

Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemiyle  
Nano Katmanlı Kompozit Malzeme Üretimi

Serdar Demirkol

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2008

Production of Nano Laminar Composite Material  
Using With Thermionic Vacuum Arc (TVA)

Serdar Demirkol

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

Department of Physics

June 2008

Termiyonik Vakum Ark (TVA) Yöntemiyle Nano Katmanlı Kompozit Malzeme  
Üretimi

Serdar Demirkol

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

Haziran 2008

# PDF Eraser Free



## ÖZET

Günümüzde teknolojik gelişmelere paralel olarak malzeme biliminde yeni materyallere büyük çapta ihtiyaç duyulmaktadır. Bu malzemelerden olan **kompozit malzemeler** üzerine önemli çalışmalar yapıla gelmektedir. Bu çalışmada, **metal matrisli - tabakalı kompozit malzemelerin** üretimi için **yeni bir yöntem** kullanılmış ve bu üretilen malzemenin incelemeleri yapılmıştır.

Literatürde görülmeyen ve ilk defa tarafımızca ele alınan bu yeni yöntemle Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi kullanılarak 13 tabakalı metal matrisli kompozit malzeme, gümüş ve aluminadan üretilmiştir. Üretilen metal matrisli - tabakalı kompozit malzemelerin taramalı elektron mikroskop (SEM), optik mikroskop, elektriksel iletkenlik ve optik emisyon spektrum analizleri gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: TVA, Kompozit Malzeme, SEM.

## SUMMARY

Nowadays, there has been great requirement for novel materials in material science in parallel to the technological developments. Many important works have been done on **composite materials** which are one of these materials. In this work, a new method has been used to produce metal matrix-layered composite materials and analysis of this material has been performed.

With this method which does not exist in literature and treated firstly by us, 13 layered metal matrix composite material has been produced from silver and alumina using Thermionic Vacuum Arc (TVA) system. After the production process, the analysis of the metal matrix composite material has been performed. The material has been characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM), Metallurgical Optical Microscope, electrical conductivity and Optical Emission Spectroscopy.

Keywords: TVA, Composite material, SEM.

## TEŞEKKÜR

Osmangazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, Plazma Fiziği Laboratuvarında çalışmama olanak sağlayan ve bu çalışmamda beni yönlendiren ve destekleyen sayın hocam Prof. Dr. Naci EKEM' e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma konusuna beni yönlendiren, her konuda kendisine danıştığım, tüm sorularıma bıkmadan cevap veren, kendime örnek aldığım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Geavit MUSA ( National Institute for Laser, Plasma and Radiation Physics, Bucharest / ROMANIA) ' ya sonsuz teşekkürler ederim.

Özellikle bu tez çalışmam esnasında bana her konuda yardım eden, deneylerimin yapımında ilgi ve desteğini esirgemeyen, benimle dostluğunu ve arkadaşlığını paylaşan Dr. Suat PAT 'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamda maddi ve manevi desteklerini üzerimde hep hissettiğim, tecrübelerinden faydalandığım sevgili hocam Doç. Dr. Ferhunde ATAY ve Dr. İdris AKYÜZ' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlerime gelmemde yaşamım boyunca beni hep destekleyen, yönlendiren ve hep yanımda olan moral kaynağım SEVGİLİ BABAM' a, SEVGİLİ ANNEM' e, ABİM' e ve ABLAM' a hürmetlerimi ve şükranlarımı sunarım.

*Aileme...*

**İÇİNDEKİLER****Sayfa**

<b>ÖZET.....</b>	<b>v</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>vi</b>
<b>TEŞEKKÜR.....</b>	<b>vii</b>
<b>İÇİNDEKİLER.....</b>	<b>viii</b>
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>	<b>xii</b>
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ .....</b>	<b>xiv</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....</b>	<b>xv</b>
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KOMPOZİT MALZEMELER.....</b>	<b>3</b>
2.1 Metal Matrisli Kompozitler.....	4
2.2 Seramik Matrisli Kompozitler.....	4
2.3 Kompozit Malzeme Türleri.....	5
2.3.1 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler.....	5
2.3.2 Fiber Takviyeli Kompozit Malzemeler .....	6
2.3.3 Katmanlı (Laminar) Kompozit Malzemeler.....	7
2.3.4 Katmanlı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı.....	8
<b>3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM TEKNİKLERİ.....</b>	<b>9</b>
3.1 Plazma Püskürtme Kaplama .....	9
3.2 Sol-Jel Kaplamalar.....	13
3.3 Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD).....	14
3.4 Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD).....	16
3.5 Termal Buharlaştırma Yöntemleri.....	17
3.5.1 Rezistans Isıtıcı ve İndüksiyon Akımı ile Buharlaştırma.....	18
3.5.2 Elektron Bombardımanı ile Buharlaştırma.....	18

**İÇİNDEKİLER (devam )**

	<b>Sayfa</b>
3.5.3 Katodik Ark Yöntemi.....	19
3.6 Sıçratma Yöntemleri .....	20
3.7 İyon Demetiyle Biriktirme Yöntemi .....	22
3.8 İyon Grubu Demeti Biriktirme Yöntemi.....	23
<b>4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ İÇİN TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) SİSTEMİ.....</b>	<b>24</b>
4.1 TVA Sisteminin Bileşenleri .....	24
4.1.1 Vakum Odası.....	25
4.1.2 Basınç Ölçüm Sistemleri .....	26
4.1.3 Vakumlama Sistemi .....	27
4.1.4 Plazma Reaktörü.....	28
4.1.5 Güç Kaynağı.....	29
4.1.6 Kalınlık Ölçüm Sistemi.....	30
4.2 TVA Plazması Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretilmesi.....	30
4.3 Termiyonik Vakum Ark (TVA) Tekniğinin Avantajları.....	37
<b>5. TVA İLE GÜMÜŞ-ALUMİNA (AG-AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) KATMANLI KOMPOZİT ÜRETİMİ.....</b>	<b>38</b>
5.1 Gümüş Plazmasının Akım- Voltaj Karakteristiği.....	40

**İÇİNDEKİLER (devam )**

	<b>Sayfa</b>
5.2 Alumina plazmasının Akım- Voltaj Karakteristiği.....	43
5.3 Ag ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Plazmalarının Optik Emisyon Spektrumları.....	46
5.4 Elektriksel Ölçüm Sonuçları.....	47
5.5 Optik Mikroskop Görüntüleri.....	50
5.6 Elektron Mikroskop Görüntüleri.....	51
<b>6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....</b>	<b>52</b>
<b>7. KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>54</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.....	6
2.2 Fiber takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi.....	7
2.3 Boron karbit tabakalı kompozit.....	8
3.1 Vakum Plazma sprej (VPS) yönteminin şematik gösterimi.....	11
3.2 Plazma püskürtme sprejinin şematik görünümü.....	12
3.3 Plazma sprej yönteminin kullanım alanlarının dağılımı.....	13
3.4 Buhar biriktirme yöntemleriyle elde edilmiş numuneler.....	15
3.5 Plazma destekli kimyasal buhar çökeltme sistemi (PACVD).....	15
3.6 Rezistans ısıtıcı ve indüksiyon akımı ile buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.....	18
3.7 Elektronların buharlaştırılacak malzeme tarafından yönlendirildiği sistem.....	19
3.8 Katodik ark PVD sistemi.....	20
3.9 Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik görüntüsü.....	22
3.10 İyon demetiyle biriktirme yönteminin şematik gösterimi.....	23
4.1 Termiyonik Vakum Ark sisteminin şematik gösterimi.....	25
4.2 Vakum ünitesinin şematik gösterimi.....	26
4.3 TVA sisteminin dijital 3 girişli basınçölçer monitörü.....	26
4.4 TVA sisteminin mekanik pompası.....	27
4.5 TVA sisteminin difüzyon pompası.....	28
4.6 TVA sisteminin önden görünüşü.....	28
4.7 TVA sisteminin güç kaynağı.....	29
4.8 Kalınlık ölçüm cihazı.....	30
4.9 TVA katot ve anodunun şematik gösterimi.....	31
4.10 Elektron demetinin anot materyali üzerine odaklanmasına Whentelt silindirin etkisi.....	32
4.11 Elektron Tabancası.....	32
4.12 Anot olarak kullanılan tungsten potanın şematik gösterimi.....	33
4.13 Elektron tabancası ve tek potalı anot.....	34



**ŞEKİLLER DİZİNİ ( devam )**

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
4.14 Doğrudan ısıtılan katot ile TVA' da metal buharı plazmasının yayılması.....	35
4.15 Çoklu kaplama yapabilen Termiyonik Vakum Ark (TVA) sisteminin şematik gösterimi ... ..	37
5.1 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Ag tabakalı kompozitinin şematik gösterimi. ....	39
5.2 Gümüş materyalinin TVA sistemiyle oluşturulan plazma hali .....	39
5.3 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> materyalinin TVA sistemiyle oluşturulan plazma hali.....	40
5.4 Kalınlık ölçüm cihazı.....	40
5.5 Gümüş ve Alumina plazmasının Akım-Voltaj karakteristiği.....	41
5.6 Gümüşün tipik Optik Emisyon Spektroskopisi.....	42
5.7 Ag ve Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> deşarjlarının Optik Emisyon Spektroskopisi.....	42
5.8 Elektriksel ölçüm düzeneğinin şematik diyagramı .....	43
5.9 Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kompozitinin akım-voltaj karakteristiği .....	44
5.10 Ag-Alumina kompozitin optik mikroskop görüntüsü .....	44
5.11 Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> tabakalı kompozit için SEM görüntüleri .....	45
5.12 Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının SEM görüntüsü ve nano tabakalarının EDX analizi.....	45
5.13 Si tabandan sökülmüş Ag-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının SEM görüntüsü.....	46

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<b><u>Çizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1 Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri.....	9
3.2 PVD ile CVD arasındaki farklar .....	17
5.1 Kaplama anında ölçülen filament akımı, deşarj akımı, breakdown voltajı, basınç ve kalınlık verileri.....	38
5.2 Elektriksel ölçüm verileri.....	49

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
A	Amper
ac	Alternatif akım
<b>B</b>	Mantetik alan
d	Elektrotlar arası uzaklık
dc	Doğru akım
e	Elektronun yükü
<b>E</b>	Enerji, elektrik alan
eV	elektronvolt
cm	Santimetre
h	Planck sabiti
g	Gaz
<b>i</b>	Akım
$I_e$	Elektronik akım
$I_f$	Flament ısıtma akımı
$I_{ark}$	Ark akımı
$I_{max. deşarj}$	Maksimum deşarj akımı
<b>j</b>	Akım yoğunluğu
k	Boltzmann sabiti
kV	Kilovolt
L	İndüksiyon, Plazma boyutları
$\ell$	Ark uzunluğu
M	Moleküler ağırlık, Nötral atom kütlesi
m	Kütle
$m_e$	Elektron kütlesi
mTorr	MiliTorr
$n_i$	İyon yoğunluğu
$n_e$	Elektron yoğunluğu
n	Plazma yoğunluğu

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devamı)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
N	Nötral atom sayısı
nm	Nanometre
P	Güç
$p_s$	Doymuş buhar basıncı
R	Direnç
r	Anoda uzaklık
S	Kesit alan
T	Sıcaklık
$T_g$	Gaz sıcaklığı
$T_u$	Uyarılmış atom sıcaklığı
$T_i$	İyon sıcaklığı
$T_e$	Elektron sıcaklığı
$T_a$	Ayrışmış atom sıcaklığı
$T_f$	Foton sıcaklığı
$T_p$	Plazma sıcaklığı
$U_{ark}$	Ark voltajı
$U_{atş}$	Ateşleme voltajı
$U_a$	Anot potansiyel düşümü
$U_c$	Katot potansiyel düşümü
$U_{plazma}$	Plazma voltajı
$U_i$	İyonizasyon potansiyeli
x	Uzaklık
v	Hız
V	Potansiyel farkı
$V_B$	Breakdown voltajı
$\epsilon_0$	Boşluğun elektriksel geçirgenliği
$\lambda_D$	Debye uzunluğu
$\lambda$	De Broglie dalgaboyu, Buharlaşma ısısı

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (Devamı)**

<b><u>Simgeler</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
$\phi$	Elektrotlar arası aç
$\rho$	Yoğunluk
PVD	Fiziksel buhar biriktirme (Physical Vapour Deposition)
CVD	Kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition)
TVA	Termiyonik Vakum Ark
HV	Yüksek voltaj
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectrometry
SEM	Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
VPS	Vakumda plazma püskürtme
CVD	Kimyasal buhar depolama
APCVD	Atmosferik basınçlı kimyasal buhar depolama
LPCVD	Düşük basınçlı kimyasal buhar depolama
MOCVD	Metal-organik kimyasal buhar depolama
PALVD	Plazma destekli kimyasal buhar depolama
CVI	Kimyasal buhar infiltrasyonu

## 1. GİRİŞ

Bir kompozit malzeme iki veya daha fazla bileşenden meydana gelir. Bu bileşenler mikro veya nano seviyede bir araya getirilirler ve birbirleri içinde çözünmezler. Takviye elemanı olarak adlandırılan bileşen; fiber, parçacık veya ince levha şeklinde olabilir. Diğer bileşen ise matris fazıdır. Kompozit malzemenin istenen özellikleri bileşenlerinin özelliklerinden daha iyi olması beklenir.

Zamanla hem takviye malzemelerinde, hem de matris malzemelerde birçok yeniliklere gidilmekte, yeni kombinasyonlar uygulanarak, çok daha yüksek performans değerlerine sahip olan yeni kompozit malzemeler yapılmaktadır.

Kompozit malzemeler, çok hızlı bir gelişme göstermiş ve bu gelişmeyi hızla sürdürmeye devam eden malzemeler olup, geleceğin malzemeleri niteliğine ulaşmış bulunmaktadır (Eroğlu, 2004).

Kompozit malzemelerin üretim tekniklerinde yeni yöntemlerin uygulanması ve zamanla nano teknolojinin gelişmesiyle daha üstün özelliklere ve daha küçük boyutlara sahip kompozit malzemeler üretilmeye başlanmıştır. Bu üretim tekniklerinden biride plazma yardımcı kaplama tekniğidir.

Mikroskopik açıdan plazma, sürekli hareket eden ve etkileşen yüklü parçacıklar topluluğu olarak ifade edilir. Plazma, iyonlar, elektronlar, yüksüz atom ve moleküller ile fotonlardan oluşan, bazı atomlar iyonlaşırken bazı iyonların elektronlarla birleşip nötral atoma dönüştüğü, bir karışım olarak da düşünülebilir (Kikuchi,1988).

Bu çalışmada, plazma ile metal matrisli tabakalı kompozit malzeme üretimi için Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi vakum koşullarında elektron tabancası yardımıyla kaplanacak malzemenin buhar deşarjından istenilen taban üzerine (metal, seramik, plastik vb.) nano kalınlıkta depolama yapan yeni bir teknik kullanılmıştır. Bu teknik ile Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (metal-seramik) nano tabakalı kompozit malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir ve bazı önemli analizleri yapılmıştır.

## 2. KOMPOZİT MALZEMELER

Kullanım amacı tek başlarına yeterli olmayan farklı iki veya daha fazla malzemeyi istenen özellikleri sağlayacak şekilde belirli şartlar ve oranlarda fiziksel olarak (nano veya mikro yapıda) bir araya getirilerek elde edilen malzemeye **kompozit** malzeme denir (Şahin, 2000).

Kompozit malzemelerde yapıyı oluşturan bileşenler birbiri içinde çözünmezler ve kimyasal olarak reaksiyona girmezler. Ancak metalik sistemlerde, bir miktar çözünme bileşenler arasında kompozit özelliklerini etkileyebilen ara yüzey reaksiyonları görülebilir (Özcan, 2008).

Kompozit malzemelerin bilinen en eski ve en geniş kullanım alanı inşaat sektörüdür. Saman ile liflendirilmiş çamurdan yapılan duvarlar ilk kompozit malzeme örneklerindedir. Bugün taş, kum, kireç, demir ve çimento ile oluşturulan kompozit malzeme evlerimizi oluşturmaktadır. Günümüzde kompozit malzemelerin kullanım alanı çok genişlemiştir; şehircilik, ev aletleri, elektrik ve elektronik sanayi, havacılık ve uzay sanayi, otomotiv sanayi, iş makineleri, inşaat sektörü, tarım sektörü vb.

Kompozitlerin özgül ağırlıklarının düşük oluşu hafif konstrüksiyonlarda kullanımda büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bunun yanında, fiber takviyeli kompozit malzemelerin korozyona dayanımları, ısı, ses ve elektrik yalıtımı sağlamaları da ilgili kullanım alanları için bir üstünlük sağlamaktadır.

Kompozitlerin çekme ve eğilme mukavemeti birçok metalik malzemeye göre çok daha yüksektir. Böylece malzemedan tasarruf yapılarak, daha hafif ve ucuz ürünler elde edilir. Büyük ve karmaşık parçalar tek işlemlerle bir parça halinde kaplanabilir. Bu da malzeme ve işçilikten kazanç sağlar. Uygun malzemelerin seçilmesiyle çok üstün elektriksel özelliklere sahip kompozit ürünler elde edilebilir. Bugün büyük enerji nakil hatlarında kompozitler iyi bir iletken ve gerektiğinde de başka bir yapıda, iyi bir yalıtkan malzemesi olarak kullanılabilirler. Kompozitler, hava etkilerinden, korozyondan ve çoğu kimyasal etkilerden zarar görmezler. Bu özellikleri nedeniyle



kompozit malzemeler kimyevi madde tankları, boru ve aspiratörler, tekne ve diğer deniz araçları yapımında güvenle kullanılmaktadır. Özellikle korozyona karşı mukavemetli olması, endüstride birçok alanda avantaj sağlamaktadır. Isı iletim katsayısı düşük malzemelerden oluşabilen kompozitlerin ısıya dayanıklılık özelliği, yüksek ısı altında kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bazı özel katkı maddeleri ile kompozitlerin ısıya dayanımı arttırılabilir. Bu özellikleri ile kompozitler otomobil gövde ve tamponlarından deniz teknelerine, bina cephe ve panolarından komple banyo ünitelerine, ev eşyalarından tarım araçlarına kadar birçok sanayi kolunda kullanılabilen bir malzemedir (Eroğlu, 2004).

## 2.1 Metal Matrisli Kompozitler

Metallerin ve metal alaşımlarının birçoğu yüksek sıcaklıkta bazı özellikleri sağlamalarına rağmen kırılğan olmaktadır. Buna karşılık fiber (metalik fiber) ile metalden oluşturulan **metal matrisli kompozitler** yüksek sıcaklıkta dahi yüksek mukavemet özelliklerini göstermektedirler. Tungsten ve/veya molibden fiberler ile alüminyum ve/veya bakırdan oluşturulan metal matrisli kompozitler en çok kullanılan örneklerdir (Özcan, 2008).

## 2.2 Seramik Matrisli Kompozitler

Metal veya metal olmayan malzemeler ile seramikten oluşturulan **seramik matrisli kompozitler**, yüksek sıcaklıklara karşı çok iyi dayanım göstermekle birlikte rijit ve gevrek bir yapıya sahiptirler. Ayrıca elektriksel olarak çok iyi bir yalıtkanlık özelliği gösterirler. Üç ayrı grupta toplanan seramik matrisli kompozitler şu şekilde sıralanabilir:

A) Seramik-Seramik Matrisli Kompozitler: İki seramik fazın karışmasından oluşmaktadır. Örnek olarak saf çini verilebilir.

B) Cam-Seramik Matrisli Kompozitler: Yaşamımızın her alanında kullanılan porselen, bir cam-seramik matrisli kompozittir. Kuartz fiberlerin bir cam matris içerisine çini ile birlikte hamurlanıp yerleştirilmesiyle oluşturulur.

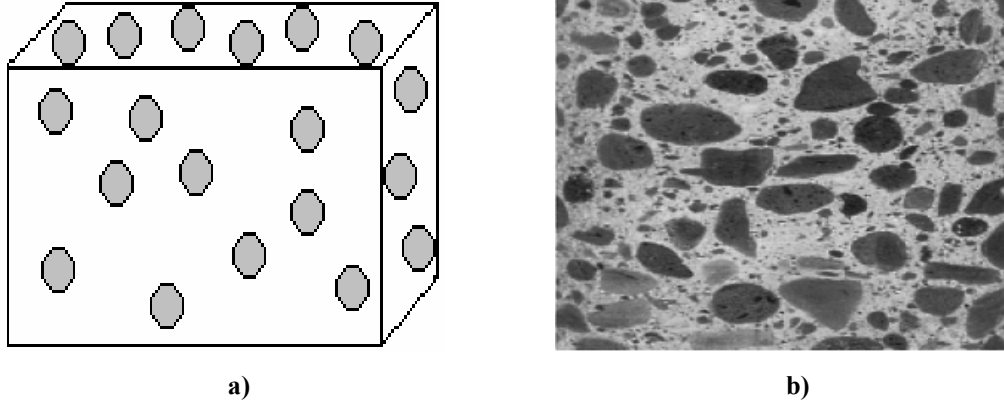
C) Metal-Seramik Matrisli Kompozitler: Bu tür kompozitler, çok fazlı bir yapıya sahiptirler. Bir metal faz, bir seramik faz, bir gözenek fazı ve daha çok karmaşık formlarda seramik ve metalin ilave fazlarından meydana gelmiştir. Endüstride kullanılan ve elmas olarak adlandırılan kesme aletleri en iyi örneklerdir. Bir kobalt matris içine dağılmış tungsten karpit parçalarından oluşan bu kompozit malzeme büyük bir dayanım sağlamaktadır (Özcan, 2008).

