136.664

TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA)'IN TEMEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

TAMER AKAN

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

2003

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU DOKÜMANTASYON MERKEZİ

INVESTIGATION OF THE BASIC PROPERTIES OF THERMIONIC VACUUM ARC (TVA)

TAMER AKAN

Ph. D. THESIS

PHYSICS DEPARTMENT

2003

TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA)'IN TEMEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

TAMER AKAN

136664

Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Enerji Ve Plazma Fiziği Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

136664

Danışman : Prof. Dr. Naci EKEM

2003

Tamer AKAN ' ın DOKTORA TEZİ olarak hazırladığı **" TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA)'IN TEMEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ "** başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

28 / 04 / 2003

Üye : Prof. Dr. Naci EKEM (Danışman) .....

Üye : Prof. Dr. Geavit MUSA .....

Üye : Prof. M. Selami KILIÇKAYA .....

Üye : Prof. Dr. Gülsen ÖNENGÜT .....

Üye : Prof. Dr. Turgay ARMAĞAN .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu ' nun 12 / 05 / 2003 gün ve 2003-8/1 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. M. Selami KILIÇKAYA

Enstitü Müdürü

Sevgili Babama

ÖZET

Termiyonik katot kullanarak anot materyalinin buharlaşmasıyla oluşan ve saf metal buharı plazması üreten, Termiyonik Vakum Ark (TVA)'ın temel özellikleri incelenildi. Yeni tip bir plazma kaynağı olan TVA sistemini, Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü'nde yaptık. TVA deşarjın ateşlenme koşullarının incelenmesi için ateşlenme voltajının, katot flamenti ısıtma akımı ve elektrotlar arası uzaklığa göre değişimi incelenildi. Bakır buharlarında üretilen TVA deşarjların akım-voltaj karakteristikleri, katot flamenti ısıtma akımına ve anot ile katot arasındaki konuma göre incelenildi. Bununla birlikte ateşlenmiş TVA'ın ark voltajı-ark akımı değişimi incelenildi. TVA deşarj akım-voltaj karakteristikleri, buharlaşan anot materyalinin cinsine göre değişmektedir. Bu değişim, anot materyali olarak altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum kullanılarak incelenildi. TVA deşarj oluştuktan sonra deşarj akımı, maksimum bir değerde hemen hemen sabit kalmaktadır. Maksimum deşarj akımının, katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi incelenildi. Aynı zamanda deşarj akımı ve deşarj voltajının, ve vakum odası basıncının zamanla değişimi incelenildi. TVA sistemini kullanarak cam tabanlar üzerine bakır, altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum ve seramik taban üzerine bakır kaplamalar yapıldı. Ayrıca TVA kaynağı ile farklı açı ve uzaklıklarda bulunan cam tabanlar üzerine ince bakır filmleri depolanıldı ve depolanan ince bakır filmlerin kalınlığının, depolanma açısı ve uzaklığı ile değişimi incelenildi. TVA'ı kullanarak farklı kütle oranlarında bakır-gümüş alaşımları yapıldı. Bu alaşımların buharlarında üretilen TVA deşarjların akım-voltaj karakteristikleri incelenildi. Bu deşarjlar ile cam tabanlar üzerine ince bakır-gümüş alaşımı filmleri elde edildi. Bu ince bakır-gümüş alaşımı filmleri içindeki bakır ve gümüş oranı EDS mikroanalizi ile bulunuldu. Bu oran, alaşımların yapılması için kullanılan oranla aynı kaldı. TVA ile farklı kütle oranlarında bakır-kalay (bronz) alaşımları da yapıldı. Bu alaşımların buharlarında üretilen TVA deşarjların, ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımlarının kullanılan bakır-kalay oranına göre değişimi incelenildi. TVA ile Al_2O_3 (Alümina) TVA deşarjları üretildi ve bu deşarjların karakteristikleri incelenildi. TVA ile cam taban üzerine ince alümina filmleri elde edildi.

SUMMARY

Basic properties of the Thermionic Vacuum Arc (TVA), which is produced by the evaporation of the anode materials using a thermionic cathode and generates a pure metal vapor plasma, were investigated. We built a TVA system, which is a new type of plasma source, at the Department of Physics at Osmangazi University. The dependence of the ignition voltage on the cathode filament heating current and the interelectrode distance was investigated in order to study the ignition conditions of the TVA discharge. The volt-ampere characteristics of the TVA discharges generated in the copper vapors were investigated as a function of the cathode filament heating current and the position between the anode and cathode. Furthermore, variation of the arc voltage-arc current of the ignited TVA was investigated. The volt-ampere characteristics of the TVA discharge vary with the type of evaporated anode material. This variation was investigated using Au, Ag, Zn, Sn and Ti as evaporated anode materials. Discharge current after the TVA discharge occurs was nearly constant at a maximum value. The maximum discharge current was investigated as a function of the cathode filament heating current. Furthermore, the discharge current and voltage and pressure of the vacuum vessel were studied as a function of time. Cu, Au, Ag, Zn, Sn and Ti coatings were made onto glass substrates and Cu coatings were made onto ceramic substrates using the TVA system. In addition, thin copper films were deposited onto glass substrates positioned at different angles and distances with respect to the TVA source, and the dependence of thickness of the deposited thin copper films on deposition angle and distance were investigated. Cu-Ag alloys in various mass ratios were made by using the TVA. The volt-ampere characteristics of the TVA discharges generated in the vapors of these alloys were studied. Thin Cu-Ag alloy films onto glass substrates were formed using these discharges. The ratio of copper and silver in the thin Cu-Ag alloy films were found using EDS microanalyses. This ratio agreed with the ratio used to make the alloys. Cu-Sn alloys in various mass ratios were made by using the TVA, as well. The variation of the ignition voltage and maximum discharge current of the TVA discharges generated in the vapors of these alloys was investigated as a function of the ratio of the Cu and Sn used. Al_2O_3 (Alumina) TVA discharges were generated using the TVA and characteristics of these discharges were investigated. Thin alumina films onto glass substrates were obtained using the TVA.

TEŞEKKÜR

Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Plazma Fiziği Laboratuvarının kurulmasında hiç yorulmadan çalışan ve her türlü aksaklıkta çözümler üreten ve bu çalışmaya beni yönlendiren sayın hocam *Prof. Dr. Naci EKEM*'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmada beni yönlendiren, deneysel sonuçlarımı değerlendiren ve tartışan, her soruma hiç bıkmadan cevap verip açıklamalarda bulunan ve kendisinden hem bir bilim adamı olarak hem de insan olarak dersler aldığım, saygıdeğer hocam *Dr. Geavit MUSA* (National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest / ROMANIA)'ya sonsuz teşekkürler ederim.

Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Plazma Fiziği Laboratuvarının kurulmasındaki yardımları için, *Ertekin AKSAK*'a, *Sadettin ALEMDAR*'a, *M. Aydın ÇELİKBİLEK*'e, teknisyen *Rüstem BACAK* ve *Zülkarni DELİL*'e teşekkür ederim. Bu tez çalışmam sırasında yazdığım makalelerimi benimle tartışan *Prof. M. Selami KILIÇKAYA*'ya, *Prof. Dr. H. Hüseyin ERKAYA*'ya, *Öğr. Gör. Yusuf YAZAR*'a ve *Prof. Dr. Gülsen ÖNENGÜT*'e teşekkür ederim.

Eğitim yaşamım boyunca her koşulda beni destekleyen, yönlendiren ve hep kendimi güçlü hissetmemi sağlayan *SEVGİLİ BABAM*'a hürmetlerimi sunar, şu anda bulunduğu yerde huzur içinde bulunmasını dilerim. Yine bugünlere gelmemde tarifsiz emekleri bulunan *SEVGİLİ ANNEM*'e, hep yanımda olup moral kaynağım olduğu için şükranlarımı sunarım. Abime ve kardeşlerime de beni hep desteklediklerı için teşekkür ederim. Bana sürekli moral vererek, tecrübelerinden faydalandığım değerli *Yrd. Doç. Dr. Mehmet PEKER*'e hürmet ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmam sırasında meydana gelen 17 Ağustos 1999 depreminde hayatlarını kaybeden *canım babam Hüseyin AKAN*, *Aret annem*, *Aret babam*, *Erkan abim*, *Aşkım Kübra*, *Sema abla*, *Yaşar abi*, *Özlem* ve *Adem*'i ve bu depremde hayatlarını kaybeden tüm insanları saygı ve sevgiyle anıyorum.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET v
SUMMARY vi
TEŞEKKÜR vii
İÇİNDEKİLER viii
ŞEKİLLER DİZİNİ xi
TABLOLAR DİZİNİ xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xvi

1. GİRİŞ 1

2. PLAZMANIN TANIMLANMASI 7

3. ELEKTRİKSEL ARK 15

3.1. Elektriksel Deşarj Karakteristikleri 15
3.2. Elektriksel Ark Çeşitleri 22
3.2.1. Sıcak Katottan Termoelektronik Emisyon İle Ark Deşarj 24
3.2.2. Soğuk Katottan Alan Emisyonu İle Ark Deşarj 24
3.2.3. Dışarıdan Isıtılan Katot İle Ark Deşarj 25
3.2.4. Metal Arklar 25
3.3. Elektriksel Ark'ın Kararlılığı 27

4. KATOTTAN ELEKTRON EMİSYONU 30

4.1. Metallerden Elektron Sökülmesi ve İş Fonksiyonu 30
4.2. İkincil Elektron Emisyonu 32
4.3. Termoelektronik Emisyon 33
4.3.1. Katkılı Metallerle Termoelektronik Emisyon 35
4.3.2. Schottky Etkisi 37
4.4. Alan Emisyonu 40

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

5. METAL BUHARLARI ÜRETEN TEKNİKLER 43

5.1. Termal Buharlaştırma Tekniği 43
5.2. Elektron Bombardımanı İle Buharlaştırma Tekniği 44
5.3. Elektron Bombardımanı İle Buharlaştırılarak Elde Edilen Metal Buharlarında Deşarj Üreten Teknikler 45
5.4. Söktürme (Sputtering) 47
5.5. Ayrı Bir Plazma Kaynağından Üretilen İyonlar İle Söktürme (Sputtering) 48
5.6. Katodik Vakum Ark 49
5.7. Anodik Vakum Ark 51
5.7.1. Magnetik Bobin Kullanarak Anot Buharlarında Deşarj Üreten Teknikler 51
5.7.2. Soğuk Katotlu Anodik Vakum Ark 54

6. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) 56

6.1. Elektrotların Düzenlenişi 56
6.2. Katottan Üretilen Elektron Demetinin Anot Üzerine Odaklanması ve Anot Materyalinin Isıtılması 63
6.3. Anot Materyalinin Buharlaştırılması 66
6.4. Deneysel Düzenek 70
6.4.1. Deneysel Düzeneğin Temel Yapısı 70
6.4.2. Vakum Sistemi 72
6.4.3. Elektriksel Devre 75
6.5. Ark İşlemi 78
6.5.1. Ark'ın Ateşlenmesi 78
6.5.2. Bakır Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri 85
6.5.3. Altın Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri 95

İÇİNDEKİLER (Devam)

Sayfa

6.5.4. Gümüş Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri 97
6.6. TVA ile Kaplama ve İnce Film Depolama 99
6.6.1. TVA ile Kaplama 99
6.6.2. TVA Kaynağı ile Farklı Açı ve Uzaklıklarda Depolanan Bakır İnce Filmlerin Kalınlık Değişiminin İncelenmesi 101
6.7. TVA ile Bakır-Gümüş Alaşımları 108
6.8. TVA ile Bakır-Kalay (Bronz) Alaşımları 121
6.9. Al_2O_3 (Alümina) TVA Deşarjları 125

7. TARTIŞMA VE SONUÇ 129

KAYNAKLAR DİZİNİ 139

ÖZGEÇMİŞ

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. : Maddenin dört hali 8

2.2. : Evrende doğal olarak bulunan ve laboratuvar koşullarında elde edilebilen plazmaların elektron yoğunluğu-elektron sıcaklığı değişimine göre sınıflandırılması 14

3.1. : Elektriksel gaz deşarj sistemi 16

3.2. : Osmangazi Üniversitesi Plazma Fiziği laboratuvarında elde eden neon gazının elektriksel deşarj plazması 16

3.3. : Elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği 17

3.4. : Elektriksel deşarjlarda elektron ve nötral gaz atomu sıcaklıklarının basınca göre değişimi 23

3.5.a. : Elektriksel ark deşarj için şematik olarak elektriksel devre 27

3.5.b. : Ark deşarjın akım voltaj karakteristiği ve yük hattı 27

4.1. : Katı içinde bulunan elektronlar için potansiyel-uzaklık diyagramı 30

4.2. : Plazma içindeki iyonlarla katottan ikincil elektron emisyonu 32

4.3. : Metalden elektron koparılması 34

4.4. : Elektrotlar arasına uygulanan potansiyel ile termoelektronik akımın artışı .. 37

4.5. : Potansiyel bariyerinin Schottky etkisi ile daralması ve potansiyelin azalması 38

4.6. : Potansiyel bariyerinin daralması ve tünelleme 40

5.1. : Termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi 43

5.2. : Şiddetli elektron bombardımanı ile ısıtılıp buharlaştırarak yoğunlaşma tekniğinin şematik diyagramı 44

5.3. : Destekleyici gaz karıştırılmış termal buharlaştırma ile üretilen metal buharlarında deşarj oluşturulması 46

5.4. : Söktürme (Sputtering) işleminin şematik gösterimi 47

5.5. : Ayrı bir plazma kaynağından üretilen iyonlarla söktürme işleminin şematik diyagramı 49

5.6. : Katodik vakum ark sisteminin şematik gösterimi 50

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil **Sayfa**

5.7. : Vakumda saf metal buharı deşarjı üretmek için anotun manyetik alan içinde elektron bombardımanı ile buharlaştırılması için deneysel düzenek..... 52

5.8. : Hamilton sistemine benzer anot buharı deşarjı oluşturan sistem..... 53

5.9. : Dorodnov tarafından önerilen anot buharında deşarj oluşturma sistemi..... 53

5.10. : Soğuk katotlu anodik vakum ark sistemi..... 54

5.11. : Soğuk katotlu anodik vakum ark için farklı şekillerde düzenlenmiş anotlar..... 55

6.1. : Doğrudan ısıtılan katot ile TVA'ın elektrotlarının düzenlenişi..... 56

6.2. : TVA için elektron emisyonu sağlayan, içinde doğrudan ısıtılan katotun bulunduğu elektron tabancasının fotoğrafi..... 57

6.3. : Dolaylı olarak ısıtılan katot ile TVA için elektrotların düzenlenişi..... 58

6.4. : Dolaylı olarak ısıtılan katotlu elektron tabancası..... 59

6.5. : Doğrudan ısıtılan katotlu TVA'ın elektrotlarının deneylerde kullanıldığı biçimdeki fotoğrafi..... 60

6.6. : Doğrudan ısıtılan katot ile TVA durumunda anot içindeki materyalin buharlaşması..... 61

6.7. : Doğrudan ısıtılan katot ile TVA'da metal buharı plazmasının yayılması..... 62

6.8. : Elektron demetine Whenelt silindirinin etkisi..... 64

6.9.a. : Anot materyalinin farklı olarak ısıtıldığı bölgeler..... 65

6.9.b. : Farklı iki bölgedeki sıcaklık değişimi..... 65

6.10. : Deneysel düzeneğin şematik gösterimi..... 70

6.11. : TVA sisteminin önden görünüşü..... 72

6.12. : Vakum sisteminin şematik gösterimi..... 73

6.13. : TVA'ın vakum pompalama siteminin fotoğrafi..... 74

6.14. : Yüksek voltaj güç kaynağı devre çizimi..... 75

6.15. : Düşük voltaj güç kaynağı devre çizimi..... 76

6.16. : Farklı iki katot flamenti ısıtma akımlarında oluşturulan TVA deşarjların akım voltaj karakteristikleri..... 79

6.17.a. : Ateşlenme voltajının flament ısıtma akımına göre değişimi..... 81

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil **Sayfa**

6.17.b. : Ateşlenme voltajının katot ile anot arasındaki uzaklığa göre değişimi..... 81

6.18. : Flament ısıtma akımı ile maksimum deşarj akımının değişimi..... 84

6.19. : TVA'ın doğrudan ısıtılan katot $\phi=90^{o}$ pozisyonunda ve anot yüzeyinin 1 mm aşağısına yerleştirildiğinde elde edilen akım voltaj karakteristiği.... 85

6.20. : Farklı elektrotlar arası açı için TVA'ın akım voltaj karakteristikleri..... 86

6.21. : TVA'ın elektrotlar arasındaki potansiyel dağılımı..... 87

6.22. : Ateşlenmiş TVA deşarjın ark voltajı ile ark akımının değişimi..... 89

6.23.a. : Bakır buharı TVA deşarjın fotoğraf görüntüsü..... 91

6.23.b. : Bakır buharı TVA deşarjın fotoğraf görüntüsü..... 91

6.23.c. : Bakır buharı TVA deşarjın fotoğraf görüntüsü..... 91

6.24.a. : TVA deşarjın ark voltajı-zaman değişimi..... 93

6.24.b. : TVA deşarjın ark akımı-zaman değişimi..... 93

6.25. : TVA basıncının zamanla değişimi..... 94

6.26. : $\phi=60^{o}$, d=4mm için altın buharlarında TVA deşarj akım voltaj karakteristiği..... 95

6.27. : $\phi=60^{o}$, d=6mm için altın buharlarında TVA deşarj akım voltaj karakteristiği..... 96

6.28. : $\phi=50^{o}$, d=5mm için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği..... 97

6.29. : $\phi=60^{o}$, d=6mm için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği..... 7

6.30. : Zn, Ag, Sn, Au ve Ti TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri..... 98

6.31.a. : TVA ile cam taban üzerine OGÜ şablonu ile elde edilen bakır kaplamaların fotoğrafı..... 99

6.31.b. : TVA ile seramik taban üzerine OGÜ şablonu ile elde edilen bakır kaplamaların fotoğrafı..... 99

6.32. : TVA ile cam taban üzerine kaplanan bakır, gümüş, altın, çinko, kalay ve titanyum kaplamalarının fotoğrafları..... 100

6.33. : TVA deşarj ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanma sistemi..... 101

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil			Sayfa
6.34.	:	Farklı açılarda depolanma	104
6.35.	:	Bakır-gümüş alaşımı faz diyagramı	108
6.36.	:	%100 Cu için TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	109
6.37.	:	%75 Cu + %25 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	110
6.38.	:	%50 Cu + %50 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	111
6.39.	:	%28 Cu + %72 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	111
6.40.	:	%15 Cu + %85 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	112
6.41.	:	%100 Ag için TVA deşarj akım voltaj karakteristiği	112
6.42.	:	Ateşlenme voltajının gümüş oranı ile değişimi	113
6.43.	:	Maksimum deşarj akımının gümüş oranı ile değişimi	114
6.44.	:	Yalnızca bakır ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	115
6.45.	:	%75 Cu + %25 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	116
6.46.	:	%50 Cu + %50 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	117
6.47.	:	%28 Cu + %72 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	118
6.48.	:	%15 Cu + %85 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	119
6.49.	:	Yalnızca gümüş ile depolanan ince filmin EDS spektrumu	120
6.50.	:	Bakır-kalay alaşımı faz diyagramı	121
6.51.	:	Ateşlenme voltajının kalay oranı ile değişimi	123
6.52.	:	Maksimum deşarj akımının kalay oranı ile değişimi	123
6.53.	:	Al_2O_3 TVA deşarjının akım voltaj karakteristiği	126
6.54.	:	Al_2O_3 TVA deşarjının maksimum deşarj akımının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi	127
6.55.	:	Al_2O_3 TVA deşarjlarının ateşlenme voltajının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi	127
6.56.	:	TVA ile cam taban üzerine depolanan ince Al_2O_3 filmlerinin fotoğrafı	128

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo **Sayfa**

3.1. : Bazı metaller için C_1, C_2, C_3 ve C_4 sabitleri 26

4.1. : Bazı metaller için elektron iş fonksiyonu değerleri 31

4.2. : Tungsten metalinin alan emisyonu karakteristiği 41

4.3. : φ=4.5eV iş fonksiyonuna sahip tungsten için emisyon akım yoğunluğu değerleri 42

6.1. : Bazı materyallerin erime ve kaynama sıcaklıkları, erime sıcaklığındaki buhar basınçları, p_s= 1 torr'da buharlaşma hızı değerleri ve p_s= 1 torr buhar basıncına ulaşmak için gerekli sıcaklık değerleri 68

6.2. : Elektron bombardımanı kullanımı durumunda buharlaştırılacak materyal ile pota materyali arasındaki gözlemler 69

6.3. : y doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlık değişimi 103

6.4. : x doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlık değişimi 105

6.5. : TVA kaynağı ile farklı dik uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlıkları 107

6.6. : TVA ile alaşım yapılan bakır-gümüş oranları ve kütle olarak karşılıkları 109

6.7. : Yalnızca bakır ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 115

6.8. : %75 Cu + %25 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 116

6.9. : %50 Cu + %50 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 117

6.10.: %28 Cu + %72 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 118

6.11.: %15 Cu + %85 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 119

6.12.: Yalnızca gümüş ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları 120

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simge	Açıklama :
n_i	İyon yoğunluğu
n_e	Elektron yoğunluğu
n	Plazma yoğunluğu
N	Nötral atom sayısı
α_{iz}	İyonlaşma derecesi
T	Sıcaklık
T_g	Gaz sıcaklığı
T_u	Uyarılmış atom sıcaklığı
T_i	İyon sıcaklığı
T_e	Elektron sıcaklığı
T_a	Ayrışmış atom sıcaklığı
T_f	Foton sıcaklığı
T_p	Plazma sıcaklığı
f(v)	Maxwell hız dağılım fonksiyonu
m	Kütle
m_e	Elektron kütlesi
k	Boltzman sabiti
v	Hız
ν_L	Langmuir plazma frekansı
e	Elektronun yükü
ε_0	Boşluğun geçirgenliği
λ_D	Debye uzunluğu
N_D	Debye küresi içindeki parçacık sayısı
τ	Ortalama çarpışma zamanı
ω	Çarpışma frekansı
d	Elektrotlar arası uzaklık, Elektronların anot içinde durdurulduğu uzaklık
L	İndüksiyon, Plazma boyutları
α	Birim atom başına iyonlaşma enerjisi

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

Simge	Açıklama :
x	Uzaklık
V_B	Breakdown voltajı
p	Basınç
i	Akım
V	Potansiyel farkı
T_{eri}	Erime sıcaklığı
T_{kay}	Kaynama sıcaklığı
l	Ark uzunluğu
ε	Elektromotor kuvveti, Materyalin yayma sabiti
R	Direnç, Gaz sabiti
W_F	Fermi enerji düzeyi
φ	İş fonksiyonu
E	Enerji, Elektrik alan
Φ	Gerilim
γ_i	İkincil elektron emisyonu katsayısı
χ	Elektron düşkünlüğü
P(W,T)	Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu
j	Akım yoğunluğu
r	Yansıma katsayısı, Anota uzaklık
h	Planck sabiti
W	Elektron enerjisi
λ	de Broglie dalga boyu, Buharlaşma ısısı
U_{gec}	Geciktirici potansiyel
U_{el}	Elektrik alandan türeyen potansiyel
U_m	Negatif uzay yükü potansiyeli
B	Manyetik alan
ϕ	Elektrotlar arası açı, Depolanma açısı
q_v	Güç yoğunluğu

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

Simge	Açıklama :
P	Güç
S	Kesit alan
w	Buharlaşma hızı
p_s	Doymuş buhar basıncı
M	Moleküler ağırlık, Nötral atom kütlesi
$U_{ateş}$	Ateşlenme voltajı
I_e	Elektronik akım
I_f	Filament ısıtma akımı
q	Atom başına buharlaşma enerjisi
σ	Stefan-Boltzman sabiti, Plazmanın elektriksel iletkenliği
q_{iletim}	Isı iletim enerjisi
Q	Tesir kesiti
U_{ark}	Ark voltajı
I_{ark}	Ark akımı
$I_{max\ deşarj}$	maksimum deşarj akımı
U_c	Katot potansiyel düşümü
U_a	Anot potansiyel düşümü
U_{plazma}	Plazma voltajı
U_i	İyonizasyon potansiyeli
h	Kalınlık
v_b	Buharın özgül hacmi
v_s	Sıvının özgül hacmi
f	Tutunma katsayısı
Δm	Depolanan film kütlesi
ρ	Yoğunluk
z	TVA kaynağından dik uzaklık
t	Zaman
A	Richardson sabiti

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ (Devam)

Kısaltma	Açıklama
TTE	Toplam termodinamik denge
LTE	Lokal termodinamik denge
Non-LTE	Lokal termodinamik dengede olmayan
XRD	X ışını difraksiyonu
TVA	Termiyonik Vakum Ark
INFLPR	Natioanal Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics
APG	Active Pirani Gauge
AGC	Active Gauge Controller
AIM	Active Inverted Magnetron
OGÜ	Osmangazi Üniversitesi
HV	Yüksek Voltaj
SEM	Scanning Electron Microscope
EDS	Energy Dispersive X-Ray Spectrometry
ZAF	Atomic number, absorption, fluoresence
RF	Radio frekans
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
MW	Mikrodalga
μm	Mikrometre
atm	Atmosfer basıncı

1. GİRİŞ

Maddeyi oluşturan parçacıkların enerjisi bakımından plazma; katı, sıvı ve gaz hallerinden farklı olarak maddenin dördüncü halidir. Plazma endüstriyel uygulamalar için uygun bazı emsalsiz karakteristiklere sahiptir. Maddenin plazma haline geçmesi ile çok yüksek sıcaklıklar elde edilebilir. Bu nedenle termodinamik kuvvetler daha verimli yapılabilir. Plazma, madde içindeki atom ya da moleküllerin radyasyon yayınlamak üzere uyarılması ve iyonlaştırılması için en uygun ortamdır. Bununla birlikte plazma kaynaklarından elektron, pozitif ve negatif iyonlar, uyarılmış atomlar, fotonlar ve radikaller gibi yeni enerjik türler de üretilebilir. Bu özellikler, endüstriyel mühendislikte plazmaların daha hızlı ve çoğu kez daha ucuz ve daha kaliteli ürünlerin elde edilmesinde kullanılmasına yol açar. Ayrıca bu işlemler istenilmeyen kirlenme ve toksik atık olmaksızın yapıldığı için, pahalı ve kirletici kimyasal endüstrilerde kullanılan benzer işlemlerden çevresel olarak daha temizdir. Bununla birlikte plazmadaki enerji yoğunlukları kimyasal cihazlarla oluşan diğer tekniklerden yüksek olduğu için, kimyasal işlemleri hızlandırır. Plazma ilişkili endüstriler, enerji tüketiminin verimini büyük ölçüde arttırdığı için enerjinin büyük bir kısmı korunmuş olur. Günümüz teknolojisinde en önemli plazma uygulaması bilgisayarlarda kullanılan büyük ölçekli mikroelektronik devrelerin üretimidir. Bugün plazma ile 1 GHz ' lik mikroişlemciler üretilebilmektedir (Öksüz, 2001). Plazma; materyallerin plazma işlemleri, savunma sanayi, uçak sanayi, otomobiller, biyomedikal, bilgisayar, tehlikeli ve zararlı atık arıtma, roket ve uzay gemilerinin fırlatılması ve yörünge korunması, telekominikasyon, kağıt sanayi, tekstil sanayi, güneş enerjisi ve optik gibi teknolojinin bir çok alanında ve füzyon reaktörü araştırmalarında kullanılmaktadır (Eliezer and Eliezer, 2001).

Materyallerin plazma modifikasyonu ile organik (polimerler) ve inorganik materyallerin kaplamaları yapılmaktadır. Bu şekilde manyetik kayıt bantları ve disketlerin üretiminde ve plastik ambalaj sanayinde kullanılmaktadır. Ayrıca polimer kaplama işlemleri ile yeni protez cihazların ve medikal görüntüleme ve teşhis araçlarının gelişmesini mümkün yapan biyomedikal alanında kullanılmaktadır. Bununla birlikte bu yöntemlerle, mühendislik üretimleri için çok önemli olan materyallerin

sertliği, yorgunluğu, dayanıklılığı, adhezyon, sürtünme, dielektrik özellikler, korozyon ve oksidasyon gibi özellikleri iyileştirilebilmektedir (Roth, 2001).

Materyallerin özelliklerini geliştirmek ve yüzeyler üzerine kaplamalar yapmak için bugüne kadar çok sayıda teknoloji kullanılmıştır. Bugünkü yüksek teknolojilere ulaşmada kaplama teknolojilerinin büyük payı vardır. Bilgisayar, cep telefonu gibi elektronik cihazlarda, mühendislik üretimlerinde materyallerin özelliklerini geliştirmede ve yaşamımızın hemen hemen her alanında kullandığımız cihazlarda kaplama işlemlerini görmekteyiz. Yüzeyler üzerine kaplanan ince filmlerin kalitesi, kullanılan kaplama teknolojisine büyük ölçüde bağlıdır. Örneğin düşük enerjili kaplamalarda yani klasik termal buharlaştırma tekniğinde, kaplanılacak materyalin nötral atomları kaplanan tabakanın üstünde ilk geldiği yerde yapışır kalır. Termal buharlaştırma tekniğindeki bu atomik mobilite düşüklüğü nedeniyle, çok sayıda boşluk ve safsızlık atomlarına sahip, zayıf yoğunlukta kaplamalar elde edilir (Thornton, 1974 ; Sanders, 1989). Aynı zamanda termal buharlaştırma durumunda, kaplama ile elde edilen ince filmlerin sıkı ve yoğun (compact) yapıya sahip olmadığı görülmektedir. Bu, elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerinin, gövde metalin fiziksel özelliklerinden farklı olduğu anlamına gelir. Bu nedenle filmlerin özdirenç ve yansıma katsayıları çok farklı değerlere sahip olur. Buharlaştırılan atomların atomik mobilitesini arttırmak için kaplanılacak nümunenin sıcaklığını arttırmak istenilmiştir (Curran et al., 1982). Ancak bu durumda mikron mertebesindeki boyutlarda polikristal yapıların oluştuğu gözlenmiştir (Musa, 1992).

Kaplanan tabakaların yapısının bileşimi, filmin oluşması esnasında iyonlarla bombardıman edilmesiyle çok büyük ölçüde değiştirilebilir (Martin, 1990 ; Takagi, 1982 ; Netterfield et al., 1985). Kaplanılan filmin enerjik iyonlarla bombardıman edilmesiyle oluşturulması, film yapısı içinde meydana gelen boşlukların sayısını azaltır. Bu nedenle bu şekilde üretilen filmler, gövde metalin fiziksel özelliklerine çok yakın özelliklere sahip, sıkı ve yoğun (compact) yapılar olur (Müller, 1987). Bunun fiziksel nedeni, 100 eV mertebesindeki enerjilere sahip iyonların, enerjilerini atomik ölçekte filmin oluşmasını sağlayan diğer atomlara dağıtmasıdır. Böylece kaplanılan yüzeyin ısıtılmasına gerek kalmadan, filmin oluşması için yoğunlaşan atomların mobilitesi

arttırılmış olur ve kaplanılan nümune ısıtılmadığı için polikristal yapılar oluşmaz. Örneğin kısmi olarak iyonlaşmış Ag atomları kullanarak Si (111) monokristal yüzey üzerine ince film kaplamalarında, 4 keV üzerindeki iyon enerjileri için, kaplanan film yine (111) düzenlenişinde olmuştur (Ren et al., 1995). Bununla birlikte elmas gibi sert materyallerin kaplamaları yalnızca 500 eV'u aşan enerjili, iyonların bombardımanı ile elde edilebilir (Davanloo et al., 1993). Bu sonuçlar, iyonlar kullanılarak kaplamalarla süper özellikli yeni materyaller üretilebileceğini göstermektedir. Bu amaçlar için özellikleri bilinen atomların saf iyonlarını kullanmak gereklidir. Ancak çoğu durumda, özellikle plazma asisteli iyonlarla bombardıman edilerek yapılan kaplamalarda, yüzey bombardımanı için argon iyonları kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalarda 800 eV argon iyonları ile bombardıman edilerek elde edilen Zn filmlerin içine girmiş, % 8 oranında argon atomlarının bulunduğu XRD yöntemi ile ölçülmüştür (Kuzel et al., 1995). Enerjik iyonlar, ayrı bir kaynaktan gaz iyonlarını kullanarak, ya da kaplanılacak materyalin buharını içeren bir soy gazın deşarjını oluşturarak elde edilen plazmadan üretilebilir. Her iki durumda da kaplanılacak filmin bombardıman edilmesi için kullanılan ana enerjik iyonlar, buharlaşan materyalin enerjik atomlarından farklıdır ve bunlar safsızlık atomları olarak ortaya çıkmaktadır. Bu safsızlık atomları kaplanılan filmin içine de girebilmektedir.

Hem yüksek mobiliteli enerjik iyonları kullanarak, hem de kaplanan film üzerinde safsızlık atomlarından korunmak için en ideal çözüm, yalnızca kaplanılacak materyalin saf buharlarından plazma oluşturmaktır. Bu durumda, eğer oluşturulan plazma yoğunluğu yeterince yüksek ise, kaplanan tabaka gerekli enerji ve gerekli akı seviyelerine sahip, kendi atomlarının iyonlarıyla bombardıman edilebilecektir. Böylece yüksek vakum koşullarında, buharlaştırılan materyalin sıkı ve yoğun (compact) tabakaları ve yüksek saflığı elde edilebilecektir (Rossnagel and Cuomo, 1989). Bu çözüm, yüksek vakum koşullarında kaplanacak materyalin yüksek oranda buharlaşmasını ve aynı zamanda bu materyalin uygun deşarjını oluşturarak muhafaza edilmesini eş zamanlı olarak sağlamak zorundadır (Musa et al., 1994).

Bu koşulların sağlandığı bir deşarj 1971 yılında A.A. Snaper tarafından, 3.625.848 no ile US patent bürosundan patent almış, vakum izolasyonu ve vakum

devrelerinde geniş ölçüde incelenmiş olan, Katodik Vakum Ark ' tır. Bu tip deşarj, katot yüzeyi üzerinde sürekli hareket eden ve katotun erozyona uğramasıyla deşarjı sağlayan katot buharlarını üreten, çok sayıdaki mikroplazmanın (mikrospot) ortaya çıkması ile karakterize edilir (Kimblin, 1973). Bu metot ile yüksek deşarj akımlarında, yüksek buharlaşma oranı elde edilir ve katot yüzeyinde mikrospotlar seviyesinde üretilen plazma, 20 eV ile 100 eV arasında iyon enerjilerine ve yüksek iyonizasyon (neredeyse % 100) derecesine sahiptir. Bu tip deşarjların dezavantajı, böyle yüksek deşarj akımlarında filmin kalitesini önemli derecede değiştiren, oluşturulan ince film içine girmiş makroparçacıkların (damlacıkların) üretilmesidir (Boxman and Goldsmith, 1989). Bu dezavantaj katotik vakum arkın, kaplama teknolojileri uygulamaları bakımından kullanım alanını sınırlayan bir sorundur. Bu makroparçacıkların kaplanan tabaka üzerine gelmesini önleyen filtreler yapılmıştır (Sanders et al., 1990). Ancak bu filtreler nedeniyle depolanma oranı çok düşük ve ekonomik açıdan pahalı olmuştur (Martin et al., 1996).

Bu koşulları sağlayan diğer bir yöntem, deşarjı sağlamak için gerekli metal buharlarını vakum içinde üreten bir kaynak olarak, katotun yerine anotun kullanılmasıdır. Anottan buharlaştırılan saf metal buharlarında deşarjın kullanımı ilk kez, 1967 yılında 1.496.697 no ile Fransız patent bürosundan patent almış H.J Hamilton tarafından önerilmiştir. Genellikle yüksek akım yoğunlukları nedeniyle ve bu tip ark durumunda anodun sıvı hale geçmesi nedeniyle, bu kaplama yönteminde kaplanan ince film üzerinde makroparçacık üretilmez. Böyle bir buharlaşma için bugüne kadar üç farklı metot önerilmiştir. Bu üç metot da, katot olarak ısıtılmış flament kullanmaktadır. Ancak katottan sağlanan elektron emisyonunu anota odaklamak için, her iki elektrot yani anot ve katot, bir manyetik alan kaynağı olan bobin içine yerleştirilmiştir. Bu üç metotla ilgili literatürde daha fazla makale ve teknolojide uygulama görülmemiştir. Bunun nedeni, elektrotlarının düzenlenişinin güç olması ve elektrotların bir elektromıknatıs içine yerleştirilmiş olmasıdır.

1983 yılında INFLPR (National Institutre for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bükreş/Romanya) ' dan düşük sıcaklık plazma fiziği grubu **Termiyonik Vakum Ark (TVA)** adında, yeni tip bir vakum ark oluşturdu (Musa et al., 1983). Bu

yeni tip ark, içinde buharlaştırılarak plazması oluşturulacak materyalin bulunduğu pota şeklindeki anodu ısıtmak, eritmek ve sonra buharlaştırmak için anot üzerine odaklanmış termoelektron yayınlayan bir katot (tungsten flament) kullanmaktadır. Bu katot flamenti, katottan üretilen elektronların anot üzerine odaklanması için bir Whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir. TVA deşarjda katottan üretilip anot üzerine gönderilen elektron demeti, elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj yardımıyla hızlandırılır. Anot üzerine elektronlar tarafından aktarılan enerji, anot içinde bulunan materyalin erimesini ve sürekli bir şekilde buharlaşmasını sağlar. Elektrotlar arası uzaklık küçük ve uygulanan voltaj yeterince yüksek ise, elektrotlar arası uzayda metal atomlarının uygun yoğunluğu için parlak bir deşarj oluşur. Isıtılmış katottan elektronların sürekli emisyonu nedeniyle ark kolayca ateşlenilir ve oluşan ark oldukça kararlıdır. TVA ile yalnızca anot materyalinin buharlaştırılması ve iyonlaştırılması nedeni ile saf , gaz karışımı ve makroparçacık içermeyen, hemen hemen her metalin % 20 oranlarına kadar yüksek iyonlaşma dereceli metal buharları plazmaları üretilir (Musa et al., 1986 ; Musa et al., 1987). Aynı zamanda TVA ile ayrıca bir iyon hızlandırıcı cihaz kullanılmadan yalnızca çalışma parametrelerinin kontrol edilmesiyle, üretilen metal iyonlarının enerjileri ayarlanabilmektedir (Musa et al., 1999). Burada iyonların enerjisinin değiştirilmesi, katot dışarıdan ısıtıldığı için katot sıcaklığının değiştirilmesiyle kolayca yapılabilmektedir (Musa et al., 1997).

1999 yılında Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümünde yeni bir Plazma Fiziği Laboratuvarı kurduk. 2000 yılında bu laboratuvarda, bugün yalnızca Romanya'daki National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bükreş ve Ovidious Üniversitesi, Constanta ' da bulunan TVA sistemini de yaptık. Oluşturulan sistem tümüyle tarafımızdan Eskişehir'de üretilmiştir. Bu tez çalışmasında Osmangazi Üniversitesinde kurduğumuz bu TVA sistemi, bu sistem ile oluşturulan TVA deşarjların oluşma koşulları ve akım voltaj karakteristikleri, TVA sistemi ile kaplama çalışmaları ve TVA ile yapılan bakır-gümüş ve bakır-kalay alaşımları incelenmiştir.

TVA metal buharlarında deşarj üreten yeni tip bir plazma kaynağı olduğu için bölüm 2.'de plazmanın genel bir tanımı yapılarak, bazı önemli plazma parametreleri açıklanmıştır. TVA gazlarda meydana gelen elektriksel deşarjlardan çok farklı

özelliklere sahip deşarj üretmektedir. Bu nedenle bölüm 3.'de elektriksel gaz deşarjlar anlatılmıştır. TVA deşarj, termiyonik katottan elektron emisyonu ile meydana geldiği için bölüm 4.'de katılardan elektron emisyonu mekanizmaları açıklanmıştır. TVA metal buharı deşarjı üreten diğer tekniklerden de farklı ve yeni bir tekniktir. Bu nedenle bölüm 5.'de metal buharları ve metal buharı deşarjı üreten diğer teknikler kısaca tanımlanmıştır. Bölüm 6.'da ise vakum pompalama ve basınç ölçüm cihazları dışında tümüyle tarafımızdan yapılan TVA sisteminin özellikleri açıklanmıştır. Bunun için ilk olarak TVA'ın elektrotlarının düzenlenişi, katottan yayınlanan elektron demetinin anot üzerine odaklanması ve anot materyalinin ısıtılması, anot materyalinin buharlaştırılması ve deneysel düzenek vakum sistemi ve elektriksel devre ile birlikte açıklanmıştır. Bölüm 6.5.'de TVA sistemi tarafından üretilen arkın ateşlenme (breakdown) koşulları ve bakır, altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum buharlarında üretilen TVA deşarjların akım voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Altın ve gümüş buharı TVA deşarjları ilk kez bu çalışmada elde edilmiştir.

TVA kaplama teknolojileri uygulamalarında da kullanılmaktadır. Bölüm 6.6.'da TVA ile cam ve seramik taban üzerine elde edilen bakır kaplamalar ve cam taban üzerine kaplanan bakır, altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum kaplamaları verilmiştir. Bununla birlikte TVA kaynağı ile farklı açı ve uzaklıklarda yerleştirilen cam tabanlar üzerine ince bakır filmleri depolanıldı ve bu filmlerin kalınlığının, depolanma açısı ve uzaklığı ile değişimi bölüm 6.6.'da verilmiştir.

Bu çalışmada TVA ile ilk kez alaşım elde edilmiştir. Bölüm 6.7.'de TVA'ı kullanarak elde edilen farklı kütle oranlarındaki bakır-gümüş alaşımları üzerine yapılan çalışmalar verilmiştir. TVA ile bakır-kalay alaşımları da yapıldı. Bölüm 6.8.'de TVA ile yapılan farklı kütle oranlarındaki bakır-kalay alaşımları üzerine yapılan çalışmalar verilmiştir.

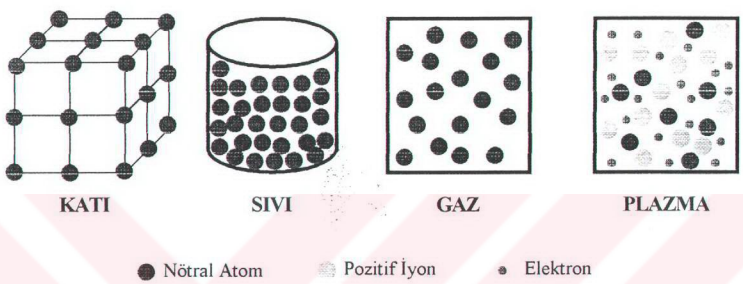
TVA ile seramiklerin de deşarjları üretilebilmektedir. İlk kez bu çalışmada Al_2O_3 (Alümina) buharlarında TVA deşarjlar üretildi ve cam tabanlar üzerine alümina ince filmleri elde edildi. Bölüm 6.9.'da TVA ile üretilen alümina TVA deşarjları üzerine yapılan çalışmalar verilmiştir.

2. PLAZMANIN TANIMLANMASI

Plazmanın bilimsel olarak incelenmesi ilk olarak, 1808 yılında Sir Humpry Davy tarafından kararlı-hal DC ark deşarjın incelenmesiyle ve 1830 ' lu yıllarda Michael Faraday ve arkadaşları tarafından, yüksek voltaj DC elektriksel deşarj tüpünün geliştirilmesi ile yapılmıştır. Gazlarda elektriksel deşarj daha sonra Sir William Crookes tarafından incelenmiş ve Crookes 1879 ' da iyonlaşmış bir gazın; " MADDENİN 4. HALİ " olduğunu ifade etmiştir. 1926 yılında F.M. Penning, civa buharında düşük basınç gazında radyo dalgası titreşimlerini bulmuştur. 1929 yılında Irving Langmuir bu titreşimlerin bulunduğu bölge için ilk kez " PLAZMA " terimini kullanmıştır (Tonks and Langmuir, 1929). 1932 yılında I.Langmuir plazma üzerindeki çalışmalarında Kimya dalında, 1970 yılında İsveçli Hannes Alfven " Plazmaya verilen pertürbasyonun manyetik alan yönünde plazma frekansı ile yayılması " çalışması ile Fizik dalında Nobel ödülü almışlardır.

İçinde bulunduğumuz evrenin % 99 ' u plazma halindedir. Yerin yaklaşık 50 km üzerinde bulunan kısmi olarak iyonlaşmış gaz bölgesi olan atmosferin katmanlarından iyonosfer, 10^6 cm^{-3} elektron yoğunluğuna ve 0.1 eV elektron sıcaklığına sahip bir plazmadır. 1 eV $\equiv$ 11604 ^oK'dir. Yerin manyetik alanı tarafından yüksek mesafelerde tuzaklanmış, enerjik iyonlaşmış parçacıkların Van Allen kuşakları, güneşten kopan plazmaların atmosferin üst katmanlarında oluşturduğu ve genelde kutuplarda gözüken ve kutup ışıkları olarak da bilinen Aurora, güneşin dış atmosferindeki korona kısmından yüksek sıcaklıklar nedeniyle kopup evrene dağılan yüklü parçacıkların sürekli şekilde akışı olan elektron yoğunluğu 5 cm^{-3} ve elektron sıcaklığı 50 eV olan güneş rüzgarları ve hemen hemen her yağmurlu günde gördüğümüz şimşek, evrende doğal olarak oluşan plazmalardır (Goldston and Rutherford, 1995). Yıldızlar arası ortamı oluşturan gaz bulutları 1cm^{-3} yoğunluklu hidrojen plazması içerir. Güneş ve yıldızların yüzey sıcaklıkları 5000 °K ' den 70000 °K ' e kadar değişmektedir ve bunlar tümüyle plazmadan oluşurlar. Dış kısımları kısmi olarak iyonlaşmışken, iç kısımları % 100 iyonlaşacak kadar sıcaktır. Örneğin güneşin merkezindeki sıcaklık 2 keV civarındadır (Kikuchi, 1988).

