

**TERMİYONİK VAKUM ARK TEKNOLOJİSİYLE ÜRETİLEN BOR  
DEŞARJLARIN ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

**ERDİNÇ KARAKAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**Haziran-2006**

**BORON PROCESSING USING  
THE THERMIONIC VACUUM ARC TECHNOLOGY (TVA)**

**ERDİNÇ KARAKAŞ**

**M.Sc. THESIS  
PHYSICS DEPARTMENT  
June-2006**

**TERMİYONİK VAKUM ARK TEKNOLOJİSİYLE ÜRETİLEN BOR  
DEŞARJLARIN ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**

**ERDİNÇ KARAKAŞ**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

**Danışman: Prof. Dr. Naci EKEM**

**2006**

Erdinç KARAKAŞ ' ın YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırladığı  
“**TERMİYONİK VAKUM ARK TEKNOLOJİSİYLE ÜRETİLEN BOR  
DEŞARJLARIN ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ**” başlıklı bu çalışma, jürimizce  
lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

..... / ..... / 2006

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

Üye : Prof. Dr. Geavit MUSA .....

Üye : Prof. Dr. Turgay ARMAĞAN .....

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu ' nun ..... / ..... / 2006 gün ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

## ÖZET

Bu tez çalışmasında; Termiyonik Vakum Ark (TVA) sisteminde yüksek erime noktalı bir materyal olan bor elementinin deşarjları oluşturulmuş ve özellikleri incelenmiştir. İkinci, üçüncü, dördüncü ve beşinci bölümler bu tez çalışmasının teorik kısımlarıdır. İkinci bölümde plazma ve özellikleri hakkında bilgi, üçüncü bölümde bor materyalinin özellikleri ve kullanım alanları, dördüncü bölümde iyon kaplama teknikleri ve iyonlarla kaplamanın avantajları ve beşinci bölümde TVA sistemi ve deşarjlarının özellikleri ile ilgili teorik bilgiler verilmiştir. Altıncı ve yedinci bölümler ise deneysel kısımlardır. Altıncı bölümde bor TVA deşarjların akım-voltaj karakteristikleri, bor buharlarının vakum odasındaki deşarj öncesi ve sonrası için basınç değişimi ve bor ince filmleri üretilirken kaplanan yüzey üzerindeki kalınlık değişimleri incelenmiştir. Yedinci bölümde TVA sisteminde oluşturulan bor ince filmlerinin XPS, SEM, HRTEM, elektron difraksiyon izleri, AFM ve optik özelliklerinin analizleri yapılmıştır.

## SUMMARY

In this thesis study, discharges of the boron having high melting point were produced and properties of the boron thin films and discharges were investigated in the Thermionic Vacuum Arc (TVA). Second, third, fourth and fifth chapters are a part of theoretical information in the thesis study. Second chapter about description and properties of plasmas, third chapter about properties and applications of the boron element and compounds, fourth chapter about some ion deposition methods and advantage of ion deposition and fifth chapter about system, discharges and properties of the TVA were presented. Sixth and seventh chapters are a part of experimental in this thesis study. Sixth chapter boron TVA discharges discharge current-voltage characteristics, discharge current—pressure effect in the vacuum vessel by generating boron TVA discharges and deposition rate of the boron in the TVA were investigated. At the last chapter, XPS, SEM, HRTEM, electron diffraction pattern, AFM and optical properties were analyzed growing thin films of the boron in the TVA.

## TEŞEKKÜR

Öncelikle Eskişehir Osmangazi Üniversitesi (ESOGÜ), Fizik Bölümü, Plazma Fiziği laboratuvarını kurulmasını sağlayan ve bilimsel çalışmalarımıza yardımcı olan, yol gösteren Eğitim Fakültesi Dekanı ve Fizik Bölümü öğretim üyesi çok değerli hocamız sayın Prof. Dr. Naci EKEM sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İlk gördüğüm günden beri bana devamlı yeni ufuklar açan, bilim heyecanımı uyaran ve çalışmalarımı yönlendiren çok değerli sayın hocam Prof. Dr. Geavit MUSA'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Plazma fiziğini ilk olarak onun verdiği seminerle tanıştım ve tam beş sene oldu. Birlikte gece demeden tatil demeden günlerce çalıştık, tartıştık. Bana devamlı her durumda destek olan, moral veren ve yardımını hiçbir zaman esirgemeyen çok değerli sayın hocam Dr. Tamer AKAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bana her konuda her zaman yardımcı olan ve bana destek veren ESOGÜ, Plazma Fiziği laboratuvarı araştırma görevlileri Arş. Gör. Suat PAT, Arş. Gör. M. Zafer BALBAĞ ve Arş. Gör. İlker ÇENİK'e minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

Senelerdir bana maddi, manevi desteklerini esirgemeyen ve aldığım her türlü kararında yanımda olduklarını bildiğim Annem, Babam ve Kardeşim'e sevgi, saygı ve hürmetlerimi sunuyorum.

Hayatımın her anında yanımda olduğunu bildiğim ve bana her durumda ümit ve destek veren sevgili Eşim'e sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
ÖZET.....	IV
SUMMARY.....	V
TEŞEKKÜR.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	8
TABLolar DİZİNİ.....	8
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	8
<b>1.GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. PLAZMA TANIMI VE ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>4</b>
2.1. Giriş.....	4
2.2. Plazmanın Tanımı.....	6
2.3. Plazma Parametreleri.....	8
2.3.1. Plazma Yoğunluğu.....	8
2.3.2. Plazma İyonlaşma Derecesi.....	8
2.3.3. Plazma Sıcaklığı.....	8
2.3.4. Plazma Frekansı.....	10
2.3.5. Debye Uzunluğu ve Plazma Kılıfı.....	10
<b>3. BOR.....</b>	<b>13</b>
3.1. Bor'un Tarihçesi.....	13
3.2. Bor ve Bor Ürünleri Terminolojisi.....	14
3.3. Bor Elementinin Atomik Yapısı ve Fiziksel, Kimyasal Özellikleri .....	15
3.3.1. Atomik Yapısı.....	15

## İÇİNDEKİLER (Devam)

3.3.2. Fiziksel Özellikleri.....	16
3.3.3. Kimyasal Özellikleri.....	17
3.4. Bor Minerallerin Tanımı ve Dünya Bor Rezervleri.....	17
3.5. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları.....	21
3.5.1. Metalürjide Bor.....	21
3.5.2. Yakıt Teknolojisinde Bor.....	21
3.5.3. Süper İletkenlikte Bor.....	
3.5.4. Bilişim Teknolojisinde Bor.....	22
3.5.5. Uzay Teknolojisinde Bor.....	22
3.5.6. Askeri Uygulamalarda Bor.....	23
3.5.7. Tıp Alanında Bor.....	23
3.5.8. Tarımda Bor.....	24
3.5.9. Nükleer Uygulamalarda Bor.....	24
3.5.10. Bor elementinin kullanıldığı diğer uygulama alanları.....	24
3.6. Bor Kullanımına Dayanan Uzun Vadeli Teknolojik Projeler.....	25
3.6.1. Sodyum Bor hidrürden Hidrojen Kaynağı Olarak Yararlanma.....	26
3.6.2. Nd-Fe-B Mıknatısları ve Maglev Trenler.....	26
3.6.3. Bor ile Nötron Yakalama Terapisi (BNCT).....	27
3.7. Bor ile ilgili Son Araştırma Konuları ve Teknolojik Gelişmeler.....	28
	28
<b>4. İYONLARLA KAPLAMA.....</b>	
4.1. İyonlarla Kaplama Teknikleri.....	31
4.1.1. Katodik Vakum Ark.....	31
4.1.2. Anodik Vakum Ark.....	31
4.1.3. Söktürme (sputtering).....	33
4.2. Kaplama Tekniklerinde İyonların Kullanılmasının Avantajları.....	34
	36
<b>5. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA).....</b>	41
5.1. Giriş.....	41
5.2. TVA Sistemi.....	43

## İÇİNDEKİLER (Devam)

5.3. TVA Deşarj.....	50
<b>6. BOR TERMİYONİK VAKUM ARK DEŞARJLAR.....</b>	<b>56</b>
6.1. Bor Buharlarında TVA Deşarj Akım Voltaj Karakteristikleri.....	56
6.2. Bor Buharlarında Vakum Odasındaki Basınç Değişimi.....	59
6.3. Bor İnce Filmleri Üretilirken Kaplanan Yüzey Üzerindeki Kalınlık Değişiminin İncelenmesi.....	63
<b>7. TVA SİSTEMİNDE OLUŞTURULAN BOR İNCE FİLMLERİN ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ .....</b>	<b>65</b>
7.1. Bor İnce Filmlerinin XPS Analiz Sonuçları.....	66
7.2. Bor İnce Filmlerinin SEM Analiz Sonuçları.....	69
7.3. Bor İnce Filmlerin HRTEM Analiz Sonuçları.....	71
7.4. Bor İnce Filmlerinin AFM Analiz Sonuçları.....	73
7.5. Bor İnce Filmlerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi.....	74
<b>8. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>78</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>80</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. : Çevremizde gördüğümüz plazmalar.....	4
2.2. : Evrenin %99'u maddenin dördüncü hali plazmadır.....	5
2.3. : Maddenin dört hali.....	6
3.1. : Bor elementinin kristal yapısı.....	14
3.2. : Boraks' in mineral şekli.....	20
3.3. : Kernit'in mineral şekli.....	20
3.4. : Üleksit' in mineral şekli.....	20
3.5. : Kolemanit' in mineral şekli.....	20
3.6. : Pandemit'in mineral şekli.....	20
4.1. : Katodik vakum ark sisteminin şematik gösterimi.....	31
4.2. : Soğuk katotlu anodik vakum ark sistemi.....	33
4.3. : Söktürme (Sputtering) işleminin şematik gösterimi.....	35
4.4. : a.) Düşük Enerjili Kaplama., b.) Yüksek Enerjili Kaplama.....	36
4.5. : a.) Titanyum iyonu bombardımanı yokken, b.) Titanyum nötral atomlarıyla...	38
4.6. : İyon-Atom Geliş Oranına Göre Ortalama Yoğunluktaki Değişim.....	39
4.7. : Kaplama yüzeyine gönderilen iyonların kinetik enerjisindeki artış ile mikro yapılarıdaki gelişim.....	39
5.1. : TVA sisteminin önden ve üstten görünüşü.....	41
5.2. : TVA sisteminin yandan görünüşü .....	42
5.3. : Deneysel düzeneğin şematik gösterimi.....	42
5.4. : Doğrudan ısıtılan katot ile TVA' nın elektrotların düzenlenişi.....	44
5.5. : TVA için elektron emisyonu sağlayan, içinde doğrudan ısıtılan katottun bulunduğu elektron tabancasının fotoğrafı.....	46
5.6. : TVA'ın elektrotlarının deneylerde kullanıldığı biçimdeki fotoğrafı.....	47
5.7. : TVA deşarj fotoğrafları.....	48
5.8. : TVA' da deşarj öncesinde tungsten potaya katı haldeki materyal konulur....	51
5.9. : TVA' da katı haldeki materyalin elektron bombardımanı yardımıyla sıvı hale geçmesi.....	51
5.10. : TVA' da oluşan sıvı materyalin elektron bombardımanı ile gaz haline geçmesi.....	52

## ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

5.11. : TVA' da gaz haline geçen materyalin elektron bombardımanın devam etmesiyle plazma haline geçmesi.....	52
5.12. : TVA deşarjın elektrotlar arası uzaydaki şematik potansiyel dağılımı.....	53
5.13. : İyon enerjilerinin ark voltajı ile değişimi .....	54
6.1. : Bor TVA deşarjının 22A filament akımı için akım-voltaj karakteristikleri.....	57
6.2. : Bor TVA deşarjının farklı filament akımları için akım-voltaj karakteristikleri..	57
6.3. : Bazı seçilmiş metallerin TVA deşarjlarının akım-voltaj karakteristiği.....	58
6.4. : Bor buharlarının deşarj öncesi akım-basınç grafiği.....	59
6.5. : Bakır buharın deşarj öncesi için akım-basınç grafiği.....	60
6.6. : Bor buharının deşarj sonrası için akım-basınç grafiği.....	61
6.7. : Bakır buharın deşarj sonrası akım-basınç grafiği.....	62
6.8. : Bor kaplanan cam yüzeyin zamanla kalınlık değişimi grafiği.....	63
7.1. : TVA sisteminde cam üzerine kaplanan bor ince filmlerin fotoğrafı.....	65
7.2. : TVA sisteminde çelik üzerine kaplanan bor ince filmlerin fotoğrafı.....	66
7.3. : TVA sisteminde oluşturulan bor ince filmin XPS analizi sonuçları.....	67
7.4. : Cam üzerine kaplanmış bor ince filminin SEM görüntüsü.....	69
7.5. : Çelik üzerine kaplanmış bor ince filminin SEM görüntüsü.....	70
7.6. : Bor ince filmin HRTEM görüntüsü.....	71
7.7. : Elektron difraksiyon izleri .....	72
7.8. : Bor ince filmin AFM görüntüsü.....	73
7.9. : Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın geçirgenliğe göre grafiği.....	74
7.10. : Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın, yansımaya göre grafiği.....	75
7.11. : Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın, kırılma indisine göre grafiği.....	76
7.12. : $(\alpha hv)^2 \sim hv$ değişim grafiği.....	77

## TABLULAR DİZİNİ

### Tablo

	<u>Sayfa</u>
3.1. : Bor elementinin atomik yapısı.....	
3.2. : Bor elementinin fiziksel özellikleri.....	15
3.3. : Bor elementinin kimyasal özellikleri.....	16
3.4. : Bor mineralleri arasında ticari önemi olanlar.....	17
3.5. : Dünyadaki toplam bor rezervleri.....	17
7.1. : XPS analizi sonucunda bor ince filmin üzerindeki bulunan elementlerin yüzdece oranları.....	19
7.2. : HRTEM ve elektron izlerinden hesaplanan değerler.....	67
	72

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$n_i$	İyon yoğunluğu
$n_e$	Elektron yoğunluğu
$n$	Plazma yoğunluğu
$N$	Nötral atom sayısı
$\alpha_{iz}$	İyonlaşma derecesi
$T$	Sıcaklık
$T_g$	Gaz sıcaklığı
$T_u$	Uyarılmış atom sıcaklığı
$T_i$	İyon sıcaklığı
$T_e$	Elektron 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
$\nu_L$	Langmuir plazma frekansı
$e$	Elektronun yükü
$\epsilon_0$	Boşluğun geçirgenliği
$\lambda_D$	Debye uzunluğu
$N_D$	Debye küresi içindeki parçacık sayısı
$\tau$	Ortalama çarpışma zamanı
$\omega$	Çarpışma frekansı
$d$	Elektrotlar arası uzaklık
$L$	İndüksiyon, Plazma boyutları
$\alpha$	Birim atom başına iyonlaşma enerjisi

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
x	Uzaklık
$V_B$	Breakdown voltajı
p	Basınç
i	Akım
V	Potansiyel farkı
$T_{eri}$	Erime sıcaklığı
$T_{kay}$	Kaynama sıcaklığı
$\epsilon$	Elektromotor kuvveti, Materyalin yayma sabiti
R	Direnç, Gaz sabiti
$\phi$	İş fonksiyonu
E	Enerji, Elektrik alan
$\Phi$	Gerilim
j	Akım yoğunluğu
r	Yansıma katsayısı, Anoda uzaklık
h	Planck sabiti
W	Elektron enerjisi
$\lambda$	de Broglie dalga boyu, Buharlaştırma ısısı
B	Manyetik alan
$\phi$	Elektrotlar arası açı, Depolanma açısı
$q_v$	Güç yoğunluğu
P	Güç
S	Kesit alan
$U_{atş}$	Ateşlenme voltajı
$I_e$	Elektronik akım
$I_f$	Flament ısıtma akımı
$\sigma$	Stefan-Boltzman sabiti, Plazmanın elektriksel iletkenliği
$Q_{iletim}$	Isı iletim enerjisi
Q	Tesir kesiti

<b><u>Simge</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$U_{ark}$	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
$t$	Zaman
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
OGÜ	Osmangazi Üniversitesi
HV	Yüksek Voltaj
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XPS	X Işınları Spektrometsi
HRTEM	Yüksek Çözünürlüklü Geçişmeli Elektron Mikroskobu
AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
RF	Radio frekans
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
MW	Mikrodalga
$\mu m$	Mikrometre
nm	Nanometre
atm	Atmosfer basıncı

## 1. GİRİŞ

Plazma; maddenin dördüncü halidir. Günümüzde plazma hali endüstriyel uygulamalar ve bilimsel araştırmalarda oldukça önem kazanmıştır. 20. yüzyılın başında tüm dikkatler maddenin katı, sıvı ve gaz halini anlamaya yönelik olmuştur. Ancak 20. yüzyılın sonlarına doğru dikkatler plazma hali üzerine yoğunlaşmıştır. Günümüzde bilim adamları tarafından en çok çalışılan konuların başında Plazma Fiziği gelmektedir. Endüstriyel uygulamalarda plazmalar daha hızlı, daha ucuz ve daha kaliteli ürünler elde edilmesini sağlamaktadır. Ayrıca çevre kirliliğine yol açmamakta, kimyasal işlemleri hızlandırmakta ve enerji tüketimi verimini artırmaktadır. Plazma; savunma sanayi, uçak sanayi, otomobil sanayi, telekomünikasyon, kâğıt sanayi, tekstil sanayi, güneş enerjisi, optik, nano teknoloji, bilgisayar teknolojisi, biyomedikal, tehlikeli ve zararlı atık arıtma ve füzyon reaktörleri araştırmalarında gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Roth, 1995).

Materyallerinin özelliklerini geliştirmek için günümüzde oldukça fazla çalışmalar yapılmaktadır. Plazma teknolojileri ile materyallerin sertliği, yorgunluğu, dayanıklılığı, yüzeysel tutunma, sürtünme, dielektrik, korozyon ve oksidasyon gibi birçok özellikleri geliştirilebilmektedir (Roth, 2001). Materyallerin özelliklerini geliştirmek için en çok başvurulan yollardan bir tanesi ince veya kalın film kaplamaktır. Plazmalar ile kaplanan ince filmler iyonlar kullanarak depolama yapılması sebebiyle diğer yöntemlere göre oldukça üstün nitelikli ve kalitelidir.

Plazmaları elde etmek için birçok sistem kullanılmaktadır. Bu sistemlerde elde edilen plazmalar amaçlarına göre kullanım alanları bulurlar. Örneğin; gaz deşarjlar aydınlatmada ve lazerlerde, ark plazmaları ince film kaplama ve sterilizasyon vb. teknolojilerde kullanılmaktadır.

Maddenin dördüncü hali olan plazma günümüz teknolojisi ve biliminde geniş yer bulduğu gibi materyaller açısından bor elementi de önemli özellikleri nedeni ile

günümüz teknolojisi ve biliminde oldukça geniş yer bulmaktadır. Bor materyalinin kullanım ve araştırma alanları devamlı genişlemektedir. Bor sahip olduğu özellikler bakımından diğer metallere farklı özellikler göstermektedir. Tabiiatta saf bor hiçbir zaman bulunmaz. Bor bileşikleri metal dışı bileşikler gibi davranır. Ancak saf bor karbon kadar elektrik iletkenidir ve termal iletkenliği diğer metallere göre oldukça düşüktür. Bor bileşikleri çok fazla uygulama alanları bulmasına rağmen işlenmesi için ileri teknoloji gerekmektedir. Bu konuda ülkemiz bor dünya rezervlerinin %70 ine sahip olmasına rağmen bor bileşiklerinin işlenmesi, araştırılması ve geliştirilmesi adına kayda değer çalışmaların olmaması ilginçtir.

Bor bileşiklerinin kullanım alanları çok geniştir. Bor; cam sanayi, seramik sanayi, nükleer sanayi, askeri ve zırhlı araçlar, elektrik-elektronik ve bilgisayar sanayinde, iletişim araçlarında, inşaat çimento sektöründe, metalürjide, enerji sektöründe, otomobil sanayi, tekstil sektörü, ilaç ve kozmetik sanayinde, tıp, kimya sanayinde, deterjan sanayi, tarım sektörü, kâğıt sanayi, koruyucu, mıknatıslar, fotoğrafçılık, kompozit malzemeler, spor malzemeler, manyetik cihazlar ve mumyalama gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Bor Enst., 2005).

1983 yılında INFLPR (National Institute for Laser , Plasma and Radition Physics, Bükreş/Romanya)' dan düşük sıcaklık plazma fiziği grubu Termiyonik Vakum Ark (TVA) adında, yeni tip bir vakum ark oluşturulmuştur (Musa et al., 1983). Termiyonik Vakum Ark, içinde buharlaştırılıp plazması oluşturulacak materyalin bulunduğu anot olarak kullanılan pota, potada bulunan materyalin plazmasını oluşturmak için anoda doğru odaklanmış termo elektron yayınlanan bir katot (tungsten filament)'dan oluşmaktadır. Tungsten filament yayınlanan elektronları anot üzerine odaklamak için whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir. Katot olarak kullanılan tungsten filament yayınlanan elektronları anoda yani materyalin bulunduğu potaya doğru hızlandırmak için anot ile katot arasına yüksek voltaj uygulanır. Böylelikle potanın içindeki bulunan materyale enerji aktarılmış olur. Öncelikle potadaki materyal erimeye başlar, eridikten sonra buharlaşır ve daha sonra uygulanan voltaj uygun değer ulaştığında elektrotlar arasında parlak bir deşarj yani plazma oluşur. TVA ile yalnızca anot materyalinin

buharlaştırılması ve iyonlaştırılması nedeni ile saf, gaz karışımı ve makro parçacık içermeyen, hemen hemen her metalin % 20 oranlarına kadar yüksek iyonlaşma dereceli metal buharları plazmaları üretilmektedir (Musa et al., 1986, Musa et al.,1987). Aynı zamanda TVA ile ayrıca bir iyon hızlandırıcı cihazı kullanılmadan yalnızca çalışma parametrelerini kontrol edilmesiyle, üretilen metal iyonlarının enerjileri ayarlanabilmektedir (Musa et al., 1999). Burada iyonların enerjisinin değiştirilmesiyle kolayca yapılabilir (Musa et al., 1997).

Bu tez çalışmasında TVA sisteminde bor materyalinin deşarjları oluşturulmuştur. TVA' da oluşturulan bor buharı deşarjlarının akım-voltaj karakteristikleri, bor buharının deşarj öncesi ve sonrası için vakum odasındaki basınç değerleri, bor buharı deşarjının TVA sisteminde cam üzerine kaplanmasının zamanla değişimi ve oluşturulan bor ince filmlerin XPS, SEM, HRTEM, elektron difraksiyon izleri, AFM ve optik özelliklerinin analizleri yapılmıştır.

Bölüm 2' de plazmanın tanımı ve özellikleri, bölüm 3' de bor materyalini özellikleri ve kullanım alanları, bölüm 4' de iyonlarla kaplama teknikleri ve iyonları kaplama yapmanın avantajları, bölüm 5' de TVA sisteminin tanımı, özellikleri ve deşarjın oluşumu, bölüm 6' da bor buharı deşarjlarında akım-voltaj karakteristiği, bor deşarjlarının oluşması sürecinde deşarj öncesi ve deşarj sonrasında vakum odasındaki basınç değerleri, bor buharının cam üzerine depolanmasının zamanla değişimi ve bölüm 7' de TVA sisteminde oluşturulan bor ince filmlerinin XPS, SEM, HRTEM, elektron difraksiyon izleri, AFM ve optiksel özelliklerinin analiz sonuçları verilmiştir.

## 2. PLAZMANIN TANIMI VE TEMEL PLAZMA PARAMETRELERİ

### 2.1. Giriş

1929 yılında Irving Langmuir tarafından ilk kez "PLAZMA" terimini kullanmıştır (Tonks, 1929). 1932 yılında I. Langmuir plazma üzerindeki çalışmalarında kimya dalında, 1970 yılında İsveçli Hannes Alfvén "Plazmaya verilen pertürbasyonun manyetik alan yönünde plazma frekansı ile yayılması" çalışması ile fizik dalında Nobel ödülü almışlardır.