Kompozitler, takviye malzemelerinin matris malzemesinin içerisindeki şekillerine göre parçacık takviyeli, fiber takviyeli ve katmanlı (laminar) takviyeli olmak üzere üç sınıfa ayrılabilir.

## **2.3 Kompozit Malzeme Türleri**

### **2.3.1 Parçacık Takviyeli Kompozit Malzemeler**

Parçacık takviyeli kompozit malzemelerde, belirgin, uniform olarak dağılmış sert, gevrek malzeme daha yumuşak bir matrisle kuşatılmıştır. Parçacık takviyeli kompozit malzemeye en güzel örnek olarak çimento ve çakılın bir karışımı olan beton verilebilir. Şekil 2.1.a'da parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik olarak gösterimi verilmiştir ayrıca Şekil 2.1.b'de ise kum ve çakıl takviye malzemesinin çimento matrisine karıştırılması ile oluşturulan bir parçacık takviyeli kompozit malzeme olan betonun taramalı elektron mikroskop (SEM; Scanning Electron Microscope) görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.1. a) Parçacık takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi. b) Betonun SEM görüntüsü.

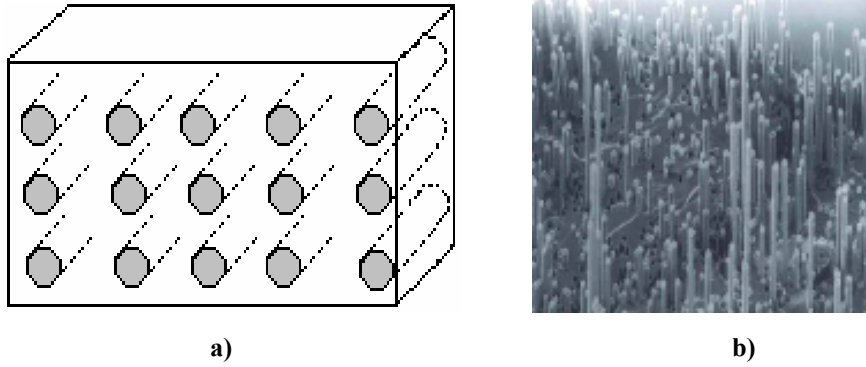
### 2.3.2 Fiber Takviyeli Kompozitler Malzemeler

Matris malzeme içerisine güçlü, bükülmez, kırılğan fiberlerin ilavesi ile fiber takviyeli kompozitlerin mukavemeti, yorulma direnci ve ağırlığa göre mukavemet oranı iyileşmektedir. Fiberler, uygulanan yükün büyük bir kısmını taşıırken matris malzeme yükün fiberlere transferini sağlamakta, süneklik (bir kuvvet uygulandığında kırılmaksızın malzemenin kalıcı deformasyona karşı dayanma yeteneği) ve tokluk (bir malzemenin darbeye ve şoka karşı enerji depolama yeteneği) temin etmektedir. Dağılım mukavemetlendirilmiş kompozitlerin aksine kompozitlerin mukavemeti hem oda sıcaklığında, hem de yüksek sıcaklıklarda artar.

Çok çeşitli takviye malzemeler kullanılmaktadır. Yıllarca toprak kerpiçlerin mukavemetlendirilmesi için saman kullanılmıştır. Çelik takviye çubuklar, beton yapılar içine yerleştirilmiştir. Polimer matris içerisine yerleştirilen cam fiberler, ulaşım ve havacılık uygulamaları için kullanılmıştır. Boron, karbon ve polimerlerden yapılmış fiberler mükemmel takviye sağlamaktadır. Hatta whiskers olarak adlandırılan tek kristaller çok ince seramik malzemeler geliştirilmektedir.

Takviye malzemeler aynı zamanda farklı yönlenme şekillerine göre de dizilmektedir. Genellikle cam elyafında (fiberglass) kısa, rast gele yönlenmiş cam fiberler bulunmaktadır. Tek yönlü olarak dizilmiş sürekli fiberler, özel olarak

anizotropik özellikler oluşturmak için kullanılabilirler. Fiberler, kumaş şeklinde dokunabilir veya şeritler şeklinde üretilirler. Şerit katmanlarının yönleri dönüşümlü olarak değiştirilebilir. Şekil 2.2’de fiber takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi ve karbon fiber kompozit malzemenin SEM görüntüsü verilmiştir.



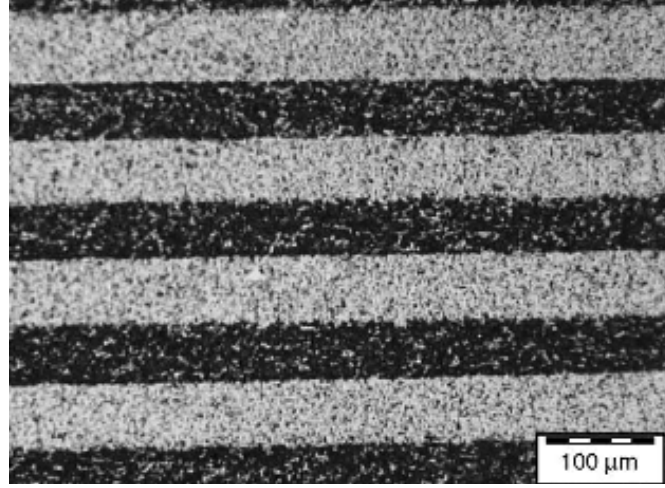
Şekil 2.2. a) Fiber takviyeli kompozit malzemenin şematik gösterimi. b) Fiber takviyeli karbon-fiber kompozit malzemenin SEM görüntüsü (Akbulut, 2007).

### 2.3.3 Katmanlı Kompozit Malzemeler

Katmanlı (laminar) kompozit malzemeler çok ince kaplamalar, kalın koruyucu yüzeyler, giydirmeler, ikili metallere, katmanlar ve pek çok diğer malzemelerden meydana gelmektedir. Pek çok katmanlı kompozit düşük maliyet, yüksek dayanım veya hafifliği korurken, korozyon direncini geliştirmek için tasarlanmaktadır. Diğer önemli uygulamaları ise üstün aşınma veya abrasiv aşınma direnci, gelişmiş görünüm ve mükemmel ısı genleşme özellikleridir. Katmanlı kompozit malzemeye en basit örnek olarak ağaç kaplama katmanlarının dönüşümlü olarak yapıştırıldığı kontra plaklar verilebilir. En çok kullanılan katmanlı kompozit malzeme olan boron karbitin SEM görüntüsü Şekil 2.3’ de verilmiştir (Erdoğan, 1998).

Katmanlı kompozitlerin sayısı öylesine fazla ve uygulamaları ve amaçları öylesine çoktur ki davranışları hakkında genelleme yapılması mümkün değildir. Emniyet gözlükleri, polivinil butiral gibi plastik bir yapıştırıcı ile iki cam parçasının birleştirildiği katman malzemelerdir; Cam kırıldığı zaman yapıştırıcı, cam parçacıklarının ayrılmasını önler. Katmanlı kompozit malzemeler, motorlarda, yalıtım

için dişlilerde, basınç devre kartlarında ve formika ve mobilya gibi dekoratif parçalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.3. Boron karbit tabakalı kompozit (Tariolle, 2004).

#### 2.4 Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı

Mühendislik uygulamalarında, özellikle de mekanik uygulamalarda, dışarıdan gelecek herhangi bir darbeye karşı beklenmedik sonuçların ortaya çıkmaması için, malzemenin gerekli en uygun cevabı veya davranışı verebilmesi istenir. Uygulama yerine ve kullanım amacına göre malzemenin maruz kalabileceği darbeler çok farklı şekillerde olabilir. Buna karşın darbeye karşı olan cevap da malzemenin kendisi tarafından belirlenir. Şöyle ki, metal ve metal alaşımları durumunda darbeye karşı malzemenin cevabı; elastik uzama ve plastik şekil değiştirme şeklinde meydana gelir ve darbe hasarı, çoğunlukla, çarpma yüzeyinde başladığı anda kolay bir şekilde tespit edilebilir. Darbe hasarı, metal malzemelerde genellikle bir tehlike işareti olarak kabul edilmez, çünkü metaller plastik şekil değiştirebilme kabiliyetlerinden dolayı, büyük miktarda enerjiyi absorbe edebilirler. Metaller sabit bir gerilme durumunda yapı sertleşmeden önce çok büyük uzamalarda akabilirler, bu nedenle oluşacak kopmalar ani ve beklenmedik olmaz. Kompozit malzemelerde bir darbe sonucunda oluşan hasar, çarpmanın türüne göre darbeye maruz kalmayan yüzeyde meydana gelebilir, içyapıda oluşan delaminasyonlar (tabakalar arasında ayrılma) şeklinde başlayabilir. Yukarıda da

bahsedildiği gibi metallerde darbe cevabı, plastik Şekil değiştirme sonucunda bir kopma Şeklinde olmasına rağmen, kompozitler çok değişik modlarda hasara uğrayabilirler ve bu hasar modlarında parçanın yapısal bütünlüğünde ciddi bir deđiŐiklik meydana gelmez. Genellikle gözle görülmeyen veya çok zayıf bir Şekilde görülebilen hasarlar meydana gelir. Plastik matrisli kompozit malzemelerin hemen tamamı kırılıgandır, bu nedenle enerjiyi sadece elastik deformasyon ve bazı hasar mekanizmaları (matris kırılması, delaminasyon, fiber kopması v.b) sayesinde absorbe edebilirler, diğer bir deđiŐle enerjiyi absorbe etmede plastik deformasyonun katkısı hemen hemen hiç yoktur. Bu anlamda hasar direnç ifadesi, bir kompozit sistemde meydana gelen darbe hasarının miktarını ifade eder. Tabakalı kompozit malzemede, eğer kalınlık boyunca bir takviye söz konusu değil ise, en büyük darbe hasarı enine doğrultuda olacaktır. Bunun en önemli nedenlerinden birisi, enine doğrultudaki malzeme elastik özelliğinin düşük olmasıdır. Bu nedenle bir kompozit malzemenin enine hasar direnci nisbeten zayıftır. Tabakalar arası gerilmeler (kesme ve normal) tabakalar arası mukavemetin düşük olmasından dolayı ilk kopmalara sebep olan gerilmelerdir. Darbe esnasında kompozit malzemeye aktarılacak enerjinin miktarı, malzemenin bu enerjiyi sönümleyebilmesi için olacaktır hasar modlarını belirleyecektir. Bu nedenle tabakalı bir kompozit malzemede darbenin oluşturacağı hasarı tahmin etmek için darbe hızının belirlenmesi çok büyük bir öneme sahiptir (Ceyhun, 2003).

### 3. KOMPOZİT MALZEMELERİN ÜRETİM TEKNİKLERİ

Kompozit malzeme üretimi teknikleri mikro ve nano yapıda olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Bu üretim teknikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Nano boyutlu üretim teknikleri ile mikro yapıda kompozit malzemeler üretilebilmektedir.

Çizelge 3.1 Kompozit Malzeme Üretim Teknikleri (Evcin, 2006).

Mikro Boyutta Üretim Teknikleri	Nano Boyutta Üretim Teknikleri
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sıvı Metali Emdirilmesi</li> <li>➤ Sıkıştırılmalı Veya Sıvı Dökme Döküm Tekniği</li> <li>➤ İnfiltrasyon Tekniği</li> <li>➤ Sıvı Metal Karıştırılması</li> <li>➤ Hızlı Katılaştırma Yöntemi</li> <li>➤ Yarı Katı Karıştırma</li> <li>➤ Toz Metalurjisi Tekniği</li> <li>➤ Difüzyon Bağlama Ve Vakumda Presleme</li> <li>➤ Sıcak Presleme Ve Sıcak İzostatik Presleme Yöntemi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Plazma Püskürtme Kaplama</li> <li>➤ Sol-Gel Kaplama</li> <li>➤ Kimyasal Buhar Biriktirme</li> <li>➤ Fiziksel Buhar Biriktirme</li> <li>➤ Termal Buharlaştırma <ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektron Bombardıman İle Buharlaştırma</li> <li>• Katodik Vakum Ark</li> <li>• Sıçratma Yöntemi</li> </ul> </li> <li>➤ İyon Demeti Biriktirme Yöntemi</li> <li>➤ İyon Grubu Demeti Biriktirme Yöntemi</li> </ul>

#### 3.1 Plazma Püskürtme Kaplama

Maddenin katı, sıvı ve gaz hâminden başka çok yüksek sıcaklıklarda karşılaşılan, plazma olarak adlandırılan dördüncü bir hâli daha vardır. Langmuir'e göre ise plazma terimi; içerisinde molekül, atom, iyon ve elektron bulunduran malzemenin iyonize edilmiş halini ifade eder. Örneğin güneş tamamen plazmadan meydana gelmiştir. Sürekli tüm gezegenlerin etrafını saran dalgalar yayar. Yıldızların içindeki madde de plazma halindedir. Plazma, eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon bulundurur.

Örneğin, azot molekülü ısıtılırsa önce azot atomu, sonra da azot iyonu oluşur. Bu oluşum reaksiyonu;  $N_{2(g)} \rightarrow 2N_{(g)} \rightarrow 2N^+_{(g)} + 2e^-$  şeklindedir. Burada molekül, atom, iyon ve elektron bulunan bir karışım meydana gelir (Evcin, 2006).

Plazmanın başlıca iki önemli avantajı vardır.

- Birincisi, bilinen bütün malzemeleri eritebilecek derecede yüksek sıcaklığa sahip olması,
- ikincisi ise, diğer malzemelere göre daha iyi ısı transferi sağlamasıdır.

Plazma püskürtme tekniğinin yüksek işlem sıcaklığı nedeniyle ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışmaya imkân sağlar. Toz formunda ve belirli tane boyutlarında olan tüm malzemeler bu işlemde kullanılabilir.

Plazma püskürtme yöntemiyle gerçekleştirilen seramik kaplamalar birçok metalden daha iyi aşınma ve erozyon direncine sahiptirler ve dizel motorları da dâhil erozyon ve aşınma dirençli uygulamalarda yaygın olarak kullanılırlar. Bununla beraber, alevle püskürtmedeki kadar olmasa da, poroziteler nedeniyle plazma püskürtmeyle oluşturulan kaplamalar korozyon için yetersiz kalabilmektedir.

Plazma püskürtme işlemi koruyucu atmosferlerde yapılmalıdır. Atmosferik plazma püskürtme (APS) İnert plazma püskürtme (İPS), soygaz veya koruyucu bir gaz atmosferi altında gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemde soygaz olarak genellikle Ar kullanılır.

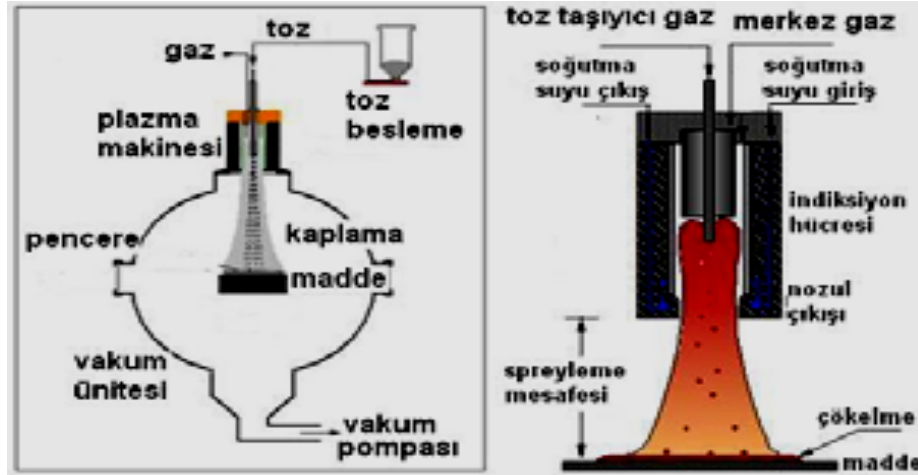
Vakum Plazma Püskürtme (VPS) yöntemi ise, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilir. Püskürtme parçacıkları, seyreltilmiş bir ortamdan daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Dolayısıyla kaplama tabakası, daha yüksek kinetik enerjiye sahip parçacıklarla üretilir. Sonuç olarak bu tip kaplamalar, düşük oranlarda porozite ve oksit içerirler.



Plazma kaplama sistemi:

- Püskürtme tabancası (plazma üfleci),
- Güç ünitesi,
- Gaz besleme ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Soğutma ünitesi ve
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

Vakum Plazma püskürtme (VPS) yöntemi ise, vakum altında veya düşük basınçlı gaz ortamında gerçekleştirilir (Şekil 3.1). Püskürtme partikülleri, seyreltilmiş bir ortamdan daha az soğuyarak ve daha az yavaşlayarak geçerler. Dolayısıyla kaplama tabakası, daha yüksek kinetik enerjiye sahip partiküllerle üretilir. Sonuç olarak bu tip kaplamalar, düşük oranlarda porozite ve oksit içerirler. Plazma püskürtme teknolojisindeki en son yeniliklerinden birisi de, kaplama işleminin su altında (SPS) gerçekleştirilmesidir.

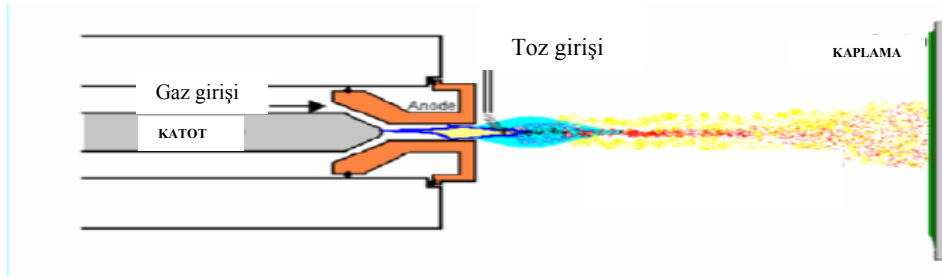


Şekil 3.1 Vakum Plazma püskürtme (VPS) yönteminin şematik gösterimi.

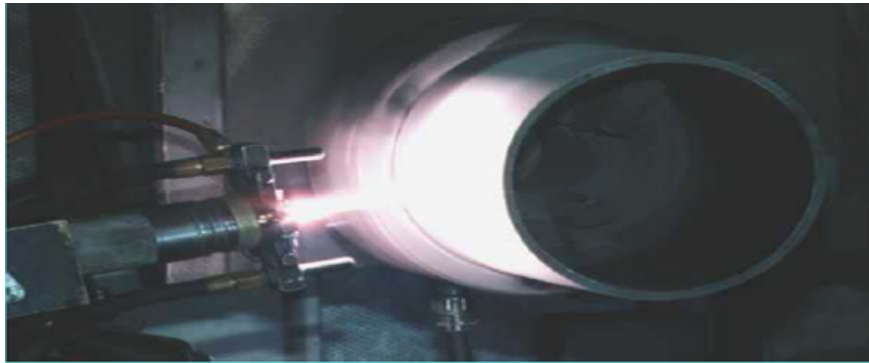
Plazma kaplama sistemi:

- Püskürtme tabancası (plazma üflecı),
- Güç ünitesi,
- Gaz besleme ünitesi,
- Toz besleme ünitesi,
- Soğutma ünitesi ve
- Kontrol ünitesinden meydana gelmektedir.

Püskürtme tabancası, kaplama sisteminin en önemli çalışma ünitesidir. Anot olarak saf bakır (Cu) ve katot olarak da %2 toryum dioksit (ThO<sub>2</sub>) katkılı tungsten (W) 'ın kullanıldığı tabancada plazma, bu iki elektrot arasındaki elektrik arkında plazma gazlarının iyonizasyonu ile elde edilir. Kullanılan plazma gazları, katottan etrafından ve aynı zamanda nozul görevini de gören anodun içerisinde geçirilir (Evcin A, 2006).