Plazma; elektriksel olarak nötral olan ve rastgele doğrultularda birlikte hareket eden, hemen hemen eşit yoğunluktaki pozitif ve negatif yüklü parçacıklar topluluğudur. Bu tanımı daha anlaşılır yapmak için Şekil 2.1.' i inceleyelim.



Şekil 2.1. Maddenin dört hali.

Bilindiği gibi termal dengedeki katı bir madde, genelde sabit bir basınçta sıcaklığının arttırılması ile sıvı haline geçer. Sıcaklık biraz daha arttırılırsa sıvı, gaz haline geçer. Yeterince yüksek bir sıcaklıkta gaz içindeki moleküller, atomlar arasındaki nadir çarpışmalar hariç, rastgele doğrultularda serbestçe hareket eden gaz atomlarını oluşturmak için ayrışırlar. Eğer sıcaklık daha fazla arttırılırsa, gaz atomlarından bir ya da birkaç elektron kopar ve gaz atomları serbestçe hareket eden yüklü parçacıklara (elektronlara ve pozitif iyonlara) ayrışmış olur. Böylece maddenin dördüncü hali olan " PLAZMA " oluşmuş olur. Buradan görüldüğü gibi plazma halinde, maddenin atomları parçalanmıştır ve sürekli hareket halinde olan, pozitif yüklü iyonların ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelmiştir. Plazma içinde aynı zamanda negatif iyonlar, fotonlar, uyarılmış atomlar, ayrışmış atomlar, radikaller, metastable atomlar, nötral atomlar da vardır (Tanenbaum, 1967).

Bazı özellikler plazmayı karakterize eder ve bu özellikler plazmayı katı, sıvı ve gazlardan ayırt eder. Plazmanın en önemli ve diğer hallerden farklı özelliği, plazmayı oluşturan parçacıkların yüklü olması ve bu yüklü parçacıkların Coulomb kuvvetleri ile

birbirlerine etki etmesidir. Plazma içindeki her parçacık komşusu bulunan her parçacığa ve hatta kendisinden daha uzakta bulunan parçacıklara aynı zamanda etki eder. Bu nedenle plazma içindeki parçacıklar sürekli birbirleriyle etkileşerek kollektif bir davranış içindedirler. Plazma içindeki yüklü parçacıkların difüzyonu bundan dolayı elektronların ve iyonların bireysel difüzyon katsayıları ile değil, ambipolar difüzyon katsayısı ile verilir (Krall and Trivelpiece, 1973). Şekil 2.1. ile maddenin hal değişimi, maddenin sıcaklığının arttırılması ile açıklanmıştır. Plazma, maddeye ısı enerjisi verilmesi ile elde edildiği gibi başka yöntemlerle de elde edilebilir. Bu farklı üretim yöntemleri laboratuvar plazmalarının farklı isimlerle anılmalarına neden olur. DC Elektriksel Deşarj, AC Elektriksel Deşarj, RF Deşarj, MW Deşarj, Puls Deşarj, Dielektrik Bariyer Deşarj gibi farklı üretim mekanizmalarına ve farklı özelliklere sahip plazmalar vardır. Plazmalar üretim yöntemlerine göre sınıflandırılabildiği gibi, plazması elde edilen gazın basıncına, parçacık yoğunluğuna, iyonlaşma derecelerine göre de sınıflandırılabilir. En genel sınıflandırma plazma içindeki parçacıkların sıcaklığına göre yapılır. Buna göre plazmalar Toplam Termodinamik Dengede Olan Plazmalar (TTD Plazmaları), Lokal Termodinamik Dengede Olan Plazmalar (LTD Plazmaları) ve Lokal Termodinamik Dengede Olmayan Plazmalar (Non-LTD) olarak üç gruba ayrılır. Bu sınıflandırmayı açıklamadan önce, plazma içindeki parçacıkların tanımlamasını yapalım.

Moleküler gazların karışımında oluşturulan plazma, çok sayıda nötral ve yüklü parçacıklar içerir. Plazma içinde birbirinden ayırt edilebilen her bir parçacık grubu " türler " olarak ifade edilir. Bu türlerden, n_e ; elektron yoğunluğu ve n_i ; iyon yoğunluğu olarak ifade edilir. Plazma, " yaklaşık olarak nötral " özelliğe sahip olduğu için,

$$n_i \cong n_e \cong n \qquad (2.1)$$

dir. Burada n; " Plazma Yoğunluğu " olarak tanımlanır. Plazma içindeki yüklü parçacık sayısını ifade eden parametre, gazın iyonlaşma derecesidir. Gaz içindeki iyonlaşmış parçacık sayısı olan iyonlaşma derecesi, α_{iz} ;

$$\alpha_{iz} = \frac{n_i}{n_i + N} \tag{2.2}$$

şeklinde ifade edilir. Burada N; nötral atomların yoğunluğudur. $\alpha_{iz}=1$ olduğunda plazma tümüyle iyonlaşmış demektir (Lieberman and Lichtenberg, 1997). Bu durum yıldızlarda ve termonükleer füzyon reaktörlerinde gözlenir. Bununla birlikte plazma içindeki her tür, farklı sıcaklık terimleri ile ifade edilir. Örneğin T_g; nötral atomların yani plazması oluşturulan gazın sıcaklığını, T_u; uyarılmış atomların sıcaklığını, T_i; iyonların sıcaklığını, T_e; elektronların sıcaklığını, T_a; molekül durumundan atoma ayrışmış atomlar için ayrışmış atom sıcaklığını ve T_f; fotonların enerjisini karakterize eden foton sıcaklığını ifade etmektedir. Eğer plazma içindeki her türün sıcaklığı eşit ise yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_f \cong T_e = T_p \tag{2.3}$$

ise bu plazma, " TTD Plazma " olarak isimlendirilir. Burada T_p ; " Plazma Sıcaklığı " olarak tanımlanır. Bu tip plazmalar yalnızca güneşte ve yıldızlarda meydana gelir. Eğer plazma içinde foton sıcaklığı haricinde her türün sıcaklıkları eşit ise yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_e \neq T_f \tag{2.4}$$

ise bu plazma, " LTD Plazma " olarak isimlendirilir. Laboratuvar koşullarında atmosferik basınçlarda lokal termodinamik dengede olan plazmalar üretilebilir ve bunlar genellikle " Termal Plazmalar " olarak adlandırılır. Termal plazmalar yüksek basınçlarda meydana geldiği için " Yüksek Basınç Plazmaları " olarak da adlandırılırlar. Plazma içinde basıncın artmasıyla, elektronlar ile nötral atomlar arasındaki çarpışma sayısı artar. Bu nedenle 1 atm. civarındaki yüksek basınçlarda meydana gelen, elektriksel ark ve plazmatron olarak adlandırılan plazma jetleri ve kontrol edilebilen termonükleer füzyon reaktörlerinde oluşturulan plazmalar, laboratuvar koşullarında üretilen lokal termodinamik dengedeki plazmalara örnek olarak verilebilir.

Daha düşük basınçlarda elektronlar ile nötral atomlar ve iyonlar arasında termal dengeye ulaşılamaz. Bu nedenle, $T_e >> T_i > T_g > T_u$ şeklinde, elektronların sıcaklıklarının diğer türlerden çok büyük olduğu ve hiçbir tür arasındaki sıcaklığın eşit olmadığı plazmalar " Non-LTD plazmalar " olarak adlandırılır. Elektronların kütlesi plazma içindeki diğer türlerden çok daha küçüktür. Bu nedenle elektronlar, plazmanın oluşması için dışarıdan verilen elektrik alanı ya da enerjiyi diğer türlerden çok daha fazla absorbe ederler. Plazması elde edilen gazın basıncı düşük olduğu için elektronlar, diğer türlerle çok sayıda çarpışma yapamaz ve böylece diğer türlere enerjisini aktaramaz. Bu nedenle düşük basınç plazmalarında elektronların sıcaklıkları, diğer türlerden her zaman çok daha büyük olur. " Düşük Basınç Plazmaları " olarak adlandırılan Non-LTE plazmalarında nötral atomların sıcaklığı yani gazın sıcaklığı çok düşük olduğu için, bu plazmalar aynı zamanda " Soğuk Plazmalar " olarak adlandırılır.

Elektronların plazma içindeki dağılım fonksiyonu;

$$f(v) = \frac{4n_e}{\pi}\left(\frac{m_e}{2kT_e}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_e v^2}{2kT_e}} \qquad (2.5)$$

Maxwell dağılım fonksiyonu ile verilir (McDaniel, 1964). Burada m_e; elektronların kütlesi ve k; Boltzman sabitidir.

Plazma ile ilişkili diğer bir özellik, plazma içindeki parçacıkların, plazma içindeki bir yüklü parçacık tarafından ya da dışarıdan oluşturulan bir elektrostatik alana karşı " kalkan " oluşturacak şekilde, kendilerini yeniden düzenleme eğiliminde olmalarıdır. Eğer plazma içinde bir elektrik alan oluşturulursa, plazma içindeki yüklü parçacıklar alanın etkisini azaltmak için tepki vereceklerdir. Bu tepki, daha hafif ve daha hızlı olan elektronlar tarafından , elektrik alanın etkisini azaltmak için plazma içindeki diğer türlere göre daha hızlı bir şekilde verilecektir. Plazma içindeki yüklü parçacıklar, bu etkiyi azaltmak için verecekleri tepkiyi, bir titreşim hareketi şeklinde yaparlar. Bu titreşim hareketini düşük kütleleri nedeniyle elektronlar, diğer türlere nazaran daha şiddetli yaparlar. Elektronların bu etkiyi azaltmak için yaptıkları titreşim hareketinin frekansı " Plazma Frekansı" olarak

adlandırılır. Başka bir deyişle plazma içinde meydana gelen bir etki, plazma içinde plazma frekansı ile yayılır. Plazma frekansı Langmuir frekansı olarak da bilinir ve

$$\nu_L = \left(\frac{e^2 n_e}{m_e \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.6}$$

şeklinde verilir (Muraoka and Maeda, 2001). Burada ε_o; boşluğun geçirgenliği ve e; elektronun yüküdür. Bu şekilde lokal elektrik alanların etkisini azaltmak için yüklü parçacıkların tepkisi " Debye Kafeslemesi (Debye Shielding) " olarak adlandırılır (Goldston and Rutherford, 1995). Debye kafesleme etkisi nedeniyle plazma içinde lokal elektriksel alanların oluşmasına izin verilmediği için plazma sürekli olarak nötral halde kalmaya çalışır. Debye kafesleme etkisi ile plazmanın bu şekilde nötral halde kalma isteği " Yaklaşık Olarak Nötral (Quasi-Neutrality) " olarak adlandırılır (Kunkel, 1966). Ancak plazma içinde,

$$\lambda_D = \left(\frac{\varepsilon_0 kT_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \tag{2.7}$$

ile verilen ve " Debye Uzunluğu " olarak adlandırılan uzunluk, plazma içindeki minimum nötral olan bölgeye karşılık gelir. Daha doğrusu plazma içinde λ_D yarıçaplı Debye küresi, plazma içindeki minimum nötral olan yani lokal elektrik alanların oluştuğu hacme karşılık gelir. Plazma içine bir metal sokulursa, Debye kafesleme etkisi ile bir kılıf oluşur. Plazma içindeki elektronlar, iyonlardan daha büyük hızlara sahip olduğu için bu metale daha çabuk ulaşırlar. Bu nedenle metal yüzeyi ile plazma arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bundan dolayı plazma, kendisi ile temasta olan herhangi bir yüzeye göre, her zaman bir pozitif potansiyele sahip olur. Debye kafesleme etkisi nedeniyle yüzeyle plazma arasında oluşan potansiyel, birkaç Debye uzunluğundaki kalınlıkta bir tabakayı kuşatır. Plazma ile kontakta bulunan tüm yüzeyler arasında oluşan pozitif uzay yüklerinin bu tabakası " Plazma Kılıfı (Plasma Sheath) " olarak adlandırılır. Bu nedenle elektriksel deşarjlar için kullanılan elektrotların ön kısmında katot potansiyeli (katot düşümü) ve anot potansiyeli (anot

düşümü) olarak adlandırılan pozitif ve negatif yükler için hızlandırıcı bir potansiyel her zaman bulunur.

Debye uzunluğu plazma için çok önemli bir parametredir. Langmuir iyonlaşmış gaza plazma ismini vermesine rağmen, her iyonlaşmış gaz plazma değildir. İyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanabilmesi için üç şartın gerçekleşmesi gerekir. Bunlardan birincisi, plazmanın oluşturulduğu sistemin boyutları (L), Debye uzunluğundan büyük olması gerekir. Yani iyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanması için $L >> \lambda_D$ olmalıdır. İkinci olarak λ_D yarıçaplı ve Debye küresi olarak adlandırılan hacim içindeki yüklü parçacık sayısının $N_D >> 1$ olması gerekir. Üçüncü şart plazmadaki çarpışma frekansı ile ilgilidir. Eğer plazma içindeki yüklü parçacıklar, nötral atomlarla çok sık çarpışıyorsa, kollektif davranış şartı sağlanmaz ve gaz bir plazma olarak davranamaz. τ, nötral atomlarla yüklü parçacıkların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman ve ω, çarpışma frekansı olmak üzere, iyonlaşmış bir gazın plazma olabilmesi için $\omega.\tau > 1$ olmalıdır (Grill, 1993).

Yukarıda açıklanan plazmanın özelliklerini daha anlaşılır yapmak için, plazma ile plazmaya en yakın hal olan gazlar arasındaki farklar aşağıda sıralanmıştır.

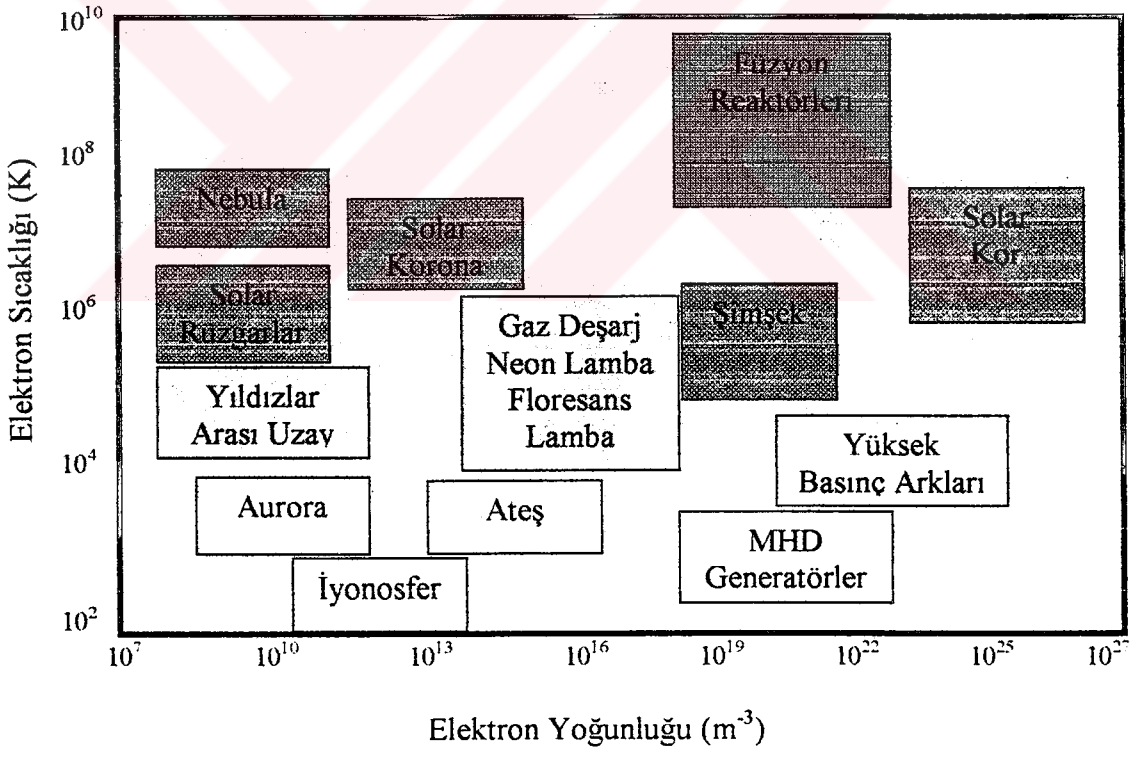
i. Gazlar elektriği iletmezler. Plazma ise elektriksel nötralitesine rağmen, iyi bir elektriksel iletkendir. Bazen bakır veya gümüşten bile daha iyi iletkendirler.
ii. Gazlar nötral parçacıklardan oluşur. Bu nedenle elektrik ve manyetik alanlarla etkileşmez. Plazma ise elektriksel nötralitesine rağmen, elektrik ve manyetik alanlarla etkileşir.
iii. Plazma içindeki herhangi bir pertürbasyonun yayılması elektromanyetik dalga hızında gerçekleşirken, bu yayılım gaz içinde ses hızında gerçekleşir.
iv. Plazma halinde kimyasal reaksiyonlar, gaz halinden daha büyük hızlarda gerçekleşir.
v. Plazma içinde yüklü parçacıklar arasındaki Coulomb çekim kuvvetleri çok uzak mesafelerde bile etkilidir. Bu nedenle plazma içindeki her parçacık civarındaki tüm parçacıklarla sürekli etkileşim halindedir. Gaz halinde parçacıklar arasındaki Coulomb

etkileşimi ancak iki parçacık yarıçapı toplamı uzaklığında gerçekleşir. Bu uzaklıklar dışında parçacık etkileşmesi yok sayılır.

vi. Gazların boş olan her şeyi doldurma özelliğine karşılık, plazmalarda bir toplaşma eğilimi vardır.

vii. Plazma elektromanyetik dalgalarla etkileştiği gibi, kendisi de elektromanyetik alan oluşturur.

Plazmalar; plazma içindeki parçacıkların sıcaklığına, plazmanın oluşturulduğu gazın basıncına göre sınıflandırıldığı gibi, daha genel olarak sınıflandırılması Şekil 2.2.'de gösterildiği gibi elektron yoğunluğu – elektron sıcaklığı dağılımı ile yapılır (Roth, 1995).



Şekil 2.2. Evrende doğal olarak bulunan ve laboratuvar koşullarında elde edilebilen plazmaların elektron yoğunluğu - elektron sıcaklığı değişimine göre sınıflandırılması.

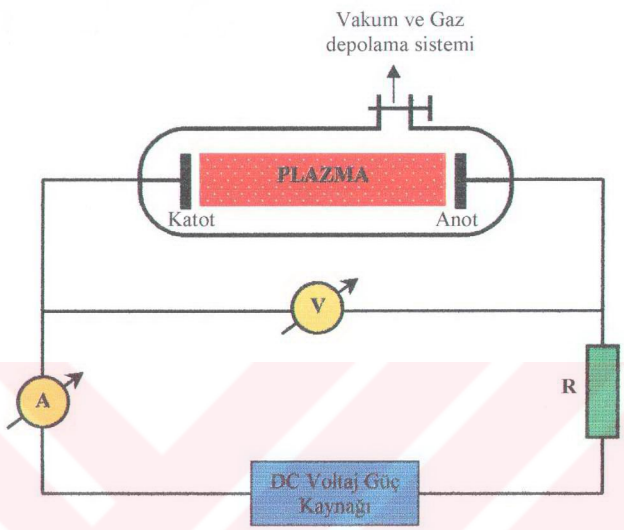
3. ELEKTRİKSEL ARK

3.1. Elektriksel Deşarj Karakteristikleri

Herhangi bir ortamdan akım iletilebilmesi için o ortam içinde yüklü parçacıkların bulunması gerekir. İdeal gazlar birbirleriyle etkileşmesi ihmal edilen nötral parçacıklardan oluşur (Erdik ve Sarıkaya, 1993). Bu nedenle elektriği iletmezler. Ancak doğada bulunan bütün gazlar içinde güneşten gelen morötesi ışınlar, radyoaktif ışınlar veya uzaydan gelen kozmik ışınlar nedeniyle bir miktar yüklü parçacık bulunur. Bu yüklü parçacıklar gazın nötral atomları ile çarpışarak yeni yüklü parçacıkların (elektronların, pozitif iyonların ve negatif iyonların) oluşmasına neden olurlar. Bu şekilde gaz içindeki yüklü parçacık sayısının artmasıyla gaz elektriksel olarak iletken hale gelir.

Gazlar içinden elektrik akımının geçmesi olayı, çok farklı davranış özelliklerine sahip elektriksel deşarj olarak adlandırılır. Gazlarda elektriksel deşarj oluşturmak için en yaygın şekilde kullanılan ve elektriksel deşarj tüpü olarak adlandırılan sistem Şekil 3.1.'de gösterilmiştir. Vakum ve gaz depolama sistemi ile vakumlanabilen ve sonra istenilen basınçta istenilen gazla doldurulabilen bu sistem, içinde iki elektrot bulunan bir cam tüpten oluşur. Elektrotların cam içinde kalan bağlantı parçaları ve elektrotların arka kısımları, deşarj tüpü içinde oluşan plazmanın yalnızca elektrotlar arasında kalması için elektriksel olarak yalıtılmıştır. Bu sistemde, elektrotlar arasına elektrik voltajı uygulamak için bir dc voltaj güç kaynağı ve gaz içinden geçen akımın kontrol edilebilmesi için akım ayarlayıcı bir direnç kullanılır. Gazlarda elektriksel deşarjlar, kullanılan güç kaynağına göre dc elektriksel deşarj, ac elektriksel deşarj, rf elektriksel deşarj gibi farklı isimlerle adlandırılır.

Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Plazma Fiziği Laboratuvarında böyle bir deşarj tüpü içinde elde ettiğimiz neon gazının elektriksel deşarjı Şekil 3.2.' de gösterilmiştir (Ekem vd., 1999).

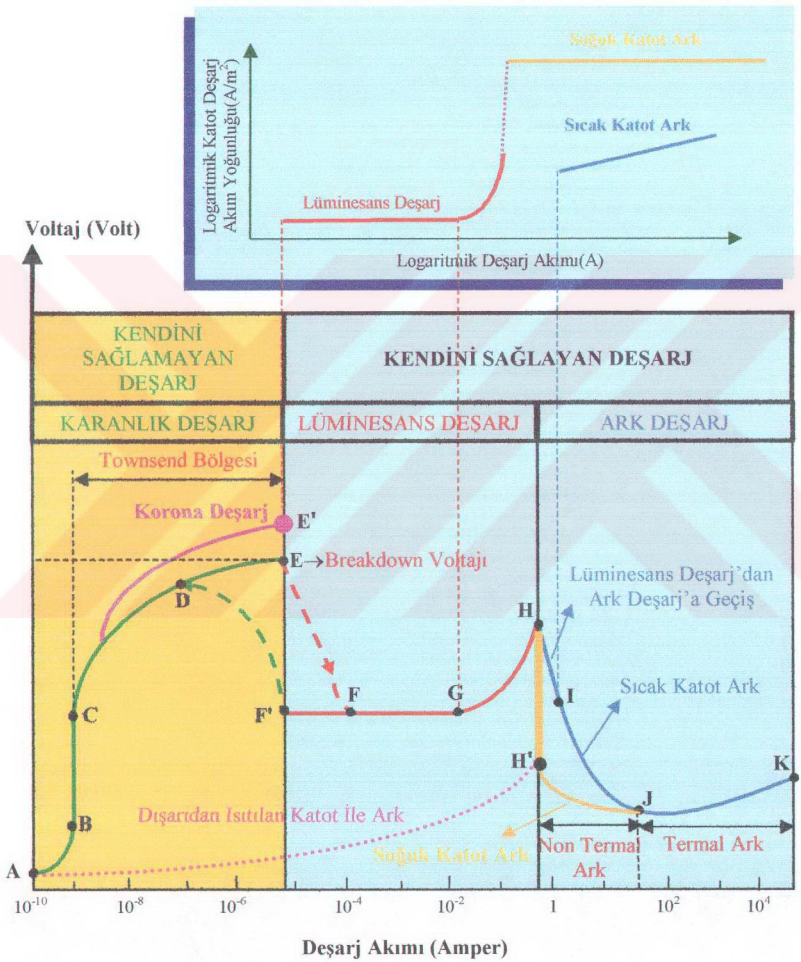


Şekil 3.1. Elektriksel gaz deşarj sistemi.



Şekil 3.2. Osmangazi Üniversitesi Plazma Fiziği laboratuvarında elde edilen neon gazının elektriksel deşarj plazması.

Bir deşarj sistemine dc voltaj güç kaynağı ile voltaj uygulanarak elde edilen gaz deşarjların akım voltaj karakteristiği Şekil 3.3.' de verilmiştir (Roth, 1995).



Şekil 3.3. Elektriksel gaz deşarjın akım voltaj karakteristiği.

Deşarj tüpü içindeki elektrotlara dc voltaj güç kaynağı ile uygulanan voltaj yavaş yavaş arttırılıp ve bu sırada deşarj içinden geçen akımın ölçülmesiyle elde edilen akım voltaj karakteristiği çok farklı davranışlar göstermektedir. Bu, deşarj tüpü içindeki yüklü parçacık sayısındaki artışa neden olan kaynakların değişmesinden dolayıdır. Bu nedenle bu karakteristik üzerinde farklı bölgeler oluşmaktadır. Deşarj tüpü içindeki yüklü parçacıkların artışı, deşarjın kendisi tarafından sağlanıyorsa kendini sağlayan (self sustaining) deşarj, yük artışı deşarj tarafından değil de bir dış kaynak tarafından sağlanıyorsa, kendini sağlamayan (non self sustaining) deşarj olarak adlandırılır. Deşarj tüpü içinde, yüklü parçacıkların artışına sebep olan elektron emisyon kaynakları da değişmektedir. Örneğin karanlık deşarj bölgesinde doğal radyasyon yoluyla, lüminesans deşarj durumunda ikincil elektron emisyonu yoluyla, ark deşarj bölgesinde termiyonik emisyon ve alan emisyonu yoluyla, yüklü parçacık sayısında artış sağlanmaktadır. Bununla birlikte karakteristik üzerinde yayınlanan radyasyon şiddetine göre de sınıflandırma yapılmıştır. Karanlık deşarj olarak adlandırılan bölgede, yayınlanan radyasyon görünür bölgede olmadığı ve dolayısıyla göz ile görülmediği için karanlık deşarj olarak adlandırılır. Lüminesans deşarj bölgesinde yayınlanan radyasyon, görünür bölgede olduğu için gözle görünür bir ışıldama meydana gelir. Bu nedenle lüminesans deşarj bölgesi olarak adlandırılır.

Deşarj tüpü içindeki elektrotlar arasına voltaj uygulanmadan önce, deşarj tüpü içinde bulunan gazda, her zaman bir miktar serbest elektron ve iyon vardır. Bunlar, güneşten gelen radyoaktif ışınlar ve uzaydan gelen kozmik ışınların gaz içindeki nötral atomları iyonlaştırması ve doğada bulunan bu radyoaktif ışınların, deşarj cihazının elektrotlarından fotoelektrik emisyon yapmasıyla oluşurlar. Deşarj tüpünde doğal olarak bulunan bu yüklü parçacıklar, elektrotlar arasına voltaj uygulanılmadan önce bir elektrik alan içinde olmadıkları için elektrik akımı oluşturmazlar. Ancak elektrotlar arasına uygulanan voltaj yavaş yavaş arttırılırsa, gaz içinde doğal olarak bulunan elektronlar anoda, pozitif iyonlar katoda doğru hareket etmeye başlarlar ve bu yüklü parçacık hareketi nedeniyle deşarj içinden bir miktar akım geçer. Katot ile anot arasına uygulanan voltaj belli bir değere gelinceye kadar (B noktası) bu akım artar ve bu noktada birim zamanda üretilen tüm yükler elektrotlar tarafından toplanılmıştır ve voltajın arttırılmaya devam edilmesiyle birim zamanda elektrotlar tarafından toplanan

yük sayısında artış olmayacaktır. Sonuç olarak akım voltaj karakteristiği doyuma ulaşacaktır. Burada yüklü parçacıklar elektrotlara doğru hareket ederken, çarpışmalarla iyonlaşma yapacak kadar enerjiye sahip değildirler. Buraya kadar deşarj tüpü içindeki tüm yükler doğal yollarla üretildiği için, AB bölgesi doğal radyasyon ile iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır. B noktasından sonra deşarj cihazı üzerine uygulanan voltaj arttırılsa dahi, akımın artmayıp sabit kaldığı satürasyon bölgesi (BC) oluşur. Bu bölgede tüp içinde hala doğal olarak üretilen yükler vardır. Ancak birim zamanda birim kesitten geçen yük miktarı sabit kaldığından akım da değişmemektedir. Satürasyon rejiminde anot ile katot arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam ettikçe akım artmaz ancak deşarj içindeki yüklü parçacıklar giderek daha fazla enerji kazanırlar. Tam C noktasında elektronlar artık gaz atomlarını iyonlaştıracak kadar enerji kazanmışlardır ve tüp içindeki yüklü parçacık sayısı giderek artacaktır. Bu artış Townsend'in birinci iyonizasyon katsayısından hesaplandığında exponansiyel bir artış olarak bulunur (Roth, 1995). Bu nedenle karakteristik üzerinde CE arasındaki bölge exponansiyel artan bölgedir. Bu artış E noktasında bir doyuma ulaşır ve bu noktaya karşılık gelen voltaj V_B, " Breakdown Voltajı " olarak adlandırılır.

Elektrotların yapısına göre doyuma ulaşılan bu bölge yani breakdown voltajına karşılık gelen bu nokta farklı bir durum gösterebilir. Eğer elektrotlar üzerinde yapım hatası olarak sivri yada keskin uçlar varsa, uygulanan voltaj nedeniyle bu sivri ve keskin bölgelerdeki elektrik alan çok yüksek olacağından, alan emisyonu nedeniyle korona deşarj oluşur. Bu nedenle breakdown voltajı değeri daha yüksek bir değere çıkabilir. Satürasyon rejimi ile breakdown voltajı arasında kalan bölge Townsend rejimi olarak adlandırılır.

Buraya kadar gaz içinden akım geçişinin anot ile katot arasındaki uzayda, dış kaynaklar nedeniyle üretilen iyonlara bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle A noktası ile breakdown voltajı arasındaki bölgeler kendini sağlamayan deşarj bölgeleri olarak adlandırılır. Aynı zamanda bu bölgede korona hariç hiçbir deşarj, görünür bölge dalga boyunda radyasyon yayınlayamaz. Bu nedenle bu bölge, karanlık deşarj olarak da adlandırılır.

Breakdown voltajı kelime anlamı olarak iletken olmayan bir materyalin iletken hale geçmesi için minimum uygulanması gereken voltaj değeri olarak tanımlanır. Gaz deşarjlar için Breakdown voltajının değeri,

$$V_B = \frac{A_1(pd)}{A_2 + \ln(pd)} \tag{3.1}$$

ile verilir. Burada A_1 ve A_2 deneysel olarak elde edilen birer sabit, p; gaz basıncı ve d; elektrotlar arası uzaklıktır. Görüldüğü gibi breakdown voltajı yalnızca gazın basıncı ve elektrotlar arası uzaklığın çarpımına (pd) bağlıdır. Bu bağımlılık Paschen yasası olarak tanımlanır (Grill, 1993).

Breakdown voltajından sonra yani karakteristik üzerinde E noktasından veya korona deşarjın oluştuğu özel durumda E´ noktasından sonra deşarj üzerine uygulanan voltaj birden azalır ve akım çok hızlı bir şekilde artar. Bu, deşarj içindeki yüklü parçacık sayısının çok hızlı bir şekilde artmasından dolayıdır. Bu artış, plazma içinde oluşan pozitif iyonların katota vurarak, katottan ikincil elektron emisyonu yapması nedeniyledir. Breakdown voltajından sonra deşarj, ihtiyaç duyduğu yüklü parçacıkları kendisi üretmeye başladığı için bundan sonraki karakteristik üzerindeki bölgeler, kendini sağlayan deşarjlar olarak tanımlanır.

Breakdown voltajından sonra deşarj üzerindeki voltaj birden azalarak lüminesans deşarj bölgesine geçilir. Lüminesans deşarj bölgesi, lüminesans deşarja geçiş bölgesi (EF), normal lüminesans deşarj bölgesi (FG) ve anormal lüminesans deşarj bölgesi (GH) olarak üçe ayrılır. Genellikle 1 torr'un altındaki düşük basınçlarda, normal lümünesans deşarja geçiş başlar. Normal lüminesans deşarj bölgesinde uygulanan voltaj çok az artmakta akım ise hızla artmaktadır. Normal lümünesans deşarj 1 ile 100mA arasındaki düşük akımlarda ve 70 ile 600V arasındaki yüksek voltajlarda oluşur ve katottaki akım yoğunluğunun sürekli sabit kaldığı karakteristik bir davranışı gösterir (Roth, 1995). Şekil 3.3.'ün üst kısmında bazı deşarjlar için, katottaki akım yoğunluğu ile deşarj akımı arasındaki ilişki yaklaşık olarak verilmiştir. Lümünesans deşarj durumunda, katottaki akım yoğunluğu katot materyaline, kullanılan gazın

basıncına ve cinsine bağlı olduğu için farklı materyaller için bu karakteristik üzerinde gösterilen değerler değişir. Deşarj içinden geçen akım G noktasına kadar arttığında katot yüzeyi tümüyle plazma ile kaplanmıştır. G noktasından geriye doğru gidilmek istense F noktasına gelinse, daha da geriye gidilmek istense D noktasına varılır. Deşarj E′ noktasında breakdown olup korona deşarj meyadana gelmiş olsa dahi, F noktasından E noktasına geriye doğru geçiş olmaz. Bu, deşarj içinde üretilmiş iyonların bulunması nedeniyledir. Karakteristik üzerinde bir noktadan başka bir noktaya geçiş, eğimi Şekil 3.1.'de gösterilen devreye bağlı dirence eşit olan, yük hattı (charge line) ile yapılır.

G noktasından sonra anormal lüminesans deşarj başlar ve H noktasına kadar sürer. Bu bölgede G noktasından sonra ikincil elektron emisyonu ile akımın artışı, yavaş yavaş doyuma ulaşmaya başlar. Bu nedenle deşarj içindeki pozitif iyonlar katota vurarak ikincil elektron üretmekle birlikte, katotun aşırı ısınmasına neden olurlar ve voltaj giderek yükselmeye başlar. Katotun yeterince ısınması sebebiyle H noktasında artık termoelektronik emisyon başlar. Deşarj içindeki termoelektronik emisyon nedeni ile yüklü parçacık sayısı arttığı için deşarj üzerindeki voltaj yeniden düşmeye başlar. Böylece lüminesans deşarjdan ark deşarja geçiş (HI) başlar. Lüminesans deşarjdan elektriksel arka geçiş, yüksek erime noktalı ve anormal lüminesans deşarj tarafından yüksek sıcaklıklara ısıtılabilen materyaller için düz ya da yavaşça değişen bir geçiş olabilir (HH'). Bu durum soğuk katot ark durumunda gözlenir. Dışarıdan ısıtılan katot ile ark deşarj durumunda ise lüminesans deşarj bölgesi oluşmadan ark deşarja geçiş olur (AH'). Genelde ark deşarja geçiş, katotun yeterince termiyonik emisyon yapamadığı çoğu durumda aniden keskin bir geçiş olur. Bu geçiş sonrasında elektriksel ark deşarj bölgesi (IK) oluşur. Voltaj değeri dc güç kaynağının iç direncine bağlı olarak bir K noktasına kadar önce azalır sonra yavaş yavaş artmaya başlar. I ile K arasında J noktasındaki yüksek akımlara ulaşıncaya kadar voltaj azalırken akım artar ancak J noktasından sonra voltaj, akımın artmasıyla yavaşça artar. Bu değişim yine elektron emisyon mekanizmasının değişmesi sebebiyledir. J bölgesine kadar elektronlar termiyonik emisyon ile üretilirken, J noktasından sonra alan emisyonu ile üretilirler. Tungsten, molibden gibi erime sıcaklıkları yüksek ve zor eriyen metaller (refractory metals) olarak adlandırılan materyaller için ark akımı katot üzerindeki çok sayıdaki spot

tarafından sağlanılır. I ile J arasındaki artan akımla voltajın azaldığı bölge, elektron iyon ve gazın sıcaklığının eşit olmadığı termal olmayan ark (non-thermal arc) rejimi, J ile K arasındaki pozitif eğimli bölge termal ark (thermal arc) rejimidir ve tüm türlerin sıcaklıklarının eşit olduğu termal denge halindeki plazmadır. Bu şekildeki elektriksel arklarda voltaj düşümü 10 ile 50 V arasındadır. Ark akımları genelde 1 A ile 1000 A arasında değişir (Raizer, 1991).

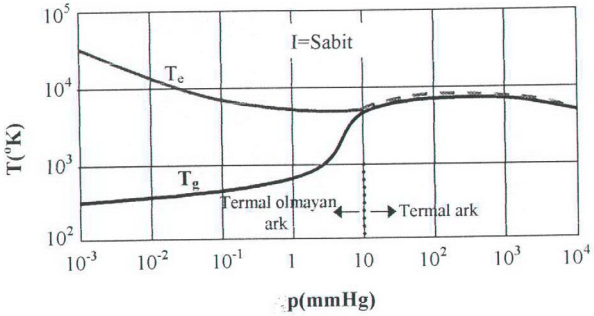
3.2. Elektriksel Ark Çeşitleri

Ark deşarj, katot civarındaki düşük katot potansiyeli ile karakterize edilir. Katot potansiyel düşümü 10 eV civarında, arkın oluştuğu gaz ya da buhar atomlarının iyonlaşma potansiyeli mertebesindedir. Bu potansiyel düşümü, ark deşarjlarda kullanılan katotların, ikincil elektron emisyonundan farklı olarak, termiyonik emisyon ve alan emisyonu mekanizmaları ile elektron yayınlamaları sebebiyledir.

Ark deşarj durumunda deşarj akımı $i \sim 1\text{-}10^5$A arasında olurken, katot akım yoğunlukları ark deşarjın bazı modları için $10^2\text{-}10^4$ A/cm^2 ve diğer modlar için $10^4\text{-}10^7$A/cm^2 olabilmektedir (Raizer, 1991).

Kullanılan gaz basıncına bağlı olarak elektriksel arklar iki büyük sınıfa ayrılabilir. Bunlardan birincisi 10 torr'dan daha büyük basınçlardaki gazlar veya buharlarda meydana gelen yüksek basınç arkları, ikincisi 10 torr'dan daha küçük basınçlardaki gazlar veya buharlarda meydana gelen düşük basınç arklarıdır.

Genellikle düşük basınç arkları termal dengede olmayan plazmalarla karakterize edilir. Termal dengede olmayan plazmalarda nötral gaz atomları 400-500 °K arasındaki sıcaklıklara sahip olurken, elektronlar 10000 ile 50000 °K arasındaki yüksek sıcaklıklara sahip olurlar. Şekil 3.4.'de elektriksel deşarjlarda elektron ve nötral gaz atomu sıcaklıklarının basınca göre değişimi gösterilmiştir (Roth, 1995).



Şekil 3.4. Elektriksel deşarjlarda elektron ve nötral gaz atomu sıcaklıklarının basınca göre değişimi.

Yüksek basınçlarda meydana gelen yüksek basınç ark plazmaları, termal dengede olan plazmalardır. Bu durumda elde edilen ark plazması içindeki elektronların, pozitif iyonların ve nötral gaz atomlarının ya da moleküllerinin sıcaklıkları eşittir. Yüksek basınç ark plazmalarında gazın sıcaklığı 4000 ile 20000 °K'e kadar çıkabilmektedir. Böyle yüksek yoğunluklu bir plazma, ark kolonunda radyasyona dönüştürülen Joule ısısının % 80-90'nına kadarını çok şiddetli bir şekilde dışarıya yayınlar. Bu özelliğinden dolayı teknolojide, süper yüksek basınç lambaları olarak kullanılmaktadırlar.

Ark deşarj durumunda katottan elektron emisyonu, lüminesans deşarjda olduğu gibi katot yüzeyine iyonların çarpması ile oluşan, ikincil elektron emisyonu ile gerçekleşmez. Katottan elektron emisyonuna göre ark deşarj, termoelektronik emisyon ile ark deşarj, soğuk katottan alan emisyonu ile ark deşarj ve dışarıdan ısıtılan katot ile ark deşarj ve metal buharlarında meydana gelen ark olmak üzere dört alt gruba ayrılır.

3.2.1. Sıcak Katottan Termoelektronik Emisyon İle Ark Deşarj

Bu durumda anot ile katot arasında oluşan lüminesans deşarj, katotu yaklaşık 3000 °K yada daha yüksek sıcaklıklara ısıtır. Deşarjın kendisi tarafından ısıtılan katot üzerinde çok küçük boyutta kızıllaşmış ve spot olarak adlandırılan sabit bir nokta oluşur. Bu sabit spottan katot, termoelektronik emisyon yapmaya başlar. Bu durumda katot yüzeyi üzerindeki akım yoğunluğu yaklaşık olarak 10^2-10^4 A/cm^2 arasındadır ve oluşan termoelektronik emisyon akımı, ark akımı mertebesindedir. Bu ark, içinde bulunan yüklü parçacık sayısı artışını kendisi sağladığı için kendini sağlayan deşarjdır. Bu tip arklarda katot olarak, yüksek sıcaklıklara dayanabilen metaller kullanılmalıdır. Bu nedenle normal basınçlarda hiç erimeyen, kaynama sıcaklıkları $T_{kay} \approx 4000$ °K olan karbon ve erime sıcaklığı $T_{eri} \approx 3700$ °K, $T_{kay} \approx 5900$ °K olan tungsten, molibden, zirkonyum, tantalyum gibi zor eriyen metaller kullanılır (Raizer, 1991). Çok sıcak tungsten katotlarla arklar, plazmatronlar, kaynak makineleri ve ark fırınlarının belirli tipleri gibi, uzun servis süreli elektrotlara ihtiyaç duyan cihazlarda kullanılır.

3.2.2. Soğuk Katottan Alan Emisyonu İle Ark Deşarj

Katottan elektronların alan emisyonu ile elektriksel ark durumunda, ark katot yüzeyinin ön kısmında elektrotlar arasında oluşan deşarjın pozitif yükleri nedeniyle oluşan yüksek elektrik alan nedeniyle, katottan elektronların alan emisyonu ile meydana gelir ve bu durumda katotun sıcaklığı termoelektronik emisyon yapabilmesi için yeterli derecede yüksek değildir ve soğuktur. Bu çeşit arklarda akım, gözle görülebilen ya da gözle görülemeyen ve katot yüzeyinde çok hızlı bir şekilde ve rastgele hareket eden bir veya daha çok spot içinden akar. Bir spot içindeki akım yoğunluğu yaklaşık 10^4-10^7 A/cm^2 kadar yüksektir. Bu spotlardan bir tanesi kısa sürede olsa katot yüzeyinde bir noktada sabit kalsa, katotun o bölgesinin aşınmasına neden olur. Alan emisyonunu sağlayan spotlar düşük erime noktalı bakır, demir, gümüş gibi metal katotlarda ve sıvı civadan yapılmış katotlarda ortaya çıkar. Katot spotlarının elektron emisyonu

mekanizması bugüne kadar tümüyle açıklanamasa da alan emisyonu şeklinde ifade edilmektedir (Raizer, 1991).

3.2.3. Dışarıdan Isıtılan Katot İle Ark Deşarj

Bu durumda katot, elektrotlar arasındaki deşarj akımıyla değil dışarıdan bir kaynak ile termoelektronik emisyon sağlamak için ısıtılır. Bu nedenle sıcak katotlu termoelektronik emisyon ile arkın özel bir halidir ve en önemli farkı bu tip ark kendini sağlamayan ark deşarjdır. Bu tip deşarjlarda kullanılan katotlar genelde flament olarak adlandırılır ve elektron tüpleri ve floresans tüplerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar.

Dışarıdan ısıtılan katot ile elektriksel arklarda, termoelektronik emisyon verimini arttırmak için katkılı katotlar da kullanılmaktadır. Katkı malzemesi flamentin iş fonksiyonunun düşmesine neden olur ve bu tip katotlar aktif katotlar olarak adlandırılır. Bu çeşit arklar bazı düşük basınç cihazlarında ve termal enerjinin elektriksel enerjiye dönüştürüldüğü termiyonik dönüştürücülerde kullanılır.

Termiyonik Vakum Ark (TVA)'ı dışarıdan ısıtılan katot ile ark sınıflandırılmasının içine sokabiliriz. Ancak TVA, saf metal buharlarında meydana geldiği için aynı zamanda metal arklar sınıfının içine de girer. Bu nedenle metal arklar da burada ayrı bir bölüm olarak açıklanmıştır.

3.2.4. Metal Arklar

Bu tip arklar genelde vakum içinde meydana gelen ve elektrotlardan birinin ark sırasında erozyona uğrayarak buharlaşması ile meydana gelir. Bu tip arkların elde edilmesi için çok farklı metotlar vardır. Bölüm 5'de metal buharlarında meydana getirilen bazı teknikler açıklanmıştır. Üretilme tekniklerine göre farklılıklar gösteren metal arklar için genel bir bağıntı Ayrton tarafından yapılmıştır.

