dik yönde yayılır. Elektrostatik dalga özelliği gösterir. Tamamen kinetik dalgadır, dispersiyon bağıntıları parçacıkların hız dağılımlarına hassas bir şekilde bağlıdır (Henning vd., 2011). Siklotron frekansının harmonikleri, parçacıkların yörüngeleri E_1 ve B_1 dalga alanları tarafından bozulduğunda üretilir (Chen, 1983). Bernstein dalgaları, ω_c 'nin harmoniklerinde soğurulur. Bununla birlikte bu dalgalar plazma dışında yaratılamaz, plazma içerisinde üretilmek zorundadırlar (Bailey, 2013b).

3.8.3. Manyetik alanın yokluğunda elektromanyetik dalgalar

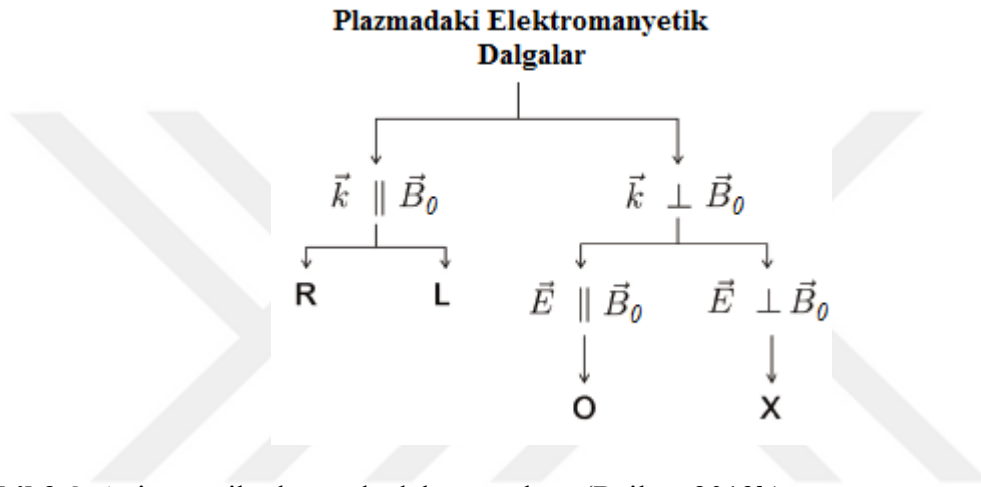
Elektromanyetik dalgalar plazma içerisinde dış manyetik alanın olmadığı durumda yayıldığında plazma izotropik bir ortamdır. Homojen ve manyetize olmamış plazmada, plazma yoğunluğu kritik yoğunluğu geçemez. Manyetize olmamış plazmada dispersiyon bağıntısı şu şekilde verilir:

$$\omega^2 - \omega_p^2 = k^2 c^2 \quad (3.18)$$

Burada ω_p plazma frekansı, k dalga vektörünün büyüklüğüdür. Büyük kc değerlerinde elektromanyetik dalgalar sıradan ışık dalgaları haline gelir, bu limitte plazmanın bulunmasıyla sönümlü hale gelmezler (Chen, 1983; Bailey, 2013b). Bu şekildeki dispersiyon bağıntıları kritik isimli bir olayı ortaya çıkartır. Eğer n çok büyükse veya ω çok küçükse, elektromanyetik dalga plazmadan geçemez (Chen, 1983).

3.8.4. Manyetize olmuş plazmada elektromanyetik dalgalar

Güçlü bir şekilde manyetize olmuş plazmalarda, dış manyetik alanın yönü elektromanyetik dalgaların yayılımında anizotropiye sebep olur (Bailey, 2013b). Uygulanan manyetik alan yönü, dalganın yayılım yönü ve elektrik alan arasındaki ilişki dikkate alındığında soğuk plazmada bulunabilecek bazı elektromanyetik dalgalar ve yönelimi Şekil 3.6' da verilmiştir.



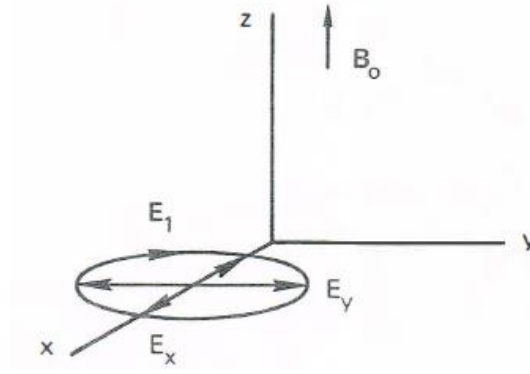
Şekil 3.6. Anizotropik plazmada dalga yayılımı (Bailey, 2013b).

3.8.4.1. Manyetik alana dik yöndeki dalgalar

B_0 manyetik alanına dik yönde yayılan dalgalar O ve X dalgaları olarak, dalga elektrik alanı yönelimine göre isimlendirilir. $k \perp B_0$ ve $E \parallel B_0$ ise, dalgamız O modundadır. $k \perp B_0$ ve $E \perp B_0$ ise, elektrik alanın yöneliminin hangi tarafa olduğu önemsizdir ve dalga X modunda olarak isimlendirilir (Bailey, 2013b).

Plazma fiziğinde O dalgası, manyetik alan tarafından etkilenmeyen dalga olarak tanımlanır (Chen, 1983).

$E_1 \perp B_0$ durumundaki dalgalar, X dalgaları, düzlemsel polarize yerine eliptik polarize dalga gibi davranmaktadır (Şekil 3.7). Bu şekilde plazma içinde yayılan bir dalga, k yönünde E_x bileşeni oluşturur. Bu elektromanyetik dalga, kısmen enine kısmen boyuna bir dalgadır, B_0 ' a dik yönde $E_1 \perp B_0$ olacak şekilde yayılır (Chen, 1983).



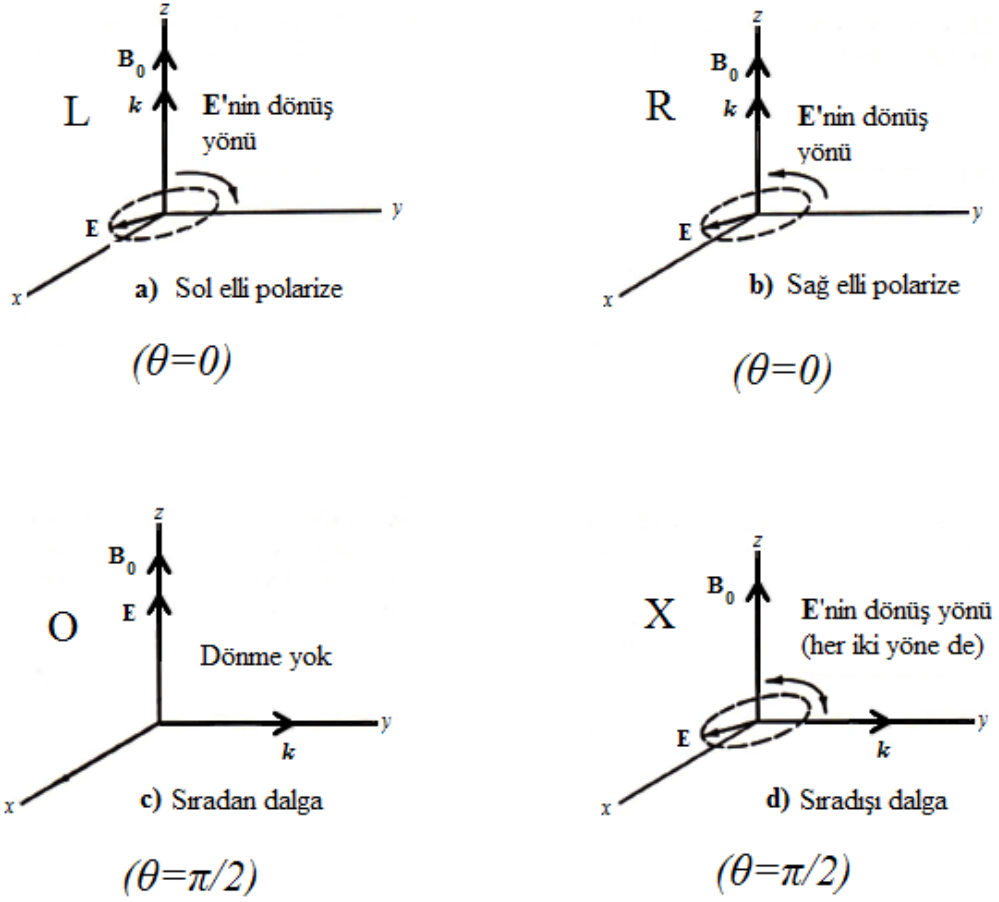
Şekil 3.7. X dalgasının eliptik olarak polarize olması (Chen, 1983).

3.8.4.2. Manyetik alana paralel yöndeki dalgalar

Genelde manyetik alan boyunca yayılan dalgalar polarizasyonlarına göre R ve L dalgaları olarak adlandırılır, R dalgası sağ eli polarize olmuş dalga ve L dalgası sol eli polarize olmuş dalga olarak isimlendirilir. R için elektrik alan vektörü zamanla saatin ters yönünde döner, B_0 boyunca; L saat yönünde döner (Şekil 3.8) (Chen, 1983).

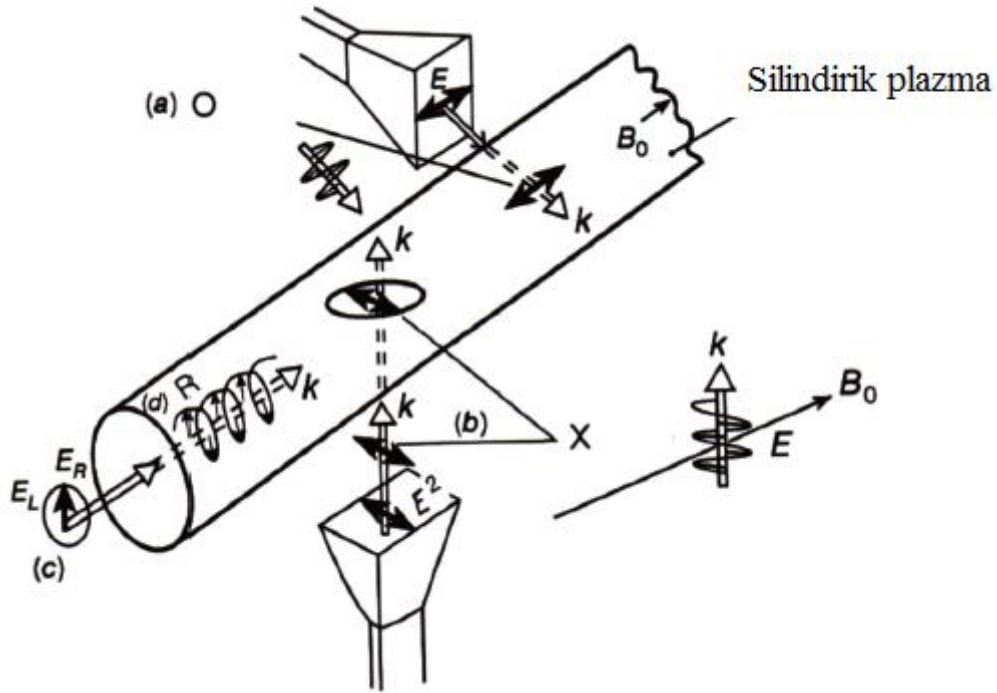
R, L, O ve X dalgalarının kritik ve rezonans frekansları önemlidir. R dalgaları için $\omega = \omega_c$ olduğunda mikrodalga frekansı Larmor frekansına eşit olur, bundan dolayı dalga elektronların siklotron hareketi ile rezonanstadır. Bu rezonans elektron siklotron rezonansı olarak isimlendirilir, ECR iyon kaynakları için birinci dereceden öneme sahiptir (Bailey, 2013b). Pratikte manyetize olmamış plazmada Langmuir salınımlarına karşılık gelir. B'ye dik elektrostatik elektron dalgaları bu frekansa sahiptir, B boyunca olan dalgalar genel plazma salınımı yapar: $\omega = \omega_p$. Manyetize olmuş plazmada X modu ilerlerken $\omega^2 = \omega_p^2 + \omega_c^2 \equiv \omega_h^2$ olması durumunda üst hibrit rezonansı görülür (Bailey, 2013b). L ve O modları herhangi bir rezonansla karşılaşmaz. Kırılma indisi sıfır olduğunda bir kritik frekansla karşılaşır (Bailey, 2013b).

Manyetik alana göre verilen açıda dalga yayılımı gerçekleştiğinde, açıyla faz hızları değişir. Yukarıda bahsedilen modlar $k \parallel B_0$ ve $k \perp B_0$ sürekli olarak birbirine dönüşür.



Şekil 3.8. Manyetize olmuş plazmada dalga yayılımında olası polarizasyonlar (Bailey, 2013b).

Elektromanyetik dalgaların çeşitli yollarla manyetize olmuş plazma içerisine gönderilmesi, Şekil 3.9’ da verilmektedir (Bailey, 2013b).



Şekil 3.9. Manyetize olmuş plazmaya elektromanyetik dalgaların gönderilmesi (Bailey, 2013b).

3.9. Mikrodalga İyon Kaynaklarında Plazma Oluşumu

Mikrodalga iyon kaynaklarının yapılarında plazma oluşum mekanizması dışında farklılık yoktur. Plazma oluşum mekanizmasındaki farklılık, manyetik alan profillerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Mikrodalga iyon kaynakları ECR iyon kaynakları ve mikrodalga deşarj iyon kaynakları olarak ikiye ayrılır.

3.9.1. ECR kaynakları

ECR iyon kaynakları ilk defa 1965 yılında R. Geller tarafından önerilmiş ve 1971 yılında ilk ECRIS tamamlanmıştır. Elektron siklotron rezonansı, elektromanyetik enerjinin plazma elektronlarınca soğurulmasını sağlar. ECR iyon kaynakları, manyetik alan etkisi altında elektron siklotron rezonans frekansında plazmanın ısıtılma prensibine dayanır.

Mikrodalga gücü dalga kılavuzu yardımıyla plazmaya aktarılır. B manyetik alanı plazma odası etrafına yerleştirilen iki veya üç solenoid tarafından üretilir. Bu esnada hekzapol mıknatıslar plazma odasının merkezinden duvarlarına doğru artan radyal

manyetik alan oluşturur. ECR iyon kaynaklarının manyetik alanlarının bu kadar karmaşık olmasının sebebi, yüksek yük durumlu iyon üretiminde iyonları tuzaklamaktır. Tek yük durumlu iyon da üretilebilir.

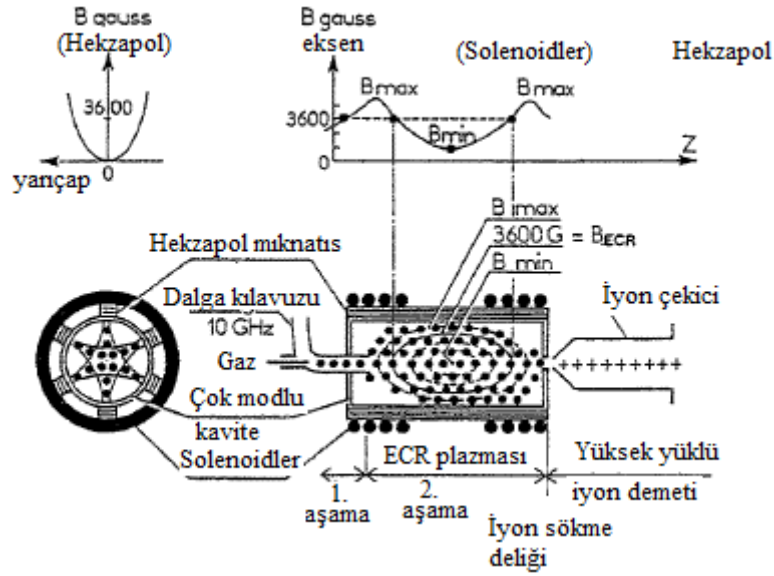
Mikrodalgalar plazmayla güçlü bir şekilde elektron siklotron rezonans ısıtma mekanizması vasıtasıyla eşleşir, burada manyetik alanın $\omega = \omega_c$ durumunda $B = (357 \times f)$ G ile uyumlu olması sağlanır, burada f GHz birimindedir. Mesela 2,45 GHz mikrodalga frekansına karşılık gelen manyetik alan değeri 875 G' tur. Plazma odasına gönderilen mikrodalgalar, sağ elli polarize R dalgalarıdır. R dalgaları için $\omega = \omega_c$ olduğunda mikrodalga frekansı Larmor frekansına eşit olur, bundan dolayı dalga elektronların siklotron hareketi ile rezonanstadır ve elektronların ısıtılmasını sağlar (Bailey, 2013a, 2013b; Castro, 2012; Brown, 2004; Popov, 1991; Taylor, 1991).

ECR iyon kaynaklarının manyetik alan yapısı karmaşık olduğu için, elektronların ısıtılması genelde Stokastik ECR ısıtma prensibiyle açıklanır.

Manyetik hapis prensibi: İyonlaşma mekanizması yavaş bir mekanizmadır ve yüksek yük durumları için uzun plazma ömürleri gerektirir. ECR kaynaklarında manyetik hapis önemli bir rol oynar çünkü plazmayla etkileşmeyi sağlamakta gerekli mikrodalga gücünü güçlü bir şekilde etkileyen parçacık ömrünü etkiler. Daha iyi manyetik hapis, daha iyi iyonlaşma verimi ve yüksek yük durumlu iyon üretimi sağlar. Bu sebeplerden, eksenel manyetik alanlara radyal manyetik alanlar eklenir, bu yapılara B_{min} yapılar adı verilir. Bu ismin verilme sebebi, merkezde manyetik alanın minimum olmasıdır. Elektronların hapis süresi genelde 10^{-3} saniyedir. Bu süre sadece eksenel manyetik alan bulunması durumundan neredeyse 50 kat daha büyüktür (Geller, 1991).

Stokastik ECR ısıtması: Elektronların elektron siklotron rezonans ısıtması kısaca şu şekilde anlatılabilir: Şekli belli olmayan, içerisi mikrodalga gücü ile dolu metal bir kavite düşünelim. Buna örnek olarak Şekil 3.10' da gösterilen Geller tarafından tasarlanan ECR iyon kaynağı düşünülebilir (Geller, 1991). Örnek olarak $f = 10$ GHz ve dalga boyu 3 cm olsun. Eğer metal kavitenin boyutları dalga boyuna göre büyükse, kavite çok modlu kavite olarak ele alınır. Eğer kavite mesela manyetik alan şiddetinin 0,2 ile 0,5 T arasında olduğu minimum B yapısı içerisine yerleştirilirse, B_{ECR} ' nin 0,36 T olduğu küresel veya yumurta

şekli manyetik yüzey oluşur. Bu yüzeyde elektronların dönme frekansı 10 GHz' dir ve mikrodalgaların frekansına eşit olur. ECR şartı sağlanır. Dönme hareketiyle elektronlar, manyetik alana dik yönde enerji kazanır. Oluşturulan manyetik alan içerisinde elektronlar birçok defa ECR yüzeyinden geçer. Elektronların bu yüzeyden çok defa geçmesinin sonucunda stokastik elektron siklotron rezonans adı verilen genel bir ısıtma işlemi oluşturur, elektronlar hızlı bir şekilde keV mertebesinde enerjilere erişir (Geller, 1991).



Şekil 3.10. 1991 yılında Geller tarafından tasarlanan ECR iyon kaynağı şematik gösterimi (Geller, 1991).

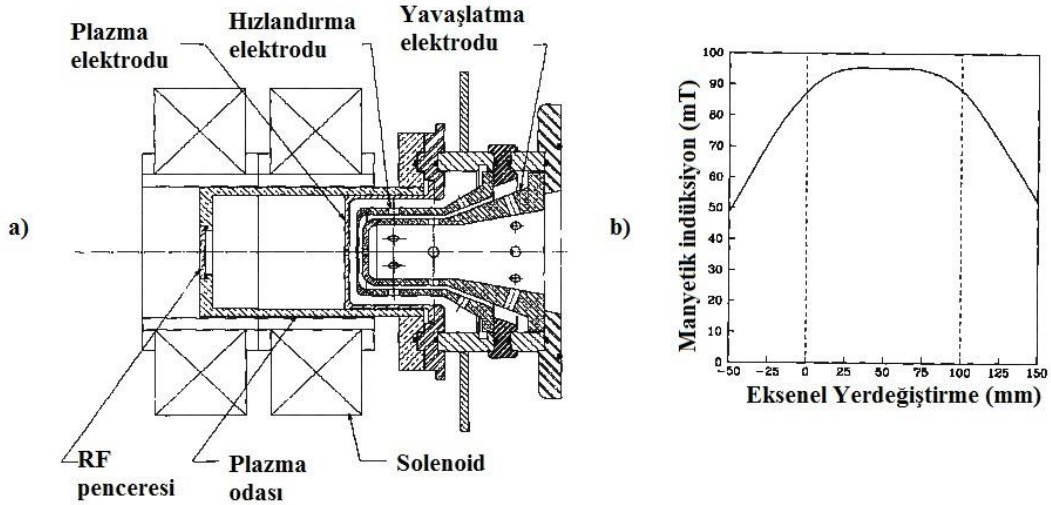
ECR iyon kaynaklarında frekans artırıldığında, daha yüksek akım yoğunluklarına ulaşılabilmektedir. Bu kaynağın akım yoğunluğu, uygulanan manyetik alan şiddeti ile de orantılıdır. Bununla birlikte yüksek yük durumlu iyon üretiminde günümüzde en çok tercih edilen kaynaklardan birisidir (Bailey, 2013b).

3.9.2. Rezonansın olmadığı durumlar ($B < B_{ECR}$ ve $B > B_{ECR}$)

Mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının yapısında, ECR' den farklı olarak sadece aksenal manyetik alanı oluşturmakta kullanılan 2 veya 3 tane solenoid bulunmaktadır. Manyetik hapsi sağlayan mıknatıslar bulunmamaktadır (Şekil 3.11). Mikrodalga gücü dalga kılavuzu yardımıyla plazmaya aktarılır. Burada manyetik alanın plazma odası boyunca büyüklüğüne göre iki farklı durum oluşur: i) Manyetik alanın plazma odası

boyunca elektron siklotron rezonans frekansından düşük olması $B < B_{ECR}$ ve ii) Manyetik alanın plazma odası boyunca elektron siklotron rezonans frekansından büyük olması $B > B_{ECR}$. Günümüzde kullanılan yüksek akımlı mikrodalga deşarj iyon kaynakları, 1991 yılında Taylor ve Wills' in ECR iyon kaynaklarındaki manyetik alanı basitleştirmek için sadece iki tane solenoid mıknatıs kullanarak yapmış olduğu iyon kaynağını temel alır, bu kaynakta manyetik alan elektron siklotron rezonans frekansından büyüktür (Taylor ve Wills, 1991). Şekil 3.11' de Taylor ve Wills'in 1991 yılında tasarladığı mikrodalga deşarj iyon kaynağı ve eksen boyunca manyetik alanı verilmiştir. Mikrodalga deşarj iyon kaynaklarında genellikle ucuz ve güvenilir magnetronların bulunmasıyla 2,45 GHz frekans tercih edilir.

Mikrodalgalar plazma odası içerisine farklı yönlerden gönderilebilir. Burada en çok karşılaşılan durum olan mikrodalgaların plazma eksenini boyunca gönderilmesini ele alacağız.



Şekil 3.11. a) İlk mikrodalga deşarj iyon kaynağı ve b) manyetik alan profili (Taylor ve Wills, 1991).

Burada ele alacağımız ilk durumda, plazma odasında her yerde manyetik alan elektron siklotron rezonans değerinin altındadır, $B < B_{ECR}$: Gelen dalga saf elektromanyetik modda değildir, yoğun plazma ile etkileşim elektrostatik salınımları tetikler. Gelen elektromanyetik dalganın soğurulması kolektif yaklaşımla tanımlanabilir: Elektronların dönme hareketi kararsız alanlar ve yüksek frekanslarla (mikrodalga

frekansları ile kıyaslanabilir mertebede) birlikte plazmada oluşan kayıplar tarafından bozulur. Daha sonra EB dalgaları uyarılır. EB dalgaları sıcak plazma çekirdeği ile herhangi bir kritik frekans olmadan etkileşir ve siklotron harmonik alanlarında ($B_{ECR}/2$ veya $B_{ECR}/3$) soğurulur. Plazmaların elektrostatik Bernstein dalgaları tarafından ısıtılmasıyla, yoğunluk kritik yoğunluğun üstüne çıkar ve plazma aşırı yoğun hale gelir. Bu opsiyon kullanışlıdır fakat plazma ikinci dereceden EB soğutulmasından dolayı dalgalı ve düzgün olmayan şekilde yaratılmıştır, plazma odasının bir kısmı boş kalır (Gammino vd., 2010; Popov vd., 1992). Günümüzde $B < B_{ECR}$ şartını sağlayarak çalışan yüksek akımlı iyon kaynağı bulunmamaktadır.

Diğer durum rezonansın olmadığı dalga plazma etkileşimidir, $B > B_{ECR}$. Bu iyon kaynağı türünde manyetik hapis yoktur. Genelde eksenel manyetik alan 2 veya 3 solenoidle sağlanır. Manyetik alan, mikrodalgaların plazmaya girdiği ve çıktığı bölgede ECR şartını sağlayacak şekilde dizayn edilir. Plazma odasının bulunduğu bölgede eksenel manyetik alan neredeyse düzdür (Castro vd., 2014). İyon sökme bölgesinde manyetik alanın hızlı bir şekilde sıfıra düşmesi istenir, bunun başlıca sebepleri demetin yayılımını düşürmek ve manyetik alanın iyon sökme bölgesinde elektriksel atlamalara sebep olmasını engellemektir (Castro vd., 2014; Gammino vd., 2006).

Bu kaynak türünde iyon kaynakları tek yüklü iyon üretiminde yüksek akımlara çok rahat çıkabilmektedir, buna karşın çalışma prensibi farklı teorilerle açıklanmaktadır. Burada çoğunluk tarafından kabul edilmiş teorileri ele alacağız. Elektromanyetik dalgalar ve plazma elektronları arasında rezonans, ECR ısıtmasının görülmesi şartıyla yüksek plazma yoğunluklarında bile görülebilir (ECR ısıtmasının tek parçacık teorisi, dalga-parçacık etkileşimi sırasında elektronların çarpışmasız hareketini temel alır). ECR bölgelerinin varlığı şu şekilde düşünülebilir: ECR başlangıçta havagazı çakmağı gibi ilk kıvılcımı oluşturur, daha sonra yakıt rezonansın olmadığı deşarj tarafından tüm plazma odasını kapsayacak şekilde sağlanır.

Daha uygun teori, dalga-parçacık etkileşimi sırasındaki çarpışmasız elektronları çarpışmalı duruma klasik ECR ısıtma teorisini genelleştirir. Yoğun ve dalgalı plazmada güçlü plazma kaybı vardır, bu durumda frekansı ν_{op} olan tek elektron kolektif saçılmaya uğrar. Bu güçlü bir şekilde plazma frekansı ω_p ' ye bağlıdır; $\nu_{op} > \omega_{EC}$ ise elektron dönme

hareketi güçlü bir şekilde kolektif çarpışmalar tarafından rahatsız edilir ve ECR hızlandırması sırasında elektron dalgaya göre fazın dışına çıkar. Bu etkin dönme periyodunun çarpışmasız duruma göre daha büyük olduğu anlamına gelir. Dönen dalga elektrik alanı ile senkronizasyonu korumak için, B_{ECR} ' den daha büyük bir manyetik alan gereklidir, böylece hızlandırma yeniden başlar. Bu yaklaşımın anahtar noktası, manyetik alana paralel yayılan elektromanyetik dalgalar (R, sağ eli polarize dalgalar) aşırı yoğun plazmada bulunur. R dalgaları rezonansın olmadığı bölgede B_{ECR} ' nin üstünde yayılır. Daha yüksek plazma yoğunluğuna $B_{ECR} < B < 1,3B_{ECR}$ olduğu bölgede ulaşılabildiği Sakudo tarafından deneylerle ispatlanmış, TRIPS' te yapılan çalışmalarda bu sonuç doğrulanmıştır. Yüksek yoğunluklu plazmada rezonansın olmadığı B değerlerinde neredeyse rezonans söğürülmesi sağlanır. Bu teoremin temel sınırı, mikrodalga plazmalarının neden aşırı yoğun olduğunu açıklamamasıdır (Gammino vd., 2010; Taylor, 1991). Bazı çalışmalarda bu teoriye ek yapılmaktadır. Bu elektromanyetik dalgalar boyuna plazma dalgalarına dönüşebilmektedir. Bu plazma dalgaları enerjilerini elektronlara Landau sönümlemesi aracılığı ile aktarmaktadır (Landau sönümlemesi plazma dalgalarından elektronlara net enerji transferidir, elektronların hız dağılımı dalgaların hızına göre çok daha düşük hızlarda çok sayıda elektron barındırdığında ortaya çıkar). Taylor tarafından 1991 yılında yapılan çalışmada $B > B_{ECR}$ durumunda elektron siklotron rezonansında yaratılana eşit veya daha büyük sayıda elektron yoğunluğuna ulaşıldığı rapor edilmiştir (Taylor, 1991).

Manyetik alanın rezonansın altında olduğu ($B < B_{ECR}$) teorik yaklaşımın bir benzeri INFN – LNS tarafından deneysel olarak araştırılmıştır (Mascali vd., 2011; Castro vd., 2012; Miracoli vd., 2012a). Bu yaklaşımın esas amacı, akım yoğunluğunu kritik yoğunluğun üzerine çıkartmak için elektromanyetik dalgaların elektrostatik dalgalara dönüştürülerek ısıtılmasıdır (Bailey, 2013b).