**Şekil 2.1.** Çevremizde gördüğümüz plazmalar: a) Alev, b) Floresans lamba, c)Yıldırım, d) Güneş (<http://images.search.yahoo.com>, 16.08.2005).

Günlük hayatta ateş gibi çok bildiğimiz floresan lambalar, büyük restoran ve eğlence yerlerinde kullanılan neon lambalar, şehirlerin gece aydınlatılmasında kullanılan sarı renkli sodyum lambaları da plazma sistemleridir. Az bildiğimiz fakat çok kullandığımız plazma, içinde bulunduğumuz evrenin % 99' unu oluşturmaktadır. Yerin yaklaşık 50-300 km üzerinde bulunan kısmi olarak iyonlaşmış gaz bölgesi olan atmosferin katmanlarından iyonosfer,  $10^6$   $\text{cm}^{-3}$  elektron yoğunluğuna ve 0.1 eV elektron sıcaklığına sahip bir plazmadır. 1 eV yaklaşık 11600 °K' dir. Yerin manyetik alanı tarafından yüksek mesafelerde tuzaklanmış, enerjistik iyonlaşmış parçacıkların Van Allen kuşakları, güneşten kopan plazmaların atmosferin üst katmanlarında oluşturduğu ve genelde kutuplarda gözükten 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  $5 \text{ cm}^{-3}$  ve

elektron sıcaklığı 50 eV olan güneş rüzgarları ve hemen hemen her yağmurlu günde gördüğümüz şimşek, evrende doğal olarak oluşan plazmalardır. Yıldızlar arası ortam nebulalar ve gaz bulutlarından oluşmuştur. Nebulalar, yeni yıldızların oluşmasına neden olurlar ve plazma halindedirler. Yıldızlar arası ortamı oluşturan gaz bulutları,  $1 \text{ cm}^{-3}$  kadar yüksek yoğunluklu, hidrojen plazması içerir. Güneş ve yıldızların yüzey sıcaklıkları  $5000 \text{ °K}$ ' den  $70000 \text{ °K}$ ' 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. Evren, galaksiler ve galaksiler arası ortamdan oluşmaktadır. Galaksiler, yıldızlar ve yıldızlar arası ortamdan oluşmaktadır. Yıldızlar arası uzayda dünyamız gibi bir süpernova patlaması sonucu oluşmuş ve plazma halinde olmayan soğuk gezegenler, evrenin ancak %1'ni oluştururlar (Kikuchi, 1998).



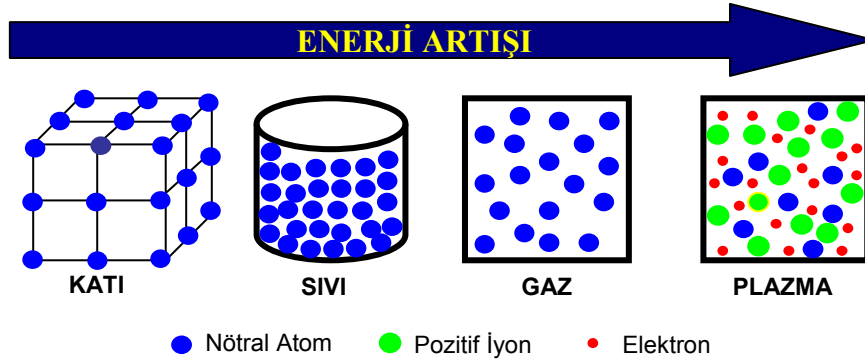
**Şekil 2.2.** Samanyolu galaksisi gibi evrenin %99'u maddenin dördüncü hali plazmadır (<http://images.search.yahoo.com>, 16.08.2005).

Güneş, yıldızlar ve yıldızlararası ortamın plazma halinde olması, Büyük Patlama (Big-Bang) teorisine de başka bir bakış açısı getirmiştir. Büyük patlama kozmologlarına göre evrenin var oluşu, "ylem" ile başlar. Ylem kelimesi ilk olarak filozof Aristoteles tarafından, "Bütün elementlerin kendisinden türediği ilk orijinal madde" anlamında kullanılmıştır. Son derece küçük olan bu kararsız top, çok yüksek şiddetle patladı ve tüm zamanların en büyük patlaması gerçekleşti. Evreni oluşturan madde öylesine sıcaktı ki, her şey plazma halindeydi. Yani başlangıçta plazma, maddenin ilk haliydi. Evrenimizin

genişleme sürecinde madde soğudu ve böylece plazmanın bir kısmı gaz haline dönüştü; soğumaya devam etti ve su haline dönüştü ve son olarak katı haline dönüştü. (Akan, 2005).

## 2.2. Plazmanın Tanımı

Plazma; bütünüyle elektriksel olarak nötral olan ve rasgele doğrultularda hareket eden pozitif ve negatif yüklü parçacıklar topluluğudur. Plazma içindeki yüklü parçacıklar birbirinden bağımsız hareket ederken, sistem bütünüyle sanki yüksüzdür. Bu nedenle plazma içindeki parçacıkların hareketi bireysel değil kolektiftir (Akan, 2003).



Şekil 2.3. Maddenin dört hali.

Bilindiği gibi termal dengedeki katı bir madde, genelde sabit bir basınçta, sıcaklığının artırılması ile sıvı haline geçer. Sıcaklık biraz daha arttırılırsa sıvı halinden gaz haline geçer. Yeterince yüksek bir sıcaklıkta gaz içindeki moleküller, rasgele doğrultularda serbestçe hareket eden gaz atomlarını oluşturmak için ayrışır. Eğer sıcaklık daha fazla arttırılırsa gaz atomlarından bir ya da birkaç elektron kopar ve gaz atomları serbestçe hareket eden yüklü parçacıklara (pozitif iyonlar ve elektronlar) ayrışarak maddenin dördüncü hali "PLAZMA" oluşur. Plazma halinde, maddenin atomları parçalanmıştır ve sürekli hareket halinde olan pozitif yüklü iyonların ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelmiştir. Plazma içinde aynı zamanda elektronlar, fotonlar, uyarılmış atomlar veya

moleküller, radikaller, yarı kararlı atomlar, nötral atom veya moleküller de vardır (Tanenbaum, 1967).

Bazı özellikler plazmayı karakterize eder ve bu özellikler plazmayı katı, sıvı ve gazlardan ayırır. Plazmanın en önemli ve maddenin diğer hallerinden 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 kolektif bir davranış içindedirler. Plazma içindeki yüklü parçacıkların difüzyonu bundan dolayı elektronların ve iyonların bireysel difüzyon katsayıları ile değil, ambipolar difüzyon katsayısı ile verilir (Kral et al.,1973). Şekil 2.3.' de görüldüğü gibi maddenin hal değişimi, maddenin sıcaklığının artırılması 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 (Roth, 1995).

## 2.3. Plazma Parametreleri

### 2.3.1. Plazma yoğunluğu

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,

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

dir. Burada  $n$ ; “Plazma Yoğunluğu” olarak tanımlanır (Grill, 1993).

### 2.3.2. Plazma iyonlaşma derecesi

Plazma içindeki yüklü parçacık sayısını ifade eden parametre, gazın iyonlaşma derecesidir. Gaz içindeki iyonlaşmış parçacık sayısı olan iyonlaşma derecesi;

$$\alpha_{iz} = \frac{n_i}{n_i + N} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N$ ; nötral atomların yoğunluğudur.  $\alpha_{iz} = 1$  olduğunda plazma tümüyle iyonlaşmış demektir (Lieberman et al., 1997). Bu durum yıldızlarda ve termonükleer füzyon reaktörlerinde gözlenir.

### 2.3.3. Plazma sıcaklığı

Termodinamik dangedeki bir nötral gaz halini tanımlayan en önemli parametre, sistem içindeki molekülün ortalama taşınım enerjisini ifade eden sıcaklıktır. Plazma içinde,

farklı elektrik yüklü ve kütleli parçacıkların bir karışımı vardır. 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 ayrılmış atomlar için ayrılmış atom sıcaklığını ve  $T_f$ ; fotonların enerjisini karakterize eden foton sıcaklığını ifade etmektedir. Eğer plazma içindeki her türün sıcaklığı eşit yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_f \cong T_e = T_p \quad (2.3)$$

ise bu plazma, “Termo Dinamik Denge (TTD) olan 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 yani,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_e \neq T_f \quad (2.4)$$

ise bu plazma, “Lokal Termo Dinamik Denge (LTD) Plazma ” olarak isimlendirilir. Laboratuvar koşullarında atmosferik basınçlarda lokal termodinamik dengede olan plazmalar üretilebilir ve bunlar genellikle “Termal Plazmalar” olarak adlandırılır (Roth, 1995).

Elektronların plazma içindeki dağılım fonksiyonu;

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

Maxwell dağılım fonksiyonu ile verilir (Grill, 1993). Burada  $m_e$ ; elektronların kütlesi ve  $k$ ; Boltzman sabitidir.

#### 2.3.4. Plazma frekansı

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

$$\nu_L = \left( \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{veya} \quad \nu_L = 8.980 n_e^{\frac{1}{2}} \text{ (Hz)} \quad (2.6)$$

şeklinde verilir (Thornton et al., 1978, McDaniel, 1964). Burada  $\epsilon_0$ ; boşluğun geçirgenliği  $n_e$ ;  $m^{-3}$  cinsinden elektron yoğunluğu ve  $e$ ; elektronun yükü'dür. Endüstriyel plazmalarda (sanayide kesme, kaynak, aydınlatma gibi pek çok alanda kullanılan plazmalar) plazma frekansı  $\nu_L \cong 0.898 \text{ GHz}$ 'dir (Muraoka et al., 2001).

#### 2.3.5. Debye uzunluğu ve plazma kılıfı

Lokal elektrik alanların etkisini azaltmak için yüklü parçacıkların tepkisi “Debye Kafeslemesi (Debye Shielding)” olarak adlandırılır (Muraoka et al., 2001). Debye kafesleme etkisi nedeniyle plazma içinde lokal elektrikselsel 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 veya Sanki Yüksüz (Quasi-Neutrality)” olarak adlandırılır. Ancak plazma içinde,

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{veya} \quad \lambda_D \cong 7434 \left( \frac{T_e}{n_e} \right)^{\frac{1}{2}} (m) \quad (2.7)$$

ile verilen ve “Debye Uzunluğu” olarak adlandırılan uzunluk, plazma içindeki minimum nötral olan bölgeye karşılık gelir  $T_e$ ; eV cinsinden elektron sıcaklığı,  $n_e$ ;  $m^{-3}$  cinsinden elektron yoğunluğu’dur. Endüstriyel plazmalar için elektron sıcaklığı 5 eV, parçacık yoğunluğu  $10^{16}$  parçacık/ $m^3$  ve  $\lambda_D \cong 0.17$  mm’dir (Roth, 1995). Daha doğrusu plazma içinde  $\lambda_D$  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. Böylece metal yüzeyi ile plazma arasında bir potansiyel farkı oluşur. Bundan dolayı plazma, kendisi ile temasta olan herhangi bir yüzeye göre, her zaman pozitif potansiyele sahip olur. Debye kafesleme etkisi nedeniyle yüzeyle plazma arasında oluşan potansiyel, birkaç Debye uzunluğundaki 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 elektrotlarda katot potansiyeli (katot düşümü) ve anot potansiyeli (anot düşümü) olarak adlandırılan pozitif ve negatif yükler için hızlandırıcı bir potansiyel her zaman bulunur (Roth, 1995; Kunkel, 1996).

Plazma frekansı ile Debye uzunluğu arasında bir ilişki vardır. Debye uzunluğu  $\lambda_D$  ile plazma frekansı  $\nu_L$ ’nin çarpımı ;

$$\lambda_D \cdot \nu_L = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{k T_e}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \approx \bar{v}_e \quad (2.8)$$

bulunur. Burada  $\overline{v_e}$ ; plazma içindeki elektronların ortalama termal hızı'dır. Eşitlik (2.8) elektronların, plazma titreşim periyodu süresince bir Debye uzunluğu mesafesinde hareket edebileceğini göstermektedir.

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, plazma boyutları (L), Debye uzunluğundan çok daha büyük olmalıdır. Yani iyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanması için  $L \gg \lambda_D$  olmalıdır.

İkinci olarak  $\lambda_D$  yarıçaplı ve Debye küresi olarak adlandırılan hacim içindeki yüklü parçacık sayısının  $N_D \gg 1$  olması gerekir. Debye küresi içindeki yüklü parçacık sayısı;

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_e \lambda_D^3 = 1.37 \times 10^6 \frac{T_e^{3/2}}{n_e^{1/2}} \quad (2.9)$$

ile verilir (Tanenbaum, 1983).

Üçüncü şart plazmadaki çarpışma frekansı ile ilgilidir. Eğer plazma içindeki yüklü parçacıklar, nötral atomlarla çok sık çarpışıyorsa, kolektif davranış şartı sağlanmaz ve gaz bir plazma olarak davranamaz.  $\tau$ ; nötral atomlarla yüklü parçacıkların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman ve  $\omega$ ; çarpışma frekansı olmak üzere, iyonlaşmış bir gazın plazma olabilmesi için  $\omega \cdot \tau > 1$  olmalıdır (Grill, 1993).

## 3. BOR

### 3.1 Bor'un Tarihçesi

4000 yıl önce uzak doğuda Tibet'te insanoğlu bor elementinin varlığından haberdardı. Bor materyali; Sümerler ve Etiler tarafından altın ve gümüş işçiliğinde, Babiller tarafından uzak doğudan getirilerek altın işlemede, Mısırlılar tarafından mumyalama işlemlerinde, Romalılar tarafından cam yapımında, Eski Yunanlılar tarafından temizlikte, 9. yüzyılda Arap doktorlar tarafından ilaç yapımında, Çinliler tarafından da seramik ve cam üretiminde kullanılmıştı.

Elementel bor 1808 yılında Fransız Kimyacı Gay-Lussac ile Baron Louis Thenard ve bağımsız olarak İngiliz kimyacı Sir Humpry Davy tarafından bulunmuştur.

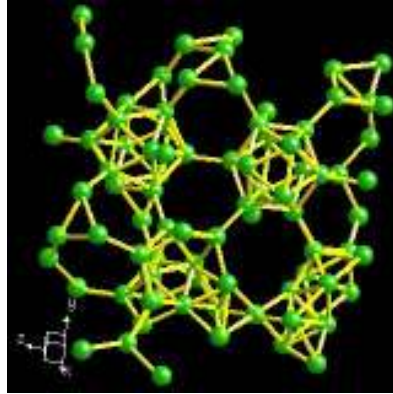
Modern bor endüstrisi ise 13. yy.' da Marco Polo tarafından Tibet' ten Avrupa'ya getirilmesiyle başlamıştır. 1771 yılında, İtalya'nın Tuscani bölgesindeki sıcak su kaynaklarında Sassolit bulunduğu anlaşılmış 1852 yılında Şili' de endüstriyel anlamda ilk boraks madenciliği başlamıştır. Nevada, California, Caliko Moutain ve Kramer yöresindeki yatakların bulunarak işletilmeye alınmasıyla ABD dünya bor gereksinimini karşılayan birinci ülke haline gelmiştir.

Türkiye' de ilk işletmenin 1861 yılında çıkartılan Maadin Nizannamesi uyarınca 1865 yılında bir Fransız şirketine işletme imtiyazı verilmesiyle başladığı bilinmektedir. Türkiye'de Bor Madenleri 1978 yılında devletleştirildikten sonra tamamen Eti Holding tarafından işletilmektedir. Bor üretimi 1970' li yıllara kadar büyük ölçüde yabancıların elindeydi. Bor mineralleri, kamu yararı ve ulusal çıkarları korumak adına 4 Ekim 1978 tarihli 2172 sayılı yasa ile Etibank'a devredildi (Ölçen, 2001).

1950 yılında Bigadiç ve 1952 yılında Mustafa Kemal Paşa yöresindeki kolemanit yatakları bulunmuştur. 1956 yılında Kütahya Emet Kolemanit, 1961 yılında Eskişehir Kırka Boraks yataklarının bulunması ve işletilmeye başlatılmasıyla Türkiye, dünya bor üretimi içinde % 3 olan payını 1962’de % 15, 1977’ de % 39 düzeyine yükseltmiştir (Bor Enst., 2005).

### 3.2 Bor ve Bor Ürünleri Terminolojisi

Bor, periyodik tabloda III A grubunda yer alan, B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81, yoğunluğu 2,84 gr/cm<sup>3</sup>, ergime noktası 2300 °C ve kaynama noktası 2550 °C olan iki kararlı izotop; B<sup>10</sup> (%19,8) ve B<sup>11</sup> (%80,2)’den oluşan, metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir elementtir. Tabiatta hiçbir zaman serbest halde bulunmaz. Doğada yaklaşık 230 çeşit bor minerali olduğu bilinmektedir (Bor Enst., 2005).



**Şekil 3.1.** Bor elementinin kristal yapısı.

Bor’un çeşitli metal veya ametal elementlerle yaptığı bileşiklerin gösterdiği farklı özellikler, bor bileşiklerin birçok endüstride kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Bor, bileşiklerinde metal dışı bileşikler gibi davranır, ancak farklı olarak saf bor, karbon gibi elektrik iletkenidir (Bor Enst., 2005). Bor hidratlar silikon ve karbon bileşiklerine

benzer özellikler gösterir. Kristalize bor görünüm ve optik özellikleri açısından elmasa benzemektedir ve neredeyse elmas kadar serttir. Endüstriyel açıdan önemli bor bileşikleri arasında boraks (tinkal, sodyum kökenli bor bileşikleri) kolemanit (kalsiyum kökenli bor bileşikleri), üleksit (sodyum-kalsiyum kökenli bor bileşikleri) ana gruplaması altında kernit, probertit, szyabelit, datolit, sasolit, boraks dekahidrat, boraks pentahidrat, susuz boraks, borik asit, sodyum per borat, susuz borik asit, hidroborasit sayılabilir. Bor madenlerinin değeri genellikle içindeki B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (bor oksit) ile ölçülmekte, yüksek oranda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bileşiğine sahip olanlar daha değerli kabul edilmektedir. Bu mineraller arasında en önemlileri tinkal ve kolemanittir. Üleksit, kernit, probertit ve szyabelit de ticari açıdan önemlidir. Madencilik faaliyetleri sonucunda genellikle zenginleştirilmiş üleksit, tinkal, kolemanit, boraks veya borik asit gibi mineraller elde edilir. Bor kullanılarak üretilen bor bileşiklerinin ise en önemlileri boraks pentahidrat, susuz boraks, boraks dekahidrat ve borik asittir. Bor madenleri, topraktan çıkarıldıktan (tüvenan cevher) sonra kırma, eleme, yıkama ve öğütme işlemlerini müteakip, ilgili sanayilerin kullanımına hazır hale getirilmektedir (<http://www.dtm.gov.tr/ead/bor>, 16.08.2005).

### 3.3. Bor Elementinin Atomik Yapısı ve Fiziksel, Kimyasal Özellikleri

#### 3.3.1. Atomik yapısı

**Tablo 3.1.** Bor elementinin atomik yapısı (Bor Enst., 2005).

<i>Atomik Çapı:</i>	1.17Å
<i>Atomik Hacmi:</i>	4.6cm <sup>3</sup> /mol
<i>Kristal yapısı:</i>	Rhombohedral
<i>Elektron Konfigürasyonu:</i>	1s <sup>2</sup> 2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>
<i>İyonik Çapı:</i>	0.23Å
<i>Elektron Sayısı (yüksüz):</i>	5
<i>Nötron Sayısı:</i>	6
<i>Proton sayısı:</i>	5
<i>Valans Elektronları:</i>	2s <sup>2</sup> p <sup>1</sup>

### 3.3.2. Fiziksel özellikleri

**Tablo 3.2.** Bor elementinin fiziksel özellikleri (Bor Enst., 2005).

<i>Atomik Kütle:</i>	10.811 gr/mol
<i>Kaynama Noktası:</i>	4275 K
<i>Termal Genleşme Katsayısı:</i>	0.0000083 cm/cm/°C (0°C)
<i>İletkenlik:</i>	Elektriksel: $1.0E^{-12} 10^6/cm$ Termal: 0.274 W/cmK
<i>Yoğunluk:</i>	2.34g/cc 300K' de.
<i>Görünüş:</i>	Sarı-Kahverengi ametal kristal
<i>Elastik Modülü:</i>	Bulk: 320/GPa
<i>Atomizasyon Entalpisi:</i>	573.2 kJ/mole 25°C' de.
<i>Füzyon Entalpisi:</i>	22.18 kJ/mole
<i>Buharlaştırma Entalpisi:</i>	480 kJ/mole
<i>Sertlik:</i>	Mohs: 9.3 Vickers: 49000 MN m <sup>-2</sup>
<i>Buharlaştırma Isısı:</i>	489.7kJ/mol
<i>Ergime Noktası:</i>	2573K
<i>Molar Hacmi:</i>	4.68 cm <sup>3</sup> /mole
<i>Fiziksel Durumu(20°C &amp; atm):</i>	Katı
<i>Spesifik Isısı:</i>	1.02 J/gK

### 3.3.3. Kimyasal özellikleri:

**Tablo 3.3.** Bor elementinin kimyasal özellikleri (Bor Enst., 2005).

<i>Elektrokimyasal Eşdeğer:</i>	0.1344g/amp-hr
<i>Elektronegativite (Pauling):</i>	2.04
<i>Füzyon Isısı:</i>	50.2kJ/mol
<i>İyonizasyon potansiyeli:</i>	Birinci: 8.298 eV İkinci: 25.154 eV Üçüncü: 37.93 eV
<i>Valans elektron potansiyeli:</i>	190 eV

### 3.4. Bor Minerallerinin Tanımı ve Dünya Bor Rezervleri

Bor mineralleri değişen oranlarda B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeren minerallerdir. Bor minerali rezervleri dünyada başlıca üç kuşakta oluşmuştur. Bu bölgeler ABD'nin güneybatı bölgesi Mojave çölü, Güney-Orta Asya Alp kuşağı ( Türkiye dahil), Güney Amerika And kuşağıdır.

**Tablo 3.4.** Bor mineralleri arasında ticari önemi olanlar (Bor Enst., 2005).

Tinkal (Boraks):	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .10H <sub>2</sub> O
Kernit:	Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> .4H <sub>2</sub> O
Kolemanit:	Ca <sub>2</sub> B <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .5H <sub>2</sub> O
Üleksit:	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .8H <sub>2</sub> O
Probertit:	NaCaB <sub>5</sub> O <sub>9</sub> .5H <sub>2</sub> O
Datolit:	CaBSiO <sub>4</sub> OH
Hidroborasit:	CaMgB <sub>6</sub> O <sub>11</sub> .6H <sub>2</sub> O

**Tinkal (Boraks):** Dünyada en yaygın bulunan bor mineralidir. U.S. Boraks tarafından Boron/ Kaliforniya ve Tincalayu / Arjantin’de işletilmekte olan yatakların temel minerali tinkaldir. Dünyanın en büyük tinkal rezervi ise Türkiye’de Kırka/ Eskişehir’de bulunmaktadır.

**Kernit:** Boron Kaliforniya’da bulunan önemli miktardaki Kernit U.S. Boraks tarafından burada bulunan rafinasyon tesislerinde işlenmektedir.

**Kolemanit:** Çeşitli kalsiyum borat oluşumları arasında en önemlisi kolemanittir. Dünyanın en büyük kolemanit yatakları Türkiye’de bulunmaktadır. Death Valley/ ABD’de de halen işletilmekte olan bir kolemanit oluşumu mevcuttur.

**Üleksit:** Üleksit ve probertit oluşumları Kaliforniya ve Türkiye’deki borat yataklarında yer almaktadır. Geçmişte önemli bir hammadde kaynağı olarak kullanılan probertit uzun yıllardan beri işlenmemektedir. Türkiye’de büyük miktarda üleksitin rezervleri bulunmaktadır. Güney Amerika And dağlarında ve Çin’de de üleksit yatakları vardır.