Metal veya karbon elektrotlarla elektriksel arkların özel durumunda ark voltajı ile ark akımı şiddeti arasındaki ilişki,

$$V = C_1 + \frac{C_2}{i} + \left(C_3 + \frac{C_4}{i}\right)\ell \qquad (3.2)$$

Ayrton denklemi ile verilir (Roth, 1995). Bu eşitlikte ℓ; arkın uzunluğu ve C_1, C_2, C_3 ve C_4 ise birer sabittir. Ark üzerinde harcanan güç ;

$$P = (C_1 + C_2\ \ell)\, i + (C_3 + C_4\ \ell) \qquad (3.3)$$

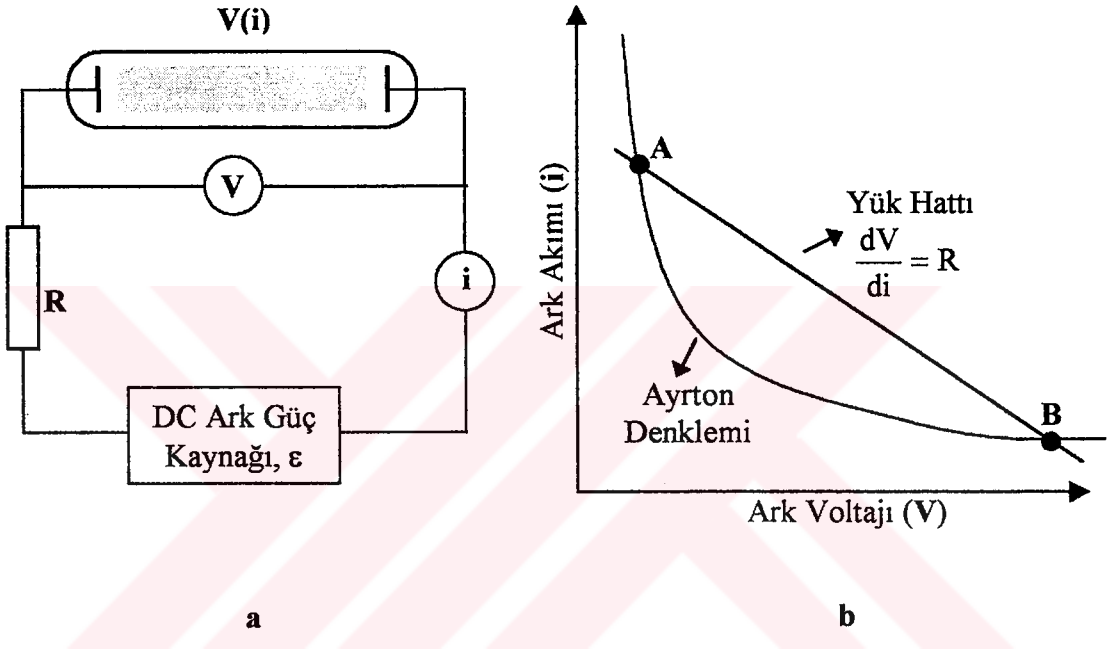
bağıntısı ile verilir. Buradan görüldüğü gibi ark üzerinde harcanan güç, ark akımı (i) ile ilişkilidir. Eşitlik 3.2. ve 3.3.' deki C_1, C_2, C_3 ve C_4 sabitlerinin değeri deneysel koşullara bağlıdır. Bu deneysel koşullar; gazın ve elektrotların cinsi, gazın basıncı, elektrotlardaki termal kayıplar yani elektrotların boyutları ve şekli ve gaz akışının olup olmadığıdır. Bir örnek olarak Tablo 3.1.' de atmosferik basınçtaki hava akışı ile sağlanan bir ark için C_1, C_2, C_3 ve C_4 sabitlerinin değerleri verilmiştir.

Tablo 3.1. Bazı metaller için C_1, C_2, C_3 ve C_4 sabitleri (Badarau, 1957).

Materyal	C_1 (V)	C_2 (V/cm)	C_3 (W)	C_4 (W/cm)
Karbon	38.9	2.0	16.6	10.5
Demir	15.0	9.4	15.7	2.5
Bakır	15.2	10.7	21.4	3.0

3.3. Elektriksel Ark'ın Kararlılığı

Şekil 3.5.a.' da bir elektriksel ark deşarj için şematik olarak elektriksel devre ve Şekil 3.5.b.' de ark deşarjın akım voltaj karakteristiği ile birlikte aynı grafik üzerinde yük hattı olarak adlandırılan doğru da verilmiştir (Roth, 1995).



Şekil 3.5. a.) Elektriksel ark deşarj için şematik olarak elektriksel devre. **b.)** Ark deşarjın akım voltaj karakteristiği ve yük hattı.

Elektromotor kuvveti ε , akım ayarlayıcı direnç R, deşarj elektrotları üzerindeki voltaj V ve deşarj akımı i arasındaki ilişki aşağıdaki ifadelerle verilir.

$$\begin{cases} V = V(i) \\ \\ \varepsilon = V + Ri \end{cases} \tag{3.4}$$

Bu denklem sistemi çok sayıda çözüme sahip olabilir. Örneğin Şekil 3.5.b. ' deki A ve B noktaları için bir çözüm vardır ancak bütün noktalar kararlılık koşullarını sağlamaz.

Belirli bir zamanda deşarj akımında δi akım değişiminin olduğunu düşünelim. Bu deşarj üzerindeki voltajın $\delta V = \left(\frac{dV}{di}\right)\delta i$ şeklinde değişimine ve aynı zamanda $\Delta\varepsilon = -L\frac{d(\delta i)}{dt}$ şeklinde öz indüksiyon elektromotor voltajı değişimine neden olur. Bu durumda eşitlik 3.4.

$$\varepsilon + \Delta\varepsilon = V + \delta V + R(i + \delta i) \tag{3.5}$$

olarak yazılabilir. ε ve Δε değerleri eşitlik 3.5.' de yerine yazılırsa;

$$L\frac{d}{dt}(\delta i) = -\left(R + \frac{dV}{di}\right)\delta i \tag{3.6}$$

bulunur. Bu denklemin çözümü

$$\delta i = (\delta i)_0 \exp\left[-\frac{1}{L}\left(R + \frac{dV}{di}\right)t\right] \tag{3.7}$$

şeklindedir. Bu nedenle eğer,

$$R + \frac{dV}{di} < 0 \tag{3.8}$$

olursa $(\delta i)_0$ başlangıç değişimi zamanla büyüyecek veya

$$R + \frac{dV}{di} > 0 \tag{3.9}$$

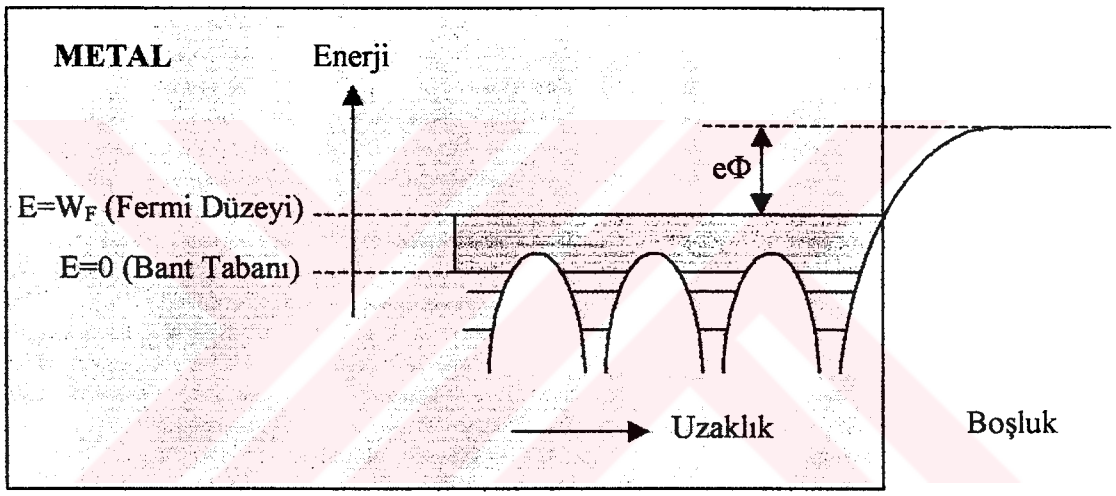
olursa $(\delta i)_0$ başlangıç değişimi zamanla sıfır olacaktır.

$R + \frac{dV}{di} < 0$ durumunda kararlı olmayan bir deşarj oluşurken, $R + \frac{dV}{di} > 0$ durumunda kararlı halde bir deşarj oluşur. Eşitlik 3.9. ile verilen kararlılık koşulu Kauffman tarafından elde edilmiştir (Roth, 1995). Eşitlik 3.9.' dan $\frac{dV}{di} > 0$ pozitif eğimli akım voltaj karakteristiğinin bölgeleri için karakteristiğin bu kısmındaki bütün noktaların kararlı olduğu görülmektedir. Şekil 3.5.b.' deki negatif eğimli karakteristikler durumunda sadece B noktasının kararlılık koşulunu sağladığını görebiliriz.

4. KATOTTAN ELEKTRON EMİSYONU

4.1. Metallerden Elektron Sökülmesi ve İş Fonksiyonu

Elektronların katılardan yayılmalarına karşı engel, bu elektronların katı içindeki pozitif iyon kafesi tarafından çekilmesidir. Şekil 4.1.' de katı içindeki elektronlar için potansiyel-uzaklık diyagramı gösterilmiştir (Rose et al., 1986).



Şekil 4.1. Katı içinde bulunan elektronlar için potansiyel-uzaklık diyagramı.

Bu şekil üzerinde metalin yüzeyine yakın olan bir elektronun potansiyel enerjisi, atom merkezleri çizgisi boyunca uzaklığın fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Bu şekilde periyodik potansiyel çukurları, pozitif iyonların çevresinde yer alırlar. İletkenlik bandındaki elektronların enerjisi ile uzaklığın fonksiyonu olarak çizilen potansiyel enerjisi eğrisi, şekilde üst üste gösterilmiştir. Sıfır enerji düzeyi iletkenlik bantının altına gelişigüzel konmuştur. Eğer sıcaklığın etkisi göz önünde bulundurulmazsa, W_F Fermi düzeyine kadar olan bütün elektronik seviyeler elektronlarla doldurulmuş olur. Bir elektronun Fermi düzeyinden metalin dışındaki boşluğa çıkarılması için elektrona verilmesi gereken enerji $\varphi=e\Phi$, " İş Fonksiyonu " olarak adlandırılır. Φ gerilimi, metalin yüzeyindeki pozitif iyonların çekimini yenmek için gereklidir. İş fonksiyonu φ' nin büyüklüğü, Fermi düzeyi W_F 'nin büyüklüğüne, enerji engelinin yükseklik ve

şekline bağlıdır. Enerji engeli elektron yayan yüzeyin yapı ve bileşimine bağlıdır. Tablo 4.1.' de bazı materyaller için iş fonksiyonu değerleri verilmiştir (Kittel, 1996).

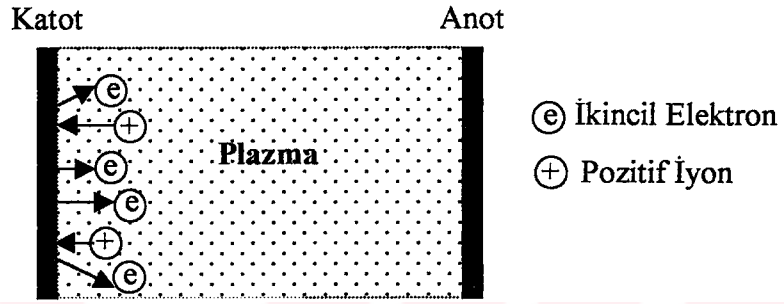
Tablo 4.1. Bazı metaller için elektron iş fonksiyonu değerleri.

Element	Yüzey Düzlemi	İş Fonksiyonu(eV)
Ag	(100)	4.64
	(110)	4.52
	(111)	4.74
Cs	Çok-Kristal	2.14
Cu	(100)	4.59
	(110)	4.48
	(111)	4.98
Ni	(100)	5.32
	(110)	5.04
	(111)	5.35
W	(100)	4.63
	(110)	5.27
	(111)	4.47

İş fonksiyonu kristal yüzeyinin hangi düzlemden oluştuğuna bağlıdır. Çünkü yüzeyde oluşan elektrik çift tabaka, pozitif iyon merkezlerinin sayısal yoğunluğuna bağlıdır. Bu çift tabakanın oluşması yüzey iyonlarının simetrik olmayan bir ortamda (bir tarafta vakum ve diğer tarafta kristal) bulunmalarından kaynaklanır.

4.2. İkincil Elektron Emisyonu

Katottan ikincil elektron emisyonu, lüminesans deşarjda ve Townsend rejiminde meydana gelen akımları korumak için önemli rol oynar. Şekil 4.2.'de iyonların katota vurmasıyla oluşan ikincil elektron emisyonu mekanizması gösterilmiştir (Roth 1995).



Şekil 4.2. Plazma içindeki iyonlarla katottan ikincil elektron emisyonu.

İkincil elektron emisyonu ;

$$\gamma_i = \frac{\text{Katot yüzeyinden yayınlanan elektron sayısı}}{\text{Katot yüzeyine gelen iyon sayısı}} \qquad (4.1)$$

şeklinde tanımlanan ikincil elektron emisyon katsayısı ile ifade edilir (Roth, 1995). İkincil elektron emisyonu katot yüzeyine pozitif iyonların, uyarılmış atomların, elektronların ve fotonların vurması ile oluşabilir. Bu nedenle ikincil elektron emisyonu katsayısı, katot yüzeyine gelen parçacık cinsini belirlemek için alt indislerle ifade edilir.

Pozitif iyonların katot yüzeyine vurması ile oluşan ikincil elektron emisyonu potansiyel emisyonu hipotezi ile açıklanır. Bu durumda metal yüzeyi üzerine gelen iyonların, metal içindeki elektronları çekerek içinde bulundukları potansiyel engelini aştıkları varsayılmaktadır. 1928 yılında Penning tarafından geliştirilen bu hipoteze göre, yüzeye atomik boyutlar uzaklığında yaklaşan bir iyonun oluşturacağı elektriksel alan, yüzeydeki elektronun içinde bulunduğu potansiyel kuyusunu bir potansiyel bariyerine dönüştürmektedir. Bu elektrik alan nedeniyle oluşan bu bariyer, düşük ve

dardır. Metal içinden bir elektron, katot yüzeyine yaklaşan bir iyona bu bariyer içinden tünelleme yapar ve onu nötürleştirir. Bu nedenle yüzeye gelen bir iyonun enerjisi, en az iş fonksiyonunun iki katı olmalıdır. Çünkü katot yüzeyinden bir ikincil elektrona sahip olmak için, metalden iki tane elektronun bu bariyer içinden tünelleme yapması gerekir. Bu elektronlardan bir tanesi gelen iyonu nötralize edecek, diğeri ise ikincil elektron olacaktır. İkincil elektron emisyonu katsayısı için katot yüzeyine gelen iyonun enerjisi E ve iş fonksiyonu φ' ye bağlı, % 50 oranında deneylerle uyumluluk gösteren aşağıdaki ifade önerilmiştir (Raizer, 1991).

$$\gamma_i \cong 0.016\,(E - 2\varphi)\ eV \tag{4.2}$$

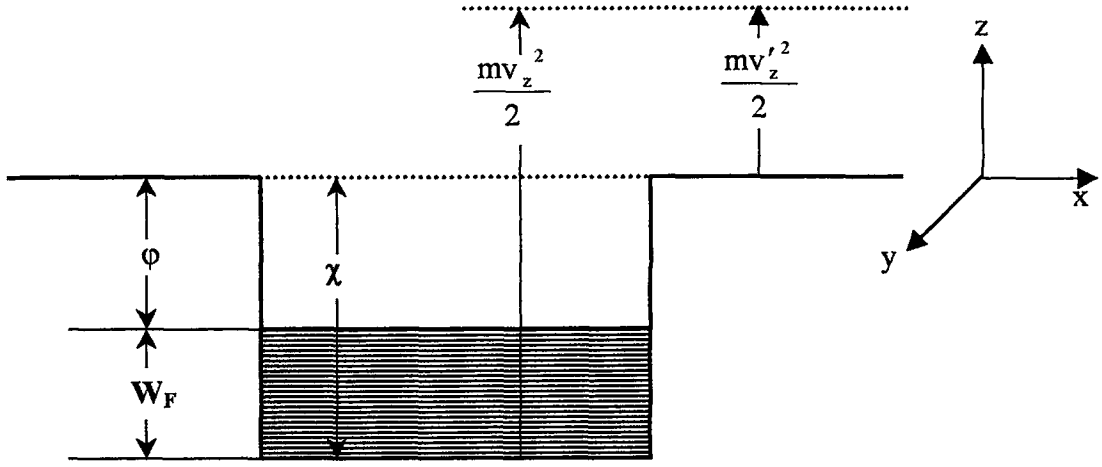
4.3. Termoelektronik Emisyon

Elektriksel ark deşarj durumunda katottan termoelektronik emisyon ile elektron emisyonu meydana gelir. Bu durumda metalden bir elektron koparılması için verilmesi gereken enerji, ısı enerjisi ile aktarılır. Isıtılan metal içindeki serbest elektronlar, verilen bu enerjiyi kinetik enerjilerini arttırmak için alırlar. Yeterli derecede kinetik enerjiye sahip olan elektronlar, içinde bulundukları enerji engelini aşarak metalin dışına çıkabilirler. Metal içindeki elektronların metalin ısıtılmasıyla metal dışına çıkması olayı " Termoelektronik Emisyon " olarak adlandırılır. Bu şekilde oluşan termoelektronik akım metalin ısıtma sıcaklığının artmasıyla artar (Şekil 4.4.).

Şekil 4.3.'de, Şekil 4.1. ile verilen elektronların katı içindeki dağılımları daha basitleştirilerek verilmiştir. Homojen ve temiz bir yüzey için iletim bandındaki elektronlar,

$$v_z \geq \sqrt{\frac{2\chi}{m}} \tag{4.3}$$

koşulunu sağlayan hıza sahipse, Şekil 4.3.'de gösterilen yüzeyin normaliyle z doğrultusunda metalden çıkabilirler. Burada χ; elektron düşkünlüğüdür.



Şekil 4.3. Metalden elektron koparılması.

Metal yüzeyi üzerinde hız bileşenleri $v_x \in (-\infty , +\infty)$ ve $v_y \in (-\infty , +\infty)$ ile verilen her değeri alabilir. Belirli bir sıcaklıkta bir elektronun $W(v_x , v_y , v_z)$ enerjisine sahip olma olasılığı,

$$P(W,T) = \frac{1}{1+\exp\left(\frac{W - W_F}{kT}\right)} \tag{4.4}$$

Fermi-Dirac dağılımı ile verilir. Burada W_F ; Fermi enerji seviyesini göstermektedir. z doğrultusundaki akım yoğunluğunu,

$$j_z = (1-r)e\int_{-\infty}^{+\infty} v_x \int_{-\infty}^{+\infty} v_y \int_{v_z^0}^{+\infty} v_z dn \tag{4.5}$$

şeklinde yazabiliriz. Bu denklemdeki e ; elektronun yükünü ve dn ; P(W,T) olasılığı ile hız uzayındaki hal sayısının çarpımıdır. Bu nedenle dn ;

$$dn = 2\left(\frac{m}{h}\right)^3 P(W,T) dv_x dv_y dv_z \tag{4.6}$$

ile verilir. Eşitlik 4.5.'deki r; metal vakum sınırındaki potansiyel bariyeri üzerinde, metal elektronlarının iç yansıma katsayısıdır. Bu yansıma katsayısı metal içindeki elektrona eşlik eden dalga boyu $\lambda = \frac{h}{mv}$, vakum içindeki elektrona eşlik eden dalga boyundan farklı olduğu için eşitlik 4.5.'de yazılmıştır. Eşitlik 4.5. ile verilen ifadedeki integraller alınırsa ;

$$j_z = A(1-r)T^2 \exp\left(\frac{-\varphi}{kT}\right) \tag{4.7}$$

ile verilen Richardson-Dushman bağıntısı elde edilir (McDaniel, 1964). Burada $A = \frac{4\pi emk^2}{h^3} = 1{,}2.10^6\,Am^{-2}K^{-2}$ ile verilen Richardson sabitidir. Bu A sabitindeki m, eğer elektronun iletim bandındaki efektif elektron kütlesini düşünecek olursak, vakum içindeki elektron kütlesinden farklı bir değere sahip olabilir. Bu durumda A sabiti farklı değerler alabilir (Gündüz, 1992). Bununla birlikte iş fonksiyonu da sıcaklıkla değiştiği için eşitlik 4.7.'de verilen akım yoğunluğu, aynı metal için iş fonksiyonunun değişmesine de bağlıdır. Eşitlik 4.7.'yi kullanarak, metaller için satürasyon akım yoğunluğu ölçümleri ile elde edilmiş verilerle çizilmiş ve eğimi (-φ/k) olan $\ln\left(j/T^2\right) = f\left(\frac{1}{T}\right)$ grafiğini kullanarak, elektronların iş fonksiyonlarını bulmak mümkündür.

4.3.1. Katkılı Metallerle Termoelektronik Emisyon

Tungsten iş fonksiyonu yüksek (4.5 eV) olduğu halde, yüksek erime noktası ve düşük gaz basıncı nedeniyle ısıl etki ile elektron yayan en kullanışlı saf metaldir. Bununla beraber saf tungsten kullanmanın bazı dezavantajları vardır. % 0.5-2 toryum oksit veya daha az miktarlarda diğer bileşikler (Al_2O_3-Na_2O-SiO_2) katılmadan üretilirse, tungsten 2000 °K sıcaklıkların üzerine ısıtıldığında tane sınırları tel eksenine çapraz olacak şekilde aşırı tane büyümesi gösterir. Bu yalnız gevreklik ve mekanik dayanım

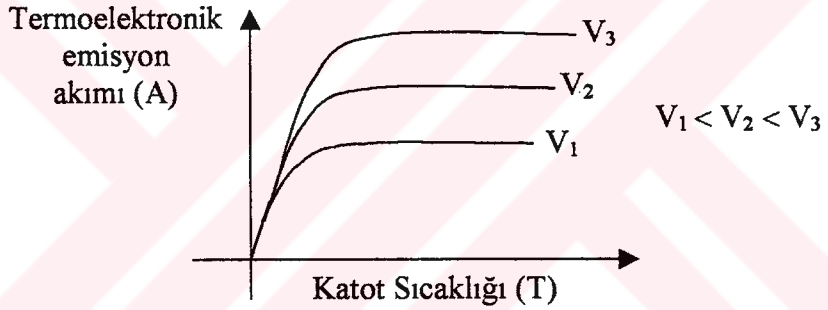
kaybına değil aynı zamanda tane sınırı kaymasına ve aşırı yerel ısınma hasarına neden olur. Eğer uygun katkı elemanı (ThO_2) kullanılırsa, 2300-2500 °K çalışma sıcaklıklarındaki tane büyümesi önlenebilir (Rose et al., 1986).

Toryumlanmış tungsten telleri eğer kısa bir süre vakumda 2500-2800 °K'e ısıtılırsa daha iyi elektron yayıcı olurlar. Bu sıcaklıkta içte bulunan toryum oksitin büyük bir kısmı telin çalışması esnasında tane sınırı yayınmasıyla yüzeye yayınabilen toryum metaline indirgenir. Toryum metalinin iş fonksiyonu 3.4 eV olduğu halde tek katlı toryum atomları ile kaplanmış bir tungsten telinde ölçülmüş iş fonksiyonu 2.6 eV 'tur. Bu farklı sonucun nedeni yüzeyde artı bir yük tabakası gibi davranarak elektronların kaçmasını kolaylaştıran elektrik dipol tabakasının oluşmasıdır. Tungsten üzerine tek kat halinde oluşan baryum, tungstenin iş fonksiyonunu 1.6 eV'a düşürür ancak elektronegatif olan oksijenin tek katı bu fonksiyonu 9.1 eV'a çıkarır. Bununla birlikte bir tungsten termal yayıcının daha az oksijenle kaplaması baryumun tungsten tarafından adsorbsiyonunu arttıracak ve iş fonksiyonunu 1.1 eV gibi düşük bir düzeye indirebilecek bir yüzey oluşturur (Rose et al., 1986).

Bununla birlikte baryum-kalsiyum alüminat ile aşılanmış gözenekli tungstenden yapılmış yayıcılar ve baryum stronsiyum-kalsiyum karbonat, zirkonyum hidrit ve nikel tozlarının disk şeklinde preslenmesi ve sinterlenmesi yöntemi ile yapılmış yayıcılar da kullanılmaktadır. Bu tür katotlar yüksek bir akım yoğunluğu verecek şekilde yaklaşık 1400 °K altındaki sıcaklıklarda çalışabilir. Bu türdeki yayıcı film katotları 1904'te Whenelt tarafından geliştirilmiş ve geniş kullanma alanına sahip oksit (BaO+SrO) kaplı katotlarla karıştırılmamalıdır. Bugün bunlar 1000 °K de yüksek bir emisyon akım yoğunluğu verdiklerinden katot ışını üretiminde, televizyon ve diğer vakum tüplerinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlar nikel alaşımından gömlek şeklinde bir telin veya şeridin baryum ve stransiyum karbonat pastası ile üniform bir tabakası ile dikkatlice kaplanması ile elde edilir (Rose et al., 1986).

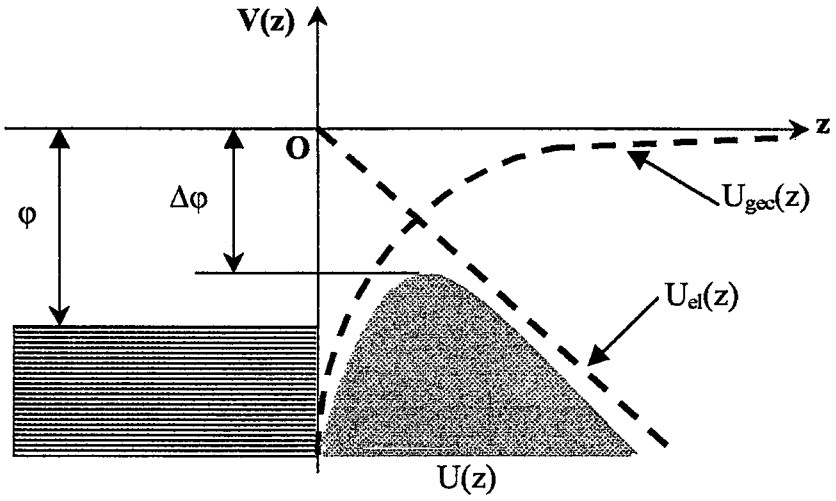
4.3.2. Schottky Etkisi

Termoelektronik emisyon ile katottan yayınlanan elektronlar elektrotlar arası uzayda birikmeye başlar ve daha sonra katottan yayınlanan elektronlar için bir potansiyel engeli oluştururlar. Bu katot önünde biriken yükler, uzay yükleri olarak adlandırılır. Uzay yüklerinin oluşturduğu potansiyel engeli, katottan yayınlanan elektronların anoda ulaşmasını geciktirir ve hatta anota ulaşmasını engelleyerek termoelektronik akımın yavaşça bir doyuma ulaşmasına neden olurlar. Ancak elektrotlar arasına uygulanan voltaj artırılırsa, termoelektronik akımın doyuma ulaşmadığı, uygulanan voltajın artmasıyla yavaşça arttığı deneysel olarak gözlenmiştir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. Elektrotlar arasına uygulanan potansiyel ile termoelektronik akımın artışı.

Bu, elektronların elektrotlardan yalnızca ısınmadan dolayı ayrılmadığını, aynı zamanda elektrotlar arasına uygulanan voltajın değeriyle artan elektrik alandan dolayı da elektrotları terk ettiğini ispatlamaktadır. Yüksek alanlar katot yüzeyindeki potansiyel enerji engelini değiştirerek yayılmayı arttırırlar. Bu durum şematik olarak Şekil 4.5.'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. Potansiyel bariyerinin Schottky etkisi ile daralması ve potansiyelin azalması.

Metal yüzeyine uygulanan E elektrik alanı nedeniyle yüzeyden z mesafesinde,

$$U_{el}(z) = -eEz \tag{4.8}$$

şeklinde bir potansiyel oluşacaktır. Yüzeyden z mesafesine gelmiş bir elektron yüzey içindeki z mesafesinde bulunan bir elektrona ;

$$\frac{e^2}{(2z)^2} \tag{4.9}$$

ile verilen itici kuvvet uygulayacaktır. Bu itici kuvvet metal yüzeyi civarında ;

$$U_{gec} = -\frac{e^2}{(4z)} \tag{4.10}$$

geciktirici potansiyeli üretecektir.

Yukarıda verilen iki potansiyelin toplamı Şekil 4.5.'de gösterildiği gibi bir maksimuma sahip olan U(z) potansiyel dağılımını verecektir. Bu maksimum ile Oz ekseni arasındaki mesafe potansiyel bariyerini $\Delta\varphi$ kadar azaldığını göstermektedir. Bu φ'den daha düşük enerjiye sahip elektronların Schottky etkisi şeklinde isimlendirilen etki ile metalin dışına çıkabilmelerine izin verildiğini ifade etmektedir. Bu potansiyel azalması $U(z)=U_{el} + U_{gec}$ fonksiyonunun maksimumunu alarak hesaplanabilir ve bu hesap ile $\Delta\varphi$;

$$\Delta\varphi = -e\sqrt{eE} \tag{4.11}$$

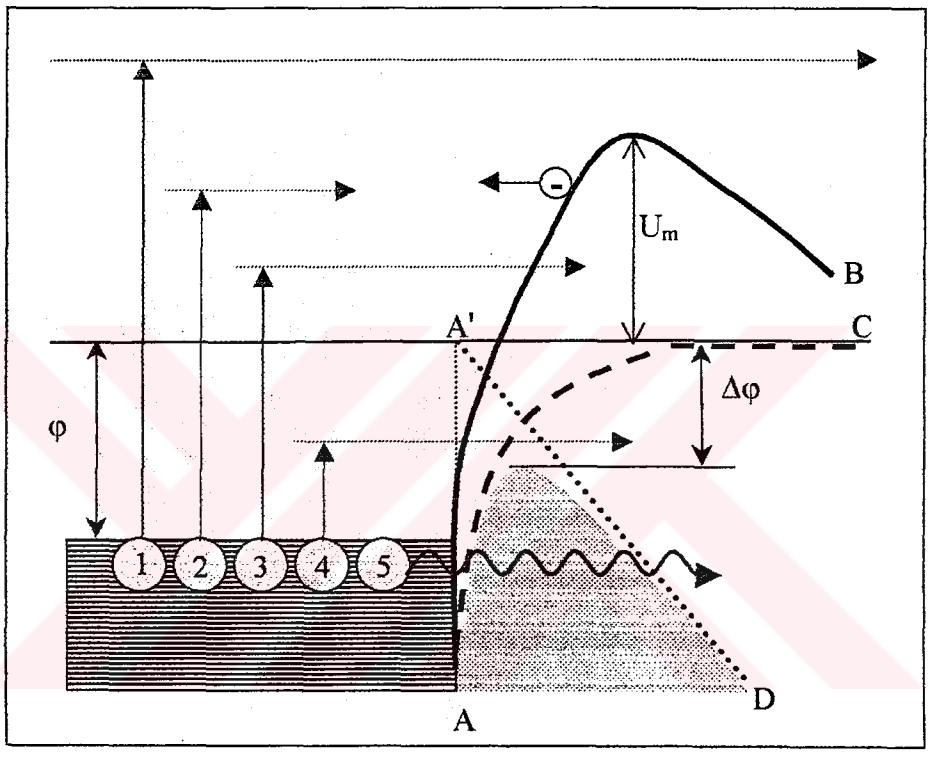
şeklinde bulunur (Raizer, 1991). Eşitlik 4.11.'de bulunan $\Delta\varphi$ değerini eşitlik 4.7.'de kullanarak,

$$j = A(1-r)T^2 \exp\left(\frac{-\varphi - e\sqrt{eE}}{kT}\right) \tag{4.12}$$

değiştirilmiş Richardson-Dushman bağıntısı bulunur. Eşitlik 4.12.'den görüldüğü gibi iş fonksiyonunun Schottky etkisi ile azalması, akım yoğunluğunun artışına neden olmaktadır.

4.4. Alan Emisyonu

Elektron yayınlayan bir elektrotun yüzeyinde meydana gelen negatif uzay yüklü bulut Şekil 4.6.'da AB eğrisi ile gösterilen yeni bir potansiyel bariyerini (U_m) üretir.



Şekil 4.6. Potansiyel bariyerinin daralması ve tünelleme.

Bu nedenle sadece U_m'den daha büyük enerjiye sahip (1) elektronları metalden kurtulabilir. Yeterli enerjiye sahip olmayan (2) numaralı diğer elektronlar bariyer tarafından yansıtılır. Katot ile anot arasına elektronlar için hızlandırıcı bir voltaj uygulanıldığı zaman U_m azalır. Bu voltaj yeterince yüksek ise U_m sıfır olabilir (AC eğrisi ile gösterildiği gibi) ve anot termal olarak uyarılmış yani ısıtılmış (3) tipindeki elektronlar tarafından oluşturulan elektronik akımın tümünü toplayabilir.

Eğer anot ile katot arasına uygulanan voltaj daha fazla arttırılırsa, potansiyel bariyeri AD şeklini alarak iş fonksiyonunun azalışı gözlenir. Bu (4) elektronları nedeniyle kaydedilen elektronik akımın artışına neden olur (Schottky etkisi).

Anot ile katot arasına uygulanan voltaj daha da arttırılırsa metalin düşük sıcaklıklarında dahi, çoğunlukla Fermi seviyesi civarından gelen elektronlarla tünelleme etkisi nedeniyle (5) elektronları tarafından bu bariyerin geçilmesine izin veren potansiyel bariyerinin azalması meydana gelir. Bu nedenle metal yüzeyindeki elektrik alan şiddetinin artması yalnızca yüksek potansiyel bariyerinin azalmasına değil aynı zamanda

$$j_f = CE^2 \exp\left[-\frac{8\pi(2m\varphi)^{1/2}}{3hE}\right] \qquad (4.13)$$

Fowler-Nordheim tarafından verilen bağıntı ile ifade edilen, alan emisyonu veya soğuk emisyon olarak bilinen yeni tip elektron emisyonunun ortaya çıktığı bu bariyerin genişliğinin azalmasına da neden olur. Bu bariyerin genişliğinin daralması sonucu (5) elektronları, bariyeri aşmak yerine bariyer içinden tünelleme yapmaktadırlar.

Önemli miktarda alan emisyonuna sahip olmak için katot yüzeyi seviyesinde 10^9 V/m mertebesinde elektrik alanlara sahip olmak gerekir. Tablo 4.2.'de tungsten metalinin uygulanan elektrik alanlara göre elektron emisyonu akım yoğunlukları verilmiştir.

Tablo 4.2. Tungsten metalinin alan emisyonu karakteristiği (Roth, 1995).

E(V/m)	J_f(A/m^2)
10^5	$3x10^{-7}$
$5x10^9$	$3.5x10^7$
10^{10}	$9.5x10^{12}$

Tablo 4.3.'de sırasıyla 2000°K ve 3000°K sıcaklıklarında ve $2x10^9$ V/m ile $5x10^9$ V/m elektrik alanlarda Schottky etkisi ve alan emisyonu için ve termoelektronik emisyon için akım yoğunlukları değerleri verilmiştir (Farral, 1970).

Tablo 4.3. $\varphi = 4.5$ eV iş fonksiyonuna sahip tungsten için emisyon akım yoğunluğu değerleri.

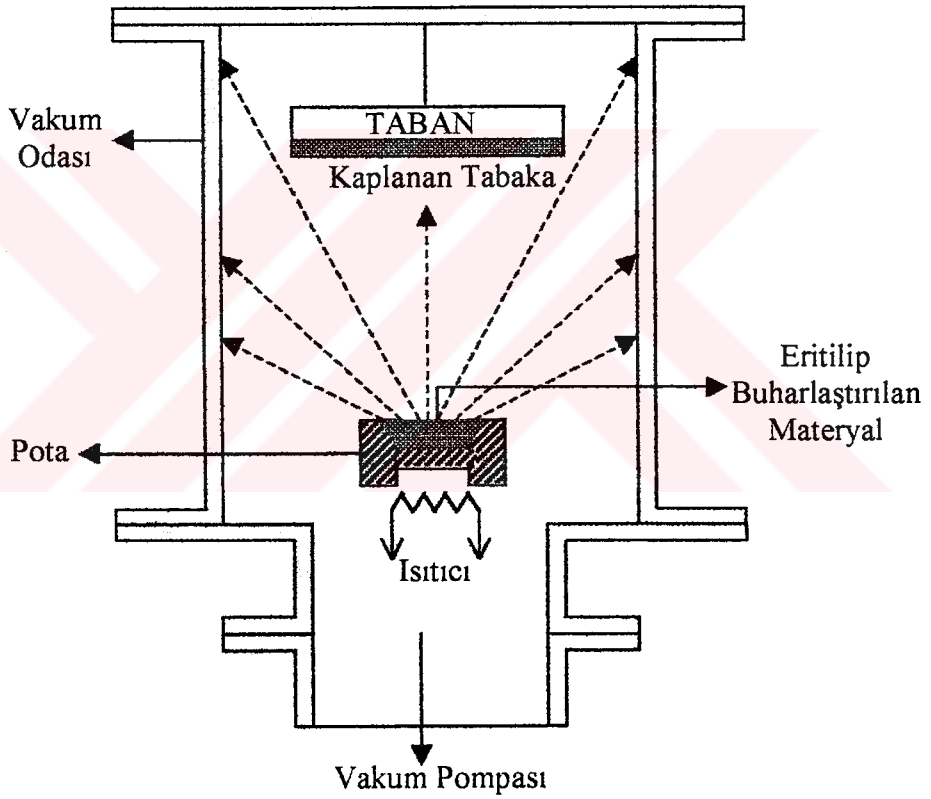
Emisyon Tipi	Sıcaklık	E=2x10^9 V/m Akım Yoğunluğu (A/m^2)	E=5x10^9 V/m Akım Yoğunluğu (A/m^2)
Termoelektronik	2000 °K	2.2x10	2.2x10
	3000 °K	3.0x10^4	3.0x10^4
Schottky	2000 °K	4.2x10^5	1.2x10^8
	3000 °K	2.1x10^8	9.7x10^9
Alan	2000 °K	4.7x10^0	3.9x10^9
	3000 °K	4.7x10^0	3.9x10^9

Görüldüğü gibi orta elektrik alan şiddetleri için Schottky emisyonu, termoelektronik emisyon ve alan emisyonundan daha büyük bir akım yoğunluğu vermektedir. Çok yüksek elektrik alanlarda elektron emisyonu çoğunlukla alan emisyonu nedeniyledir.

5. METAL BUHARLARI ÜRETEN TEKNİKLER

5.1. Termal Buharlaştırma Tekniği

Termal buharlaştırma tekniği ile zor eriyen metalden yapılmış pota içine yerleştirilmiş materyalin buharlaştırılması ve bir taban üzerine kaplanması için kullanılan sistem şematik olarak Şekil 5.1.'de gösterilmiştir (Roth, 2001).



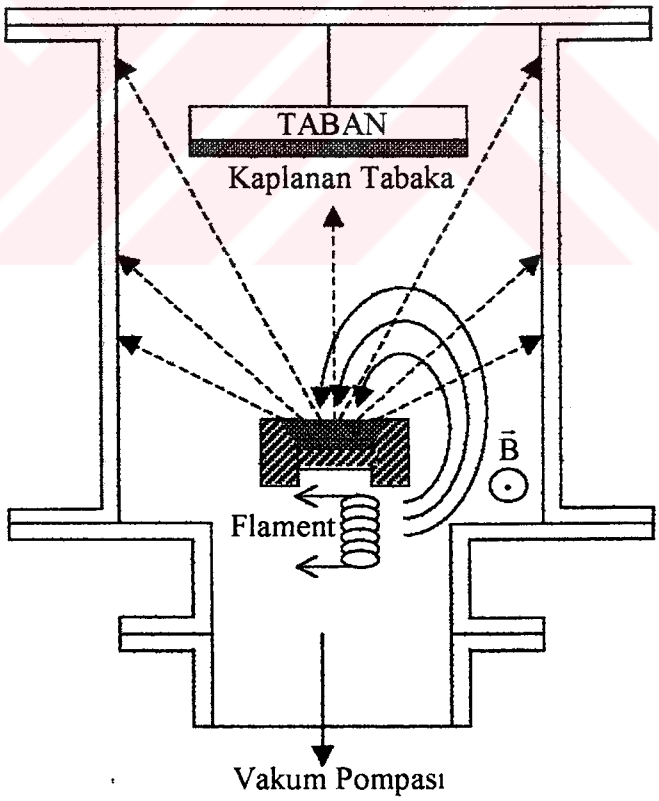
Şekil 5.1. Termal buharlaştırma sistemin şematik gösterimi.

Termal buharlaştırma tekniğinde, zor eriyen metalden (tungsten, molibden) yapılmış ve içine buharlaştırılacak materyalin yerleştirildiği pota, bir vakum odasının içine yerleştirilmiştir. Bu potanın alt kısmına yerleştirilen flament şeklinde bir ısıtıcı ile bu pota ve dolayısıyla pota içindeki materyal ısıtılır. Pota içindeki materyalin erime sıcaklığı, potanın yapıldığı materyalin erime sıcaklığından daha düşüktür. Isıtıcı

tarafından potaya aktarılan ısı, pota içindeki materyalin erime sıcaklığına ulaştığında pota içindeki materyal erimeye başlar ve daha sonra hızlı bir şekilde vakum odası içinde her doğrultuda buharlaşır. Vakum odası içinde herhangi bir yere yerleştirilen taban üzerine, istenilen kalınlıkta buharlaşan materyalin kaplaması yapılabilir. Buharlaştırılacak materyal, zor eriyen bir pota üzerine veya tel üzerine yerleştirilerek bu pota veya tel üzerinden akım geçirilerek de buharlaştırılabilir (Akan, 1994).

5.2. Elektron Bombardımanı İle Buharlaştırma Tekniği

Şekil 5.2.'de gösterilen elektron bombardımanı ile buharlaştırma ve kaplama sistemi de vakum koşullarında çalışır (Roth, 2001).

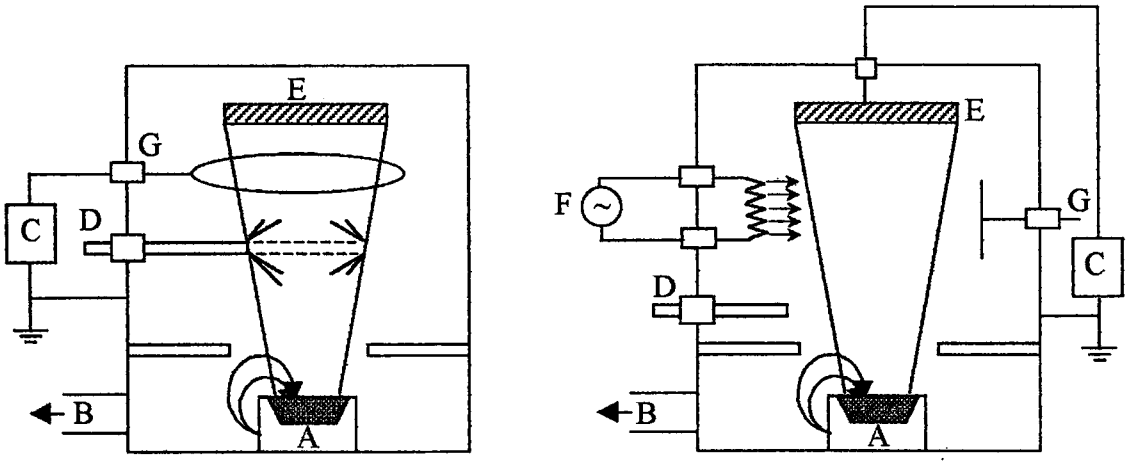


Şekil 5.2. Şiddetli elektron bombardımanı ile ısıtılıp buharlaştırarak yoğunlaştırma tekniğinin şematik diyagramı.

Burada buharlaşan atomların ortalama serbest yolları, taban ve pota arasındaki mesafeden daha büyük ya da onunla kıyaslanabilir düzeydedir (Roth, 2001). Termal buharlaştırma tekniğinde olduğu gibi buharlaştırılacak materyal, zor eriyen metalden yapılmış bir pota içine yerleştirilmiştir ve pota içindeki materyal potanın altında bulunan flament tarafından yayınlanan ve bir manyetik alanla yönlendirilen enerjik elektronlarla bombardıman edilerek ısıtılır ve buharlaştırılır. Potanın yanındaki yaklaşık 10 mT civarındaki bir manyetik indüksiyon, elektron demetinin flamentten 270° 'lik bir yörünge izlemesini sağlar. Bu yörünge, bir anot gibi görev yapan buharlaştırıcı pota içindeki erimiş metale ulaşıncaya kadar elektronların enerji kazanmasına yetecek bir yörüngedir. Sıcak flamentten yayınlanan safsızlıklar buharlaşan metale ya da bu geometrideki tabana ulaşmaz. Bu nedenle flament potanın altına konmuştur (Watchman and Haber, 1993). Flamentten yayınlanan elektronlarla buharlaşan metal atomlarının iyonlaşması istenmediği için flament potanın alt kısmına yerleştirilmiştir. Ancak bu teknik ile buharlaşan atomların çok az bir kısmı iyonlaşabilmektedir. Yine de her iki teknik düşük enerjili kaplama teknikleri içinde yer alır. Bu nedenle bu tekniklerle çok sayıda boşluk ve safsızlık atomlarına sahip zayıf yoğunlukta filmler üretilir.