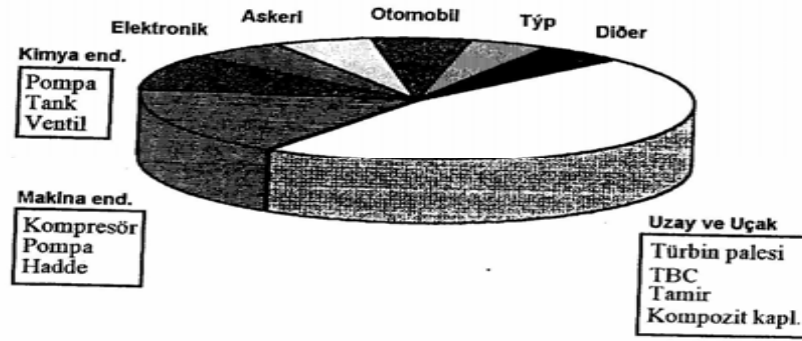
a)



b)

**Şekil 3.2** a) Plazma püskürtme sisteminin şematik görünümü b) Çalışma şekli ve kaplama yaparken çekilmiş fotoğrafı (Eroğlu., 2004).

Plazma püskürtme yöntemiyle üretilen kaplamalar, endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Plazma püskürtme yönteminde, ergime noktası yüksek metal ve alaşımlarla çalışılabilmesi nedeniyle, sayısız kaplama tozlarının ve kombinasyonlarının farklı ana malzemeler üzerine uygulanması söz konusudur. Bu durum, üretilen kaplamaların kullanım potansiyelini artırmaktadır. Şekil 3.3' de kaplamaların kullanıldığı genel endüstri dalları verilmektedir.



Şekil 3.3 Plazma püskürtme yönteminin kullanım alanlarının dağılımı.

### 3.2 Sol-Jel Kaplamalar

Sol-jel yöntemi, bir sıvı faz içinde bulunan katı taneciklerden oluşan kolloidal süspansiyonların (sol) ve sonrasında sürekli bir sıvı faz içerisinde üç boyutlu katı inorganik ağ yapılarının (jel) oluşmasını içerir. Sol-jel teknolojisi, çözelti formundan yola çıkılarak farklı uygulama alanlarına yönelik olarak seramik, cam ve kompozit malzemeler üretim tekniğine verilen genel isimdir.

Bu yöntem, kolloidal boyuttaki kristal olmayan tanecikleri kullanarak sulu veya susuz bir ortamda, metal oksitlerin kararlı çözeltilerinin hazırlanmasına dayanır. Kolloidal olarak kullanılan tanecikler 500 nm ve daha altındaki boyutlara sahip taneciklerdir ve optik mikroskopla görülemezler, çünkü en büyük boyutları ışığın dalga boyuna eşittir. Bu yöntemde temel özellik, sulu bir çözücü içerisinde metal bileşiklerini, kendi başlangıç birimlerine dağıtmaktır. Bu amaçla çeşitli başlangıç maddeleri kullanılmaktadır. Sol-jel sentezlenmesi başlangıç maddelerine göre iki ayrılır:

- Metal-organik: organik çözücülerde metal alkoksitlerle yapılır.
- İnorganik: sulu çözeltilerde (klorür, nitrat, vb) metal tuzları ile yapılır. Bu yol ucuzdur ama reaksiyonlarının kontrolü zordur.

#### Sol-jel Uygulamaları:

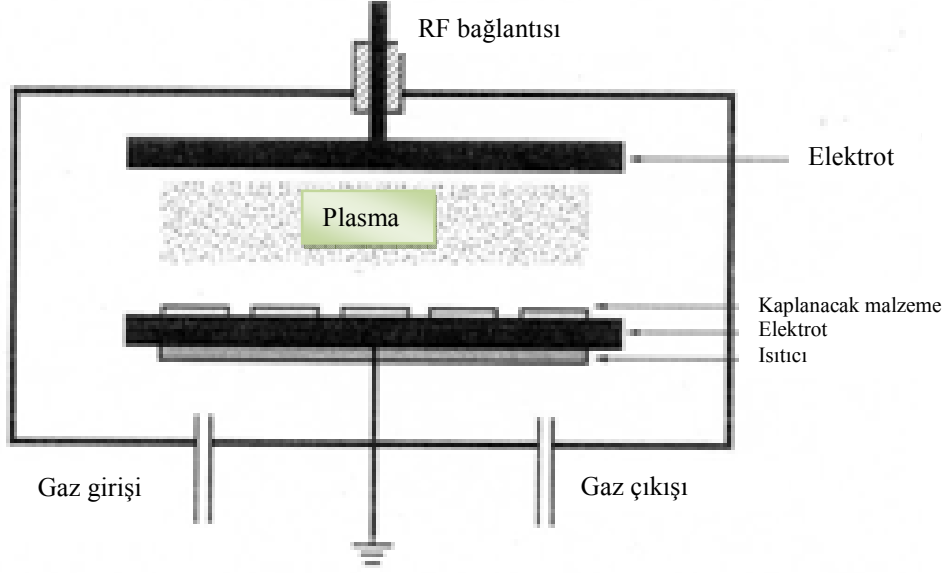
- Gelişen teknolojiye paralel olarak malzeme teknolojileri de gelişmiştir. Cam üretimi ile ivmelenen sol jel tekniği günümüzde film, fiber, monolit, toz, kompozit ve gözenekli ortamlar gibi çok farklı alanlarda kendine uygulama alan bulmuştur.
- Çelik yüzeylerinin sol-jel tekniği ile kaplaması yaygın olarak yüzeylerin paslanmaya, çizilmeye ve oksidasyona karşı koruyucu kaplamalarında kullanılmaktadır.
- Bu amaçla sol jel yöntemiyle hazırlanmış seramik, örnek olarak silisyum dioksit, çinko dioksit ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), esaslı kaplama uygulamaları yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 3.3 Kimyasal Buhar Biriktirme

Ortalama kapalı bir kap içinde ısıtılmış malzeme yüzeyinin buhar halindeki bir taşıyıcı gazın kimyasal reaksiyonu sonucu oluşan ‘katı’ bir malzeme ile kaplanması ‘kimyasal buhar biriktirme (Chemical Vapour Deposition, CVD) yöntemi olarak tanımlanır. Yöntem temelde buhar fazından ve basıncı istenilen değerlere ayarlanmış bir ortamda kimyasal yöntemle katı kaplama malzemesi üretmeye dayanır. CVD yönteminin şematik gösterimi Şekil 3.4’ de gösterilmiştir.

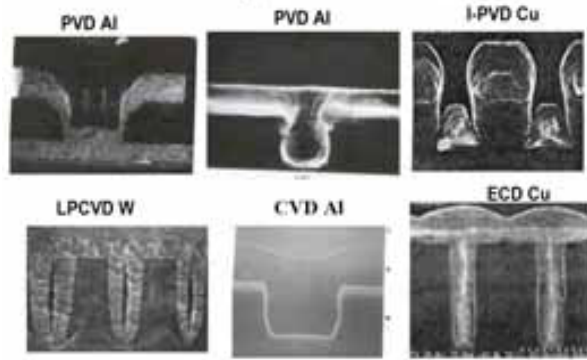
Kimyasal buhar biriktirme ile metalik, elementer ve seramik kaplamalar üretilir. Bunlar yaygın olarak elektronik sanayinde, makine imalat sektöründe kesici-delici-aşındırıcı yüzey üretiminde, yüzeylere yüksek sıcaklık direnci sağlayan seramik esaslı kaplamalar üretiminde gittikçe artan oranda kullanılmaktadır. Gerek kaplama tekniğinin alışılmış yöntemlerden farkı ve daha gelişmiş donanıma ihtiyaç göstermesi, gerekse üretilen kaplamaların ‘ileri teknoloji’ nitelikli olması ‘kimyasal ve fiziksel’ buhar

biriktirme yöntemlerini de “ileri teknoloji malzemeleri üretim teknikleri” arasına sokmaktadır.



Şekil 3.4 Plazma destekli kimyasal buhar çöktürme sistemi (PACVD) (Evcin A, 2006).

Kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle elde edilmiş değişik numuneler Şekil 3.5’ de verilmiştir.



Şekil 3.5 Kimyasal buhar biriktirme yöntemleriyle elde edilmiş numuneler.

Kimyasal buhar biriktirme yöntemi kaplama elde etmekten çok önce nikel ve titanyum metal üretiminde başarı ile kullanılmıştır. Ayrıca kalın tungsten ve alaşımları da bu yöntemle elde edilmiştir. Yöntemin metal üretiminden kaplama üretimine

uyarlanması ise yepyeni olanaklar yaratmıştır. Yöntem yeni malzemeler ve yeni kaplamalar elde etme olanağı sağlamıştır.

CVD aşağıdaki gibi prosesleri içerir:

- Atmosferik basınçlı kimyasal buhar çökeltme (atmospheric pressure chemical vapour deposition) (APCVD)
- Düşük basınçlı kimyasal buhar çökeltme (low pressure chemical vapour deposition) (LPCVD)
- Metal - organik kimyasal buhar çökeltme (metal-organic chemical vapour deposition) (MOCVD)
- Plazma destekli kimyasal buhar çökeltme (plasma assisted chemical vapour deposition) (PACVD)
- Lazer kimyasal buhar çökeltme (laser chemical vapour deposition) (LCVD)
- Fotokimyasal buhar çökeltme (photochemical vapour deposition) (PCVD)
- Kimyasal buhar infiltrasyonu (chemical vapour infiltration) (CVI)

### 3.4 Fiziksel Buhar Biriktirme

Kaplama yöntemleri kaplama malzemesinin bulunduğu fiziksel durum göz önüne alındığında;

- katı halden yapılan kaplamalar,
- çözültiden yapılan kaplamalar,
- sıvı ya da yarı sıvı halden yapılan kaplamalar ve
- buhar fazından yapılan kaplamalar olarak dört ana grupta irdelenebilir.

Özellikle bu kaplama yöntemlerinin içerisinde buhar fazından yapılan kaplamalar sınıfında yer alan Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD) ve Fiziksel Buhar Biriktirme (Physical Vapor Deposition, PVD) teknikleri bilinen diğer yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan kaplamaları kolaylıkla sağlayabilmektedir. Bu iki yöntemin temel prensibi vakum ortamında kaplanacak metali buharlaştırarak

kaplanacak yüzey üzerine biriktirmektir. Kimyasal Buhar Biriktirme ve Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemleri arasındaki farklar Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Faraday' in 1857 yılında bir metal teli vakum altında buharlaştırarak yaptığı kaplama bu yöntemin ilk uygulaması olarak kabul edilmektedir. 1888 yılında ise Kundt bu yöntem ile üretilmiş ince filmlerin optik özelliklerini incelemiştir.

II. Dünya savaşından sonra fiziksel buhar biriktirme yöntemi kesici takımlar için kullanılmaya başlanmıştır. 1970’li yıllardan sonra vakum ve elektrik-elektronik teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak yöntemi endüstriyel uygulamalarda yerini hızla almıştır.

Çizelge 3.2 PVD ile CVD arasındaki farklar

Teknoloji	Özellikler
Kimyasal Buhar Depolama (CVD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pahalı yüksek sıcaklık reaksiyon zincirlerine, vakum ortamına ihtiyaç duyar. Numunelerde sıcaklık ve basınç dayanıklı pahalı numunelerdir</li> <li>• Numune yüksek sıcaklıklarda bütünlüğünü korumalıdır.</li> <li>• Kullanılan yüksek enerji nedeniyle daha sağlam kaplamalar söz konusudur</li> <li>• Endüstriyel kullanımları daha yoğundur</li> </ul>
Fiziksel Buhar Depolama (PVD)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek basınç ortamına ihtiyaç duyar</li> <li>• Numune basınç dayanıklı olmalıdır</li> <li>• Numuneler üzerindeki değişiklikler sınırlıdır</li> <li>• Kaplamalar fazla dayanıklı değildir</li> <li>• Dekoratif uygulamaları oldukça yoğundur.</li> </ul>

### 3.5 Termal Buharlaştırma Yöntemleri

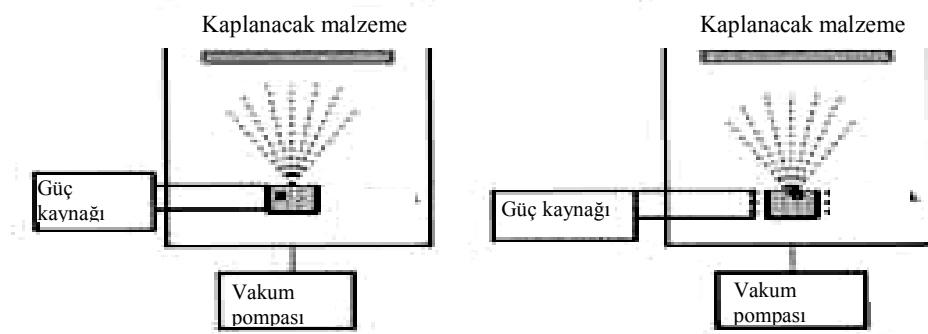
Bu yöntemde malzeme termal bir ısı kaynağı ile buhar haline getirilmektedir ve buharlaştırmanın yapıldığı şekle göre bu yöntem gruplara ayrılmaktadır:

- Rezistans ısıtıcı ve indüksiyon akımı ile buharlaştırma
- Elektron bombardımanı ile buharlaştırma
- Katodik ark yöntemi (Evcin, 2006).

### 3.5.1 Rezistans Isıtıcı ve İndüksiyon Akımı ile Buharlaştırma

Buharlaştırmanın ısı rezistansı ile sağlandığı durumda pota içerisindeki malzeme ısıtılmaktadır.

Buharlaştırma indüksiyon akımı ile yapıldığında ise su soğutmalı bakır tel sarılmış sıcaklığa dayanıklı potalara r.f. akımı uygulanarak buharlaştırma sağlanmaktadır.



Şekil 3.6 Rezistans ısıtıcı ve indüksiyon akımı ile buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi.

Bu yöntem diğer tekniklere göre daha ucuzdur fakat bazı önemli sınırlamaları vardır. Geometrik faktörler nedeniyle büyük çaplı üretimler çok zor ya da mümkün değildir ve düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler için uygulanabilir. Potanın da sıcaklıktan etkilenecek buharlaşması durumunda kaplama safiyeti bozulabilmektedir.

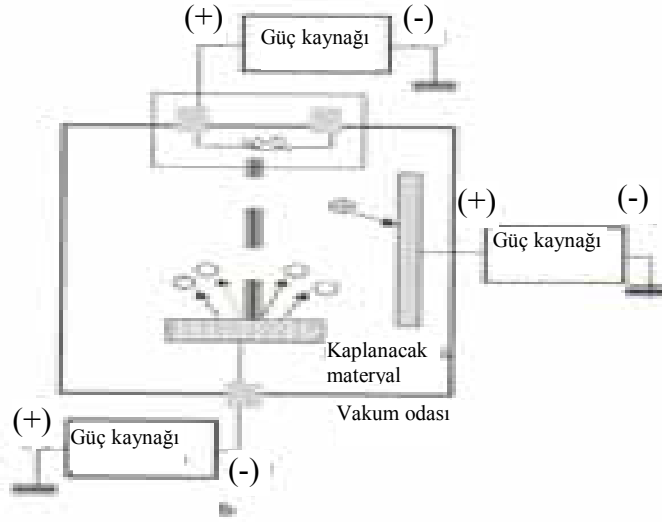
### 3.5.2 Elektron Bombardmanı ile Buharlaştırma

Bu yöntemde bir elektron kaynağı tarafından sağlanan elektronlar ile malzeme bombardımana tutularak buharlaşma sağlanmaktadır.

Elektronların odaklanması kolaylıkla yapılabilmektedir. Bu nedenle yüksek güç yük yoğunlukları elde edilerek yüksek ergime sıcaklıklarına (>3500 °C) sahip malzemeler bile kolaylıkla buharlaştırılabilmektedir.

Elektronların da yönlendirmeleri kolay olduğundan yüzeyde tarama yaparak homojen buharlaştırma yapmak mümkün olmaktadır.





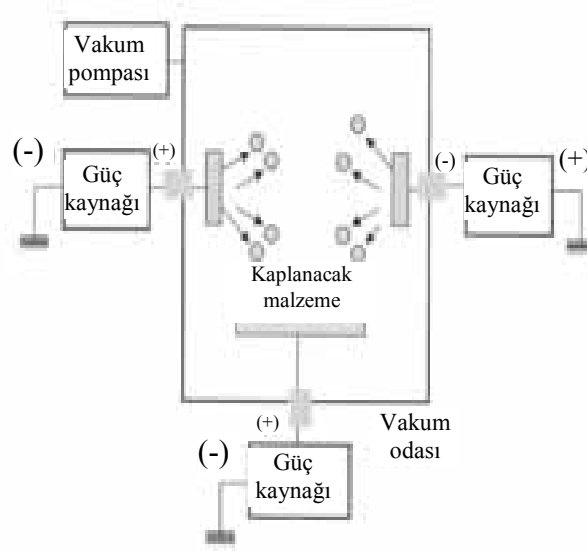
Şekil 3.7 Elektronların buharlaştırılacak malzeme tarafından yönlendirildiği sistem.

Elektron tabancasında ince ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir filaman tel üzerinden akım geçirilerek telin ısınması ve elektron yayması sağlanmaktadır (Şekil 3.7). Elde edilen elektronlar bir manyetik alan yardımı ile hızlandırılarak yönlendirilmektedir. Buharın tabanca üzerinde birikmesini ve tabancanın buhar bulutunu gölgelemesini engellemek için yönlendirme genellikle  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  veya  $270^\circ$  lik açılarla yapılmaktadır. Hızlandırma potansiyeli 6-10 kV mertebelerinde olan bu tip tabancalarda yalıtkan malzemeler de kolaylıkla buharlaştırılmaktadır (Evcin A., 2006).

### 3.5.3 Katodik Ark Yöntemi

Bu yöntemde buharlaştırılacak malzeme olan katot (-V) ve vakum odası duvarları arasına düşük voltaj (20-30 V) yüksek akım (100-200 A) özelliğine sahip bir potansiyel uygulanmaktadır.

Başlangıçta kısa devre yaparak tetikleme oluşturulup anot-katot arasındaki akım geçişi ile katot yüzeyinde çok küçük alanlarda sıcaklığı  $2500^\circ\text{C}$  civarında olan ark izinin (spot) oluşumu sağlanmaktadır (Şekil 3.8).



Şekil 3.8 Katodik ark PVD sistemi.

Katodun önünde yüksek elektron akışı ile buharlaşan atomların iyonizasyonu sağlanmaktadır. Buharlaştırma işlemi sırasında katot malzemesinin iyi bir şekilde soğutulmadığı ya da ark izinin etrafının fazla ısındığı durumlarda film kalitesini bozan droplet adı verilen büyük sıvı kütlelerinin oluşup yüzeyden kopması söz konusudur. Bu etkiyi azaltıcı veya yok edici sistemler geliştirilmiştir (Borneinstein, 2008).

### 3.6 Sıçratma Yöntemleri

İnce film kaplamalarda buhar kaynağı olarak yaygın olarak kullanılan ve diğer yöntemlere göre birçok avantaj sunan bir yöntem de katı malzemeyi pozitif iyonlarla bombardıman yaparak yüzeyden atomları sıçratma işlemidir.

- Diyot sıçratma
- Triyot sıçratma
- Manyetik alanda sıçratma

Sıçratma işleminde diğer malzemeler ile reaksiyona girmeyecek soy gaz örneğin argon iyonları ( $Ar^+$ ) kullanmak gerekmektedir. İyon kaynağı olarak iyon tabancası veya plazma kullanılabilir. Elde edilen iyonlar yüksek hızlarda hedef olarak adlandırılan

buharı elde edilecek malzeme yüzeyine çarptırılarak ya malzeme latisi içine girip kalabilir, ya enerjilerini bırakarak geri saçınabilir ya da yüzeyden bir atom koparma durumları ortaya çıkabilir.

Sıçratma işleminde iyonun yüzeyden atom koparması için kütlelerinin oldukça büyük olması gerekmektedir. Bu nedenle argon ile yapılan sıçratma işlemi diğer inert gazlara, örneğin helyuma göre daha verimli olmaktadır. Sıçratma yöntemi ile kaplama uygulamalarında daha çok plazma yani negatif, pozitif yüklü ve yüksüz parçacıklar, x-ışınları ve bunların çarpışmasının bulunduğu ortam iyon kaynağı olarak kullanılmaktadır.

