



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



SOL-JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ Ag
KATKILI HfO₂ İNCE FİLMLEİN YAPISAL VE
OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Şehmus KAVAL

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran-2018
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Şehmus KAVAL tarafından hazırlanan "Sol-Jel Yöntemiyle Hazırlanmış Gümüş Katkılı HfO₂ İnce Filmlerin Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi" adlı tez çalışması 07/06/2018 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan
Prof. Dr. Ali YILMAZ

Danışman
Doç. Dr. Osman PAKMA

Üye
Doç. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

İmza





Yukarıdaki sonucu onaylıyorum.


Doç. Dr. Bahattin İŞCAN
FBE Müdürü


TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Şehmus KAVAL

Tarih: 07/06/2018

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SOL-JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ Ag KATKILI HfO₂ İNCE FİMLERİN YAPISAL VE OPTİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Şehmus KAVAL

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Osman PAKMA

2018, 51 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Ali YILMAZ
Doç. Dr. Osman PAKMA
Doç. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

Bu çalışmada, sol-jel daldırma yöntemiyle cam yüzeylere katkısız ve Ag-katkılı HfO₂ ince filmler elde edilmiştir. Daha sonra bu filmler 1 saat 500 °C'de tavlamaya bırakılmıştır. Katkısız ve Ag-katkılı HfO₂ ince filmlerin yapısal ve optiksel özellikleri X-ışını kırınım deseni (XRD), UV-VIS spektrometresi ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ile karakterize edilmiştir. Yapılan analiz sonuçları literatürde çeşitli yöntemlerle elde edilmiş HfO₂ kaplama sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnce film, Hafniyum oksit, Sol-jel, SEM, UV-VIS, XRD.

ABSTRACT

MS THESIS

STRUCTURAL AND OPTICAL PROPERTIES OF Ag-DOPED HfO₂ THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD

Şehmus KAVAL

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA

2018, 51 Pages

Jury

Prof. Dr. Ali YILMAZ

Assoc. Prof. Dr. Osman PAKMA

Assoc. Prof. Dr. M. Zafer KÖYLÜ

In this study, undoped and Ag-doped HfO₂ thin films were deposited on glass substrates using sol-gel dip coating method. These films were then thermally annealed at 500 °C for one hour. The structural and optical properties of undoped and Ag-doped HfO₂ thin films were characterized by X-ray diffraction, (XRD), UV-VIS spectrometry and scanner electron microscope (SEM). The results of this analysis were compared and interpreted with the results obtained in literature by various methods of coating with HfO₂.

Keywords: Thin film, Hafnium oxide, Sol-gel, SEM, UV-VIS, SEM.

ÖNSÖZ

Bu çalışma, Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında ‘Yüksek Lisans’ olarak gerçekleşti.

Bu çalışmada, sol-jel yöntemi ile hazırlanmış HfO₂ ince filmlerin yapısal ve optiksel özellikleri incelendi. Deneysel çalışmalar Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı İleri Fizik Araştırma Laboratuvarı’nda yapıldı.

Bu tez çalışmasının seçilmesinde, yürütülmesinde, sonuçlandırılmasında ve sonuçlarının değerlendirilmesinde maddi ve manevi destek ve yardımlarını esirgemeyen Sayın Hocam Doç. Dr. Osman PAKMA’ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışmanın laboratuvar aşamasında, metotların seçilmesinde ve sonrasında çalışmamızın tüm aşamalarında bulunup değerli katkılarını bizlerden esirgemeyen Erciyes Üniversitesi öğretim üyelerinden Doç. Dr. İshak Afşin KARİPER’e teşekkür ederim.

Ayrıca yaptığım bu çalışma esnasında çoğu kez bilgi ve tecrübelerinden istifade ettiğim Batman Üniversitesi Fizik Bölümü Anabilim Dalı Başkanı Prof. Dr. Ali YILMAZ’a teşekkür ediyorum.

Son olarak, hayatımın her aşamasında yanımda olan ve kıymetli desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili AİLEME, özellikle muhterem BABAM ve ANNEME en kalbi duygularıyla minnet ve şükranlarımı sunuyorum.

Şehmus KAVAL
Haziran-2018

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ	1
2. TEORİK BİLGİLER.....	4
2.1. Kristal Yapılar.....	4
2.1.1. Kristal sistemleri ve bravais örgüleri.....	4
2.2. Yapısal Analiz Teknikleri.....	7
2.2.1. X-Işını kırınım deseni (XRD).....	7
2.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM).....	7
2.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM).....	8
2.3. Optiksel Analiz Teknikleri.....	8
2.3.1. UV-VIS spektrometresi.....	8
2.4. İnce Film Oksit Yapı Elde Etme Yöntemleri.....	9
2.4.1. Termal buharlaştırma yöntemi.....	9
2.4.2. Saçtırma yöntemi.....	11
2.4.3. Kimyasal püskürtme yöntemi.....	11
2.4.4. Langmuir-Blodgett yöntemi.....	13
2.4.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi.....	14
2.4.6. Sol-Jel kaplama yöntemi.....	14
2.5. Temel Optiksel Kavramlar.....	17
2.6. Hafniyum Oksit (HfO ₂).....	22
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	23
3.1. Alt Tutucu Tabakaların Temizlenmesi	23
3.2. Çözeltilerin Hazırlanması Ve İnce Filmlerin Kaplanması.....	23
3.3. Deneyleerde Kullanılan Cihazlar.....	24
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	26
4.1. HfO ₂ İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri (XRD).....	26
4.2. HfO ₂ İnce Filmlerin Optiksel Özellikleri.....	29
4.3. HfO ₂ İnce Filmlerin SEM Görüntüleri.....	32
5. TARTIŞMA	33

KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	39



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

Å	: Angstrom
a	: soğurma katsayısı
a,b,c	: Kristal örgü parametreleri
Ag	: Gümüş
AgNO_3	: Gümüş nitrat
c	: Işık hızı
$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$: Aseton
$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$: Etanol
d	: Kristal düzlemleri arası mesafe
D	: Tanecik boyutu
e	: Kütle transfer katsayısına
h	: Plank sabiti
$h(t)$: Film kalınlığı
h_0	: Başlangıç kalınlığı
(hkl)	: Miller indisleri
Hf	: Hafniyum
HfCl_4	: Hafniyum klorür
HfO_2	: Hafniyum oksit
H_2O	: Deiyonize su
k	: Dielektrik sabiti
$^{\circ}\text{K}$: Kelvin
n	: Elektron konsantrasyonu
n	: Kırma indisi
p	: Boşluk konsantrasyonu
p_A	: Başlangıçtaki madde miktarı
p_A^0	: Birim hacimdeki uçucu madde miktarı
R	: yansıma katsayısı
SiO_2	: Silisyum oksit
T	: Mutlak sıcaklık
t	: Zaman
T	: Geçirgenlik
β	: Bragg açısı
θ	: Bragg kırınım açısı
ρ	: Solün yoğunluğunu
σ	: İletkenlik
λ	: Dalga boyu
μ	: Mobilite
η	: Solün vizkositesi
ν	: Foton frekansı
ω	: Açısal frekan

Kısaltmalar

AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
DC	: Doğru akım
eV	: Elektron Volt
JCPDS	: Joint Committee on Powder Diffraction Standarts
LB	: Langmuir Blodgett
PMT	: Foto çoğaltıcı
RF	: Radyo frekans
UV-VIS	: Görünür ultraviyole
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını kırınımı deseni



ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 1.1. Çeşitli dielektrik malzemeler (Kasap ve Crapper, 2006).....	2
Çizelge 2.1. Kristal sistemleri ve Bravais örgüleri.....	6
Çizelge 4.1. HfO ₂ ince filmlerin XRD desenlerinden hesaplanmış dereceler.....	27
Çizelge 4.2. HfO ₂ ince filmlerin XRD desenlerinden hesaplanmış ortalama tanecik büyüklüğü, bozuk yapı yoğunluğu ve birim alandaki tanecik sayısı.....	27
Çizelge 4.3. HfO ₂ ince filmlerin hesaplanmış optik band aralığı ve ölçülmüş kalınlık Değerleri.....	31



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Kristal örgü.....	4
Şekil 2.2. Bravais örgüleri.....	5
Şekil 2.3. Taramalı elektron mikroskobu çalışma dizaynı (Aydoğan, 2011).....	8
Şekil 2.4. Termal buharlaştırma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları.....	9
Şekil 2.5. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi.....	10
Şekil 2.6. Termal buharlaştırma sistemi (Batman Üniversitesi).....	10
Şekil 2.7. Saçtırma mekanizması.....	11
Şekil 2.8. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi.....	12
Şekil 2.9. Püskürtme sistemi (Batman Üniversitesi).....	12
Şekil 2.10. Hava-su arakesitinde düzenlenmiş yüzey etkin moleküller.....	13
Şekil 2.11. LB sistemi (Batman Üniversitesi).....	13
Şekil 2.12. Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi.....	14
Şekil 2.13. Sol-jel döndürme yöntemiyle kaplama aşamaları.....	15
Şekil 2.14. Sol-jel daldırma yöntemiyle kaplama aşamaları.....	17
Şekil 2.15. Gelen, yansıyan ve kırılan ışınlar.....	20
Şekil 2.16. Tek katman film.....	20
Şekil 2.17. HfO ₂ yapısının faz gösterimleri.....	22
Şekil 3.1. 0-1200 °C ayarlanabilir Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın.....	24
Şekil 3.2. Holmarck sol-jel daldırma cihazı.....	25
Şekil 3.3. Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIS spektrofotometre cihazı.....	25
Şekil 3.4. Avantes AvaSpec-ULS2048 ince film kalınlık ölçüm sistemi.....	25
Şekil 4.1. Cam alt tabaka yüzeye kaplı HfO ₂ ince filmin X-ışını kırınım desenleri.....	26
Şekil 4.2. Cam alt tabaka yüzeye kaplı (a) % 1 Ag, (b) % 5 ve (c) % 10 Ag katkılı HfO ₂ ince filmin X-ışını kırınım desenleri.....	28
Şekil 4.3. Katkısız ve Ag katkılı HfO ₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlikleri.....	29
Şekil 4.4. HfO ₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı (a) yansıma, (b) soğurma ve (c) kırma indisi eğrileri.....	30
Şekil 4.5. (a) Katkısız, (b) %1 Ag katkılı, (c) %5 Ag katkılı ve (d) %10 Ag katkılı HfO ₂ ince filmler için hesaplanmış optik band aralığı değerleri.....	31
Şekil 4.6. Katkısız ve katkılı HfO ₂ ince filmlerin SEM görüntüleri.....	32

1. GİRİŞ

20. yüzyılda diyot ve transistör gibi temel elektronik devre elemanlarının bulunması ile teknoloji hızlı bir şekilde ilerlemiştir. Günümüzde kullanmış olduğumuz cep telefonları, bilgisayarlar ve birçok elektronik cihazlarda bu devre elemanları bolca kullanılmaktadır. Yarı iletken teknolojisine dayanan bu devre elemanları, teknolojinin ilerlemesi ile çok küçük boyutta entegre diye tabir ettiğimiz yapı içerisine milyonlarcasını yerleştirilebilmektedir.