Dalga kılavuzu yukarıda bahsedildiği gibi yine plazma odası eksenini doğrultusunda yerleştirilir. Burada manyetik alan eksenini ile plazma odasının eksenini kesişir; mikrodalgaların plazma içerisinde yayılması durumunda enjekte edilen mikrodalgalar genelde O veya R dalgalarıdır. Manyetik alanların karmaşık yapısından ve plazma odası duvarlarından olası yansımalarından dolayı, bu modlar sürekli olarak bir diğerine dönüşebilir. Plazma odası içerisinde bir şekilde X modu O – X dönüşümü ile oluşur. Bu

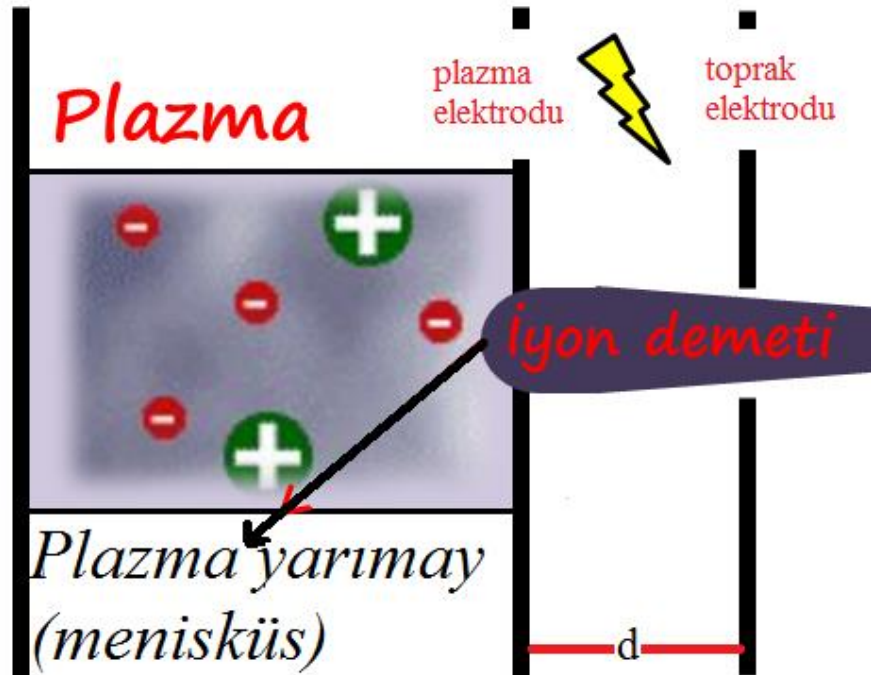
anda X dalgaları EB dalgalarına üst hibrit frekans tabakasında dönüşür. EB dalgaları plazma içerisinde herhangi bir sınırlama olmaksızın plazma aşırı yoğun olsa bile yayılır. Bununla birlikte EB dalgaları plazma dışarısında yayılamaz, plazma içerisindeki elektromanyetik dalgaların dönüşümü ile yaratılır. Bundan dolayı bu dalgaları plazmanın dışından gönderme imkanı bulunmamaktadır, plazma içerisinde yaratılması şarttır. O modunun plazma odasına giriş açısı optimum değilse, EB dalgalarının oluşma işlemi düşük verimlidir. Güçteki ve arka fon basıncındaki değişimler plazma özelliklerini değiştirir, bu durum sonucunda dönüşüm verimliliği etkisi oluşur. Böylece O – X – B dönüşümü mümkün olur. EB dalgaları siklotron harmoniklerinde soğurulur. Bu yolla elektron yoğunluğu kritik yoğunluğun üzerine çıkar (Bailey, 2013b; Celona vd., 2010; Castro vd., 2012). Bu yaklaşım aynı zamanda ECR ve mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının çalışma yapısı açıklamakta kullanılmaktadır (Bailey, 2013b; Celona, 2010).

Bu yaklaşım göz önünde bulundurularak 2012 yılında Miracoli vd. tarafından yapılan deneysel çalışmada tüm plazma odası değil de mikrodalgaların plazma odasına girdiği yer ele alınmıştır. Buna göre 2,45 GHz frekanslı mikrodalgaların plazma odasına girdiği yerde, $B > 820$ G olduğu durumda elektronlarla mikrodalgalar arasındaki temel enerji transferinin elektron siklotron rezonansı aracılığı ile yapıldığı; $B < 820$ G olması durumunda elektromanyetik dalgaların elektrostatik moda çevrildiği ve elektrostatik dalgaların siklotron harmoniklerinde soğurulduğu belirlenmiş, bu durumda daha iyi sonuç alındığı belirtilmiştir (Miracoli vd., 2012a; Popov vd., 1992).

4. İYON SÖKME SİSTEMİ

Hızlandırıcılarda istenilen iyon türünde ve istenilen şiddette demet akımı, sadece plazma kaynağı kullanılarak elde edilemez. Bu iyonları plazma kaynağından alıp istenilen şiddette ve enerjide demet hattına aktarmak için bir dizi elektrot sistemi kullanılır. Bu elektrot sistemine iyon sökme sistemi (ekstraksiyon sistemi) adı verilir. Bu elektrot sistemi sayesinde iyon demeti oluşur. Plazma içerisinde üretilen iyonların çok küçük bir kısmı elektrotlar vasıtasıyla küçük bir delikten demet hattına aktarılırlar. Plazmada oluşan iyonların akım yoğunluğu yeterli geldiği sürece bu kısım çalışmaya devam eder. Bu kısımda temel anlamda pozitif iyonlar için olan iyon sökme sistemi ve bu sistem için önemli kavramlar ele alınacaktır.

Yüklü parçacıkların oluştuğu plazmadan iyonların demet hattına aktarılması ve iyon demeti oluşumu için kullanılan elektrot sistemine iyon sökme sistemi adı verilir. Bu sistemin en basit hali Şekil 4.1’ de gösterilen iki elektrotlu sistemdir. İyon sökme sistemi çok sayıda elektrot içerebilir (Brown, 2004; Bailey, 2013a).



Şekil 4.1. İki elektrotlu iyon sökme sistemi (Türemen vd., 2013).

Plazma elektrotunun toprağa göre V_{kaynak} sabit potansiyeline, demet hattının 0 V potansiyele (yani topraklandığını) sahip olduğunu varsayalım. Bu durumda demet aşağıda verilen başlangıç enerjisine sahip olur:

$$E = q(V_{kaynak} - V_{demet\ hattı}) \quad (4.1)$$

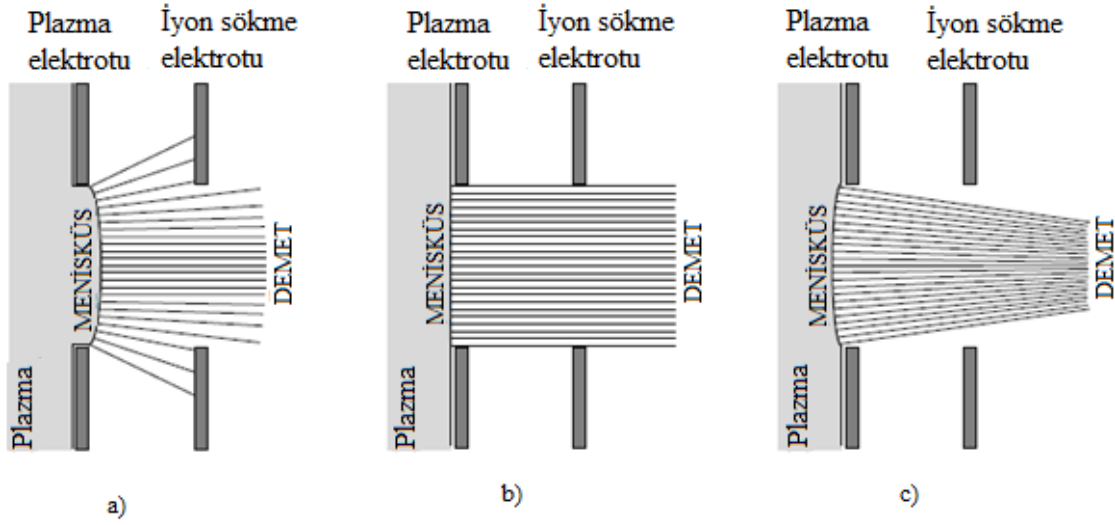
Burada E demet enerjisi, q parçacık yüküdür. İyon kaynağı voltajı uygulama alanına göre ayarlanır (Bailey, 2013b; Brown, 2004).

Plazma kaynaklarında iyon yayan yüzey plazmanın uç noktasıdır. İyon sökme bölgesinde plazma üzerinde delik olan bir elektrot tarafından sınırlandırılmıştır. Bu elektrot çeşitli isimlerle anılır; çıkış elektrotu, aygıt elektrotu veya plazma elektrotu gibi. Genellikle plazma ile aynı potansiyeldedir. Plazmanın uç kısmı bu delik boyuncadır ve plazma menisküsü olarak isimlendirilir (Brown, 2004; Bailey, 2013a).

4.1. Plazma Menisküsü

Plazma menisküsü, iyonlaşma bölgesi ile demet arasındaki sınırdır. Menisküsün şekli, plazmadan çıkış bölgesindeki elektrik alan ve plazma yoğunluğuna bağlıdır. Şekil 4.2' de plazma menisküsünün dışbükeyden iç bükeye plazma yoğunluğuyla değişimi verilmektedir (Bailey, 2013a).

Parçacıkların yörüngeleri menisküs şekline bağlıdır, buradan iyon kaynağını en uygun menisküs şekli verecek şartlarda çalıştırmanın önemli olduğu anlaşılmaktadır. Bu eşleşmiş durum olarak adlandırılır ve plazma yoğunluğu, iyon sökme potansiyeli gibi şartları demet iyi transfer edilinceye kadar değiştirerek bulunur. Burada Şekil 4.2' deki gösterimlerde demetin dağılmasına sebep olan uzay yükü (space charge) etkisinin dahil edilmediği unutulmamalıdır.



Şekil 4.2. Üç farklı menisküs şekli (a) dışbükey, yüksek plazma yoğunluğu; b) düz, orta plazma yoğunluğu; c) içbükey, düşük plazma yoğunluğu) (Bailey, 2013a).

4.2. Child Langmuir Kanunu

Plazmadan demet hattına aktarılabilecek akım yoğunluğu için mutlak bir değer vardır. Bir noktada demet hattına aktarılan demetin uzay yükü dış alanı yok eder, bu noktadan sonra daha yüksek iyon akım yoğunluğuna ulaşmak mümkün değildir. Bu durumun gerçekleştiği akım yoğunluğu j_{CL} Child Langmuir kanunu ile hesaplanabilir. Child Langmuir kanununda yayılma yüzeyi sonsuz ve iyonların ilk enerjileri sıfır kabul edilir:

$$j_{CL} = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2eQ}{m}} \frac{1}{d^2} V^{3/2} \quad (4.2)$$

Burada ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliği, e elektronun birim yükü, Q iyon yük durumu, m iyon kütlesi, d plazma elektrotu ile toprak elektrotu arasındaki mesafe, V potansiyel düşmesidir. Elektrik alan şiddeti $E = V/d$ ile verilir.

Silindirik simetrik iyon sökme sisteminde oluşan toplam iyon demet akımı I_{CL} şu şekilde ifade edilir:

$$I_{CL} = \frac{4}{9} \pi \epsilon_0 \sqrt{\frac{2eQ}{m}} S^2 V^{3/2} \quad (4.3)$$

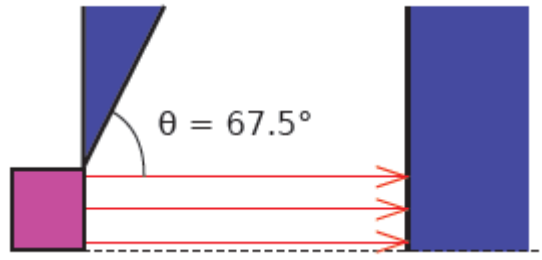
Burada $S = r/d$, r plazma elektrotunun deliğinin yarıçapı, $F = \pi r^2$ yayılma alanıdır. Bir elektrot sistemi için S sabit ise, demet hattına aktarılabilen demet akımı $V^{3/2}$ ile orantılıdır.

Denklem 4.2 ile verilen akım yoğunluğu, menisküsteki plazma yoğunluğu N' ye bağlıdır. Bu eşitlikler uzay yükü ile sınırlanmış durumlarda doğrudur, mesela plazma aşırı yoğundur fakat akım uzay yükü etkisi tarafından sınırlanır gibi. Eğer plazma daha fazla iyon veremezse, kaynak artık uzay yükü sınırlı değildir ve yukarıdaki denklemde verilen akım – voltaj arasındaki ilişki artık geçerli değildir (Brown, 2004; Zhang, 1999; Bailey, 2013b).

4.3. Pierce Geometrisi

Uzay yükü kuvvetleri demeti dağılıp yok etmeye çalışır. Bu genellikle ilk hızlandırma aralığında demetin düşük hızından dolayı gerçekleşir. Hızlandırma boşluğunda elektrik alanın şekli, demet hattına aktarılan demeti şekillendirir. İlk hızlandırma boşluğunda elektrik alan parçacıkları hızlandırmakla yetinmeyip aynı zamanda odaklarsa, demetin dağılma problemi ortadan kalkar, bunun için elektrotlara şekil verilir (Bailey, 2013a, 2013b).

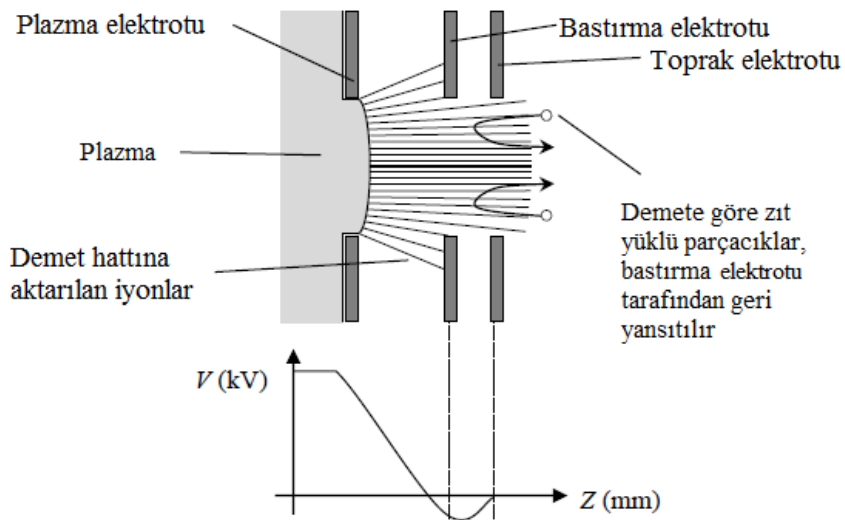
Yüzeyden yayılan elektronlar ele alındığında bunun için mükemmel bir sonuç vardır. Bu çözümde katottaki elektrot şeklini demet eksenine göre $67,5^\circ$ derece açı yapacak şekilde tasarlamaktır. Bu geometri Pierce geometrisi olarak bilinir (Şekil 4.3). Plazma iyon kaynakları için bu şekilde sihirli bir geometri bulunmamaktadır. Gerçekte iyon kaynakları için tamamen paralel demet imkansızdır. Bunun açık sebebi de iyonların sabit bir yüzeyden başlamaması, plazmaya göre değişen başlangıç koşullarının bulunmasıdır (Bailey, 2013a, 2013b; Brown, 2004; Zhang, 1999).



Şekil 4.3. Elektronların Pierce geometrisi kullanarak sökülmesi (Bailey, 2013b).

4.4. Bastırma Elektrotu

Pozitif iyonlar için olan hızlandırma boşluğunda, elektronlar ters yönde iyon kaynağının içine doğru hızlanır. Geri saçılan parçacıklar kaynağa zarar verebilir. Bu istenen bir durum değildir, bunları engellemek önemlidir. Bundan dolayı genellikle bastırma elektrotu, toprak elektrotundan hemen önce yerleştirilir. Bastırma elektrotuna negatif voltaj uygulanır, uygulanan bu voltaj genellikle plazma elektrotuna uygulanan voltajın %10' u kadardır. Toprak elektrotunun olduğu taraftan plazma elektrotuna doğru ilerleyen elektronlar geri saçılır. Böylelikle kaynağa doğru giden istenmeyen elektronlar engellenir (Şekil 4.4) (Zhang, 1999; Bailey, 2013a).



Şekil 4.4. Bastırma elektrotu gösterimi (Bailey, 2013a).

4.5. Plazmadan Pozitif İyon Sökülmesi

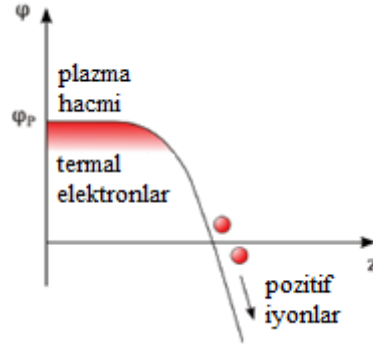
İyonlar neredeyse nötr plazmada oluşur ve nötrlenmemiş demete aktarılır. İyon sökme işleminin plazmanın nötrleyici etkisi olmadan modellemek mümkün değildir. İyon – elektron plazmaları için gerekli geçiş tabakasının veya plazma kılıfının en basit tanımı Bohm tarafından yapılmıştır. İyonların plazma gövdesinden plazma kılıfına v_0 hızı ile ulaştığı varsayılır. İyonların yük yoğunluğu plazma neredeyse nötr kabul edilerek hesaplanır. Elektronların termal dengede olduğu kabul edilir ve Boltzmann dağılımına uyarlar. Kılıftaki potansiyel Poisson denklemi ile tanımlanır. Bunun sonucunda Bohm kılıf kriteri olarak bilinen bir şart ortaya çıkar:

$$v_0 \geq v_B = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_i}} \quad (4.4)$$

Burada v_B , Bohm hızıdır. Bu kriter kılıfın ucuna ulaşan iyonlar için en düşük hız limitini tanımlar. Poisson denklemi analitik olarak çözülemez ve genellikle nümerik yaklaşımlar veya kabuller kullanarak hesaplanır.

Bu modele göre plazmadan iyon sökme işlemi basittir. Pozitif iyonlar neredeyse nötr plazma hacminden iyon sökme kılıfına v_B hızı ile akar. Plazma potansiyeli tarafından tanımlanan nötrlemeyi sağlayan elektron yoğunluğu, plazma hacminde iyon yoğunluğuna eşittir ve iyon sökme işlemi sırasında üssel olarak azalır. İyon sökme bölgesinden yeterince uzakta nötrlemeyi sağlayan elektron sayısı sıfırlanır. Modelden nötrlenmiş plazma ile nötr olmayan iyon sökme kısmı arasında iyi tanımlanmış bir sınır yoktur. Genelde bu tür bir sınır plazma elektrotuna yakın elektrik alanın odaklama işlemini ve plazma kılıf şeklini inceler. Pozitif iyon sökme işleminde genelde plazma menisküs yüzeyi yapay sınır olarak seçilir. Bu seçim her ne kadar gerçekte bu tür bir sınır olmasa da düşünüldüğü gibi çalışır (Şekil 4.5) (Bailey 2013b).

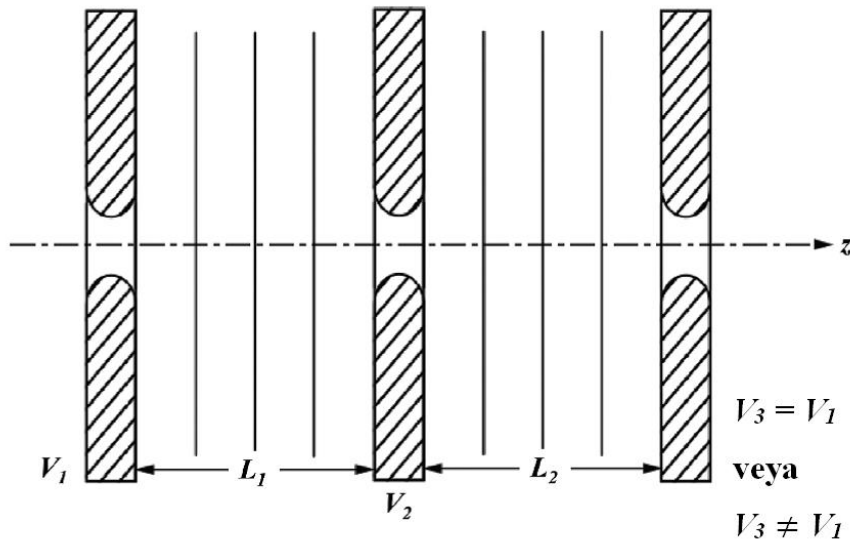
Demet oluşumu sadece iyon sökme sistemi elektrot şekli ve onlara uygulanan elektriksel potansiyelle değil, aynı zamanda plazmanın elektron ve iyon sıcaklığı, yoğunluğu gibi özellikleriyle de değişir (Bailey, 2013b).



Şekil 4.5. Pozitif iyon sökme işlemi (Bailey, 2013b).

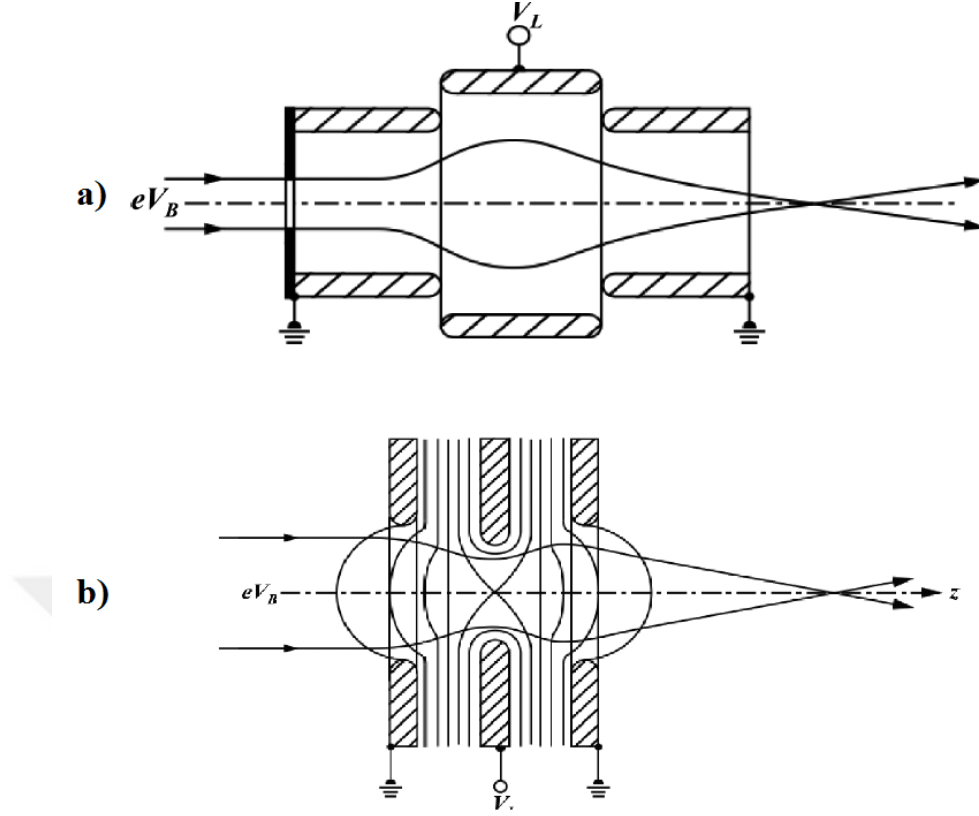
4.6. Einzel Lens

Einzel lensleri çeşitli kaynak türlerinde demeti odaklamak amacıyla kullanılan elektrot sistemine verilen isimdir. Plazma ve toprak elektrotundan sonra yerleştirilebildikleri gibi demet hattı boyunca farklı konumlarda da kendilerine yer edinirler.



Şekil 4.6. Einzel lens genel yapısı (Liebl, 2007).

Einzel lens notasyonu, genelde 3 adet elektrottan oluşan sistemlerde kullanılmaktadır (Şekil 4.6). Birinci ve üçüncü elektrot aynı potansiyelde tutulmakta, ikinci elektrota ise farklı bir potansiyel uygulanmaktadır. Birinci ve üçüncü elektrotların potansiyelleri farklı olursa, buna imersiyon lensi adı verilmektedir. Bu elektrot sisteminde, parçacık enerjileri lenslerden önce ve sonra aynıdır (Liebl, 2007).



Şekil 4.7. Einzel lens modları, a) yavaşlatma – hızlandırma modu, b) hızlandırma – yavaşlatma modu (Liebl, 2007).

İki tür einzel lens yapısı bulunmaktadır, bunlar kısaca hızlandırma – yavaşlatma modu veya yavaşlatma – hızlandırma modu olarak isimlendirilir (Şekil 4.7). Sonuçta bu modların ikisinde de sistem demeti odaklar. Aralarındaki fark, hızlandırma – yavaşlatma modunun daha yüksek enerjiler gerektirmesidir (Liebl, 2007).

4.7. Vakum

İyon kaynakları hızlandırıcı yapısı içerisinde çalışırken gazın doğrudan enjekte edildiği çok az kısımdan birisidir. Vakum sisteminin ilk amacı, enjekte edilen gazı hızlandırıcının daha düşük gaz yoğunluğu gereken diğer yapılarına ulaşmadan önce dışarıya atmaktır. Bu ortalama serbest yolu arttırmak ve bunun sonucunda elektriksel kırılmayı (atlamayı) engellemek için gereklidir (Bailey, 2013b).

İlgili yapıdaki basınç seviyesine göre vakuma farklı isimler verilmektedir, vakum seviyelerine verilen isimler ve bunlara karşılık gelen basınç aralığı Çizelge 4.1’ de verilmektedir. Yüksek vakum ve özellikle daha düşük basınçlarda vakum odası olarak kullanılan kısmın sızdırmazlığının çok iyi olması ve temiz odada hazırlanması gerekmektedir. Kir, pas, sıvı, ... gibi vakumu etkileyen dış etmenlerin vakum odası içerisinde bulunması, arzu edilen vakum seviyesine ulaşılmasına engel teşkil eder.

Çizelge 4.1. Vakum seviyeleri ve karşılık gelen basınç aralığı.

	Basınç aralığı (mbar)
Düşük Vakum (LV)	1000 – 1
Orta Vakum (MV)	1 – 10 ⁻³
Yüksek Vakum (HV)	10 ⁻³ – 10 ⁻⁹
Ultra Yüksek Vakum (UHV)	10 ⁻⁹ – 10 ⁻¹²
Aşırı Yüksek Vakum (XHV)	<10 ⁻¹²

4.8. Paschen Eğrisi

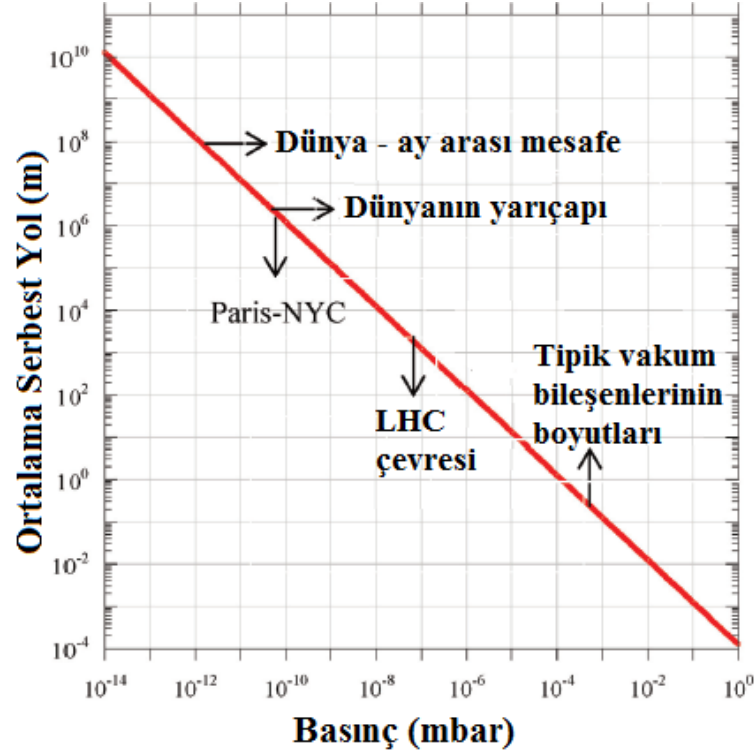
İki düz elektrot arasında gazın kırılma voltajı (elektrik atlaması) elektron ortalama serbest yoluna ve elektrotlar arasında uzaklığa bağlıdır. Burada elektriksel kırılmadan kasıt, arkafon gazının iyonlaşması sonucu iki elektrot arasında elektriksel iletim gerçekleşmesidir. Bu hızlandırıcı yapılarında istenmeyen bir durumdur. Elektron ortalama serbest yolu, elektronun bir başka atoma çarpmadan önce alabileceği ortalama yoldur. Doğrudan basınçla alakalıdır. Hidrojen molekülleri için ortalama serbest yol Şekil 4.8’ de verilmektedir (Bailey, 2013b).