**Datolit:** Datolit yatakları esas olarak Rusya’nın Doğu bölgelerinde bulunmakta olup Sovyetler Birliği’nin dağılmasından önce bu ülkenin temel bor ürünleri kaynağı olarak kullanılmıştır.

**Hidroborasit:** Arjantin’de kolemanit ile birlikte hidroborasit oluşumu da bulunmakta ve ağırlıklı olarak seramik sanayinde kullanılmaktadır.

**Szajbelite (Asharite):** Bu mineral oluşumu ağırlıklı olarak Kazakistan’da bulunmaktadır.

**Göl Suları:** Okyanus ve deniz sularında da belirli bir miktarda bor bulunmaktadır. Deniz suyu ortalama 4.6 ppm civarında bor içermektedir. Kaliforniya Searles Lake suyu bugüne kadar bor üretiminde kullanılan tek su kaynağı olarak bilinmektedir.

Bunun nedeni sadece içerdiği bor miktarı değil (mevcut rezervlerin 3000 ppm olduğu belirtilmektedir) aynı zamanda diğer minerallerin de ekonomik olarak geri kazanabilir miktarlardaki varlığıdır.

B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> bazında 885 milyon ton olan dünya toplam bor rezervi ve ülkelere göre dağılımı aşağıdaki tablo 3.5. belirtilmektedir.

**Tablo 3.5.** Dünyadaki Toplam Bor Rezervleri (Bor Enst., 2005).

Ülke	Toplam Rezerv (milyon ton)	%
Türkiye	563.000	64
ABD	80.000	9
Rusya	100.000	11
Çin	36.000	4
Şili	41.000	4
Bolivya	15.000	2
Peru	22.000	3
Arjantin	9.000	1
Kazakistan	15.000	2
TOPLAM	885.000	100



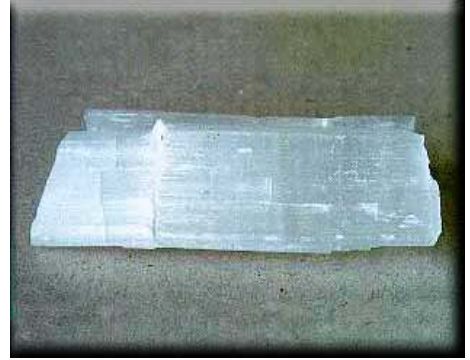
**Şekil 3.2.** Boraks' ın mineral şekli  
(Baykal, 1999).



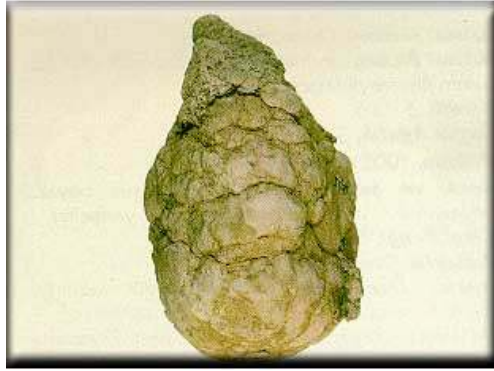
**Şekil 3.3.**Kernit'in mineral şekli  
(Baykal, 1999).



**Şekil 3.3.** Üleksit' in mineral şekli  
(Baykal, 1999).



**Şekil 3.4.**Kolemanit' in mineral şekli  
(Baykal, 1999).



**Şekil 3.5.** Pandermit' in mineral şekli  
(Baykal, 1999).

### **3.5. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları**

Bor elementi veya bileşiklerinin; hafifliği, gerilmeye olan direnci ve kimyasal etkilere dayanıklılığı sebebiyle; plastiklerde, sanayi elyafı üretiminde, lastik ve kâğıt endüstrisinde, tarımda, nükleer enerji santrallerinde, roket yakıtlarında da kullanılmaktadır. Camın ısıyla genleşmesini önemli ölçüde indirgelediği, camı aside ve çizilmeye karşı koruduğu, titreşim, yüksek ısı ve ısı şoklarına karşı dayanıklılığı sağladığı için ısıya dayanıklı cam gereçleri ve elektronik ve uzay araştırmalarında kullanılacak üstün nitelikli camların üretiminde de önemli yeri vardır.

#### **3.5.1. Metalurjide bor**

Bazı bor bileşikleri yüksek sertlik derecesine sahiptir. Bu sebeple, aşındırıcı ve ışık kırıcı olarak, metalleri ve süper alaşımları kesme, bileme ve cilalamada kullanılmaktadır. Bor bileşikleri tungsten karbürüne göre daha yüksek kesme oranına, sürekli-ağır-iş görme kabiliyetine sahiptir ve soğutuculara ihtiyaç olmaz (Garret, 1998).

#### **3.5.2. Yakıt teknolojisinde bor**

Bor ve hidratları birim ağırlık başına yanma sıcaklığı en yüksek olan elementtir (25,120 Btu/lb yanma sıcaklığına sahiptir (hava gazınıniki 18,500 Btu/lb)). Bu sebeple hava ve uzay taşıtları için yakıt olarak düşünülmektedir. Ancak maliyetlerin yüksekliği ve zararlı son ürünleri ticari kullanımı engellemektedir. Dibor-hidrat ( $B_2H_6$ ), penta bor ( $B_5H_9$ ) and dekabor ( $B_{10}H_{14}$ )'un yakıt amaçlı kullanılması düşünülmüştür. Diğer taraftan, hidrokarbon yakıtlar için çok etkin bir anti-oksidan katkı olup, sodyum bor hidrat da Amerikan Deniz Kuvvetlerinde aynı amaçla jet yakıtı olarak

kullanılmaktadır. Yine, bor triklorid veya florid petrol arıtımında katalizör olarak ve bor nikel katalizörü de karbon monoksitin yakıtta çevrilmesinde kullanılmaktadır (Garret, 1998).

### **3.5.3. Süper iletkenlikte bor**

Japon bilim adamlarınca, 2001 yılı Şubat ayında, magnezyum diboridin geleceğin süper iletkeni olabileceği keşfedilmiştir. Süper iletkenlik, sıcaklığın belli bir noktanın altına düşürülmesiyle (kritik sıcaklığın altına) her türlü elektriksel direncin kaybolması durumudur. Süper iletkenliğin genellikle  $-273^{\circ}\text{C}$  olan mutlak sıfır noktasına yakın sıcaklıkta gerçekleşmesi ve bu derece düşük bir sıcaklığı gerçekleştiriminin pahalı oluşu, çok daha yüksek kritik sıcaklığa sahip olan magnezyum diboridi ucuz ve verimli bir alternatif haline getirmektedir. Süper iletkenler, çok yüksek akım yoğunluklarını hiçbir enerji kaybına neden olmadan taşıyabildikleri için santrallerden şehirlere verimli enerji iletimi, güçlü mıknatıs isteyen uygulamalar (magnetik rezonans, maglev trenleri vs.), büyük miktarlarda enerjinin manyetik alan depolanması ya da mikro elektronikte istenmeyen ısının önlenmesi gibi bir çok uygulama alanına sahiptir (Yılmaz, 2002).

### **3.5.4. Bilişim teknolojisinde bor**

Dizüstü bilgisayarlar, cep telefonları, avuç içi bilgisayarları ve diğer mobil iletişim araçlarında kullanılan akım levhalarının vazgeçilmez hammaddelerinden biri de bordur (Garret, 1998).

### **3.5.5. Uzay teknolojisinde bor**

Bor bileşikleri ve bor lifleri (fiber) plastiklerde veya metallerde yüksek dayanıklılığa ve esnekliğe sahiptir. Bu gelişmiş bileşikler askeri alanda, özellikle hava ve uzay araçlarında kullanılmaktadır. Plastiklerde borlu lifler, alüminyum ve titanyumun 6 katı kadar sertlik/yoğunluk oranına sahiptir. Yüksek ısıya dayanıklılığı, esnekliği, hafifliği, güç ve üretim kolaylığı ile birleştirmektedir. Bu özellikleri sebebiyle jet motorlarının kompresör bıçaklarında, kanatçıklarında, dümenlerinde kullanılmaktadır. Bor bileşiklerinin kullanılması, titanyumla karşılaştırıldığında F14, Tomcat, F15 Eagle ve B1 bombardıman uçakların ağırlığını 91 kg azaltmaktadır. Uzay mekiklerinde 137 kg'a kadar ağırlık tasarrufu sağlanabilmektedir (Garret, 1998).

### **3.5.6. Askeri Uygulamalarda Bor**

Piyade tüfeği, tabanca, top, tank üretiminde, zırhlı personel taşıyıcıların zırhlarını güçlendirici seramik plaklarda da bor kullanılmaktadır. Borla güçlendirilmiş cam malzemelerin iletken olmayan ve düşük dielektrik özelliği onları radara karşı görünmez kıldığı için askeri teçhizat yapımında önemlidir. ABD ordusu tarafından kullanılan gizli teknoloji ürünü Stealth Fighter (hayalet uçaklar) ve donanımlarının imalinde de bor ve rafine bor ürünlerinin kullanıldığı düşünülmektedir (<http://www.usgs.gov>, 16.08.2005).

Bor karbid ve fiber camın bir bileşimi 30 kalibre kurşunu durduracak şekilde geliştirilmiş olup, AH-10 Kobra helikopterlerinin koltuklarında kullanılmaktadır (Garret, 1998).

### **3.5.7. Tıp Alanında Bor**

BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) kanser tedavisinde kullanılmaktadır. Özellikle beyin kanserinin tedavisinde hasta hücrelerin seçilerek imha edilmesine yaraması ve sağlıklı hücrelere zararının minimum düzeyde olması nedeniyle tercih sebebi olabilmektedir (<http://www.usgs.gov>, 16.08.2005).

### **3.5.7. Tarımda Bor**

Bor; bitki gelişimi için önemli 16 temel bitki besininden biridir. Toprağın üst tabakalarındaki bor'un çoğunluğu çürümüş bitki dokularından kaynaklanmaktadır. Bor, bitkilerde şekerin hormon faaliyeti üzerindeki etkisini, fotosentez miktarını, köklerin büyümesini ve havadan emilen karbon dioksit miktarını artırır. Bor'un bir diğer işlevi hücre büyümesi ve yapısı olup, bor eksikliği hücre duvarlarını inceltici etki yapmaktadır. Ancak, bor'un çok yüksek konsantrasyonda bulunması toksik etki de yapabilmektedir (Garret, 1998).

Bor eksikliği görülen bitkilerde susuz boraks ve boraks pentahidrattan mamul bir gübre kullanılmaktadır. Ayrıca suda eriyebilen sodyum pentaborat veya disodyum ektaborattan mahsulün üzerine püskürtülmek suretiyle faydalanılmaktadır. Bor, sodyum

klorat ve bromosol gibi bileşiklerle birlikte yabancı otların yok edilmesi veya toprağın sterilleştirilmesi gereken durumlarda da kullanılmaktadır (DPT, 1999).

### **3.5.8. Nükleer Uygulamalarda Bor**

Atom reaktörlerinde borlu çelikler, bor karbürler ve titanbor alaşımları kullanılır. Paslanmaz borlu çelik, nötron absorbanı olarak tercih edilmektedir. Yaklaşık her bir bor atomu bir nötron absorbe etmektedir. Atom reaktörlerinin kontrol sistemleri ile soğutma havuzlarında ve reaktörün alarm ile kapatılmasında ( $B^{10}$ ) bor kullanılır. Ayrıca, nükleer atıkların depolanması için kolemanit kullanılmaktadır.

Nükleer reaktörlerde radyoaktif malzemenin fisyonu sonucunda ısı, alfa ve beta parçacıkları, gama ışınları ve nötronlar açığa çıkar. Nötronlara kalkan olarak kullanılan en önemli malzemeler, hidrojen, lityum, polietilen ve su olup, kalkan olarak kullanılan malzemelerin çoğu ikincil gama ışını yaymakta, bu da ısı düşürme ve tekrar kalkan uygulamayı gerektirmektedir. Bor, termal nötronları emme kabiliyeti açısından tektir. Sadece hafif bir gama ışını çıkarmakta ve alfa parçacıklarını kolayca emmektedir (Garret, 1998).

### **3.5.9. Bor elementinin ve bileşiklerinin kullanıldığı diğer uygulama alanları**

Termal depolama pillerindeki, sodyum sülfat ve su ile yaklaşık %3 ağırlıktaki boraks dekahidratın kimyasal karışımı gündüz güneş enerjisini depolayıp gece ısınma amacıyla kullanılabilir. Ayrıca, binalarda tavan malzemesine konulduğu takdirde güneş ışınlarını emerek, evlerin ısınmasını sağlayabilmektedir (DPT, 1999).

Çinko borat ve disodyum oktaborat tetrahidrat anti mikrobiyal özellikleri sebebiyle ahşap koruyucu olarak kullanılmaktadır (Garret, 1998).

Bor, demir ve nadir toprak elementleri kombinasyonu (METGLAS) % 70 enerji tasarrufu sağlamaktadır. Bu güçlü manyetik ürün; bilgisayar disk sürücüleri, otomobillerde direk akım-motorları ve ev eşyaları ile portatif güç aletlerinde kullanılmaktadır. Sodyum borohidrat, atık sulardaki civa, kurşun, gümüş gibi ağır metallerin sulardan temizlenmesi amacıyla kullanılmaktadır (DPT, 1998).

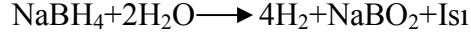
Bor bileşiklerini çeşitli endüstriyel kullanımlara uygun hale getirmek için gereken işlemlerin derecesi çok çeşitlilik göstermektedir. Bazı sanayiler mineral konsantreleri kullanırken, diğerleri rafine bor ürünleri kullanır. Boraks pentahidrat, boraks dekahidrat, susuz boraks, borik asit, bor oksit, zenginleştirilmiş kolemanit ve zenginleştirilmiş üleksit gibi hacimli bor ürünleri tüketilen toplam bor'un yüksek bir oranını oluşturmaktadır (DPT, 1998).

### **3.6. Bor Kullanımına Dayanan Uzun Vadeli Teknolojik Projeler**

#### **3.6.1. Sodyum bor hidrürden hidrojen kaynağı olarak yararlanma**

Özel bor kimyasallarından sodyum bor hidrürün mevcut kullanım alanları; özellikli arıtım kimyasalları, selüloz ağartma, metal yüzeylerin temizlenmesi, fotoğrafçılık ve metal yüzey işlemlerinde değerli metal kazanma, atık sulardan ağır metalleri olarak bilinmektedir. Sodyum bor hidrürün hidrojen depolama-taşıma özelliğinden yararlanmak üzere son yıllarda yoğun araştırmalar da sürdürülmektedir (Bor Enst., 2005).

Sodyum borhidrür çözeltisinden katalizör yardımıyla hidrojen elde etmek mümkündür. Yan ürün olarak üretilen sodyum meta borat yeniden sodyum bor hidrür üretimi için kullanılabilir.



Bu şekilde hidrojen üretimin avantajları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Reaksiyon inorganik olduğundan karbon ve sülfür oluşumu söz konusu değildir. Reaksiyon ortam sıcaklığı ve basıncında gerçekleştirilebilir.
- Reaksiyon kontrolü oldukça kolaydır. Katalizörün alınması ile reaksiyon durdurulabilir.
- Sodyum bor hidrür yanıcı ve patlayıcı olmadığı gibi taşınması da oldukça kolaydır.
- Sistemin dezavantajı ise; sodyum bor hidrür üretimi ve bu üretimin yüksek maliyetidir.

Doğrudan sodyum bor hidrür yakıt pilleri; özellikle güç gereksinimi, düşük olan telefon , radyo , küçük televizyon , el süpürgesi vb. taşınabilir cihazlar ile acil pil şarj sistemi, seyyar telsiz, telefon, elektronik harp cihazları, uydu haberleşme sistemleri, bazı silah robot, insansız kara ve deniz araçları ve bir kısım askeri uygulamalarda önem taşımaktadır (Bor Enst., 2005).

### **3.6.2. Nd-Fe-B mıknatısları ve maglev trenler**

Özel bor ürünlerinden ferrobör' un ve elementer borun en önemli kullanım alanlarından biri Nd-Fe-B esaslı sürekli mıknatıslardır. Motor-jeneratör, tıbbi ekipmanlar, video, bilgisayar, hoparlörler, sensörler, manyetik saklama, test ve ölçüm cihazları, mikro motorlar, mini dc motorlarda uygulama alanı bulan bu mıknatısların kullanım alanlarından biri de maglev trenleridir. Maglev adı ile anılan,"magnetic levitation" ya da "alçak uçuş" ; manyetik kuvvetler yardımıyla taşıtın kaldırılıp belli bir yönde hareket ettirildiği teknolojilerinde genel adıdır (Bor Enst., 2005).

Genel ilke; yol boyunca sıralanan bobinlere değiştirilebilen frekansta alternatif

akım verilerek araçtaki mıknatısların kilitlendiği bir manyetik dalga oluşturmaktadır. Önemli miktarlarda tüketilen bu mıknatısların özellikle Nd-Fe-B esaslı mıknatısların yapımında kullanılan bor, mıknatısın manyetik performansını artırmaktadır (Bor Enst., 2005).

Halen ABD, Çin ve Japonya'da kısa süreli mesafelerde deneme amaçlı olarak kullanılan bu taşıma sisteminin geleceğin ulaşım alternatiflerinden biri olacağı tahmin edilmektedir. Farklı sistemlere dayalı maglev trenlerin deneme çalışmaları halen sürdürülmektedir (Bor Enst., 2005).

### **3.6.3. Bor ile nötron yakalama terapisi (BNCT)**

Bor minerali kanser tedavisinde de kullanılmaya başlanılmıştır. Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) olarak adlandırılan ve bor izotoplarının kullanıldığı bu yöntem ile bir çeşit beyin tümörü olan glioblastoma multiform (GBM) hastalarının tedavisine çalışılmaktadır.

BNCT'nin temel prensibi; borun dokulara uygun ilaç (BPA ve BSH) formunda bulunan ve radyo aktif olmayan  $B^{10}$  izotopu bakımından zengin organik bileşiğin beyine gönderilerek, bir buradaki tümörde birikmesi sağlanmak sureti ile kanserli hücrelerdeki bor konsantrasyonunun nötron bombardımanı ile aktif hale getirilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemle tutulan yeni nötronlar ile bor çekirdeği kırılarak ve yüksek toksikolojiye sahip alfa ışınları ile lityum çekirdeği oluşumu gözlenmektedir. Bu parçacıklar yüksek enerjili (2,79 MeV) fakat az bir alanda etkilidir. Böylece hastalıklı hücreler hasar görürken çevresindeki sağlıklı dokular zarar görmez. BNCT tedavisinin başarılı olması için,  $B^{10}$  izotopunun konsantrasyonunun iyi ayarlanması (290–400 mg/kg ) nötron kalitesi, hastalıklı bölgenin tam tespiti ve doğru noktaya uygulanması gerekmektedir. BNCT çalışmaları dünyanın birçok ülkesinde bağımsız ve ortak projeler ile sürdürülmektedir (Bor Enst., 2005).

### **3.7. Bor ile ilgili Son Araştırma Konuları ve Teknolojik Gelişmeler**

Dünya bor sektöründe son yıllarda özetle aşağıdaki gelişmeler yaşanmıştır (Bor Enst., 2005).

- 2003 yılında sodyum bor hidrür yakıt hücresi kullanılan bir otomobilin 130 km/s hız ile 480 km yol kat ettiği bir deneme yapılmıştır.
- Titanyum di borür esaslı olarak geliştirilen protip pili geleneksel çinko bazlı pillere göre iki kat daha uzun süre dayandığı görülmektedir.
- Maglev trenleri ile ilgili olarak ABD’de başlamış bulunan projeler ile ilgili çalışmalara devam etmiş, 4 adet maglev projesi için hükümetin 2003 yılında 4.5 milyar dolar, 2004 yılında 4.8 milyar dolar kaynak ayırdığı açıklanmaktadır.
- Sodyum bor hidrür esaslı hidrojen yakıt hücreleri çalışmaları devam etmektedir.
- Mobilya ve mefruşat malzemelerinin aleve dayanıklı özellikte olması konusunda ABD’de yeni düzenlemeler getirilmektedir. Uygulamaya konulan yeni standartlara uygun olarak çinko boratın aleve dayanıklılık özelliği nedeni ile kullanılabilirliği ve tüketiminde artış gündeme gelmektedir. Yeni standartlar özellikle yaşama alanlarında sigara, kibrit, çakmak, mum vb. kaynaklı yangınlara karşı önlem olarak gündeme gelmektedir.
- Sertliği elmas ile eşdeğer olan yeni bir bor-alüminyum-magnezyum alaşımı kesici uçlarda elmasın yerini almaya başlamaktadır. Yeni alaşım kristal yapısı ve ince tane boyutu nedeni ile mevcut kesici uçlar gibi ısınmadan işlev görebilmektedir.
- Bor içerikli yeni bir di boron ester bileşiği düz ekranlı organik ışık kaynağı diyotların üretimi esnasında katalist olarak kullanılmaya başlanmaktadır.

- Amino asit türevlerinin sentezinde bor kullanımı için yeni bir teknik geliştirilmektedir.
- İnce magnezyum di borür şeritleri bir kısım elektronik cihazlarda etkin bir süper iletken olarak kullanılmaktadır.
- Biyokimya araştırmacısı Joseph Nagvary, Stradivarius ve Guarneri Viyolav, yapıldığı ahşap malzemenin bor bakımından zengin bir karışımla muamele edildiğini ve bu işlemin ahşap içindeki çok ince boşlukları da doldurarak ses kalitesini artırdığını artırmaktadır.
- Güney Florida üniversitesinde yapılan bir araştırma çocuklarda toz maytlardan kaynaklanan astımın boratlar ile kontrol edilebildiğinin ortaya çıkarmıştır. Bazı bor formülasyonlarının maytları öldürdüğü ve 6 ay süresince yeniden oluşmalarını kontrol ettiği açıklanmaktadır.

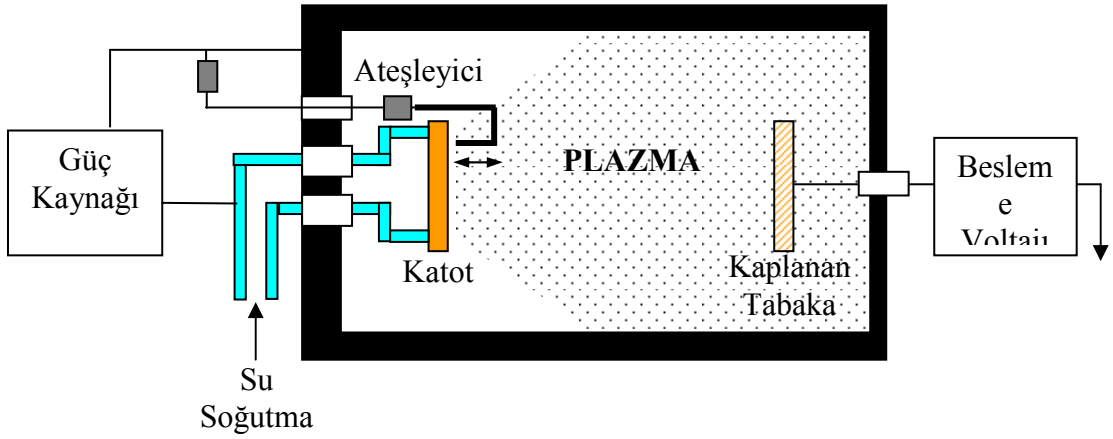
## 4. İYONLARLA KAPLAMA

### 4.1. İyonlarla Kaplama Teknikleri

Bu bölümde günümüz teknolojisi ve araştırmalarında yaygın olarak kullanılan bazı iyon kaplama teknikleri kısaca açıklanmıştır.

#### 4.1.1. Katodik vakum ark

Katodik vakum ark, su ile soğutulan katot materyalinin buharında meydana gelir. Katodik vakum ark için kullanılan sistem şematik olarak Şekil 4.1.' de gösterilmiştir (Lindfors et al., 1986).