Dielektrik malzemeler günümüz teknolojisinde entegre devre teknolojisinde önemli bir yere sahiptir. Metal-oksit-yarıiletken diyotlar, güneş hücreleri, sensörler, hafıza bellekleri, işlemciler ve alan etkili transistörler gibi yapılarda kullanılmaktadır. Silisyum dioksit (SiO_2) bu teknolojilerde en çok kullanılan dielektrik malzemelerden bir tanesi olmuştur. Özellikle yüksek optiksel geçirgenliğe, yüksek dielektrik katsayısına ve düşük iletkenliğe sahip olması ile bilinir. Amorf yapısı ile bilinen silisyum dioksitin dielektrik sabiti 3,9 ve bant aralığı 8,9-9,0 eV mertebesindedir (Robertson ve Chen, 1999; Robertson, 2000).

Entegre devre teknolojisinde çokça kullanılan SiO_2 'in yerine daha yüksek dielektrik kat sayısına sahip malzemelerin kullanılması gündemdedir. Çizelge 1.1'de dielektrik malzemeler sıralanmıştır. Çizelge 1.1'de görüldüğü gibi 22 gibi yüksek dielektrik kat sayısına sahip hafniyum dioksit (HfO_2), SiO_2 'e alternatif dielektrik bir malzemedir. HfO_2 hazırlanma şartlarına bağlı olarak monoklinik, tetragonal ve kübik kristal yapıda olabilmektedir (Kidchob ve ark., 2007; Wang ve ark., 2008). HfO_2 ince filmini çeşitli büyütme yöntemleri ile elde edilebilir. Bunlar: atomik tabaka biriktirme yöntemi (Boher ve ark., 2004; Ferrari ve ark., 2004) , kimyasal buhar depolama (Fang ve ark., 2003; Fang ve ark., 2004), fiziksel buhar depolama (Callegari ve ark., 2001; Sun ve ark., 2003), darbeli lazer depolama (Essary ve ark., 2004; Wang ve ark., 2003), radyo frekans saçırma (Gruger ve ark., 2004; Lee ve ark., 2000) ve plazma oksidasyon (He ve ark., 2004) yöntemleri sıralanabilir. Bu yöntemlerle elde edilen ince filmler kaliteli olmasına rağmen ekonomik değildir. Sol-jel ve kimyasal banyo depolama yöntemlerinde kullanılan düzenekler daha ekonomiktir. Ayrıca bu yöntemlerle de elde edilen ince filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin kontrolü kolay olduğu için daha nitelikli filmler elde edilebilir.

Çizelge 1.1. Çeşitli dielektrik malzemeler (Kasap ve Crapper, 2006)

Dielektrik malzeme	Dielektrik sabiti (k)	Bant Aralığı E_G (eV)	Kristal Yapısı (400-1050 °C)
SiO ₂	3,9	8,9-9,0	Amorf
Si ₃ N ₄	7	4,8-5,3	Amorf
Al ₂ O ₃	9	6,7-8,7	Amorf
Y ₂ O ₃	11-15	5,6-6,1	Kübik
Sc ₂ O ₃	13	6,0	Kübik
ZrO ₂	22	5,5-5,8	Monoklinik, tetragonal, kübik
HfO ₂	22	5,5-6,0	Monoklinik, tetragonal, kübik
La ₂ O ₃	30	6,0	Hexagonal, kübik
Ta ₂ O ₅	26	4,6	Ortorombik
TiO ₂	80	3,05-3,3	Tetragonal (rutil,anatez)
ZrSiO ₄	12	6-6,5	Tetragonal
HfSiO ₄	12	6,5	Tetragonal
HfSiON	12-17	6,9	Amorf

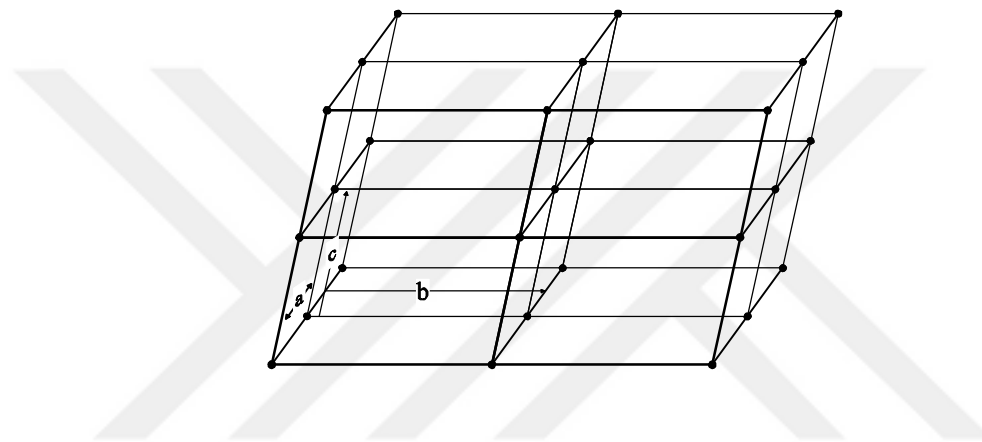
Bu tez çalışmasında cam alt tabakalara sol-jel daldırma yöntemi ile HfO_2 ince filmlerin kaplanması; elde edilen bu ince filmlerin yapısal ve optiksel özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Yapısal özellikler X-ışını kırınımı deseni (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile ve optiksel özellikleri ise UV-VIS spektrum ölçümlerinden yararlanılmıştır. Daha sonra aynı yapıya %1, %5 ve %10 gümüş (Ag) katkılama ile katkılı HfO_2 ince filmler elde edilmiş, bu yapıların da yapısal ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve literatürdeki çalışmalar da dikkate alınarak yorumlanmıştır.



2. TEORİK BİLGİLER

2.1. Kristal Yapılar

Atomların yerleşim düzenleri bir katı içerisinde kendini düzenli bir şekilde tekrarlıyorsa yapı kristal yapı olarak tanımlanır. Eğer bu yapı tekrarlamıyorsa yapı amorf yapı olarak tarif edilir. Şekil 2.1’de kristal yapı içerisinde atomların üç boyutta dizilişleri görülmektedir. Kristalin bu yapısı örgü veya uzay örgüsü olarak isimlendirilir.



Şekil 2.1. Kristal örgü

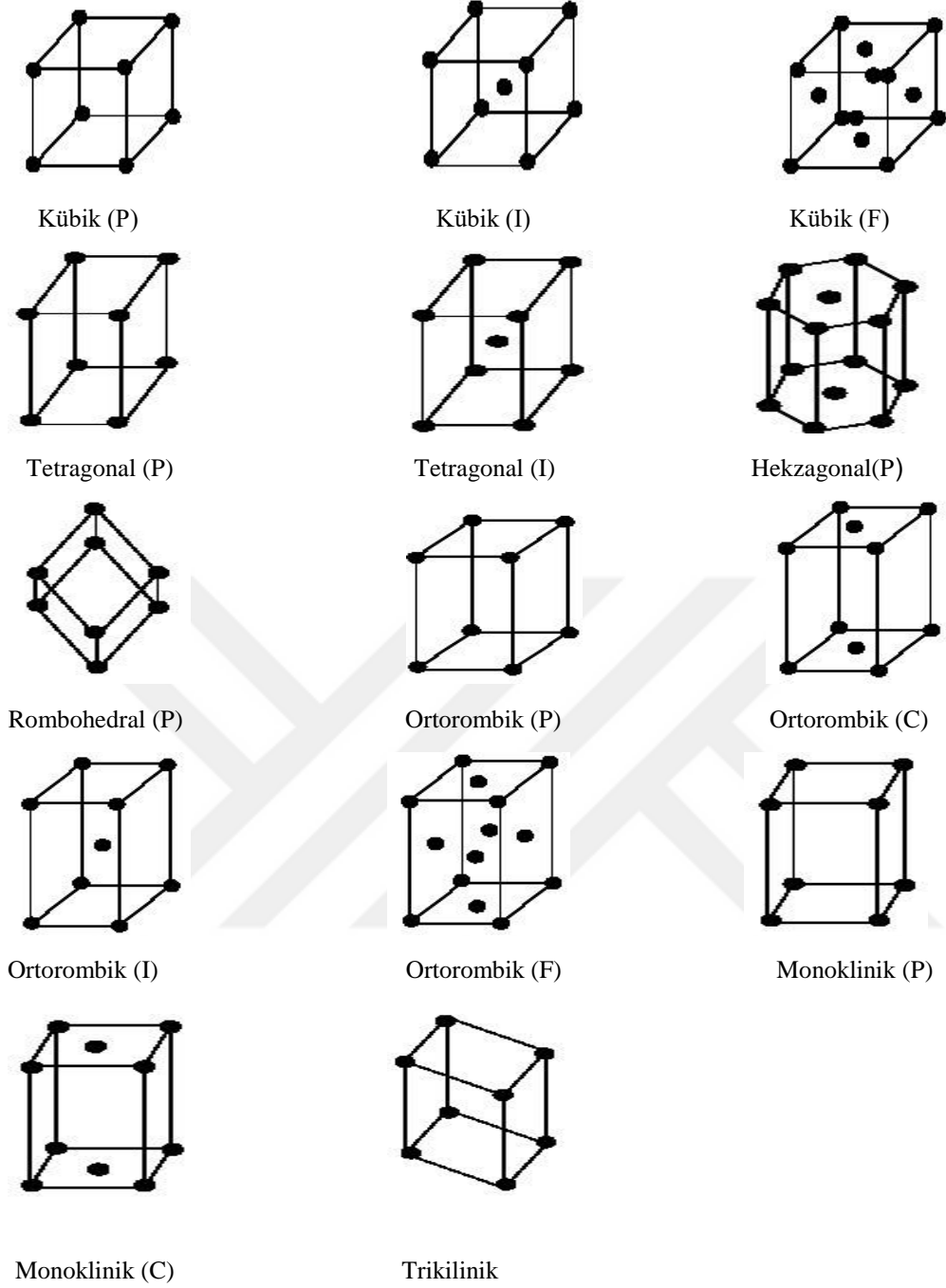
Bu periyodiklik, aşağıda belirtilen vektörle kristal boyunca yer değiştirerek açıklanabilir,

$$r = ua + vb + wc \quad (2.1)$$

Buradaki u , v ve w tam sayı ve a , b ve c öteleme vektörleridir. Bu şekilde bir vektörle bağlantılı sonsuz bir kristal, iki nokta belirlenip bakıldığında aynı gözükür.