Paschen 1880 yılında gazlarda elektriksel kırılmayı araştırdı ve gazlarda elektriksel kırılmaya sebep olacak voltaj miktarını buldu:

$$V_b = \frac{aPd}{\ln(Pd) + b} \quad (4.5)$$

Burada V_b gazın kırılma voltajı, P basınç, d elektrotlar arasında uzaklık, a ve b ise gaza bağlı sabitlerdir. Verilen bir gaz için sürekli kırılmayı yaratmak için gerekli voltaj,

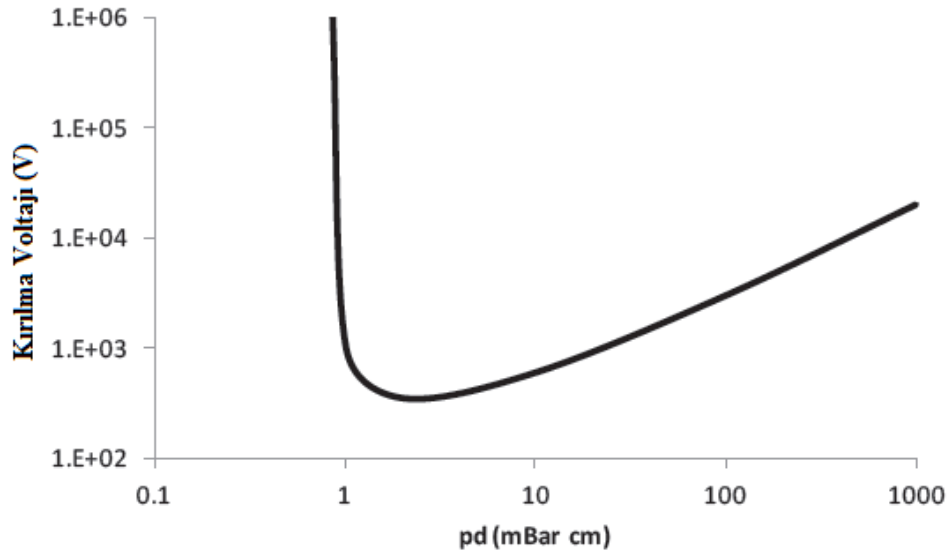
basınç ile elektrotlar arasındaki uzaklığın çarpımının fonksiyonudur, sadece elektrik alan ve basınç yeterli değildir. Bu fonksiyonun grafiği Paschen eğrisi olarak isimlendirilir. Bu grafikten her bir gazın elektriksel kırılması için gerekli olan minimum voltaj belirlenebilir. Elektrot tasarımında bu grafiğin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Bailey, 2013b). Hidrojen gazı için çizilen Paschen eğrisi Şekil 4.9’ da verilmektedir.



Şekil 4.8. Hidrojen molekülünün oda sıcaklığında ortalama serbest yolu (Bailey, 2013b).

Çok yüksek basınçlarda ortalama serbest yol çok kısadır. Elektronlar bir atom veya moleküle çarpıncaya kadar iyonlaşma enerjisine ulaşması için yeterli zamanı bulunmadığı anlamına gelir. Bu çok yüksek basınçlarda kırılma voltajının yüksek olduğu anlamını taşır.

Çok düşük basınçlarda çarpışmalar arasında ortalama serbest yol elektrot uzaklıklarından daha uzundur. Elektronlar iyonlaşma enerjisine kadar hızlandırılabilir, fakat anottan başka bir şeye çarpmazlar. Bu çok düşük basınçlarda kırılma voltajının çok yüksek olduğu anlamını taşır. Bu durum vakumun yalıtkan bir ortam olarak kullanılmasının sebebini açıklar (Bailey, 2013b).



Şekil 4.9. Hidrojen için Paschen eğrisi (Bailey, 2013b).

4.9. Elektrotlar Arasına Uygulanacak Voltaj Değeri

Coupland tarafından iki elektrot arasına uygulanabilecek maksimum voltaj şu ampirik eşitlik ile tanımlanmıştır:

$$V_{maks,C} = 6 \times 10^5 \sqrt{d} \quad (4.6)$$

Burada d metre birimindedir. Diğer bir ampirik denklem ise Kilpatrick tarafından verilmiştir:

$$V_{maks,K} \approx 1,7 \times 10^6 d^{2/3} \quad (4.7)$$

Burada d metre biriminde iki elektrot arası mesafedir (Brown, 2004).

Elektrot tasarımında iki elektrot arasında mesafe belirlenirken uygulanması gereken voltaj teorik olarak belirlenmeli, tasarım buna göre yapılmalı ve uygulamada bu noktalara dikkat edilmelidir. Aksi takdirde kullanılan cihazlara (güç kaynakları, vakum pompaları, akım ölçerler, ...) zarar gelebileceği gibi kişi kendisine de zarar verebilir (Bailey, 2013b).

Bunlara ek olarak, elektrot tasarımı sırasında elektrot yüzeyinde keskin kısımların olmamasına dikkat edilir. Keskin kısımlar olması durumunda elektrik atlamaları bu kurallara uymadan gerçekleşebilir.

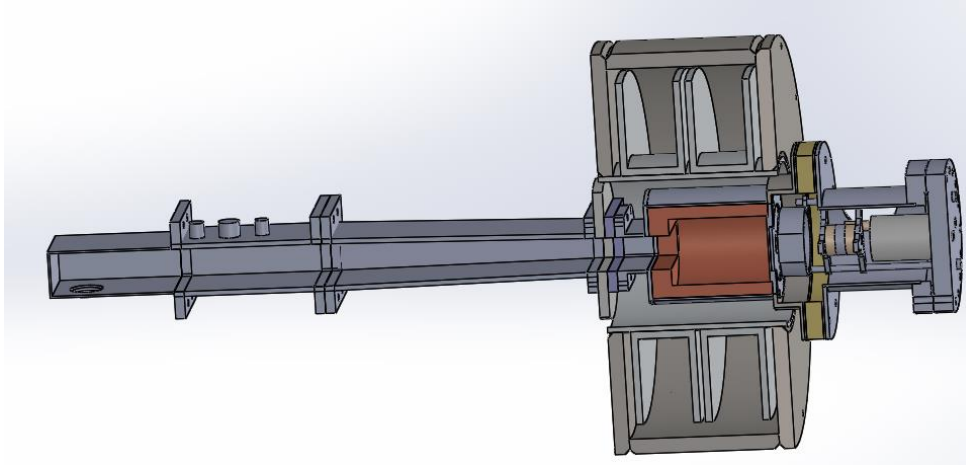


5. MATERİYAL VE YÖNTEM

Mikrodalga deşarj iyon kaynağı tasarımı sırasında bölüm 2’ de yer alan literatür araştırmaları kısmından faydalanılmıştır. Ayrıca pratikte eksik kalan kısımlar, mikrodalga iyon kaynakları konusunda tecrübeli INFN – LNS, İyon Kaynakları grubuna 2014 yılı Şubat ayında yapılan ziyarette giderilmiştir.

Bu yapacağımız ilk kaynak olduğu için sistemi çok karmaşık tutmamaya çalıştık. Sistemin karmaşık hale gelmesi, problem çıktığında çözümü zorlaştırmaktadır.

Tasarlanan mikrodalga deşarj iyon kaynağı genel görünümü Şekil 5.1’ de verilmektedir. Sistem 2,45 GHz frekanslı magnetrona uyumlu magnetron kafası, saplamalı ayarlayıcı ve WR340’tan WR284’e geçiş dalga kılavuzu bileşenlerini içeren mikrodalga transfer hattı, elektriksel yalıtım, vakum penceresi, plazma odası, elektromıknatıslar, elektrot sistemi ve Faraday kabından oluşmaktadır.



Şekil 5.1. Tasarlanan mikrodalga deşarj iyon kaynağı genel görünümü.

İyon kaynağı çalışmaları yarı deneysel bir konudur, yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen veriler ile daha sonra yapılacak deneysel çalışmalar sonucunda elde edilecek verilerin birebir aynı sonucu vermeyebileceği göz önünde bulundurulmuştur. Simülasyon çalışmalarının ve teorik çalışmaların sonuçlarını karşılaştırmak yerine, bu çalışmaların birbirlerini tamamlayacaklarını düşünmek daha doğru olur.

Önerilen mikrodalga deşarj iyon kaynağı tasarımı ve yapımı çalışması, temel olarak dokuz aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalardan dört tanesi üretim, beş tanesi deneysel çalışmaları içermektedir. Üretim kısmını içeren aşamalar sırasıyla şu şekildedir:

Aşama 1: Mikrodalga transfer hattının kurulması,

Aşama 2: Plazma odasının imalatı,

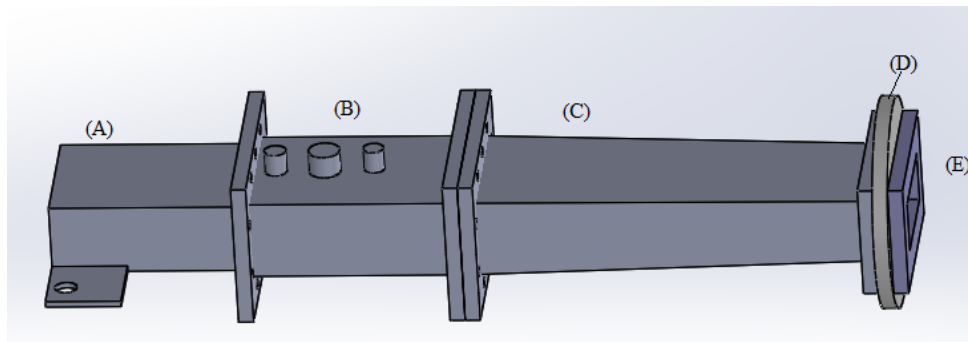
Aşama 3: Solenoid tasarımı, üretimi ve manyetik alan ölçümü,

Aşama 4: Elektrot simülasyonu ve imalatı.

Çalışmanın bu kısmında deneysel sistemi anlatan bu dört aşamaya yer verilecektir. Bu aşamaların birbirleriyle olan ilişkisi göz önünde bulundurularak çalışmalar yapılmıştır.

5.1. Mikrodalga Transfer Hattının Kurulması

Mikrodalga transfer hattının kurulması ve imalatı, ilk aşamada yer almaktadır. Bu çalışmada mikrodalga transfer hattı, 2,45 GHz frekanslı magnetrondan plazma odasına mikrodalga gücünü minimum sayıda devre elemanı kurarak aktarma üzerine kurulmuştur. Mikrodalga transfer hattı şu bileşenlerden oluşmaktadır: Magnetron kafası, saplamalı ayarlayıcı, WR340'dan WR284'e geçiş dalga kılavuzu, elektriksel yalıtım ve vakum penceresi (Şekil 5.2).



Şekil 5.2. Mikrodalga transfer hattı 3 boyutlu çizimi (A) Magnetron kafası, B) Saplamalı ayarlayıcı C) WR340'tan WR284'e geçiş dalga kılavuzu, D) Elektriksel yalıtım E) Vakum penceresi).

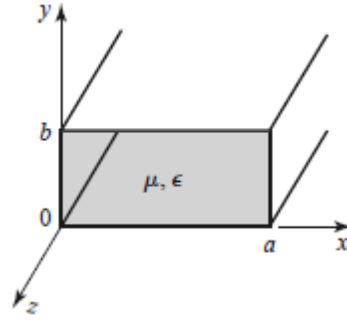
Mikrodalga transfer hattına yönelik hesaplamalar günümüzde simülasyon programları kullanılarak yapılmaktadır. Burada simülasyon programlarının verdiği çıktıda S parametreleri olarak adlandırılan parametre setleri önemlidir, saçılma parametreleri olarak isimlendirilirler ve doğrusal elektriksel ağların elektriksel davranışlarını göstermektedir. Saçılma matrisi RF enerjisinin çok portlu ağlarda nasıl yayıldığını nitelendiren matematiksel ifadedir. S parametreleri N portlu ağın voltaj sinyali ile her bir portta etkisini tanımlar. S_{11} parametresi giriş portunda ne kadar yansıma olduğu, S_{21} parametresi ise ne kadar gücün iletildiğini göstermektedir (Pozar, 2012). Burada sınır şart ürünün imal edileceği malzemenin bulunması, malzemenin tasarım ölçülerinde bulunması, malzemenin işlenebilirliği, ürün imalinde ölçü ve kalınlıktaki minimum hassasiyeti olarak sıralanabilir.

S parametreleri dB biriminden şu formül yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$S \text{ parametresi (dB)} = 20\log_{10}|S_{11}| \quad (5.1)$$

Denklemden $|S_{11}|$ olarak verilen, yansıma parametresinin büyüklüğüdür. Bu işlemin sonucu dB biriminde negatif çıkmaktadır (Pozar, 2012; Surducan vd., 2012; Long, 2016).

Mikrodalga transfer hattında karşımıza dalga kılavuzu olarak isimlendirilen bir kavram çıkmaktadır. Dalga kılavuzları dikdörtgen, dairesel, koaksiyel, ... gibi çeşitli şekillerde bulunmaktadır. Burada çalışmamız için dikdörtgen dalga kılavuzu önemlidir. Dikdörtgen dalga kılavuzları mikrodalga sinyallerini aktarmak için kullanılan en eski transfer hatlarından birisidir. Ticari olarak 1-220 GHz arasında bulunabilir. Dikdörtgen dalga kılavuzu içi boş, dört tarafı metalle çevrili dikdörtgen bir yapıdır. Tek bir iletkenin olduğu durumda (dikdörtgen dalga kılavuzu) TE ve TM modunda çalışabilir, bir diğer mod olan TEM modu iki veya daha fazla sayıda iletken olması durumunda çalışır (koaksiyel kablo gibi). Ayrıca TE ve TM modunda kritik frekansın altında dalga iletimi gerçekleşmez, kritik frekans dalga kılavuzunun ölçüleri tarafından belirlenir (Şekil 5.3) (Pozar, 2012).



Şekil 5.3. Dikdörtgen dalga kılavuzunun temsili şekli (Pozar, 2012).

Dalga kılavuzlarına ticari olarak çeşitli isimler verilmektedir; WR340, WR284, ... gibi. WR340'ın anlamına bakarsak, burada uzun kenar (a) 3,4 inch' e karşılık gelmektedir, isimlendirme bu şekilde yapılmıştır. Mesela WR340'ın uzun kenarı ~ 86 mm, kısa kenarı ~ 43 mm' dir. WR284 dalga kılavuzuna bakıldığında uzun kenarı ~ 72 mm, kısa kenarı ~ 34 mm' dir.

TE modu, enine elektrik modu olarak tanımlanır, dalganın yayıldığı yönde elektrik alan bileşeni yoktur. TM modu, enine manyetik modu olarak tanımlanır, dalganın yayıldığı yönde manyetik alan bileşeni yoktur.

Dalga kılavuzunun uzun kenarı a , kısa kenarı b olmak üzere ($a > b$) TE modunda kritik frekans şu şekilde ifade edilir (Pozar, 2012):

$$f_{c_{mn}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{\mu\epsilon}} \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \quad (5.2)$$

Burada $f_{c_{mn}}$ kritik frekans, ϵ elektriksel geçirgenlik, μ vakum geçirgenliği, a ve b dalga kılavuzunun kenar ölçüleri, m ve n yayılma modları olarak tanımlanır.

En küçük kritik frekansa karşılık gelen mod, baskın mod olarak adlandırılır. En küçük kritik frekans $m = 1$ ve $n = 0$ olmak üzere TE₁₀ modunda görülür (Pozar, 2012):

$$f_{c_{10}} = \frac{c}{2a} \quad (5.3)$$

Burada f_c , Hz biriminde dikdörtgen dalga kılavuzu frekansı; c , m/s biriminde ışık hızı; a ise metre biriminde dalga kılavuzunun geniş kısmının iç ölçüsünü ifade etmektedir. TE₁₀ modu TE modu için baskın moddur. TE modunda $m = n = 0$ için TE₀₀ modu yoktur. Verilen frekansta f sadece $f > f_c$ durumunda yayılır.

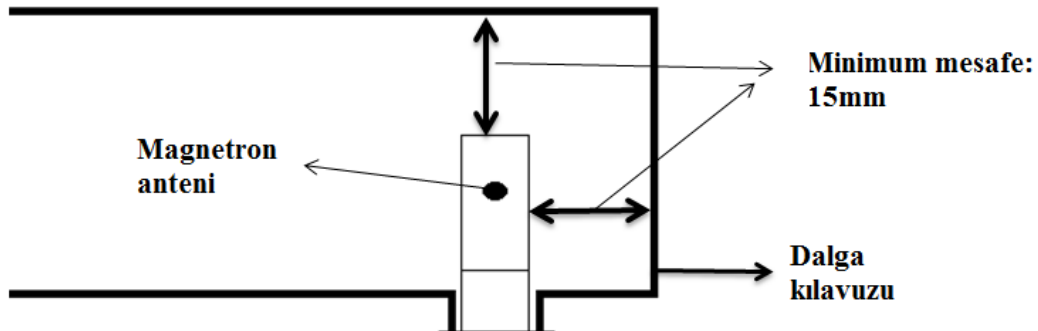
TM modunda TM₀₀, TM₁₀ veya TM₀₁ modları yoktur. TM modunda en düşük mod, TM₁₁ modudur. TM₁₁ modu için kritik frekans şu şekilde verilir (Pozar, 2012):

$$f_{c_{11}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{b}\right)^2} \quad (5.4)$$

Dalga kılavuzlarında en uygun çalışma frekansları, kritik frekansının 1,25 katından başlar. Bu açıdan kritik frekans önemlidir.

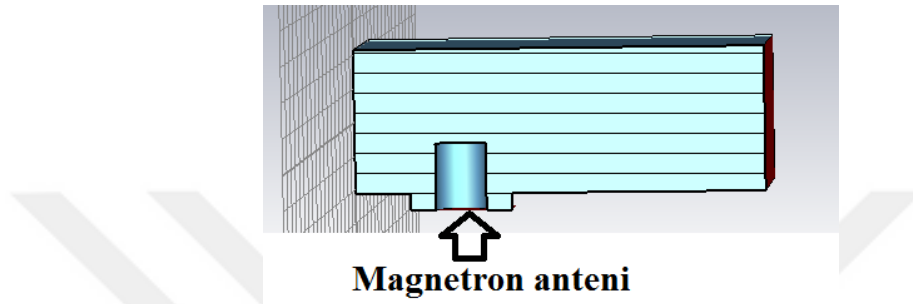
5.1.1. Magnetron kafası

Magnetron, magnetron kafasına Şekil 5.4' te gösterildiği gibi bağlanır ve mikrodalga transfer hattına güç aktarımı gerçekleştirilir. Mikrodalga güç üretici, magnetron kafasına koaksiyel kablo aracılığı ile de bağlanabilir. TE₁₀ modunda (en temel modda), magnetronun anteni kapalı kısımdan dalga kılavuzunun dalga boyunun en az (1/8)' i kadar uzaklığa yerleştirilmelidir (Surdacan vd., 2012). Muegge magnetron kullanım kılavuzunda bu mesafenin minimum 15 mm olması gerektiği tavsiye edilmiştir (Şekil 5.4).



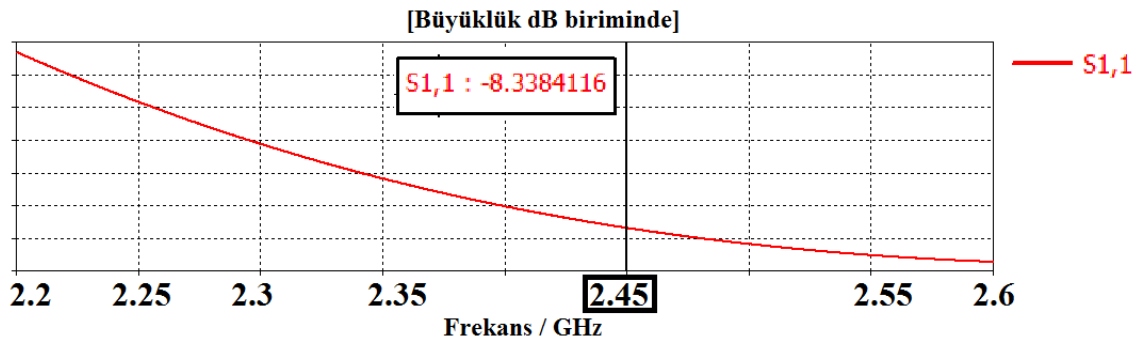
Şekil 5.4. Tavsiye edilen magnetron yerleştirme şekli (Muegge, 2016).

Şekil 5.4’ te verilen sınır şartlar göz önünde bulundurularak WR340 dalga kılavuzu ölçülerinde magnetron kafasının simülasyonu CST programı kullanılarak yapılmıştır. Simülasyon işleminde magnetronun çalışma frekansı olan 2,45 GHz göz önünde bulundurulmuştur. Simülasyon işleminde kullanılan taslak çizim şekil 5.5’ te verilmektedir. Burada antenin ne kadar içe gireceği, sağ taraftan ve üst taraftan ne kadar boşluk kalacağı simülasyon yardımıyla belirlenmiştir.

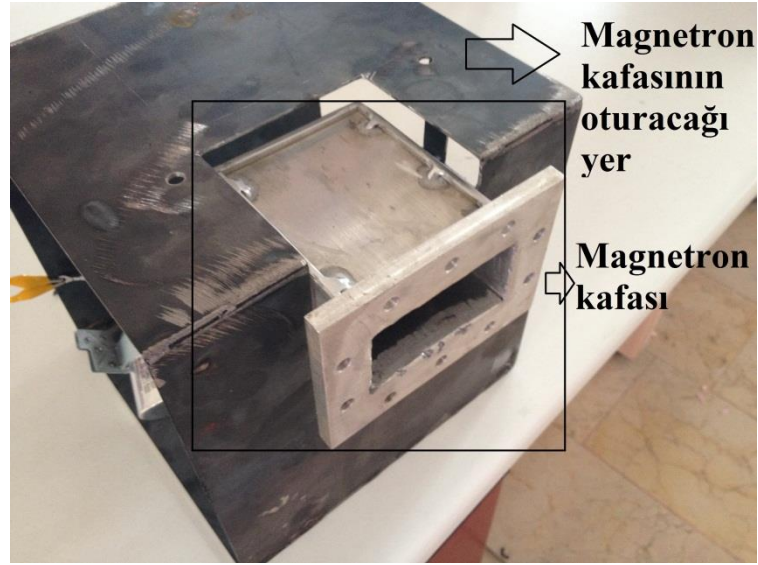


Şekil 5.5. Magnetron kafası simülasyonunun kesit alanının görünümü.

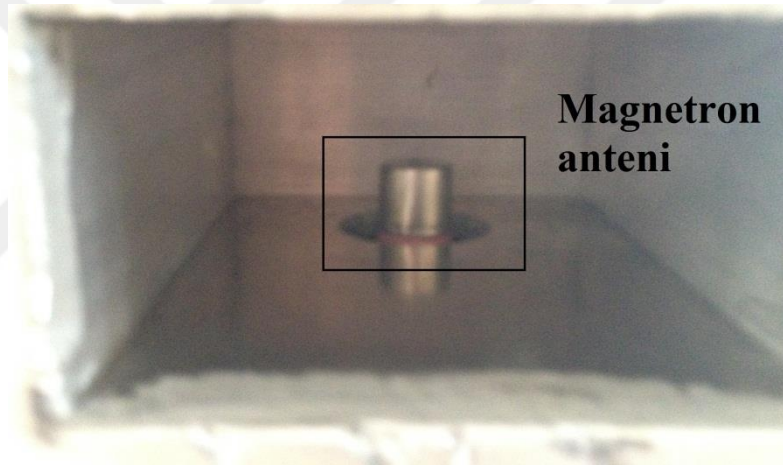
Magnetron kafası simülasyonu sonucunda elde edilen en iyi yansıma parametresi Şekil 5.6’ da verilmektedir. Üretim şartları göz önünde bulundurularak elde edilen simülasyon sonuçlarına göre magnetron kafası üretimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6. Magnetron kafası yansıma parametresi.



Şekil 5.7. Magnetron kafası imalatı.



Şekil 5.8. Magnetron anteni dalga kılavuzu içinden görünümü.

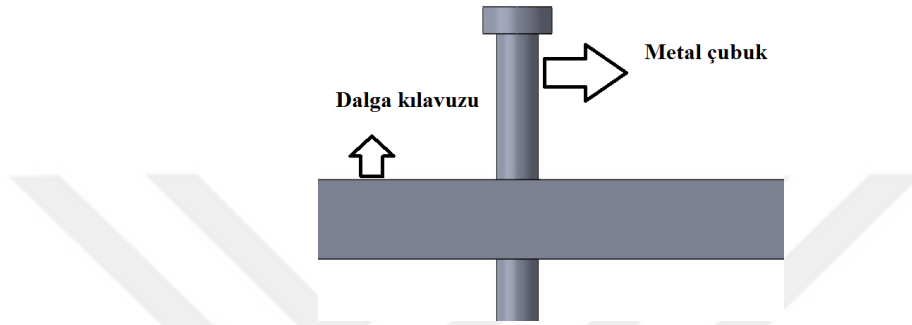
İmalatı gerçekleştirilen magnetron kafasının dıştan ve içten görünümü Şekil 5.7 ve Şekil 5.8’ de gösterilmektedir.

5.1.2. Saplamalı ayarlayıcı (stub tuner)

Bir sinyal üretici, birçok dalga boyu uzunluğunda dalga kılavuzu veya transfer hattı vasıtasıyla gücü bir sisteme (yüke) aktarırken, yük ile sinyal üreticiyi dalga kılavuzu ile her bir hattın sonunda eşleştirmek tercih edilir. Bunu yapmanın birkaç sebebi bulunmaktadır, bunlardan en önemli olanı frekans hassaslığındaki büyük azalmadır. Aynı zamanda transfer hattı ile sinyal üreticinin empedansları eşleştirilerek maksimum güç transferi sağlanabilir.

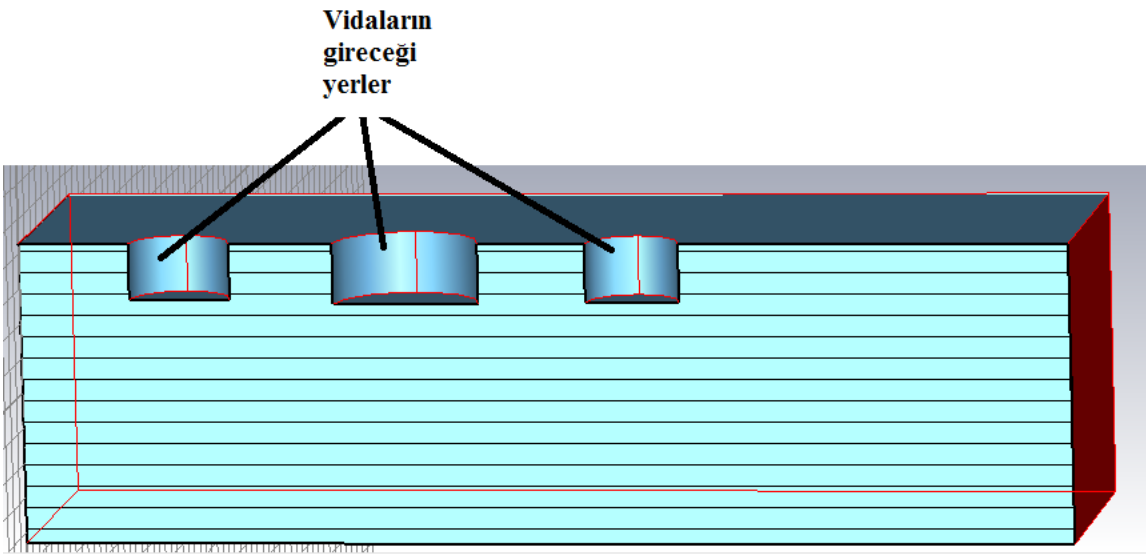
Eğer orjinal yük kötü bir şekilde eşleştirilmişse, transfer hattı boyunca çok fazla duran dalga alanları oluşabilir. Bu sistemin güç kapasitesini düşürür.

Saplamalı ayarlayıcı ismi verilen devre elemanı, dalga kılavuzuna montajı yapılan metal çubuktan (vidadan) ibarettir (Şekil 5.9). Hassaslığı arttırmak amacıyla metal çubukların (vidaların) sayısı çoğaltılır (Collin, 2001).



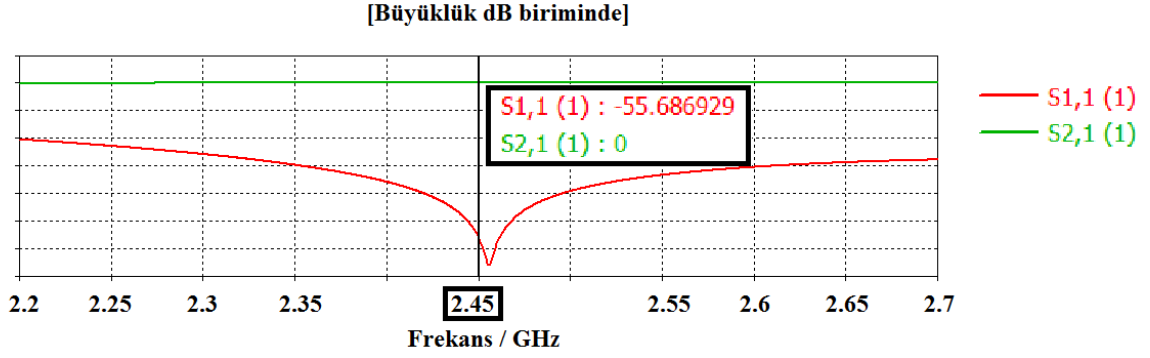
Şekil 5.9. Basit anlatımla saplamalı ayarlayıcı örneği (Collin, 2001).