#### ***i. Diyot Sıçratma***

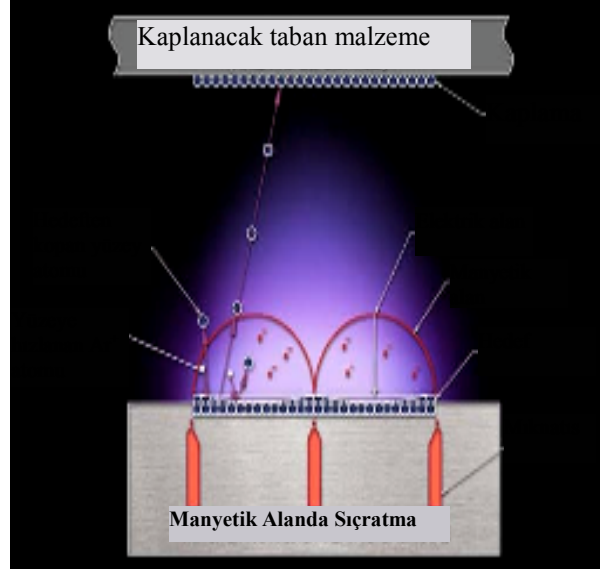
Bu yöntemde iki yüzey arasına bir potansiyel uygulanarak bir elektron akışı elde edilerek sıçratma gerçekleştirilmektedir. Ortama gaz verildiğinde ise yoğun atom çarpışmaları oluşmaktadır. Çarpışmalar sırasında bir elektron çarptığı atomdan bir elektron koparabilirse atom iyon haline geçmektedir.

#### ***ii. Triyot Sıçratma***

Bu sıçratma tekniğinde ise diyot sıçratma sisteminden farklı olarak anot ve katot arasına elektron yayan bir flaman ve elektron toplayıcı eklenmiştir. Böylelikle plazmanın iyon akım yoğunluğu artırılmaktadır.

#### ***iii. Manyetik Alanda Sıçratma***

Plazma kullanılarak yapılan sıçratma yöntemlerinde asıl amaç katottan çıkan elektronların anot yüzeyine doğru ilerlerken ortamdaki gaz atomları ile çarpışarak iyonizasyonu sağlamaktır (Şekil 3.9).



Şekil 3.9 Manyetik alanda sıçratma yönteminin şematik görüntüsü [Angstromsciences, 2008].

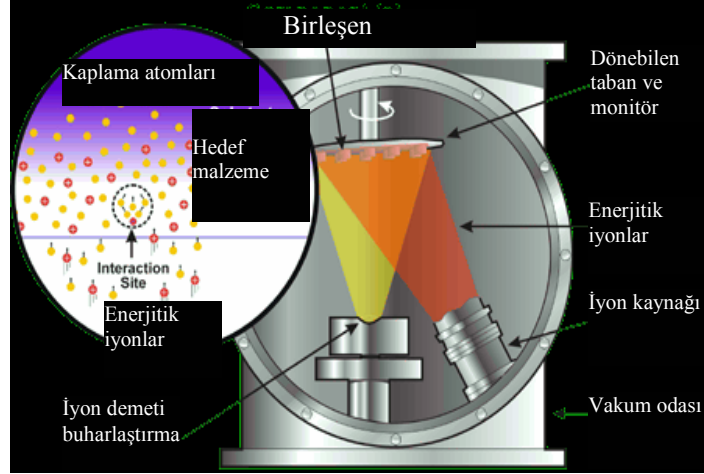
Bu iyonizasyonun katot yüzeyine yakın bölgelerde olması sıçratma verimi arttırdığından katot malzemesi arkasına yerleştirilen mıknatıs ya da elektromıknatıslar yardımıyla oluşturulan manyetik alan elektronların yollarını değiştirerek çarpışmaların daha çok katot yüzeyine yakın yerlerde olmasını sağlamaktır.

### 3.7 İyon Demetiyle Biriktirme Yöntemi

Hedefi veya alt taşı ya da her ikisini birden bombardıman enerjisi, kinetik enerjisi, iyi bilinen bir iyon demetiyle döverek iyi bir biriktirme işlemi yapılabilir. Plazma yoğunluğu ve enerji bağımsız olarak seçilebilir ve yüksek vakum şartlarından dolayı biriktirilen malzeme kopartma yöntemine göre daha temiz elde edilebilmektedir. İyon demetiyle biriktirme yönteminin (ion deposition assisted deposition) karmaşıklığı ve geniş alan plazma kaynaklarının kısa anlar için elde edilmesinden dolayı sensör teknolojisinde henüz yerini alamamıştır.

### 3.7 İyon Grubu Demeti Biriktirme Yöntemi

İyon grubu demeti biriktirme yöntemi (ion cluster beam deposition) buharlaştırma, kopartma ve iyon demeti yardımı ile biriktirme yöntemlerinin birleşmiş bir şeklidir. Bir maden eritme potası termal olarak ısıtılıp, metal buharının genişletilmesi yoluyla, sadece tek atom değil; atom grupları kaynaktan vakum ortamına yayılır. Bu gruplar bir plazma bölgesinde iyonlaştırılıp belli enerji ve gerilime gönderilerek istenen tabakanın oluşumu sağlanır (Borneinstein, 2008).



Şekil 3.10 İyon demetiyle biriktirme yönteminin şematik gösterimi.

## 4. TABAKALI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ İÇİN TERMİYONİK VAKUM ARK (TVA) SİSTEMİ

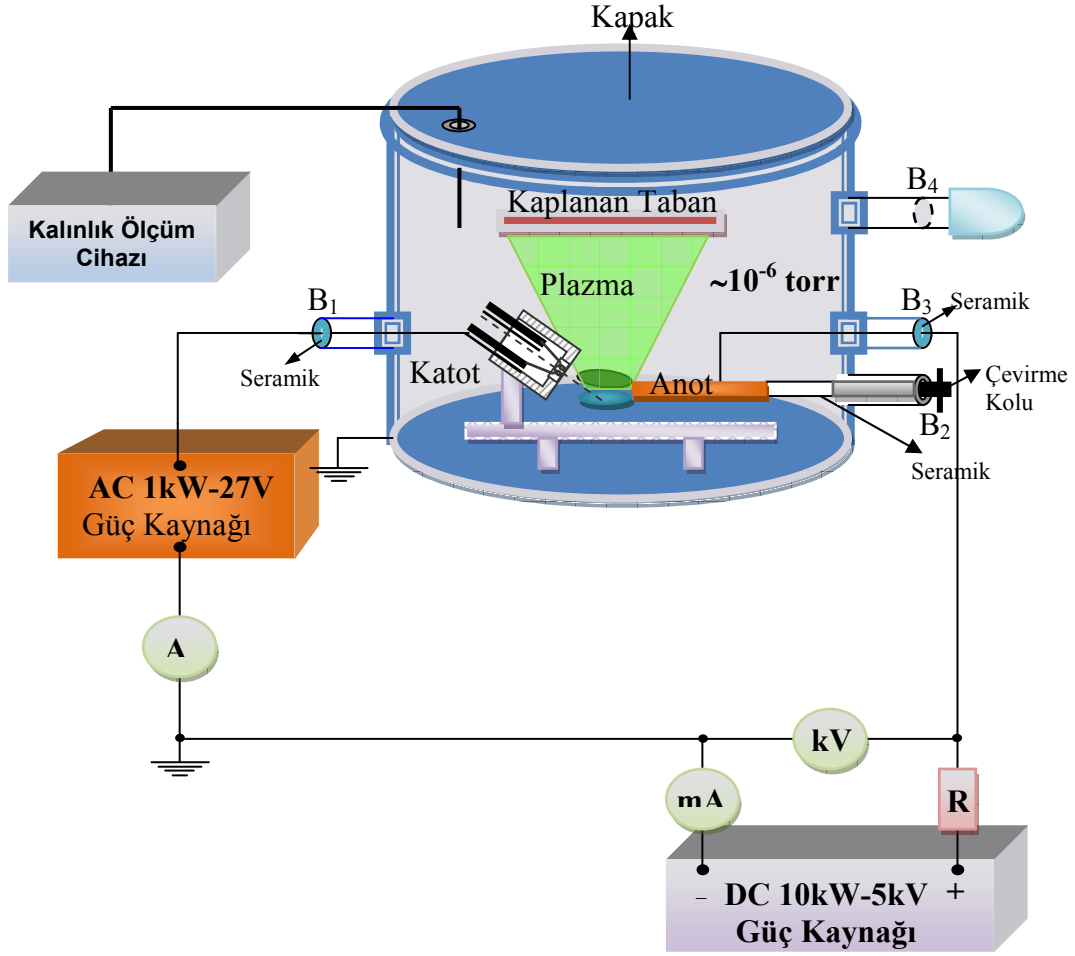
### 4.1 TVA Sisteminin Bileşenleri

Vakum odası içerisinde anot metali buharı plazmasının üretilmesi için elektrostatik olarak odaklanmış elektron bombardımanı kullanan Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemini ilk kez 1983 yılında Düşük Sıcaklık Plazma Fiziği Grubu (INFLPR, National Institute For Laser, Plasma and Radiation Physics, Bükreş) geliştirmiştir (Musa et al., 1983).

Böyle bir bir TVA sistemi ile katmanlı kompozit malzeme üretmek için, TVA-Anot sisteminde bir takım değişiklikler yapmak gerekir. Katmanlı kompozit üretmek için gerçekleştirdiğimiz sistemimiz

- a) Vakum odası,
- b) Basınç ölçüm sistemleri,
- c) Vakumlama sistemi,
- d) Plazma reaktörü,
- e) Güç kaynakları,
- f) Kalınlık ölçüm sisteminden oluşturulmuştur.

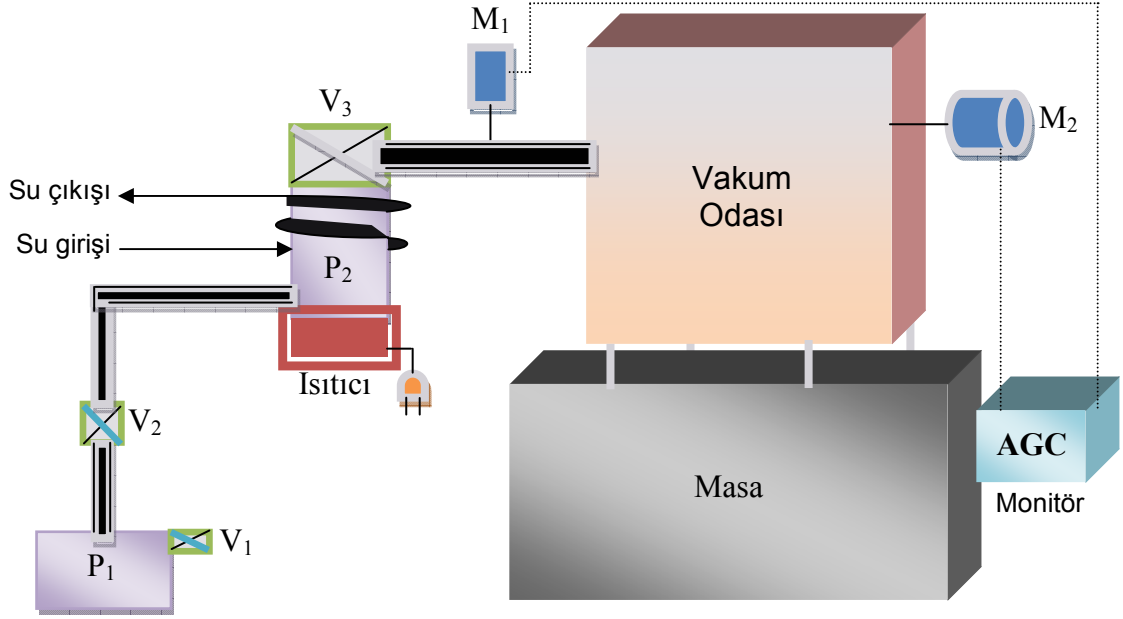
Katmanlı kompozit malzeme üretmek için oluşturulan bu sistemin şematik gösterimi Şekil 4.1'de görülmektedir.



Şekil 4.1 Termiyonik Vakum Ark sisteminin şematik gösterimi.

#### 4.1.1 Vakum Odası

Vakum ünitesi başlıca vakum odası, mekanik pompa, difüzyon pompası, monitör ve manometrelerden oluşmaktadır. Vakum ünitesinin şematik gösterimi Şekil 4.2 de verilmiştir. Şekilde görülen vakum odasının içinde ki ve dışında ki sistem parçaları uygun şekilde yerleştirildiğinde vakum odası diğer parçalar ile birlikte plazma reaktörü olarak görev yapar (Bakınız 4.1.4).



Şekil 4.2 Vakum ünitesinin şematik gösterimi.

#### 4.1.2 Basınç Ölçüm Sistemleri

Plazma reaktörünün basıncı Edwards marka Active Pirani Gauge APG-M model düşük basınç manometresi ve Edwards marka Active Inverted Magnetron Gauge AIM-S model çok düşük basınç ölçebilen manometre ile ölçülür. Her iki manometrede Edwards marka Active Gauge Controller AGC Single Display (Şekil 4.3) model dijital basınçölçere bağlıdır. Düşük basınç manometresi  $10^{-3}$  Torr a kadar düşük basınçları, diğer manometre ise  $10^{-3}$  ile  $10^{-6}$  Torr arasındaki çok düşük basınçları ölçebilmektedir.



Şekil 4.3 TVA sisteminin dijital 3 girişli basınçölçer monitörü.



### 4.1.3 Vakumlama Sistemi

#### *i) Mekanik pompa*

Mekanik pompamız Edward marka RV3 model ve 3.7 m<sup>3</sup>/saat pompalama hızına sahiptir. Mekanik pompanın dijital fotoğrafı Şekil 4.4 de verilmiştir.

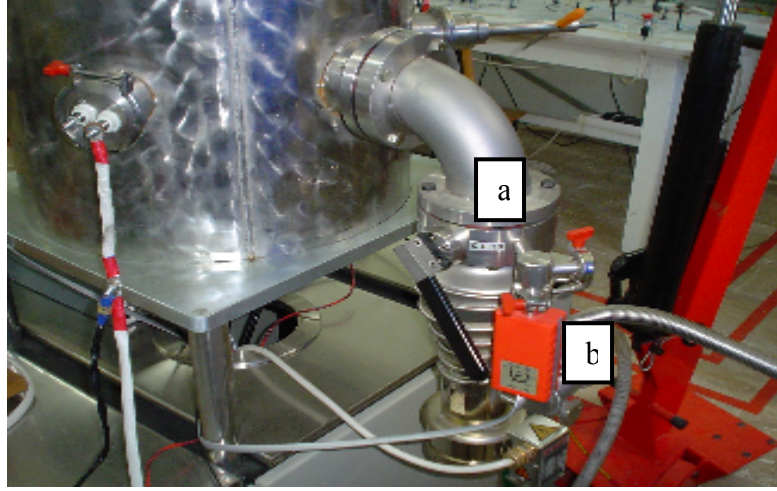


Şekil 4.4 TVA sisteminin mekanik pompası.

Vakumlama sistemi mekanik pompa ve difüzyon pompasından oluşmaktadır. TVA metal buharı plazmasının oluşabilmesi için 10<sup>-5</sup> Torr veya daha yüksek vakum değeri gerekmektedir.

#### *ii) Difüzyon pompası*

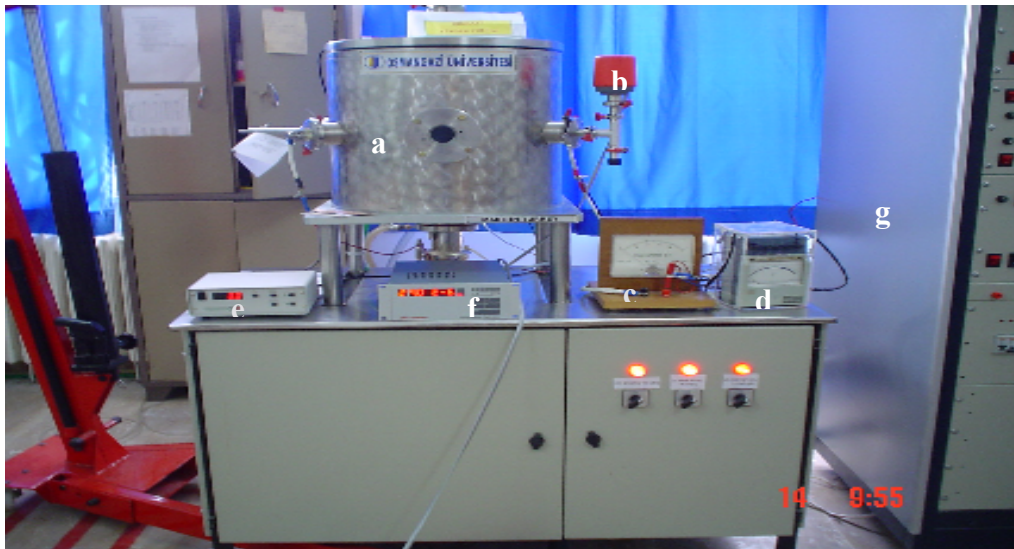
Sistemimizdeki difüzyon pompası Edwards marka Diffstak 63/150 modeldir ve optimum değerdeki vakumlama hızı 135 l/saat dir. Difüzyon pompasının dijital fotoğrafı Şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.5 TVA sisteminde a) difüzyon pompası, b) düşük basınç manometresi.

#### 4.1.4 Plazma Reaktörü

Termiyonik vakum ark sisteminin vakum odası 415 mm yüksekliğinde, 445 mm çapında ve 5 mm kalınlığında paslanmaz çelikten yapılmış bir silindirdir. Bu silindir içerisinde vakum oluşturulması, plazmanın üretilmesi, kompozit malzemelerin üretiminin gerçekleştirilmesi ve diğer ara işlemler gerçekleştirildiği için plazma reaktörü olarak adlandırılabilir. Plazma reaktörünün dijital resmi Şekil 4.6' da verilmiştir.



Şekil 4.6 TVA sisteminin önden görünüşü a) Plazma reaktörü, b) çok düşük basınç ölçen manometre, c) ampermetre, d) voltmetre, e) kalınlık ölçer, f) dijital basınçölçer monitör, g) güç kaynağı.

#### 4.1.5 Güç Kaynağı

Plazma üretmek için dc, 0-5 kV kapasiteli ayarlanabilir çıkış voltajlı yüksek voltaj güç kaynağı ve 0-27 V ac ayarlanabilir çıkış voltajlı düşük voltaj güç kaynağı kullanılmıştır.

Sistemimizde anot ile katot arasına uygulanan potansiyel 0-5 kV doğru akım (dc) güç kaynağından temin edilmiştir. 0-27 volt ac güç kaynağı ise elektron bombardımanı olarak kullanılan elektron tabancasındaki filamanı ısıtmak için kullanılmıştır. Kullanılan güç kaynaklarının fotoğrafı Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 TVA sisteminin güç kaynağı.1 numara düşük voltaj, 2 numara yüksek voltaj üreticidir.

#### 4.1.6 Kalınlık Ölçüm Sistemi

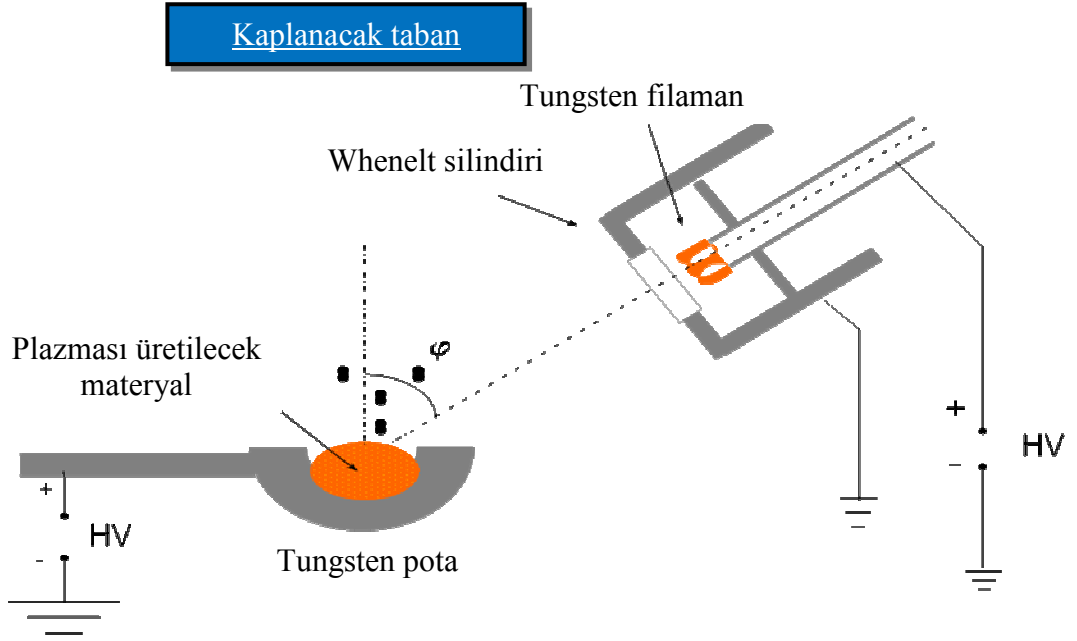
Kaplama yapılırken tabakaların kalınlığının ölçümü Cressington MTM-10 High Resolution Thickness Monitors cihazı ile deney süresince yapılmıştır (Şekil 4.8). Bu sayede üreteceğimiz ince filmin kalınlığını deney esnasında görebilmekte ve kalınlığı ayarlayabilmekteyiz.