2.1.1. Kristal sistemleri ve Bravais örgüleri

Uzay örgüleri ilk defa 1835 yılında Frankenheim tarafından tanımlanmıştır. 15 adet kristal örgü sistemi tanımlanmış olmasına rağmen sonrasında Bravais bunu 14’e indirmiştir. Bravais ile anılan 14 adet örgü sistemi Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Bravais örgüleri

Çizelge 2.1. Kristal sistemleri ve Bravais örgüleri

Sistem	Eksen uzunlukları ve açıları	Bravais Örgüsü	Örgü Sembolü
Kübik	Eksenler in üçü de birbirine eşittir. Açılar 90° 'ye eşittir. $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Basit	P
		Cisim-merkezli	I
		Yüzey-merkezli	F
Tetragonal	Eksenlerden ikisi birbirine eşittir. Açılar 90° 'ye eşittir. $a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Basit Cisim-merkezli	P I
Ortorombik	Eksenlerin üçü de birbirine eşit değildir. Açılar 90° 'ye eşittir. $a \neq b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	Basit	P
		Cisim-merkezli	I
		Taban-merkezli	C
		Yüzey- merkezli	F
Rombohedral	Eksenlerin hepsi birbirine eşittir. Açıların hepsi birbirine eşittir. $a = b = c, \alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	Basit	R
Hekzagonal	Eksenlerin ikisi birbirine eşittir. Açılardan ikisi 90° , üçüncüsü 120° dir. $a = b \neq c, \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ dir.	Basit	P
Monoklinik	Eksenlerin üçü de birbirine eşit değildir. Açılardan ikisi birbirine eşittir ve 90° . $a \neq b \neq c, \alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	Basit	P
		Taban-Merkezli	C
Triklirik	Eksenlerin üçü de birbirine eşit değildir. Açıların üçü de birbirine eşit değildir. $a \neq b \neq c, \alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	Basit	P

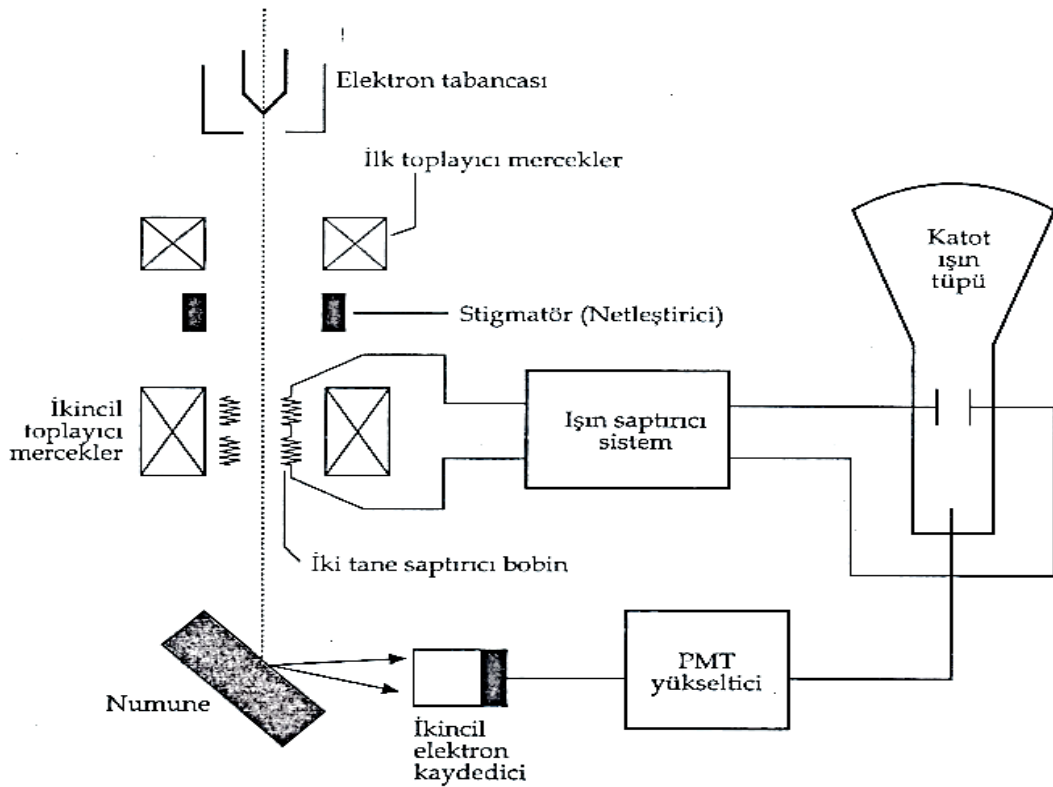
2.2. Yapısal Analiz Teknikleri

2.2.1. X-Işını kırınım deseni (XRD)

XRD yöntemi ile kristal yapının hücre tipi ve düzlemler arası mesafeler belirlenebilir. XRD yöntemi; malzeme üzerine gönderilen X-ışını ile malzemenin elektronları ile etkileşerek saçılmaya uğrar ve kristal yapısı hakkında bilgiyi verir. XRD yöntemi en basit şekli ile yapı üzerine gönderilen X-ışını demetinin atom düzlemlerine çarpıp yansımadır. XRD ile malzeme içerisindeki kimyasal bileşenlerin türü ve hangi fazda oldukları belirlenebilir. Ayrıca XRD yöntemi ile belirlenen kırınım piklerin şiddetleri, bileşenin malzeme içindeki oranına bağlı olarak nicel analiz de yapılabilir. Elde edilen kırınım spektrumları JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards) kartları kullanılarak bilinmeyen bir malzeme tayini yapılabilir. Spektrumdaki piklerin şiddetleri, yarı pik genişlikleri ve zemin (background) şiddetleri malzemelerin kristalleşmesi hakkında bilgi verir.

2.2.2. Taramalı elektron mikroskobu (SEM)

Taramalı elektron mikroskobu (SEM-scanning electron microscope), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi bir tungsten katottan termoyonik olarak salınan elektronlar ardışık bulunan iki toplayıcı merceğe odaklanırlar. İki çift bobin numune yüzeyinin dikdörtgen bir bölgesi üstünde demeti yansıtır. Numune yüzeyine çarpan ilk elektronlar enerjilerini esnek olarak diğer atomik elektronlara ve örgüye transfer gerçekleştirirler. Rastgele saçılma işlemi ile yüzeyi terk eden bazı elektronlar da örneğe bakan bir dedektör ile kaydedileceklerdir. Genellikle bu şekilde kayıtlar, birkaç angström'den daha büyük olmayan derinlikten gelen diğer ikincil düzeydeki elektronlardır. Burada kullanılan foto çoğaltıcı (PMT) amplifikatör (yüksekteç), bir katot ışını tüpünün şiddetini değiştirmek için görev yapan, sinyal veya çıkışı yükseltmek için yararlanır. Araştırma niteliğindeki SEM'ler de genellikle $\sim 50 \text{ \AA}$ çözünürlüğe sahip görüntüler elde etmek için kullanılabilirler (Aydoğan, 2011). SEM tekniği ile sadece yüzey görüntüsü elde edilmez, aynı zamanda numune döndürülerek bu teknikte yapı içinde (SEM kesit alanı) farklı tabakaların kalınlıkları hakkında bilgi de elde edilebilir.



Şekil 2.3. Taramalı elektron mikroskobu çalışma dizaynı (Aydoğan, 2011)

2.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM)

Bu tekniğin en önemli özelliği; geleneksel elektron mikroskopisi tekniklerinden kaçınılmaz olan özel örnek hazırlanması, vakum vb. şartlara ihtiyaç duyulmadan, incelenecek örneğin yüzeyinin moleküler ve ya atomik yapıda, üç boyutta görüntüsünün elde edilmesidir. AFM 1986 yılında IBM laboratuvarındaki çalışmalar sırasında geliştirilmiş ve atomik boyuttaki bir sivri ucun yüzeyi taraması ilkesine dayanır. Uç ile yüzey arasındaki etkileşme kuvveti ölçülür. Uç yüzey boyunca sürüklenebilir veya hareket ederken titreşebilir. Etkileşme kuvveti numunenin tabiatına, prop uca ve uç ile yüzey arasındaki mesafeye bağlıdır. Bu metotta angström mertebesinden 100 μm 'ye kadar yüzey topoğrafisi görüntülenebilir.

2.3. Optiksel Analiz Teknikleri

2.3.1. UV-VIS spektrometresi

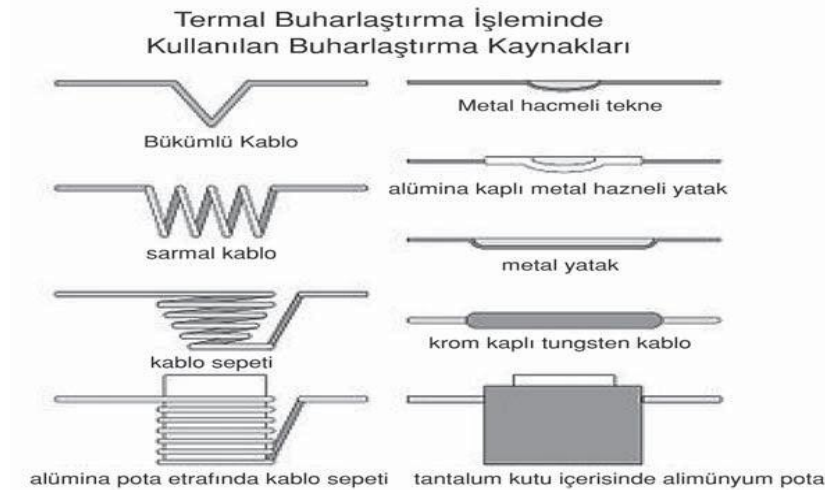
Spektrofotometrelerde dalga boyu analiz yöntemi olarak tanımlanır. Dalga boyuna karşı geçirgenlik veya soğurma ölçümü alınır. Genellikle ultraviyole (UV) spektrofotometreler görünür ve birleşik halde olup; UV-VIS olarak isimlendirilir. Bu tip spektrofotometrelerin dalga boyları 100 ile 800 nm arasında değişen ışın ile tarayarak çalışırlar. UV-VIS ışık kaynakları aynı sistem içinde kullanılır. Bilgisayar yazılımı ile 100-400 nm arasında UV, 400-800 nm arasında görünür lokal ışık kaynağı kullanılır.

Örneğin bir çözeltiden geçen ışık miktarı, ışığın çözelti içinde geçiş yaptığı yol ve çözelti konsantrasyonu ile logaritmik olarak ters orantı, emilen ışık miktarı ise doğru orantılıdır. Çözeltiden çıkan ışık şiddetinin çözeltiye giren ışık şiddetine oranı (I/I_0), geçirgenlik (T) olarak tanımlanır. Geçirgenlik, genellikle (% T) olarak tanımlanır.