Biz çalışmamızda 3 vidadan oluşan bir saplamalı ayarlayıcı dizaynı yaptık ve hesaplama sonuçlarına göre vida ölçülerini belirledik. Vida genişlikleri ve vida boylarının simülasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon işlemlerinde kullanılan taslak çizim Şekil 5.10’ da verilmektedir.



Şekil 5.10. Simülasyon programında saplamalı ayarlayıcı kesit görünümü.

Elde edilen sonuçlar, üretim imkanları göz önünde bulundurularak yeniden hesaplandı. Buna göre yansıma ve iletim parametrelerinin en iyi olduğu simülasyon sonuçları Şekil 5.11’ de verilmektedir. Simülasyon sonuçlarına göre saplamalı ayarlayıcı üretimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.12).



Şekil 5.11. Saplamalı ayarlayıcı yansıma ve iletim parametreleri.



Şekil 5.12. Saplamalı ayarlayıcı a) üstten, b) yandan, c) içten görünüm.

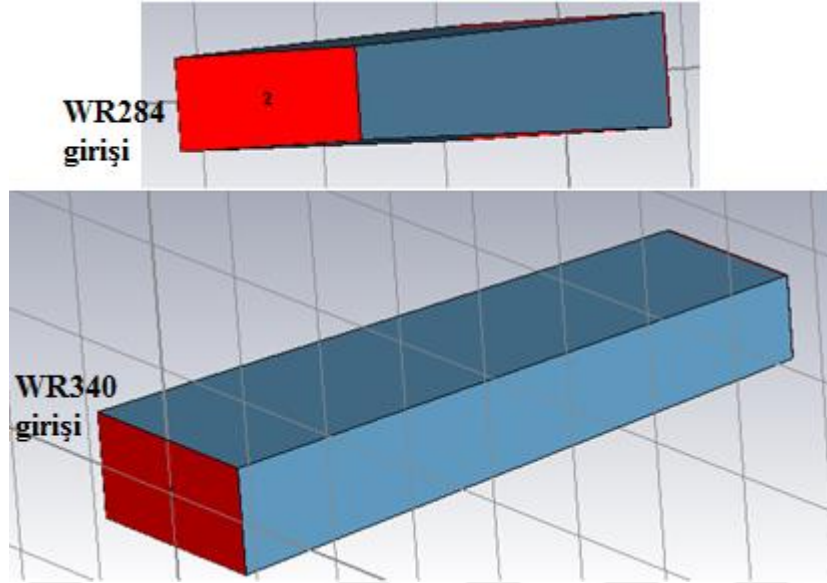
5.1.3. WR340' tan WR284' e geçiş

Standart bir WR340 dalga kılavuzunun i ölçüleri 86 mm x 43 mm' dir, kritik frekansı yaklaşık olarak 1,7 GHz' e ve çalışma frekansı 2,2 – 3,3 GHz aralığına karşılık gelmektedir. Bunun yanında standart ölçülerde bir WR284 dalga kılavuzunun i ölçüleri 72 mm x 34 mm' dir, kritik frekansı 2,08 GHz' e ve çalışma frekansı 2,6 – 3,9 GHz aralığına karşılık gelmektedir. Bu durum göz önünde bulundurularak 2,45 GHz frekansta bir mikrodalga güç kaynağı için WR340 dalga kılavuzu ile çalışmak daha uygundur.

Bizim bu çalışmada kullanacağımız plazma odamızın i çapı 90 mm' dir. Mikrodalga transfer hattının esas amacı, sinyal üreticiden çıkan 2,45 GHz frekansındaki mikrodalgaları plazma odasına aktarmaktır. Plazma odasının i ölçüleri düşünüldüğünde, dalga kılavuzu ile plazma odasının birleşeceği yüzeyde aynı zamanda plazma odasına gaz aktarımı için gaz girişi de bulunacak, dalga kılavuzunu vidalamak için flanş gerekecektir. Ayrıca WR340' a uygun ticari vakum penceresi bulmak zordur. Bu ve benzeri teknik konular göz önünde bulundurulduğunda WR340 dalga kılavuzu ile çalışmak problem teşkil etmektedir. WR340 dalga kılavuzu yerine WR284 dalga kılavuzu ile çalışmak teknik açıdan daha uygundur. Buna karşın WR284' n çalışma aralığı 2,6 – 3,9 GHz olduğu göz önünde bulundurulursa, tüm hat boyunca WR284 dalga kılavuzu ile çalışmak güç aktarımı açısından problem oluşturabilir. Bu durumda hattın bir kısmında WR340 dalga kılavuzu ile çalışmak, kalan kısmında WR284 dalga kılavuzu ile çalışmak daha uygundur.

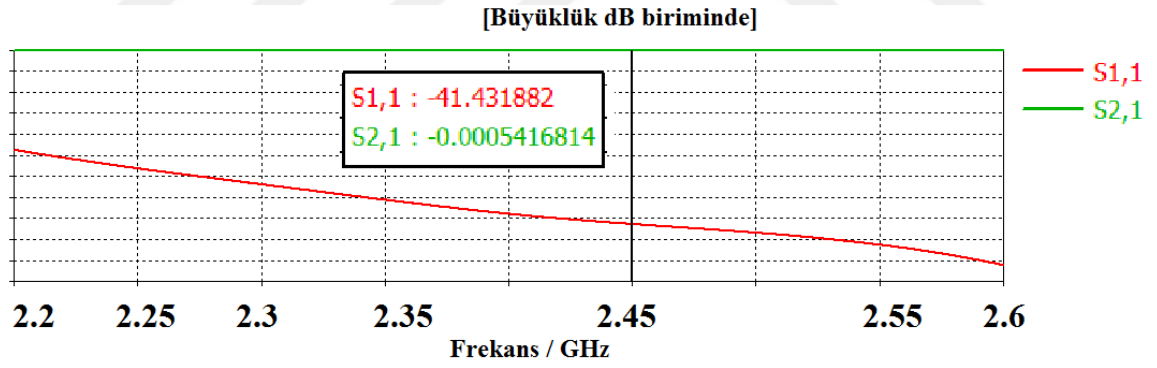
Bu sonuç göz önünde bulundurulduğunda bu iki farklı ölçüdeki dalga kılavuzunu birleştirmek gerekmektedir. Bu durumda karşımıza WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu çıkar. Giriş kısmı WR340' a, çıkış kısmı WR284' e uyacak şekilde daralarak giden bir yapısı vardır. Tasarladığımız sistemde hem WR340 dalga kılavuzu, hem de WR284 dalga kılavuzu bulunmaktadır. Bundan dolayı WR340' tan WR284 dalga kılavuzuna geçiş kullanılmıştır.

Basit anlamda WR340' tan WR284' e geçiş, bir tarafı 86 mm x 43 mm iç ölçülerinde; diğer tarafı 72 mm x 34 mm iç ölçülerinde olan L uzunluğunda dikdörtgen bir şekilde daralan içi boş bir metali ifade etmektedir (şekil 5.13).



Şekil 5.13. WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu.

WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu simülasyon sonucu yansıma ve iletim parametreleri Şekil 5.14' te verilmektedir. Dalga kılavuzu üretimi, bu parametreler göz önünde bulundurularak yapılmıştır (Şekil 5.15).



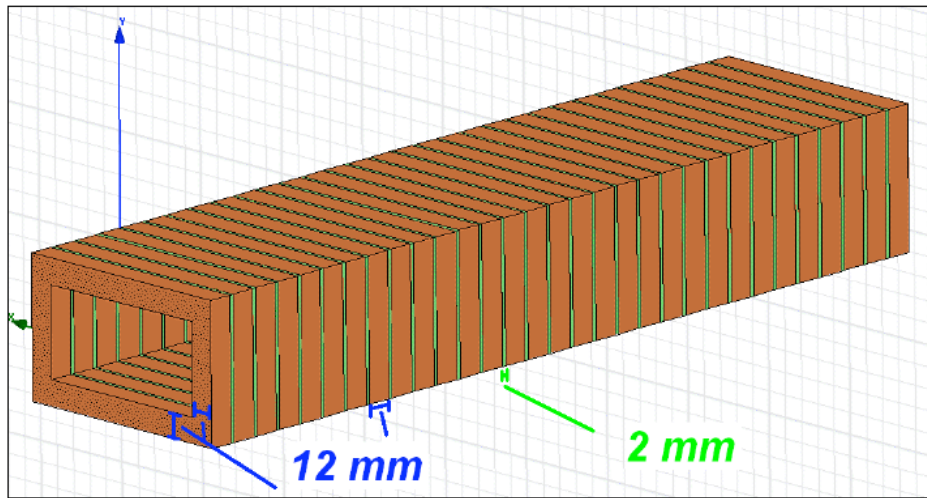
Şekil 5.14. CST yansıma ve iletim parametreleri.



Şekil 5.15. Üretimi gerçekleştirilen WR340' tan WR284' e geçiş dalga kılavuzu.

5.1.4. Elektriksel yalıtım (DC break)

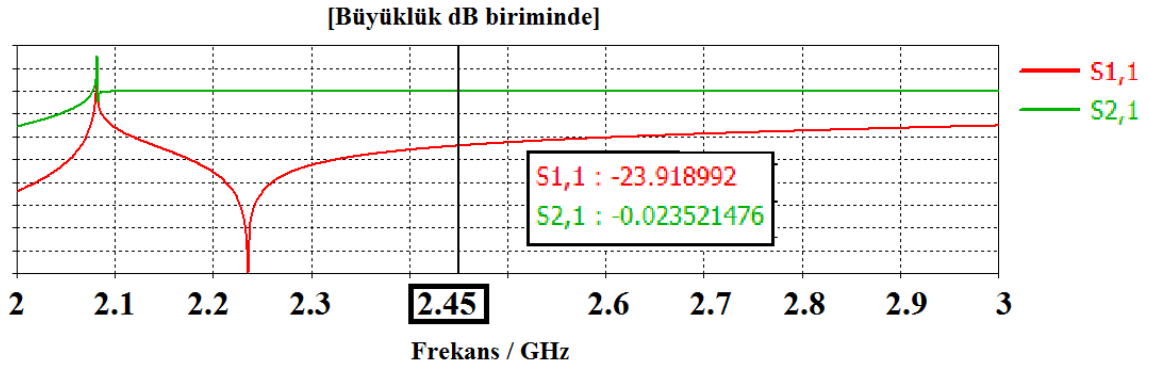
Plazma odasının hemen dışında bulunan elektrotlara, plazma içerisinden iyon sökmek için yüksek voltaj uygulanır, bu voltaj plazma odası ile dalga kılavuzu bileşenleri arasında araya yalıtım yerleştirilmemesi durumunda mikrodalga üreticiye (magnetrona) kadar gider ve sistem kısa devre yapar, hem magnetron hem de yüksek voltaj kaynakları bozulabilir. Bunun dışında çalışan personelin zarar görmesi de olasıdır. Bunu engellemek için araya yalıtım malzemesi yerleştirilir, bu yalıtım uygulanacak yüksek voltaj değerine göre eldeki teknik imkanlar doğrultusunda çok karmaşık bir yapıda da olabilir (Maimone vd., 2007).



Şekil 5.16. Maimone vd. tarafından INFN-LNS' te yapılan elektriksel yalıtım tasarımı (Maimone vd., 2007).

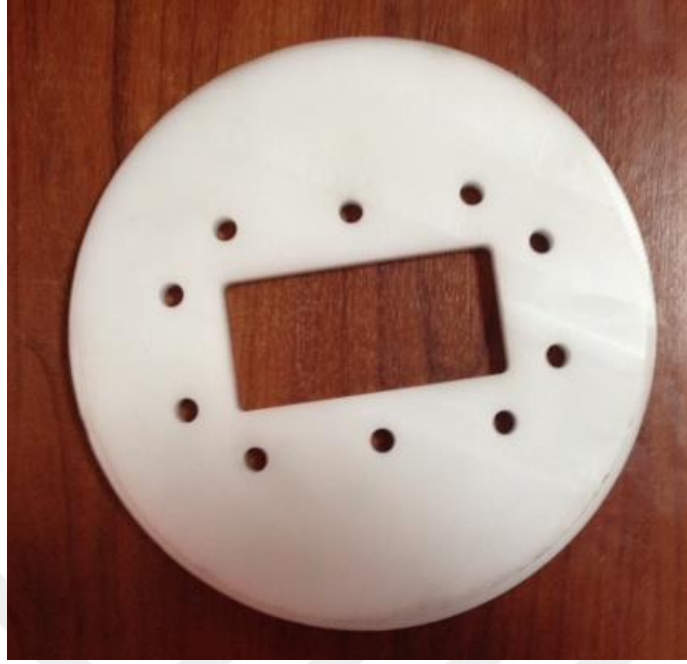
Şekil 5.16’ da INFN-LNS’ te tasarlanan elektriksel yalıtım görülmektedir. Burada 2’ şer mm kalınlıkta boron nitrit diskler arasına 12’ şer mm kalınlıkta bakır yerleştirilmiştir. Bu tasarımın tek yalıtkanı bulunan tasarıma göre daha yüksek voltajlarda ve daha yüksek mikrodalga gücünde çalışmaya olanak sağladığı belirtilmiştir (Maimone vd., 2007).

Mikrodalga transfer hattı ile plazma odası arasında yalıtım sağlamak amacıyla elektriksel yalıtım tasarlanmıştır. Teflonun dielektrik sabiti mm başına yaklaşık 20 kV’ tur. Tasarımımızda bulunan teflon kalınlığı 10 mm’dir ve teoride yaklaşık 200 kV’ a kadar elektrik yalıtımını sağlayabilmektedir. Yalıtım değeri bizim kullanacağımız 10 kV değerinden yüksektir. Yani tasarım, çalışmamız için uygundur. Elektriksel yalıtım kısmında her ne kadar simülasyon yapmış olsak ta daha çok malzeme bozulmadan imal edilebilecek en uygun kalınlığa göre seçim yapılmıştır (Şekil 5.17). Simülasyon sonuçlarından faydalanarak elektriksel yalıtım üretilmiştir (Şekil 5.18).



Şekil 5.17. Elektriksel yalıtım simülasyon sonucu.

Daha karmaşık yapıda elektriksel yalıtım üretimine bu aşamada gerek duyulmamıştır. İhtiyaç halinde Maimone vd. tarafından yapılan çalışmada belirtilen karmaşık yapıdaki elektriksel yalıtım üretimi için elimizde gerekli imkanlar mevcuttur.



Şekil 5.18. Elektriksel yalıtım.

5.1.5. Vakum penceresi

Vakum penceresi kuvarstan oluşmaktadır, asıl görevi mikrodalga transfer hattı ile plazma arasında bir bariyer görevi görmek, plazma odası içerisindeki vakumu korumaktır. Amerikan Gerling firmasından WR284 dalga kılavuzuna uygun olacak şekilde satın alınmıştır (Şekil 5.19). 10^{-7} mbar vakuma kadar çalışabilir. WR284 dalga kılavuzunun çıkışında yer alan elektriksel yalıtım ile plazma odasının arasına yerleştirilmiştir. Vakum penceresinin yansıma katsayısı, üretici firma bilgilerine göre – 32 dB civarındadır. Bu da yansıma katsayısına göre çok iyi bir değerdir.

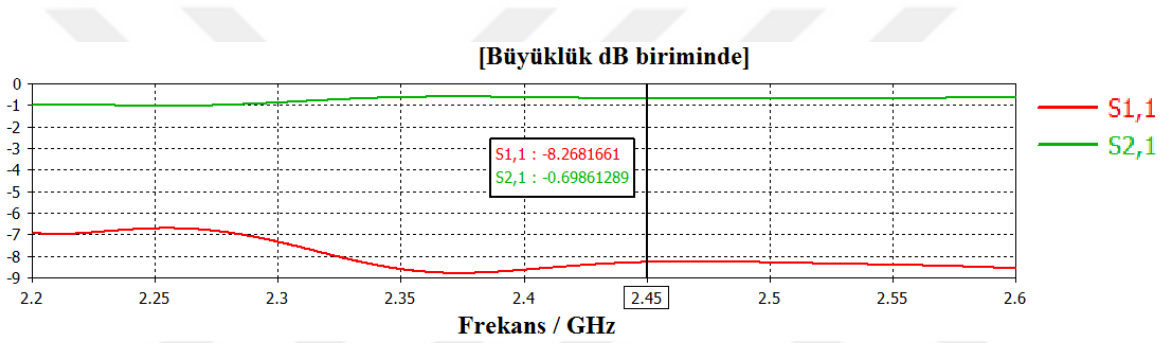


Şekil 5.19. Vakum penceresi.

5.1.6. Mikrodalga transfer hattı genel görünümü

Her bir parça için yapılan hesaplamalarda yansımaya katsayısı en büyük olan parçanın magnetron kafası olduğu belirlenmiştir ve yansımaya katsayısı yaklaşık olarak -8,32 dB' dir. Tüm hattın simülasyonu yapıldığında (Şekil 5.20) yansımaya katsayısı -8,26 dB olarak karşımıza çıkmaktadır, bu değer magnetron kafası için elde edilen simülasyon sonucuna yakındır. Buradan gücün yaklaşık %15' inin geri yansıdığı hesaplanmıştır.

Genel olarak vakum penceresi satın alınmış, diğer parçalar simülasyon sonucuna göre üretilmiş ve birleştirilmiştir (Şekil 5.21).



Şekil 5.20. Mikrodalga transfer hattının simülasyonu.



Şekil 5.21. Mikrodalga transfer hattı üstten görünümü (A: Magnetron kafası, B: Saplamalı ayarlayıcı, C: WR340'dan WR284'e geçiş dalga kılavuzu, D: Elektriksel yalıtım).

5.2. Plazma Odası

İkinci aşamada plazma odasının üretimi yer almaktadır. Plazma odası imalatında dikkat edilen en önemli konu, Gammino vd. tarafından 2006 yılında yapılan çalışmada belirtildiği üzere manyetik alan eksenini ile plazma odası eksenini çakıştırılacak şekilde tasarım yapılmıştır. Ayrıca dalga kılavuzu, bu eksenle kesişecektir (Gammino vd., 2006). Bu durumda plazma içerisinde yayılan dalgalar R veya O dalgası olacaktır. Bunun sonucunda plazma yoğunluğunun artırılması hedeflenmiştir.

Plazma odasının boyutları, Taylor ve Wills' in 1991 yılındaki çalışması referans alınarak belirlenmiştir. Plazma odasının iç çapı 90 mm, uzunluğu 100 mm seçilmiştir (Taylor ve Wills, 1991). Plazma odasının bir tarafı WR284 dalga kılavuzuna, diğer tarafı elektrotların yerleştirilmesine uygun olarak OFHC bakırdan yapılmıştır (Şekil 5.22). Daha sonra mikrodalga hattı ile bağlantısı elektriksel yalıtım ve vakum penceresi kullanılarak yapılmıştır.



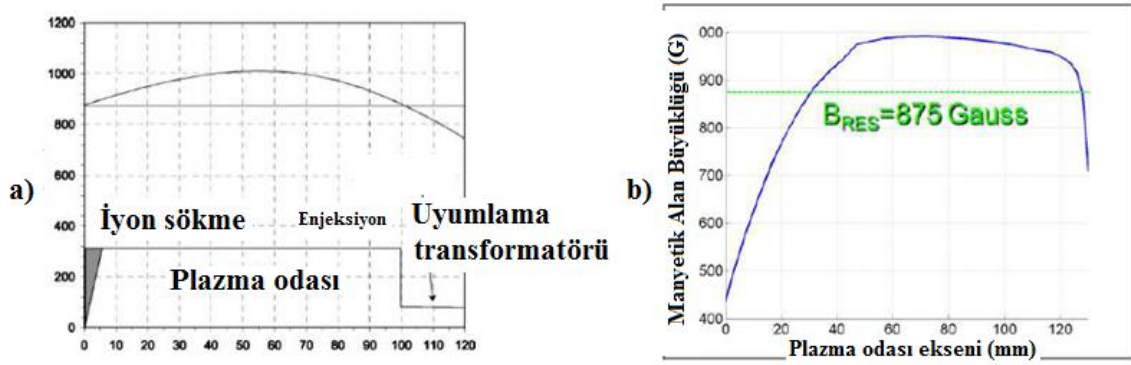
Şekil 5.22. Plazma odası.

5.3. Elektromıknatıs Tasarımı

Bu kısımda elektromıknatısların tasarımı, bunların üretimi ve test edilmesi yer almaktadır. Plazma odası etrafına birbirinden bağımsız, ECR şartını sağlamak için iki tane solenoid mıknatıs yerleştirilmiştir (Brown, 2004; Taylor, 1991; Taylor ve Wills, 1991; Taylor ve Mouris, 1993; Bailey, 2013b; Sherman vd., 1998; Celona vd., 2000; Miracoli,

2010). Manyetik alan eksenini ile plazma odası eksenini aynı hizada olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Solenoidlerin tasarımı Poisson Superfish isimli iki boyutlu elektromanyetik simülasyon programı ile gerçekleştirilmiştir (Billenand ve Young, 1987).

Mikrodalga iyon kaynağı solenoid tasarımı LNS – INFN İyon Kaynağı Grubu tarafından verilen tavsiyeler doğrultusunda yapılmış ve sanayi imkanları göz önünde bulundurularak üretimi gerçekleştirilmiştir. TRIPS ve VIS için olan manyetik alan profilleri Şekil 5.23’ te görülmektedir. Manyetik alan profili tasarlanırken, VIS manyetik alan profili göz önünde bulundurulmuştur.



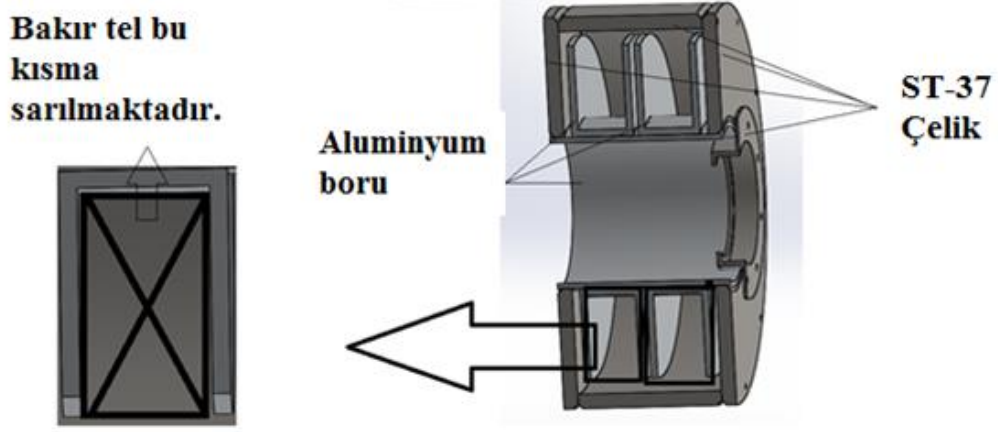
Şekil 5.23. a) TRIPS ve b) VIS manyetik alan profili (Miracoli, 2010).

5.3.1. Simülasyon

Manyetik alan tasarımı 2 boyutlu Poisson Superfish adı verilen ücretsiz simülasyon programı kullanılarak yapılmıştır. Tasarımda 2 adet solenoid mıknatıs kullanılmıştır. Burada iyonların plazmadan söküleceği bölgenin başlangıcında ST-37 karbon alaşımlı çelik kullanılmıştır, bu çeliğin kullanılması ile iyon sökme bölgesinin başlangıcında manyetik alan hızla sıfıra düşmüştür. Deneysel sistemde kullanılan herhangi bir malzeme / cihaz, manyetik alanı etkilemeyecek/etkilenmeyecek şekilde seçilmiştir.

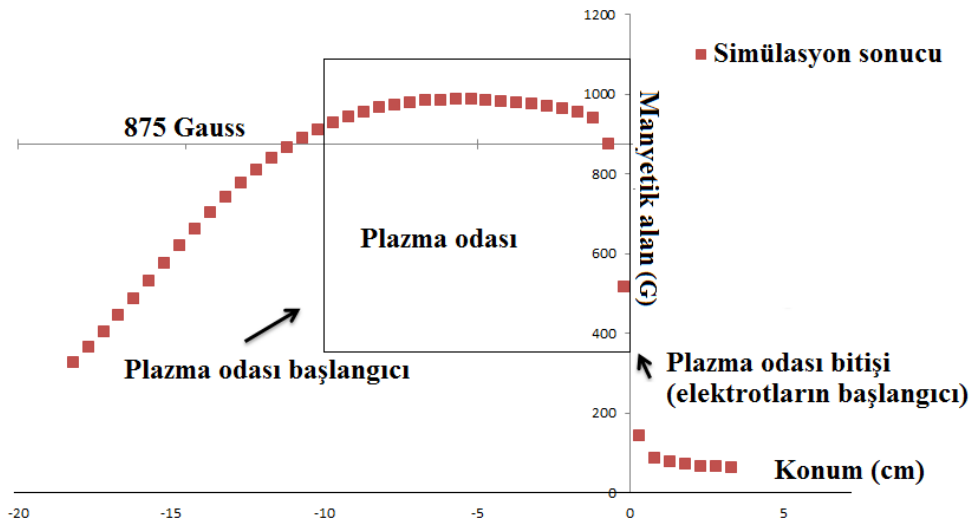
Montaj esnasında herhangi bir problem çıkmaması için montaj işlemleri öncelikle bilgisayarda sanal ortamda 3 boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir. Mıknatısların 3 boyutlu kesiti Şekil 5.24’ te verilmiştir. Şekil 5.24 göz önüne alındığında, bakır bobinler, U

şeklinde olan kısımlara sarılmaktadır. Arada kalan kısımdan mıknatısların ısınmasını engellemek amacı ile su geçecektir.



Şekil 5.24. Elektromıknatısların 3 boyutlu görünümü.

Yapılan simülasyon işlemleri sonucunda elde edilen manyetik alan profili Şekil 5.25’ te verilmektedir. Her bir solenoid 525 sarımdan oluşmaktadır ve simülasyonlar sonucunda mikrodalga hattı tarafındaki solenoid üzerinden geçen akım $I = 14,08$ A ve elektrotlar tarafındaki solenoid üzerlerinden geçen akım $I = 12,8$ A olarak hesaplanmış ve deneysel sonuçlarda kullanılmıştır. Bu manyetik alan profili, mikrodalga iyon kaynağı için gerekli şartları sağlamaktadır. Deneyler esnasında gerektiğinde manyetik alan profili, bobinlere uygulanan akım değeri değiştirilerek optimize edilebilir, elektromıknatıs kullanmamızdaki asıl sebep budur.

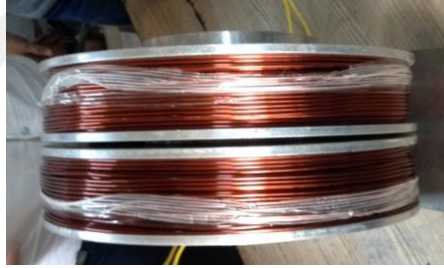


Şekil 5.25. Manyetik alan simülasyon sonucu.

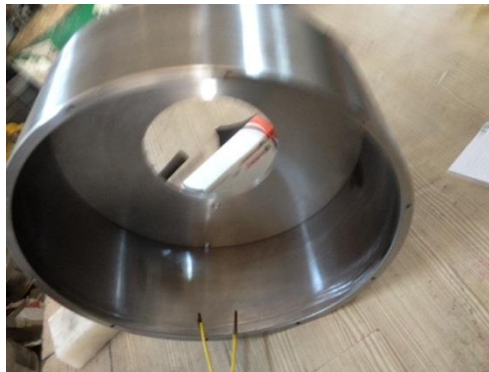
Elektromıknatısların üretimi esnasında simülasyon işlemi, gerek tasarım hatasından gerekse uygun malzemenin bulunamaması veya uygun sarım sayısına ulaşamamasından tekrarlanmıştır. Burada yer alan simülasyon sonucu, üretimi gerçekleştirilen elektromıknatıslar göz önünde bulundurularak hazırlanmıştır.

5.3.2. Üretim

Simülasyon işlemlerin bitmesinin ardından elektromıknatısların üretim aşaması başlamıştır. İmalat aşamasında yukarıda belirtildiği gibi bazı aksaklıklar olmuş, yapılan ilk 2 – 3 tasarım yapımı mümkün olmadığı için yenilenmiştir. Son olarak en uygun değerler göz önünde bulundurularak simülasyon işlemi tamamlanmış ve elektromıknatısların üretim aşamasına geçilmiştir. Şekil 5.26 – 5.28’ de montajdan önce elektromıknatısların parçaları görülmektedir. Sırasıyla bakır sarımlar (bobinler), elektromıknatısın etrafına yerleştirilen kapak (ST-37) ve elektromıknatısın yandan görünüşü verilmektedir.



Şekil 5.26. Elektromıknatıs içerisinde bulunan bakır sarımlar.



Şekil 5.27. Elektromıknatıs kapağı.



Şekil 5.28. Elektromıknatısın yandan görünüşü ve su kanalları.

Çalışma esnasında bobinlerin sıcaklığı önemlidir. Elektromıknatısları soğutmak amacı ile bobinler arasındaki boşluk saf su ile doldurmuş ve bu suyu 20°C’ de sabit tutacak şekilde devir daim yapmak amacıyla su soğutucuya bağlanmıştır. Bu sıcaklık sabit kalmazsa manyetik alan düşmektedir ki bu istenmeyen bir durumdur. Bir diğer problem, elektromıknatıs kapağının iç çeperlerine su değdiğinde malzemeden dolayı küflenmeye ve korozyona uğramaya başlamasıdır. Küflenmeyi ve korozyonu engellemek için bakırın iç ve dış kısmı sırla boyanmıştır (5.29). Elektromıknatısın birleştirilmiş hali Şekil 5.30’ da verilmiştir. Daha sonra dış kısım tekrar boyanmıştır.