Şekil 4.8 Kalınlık ölçüm cihazı.

#### 4.2 TVA Plazması Kullanılarak Kompozit Malzeme Üretilmesi

TVA, katot ile anot olarak isimlendirilen iki elektrot arasında meydana gelir. Katot elektron emisyonu sağlayan bir filaman, anot ise buharlaştırılarak plazması elde edilecek materyalin içine konulduğu bir potadır. Şekil 4.9'da katot ve anodun şematik çizimi görülmektedir. Katot olarak kullanılan filaman, sargılı filaman ise elektrotlar doğrusal geometride, bir çember şeklinde ise elektrotlar silindirik geometride olarak kabul edilir (Ehrich, 1998). Bu çalışmada doğrusal geometride ki elektrotlar kullanılmıştır.

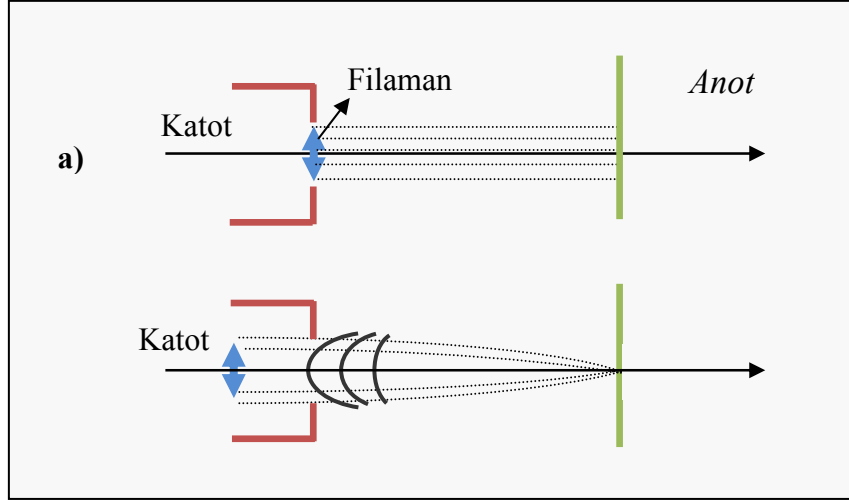


Şekil 4.9 TVA katot ve anodunun şematik gösterimi (Musa, 1994).

Her iki elektrot son vakum değeri  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  Torr basınçta olan bir vakum odası içinde bulunmaktadır. Burada kullanılan katot, 0.4 mm çapında tungsten filamandan oluşturulmuş bir elektron tabancası olarak isimlendirilmiştir. Elektron tabancasının ön kısmında, tungsten filamandan çıkan elektron demetini odaklamak amacıyla elektrostatik mercekle görev yapan Whenelt silindiri yer alır.

Doğrudan ısıtılan katodun içine yerleştirilen Whenelt silindiri topraklanmıştır. Filamandan yayınlanan negatif yüklü elektronlar, pozitif potansiyel tarafından çekilirken toprak potansiyelindeki Whenelt silindiri tarafından itilecekler ve elektronlar yalnızca Whenelt silindirin ön kısmındaki boşluk içinden anoda hareket edecekler ve dolayısıyla anot üzerine odaklanacaklardır. Bu nedenle TVA sisteminde Whenelt silindiri, katottan yayınlanan elektron demetini anot üzerine odaklayan elektrostatik mercekle (Şekil 4.10) gibi davranmaktadır (Musa et al., 1997).





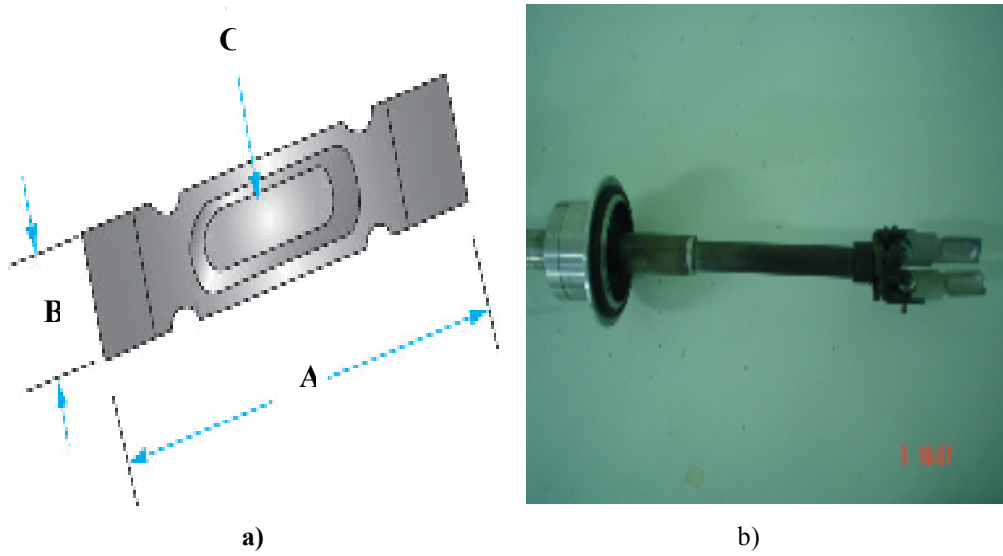
**Şekil 4. 10** Elektron demetinin anot materyali üzerine odaklanmasına Whenelt silindirinin etkisi.

Şekil 4.11’de kullanılan elektron tabancasının fotoğrafı görülmektedir. Kullanılan elektron tabancası hareketli olduğundan dolayı anot materyalinin istenilen bölgesine odaklanması sağlanabilmektedir. Elektron tabancasından yayınlanan elektron demetinin anot materyali üzerine bombardıman edilmesi nedeniyle anot olarak kullanılan pota yüzeyine ve böylece plazması oluşturulacak anot materyaline ısı enerjisi aktarılır.



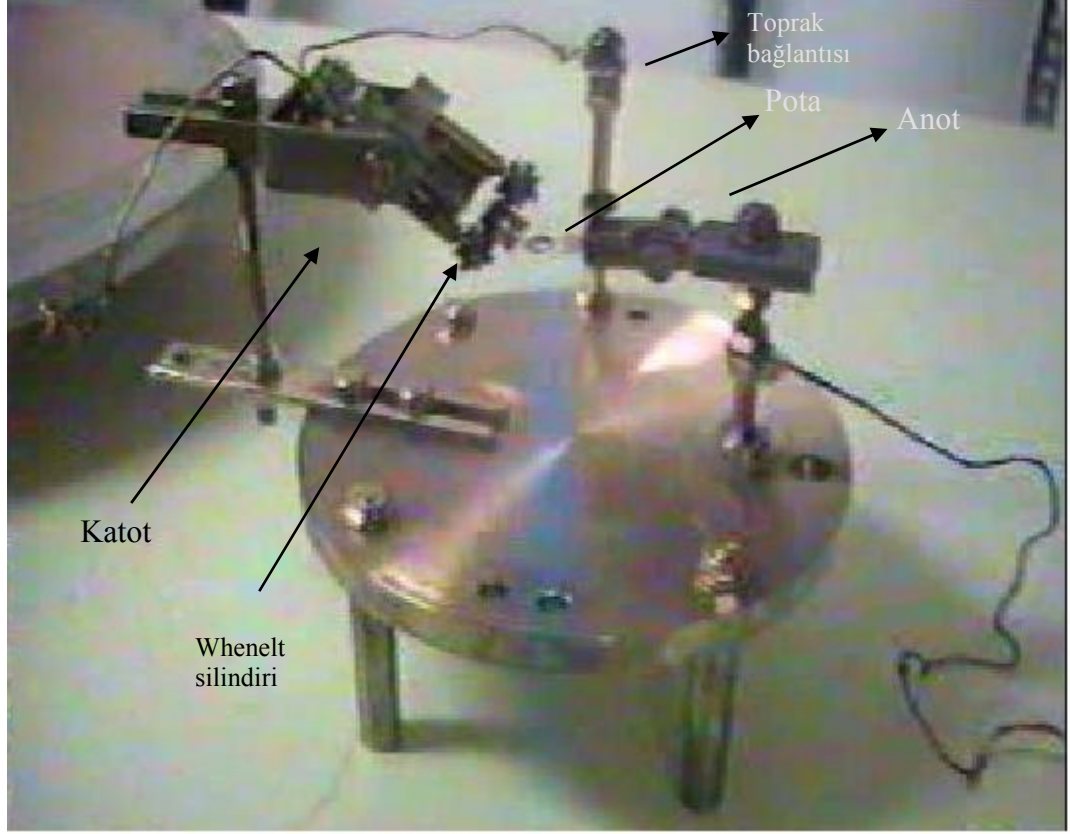
**Şekil 4. 11** Elektron Tabancası.

TVA için kullanılan ikinci elektrot ise anotdur. Anot olarak tungstenden yapılmış kaşık şeklinde potalar kullanılmıştır. Deneyde kullanılan tungsten potaların şematik görüntüsü Şekil 4.12’de görülmektedir. Potanın A uzunluğu 49mm, B genişliği 12mm ve C derinliği ise 0.4mm dir. Plazması üretilecek materyalin bu pota içine konularak elektron bombardımanı nedeni ile önce erimesi daha sonra buharlaşması ve ateşleme voltajına geldiğinde plazması oluşturulmaktadır.



Şekil 4.12 Anot olarak kullanılan tungsten potanın a) Şematik gösterimi, b) Dijital fotoğrafı.

Şekil 4.13’de doğrudan ısıtılan katotlu elektron tabancası ve tungsten potadan oluşturulan anodun bir bütün halinde dijital fotoğrafı görülmektedir. Bu görülen resimdeki parçalar vakum odasının içerisine yerleştirilmiştir. Böylece vakum odası plazma reaktörü olarak görev yapar.



Şekil 4. 13 Elektron tabancası ve tek potalı anot.

Vakum odası içerisinde  $10^{-6}$  Torr civarındaki basınç değerine ulaşılnca, bir düşük voltaj güç kaynağı ile filaman üzerinden akım geçirilerek filamanın ısınması ve katodun termiyonik emisyon yapması sağlanır. Elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj ile termiyonik emisyonun yanında, Schottky etkisi ve alan emisyonu ile de elektron emisyonu gerçekleşir.

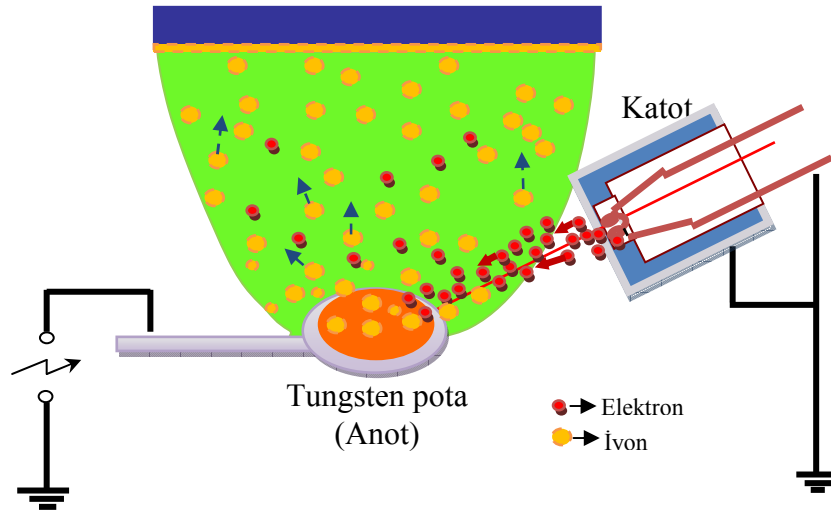
*Termiyonik emisyon:* Vakum içindeki katı bir malzemenin yüksek sıcaklıkta ısıtılmasından dolayı bu malzeme de oluşan elektron emisyonuna denilmektedir.

*Schottky etkisi:* Vakum içindeki anot-katot elektrotları arasına uygulanan yüksek voltaj nedeniyle elektron emisyonunun artmasına, Schottky etkisi denilmektedir.

*Alan emisyonu:* Bir elektrot yüzeyinin sivriltilmesi ya da inceltilesi ile elektrot yüzeyindeki elektrik alanın şiddeti sonucunda materyalden elektron emisyonu oluşturulmasına denilmektedir.



Filamandan yayınlanan elektronların anot pota içerisinde bulunan materyal üzerine hızlandırılması nedeniyle materyal ısınır ve buhar haline gelir. Belirli bir yüksek voltaj değerine ulaşınca (ateşleme voltajı) plazma hali gerçekleşir, bu andan itibaren materyalin plazmasını parlak bir ışımaya ile görebilir. Şekil 4.14’de oluşturulan TVA plazmasının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 4. 14 Doğrudan ısıtılan katot ile TVA’ da metal buharı plazmasının yayılması.

Anot içinde üretilen metal buharı deşarjının ateşlenmesi gazlarda meydana gelen klasik elektriksel deşarjların ateşlenmesinden farklıdır. Ateşleme voltajının değeri gazlardaki elektriksel kırılma voltaj değeri gibidir ancak TVA durumunda deşarj ateşlemek için uygulanan voltaj, aşağıda verilen iki şartı aynı zamanda sağlamak zorundadır.

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

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

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

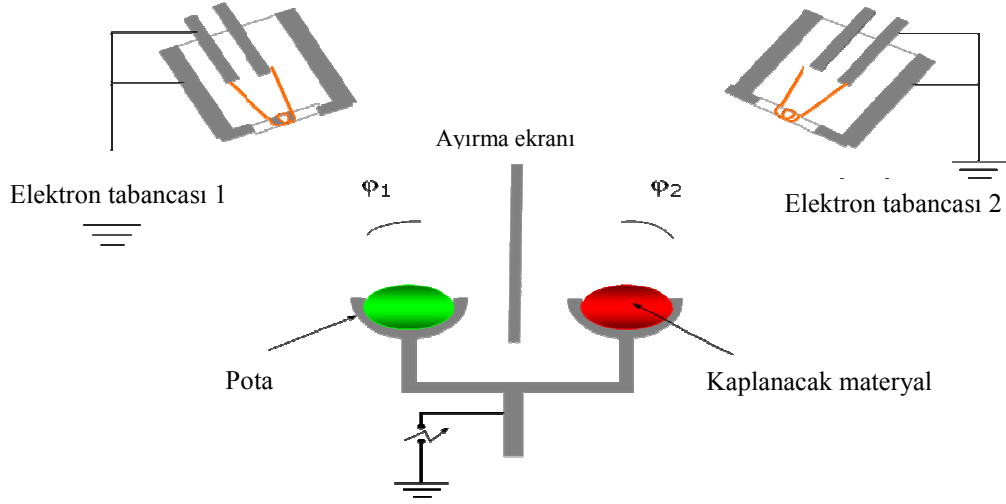
$$P = I_e U_{atş} \quad (4.1)$$

ile verilir. Burada  $I_e$ ; elektron emisyonu nedeniyle oluşan akım şiddeti ve  $U_{atş}$ ; ateşlenme voltajıdır (kullanılan anot materyalinin cinsine, elektrotların düzenlenişine ve filamanın elektron emisyonuna göre değişen metal buharı deşarjının oluştuğu anda elektrotlar arasına uygulanan voltaj değeridir). Materyalin buharı ateşlendikten sonra akım (ark akımı) birden çok yüksek değerlere çıkar ve aynı anda elektrotlar arasında ölçülen voltaj birden azalır. Termiyonik vakum arkın oluştuğu bu anda görünür bölgede olan materyallerin plazması çok rahatlıkla vakum odası penceresinden görülebilmektedir (Akan, 2003).

### 4.3 Termiyonik Vakum Ark Tekniğinin Avantajları

1. Yüksek vakumda (HV) ya da ultra yüksek vakumda (UHV) sistemin çalışması nedeniyle yüksek saflıkta kaplamalar yapılabilmesi,
2. Diğer birçok kaplama tekniğinde kullanılan ara gazların (Ar, Ne vs) TVA sisteminde kullanılmasına gerek olmadığından yüksek saflıkta filmler üretilebilmesi,
3. TVA sistemiyle plazması oluşturulan materyallerin yüksek iyon enerjilerine (500 eV' dan fazla) sahip olmaları sebebiyle üretilen ince filmin yüzeye sıkı tutunma ve düşük pürüzlülük özelliklerine sahip olması,
4. İyon enerjilerinin elektrotlar arası mesafe, açı ve filaman akımı değişimiyle kontrol edilebilmesi,
5. Yüksek erime sıcaklığına sahip materyallerin (Bor, karbon, renyum vs.) ve seramiklerin ince filmlerinin üretilebilmesi,

6. Plastikler de dahil olmak üzere birçok alt taban üzerine ince film kaplanabilmesi,
7. Birden çok elektron tabancası kullanarak aynı anda birçok materyalin kaplanmasının rahatlıkla yapılabilmesi olarak sıralayabiliriz (Şekil 4.14).



Şekil 4.15 Çoklu kaplama yapabilen Termiyonik Vakum Ark (TVA) sisteminin şematik gösterimi (Musa, 2004).

## 5. TVA İLE GÜMÜŞ-ALUMİNA (Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) KATMANLI KOMPOZİT MALZEME ÜRETİMİ

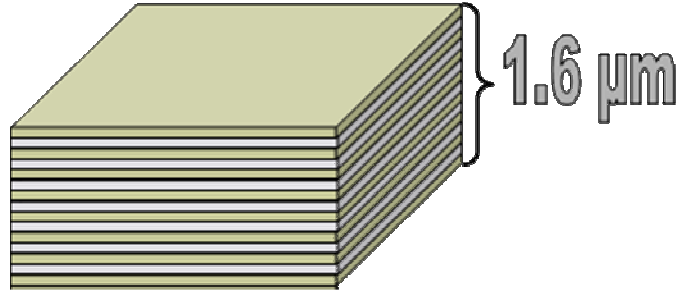
Bu bölümde Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemi ile oluşturulan 13 katmanlı Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit malzemenin üretim aşaması, akım-voltaj karakteristikleri, depolama oranı, Elektron Mikroskop Görüntüsü (SEM), Optik Mikroskop Görüntüsü, Enerji Dağılımlı X-ışınları Spektroskopisi (EDX) görüntüleri, optik emisyon spektrumları verilmiştir.

Katmanlı kompozit materyal oluşturulurken Çizelge 5.1'deki sıra takip edilerek silisyum ve cam taban üzerine 13 kat kaplama gerçekleştirilmiştir. İlk kaplama malzemesi olarak gümüşün 21 amper filaman akımı, 45-50 mA deşarj akımı, 1750 Volt deşarj voltajı ve  $5.1 \cdot 10^{-6}$  Torr basınçta plazması üretilerek 130 nm kalınlıkta kaplama yapılmıştır. Diğer kaplamalar Çizelge 5.1' deki sıra takip edilerek elde edilmiştir.

**Çizelge 5.1** Kaplama anında ölçülen filaman akımı, deşarj akımı, breakdown voltajı, basınç ve kalınlık verileri.

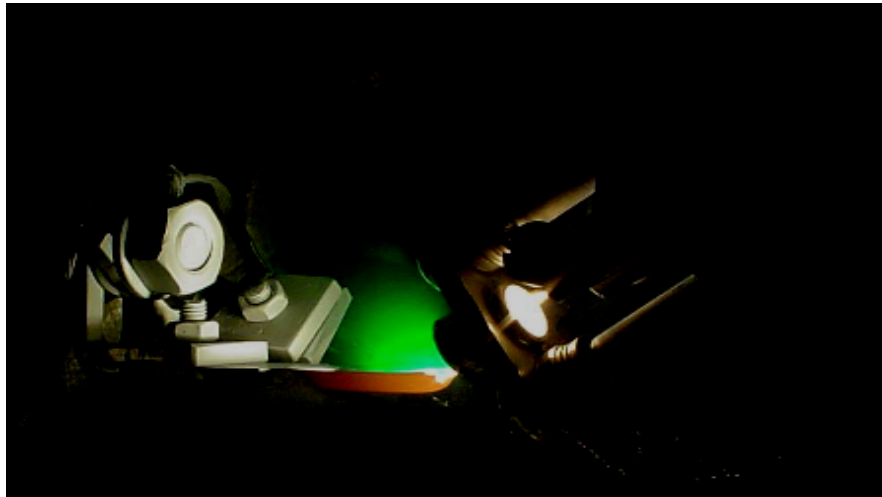
Depolanan katmanların sırası	Kaplanan malzeme	Filaman akımı I <sub>f</sub> (A)	Deşarj akımı I <sub>D</sub> (mA)	Ateşleme voltajı V <sub>B</sub> (V)	Çalışma basıncı P (Torr)	Kalınlık (nm)
1	Gümüş	21	45-50	1750	$5.1 \cdot 10^{-6}$	130
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	84-86	2450	$3.4 \cdot 10^{-5}$	137
3	Gümüş	21	55-60	1450	$2.8 \cdot 10^{-5}$	132
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	56	2300	$2.2 \cdot 10^{-5}$	128
5	Gümüş	21	65-70	1550	$9.5 \cdot 10^{-6}$	130
6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	85	2400	$1.1 \cdot 10^{-5}$	131
7	Gümüş	21	68	1400	$2.7 \cdot 10^{-5}$	129
8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	100	2350	$2.0 \cdot 10^{-5}$	130
9	Gümüş	21	750	1450	$8.5 \cdot 10^{-6}$	132.2
10	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	150	2450	$3.3 \cdot 10^{-5}$	130
11	Gümüş	21	760	1300	$2.1 \cdot 10^{-5}$	129
12	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21	88	2450	$7.1 \cdot 10^{-6}$	130
13	Gümüş	21	78	1400	$1.5 \cdot 10^{-5}$	60

Şekil 5.1 de TVA ile ürettiğimiz tabakalı kompozit malzemenin şematik görüntüsü verilmiştir. Koyu renkli olan ve ilk tabaka ile son tabaka olarak da gösterilen gümüş tabakası, beyaz renk ile gösterilen tabaka ise aluminaı temsil etmektedir.