2.4. İnce Film Oksit Yapı Elde Etme Yöntemleri

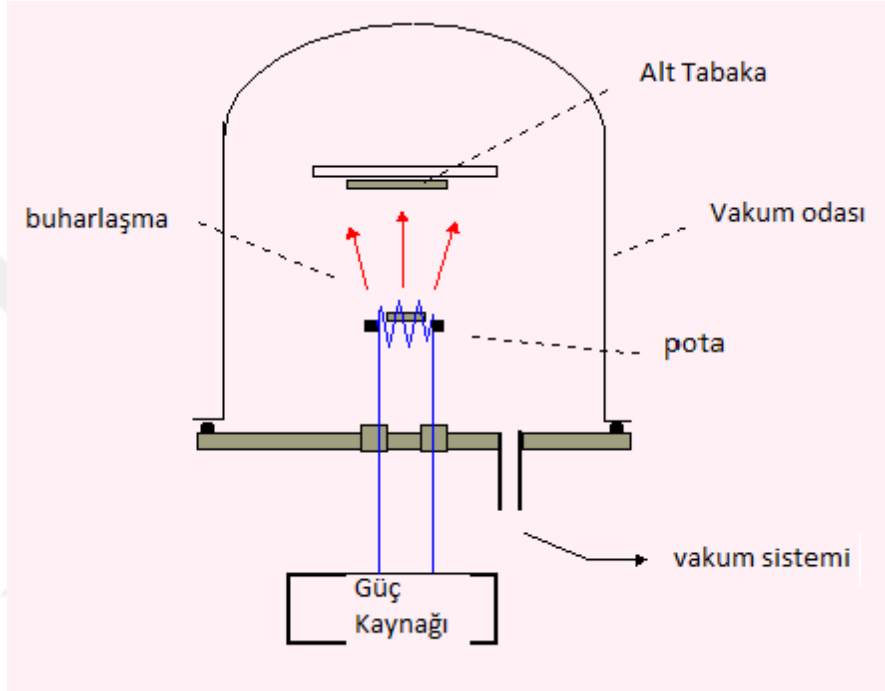
2.4.1. Termal buharlaştırma yöntemi

Termal buharlaştırma yöntemi, vakumlu ortamda cam vb. gibi alt tabaka yüzeyine kaplama oluşturulan süreçtir. Vakum kaplama olarak da isimlendirilen süreç elektrot arasındaki rezistansın ısıtılmasıyla oluşur. Tungsten, molibden gibi ısıya dayanıklı ve çok yüksek ergime noktasına sahip metallere üretilmiş olan potaların içerisine alüminyum, altın, gümüş ve krom gibi metallerin ısıtılarak buharlaştırmasıyla oluşur.



Şekil 2.4. Termal buharlaştırma işleminde kullanılan buharlaştırma kaynakları

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi cam veya metalden meydana gelmiş oda içerisinde vakum altındaki buharlaştırma yöntemini şematik gösterimi görülmektedir. Pota içerisine buharlaştırılmak istenen malzeme yerleştirilir. Vakum altında iken (10^{-6} - 10^{-7} Torr) pota üzerinden yüksek akım geçirilerek ısıtılır. Buharlaştırılmak istenen malzeme ısıtılınca atom ve moleküllerden oluşmuş gaz halini alır ve alt tabaka yüzeyine çökerek ince film şeklinde kaplanır. Filmin homojen olması ve büyüme hızı ortamın vakum şartlarına sıkı bir şekilde bağlıdır (Bouchenaki ve ark., 1991).



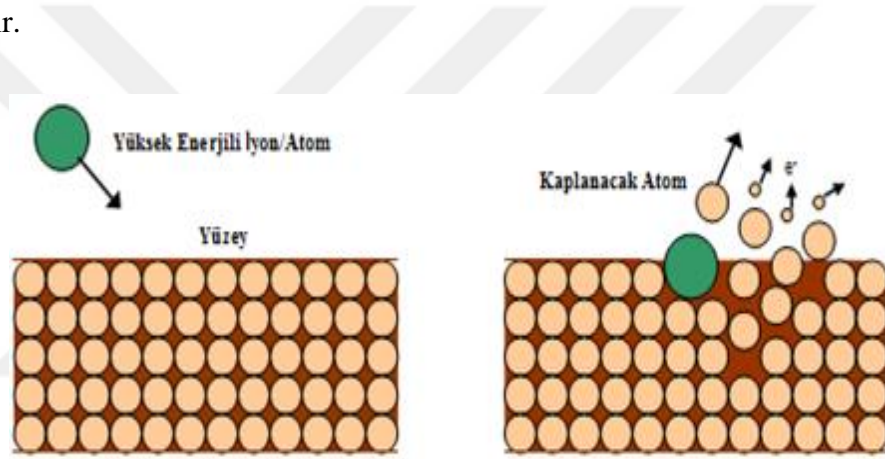
Şekil 2.5. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi



Şekil 2.6. Termal buharlaştırma sistemi (Batman Üniversitesi)

2.4.2. Saçtırma Yöntemi

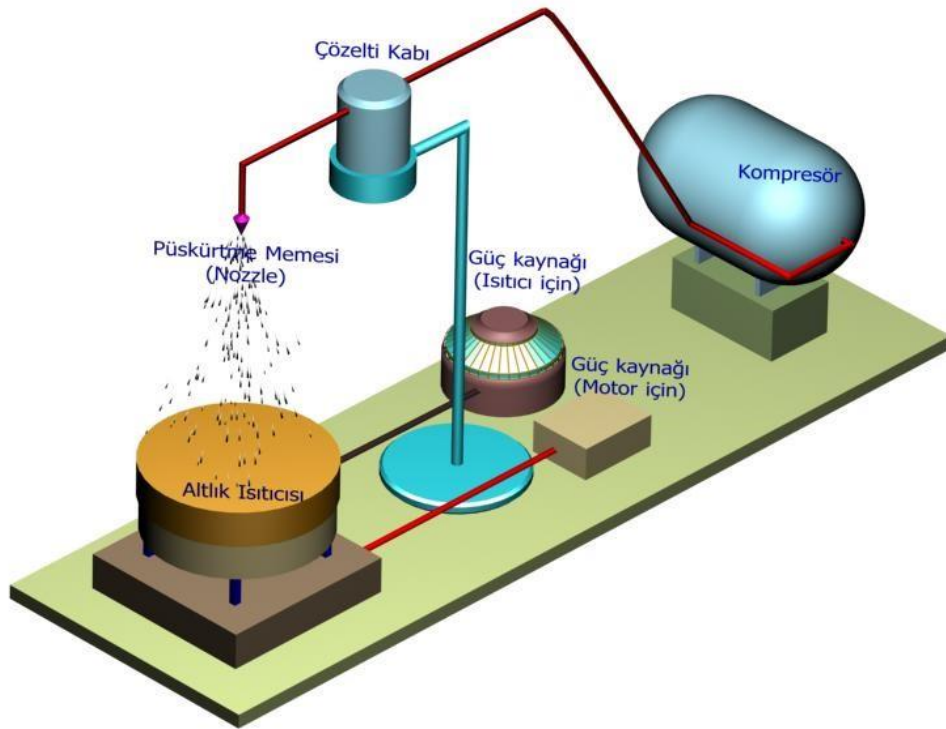
İnce film kaplamalardan genellikle buhara kaynağı olarak saçtırma yöntemi tercih edilir. Diğer kaplama yöntemlerine göre birçok üstünlüğü bulunan saçtırma yönteminde, şekil 2.7’de görüldüğü gibi katı malzeme pozitif iyonlarla bombardıman edilerek atomlar yüzeyden koparılır ve saçılan atomlar alt tabaka yüzeyinde film tabakasını oluşturur. Saçtırma yönteminde biri anot diğeri katot olmak üzere iki elektrot bulunur. Katodun ön yüzeyi kaplanacak malzeme ile örtülmüştür. Kaplama yapılacak alt tabaka yüzey ise anot üzerine yerleştirilir. Saçtırma çemberi, argon gazı ile doldurulmuştur. DC gerilim oluşturularak Ar^+ iyonları hedef malzemeye saçtırılır ve alt tabaka yüzeyde ince film tabakası oluşması sağlanır. Bu sisteme RF-diyot saçtırma adı da verilir.



Şekil 2.7. Saçtırma mekanizması

2.4.3. Kimyasal püskürtme yöntemi

Kimyasal püskürtme yönteminde elde edilecek filmler için hazırlanan sulu çözeltilerin karıştırılarak ısıtılmış alt tabaka yüzeyi üzerine hava gazı veya basınçlı azot yardımıyla belirli bir süre püskürtülür. Kimyasal püskürtme yöntemi oksit film elde etme yöntemlerinden en ucuz ve en kolaylarından bir tanesidir. Filmin kalitesi, taban sıcaklığı, püskürtme oranı ve filmin kalınlığı gibi deneysel parametrelerle değişir. Kimyasal püskürtme yönteminin dezavantajı ise tüketilen çözelti miktarının fazla olmasıdır.



Şekil 2.8. Kimyasal püskürtme yönteminin şematik gösterimi

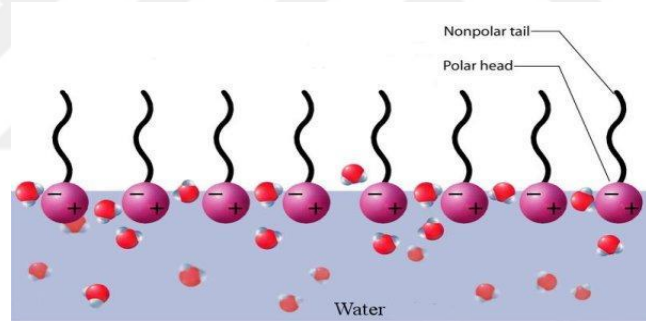


Şekil 2.9. Püskürtme sistemi (Batman Üniversitesi)

2.4.4. Langmuir-Blodgett yöntemi

Langmuir Blodgett (LB) ince film kaplama yönteminde kaplama yapılacak alt tabakanın sıvı yüzeyine daldırılarak organik materyalin bir veya daha fazla tek katmanın katı üzerine kaplanmasıyla oluşur. Langmuir-Blodgett filmleri Irving Langmuir ve Kaharine B.Blodgett tarafından bu teknik keşfedildikten sonra isimlendirilmiştir.

LB filmler, yüzey aktif (sufactant) gibi amfilif moleküller, hava-su arakesitinde hava ile etkileştiğinde oluşur. Yüzey aktif ajanlar hidrofobik bitiş ve hidrofilik başlangıca sahip moleküllerdir. Yüzey aktif maddelerin konsantrasyonu kritik micellar konsantrasyonundan (CMC) daha küçük olduğunda şekil 2.10' daki gibi düzenlenirler. Bu davranış yüzey-enerji açısından açıklanabilir. Kuyruk kısımları hidrofobik olduğundan hava ile teması, su ile temasa tercih ederler. Benzer bir şekilde baş kısımları hidrofilik olduğundan hava ile temas etmektense bu kısım su ile temas eğilimindedir. Ana etki yüzey enerjisini düşürmedir.