Şekil 5.29. Elektromıknatıs kapaklarının sırla boyanmış hali.



Şekil 5.30. Elektromıknatısın dıştan görünüşü, sırla boyanmış hali.

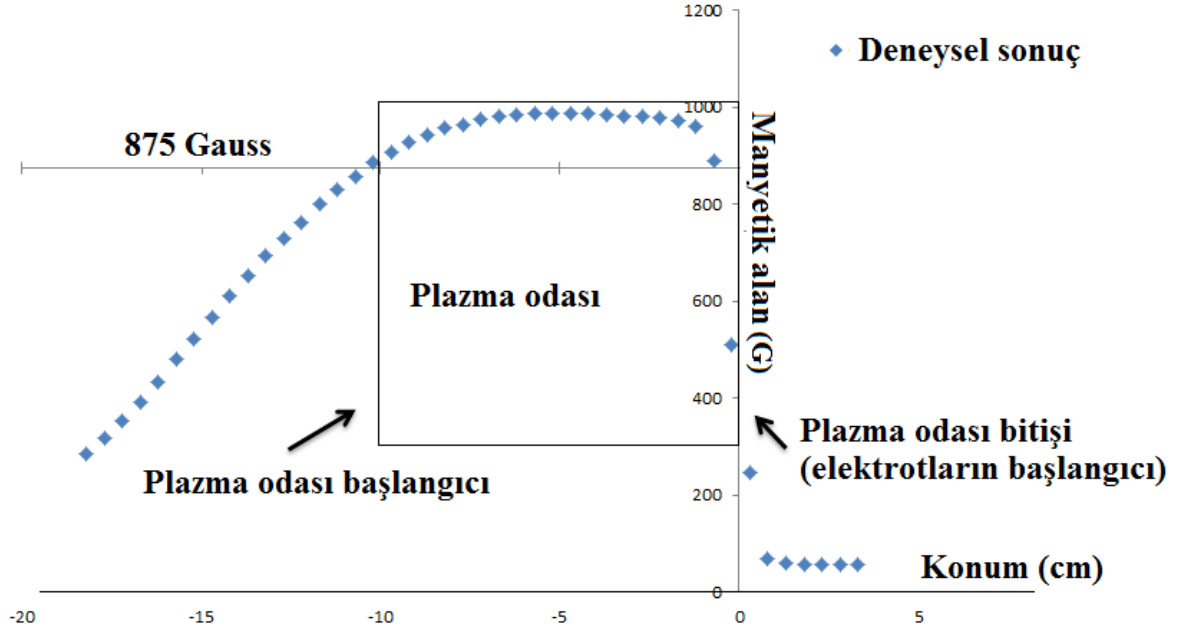
5.3.3. Manyetik alan ölçümü

Manyetik alan ölçümü, eksen boyunca (z ekseni) manyetik alan ölçebilen eksenel probu olan Gaussmetre ile yapılmıştır.

Gaussmetre, z ekseni boyunca manyetik alanı ölçmek amacıyla şekildeki sistemle plazma odasının merkezine yerleştirilmiş, yanına konum ölçümünü alabilmek amacıyla bir cetvel monte edilmiştir. Manyetik alan ölçümü 5 mm arayla gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.31). Manyetik alanın deneysel ölçüm sonuçları Şekil 5.32’ de verilmektedir.

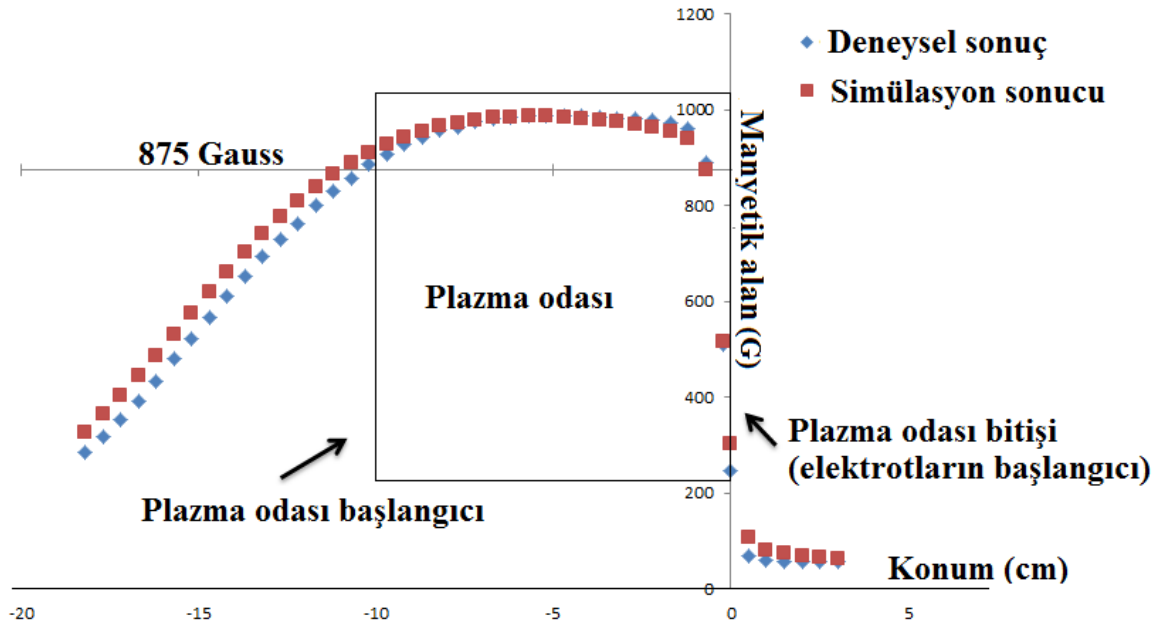


Şekil 5.31. Manyetik alan ölçümü esnasında çekilmiş bir fotoğraf



Şekil 5.32. Manyetik alan deneysel ölçüm sonuçları.

Manyetik alanın deneysel ölçüm sonuçları ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırması Şekil 5.33’ te verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere deneysel ve simülasyon sonuçları birbiri ile uyum içerisinde çıkmıştır. Deneysel sonuçlar, beklentimizi karşılamaktadır.



Şekil 5.33. Manyetik alan karşılaştırması (simülasyon ve deneysel ölçüm).

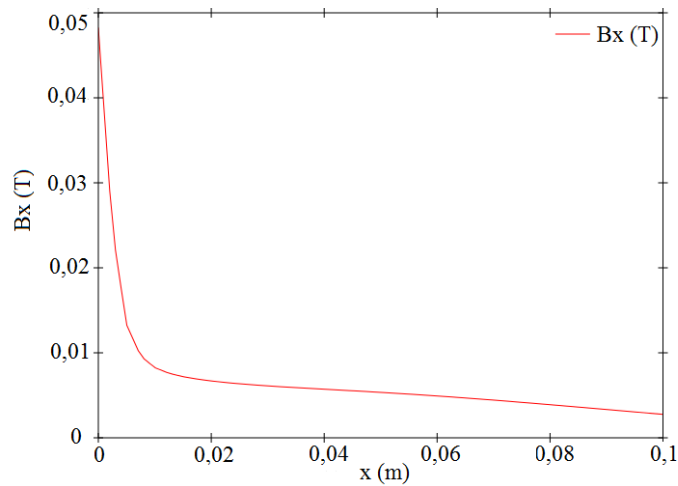
5.4. Elektrot Tasarımı

İyon sökme elektrotlarının tasarımı, IBSIMU (İyon demeti simülatörü) isimli ücretsiz iyon demeti tasarım programı ile gerçekleştirilmiştir (Kalvas vd., 2010). Simülasyon işlemlerinden sonra, elektrotların üretimine geçilmiştir.

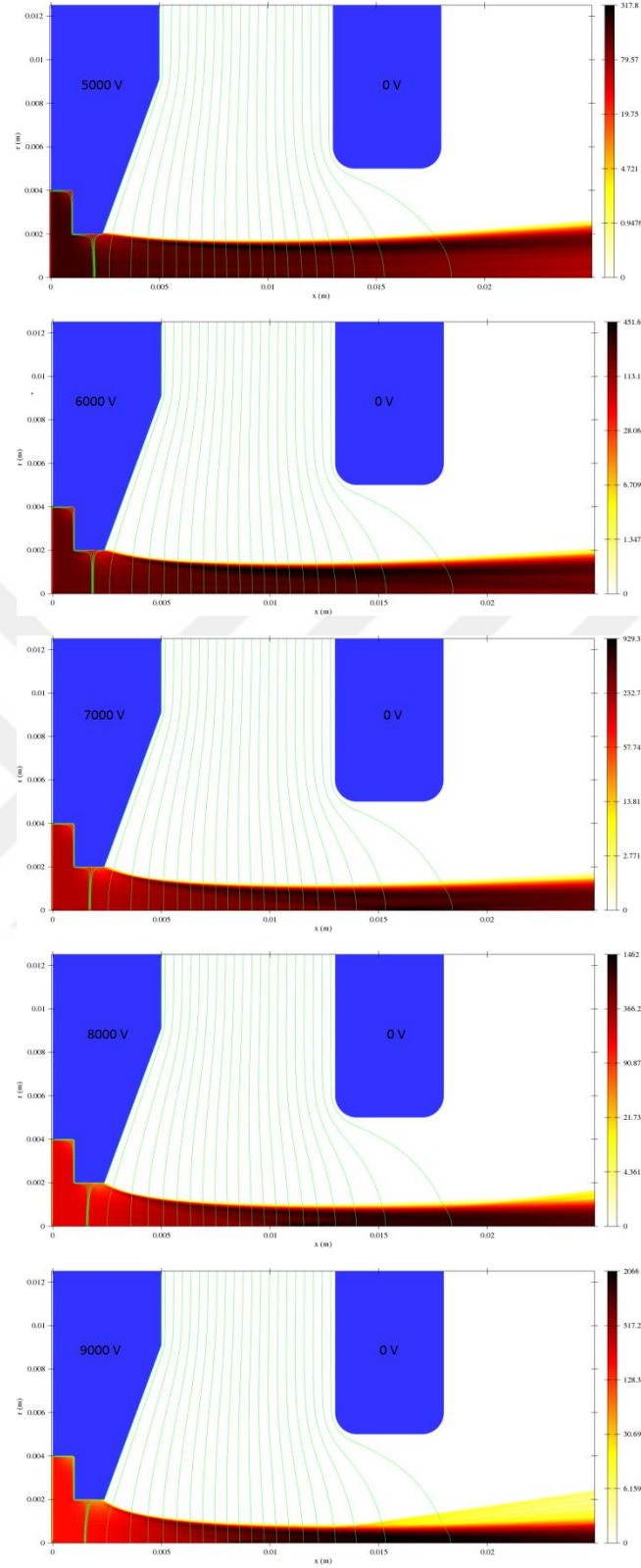
5.4.1. Simülasyon

Simülasyon işlemlerinde plazma elektrotu ile akım ölçümünde kullanılacak Faraday kabı arasında yaklaşık 15 cm mesafe olduğu düşünülmüş, simülasyon işlemleri buna göre yapılmıştır.

Şekil 5.33' te verilen manyetik alan sonuçları incelendiğinde, manyetik alanın iyon sökme bölgesinde düşük te olsa var olduğu belirlenmiştir. İyon sökme bölgesindeki manyetik alanın iyonların izleyeceği yolu etkileyebileceği düşünülmüştür. İyon sökme bölgesindeki teorik manyetik alan verileri, IBSIMU programı içerisine tanımlanmıştır. Böylelikle iyon sökme bölgesinin simülasyon işlemlerine manyetik alan sonuçları dahil edilmiştir. Daha sonra IBSIMU programının bizim tanımladığımız manyetik alan verileri ile işlem yapıp yapmadığını anlamak için IBSIMU programına iyon sökme bölgesindeki manyetik alan profili çizdirilmiş, Şekil 5.34' te verilen manyetik alan profiline göre hesaplamaları yaptığı anlaşılmıştır. Bu manyetik alan profili, bizim tanımladığımız manyetik alan profili ile uyumludur.



Şekil 5.34. IBSIMU programına tanımlanan manyetik alan profili.

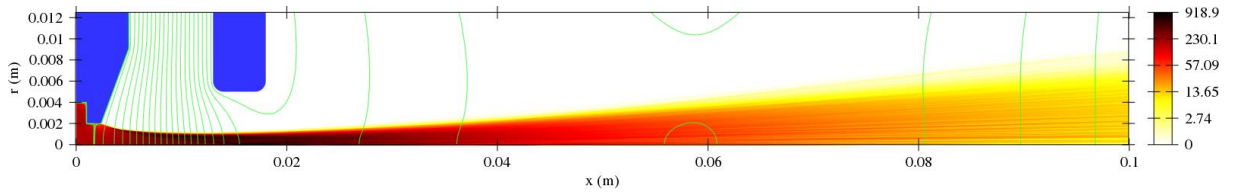


Şekil 5.35. IBSIMU programı kullanılarak yapılan 2 elektrotlu tasarımda demetin plazma elektrot voltajına göre davranışı.

İki elektrot arasına uygulanabilecek maksimum voltaj değeriyle ilgili teorik hesaplama yapılabildiğinden bahsedilmiştir. Elektrotlar arası mesafe belirlenirken Coupland ve Kilpatrick tarafından verilen teorik hesaplama ve Paschen eğrisi göz önünde bulundurulmuştur.

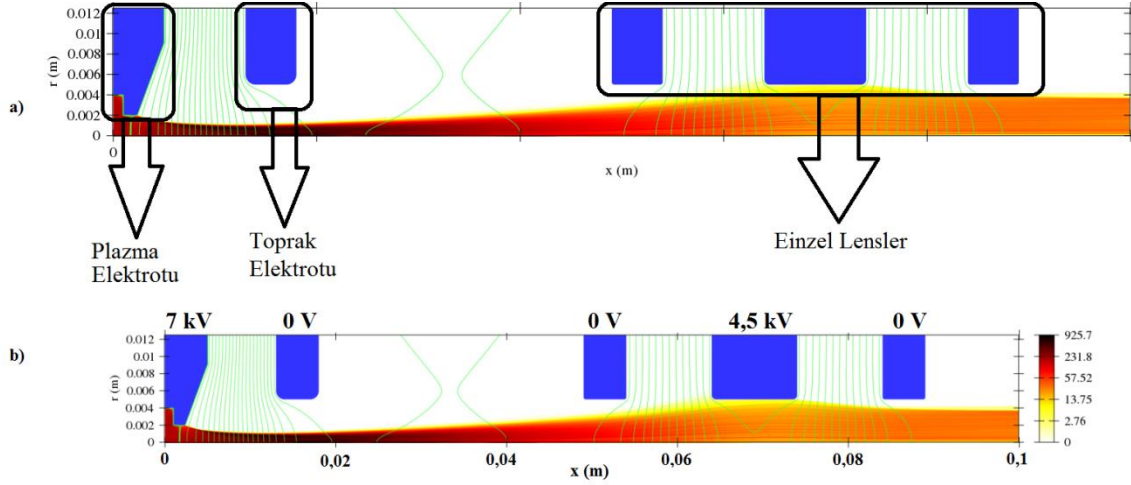
Simülasyon işlemlerine 2 elektrotlu en basit sistemle başlanmıştır. İlk elektrot plazma elektrotudur, buna yüksek voltaj uygulanmıştır. İkinci elektrot toprak elektrotu olup 0 V potansiyelde tutulmuştur. Öncelikle plazma menisküsünün şekli ve toprak elektrotu çıkışında demetin nasıl davranacağını görmek için çeşitli yüksek voltaj değerleri uygulanmıştır (Şekil 5.35). Bunun sonucunda demetin 8 kV üzeri voltaj değerlerinde saçılmaya başladığı belirlenmiştir.

Demetin daha uzun mesafede nasıl davrandığını görmek için simülasyon mesafesi uzatılmıştır (Şekil 5.36). Demetin Faraday kabına yaklaşımdan dağıldığı belirlenmiştir. Bu sonuç bizim için yeterli değildir. Yapılan araştırmalar sonucunda demeti odaklamak için einzel lens tasarımı kullanılabileceği belirlenmiş, toprak elektrotundan sonra üç tane daha elektrot konulmasına karar verilmiştir.



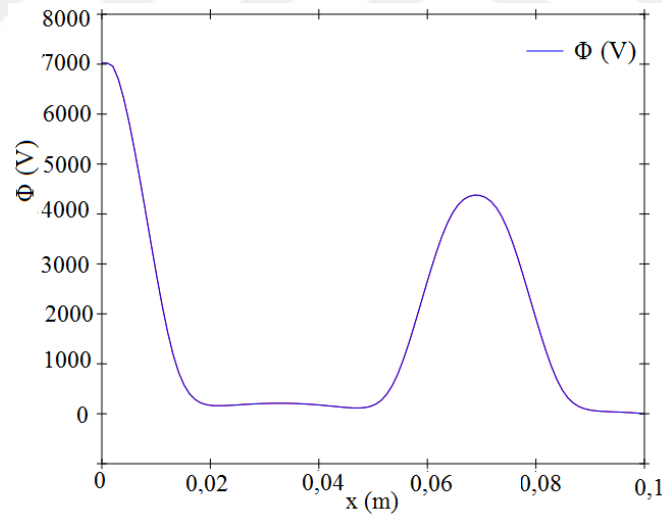
Şekil 5.36. İki elektrotlu tasarım.

Daha sonra einzel lens sistemi tasarımıımıza eklenmiş, toplam 5 elektrottan oluşan iyon sökme sisteminin simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon işlemi sırasında farklı uzaklıklar ve farklı elektrot şekilleri ele alınmıştır. En iyi sonuca Şekil 5.37' de ulaşıldığı belirlenmiştir. Şekil 5.37' de verilen beş elektrotlu simülasyon sonucuna göre plazma elektrotuna 7000 V, ortadaki einzel lens elektrotuna 4500 V uygulandığında tasarımın iyonları dağıtmadan Faraday kabına ulaştırdığı tesbit edilmiştir.



Şekil 5.37. Simülasyonda iki elektrotlu tasarıma einzel lens sisteminin eklenmesi
a) elektrotların isimlendirilmesi ve b) uygulanan voltaj değerleri.

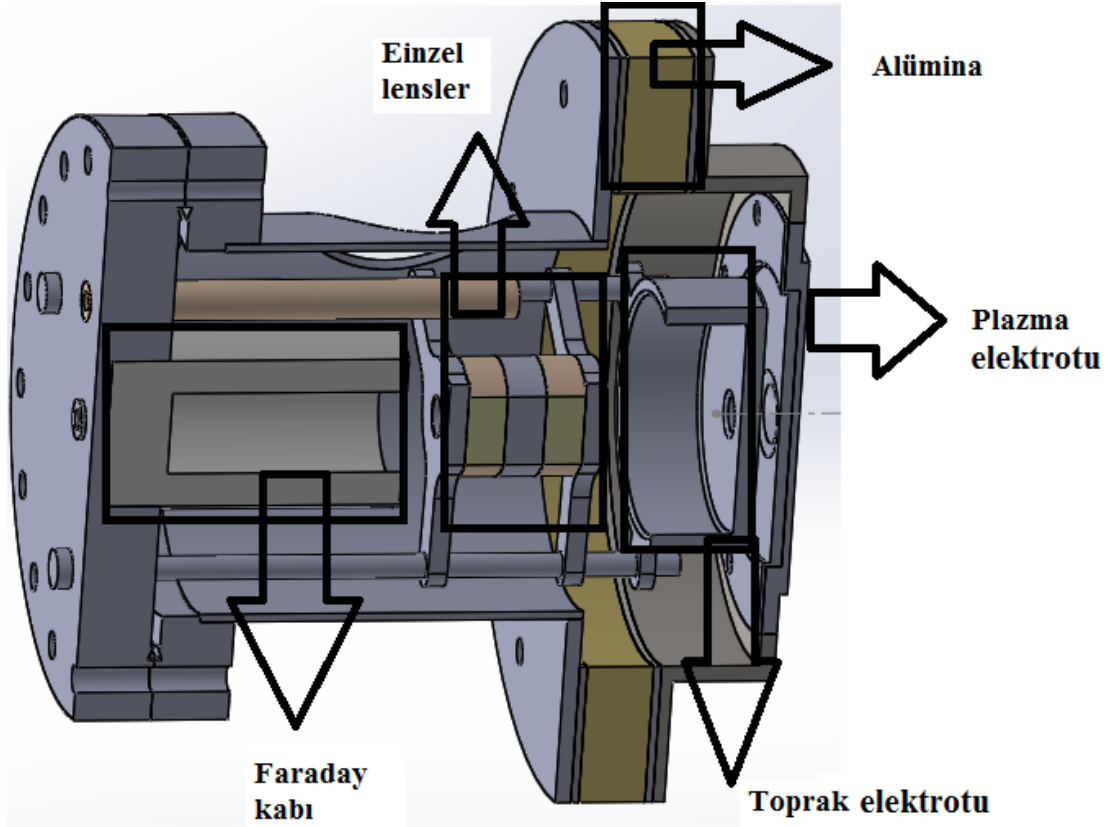
Yapılan tasarım işleminde elektriksel potansiyel geçişi esnasında keskin bölgenin olmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 5.38’ den görüleceği üzere elektriksel potansiyelde keskin bir nokta bulunmamaktadır. Sonraki aşamada elektrotların üretimine geçilmiştir.



Şekil 5.38. Elektriksel potansiyel.

5.4.2. Elektrotların üretimi

Montaj esnasında herhangi bir problemle karşılaşmamak adına öncelikle tasarımın üç boyutlu çizimi gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.39).



Şekil 5.39. İyon sökme kısmı üç boyutlu çizimi.

Plazma elektrotu ile toprak elektrotu arasında voltaj atlaması olmaması için yalıtım konulmuş, yalıtım malzemesi olarak alümina kullanılmıştır (Şekil 5.40). Alüminanın elektriksel direnci mm başına 9 kV' tur. Bunun yanında 1500 °C' ye kadar yüksek ısıya dayanıklıdır.



Şekil 5.40. Alumina.

Üç boyutlu çizim sonrasında simülasyon sonuçlarına göre elektrot imalatları gerçekleştirilmiştir. İmal edilen elektrot şekilleri Şekil 5.41 ve 5.42' de verilmektedir.



Şekil 5.41. Plazma elektrotu.



a)



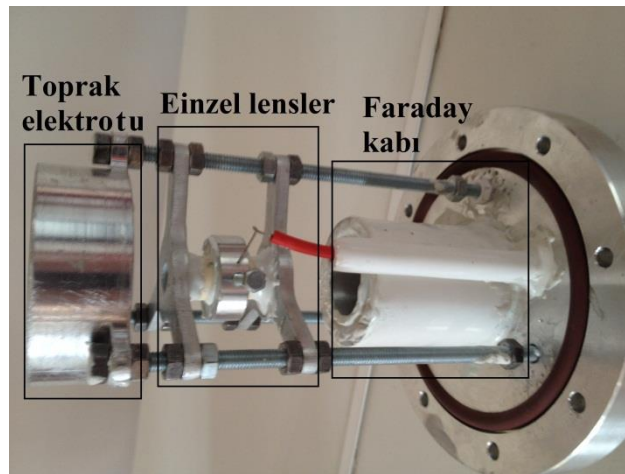
b)



c)

Şekil 5.42. İmalatı gerçekleştirilen a) toprak elektrotu, b) ve c) einzel lensler.

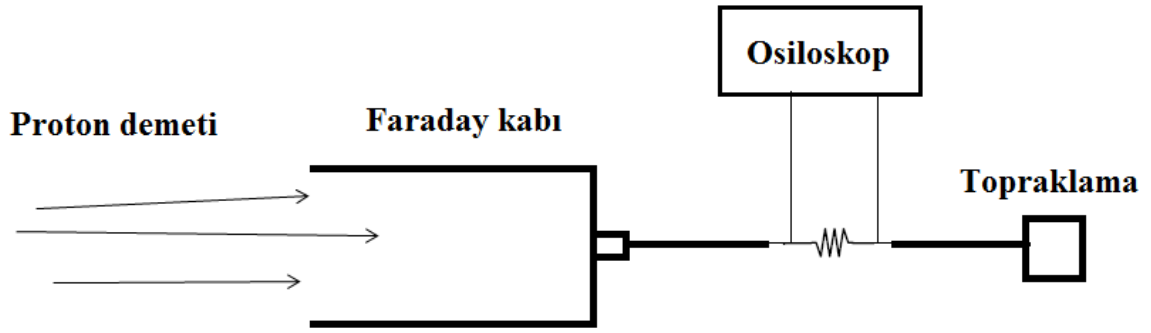
Toprak elektrotu, einzel lensler ve Faraday kabının birleştirilmiş hali Şekil 5.43' te verilmektedir. Burada einzel lenslerin yanında görünen kırmızı kablo, ortadaki einzel lens elektrotuna yüksek voltaj aktarmakta kullanılacak olan kablodur.



Şekil 5.43. Toprak elektrotu, einzel lensler ve Faraday kabı.

5.5. Faraday Kabı

Demet akım ölçüm işlemi Faraday kabı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Faraday kabı temsili görünümü Şekil 5.44’ te verilmiştir. Akım ölçüm işlemi Faraday kabı, bir direnç ve osiloskop vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Faraday kabının kendisi metalden oluşmaktadır, iyon sökme elektrotlarının bulunduğu kısımdaki metallere seramik kullanarak izole edilmiştir. Daha sonra çıkışı toprağa bağlanmış, araya bir direnç eklenmiştir (Şekil 5.44).



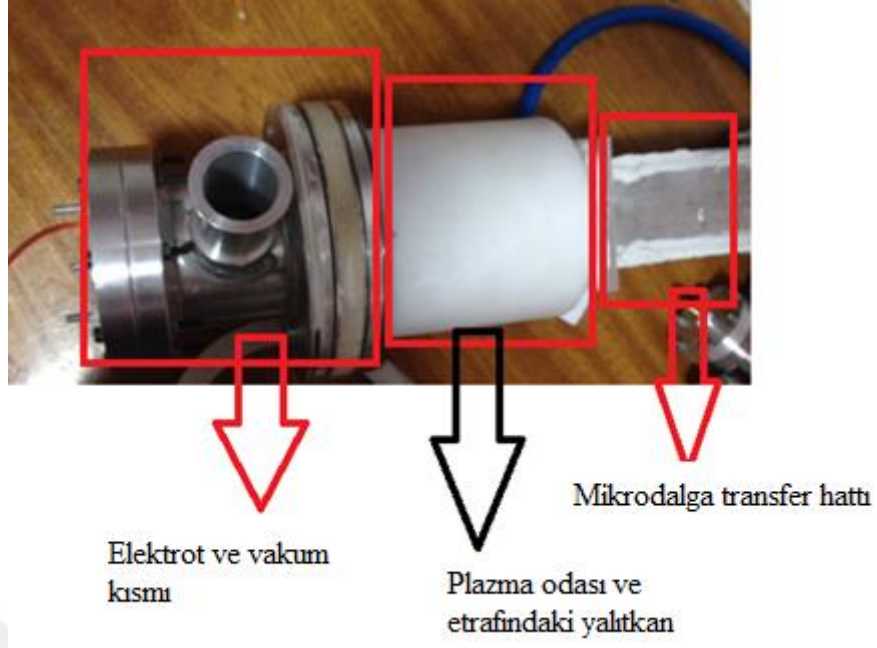
Şekil 5.44. Demet akımı ölçümü için kullanılan devre.

Burada 1 k Ω değerinde bir direnç kullandığımızı kabul edelim, osiloskopta 1 V okunması durumunda gelen demet akımı 1 mA olacaktır.

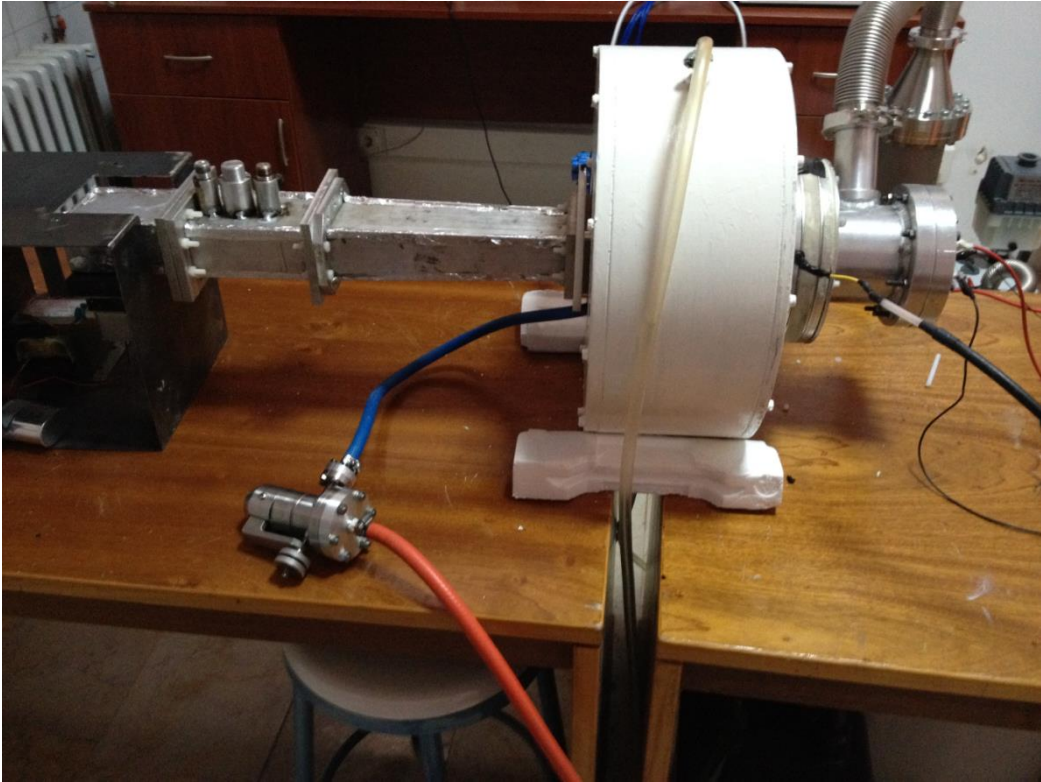
5.6. Montaj

Tüm parçaların imalatı tamamlandıktan sonra montaj işlemine geçilmiştir. Bu aşamada parçalar arasında boşluk kalmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 5.45’ te mikrodalga transfer hattı, plazma odası ve iyon sökme bölgesinin birleştirilmiş hali görülmektedir.