5.3. Elektron Bombardımanı İle Buharlaştırılarak Elde Edilen Metal Buharlarında Deşarj Üreten Teknikler

Termal buharlaştırma ile yüksek buharlaşma oranı elde edilmesine rağmen, buharlaşan metal yüzeyinden uzaklaştıkça metal atom yoğunluğu hızlı bir şekilde azalır. Bundan dolayı ve genellikle elektrotlar arasındaki büyük uzaklıklar nedeniyle, termal buharlaştırma durumunda saf metal buharlarında bir deşarj gözlenmez. Termal buharlaşma ile üretilen metal buharlarında deşarjlar üretmek için vakum odası içine sokulmuş destekleyici gaz kullanılması gereklidir (Bunshah, 1982). Şekil 5.3.'de bu tip deşarjlar için iki farklı sistem gösterilmiştir (Martin, 1990).



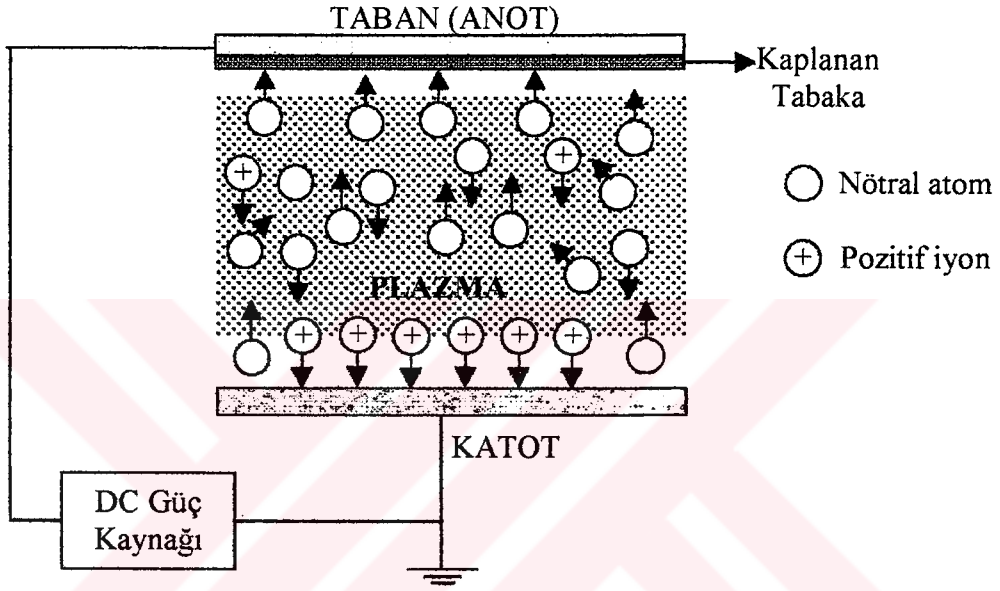
(a) (b)

Şekil 5.3. Destekleyici gaz karıştırılmış termal buharlaşma ile üretilen metal buharlarında deşarj oluşturulması. A: Elektron bombardımanı ile buharlaştırma kaynağı, B: Pompalama sistemi, C: Güç kaynağı, D: Reaktif gaz girişi, E: Kaplama yapılacak taban, F: Yardımcı elektron bombardımanı kaynağı, G: Anot.

Şekil 5.3.a.'da verilen deşarj G anodu ile topraklanmış vakum çeperleri arasında oluşur. Gaz D boşluğundan gönderilir ve sürekli pompalanır. İyonizasyon derecesini arttırmak ve deşarjın ateşlenmesini kolaylaştırmak için Şekil 5.3.b.'de gösterildiği gibi yardımcı deşarj kullanılır. Bu deşarj ısıtılmış F katodu ile G anodu arasında oluşturulur. Bu deşarj ile E taban anodu arasına bir voltaj uygulanılır. Metal atomlarının uyarılma ve iyonlaşma enerjileri genelde gaz atomlarının uyarılma ve iyonlaşma enerjilerinden çok küçük olduğu için, ana gaz deşarjda metal atomlarının çoğu uyarılmış ve iyonlaşmış haldedir. Bu deşarjlar saf metal buharında değil gaz-metal buharı karışımında deşarjlardır. Bu nedenle bu tekniklerle üretilen filmler, yalnızca buharlaştırılan metal atomlarını değil gaz atomlarını da içerir.

5.4. Söktürme (Sputtering)

Söktürme işlemi bir metal yüzeyine vuran iyonların bu metal yüzeyinden metal atomlarını sökmesi olayıdır (Campbell, 1978). Şekil 5.4.'de söktürme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Söktürme (Sputtering) işleminin şematik gösterimi.

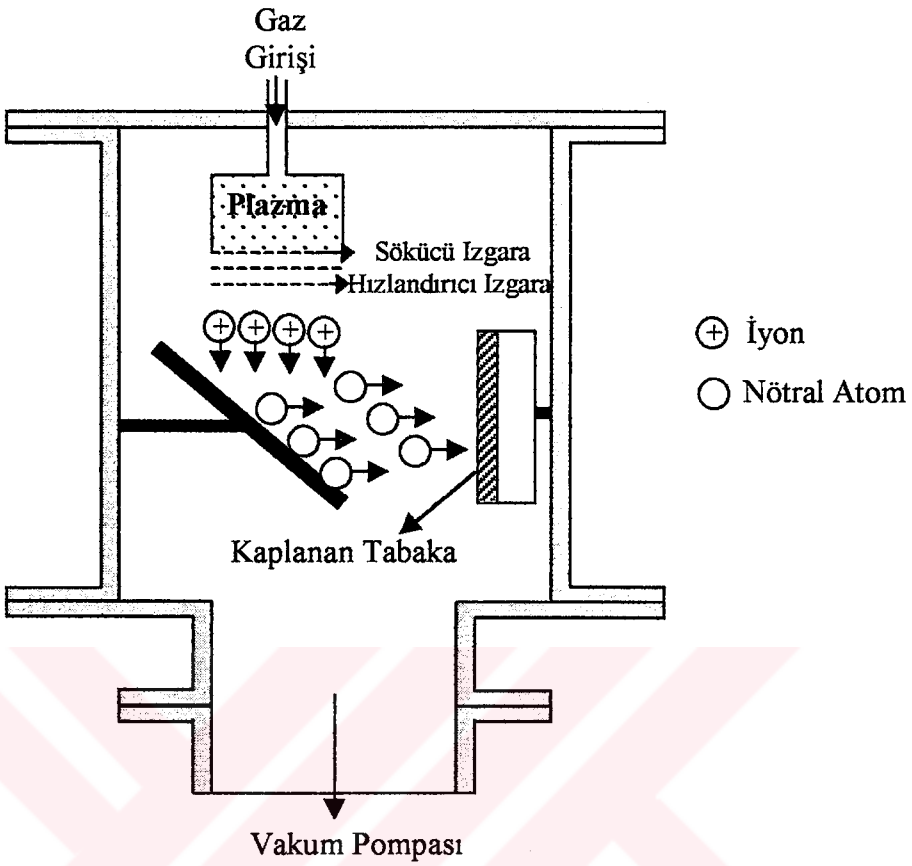
Bu işlem için öncelikle elektrotlar arasına bir soy gaz yani destekleyici gaz pompalanır. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj ile bu elektrotlar arasında bir plazma meydana getirilir. Söktürme işlemi burada kullanılan güç kaynağının cinsine göre değişik isimlerle anılır. Örneğin elektrotlar arasına uygulanan voltaj bir Radyo Frekans aralığında frekansa sahip voltaj titreşimlerini üreten kaynak ise elde edilen işlem RF söktürme olarak isimlendirilir. Elektrotlar arasında meydana gelen plazma, katotun ön kısmında bir potansiyel düşümü oluşturur. Plazma içindeki pozitif iyonlar bu potansiyel düşümünde katota doğru hızlanırlar ve bu hızla katota vururlar. Katota vuran pozitif iyonlar ikincil elektron emisyonu yapabildiği gibi katotun lokal ısınmalarına ve aşınmasına neden olur. Katot yüzeyinin bu bölgelerinden bir süre sonra nötral metal atomları sökülmeye başlar. Sökülen bu nötral atomlar katotun hemen karşısında bulunan anotun üzerindeki taban üzerine kaplanırlar (Thornton, 1983). Lokal olarak

ısınan bölgelerden mikrodamlacıklar da üretilebilir. Bu nedenle bu teknikte genelde anot üst kısma yerleştirilir. Kaplama yüzeyini iyonlar oluşturmadığı için bu yöntem düşük enerjili kaplama tekniğidir. Bu kaplama işleminde bir enerjik iyon kaynağı ve iyon demeti hedefi yoktur. Ancak kaplama yapılan nümunenin incelendiğinde yüzeyinin üzerinde metal atomları ile birlikte soy gaz atomları da gözükmektedir. Bu nedenle söktürme tekniği ile saf metal buharları kaplamaları elde edilemez.

Bununla birlikte elektrotlar arasındaki pozitif iyon sayısını arttırmak için, katotun arka kısmında mıknatıs kullanılır. Bu şekilde yapılan söktürme işlemi " Magnetron Söktürme " olarak adlandırılır. Uygulanan manyetik alan ile plazma içindeki elektronların yörüngesi doğrusaldan helizoidal bir yörüngeye çevrilir. Böylece elektronlar daha uzun yörüngelere sahip olacak ve daha çok çarpışma yaparak daha çok iyon oluşmasına neden olacaktır (Dorodnov and Petrosov, 1981).

5.5. Ayrı Bir Plazma Kaynağından Üretilen İyonlar İle Söktürme

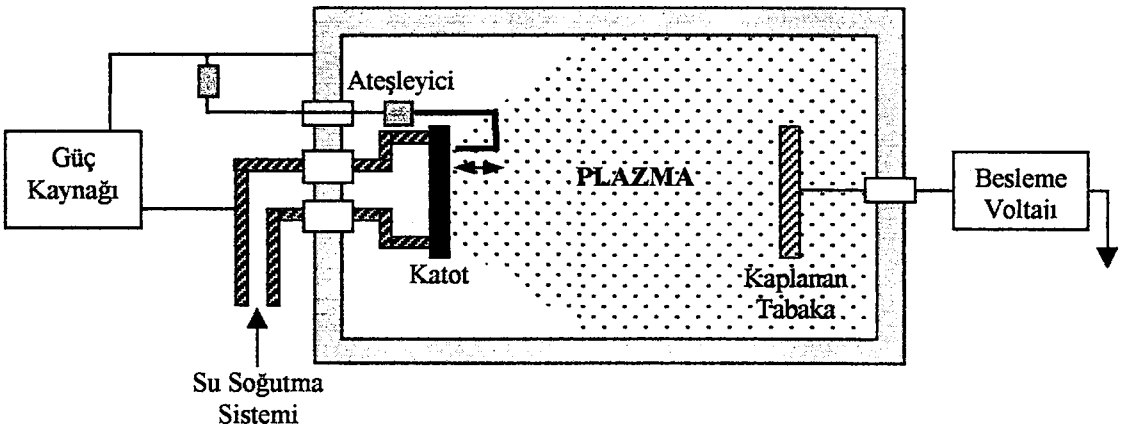
Bu durumda söktürme işlemi için elektrotlar arasında plazma oluşturulmaz. Ayrı bir kaynak ile üretilen plazmanın iyonları bir hedef üzerine gönderilir ve bu iyonlar hedef yüzeyinden söktürme yaparlar. Bu işlem Ion-Beam Sputtering (İyon Yayıcı Söktürme) olarak da isimlendirilir. Bu sistem Şekil 5.5.'de gösterilmiştir (Roth, 2001). İyon yayıcı söktürme ile kaplama işlemi bir çok giriş parametresinin bağımsız bir şekilde kontrol edilmesine izin verir. İyon enerjisi, iyon akımı yoğunluğu, hedefe geliş açısı, taban üzerine geliş açısı bağımsız olarak değiştirilebilir. Başlangıç iyon enerjisi, akım yoğunluğu sabit kalırken bağımsız bir şekilde ayarlanabilir (Müller, 1986). Bununla birlikte düşük basınç vakum işlemi söktürülen atomların çarpışma sayısını tabana gelmeden önce en aza indirir ve böylece gözenekli yapı oluşumu azalır ve adhezyon ve kaplanan tabaka kalitesi artar (Sundgren, 1985).



Şekil 5.5. Ayrı bir plazma kaynağından üretilen iyonlarla söktürme işleminin şematik diyagramı. Burada eğimlendirilmiş hedefe enerjitik iyon demeti vurur ve bu iyonların söktüğü metal atomları tabana doğru hareket ederek kaplama yaparlar.

5.6. Katodik Vakum Ark

Katodik vakum ark, su ile soğutulan katot materyalinin buharında meydana gelir ve kaplama metodu olarak 1971 yılında A.A. Snaper tarafından US. 3.625.848 patent nosu ile patent almıştır. Katodik vakum ark için kullanılan sistem şematik olarak Şekil 5.6.'da gösterilmiştir (Lindfors et al., 1986).



Şekil 5.6. Katodik vakum ark sisteminin şematik gösterimi.

Katodik ark kaynakları; su ile soğutulan katot, güç kaynağı, anot, ateşleyici, kontrol devresi, soğutucu sistem ve katot yüzeyindeki ark spotlarını sınırlandıran cihazdan oluşur. Su ile soğutulan katot, vakum odası içine yerleştirilmiştir ve aynı zamanda anot olan vakum odasının çeperlerinden izole edilmiştir. Katodik ark, katot yüzeyindeki ark spotlarının katotu erozyona uğratarak buharlaşması ile oluşur ve harici başka bir gaz kullanılması gerekmez (Daalder, 1976). Katot metalden, metal alaşımından veya yarıiletkenden yapılabilir. Ark deşarj yukarı aşağı hareket edebilen elektromanyetik olarak aktif olan tetikleyici tel tarafından vakum koşullarında oluşturulur. Tetikleyici ile katotun kontak olması süresince, bu kontak yerinin bölgesel aşırı ısınması oluşur ve bu nedenle ana katotlar arasında ark meydana gelir. Ark yüksek akımlarda meydana gelirken katot yüzeyi üzerinde parlak ve hareketli katot spotları ortaya çıkar. Toplam ark akımı 10^2-10^3A mertebesindedir. Katot materyali bu spotlardan sürekli olarak buharlaşır ve elektrotlar arasında tümüyle iyonlaşmış metal buharı plazması elde edilmiş olur (Randhawa, 1988).

Katot spotları seviyesindeki yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, katot materyalinin mikron büyüklüğünde parçaları (makroparçacık yada mikrodamlacık) da buharlaşma işlemi ile birlikte katot yüzeyinden sökülür. Bu kaplanan tabakanın düz olmasını engeller ve ayrıca film üzerinde boşluklar oluşturur (Daalder, 1976 ; Daalder, 1979). Bununla birlikte sürekli hareket eden ark spotları nedeniyle ark akımı da çok kararlı değildir. Ancak metal plazmasının yüksek iyonlaşma derecesi (neredeyse %100) ve

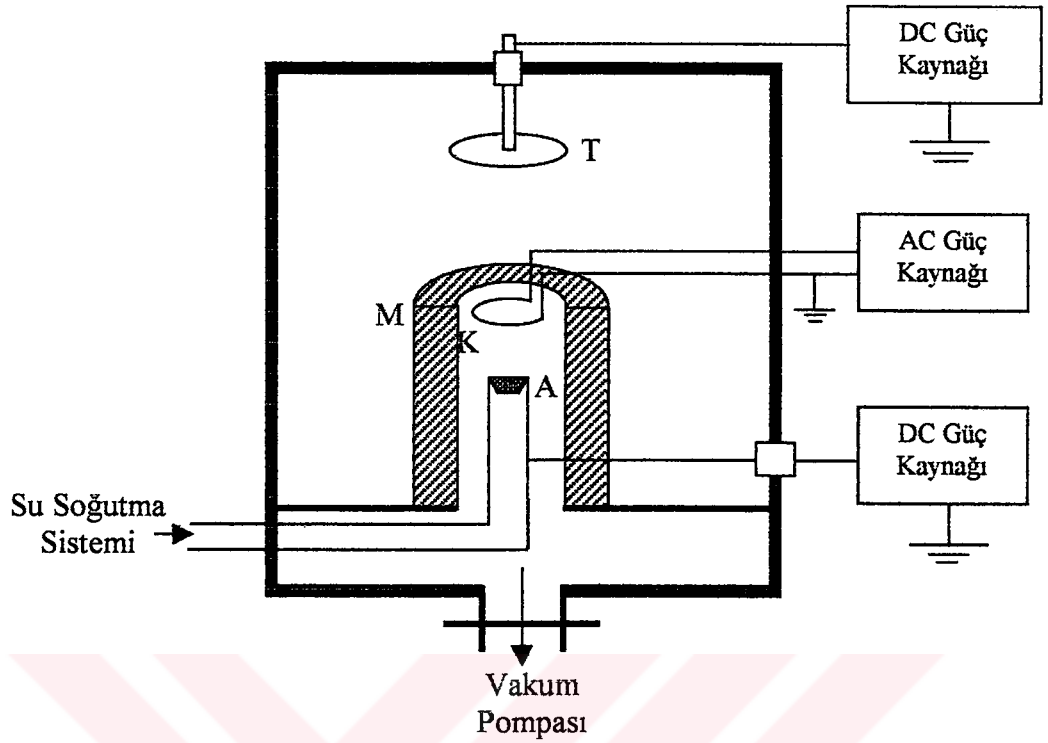
sistemin basitliği nedeniyle, bu metot bugün pek çok laboratuvarda ve üretim teknolojisinde kullanılmaktadır. Ark spotunun sayısı toplam katot akımına ve katotun bileşimine bağlıdır. Ark spotları 10^{-8}-10^{-4} m mertebesinde küçük boyutlardadır ve akım yoğunlukları 10^{6}-10^{12} A/m^2 kadar yüksektir ve katot yüzeyi üzerinde 10^{2} m/s hızlarında hareket ederler (Davis and Miller, 1969). Ark spotundan yayınlanan plazma ; elektronlar, iyonlar ve makroparçacıklar ve nötral metal buharı içerir. Nötral metal buharı, kütle transferinin küçük bir kısmını (%1-%2) oluşturur. Bu nedenle ark kaynağından kaplama materyali akısı, hemen hemen tümüyle iyonlar ve makroparçacıklardan oluşur (Daalder, 1976). Bir ark spotu tarafından üretilen plazma içindeki iyonların ortalama kinetik enerjisi 10 ile 100 eV arasındadır. Ortalama iyon enerjisi katot ile anot arasındaki potansiyel farkından daha büyüktür (Aksenov et al., 1981).

Bu fiziksel karakteristikler kaplanan filmler için film morfolojisinin kontrolü, düşük numune sıcaklığı, yüksek film yoğunluğu, yüksek film tutunması, bileşik filmlerin verimli sentezi ve uniformluk gibi avantajlar sunmaktadır (Lindfors et al., 1986). Ancak makroparçacık üreterek filmler üzerinde gözenek oluşmasına neden olduğu için kaplama teknolojilerinde sınırlı kullanım alanlarına sahiptir.

5.7. Anodik Vakum Ark

5.7.1. Manyetik Bobin Kullanarak Anot Buharlarında Deşarj Üreten Teknikler

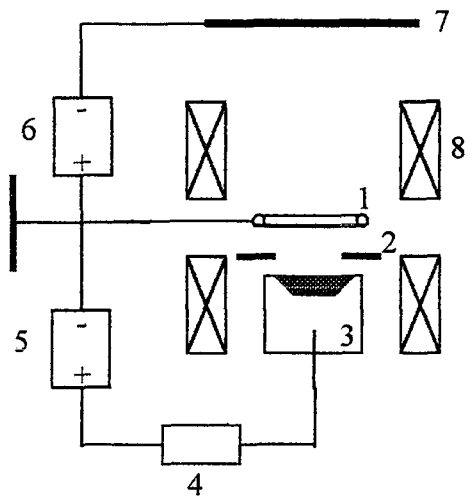
Anottan buharlaştırılan saf metal buharlarında deşarjın kullanımı ilk kez 1967 yılında 1.496.697 Fransa patent nosu ile H.J.Hamilton tarafından önerildi. Bu yöntemde yüzük şeklinde ısıtılmış katot (K) ve su soğutmalı anot (A) elektromanyetik mıknatıs içine yerleştirilmiştir. Aynı zamanda kaplamanın yapılacağı hedef (T) anotun üst kısmına yerleştirilmiştir. Bu sistem Şekil 5.7.'de gösterilmiştir (Musa, 1992).



Şekil 5.7. Vakumda saf metal buharı deşarjı üretmek için anotun manyetik alan içinde elektron bombardımanı ile buharlaşması için deneysel düzenek. K: Isıtılmış katot, A: Anot, M: Manyetik bobin, T: Kaplanan hedef.

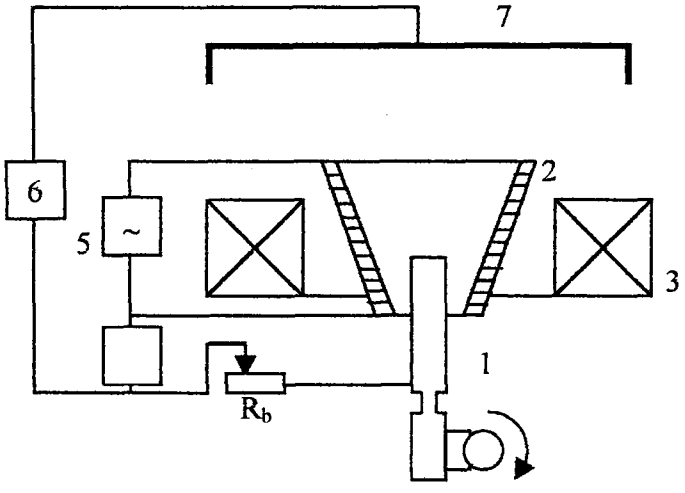
Katot ısıtıldıktan sonra elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulanılır. Buharlaştırılacak materyalin içine yerleştirildiği anot yüzeyine gelen hızlandırılmış ve manyetik olarak kuşatılmış elektron bombardımanı nedeni ile bu metal erir ve sonra kaynamaya başlar ve sonra metal buharları oluşur. Uygulanan yüksek voltaj nedeni ile eğer buharlaşma oranı yeterince yüksek ise saf metal buharlarında bir deşarj oluşturulabilir ve vakum koşullarında muhafaza edilebilir.

Benzer bir sistem V.A Sayenko ve arkadaşları tarafından 1983 yılında, XVI.ICPIG konferansında önerilmiştir (Sayenko, 1983). Bu sistem Şekil 5.8.'de verilmiştir (Musa, 1992).



Şekil 5.8. Hamilton sistemine benzer anot buharı deşarjı oluşturan sistem. 1: Isıtılmış katot, 2: Koruyucu yüzük, 3: Anot, 4: Ayarlayıcı direnç, 5-6: Güç kaynakları, 7: Kaplanan hedef, 8: Manyetik bobin.

Anot materyalinin elektron bombardımanı ile buharlaştırılmasının manyetik alan içinde toplanması ile yapılan benzer bir deneysel düzenek 1979 yılında A.M.Dorodnov ve arkadaşları tarafından önerildi (Dorodnov et al., 1979). Bu durumda büyük alanlı dışarıdan ısıtılan zor eriyen metal katot kullanılmıştır. Elektrotların yine bir manyetik alan içine yerleştirildiği bu deneysel düzenek Şekil 5.9.'da gösterilmiştir (Musa, 1992).

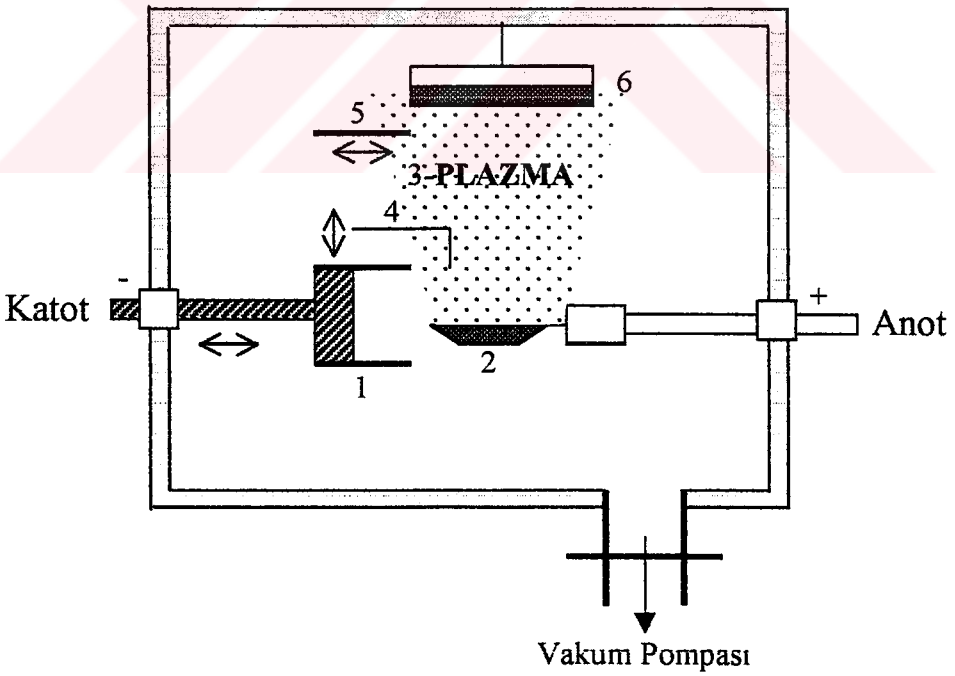


Şekil 5.9. Dorodnov tarafından önerilen anot buharında deşarj oluşturma sistemi. 1: Anot, 2: Katot, 3: Elektromanyetik bobin, 4: Güç kaynağı, 5: Katot ısıtma sistemi, 6: İyonları hedefe hızlandırıcı kaynak, 7: Kaplanan hedef, R_b: Ayarlayıcı direnç.

Anot buharlarında vakum koşullarında saf metal buharı plazması üreten bu üç yöntemde daha fazla yayın ve teknolojik uygulama yapılmadı. Bunun nedenlerinden birisi elektron demeti sayısının arttırılması için manyetik alan kullanılmasıdır. Bu nedenle metal buharı kaynağı, yayılan metal buharı plazma için küçük bir çıkış haricinde kapalı bir bölge içinde kalmıştır.

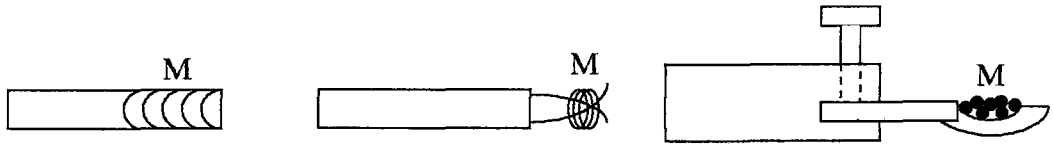
5.7.2. Soğuk Katotlu Anodik Vakum Ark

1988 yılında vakum koşullarında anot metali buharlarında soğuk katotlu yeni bir yüksek akım deşarjı Essen üniversitesindeki bir grup tarafından yapılmıştır (Ehrich, 1988). Bu durumda deşarj, bir soğuk katot ile vakum koşullarında sürekli buharlaşan anot arasında oluşur. Şekil 5.10.'da soğuk katotlu anodik vakum için kullanılan sistem şematik olarak gösterilmiştir (Mausbach et al., 1990).



Şekil 5.10. Soğuk katotlu anodik vakum ark sistemi. 1: Silindirik paslanmaz çelikli hareketli katot. 2: Buharlaştırılacak materyalin yerleştirildiği ve anot görevi gören tungsten pota. 3: Yayılan plazma. 4: Hareketli katodik kalkan. 5: Koruyucu kapak. 6: Cam üzerine kaplanan tabaka.

Buharlaştırılacak materyal anot olarak kullanılan zor eriyen metalden yapılmış bir çubuk üzerine sarılmış yada yine zor eriyen metalden yapılmış pota içine konulmuştur. Şekil 5.11.'de farklı şekillerde düzenlenmiş anotlar gösterilmiştir. Bu şekiller üzerinde M buharlaştırılacak materyali göstermektedir (Ehrich, 1988).



Şekil 5.11. Soğuk katotlu anodik vakum ark için farklı şekillerde düzenlenmiş anotlar.

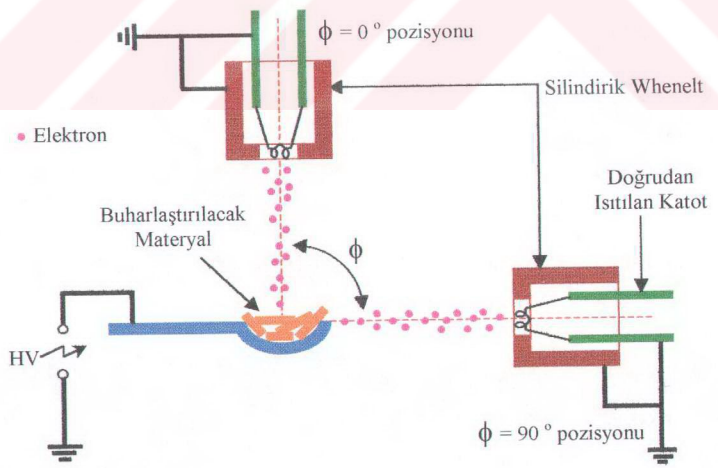
Soğuk katot karbon veya zor eriyen metalden yapılmış bir disktir. Deşarj elektrotlardan birinin hareketi ile katot ve anotun kısa süreli kontak etmesiyle ateşlenebilir. Deşarjın ateşlenmesi hareketli yardımcı bir elektrot yardımıyla veya elektrotlar arasına plazma sokulmasıyla da ateşlenebilir.

Vakum koşullarında geliştirilen 10^2 A mertebesindeki akımların ve ark üzerindeki voltaj düşümleri 20V olan anot buharlarında soğuk katotlu bu tip yüksek akım arkı, kaplama teknolojileri için başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Neredeyse gövde metal karakteristiğine yakın kaplanan filmlerin yüksek kalitesi, nümune üzerine yüksek tutunma ve çok düz yüzeyler elde edilmiştir. Bununla birlikte, metal tabakanın yüksek kaplama oranları elde edilmiştir (Ehrich et al., 1990a).

6. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA)

6.1. Elektrotların Düzenlenişi

Vakum içinde anotun metal buharı plazmasının üretilmesi için elektrostatik olarak odaklanmış elektron bombardımanı kullanan Termiyonik Vakum Ark (TVA) ilk kez 1983 yılında, INFLPR (National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics, Bükreş) 'den Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Grubu tarafından önerilmiştir (Musa et al., 1983). TVA, katot ile anot olarak isimlendirilen iki elektrot arasında meydana gelir. Katot elektron emisyonu sağlayan sıcak bir flament, anot ise buharlaştırılarak plazması elde edilecek materyalin içine konulduğu bir potadır. Katot olarak kullanılan flament, sargılı flament ise elektrotlar doğrusal geometride, bir çember şeklinde ise elektrotlar silindirik geometride olarak kabul edilir. Bizim deneylerimizde doğrusal geometride elektrotlar kullanılmıştır. Şekil 6.1.'de doğrusal geometride elektrotların, birbirine göre iki farklı pozisyon için düzenlenişi gösterilmiştir.



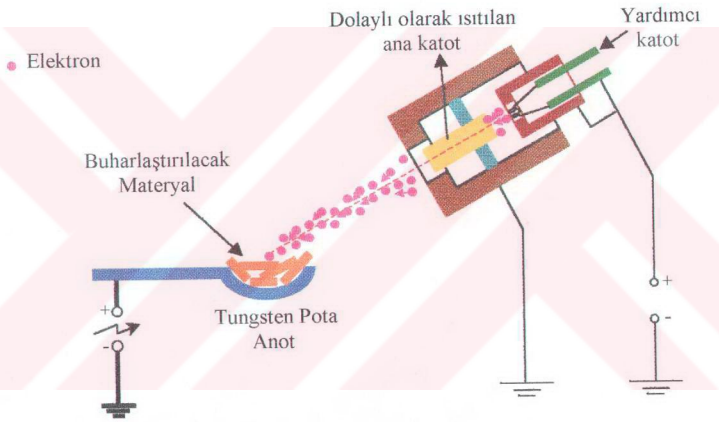
Şekil 6.1. Doğrudan ısıtılan katot ile TVA'ın elektrotlarının düzenlenişi. Katot, anota göre istenilen açıya getirilebilmektedir. HV: Yüksek voltajı simgelemektedir.

Her iki elektrot son vakum değeri 10^{-5}-10^{-6} mbar basınçta olan bir vakum odası içinde bulunmaktadır. Burada kullanılan katot, bir güç kaynağı ile üzerinden akım geçirilerek doğrudan ısıtılmış 1mm çapındaki bir çubuk üzerine 4 kez sarılarak oluşturulmuş 0.4 mm çapında tungsten teldir. Bu flament, katot elektronlarının istenilen doğrultuda yayılmasını sağlamak için ilk kez Whenelt tarafından kullanıldığı için, bu isimle anılan bir Whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir. Whenelt silindiri 15 mm uzunluğunda ve 12 mm çapında ve ön kısmında 5 mm çapında boşluk bulunan, paslanmaz çelikten yapılmış bir silindirdir. Çok yüksek akımlarda çalışıldığında molibden Whenelt silindiri kullanılmıştır. Bu Whenelt silindiri içine yerleştirdiğimiz flamentin vakum odası içine yerleştirdikten sonra, dışarıdan elektrik bağlantılarının yapılacağı mekanizmalarla birlikte düzenlenişine, elektron tabancası ismi verilir. Şekil 6.2.'de tümüyle TVA'ın elektron emisyon kaynağını oluşturan elektron tabancasının fotoğrafı verilmiştir. Bu elektron tabancası, mekanizması gereği değişik pozisyonlara getirilebilmektedir. Böylece elektron bombardımanının, anotun istenilen yüzeyine odaklanması mümkün olmaktadır.



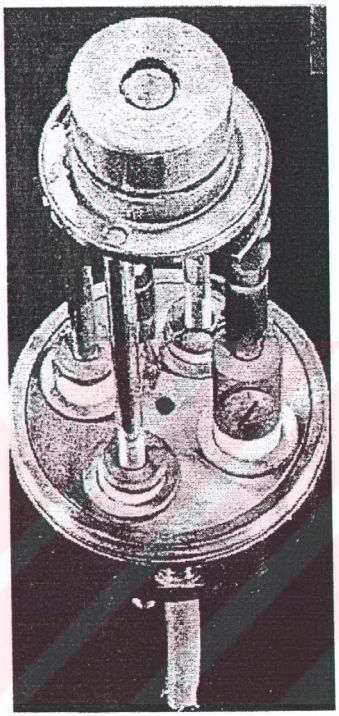
Şekil 6.2. TVA için elektron emisyonu sağlayan, içinde doğrudan ısıtılan katotun bulunduğu elektron tabancasının fotoğrafı.

TVA için dolaylı olarak ısıtılan katot ta kullanılmaktadır. Bu durumda ana katot, yardımcı katot olarak adlandırılan ve yardımcı Whenelt içine yerleştirilmiş, doğrudan ısıtılan filament tarafından ısıtılmaktadır. Ana katot 4 mm çaplı, 1mm^2 kesit alanlı ve iki iletkene tutturulup yardımcı katotun önüne yerleştirilmiş %4 ThO_2 ile kaplanmış tungsten bilyadır (Musa et al., 1994). Şekil 6.3.'de dolaylı olarak ısıtılan katot durumunda elektrotların düzenlenişi gösterilmiştir (Biloiu, 1998). Ana katot, 1-2 mm çapındaki bir bilyenin çapından daha büyük ön taraf boşluğuna sahip bir molibden Whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir.



Şekil 6.3. Dolaylı olarak ısıtılan katot ile TVA için elektrotların düzenlenişi.

Elektrotlar arasında oluşan plazmanın, yardımcı katot doğrultusunda yayılmasını ya da yardımcı katotun elektron demetinin, buhar plazması hacmi içine gelmesini önlemek için molibden Whenelt silindiri içine zor eriyen metalden (tungsten) yapılmış levha yerleştirilmiştir. Dolaylı olarak ısıtılan katotlu elektron tabancasının fotoğrafi Şekil 6.4.'de gösterilmiştir (Musa et al., 1987).

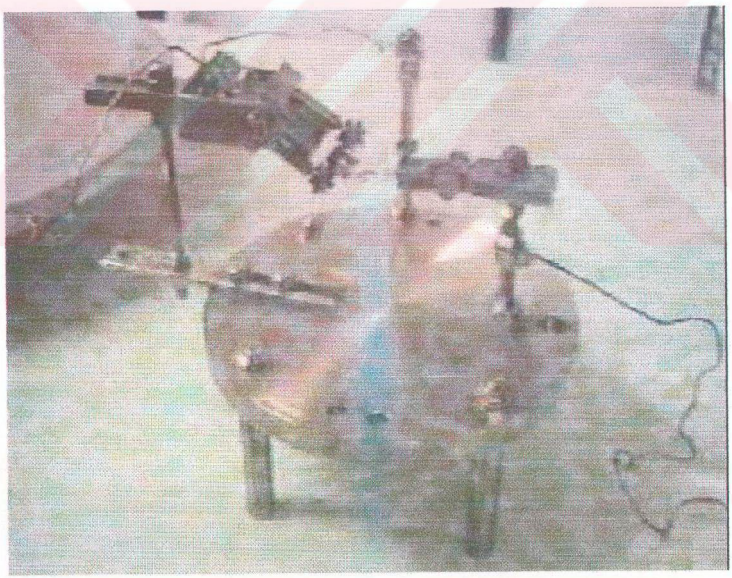


Şekil 6.4. Dolaylı olarak ısıtılan katotlu elektron tabancası.

Doğrudan ısıtılan katot ile kıyaslandığında dolaylı olarak ısıtılan katot, daha güçlü buhar deşarjı sağlar ve daha uzun ömre (kullanım süresine) sahiptir. Doğrudan ısıtılan katot durumunda, tungsten tel üzerinde küçük bir kusurlu nokta oluşursa, bu kusurlu bölge, hızlı bir şekilde büyür ve bu noktada flamentin zarar görmesine neden olur. Deneylerimizde doğrudan ısıtılan katot kullandığımız için ortalama 4 veya 5 deşarj elde ettikten sonra flamenti değiştirmek zorunda kaldık. Bu bazen flamentin kopması şeklinde, bazen de flamentin üzerine anot içinde bulunan materyalin kaplanmasıyla, Whenelt silindirine yapışması ve dolayısıyla kısa devre yaparak akım geçirmemesi nedeniyle olmuştur.

Dolaylı olarak ısıtılan katot durumunda böyle bir durum gözlenmez. Dolaylı olarak ısıtılan katotun kullanımı, anottan buharlaşan materyalin Whenelt silindiri üzerine kaplanarak Whenelt silindirinin ön boşluğunun zamanla kapanması sorununu ortadan kaldırır. Bununla birlikte demir ve nikel gibi bazı metaller tungsten ile alaşım yaparlar. Bu durumda doğrudan ısıtılan tungsten flament kullanılamaz. Dolaylı olarak ısıtılan katot ile tungsten flament ile alaşım yapan metallerle de çalışılabilir.

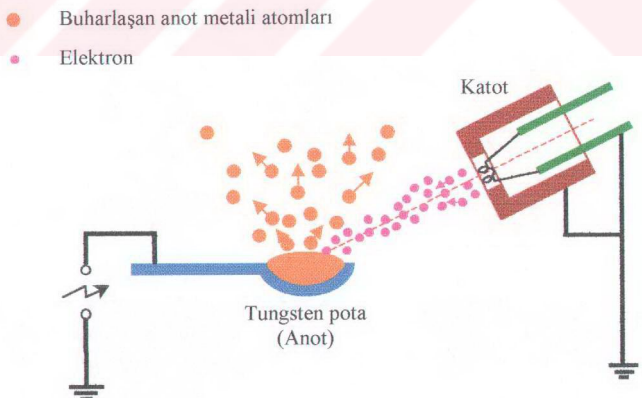
TVA için kullanılan ikinci elektrot anot, tungstenden yapılmış 0.2 mm kalınlığında ve üst kısım boşluğu 10 mm çapında olan kaşık şeklinde bir potadır. Buharlaştırılarak plazması elde edilecek materyal bu potanın içine yerleştirilmektedir. Şekil 6.5. ' de doğrudan ısıtılan katotlu elektron tabancası ile anotun, deney sırasında kullanıldığı biçimdeki düzenlenişinin fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.5. Doğrudan ısıtılan katotlu TVA'ın elektrotlarının deneylerde kullanıldığı biçimdeki fotoğrafı.

Şekil 6.5.'den görüldüğü gibi TVA'da elektron emisyonu sağlayıcısı olarak kullanılan elektron tabancası ile anot, 200mm çapında 15mm kalınlığında olan ve paslanmaz çelikten yapılmış 80mm yüksekliğinde dört ayaklı tabla üzerine monte edilmiştir. Bu şekilde elektrotlar sistemi vakum odası içine kolayca yerleştirilip, istenildiğinde çıkarılabilmektedir.

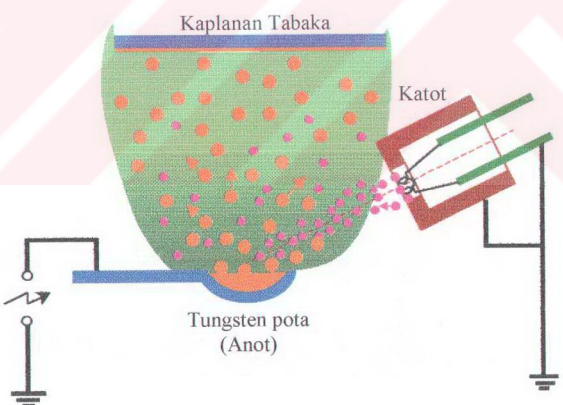
Elektrotların monte edildiği tabla vakum odası içine yerleştirildikten sonra anot içine buharlaştırılacak materyal yerleştirilir ve vakum odası vakumlanır. Yaklaşık 10^{-6} mbar civarındaki bir basınç değerine ulaşılınca, bir düşük voltaj güç kaynağı ile flament üzerinden akım geçirilerek flamentin ısınması ve termiyonik emisyon yapması sağlanır. Bu durumda ısıtılmış katot yani flament ile anot arasına yüksek voltaj uygulanarak flamentten termiyonik emisyonla birlikte, Schottky etkisi ve alan emisyonu ile de elektron emisyonu sağlanır. Aynı zamanda elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj, yayınlanan elektronların anot içinde bulunan materyal üzerine hızlanmasını ve onun ısınmasını sağlar. Uygun şekilde seçilmiş yüksek voltaj için elektron bombardımanı ile pota içindeki anot materyali erir ve sonra sürekli şekilde bir anot materyali buharlaşması elde edilir (Şekil 6.6.).



Şekil 6.6. Doğrudan ısıtılan katot ile TVA durumunda anot içindeki materyalin buharlaşması.

Anot materyalinin sürekli bir şekilde buharlaşması nedeniyle elektrotlar arası alanda, metal buharı atomlarının kararlı-hal yoğunluk dağılımı elde edilir. Bu durumda vakum odası içindeki denge basıncının değeri, $p \sim r^{-2}$ şeklinde bir değişimle, anottan r mesafesi ile azalır (Ehrich et al., 1988). Bu nedenle elektrotlar arası uzay genellikle birkaç mm arasında ve en çok 10-15 mm civarında olmalıdır.

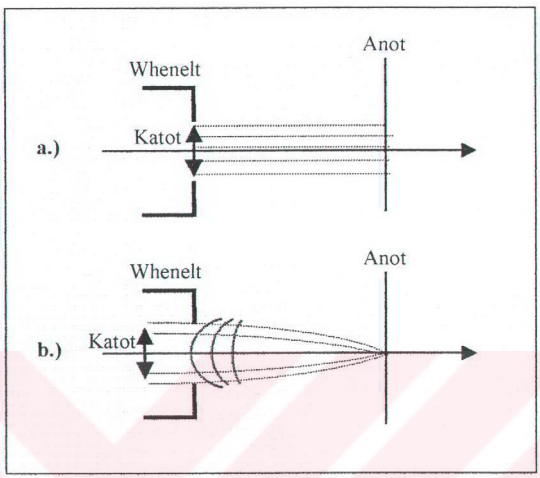
Anot materyalinin erimesinden ve kararlı hal yoğunluk dağılımına ulaşmasından sonra, katot ile anot arasına uygulanılan voltaj daha fazla arttırılırsa vakum odası içinde parlak bir deşarj gözlenir (Şekil 6.7.). Anot materyalinin buharında elde edilen bu deşarj şekil olarak, elektriksel parametreler ve yayınlanan spektral radyasyon bakımından çok kararlıdır. Bununla birlikte TVA deşarj üzerinde yapılan spektroskopik çalışmalar, TVA ile üretilen plazmanın yalnızca anot metali buharlarından meydana geldiğini ispatlamaktadır (Musa et al., 1986 ; Musa et al.,1987).



Şekil 6.7. Doğrudan ısıtılan katot ile TVA' da metal buharı plazmasının yayılması.