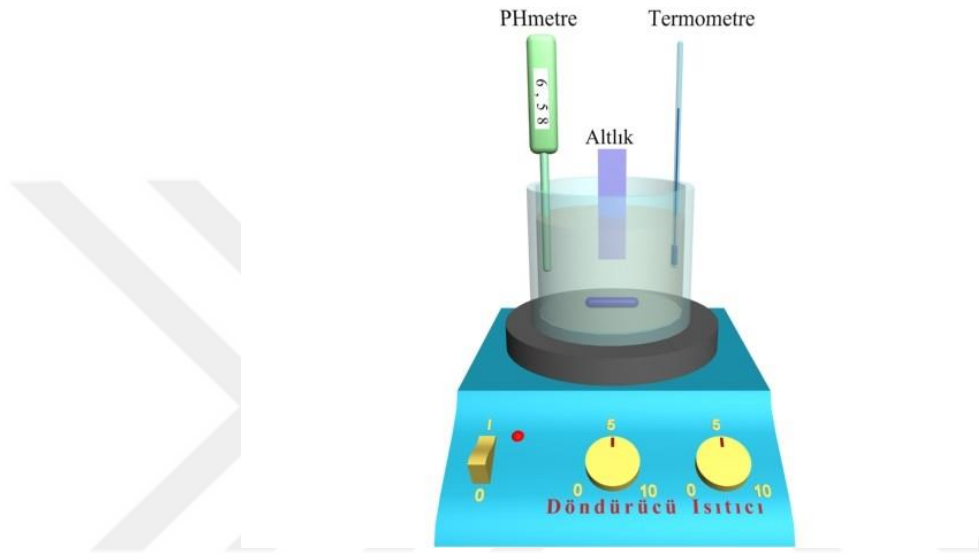
Şekil 2.10. Hava-su arakesitinde düzenlenmiş yüzey etkin moleküller



Şekil 2.11. LB sistemi (Batman Üniversitesi)

2.4.5. Kimyasal banyo depolama yöntemi

İnce film kaplama yöntemlerinde olan kimyasal banyo depolama yöntemi kullanmak oldukça basit bir yöntemdir. Kısaca bu yöntem; metal, hidroksit, sülfür ya da selenit iyonlarının kaynağını içeren sulu çözeltiler içerisinde temizlenmiş alt tabakaların belirli bir zaman daldırılarak ince filmlerin bu alt tabaka tabanlar üzerine biriktirilmesi ile elde edilen bir yöntemdir.



Şekil 2.12. Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi

2.4.6. Sol-Jel kaplama yöntemi

İnce film kaplama yöntemlerinden olan sol-gel yöntemi ilk kez literatüre 1946 yılında girmiştir. Sıvı içerisindeki katı maddelerin süspansiyonuna sol denilmektedir ve yerçekimi ihmal edilebilir. Moleküller arası Van der Waals ve elektriksel itme kuvvetlerinin etkisi yer çekimi kuvvetine oranla fazla olduğu için solü oluşturan malzemelerin dibe çökmesi gerçekleşmez. Sanayi ve teknoloji alanında sıkça kullanılan sol-jel yönteminin üstünlüklerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Kaplanan film yüzeyi homojendir.
- Başlangıç malzemesinin saflığına bağlı olarak filmlerde saftır.
- Uygulama yöntemi basit ve ekonomiktir.
- Kaplamalar sırasında yüksek sıcaklıklara gerek duyulmaz.

- Ortam kirliliği yok denecek kadar azdır.
- Sol-gel yöntemi, taşıyıcının geometrisi ile sınırlı değildir.
- Çok katmanlı kaplamalar yapmak mümkündür.
- Birden fazla katmanlı filmler hazırlamak mümkündür.
- Hazırlanan filmler gözenekli yapıda oluşur. Gözenekliliğin kontrolü, sol hazırlamada kullanılan malzemelerin seçimi ve katılma yüzdeleriyle mümkündür.

Sol-jel yöntemiyle ince film kaplaması iki şekilde yapılır. Bunlar:

- Döndürme yöntemiyle sol-jel kaplama yöntemi.
- Daldırma yöntemiyle sol-jel kaplama yöntemi.

Döndürerek sol-jel kaplama yönteminde yatay olarak döndürülen alt tabaka taşıyıcı üzerine sol damlatılması ve damlatılan solün uygulanan merkezkaç kuvveti etkisiyle taşıyıcı üzerine kaplanması esastır. Döndürme yöntemiyle sol-jel kaplama yöntemi beş kısımdan oluşmaktadır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi sol durmakta olan alt tabaka taşıyıcı yüzeye damlatılarak yüzeye dağıtılır. Alt tabaka taşıyıcının döndürülmesiyle üzerindeki sol merkezkaç kuvvetinin etkisiyle dairesel olarak yüzeye yayılır. Fazlalık sol miktarı dönme esnasında merkezkaç kuvveti etkisiyle taşıyıcıdan dışarı savrulur ve yüzeyi terk eder. Dönme sonunda alt tabaka taşıyıcı üzerindeki filmin kalınlığı her yerde aynı olur. Bu aşamadan sonra sol buharlaşır. Son olarak ta alt tabaka taşıyıcı fırınlanır.



Şekil 2.13. Sol-jel döndürme yöntemiyle kaplama aşamaları

Döndürme esnasında fazla solün taşıyıcı terk etmesiyle film kalınlığı azalır. Film kalınlığı azaldıkça yüzeyde bulunan sıvının taşınma oranı yavaşlar. Bunun sebebi

ise, film kalınlığı azaldıkça akışkanlığa karşı direncin büyümesidir. Diğer yandan, uçucu olmayan maddelerin konsantrasyonunun büyümesi akışkanlığa karşı direncin artmasına sebep olur. Filmin kalınlığı $h(t)$;

$$h(t) = \frac{h_0}{\left(1 + \frac{4\rho\omega^2 h_0^2 t^2}{3\eta}\right)^{1/2}} \quad (2.2)$$

Burada t zamanı, h_0 başlangıç kalınlığını, ρ solün yoğunluğunu, ω açısal frekansı ve η solün vizkositesini belirtmektedir. Eşitlik (2.2)'den de görüldüğü gibi filmin kalınlığı döndürülme hızı ile ters orantılıdır. Döndürme hızının artması filmin kalınlığını azaltır.

Dönme esnasında bir miktar solde taşıyıcıyı buharlaşma ile terk eder. Bunun ölçüsü, kütle transfer katsayısıdır. Dönme hızının sabit olması, kütle transfer katsayısının düzenli olmasını sağlar. Buna göre son aşamadaki kalınlık;

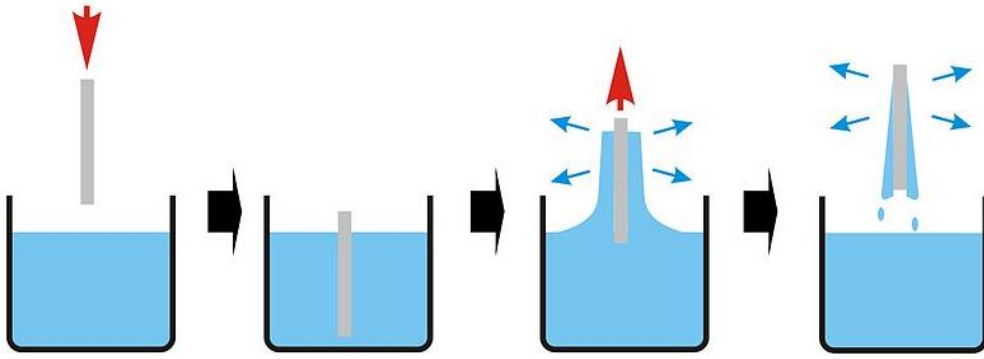
$$h_{toplam} = \left(1 - \frac{p_A^0}{p_A}\right) \times \left(\frac{3\eta e}{2 p_A^0 \omega^2}\right) \quad (2.3)$$

ile bulunur. Burada p_A başlangıçtaki madde miktarını, p_A^0 birim hacimdeki uçucu madde miktarını ve e kütle transfer katsayısına bağlı bir değerdir.

Sol-jel daldırma yöntemi hazırlanan sol içerisine alt tabaka taşıyıcının belli bir hızla daldırılıp aynı hızla dışarı çekilmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemde beş aşamadan oluşmaktadır. Şekil 2.14'te görüldüğü gibi ilk aşama alt tabaka taşıyıcı sabit bir hızla sol içerisine daldırılır. Yine aynı şekilde daldırılan taşıyıcı sabit hızla yukarı çekilir. Kaplama esnasında etki eden kuvvetler:

- Yerçekimi kuvveti
- Sol ile taşıyıcı arasındaki sürtünme kuvveti
- Solün alt tabaka taşıyıcıya tutunmasından oluşan yüzey gerilimi kuvvetidir.

Taşıyıcı yukarı çekilir iken, süzülme esnasında yine bu kuvvetlerin etkisi altında bazı sol damlacıkları da taşıyıcı kenarlarında süzülerek yüzeyi terk eder. Buharlaşma aşamasında taşıyıcı üzerinde kalan fazla sol, fırınlama işleminden sonra film haline dönüşür.



Şekil 2.14. Sol-jel daldırma yöntemiyle kaplama aşamaları

Sol-jel daldırma kaplama yönteminde filmin kalınlığı,

$$h = 0,94 \frac{(\eta u^{2/3})}{x_{l,v}^{1/6} (\rho g)^{1/2}} \quad (2.4)$$

şeklinde verilen Landau-Levich bağıntısı ile belirlenir. Burada u taşıyıcının sol içerisine daldırma hızını, $x_{l,v}$ sıvı buhar gerilimini ve g yer çekimi sabitini ifade etmektedir. Eşitlik (2.4)'te görüldüğü gibi taşıyıcının daldırma hızı filmin kalınlığı ile doğru orantılıdır. Taşıyıcı sole ne kadar hızlı (yavaş) daldırılıp çekilirse kaplanan film o kadar kalın (ince) olur. Dikkat çeken diğer bir nokta ise taşıyıcının sol içinde bulunma süresinin kalınlığa etkisi olmamasıdır.