Burada plazma odasının etrafına, elektromıknatıs ile plazma odası arasında voltaj atlaması olmaması için yalıtım yerleştirilmiştir. Sistemin montajının tamamlanmasının ardından (Şekil 5.46) deneysel çalışmalara geçilmiştir.



Şekil 5.45. Mikrodalga hattı, plazma odası ve iyon sökme bölgesinin montajı.



Şekil 5.46. İyon kaynağının birleştirilmiş hali.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Deneysel çalışmalar beş başlık altında toplanmıştır. Bu aşamalar şu şekildedir:

Aşama 1: Vakum testi,

Aşama 2: Yüksek voltaj sistemlerinin testi,

Aşama 3: Plazma oluşumu,

Aşama 4: Proton demetinin plazma odasından demet hattına aktarılması (iyon sökme işlemi),

Aşama 5: Demet akımının optimizasyonu.

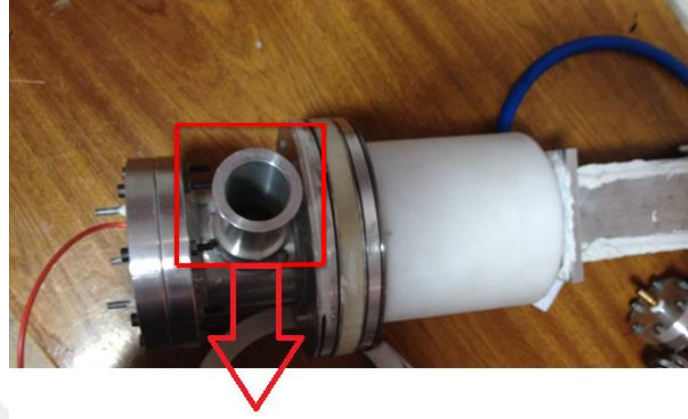
6.1. Vakum Testi

İlk aşamada sistemin vakum testi yer almaktadır. Bizim bu çalışmada vakum üzerine ana hedefimiz, vakumu 10^{-5} mbar seviyesinde tutmaktır. Vakum işlemi için Edwards Vacuum next300D/RV12 Turbomoleküler Vakum Pompa İstasyonu kullanılmıştır. Vakum çalışmalarında tüm parçalar birleştirildikten sonra geçilmiştir.

Burada vakum pompası Şekil 6.1’ de gösterilen kısma bağlanmıştır. Bu nokta her ne kadar çok yakınmış gibi görünse de plazma odasından daha uzaktadır. Bu kısımda vakum ikiye ayrılmaktadır.

İlk kısım plazma odasının olduğu kısım, ikinci kısım ise iyon sökme elektrotlarının olduğu kısımdır. Bizim burada ölçtüğümüz vakum değeri daha çok iyon sökme sisteminin olduğu kısma aittir. Plazma odası hacminde vakum, gazın olduğu durumda $10^{-3} - 10^{-4}$ mbar seviyesindedir. Bu durum şu şekilde açıklanabilir: İyon sökme sisteminin olduğu kısımda içerideki gaz hacmi büyük bir boru ile tahliye edilirken ve tabi vakum pompasına yakinken, plazma odasının içerisindeki hacim 4 mm çaplı plazma elektrotu deliğinden

tahliye edilmektedir ve vakum pompasına uzaktır. Bu sebeple plazma odası kısmında vakum daha yüksektir (Miracoli, 2010).



Vakum pompası bağlantısı

Şekil 6.1. Vakum pompasının bağlandığı nokta.

Vakum testlerine başlandığında ilk etapta hedeflenen vakum değerine ulaşılamamıştır. Bu durumda önce ilgili kaçak noktası araştırılmış, tespit edilmiş ve problem yaratan noktada problem giderilmiştir. Daha sonra test tekrarlanmıştır.

Sistemde herhangi bir problem olmadığı anlaşıldığında içeride gaz olmadığı durumda sistemin vakumu $2 - 2,5 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde ölçülmüştür.

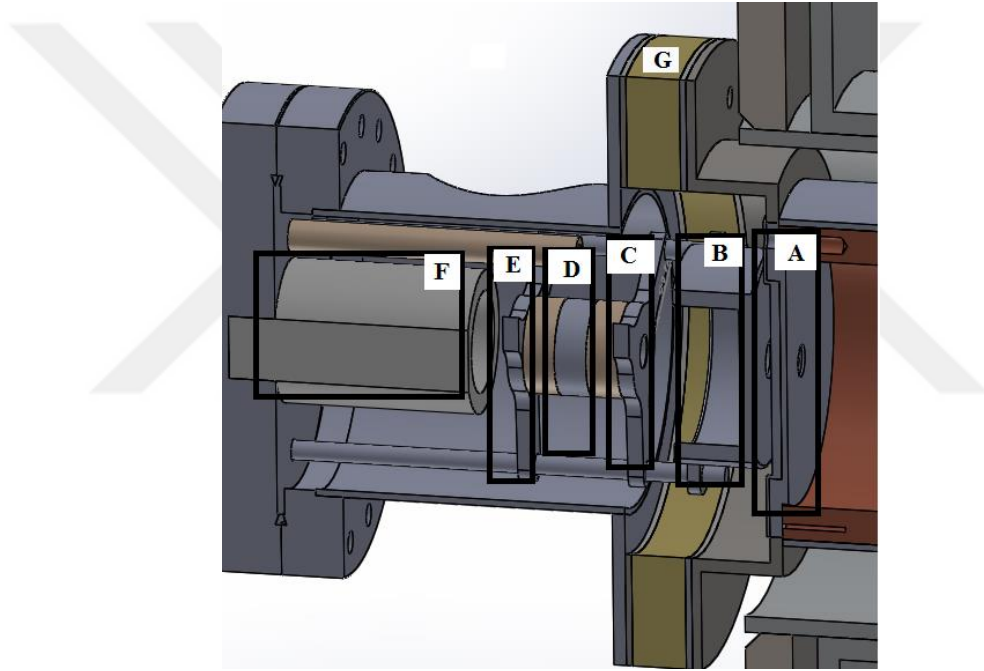
Yapılan testler neticesinde bu vakum seviyesinin bizim için yeterli olduğu düşünülmüş, gerekli olması durumunda vakum seviyesinin düşürülmesi konusunda çalışmalara devam edilmesi planlanmıştır.

6.2. Yüksek Voltaj Sistemlerinin Testi

Yüksek voltaj testi yapmamızdaki başlıca sebepler şu şekilde sıralanabilir: i) Yüksek voltaj kaynakları ilgili elektrotlara voltaj iletimi sağlamazsa iyon kaynağı çalışmaz, bu açıdan öncelikle voltaj kaynaklarının kontrolü gerçekleştirilmiştir. ii) İyon kaynağının çalışması esnasında, yani içeride gaz varken ve plazma oluşmuşken, topraklanan elektrotlar ile yüksek voltaj uygulanan elektrotlar arasında voltaj atlaması gerçekleşmesi sistemin çalışmasını engeller, bu problem gerçekleşmeden önleminin

alınması gerekir. Ayrıca sistem çalışırken elektrotlar arasında voltaj atlaması yapması, parçaların hasar görmesi gibi teknik problemlere sebep olabilir.

Elimizde iki adet yüksek voltaj kaynağı bulunmaktadır; bunlardan birisi 25 kV/12 mA değerinde, diğeri ise 10 kV/6mA değerindedir, iki kaynak ta ayrı pozitif yüksek voltaj kaynağıdır. Öncelikle voltaj kaynaklarının çalıştığından emin olmak için yüksek voltaj ölçebilen bir ampermetre vasıtasıyla denenmiştir. Çalıştıklarından emin olunduktan sonra, yüksek voltaj kaynaklarının iyon kaynağı üzerinde bulunan ilgili elektrotlara bağlantısı gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.2. İyon sökme sistemi (A: Plazma elektrotu, B: Toprak elektrotu, C: Einzel lens 1. elektrot, D: Einzel lens 2. elektrot, E: Einzel lens 3. elektrot, F: Faraday kabı, G: Alumina).

Yapılan bu çalışmada iki farklı noktaya yüksek voltaj uygulanmıştır. Bunlardan ilki Şekil 6.2’ de A ile gösterilen plazma elektrotuna, ikincisi D ile gösterilen einzel lens 2. elektrotunadır. Geri kalan elektrotlar ve Faraday kabı topraklanmıştır.

Yüksek voltaj sistemlerinin testi esnasında öncelikle yüksek voltaj kaynakları iyon kaynağının ilgili elektrotlarına bağlanmıştır. Sistemde gerekli bileşenlerin topraklamasının yapıp yapılmadığı kontrol edilmiş, emin olunduktan sonra vakum pompası çalıştırılmıştır.

Yüksek voltaj sistemleri, deneylerin yapıldığı aralık olan $2 - 7 \times 10^{-5}$ mbar seviyeleri arasında *içeride gaz olmadığı* durumda denenmiştir.

Öncelikle plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanmıştır, plazma elektrotunun voltajı 0'dan başlayarak yavaş yavaş yükseltilmiştir, denediğimiz maksimum voltaj simülasyonda bulunan değerden yaklaşık 3 – 4 kV daha yüksektir. Daha yüksek voltaj seviyelerinde deneme yapmamızın sebebi simülasyon sonucunda hesaplanan voltaj değeri yeterli gelmezse deneye başladığımızda voltaj atlaması gibi bir sürprizle karşılaşmamaktır. Bir problem olmadığı belirlendikten sonra bu yüksek voltaj kaynağı kapatılmıştır.

İkinci olarak einzel lens ikinci elektrota yüksek voltaj uygulanmış, bir problem olmadığı tesbit edildikten sonra yüksek voltaj kaynağı kapatılmıştır.

Eğer iki kaynağın çalıştırılması sonucunda birisinde veya ikisinde de problem görülmüşse, önce bu problemin giderilmesi için gerekli çalışmalar yapılmıştır. Problem olmaması durumunda bir sonraki aşamaya geçilmiştir.

Son olarak iki yüksek voltaj kaynağı birlikte çalıştırılmıştır. Bir problem olmadığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda tasarımıımız bu üç aşamayı başarılı olarak tamamlamıştır.

Bunlara ek olarak ileriki aşamalarda sistem daha stabil olduğunda yüksek voltaj kaynaklarından korunmak için ek önlemler alınması planlanmaktadır.

Burada insan sağlığı açısından dikkat edilmesi gereken en önemli nokta, voltaj kaynağı/kaynakları ile çalışırken kişinin herhangi bir şekilde voltaj kaynaklarının bağlı olduğu metal yüzeylerle temasının olmaması ve bu yüzeylere yaklaşmamasıdır. Ortamın nemli, pis olmamasına dikkat edilmelidir. Bununla birlikte bu testler esnasında bir problemle karşılaşılabilceği göz önünde bulundurularak yanınızda fazladan en az bir kişi bulunmalıdır, bu kişinin bu çalışma esnasında görevi sizi ve sistemleri uygun mesafeden gözetleyip gerektiğinde müdahalede bulunmaktır.

6.3. Plazma Oluşumu

Bu aşama, önceki aşamalara göre daha karmaşık bir yapı oluşturmaktadır. Bununla birlikte sonraki aşamalar, bu aşamanın başarısına bağlıdır.

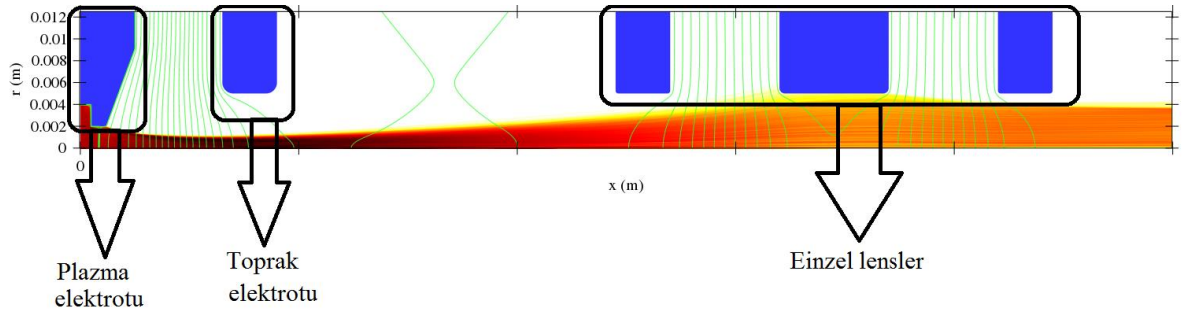
İlk olarak vakum pompası çalıştırılmış, vakum hedeflenen seviyeye ulaşmaya kadar beklenmiştir. Ardından ayarlı bir vana yardımıyla plazma odası içerisine hidrojen gazı bir delikten gönderilmiştir. Hidrojen gazı basıncıyla birlikte vakumun $3,2 \times 10^{-5}$ mbar ile 4×10^{-4} mbar arasında vakum mertebesinde sabitlenmesi sağlanmıştır. Plazma deneyleri geniş bir aralık olan $3,2 \times 10^{-5}$ mbar ile 4×10^{-4} mbar vakum seviyeleri arasında gerçekleştirilmiştir. Önceden belirlenen manyetik alan profilini uygulamak için solenoidler çalıştırılmıştır. Sırayla elektromıknatısların sıcaklığının yükselmemesi için soğutma sistemi çalıştırılmış, daha sonra sırasıyla iki solenoide daha önce belirlenen akım değerleri uygulanmıştır. Son olarak 2,45 GHz frekansında mikrodalga üreticisi yani magnetron çalıştırılmıştır. Magnetron atmalı yapıda çalışmaktadır ve frekansı 50 Hz, periyodu ise 20 ms' dir. Sonuç olarak plazma oluşumu plazma odasının üzerindeki bir cam aracılığı ile Şekil 6.3' te verildiği gibi gözlenmiştir. Bu aşamanın başarıyla tamamlanmasının ardından iyon sökme işlemine geçilmiştir.



Şekil 6.3. Plazma oluşumu.

6.4. 2 mm Yarıçaplı Plazma Elektrotlu İyon Sökme Sistemi

Bu aşamanın bir önceki aşama olan plazma oluşumundan farkları, iyon sökme bölgesindeki elektrotlara yüksek voltaj uygulanması ve plazma odasından demet hattına aktarılan proton akımının ölçülmesidir. Bu elektrot sisteminde plazma elektrotunun yarıçapı 2 mm' dir.



Şekil 6.4. Deneyel çalışmada kullanılan elektrot tasarımı.

Öncelikle bölüm 6.3.' te belirtildiği gibi plazma oluşturulmuştur. Burada yapılan deneyler $3,2 \times 10^{-5}$ mbar ile $6,5 \times 10^{-5}$ mbar vakum aralığında gerçekleştirilmiştir.

Genel olarak yapılan işlemlerde ilk olarak sadece plazma elektrotuna bağlı yüksek voltaj kaynağı çalıştırılmış, ölçüm alınmıştır. Hemen ardından hem plazma elektrotuna bağlı yüksek voltaj kaynağı, hem de einzel lense bağlı yüksek voltaj kaynağı sırasıyla çalıştırılmıştır. İlk olarak plazma elektrotuna bağlı yüksek voltaj kaynağının voltajı yavaş yavaş artırılarak 0 – 10 kV arasında değiştirilmiş ve en iyi akım sonuçları ~8 kV değerinde elde edilmiştir. Daha sonra bu kaynakla birlikte einzel lense bağlı yüksek voltaj kaynağı çalıştırılmış, voltaj 0 – 5 kV arasında değiştirilmiş, ~1 kV uygulandığında en iyi sonuç alınmıştır. Farklı vakum mertebelerinde aynı prosedür tekrarlanmıştır. Uygulanan voltaj aralıkları, simülasyon sonuçları baz alınarak oluşturulmuştur. Bununla birlikte burada bahsedilen değerler, yüksek voltaj kaynağından okunan değerlerdir. İyon kaynağı çalışırken araya ampermetre/voltmetre bağlayıp yüksek voltaj ölçme olanağımız yoktur.

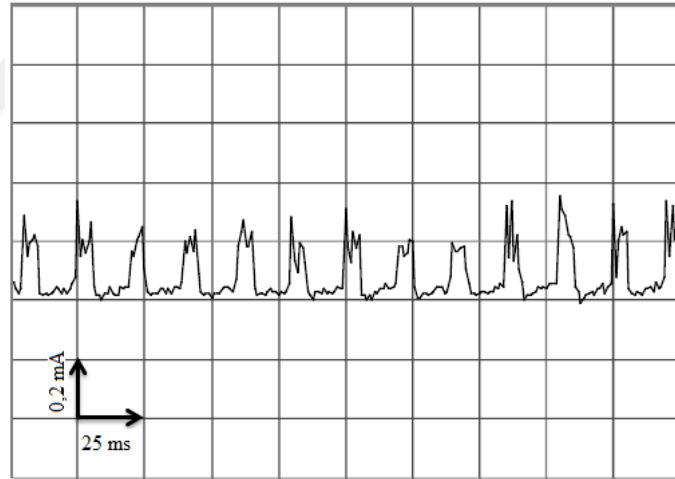
Deneyler $3,2 \times 10^{-5}$ mbar, $5,3 \times 10^{-5}$ mbar ve son olarak $6,5 \times 10^{-5}$ mbar seviyelerinde plazma odası içerisinde hidrojen gazı miktarı farklıyken yapılmıştır. Hidrojen gazı miktarı

daha yüksek seviyedeysen gerçekleştirilen deneylerde alınan sonuçlar yukarıda belirtilen aralıkta gerçekleştirilen deney sonuçlarıyla karşılaştırıldığında iyi sonuç vermemektedir.

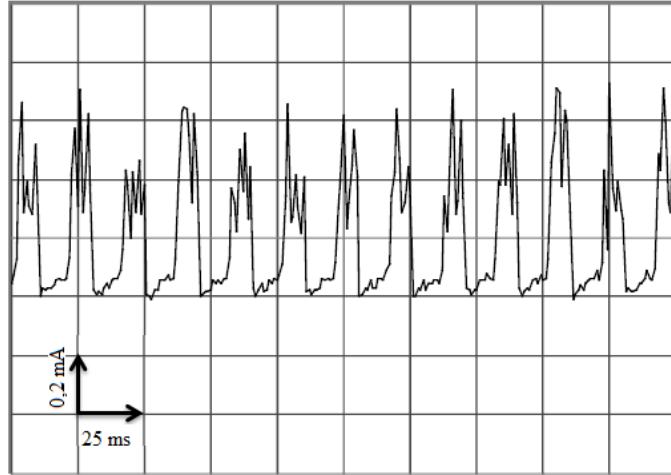
6.4.1. 6,5E-5 mbar

Plazma odasında gaz varken vakum $6,5 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiştir, bunun sonucunda osiloskop kullanılarak ölçülen demet akımı şekil 6.5' te verilmektedir. ~0,2 mA akım demet akımı ölçülmüştür.

Daha sonra plazma elektrotuna bağlı yüksek voltaj kaynağı çalışırken einzel lense yüksek voltaj uygulanmıştır, ölçülen demet akımı şekil 6.6' da verilmektedir. Plazma elektrotu ve einzel lense voltaj uygulanması durumunda ~0,6 mA demet akımı ölçülmüştür.



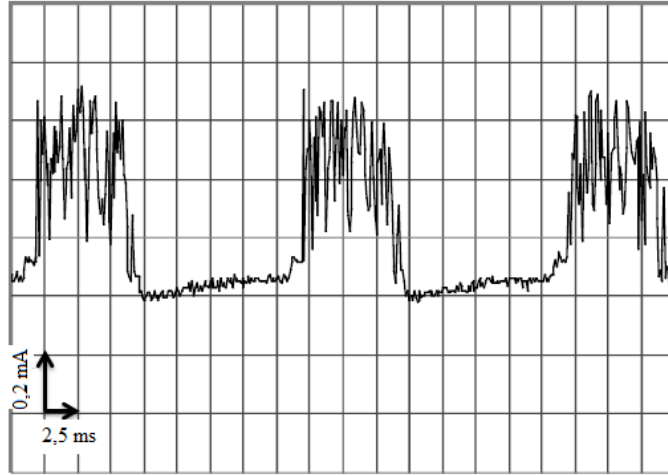
şekil 6.5. 6,5E-5 mbar' da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms lğinde.



Şekil 6.6. $6,5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde.

Önce sadece plazma elektrotuna, sonra plazma elektrotu ve einzel lensin her ikisine birden gerekli voltaj değerlerinin uygulanması ile ölçülen akım değerleri incelendiğinde, her iki elektrota da voltaj uygulanması sonucu ölçülen demet akımının arttığı belirlenmiştir.

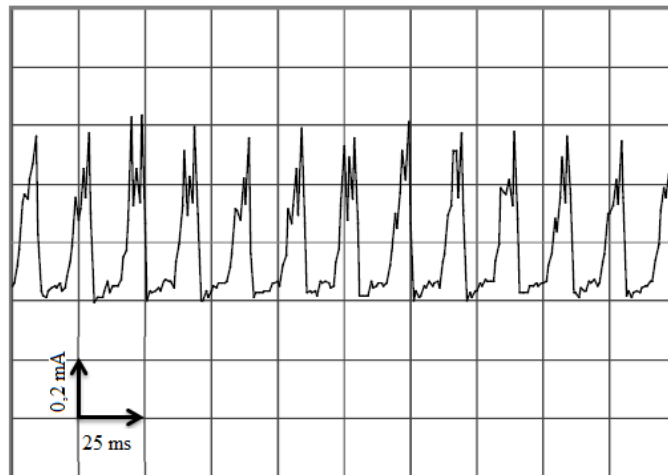
Ölçülen demet akımının osiloskopta x eksenini 2,5 ms ölçeğinde olan daha yakın görüntüsü Şekil 6.7’ de verilmektedir. Buradan demetin periyodunun 20 ms olduğu belirlenmiştir. Plazma oluşturmada kullandığımız magnetron 50 Hz’ lik atmalı yapıda çalışmaktadır. Atmalı yapıda mikrodalga üretici kullanılması ile oluşan proton demetinin, mikrodalga üreticinin çalıştığı atma yapısında oluştuğu belirlenmiştir. Yani 50 Hz atmalı yapıda magnetron kullanılmış, 50 Hz atmalı proton demeti oluşmuştur şeklinde açıklanabilir.



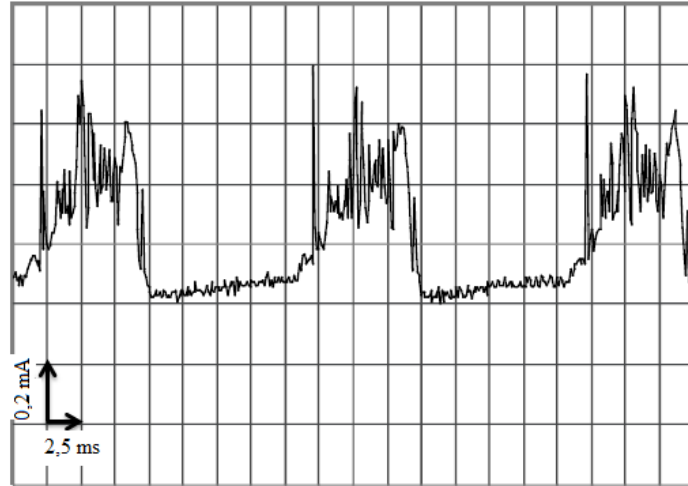
Şekil 6.7. $6,5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini $2,5$ ms ölçeğinde.

6.4.2. $5,3E-5$ mbar

Plazma odası içerisindeki hidrojen gazının miktarı azaltılarak deneylere devam edilmiştir. Vakum, gaz miktarını azaltmak suretiyle $5,3 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiş ve deneyler tekrarlanmıştır. Şekil 6.8 ve 6.9’ da görüldüğü gibi plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulandığında $0,6$ mA’in altında demet akımı ölçülmüştür. Bu değer, $6,5 \times 10^{-5}$ mbar’ da elde edilen değerden az da olsa düşüktür. Ayrıca Şekil 6.9’ dan atma şeklinin değiştiği belirlenmiştir.



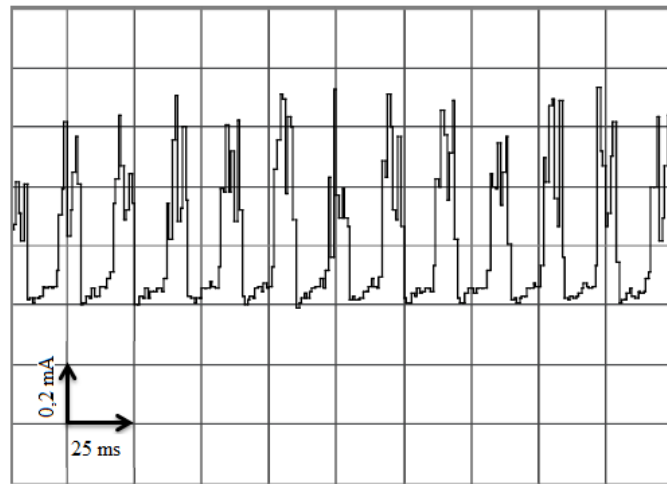
Şekil 6.8. $5,3E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde.



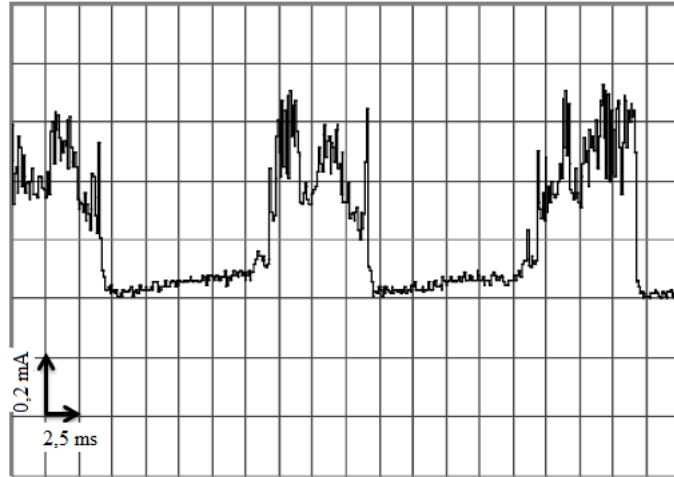
Şekil 6.9. $5,3E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 2,5 ms ölçeğinde.

6.4.3. $3,2E-5$ mbar

Hidrojen gazının miktarı azaltılarak vakum $3,2 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiş ve aynı işlemler tekrarlanmıştır. Plazma elektrotuna ~ 8 kV ve einzel lense 1 kV uygulanmıştır. Bu sonuç Şekil 6.10’ da verilmektedir. Ölçülen akım değeri 0,6 mA’i biraz geçmiştir. Demetin atma şekli yine farklılaşmıştır (Şekil 6.11).



Şekil 6.10. $3,2E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 25 ms ölçeğinde.



Şekil 6.11. $3,2 \times 10^{-5}$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 2,5 ms görünümü.

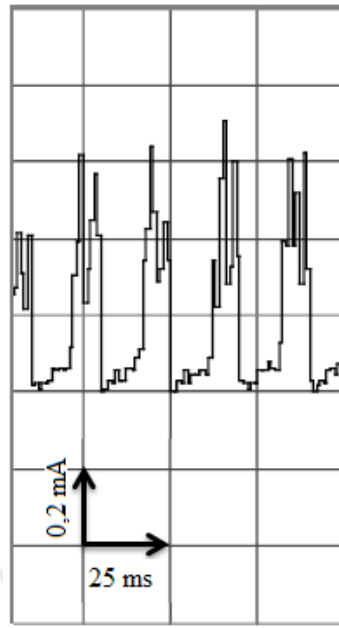
Değişik vakum seviyelerinde yapılan çalışmalarda manyetik profilin aynı olması ve hidrojen gaz miktarının değişmesi sonucunda farklı atma şekilleri elde edilmiştir.

Burada en iyi sonuç plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken vakum $3,2 \times 10^{-5}$ mbar’ dayken plazma elektrotuna 8 kV, einzel lense 1 kV uygulanması durumunda ortaya çıkmıştır.