Şekil 5.1  $Al_2O_3$ -Ag tabakalı kompozitinin şematik gösterimi.

Termiyonik Vakum Ark Sistemiyle oluşturulan gümüş ve alumina buharlarının plazmaları Şekil 5.2 ve 5.3’ de görülmektedir.



Şekil 5.2 Gümüş materyalinin TVA sistemiyle oluşturulan plazma hali.

Görünür bölgede olan gümüş materyali plazmasının açık yeşil renktedir.

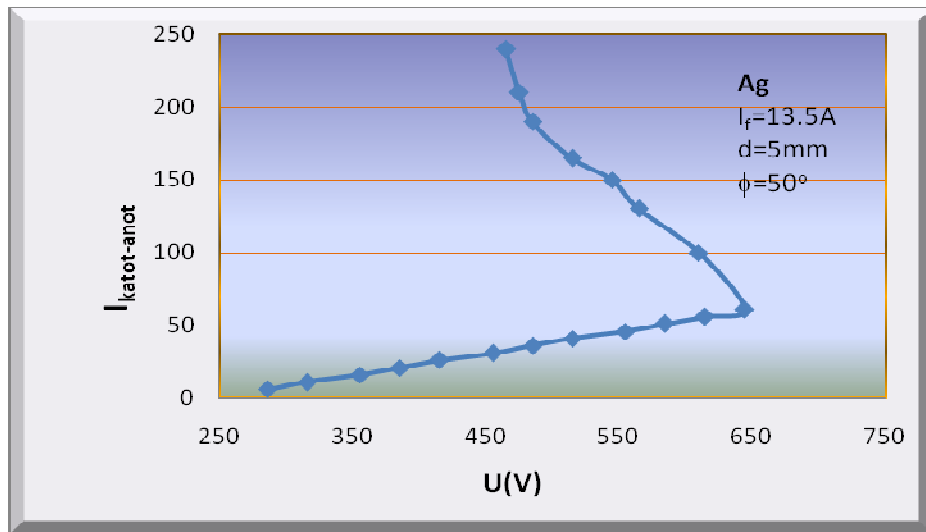


Şekil 5.3 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> materyalinin TVA sistemiyle oluşturulan plazma hali.

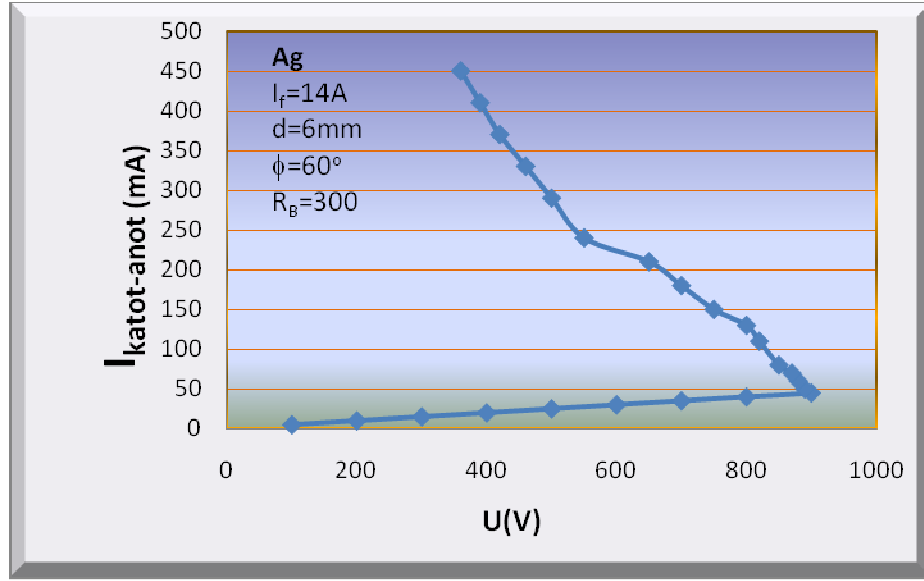
Görünür bölgede olan alumina materyali plazması ise açık mavi renkte olduğu görülmektedir.

### 5.1 Gümüş Plazmasının Akım- Voltaj Karakteristiği

Daha önce yapılan çalışmalarda, buharlaştırılacak materyal olarak gümüş kullanarak elde edilen gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilmiştir.



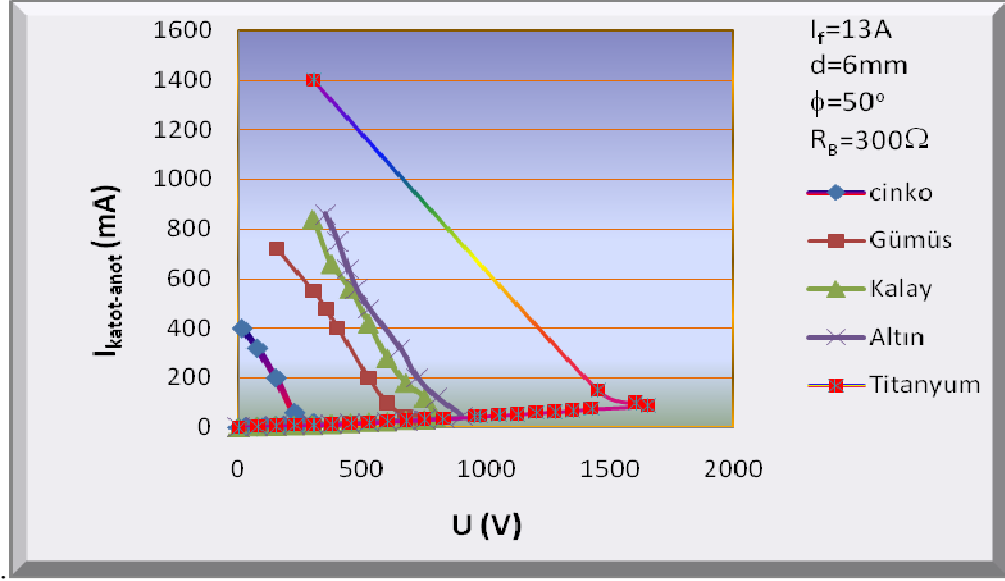
Şekil 5.4  $\phi=50^\circ$ ,  $d=5\text{mm}$  için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.



Şekil 5.5  $\phi=60^\circ, d=6\text{mm}$  için gümüş buharı TVA deşarj akım voltaj karakteristiği.

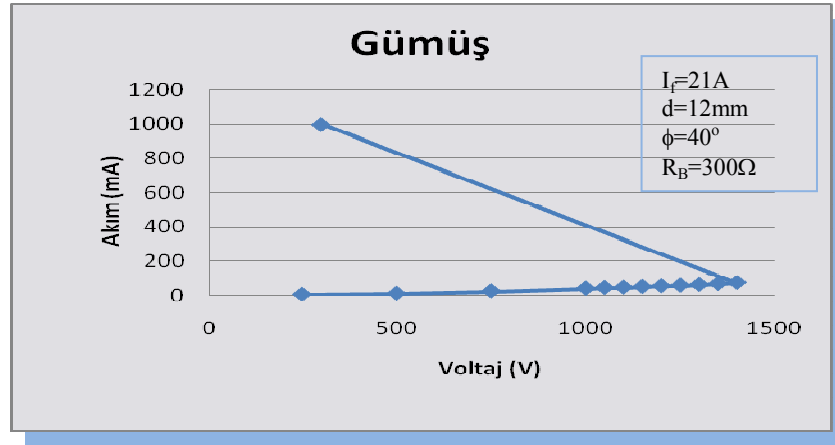
Şekil 5.4 ve Şekil 5.5’de verilen karakteristikler %99 saflıktaki gümüş buharlarında elde edilmiştir. Bu iki karakteristik hemen hemen aynı katot filamanı ısıtma akımında ancak Şekil 5.5’de verilen karakteristik daha yüksek elektrotlar arası açı ve uzaklıkta elde edilmiştir. Bu nedenle bu durumda daha yüksek ateşlenme voltajında TVA deşarj oluşmuştur. TVA’ın akım voltaj karakteristiği buharlaştırılacak materyal cinsine bağlıdır Bu nedenle aynı çalışma parametrelerinde (katot filamanı ısıtma akımı  $I_f = 13\text{A}$ , elektrotlar arası uzaklık  $d=6\text{mm}$  ve elektrotlar arası açı  $\phi=50^\circ$ ) farklı metaller için TVA deşarjlar üretildi.

Şekil 5.6’da görüldüğü gibi aynı çalışma parametrelerinde yalnızca buharlaştırılacak materyalin değişmesi, TVA deşarj akım voltaj karakteristiğini değiştirmektedir. Şekil 5.6’da kullanılan materyallerin  $p=1$  Torr’daki buharlaşma sıcaklıkları; Titanyum (2356K), Altın (1980K), Kalay (1885K), Gümüş (1610K), Çinko (758K) olarak sıralanmıştır.



Şekil 5.6 Zn, Ag, Sn, Au ve Ti TVA deşarj akım voltaj karakteristikleri (Akan, 2003).

Bu çalışmada nano katmanlı kompozit malzeme için üretilen Ag materyalinin plazma deşarjının akım-voltaj karakteristiği Şekil 5.7’de görülmektedir. Bu I-V karakteristiği daha önce yapılan çalışmalardaki I-V karakteristikleriyle uyum içindedir.



Şekil 5.7 Gümüş plazmasının Akım-Voltaj karakteristiği.

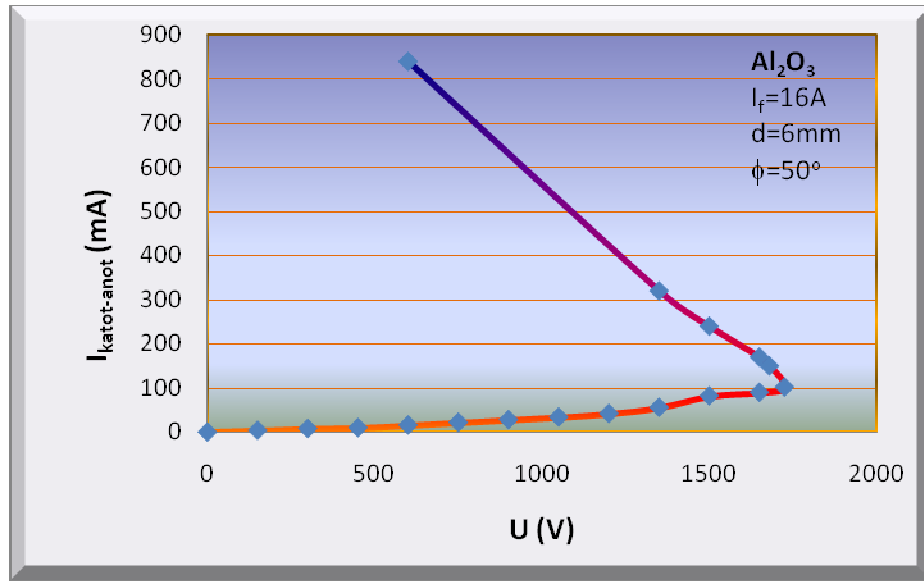
Şekil 5.7’deki akım-voltaj karakteristiği gümüş plazması için 21 Amper filaman ısıtma akımında, 12 mm elektrotlar arası mesafede ve  $40^\circ$  elektrotlar arası açıda alınmıştır.



## 5.2 Alumina plazmasının Akım- Voltaj Karakteristiği

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

TVA kullanarak daha önce MgO ince film depolama yapılmıştır (Ehrich et al., 1999). Diğer bir yapay seramik olan  $Al_2O_3$ 'ün daha önce yapılan çalışmalarda ki TVA deşarjının akım voltaj karakteristiği şekil 4.24 de verilmiştir.

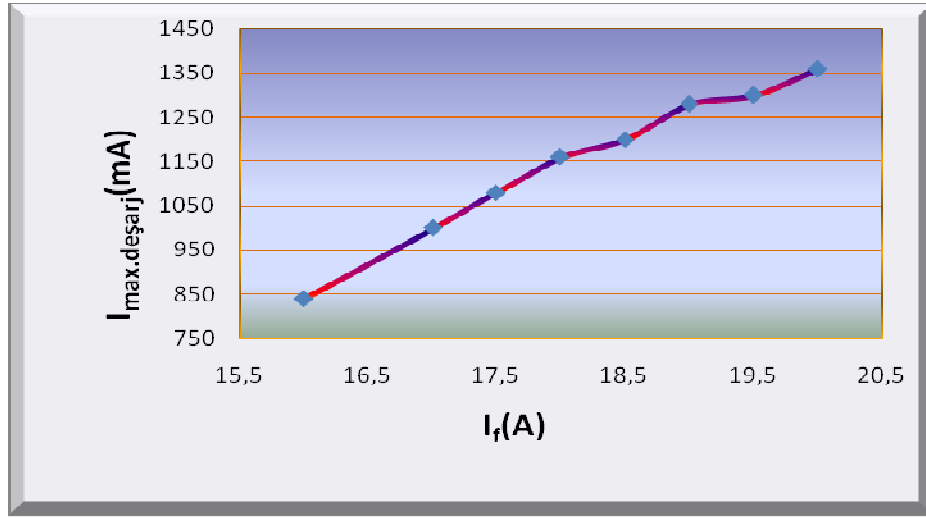


Şekil 5.8  $Al_2O_3$  TVA deşarjının akım voltaj karakteristiği.

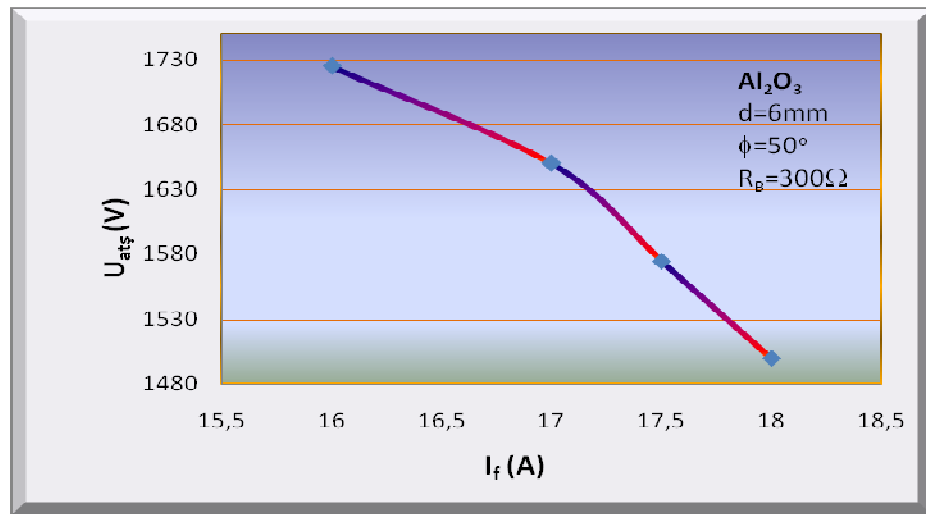
$Al_2O_3$  buharlarında üretilen deşarj ateşlendikten sonra, deşarj akımı çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Şekil 5.8 ile verilen akım voltaj karakteristiğinin elde edildiği deşarj sırasında, katot filamanı ısıtma akımı artırılarak, maksimum deşarj akımının katot filamanı ısıtma akımı ile değişimi elde edildi. Şekil 5.9'da  $Al_2O_3$  TVA deşarjının maksimum deşarj akımının, katot filamanı ısıtma akımı ile değişimi verilmiştir.

Şekil 5.9'dan görüldüğü gibi metallerde olduğu gibi seramiklerde de katot filamanı ısıtma akımı arttırıldığında maksimum deşarj akımı artmaktadır.

$Al_2O_3$  TVA deşarjları farklı katot filamanı ısıtma akımları için de elde edildi. Şekil 5.10'da farklı filaman akımlarında üretilen  $Al_2O_3$  TVA deşarjlarının ateşlenme voltajlarının katot filamanı ısıtma akımı ile değişimi verilmiştir.

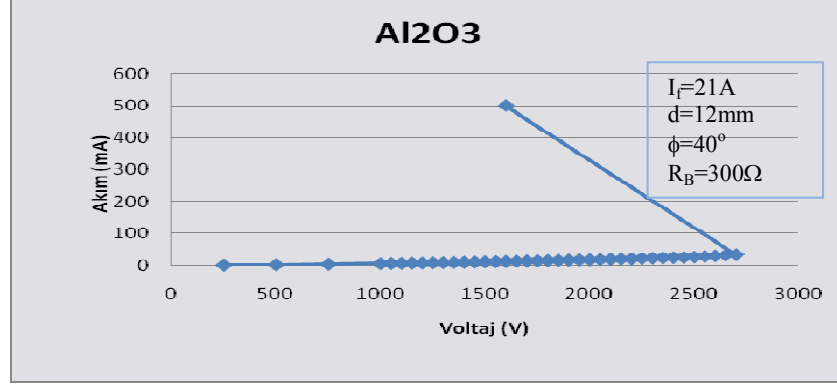


Şekil 5.9  $Al_2O_3$  TVA deşarjının maksimum deşarj akımının katot filamanı ısıtma akımı ile değişimi.



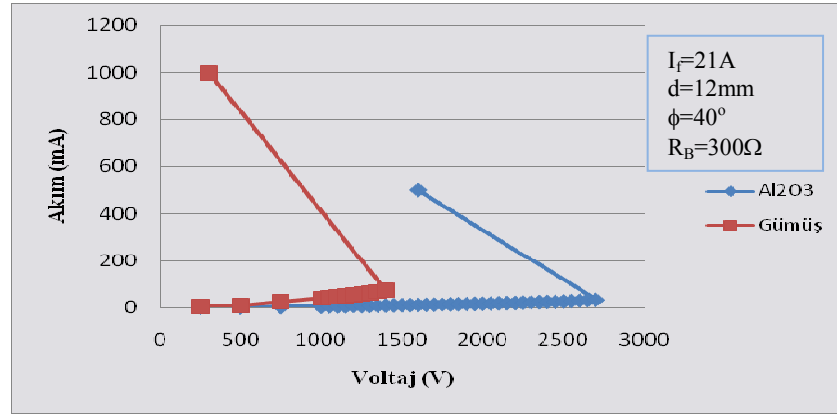
Şekil 5.10  $Al_2O_3$  TVA deşarjlarının ateşlenme voltajının katot filamanı ısıtma akımı ile değişimi (Akan 2003).

Bu çalışmada nano katmanlı kompozit malzeme için üretilen  $Al_2O_3$  materyalinin plazma deşarjının akım-voltaj karakteristiği Şekil 5.11’de görülmektedir.



Şekil 5.11 Alumina plazmasının Akım-Voltaj karakteristiği.

Şekil 5.5’deki akım-voltaj karakteristiği alumina plazması için 21 Amper filaman ısıtma akımında, 12 mm elektrotlar arası mesafede ve  $40^\circ$  elektrotlar arası açıda alınmıştır.