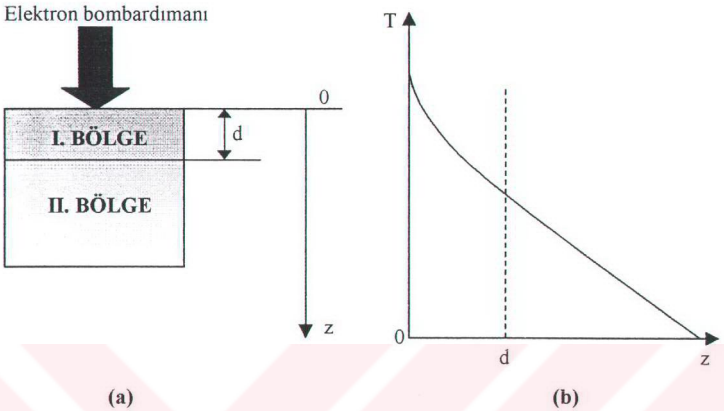
6.2. Katottan Üretilen Elektron Demetinin Anot Üzerine Odaklanması ve Anot Materyalinin Isıtılması

TVA sistemini anot metali buharlarında deşarj üreten diğer tekniklerden ayıran en önemli özelliği, katottan yayınlanan elektronların anot üzerine odaklanması için elektromanyatik bobin yerine elektrostatik mercek görevi yapan bir Whenelt silindirinin kullanılmasıdır. Şekil 6.1., 6.5., 6.6. ve 6.7.'de gösterildiği gibi doğrudan ısıtılan katotun içine yerleştirildiği Whenelt silindiri topraklanmıştır. Şekil 6.5.'den görüldüğü gibi doğrudan ısıtılan flamentin bir ucu elektrotların monte edildiği tabla üzerine bağlanmıştır. Bu tabla vakum odasının tabanına yerleştirildiği için ve vakum odası toprak hattına bağlı olduğundan, elektrotlar sisteminin monte edildiği tabla toprak potansiyelinde tutulmuştur. Ancak anot, tabla üzerinden seramik yalıtıcı ile yalıtılmıştır. Şekil 6.2.'den görüldüğü gibi Whenelt silindiri elektron tabancasından dolayısıyla tabla üzerinden yalıtılmamıştır. Böylece Whenelt silindiri toprak potansiyelinde tutulmuştur. Anot pozitif potansiyelde tutulurken Whenelt silindirinin toprak potansiyelinde tutulması ile katottan yayınlanan elektronlar anot üzerine gönderilir. Katottan yayınlanan negatif yüklü elektronlar, pozitif potansiyel tarafından çekilirken toprak potansiyelindeki Whenelt silindiri tarafından itilecektir ve elektronlar yalnızca Whenelt silindirinin ön kısmındaki 5 mm'lik delik içinden anota hareket edecekler ve dolayısıyla anot üzerine odaklanacaklardır. Bu nedenle TVA sisteminde Whenelt silindiri, katottan yayınlanan elektron demetini anot üzerine odaklayan elektrostatik mercek gibi davranmaktadır. Katottan yayınlanan elektronların anot üzerine odaklanması, elektrotların ve Whenelt silindirinin birbirine göre pozisyonuna, Whenelt silindirinin polarizasyon voltajına ve anota uygulanan yüksek voltaja bağlıdır (Musa et al., 1997). Bizim deneylerimizde katot, Whenelt silindirinin ön yüzüne paralel yerleştirilmiştir ve Whenelt silindirine negatif voltaj uygulanmamıştır. Bu durumda Whenelt silindiri katottan yayınlanan elektronları anot üzerine toplamaktadır (Şekil 6.8.a.). Ancak katota ac voltaj uygulandığı için, katot Whenelt silindirine göre bir pozitif voltajda bir negatif voltajda bulunmaktadır. Katot'un Whenelt silindiri içindeki konumuna göre elektronların anot üzerine odaklandığı bir durum elde edilebilir (Şekil 6.8.b.).



Şekil 6.8. Elektron demetine Whenelt silindirinin etkisi.

Katottan yayınlanan elektron bombardımanı nedeni ile anot yüzeyi üzerine ve böylece anot materyaline ısı enerjisi aktarılır. Ancak pota içindeki tüm materyalin ısınması aynı mekanizma ile gerçekleşmez. Anot üzerine bombardıman edilen elektronlar, anot materyalinin içinde belli bir uzaklığa kadar girebilir. Başka bir deyişle elektronlar, anot materyali içinde belli bir uzaklıkta durdurulurlar. Anot materyali bu uzaklığa kadar doğrudan elektronlar tarafından aktarılan enerji ile ısınırken bu noktadan sonraki bölgeler ısı transferi ile ısınır. Bu nedenle anot materyali üzerinde sıcaklık gradyentinin değişken olduğu birinci bölge ve sıcaklık gradyentinin sabit olduğu ikinci bölge olmak üzere iki bölge oluşur (Ehrich et al., 1990b). Bu durum şematik olarak Şekil 6.9.'da gösterilmiştir.



Şekil 6.9. a.) Anot materyalinin farklı olarak ısıtıldığı bölgeler. **b.)** Farklı iki bölgedeki sıcaklık değişimi.

a) I. Bölge , $z \in (0,d)$: Hedefteki anot materyali içinde yayılan elektronlar, anot materyaline bu şekilde enerji aktarırlar ve enerjilerini kaybederek d mesafesi içinde durdurulurlar. Bu ısı kaynağı nedeniyle anot materyali ısıtılmaya başlanır ve gelen elektronların enerjisinin yeterli bir değeri için erime noktasına ulaşır. I. Bölgede anot materyaline doğrudan elektronlar tarafından enerji aktarılır.

b) II. Bölge, $z \geq d$: Bu bölgede doğrudan enerji verici bir kaynak yoktur. Isınma I. Bölgeden termal iletkenlik ile oluşur.

Hedef üzerine giden güç yoğunluğu $q_v = P / S.d$, elektron demetinin verimli bir şekilde yayıldığı bölgenin hacmine karşılık gelen minimum S.d değeri için maksimumdur. Bu termal iletkenlik ile minimum kayıplara sahip olmak için elektron demetinin hedef yüzeyine iyi odaklanması gerektiğini açıklar.

6.3. Anot Materyalinin Buharlaştırılması

Flamentten elektron emisyonu sağlanıp bu elektronlar bir yüksek voltaj ile hızlandırılarak anot içindeki materyal üzerine bombardıman edilir. Bu bombardıman nedeniyle anot materyali ısınır ve erimeye başlar. Bir süre sonra anot içindeki tüm materyal erir ve potanın içine yayılır. Uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse erimiş materyal üzerinde tam elektronların odaklandığı yerde kaynama başladığını gösteren küçük parlak bir nokta oluşur. Bu parlak nokta spot olarak adlandırılır. Kaynamanın başladığı bu spottan buharlaşma da başlar. Voltaj uygun bir değere gelince bu spot tüm materyal üzerine yayılır ve anot materyalinin sürekli bir buharlaşması elde edilir. Elde edilen bu buhar, flament tarafından üretilen elektron bombardımanı içinde olduğundan aynı zamanda iyonlaştırılarak plazması elde edilir.

Buharlaştırılacak olan materyalin cinsine ve materyalin sıcaklığına bağlı olan buharlaşma hızı ;

$$w = 5.83 \times 10^{-2} p_s \sqrt{\frac{M}{T}} f \qquad (g/cm^2 s) \qquad (6.1)$$

bağıntısı ile verilir (Roth, 1976). Burada p_s; materyalin doymuş buhar basıncı, M; moleküler ağırlık ve *f*; yüzey üzerine gelen molekülün tutunma olasılığı olan tutunma katsayısıdır. Clapeyron-Clausius eşitliği, dengede iki evreden oluşan bir sistem için basıncın sıcaklıkla değişimini verir. Sıvı-buhar dengesi için doymuş buhar basıncının sıcaklıkla değişimini veren Clapeyron-Clausius eşitliği;

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_{s-b} = \frac{\lambda}{T(v_b - v_s)} \qquad (6.2)$$

ile verilir. Burada λ; buharlaşma ısısı ve v_b ve v_s ; buharın ve bu buhara karşılık gelen sıvının özgül hacimleridir. Buharın ideal bir gaz olduğu varsayılırsa ve sıvı veya

katının özgül hacmi, buharınki yanında önemsenmezse, eşitlik 6.2. ile verilen integral alınabilir ve doymuş buhar basıncının sıcaklıkla değişimi;

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T(RT/p)} \Rightarrow \ln p_s = -\frac{A}{T} + C \qquad (6.3)$$

şeklinde bulunur (Huang, 1963). Burada A ve C; buharlaştırılacak materyalin cinsine bağlı iki sabittir. Eşitlik 6.3.'den görüldüğü gibi buhar basıncı sıcaklıkla artmaktadır. Doymuş buhar basıncı çok önemli bir parametredir. Çünkü uygun ve yeterli buhar basıncının deşarjı sağlaması için hangi sıcaklıkta elde edileceği bilinmelidir. Saf metal buharlarında bir deşarjın üretilmesi, metal atomlarının uygun buhar basıncını elde etmek için gerekli yüksek sıcaklıklar nedeniyle zordur. Doymuş koşullardaki sezyumun buhar basıncı, 500 °K'den daha düşük sıcaklıklar için 10^2 Pa'dan daha fazladır. Titanyum veya demir gibi metaller için aynı basınca ulaşmak için gerekli sıcaklık 2000 °K'den daha büyüktür. Tablo 6.1.'de bazı metaller için erime sıcaklığındaki buhar basınçları, bu materyallerin erime ve kaynama noktaları, p_s=1 torr'da buharlaşma hızları ve p_s=1 torr buhar basıncına ulaşmak için gerekli sıcaklıklar verilmiştir (Roth, 1976).

Flamentten anot üzerine gönderilen elektron demeti hem buharlaştırılacak materyali hem de buharlaştırılacak materyalin içinde bulunduğu potayı ısıtacağından, ısınma süresince eğer uygun olmayan buharlaştırılacak materyal-pota materyali seçimi kullanılırsa, buharlaştırılacak materyalin pota materyali ile alaşım yapması mümkün olabilir (Sanders, 1989). Tablo 6.2.'de elektron demeti kullanarak buharlaşma durumunda kullanılabilecek bazı kombinasyonlar verilmiştir. Bizim deneylerimizde tungsten pota içinde bakır, altın, gümüş, çinko, kalay, titanyum ve bakır-gümüş ve bakır-kalay alaşımı kullanılmıştır. Ancak eğer anota su soğutma işlemi yapılırsa tungsten pota ile alaşım yapan materyallerle de çalışmak mümkündür.

Tablo 6.1. Bazı materyallerin erime ve kaynama sıcaklıkları, erime sıcaklığındaki buhar basınçları, p_s=1 torr'da buharlaşma hızı değerleri ve p_s=1 torr buhar basıncına ulaşmak için gerekli sıcaklık değerleri.

Element	Erime Sıcaklığı (K)	Kaynama Sıcaklığı (K)	T_{erime} Sıcaklığında Buhar Basıncı (Torr)	p_s=1 torr'da Buharlaşma Hızı x 10^{-2} (g/cm^2s)	p_s=1 torr Buhar Basıncı İçin Gerekli Sıcaklık (K)
Zn	692	1180	$1.6x10^{-5}$	1.71	758
Bi	544	1833	$1.2x10^{-10}$	2,47	1165
Pb	600	2013	$5.4x10^{-8}$	2.38	1250
Ag	1234	2485	$1.7x10^{-3}$	1.51	1610
Al	933	2600	$1.2x10^{-6}$	0.71	1820
Cu	1356	2868	$3.0x10^{-4}$	1.07	1895
Au	1336	3080	$6.0x10^{-5}$	1.84	1980
Cr	2173	2945	$6.4x10^{-7}$	0.94	2010
Fe	1809	3273	$3.7x10^{-2}$	0.95	2120
Ni	1728	3137	$4.4x10^{-3}$	0.96	2150
Co	1766	3373	$8.1x10^{-4}$	0.96	2180
Pd	1825	3440	$8.7x10^{-3}$	1.27	2240
Ti	1933	3560	$8.4x10^{-2}$	0.82	2356
Pt	2042	4100	$1.6x10^{-4}$	1.52	2860
Mo	2895	5098	$2.2x10^{-2}$	0.95	3570
Ta	3269	5702	$5.6x10^{-2}$	1.24	4010
W	3703	5933		-	4190
Sn	505	2780		1.46	1885

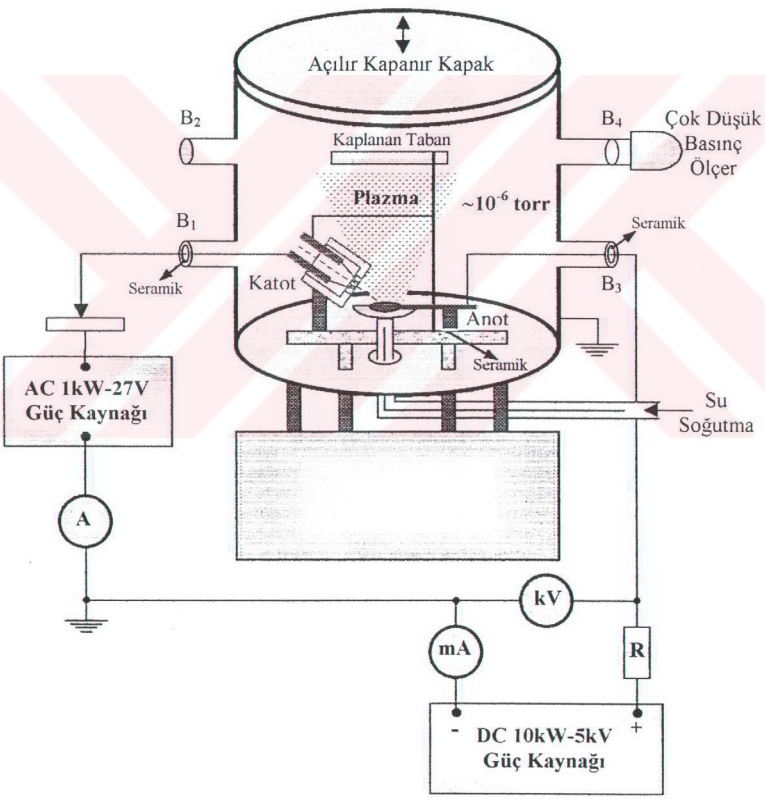
Tablo 6.2. Elektron bombardımanı kullanımı durumunda buharlaştırılacak materyal ile pota materyali arasındaki gözlemler.

Buharlaşacak Materyal	Teslim Şekli	Pota Materyali	Gözlem
Al	Bar	W	Pota Materyali İle Alaşım
	Küçük Taneli Toz	BN	
Ag	Bar	W, Mo, Seramik	
	Büyük Taneli Toz	W, Mo, Seramik	
	Küçük Taneli Toz	W	
Au	Bar	W	
	Küçük Taneli Toz	W	
Cd	Bar	W, Ta, Seramik	
Cr	Büyük Taneli Toz	W	Süblimleşme
Cu	Bar	W	
Fe	Bar	W	Pota Materyali İle Alaşım
Ni	Tel	W	Pota Materyali İle Alaşım
Pt	Tel	W	
Sb	Büyük Taneli Toz	W, Mo, Seramik	
Sn	Büyük Taneli Toz	W	Oda Sıcaklığında Yoğunlaşma
Ti	İnce Taneli Toz	W, Grafit	Pota Materyali İle Alaşım
Zn	Bar	W, Mo	Süblimleşme
Zr	Büyük Taneli Toz	W	Pota Materyali İle Alaşım

6.4. Deneysel Düzenek

6.4.1. Deneysel Düzeneğin Temel Yapısı

Şekil 6.10.'da TVA sisteminin deneysel düzenlenişi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.10. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi.

Bu şekil üzerinde TVA'ın elektrotları ve bu elektrotların içine yerleştirildiği vakum odası, elektrotlara enerji sağlayan güç kaynakları ve bağlantıları ve TVA'ın elektriksel parametrelerinin ölçüldüğü ampermetre ve voltmetre birlikte gösterilmiştir.

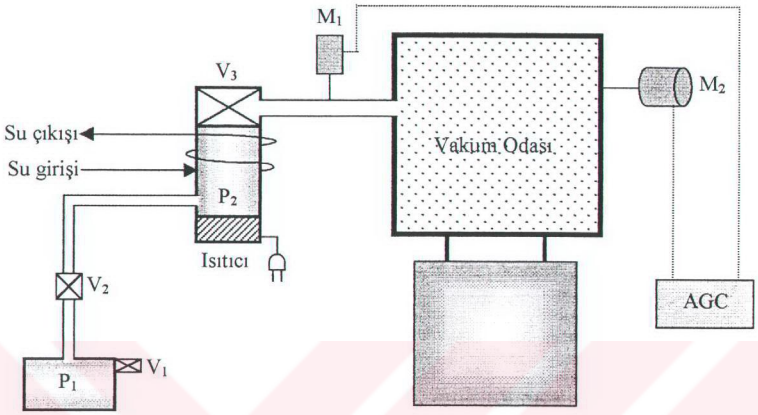
Elektrotların düzenlenişi bölüm 6.1.'de açıklandı. Bu elektrotların içine yerleştirildiği vakum odası 415 mm yüksekliğinde, 445 mm çapında ve 5 mm kalınlıkta paslanmaz çelikten yapılmış bir silindirdir. Bu vakum odasının üst kısmında silindir ile aynı çap ve 20 mm kalınlıkta bir vinç yardımıyla açılıp kapanan bir dairesel kapak vardır. Bu kapak ile vakum odası arasında, vakum tutuculuğu sağlayan özel lastik (O-ring) vardır. Bu kapak yardımıyla tabla üzerine monte edilmiş taşınabilir elektrotlar sistemi, vakum odası içinden kolayca çıkarılıp tekrar yerine konulabilmektedir. Vakum odasının yanlarında 45 mm çapında ve özel tutucularla kapakları tutturulmuş 4 tane boşluk vardır. Bu boşluklardan B_1 ile numaralandırılan boşluktan katotun elektrik bağlantısı, B_3 ile numaralandırılan boşluktan anotun elektrik bağlantısı ve B_4 ile numaralandırılan boşluğa çok düşük basınç ölçebilen manometre yerleştirilmiştir. B_2 boşluğu kaplama yapılacak yüzeyin ısıtılması için kullanmayı düşündüğümüz ısıtıcının ve termoçiftin bağlantıları için kullanılacaktır. Bu işlem daha yüksek tutunmaya sahip filmlerin üretimi için yapılacaktır. Bununla birlikte vakum odasının ön kısmında 50 mm çapında, arka ve alt kısmında ise 80 mm çapında üç boşluk daha vardır. Arkada bulunan boşluğa bölüm 6.4.2.'de açıklanan vakum sistemi bağlanılmıştır. Ön kısımdaki boşluğa bir cam yerleştirilerek vakum odasının içinin deney sırasında gözlenebilmesi sağlanmıştır. Alt kısmındaki boşluk anotun su soğutma sistemi için kullanılacaktır. Bizim deneylerimizde anot için soğutma işlemi yapılmamıştır. Ancak tungsten pota ile alaşım yapan demir, nikel gibi materyallerle çalışılması durumunda anota su soğutma işlemi yapılacaktır. Şekil 6.11.'de deneylerimizde kullandığımız TVA'ın önden çekilmiş fotoğrafı verilmiştir.



Şekil 6.11. TVA sisteminin önden görünüşü.

6.4.2. Vakum Sistemi

Vakum odası içinde plazmasının elde edileceği metalin uygun doymuş buhar basıncına ulaşmak için ve elde edilen deşarjın safsızlığını sağlamak için vakum odasının vakumlanması gereklidir. Bu işlem için son vakum değeri 10^{-6} mbar civarında olan Şekil 6.12.'de şematik olarak gösterilen vakum pompaları sistemi kullanılmıştır.



Şekil 6.12. Vakum sisteminin şematik gösterimi.

Vakum odasının vakumlanması için öncelikli olarak P_1 mekanik pompasının V_1 valfi ile hava girişi kapatılır. Daha sonra RV3 model Edwards marka ve 3.7 m^3 / h pompalama hızına sahip P_1 mekanik pompası açılır. Bir iki dakika sonra V_2 kelebek anahtarı açılarak, P_2 difüzyon pompasına kadar olan bağlantı borularının vakumlanması sağlanır. Daha sonra P_2 difüzyon pompası üzerine monte edilmiş V_3 valfi açılır. Vakum odasının basıncı Edwards marka Active Pirani Gauge APG-M model M_1 düşük basınç manometresi ve Edwards marka Active Inverted Magnetron Gauge AIM-S model çok düşük basınç ölçebilen M_2 manometresi ile ölçülür. Her iki manometre 3 girişli Edwards marka Active Gauge Controller AGC Single Display model dijital basınç ölçere bağlıdır. Bu basınç ölçerde M_1 ve M_2 manometreleri ayrı ayrı gözlenebilmektedir. M_1 manometresi 10^{-3} mbar'a kadar düşük basınçları, M_2 manometresi ise 10^{-3} ile 10^{-6} mbar arasındaki çok düşük basınçları ölçebilmektedir. Vakum odasının içi, yalnızca P_1 mekanik pompa ile 10^{-1} mbar'ın altında bir basınca getirildiğinde, Edwards marka Diffstak 63/150 model 135 l/s pompalama hızına sahip P_2 difüzyon pompasının su soğutma sistemi açılır ve daha sonra ısıtıcının fişi 220 V'a

takılarak difüzyon pompası devreye sokulmuş olur. Vakum odasının içi 10^{-3} mbar'ın altında bir basınca ulaştığında M_1 manometresi çalışmayacağı için dijital basınç ölçerden M_2 manometresi değerine geçilir. Vakum odasının içi yapılan deneylerde en son $p = 1.2.10^{-6}$ mbar değerine kadar getirilmiştir. Bu yüksek vakum değerleri kaplanan ince filmin saflığını elde etmek için çok önemlidir (Thorton,1974).

Şekil 6.13.'de vakum odasına bağlı, vakum pompalama sisteminin fotoğrafı verilmiştir.

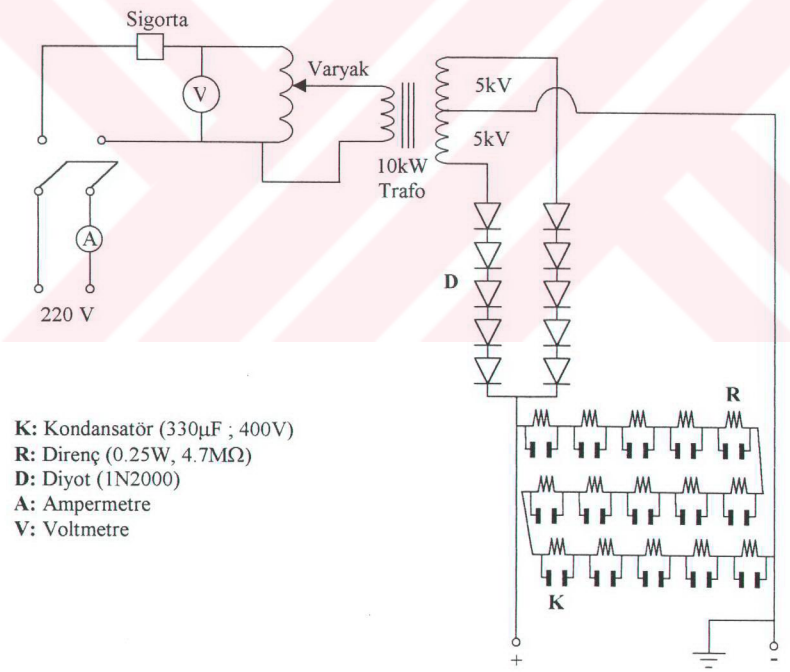


Şekil 6.13. TVA'ın vakum pompalama sisteminin fotoğrafı.

6.4.3. Elektriksel Devre

TVA için aynı pano üzerine yerleştirilmiş iki elektriksel kaynak kullanılmıştır. Bunlardan birincisi dc, 0-5kV ve 10kW kapasiteli ayarlanabilir çıkış voltajlı (varyaklı) yüksek voltaj güç kaynağı, ikincisi ise 1kW kapasiteli, ve 27V ac ayarlanabilir çıkış voltajlı (varyaklı) düşük voltaj güç kaynağıdır.

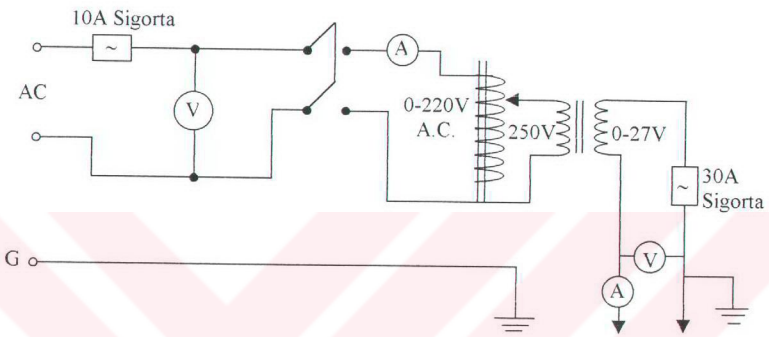
Yüksek voltaj güç kaynağı elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulamak için kullanılır. Yüksek voltaj güç kaynağının devre çizimi Şekil 6.14.'de verilmiştir.



K: Kondansatör (330μF ; 400V)
R: Direnç (0.25W, 4.7MΩ)
D: Diyot (1N2000)
A: Ampermetre
V: Voltmetre

Şekil 6.14. Yüksek voltaj güç kaynağı devre çizimi.

Düşük voltaj güç kaynağı flament üzerinden akım geçirerek, flamentin ısınarak elektron emisyonu yapması için kullanılır. Şekil 6.15.'de düşük voltaj güç kaynağının devre çizimi verilmiştir.



Şekil 6.15. Düşük voltaj güç kaynağı devre çizimi.

Yüksek voltaj güç kaynağı trafoları ile birlikte ve düşük voltaj güç kaynağı aynı pano içine yerleştirilmiştir. Bu pano üzerinde her iki kaynağın açma kapama düğmeleri, sigortaları ve uygulama voltajlarının kademe kademe arttırılabildiği varyakları bulunmaktadır. Bu pano Şekil 6.11.'de görülmektedir.

Şekil 6.10.'da TVA için tüm elektriksel bağlantılar şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 6.10.'da görüldüğü gibi vakum odasının kendisi toprak olarak kullanılmıştır. Katot flamentinin bir ucu elektrotlar sisteminin bulunduğu tablaya bağlanmıştır ve elektrotlar sisteminin üzerinde bulunduğu tabla, vakum odasının tabanına değmektedir ve izole edilmemiştir. Bu şekilde katot, toprak potansiyelinde tutulmuştur. Vakum odasının kendisinin toprak olarak kullanılması çok önemli bir avantajdır. Çünkü elektrotlar arasında meydana gelen plazma, katot potansiyelinden yani toprak potansiyelinden daha yüksek voltajdadır. Toprak olarak da vakum odasının kendisinin kullanılması nedeni ile elektrotlar arasındaki plazma, vakum odası içinde her yöne

kolayca yayılabilmektedir. Böylece plazma içindeki iyonlar, ayrı bir hızlandırıcı ve yönlendirici kaynak kullanılmadan vakum odasının çeperlerine doğru yönlendirilmiş ve hızlandırılmış olmaktadır. Ancak burada çok dikkat edilmesi gereken bir durum vardır. Katota güç kaynağı ile dışarıdan akım verilirken ve anota yüksek voltaj uygularken, katot ve anot bağlantılarının vakum odasına kısa devre yapmaması için, vakum odasına temas etmeleri önlenmelidir. Bu nedenle anot ile katotun elektriksel bağlantılarının vakum odası ile temasını önlemek için, vakum odasına girdikleri bölge seramik yalıtkanlar ile yalıtılmıştır.

Şekil 6.10.'da gösterilen deneysel düzenekte 300Ω ve 2A akım taşıyabilen, akım ayarlayıcı R_b direnci (balast direnç) kullanılmıştır. Akım ayarlayıcı direnç, deşarj sistemlerinde mutlaka kullanılmalıdır. Çünkü deşarj sırasında plazmanın direnci sıfıra yaklaşır ve akım birden çok yüksek değerlere çıkar. Bu sırada kullanılan ampermetrenin maksimum değerleri aşılarak ya da güç kaynaklarının maksimum verebildikleri akımdan fazlası çekilerek, ampermetrenin ve güç kaynaklarının yanmasına neden olunabilir. Bu sebeple TVA sisteminde de bir akım ayarlayıcı direnç kullanılmıştır. Bununla birlikte TVA deşarj içinden geçen akımın okunması için analog A ampermetresi ve TVA deşarj üzerindeki potansiyel farkının ölçülmesi için analog V voltmetresi kullanılmıştır. Kullanılan ampermetre ve voltmetre yüksek akım ve yüksek voltaj değerlerini okuyabilmek için uygun direnç eklemeleri ile tarafımızdan yapılmıştır. Direnç bölücü devrelerle yaptığımız voltmetre iki kademeli çalışabilmektedir. Düşük voltajların ölçüldüğü birinci kademede maksimum 1200V, yüksek voltajların ölçüldüğü ikinci kademede maksimum 6000V ölçülebilmektedir.

6.5. Ark İşlemi

6.5.1. Arkın Ateşlenmesi

Anot içinde üretilen metal buharında meydana getirilen arkın ateşlenmesi (deşarjın ya da plazmanın oluştuğu an) gazlarda meydana gelen klasik elektriksel deşarjların ateşlenmesinden farklıdır. Ateşleme voltajının değeri gazlardaki elektriksel breakdown değeri gibidir ancak TVA durumunda arkı ateşlemek için uygulanan voltaj, aşağıda verilen iki şartı aynı zamanda sağlamak zorundadır.

i.) Yeterli Sayıda Nötral Atom Sağlamak: Elektrotlar arası uzayda kararlı hal rejimindeki uygun yoğunluğu sağlayacak anot materyalinin yüzeyinden yüksek oranda nötral atomları buharlaştırmak.

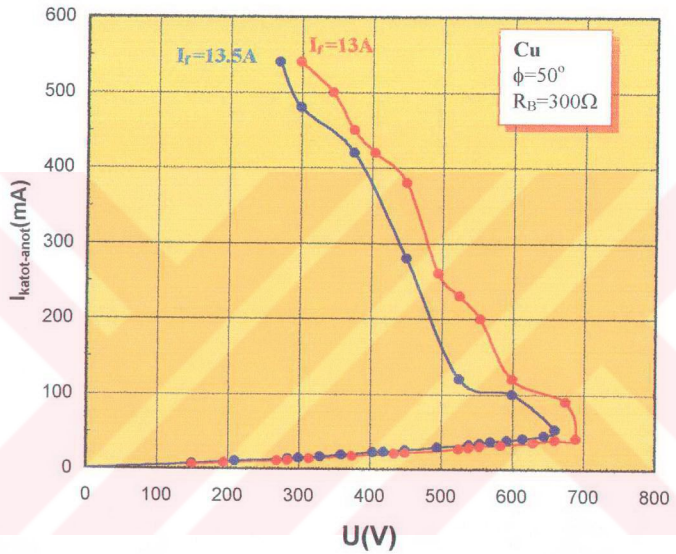
ii.) Yeterli Sayıda İyon Sağlamak: Elektrotlar arası uzayın dış kısmında sürekli olarak meydana gelen iyon kayıplarını karşılayacak (ateşlenmeden sonra) gerekli yük yoğunluğunu sağlayacak yeterli yükleri (özellikle iyonları) parçacık çarpışmaları sonucu oluşturmak.

TVA deşarj içinden geçen akım ve deşarj üzerindeki voltajın ölçülmesi ile elde edilen akım-voltaj karakteristiği, eksenlerin orjininden başlar ve ateşlenme koşulları gerçekleşene kadar akım ve voltaj aynı anda artar. Bu sırada termiyonik vakum arka aktarılan elektriksel güç;

$$P = I_e U_{ateş} \tag{6.4}$$

ile verilir. Burada I_e; elektron emisyonu nedeniyle oluşan akım şiddeti ve $U_{ateş}$; ateşlenme voltajıdır (Kullanılan anot materyalinin cinsine, elektrotların düzenlenişine ve flamentin elektron emisyonuna göre değişen metal buharı deşarjının oluştuğu anda elektrotlar arasına uygulanan voltaj değeridir). Ark ateşlendikten sonra akım (ark

akımı) çok yüksek değerlere çıkar ve bu sırada elektrotlar arasında ölçülen voltaj birden azalır. Sabit elektrotlar arası uzaklık (d ≅ 5 mm) ve açı (ϕ = 50°)'da iki farklı katot flamenti ısıtma akımı için bakır buharlarında üretilen TVA deşarjların akım-voltaj karakteristikleri Şekil 6.16.'da verilmiştir.



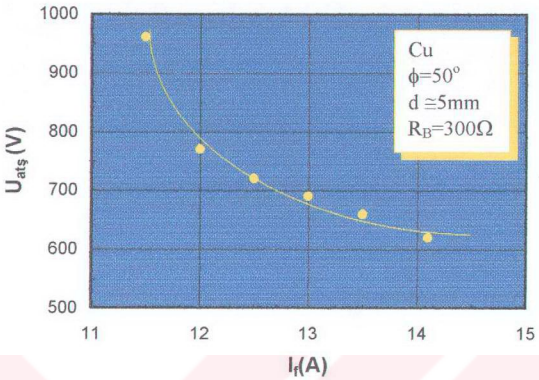
Şekil 6.16. Farklı iki katot flamenti ısıtma akımında oluşturulan TVA deşarjların akım-voltaj karakteristikleri (Akan, 2003).

Şekil 6.16. ile verilen karakteristikler anot ile katot arasına bağlanan ampermetre ve voltmetreden gözlenen değerlerle elde edilmiştir ve her iki karakteristikte de benzer şekilde iki bölge ortaya çıkmaktadır. Katot I_f = 13A akım ile ısıtılarak termoelektronik emisyon yaptıktan sonra elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj yavaş yavaş arttırılmaya başlanmıştır. Bu sırada anot ile katot arasındaki uzay vakumlu olduğu için katottan yayınlanan elektronlar doğrudan anot tarafından toplanır. Bu nedenle ampermetreden gözlenen akım ve elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttığı için voltmetreden okunan voltaj artar. Bu durumda Şekil 6.16.'da gözüken ve vakum

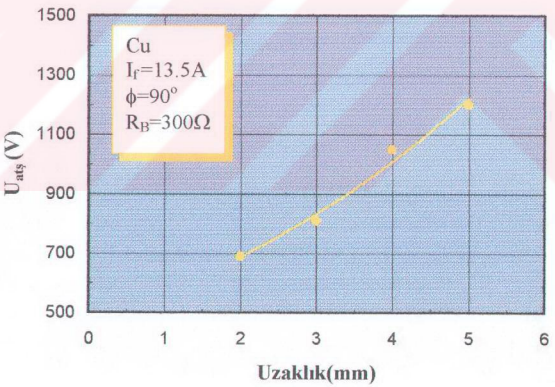
diyotlara benzer şekilde, akım ve voltajın hemen hemen doğru orantılı olarak arttığı birinci bölge oluşur. Bu bölge $I_f = 13.5$ A'de de benzer çıkmaktadır. TVA deşarj akım voltaj karakteristiğinin birinci bölgesi katotun termoelektronik emisyonu ile oluşur. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse, elektrotlar arasına uygulanan voltajın belli bir değerinde akım birden artar ve bu sırada elektrotlar arasında ölçülen voltaj birden azalır ve TVA deşarj akım-voltaj karakteristiğinin ikinci bölgesi oluşur. Burada deşarj akımı bir maksimum değere kadar yükselmeye devam eder. Bu bölgede gözle görülür radyasyonun yayınlandığı deşarj gözlenir. Başka bir deyişle karakteristik üzerindeki ikinci bölgede artık TVA deşarj oluşmuştur. Bu nedenle birinci bölgenin bittiği ve ikinci bölgenin başladığı yani TVA deşarjın oluştuğu an elektrotlar arasına uygulanan voltaj ateşlenme voltajı olarak adlandırılır. Ateşlenme voltajı gazlarda breakdown voltajı olarak adlandırılır. TVA deşarj durumunda ateşlenme voltajı, gaz deşarjlardaki breakdown voltajı gibi deşarjın oluştuğu an elektrotlar arasına uygulanan voltaj değeridir ancak önemli bir farklılığın altı çizilmelidir. Gazlarda breakdown voltajı ile aktarılan enerji, gaz atomlarının yalnızca iyonlaşmasını sağlarken TVA deşarj durumunda breakdown voltajı (ateşlenme voltajı) ile aktarılan enerji ile hem deşarjın oluştuğu gaz üretilmekte hem de bu gaz iyonlaştırılmaktadır. Bu nedenle TVA deşarjın oluşması için elektrotlar arasına uygulanması gereken minimum voltaj değeri, bu çalışmada ateşlenme voltajı olarak kullanılacaktır.

Şekil 6.16.'dan görüldüğü gibi katot flamenti ısıtma akımının değişmesi ile TVA deşarj akım voltaj karakteristiği şekil olarak çok fazla değişmemekte ancak ateşlenme voltajı değeri değişmektedir. Bu nedenle TVA deşarjın ateşlendiği ve bakır buharı deşarjının oluştuğu ateşlenme voltajının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi incelenmiştir. Şekil 6.17.a.'da ateşlenme voltajının, sabit elektrotlar arası uzaklık ($d \cong$ 5mm) ve açı ($\phi=50^o$)'da elde edilen flament ısıtma akımına göre değişimi verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi ateşlenme voltajı, flamentin ısıtma akımı arttıkça azalmaktadır.

Ateşlenme voltajının değişimini belirleyen diğer önemli parametre, sabit bir flament akımı için katot ile anot arasındaki uzaklıktır. Şekil 6.17.b.'de farklı elektrotlar arası uzaklıkta elde edilen ateşlenme voltajı değerlerinin değişimi verilmiştir.



Şekil 6.17.a. Ateşlenme voltajının flament ısıtma akımı ile değişimi (Akan vd., 2002).



Şekil 6.17.b. Ateşlenme voltajının katot ile anot arasındaki uzaklığa göre değişimi (Akan vd., 2002).

Anot materyali üzerine yönelen elektron akısının azalmasına neden olacak herhangi bir çalışma parametresinin değişimi, ateşlenme voltajının artmasına neden olmaktadır.

Ateşlenme voltajı tarafından aynı anda sağlanılmak zorunda olan iki koşul ;

$$I_e U_{atş} = qn + C_1 \varepsilon \sigma T^4 + q_{iletim} + C_2 \alpha N \tag{6.5}$$

$$I_e \sqrt{\frac{eU_{atş}}{2m_e}} Q_i N d = C_3 N^+_{kritik} v_i \tag{6.6}$$

bağıntıları ile verilir (Dorondov and Petrosov, 1981). Burada

$$v_i = \sqrt{\frac{eU_{atş}}{2M}} \tag{6.7}$$

iyonların hızıdır.

Bu bağıntılarda $\mathbf{I_e}$ **ve** $\mathbf{U_{atş}}$; elektronların akım yoğunluğu ve ateşlenme voltajını, **n**; birim zamanda birim anot yüzeyinden buharlaşan atomların sayısını, **q**; bir atom için buharlaşma enerjisini, $\mathbf{C_1 \varepsilon \sigma T^4}$; birim zamanda birim yüzeyden radyasyon nedeni ile enerji kayıplarını, **T**; buharlaşan anot materyalinin sıcaklığını, $\mathbf{q_{iletim}}$; birim zamanda elektriksel iletkenlik nedeniyle enerji kayıplarını ve $\mathbf{C_2 \alpha N}$; birim zamanda nötral atomların iyonlaşması için gerekli enerjiyi, **Q** ; iyonlaşma için tesir kesitini, **d**; elektrotlar arasındaki uzaklığı (ϕ=90° durumunda Whenelt silindirinin ön yüzeyi ile anot potasının uç kısmı arasındaki mesafe, $0° < \phi < 90°$ koşullarında Whenelt silindirinin ön yüzeyi ile anot potasının üst yüzeyi arasındaki mesafe), $\mathbf{N^+_{kritik}}$; deşarjın oluşması için elektrotlar arası boşlukta metal iyonlarının kritik yoğunluğunu, $\mathbf{m_e}$ ve **M** ; sırasıyla elektronun ve nötral atomların kütlesini ifade etmektedir. Burada ε; materyalin yayma sabiti, σ; Stefan-Boltzman sabiti ve α; bir atom için iyonlaşma enerjisidir.

Eşitlik 6.6.'nın sol tarafı iyon üretim oranını, sağ tarafı ise birim zamandaki iyon kayıplarını ifade etmektedir. Bu kayıplar, uygulanılan yüksek voltaj tarafından elektrotlar arası uzayın dış kısımlarına hızlandırılan yük yoğunluğu N^+_{kritik} ile ve iyonların hızı v_i ile doğru orantılıdır.

Deşarjın kararlı olması için elektrotlar arası uzayda minimum sayıda yük yoğunluğunun N^{+}_{kritik} oluşması gereklidir. C_1, C_2 ve C_3 sabitleri sistemin geometrisine bağlı sabitlerdir. Bu bağıntılardan C_4 bir sabit ve N; nötral atomlar yoğunluğu olmak üzere, $N \cong C_4.n$ kabul ederek ve iyon üretiminin sıcak katottan yayınlanan elektron akımı I_e ile gerçekleştirildiği düşünülerek, eşitlik 6.6. ile verilen koşulun sağlanması için $I_e \sim 1 / N$ ($I_e.N$ = sabit) varsayarak eşitlik 6.5. ,

$$I_e U_{atş} = C_5 \frac{q}{I_e} + C_1 \varepsilon \sigma T^4 + q_{iletim} + C_2 \alpha N \qquad (6.8)$$

şeklinde yazılır. Burada C_5 bir sabittir.

$C_1\varepsilon\sigma T^4$ radyasyon kayıpları terimi ve q_{iletim} ısı iletim teriminin ihmal edildiği düşük erime noktalı materyaller için ve aynı zamanda $C_2\alpha N$ iyonizasyon teriminin ihmal edildiği iyonizasyon derecesinin düşük olduğu durumda, kaba bir yaklaşımla 6.8. eşitliğinden ateşlenme voltajı;

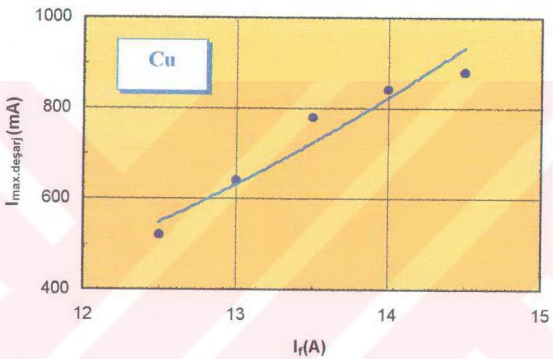
$$U_{atş} \cong \frac{1}{I_e^2} \qquad (6.9)$$

şeklinde yazılabilir. Yüksek erime noktalı materyaller için örneğin zor eriyen metaller için T değeri çok yüksek olacak ve aynı zamanda buharlaşma oranı düşük bir değere sahip olacaktır. Bu durumda $C_1\varepsilon\sigma T^4$ radyasyon terimi baskın bir değere sahip olacak ve sonuç olarak 6.8. eşitliğinden ateşlenme voltajı;

$$U_{atş} \cong \frac{1}{I_e} \qquad (6.10)$$

şeklinde olacaktır. Elektron akımı ile ateşlenme voltajı arasındaki bu teorik bağımlılık, deneysel olarak bakır için elde edilen ve Şekil 6.17.a.'da verilen eğri ile benzerlik göstermektedir.

TVA deşarj ateşlendikten sonra ark akımı hızlı bir şekilde artıp bir maksimuma ulaşır ve burada hemen hemen sabit kalır. Bu sırada yani TVA deşarj ateşlendikten sonra, katot flamenti ısıtma akımı arttırıldığında maksimum deşarj akımı da artmaktadır. Şekil 6.18.'de I_f =12.5A'de bakır buharlarında ateşlediğimiz TVA deşarj'da, katot flamenti ısıtma akımını arttırarak elde ettiğimiz maksimum deşarj akımı değişimi verilmiştir.



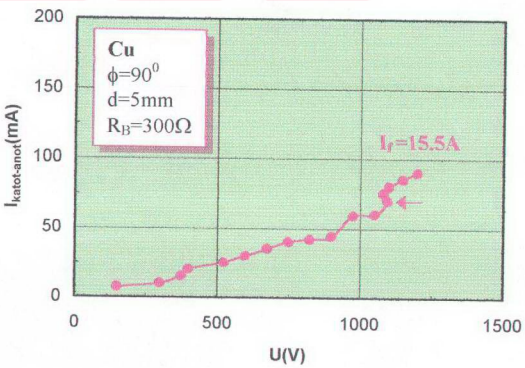
Şekil 6.18. Filament ısıtma akımı ile maksimum deşarj akımının değişimi (Akan, 2003).

Şekil 6.18.'den görüldüğü gibi ateşlenmiş bir TVA deşarj'da katot ısıtma akımı arttırıldığında maksimum deşarj akımı da artmaktadır. Yani ark ateşlendikten sonra deşarj akımı, elektron bombardımanı yardımıyla yani katot ısıtma akımı ile önemli derecede kontrol edilebilmektedir. Ayrıca katot ısıtma akımı sıfır yapılırsa TVA deşarj sönmektedir. Başka bir deyişle TVA deşarj, ateşlendikten sonra dahi kontrol altında tutulabilmektedir. Bu özellik TVA deşarjı diğer anot metali buharlarında deşarj üreten tekniklerden ayıran diğer bir önemli özelliktir. TVA sisteminde metal buharlarında oluşturulan deşarj, katot flamenti ısıtma akımı ile dışarıdan kontrol altında tutulabilmektedir ve katot ısıtma akımının uygun değerde seçilmesi ile istenilen deşarj akımında TVA deşarj oluşturulabilmektedir. Bununla birlikte katot flamenti ısıtma akımı TVA deşarj içinde oluşan iyonların enerjilerini belirleyen en önemli faktördür (Musa et al., 1999). Bu nedenle katot flamenti ısıtma akımının değiştirilmesi ile

iyonların enerjisi de değiştirilebilir ve farklı çalışmalar için istenilen iyon enerjili TVA deşarjlar üretilebilir. Örneğin iyonların enerjisi kaplanan film kalitesini önemli derecede değiştirmektedir (Müller, 1987 ; Martin et al., 1987). Bu nedenle TVA deşarj ile katot flamenti ısıtma akımının değiştirilmesi ile istenilen kaliteye yakın filmleri üretmek mümkün olabilir.