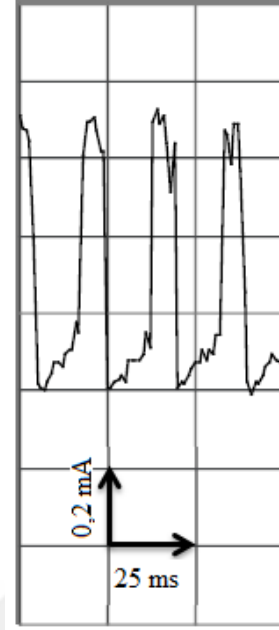
6.4.4. Manyetik alan optimizasyonu

İyon sökme sisteminde plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken vakumun demet akım sonuçlarına etkisi incelendikten sonra manyetik alan profilindeki değişikliğin, deney sonucu üzerinde ne gibi bir farklılık yaratacağı denenmiştir. Bobinlere uygulanan akım değiştirilmiştir. Bunun sonucunda manyetik alan profili değişiklik göstermiştir. Manyetik alan profilinde değişiklik olduğunda, ölçülen demet akımı değerinin farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Şekil 6.12’ de iki farklı manyetik alan profilinde akım sonuçlarındaki değişim verilmektedir. Bu iki deney de aynı vakum seviyesinde, farklı manyetik alan profillerinde gerçekleştirilmiştir. Buradan itibaren Şekil 5.33’ te verilen manyetik alan profili “manyetik alan profili A” olarak adlandırılacaktır. Deneyler esnasında bulunan optimum manyetik alan profili “manyetik alan profili B” olarak adlandırılacaktır.



a)

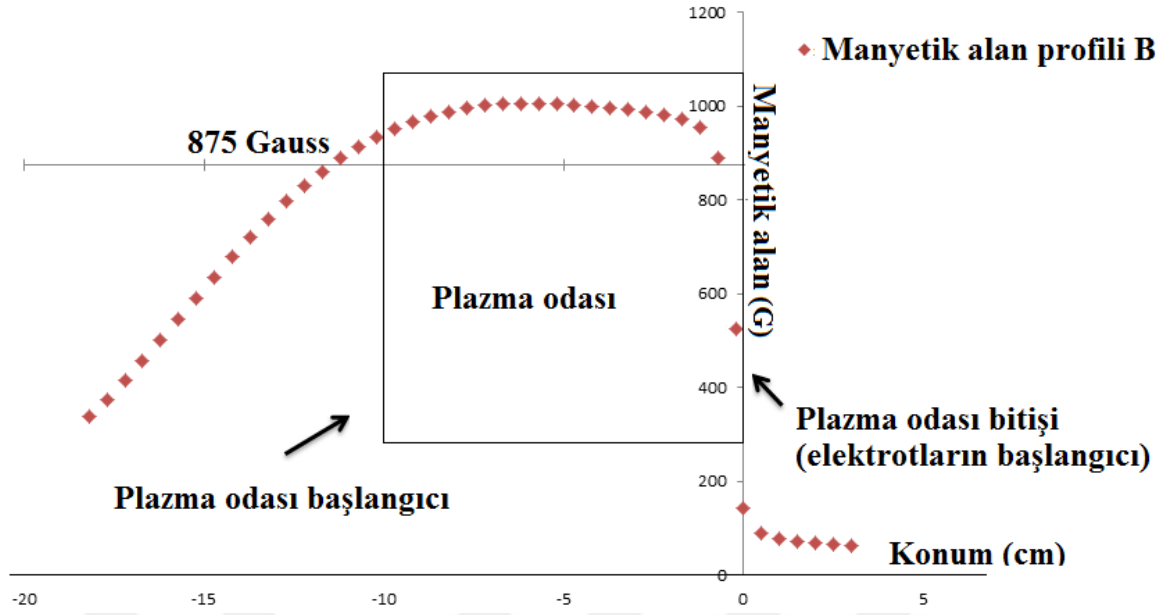


b)

Şekil 6.12. Manyetik alan profilinin demet akımına etkisi; a) Manyetik alan profili A, b) Manyetik alan profili B.

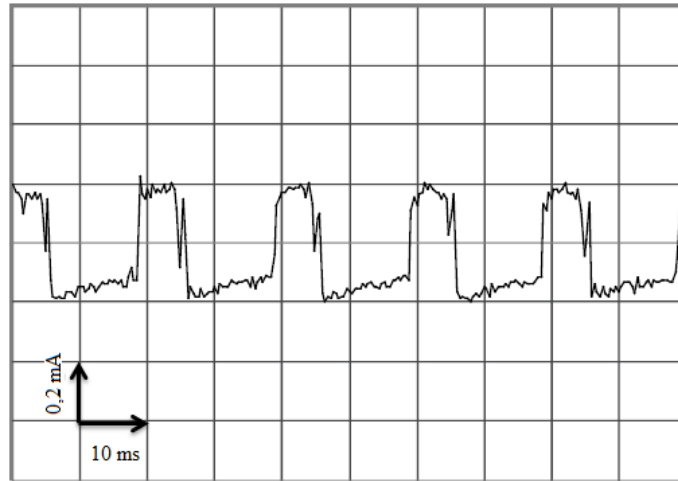
Bu etki demet akımının artması olarak karşımıza çıkabildiği gibi, azalması olarak ta karşımıza çıkabilmektedir. Burada sadece en iyi sonuç veren durumdan bahsedilecek, diğer durumlar çok fazla veri olduğu için ele alınmayacaktır.

Sistem içerisinde hidrojen gazı varken $3,2 \times 10^{-5}$ mbar vakum seviyesinde bobinlere uygulanan akım değerleri her iki solenoid içinde değiştirilmiştir. Burada en iyi sonuç alınan manyetik alan profili Şekil 6.13' te verilmektedir. Bu manyetik alan profilinin tesbit edilmesi sırasında bize yardımcı olan en önemli etmen, osiloskopla ölçülen akım değeridir.



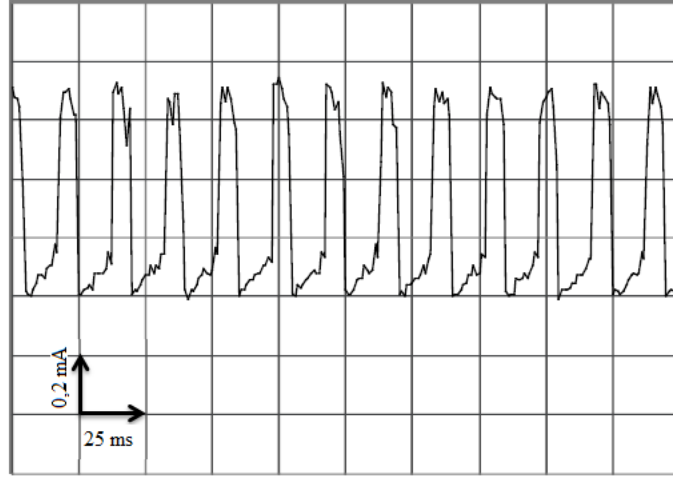
Şekil 6.13. Manyetik alan profili B.

Bölüm 6.4.' te belirtildiği gibi deney aşamaları tekrarlanmış, bu defa manyetik alan profili B kullanılmıştır. $3,2 \times 10^{-5}$ mbar basınçta sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması durumunda 0,4 mA demet akımı ölçülmüştür (Şekil 6.14).



Şekil 6.14. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2 \times 10^{-5}$ mbar' da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri.

Daha sonra einzel lense yüksek voltaj uygulanmıştır. Einzel lense voltaj uygulanması durumunda ölçülen demet akım değeri yaklaşık 0,75 mA olarak belirlenmiştir (Şekil 6.15). Ölçülen bu değer, önceki sonuçlara göre %25 daha yüksektir.



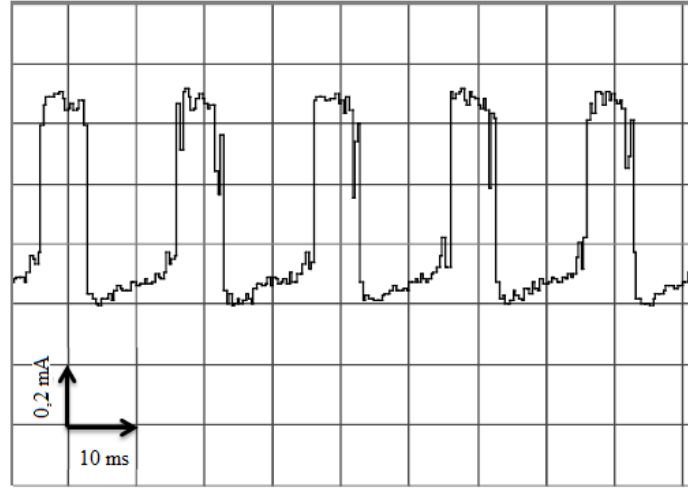
Şekil 6.15. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2 \times 10^{-5}$ mbar’ da plazma elektrotuna ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri.

Şekil 6.16 ve 6.17’ de $3,2 \times 10^{-5}$ mbar’da ölçülen demet akımı yatay ekseninde her bir kare 10 ms ve 1 ms olması durumunda verilmiştir.

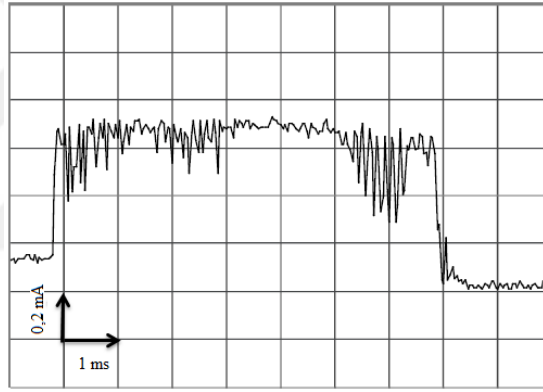
Bu sonuca göre demet 50 Hz atmalı yapıdadır. Bununla birlikte atma uzunluğu 7 ms olarak belirlenmiştir. Demetin gerçekten var olduğu süreyi belirten sinyal oranı (duty cycle) şu şekilde hesaplanır (Miracoli, 2010):

$$\%D = \frac{T}{P} \times 100 \quad (6.1)$$

Burada D sinyal oranı, T sinyalin aktif olduğu süre, P sinyalin toplam periyodu olarak ifade edilir. Buradan sinyal oranı %35 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçtan demetin zamanın %35’ inde açık, %65’ inde kapalı olduğu anlaşılmaktadır.

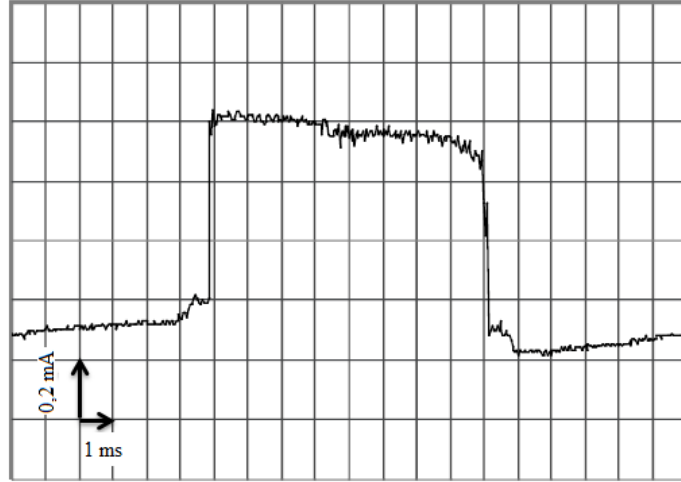


Şekil 6.16. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2E-5$ mbar’ da plazma elektrotuna ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde.



Şekil 6.17. Manyetik alan profili B kullanılarak $3,2E-5$ mbar’ da plazma elektrotuna ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri, osiloskopta x eksenini 1 ms ölçeğinde.

Manyetik alanın tamamen rezonans bölgesinin altında kaldığı manyetik alan profillerinde de denemeler yapılmıştır. Bu denemelerde en ilginç olanı 6×10^{-5} mbar’ da bobin sarımlarından birisine 11,7 A; diğerine 9,7 A uygulandığı durumdur. Bu durumda manyetik alan plazma odasının her yerinde rezonansın altında kalmaktadır. Plazma elektrotuna 9 kV, einzel lense 1,9 kV uygulanmıştır. Osiloskopla ölçülen demet akımı Şekil 6.18’ de verilmektedir.



Şekil 6.18. 6E-5 mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması durumunda akım değeri (manyetik alan profili: rezonansın altı).

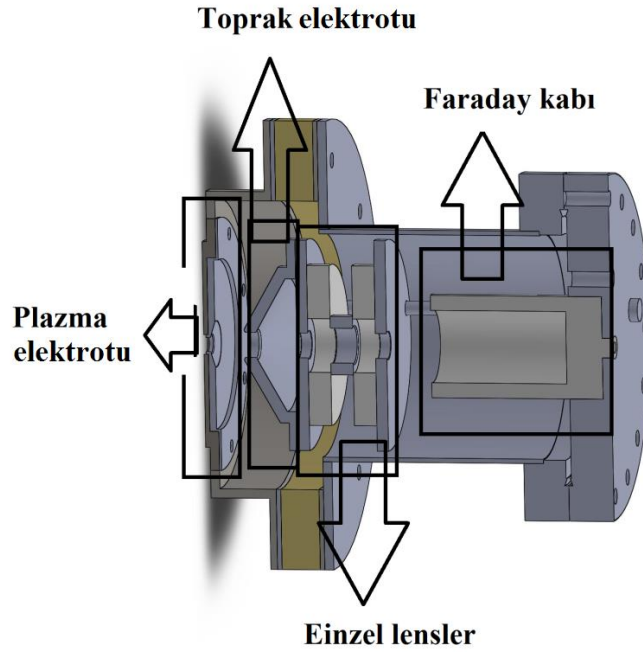
Burada 0,8 mA akım değeri ölçülmüş, manyetik alan değerinin rezonansın altında olduğu durumda kaynak kararlı olarak çalışmamıştır, yani kaynağı belirlenen manyetik alan profilinde tekrar çalıştırdığımızda aynı sonuç alınamamıştır. İyon kaynağı manyetik alan rezonansın üstünde olduğu durumda daha kararlı çalışmıştır.

6.5. 4 mm Yarıçaplı Plazma Elektrotlu İyon Sökme Sistemi

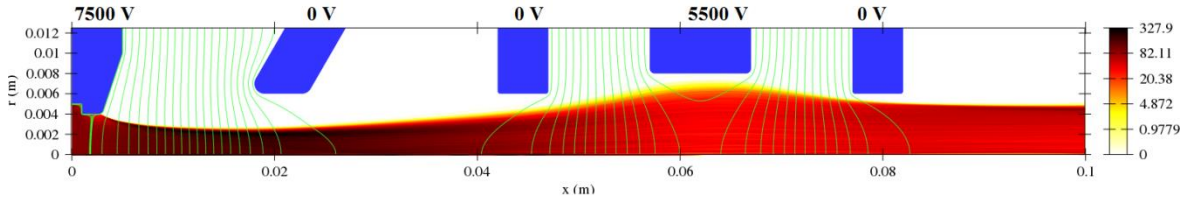
2 mm yarıçaplı plazma elektrotu tasarımı kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar sonucunda 0,75 mA demet akımı ölçülmesinin ardından elektrot çapının artırılması sonucu demet akımında oluşacak değişikliği belirlemek için yeni bir elektrot tasarımı yapılmıştır. Yeni elektrot tasarımında plazma elektrotunun yarıçapı 4 mm’ dir (Şekil 6.19).

Bu elektrot sisteminin simülasyon çalışmaları daha öncekine benzer şekilde IBSIMU programı ile yapılmıştır. Simülasyon sonuçları Şekil 6.20’ de verilmektedir.

Simülasyon sonuçlarına göre plazma elektrotuna yaklaşık 7,5 kV, einzel lens ikinci elektrotuna 5,5 kV uygulandığında en iyi sonuç elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları bize deneysel çalışmada fikir vermesi açısından faydalıdır. Simülasyon işlemlerinin tamamlanmasının ardından parçaların üretimi gerçekleştirilmiş, ardından Şekil 6.19’ da gösterildiği gibi parçaların montajı yapılmıştır.



Şekil 6.19. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sistemi.



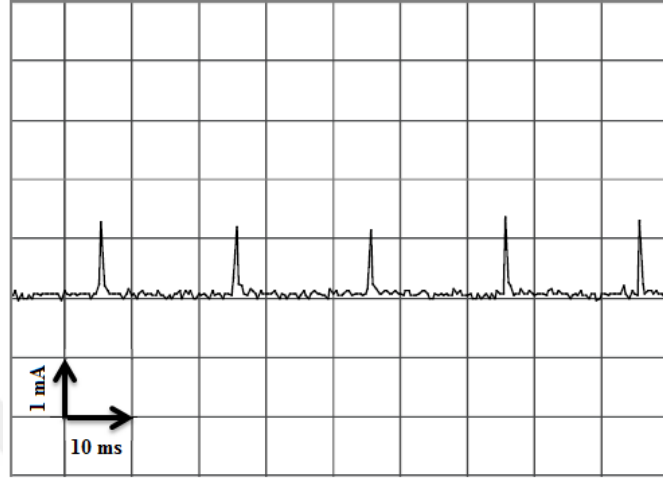
Şekil 6.20. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sisteminin simülasyon sonucu.

Parçaların birleştirilmesinin ardından vakum testi, yüksek voltaj sistemlerinin testi, plazma oluşumu adımları bu bölümün başında belirtildiği gibi tekrarlanmıştır. Plazma oluşumunun ardından farklı hidrojen gazı seviyelerinde iyon sökme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu kısımda deneyler hidrojen gazı ile birlikte $2,4 \times 10^{-5}$ - $5,5 \times 10^{-5}$ mbar vakum seviyeleri arasında gerçekleştirilmiştir.

6.5.1. $2,4 \times 10^{-5}$ mbar

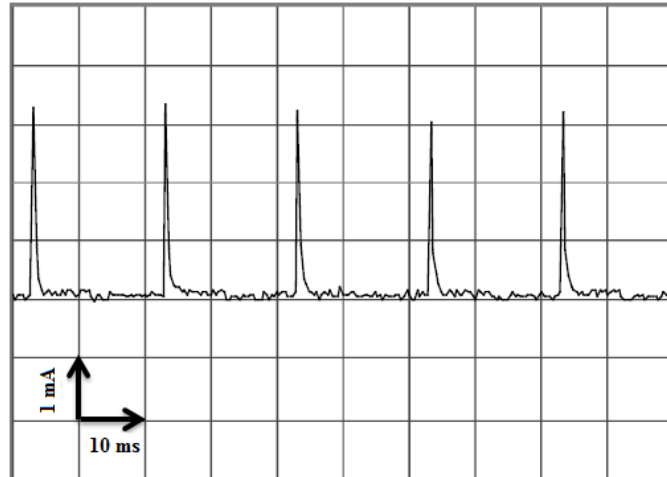
Vakum plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken $2,4 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiştir. Plazma oluşumu gerçekleştikten sonra plazma elektrotuna voltaj uygulanmıştır (Şekil 6.21). İlk denemelerde ölçülen akım değerinin yüksek çıkmasından

dolayı osiloskopta dikey ekseninde her bir kare 1 mA ölçüm sonucu verecek şekilde değişikliğe gidilmiştir.



Şekil 6.21. $2,4E-5$ mbar’ da sadece plazma elektrotuna yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde.

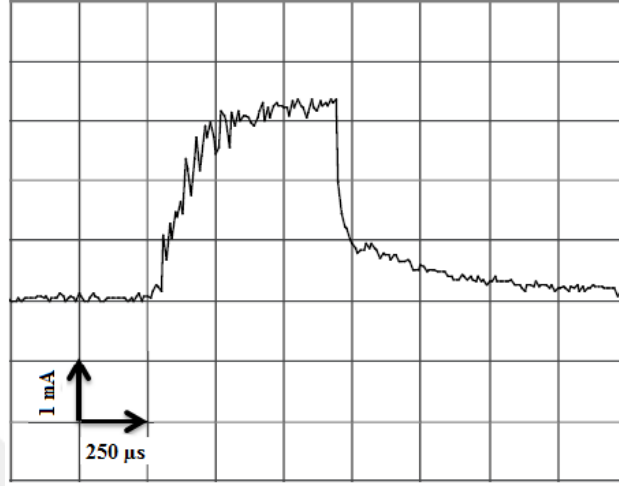
Plazma elektrotuna 7 kV uygulanması sonucunda demet akımının 1 mA’in biraz üzerinde olduğu belirlenmiştir. Daha sonra einzel lense 1,8 kV uygulanmıştır (Şekil 6.22).



Şekil 6.22. $2,4E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde.

Einzel lense voltaj uygulanmasından sonra ölçülen demet akımı 3,14 mA olarak belirlenmiştir. Osiloskopun $250 \mu s$ ölçeğinde daha yakından görünümü Şekil 6.23’ te verilmektedir.

Şekil 6.23'teki verilere göre atma uzunluğu $500 \mu\text{s}$ ve sinyal oranı %2,5 olarak belirlenmiştir.

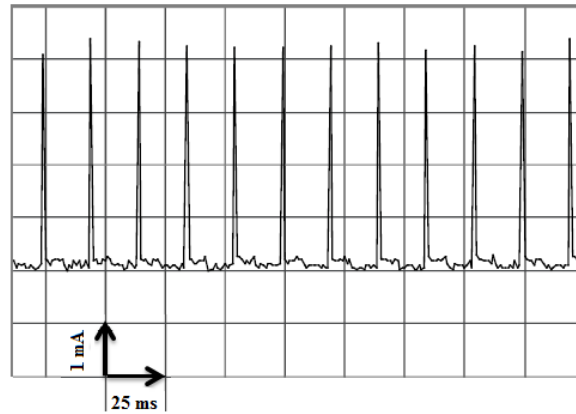


Şekil 6.23. $2,4\text{E}-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $250 \mu\text{s}$ ölçeğinde.

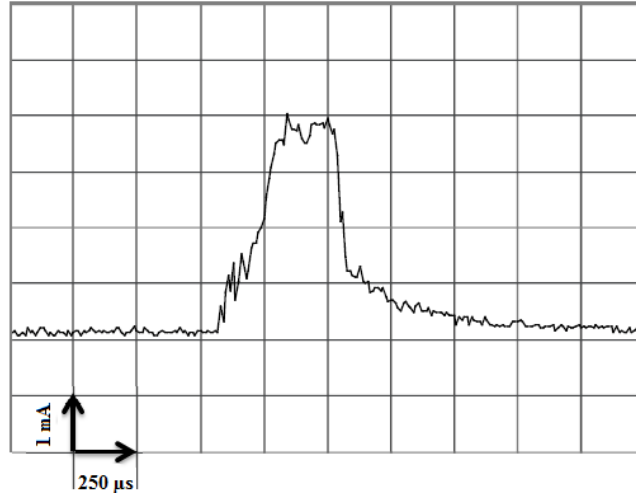
6.5.2. $4,4\text{E}-5$ mbar

Vakum plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken $4,4 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiştir. Daha sonra plazma elektrotuna 7,4 kV, einzel lense 1 kV uygulanmıştır.

Şekil 6.24' te görüldüğü üzere 4,16 mA akım değeri ölçülmüştür. Demet parametrelerini belirlemek için osiloskopun $250 \mu\text{s}$ ölçeğinde görünümü Şekil 6.25' te verilmektedir. Atma uzunluğu $250 \mu\text{s}$ ve sinyal oranı %1,25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.24. $4,4\text{E}-5$ mbar' da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini 10 ms ölçeğinde.

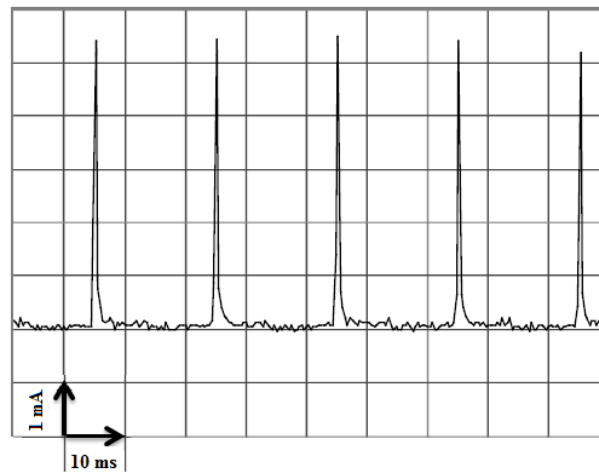


Şekil 6.25. $4,4E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $250 \mu s$ ölçeğinde.

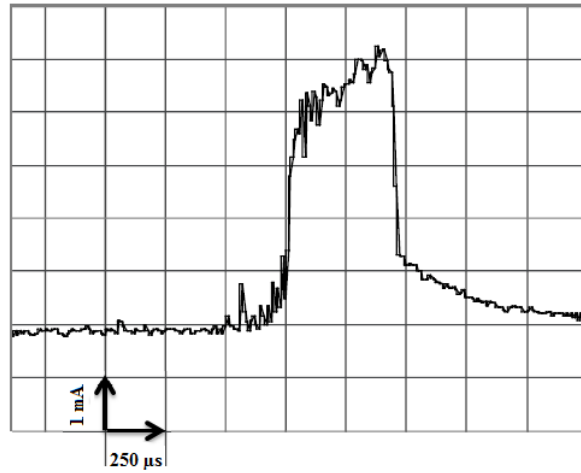
6.5.3. $5E-5$ mbar

Vakum plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken 5×10^{-5} mbar seviyesinde sabitlenmiştir. Daha sonra plazma elektrotuna 7,4 kV, einzel lense 1 kV uygulanmıştır.

Şekil 6.26’ da görüldüğü üzere 5,2 mA akım değeri ölçülmüştür. Demet parametrelerini belirlemek için osiloskopun $250 \mu s$ ölçeğinde görünümü Şekil 6.27’ de verilmektedir. Atma uzunluğu $500 \mu s$ ve sinyal oranı %2,5 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.26. $5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $10 ms$ ölçeğinde.

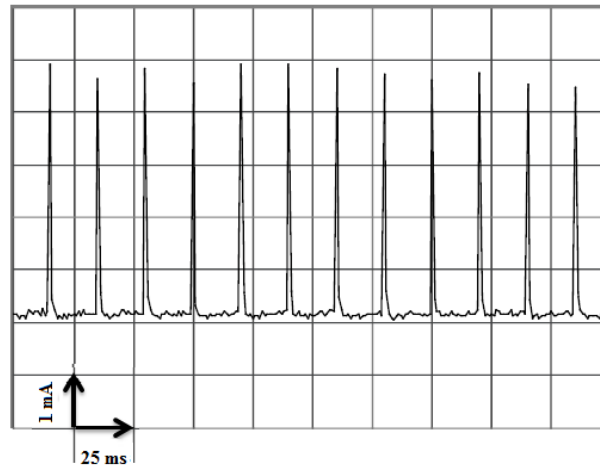


Şekil 6.27. $5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $250 \mu s$ ölçeğinde.

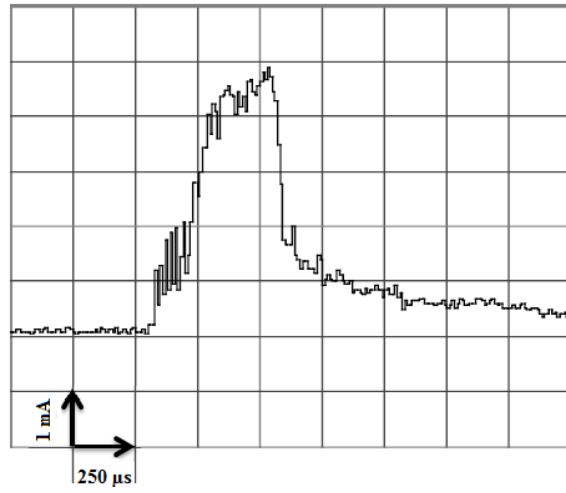
6.5.4. $5,5E-5$ mbar

Vakum plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken $5,5 \times 10^{-5}$ mbar seviyesinde sabitlenmiştir. Daha sonra plazma elektrotuna 7,4 kV, einzel lense 1 kV uygulanmıştır.

Şekil 6.28’ de görüldüğü üzere 4,6 mA akım değeri ölçülmüştür. Demet parametrelerini belirlemek için osiloskopun $250 \mu s$ ölçeğinde görünümü Şekil 6.29’ da verilmektedir. Atma uzunluğu $500 \mu s$ ve sinyal oranı %1,25 olarak belirlenmiştir.



Şekil 6.28. $5,5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $25 ms$ ölçeğinde.



Şekil 6.29. $5,5E-5$ mbar’ da plazma elektrotu ve einzel lense yüksek voltaj uygulanması, osiloskopta x eksenini $250 \mu s$ ölçeğinde.

4 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılarak yapılan deneylerde akım değeri en yüksek 5×10^{-5} mbar’ da 5,2 mA ölçülmüştür. 4 mm yarıçaplı elektrot tasarımında manyetik alan profilindeki değişim, ölçülen demet akımında değişiklik yaratmamıştır. Sistem kararlı olarak rezonansın üstündeki manyetik alan profilinde çalışmıştır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında yüksek akımlı proton üretebilen iyon kaynakları üzerine literatür araştırmaları yapılmıştır. Yeni teknoloji olan ve daha az bakım gerektiren mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının 100 mA' e kadar proton demeti üretmekte uygun olduğu belirlenmiştir. İyon kaynağının belirlenmesi aşamasından sonra iyon kaynağı tasarımı, simülasyonu, üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretim aşamasının tamamlanmasından sonra deneysel çalışmalar yapılmıştır.

2 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sistemi kullanarak plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken $3,2 \times 10^{-5}$ mbar vakum mertebesinde yapılan deneyler sonucunda 0,75 mA proton demeti akımı Faraday kabı kullanılarak ölçülmüştür. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan iyon sökme sistemi kullanılarak yapılan çalışmalarda plazma odası içerisinde hidrojen gazı varken 5×10^{-5} mbar vakum mertebesinde ölçülen demet akımı 5,2 mA' dir. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılarak yapılan deneylerin sonucu, 2 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılarak yapılan deneylerin sonucuna göre yaklaşık 7 kat daha yüksektir. Bu bize elektrot çapının büyümesi ile sökülen iyon akımının doğrudan ilişkisinin olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda bu sonuçlardan plazma elektrotu çapının artmasıyla verimin arttığı da söylenebilir.