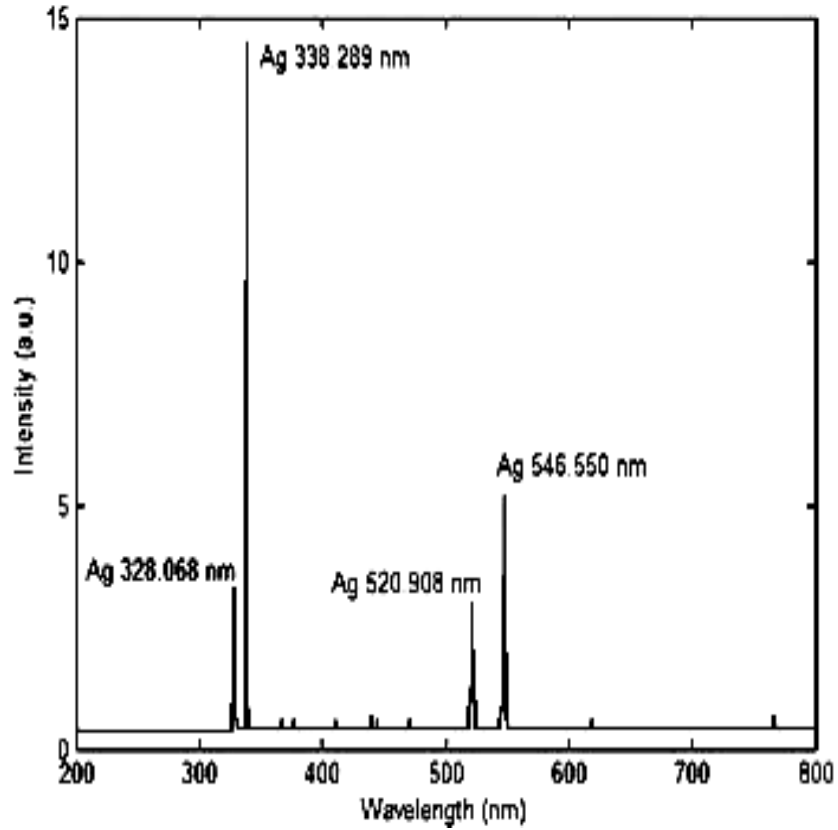


Şekil 5.12 Ag ve  $Al_2O_3$  plazmalarının Akım-Voltaj karakteristiklerinin karşılaştırma grafiği.

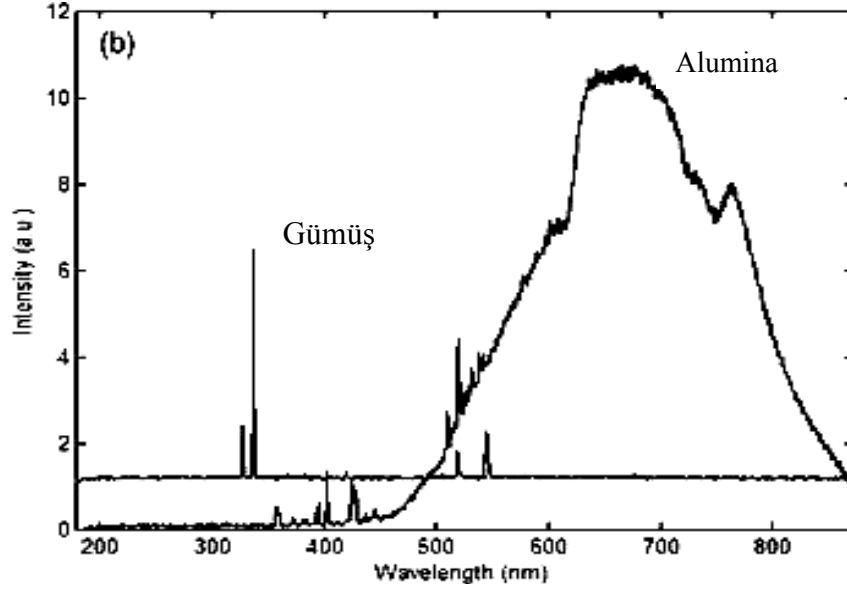
Ag ve  $Al_2O_3$  için akım-voltaj karakteristikleri birbirine benzerdir (Şekil 5.12). Sadece ark deşarj oluşum için gerekli olan plazmaya geçiş voltajları yani ateşleme voltajları arasında farklılık söz konusudur. Ateşleme voltajının farklı olmasının sebebi ise kullanılan materyalin erime noktalarının farklı olmasındandır.

### 5.3 Ag ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Plazmalarının Optik Emisyon Spektrumları

Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) plazmada yayınlanan ışığın spektral analizidir. OES plazmalarda ve plazma kaynaklarında optik spektrumların farklı tiplerinde UV' den IR' ye kadar olan bölgede (200nm-850nm) analiz yapılarak gerçekleştirilir. TVA ile üretilen gümüş buharı ve alumina buharı deşarjlarının spektroskopik analizleri "Ocean Optics USB 2000" model Optik Emisyon Spektroskopisi(OES ) cihazı ile yapıldı. Şekil 5.13 ve 5.14' de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Ag'nin Optik Emisyon Spektroskopileri verilmiştir.



Şekil 5.13 Gümüşün tipik Optik Emisyon Spektroskopisi (Akan, 2007).

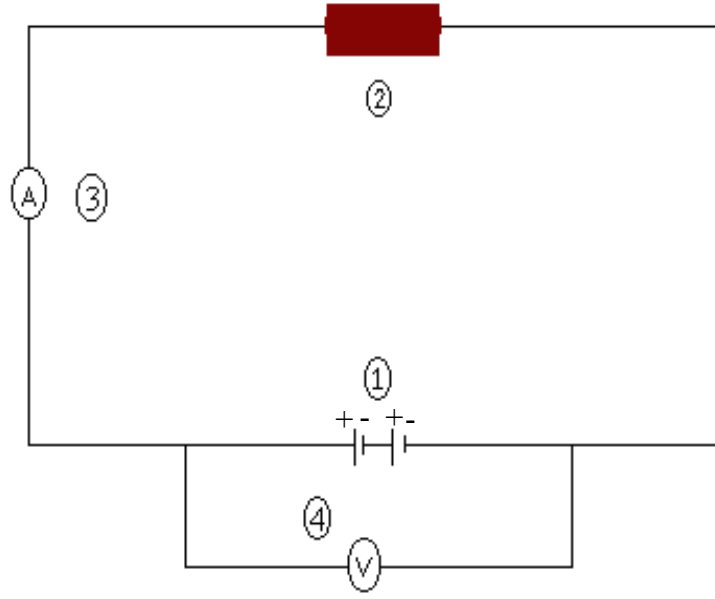


Şekil 5.14 Ag ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> deşarjlarının Optik Emisyon Spektroskopisi.

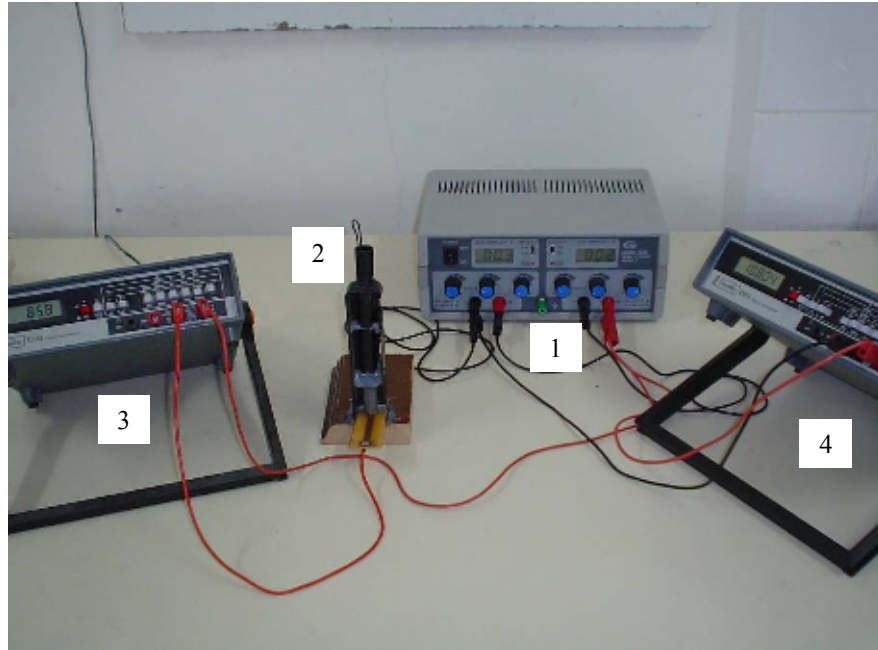
Alınan ölçümlerde görüldüğü gibi üretilen plazma deşarjları saftır. Buda bize ürettiğimiz Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tabakalı kompozit malzememizin sadece gümüş ve aluminadan oluştuğunu göstermektedir. Aluminanın spektrumunda görülen geniş yayvan pik, elektron bombardımanından dolayı çok ısınan potanda oluşan kara cisim ışımasından (black body radiation) kaynaklanmaktadır (Akan, 2007).

#### 5.4 Elektriksel Ölçüm Sonuçları

Numunemizin elektriksel ölçümünü en üst tabaka ile en alt tabaka arasında Şekil 5.15' deki sistem kullanılarak iki uç tekniğiyle alınmıştır. 1 numara ile gösterilen güç kaynağımız, 2 numara elektriksel özdirenç ölçümünü yaptığımız cihaz, 3 numara ampermetremiz ve 4 numara ise voltmetremizdir.



a)



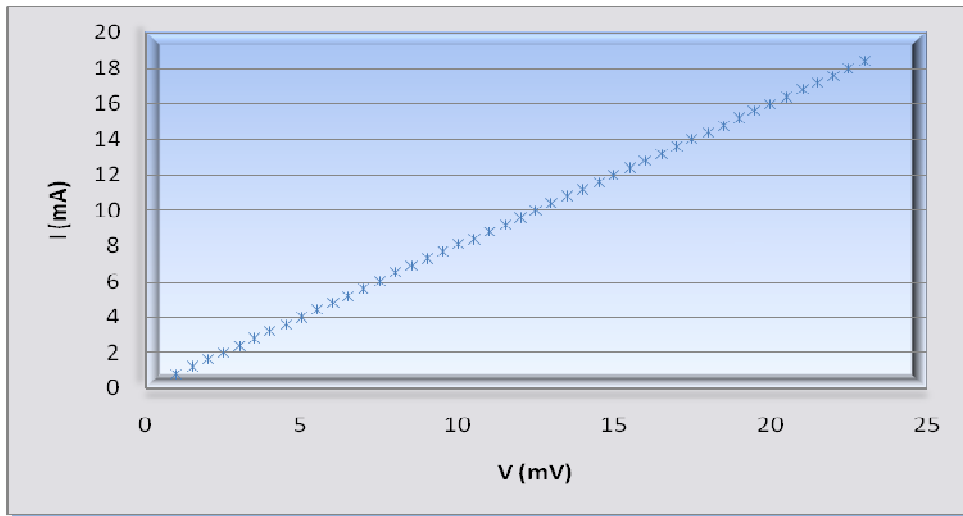
b)

Şekil 5.15 a) Elektriksel ölçüm düzeneğinin şematik diyagramı,

b) Elektriksel ölçüm düzeneğinin fotoğrafı.

Çizelge 5.2 Elektriksel ölçüm verileri

V (mV)	I (mA)	V (mV)	I (mA)
1	0,8	12,51	10
1,54	1,2	13	10,4
2,03	1,6	13,53	10,8
2,5	2	14,02	11,2
3,03	2,4	14,54	11,6
3,5	2,8	15,01	12
4	3,2	15,54	12,4
4,53	3,6	16,01	12,8
5,01	4	16,54	13,2
5,5	4,4	17,03	13,6
6,02	4,8	17,51	14
6,5	5,2	18,05	14,4
7	5,6	18,52	14,8
7,52	6	19,01	15,2
8,01	6,5	19,5	15,6
8,53	6,9	20,02	16
9,05	7,3	20,55	16,4
9,53	7,7	21,06	16,8
10,04	8,1	21,53	17,2
10,54	8,4	22,04	17,6
11,03	8,8	22,52	18
12,02	9,6	23,04	18,4

Şekil 5.16 Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitinin akım-voltaj karakteristiği (N. Ekem, 2004).

Elektriksel ölçümlerdeki verilerimizden

$$\rho = \frac{\Delta V S}{\Delta I L} \quad (5.1)$$

formülüyle öz direnç hesaplamamızda,

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 23.04 - 1.00 = 22.04 \text{ mV}, \quad L = 1.10^{-4} \text{ cm} \text{ ve } \Delta I = I_2 - I_1 = 18.4 - 0.8 = 17.6$$

mA ayrıca alan hesabı için  $r=0.15$  cm verileri kullanılarak;

$$S = \pi r^2 = 3.141592 \times (0.15)^2 = 0.070685 \text{ cm}^2$$

bulunur ve formülümüzde yerine yazarsak

$$\rho = \frac{\Delta V S}{\Delta I L} = \frac{22.04 \cdot 10^{-3} \cdot 0.070685}{17.6 \cdot 10^{-3} \cdot 1.10^{-4}} = \frac{1.583344}{1.76 \cdot 10^{-3}}$$

öz direncimiz  $\rho = 8.99 \cdot 10^2 \text{ } \Omega\text{cm}$  olarak bulur. Elektriksel iletkenliği de;

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (5.2)$$

formülünden hesaplırsak

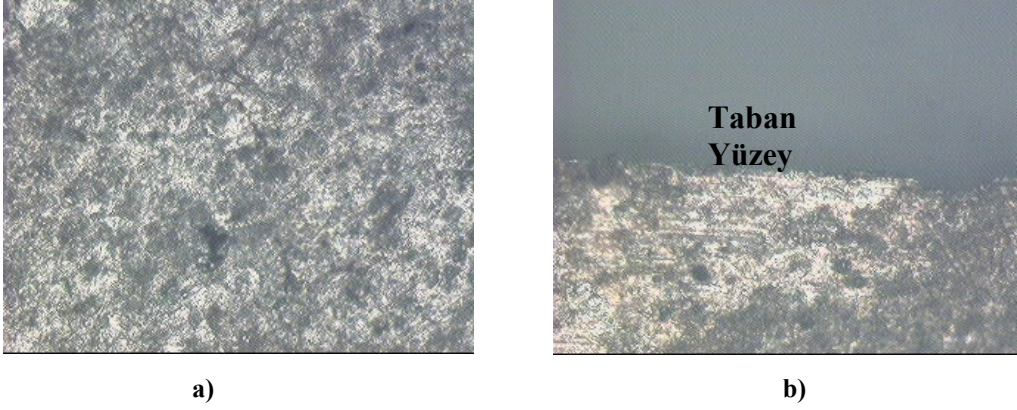
$$\sigma = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{8.99 \cdot 10^2}$$

elektriksel iletkenliği  $\sigma = 1.112 \cdot 10^{-3} \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  olarak buluruz. Bu sonuç ve Şekil 5.16' daki akım-voltaj grafiği bize ürettiğimiz kompozitin beklediğimiz gibi yarıiletkenlik ile iletkenlik arasında gümüşten daha kötü ancak  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ' den çok daha iyi bir iletken olduğunu ve ohmik davranış sergilediğini gösterir.

### 5.5 Optik Mikroskop Görüntüleri

Yaptığımız kompozitin OLYMPUS PM53-LECE 2000 görüntü analizörü ile optik mikroskop görüntüleri alınmıştır.



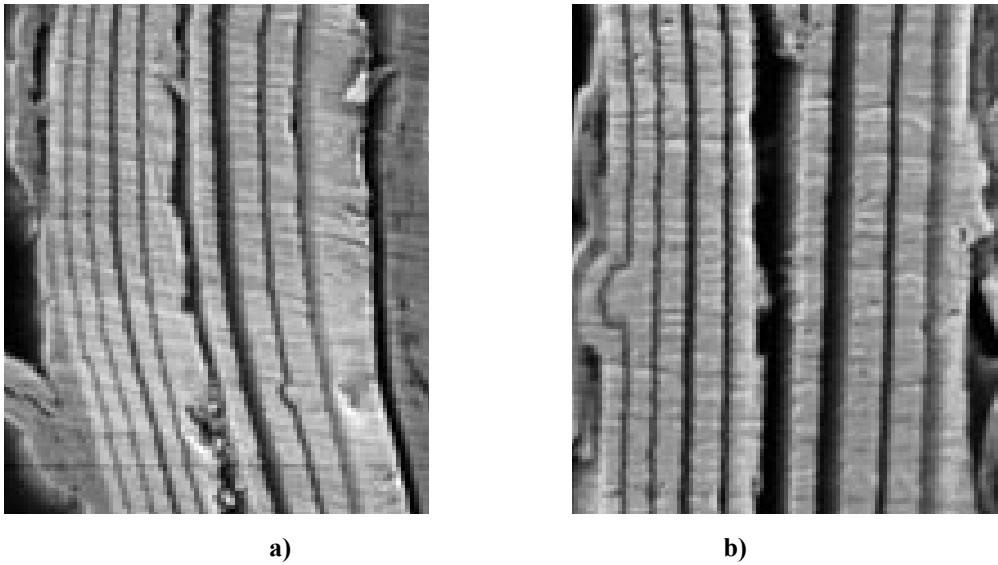


**Şekil 5.17 a)** Gümüş-Alumina kompozitin 20 defa büyütme mercekteki optik mikroskop görüntüsü, **b)** Kompozitin uç kısmının 20 defa büyütme mercekteki optik mikroskop görüntüsü.

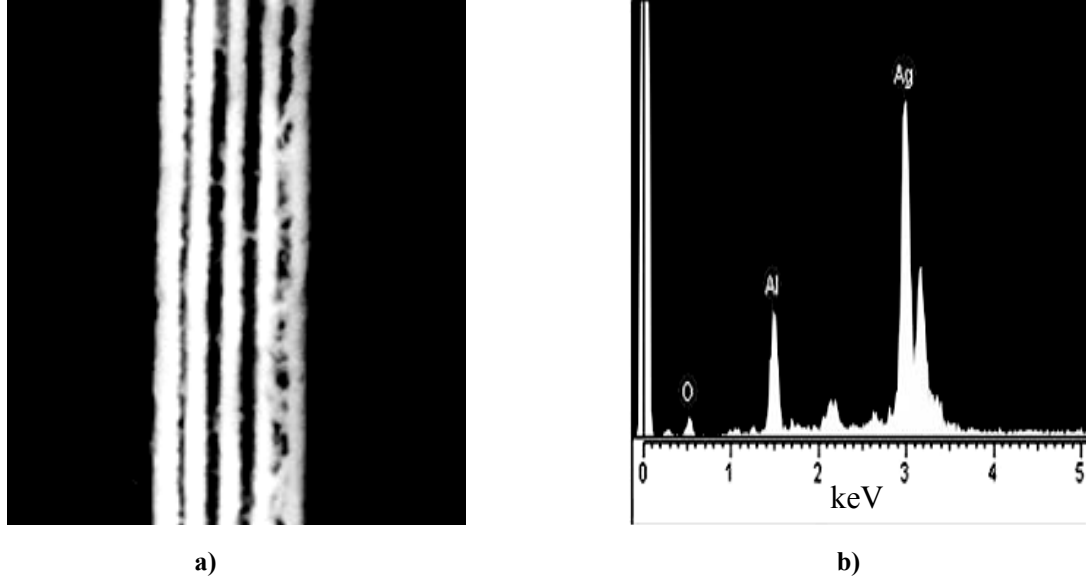
Şekil 5.17 deki görüntülerden homojen bir dağılım olduğu görülmektedir. Beyaz, parlak bölgeler gümüşlen ve siyah bölgelerde aluminadan gelmektedir (N. Ekem, 2004).

### 5.6 Elektron Mikroskop Görüntüleri

Üretilen kompozitin SEM görüntüsü ve EDX analizi Zeiss marka 50 VP Supra model elektron mikroskobu ile alınmıştır (Şekil 5.18 ve 5.19).

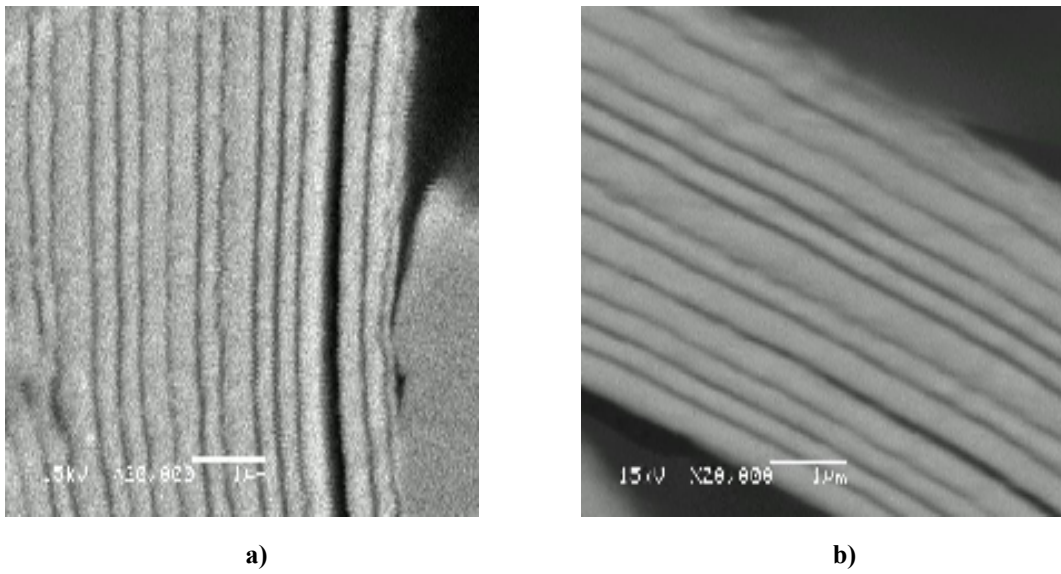


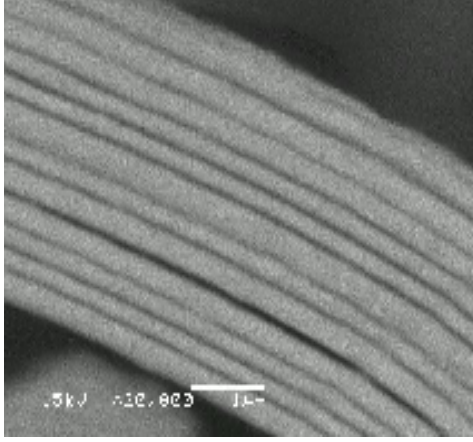
**Şekil 5.18** Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakalı kompozit için SEM görüntüleri. a) 2300 büyütme, b) 4000 büyütme.