2.5. Temel Optiksel Kavramlar

Işık madde ile etkileşirken ya da yayılırken çeşitli olular meydana gelir. Bunları yansımaya, kırılma ve soğurma şeklinde sıralayabiliriz. Işık bir yüzeyden geçerken bir miktarı yansır, diğer geriye kalan kısmı ise ortama girer ve ortam boyunca yayılır. Işık tam ara yüzeye geldiğinde gelen akı yoğunluğunun bir parçası yansımış bir dalga biçiminde geri döner, kalanı da kırılmış bir dalga olarak sınırı geçer. Madde içerisinde kırınımına uğrayan ışık serbest ortama göre daha yavaş yayılır. Hızdaki bu azalma Snell yasasına uyacak bir şekilde ışığın bükülmesine yol açar. Fakat ışığın şiddeti kırılma

olayından etkilenmez. Soğurma, ışığın şiddetinin ilerledikçe azalması olayıdır. Eğer yayılma esnasında gelen ışığın frekansı ortamda etkileştiği atomların geçiş frekansı ile rezonansta ise meydana gelir. Ortamın geçirgenliği soğurma ile yakından bağlıdır. Seçici soğurma birçok optik malzemenin renklenmesine neden olur. Soğurma esnasında ışık enerjisinin bir kısmını çarpışmalar ile birlikte ısı şeklinde ortama verir. Işığın ortam ile etkileşmesinden sonra frekansını değiştirmesi ve yönünü de değiştirmesi saçılma olarak tanımlanır.

Metallerin optik özelliklerinin analizinde iki optik sabit önemli yer tutar. Bunlar kırılma indisi (n) ve söndürme katsayısıdır (k). Kompleks kırılma indisi bu iki çokluktan meydana gelir ve

$$n^* = n + ik \quad (2.5)$$

ile verilir. n ışığın boşluktaki hızının herhangi bir ortamdaki hızına oranı olarak tanımlanır. k ise ortam boyunca ilerleyen ışığın soğurulmasının ölçüsüdür. Bu iki basit dalga boyuna ve sıcaklığı bağlıdır.

Işığın optik bir ortam tarafından soğurulmasının ölçüsü soğurma katsayısıdır. Soğurma katsayısı α ifade edilir ve söndürme katsayısı ile aralarındaki ilişki,

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda_0} \quad (2.6)$$

ile verilir. Buradaki λ_0 vakumdaki dalga boyudur. Bandlar arası geçişte foton enerjisi ile soğurma katsayısı arasındaki ilişki ise;

$$\alpha = A (h\nu - E_g)^m \quad (2.7)$$

şeklinindedir. Burada A bir sabit, E_g yasak band aralığını ve m ise geçiş türünü belirleyen katsayıdır. m katsayısı dolaylı geçişler için $1/2$, 2 ve yasak geçişler için $3/2$ değerlerini alır.

Farklı dalga boyları ve farklı geliş açıları için ışığın polarizasyonu, yansıtması ve geçirgenliği ince film optiğinin araştırdığı temel fiziksel özelliklerdir. Bu özellikleri filmin kompleks kırılma indisi ve kalınlığının bir fonksiyonu olarak ışığın

elektromanyetik teorisinden belirlemek mümkündür. Yansıtma ve geçirgenlik Fresnel denklemleri tarafından verilir. Fresnel denklemleri ışığın polarizasyonuna göre değişim gösterir. Eğer gelen ışın n_m kırılma indisine sahip bir ortamdan, n_{m-1} kırılma indisine sahip bir ortama giriş yapıyorsa p-polarizasyonu için, yani elektrik alan vektörünün ışığın gelme düzlemine paralel olduğu durumda geçirgenlik (t_m) ve yansıtma (r_m) katsayıları aşağıdaki bağıntılarla verilir (Durmuş, 2011);

$$r_{mp} = \frac{n_m \cos \phi_{m-1} - n_{m-1} \cos \phi_m}{n_m \cos \phi_{m-1} + n_{m-1} \cos \phi_m} \quad (2.8)$$

$$t_{mp} = \frac{2 n_m \cos \phi_m}{n_m \cos \phi_{m-1} + n_{m-1} \cos \phi_m} \quad (2.9)$$

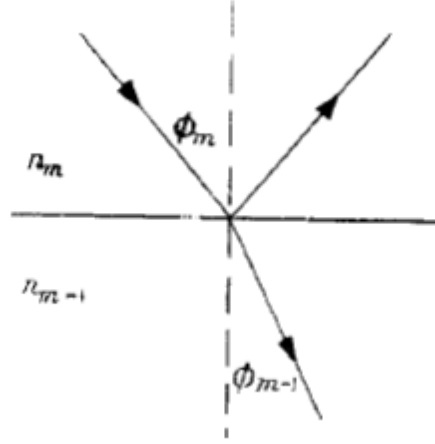
Elektrik alan vektörünün ışığın gelme düzlemine dik olduğu durumda yani s-polarizasyonunda ise bağıntılar değişir;

$$r_{ms} = \frac{n_m \cos \phi_m - n_{m-1} \cos \phi_{m-1}}{n_m \cos \phi_m + n_{m-1} \cos \phi_{m-1}} \quad (2.10)$$

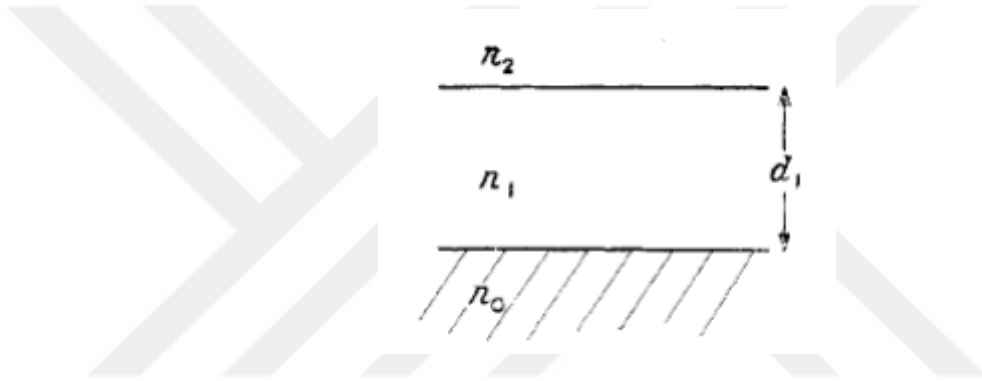
$$t_{ms} = \frac{2 n_m \cos \phi_m}{n_m \cos \phi_m + n_{m-1} \cos \phi_{m-1}} \quad (2.11)$$

Eşitliklerdeki ϕ_m ve ϕ_{m-1} açıları sırasıyla gelme ve kırılma açıları olup birbirleriyle Snell yasasıyla bağıntılıdır;

$$n_m \sin \phi_m = n_{m-1} \sin \phi_{m-1} \quad (2.12)$$



Şekil 2.15. Gelen, yansıyan ve kırılan ışınlar



Şekil 2.16. Tek katman film

Tek katman bir film için kırılma indisi n_1 ve kalınlık d_1 olarak alınırsa yansıtma ve geçirgenlik katsayılarının genlikleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir;

$$R = \frac{r_2 + r_1 \exp(-2i\delta_1)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\delta_1)} \quad (2.13)$$

$$T = \frac{t_1 t_2 \exp(-i\delta_1)}{1 + r_1 r_2 \exp(-2i\delta_1)} \quad (2.14)$$

Buradaki δ_1 faz değişimi ve ν şu şekilde tanımlanmıştır;

$$\delta_1 = 2\pi \nu n_1 d_1 \cos \phi_1 \quad (2.15)$$

$$v = 1 / \lambda \quad (2.16)$$

Buradaki ϕ_1 kırılma açısıdır. Yansıyan ve geçen ışınlar dik kesit birim alandaki saniye başına düşen enerjiler n_0RR^* ve n_2TT^* ile verildiğinden yansıtma (reflectance) ve geçirgenlik (transmittance) şöyle yazılır;

$$R = RR^* = \frac{r_1^2 + 2r_1r_2 \cos 2\delta_1 + r_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos 2\delta_1 + r_1^2r_2^2} \quad (2.17)$$

$$T = \frac{n_2}{n_0} TT^* = \frac{n_2}{n_0} \frac{t_1^2 t_2^2}{1 + 2r_1r_2 \cos 2\delta_1 + r_1^2 r_2^2} \quad (2.18)$$

Bu iki denklem kırılma indisleri cinsinden de yazılabilir. Taşıyıcının kırılma indisi n_0 , filminki n_1 ve ortamınki n_2 alınırsa dik geliş için;

$$r_1 = \frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \quad (2.19)$$

$$t_1 = \frac{2n_1}{n_1 + n_0} \quad (2.20)$$

$$r_2 = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (2.21)$$

$$t_2 = \frac{2n_2}{n_2 + n_1} \quad (2.22)$$

Bu durumda;

$$R = \frac{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) - 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1} \quad (2.23)$$

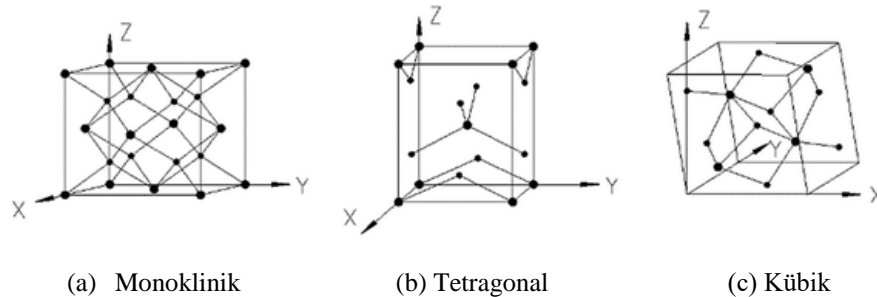
$$T = \frac{8n_0n_1^2n_2}{(n_0^2 + n_1^2)(n_1^2 + n_2^2) + 4n_0n_1^2n_2 + (n_0^2 - n_1^2)(n_1^2 - n_2^2) \cos 2\delta_1} \quad (2.24)$$

olarak yazılır.

2.6. Hafniyum Oksit (HfO₂)

Hafniyum elementi ilk defa 1870 yılında Mande Leev tarafından bahsedilmiştir. Fakat 72 atom numarasına sahip olan hafniyumun 1922 yılına kadar ispatı yapılamamıştır. Hevesy ve Coster Norveç zirkomlarının X-ışını kırınım desenlerini incelerken 72 atom numarasına sahip element için analizine karşılık gelen yeni X-ışını çizgileri keşfetmişlerdir. Hevesy ve Coster 72 atom numarasına sahip elementi hafniyum olarak isimlendirmişlerdir (Aynibal, 2009). Titanyum ve zirkonyum gibi periyodik cetvelin 6B grubunda yer alan hafniyum 178,49 gram/mol atom aralığı ihtiva eden geçiş metalidir.