Plazmadan demet hattına plazma içerisinde bulunan sadece protonlar değil (H^+), H^{2+} ve varsa H^{3+} , lar da aktarılmaktadır. Bu durumda demet saf proton demeti olmaktan çıkmaktadır. Bizim ölçtüğümüz akım değerleri içerisinde H^{2+} ve varsa H^{3+} , lar da vardır. Proton demeti içerisindeki iyon bileşimi kütle spektrometresi kullanılarak belirlenmektedir. Bu aşamada elimizde kütle spektrometresi bulunmadığı için bu ayırım yapılamamıştır.

Her iki elektrot tasarımında da manyetik alan profili rezonansın üzerindeyken sistemin daha kararlı çalıştığı belirlenmiştir. 2 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılarak yapılan tasarımda, manyetik alanın değişmesiyle ölçülen akımın %25 arttığı belirlenmiştir. Buna karşın 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılarak yapılan tasarımda, manyetik alanın değişmesiyle verim önceki sonuçlardaki gibi yüksek bir artış göstermemiştir. Küçük

değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu veriler sonucunda küçük çaplardaki plazma elektrotlarında manyetik alan değişimin etkisinin daha fazla hissedildiği anlaşılmaktadır.

2 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılan tasarımda, plazma odası içerisindeki gaz miktarının değişmesiyle akım değerinde çok büyük bir değişiklik gözlemlenmemiştir. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu kullanılan tasarımda, plazma odası içerisindeki gaz miktarının değişmesiyle verim %70' lere varan bir artış göstermiştir. Plazma odası içerisindeki gaz miktarının artması, daha fazla iyonlaşmaya sebep olmuş olabilir. Bununla birlikte plazma elektrotunun çapının büyümesi, iyonların plazma odasından demet hattına daha rahat aktarılmasına sebep olmuş olabilir. Buradan demet akımındaki bu kadar yüksek mertebedeki artış açıklanabilir.

Bir diğer nokta, demet akımı ölçülürken Faraday kabındaki elektronların bastırılmasıdır. Demet akımı Faraday kabında ölçüldüğü esnada Faraday kabına bir miktar negatif voltaj verilir. Bu voltajın uygulanması ile ikincil elektronların arkafon gazını iyonlaştırması sonucu oluşan iyonların Faraday kabına girmesi engellenir, yani fazla akım ölçülmesi engellenir. Şu an elimizde negatif yüksek voltaj kaynağı bulunmadığı için bu yapılamamıştır. Bu aşamanın önümüzdeki zaman dilimi içerisinde gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Elektrot tasarımı esnasında, iyon sökme bölgesinde kalan gazın iyonlaşması sonucunda oluşan ve bu bölgedeki elektrik alandan dolayı plazma elektrotlarına doğru hızlanan elektronları engellemek için bastırıcı elektrot kullanılması gerektiğinden 4. bölümde bahsedilmişti. Bastırıcı elektrota negatif voltaj uygulanmaktadır. Yukarıda belirtildiği üzere şu aşamada elimizde negatif yüksek voltaj kaynağı bulunmadığı için bu elektrot tasarımı yer almamaktadır.

Child – Langmuir kanunu adı verilen kanun yardımıyla plazmadan demet hattına aktarılabilecek demet akımı belirlenebilir. Plazma elektrotunun yarıçapının (r) iki elektrot arası uzaklığa (d) bölümü ile ortaya çıkan oran 2 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan tasarımı için (r/d) 0,25' dir. Bu oran kullanılarak, plazma elektrotu ve toprak elektrotu arasına 8 kV uygulandığı gerçeği ile yapılan hesap sonucunda demet hattına aktarılabilecek maksimum akım 7,65 mA olarak hesaplanmıştır. Bu teorik sonuç, deneysel sonuç olan

0,75 mA akım değerinden çok çok büyüktür. Bu kanunda belirtilen en önemli nokta, demet akım yoğunluğunun plazma içerisindeki iyon yoğunluğuna bağlı olmasıdır. Yani buradan çıkarılan sonuç, bizim plazma kaynağımızın yeterince iyon üretememesi veya plazma kaynağından demet hattına yeterince iyon aktarılamamasıdır.

Child – Langmuir kanunu kullanarak benzer hesaplamalar 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan sistem için de gerçekleştirilmiştir, burada r/d oranı 0,27' dir ve Child – Langmuir kanununa göre 2 elektrot arası 7 kV uygulanması durumunda sistemden demet hattına aktarılabilir maksimum akım değeri 7,74 mA olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, ölçülen 5,2 mA sonucu ile yakınlık göstermektedir. 2 farklı elektrot tasarımında da iyon üretim yeri olan plazma odası aynıdır, deneyler esnasında herhangi bir değişiklik yapılmamıştır. Bu durumda önceki paragrafın son cümlesinde belirtilen plazma kaynağının yeterince iyon üretememesi düşüncesi geçerliliğini kaybetmektedir. Burada ortaya çıkan durum, 2 mm yarıçaplı plazma elektrotunun bulunduğu tasarımda plazma kaynağının demet hattına yeterince iyon aktaramamış olmasıdır. Bunun muhtemel sebebi, 2 mm yarıçaplı plazma elektrotu bulunan tasarımda plazmanın plazma elektrotunu rahatça görüp iyon aktarımı gerçekleştirememesidir.

Bölüm 2' de mikrodalga deşarj iyon kaynaklarının gelişimi ve tarihçesinden bahsedilmişti. Deneyler sonucunda plazma odasından sökülen iyon demeti akımı ile 2. bölümde literatürde belirtilen kaynaklardan sökülen demet akımları karşılaştırıldığında, elde ettiğimiz demet akımı sonuçlarının düşük olduğu görülmektedir. Burada bazı sorunlar olduğu açıktır ve bu durum bilinmektedir. Buradaki öncelikli hedef, bir iyon kaynağı yapmak ve çalıştırmaktır. Bu bütçeye bağlı bir süreçtir. Zaman içerisinde tasarlamış olduğumuz iyon kaynağının akımının ve enerjisinin yükseltilmesi hedeflenmektedir. Şu aşamada mikrodalga hattından iletilen/yansıyan gücün deneysel ölçümleri yapılamamıştır. İlerleyen zamanda yapılması planlanmaktadır. Bunlara ek olarak uyumlama transformatörü tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiş, ilk denemede problem çıktığı için ilerleyen süreç içerisinde denenmesine karar verilmiştir. Bir diğer nokta, demet akımını pasif olarak artırma yöntemlerinden olan boron nitrit ve alümina tasarımı ve imalatının gerçekleştirilmiş fakat henüz sistemde denenmemiş olmasıdır. Benzer şekilde daha yüksek voltaj değerlerine çıkarak demet akımı artırılabilir, bunun sonucunda plazma elektrotu ile toprak elektrotu arasında yer alan yalıtımın değişmesi gerekir. Aslında bu yapılabilecek

değişikliklerin hepsi belirli bir noktada kilitlenmektedir, bizim plazma elektrotu için kullanabileceğimiz yüksek voltaj kaynağımız 25 kV ve 12 mA akım değerine kadar çalışmaktadır. Daha yüksek akım değerlerinde çalışmaz. Bu sınır koşul göz önünde bulundurulduğunda, güç kaynağının zarar görmeden çalışabilmesi için sökülecek maksimum akımın 6 mA olması gerekir ki yüksek voltaj kaynağı kendini koruyabilsin. Aksi takdirde yüksek voltaj kaynağı kullanılamaz hale gelebilir. Biz bu aşamada yüksek voltaj kaynağı için belirtilen sınır değerde olduğumuzdan yukarıda belirtilen iyileştirmeler gerçekleştirilememiştir. Bu durum yine aynı sonuca çıkmaktadır: bütçe, ekipmanların öğrenilmesi, zaman. Dolayısıyla burada elde edilen 7 kV' luk yüksek voltaj altında 5,2 mA ve 50 Hz atmalı yapıdaki sonuç bizim için iyi bir değerdir.

2 mm yarıçaplı plazma elektrotunun bulunduğu tasarımda proton demetinin atma uzunluğu 7 ms, periyodu 20 ms ve sinyal oranı %35 olarak belirlenmiştir. Bu sonuç, demetin zamanın %35' inde açık olduğu ve geriye kalan %65' inde kapalı olduğunu tanımlamaktadır. Bu atmalı iyon kaynağı için iyi bir sonuçtur.

4 mm yarıçaplı plazma elektrotunun bulunduğu tasarımda proton demetinin atma uzunluğu 500 μ s, periyodu 20 ms ve sinyal oranı %2,5 olarak belirlenmiştir. Bu yüksek akımlarda çalışan iyon kaynağı için iyi bir sonuçtur. Atma uzunluğunun bu kadar düşük olmasının kullanılan mikrodalga üretici ile ilgisi olduğu düşünülmektedir. Buna karşın iyon sökme voltajını arttırmak gerekmektedir.

Soğutma sistemleri iyon kaynaklarının çalışmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bizim plazma odası, mikrodalga transfer hattı ve elektrotlarımızda soğutma sistemi bulunmamaktadır. Soğutma sistemi, bu aşamada iyon kaynağı yapısını fazla karmaşık hale getirmemek için yerleştirilmemiştir. İlerleyen süreçte yerleştirilecektir.

Elektrotların dayanıklılığının iyi olması ve iletkenliğinin düşmemesi için molibdenyum kaplama kullanılmaktadır. Şu aşamada ülkemizde bu kaplamayı yapan bir firma bulamadığımızdan bu işlem gerçekleştirilememiştir. Buna ek olarak elektrot malzemesi olarak iletkenliği iyi olduğu için bakır da kullanılmaktadır. Buna karşın bakır işlenebilirliği iyi ve dayanıklı bir malzeme değildir. Bu açıdan şu aşamada elektrotlar alüminyumdan yapılmıştır.

Bizim açımızdan diğer önemli bir nokta, mikrodalga üreticinin sabit güçte ve atmalı yapıda çalışmasıdır. Farklı güçteki mikrodalga üreticiler ile iyon kaynağının çalışmasının nasıl değiştiği belirlenememiştir. İyon üretimi işleminde gücün yeterli gelip gelmediği anlaşılamadığından bu bizim açımızdan problem yaratmaktadır.

Yapılan bu prototip iyon kaynağının bu bölümde bahsedilen noktalar göz önünde bulundurularak daha kararlı hale getirmek amacıyla geliştirilmesi planlanmaktadır. Ayrıca sonraki aşamada iyon kaynağına bir veya iki solenoidten oluşan bir düşük enerji demet aktarım hattı eklenmesi düşünülmektedir. Bu aşamaların hepsinin tek bir defada gerçekleştirilememesinin en önemli sebebi, bu çalışmaya başlarken bu konuda yeterli tecrübemizin olmaması ve bütçedir.

Sonuç olarak mikrodalga deşarj iyon kaynağında 2 mm yarıçaplı plazma elektrotu tasarımı kullanıldığında 8 kV iyon sökme voltajı altında kaynaktan 0,75 mA demet akımı ölçülmüş, bu demet 50 Hz atmalı yapıda, 7 ms atma uzunluğundadır. 4 mm yarıçaplı plazma elektrotu tasarımı kullanıldığında 7 kV iyon sökme voltajı altında kaynaktan 5,2 mA demet akımı ölçülmüş, bu demet 50 Hz atmalı yapıda, 500 μ s atma uzunluğundadır. Bu kaynağın tasarımının geliştirilebileceği belirlenmiştir.

İleride iyon kaynağı çalışmaları yapmak isteyenler için, bu bölümde vurgulanan noktaları göz önünde bulundurmaları faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Algin, E., Cetinkaya, H., Akkus, B., Sahin, L., TAC Proton Accelerator Facility: Normal Conducting Part, Proceedings of IPAC2014, Dresden, Germany, THPME049.
- Bailey, R., 2013, Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: High Power Hadron Machines, Bilbao, Spain, 24 May – 2 June 2011, CERN-2013-001.
- Bailey, R., 2013, in Proceedings of the CAS–CERN Accelerator School: Ion Sources, Senec, Slovakia, 29 May – 8 June 2012, Genova: CERN, CERN–2013–007.
- Billenand, J., Young, L.M., 1987, POISSON, SUPERFISH Reference Manual, LA-UR-96-1834.
- Bogomolov, S. L., Efremov, A. A., Gulbekian, G. G., Lebedev, A. N., Leporis, M., Loginov, V. N., Smirnov, Y. I., Zelenak, A., Yazvitskiy, N. Y., 2002, Investigation of 2,45 GHz ECR ion source for production of radioactive ion beams, Proceedings of EPAC 2002, Paris, France, 1691-1693.
- Braithwaite, N. St. J., 2000, Introduction to gas discharges, Plasma Sources Sci. Technol., 9, 515-527.
- Brown, I. G., 2004, The Physics and Technology of Ion Sources (2. Baskı), Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
- Castro, G., Mascali, D., Romano, F.P., Celona, L., Gammino, S., Lanaia, D., Di Giugno, R., Miracoli, R., Di Bartolo, F., Gambino, N., Ciavola, G., 2012, Compasion between off-resonance and electron Bernstein waves heating regime in a microwave discharge ion source, Rev. Sci. Instrum., 83, 02B501.
- Castro, G., 2012, Study of Innovative Plasma Heating Methods and Applications to High Current Ion Sources, PhD Thesis, Catania University, Italy, 184 p (unpublished).
- Castro, G., Mascali, D., Celona, L., Gammino, S., Caliri, C., Di Bartolo, F., Lanaia, D., Mazzaglia, M., Miracoli, R., Neri, L., Torrisi, G., Altana, C., Ciavola, G., 2014, Note: Enhanced production of He⁺ from the Verstatile Ion Source (VIS) in off-resonance configuration, Rev. Sci. Instrum. 85, 096109.
- Celona, L., Ciavola, G., Gammino, S., Gobin, R., Ferdinand, R., 2000, TRIPS: The high intensity proton source for the TRASCO Project, Rev. Sci. Instrum., 71(2), 771-773.
- Celona, L., Gammino, S., Ciavola, G., Maimone, F., Mascali, D., 2010, Microwave to plasma coupling in electron cyclotron resonance and microwave sources, Rev. Sci. Instrum., 81, 02A333.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chen, F. F., 1983, Introduction to Plasma Physics and controlled Fusion, Second Edition, Volume 1: Plasma Physics, Plenum Press, New York and London.
- Ciavola, G., Celona, L., Gammino, S., Marletta, S., Campisano, C., 2000, Installation of TRIPS at INFN-LNS, Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria, 1592-1594.
- Ciavola, G., Celona, L., Gammino, S., Fagotti, E., Comunian, M., Pisent, A., Gobin, R., Ferdinand, R., 2002, The TRASCO High current proton source and its LEPT, Proceedings of LINAC2002, Gyeongju, Korea, 674-676.
- Ciavola, G., Celona, L., Gammino, S., Chines, F., Campisano, C., 2002, First beam from the TRASCO intense proton source (TRIPS) at INFN-LNS, Rev. Sci. Instrum., 73(2), 1030 – 1032.
- Collin, R. E., 2001, Foundations for Microwave Engineering, Second Edition, IEEE Press Series on Electromagnetic Wave Theory.
- Cui, B., Bao, Y., Li, L., Jiang, W., Wang, R., 2001, Microwave ion source for accelerator driven sub-critical system, Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, China, pp. 190 – 192.
- Çınar, K. 2011. Design and Construction of a Microwave Plasma Ion Source, MsC Thesis, Middle East Technical University, 56 p (unpublished).
- Freidberg, J. P., 2007, Plasma Physics and Fusion Energy, Cambridge University Press, New York.
- Gammino, S., Ciavola, G., Celona, L., Passarello, S., Ando, L., Consoli, F., Mascali, D., Maimone, F., 2006, The new Versatile Ion source (VIS) for high power proton accelerators, Czechoslovak J Phys, 55, B223-229.
- Gammino, S., Celona, L., Ciavola, G., Maimone, F., Mascali D., 2010, Review on high current 2.45 GHz electron cyclotron resonance sources, Rev. Sci. Instrum., 81, 02B313.
- Geller, R., 1991, ECRIS: the electron cyclotron resonance ion source - (status), Supplement to Z. Phys. D. - Atoms, Molecules and Clusters 21, s117-121.
- Gobin, R., Beauvais, P., Y., Bogard, D., France, A., Ferdinand, R., Harrault, F., Jannin, J-L., Lagniel, J-M., Leroy, P-A., 1998, New performances of the CW high-intensity light ion source (SILHI), Proceedings of the European Particle Accelerator Conference, Sweden, 1397 – 1399.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gobin, R., Beauvais, P. –Y., Ferdinand, R., Leroy, P. –A., Celona, L., Ciavola, G., Gammino, S., 1999, Improvement of beam emittance of the CEA high intensity proton source SILHI, Rev. Sci. Instrum., 70(6), 2652-2654.
- Goebel, D. M., Katz, I., 2008, Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL Space Science and Technology Series, California.
- Goldston, R. J., Rutherford, P. H., 1995, Introduction to Plasma Physics, IOP, Bristol and Philadelphia.
- Hansborough, L. D., Hodgkins, D. J., Meyer, E. A., Schneider, J. D., Sherman, J. D., Stevens, R. R., Zaugg, T. J., 1997, Mechanical engineering of a 75-keV proton injector for the low energt demonstration accelerator, Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, 3, 2740 – 2742.
- Hansborough, L. D., Sherman, J. D., Smith, H. V., 2001, An injector and LEBT for the AAA accelerator, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2096-2098.
- Henning, F.D., Mace, R.L., Pillay, S.R., 2011, Electrostatic Bernstein waves in plasmas whose electrons have a dual kappa distribution: Applications to the Saturnian magnetosphere, J. Geophysical Res., 116, A12203.
- Iga, T., Seki, T., Hara, S., 2010, A compact and high-proton-yield microwave ion source for proton linac, Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan, 85 – 87.
- Inan, U.S., Golkowski, M., 2011, Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists, Cambridge University Press, Cambridge.
- Ishikawa, J., Takeiri, Y., Takagi, T., 1984, Axial magnetic field extraction-type microwave ion source with a permanent magnet, Rev. Sci. Instrum., 55(4), 449-455.
- Jackson, G. S., Elmore, D., Caffee, M., Mueller, K. A., Bonte, B. D., Muzikar, P., Alexandar, B., 2004, Ion source modeling and design at PRIME Lab, Nuc. Instrum. Met Phys Res B, 223-224, 155-160.
- Jain, S. K., Jain, A., Hannurkar, P. R., 2004, Indigenous development of a low cost high power 2 kW (CW), 2,45 GHz microwave system, Indian Journal of Pure and Applied Phys, 42, 896-901.
- Kalvas, T., Tarvainen, O., Ropponen, T., Steczkiewicz, O., Arje, J., Clark, H., 2010, IBSIMU: A three-dimensional simulation software for charged particle optics, Rev. Sci. Instrum., 81, 02B703.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kalvas, T., 2013, Development and Use of Computational Tools for Modelling Negative Hydrogen Ion Source Extraction Systems, University of Jyväskylä, Finland, PhD Thesis, 159 p (unpublished).
- Kobayashi, A., Takao, Y., Komurasaki, K., 2007, Fundamental characteristics of microwave discharge type plasma source under atmosphere pressure, Transactions of JWRI, 35 (2), 5-9.
- Laqua, H. P., 2007, Electron Bernstein wave heating and diagnostic, Plasma Phys. Control. Fusion, 49, R1-R42.
- Leitner, M. A., Lundgren, S. A., Lyneis, C. M., Taylor, C. E., Wutte, D. C., 1999, Progress report of the 3rd generation ECR ion source fabrication, 4th International Workshop on ECR Ion Sources, CERN, Geneva, Switzerland, 3-6 May 1999, 66.
- Liebl, H., 2007, Applied Charged Particle Optics, Berlin:Springer.
- Long, S., Steve Long Lecture notes, http://www.ece.ucsb.edu/~long/ece145a/Notes4_Sparams.pdf, University of California, erişim tarihi: 22.03.2016
- Maimone, F., Celona, L., Ciavola, G., Consoli, F., Gammino, S., Barbarino, S., Tumino, L., 2007, Electromagnetic Study and Optimization of the PM-TRIPS Ion Source and the Related Microwave Line, INFN/TC-07/04, April 3, 2007.
- Mascali, D., Celona, L., Gammino, S., Miracoli, R., Castro, G., Gambino, N., Ciavola, G., 2011, Electrostatic wave heating and possible formation of self-generated high electric fields in a magnetized plasma, Nuclear Instrum Meth Phys A, 653, 11-16.
- Miracoli, R., 2010, Characterization of microwave discharge ion source for high proton beam production in cw and pulsed mode, PhD Thesis, Catania University, Italy, 146 p. (unpublished)
- Miracoli, R., Celona, L., Castro, G., Mascali, D., Gammino, S., Lanaia, D., Di Giugno, R., Serafino, T., Ciavola, G., 2012, Characterization of the versatile ion source and possible applications as injector for future projects, Rev. Sci. Instrum., 83, 02A305.
- Miracoli, R., Gammino, S., Celona, L., Castro, G., Mascali, D., Gobin, R., Delferriere, O., Adroit, G., Senec, F., Ciavola, G., 2012, Note: Emittance measurements of intense pulsed proton beam for different pulse length and repetition rate, Rev. Sci. Instrum., 83, 056109.
- Muegge Magnetron Kullanım Kılavuzu, 2016, <http://www.muegge.de>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Neri, L., Celona, L., Gammino, S., Mascali, D., Castro, G., Torrisi, G., Cheymol, B., Ponton, A., Galata, A., Patti, G., Gozzo, A., Lega, L., Ciavola, G., 2014, Improved design of proton source and low energy beam transport line for European Spallation Source, *Rev Sci Instrum.*, 85, 2, 02A723.
- Piel, A., 2010, *Plasma Physics, An Intoduction to Laboratory, Space and Fusion Plasmas*, Springer, New York.
- Popov, O. A., 1991, Effects of magnetic field and microwave power on electron cyclotron resonance-type plasma characteristics, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 9 (3), 711-715.
- Popov, O. A., Shapoval, S. Y., Yoder Jr, M. D., 1992, 2.45 GHz microwave plasmas at magnetic fields below ECR, *Plasma Sources Sci Technol*, 1, 7-12.
- Pozar, D. M., 2012, *Microwave Engineering*, fourth edition, John Wiley and Sons, Inc.
- Reijonen, J., Eardley, M., Gough, R., Leung, K., Thomae, R., 2003, Microwave ion source for low charge state ion production, *Nuclear Instrum. Met. Phys. Res. A*, 511, 301 – 310.
- Sakudo, N., Tokiguchi, K., Koike, H., Kanomata, I., 1977, Microwave Ion Source, *Rev. Sci. Instrum.*, 48(7), 762-766.
- Schneider, R. J., Von Reden, K. F., Hayes, J. M., Wills, J. S. C., Kern, W. G. E., Kim, S.-W., 2000, Tests of positive ion beams from a microwave ion source for AMS, *Nuc Instrum Met Phys B*, 172, 252-256.
- Sherman, K., Arvin, A., Hansborough, L., Hodgkins, D., Meyer, E., Schneider, J., Smith, H. V., Stettler, Jr. M., Stebens, R. R., Thuot, Jr. M., Zaugg, T., Ferdinand, R., 1998, Status report on a dc 130 mA, 75 keV proton injector, *Rev. Sci. Instrum.*, 69(2), 1003-1008.
- Sherman, J. D., Figueroa, T. L., Hansborough, L. D., Kerstiens, D. M., Schneider, J. D., Smith, H. V., Stettler, Jr. M. W., Stevens, R. R., Thuot, Jr. M. E., Warren, D. S., Zaugg, T. J., Arvin, A. A., Bolt, A. S., Boers, J. E., 2002, A 75 keV, 140 mA proton injector, *Rev. Sci. Instrum.*, 73(2), 917-921.
- Spence, D., Lykke, K. R., 1995, Generation of high purity cw proton beams from microwave driven sources, *Particle Accelerator Conference, Proceedings of 1995, 1-5 May 1995, Dallas, TX*, 1019-1021.
- Stockli, M. P., Han, B., 2014, *Ion Sources and Low-Energy Ion Beams, Lecture Notes, USPAS, Jan. 20-31, 2014.*

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Surducu, V., Surducu, E., Ciupa, R., Neamtu, C., 2012, Microwave Generator For Scientific and Medical Applications, AIP Conf. Proc. 1425, 89.
- Şahin Yalçın, L., 2013, Türk Hızlandırıcı Merkezi Proton Hızlandırıcısı (THM-PHT): Genel Durum, Ulusal Proton Hızlandırıcıları Çalıştayı 18-19 Nisan 2013 (sözlü sunum).
- Şahin Yalçın, L., Algın, E., Çakırlı, R.B., Çalışkan, A., Çavdar, İ., Ganioglu, E., Küçer, R., Aşıcı, C., Bozkurt, E., Çetinkaya, H., Hafizoğlu, N., Kışoğlu, F., Öztürk, Ç., 2015, THM Proton Hızlandırıcı Tesisi (THM_PHT) Teknik Tasarım raporu, Proje sonuç raporu, 174 s. (yayımlanmamış).
- Tanaka, M., Hara, S., Hae, T., Iga, Y., Saitou, K., Amemiya, K., Hiramoto, K., 2004, Development of a high-current microwave ion source for proton linac application systems, Rev Sci Instrum, 75(5), 1894-1896.
- Tanaka, S., Hara, S., Seki, T., Iga, T., 2008, Development of an all-permanent –magnet microwave ion source equipped with multicusp magnetic fields for high current beam production, Rev Sci Instrum, 79, 02B317.
- Taylor, T., 1991, High Current Microwave Ion Sources, Rev. Sci. Instrum., 63 (4), 2507-2512.
- Taylor, T., Wills, J. S. C., 1991, A high-current low-emittance dc ECR proton source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 309, 37-42.
- Taylor, T., Mouris, J. F., 1993, An advanced high-current low-emittance dc microwave proton source, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 336, 1-5.
- Türemen, G., Alaçakır, A., Recepoğlu, E., 2013, Design and Construction of a multi-cusp H⁺ Ion Source at SNRTC, Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi, 2-5 Eylül 2013, İstanbul.
- Waldmann, O., Ludewigt, B., 2010, A permanent magnet microwave ion source for a compact high-yield neutron generator, Proceedings of the 21st International Conference on the Application of Accelerators in Research and Industry, CAARI 2010, Fort Worth, TX, August 8-13, 2010.
- Wolf, B., 1995, Handbook of Ion Sources, CRC Press, United States of America.
- Xu, Y., Peng, S., Ren, H., Zhao, J., Chen, J., Zhang, T., Wang, Z., Luo, Y., Guo, Z., Chen, J., 2013, Preliminary Results of H₂⁺ beam generated by a 2,45 GHz permanent magnet ECR ion source at PKU, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, pp. 363-365.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Zhang, H., 1999, Ion Sources, China: Science Press Beijing and Springer-Verlag Berlin Heidelberg.



EK AÇIKLAMALAR

Ek Açıklama — A: İyon Kaynaklarıyla İlgili Bu Çalışmada Kullanılan İngilizce Terimlerin Türkçe Karşılıkları

Çizelge A.1. İyon kaynakları ile ilgili bu çalışmada kullanılan İngilizce terimlerin Türkçe karşılıkları.

İngilizce	Türkçe
Accel electrode	Hızlandırma elektrotu
Circulator	Dolaştırıcı
DC break	Elektriksel yalıtım
Decel electrode	Yavaşlatma elektrotu
Directional coupler	Yönlü kuplör
Dummy load	Yapay yük
Duty cycle	Sinyal oranı, iş süresi
E-bend waveguide	Bükümlü dalga kılavuzu
Emittance	Yayınım
Extraction	İyon sökme
Extraction system	İyon sökme sistemi
Extraordinary wave (X)	Sıradışı dalga
Left hand circularly polarized wave (L)	Sol eli polarize dalga
Low energy beam transport (LEBT)	Düşük enerji demet aktarımı (DEDA)
Matching transformer	Uyumlama transformatörü
Ordinary wave (O)	Sıradan dalga
Plasma sheath	Plazma kılıfı
Pulse	Atma
Quasi-neutral	Sanki nötr
Radio Frequency Quadrupole (RFQ)	Radyo frekans dört kutuplusu
Repetition rate	Tekrarlama frekansı
Right hand circularly polarized wave (R)	Sağ eli polarize dalga
Space charge	Uzay yükü
Stub tuner	Saplamalı ayarlayıcı
Suppression electrode	Bastırma elektrotu

ÖZGEÇMİŞ

1983 yılında Kütahya’ da doğdum. İlkokulu Kurtuluş İlkokulu’ nda, Ortaokul ve Liseyi Ali Güral Lisesi’ nde tamamladım. 2002 yılında Dumlupınar Üniversitesi Fizik Bölümü’ nde Lisans eğitimime başladım, 2006 yılında mezun oldum. Aynı yıl Dumlupınar Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Bilim Dalı’ nda Yüksek Lisans eğitimime Danışman Hocam Doç. Dr. Latife ŞAHİN YALÇIN’ la birlikte başladım, 2009 yılında mezun oldum. Aynı yıl Dumlupınar Üniversitesi Fizik Bölümü’ nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladım. 2010 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı Nükleer Fizik Bilim Dalı’ nda Doktora Eğitimime Danışman Hocam Prof. Dr. Emel ALĞIN’ la birlikte başladım, 2016 yılında mezun oldum.