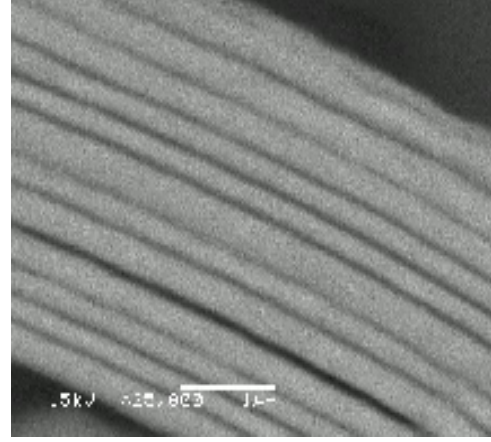
**Şekil 5.19 a)** Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının SEM görüntüsü, **b)** Nano tabakalarının EDX analizi (T. Akan, 2007).

Şekil 5.18 ve 5.19 de görülen SEM görüntülerinden ürettiğimiz gümüş-alumina kompozitin tabakaları açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca EDX analiz grafiğinde görülen oksijen, alüminyum ve gümüş pikleride bize kompozitimizin gümüş ve aluminadan oluştuğunu göstermektedir.

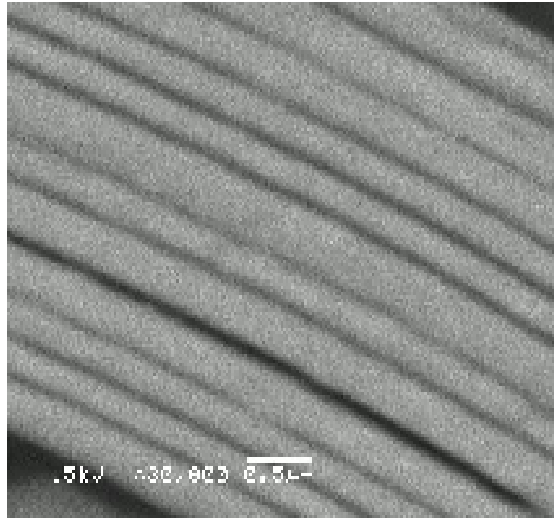




c)



d)

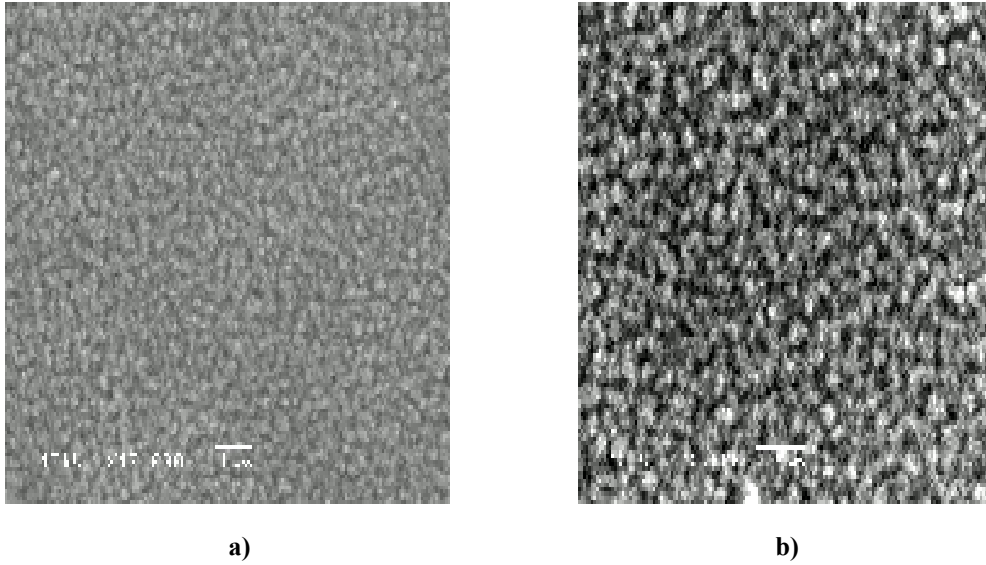


e)

**Şekil 5.20** Si tabandan sökülmüş Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının a) 20.000 büyütmeli SEM görüntüsü, b) 20.000 büyütmeli SEM görüntüsü, c) 20.000 büyütmeli SEM görüntüsü, d) 25.000 büyütmeli SEM görüntüsü, e) 30.000 büyütmeli SEM görüntüsü.

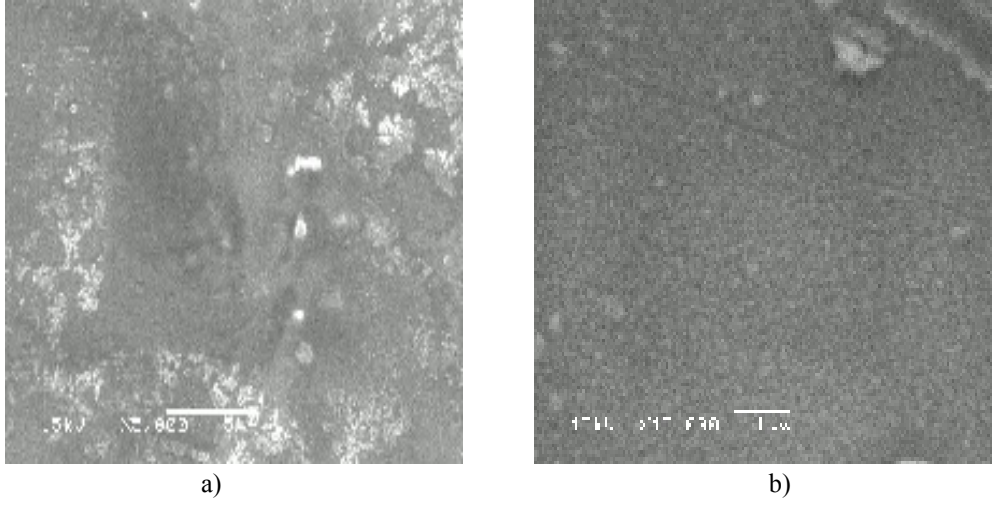
Şekil 5.20.a' da Si tabandan sökülmüş ilk tabakası Ag olan ve sırayla gümüş, alumina şeklinde devam edip son tabaka yine gümüş olan kompozitin 20.000 büyütmede ki SEM görüntüsü verilmiştir. Şekilde depolanan tabakalar rahatlıkla görülebilmektedir. Aynı numune üzerinde farklı bölgede aldığımız yine 20.000 büyütmeli SEM görüntümüzde (Şekil 5.20.b ve Şekil 5.20.c) oluşan tabakalar daha net olarak görülmektedir. Bu görüntülerde gördüğümüz silisyum taban üzerindeki kompozit

söküldükten sonra daha kolay ve net görüntü elde edebilmek için Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü laboratuvarında bakalit içine kesitten görüntü alabilecek şekilde koyduk ve yüzeyini parlattık. Bu şekilde bakalit içine gömülü kompozitimizin kesitten görüntüsünü Jeol Jsm-5600LV marka elektron mikroskobundan aldık. Numunenin farklı bölgelerinden 25.000 ve 30.000 büyütme ile aldığımız görüntülerde (Şekil 5.20.d ve Şekil 5.20.e) tabakalarda kırılmaya ve bozunmaya rastlanmadı. Üretilen tabakaların uniform olarak devam ettikleri görülmüştür.



**Şekil 5.21** Si tabandan sökülmüş Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının a) Si taban üzerine kaplanmış Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin yüzeyden alınmış 10.000 büyütmeli SEM görüntüsü, b) Si taban üzerine kaplanmış Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin yüzeyden alınmış 15.000 büyütmeli SEM görüntüsü,

Oluşturulan tabakaların yüzeyden alınan SEM görüntüleri ise Şekil 5.21.a, Şekil 5.21.b de verilmiştir. Burada silisyum taban üzerine oluşturulan gümüş ve alumina tabakalı kompozitin yüzeyden 5.000, 10.000 ve 15.000 büyütmede ki SEM görüntüleri incelendiğinde üretilen kompozitin hemen hemen homojen bir yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır. Şekil 5.21.b deki yüzeyden alınan görüntüden, Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tabakalı kompozitin tabana çok iyi tutunduğu ve homojen bir dağılıma sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 5.22** Si tabandan sökülmüş Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin nano tabakalarının a) Kaplama yapılmadan önceki boş cam yüzeyinin 5.000 büyütmeli SEM görüntüsü, b) Cam taban üzerine kaplanmış Ag- Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitin yüzeyden alınmış 15.000 büyütmeli SEM görüntüsü.

Şekil 5.22.a da ise boş cam tabanın 5.000 büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Cam tabanın yüzeyinin homojen olmadığı, çeşitli büyüklüklerde, gelişmiş güzel dağılmış ve şekillenmiş, yığılma şeklinde beyaz bölgelerin olduğu görülmektedir. Şekil 5.22.b de bu boş cam taban üzerine depolanan kompozitin 15.000 büyütmedeki SEM görüntüsü verilmiştir. Görüntüden, kompozitin hemen hemen homojen bir yapıya sahip olduğunu söyleyebiliriz. Bazı yerlerde beyaz renkte yığılmalar olduğu görülmektedir. Bu yığılmaların boş cam taban üzerindeki önceden oluşmuş yığılmalardan kaynaklandığını düşünmekteyiz.

## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Doğrudan ısıtılan termiyonik katot kullanılarak, anot materyalinin buharlaştırılmasıyla oluşan ve saf metal buharı plazması üreten yeni tip bir plazma kaynağı olan Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemiyle nano-katmanlı yapıda gümüş matrisli Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakalı kompozit malzeme üretilerek bazı fiziksel özellikleri incelendi, optik mikroskop ve elektron mikroskop görüntüleri alındı, elektriksel özellikleri incelendi ve optik emisyon spektrum analizi alındı.

Literatürde belirtildiği gibi birçok yöntem ile gümüş matrisli Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakalı kompozit malzemeler üretmek mümkündür.

Bu deneysel çalışmada Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakalı kompozit malzeme 13 katmandan oluşacak şekilde üretilmiştir. Gümüş ve alumina katmanlarının kalınlıkları birbirine eşit ve 130 nm olarak gerçekleştirilmiştir. Nanometre boyutunda ve eşit kalınlıkta oluşturulan tabakalardan meydana getirilen bu kompozitin en önemli özelliği sistemimizin çalışması sırasında gerek gümüş gerekse alüminanın saf olarak kullanılabilmesidir. Bir ara gaz yada yabancı parçacık içermeyen ilgili malzemenin gaz buharı plazması ile elde edilmiştir.

Yukarıda ifade edilen özellikleri oluşturabilmemiz önemli olup sistemimizde ki deşarjın, çalışma parametrelerini kullanarak, kontrol altında tutulabilmesiyle sağlanmıştır.

Termiyonik Vakum Ark (TVA) sistemiyle üretilen nano tabakalı kompozit malzememizin optik mikroskop görüntülerinin incelenmesiyle yüzeyin homojen bir dağılım gösterdiği görülmüştür. Ayrıca elektriksel özellikleri incelendiğinde kompozitimizin elektriksel iletkenliği literatürdeki gümüşün iletkenliğinden düşük alüminanın iletkenliğinden çok daha iyi olduğu anlaşılmaktadır

( $\sigma = 1.112 \cdot 10^{-3} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ). Buda çok iyi bir yalıtkan olan seramik ( $\sigma \cong 10^7 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$ ) katkılı bir kompozit için çok iyi bir iletkenlik katsayısıdır.

Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) kullanılarak kaplama anında kaplaması yapılacak numunelerin plazması incelendiğinde, üretilen plazma deşarjlarının saf olduğu görülmektedir. XRD analiz sonuçları da kaplamanın sadece Al, O ve Ag den oluştuğunu göstermiştir. Başka bir materyale rastlanmamıştır. Numunenin kesit yüzeyinden alınan SEM görüntülerinde ise nano tabakalar net bir şekilde görülebilmektedir. Yüzeyden alınan SEM görüntülerinde ise üretilen kompozitin optik mikroskop görüntüsünde de olduğu gibi hemen hemen homojen bir yapıya sahip olduğu göze çarpmaktadır ve Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano tabakalı kompozitin tabana çok iyi tutunduğu ve homojen bir dağılıma sahip olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

Gelecekte TVA sistemi ile üretilen nano matrisli-katmanlı kompozit malzemelerin nano-sertlik ölçümü, termal iletkenlik ölçümü, aşınma, erozyon testleri vs. yapılarak ayrıca farklı metaller ve seramikler kullanılarak geliştirilmesi yapılmalıdır.

**KAYNAKLAR**

- Akan T., 2003, ‘Termiyonik Vakum Ark (TVA)’ın Temel Özelliklerinin İncelenmesi’, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Akan T., 2005, Maddenin dördüncü hali plazma ve temel özellikleri, Çağdaş Fizik Elektronik Dergi, sayı 4,-1-3
- Akan T., **Serdar Demirkol**, Naci Ekem, Suat Pat, Geavit Musa, 2007, “Study of Metal and Ceramic Thermionic Vacuum arc Discharges”, Plasma Science and Technology, Vol.9, No.3, Jun.
- Akbulut H., 2007, Kompozit Malzemeler Ders Notları.
- Angstromsciences, <http://www.angstromsciences.com/technology/sputtering-technology/index.html> Erişim Tarihi: 07.01.2008
- Ali Özcan, <http://akademik.maltepe.edu.tr/~aliozcan/kompozit%20malzemeler.pdf> Erişim Tarihi:22.03.2008
- Borneinstein, [http://borneinstein.tripod.com/physics\\_engineering/thinfilm.html](http://borneinstein.tripod.com/physics_engineering/thinfilm.html) Erişim Tarihi: 19.04.2008
- Dcs, [www.dcs.lancs.ac.uk/iono/aurorawatch/](http://www.dcs.lancs.ac.uk/iono/aurorawatch/) Erişim Tarihi: 11.08.2007
- Demirkol S., 2004, ‘ Termiyonik Vakum Ark (TVA) Sistemiyle Nano Katmanlı Yapıda Ag-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tabakalı Kompozit Malzeme Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi’, Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.



Ersoy H.Y., 1992, 'Kompozit Malzeme', 55-110s

Eroğlu Ő, 2004, Seramik Kaplama Üretim ve Tanımlama Teknikleri, Teknoloji Tanıtım Konferansı, Gebze/KOCAELİ.

Evcin A., 2006, Yüzey Kaplama Teknolojisi Ders Notları.

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

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

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

Gül, F., 1999, Seramik Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Üretim Yöntemleri ve Özellikleri, M:Ü Fen Bilimleri Dergisi Sayı15, 101-113s.

G. Dorey, 2001, Impact Damage in Composites Development, Consequences and prevention, In 'Proc. 6<sup>th</sup> Int. Conf. On Composite Materials and 2<sup>th</sup> European Conf. On Composite Materials', Imperial College, London, vol 3, 3.1-3.26

H. Muta, K. Kurosaki, M. Uno, S. Yamanaka, 2003, Thermoelectric Properties of Constantan / Spherical SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Partical Composite, Journal of Alloys and Compounds, 45-52s

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

M. Erdoğan, 1998 Malzeme Bilimi Ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt II, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara

- Musa G., Betiu N., Mustata I., Baltog A. And Popescu A., 1983, "Low voltage arc welding in vacuum", *Rewiev Roum. Physics*, 28, 907.
- Musa G., Baltog A., Popescu A., Mustata I., 1986, "Electrical and spectral characteristics of aheated cathode discharge in metal vapors", *Contribution to Plasma Physics*, Vol.26, 171-177
- Musa G., 1992, "Discharge in metal vapors", *Romania reports in physics*, vol. 44, no. 9-10, 917-964
- Musa G., Ehrich., H. ve Mausbach, M., 1994, "Studies On Thermionic Cathode Anodic Vacuum Arcs", *J. Vac. Sci. Techn.*, A12(5), 2887-2895
- Musa G., Ehrich H. And Schuhman J., 1997, "Pure Metal Vapor Plasma Source with Controlled Energy of İons", *IEEE Transactions on Plasma Science*, Vol. 25, no.2, 236-391
- Musa G., Popescu A., Mustata I., Cretu M., Ehrich H., Schunman J., 1997, "Pure metal vapor plasma gun", *International symposium Plasma*, Opole University, Poland
- Musa G., 2004, "Thermionic Vacuum Arc: An Advanced Technology for Surface Coating", *Türk Fizik Derneği (TFD) 22. Fizik Kongresi*, Bodrum, Türkiye
- N. Ekem, T. Akan, S. Pat, **S. Demirkol**, M. Z. Balbağ, U. G. İşsever, M. İ. Cenik, G. Musa, 2005, "Boron Thin Film Deposition Using The Thermionic Vacuum Arc Technology", *Proceedings of XXVII-th International Conference On Phenomena of Ionized Gases (ICPIG-27)*, pp 05, 229-232, 18-22 July, Eindhoven, NETHERLANDS

- N. Ekem, 2004, S. Pat, Ö. Küsmüş, **S. Demirkol**, R. Vlodoiu, G. Musa, “Termiyonik Vakum Ark Yöntemiyle Katmanlı Kompozit Malzeme Üretimi ”, Türk Fizik Derneği (TFD) 22. Fizik Kongresi, Bodrum, Türkiye
- N., Ekem, Pat S., Küsmüş Ö., **Demirkol S.**, Ciupina V., Vlodoiu R., Musa G., 2004, ‘Termiyonik Vakum Ark Yöntemi ile Katmanlı Kompozit Malzeme Üretimi’ 22. Tür Fizik Derneği Kongresi, Bodrum.
- N., Ekem, 2003-2004, Ekem, N., Musa, G., Akan, T., Pat, S., Plazma Fiziği Ders Notları
- N. Ekem, T. Akan, S. Pat, U. G. İşsever, M. Z. Balbağ, M. İ. Cenik, **S. Demirkol**, Y. Kucukbalaban, G. Musa, 2005, “The Electron Temperatures of the Copper Thermionic Vacuum Arc (TVA) Discharge”, 6<sup>th</sup> International Balkan Workshop on Applied Physics, 5-7 July, Constanta, ROMANIA.
- Pat S., N., Akan T., Kusmus O., **Demirkol S.**, Vlodoiu R., Lungu C. P., Musa G., 2005, Study on Termionic Vacuum Arc- A novel and advanced technology for surface coating, Journal of optoelectronics and advanced materyals 7 (5) : 2495-2499 p.
- Roth, J.R., 1976, Vacuum technology, North-Holland Publishing Company, 496p.
- Roth, J.R., 1995, Industrial Plasma Engineering Volume I, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, 538p.
- S. Demirkol**, T. Akan, N. Ekem, H. Deligöz, S. Pat, G. Musa, 2006, “Studies on Ag and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Tehrmionic Vacuum Arc Discharges”, 2<sup>nd</sup> International Workshop & Summer School on Plasma PhysicS (IWSSPP), 3-9 July, Kiten, BULGARIA.
- S. Tariolle, F. Th’evenot, T. Chartier., J.L. Besson, 2004, “Boron carbide laminar composite properties, reinforcement”, Journal of the European Ceramic Society, Vol.2 No.5.

Şahin, Y, 2000, Kompozit, Malzemelere Giriş, Gazi Kitapevi, Ankara.

T. Akan, N. Ekem, **S. Demirkol**, S. Pat, M. Z. Balbag, I. Cenic, H. Deligoz, G.Musa, 2006, “Studies on Ag-Al2O3 Nano-layer Composite Produced by the Thermionic Vacuum Arc Method (TVA)”, 6th International Conference of the Balkan Physical Union, 22-26 August, İstanbul, TÜRKİYE

Tanenbaum, B.S., 1967, Plasma Physics, Mcgraw Hill Book Comp., NewYork, 360p.

V. Ceyhun, 2003, Mesut Turan, Tabakalı Kompozit Malzemelerin Darbe Davranışı, Makine Mühendisleri Odası Ocak Dergisi