Şekil 4.1. Katodik vakum ark sisteminin şematik gösterimi (Lindfors et al., 1986).

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 (Lindfors et al., 1986). Katot metalden, metal alaşımından veya yarı iletkenlerden yapılabilir. Ark deşarj yukarı aşağı hareket edebilen elektromanyetik olarak aktif olan tetikleyici tel tarafından vakum koşullarında oluşturulur. Tetikleyici ile katodun teması süresince, bu temas 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  $10^2$ - $10^3$ A mertebesindedir. Katot materyali bu spotlardan sürekli olarak buharlaşır ve elektrotlar arasında tümüyle iyonlaşmış metal buharı plazması elde edilmiş olur (Randhawa, 1988).

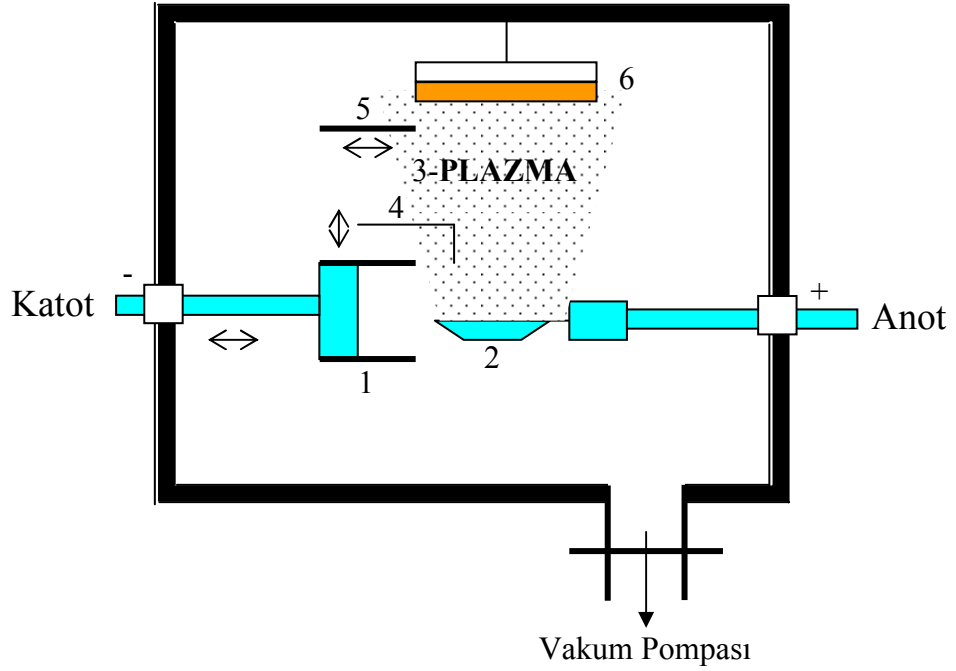
Katot spotları seviyesindeki yüksek güç yoğunluğu nedeniyle, katot materyalinin mikron büyüklüğünde parçaları (makro parçacık ya da mikro damlacık) da buharlaşma işlemi ile birlikte katot yüzeyinden sökülür. Bu kaplanan tabakanın düz olmasını engeller ve ayrıca film üzerinde boşluklar oluşturur (Daalder, 1979; Randhawa 1988). 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 laboratuarda ve üretim teknolojisinde kullanılmaktadır. Ark spotunun sayısı toplam katot akımına ve katodun bileşimine bağlıdır. Ark spotları  $10^{-8}$ - $10^{-4}$  m mertebesinde küçük boyutlardadır ve akım yoğunlukları  $10^6$ - $10^{12}$  A/m<sup>2</sup> kadar yüksektir ve katot yüzeyi üzerinde  $10^2$  m/s hızlarında hareket ederler (Davis and Miller, 1969). Ark spotundan yayınlanan plazma; elektronlar, iyonlar ve makro parçacıklar ve nötral metal buharı içerir. Nötral metal buharı, kütle transferinin küçük bir kısmını (%1-%2) oluşturur. Bu nedenle ark kaynağından kaplama materyali akışı, hemen hemen tümüyle iyonlar ve makro parçacıklardan oluşur (Daalder, 1979). 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 makro parçacık üreterek filmler üzerinde gözenek oluşmasına neden olduğu için kaplama teknolojilerinde sınırlı kullanım alanlarına sahiptir.

#### 4.1.2 Anodik vakum ark

1988 yılında vakum koşullarında anot metali buharlarında soğuk katotlu yeni bir yüksek akım deşarjı Essen üniversitesindeki bir grup tarafından yapılmıştır (Ehrich et al.,1988). Bu durumda deşarj, bir soğuk katot ile vakum koşullarında sürekli buharlaşan anot arasında oluşur. Şekil 4.2.'de soğuk katotlu anodik vakum için kullanılan sistem şematik olarak gösterilmiştir (Mausbach et al., 1990).



**Şekil 4.2.** 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.

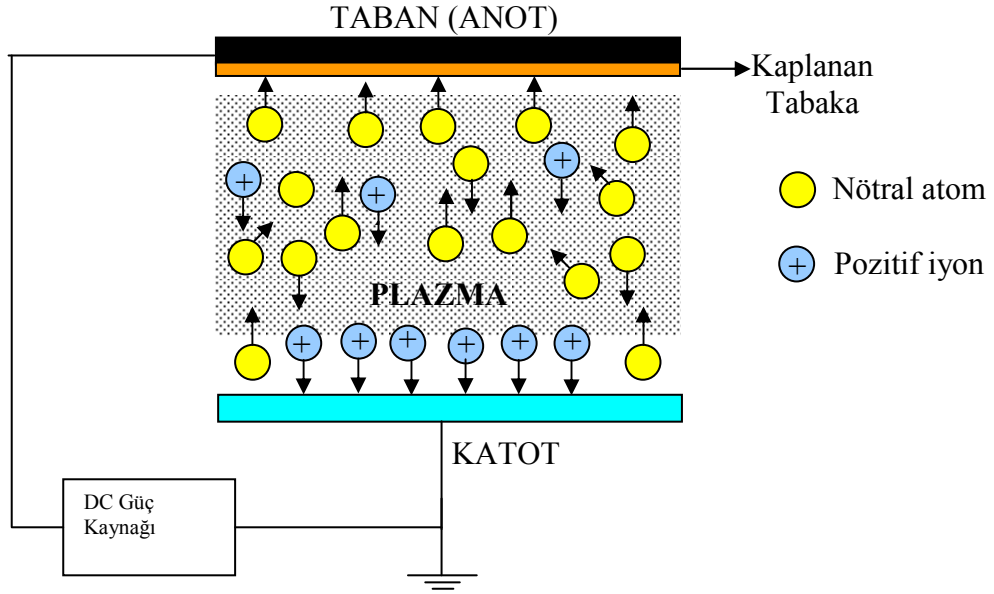
Buharlaştırılacak materyal anot olarak kullanılan zor eriyen metalden yapılmış bir çubuk üzerine sarılmış ya da yine zor eriyen metalden yapılmış pota içine konulmuştur.

Soğuk katot karbon veya zor eriyen metalden yapılmış bir diskdir. 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, numune üzerine yüksek tutunma ve çok düz yüzeyler elde edilmiştir. Bununla birlikte, metal tabakanın yüksek kaplama oranları elde edilmiştir (Ehrich, 1990).

#### **4.1.3. Söktürme (Sputtering)**

Söktürme işlemi bir metal yüzeyine vuran iyonların bu metal yüzeyinden metal atomlarını skmesi olayıdır (Campbell,1978). şekil 4.3.'de söktürme işlemi şematik olarak gösterilmiştir.



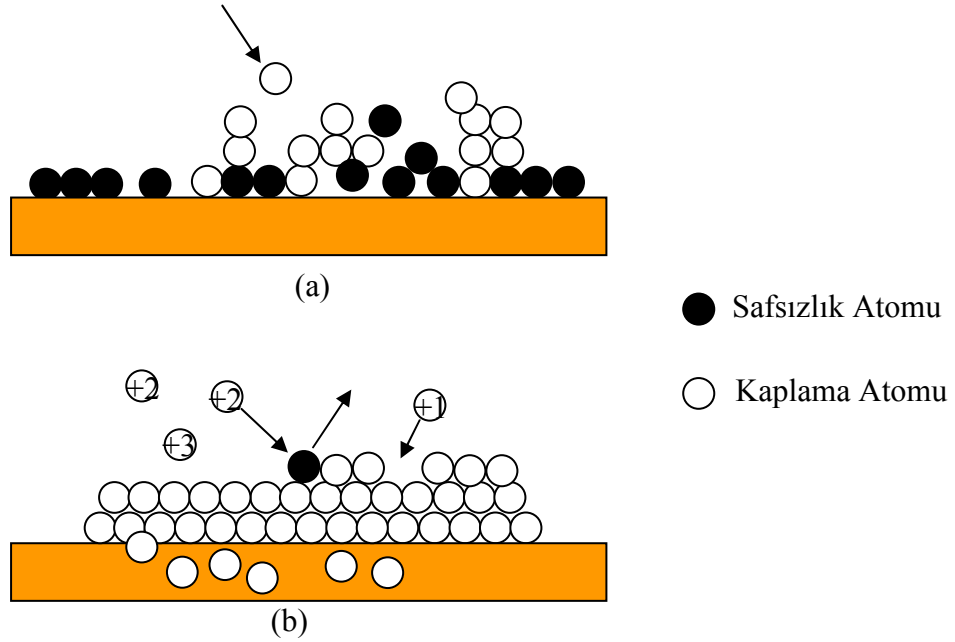
**Şekil 4.3.** Söktürme (Sputtering) işleminin şematik gösterimi.

Bu işlem için öncelikle elektrotlar arasında bir soy gaz yani destekleyici gaz pompalanır. Elektrotlar arasında uygulanan voltaj ile bu elektrotlar arasında bir plazma meydana getirilir. Elektrotlar arasında meydana gelen plazma, katodun ön kısmında bir potansiyel düşümü oluşturur. Plazma içindeki pozitif iyonlar bu potansiyel düşümünde katoda doğru hızlanırlar ve bu hızla katoda vururlar. Katoda vuran pozitif iyonlar ikincil elektron emisyonu yapabildiği gibi katodun lokal ısınmalarına ve aşınmasına neden olur. Katot yüzeyinin bu bölgelerinden bir süre sonra nötral metal atomları sökülmeğe başlar. Sökülen bu nötral atomlar katodun hemen karşısında bulunan anodun üzerindeki taban üzerine kaplanırlar (Thornton, 1974). Lokal olarak ısınan bölgelerden mikro damlacıklar 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 numunenin incelendiğinde yüzeyinin üzerinde metal atomları ile birlikte soy gaz atomları da gözükmektedir. Bu nedenle söktürme tekniği ile saf metal buharları kaplamaları elde edilemez.

Söktürme (sputtering) çeşitli güç kaynakları ve elektrot konfigürasyonları kullanılarak değişik isimler almaktadır (Roth, 2001).

#### 4.2. Kaplama Tekniklerinde İyonların Kullanılmasının Avantajları

Şekil 4.4’de düşük enerjili nötral atomların kullanılmasıyla ve yüksek enerjili iyonların kullanılmasıyla elde edilen kaplamalar atomik ölçekte gösterilmiştir.

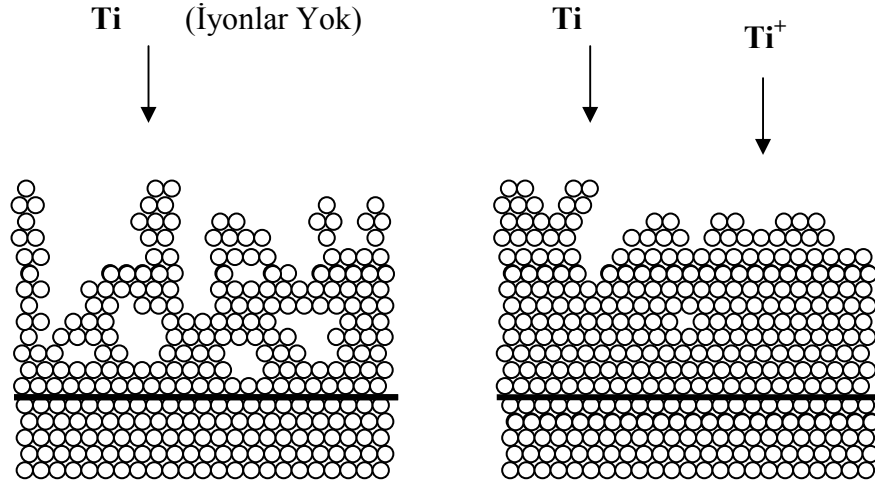


Şekil 4.4. a.) Düşük Enerjili Kaplama. b.) Yüksek Enerjili Kaplama.

Söktürme ve termal buharlaştırma ya da elektron bombardımanı ile termal buharlaştırma ile yapılan kaplamalarda, kaplanan atomlar nötraldir ve yoğunlaşmadan sonra atomik mobiliteye katkıda bulunmak için sınırlı enerjiye sahiptirler (Şekil 4.4.a.). Ark işlemleri kaplamanın yapılacağı numunenin bile içine girebilecek kadar hızlandırılabilen pozitif iyonları üretirler. Bu yüksek mobiliteler nedeniyle yüksek kalitede filmler üretilir (Şekil 4.4.b.).

Söktürme (sputtering), termal buharlaştırma ve elektron bombardımanı ile buharlaştırma gibi düşük enerjili kaplama tekniklerinde, kaplanan materyalin nötral atomları kaplanan numunenin yüzeyine gelir ve bu yüzeyin tam üstüne kaplanır. Kaplama mobilitesi için çok düşük enerji mevcut olduğu için bu atomlar yüzey üzerine ulaştığı ve temas ettiği ilk noktaya yapışır kalır. Eğer bu yüzey, kaplanan numune ile kaplama arasında safsızlık atomları olarak adlandırılan yüzey kirliliklerine (toz, yağ, parmak izi, adsorbe olmuş her türlü gaz gibi) sahip ise, sonuç olarak elde edilen kaplama zayıf şekilde tutunmaya sahip olacaktır. Bununla birlikte bu kaplama çok sayıda safsızlık atomu ve boşluk ile dolu zayıf yoğunlukta bir kaplama olacaktır (Şekil 4.4.a.)

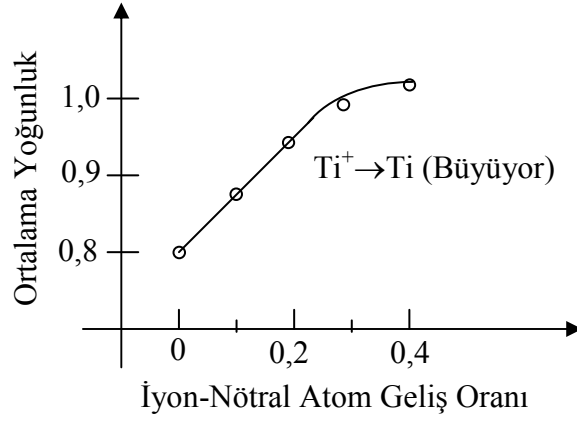
Bunun aksine şekil 4.4.b.'de gösterildiği gibi yüzey üzerine bir ark tarafından üretilmiş ve hızlandırılmış yüksek kinetik enerjili pozitif iyonlar geldiğinde, bu pozitif iyonlar kaplama gerçekleşmeden önce yüzeyi safsızlık atomlarından temizleyecek enerjiye sahiptirler. Bu iyonlar yüzey temizliği yapmakla birlikte yüzeyden veya oluşturulan ark plazmasından bir elektron alarak nötrleşip yüzey üzerine kaplanırlar. Hatta bu iyonlardan bir kısmı numunenin düşük enerjili seviyelerine yerleşerek yüzey içine girerler. Böylece daha yoğun ve daha yüksek tutunmalı filmler oluşturulur. Enerjistik kaplama tekniklerinin bu avantajları P.J. Martin ve arkadaşları tarafından yapılan moleküler dinamik simülasyonlarla gösterilmiştir. Şekil 4.5.'de düşük enerjili titanyum nötral atomlarla yapılan kaplama yapıları ile ark işlemlerinin karakteristiği olan yüksek enerjili titanyum pozitif iyonları tarafından yapılan kaplama yapılarını kıyaslayan bir moleküler dinamik simülasyon gösterilmiştir (Martin et al., 1987)



**Şekil 4.5. a.)** Titanyum iyonu ( $Ti^+$ ) bombardımanı yokken, **b.)** Titanyum iyonları nötral atomlarıyla birlikte (Martin et al., 1987).

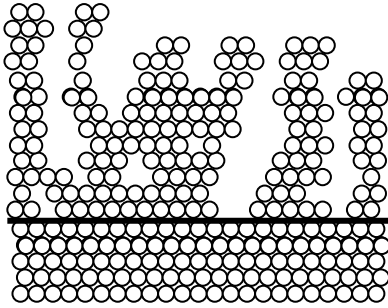
Şekil 4.5.a.'daki simülasyonda termal hızlı ( $Ti^+$  bombardımanı yapılmaksızın) titanyum atomlarının kullanılmasıyla oluşan mikro yapılar gösterilmiştir. Titanyum buharlarının enerjisi 0,1 eV olarak seçilmiştir. Düşük hızla gelen ve bu nedenle düşük kaplama atomu mobilitesi nedeniyle büyüyen film üzerinde mikro gözenekler oluşur. 50 eV 'lu enerjilik  $Ti^+$  iyonları simülasyona katıldığında mikro kayıplar  $j_{Ti^+} / j_{Ti}$  iyon ve nötral atom akım yoğunluklarına bağlı olarak değişir. Şekil 4.5.b.'de  $j_{Ti^+} / j_{Ti} = 0,16$  için elde edilen ve mikro boşlukların önemli derecede azaldığı görülmektedir (Martin et al., 1987).

Şekil 4.6.'da 50 eV kinetik enerjili  $Ti^+$  iyonları için iyon-atom geliş oranının fonksiyonu olarak ortalama yoğunluk gösterilmiştir. 0,2'den daha büyük oranlarda maksimum yoğunluk oluşmaktadır.

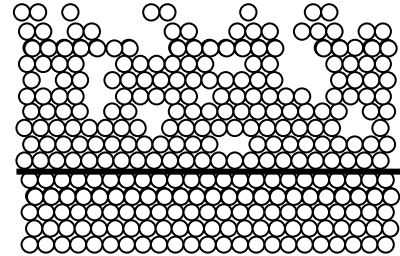


**Şekil 4.6.** İyon-Atom geliş oranına göre ortalama yoğunluktaki değişim (Martin et al., 1987).

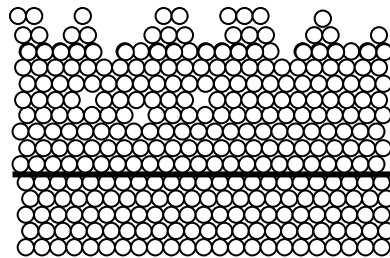
Sabit  $j_{Ti^+}/j_{Ti}$  oranı için maksimum hesaplanan 100 eV luk enerjilere  $Ti^+$  iyonlarının enerjisinin artması yüksek ortalama yoğunluk ve yüksek kristal düzenlenişi gözlenmiştir. Şekil 4.7' de gelen iyon enerjisinin değişimine göre yapılmış simülasyon verilmiştir (Karlz, 1987).



**a.)**  $E_A=0.02 \times 1.3$  eV iyon enerjili



**b.)**  $E_A=0.5 \times 1.3$  eV iyon enerjili



**c.)**  $E_A=1.5 \times 1.3$  eV iyon enerjili

**Şekil 4.7.** Kaplama yüzeyine gönderilen iyonların kinetik enerjisindeki artış ile mikro yapılarıdaki gelişim (Karlz, 1987).

Buharlaştırılan materyal içinde iyonlaşmış parçacıkların bulunması film oluşması için yoğunlaşma işlemlerinin kritik parametrelerini büyük ölçüde etkiler. Kaplanan materyallerin iyon içeriği ve kinetik enerjisi çalışma koşullarının değiştirilmesiyle kolayca kontrol edilebilir. Bundan dolayı mekaniksel, optiksel ve kristalografik özellikler gibi film özellikleri üç boyutlu olarak kontrol edilebilir (Karlz, 1987)..

İyonlar kaplanan yüzey üzerine materyalin sahip olduğu tüm özelliklerle birlikte enerji, momentum ve yük transfer ederler. İyonların kinetik enerjisi filmlerin fiziksel ve kristalografik özelliklerini etkiler. Örneğin tutunma kuvveti, paketlenme yoğunluğu, yüzey sertliği, kaplanan filmlerin yapısı ve kristal hali veya kaplanan bileşik materyallerin kimyasal bileşimi gibi özellikler iyonların kullanılması ile önemli ölçüde iyileştirilir (Karlz, 1987).

Bugün endüstride kullanılan kesici ve delici makinelerin yüzey sertleştirilmesi iyonlar kullanılarak TiN ile kaplanılmaktadır. Bu şekilde elde edilen cihazların kullanım süreleri artmakta ve düşük kimyasal aktiviteye sahip oldukları için okside olmazlar. Aynı zamanda kaplanan filmin iyi tutunmalarının çok gerekli olduğu dekorasyon amaçlı uygulamalarda da altın rengine sahip olduğu için iyonlar kullanarak TiN kaplamalar yapılmaktadır. Korozyona ve dış dirence karşı koruma sağlamak için yapılan seramik kaplamalarda mikro parçacıksız kaplamalar gerekli olduğu için bu tip kaplamalar yine iyonlar kullanılarak yapılır. Optik kullanımları için ve manyetik kayıt bantlarında ve entegre devrelerin yapımında bugün iyonlar kullanılarak yapılan kaplamalar geniş ölçüde kullanılmaktadır (Roth, 2001).

## 5. TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA)

### 5.1. Giriş

Anot metalinin buharlaştırılmasıyla oluşturulan ilk deşarj, 1967 yılında H. J. Hamilton tarafından gerçekleştirildi. Hamilton sistemine benzer anot metalini buharlarında deşarj üreten iki sistem daha önerilmiştir. Bunlardan birincisi 1979 yılında A. M. Dorodnov tarafından, ikincisi ise 1983 yılında V. A. Sayenko tarafından bulunmaktadır. Bu üç yöntem hakkında çok fazla teknolojik uygulama ve bilimsel yayın yapılmamıştır. Bunun nedeni her üç sisteminde mekanizmalarının güçlüğü ve pahalı olmasıdır (Akan, 2003).

1983 yılında Bükreş/ROMANYA’da bulunan INFLPR (National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics)’dan “Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Grubu”, anot metalinin buharlaştırılmasıyla oluşan termiyonik vakum ark (TVA) adında yeni tip bir vakum ark oluşturdu (Musa et al., 1986). 1999 yılında Eskisehir Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü’nde yeni bir Plazma Fiziği Laboratuvarı kuruldu. 2000 yılında saf metal buharı plazması üreten şekil 5.1. ve şekil 5.2. TVA sistemi de bu laboratuvarında kurulmuştur (Akan, 2003).



Şekil 5.1. TVA sisteminin önden ve üstten görünüşü.