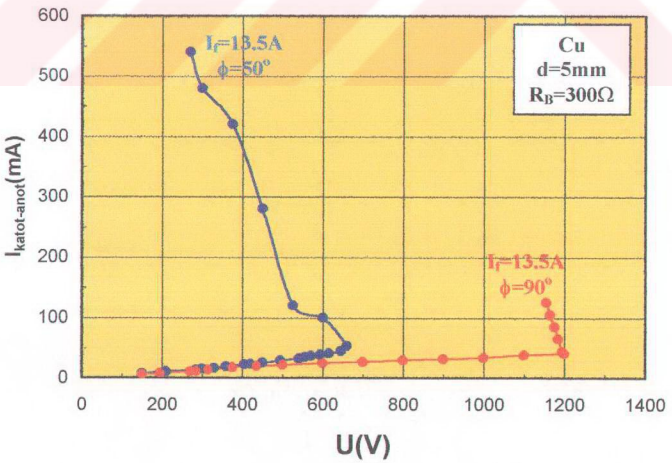
6.5.2. Bakır Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri

TVA'ın, elektrotlar arasındaki açı $\phi=50^{o}$ olduğunda ve I_f =13A ve I_f =13.5A flament ısıtma akımları için bakır buharlarında elde edilmiş akım voltaj karakteristikleri Şekil 6.16.'da verilmiştir. Elektrotların birbirine göre pozisyonu gibi elektrotların geometrisi, termiyonik vakum arkın çalışması için önemlidir. Bu deneysel sonuçlarla ispatlanmıştır. $\phi=90^{o}$ durumunda elde edilen Şekil 6.19. ve Şekil 6.20. ile verilen eğrilere baktığımızda, çalışma parametreleri hemen hemen aynıdır. Buna rağmen akım voltaj karakteristikleri tümüyle farklıdır. Elektrotlar arası uzayda görünür deşarjın belirdiği yer Şekil 6.19.'da okla gösterilmiştir. Bu iki karakteristik için deneysel koşullar arasındaki fark, elektrotların birbirine göre pozisyonunun değişimidir.



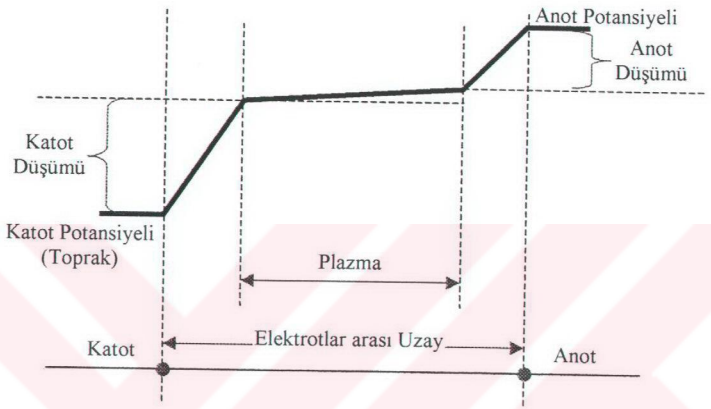
Şekil 6.19. TVA'ın doğrudan ısıtılan katot $\phi=90^{o}$ pozisyonunda ve anot yüzeyinin 1 mm aşağısına yerleştirildiğinde elde edilen akım voltaj karakteristiği (Akan, 2003).

Şekil 6.20. ile verilen akım voltaj karakteristiğinde ϕ=90° durumunda katot, potanın 0.5-1mm yukarısına yerleştirilmişken, Şekil 6.19. ile verilen karakteristik ϕ=90° iken, ancak bu durumda katot, potanın 1mm altına gelecek şekilde yerleştirilerek elde edilmiştir. Bu durumda katot tarafından üretilen elektronlar doğrudan buharlaştırılacak olan materyalin üzerine değil daha çok potanın üzerine gelmiştir. Yine de bu durumda elektron bombardımanı ile yüksek sıcaklığa ulaşan potanın uçlarına doğru erimiş materyalin pota yüzeyi üzerinde yayılması nedeniyle bir deşarj gözlenilebilmektedir. Bu durumda pota içindeki erimiş materyal sürekli şekilde potanın en sıcak noktasına doğru hareket etmektedir. Ancak Şekil 6.16.'daki karakteristiğin elde edildiği gibi, elektron ışınları tamamıyla anot materyali üzerine geldiği zaman, ateşlenme voltajı ve aynı zamanda ark voltaj düşümü (deşarj üzerindeki voltaj) önemli derecede azalmaktadır. Bu nedenle elektrotlar arasındaki açının değişmesi de akım voltaj karakteristiğini değiştirmektedir. Bu durum kıyaslama olması için farklı iki akım voltaj karakteristiğinin verildiği Şekil 6.20. 'de gösterilmiştir. Bu iki termiyonik vakum ark, aynı katot ısıtma akımına fakat ϕ=90° ve ϕ=50° şeklinde farklı katot pozisyonlarına sahiptir.



Şekil 6.20. Farklı elektrotlar arası açı için TVA'ın akım voltaj karakteristikleri (Akan, 2003).

TVA'ın elektrotları arasındaki potansiyel dağılımı şematik olarak Şekil 6.21.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.21. TVA'ın elektrotlar arasındaki potansiyel dağılımı (Ehrich et al., 1998).

Şekil 6.21.'den, ark üzerindeki toplam ark voltaj düşümü U_{ark},

$$U_{ark} = U_c + U_{plazma} + U_a \qquad (6.11)$$

eşitliği ile verilir. Burada U_c; ark katodundaki potansiyel düşümü, U_{plazma}; katot ile anot düşümleri dışında kalan ark plazması üzerindeki voltaj, U_a; anodik voltaj düşümüdür.

Bu potansiyel dağılımını anlamak için TVA deşarjın bir özelliğini tekrar belirtmeliyiz. Gazlarda meydana gelen elektriksel deşarjların aksine TVA deşarj, deşarjın oluştuğu gazı yani metal buharlarını sürekli kaybederek, yeniden deşarj koşullarını sağlayacak gazı kendisi üretmektedir. Daha önce kararlı bir deşarj elde etmek için elektrotlar arası uzayda hem yeterli sayıda metal buharı atomları, hem de yeterli sayıda iyonların oluşturulmak zorunda olduğu belirtilmişti.

Deşarj oluşma koşullarının deşarj oluştuktan sonra sağlanması için, ark ateşlendikten sonra anottan nötral atom üretimi en azından ark ateşlenmeden önceki seviyede tutulmak zorunda olduğundan,

$$U_a I_{ark} = I_e U_{atş} \tag{6.12}$$

koşulunu sağlayan bir anodik voltaj düşümü (U_a) oluşur (Katsch et al., 1990). Burada I_e ve $U_{atş}$ elektron akımı ve ateşlenme voltajıdır ve I_{ark}; ark akımıdır.

Geliştirilen bir model ile anodu ısıtarak anot metali atomlarını üreten elektronların, elektrotlar arasında oluşan plazma içinden üretildiği ve bu elektronların anot voltaj düşümü tarafından anot üzerine hızlandırıldıkları kabul edilmektedir (Musa et al., 1997). Bu modele göre ark ateşlendikten sonra arkın kararlı bir şekilde devam etmesi için eşitlik 6.12. ile verilen harcanan güçler eşitliği, eşitlik 6.8. ile birlikte kullanılabilir.

Isıtılan katotlu bir deşarj için arkın düşük akımlarında dahi deşarjın sağlanması için gerekli elektronlar, sıcak katotun termoelektronik emisyonu ile verildiğinden, bir yüksek voltaj düşümü gerekli değildir. Eğer elektron kaynağı daha zayıf olursa TVA'ın katot voltaj düşümü düzgün bir şekilde kontrol edilebilecek şekildeki gerekli değerlere arttırılabilir (Musa et al., 1997). Bu nedenle katot voltaj düşümü U_c, çalışılan materyalin iyonizasyon potansiyeli civarındadır. Yani $U_c \approx U_i$ dir.

Plazma içindeki voltaj düşümü,

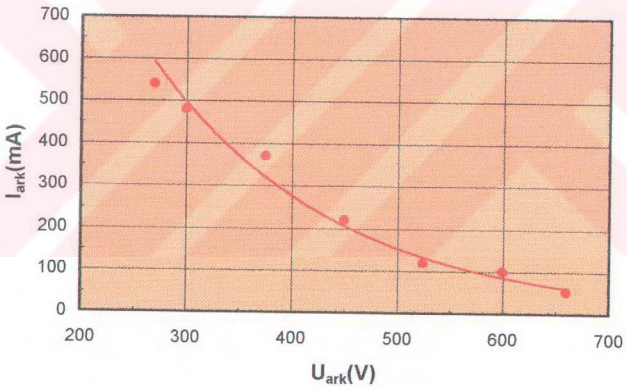
$$U_{plazma} = C_6 I_{ark} \frac{l}{\sigma} \tag{6.13}$$

şeklinde yazılabilir. Burada σ ; plazmanın elektriksel iletkenliği ve C_6 bir sabittir.

Eşitlik 6.8., 6.12. ve 6.13.'ü kullanarak ark voltaj düşümü için,

$$U_{ark} = U_i + C_6 \frac{I_{ark}}{\sigma} + \frac{C_5 \frac{q}{I_c} + C_1 \varepsilon \sigma T^4 + q_{iletim} + C_2 \alpha N}{I_{ark}} \qquad (6.14)$$

denklemi yazılabilir. Düşük akımlarda 6.14. eşitliğinin yalnızca son terimi önemli olacaktır. Yüksek ark akımlarında son terim ihmal edilebilecek ve U_{ark} düşük olacak ve ark akımına göre küçük bir değişim gösterecektir. Ark akımı ile ark voltajının deneysel olarak değişiminin gözlenmesi için TVA deşarj üretildikten sonra deşarj üzerinden geçen akım ve deşarj üzerindeki voltajın ölçülmesi ile elde ettiğimiz bakır buharı TVA deşarj ark akımı-ark voltajı grafiği Şekil 6.22.'de verilmiştir.



Şekil 6.22. Ateşlenmiş TVA deşarjın ark voltajı ile ark akımının değişimi.

TVA deşarj ateşlendikten sonra ark akımı çok hızlı bir şekilde artmakta, ark voltajı da hızlı bir şekilde azalmaktadır. Bu nedenle Şekil 6.22. ile verilen eğri, sabit bir ark voltajı değeri için çok sayıda okunan ark akımı değerinin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Başka bir deyişle grafikte verilen her bir ark voltajı değeri için birkaç kez TVA deşarj oluşturulup bu voltajdaki ark akımları okunmuştur. Bizim deneylerimizde çok yüksek ark akımlarına çıkılmamıştır. Bu nedenle Şekil 6.22. ile verilen grafik

0-600mA arasındaki küçük akımlar için elde edilebilmiştir. Ancak bu küçük ark akımlarında hiperbolik bir eğri elde edilmiştir. Bu sonuç eşitlik 6.14.'e düşük akımlarda getirilen yaklaşımı doğrulamaktadır. Daha yüksek akımlarda bu değişim G.Musa ve arkadaşları tarafından incelenmiştir (Musa et al., 1994). Burada yüksek ark akımlarında ark voltajı düşük olmakta ve ark akımı arttıkça çok fazla değişmemektedir.

TVA'da katot toprağa bağlı olduğu için ve elektrotlar arası uzayda oluşan metal buharı plazması ile toprak (vakum odası) arasındaki potansiyel düşümü Şekil 6.21.'den görüldüğü gibi katot düşümüne eşit olduğu için plazma içindeki iyonlar, vakum odasının çeperlerine katot düşümü ile orantılı bir enerji ile ulaşırlar. Bununla birlikte plazma içinde meydana gelen yük transferi çarpışmaları sonucu bazı iyonlar nötral hale gelirler (Musa et al., 1997). Bu nedenle TVA deşarjı içinde enerjik iyonların yanında enerjik nötral atomlar da bulunur. Vakum odası toprak olarak kullanıldığı için plazma içindeki iyonlar vakum odası çeperlerine göre daha yüksek potansiyelde bulunmaktadır. Bu nedenle iyonlar çeperlere doğru hızlandırıldıkları gibi çeperlere doğru yönlendirilmiş de olmaktadırlar. Bu TVA'ın kaplama teknikleri bakımından önemli bir avantajıdır. Vakum odası içinde bulunan kaplamanın yapılacağı taban üzerine iyonlar yönlendirilmiş ve hızlandırılmış olmaktadır.

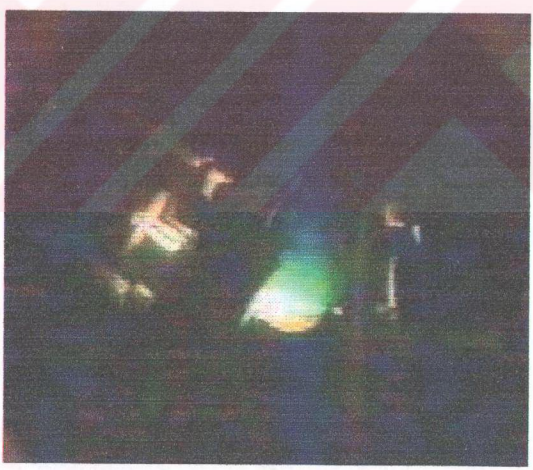
TVA deşarjın görüntüsü değişik safhalardaki arkın gösterildiği Şekil 6.23.'de görülebilmektedir. Şekil 6.23.a. , Şekil 6.23.b. ve Şekil 6.23.c.'de bakır buharlarında oluşturulan TVA deşarj fotoğrafları verilmiştir. Bu fotoğraflar vakum odasının ön kısmında bulunan camdan dijital kamera ile çekilmiştir. Bu üç fotoğraf ark ateşlendikten hemen sonra ark akımı sabit kalana kadar elde edilen kamera görüntülerinden belli zaman aralıklarında seçilmiştir. Görüldüğü gibi TVA deşarjın büyüklüğü (elektrotlar arası uzayda kapladığı hacim) ark akımının artması ile artmaktadır.



a.)



b.)



c.)

Şekil 6.23. a., b., c. Bakır buharı TVA deşarjın fotoğraf görüntüleri. İlk fotoğraf ark hemen ateşlendikten sonraki görüntüdür. Diğer iki görüntü ark ateşlendikten sonra ark akımı arttıkça alınmıştır.

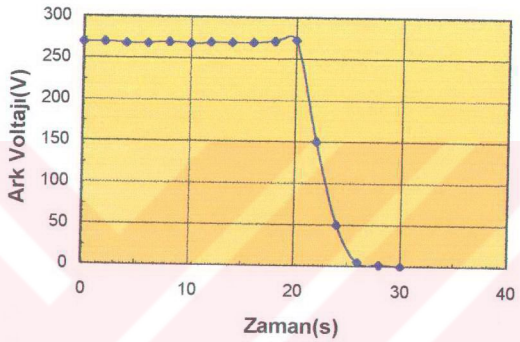
Yaptığımız bazı deneylerde ark ateşlendikten sonra katot ısıtma akımı yada elektrotlar arasına uygulanan voltaj değiştirilmediği halde deşarj birden sönüp tekrar kendiliğinden ateşlenmiştir. Bu arkın sönüp yanma titreşimi bazı durumlarda bir kez olurken bazı durumlarda pota içindeki tüm materyal bitinceye kadar sürmekte ve bu titreşimin periyodu 30s ile 60s arasında değişmektedir. Bu titreşimli deşarjların gözlendiği durumları analiz ettiğimizde üç farklı durumda titreşimli deşarj oluşmaktadır.

Durum 1: Pota içinde çok az materyal kaldığında: Bu durumda pota içindeki bakır hemen hemen bitmiş olmasına rağmen, potanın sapında bulunan erimiş bakır pota içine akmakta ve katottan elektron bombardımanı ile bu bakırın deşarjı oluşturulmaktadır. Ancak deşarj potanın sapındaki bakıra doğru yayılmak isterken sönmektedir. Deşarj sönerken pota sapında bulunan bakır tekrar pota içine akarak aynı sürecin devam etmesine neden olmaktadır. Bu durumdaki titreşimli deşarj, pota sapındaki materyal bitinceye kadar devam etmektedir ve periyodu yaklaşık 30-40s' dir.

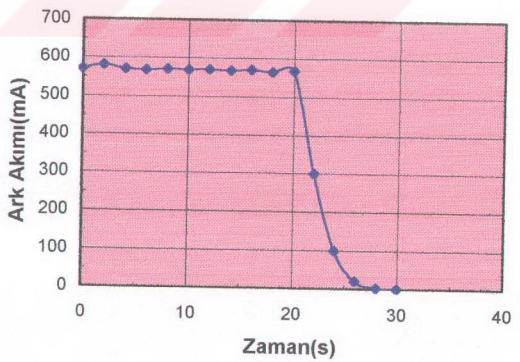
Durum 2: Pota yatay değildir: Bu durumda meydana gelen titreşimli deşarj durum 1'e benzerdir. Bu durumda pota katota doğru biraz eğimlidir ve pota içindeki materyal potanın katot kısmına doğru akmaktadır. Bu durumda periyodu yaklaşık 50-60s olan titreşimli deşarjlar gözlenmiştir.

Durum 3: Uygulanan güç pota içindeki bakırı kolayca buharlaştırmak için yeterli değildir. Bu durumda tungsten pota ivmelendirilmiş elektronlar tarafından ısıtıldıktan sonra bakır erir ve sonra buharlaşmaya başlar. Eğer bakır tüm potanın üzerini kaplayan erimiş bakır tabakası haline gelirse kaynamaya başlar ve eğer spot boyutu (tungsten pota üzerinde elektron ışını spotu) küçükse, spot alanı içindeki bakır kolayca buharlaştırılır. Aynı zamanda bakır buharları spot alanına gelen erimiş bakırın üzerinden uzaklaşırlar. Şimdi tüm bakır spot alanından kurtulmuş ve serbest hale gelmiştir. Çünkü erimiş bakırı terkedecek daha fazla buhar kalmamıştır. Şimdi erimiş bakır kısmen soğutulmuş spot alanını kaplar ve buharlaşma sona erer. Sonra bu çevrim tekrar başlar.

Bakır buharlarında ürettiğimiz TVA deşarjların kararlılıklarının incelenmesi için ark voltajı ve ark akımının zamanla değişimi incelenmiştir. Katot flamenti ısıtma akımı I_f = 13.5 A, elektrotlar arası açı $\phi = 50^\circ$ ve elektrotlar arası uzaklık yaklaşık 5mm koşullarında bakır buharlarında üretilen TVA deşarjın ark voltajının zamanla değişimi Şekil 6.24.a.'da, ark akımının zamanla değişimi ise Şekil 6.24.b.'de verilmiştir.

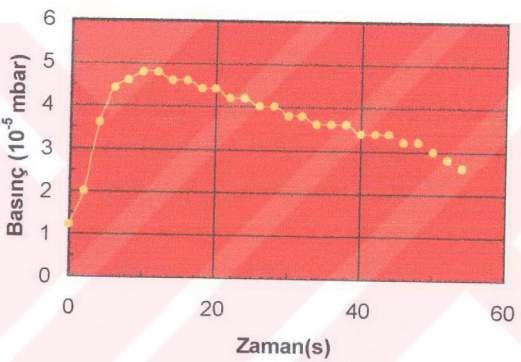


Şekil 6.24.a. TVA deşarjın ark voltajı - zaman değişimi (Akan, 2003).



Şekil 6.24.b. TVA deşarjın ark akımı - zaman değişimi (Akan, 2003).

Şekil 6.24.a. ve Şekil 6.24.b.'de ark voltajı ve ark akımının zamanla değişimi 20s için verilmiştir. Bu hem ark akımının hem de ark voltajının aynı zaman dilimi içinde değişimini gözlemek için yapılmıştır. 20s sonra katot flamenti ısıtma akımı kapatılarak deşarjlar söndürülmüştür. Bizim yaptığımız çoğu deneyde ark voltajı ve ark akımı pota içindeki materyal bitinceye kadar hemen hemen sabit kalmıştır. Bu TVA deşarjın ateşlendikten sonra çalışma parametreleri açısından son derece kararlı kaldığını göstermektedir. TVA deşarjın vakum odası içindeki basınç değişimi de incelenmiştir. Bu değişim Şekil 6.25.'de verilmiştir.



Şekil 6.25. TVA basıncının zamanla değişimi (Akan, 2003).

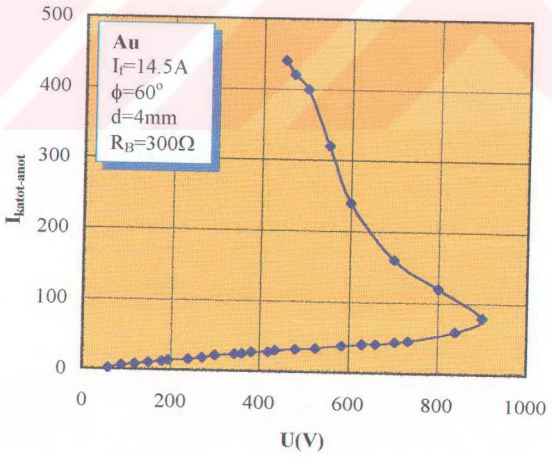
Şekil 6.25.'den görülebildiği gibi pota içindeki bakır buharlaşmaya başlayınca vakum odası içindeki basınç hızlı bir şekilde artmaktadır. Bu iki sebepten olabilir. Birincisi, kullandığımız bakır saf değildir ve buharlaşma sırasında içinden gaz atomları vakum odası içinde basıncın artmasına neden olmaktadır. İkincisi, TVA deşarj ateşlendikten sonra plazma içinde oluşan fotonlar ve enerjitik parçacıklar vakum odasının çeperlerine vurarak buralara adsorbe olmuş gaz atomlarını sökerek bunların vakum odası içine yayılmasına ve basıncın artmasına neden olabilir.

Ark ateşlendikten sonra basınç, ark deşarjın çalışması boyunca sürekli olarak azalır ve belli bir değerde hemen hemen sabit kalır. Bu sırada TVA deşarj hem

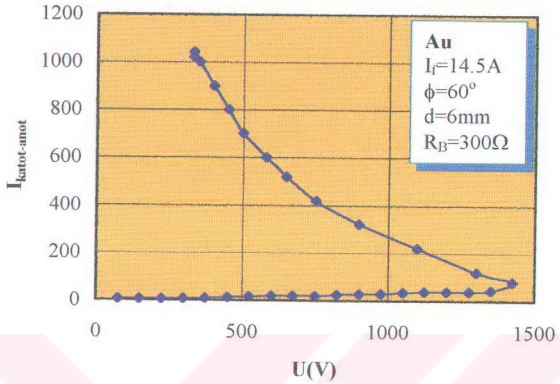
yayınlanan radyasyon bakımından hem de ark voltajı ve ark akımının zamanla değişimi bakımından son derece kararlıdır. Ark ateşlendikten sonra basıncın azalması, TVA deşarj oluştuktan sonra vakum odasının iç yüzeyinin yeni metal atomları ile kaplanarak vakum odası çeperlerine adsorbe olmuş atomların sökülmesinin zorlaşması ile açıklanabilir. Bununla birlikte vakum odasının çeperlerinde deşarjın oluştuğu gazın aktif molekülleri de adsorblanarak basınç azalabilir.

6.5.3. Altın Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri

TVA'ın akım voltaj karakteristiği erime noktası ve anottan bir atomu buharlaştırmak için gerekli enerjinin farklı olduğu buharlaştırılacak materyalin cinsine bağlıdır. Bu nedenle bakırdan farklı olarak altın buharlarında TVA deşarjlar elde edildi. Şekil 6.26. ve Şekil 6.27.'de farklı elektrotlar arası düzenlenişte altın buharlarında elde ettiğimiz TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri verilmiştir.



Şekil 6.26. ϕ=60°, d=4mm için altın buharlarında TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

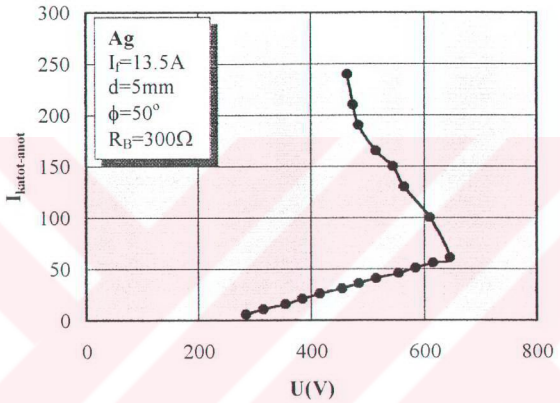


Şekil 6.27. ϕ=60°, d=6mm için altın buharlarında TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

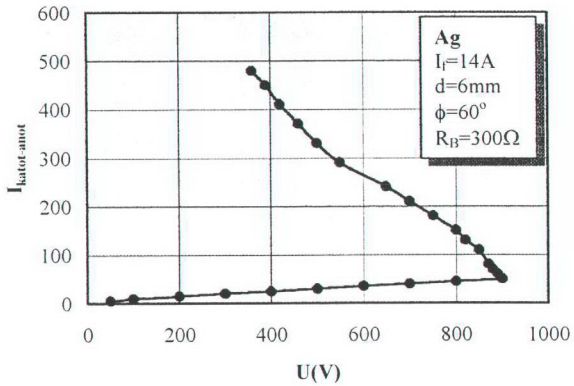
Şekil 6.26. ve Şekil 6.27.'de verilen karakteristikler için buharlaştırılacak materyal olarak 14 ayar altın kullanılmıştır. Şekil 6.26. ile verilen karakteristik ile Şekil 6.27.'de verilen karakteristik arasındaki fark elektrotlar arası uzaklıktır. Görüldüğü gibi elektrotlar arası uzaklık arttırıldığında ateşlenme voltajı daha yüksek çıkmaktadır.

6.5.4. Gümüş Buharlarında Termiyonik Vakum Ark Deşarj Karakteristikleri

Buharlaştırılacak materyal olarak gümüş kullanarak elde edilen gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri Şekil 6.28. ve Şekil 6.29.'da verilmiştir.

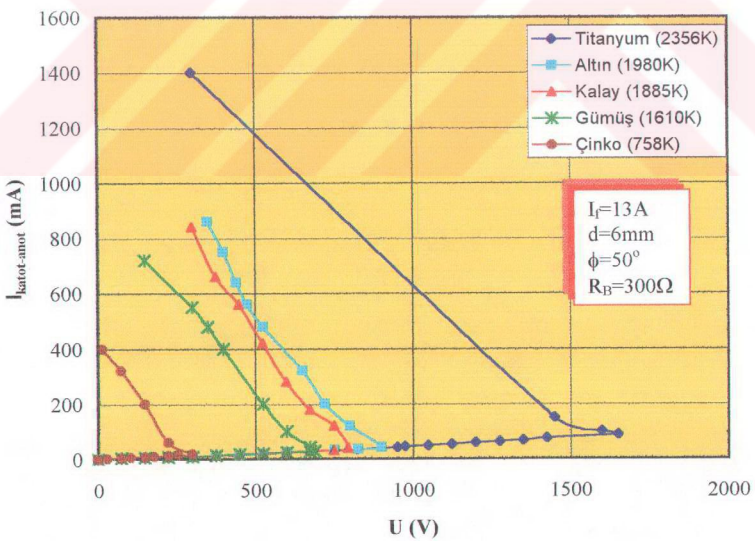


Şekil 6.28. ϕ=50°, d=5mm için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.



Şekil 6.29. ϕ=60°,d=6mm için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

Şekil 6.28. ve Şekil 6.29.'da verilen karakteristikler %99 saflıktaki gümüş buharlarında elde edilmiştir. Bu iki karakteristik hemen hemen aynı katot flamenti ısıtma akımında ancak Şekil 6.29.'da verilen karakteristik daha yüksek elektrotlar arası açı ve uzaklıkta elde edilmiştir. Bu nedenle bu durumda daha yüksek ateşlenme voltajında TVA deşarj oluşmuştur. TVA'ın akım voltaj karakteristiği buharlaştırılacak materyal cinsine bağlıdır. Eşitlik 6.8.'den görüldüğü gibi temel materyal parametreleri T sıcaklığı ve q buharlaşma enerjisidir. Bu nedenle aynı çalışma parametrelerinde (katot flamenti ısıtma akımı I_f = 13A, elektrotlar arası uzaklık d=6mm ve elektrotlar arası açı $\phi=50^o$) farklı metaller için TVA deşarjlar üretildi. Şekil 6.30.'da çinko, gümüş, kalay, altın ve titanyum buharlarında üretilen TVA deşarjların akım voltaj karakteristikleri verilmiştir. Şekil 6.30.'dan görüldüğü gibi aynı çalışma parametrelerinde yalnızca buharlaştırılacak materyalin değişmesi, TVA deşarj akım voltaj karakteristiğini değiştirmektedir. Şekil 6.30.'da kullanılan materyallerin yanında, p=1 torr'daki buharlaşma sıcaklıkları da verilmiştir.

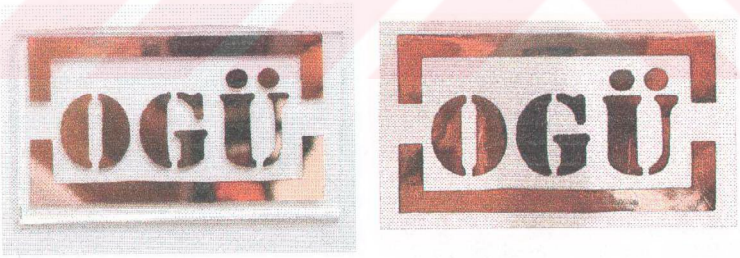


Şekil 6.30. Zn, Ag, Sn, Au ve Ti TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri.

6.6. TVA ile Kaplama ve İnce Film Depolama

6.6.1. TVA ile Kaplama

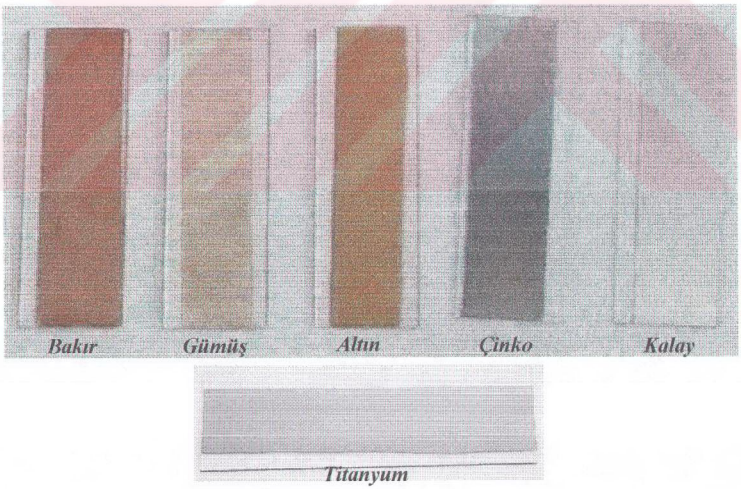
TVA'ı kaplama teknolojileri bakımından kullanmak için elektrotlar sisteminin monte edildiği tablaya, kaplama yapılacak tabanın monte edildiği bir ayak yerleştirilmiştir. Bu ayak yardımıyla kaplama yapılacak taban, TVA kaynağı olan anotun üstüne gelecek şekilde yerleştirilebilmektedir. Elektrotlar arasında üretilen metal buharı plazması, vakum odası içinde her doğrultuda yayıldığı için bu ayak üzerine yerleştirilen taban üzerine metal kaplamalar elde edilmektedir. TVA ile elektrotlar arasında oluşan plazma, vakum odası içinde her doğrultuda yayıldığı için kaplama yapılacak taban, vakum odası içinde istenilen yere yerleştirilebilir. Ancak anottan buharlaşan metal yoğunluğu elektrotlardan uzaklaştıkça azalacağı için, kaplama yapılacak taban elektrotlardan yaklaşık 20cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Cam ve seramik tabanlar üzerine alüminyumdan yaptığımız OGÜ şablonu ile elde ettiğimiz bakır kaplamaların fotoğrafı Şekil 6.31.'de verilmiştir.



(a) (b)

Şekil 6.31.a. TVA ile cam taban üzerine, **b.** seramik taban üzerine OGÜ şablonu ile elde ettiğimiz bakır kaplamaların fotoğrafları.

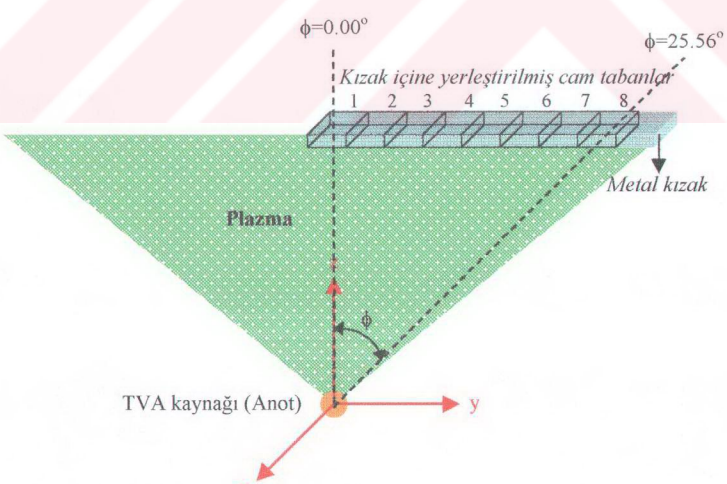
Kaplanan tabaka olarak kullandığımız cam ve seramikler vakum odası içine yerleştirilmeden önce, çalışma frekansı 43 kHz olan Delta marka DG-1 model ultrasonik banyoda temizlenildi. Fakat seramik taban kullanımlarında vakum odası içindeki vakumun, normal değerlerin biraz üstünde kaldığı gözlenildi. Seramikler tozdan üretilmektedir ve içinde çok sayıda boşluk içermektedir. Bu nedenle ultrasonik banyoda yıkanırken bu boşluklar içine su molekülleri yerleşmektedir. TVA ile cam tabanlar üzerine gümüş, altın, çinko, kalay ve titanyum kaplamaları da yapıldı. Çinkonun buharlaşma sıcaklığı düşük ve süblimleştiği için, çinko buharı TVA deşarjlarında 16mm eninde, 21mm uzunluğunda, 0.05mm kalınlığında ve 0.4mm derinliğinde tungsten pota kullanıldı. Şekil 6.32.'de bu kaplamaların fotoğrafları verilmiştir. Bakır, gümüş ve altın buharı TVA deşarjlarında yeşil renkte, çinko buharı TVA deşarjında pembe renkte, kalay ve titanyum buharı TVA deşarjında mavi renkte radyasyon gözlenildi.



Şekil 6.32. TVA ile cam taban üzerine kaplanan bakır, gümüş, altın, çinko, kalay ve titanyum kaplamalarının fotoğrafları.

6.6.2. TVA Kaynağı İle Farklı Açılarda Ve Uzaklıklarda Depolanan Bakır İnce Filmlerin Kalınlık Değişiminin İncelenmesi

TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan filmlerin kalınlık değişiminin incelenmesi için öncelikli olarak 20mm x 200mm boyutlarında bir metal kızak yapıldı. Bu kızak içine 10mm x 20mm boyutlarında ve 1mm kalınlığında 8 adet cam taban yerleştirildi. Bu cam tabanlar metal kızak içine yerleştirilmeden önce ultrasonik banyoda sitrik asit yardımıyla temizlenildi ve daha sonra yaklaşık 1.5 saat 150 °C'lik fırında kurutuldu. Temizlenme işlemleri yapılan bu cam tabanların her biri numaralandırılarak, hassasiyeti ± 0.1mg olan dijital terazide tek tek tartıldı ve her bir camın kütlesi m_1, m_2,.....,m_8 şeklinde kaydedildi. Bu kayıt işlemi yapılırken metal kızağa ilk olarak yerleştirilecek cam 1 numara ile, diğerleri de aynı şekilde metal kızağa giriş sırasına göre numaralandırıldı. Bu 8 cam taban metal kızak içine yerleştirildikten sonra Şekil 6.33.'de şematik olarak gösterildiği gibi TVA kaynağı olan anot potasından z=140 mm uzaklığa y doğrultusunda yerleştirildi. Burada z; z doğrultusunda TVA kaynağı ile 1 numaralı camın orta noktasına olan dik uzaklıktır.



Şekil 6.33. TVA deşarj ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanma sistemi.

İçinde 8 cam taban bulunan metal kızak elektrotlar sisteminin üst kısmına yerleştirilirken 1 numaralı camın tam anot potasının üstüne gelmesine dikkat edildi. Böylece 1 numaralı cam, TVA kaynağı ile z doğrultusunda 0°'de, 8 numaralı cam taban ise 26.56°'de tutulmuş oldu. Burada 0° ; TVA kaynağı ile 1 numaralı camın tam orta noktasını birleştiren doğrudur. Diğer açılar bu doğru ile diğer camların orta noktalarını TVA kaynağına birleştiren doğrular arasında kalan açılardır.

TVA kaynağı üzerine cam tabanların yerleştirilme işlemi bu şekilde tamamlandıktan sonra vakum odası yaklaşık 2.10^{-5} mbar'a kadar vakumlanıldı ve katot flamenti ısıtma akımı I_f =13A, elektrotlar arası açı ϕ=90°, elektrotlar arası uzaklık d=2mm koşullarında, elektrotlar arası uzayda bakır buharlarında TVA deşarj oluşturuldu. Bu deneyde kaplanılacak materyal olarak pota içine m=0.5g bakır yerleştirildi. Deşarj dolayısıyla depolanma, pota içindeki tüm materyal bitinceye kadar devam etti. Deşarj boyunca ark akımı 180 mA civarında sabit kaldı. Vakum odasının soğuması beklenildikten sonra vakum odasından metal kızak çıkarıldı ve üzerine bakır depolanmış cam tabanlar, kızak içine yerleştirilme ve tartım sıralarına dikkat edilerek tek tek çıkarılarak dijital terazide tekrar tartıldı. Üzerine bakır depolanmış cam numunelerin kütleleri m'_1, m'_2,....,m'_8 şeklinde kaydedildi. Üzeri bakır kaplanmış cam tabanın kütlesinden, bakır kaplanmadan önceki kütlesi çıkarılarak yani $\Delta m_1 = m'_1 - m_1$, $\Delta m_2 = m'_2 - m_2$,....., $\Delta m_8 = m'_8 - m_8$ kütle farkları hesaplanarak her bir cam taban üzerine depolanan bakır miktarı bulundu. Kızak içine yerleştirilen 10mm genişliğindeki her bir cam üzerine depolanan bakır tabakaların uniform olduğu kabul edilerek ve

$$h = \frac{\Delta m}{S.\rho_{Cu}} \qquad (6.15)$$

eşitliğini kullanarak, her bir cam taban üzerine depolanan bakır tabakaların kalınlıkları bulundu. Bu eşitlikte h; cam taban üzerine depolanan film kalınlığını, Δm; her bir cam taban üzerine depolanan bakır kütlesini, S; depolanan filmin yüzey alanını, ρ_{Cu}; depolanan materyal olarak kullandığımız bakırın yoğunluğunu (Laboratuvarda piknometre yöntemi ile yaptığımız deneylerde 8.11g/cm^3 bulundu) ifade etmektedir.

Burada depolanan filmin yoğunluğu, bulk metalin yoğunluğuna eşit alınmıştır. Çoğu işlemde depolanan film yoğunluğu, bulk metalin yoğunluğundan farklıdır. Ancak iyonların bombardımanı ile üretilen filmlerin yoğunluğu, bulk metalin yoğunluğuna yakındır (Rossnagel and Cuomo, 1989). TVA ile üretilen filmler buharlaştırılan materyalin iyonlarının bombardımanı ile elde edildiği için depolanan film yoğunluğu olarak, depolama yapılan bakırın yoğunluğu alınmıştır. y doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan filmlerin bulunan kalınlıkları Tablo 6.3.'de verilmiştir. Tablo 6.3.'de verilen depolanma açısı değerleri trigonometrik hesaplarla bulunmuştur.

Tablo 6.3. y doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlık değişimi.

ρ_{Cu}=8.11g/cm^3, I_f=13A, z=140mm, d=2mm, y doğrultusu					
No	**Depolanma açısı (ϕ^o)**	**Depolanma uzaklığı (mm)**	**Deneysel kalınlık h(μm)**	**Hesap ile bulunan kalınlık Cx10^{-7}**	**Deneysel kalınlık/Hesap ile bulunan kalınlık 10^4/C**
1	0.00	140	0.821	510	1.6
2	4.08	140.35	0.771	506	1.52
3	8.13	141.42	0.652	494	1.31
4	12.09	143.17	0.598	476	1.25
5	15.94	145.60	0.544	453	1.2
6	19.65	148.66	0.491	425	1.15
7	23.19	152.31	0.428	396	1.08
8	26.56	156.52	0.301	364	0.82

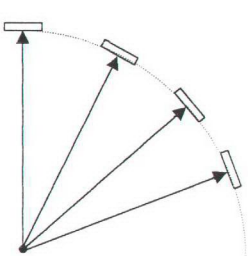
Bu deneyde depolanma açısı ile film kalınlığının değişimi incelenmek istenmiştir. Ancak Şekil 6.33.'de verilen bir düzenek ile bu deney yapıldığında depolanma açısı değiştikçe depolanma uzaklığı da değişmektedir. Bu nedenle Tablo 6.3.'de kalınlık

değişimi, depolanma açısı ile birlikte depolanma uzaklığı için de verilmiştir. Burada verilen depolanma uzaklıkları da trigonometrik hesaplarla bulunmuştur. Tablo 6.3.'den görüldüğü gibi TVA kaynağı ile dik doğrultuda yani z doğrultusunda 0°'de yerleştirilen cam taban üzerine depolanan filmin kalınlığı daha büyük çıkarken, TVA kaynağı ile daha büyük açılarda depolanan filmlerin kalınlığı azalmaktadır (Akan et al., 2002).

Depolanan film kalınlığı,

$$h=C\frac{Cos\phi}{r^2} \tag{6.16}$$

Kosinüs yasası ile verilir. Burada ϕ; depolanma açısı ve r; depolanma uzaklığıdır. Tablo 6.3.'de Kosinüs yasası ile teorik olarak hesaplanmış kalınlık değerleri de verilmiştir. Görüldüğü gibi deneysel kalınlık değerleri ile teorik olarak hesaplanan kalınlık değerleri arasında fark vardır. Bu, deneysel ölçümlerde elde edilen kalınlık değerlerinin ölçülmesinde nötral atom ve iyonların film yüzeyi üzerine geliş açılarının 90° olmaması nedeniyledir. Eşitlik 6.16. ile verilen bağıntıdan görüldüğü gibi depolanan film kalınlığı, yalnızca depolanma açısına ve depolanma uzaklığına bağlıdır. Bu durumda her film yüzeyi üzerine depolanan nötral atom ve iyonların geliş açısı Şekil 6.34.'de gösterildiği gibi 90°'dir.



Şekil 6.34. Farklı açılarda depolanma.

TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan filmlerin kalınlığındaki değişim, x doğrultusunda da incelenmiştir. Bu durumda y doğrultusu için yapılan işlemler, x doğrultusunda tekrar edilerek Tablo 6.4.'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

Tablo 6.4. x doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı açılarda ve uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlık değişimi.

ρ_{Cu}=8.11g/cm^3, I_f=13A, z=140mm, d=2mm, x doğrultusu					
No	**Depolanma açısı (ϕ^o)**	**Depolanma uzaklığı (mm)**	**Deneysel kalınlık h(μm)**	**Hesap ile bulunan kalınlık Cx10^{-7}**	**Deneysel kalınlık/Hesap ile bulunan kalınlık 10^4/C**
1	0.00	140	0.650	510	1.27
2	4.08	140.35	0.592	506	1.16
3	8.13	141.42	0.292	494	0.59
4	12.09	143.17	0.242	476	0.5
5	15.94	145.60	0.188	453	0.41
6	19.65	148.66	0.131	425	0.3
7	23.19	152.31	0.0637	396	0.16
8	26.56	156.52	0.0635	364	0.17

x doğrultusunda da, y doğrultusu gibi depolanma açısı büyüdükçe depolanan film kalınlığı azalmaktadır. Bu azalış, y doğrultusunda daha periyodik olurken x doğrultusunda her iki cam tabanda bir düşüş gözlenmektedir. Bununla birlikte bu doğrultuda deneysel sonuçlarla teorik hesaplama sonuçları arasında daha büyük farklar çıkmaktadır. Bunun nedeni, bu doğrultuda elektron bombardımanının olmaması olabilir.

TVA kaynağı ile farklı dik uzaklıklarda da depolanmalar elde edilerek, bunların kalınlık değişimi incelenildi. Bunun için z doğrultusunda TVA kaynağı ile farklı dik uzaklıklara cam tabanlar yerleştirildi. Her farklı dik uzaklık için ayrı TVA deşarj üretilerek depolanma yapıldı ve farklı dik uzaklıklarda depolanan filmlerin kalınlıkları bulundu.