Hafniyum elementinin en kararlı oksit formu olan hafniyum dioksit (HfO₂) beyaz renkte olup, ergime noktası 2900 °C ve kırınımı iyi olması ile bilinen bir bileşiktir. HfO₂ bileşiği dört farklı formda bulunabilir. Bunlardan üçü kristal biri amorf formundadır. Şekil 2.17’de görüldüğü gibi kristal yapıları monoklinik, tetragonal ve kübik şeklindedir. HfO₂ 400 °C altındaki sıcaklıklarda amorf yapıda olur iken 480 °C üzerindeki sıcaklıklarda ise yapı monoklinik kristal yapıya dönüşür. HfO₂ monoklinik kristal yapısı amorf yapıya yakın özellikler sergilediğinden en düzensiz olduğu yapıdır. Kübik yapısı ise en düzenli halidir (Wan ve Zhou, 2017).



Şekil 2.17. HfO₂ yapısının faz gösterimleri

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Alt Tutucu Tabakaların Temizlenmesi

İnce film HfO_2 kaplanacak $1 \text{ mm} \times 26 \text{ mm} \times 76 \text{ mm}$ ebatlı mikroskop camlar $18 \text{ M}\Omega$ 'luk dirence sahip deiyonize su [H_2O] ihtiva eden ultrasonik banyoya 1 saat bırakılmıştır. Yine aynı camlar 1 saat süreyle ultrasonik banyo içerisinde asetona [$\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$, Merck] bırakılmıştır. Son olarak tabaka yüzeyindeki birikintileri yok etmek için camlar $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 'deki tüp fırın içerisine 10 dakika bırakılmıştır.

3.2. Çözeltinin Hazırlanması Ve İnce Filmlerin Kaplanması

Bu tez çalışmasında katkısız HfO_2 ve % 1, % 5, % 10 Ag katkılı HfO_2 olmak üzere 4 farklı çözelti hazırlanmıştır. Çözeltiler sırasıyla:

Katkısız HfO_2 Çözeltisi: Bir behere 0,3230 g hafniyum klorür [HfCl_4 , Aldrich] bırakıldı. Daha sonra 50 mL etanol [$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, Merck] behere konarak 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Son olarak aynı çözeltiliye 10 mL deiyonize su ilave edilerek çözelti 3 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

% 1 Ag Katkılı HfO_2 Çözeltisi: Bir behere 0,3230 g hafniyum klorür [HfCl_4 , Aldrich] ve 0,0016987 g gümüş nitrat [AgNO_3 , Sigma-Aldrich] bırakıldı. Daha sonra 50 mL etanol [$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, Merck] behere konarak 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Son olarak aynı çözeltiliye 10 mL deiyonize su ilave edilerek çözelti 3 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

% 5 Ag Katkılı HfO_2 Çözeltisi: Bir behere 0,3230 g hafniyum klorür [HfCl_4 , Aldrich] ve 0,0084935 g gümüş nitrat [AgNO_3 , Sigma-Aldrich] bırakıldı. Daha sonra 50 mL etanol [$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$, Merck] behere konarak 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Son olarak aynı çözeltiliye 10 mL deiyonize su ilave edilerek çözelti 3 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

% 10 Ag Katkılı HfO_2 Çözeltisi: Bir behere 0,3230 g hafniyum klorür [HfCl_4 , Aldrich] ve 0,016987 g gümüş nitrat [AgNO_3 , Sigma-Aldrich] bırakıldı. Daha sonra 50 mL

etanol [C₂H₆O, Merck] behere konarak 2 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Son olarak aynı çözeltiye 10 mL deiyonize su ilave edilerek çözelti 3 saat manyetik karıştırıcı ile karıştırılmıştır.

Temizlenmiş al tabaka cam yüzeyler Holmarck HQ-TH-O1 sol-jel daldırma kaplama cihazı ile 15 kez çözelti içerisine daldırılmıştır. Her bir daldırmadan sonra camlar 500 °C de 10'ar dakika tüp fırın içerisinde tavlamaaya bırakılmıştır. Kaplanan filmler son olarak 1 saat 500 °C de tüp fırın içerisinde tavlamaaya bırakılmıştır.

3.3. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Cam alt tabaka yüzeylerin temizlenmesinde ve çözelti içerisinde kullanılan deiyonize saf su için Direct-Q(3UV) cihazından faydalanılmıştır. Temizleme işi için kullanılan ultrasonik banyolama cihazı da Kudos markadır. Çözelti hazırlanmasında da WiseStir MSH-20D manyetik karıştırıcıdan faydalanılmıştır. Isısal işlemlerde Protherm PTF 12/75/800 markalı tüp fırından yararlanılmıştır.



Şekil 3.1. 0-1200 °C ayarlanabilir Protherm PTF 12/75/800 tüp fırın

Sol-jel daldırma yöntemiyle kaplama işlemlerinde Holmarck Dip Coating cihazından yararlanılmıştır. Cam alt tabaka yüzeylere kaplanmış ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri (XRD) Rigaku RadB ile CuK α_1 ($\lambda = 1,5416 \text{ \AA}$) radyasyonu kullanılarak $2\theta = 10-90^\circ$ aralığında gerçekleştirilmiştir. Yine bu filmlerin optiksel

ölçümleri oda sıcaklığında Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIR spektrofotometre cihazından yararlanılmıştır.

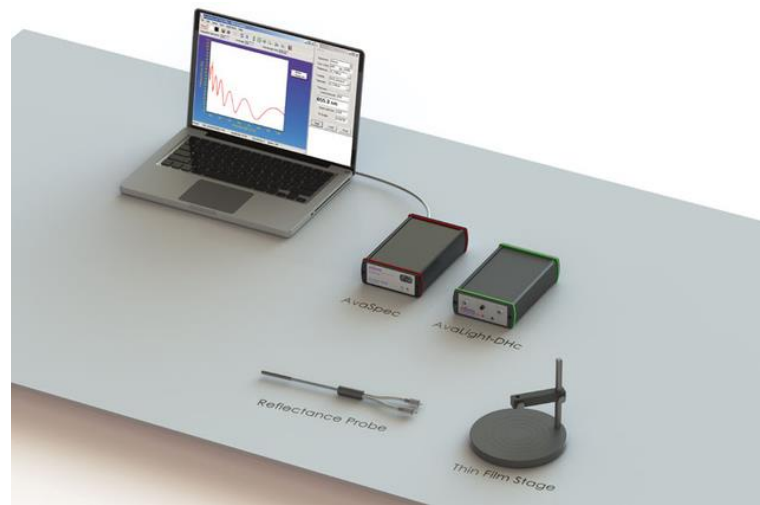


Şekil 3.2. Holmarck sol-jel daldırma cihazı



Şekil 3.3. Shimadzu UV-3600 UV-VIS-NIS spektrofotometre cihazı

Kaplanmış olan HfO_2 ince film yüzeylerinin kalınlıkları Avantes AvaSpec-ULS2048 ince film kalınlık ölçüm sistemiyle gerçekleştirilmiştir.

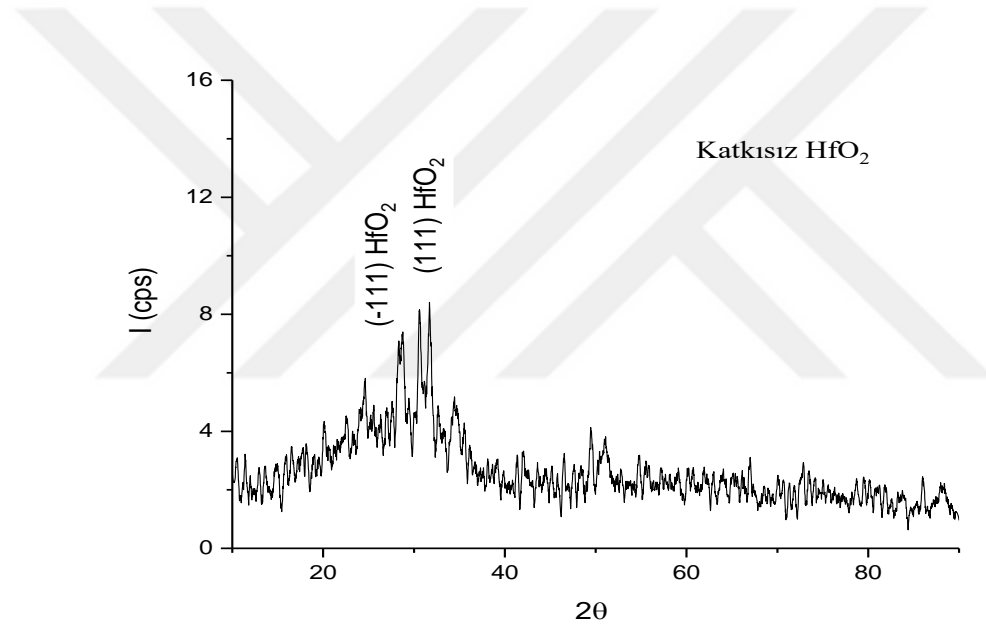


Şekil 3.4. Avantes AvaSpec-ULS2048 ince film kalınlık ölçüm sistemi

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. HfO₂ İnce Filmlerin X-Işını Kırınım Desenleri (XRD)

Cam alt tabaka tutucu yüzey üzerine kaplanmış HfO₂ ince filmin XRD desenleri Şekil 4.1’de görülmektedir. Görüldüğü gibi 28,394 derecede (-111) yönelimine sahip monoklinik HfO₂ ile 31,732 derecede (111) yönelimine sahip yine monoklinik HfO₂ nin pikleri tespit edilmiştir. Bu pikler standart PDF numarası 78-50 ile uyumludur. Elde edilen bu pikler Microcal Origin 8.0 programı ile smooth very analizi uygulanmış ve düzeltmeler yapılmıştır.



Şekil 4.1. Cam alt tabaka yüzeye kaplı HfO₂ ince filmin X-ışını kırınım desenleri

İnce filmde yer alan kristal boyutları XRD desenlerinden faydalanılarak Debye Scherrer formülünden (Cullity, 1978);

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.1)$$

bulunmuştur. Buradaki λ X-ışını dalgaboyunu, β Bragg açısını ve θ ise kırınım çizgisinin yarı genişliğini vermektedir. Hesaplamalar sonucunda ortalama tanecik

büyüklüğü 12,76 nm, bozuk yapı yoğunluğu $6,13 \times 10^{-3}$ lines/nm² ve birim alandaki tanecik sayısı ise $5,09 \times 10^{-2}$ 1/nm hesaplanmıştır.