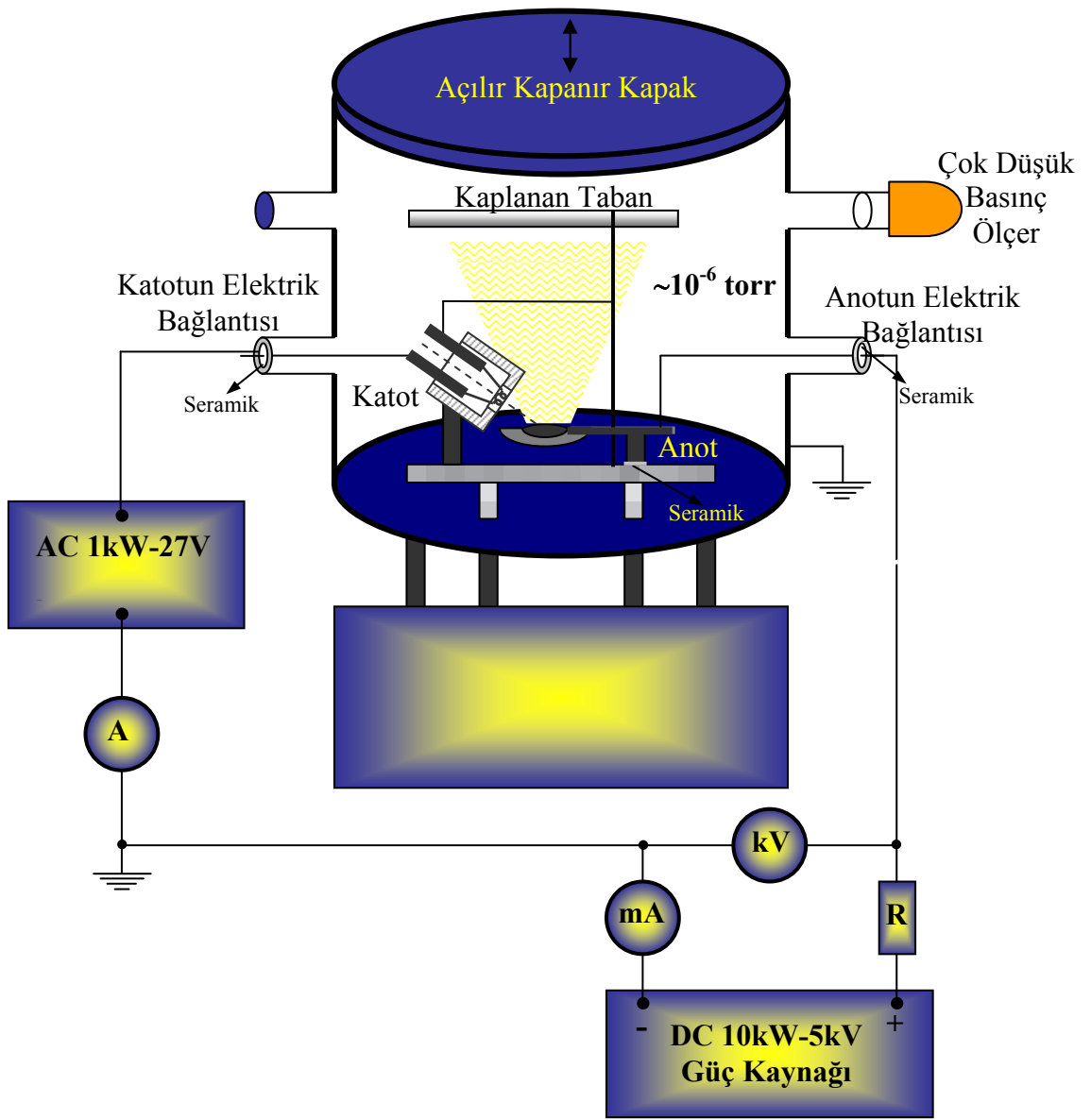


**Şekil 5.2.** TVA sisteminin yandan görünüşü (vakum pompası ile birlikte).

Termiyonik Vakum Ark (TVA); metal, seramik, yarıiletken gibi hemen hemen her materyalin plazmasını üreten yeni bir tekniktir. TVA sistemi temel olarak, vakum odası içinde, plazması oluşturulacak materyalin bulunduğu anot ve termo-elektron sağlayan katottan oluşmaktadır. Katottan yayınlanan elektronlar ve elektrotlar arasında uygulanan voltaj ile anot materyalinin saf, gaz karışımı ve makro-parçacık içermeyen, yüksek iyonlaşma dereceli plazması oluşturulur. TVA sistemi, pek çok yeni teknolojik uygulamalarda kullanılmaktadır. Bunlardan en önemlisi iyon-destekli kaplama tekniğidir. Anot materyali iyonları ile bombardıman edilerek üretilen kaplamalar; son derece düz, pürüzlülüğü düşük, yoğun ve yüksek tutunmalı kaplamalar olmaktadır. TVA ile yapılan karbon ve bor kaplamalarda, yapıların nano boyutta olduğu görülmüş ve bu TVA sisteminin nano teknoloji uygulamalarında da kullanımına sebep olmuştur (Musa et al., 2001).

## 5.2. TVA Sistemi

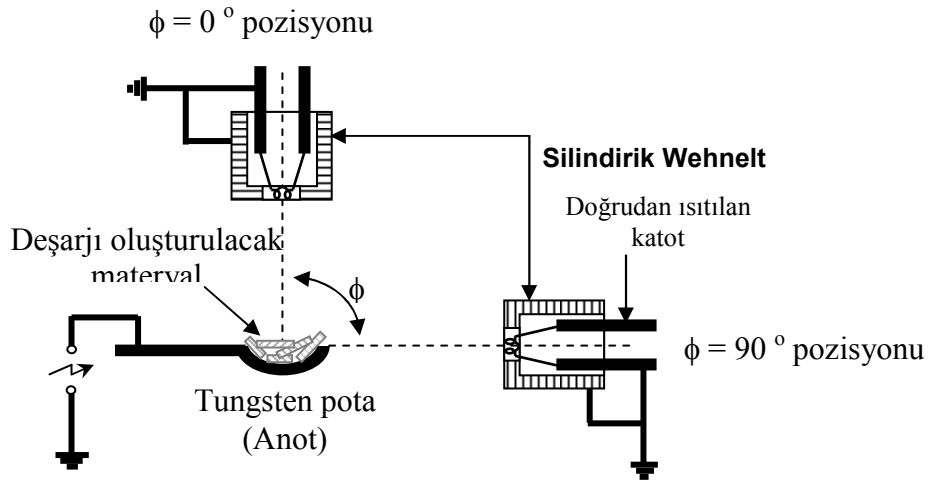
TVA sistemi, elektrotlarının düzenlenişi bakımından anot metali buharlarında plazma üreten diğer tekniklerden farklı ve yeni bir tekniktir. TVA, doğrudan ısıtılan termiyonik katot ile içine buharlaştırılarak plazması yapılacak materyalin yerleştirildiği anot arasında meydana gelmektedir (Akan, 2003).



Şekil 5.3. Deneysel düzeneğin şematik gösterimi (Akan, 2003).

TVA sisteminin genel olarak şematik gösterimi şekil 5.3.'de verilmiştir. TVA sistemi temel olarak; vakum ünitesi, elektriksel ünite ve elektrotlar sisteminden oluşur. Vakum ünitesi; elektriksel ünite pompalar ve basınç ölçüm cihazlarından, elektriksel ünite; güç kaynakları ve elektriksel ölçüm cihazlarından, elektrotlar sistemi ise katot ve anot olarak adlandırılan iki elektrotlardan oluşur.

TVA sistemini elektrotlar sistemi katot ve anot olarak isimlendirilen ve birbirlerine göre farklı konumlara getirilebilen iki elektrottan oluşur. Şekil 5.4.'te elektrotlar sistemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Doğrudan ısıtılan katot ile TVA'nın elektrotların düzenlenişi.

Katot; değişik kalınlıklardaki tungsten tellerden değişik çaplarda sarılarak elde edilen bir tungsten filamenttir. Katot filamentini molibden bir Wehnelt silindiri içine yerleştirilmiştir. Anot ise içine buharlaştırılarak plazması oluşturulacak materyalin konduğu kaşık şeklinde genelde bir tungsten potadır. Bu çalışmada farklı potalar kullanılmıştır. Katodun içine yerleştirildiği elektron tabancası ile anot, paslanmaz çelikten yapılmış bir tabla üzerine monte edilmiştir. Bu tabla üzerinde katot ile anot

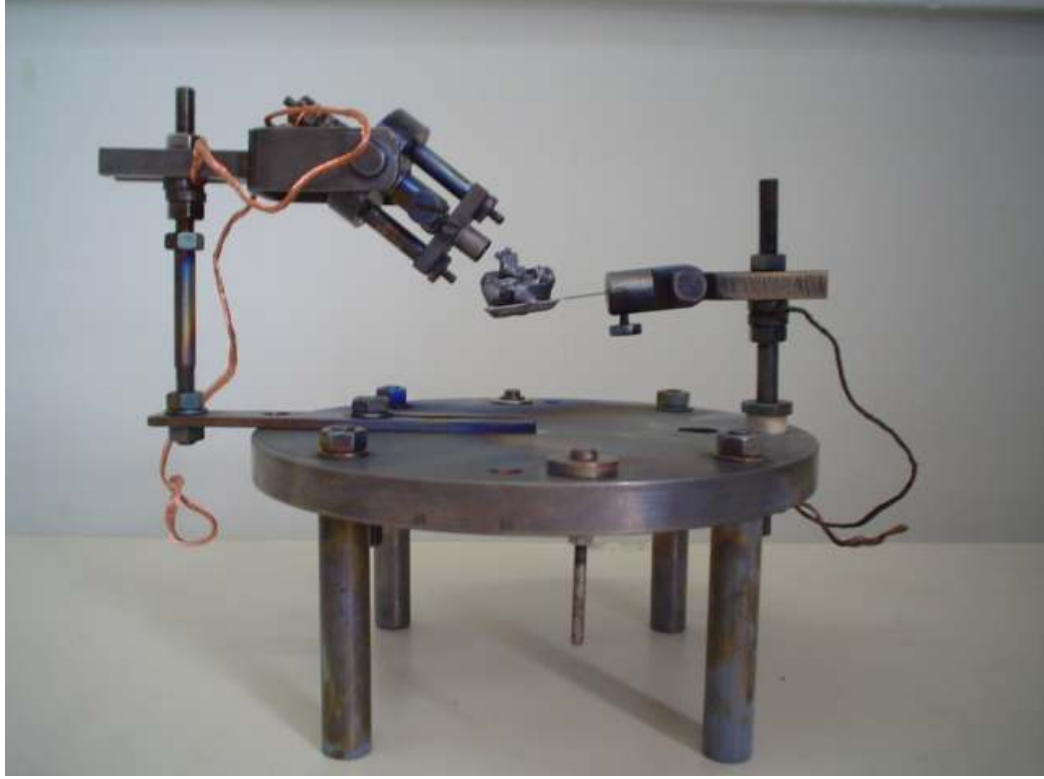
arasındaki açı ve uzaklık ayarlanabilmektedir. Böylece istenilen elektrotlar arası açı ve uzaklıkta TVA deşarj oluşturulabilmektedir. Elektrotların yerleştirildiği bu tabla, bir mekanik pompa ve difüzyon pompası yardımıyla son basınç değeri  $10^{-6}$  mbar yapılabilen ve basıncı dijital basınç ölçer ile ölçülebilen bir vakum odası içine yerleştirilmiştir. Bu vakum odasının üst kısmında bulunan kapak, bir kaldıraç yardımıyla açılıp kapanmakta ve elektrotların bulunduğu tabla vakum odasının içine kolayca yerleştirilebilmektedir. Vakum odasının ön kısmında ise cam ile kapatılmış bir pencere yapılmıştır. Buradan vakum odasının içi gözlenebilmekte ve TVA deşarj oluştuktan sonra deşarj izlenebilmektedir. Bununla birlikte TVA sisteminde, katot filamentinden termoelektronik emisyon elde etmek için bir a.c. düşük voltaj güç kaynağı (1 kW, 27 V), elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulamak için bir d.c. yüksek voltaj güç kaynağı (10 kW, 0-5 kV) ve akım ayarlayıcı bir balast direnç (300-1000  $\Omega$ ) kullanılmaktadır.

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 filament, katot elektronlarının istenilen doğrultuda yayılmasını sağlamak için ilk kez Whenelt tarafından kullanıldığı için, bu isimle anılan bir Whenelt silindiri içine yerleştirilmiştir. Bu Whenelt silindiri içine yerleştirdiğimiz filamentin vakum odası içine yerleştirdikten sonra, dışarıdan elektrik bağlantılarının yapılacağı mekanizmalarla birlikte düzenlenişine, elektron tabancası ismi verilir. Şekil 5.5.'de tümüyle TVA'nın elektron emisyon kaynağını oluşturan elektron tabancasının fotoğrafı verilmiştir. Bu elektron tabancası, mekanizması gereği değişik pozisyonlara getirilebilmektedir. Böylece elektron bombardımanının, anodun istenilen yüzeyine odaklanması mümkün olmaktadır.



**Şekil 5.5.** TVA için elektron emisyonu sağlayan, içinde doğrudan ısıtılan katottun bulunduğu elektron tabancasının fotoğrafı.

TVA için kullanılan ikinci elektrot anot, genelde tungstenden yapılmış 0.2 mm kalınlığında ve üst kısım boşluğu 10 mm çapında olan kaşık şeklinde bir potadır. Bu çalışmada daha çok karbon pota kullanılmıştır. Buharlaştırılarak plazması elde edilecek materyal bu potanın içine yerleştirilmektedir. Şekil 5.6. ' de doğrudan ısıtılan katotlu elektron tabancası ile anodun, deney sırasında kullanıldığı biçimdeki düzenlenişinin fotoğrafı verilmiştir.



**Şekil 5.6.** TVA'nın elektrotlarının deneylerde kullanıldığı biçimdeki fotoğrafı.

Şekil 5.6.'dan görüldüğü gibi TVA' da elektron emisyonu sağlayıcısı olarak kullanılan elektron tabancası ile anot, paslanmaz çelikten yapılmış dört ayaklı tabla üzerine monte edilmiştir. Bu şekilde elektrotlar sistemi vakum odası içine kolayca yerleştirilip, istenildiğinde çıkarılabilmektedir.

Bu elektrotların içine yerleştirildiği vakum odası paslanmaz çelikten yapılmış bir silindirdir. Bu vakum odasının üst kısmında silindir ile aynı çapta 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. Ön kısımdaki boşluğa bir cam yerleştirilerek vakum odasının içinin deney sırasında gözlenebilmesi sağlanmıştır. Alt kısmındaki boşluk anodun su soğutma sistemi için kullanılacaktır.

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 mekanik ve difüzyon pompası olarak iki adet vakum pompası kullanılmıştır. Vakumlama işlemi ilk olarak mekanik pompa ile başlanır ve basınç değeri  $10^{-3}$  mbar olasıya kadar devam edilir. Daha sonra ise basınç değeri daha da düşürebilmek için difüzyon pompası devreye girer.

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

Yüksek voltaj güç kaynağı elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulamak için kullanılır. Düşük voltaj güç kaynağı ise filament üzerinden akım geçirerek, filamentin ısınarak elektron emisyonu yapması için kullanılır.

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 5.1.'de görülmektedir.

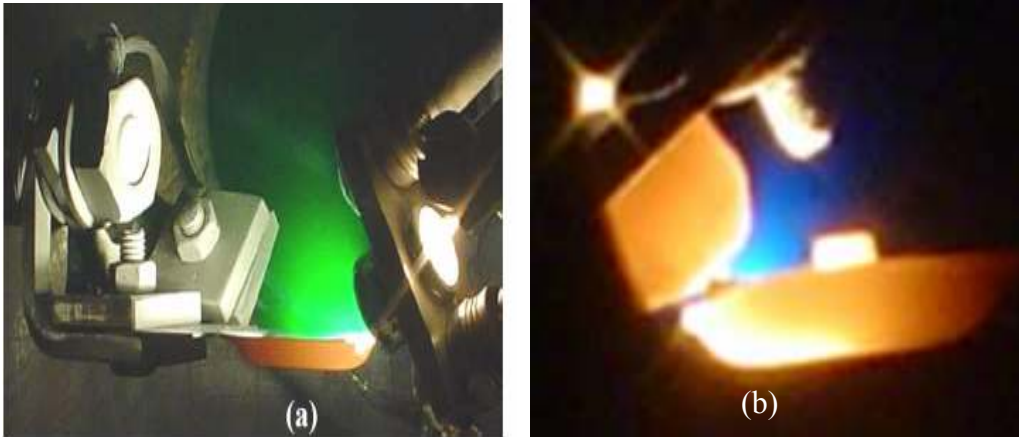
Şekil 5.3.'de TVA için tüm elektriksel bağlantılar şematik olarak gösterilmiştir. Şekil 5.3.'da görüldüğü gibi vakum odasının kendisi toprak olarak kullanılmıştır. Katot filamentinin bir ucu elektrotlar sisteminin bulunduğu tablaya bağlanmıştır ve elektrotlar sisteminin üzerinde bulunduğu tabla, vakum 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. Katoda güç kaynağı ile dışarıdan akım verilirken ve anoda yüksek voltaj uygularken, katot ve anot bağlantılarının vakum odasına kısa devre yapmaması için, vakum odasına temas etmeleri önlenmelidir. Bu nedenle anot ile katodun elektriksel bağlantılarının vakum odası ile temasını önlemek için, vakum odasına girdikleri bölge seramik yalıtkanlar ile yalıtılmıştır.

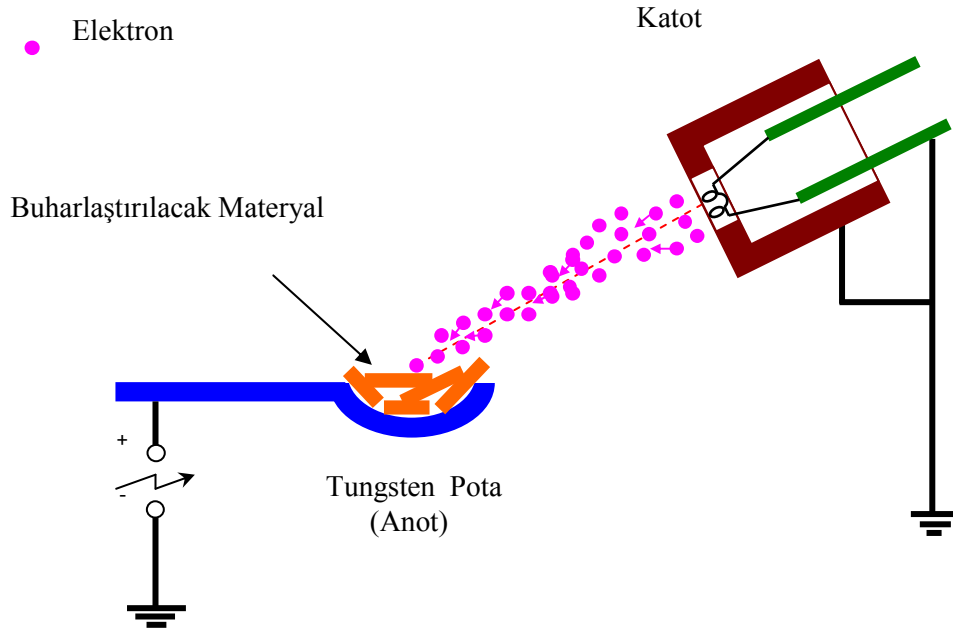
Şekil 5.3.'da gösterilen deneysel düzenekte  $300 \Omega$  ve 2 A akım taşıyabilen, akım ayarlayıcı  $R_b$  direnci (balast direnç) kullanılmıştır. Akım ayarlayıcı direnç, deşarj sistemlerinde mutlaka kullanılmalıdır. Çünkü deşarj sırasında plazmanın direnci sıfıra yaklaşır ve akım birden çok yüksek 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 ampermetre ve TVA deşarj üzerindeki potansiyel farkının ölçülmesi için analog voltmetre kullanılmıştır.

### 5.3 TVA Deşarj

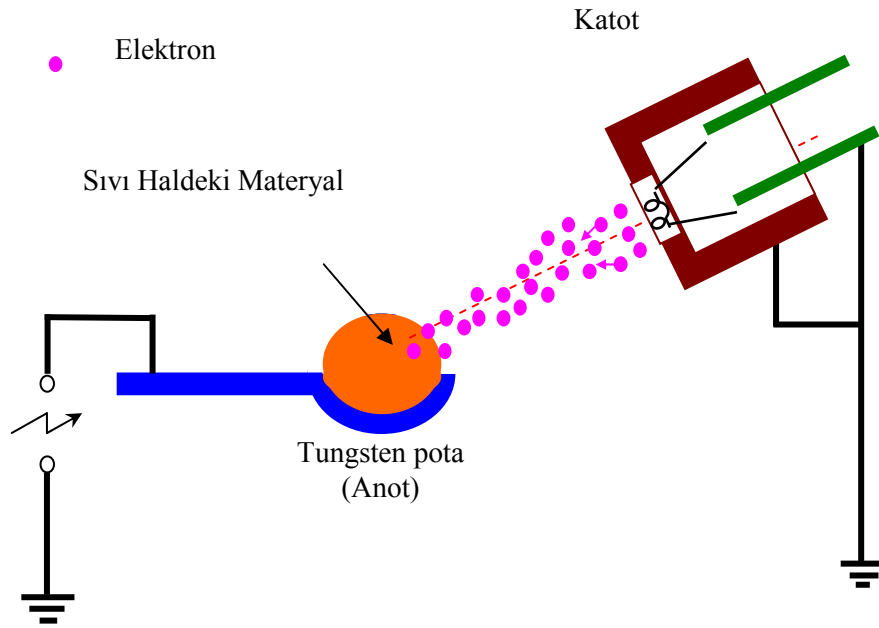
TVA deşarjın oluşturulması için katot flamenti, a.c. düşük voltaj güç kaynağı ile istenilen ısıtma akımında ısıtılır ve böylece katottan termoelektron emisyonu sağlanmaktadır. Burada katodun bir ucu, düşük voltaj güç kaynağına bağlı iken diğer ucu elektrotların monte edildiği tablaya dolayısıyla vakum odasının üzerine bağlanmıştır. Böylece vakum odasının kendisi toprak olarak kullanılmıştır. Katot filamentinden elektron emisyonu sağlandıktan sonra anot ile katot arasına yüksek voltaj uygulanır. Anot ile katot arasına yüksek voltajın uygulanması ile katottan yayınlanan elektronlar, anot üzerine hızlandırıldığı gibi anot üzerine odaklanmış da olmaktadır. Bu, katot filamentinin içine yerleştirildiği Wehnelt silindirinin toprak potansiyelinde tutulması nedeniyledir. Hızlandırılarak anot üzerine odaklanan elektron bombardımanı nedeniyle anot içindeki materyal üzerine enerji aktarılır ve bu enerji ile anot materyali ilk olarak ısınır. Uygulanan voltajın arttırılmaya devam edilmesi ile anot içindeki materyalinin erimesi ve daha sonra kaynayarak buharlaşması sağlanır. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse, elektrotlar arası uzayda anot metali atomlarının belirli bir yoğunluğunda ve uygulanan voltajın uygun değerinde, katottan yayınlanan elektron emisyonunun devam etmesi sebebiyle anot metali buharlarında parlak bir deşarj oluşur (Şekil 5.7-5.8.-5.9.-5.10.-5.11.).