Farklı dik uzaklıkta depolanmalar elde etmek için ilk olarak 10mm x 76mm boyutlarında ve 1 mm kalınlığında, ultrasonik banyoda yıkanıp fırında kurutulan ve kütlesi tartılarak numaralandırılan bir cam taban, TVA kaynağı olan anot potasından z=20mm dik uzaklığa yine bir metal tutucu yardımıyla yerleştirildi. Burada camın orta noktasının TVA kaynağının tam üstüne gelmesine dikkat edildi. Vakum odası vakumlandıktan sonra I_f = 13A, elektrotlar arası açı $\phi = 90^{\circ}$, elektrotlar arası uzaklık d=2mm koşullarında, bakır buharlarında TVA deşarj oluşturuldu. Burada buharlaştırılacak bakır olarak m=0.1g bakır kullanıldı. Deşarj ve dolayısıyla depolanma, pota içindeki bakır bitinceye kadar devam etti. Daha sonra cam taban üzerine depolanan bakır kütlesi bulunarak, farklı açılarda depolanan filmlerin kalınlığının bulunmasındaki işlemler tekrar edilerek, TVA kaynağından z=20 mm dik uzaklıkta depolanan film kalınlığı bulundu. Daha sonra TVA kaynağından z=30 mm, 40 mm, 50 mm ve 60 mm uzaklıklarda yeniden aynı koşullarda TVA deşarjlar üretilerek depolanmalar yapıldı ve her uzaklıkta depolanan film kalınlıkları bulundu. TVA kaynağından farklı dik uzaklıklar da depolanan filmlerin, bulunan kalınlıkları Tablo 6.5.'de verilmiştir.

Plazma kaynağından farklı dik uzaklıklarda yapılan her deneyin aynı koşullarda gerçekleşmesi için kullanılan bakır miktarı her deneyde m=0.1g sabit tutuldu. Bununla birlikte katot flamenti ısıtma akımı yine her deneyde I_f =13A sabit tutuldu. Farklı dik uzaklıklar için elde edilen deşarjlar sırasında, deşarj akımı I_d=100-110mA arasında sabit kaldı. Bununla birlikte deşarjın oluşma süresi de her deneyde sabit tutulmaya çalışıldı. m=0.1g kütleli bakır için deşarjlar yaklaşık 4-5 dakika sürdü. TVA kaynağından farklı dik uzaklıklarda depolanan filmlerin kalınlıkları ölçülürken 15.2cm^2'lik yüzeyin kalınlığının uniform olduğu ve depolanan bakır filmin yoğunluğunun bulk metalin yoğunluğuna eşit olduğu kabul edilmiştir.

Tablo 6.5. TVA kaynağından farklı dik uzaklıklarda depolanan bakır filmlerin kalınlıkları.

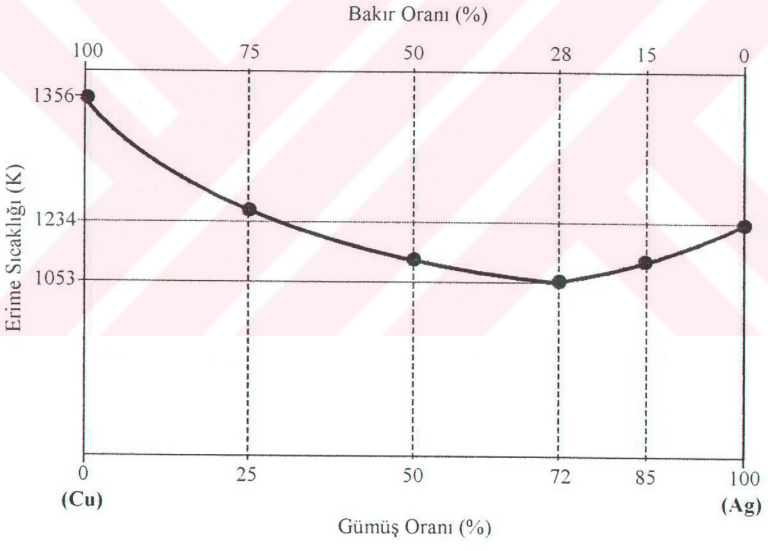
ρ_{Cu}=8.11g/cm^3, I_f=13A, d=2mm, z doğrultusu			
TVA kaynağı (anot)'na Uzaklık (mm)	**Deneysel kalınlık h(μm)**	**Hesap ile bulunan kalınlık Cx10^{-3}**	**Deneysel kalınlık/Hesap ile bulunan kalınlık 10^3/C**
20	2.84	2.5	1.136
30	1.11	1.111	0.999
40	0.706	0.625	1.129
50	0.543	0.4	1.357
60	0.362	0.277	1.306

TVA kaynağına z=10mm dik uzaklığa yerleştirilen cam taban üzerine depolanan bakır tabakanın kalınlığının ölçülmesi için yapılan deneyde ilginç bir sorunla karşılaşıldı. Bu durumda, cam taban üzerinde tam anotun üst kısmına karşılık gelen dairesel bölgenin depolanmadığı görüldü. Bu açık olan bölgenin uç kısımları da neredeyse kendi kendine kalkmak üzereydi. Bu olay, cam taban üzerine depolanan tabakanın daha sonra arkadan gelen şiddetli iyon ve bakır atomları tarafından bombardıman edilerek bu bölgede oluşan film içinde bir stres oluşması nedeniyle olabilir. Ayrıca bu bölgede meydana gelen aşırı sıcaklık nedeniyle bu bölge kalkmış olabilir. Bu bölgedeki sökülme, camın genleşme katsayısı ile depolanan filmin genleşme katsayısının farklı olması nedeniyle de meydana gelmiş olabilir.

Tablo 6.5.'den görüldüğü gibi TVA kaynağından uzaklaştıkça cam taban üzerine depolanan tabakanın kalınlığı azalmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü metal buharı yoğunluğu TVA kaynağından uzaklaştıkça azalmaktadır. Bununla birlikte farklı dik uzaklıklarda yapılan depolamalar ile elde edilen filmlerin kalınlığının, hesap ile bulunan kalınlıklara daha yakın çıktığı görülmektedir. Bu, farklı dik uzaklıklarda yapılan depolamalarda, depolanan parçacıkların taban üzerine geliş açısının 90° olması nedeniyledir.

6.7. TVA ile Bakır-Gümüş Alaşımları

TVA ile bakır-gümüş alaşımları yapıldı. Yapılan bakır-gümüş alaşımları farklı oranlarda elde edildi. Bu farklı oranlar bakır-gümüş alaşımının faz diyagramı üzerinden seçildi. Şekil 6.35.'de bakır-gümüş alaşımı faz diyagramı verilmiştir. Görüldüğü gibi diyagram, bakırın erime sıcaklığından başlıyor ve daha sonra alaşım içindeki gümüş oranı arttıkça alaşımın erime sıcaklığı bir minimum değere kadar azalmaktadır. Bu minimum değerde bakır-gümüş oranı; %28 bakır, %72 gümüştür. Bu orandan sonra gümüş oranı artarsa alaşımın erime sıcaklığı, gümüşün erime sıcaklığına kadar artmaktadır.



Şekil 6.35. Bakır-gümüş alaşımı faz diyagramı (Lyman, 1973).

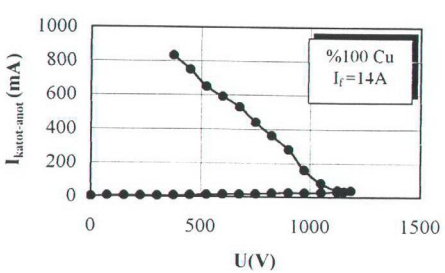
TVA ile alaşım yapılan bakır-gümüş oranları, Şekil 6.35.'de verilen faz diyagramı üzerinde nokta olarak gösterilmiştir. Diyagram üzerinden görüldüğü gibi ilk

olarak %100 bakır için, bakır ve gümüşün farklı oranları için ve son olarak %100 gümüş için çalışıldı. Tüm deneylerin aynı deneysel koşullarda gerçekleşmesi için her deney, aynı elektrotlar arası düzenlenişte ve aynı katot flamenti ısıtma akımında (I_f =14A) yapıldı. TVA ile alaşım yapılarak deşarjları oluşturulan ve akım voltaj karakteristikleri elde edilen bakır-gümüş oranları Tablo 6.6.'da verilmiştir.

Tablo 6.6. TVA ile alaşım yapılan bakır-gümüş oranları ve kütle olarak karşılıkları.

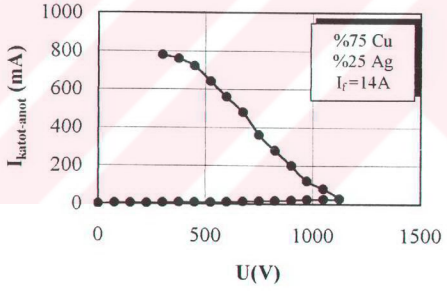
Deney No	Bakır		Gümüş	
	Yüzde	Kütle (g)	Yüzde	Kütle (g)
1	100	0.2	0	0
2	75	0.15	25	0.05
3	50	0.1	50	0.1
4	28	0.056	72	0.144
5	15	0.3	85	0.17
6	0	0	100	0.2

Tablo 6.6.'da verilen oranlarda çalışmak için ilk olarak %100 bakır kullanarak TVA deşarj oluşturuldu. Bunun için anot potası içine 0.2g bakır konuldu. Vakum odası vakumlandıktan sonra flamentten I_f =14A akım geçirilerek yalnızca bakır buharlarında TVA deşarj elde edildi. Şekil 6.36.'da %100 Cu için elde edilmiş bakır buharı TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



Şekil 6.36. %100 Cu için TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

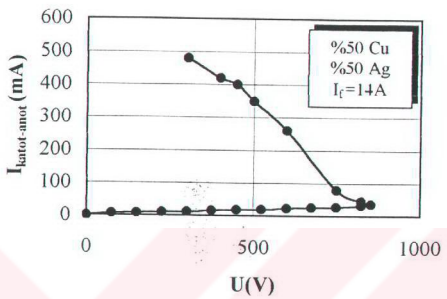
Yalnızca bakır buharında TVA deşarj oluşturduktan sonra farklı oranlarda bakır-gümüş alaşımları için TVA deşarjlar oluşturuldu ve bunların akım-voltaj karakteristikleri elde edildi. Bunun için ilk olarak 0.2g'ın %75'ine karşılık gelen 0.15g bakır ve 0.2g'ın %25'ine karşılık gelen 0.05g gümüş, anot potası içine yerleştirildi. Vakum odası vakumlandıktan sonra yine flamentten I_f =14A akım geçirildi ve elektrotlar arasına uygulanan voltaj yavaş yavaş arttırılmaya başlandı. Voltajın belli bir değerinde bakır parça ve gümüş parça birbirleri içine girerek bir top haline geldiler ve böylece bakır-gümüş alaşımı oluşturuldu. Bakır-gümüş alaşımı oluşturulduktan sonra voltaj arttırılmaya devam edilince alaşım eridi ve kaynamaya başladı. Daha sonra voltajın belli bir değerinde (ateşlenme voltajı) alaşım buharlarında TVA deşarj oluşturuldu. Bu sırada yalnızca yeşil renkte radyasyon gözlenildi. Şekil 6.37.'de %75 Cu + %25 Ag alaşımı için elde edilmiş TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



Şekil 6.37. %75 Cu + %25 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

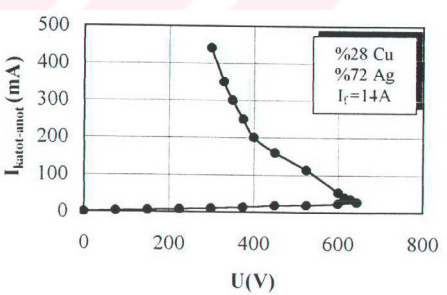
Aynı işlemler 0.2g'ın Tablo 6.6.'da verilen yüzdeleri için tekrarlandı ve her bir oran için bakır-gümüş alaşımları TVA deşarjları üretildi. Bu deşarjların akım voltaj karakteristikleri Şekil 6.38., Şekil 6.39. ve Şekil 6.40.'da verilmiştir.

Şekil 6.38.'de %50 Cu + %50 Ag alaşımı için elde edilmiş TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



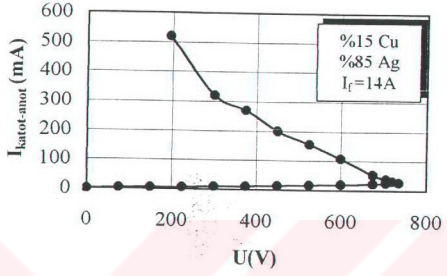
Şekil 6.38. %50 Cu + %50 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

Şekil 6.39.'da bakır-gümüş alaşımının minimum erime sıcaklığına sahip olduğu %28 Cu + %72 Ag alaşımı için elde edilmiş TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



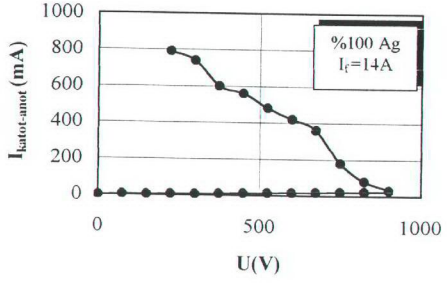
Şekil 6.39. %28 Cu + %72 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

Şekil 6.40.'da %15 Cu + %85 Ag alaşımı için elde edilmiş TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



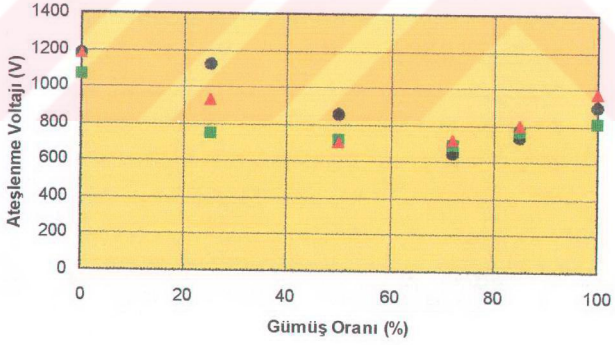
Şekil 6.40. %15 Cu + %85 Ag alaşımı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

Son olarak yalnızca gümüş kullanarak TVA deşarj oluşturuldu. Bunun için anot potası içine 0.2g gümüş konuldu ve katot flamenti ısıtma akımı I_f=14 A için yalnızca gümüş buharlarında TVA deşarj elde edildi. Şekil 6.41.'de %100 Ag için elde edilmiş gümüş buharı TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.

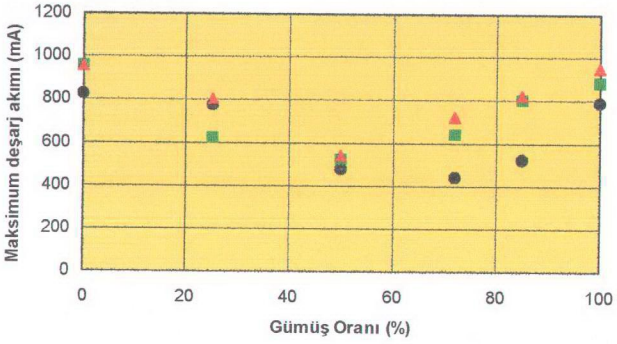


Şekil 6.41. %100 Ag için TVA deşarj akım voltaj karakteristiği

Şekil 6.36., 37., 38., 39., 40., 41. ile verilen TVA deşarj akım voltaj karakteristiklerinden görüldüğü gibi bakır, farklı oranlardaki bakır-gümüş alaşımı ve gümüş TVA deşarjlarını oluşturmak için uygulanması gereken minimum voltaj yani ateşlenme voltajı, bakır-gümüş oranına göre farklılıklar göstermektedir. Bununla birlikte oluşan deşarjların maksimum deşarj akımları da bakır gümüş oranına göre değişmektedir. Bu nedenle bu karakteristikler üzerindeki ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı değerlerini kullanarak, ateşlenme voltajının ve maksimum deşarj akımının, gümüş oranı ile değişimleri elde edildi. Ateşlenme voltajının alaşım içindeki gümüş oranı ile değişimi Şekil 6.42.'de, maksimum deşarj akımının alaşım içindeki gümüş oranına göre değişimi Şekil 6.43.'de siyah yuvarlak noktalarla verilmiştir. Tablo 6.6.'da verilen bakır-gümüş oranları için akım voltaj karakteristikleri iki kez daha tekrarlanmıştır. Böylece ateşlenme voltajının ve maksimum deşarj akımının gümüş oranı ile değişimi iki kez daha alındı. Bu değerler Şekil 6.42. ve Şekil 6.43.'de kırmızı üçgen ve yeşil karelerle verilmiştir. Üç deney de aynı elektrotlar arası düzenlenişte alınmaya dikkat edildi.



Şekil 6.42. Ateşlenme voltajının gümüş oranına göre değişimi.

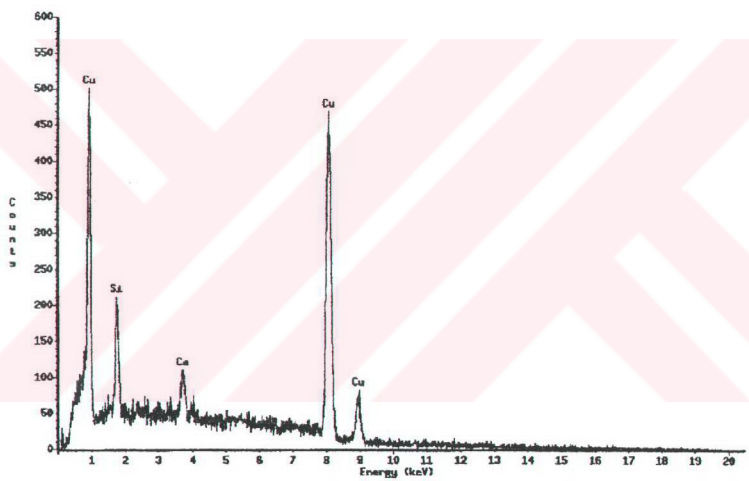


Şekil 6.43. Maksimum deşarj akımının gümüş oranına göre değişimi.

Şekil 6.42. ile verilen ateşlenme voltajının gümüş oranına göre değişim grafiği, Şekil 6.35. ile verilen bakır-gümüş faz diyagramına benzemektedir. Şekil 6.35.'den görüldüğü gibi bakır-gümüş alaşımı için, alaşım içindeki gümüş oranı arttıkça alaşımın erime sıcaklığı bir minimuma kadar azalmaktadır. Bu minimum değerden sonra alaşımın içindeki gümüş oranı arttırıldıkça alaşımın erime sıcaklığı da artmaktadır. TVA deşarjın ateşlenme voltajı, materyalin buharlaşma sıcaklığı ile doğru orantılıdır. Bu nedenle ateşlenme voltajı, alaşım içindeki gümüş oranı arttıkça bir minimum değere kadar (%28 Cu+%78Ag) azalmakta ve bu orandan sonra gümüş oranı artarsa ateşlenme voltajı da artmaktadır. Bu değişim TVA deşarjın maksimum deşarj akımı için de gözlenmektedir.

TVA ile yalnızca bakır ve gümüş ve farklı oranlarda bakır-gümüş alaşımları deşarjları elde edilirken, anot potasının üst kısmına her deneyde birer cam taban yerleştirildi. Böylece Tablo 6.6.'da verilen her bir oran için cam taban üzerine ince filmler elde edildi. Bu filmlerin her birinin EDS (Enerji Dağılımlı X-ışını spektrometresi) spektrumları alındı. SEM-EDS sistemi ile karakteristik x-ışınları analiz edilir. Yapılan alaşım filmleri SEM'in elektron ışını ile bombardıman edildiğinde, film yüzeyindeki atomlardan elektronlar koparılır. Oluşan elektron boşluğu, daha yüksek

kabuktaki bir elektron ile doldurulur ve x-ışını salınır. EDS x-ışını dedektörü, enerjilerine göre salınan x-ışınlarının sayısını ölçer. X-ışınının enerjisi, x-ışınını salan elementin karakteristiğidir. Dedekte edilen x-ışınlarının bağıl sayılarına göre bir enerji spektrumu elde edilir ve film içinde var olan elementlerin cinsi ve miktarı belirlenir. Bu şekilde alaşım yapmak için kullandığımız oranın, film oluştuğunda aynı kalıp kalmadığı bulundu. Şekil 6.44.'de yalnızca bakır kullanılarak elde edilen TVA deşarj ile cam taban üzerine kaplanan bakır filmin EDS spektumu ve Tablo 6.7.'de bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.

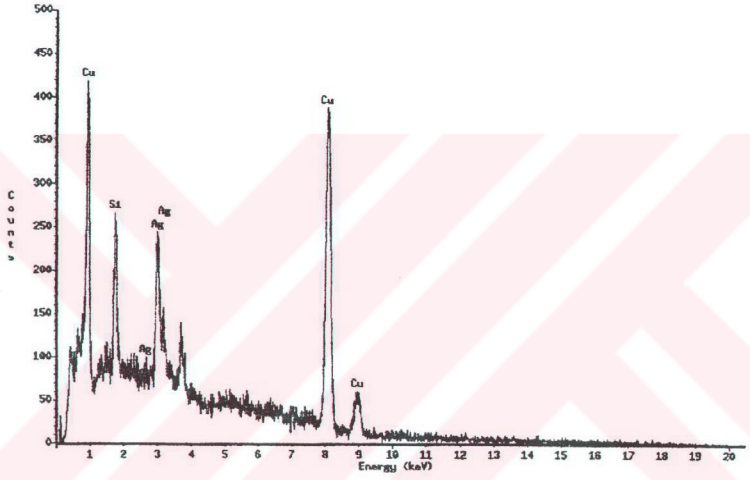


Şekil 6.44. Yalnızca bakır ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

Tablo 6.7. Yalnızca bakır ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	1.000	99.56	99.26	+/- 2.32
Ag-L	1.247	0.44	0.74	+/- 0.48
Toplam	-	100.00	100.00	-

Tablo 6.6.'da verilen oranlardaki bakır-gümüş alaşımları buharlarında oluşturulan TVA deşarjlar ile depolanan filmlerin de, EDS spektrumları ve EDS mikroanalizleri alındı. Şekil 6.45.'de %75 bakır, %25 gümüş alaşımında oluşturulan TVA deşarjla depolanan ince filmin EDS spektrumu ve Tablo 6.8.'de bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.

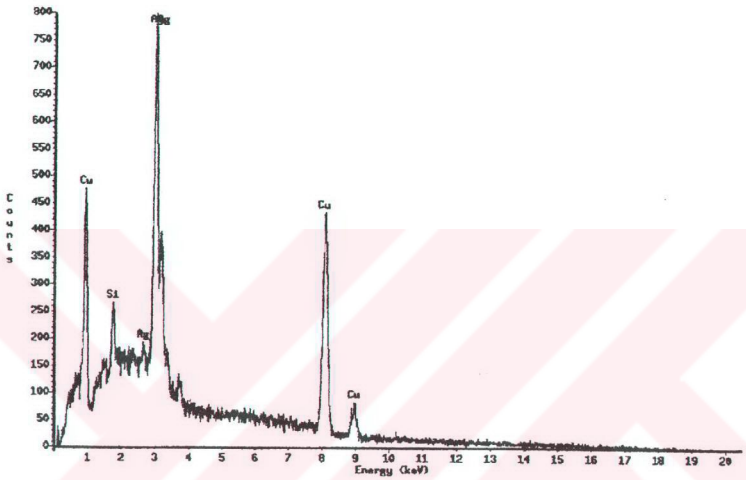


Şekil 6.45. %75 Cu + %25 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

Tablo 6.8. %75 Cu + %25 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	0.993	87.88	81.03	+/- 2.16
Ag-L	1.200	12.12	18.97	+/- 1.36
Toplam	-	100.00	100.00	-

Şekil 6.46.'da %50 bakır, %50 gümüş alaşımında oluşturulan TVA deşarjla depolanan ince filmin EDS spektrumu ve Tablo 6.9.'da bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.

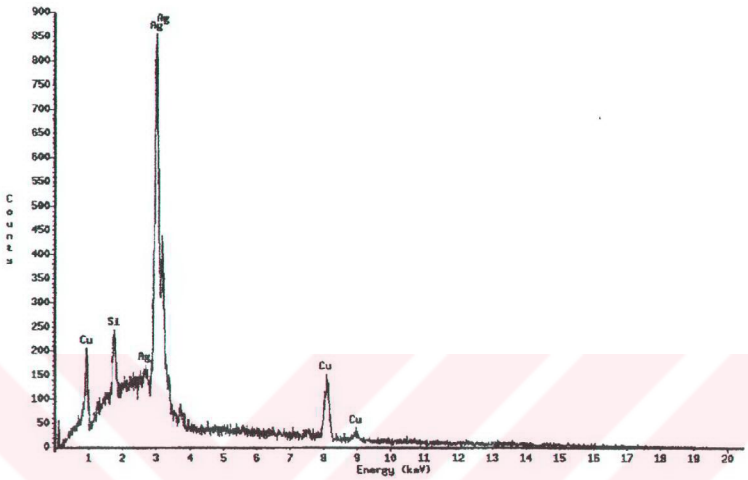


Şekil 6.46. %50 Cu + %50 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

Tablo 6.9. %50 Cu + %50 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	0.983	65.61	53.26	+/- 1.49
Ag-L	1.132	34.39	46.74	+/- 1.27
Toplam	-	100.00	100.00	-

Şekil 6.47.'de %28 bakır, %72 gümüş alaşımında oluşturulan TVA deşarjla depolanan ince filmin EDS spektrumu ve Tablo 6.10.'da bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.

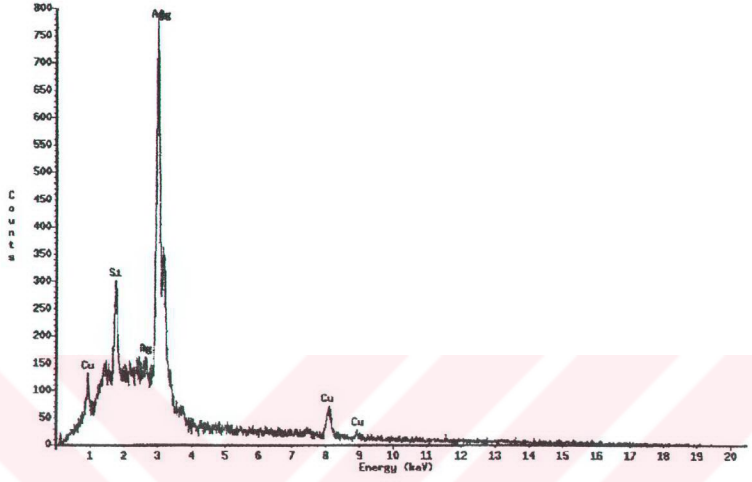


Şekil 6.47. %28 Cu + %72 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

Tablo 6.10. %28 Cu + %72 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	0.970	36.11	24.92	+/- 1.54
Ag-L	1.062	63.89	75.08	+/- 1.85
Toplam	-	100.00	100.00	-

Şekil 6.48.'de %15 bakır, %85 gümüş alaşımında oluşturulan TVA deşarjla depolanan ince filmin EDS spektrumu ve Tablo 6.11.'de bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.

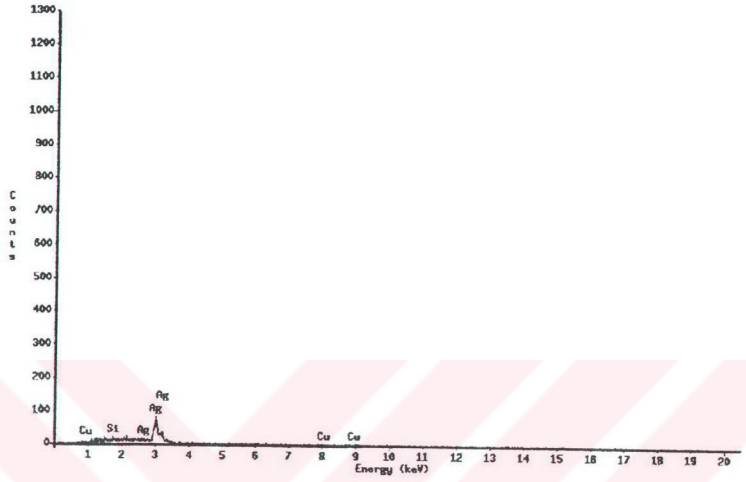


Şekil 6.48. %15 Cu + %85 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

Tablo 6.11. %15 Cu + %85 Ag alaşımı ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	0.964	21.50	13.68	+/- 1.63
Ag-L	1.035	78.50	86.32	+/- 2.28
Toplam	-	100.00	100.00	-

Şekil 6.49.'da yalnızca gümüş kullanılarak oluşturulan TVA deşarjla depolanan ince filmin EDS spektrumu ve Tablo 6.12.'de bu filmin EDS mikroanaliz sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.49. Yalnızca gümüş ile depolanan ince filmin EDS spektrumu.

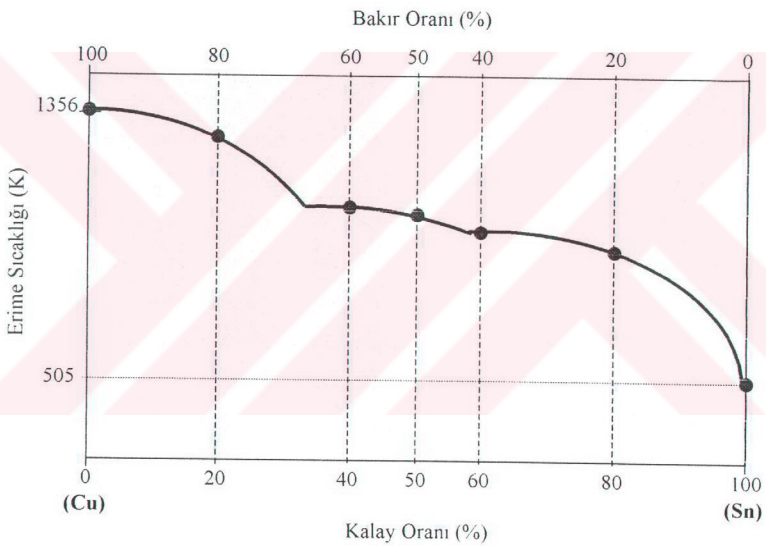
Tablo 6.12. Yalnızca gümüş ile depolanan ince filmin EDS mikroanaliz sonuçları.

Element	ZAF	Atom %	Elemental Ağ. %	Ağ. % Hata
Cu-K	0.957	3.49	2.08	+/- 0.56
Ag-L	1.005	96.51	97.92	+/- 1.94
Toplam	-	100.00	100.00	-

Tablo 6.7.'de ve Tablo 6.12.'de verilen sonuçlardan görüldüğü gibi kullanılan bakır içinde % 0.74 gümüş ve kullanılan gümüş içinde % 2.08 bakır bulunmaktadır. Bu oranlar, alaşım yapılarak depolanan filmlerin EDS mikroanaliz sonuçlarında göz önünde bulundurulursa, depolanan filmler içindeki bakır ve gümüş oranlarının yapılan bakır-gümüş alaşımı oranlarına yakın olduğu görülür. EDS spektrumlarında ortaya çıkan Si ve Ca pikleri, depolamanın yapıldığı cam tabandan gelmektedir. EDS mikroanaliz sonuçlarında verilen ZAF değerleri, cihazın düzeltme faktörüdür.

6.8. TVA ile Bakır-Kalay (Bronz) Alaşımları

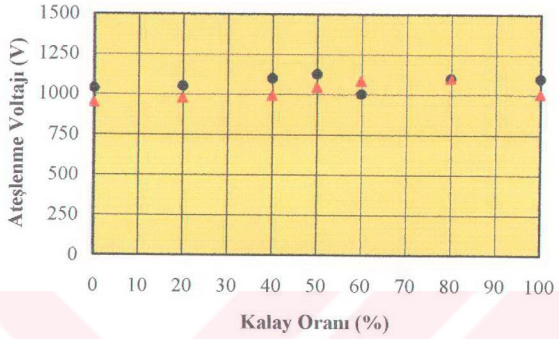
TVA ile farklı kütle oranlarında bakır-kalay alaşımları yapıldı. Bu farklı oranlar bakır-kalay alaşımının faz diyagramı üzerinden seçildi. Şekil 6.50.'de bakır-kalay alaşımı faz diyagramı verilmiştir. Görüldüğü gibi diyagram, bakırın erime sıcaklığından başlıyor ve daha sonra alaşım içindeki kalay oranı arttıkça alaşımın erime sıcaklığı, kalayın erime sıcaklığına kadar azalmaktadır.



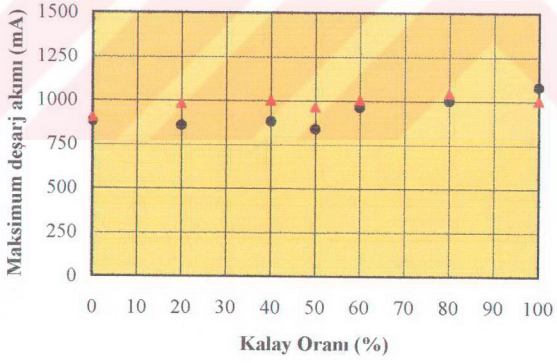
Şekil 6.50. Bakır- kalay alaşımı faz diyagramı (Lyman, 1973).

TVA ile alaşım yapılan bakır-kalay oranları, Şekil 6.50.'de verilen faz diyagramı üzerinde nokta olarak gösterilmiştir. Diyagram üzerinden görüldüğü gibi ilk olarak %100 bakır için, bakır ve kalayın farklı oranları için ve son olarak %100 kalay için çalışıldı. Tüm deneylerin aynı deneysel koşullarda gerçekleşmesi için her deney, aynı elektrotlar arası düzenlenişte ve aynı katot flamenti ısıtma akımında (I_f=15A) yapıldı.

Şekil 6.50'de verilen oranlarda çalışmak için ilk olarak %100 bakır kullanarak TVA deşarj oluşturuldu. Bunun için anot potası içine 0.2g bakır konuldu. Vakum odası vakumlandıktan sonra flamentten I_f =15A akım geçirilerek yalnızca bakır buharlarında TVA deşarj elde edildi ve bakır buharı TVA deşarjı için ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı değerleri bulundu. Yalnızca bakır buharında TVA deşarj oluşturduktan sonra farklı oranlarda bakır-kalay alaşımları için TVA deşarjlar oluşturuldu. Bunun için ilk olarak 0.2g'ın %80'ine karşılık gelen 0.16g bakır ve 0.2g'ın %20'sine karşılık gelen 0.04g kalay, anot potası içine yerleştirildi ve flamentten I_f =15A akım geçirildi ve elektrotlar arasına uygulanan voltaj yavaş yavaş arttırılmaya başlandı. Kalayın erime sıcaklığı bakırdan çok düşük olduğu için voltajın belli bir değerinde kalay parçası eridi. Voltaj artırılmaya devam edilince kalay, bakırın üzerini sarmaya başladı ve top haline geldiler ve voltaj biraz daha arttırılınca bakır-kalay eridi. Daha sonra voltajın belli bir değerinde bakır-kalay alaşımı buharlarında TVA deşarj oluştu. Bu sırada bu oran için oluşturulan alaşım buharı TVA deşarj ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı kaydedildi. Aynı işlemler 0.2g'ın Şekil 6.50.'de verilen yüzdeleri için tekrarlandı ve her bir oran için bakır-kalay alaşımları TVA deşarjları üretildi ve her bir deşarjın ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımları bulundu. Son olarak yalnızca kalay kullanarak TVA deşarj oluşturuldu. Bunun için anot potası içine 0.2g kalay konuldu ve flament akımı I_f=15 A için, yalnızca kalay buharlarında TVA deşarj elde edildi ve kalay buharı TVA deşarjı için ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı değerleri bulundu. Bu sırada petrol mavisi renginde radyasyon gözlendi. Bakır, farklı oranlardaki bakır-kalay alaşımı ve kalay TVA deşarjlarını oluşturmak için uygulanması gereken minimum voltaj yani ateşlenme voltajının, bakır-kalay oranına göre ve oluşan deşarjların maksimum deşarj akımlarının bakır-kalay oranına göre değişimleri bulundu. Ateşlenme voltajının alaşım içindeki kalay oranı ile değişimi Şekil 6.51.'de, maksimum deşarj akımının alaşım içindeki kalay oranına göre değişimi Şekil 6.52.'de siyah yuvarlak noktalarla verilmiştir. Şekil 6.50.'de verilen bakır-kalay oranları için bir kez daha TVA deşarjlar oluşturuldu. Bu değerler Şekil 6.51. ve Şekil 6.52.'de kırmızı üçgenlerle verilmiştir. Bazı deneylerde kullanılan flament içine kalay biriktiği için, flament değiştirilmek zorunda kalındı. Ancak flament değiştirilse dahi tüm deneylerin, aynı elektrotlar arası düzenlenişte yapılmasına dikkat edildi.



Şekil 6.51. Ateşlenme voltajının kalay oranı ile değişimi.



Şekil 6.52. Maksimum deşarj akımının kalay oranı ile değişimi.

Şekil 6.51. ile verilen ateşlenme voltajının kalay oranına göre değişim grafiğinden görüldüğü gibi, bakır ve kalayın erime sıcaklıklarının çok farklı olmasına rağmen ateşlenme voltajı değerleri alaşım içindeki kalay oranı ile çok fazla değişmemektedir. Bu, bakır ve kalayın buharlaşma sıcaklıklarının yakın olması nedeniyledir. Bakırın 1 torr buhar basıncına ulaşmak için gerekli sıcaklık 1896 °K'dir ve kalayın 1 torr buhar basıncına ulaşmak için gerekli sıcaklık 1885 °K'dir. Bu nedenle bakır-kalay alaşımı buharı TVA deşarjları için ateşlenme voltajı değerleri bakır ve kalay oranı ile çok fazla değişmemektedir. Ancak Şekil 6.42.'de verilen ateşlenme voltajının bakır-gümüş alaşımı içindeki gümüş oranına göre değişim grafiğinden görüldüğü gibi ateşlenme voltajı alaşım içindeki gümüş oranı ile değişmektedir. Bu, bakır ve gümüşün erime sıcaklıklarının farklı olmasının yanında buharlaşma sıcaklıklarının da farklı olması nedeniyledir. Gümüşün 1 torr buhar basıncı için gerekli sıcaklık 1616 °K' dir.

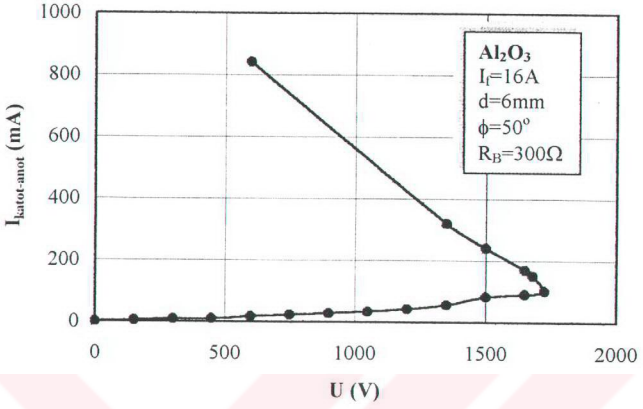
Şekil 6.52.'den görüldüğü gibi maksimum deşarj akımı da, bakır-kalay alaşımı içindeki kalay oranı ile çok fazla değişmemektedir. Ancak Şekil 6.43.'de verilen grafikten görüldüğü gibi maksimum deşarj akımı bakır-gümüş alaşımı içindeki gümüş oranı ile değişmektedir. Şekil 6.43. ve Şekil 6.52. grafiklerinin daha çok ateşlenme voltajı grafiklerine benzediği görülmektedir. Bu nedenle maksimum deşarj akımlarının ateşlenme voltajına bağlı olduğu söylenebilir.

6.9. Al_2O_3 (Alümina) TVA Deşarjları

Seramikler genellikle metal ve metal olmayan elementlerin iyonsal bileşiklerinden oluşan inorganik malzemelerdir. Çoğunlukla çok sert ve çok yüksek sıcaklıklara dayanıklıdırlar. Isıl ve elektriksel yönden yalıtkandırlar. Metallerden hafif, sürtünme katsayıları düşük ve oksitlenmeye karşı dirençleri yüksektir. Bu özelliklerinden dolayı uçak ve uzay endüstrisinde büyük ölçüde kullanılmaktadırlar. Piezoelektrik ve süperiletkenlik özelliklere sahip olduklarından elektronik endüstrisinde kullanılmaktadırlar. Seramikler; geleneksel seramikler ve ileri teknoloji seramikleri olarak iki ana grupta incelenebilirler. Geleneksel seramikler; kil, kaolen ve feldispat gibi minerallerin yüksek sıcaklıkta pişirilmesi ile elde edilirler. Bileşiklerinde değişik türde silikatlar, alüminatlar ve metal oksitleri bulunur. Cam, tuğla, kiremit, aşındırma tuzları, porselen ve beton gibi malzemeler bu guruba girerler. İleri teknoloji seramikleri genellikle saf bileşikler olup, başlıca oksitler, karbürler ve nitrürlerden oluşurlar. Al_2O_3, TiO_3, SiC, WC ve Si_3N_4 örnek olarak verilebilirler. Erime sıcaklıkları 2400 °K'nin üzerinde olduğundan, yüksek sıcaklığa ve aşınmaya karşı dayanıklılık gerektiren yerlerde kullanılırlar. Örneğin ZrO_2 (Zirkonya), soğutma ve yağlama gerektirmeyen motor parçalarının üretilmesinde, B_4C (Boron karbür) kurşun geçirmez gömlek yapımında kullanılır (Akan, 1997).

Al_2O_3 (Alümina) erime sıcaklığı çok yüksek (2700 °K) olan ileri teknoloji seramiklerindendir. Alümina; kesici cihaz ve takımlar, protez yapımı, entegre devre, gaz lazer tüpleri, yüksek sıcaklık ve yüksek voltaj yalıtkanları, balistik zırhlar, termometre sensörleri, öğütücü, sıkıştırıcı ve bileme ortamları, fırın içi yalıtımı ve vida yivi gibi çok farklı amaçlar için kullanılmaktadır.

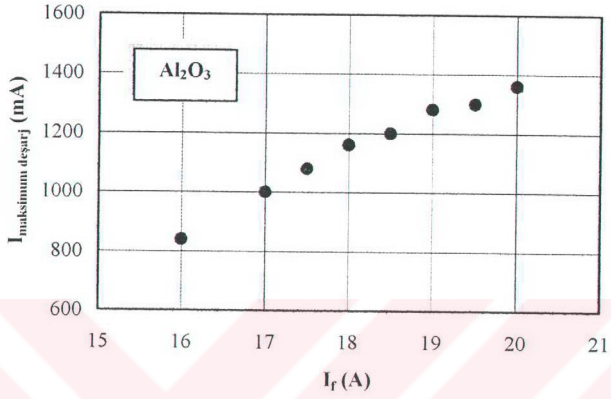
TVA'ı kullanarak daha önce MgO ince film depolama yapılmıştır (Ehrich et al., 1999). Bu çalışmada ilk kez TVA ile Al_2O_3 buharlarında TVA deşarjlar üretildi ve cam tabanlar üzerine Al_2O_3 ince filmleri elde edildi. Şekil 6.53.'de katot flamenti ısıtma akımı I_f=16A'de Al_2O_3 buharlarında üretilen TVA deşarjın akım voltaj karakteristiği verilmiştir.



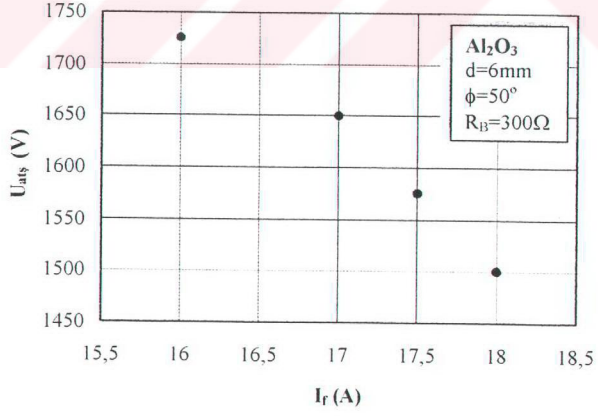
Şekil 6.53. Al_2O_3 TVA deşarjının akım voltaj karakteristiği.

Al_2O_3 buharlarında üretilen deşarj ateşlendikten sonra, deşarj akımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 6.53. ile verilen akım voltaj karakteristiğinin elde edildiği deşarj sırasında, katot flamenti ısıtma akımı arttırılarak, maksimum deşarj akımının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi elde edildi. Şekil 6.54.'de Al_2O_3 TVA deşarjının maksimum deşarj akımının, katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi verilmiştir. Şekil 6.54.'den görüldüğü gibi metallerde olduğu gibi seramiklerde de katot flamenti ısıtma akımı arttırıldığında maksimum deşarj akımı artmaktadır.

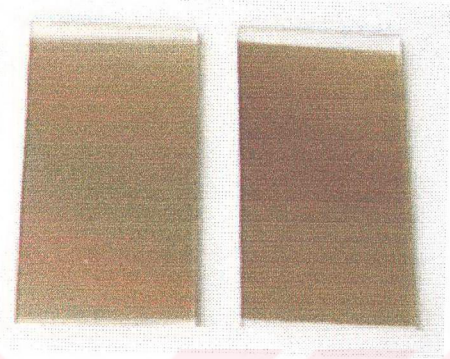
Al_2O_3 TVA deşarjları farklı katot flamenti ısıtma akımları için de elde edildi. Şekil 6.55.'de farklı flament akımlarında üretilen Al_2O_3 TVA deşarjlarının ateşlenme voltajlarının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi verilmiştir. TVA ile cam tabanlar üzerine ince Al_2O_3 filmleri de elde edildi. Şekil 6.56.'da I_f=17A, I_{arc}=800mA ve U_{arc}=750V koşullarında üretilen ince Al_2O_3 filmlerinin fotoğrafi verilmiştir.



Şekil 6.54. Al_2O_3 TVA deşarjının maksimum deşarj akımının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi.



Şekil 6.55. Al_2O_3 TVA deşarjlarının ateşlenme voltajının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi.



Şekil 6.56. TVA ile cam taban üzerine depolanan ince Al_2O_3 filmlerinin fotoğrafi.

Şekil 6.56.'dan görüldüğü gibi, alümina filmleri üzerinde kırmızı ve yeşil renklenmeler ortaya çıkmaktadır. Bu, cam üzerine depolanan alümina filminin, cam üzerinde bileşik farklılığı olan bölgeler içermesi nedeniyledir. Film üzerindeki bu farklı bileşikli bölgeler, farklı kırılma indisli bölgeler olmakta ve ışığın girişim yapmasına neden olmaktadır.

7. TARTIŞMA ve SONUÇ

Doğrudan ısıtılan termiyonik katot kullanılarak, anot materyalinin buharlaştırılmasıyla oluşan ve saf metal buharı plazması üreten yeni tip bir plazma kaynağı olan Termiyonik Vakum Ark (TVA)'ın temel özellikleri incelenmiştir. TVA'da , buharlaştırılarak plazması oluşturulacak materyalin içine konduğu kaşık şeklindeki tungsten pota anot, üzerinden düşük voltaj güç kaynağı ile akım geçirilerek termoelektron emisyonu sağlayan tungsten flament, katot olarak kullanılmaktadır. Katot flamenti bir Whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir. Katottan yayınlanan elektronlar, anot materyalini ısıtmak, eritmek ve buharlaştırarak plazmasını oluşturmak için Whenelt silindiri yardımıyla anot üzerine odaklanmıştır. Anot materyalinin eriyerek sürekli bir şekilde buharlaşmasını sağlayacak gerekli enerjiyi anot üzerine aktarmak için katottan yayınlanan elektron demeti, anot ve katot arasına uygulanan yüksek voltaj yardımıyla hızlandırılmıştır. Hızlandırılarak anot üzerine odaklanan elektron bombardımanı nedeniyle anot materyali eriyerek kaynamaya başlar ve daha sonra buharlaşır. Elektrotlar arası uzayda metal atomlarının belirli bir buhar yoğunluğunda ve uygulanan voltajın uygun değerinde, katottan yayınlanan elektron emisyonunun devam etmesi sebebiyle metal buharlarında parlak bir deşarj oluşur. Deşarj oluştuğu anda elektrotlar arasındaki voltaj birden azalır, akım ise aniden yükselir.

TVA, elektrotlarının düzenlenişi bakımından yeni bir sistem olduğu gibi, TVA deşarj da, gazlarda meydana gelen lüminesans deşarjlardan ya da ark deşarjlardan farklı, yeni tip bir deşarjdır. TVA ile dışarıdan ısıtılan termiyonik katot kullanılarak, anot potası içine yerleştirilen materyalin saf, herhangi bir gaz ya da makroparçacık içermeyen metal buharı plazması elde edilir. Bu yeni tip TVA deşarjın breakdown koşulları ve ark voltaj düşümü, gazlarda meydana gelen deşarjlardan farklıdır ve en önemlisi bu yeni tip deşarjın meydana geldiği gaz (metal buharı), deşarjın kendisi tarafından üretilmektedir. Aynı zamanda TVA deşarj, metal buharlarında deşarj üreten diğer tekniklerden de, hem elektrotlarının düzenlenişi hem de oluşan deşarjın özellikleri bakımından farklı özelliklere sahiptir. TVA elektrotlarının düzenlenişi bakımından basit

bir sistemdir ve düşük maliyette oluşturulmaktadır. Bununla birlikte deşarj, katot flamenti ısıtma akımı gibi çalışma parametreleri ile kontrol edilebilmektedir.

Bu yeni tip TVA deşarjı üreten sistem, 2000 yılında Osmangazi Üniversitesi plazma fiziği laboratuvarında tarafımızdan kurulmuştur. Sistemin vakum odası, elektrotlar sistemi, pompalama sistemleri monte işlemleri, basınç ölçüm sistemleri monte işlemleri, dört farklı güç kaynağını bir arada bulunduran güç kaynakları pano sistemi, yüksek voltaj ölçebilen bir voltmetre ve ampermetre tümüyle tarafımızdan yapılmıştır. Bu yeni tip deşarjı üreten sistem ülkemizde ilk ve sadece bizim laboratuvarımızda ve tarafımızdan imal edildiği için, bu çalışmada sistemin tanıtılmasına geniş yer verilmiştir. Bununla birlikte bu sistem ile laboratuvarımızda elde edilen bakır, altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum buharlarında TVA deşarjların özellikleri incelenmiştir. TVA ile altın ve gümüş buharlarında TVA deşarjlar ilk kez bu çalışmada incelenmiştir. TVA'ı kullanarak ilk kez bu çalışmada alaşım yapılmıştır ve TVA ile yapılan bakır-gümüş ve bakır-kalay alaşımı buharlarında TVA deşarjlar oluşturulmuştur. TVA ile seramik buharlarında TVA deşarjlar üretilebilmektedir. Yine ilk kez bu çalışmada TVA ile Al_2O_3 (Alümina) TVA deşarjları üretildi ve cam tabanlar üzerine alümina ince filmleri elde edildi.

TVA deşarjın özelliklerini incelemek için ilk olarak, deşarjın ateşlenme koşulları incelenmiştir. TVA deşarjın oluşması için iki önemli şartın aynı anda sağlanması gerekmektedir. TVA deşarjın oluşması için elektrotlar arası uzayda aynı anda, hem yeterli sayıda buharlaşma yani metal atomu, hem de yeterli sayıda iyonlaşma yani iyon oluşturulmak zorundadır. Bunun için ateşlenme voltajının katot flamenti ısıtma akımı ve elektrotlar arası uzaklık ile değişimi incelenmiştir. TVA deşarjın oluşması için deşarja verilen güç; flament ısıtma akımı I_e ve elektrotlar arasına uygulanan voltajın (ateşlenme voltajı, $U_{ateş}$) çarpımıdır. Bu güç, anot metalinin buharlaşması, radyasyon kayıpları, metal buharlarının iyonlaşması ve ısı iletim enerjisi olarak harcanmaktadır. Deşarja verilen gücün bu şekilde harcandığını düşünerek bir eşitlik elde edilmiştir. Bu eşitlik elde edilirken $I_e.N$=sabit kabul edilmiştir. Burada N; nötral atom sayısıdır. Bu kabul, deşarjın oluşması için yukarıda verilen iki şartı aynı anda ifade etmektedir. Çünkü deşarj oluşmadan önce, anot üzerinden metal atomlarını oluşturan ve bu metal

atomlarını iyonlaştıran flament ısıtma akımıdır. Nötral atom sayısındaki azalma, iyon sayısındaki artış olacağından $I_e.N$=sabit kabul edilebilir. Bakırın düşük erime sıcaklığına sahip olması dolayısıyla radyasyon kayıplarının ve ısı iletim kayıplarının ve iyonlaşma miktarının düşük olduğu düşünülerek, ateşlenme voltajı ve flament ısıtma akımı arasında teorik bir bağıntı elde edilmiştir. Ateşlenme voltajı teorik olarak bulunan bağıntıda, flament ısıtma akımı ile ters orantılı olarak değişmektedir. Bakır buharlarında sabit elektrotlar arası uzaklıkta ve açıda farklı flament ısıtma akımları için TVA deşarjlar üretmek için yaptığımız deneylerde de ateşlenme voltajı, flament ısıtma akımı arttıkça azalmıştır. Bununla birlikte ateşlenme voltajının elektrotlar arası uzaklıkla değişimi de incelenmiştir. Sabit flament akımında ve sabit elektrotlar arası açıda (ϕ=90°) elektrotlar arası uzaklık arttıkça, ateşlenme voltajı da artmıştır. Bu beklenen bir sonuçtur. Çünkü elektrotlar arası uzayda, sabit flament akımında deşarjın oluşması için gerekli nötral atom yoğunluğu sabittir. Elektrotlar arası uzaklık arttığında aynı nötral atom yoğunluğunun elde edilmesi için, anot üzerine daha fazla enerji aktarılması gereklidir. Flament akımı sabit tutulduğundan, bu durumda nötral atom sayısı uygulanan voltajın arttırılması ile sağlanır. Bu nedenle elektrotlar arası uzaklık arttıkça, elektrotlar arasına uygulanması gereken voltajın (ateşlenme voltajı) arttırılması gereklidir.

TVA deşarjların karakteristiklerini belirlemek için bakır buharlarında elde edilen TVA deşarjların akım voltaj karakteristik eğrileri elde edilmiştir. Bu karakteristik eğriler; katot flamenti ısıtma akımına, elektrotların birbirine göre konumuna ve buharlaştırılacak materyalin cinsine göre farklılıklar göstermektedir. Flament ısıtma akımı I_f=13A ve I_f=13.5A olduğu durumda elde edilen akım voltaj karakteristiklerinde, ark deşarj meydana gelene kadar akım ve voltaj hemen hemen doğru orantılı bir şekilde artarken, deşarj oluştuktan sonra akım birden yükselmekte voltaj ise düşmektedir. Deşarj akımı bir maksimum değere kadar artmaktadır ve aynı katot flamenti ısıtma akımı için hemen hemen sabit bir değerde kalmaktadır. Yüksek flament akımında TVA deşarj daha düşük voltaj değerinde meydana gelmekte ve daha yüksek deşarj akımı değerlerine ulaşılmaktadır. Bu nedenle TVA deşarj meydana geldikten sonra da flament akımı değiştirilerek, maksimum deşarj akımının flament ısıtma akımı ile değişimi incelenmiştir. Deşarj oluştuktan sonra flament akımı arttırıldıkça, maksimum

deşarj akımı da artmaktadır. Böylece deşarj, flament ısıtma akımı ile kontrol altında tutulabilmektedir. Bu TVA deşarjı, diğer metal buharı deşarjlardan ayıran en önemli özelliklerden biridir. Flament ısıtma akımı, katot düşümünü etkileyen en önemli parametredir. TVA içinde oluşan plazma, en azından katot düşümüne eşit bir potansiyele eşit olduğundan plazma içindeki iyonlar da en azından katot düşümü seviyesinde bir enerjiye sahiptirler. Bu nedenle katot flamenti ısıtma akımının değiştirilmesi ile TVA deşarj içindeki iyonların enerjisi de değiştirilebilmektedir. Bu, oluşturulan metal buharı plazması içindeki iyonların enerjisinin de kontrol altında tutulabildiği anlamına gelmektedir. İyonların enerjisinin kontrol edilebilmesi, TVA'ın kaplama teknolojileri bakımından kullanımını ve gelecekte TVA'ın mümkün kullanım uygulaması olabilecek TVA iyon kaynağı için çok önemlidir. İyonların enerjisinin ölçülmesi için Ion Energy Analyser(İyon Enerji Analiz) cihazı kullanılmaktadır. Laboratuvarımıza almayı düşündüğümüz bu cihaz ile daha sonraki çalışmalarda plazma içindeki iyonların enerjisi ölçülebilecektir.

TVA deşarjın akım voltaj karakteristikleri, elektrotların birbirine göre konumu değiştirilerek incelenmiştir ve buharlaştırılacak materyal olarak bakır yerine altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum kullanılarak elde edilmiş karakteristikler verilmiştir. TVA deşarjın akım voltaj karakteristiğini etkileyen en önemli faktör, elektrotların birbirine göre bağıl pozisyonudur. Bunun için hemen hemen aynı flament ısıtma akımında $\phi=90^{o}$ durumunda katot, potanın 1mm altına yerleştirilerek ve potanın 0.5-1mm üstüne yerleştirilerek akım voltaj karakteristikleri elde edilmiştir. Bu iki durumda çalışma parametreleri hemen hemen aynı olmasına rağmen, katot potanın altına yerleştirildiği durumda çok farklı bir durum gözlenmektedir. Katot potanın üstüne yerleştiği durumda parlak deşarj oluştuğu sırada, voltaj birden düşüp akım birden yükselirken; katot potanın altına yerleştiği durumda, parlak deşarj oluştuğunda akım birden çok yüksek değerlere çıkmamaktadır. Bu katottan yayınlanan elektron demeti tarafından aktarılan enerjinin, buharlaştırılacak materyal üzerine farklı şekilde aktarılmasıyla ilgilidir. Katot potanın altına yerleştirildiğinde, elektronlar potayı ısıtmakta ve buradan ısı iletimi ile buharlaştırılacak materyale ısı aktarılmaktadır. Katot potanın üstüne yerleştirildiğinde elektronlar Whenelt silindirinin odaklayıcı etkisi nedeni ile doğrudan buharlaştırılacak materyal üzerine gelmekte ve buharlaştırılacak

materyale doğrudan enerji aktarılmaktadır. Bu nedenle elektrotların birbirine göre bağıl pozisyonun değişmesinin yanında, elektrotlar arasındaki açının da değişmesi TVA deşarjın akım voltaj karakteristiklerini değiştirmektedir. TVA deşarjın akım voltaj karakteristikleri, aynı filament ısıtma akımında ve yaklaşık aynı elektrotlar arası uzaklıkta, elektrotlar arası açı $\phi=50^{o}$ ve $\phi=90^{o}$ iken incelenmiştir. Elektrotlar arası açı $\phi=50^{o}$ iken daha düşük voltaj değerlerinde deşarj meydana gelmiştir. Bu durumda katottan yayınlanan elektronlar tümüyle anot materyali üzerine bombardıman edilebilmektedir. Bununla birlikte elde edilen akım voltaj karakteristiklerini ifade eden bir model verilmiştir. Bu model ile elektrotlar arası potansiyel dağılımı incelenerek anot potansiyel düşümü tanımlanmıştır. Burada deşarj oluştuktan sonra anot materyalini buharlaştıran elektronların, plazma içinden üretildiği ve bu elektronların anot potansiyel düşümü tarafından anot üzerine hızlandırıldıkları kabul edilmektedir. TVA deşarjın ateşlenmesi için sağlanması gereken koşullar, deşarj oluştuktan sonra da muhafaza edilmek zorundadır. TVA deşarj, deşarjın oluştuğu gazı kendisi ürettiği için elektrotlar arası uzayda aynı anda hem yeterli sayıda metal atomları hem de yeterli sayıda iyon oluşturulmak zorundadır. Dolayısıyla deşarjın oluşması için gereken minimum nötral atom yoğunluğunun, deşarj ateşlendikten sonra da üretilmesi gerekmektedir. Ark deşarj oluşmadan önce bu nötral atomlar flamentten yayınlanan elektronlar tarafından üretilirken, ark deşarj oluştuktan sonra elektrotlar arasındaki nötral atom yoğunluğu flament tarafından üretilen elektronlar tarafından değil, plazma içinde üretilen elektronlar tarafından üretilmektedir. Bu nedenle elektrotlar arası potansiyel dağılımında ortaya çıkan anot düşümü, gazlarda meydana gelen deşarjlardaki anot potansiyel düşümünden farklılık göstermektedir. Gazlarda meydana gelen deşarjlarda anot düşümü, plazma içindeki elektronları anota toplayarak deşarj akımını oluştururken, TVA durumunda anot potansiyel düşümü, anot metalini ısıtarak onun buharlaşmasını da sağlar. Bu model ile ark voltajı ve ark akımı arasında bir bağıntı bulunmuştur. Bu bağıntı ile deneysel sonuçlar uyum göstermektedir. Düşük akımlarda ark voltajı ile ark akımı ters orantılı olarak değişmektedir. Yüksek akımlarda ise ark voltajı ve ark akımı çok fazla değişmemektedir. Bu model incelenirken TVA'ın elektrotları arasındaki potansiyel dağılımı da verilmiştir. Bu potansiyel dağılımından görüldüğü gibi vakum odası içinde oluşan plazma, vakum odasının çeperlerine nazaran

daha yüksek voltaja sahiptir. Bunun nedeni plazma, katot düşümü seviyesinde bir potansiyelde iken vakum odasının katot ile aynı potansiyelde yani toprak potansiyelinde olmasıdır. Dolayısıyla vakum odası içinde oluşan plazmanın iyonları, daima vakum odasının çeperlerine doğru yönlendirilmiş olmaktadır. Bu TVA'ın kaplama teknolojileri bakımından diğer bir avantajıdır. Bu özelliğinden dolayı TVA durumunda oluşan iyonların hızlandırılması yada yönlendirilmesi için ayrı bir sistem kurulmasına gerek kalmamaktadır.

TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri buharlaştırılacak materyalin cinsine göre de incelenmiştir. Bunun için bakırdan farklı olarak TVA ile altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum buharlarında TVA deşarjlar üretildi. Altın ve gümüş buharlarında TVA deşarjlar ilk kez bu çalışmada elde edilmiştir. Farklı metallerin buharlarında üretilen TVA deşarjların akım voltaj karakteristikleri bakır buharlarında üretilen deşarjların karakteristiklerine benzemektedir. Ancak çalışma parametrelerinin aynı tutulmasına rağmen yalnızca buharlaştırılacak materyalin değişmesi, TVA deşarj akım voltaj karakteristiğini değiştirmektedir. Kullanılan materyallerden buharlaşma sıcaklığı en düşük olan çinko TVA deşarj akım voltaj karakteristiğinde ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı en küçük olurken, buharlaşma sıcaklığı en yüksek olan titanyum TVA deşarj akım voltaj karakteristiğinde ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımı en yüksek olmaktadır.

TVA deşarjın çalışma parametrelerinin kararlılığını analiz etmek için, ark voltajının ve ark akımının zamanla değişimi incelenilmiştir. Ark voltajı ve ark akımı hemen hemen sabit kalmıştır. Bununla birlikte vakum odası içindeki basınç değişimi zamanla incelenmiştir. Basınç önce yükselip daha sonra düşmüştür. Bu beklenen bir sonuçtur. Plazması oluşturulacak materyal içindeki safsızlık atomları deşarj ilk oluştuğu anda vakum odası içinde yayılarak basıncı yükseltmektedir. Basıncın artmasına diğer ve daha önemli etken ise vakum odası çeperlerine adsorbe olmuş atomlardır. Deşarj tarafından üretilen enerjitik parçacıklar (iyonlar ve fotonlar), vakum odası çeperlerine vurarak buradan adsorbe olmuş atomların sökülmesine ve basıncın yükselmesine neden olmaktadır. Ancak birkaç kez deşarj oluştuktan sonra daha kararlı basınçta deşarj elde edilmektedir. Deşarj yayınlanan radyasyon bakımından da son

derece kararlıdır. Bakır buharlarında elde edilen deşarj sırasında yeşil renkte ve deşarj süresince sürekli yayınlanan radyasyon gözlenmektedir. Bu radyasyonun kararlılığı gözlemsel olarak analiz edilmiştir. Ancak yine laboratuvarımıza almaya çalıştığımız Optical Multichannel Analyser (Optiksel çokkanallı analiz) cihazı ile bu radyasyonun spektroskopik bilgileri de alınacaktır. Daha önce literatürde TVA deşarj üzerine yapılmış spektroskopik çalışmalar TVA deşarjın yalnızca anot metali buharlarında meydana geldiğini ispatlamıştır. Bununla birlikte bazı durumlarda titreşimli rejimde TVA deşarjı da elde edilebilmektedir. Bu titreşimli deşarj sırasında deşarj akımı ve deşarj voltajı da aynı frekansta titreşim yapmaktadır. Genelde potanın bir miktar eğik olduğu yada pota içindeki materyal çok az olduğunda meydana gelen bu titreşimli rejim, uygun önlemler alındığında önlenebilmektedir. Bu titreşimli rejim bazen potanın sap kısmına kaplanmış bakır için de meydana gelmektedir. Pota içinde hiç bakır kalmamasına rağmen, potanın sapına buharlaşmadan sonra kaplanan bir miktar bakır, pota çok ısındığında potanın daha sıcak bölgesine akarak titreşimli rejimde bir deşarj oluşturmaktadır.

TVA kaplama teknikleri bakımından önemli avantajlara sahiptir. Cam ve seramik tabanlar üzerine OGÜ şablonu ile bakır kaplamalar ve cam taban üzerine bakır, altın, gümüş, çinko, kalay ve titanyum kaplamalar elde edilerek TVA'ın kaplama teknolojileri bakımından kullanılabilirliği gösterilmiştir. TVA sisteminin ön kısmında bulunan cam ile vakum odası içinde meydana gelen deşarj izlenebilmektedir. Ancak elektrotlar arasında oluşan plazma, vakum odası içinde her yöne doğru yayıldığı için bu cam, vakum odasının iç tarafından bakır ile kaplanmakta ve vakum odasının iç kısmının görülmesini engellemektedir. Şu anda bu problemi çözmek için bir ayna sistemi yapmaktayız. Bu ayna sistemi şu anda bulunan cam pozisyonuna göre 90°'de bulunacak ve içerinin gözlendiği bölgede kaplanma meydana gelmeyeceği için içerisi devamlı gözlenebilecektir. Kullandığımız kaplama materyalinin %100 saf olmaması nedeniyle materyal içinde bulunan safsızlık atomları erime sırasında buharlaşarak kaplaması yapılacak taban üzerine yerleşmektedir. Bu nedenle kararlı hal deşarjı elde etmek için birkaç kez deşarj oluşturmak zorundayız. Bu sırada oluşan saf olmayan metal buharı deşarjın, taban üzerine kaplanmasını önlemek için bir koruyucu kalkan yapmaktayız. Bu kalkan vakum odası dışından kontrol edilebilecektir. Bu şekilde

kararlı hal deşarj oluştuktan sonra bu kalkan açılacak ve taban üzerine safsızlık içermeyen kararlı hal deşarjı kaplaması yapılacaktır. Şu anda ayrıca seramik üzerine yaptığımız kaplamaların özelliklerini arttırıcı bir önlem daha almaktayız. Seramikler toz halinden üretildikleri için, yapılarında boşluklar içermektedir. Dolayısıyla ultrasonik banyoda yıkanırken bu boşluklara yerleşen su molekülleri, vakum sırasında çıkarılamamaktadır. Bu nedenle taban üzerine küçük bir ısıtıcı yaparak bu su moleküllerinin daha kolay çıkartılması sağlanacaktır. Bugüne kadar yaptığımız çalışmalarda anot materyali için su soğutma işlemi yapılmamıştır. Fakat daha sonraki çalışmalarda anotu soğutmak için, vakum odasının altından bir su soğutma sistemi yapılarak anotun soğuması sağlanacaktır.

TVA ile cam tabanlar üzerine ince filmler üretilebilmektedir. TVA kaynağı olan anot potası ile farklı açı ve uzaklıklarda yerleştirilen cam tabanlar üzerine bakır ince filmleri depolanmıştır ve bu filmlerin kalınlıklarının depolanma açısı ve uzaklığı ile değişimi incelenmiştir. TVA kaynağının tam üst kısmına yani z doğrultusu ile sıfır dereceye yerleştirilen cam tabanlar üzerine depolanan filmin kalınlığı en büyük çıkarken, TVA kaynağı ile daha büyük açılarda depolanan filmlerin kalınlıkları azalmaktadır.

Literatürde TVA ile metaller üzerine (altın ve gümüş hariç) yapılan çalışmalar bulunmaktadır. Ancak TVA ile alaşım üretmek ve alaşım buharlarında TVA deşarjların incelenmesi ilk kez bu çalışmada yapılmıştır. Bakır-gümüş alaşımının faz diyagramı üzerindeki farklı oranlar için, bakır-gümüş alaşımları yapıldı ve bu alaşımların TVA deşarjları oluşturuldu. Farklı oranlarda üretilen bakır-gümüş TVA deşarjları için akım voltaj karakteristikleri elde edildi ve bu karakteristikleri kullanarak ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımının gümüş oranına göre değişimleri incelenildi. Bakır-gümüş alaşımı için ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımının gümüş oranına göre değişimi, bakır-gümüş faz diyagramına benzer çıkmaktadır. Farklı oranlardaki bakır-gümüş alaşımlarının buharlarında oluşturulan TVA deşarjlarla, bu alaşımların cam tabanlar üzerine ince filmleri elde edildi. Bu filmlerin EDS mikroanaliz sonuçları incelenildiğinde, hemen hemen her film içindeki bakır ve gümüş oranının, alaşımları elde etmek için kullanılan bakır-gümüş oranına yakın çıktığı görülmüştür.

TVA ile, erime sıcaklıkları çok farklı fakat buharlaşma sıcaklıkları çok yakın olan bakır ve kalay alaşımları da yapıldı. Farklı kütle oranlarında yapılan bakır-kalay alaşımları buharlarında üretilen TVA deşarjların, ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımlarının yapılan alaşımlar içindeki kalay oranına göre değişimleri incelenildi. Ateşlenme voltajı ve maksimum deşarj akımlarının, alaşımlar içindeki kalay oranı ile çok fazla değişmediği gözlenmiştir. Bu çalışmada TVA ile ilk kez yapılan alaşım çalışmaları, TVA'ın iyi bir alaşım kaynağı olduğunu göstermektedir.

TVA ile seramik materyallerinde plazması yapılabilmektedir. Literatürde daha önce TVA ile MgO ince filmleri üzerine yapılan bir çalışma verilmiştir. TVA ile ilk kez bu çalışmada Al_2O_3 (Alümina) TVA deşarjları üretildi. Alümina buharı TVA deşarjlarının akım voltaj karakteristikleri ve maksimum deşarj akımının ve ateşlenme voltajının katot flamenti ısıtma akımı ile değişimi incelenilmiştir. Alümina TVA deşarjlarının da katot flamenti ısıtma akımı ile kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Ayrıca üretilen alümina TVA deşarjları ile cam tabanlar üzerine ince alümina filmleri de elde edilmiştir. Bu, bugünkü teknolojide seramiklerin kullanım alanları göz önünde bulundurulduğunda önemli olmaktadır.

TVA sahip olduğu eşsiz özellikleri bakımından gelecekte de, çok farklı teknolojik amaçlar için kullanılabilecektir. Bunlardan bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Metal iyon kaynağı,
- Düşük voltaj ark koşullarında vakumda mikro kaynak,
- Spektroskopi için referans olarak saf metal kullanan kararlı kaynak,
- Özellikle erimeyen metaller için iyon dikimi (Ion Implantation),
- Yeni tip metal buharı lazeri,
- Yeni tip titanyum pompa.

TVA'ın gelecekte mümkün olan bu uygulamalarından, yeni tip saf metal buharı lazer ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sırasında oluşan deşarjın spektroskopik bilgileri alındığında %100 saf metal buharı elde edildiği görülmektedir.

Bu nedenle spektroskopi için referans saf metal buharı kaynağı olarak kullanılabilir. Aynı zamanda TVA deşarj içinde üretilen iyonlar, sistemin kendisi tarafından yönlendirildiği için bir iyon kaynağı olarak ve iyon dikimi çalışmalarında kullanılabilir. TVA'da kullanılan katot elektrotların düzenlenişi bakımından istenildiği şekilde ayarlanabilmektedir. Bu nedenle vakum koşullarında kaynak işlemleri için kullanmak da son derece kolay olacaktır. Yeni tip titanyum pompa ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akan, T., 1994, Vakumda buharlaştırma tekniği ile depolanan alüminyum ve germanyum ince filmlerinin iletkenliklerinin sıcaklıkla değişiminin incelenmesi, Lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, İstanbul, 73s.

Akan, T., 1997, Çok kanallı termal mikroskop, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik anabilim dalı, Eskişehir, 88s.

Akan, T., Ekem, N., Musa, G., 2002, Bakır buharlarında Termiyonik Vakum Ark(TVA) deşarjının akım-voltaj karakteristiklerinin incelenmesi , 21.Türk Fizik Derneği Fizik Kongresi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, s. YEF_S22.

Akan, T., Musa, G., Ekem, N., Pat, S., 2002, Dependence of film thickness on the deposition angle in the Thermionic Vacuum Arc method, Balkan Physics Letter, vol.10, no.2, 79-96.

Akan, T., 2003, Operation parameters of the Thermionic Vacuum Arc (TVA) Discharge, Turkish Journal of Physics, vol.27, no.1, 69-75.

Aksenov, I. I., Bren, V. G., Padalka, V. G. and Khoroshikh, V. M., 1981, Mechanism shaping the ion energy distribution in the plasma of a vacuum arc, Soviet Technical Physics Letter, vol.7, 497-499.

Badarau, E., 1957, Fizica descarcarilor in gaze, Editura Academiei RPR, 345p.

Biloiu, C., 1998, Contributii la stadiul descarcarii in arc cu catod cald in vapori metalici, Teza de doctorat, Universitatea din Bucuresti, 125p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Boxman, R. L. and Goldsmith, S., 1989, Principles and applications of vacuum arc coatings, IEEE Transactions on Plasma Science, vol.17, no.5, 705-711.

Bunshah, R., 1982, Deposition technology for films and coatings, Park Ridge, NJ:Noyes.

Curran, J. E., Page, J. S. And Pick, U., 1982, The influence of some evaporation parameters on the structure and properties of thin aluminium films, Thin Solid Films, vol. 97, 259-276.

Campbell, D. S., 1978, Active and passive thin films devices, Academic press, London, chapt.2.

Daalder, J. E., 1976, Components of cathode erosion in vacuum arcs, Journal of Physics D., vol. 9, 2379-2395.

Daalder, J. E., 1979, Erosion structures on cathodes arced in vacuum, Journal of Physics D., vol. 12, 1769-1779.

Davis, W. D. and Miller, H. C., 1969, Analysis of the electrode products emitted by a dc arc in a vacuum ambient, Journal of Applied Physics, vol. 40, 2212-2222.

Davanloo, F., Lee, T. J., Lou J. H., Park H. and Collins C. B., 1993, Progress in the characterization of nanophase diamond films uniquely produced by a laser plasma discharge source , Surface Coating Technology, vol. 62, 564 – 569.

Dorodnov, A. M. and Petrosov, B. A., 1981, Physical principles and types of technological vacuum plasma devices, Soviet Physics Technical Physics, vol.26, 304-315.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Dorodnov, A. M., Kuznetsov, A. N. and Petrosov, V. A., 1979, New anode-vapor vacuum arc with a permanent hollow cathode, Soviet Physics-Technical Physics Letter, vol.5, 418-425.

Ehrich, H., 1988, The anodic vacuum arc. I. Basic construction and phenomenology, Journal of Vacuum Science and Technology, vol A6(1), 134-138.

Ehrich, H., Hasse, B., Müler, K. G. and Schmidt, R., 1988, The anodic vacuum arc. II. Experimental study of arc plasma, Journal of Vacuum Science and Technology, vol.A6, 2499-2503.

Ehrich, H., Hasse, B., Mausbach, M. And Müler, K. G., 1990a, The anodic vacuum arc and its application to coating, Journal of Vacuum Science and Technology, vol.8, 2160-2164.

Ehrich, H., Hasse, B, Mausbach, M. And Müler, K. G., 1990b, Plasma deposition thin films utilizing the anodic vacuum arc, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol.18, 895-903.

Ehrich, H., Musa, G., Popescu, A., Mustata, I., Salabas, A., Cretu, M., Leu, G.F., 1999, MgO thin film deposition using TVA (thermionic vacuum arc), Thin Solid Films, 343-344, 63-66.

Ehrich, H., Schuhmann, J., Musa, G., Popescu, A., Mustata, I., 1998, Adhesive metal films obtained by thermionic vacuum arc (TVA) deposition, Thin Solid Films, vol. 333, 95-102.

Ekem, N., Musa, G. and **Akan, T.**, 2000, Düşük sıcaklık ve düşük basınçtaki plazma parametrelerinin incelenmesi, Osmangazi Üniversitesi araştırma fonu proje sonuç raporu, 41s.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Eliezer, S. and Eliezer, Y., 2001, The fourth state of matter, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 224p.

Erdik, E. ve Sarıkaya, Y., 1993, Temel üniversite kimyası, Gazi büro kitabevi, Ankara, 545s.

Farral, G. A., 1970, Numerical analysis of field emission and thermally enhanced emission from broad-area electrodes in vacuum, Journal of Applied Physics, vol.41, 563-571.

Goldston, R. J. and Rutherford, P. H., 1995, Introduction to plasma physics, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 491p.

Grill, A., 1993, Cold plasma in materials fabrication, IEEE press, NewYork, 256p.

Gündüz, E., 1992, Modern fiziğe giriş, Ege üniversitesi fen fakültesi kitaplar serisi, no.110, 595s.

Huang, K., 1963, Statistical mechanics, John Wiley and Sons, USA, 470p.

Katsch, H. M., Mausbach, M. and Müler, K. G., 1990, Investigation of the expanding plasma of an anodic vacuum arc, Journal of Appied Physics, vol.67(8), 3625-3629.

Kimblin, C. W., 1973, Erosion and ionizition in the cathode spot regions of vacuum arcs, Journal of Applied Physics, vol. 44, 3074-3081.

Kikuchi, H., 1988, Laboratory and space plasmas, Springer, 657p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Kittel, C., 1996, Katıhal fiziğine giriş, (Çev. B.Karaoğlu), Bilgitek yayıncılık, İstanbul, 434s.

Kral, N. A. and Trivelpiece, A. W., 1973, Principles of plasma physics, McGraw-Hill book company, 674p.

Kunkel W. B., 1966, Plasma physics in theory and application, McGraw-Hill book company, New York, 494p.

Kuzel R., Valvoda, V. J., Chladek, M., Musil, J. and Matous, J., 1995, XRD microstructural study of Zn films deposited by unbalanced magnetron sputtering, Thin Solid Films, Vol. 263, 150-158.

Lieberman M. A. and Lichtenberg, A. J., 1997, Principles of plasma discharges and materials processing, John Wiley, New York, 572p.

Lindfors, P. A., Mularie, W. M. and Wehner, G. K., 1986, Cathodic arc deposition technology, Surface and Coatings Technology, 29, 275-290.

Lyman, T., 1973, Metals handbook: Metallography, structures and phase diagrams, vol. 8., 8th edition, American society for metals, Materials Park.

Martin, P., 1990, Ionization-assisted evaporative process: techniques and film properties, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 18, 855- 868.

Martin P. J., Bendavid, A. and Kinder T. J., 1996, Proc. XVII th. International symposium on discharges and electrical insulation in vacuum, Berkeley, USA, 887-891.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Martin, D. J., McKenze, D. R., Netterfield, R. P., Swift, P., Filipczuk, S. W., Miller, K. H., Pacey, C. G., James, B., 1987, Characteristics of titanium arc evaporation process, Thin Solid Films, vol. 153, 91-102.

McDaniel, E. W., 1964, Collision phenomena in ionized gases, John Wiley&Sons, USA, 775p.

Mausbach, M., Ehrich, H., Müller, K. G., 1990, Cu and Zn films produced with an anodic vacuum arc, Vacuum, vol. 41, 1393-1395.

Muraoka, K. And Maeda, M., 2001, Laser-aided diagnostics of plasmas and gases, IOP Publishing, Bristol and Philedelphia, 295p.

Musa, G., 1992, Discharges in metal vapors, Romanian reports in physics, vol. 44, no. 9-10, 917-964.

Musa, G., Baltog, A., Popescu, A. and Mustata, I., 1986, Electrical and spectral characteristics of a heated cathode discharge in metal vapors, Contributions to Plasma Physics, vol.26, 171-177.

Musa, G., Baltog, A., Popescu, A., Betiu, N. and Mustata, I., 1987, Possible high power laser construction using a new discharge type- heated cathode discharge in the copper vapors continously evaporated from the anode, Contributions to Plasma Physics, vol.27, 431-437.

Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A. and Popescu, A., 1983, Low voltage arc welding in vacuum, Review Roum. Physics, 28, 907.

Musa, G., Ehrich, H. and Mausbach, M., 1994, Studies on thermionic cathode anodic vacuum arcs, Journal of Vacuum Science and Technology, A12(5), 2887-2895.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Musa, G., Ehrich, H. and Schuhman, J., 1997, Pure metal vapor plasma source with controlled energy of ions, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 25, no. 2, 386-391.

Musa, G., Ehrich, H., Schuhman, J., Popescu, A., Mustata, I., Cretu, M., Salabas, A., Leu, G. F. and Biloiu, C., 1999, Plasma characteristics of Thermionic Vacuum Arc (TVA), Proc. 24th international conference. on phenomena in ionized gases (ICPIG), Poland.

Musa, G., Popescu, A., Mustata, I., Borcoman, I., Cretu, M., Ehrich, H., and Schuhman, J., 1997, Pure metal vapor plasma gun, international symposium Plasma'97, Opole University, Poland.

Müller, K. H., 1986, Model for ion-assisted thin film densification, Journal of Applied Physics, vol.59, 2803-2807.

Müller, K. H., 1987, Stress and microstructure of sputter-deposited thin films: Molecular dynamics investigations, Journal of Applied Physics, vol. 62, 1796-1799.

Netterfield, R. P., Sainty, W. G., Martin, P. J., Sie, S. H., 1985, Properties of CeO_2 thin films prepared by oxygen-ion assisted deposition, Applied Optics, vol. 24, 2267-2272.

Öksüz, L., 2001, Plazma gerçeği, Bilim ve Teknik dergisi, 75-76.

Raizer, Y. P., 1991, Gas discharge physics, Springer-Verlag, USSR, 449p.

Randhawa, H., 1988, Cathodic arc plasma deposition technology, Thin Solid Films, vol.16,175-185.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Ren, Z. M., Du, Y. C., He, M. Q., Ying, Z. F., Xiong, X. X., Li, F. M., Su, Y., Chen, L. Y. and Brown, W. L., 1995, Studies of Ag films deposited using partially ionized beam deposition, Journal of Vacuum Science and Technology, vol. A13, 17-23.

Rose, R. M., Shepard, l. A. and Wulf, J., 1986, Malzemelerin yapı ve özellikleri, (Çev. K. Onaran ve S. Altıntaş), İstanbul Teknik Üniversitesi Kütüphanesi, İstanbul, 288s.

Rossnagel, S. M. And Cuomo, J. J., 1989, Film modification by low energy ion bombardment during deposition, Thin Solid Films, vol. 175, 143-156.

Roth, A., 1976, Vacuum technology, North-Holland Publishing Company, 496p.

Roth, J. R., 1995, Industrial plasma engineering, volume I, IOP publishing, Bristol and Philadelphia, 538p.

Roth, J. R., 2001, Industrial plasma engineering, volume II, IOP publishing, Bristol and Philadelphia, 645p.

Sanders, D. M., 1989, Review of ion-based coating processes derived from the cathodic arc, Journal of Vacuum Science and Technology, vol.7, 2339-2345.

Sanders, D.M., Boerker, D.B. and Falebella, S., 1990, Coating technology based on the vacuum arc-A review, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 18, 883-894.

Sayenko, V.A., Koloniets, N.F. and Mashtalir, N.N., 1983, Proceedings of the 16th ICPIG, Düsseldorf, (unpublished).

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Sundgren, J. E., 1985, Structure and properties of TiN coatings, Thin Solid Films, vol. 128, 21-44.

Takagi, T., 1982, Role of ions in ion-based film formation, Thin Solid Films, vol. 92, 1-17.

Tanenbaum, B. S., 1967, Plasma physics, McGraw Hill Book Comp., NewYork, 360p.

Thornton, J. A., 1974, Influence of apparatus geometry and deposition conditions on the structure and topography of thick sputtered coatings, Journal of Vacuum Science and Technology, Vol.11, 666-670.

Thornton, J. A., 1983, Plasma assisted deposition process:Theory, mechanism and applications, Thin Solid Films, vol.107, 3-19.

Tonks, L. and Langmuir, I., 1929, Oscillations in ionized gases, Physics Review., vol. 33, 195.

Watchman J.B. and Haber, R.A., 1993, Ceramic films and coatings, Noyes Publications, New Jersey, USA, 447p.

ÖZGEÇMİŞ

ADI SOYADI	: Tamer AKAN
DOĞUM YERİ VE TARİHİ	: Erbaa-Tokat/TÜRKİYE, 11 Ağustos 1972
MEDENİ HALİ	: Bekar
EV ADRESİ	: Yenikent Blokları 2562-B2 Blok, Daire:8 Eskişehir/TÜRKİYE
EĞİTİMİ	: İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü Lisans, 1990-1994 Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans, 1994-1997 Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora, 1997-
YABANCI DİL	: İngilizce, Mayıs 1998 KPDS – 69/100
MESLEĞİ	: Fizikçi
TEMEL ÇALIŞMA ALANI	: Plazma Fiziğinde Temel ve Uygulamalı Araştırma
İŞ ADRESİ	: Osmangazi Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Meşelik Kampüsü, 26480 Eskişehir/TÜRKİYE Tel : +90 (222) 229 04 33 /2313 Fax : +90 (222) 239 35 78 e-mail : akan@ogu.edu.tr

ARAŞTIRMA AŞAMALARI : Summer School on Advances in Quantum Optics and Spectroscopy of Solids, 2-10 July, 1995, Bilkent University, Ankara/TURKEY.

National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, 27-31 July 1998 Bucharest, ROMANIA.

BİLİMSEL ÇALIŞMALAR :

I. TEZLER

1. **Akan, T.**, " Vakumda Buharlaştırma Tekniği ile Depolanan Alüminyum ve Germanyum Filmlerinin İletkenliğinin Sıcaklıkla Değişiminin İncelenmesi" İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, Lisans Tezi, 1994, İstanbul, [Prof. Dr. Attila AKSELİ yöneticiliğinde]

2. **Akan, T.**, "Çok Kanallı Termal Mikroskop" Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, Ocak 1997, Eskişehir, [Yrd. Doç. Dr. M.Celalettin BAYKUL yöneticiliğinde]

3. **Akan, T.**, "Termiyonik Vakum Ark (TVA)'ın Temel Özelliklerinin İncelenmesi" Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Doktora Tezi, Devam Ediyor, [Prof. Dr. Naci EKEM yöneticiliğinde]

II. KİTAPLAR

4. Baykul, M.C., **Akan, T.**, " Physics Laboratory Manual-Mechanic and Heat Experiments ", 1995 , 35p.

5. Baykul, M.C., **Akan, T.**, Sağdıç, F., " Physics Laboratory Manual-Electric and Optic Experiments ", 1997 , 24p.

III. ULUSLARARASI DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

6. **Akan, T.,** Musa, G., Ekem, N., Pat, S., 2002, " Dependence of Film Thickness on The Deposition Angle in The Thermionic Vacuum Arc Method", Balkan Physics Letters, vol. 10, no.2, PP.79-86.

IV. ULUSLARARASI BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

7. Baykul, M.C., **Akan, T.,** 1997, "Multi-Channel Thermal Microscopy," *3rd General Conference of the Balcan Physical Union*, 2-5 September, 1997, Cluj-Napoca, ROMANIA, Page 4P-336.

V. ULUSAL DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALELER

8. **Akan, T.,** 2003, " Operation Parameters of The Thermionic Vacuum Arc (TVA) Discharge ", Turkish Journal of Physics, vol. 27, no. 1, 69-75.

9. **Akan, T.,** 2002, " Bakır Buharı Termiyonik Vakum Ark Deşarjın Karakteristikleri ", İTÜ Dergisi/C, cilt 1, sayı 1, 65-69.

10. **Akan, T.,** Ekem, N., 2003, " Anot Metali Buharlarında Plazma Üreten Yeni Teknik, Termiyonik Vakum Ark (TVA)", DEÜ Fen ve Mühendislik Dergisi, İncelemede.

11. **Akan, T.**, Ekem, N., 2003, " Variation in Thickness of Copper Films Deposited at Various Distances and Angles using The Thermionic Vacuum Arc ", Turkish Journal of Physics. İncelemede.

VI. ULUSAL BİLİMSEL TOPLANTILARDA SUNULAN BİLDİRİLER

12. **Akan, T.**, Baykul, M.C., "Malzeme Analiz Tekniklerinden Elektron ve Taramalı Prop Mikroskopları ve Çok Kanallı Termal Mikroskop", *I.Kızılırmak Fen Bilimleri Sempozyumu*, Kırıkkale, 14-16 Mayıs 1997 , Sayfa 451-459.

13. Baykul, M.C., Işık, İ., Sağdıç, F., **Akan, T.**, "Çok Kanallı Termal Mikroskop İle Sepiolitin Isıl İletkenlik Katsayısının ve Bakır-Sepiolit Yüzeyinin Termal Görüntüsü" , *VIII.Ulusal Kil Sempozyumu*, 24-27 Eylül 1999, DPÜ, Kütahya, Sayfa 187-193.

14. **Akan, T.**, Ekem, N., Musa, G., "Bakır Buharlarında Termiyonik Vakum Ark(TVA) Deşarjının Akım-Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi" , *21.Türk Fizik Derneği Fizik Kongresi*, 11-14 Eylül 2002, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, s. YEF_S22.

15. **Akan, T.**, Ekem, N., Musa, G., "Bakır Buharlarında Termiyonik Vakum Ark(TVA) Deşarjının Breakdown Voltajının İncelenmesi" , *21.Türk Fizik Derneği Fizik Kongresi*, 11-14 Eylül 2002, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, s.YEF_P8.

16. **Akan, T.**, Ekem, N., Musa, G., Pat, S., " Termiyonik Vakum Ark(TVA) İle Cam Taban Üzerine Oluşturulan Bakır Filmlerin Metalurjik Mikroskop İle İncelenmesi" , *21.Türk Fizik Derneği Fizik Kongresi*, 11-14 Eylül 2002, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, s.YEF_P9.

VII. PROJELER

17. Ekem, N., Musa, G., **Akan, T.**, " Düşük Sıcaklık ve Düşük Basınçtaki Plazma Parametrelerinin İncelenmesi", Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu, Proje No: 199919014, 1999.

18. Ekem, N., Musa, G., Tezel, Ö., **Akan, T.**, Pat, S., Saban, İ., Aksak, E., Delil, Z., Bacak, R., Alemdar, S., " RF Gaz Deşarjlarının ve Termiyonik Vakum Ark (TVA) Bakır Metal Plazmalarının Optiksel Çok Kanallı Analizör (OMA) Kullanılarak Plazma Karakteristiklerinin Belirlenmesi" , Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu, Proje No: 200319009, 2003.

VIII. ÖDÜLLER

19. Türk Fizik Derneği 21. Fizik Kongresi EN BAŞARILI ÇALIŞMA ödülü.