**Şekil 5.7.** TVA deşarj fotoğraflar: a) bakır buharı plazması, b)  $Al_2O_3$  buharı plazması .

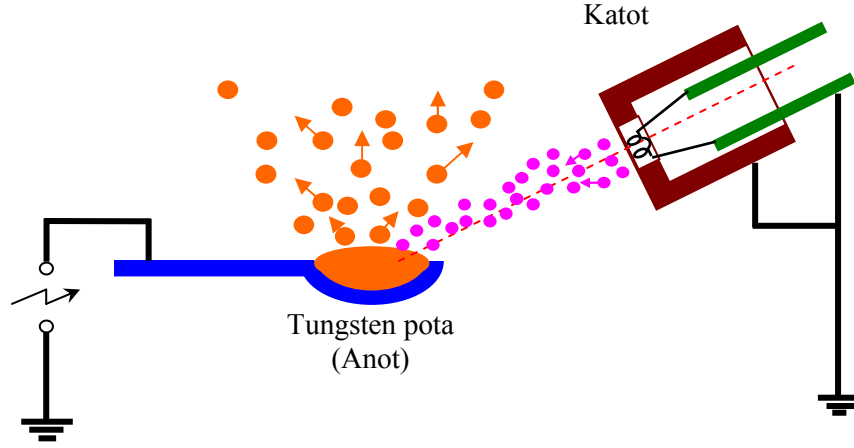


**Şekil 5.8.** TVA’da deşarj öncesinde tungsten potaya katı haldeki materyal konulur.



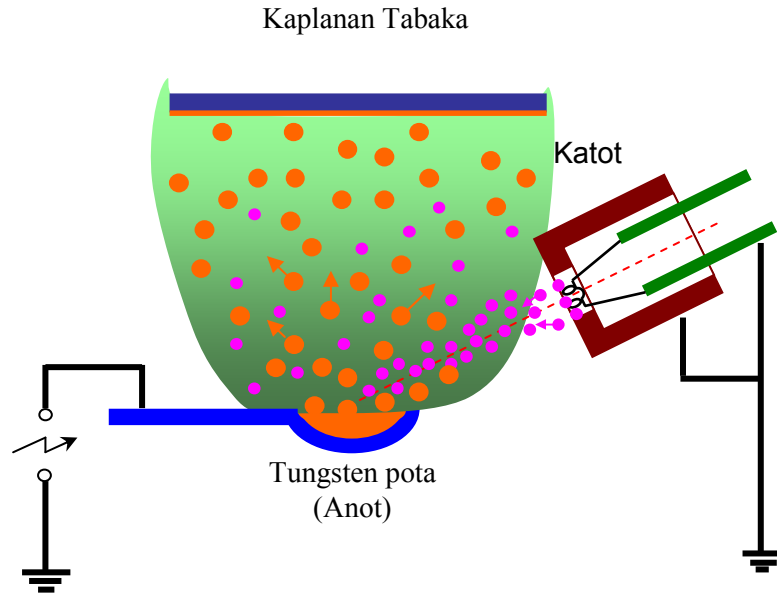
**Şekil 5.9.** TVA’da katı haldeki materyalin elektron bombardımanı yardımıyla sıvı hale geçmesi.

- Buharlaşan anot metali atomları
- Elektron



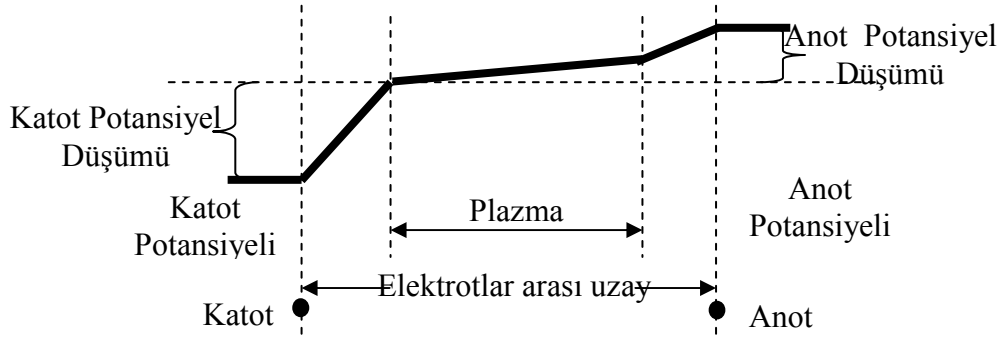
Şekil 5.10. TVA' da oluşan sıvı materyalin elektron bombardımanıyla gaz haline geçmesi.

- Buharlaşan anot metali atomları
- Elektron
- Plazma



Şekil 5.11. TVA' da gaz haline geçen materyalin elektron bombardımanın devam etmesiyle plazma haline geçmesi.

TVA deşarj, gazlarda meydana gelen ark deşarjlardan farklıdır. Gazlarda meydana gelen deşarjlarda gaza aktarılan elektriksel enerji, yalnızca gazın iyonlaşmasını ve iyon kayıplarını korumak için harcanırken, TVA’da deşarja aktarılan elektriksel enerji, hem arkın oluşacağı gazı hem de bu gazın iyonlarını aynı anda üretmek için harcanır. Bununla birlikte TVA deşarjın oluşması için gereken koşullar, deşarj oluşuktan sonra da korunmak zorundadır. Başka bir deyişle TVA, deşarj boyunca hem deşarjın oluşacağı gazı hem de bu gazın iyonlarını oluşturmaktadır. Bu durum bir model ile açıklanmıştır (Ehrich et al., 1998). Bu modelde TVA deşarj oluşuktan sonra, tanımlanan potansiyel dağılımında ortaya çıkan anot potansiyel düşümü açıklanmıştır. TVA deşarjın elektrotları arasındaki potansiyel dağılımı Şekil 5.12.’de verilmiştir.



**Şekil 5.12.** TVA deşarjın elektrotlar arası uzaydaki şematik potansiyel dağılımı (Ehrich et al., 1998).

Şekil 5.12.’den, ark üzerindeki toplam ark voltaj düşümü  $U_{ark}$ ,

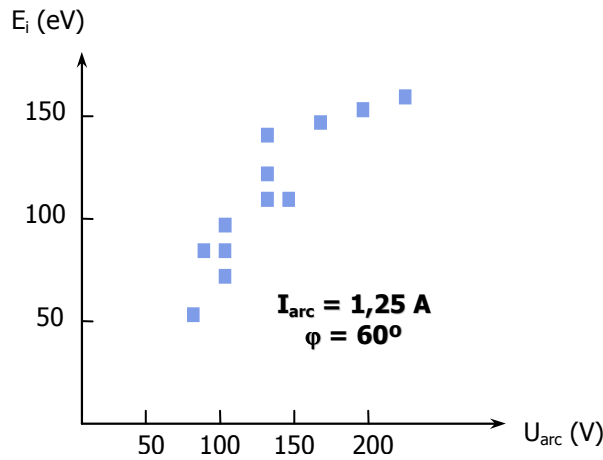
$$U_{ark} = U_c + U_{plazma} + U_a \quad (5.1)$$

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. Bazı hesaplamalar yapıldığında ark voltajı;

$$U_{\text{ark}} = U_i + C_6 \frac{I_{\text{ark}}}{\sigma} + \frac{C_5 \frac{q}{I_e} + C_1 \epsilon \sigma T^4 + q_{\text{iletim}} + C_2 \alpha N}{I_{\text{ark}}} \quad (5.2)$$

bulunur. Bu bağıntıda;  $U_i$ ; materyalin iyonizasyon potansiyelini,  $C_6$  ve  $C_5$  deneysel sabitleri,  $q$ ; bir atom için buharlaşma enerjisini,  $C_1 \epsilon \sigma T^4$ ; birim zamanda birim yüzeyden radyasyon nedeni ile enerji kayıplarını,  $T$ ; buharlaşan anot materyalinin sıcaklığını,  $q_{\text{iletim}}$ ; birim zamanda elektriksel iletkenlik nedeniyle enerji kayıplarını ve  $C_2 \alpha N$ ; birim zamanda nötral atomların iyonlaşması için gerekli enerjidir. Burada  $\epsilon$ ; materyalin yayma sabiti,  $\sigma$ ; plazmanın elektriksel iletkenliği ve  $\alpha$ ; bir atom için iyonlaşma enerjisidir. Düşük akımlarda 5.2 eşitliğinin yalnızca son terimi önemli olacaktır. Yüksek ark akımlarında son terim ihmal edilebilecek ve  $U_{\text{ark}}$  düşük olacak ve ark akımına göre küçük bir değişim gösterecektir (Musa et al., 1994).

TVA'nın en önemli özelliklerinden birisi, üretilen iyonların enerjisinin sistem parametreleri ile kolayca değiştirilebilmesidir. Örneğin Şekil 5.13' de, TVA' da üretilen bakır iyonlarının enerjilerinin ark voltajı ile değişimi verilmiştir. Temel olarak elektrotlar arası uzaklık, elektrotlar arası açı ve katot ısıtma akımı TVA'da üretilen iyonların enerjisini değiştiren parametrelerdir. Özellikle katot ısıtma akımı deşarj süresince değiştirilebildiği için iyonların enerjisi deşarj esnasında da kontrol edilebilir.



Şekil 5.13. İyon enerjilerinin ark voltajı ile değişimi (Ehrich et al., 1998).

materyalin kaplaması

TVA sistemi ile periyodik tabloda erime sıcaklığı 1600°C'nin altında olan tüm materyallerin plazması üretilerek ince filmleri elde edilmiştir. Bununla birlikte çok yüksek erime noktalı Tungsten (3407°C), Renyum (3180°C), Bor (2300°C) ve Karbon (3550°C) gibi materyallerin de kaplamaları yapılmıştır. TVA ile yapılan karbon ve bor kaplamalarda, yapıların nano boyutta olduğu görülmüş ve bu TVA sisteminin nano teknoloji uygulamalarında da kullanımına sebep olmuştur. TVA sahip olduğu eşsiz özellikleri bakımından gelecekte de, çok farklı teknolojik amaçlar için kullanılabilir. Bunlardan bazıları; 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, yeni tip metal buharı lazeri, yeni tip titanyum pompadır.

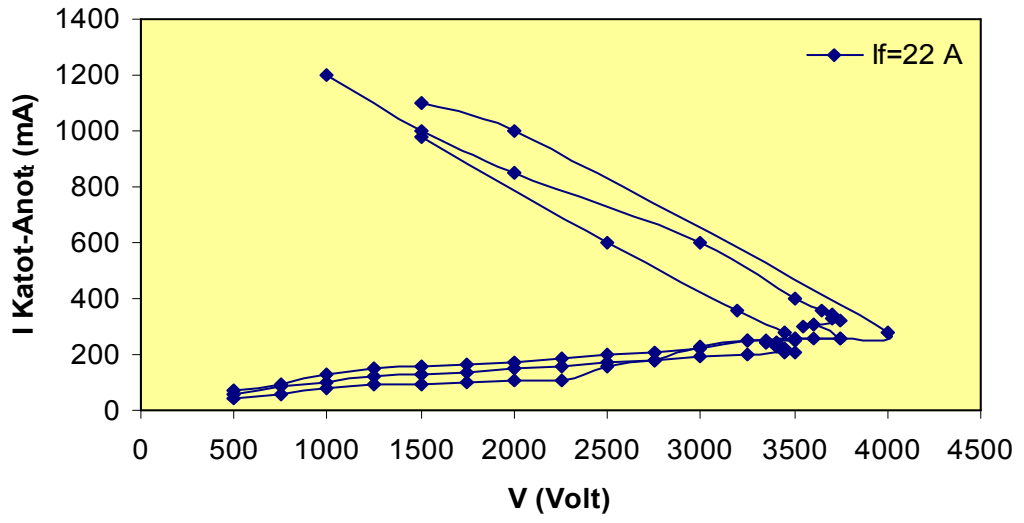
## **6. BOR TERMİYONİK VAKUM ARK DEŞARJLAR**

### **6.1. Bor Buharlarında Üretilen Termiyonik Vakum Ark Deşarjların Akım Voltaj Karakteristikleri**

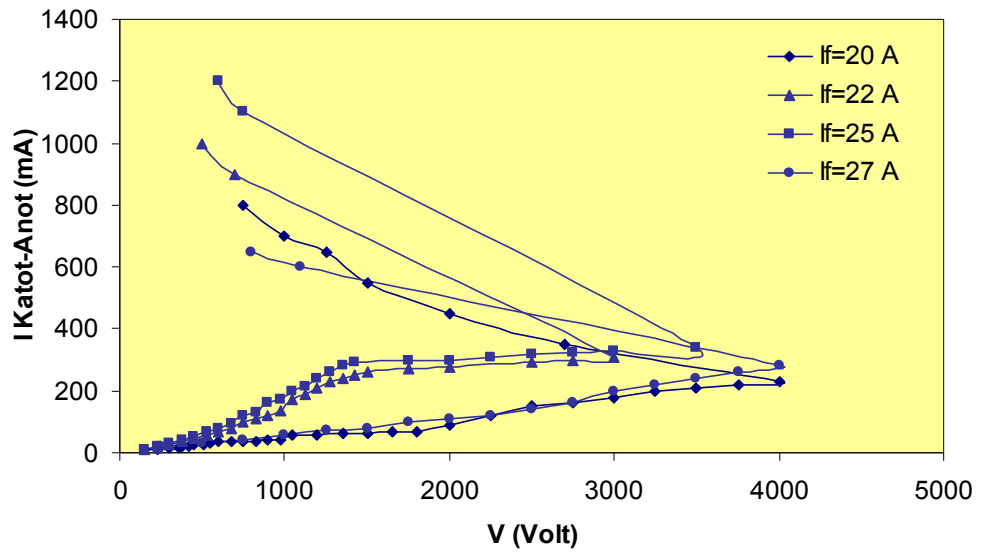
TVA'ın akım voltaj karakteristiği, erime noktası ve anottan bir atomu buharlaştırmak için gerekli enerjinin farklı olduğu buharlaştırılacak materyalin cinsine bağlıdır. Burada bor buharının akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiştir.

Şekil 6.1. ve Şekil 6.2.' de, anot materyali olarak kullandığımız borun TVA deşarj akım-voltaj karakteristiği verilmiştir. Şekil 6.1.' de 22 A filament akımı değerleri için deneyler üç kez tekrarlanarak yapılmıştır. Şekil 6.2.' de ise 20 A, 22 A , 25 A ve 27 A filament akım değerleri için deneyler tekrarlanmıştır. Bu deneyler esnasında camlaştırılmış karbon pota kullanılmıştır. Anot ile katodun whenelt silindiri arasındaki uzaklık 2-4 mm, elektron emisyonu sağlayan filament ile anot arasındaki açı  $15^{\circ}$ - $20^{\circ}$  dir.

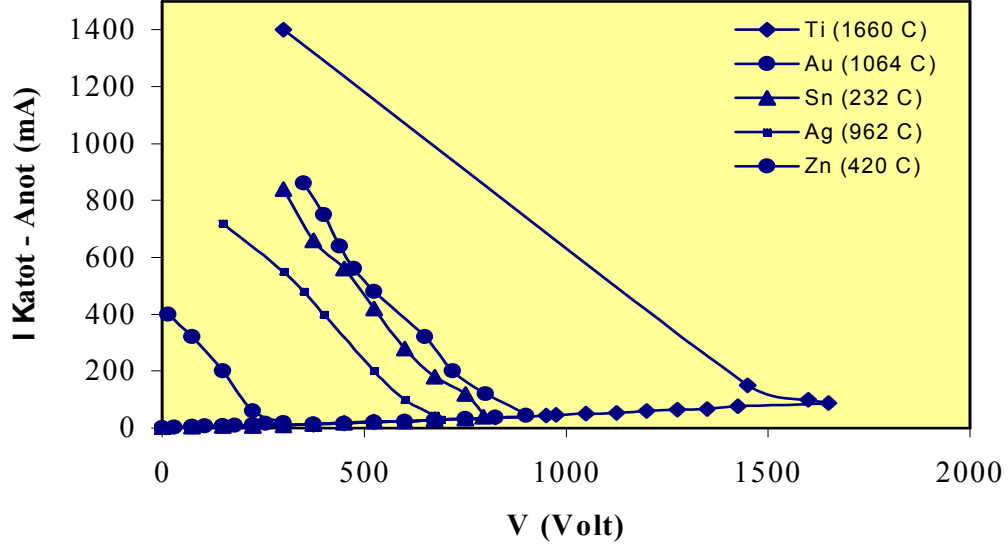
TVA' da bor materyali 3000-3500 V' un üzerindeki voltaj değerlerine çıkıldığında ateşleme ve termiyonik vakum ark deşarjı başlamaktadır. Karşılaştırma olması için  $232^{\circ}\text{C}$  –  $1660^{\circ}\text{C}$  arasındaki erime sıcaklıklarına sahip bazı metallerin TVA deşarj akım-voltaj karakteristikleri Şekil 6.3.'de verilmiştir.



Şekil 6.1. Bor TVA deşarjının 22 A filament akımı için akım-voltaj karakteristikleri.



Şekil 6.2. Bor TVA deşarjının farklı filament akımları için akım-voltaj karakteristikleri.



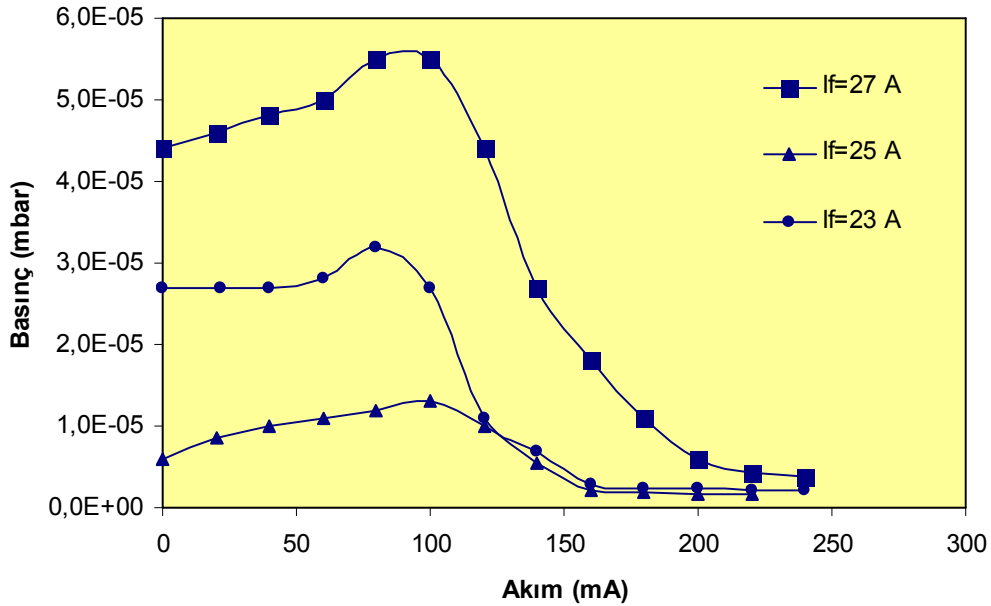
**Şekil 6.3.** Bazı seçilmiş metallerin TVA deşarjlarının akım-voltaj karakteristikleri (Musa, 2005).

Şekil 6.1.-6.2. ve Şekil 6.3. karşılaştırıldığında görüldüğü gibi, bor ve diğer bazı metallerin akım-voltaj karakteristik eğrileri birbirine benzemektedir. Ancak bu metallerin erime ve buharlaşma sıcaklıkları farklı olduğundan dolayı breakdown voltajları da farklı olmaktadır. Bu metallerin breakdown voltaj değerleri 300–1800 V arasında değişmektedir.

Borun yüksek kaynama sıcaklığına sahip olduğundan dolayı borun plazmasını yapabilmek için diğer materyallerden daha fazla yüksek voltaj ve yüksek flament akımı uygulamak gerekmektedir (Akan, 2003 a.). Borun plazması elde edilirken en az 20 A flament akımı ve breakdown voltaj değeri de 3500 V civarında gerçekleşmektedir.

## 6.2. Bor Buharlarının Deşarj Öncesi ve Sonrası için Vakum Odası İçindeki Basınç Değişimi

Bu çalışmada bor buharının deşarj oluşturulması sürecinde deşarj öncesi ve sonrası için vakum odasındaki basıncın değerleri incelenmiştir. Bakır buharlarının deşarjlarının oluşması sürecindeki vakum odasındaki basınç değerleri ile karşılaştırıldı.



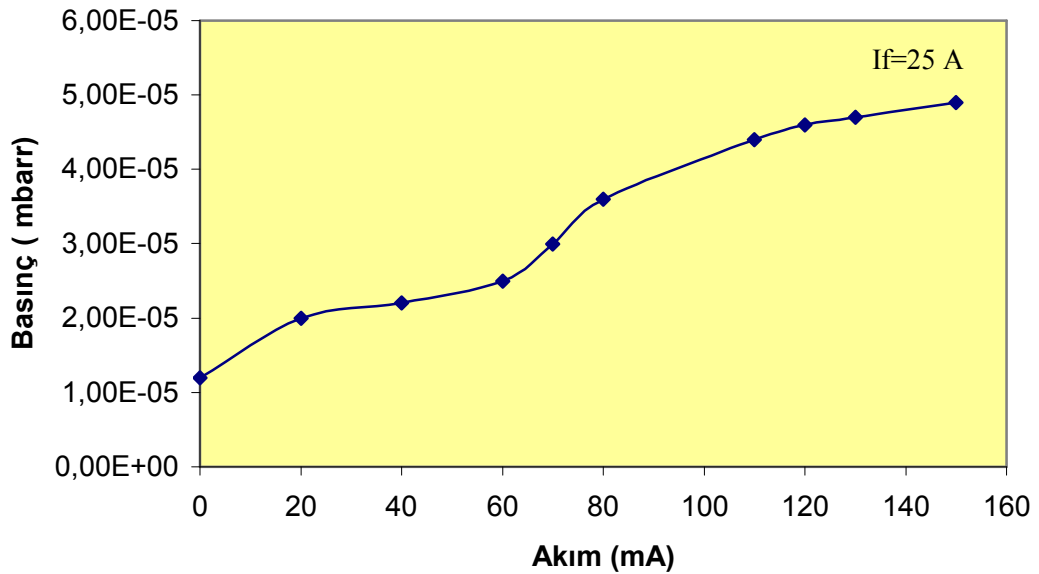
Şekil 6.4. Bor buharlarının deşarj öncesi akım-basınç grafiği.

Şekil 6.4.'de görüldüğü gibi üç değişik flament akımında bor buharının vakum odasındaki deşarj öncesi basınç değerlerinde, deneye ilk başladığında, voltaj yükseltip belli bir akım değerine ulaşasıya kadar basınç artmıştır. Bunun nedeni potaya koymuş olduğumuz bor materyalinin içinde bulunan gazların elektron bombardımanıyla vakum odasına salınıvermesidir. Voltaj artırılıp akım değeri yükseldiği sürece saf bor buharı oluşmaya başlamaktadır ve basınç değeri gittikçe

düşmektedir. Burada akımın artması aslında bor üzerine gönderilen elektronların enerjisinin dolayısıyla bor materyalinin sıcaklığının artmasıdır. Metallerin buhar basıncı sıcaklıkla ilişkilidir. Borun basınç buharı ( $10^{-7}$  mbarr/1200 C<sup>0</sup>) ortamın basınç değerinden daha düşük olduğundan dolayı borun üzerine doğru vakum odasındaki diğer (hava) gazlar difüzyon gerçekleştirmektedirler. Bu durum bazı metallerle benzerlik göstermektedir fakat basıncın bu derece düşmesinin nedeni bor materyalinin oksijenle bileşik yapma eğilimini oldukça fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Bu durum difüzyon pompalarının çalışma prensibine benzemektedir. Difüzyon pompalarının çalışma prensibi incelendiğinde, mekanik pompa ile  $10^{-3}$  mbarr seviyesine indirilen basıncın difüzyon pompasının içinde bulunan yağın buharlaştırılmasıyla difüzyon olayının gerçekleşmesi olduğu görülmektedir. Yani; difüzyon pompası içindeki yağ buharlaştığında oluşan buharın buhar basıncı vakum ortamından daha düşük olduğundan vakum odasındaki hava molekülleri difüzyon gerçekleştirerek pompadan dışarıya atılırlar.

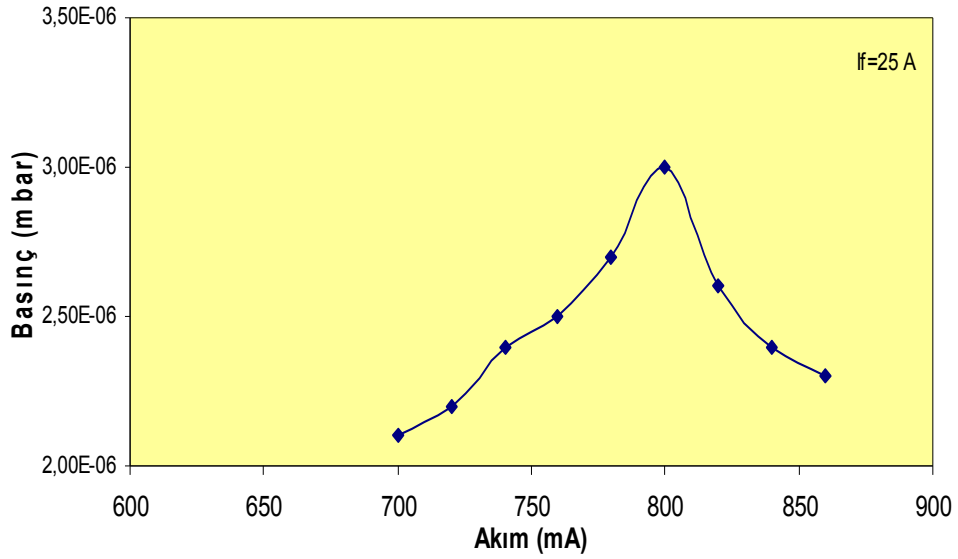
Burada bor materyalinin vakum odasındaki basınç değerini düşürmesinin öneminin daha iyi anlaşılması için bakır buharının deşarj öncesindeki basınç değerleri de belirlendi. Bakırın buhar basıncı  $10^{-3}$  mbarr/1200 C<sup>0</sup> civarındadır.



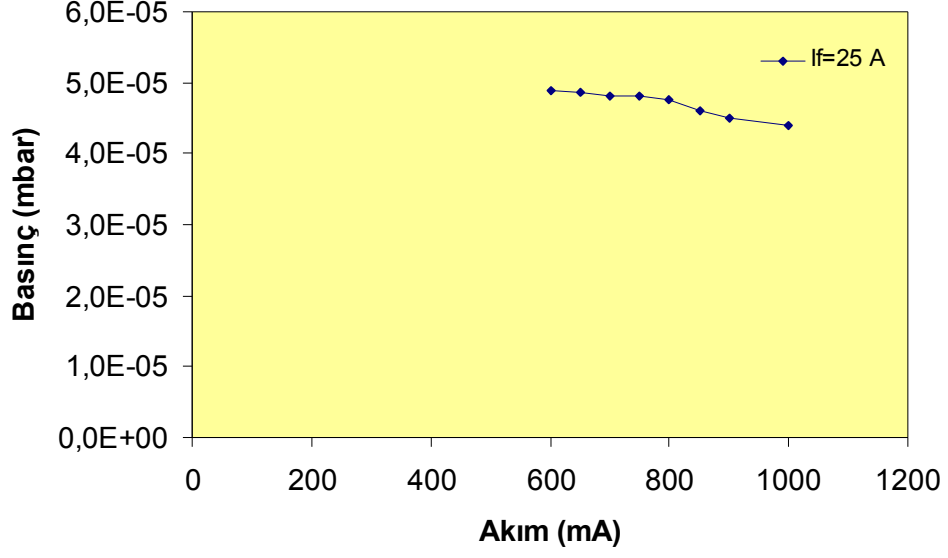
**Şekil 6.5.** Bakır buharın deşarj öncesi için akım-basınç grafiği.

Şekil 6.5.' deki grafikten görüldüğü gibi bakır buharında deşarj öncesinde akım değeri artıkça vakum odasındaki basınç değeri de yükselmektedir. Böylelikle bor materyalinin vakum odasındaki basıncının azalması yönündeki yapığı bu etki, ileri zamanlarda vakum pompaların daha yüksek vakum değerlerine ulaşabilmesi açısından oldukça önem kazanmaktadır.

Bor ve bakır buharlarının deşarj sonrası için akım-basınç grafikleri de elde edildi. Bu grafikleri Şekil 6.6. ve Şekil 6.7.' de görülmektedir.



**Şekil 6.6.** Bor buharının deşarj sonrası için akım-basınç grafiği.

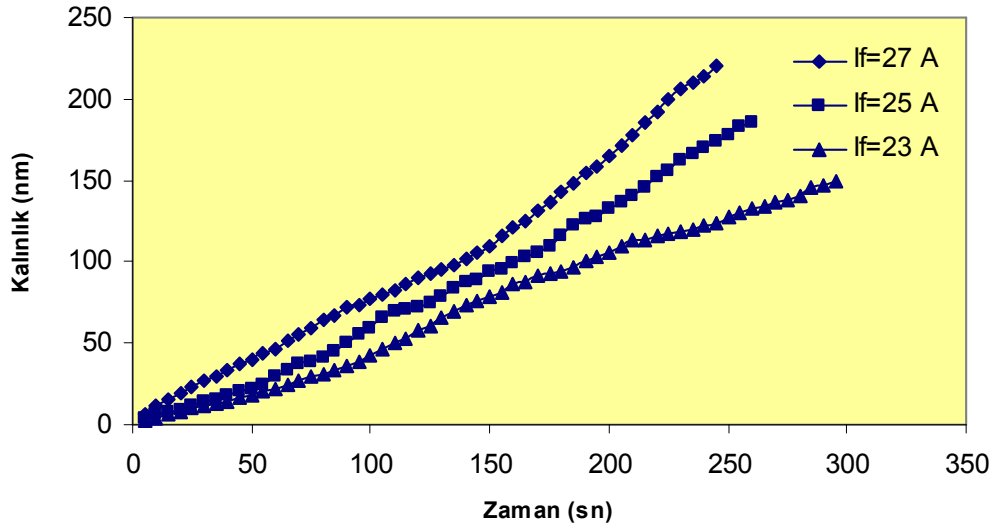


**Şekil 6.7.** Bakır buharın deşarj sonrası akım-basınç grafiği.

Bor materyali deşarjı başladığı anda vakum odasındaki basınç değeri yaklaşık olarak  $1.10^{-6}$  mbar kadar yükselme gerçekleşmektedir. Sonrasında deşarj dengeye gelmeye başladığında basınç değeri tekrar düşmeye başlamaktadır. Bakır buharları deşarjlarında ise deşarj oluştuktan sonra basınç neredeyse sabit kalmaktadır.

### 6.3 Bor İnce Filmleri Üretilirken Kaplanan Yüzey Üzerindeki Kalınlık Değişiminin İncelenmesi

Bor materyalini deşarjı oluşma sürecinde zamana göre cam taban üzerindeki kaplanan bor materyalini kalınlık değişimi incelenmiştir. Bu deneyler esnasında hep aynı koşulların geçerli olmasına gayret edildi. Sadece kaplanan materyalinin kalınlık değişiminin filament akımıyla nasıl değiştiğini görebilmek için üç farklı filament akım değerinde çalışıldı. Bu deneyler yapılırken katot filament ile anot pota arasındaki uzaklık 2-4 mm, katot filament ile anot arasındaki açı  $40^0-45^0$  ve kaplanan camın potadaki materyale olan uzaklığı 10-15 cm arasındadır.



Şekil 6.8. Bor kaplanan cam yüzeyin zamanla kalınlık değişimi grafiği.

Şekil 6.8.' den görüldüğü gibi cam üzerine kaplanan bor materyali zamanla doğru orantılı olacak şekilde artmaktadır. Kaplanan materyalin kalınlığının filament akımıyla değişimini bakacak olursak filament akımı yükseldikçe birim zamanda cam

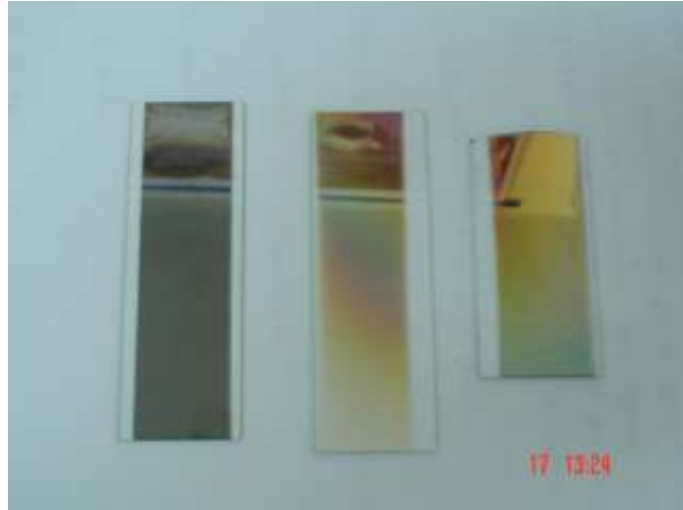
zerine kaplanan bor miktarı da arttığı görülmektedir. Buradaki cam taban üzerindeki kalınlık değişimi bize birim zamanda sistemimizin bor materyalini depolama oranını vermektedir.

## 7. TERMİYONİK VAKUM ARK SİSTEMİNDE BOR İNCE FİMLERİNİN ÜRETİLMESİ VE ÖZELLİKLERİN İNCELENMESİ

Bu bölümde termiyonik vakum ark sisteminde oluşturulan bor deşarjlarından elde edilen ince filmlerin özellikleri incelendi. Elde edilen ince filmlerin XPS, SEM, AFM HRTEM, elektron difraksiyon izleri ve optik özelliklerinin analizleri yapılmıştır.

### 7.1. Termiyonik Vakum Ark Sisteminde Bor İnce Filmleri Üretimi

Bu çalışmalarda cam üzerine bor ince filmleri kaplanmıştır. Bor ince filmlerin kalınlığı Cressington MTM10 kalınlık ölçer aracı ile ölçülmüş ve yaklaşık olarak tüm filmler yaklaşık olarak 200 nm olarak kaplanmıştır. İnce filmler kaplanırken materyal olarak saf bor, pota olarak ise camlaştırılmış karbon pota kullanılmıştır. Şekil 7.1. ve şekil 7.2.'de cam ve çelik üzerine bor kaplı numuneler görülmektedir.



**Şekil 7.1.** TVA sisteminde cam üzerine kaplanan bor ince filmlerin fotoğrafı.

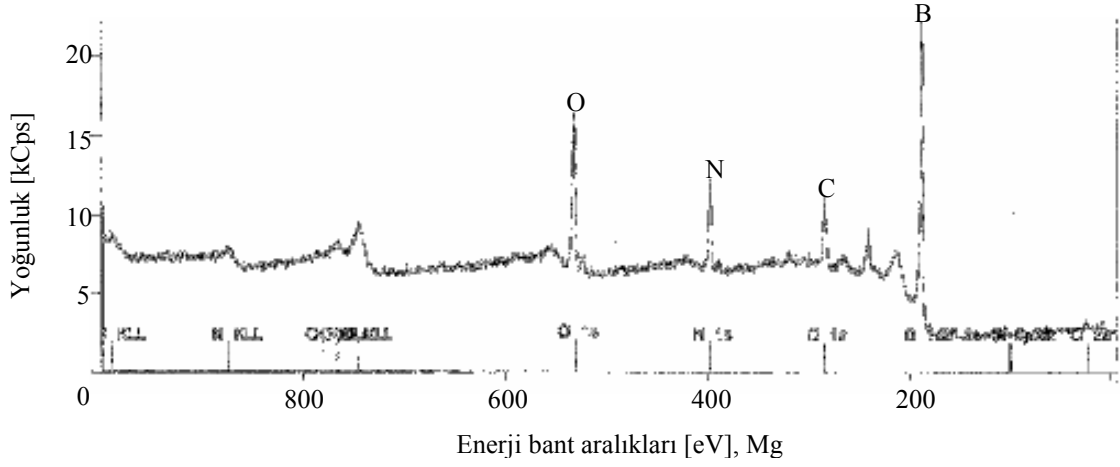


**Şekil 7.2.** TVA sisteminde çelik üzerine kaplanan bor ince filmin fotoğrafı.

## **7.2. Bor İnce Filmlerinin XPS (X IŞINLARI SPEKTROMETRESİ) Analiz Sonuçları**

XPS analizi ince filmlerin yüzeyindeki hangi materyallerin olduğuna anlamaya yönelik uygulanan literatürdeki en kabul edilen yöntemdir. XPS analizi ince filmlerin yüzeyinde bulunan atomların sayıca oranını vermektedir.

XPS analizi, Orta Doğu teknik Üniversitesi, Merkezi Laboratuvarlarında SPECS marka XPS cihazı ile yapılmıştır. Analiz esnasında ince filmin konulduğu ortam  $10^{-9}$  mbarr basınçtır.



**Şekil 7.3.** TVA sisteminde oluşturulan bor ince filmin XPS analizi sonuçları.

**Tablo 7.1.** XPS analizi sonucunda bor ince filmin üzerindeki bulunan elementlerin yüzde oranları.

ELEMENT	% ATOM
B	68,0
C	11,1
N	7,7
O	12,4
Si	0,8

Şekil 7.3. de XPS analizi sonucunun grafiği, tablo 7.1.'de bu sonuçlardaki elementlerin sayıca yüzde ağırlıkları verilmiştir. Beklenildiği gibi en yüksek oran bor elementine aittir.

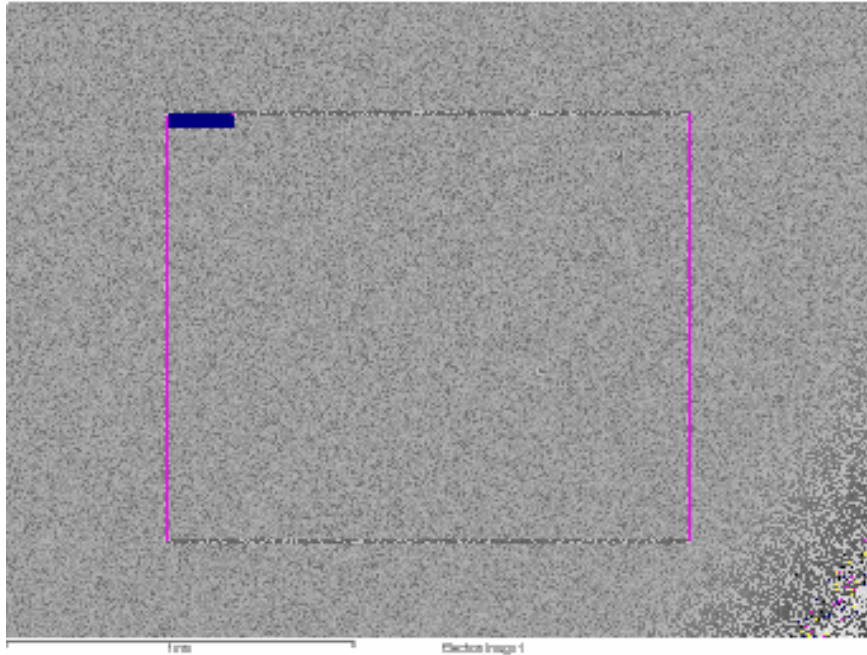
Sonuçlarda karbon oranının %11.1 çıkmasının iki nedeni vardır. Birinci neden; bu deneylerde borun ince filmlerin kaplamaları yapılırken pota olarak karbon pota kullanılmasıdır. TVA sisteminde potadan borun ince filmine gelen bu katkı diğer metallerin ince filmlerinde bu derece yüksek hatta hiç olmamaktadır. Borun ince filmde % 11.1 çıkmasının en büyük nedeni borun karbon gibi yüksek erime noktalı bir materyal olmasıdır. Yani, bor deşarjı oluşması için oldukça yüksek voltaj ve akımlara çıkmak gerekmektedir. Bu yüksek voltaj ve akım değerlerinde bir miktar karbon pota da buharlaşıp ince filme kaplanmaktadır. Bu durum bir takım mühendislik işlemleri ile kolayca çözülebileceği düşünülmektedir. İkinci neden ise difüzyon pompasından gelen karbondur. Ancak difüzyon pompasından gelen miktar, tungsten pota kullanılarak diğer metallerle yapılan ince filmlerin analizinden bilindiği gibi oldukça az olmaktadır (yaklaşık %1).

Şekil 7.3.' de dikkate çeken diğer bir nokta ise oksijen ve azot miktarlarıdır. Oksijen % 12.4 ve azot % 7.7 ince filmin yüzeyinde bulunmaktadır. Bu sonuçlar ilk bakışta şaşırtıcı gelmektedir. Çünkü 5. bölümde anlatıldığı gibi TVA sisteminde herhangi bir tampon gazı yoktur, deşarj direkt elektron bombardımanı ile potaya konan materyalin kendi kendine sağlamasıyla oluşmaktadır. Bu oranlar XPS analizi esnasında öncü tarama da daha yüksek çıkmıştır (oksijen % 24, azot %13). Bunun üzerine  $10^{-9}$  mbar'lık vakum da filmimizi XPS cihazının içinden hiç çıkarmadan, 5 eV' luk Ar iyonları ile 5 dakika boyunca bombardıman yapılmıştır. Bu işlem filme herhangi bir zarar vermeden çevresel etkenlerden dolayı filmin yüzeyine yapışmış maddeleri temizlenmesi için yapılmaktadır. Bu işlem sonrasında Şekil 7.3' de verilen sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak oksijen ve azot oranları yaklaşık olarak %50 azalmıştır. Bu durum oksijen ve azotun borun ince filmin kendisinden değil TVA sisteminden XPS cihazına gidesiye kadar maruz kaldığı çevresel etkenlerden kaynaklandığını göstermektedir. Çünkü filmin maruz kaldığı en büyük çevresel etken 1 atm basıncındaki havadır. Hava ise % 71 azot, % 28 oksijen den oluşmaktadır. Bu bilgi ile bor'un oksijen ve azot'u tutma eğilimi bilgisini birleştirirsek bu oranların nedeni rahatlıkla anlaşılmaktadır.

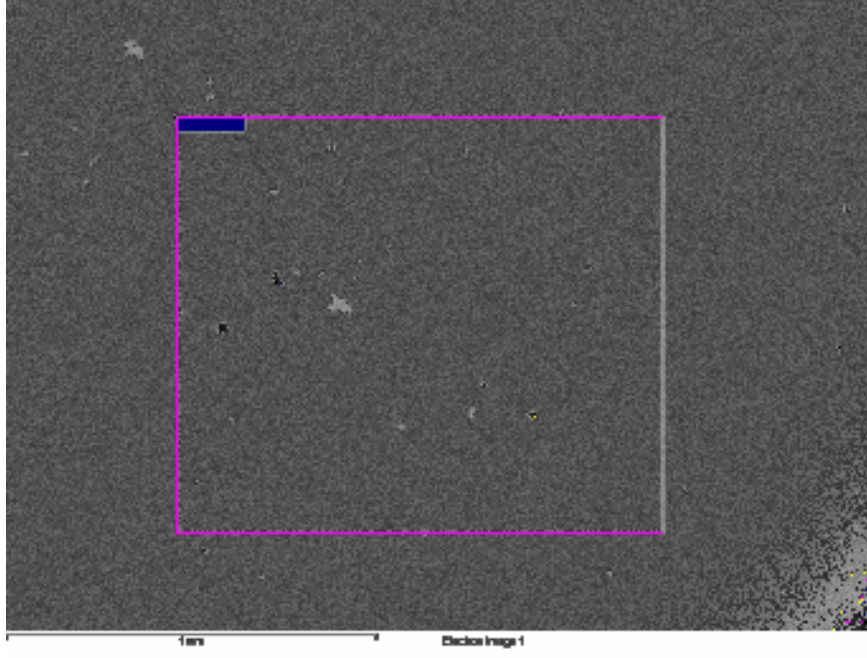
Son olarak silisyumun % 0.8 oranı oldukça normaldir. İnce filmin üzerinde silisyumun çıkmasının nedeni TVA sisteminde ince filmin kaplanması esnasında iyonlarla çalışılmasıdır. Yani bor iyonları cam üzerine gidip adeta dikilmektedir. Böylece eser miktarda yüzeye tabandan, taban materyali çıkabilmektedir (Akan, 2003 a.).

## 7.2. Bor İnce Filmlerinin SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) Analiz Sonuçları

SEM görüntüleri ince filmlerinin yüzeylerindeki yapıyı analiz etmek için kullanılır. Burada bor ince film kapladığımız cam ve çelik numunelerinin elektron mikroskobu görüntüleri elde edildi. Şekil 7.4. ve Şekil 7.5.' de bor ince filmlerinin SEM görüntüsü, ince filmin yüzeyi 10000 kez büyütülerek elde edilmiştir. Şekil 7.4 ve Şekil 7.5. den de görüldüğü gibi bor ince filmin yapısı homojen ve oldukça düzgündür



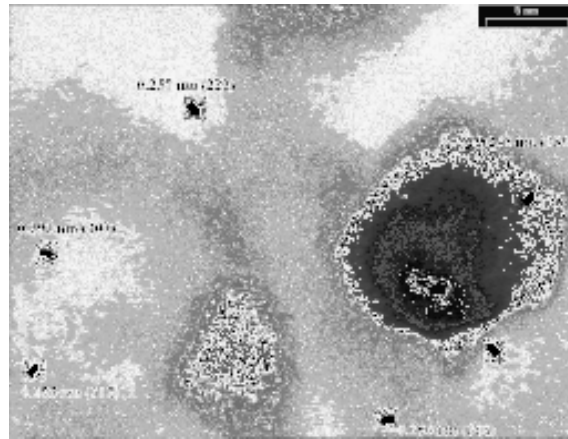
Şekil 7.4. Cam üzerine kaplanmış bor ince filminin SEM görüntüsü.



**Şekil 7.5.** Çelik üzerine kaplanmış bor ince filminin SEM görüntüsü.

### 7.3. Bor İnce Filmlerin HRTEM (Yüksek Çözünürlüklü Geçirmeli Elektron Mikroskobu ) Analiz Sonuçları

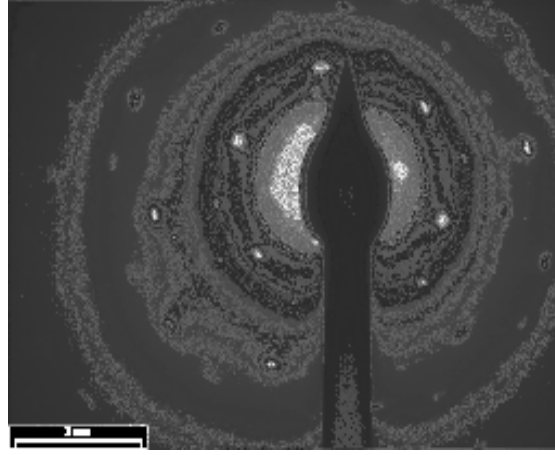
HRTEM analizleri ince filmlerin yapısını nano yapıda incelemeye yöneliktir. Burada bor ince filmler, yüzeyleri düzgün kristal yapıya sahip olan özel olarak hazırlanmış KCl (potasyum klorür) tabanlar üzerine kaplanmıştır. Daha sonra HRTEM analizi yapılabilmesi için numune saf suyun içine konularak KCl tabanın çözünmesi sağlanmıştır. Şekil 7.6.'da görüldüğü gibi, 1,4 Å çözünürlükte 1.2 milyon kez büyütülmüş görüntüsü elde edilmiştir. Bu görüntüden ince filmin yapısının nano boyutlarında olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 7.6. Bor ince filmin HRTEM görüntüsü (Musa, 2005).

Elektron difraksiyon izlerine hesaplamalarına göre, Şekil 7.6.' deki  $a=10.92 \text{ \AA}$  ve  $c= 23.81 \text{ \AA}$  parametreleriyle belirlenen ve oklarla gösterilen yerlerden bor ince filminin romohedral kristal yapısında karşılık gelmektedir. Hesaplamaların tüm verileri tablo 7.2' de verilmiştir.

Bor' un nano yapıları üzerinde gerçekleştirilen elektron difraksiyonu iyi dairesel yapılar oluşturduğunu göstermektedir (çap verileri tablo 7.2. de verilmiştir.) ve  $d$  aralığının romohedral yapısına karşılık geldiği doğrulanmış olmaktadır.



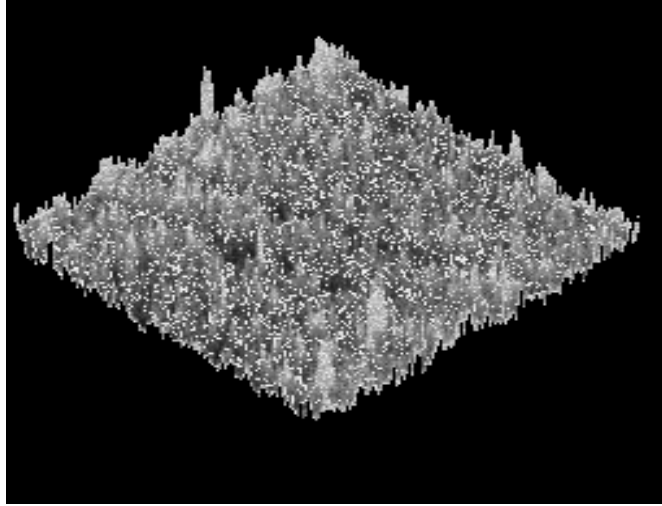
**Şekil 7.7.** Elektron difraksiyon izleri (Musa, 2005).

**Tablo 7.2.** HRTEM ve elektron izlerinden hesaplanan değerler (Musa, 2005).

<b>Dairesel Alan</b> <b>(mm)</b>	<b>Dairesel Çevre</b> <b>(mm)</b>	<b>Çevre</b> <b>(mm)</b>	<b><math>d_{hkl}</math></b> <b>(nm)</b>	<b>hkl</b>	<b>Bor</b> <b>80-0324</b>
5.17403	8.06342	2.56667	0.34675	122	0.34248
6.97075	9.35933	2.97917	0.29874	303	0.29308
8.43461	10.29526	3.27708	0.27158	220	0.27312
11.36603	11.95114	3.80417	0.23395	042	0.23537
12.92228	12.74309	4.05625	0.21941	404	0.21981
18.53807	15.26290	4.85833	0.18319	146	0.18315
21.44186	16.41482	5.22500	0.17033	213	0.17080

#### 7.4. Bor İnce Filmlerinin AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) Analiz Sonuçları

AFM analizleri ince filmlerin yüzeylerinin pürüzlülüğünü anlamaya yönelik incelemelerdir. Burada TVA' da kaplanan bor ince filmlerinin AFM analizleri yapılmıştır. Şekil 7.8' de bor ince filminin AFM görüntüsü görülmektedir. Yapılan ölçümlerde bor ince filmin pürüzlülüğü 10 nm' nin altında çıkmıştır. Bu son derece düz bor ince film anlamına gelmektedir. İleride borun sertlik testleri de yapılacaktır. Fakat literatürde borun son derece sert olduğu bilinmektedir. Bu derece sert malzemenin sert malzemenin bu pürüzlülükte kaplaması sürtünmeyi engelleyici dişli, piston gibi yerlerde geniş uygulamalar bulacaktır.



Şekil 7. 8. Bor ince filmin AFM görüntüsü (Musa, 2005).

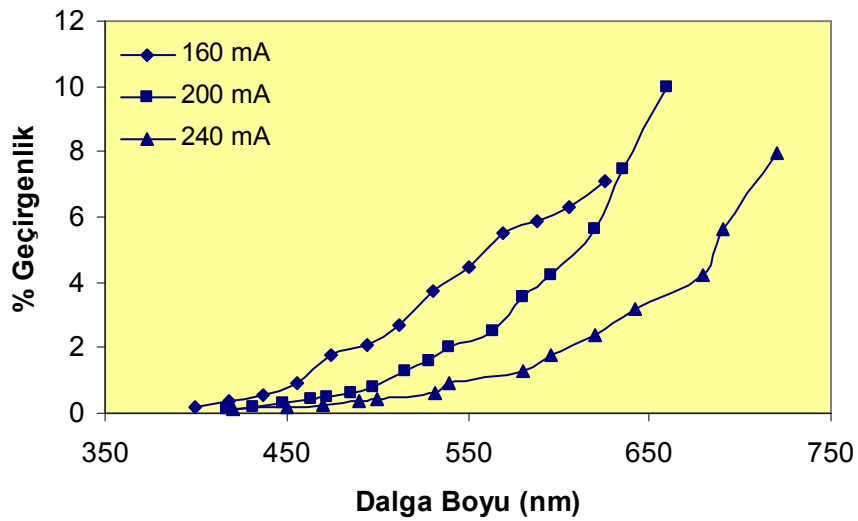
## 7.5. Bor İnce Filmlerinin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

TVA' da üretilen bor ince filmlerin optik özellikleri incelenmiştir. Bu çalışmada 160 mA, 200 mA, 240 mA deşarj akımlarında 200 nm kalınlığında bor ince filmler oluşturulmuştur. Bu filmlerin UV dalga boyu (200-900 nm) aralığında üzerlerine ışık gönderilerek absorpsiyon değerleri ölçülmüştür. Bu ölçülen absorpsiyon değerlerinden kaplanan bor ince filmlerin, geçirgenliği (T), yansımaya (R), kırılma indisi (n) ve yasak enerji aralıkları hesaplanmıştır. Kaplanan bor ince filmlerinin bu optiksel özelliklerini belirlerken yarı iletken malzemelerin optiksel özelliklerini hesaplanırken kullanılan metotlar kullanılmıştır.

Şekil 7.9.' de bor ince filmlerin üzerlerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın ölçülen absorpsiyon değerlerinden geçirgenlik hesaplanmıştır. Geçirgenlik, geçen ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır ve T ile temsil edilir. Yüzde geçirgenliği (T) hesaplamak için;

$$T = 10^{-A} \quad (7.1)$$

bağıntısı kullanılır. Burada T; geçirgenlik, A; absorpsiyon değerleridir (Pankove,1971).

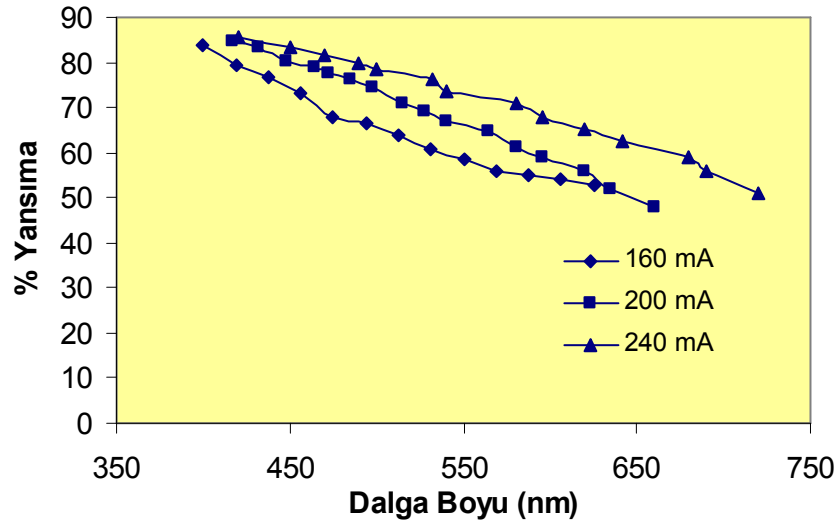


Şekil 7.9. Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın, geçirgenliğe göre grafiği.

Şekil 7.10.' da bor ince filmlerin UV dalga boyu aralığında yansımaya değerleri hesaplanmıştır. Yansımaya, malzeme yüzeyinden yansıyan ışık şiddetinin gelen ışık şiddetine oranı olarak tanımlanır ve R ile temsil edilir. Yüzde yansımaya;

$$R = 1 - \sqrt{\left(\frac{T}{100}\right)^A} \quad (7.2)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Burada R; yansımaya, T; geçirgenlik, A; absorpsiyon değerleridir (Smith, 1990; Subramanyam et al., 1999; Kim et al., 2000; Nasser et al., 1998; Benramdane et al., 1997; Sze, 1981; Klingshirn, 1997).



**Şekil 7.10.** Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın, yansımaya göre grafiği.

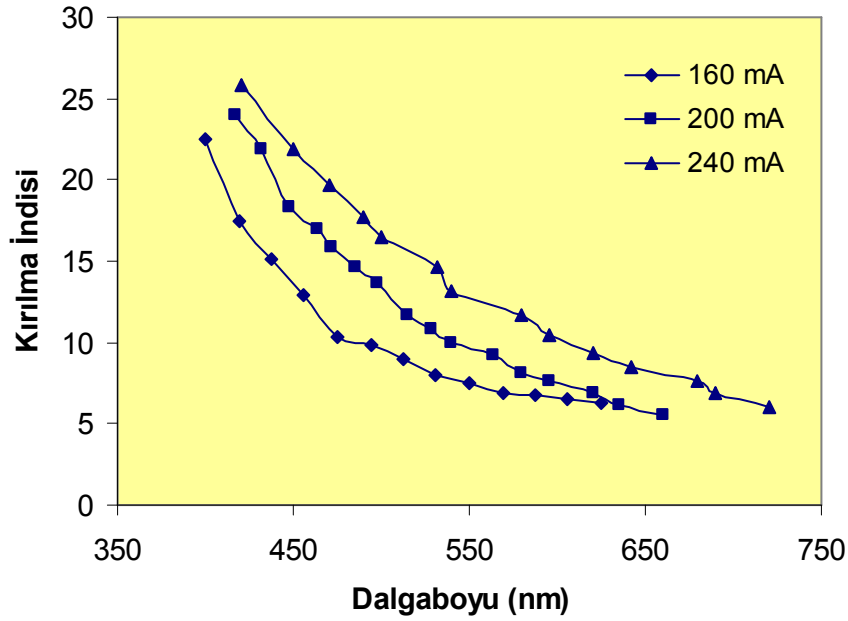
Şekil 7.11.' da bor ince filmlerin UV dalga boyu aralığında kırılma indisi değerleri hesaplanmıştır. Işık bir malzemeden geçerken enerjisinin bir kısmını kaybeder. Bu enerji kaybı ışığın hızını azalttığından ışık demeti yön değiştirir ve kırılmaya uğrar. Işığın boşluktaki hızının malzeme içindeki hızına oranı malzemenin kırılma indisi olarak tanımlanır ve n ile gösterilir. Kırılma indisi;

$$n = \frac{1+R}{1-R} + \sqrt{\frac{4R}{(1-R)^2} - k^2} \quad (7.3)$$

olarak ifade edilir. Burada R; yansımaya, k sönüm katsayısıdır. Ayrıca sönüm katsayısı;

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4 \pi} \quad (7.4)$$

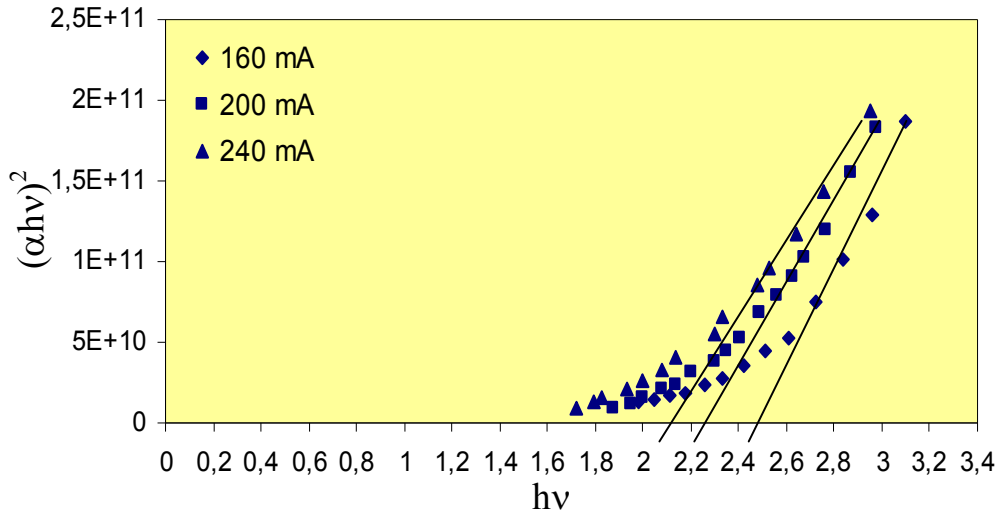
olarak verilir. Burada;  $\alpha = \frac{A}{d}$  dir. A; absorpsiyon, d; ince filmin kalınlığı,  $\lambda$  ise ince filmin üzerine gönderilen ışığın dalga boyudur (Sze, 1981; Smith, 1959; Klingshirn, 1997; Benramdane et al., 1997; Brewer and Franzen, 2002; Kittel, 1996).



**Şekil 7.11.** Bor ince filmlerin üzerine gönderilen UV dalga boyu aralığında ışığın, kırılma indisine göre grafiği.

Bor ince filmin optiksel özelliklerinden yararlanarak yasak enerji aralığı hesaplanabilir. İnce filmin yasak enerji aralığı, temel soğurma spektrumu kullanılarak

Çizilen  $(\alpha hv)^2 \sim hv$  değişim grafiğinden belirlenir. Bu değişimin lineer kısmının doğrultusunun  $hv$  eksenini  $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir (Silva and Zaniquelli, 1999; Paraguay et al. 1999; Purica et al., 2002; Qadri et al., 2000; Lokhande and Uplane et al., 2000).



**şekil 7.12.**  $(\alpha hv)^2 \sim hv$  değişim grafiği.

şekil 7.12. deki  $(\alpha hv)^2 \sim hv$  değişim grafiğinden eğrilerin lineer olduğu bۆlgede  $hv$  eksenini  $(\alpha hv)^2=0$ 'da kestiği noktanın enerji değerleri belirlenmiştir. Oluşturulan bor ince filmlerin yasak enerji aralığları yaklaşık olarak; 160 mA lik deşarj akımında 2.50 eV, 200 mA lik deşarj akımında 2.25 eV, 240 mA lik deşarj akımında 2.10 eV olarak bulunmuştur. Yasak enerji aralığı bu değerler çıkması bor ince filmlerimizin yarı iletken ۆzellięi taşıdığını gۆstermektedir.

## 8. TARTIŞMA VE SONUÇ

Yeni tip, bir plazma kaynağı olan Termiyonik Vakum Ark sistemiyle oluşan bor buharı deşarjlarının özellikleri incelendi. TVA sistemi sahip olduğu eşsiz özellikleri itibariyle önemli avantajlara sahip bir plazma kaynağıdır. TVA' da buharlaştırılarak plazması oluşturulacak materyalin içine konduğu kaşık şeklindeki tungsten pota anot, üzerinden düşük voltaj güç kaynağı ile akım geçirilerek termo elektron emisyonu sağlayan tungsten filament, 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 arasında 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 olduğu anda elektrotlar arasındaki voltaj birden azalır, akım ise aniden yükselir. TVA' nın en önemli avantajlarından biri herhangi bir materyalin plazmasını oluşturmak için tampon gazı kullanılmamasıdır. Böylelikle oluşan plazma sadece potaya konan materyalin plazmasıdır.

Bor özellikleri itibariyle işlenmesi zor bir materyaldir. Aynı zamanda hemen hemen her sektörde uygulama alanları vardır. Günümüzde olduğu gibi ileriki yıllarda önemi daha da artarak vazgeçilemeyen bir materyal olacağı bugünkü çalışmalar göstermektedir. .

Bu tez çalışmasında birinci olarak bor buharı deşarjlarının akım-voltaj karakteristikleri elde edildi. Elde edilen bor deşarjların akım-voltaj karakteristiklerinin diğere çoğru metallerdeki yapıya benzerlik gösterdiğini tespit edildi. Ancak bor buharının plazmasını üretmek için filament akımına ve diğere TVA parametrelerine bağılı olarak 3500-4000 V' lara kadar çıkılması gerekliliğı ortaya çıktı.

İkinci olarak, bor deşarjlarının oluşma sürecinde deşarj öncesi ve sonrası için vakum odasındaki basınç değere belirlendi. Çalışmanın bu aşamasında diğere metallerde farklı bir durum gözlemlendi. Bor'un plazması oluşturmak için elektrotlar arasına voltaj uygulanmaya başlandığında belli bir noktaya kadar basınç değere yükselmektedir. Sonrasında belli bir noktaya gelindiğinde vakum odasının basınç değere hızla düşmeye başlamaktadır. Yapılan deneylerde  $1.2 \cdot 10^{-6}$  mbar'a kadar vakum odasının basınç değere düştüğü gözlemlenmiştir. Bor'un vakum odasında yaptığı bu etkiyi daha iyi anlamak için deşarj öncesi ve sonrası için bakır buharının deşarjları sırasındaki vakum odasının basınçları belirlendi ve bor'ununkilerle karşılaştırıldı. Ayrıca bor materyalinin cam taban üzerine depolanması sürecinde camın üzerine kaplanan materyalin flamet akımı parametresini değıştirerek zamana göre kalınlık değışimi incelendi.

Son olarak, bor deşarjlarında elde edilen ince filmlerin XPS, SEM, HRTEM, Elektron difraksiyon izleri, AFM ve optiksel özellik analizleri yapılmıştır. Yapılan bu tüm analizler sonucunda oluşturulan ince filmlerin yüksek kalitede olduğu gözlemlenmiştir.

Yapılan tüm bu incelemeler, bor materyalinin TVA sistemindeki özellikleri ileride yapılacak çalışmalar için oldukça önemlidir. Bu tez çalışmasının ileri aşamasında magnezyum ile bor' u alaşım yaptırarak magnezyum di bor oluşturup süper iletken üretmek olacağı düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akan, T., 2003, Termiyonik Vakum Ark (TVA)'nın temel özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir
- Akan T., Ekem N., Pat S., Vladioiu R., Musa G., 2003 a, Studies on the thermionic vacuum arc discharges in the vapors of Cu-Ag and Cu-Sn Alloys, JOAM, vol.7, 2489-2494.
- Akan T., 2005, Maddenin dördüncü hali plazma ve temel özellikleri, Çağdaş Fizik Elektronik Dergi, sayı 4, 1-3.
- 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.
- Benramdane, N., Murad, W.A., Misho, R.H., Ziane, M. and Kezzab, Z., 1997, A chemical method for the preparation of thin films of CdO and ZnO, Materials Chemistry and Physics, 48, 119-123.
- Brewer, S.H. and Franzen, S., 2002, Optical properties of indium tin oxide and fluorine-doped tin oxide surfaces: correlation of reflectivity, skin depth, and plasmon frequency with conductivity, Journal of Alloys Compounds, 338, 73-79.
- Baykal,D.E., Hidrotermal ve Mikrodalga Enerjiyle, Lityum İçeren Boratlı Fosfatlı Bileşiklerin Sentezlenmesi, Kristal Yapı ve Termokimyasal Özelliklerinin İncelenmesi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir
- Bor Enstitüsü, 2005, BOR, Bor Çalıştayı El Kitapçığı, Ankara
- 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

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

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.

DPT, "VIII. Beş Yıllık Kalkınma Planı-Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu", Devlet Planlama Teşkilatı, Ankara, 1999

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

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.

Grill, A., 1993, Cold plasma in materials fabrication, IEEE pres, New York, 256p.

<http://www.dtm.gov.tr/ead/bor>, T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Mteşarlığı web sitesi, 16.08.2005

<http://www.etiholding.gov.tr>, ETİBOR A.ř. web sitesi, 16.08.2005.

<http://www.usgs.gov>, U.S. Geogical Survey web sitesi, 16.08.2005.

[http:// <http://images.search.yahoo.com>](http://images.search.yahoo.com), Yahoo Fotoğrafları web sitesi,16.08.2005.

Karlz H., 1987, Stress and microsturcture os sputter-deposited thin films: Molecular dynamics investigations, J. Appl. Phys., vol.62, 1796p.

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

Kim, Y.J. and Kim, H.J., 1999, Trapped oxygen in the grain boundaries of ZnO polycrystalline thin films prepared by plasma-enhanced chemical vapor deposition, Materials Letters, 41, 159-163.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Klingshirn, C.F., 1997, Semiconductor optics, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 490 p
- Kral, N. A. and Trivelpiece, A. W., 1973, Principles of plasma physics, McGraw-Hill book company, New York, 494p.
- Kittel, C., 1996, Katılal fiziğine giriş, (Çev. B. Karaoğlu), Bilgi Tek Yayıncılık, İstanbul, 434 s.
- Kunkel, W. B., 1966, Plasma physics in theory and application, McGraw-Hill book company, New York, 494p.
- 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.
- Lokhande, B.J. and Uplane, M.D., 2000, Structural, optical and electrical studies on spray deposited highly oriented ZnO films, Applied Surface Science, 167, 243-246.
- Martin P.J., Mckenze D.R., Netterfield R.P., Swift P., Filipezuk S.W., Mler K.H., Pacey C.G., James B., 1987, Characteristic Of Titanium Arc Evaporation Processes, Thin Solid Films, vol.153, 92.
- McDaniel E. W., 1964, Collision phenomena in ionized gases, John Wiley&Sons, USA, 775p.
- Mausbach, M., Ehrich, H., Mller, K. G., 1990, Cu and Zn films produced with an anodic vacuum arc, Vacuum, vol. 41, 1393-1395.
- Musa, G., Betiu, N., Mustata, I., Baltog, A. and Popescu, A., 1983, Low voltage arc welding in vacuum, Review Roum. Physics, 28, 907.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- 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 continuously evaporated from the anode, Contributions to Plasma Physics, vol.27, 431-437.
- 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.
- 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.
- 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. 24<sup>th</sup> international conference. on phenomena in ionized gases (ICPIG), Poland.
- Musa G., Ciupuna V., Lungu C.P., Mustata I., Ehrich H., Hegemann T., 2001, Thermionic vacuum arc carbon plasma generation for hydrogen free carbon film deposition.
- Musa G., Ekem N., Akan T., Pat S., Balbağ M.Z., İşsever U.G., Cenik M.İ., 2005, Termiyonik Vakum Ark (TVA) Teknolojisini Kullanarak Bor'un Plazma İle İşlenmesi, Bor Çalıştayı, Sözlü Bildiri, Ankara.
- Muraoka K. and Maeda, M., 2001, Laser-aided diagnostics of plasmas and gases, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 295p.
- Nasser, S.A., Afify, H.H., El-Hakim, S.A. and Zayed, M.K., 1998, Structural and physical properties of sprayed copper-zinc oxide films, Thin Solid Films, 315, 327-335.
- Ölçen, N., 2001, Bor Madeninin Enerji Alanındaki Önemi, Uludağ Üniversitesi Makine Müh. , Yüksek Lisans Tez,, Bursa.
- Pankove, J.I., 1971, Optical process in semiconductors, Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, N.J., 422 p.

## KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Paraguay D, F., Estrada L, W., Acosta N, D.R., Andrade, E. and Yoshida, M.M., 1999, Growth, structure and optical characterization of high quality ZnO thin films obtained by spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 350, 192-202.
- Purica, M., Budianu, E. and Rusu, E., 2001, ZnO thin films on semiconductor substrate for large area photodetector applications, *Thin Solid Films*, 383, 284-286.
- 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.
- Roth, J. R., 1995, *Industrial plasma engineering*, vol. I, IOP publishing, Bristol and Philadelphia, 538p.
- Roth, J. R., 2001, *Industrial plasma engineering*, volume II, IOP publishing, Bristol and Philadelphia.
- Qadri, S.B., Kim, H., Horwitz, J.S., and Chrisey, D.B., 2000, Transparent conducting films of ZnO-ZrO<sub>2</sub>: Structure and properties, *Journal of Applied Physics*, 88, 6564-6566.
- Silva, R.F. and Zaniquelli, M.E.D., 1999, Aluminium doped zinc oxide films: formation process and optical properties, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 247, 248-253.
- Smith, R.A., 1959, *Semiconductors*, Cambridge University Press, New York, 494 p.
- Smith, W.F., 1990, *Principles of materials science and engineering*, McGraw-Hill, Inc., USA, 864 p.
- Subramanyam, T.K., Naidu, B.S. and Uthanna, S., 1999, Effect of substrate temperature on the physical properties of DC reactive magnetron sputtered ZnO films, *Optical Materials*, 13, 239-247.
- Sze, S.M., 1981, *Physics of semiconductor devices*, John Wiley & Sons, Inc., USA, 868 p.

### **KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)**

- Takagi, T., 1982, Role of ions in ion-based film formation, Thin Solid Films, vol. 92, 1-17p.
- Tanenbaum, B. S., 1967, Plasma physics, McGraw-Hill book company, New York, 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. and Penfold, A. S., 1978, Thin film processes, eds. J. L. Vossen and W. Korn, Academic press, New York, 75p.
- Tonks, L. and Langmuir, I., 1929, Oscillations in ionized gases, Physics Review, vol.33, 195.
- Yılmaz, A. (2002),"Her Derde Deva Hazinemiz Bor", TÜBİTAK-Bilim ve Teknik Dergisi, Ankara, Mayıs 2002