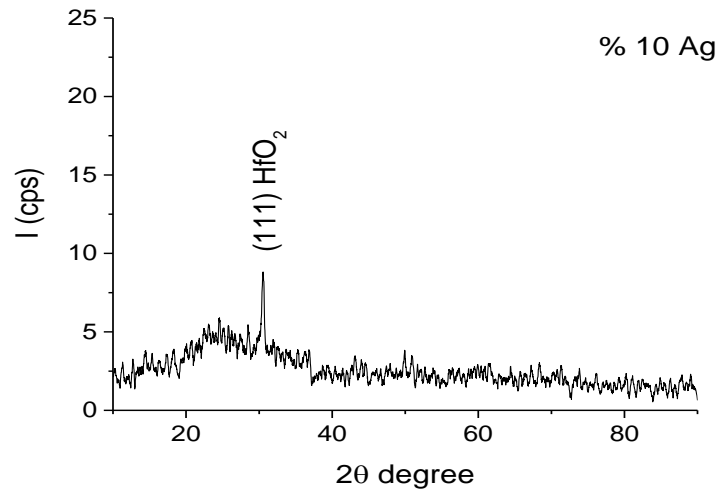
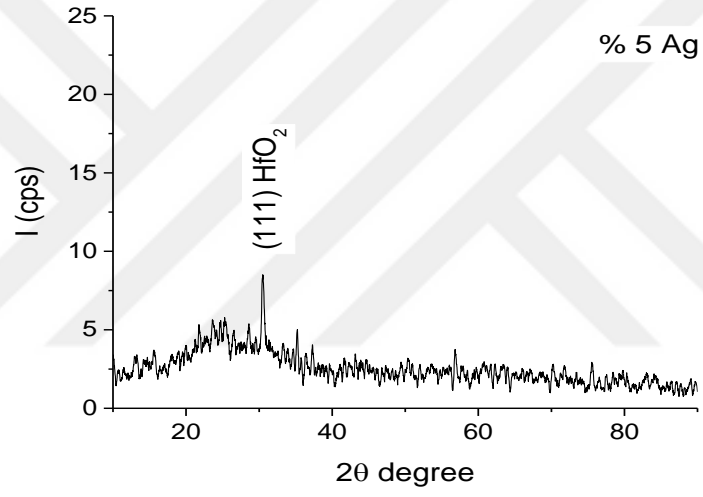
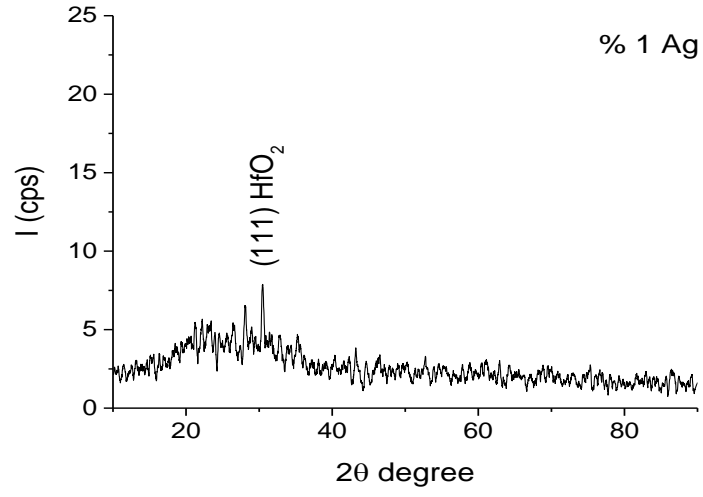
% 1, % 5 ve % 10 Ag katkılı HfO₂ ince filmlerin XRD desenleri Şekil 4.2’de görülmektedir. Pikler sırasıyla 30,538; 30,541 ve 30,611 derecelerinde (111) yönelimlerine sahip monoklinik HfO₂ piklerine karşılık gelmektedir. Yine bu pikler standart PDF numarası 78-50 ile uyumludur. Elde edilen tüm XRD desenleri ile ilgili hesaplanmış özellikler Çizelge 4.1. ve 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. HfO₂ ince filmlerin XRD desenlerinden hesaplanmış dereceler

HfO ₂ İnce Filmler	(hkl)	2θ (Gözlemlenen)	2θ (Hesaplanan)	I/I ₀	PDF Numarası	Yapı
Katkısız	-111	28,394	28,347	79,6	78-50	Monoklinik
	111	31,732	31,650	100,0		
	002	33,046	34,309	84,2		
% 1 Ag Katkılı	111	30,538	31,650	-	78-50	Monoklinik
% 5 Ag Katkılı	111	30,541	31,650	-	78-50	Monoklinik
% 10 Ag Katkılı	111	30,611	31,650	-	78-50	Monoklinik

Çizelge 4.2. HfO₂ ince filmlerin XRD desenlerinden hesaplanmış ortalama tanecik büyüklüğü, bozuk yapı yoğunluğu ve birim alandaki tanecik sayısı

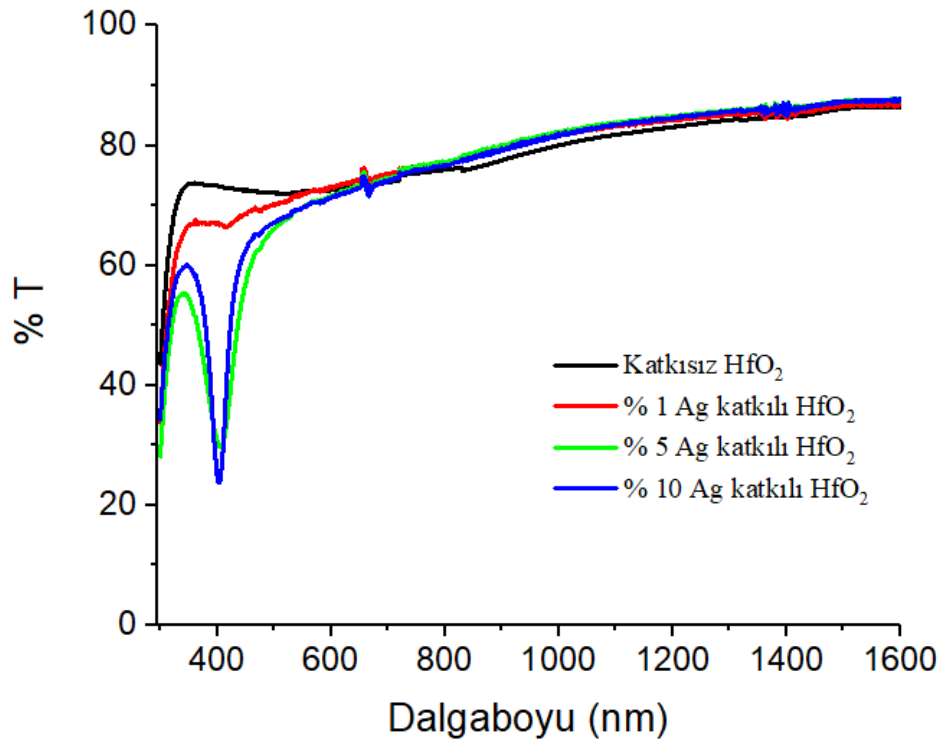
HfO ₂ İnce Filmler	D (nm)	$\delta \times 10^{-3}$	N (1/nm) $\times 10^{-2}$
Katkısız	12,76	6,13	5,09
% 1 Ag Katkılı	3,80	69,06	192
% 5 Ag Katkılı	3,72	72,26	205
% 10 Ag Katkılı	3,52	80,38	241



Şekil 4.2. Cam alt tabaka yüzeye kaplı (a) % 1 Ag, (b) % 5 ve (c) % 10 Ag katkılı HfO_2 ince filmin X-ışını kırınım desenleri

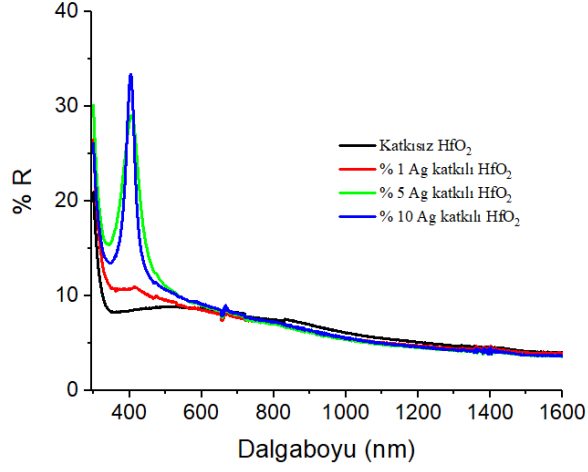
4.2. HfO₂ İnce Filmlerin Optiksel Özellikleri

Şekil 4.3'te elde edilen filmlerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlikleri görülmektedir. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi elde edilen filmlerin geçirgenlikleri 500 nm dalgaboyunda sırasıyla % 72, % 70, % 66 ve % 67 mertebesindedir. Burada dikkat çekici bir nokta HfO₂ yapısına Ag katkı oranı arttıkça 350 nm'den itibaren geçirgenliklerinin düşmesidir. Şekil 4.3'te görüldüğü gibi % 5 ve % 10 Ag katkılı HfO₂ ince film yapılarının geçirgenlikleri 404 nm'de % 30 ve % 24'e düşmüştür.

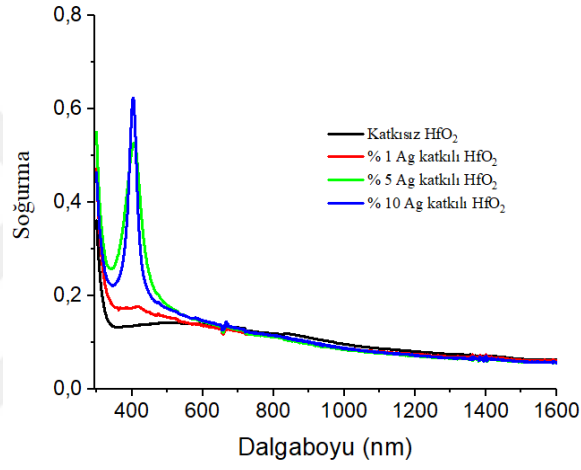


Şekil 4.3. Katkısız ve Ag katkılı HfO₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı geçirgenlikleri

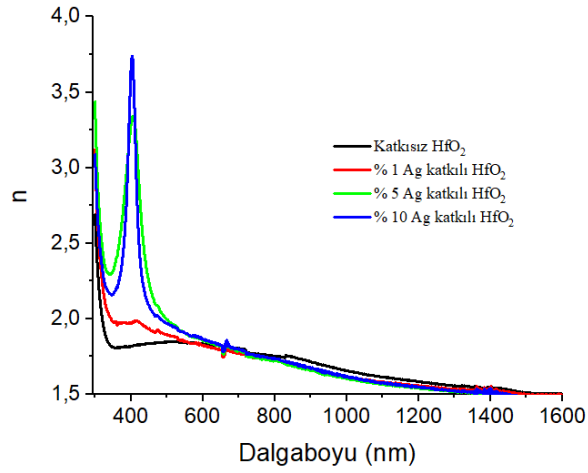
Şekil 4.4'te ince katkısız ve Ag katkılı HfO₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı yansımaya, soğurma ve kırma indisi eğrileri görülmektedir. Şekil 4.4(c)'de görüldüğü gibi filmlerin kırma indisleri 500 nm dalgaboyunda 1,84; 1,89; 1,99 ve 1,97 değerlerindedir.



(a)

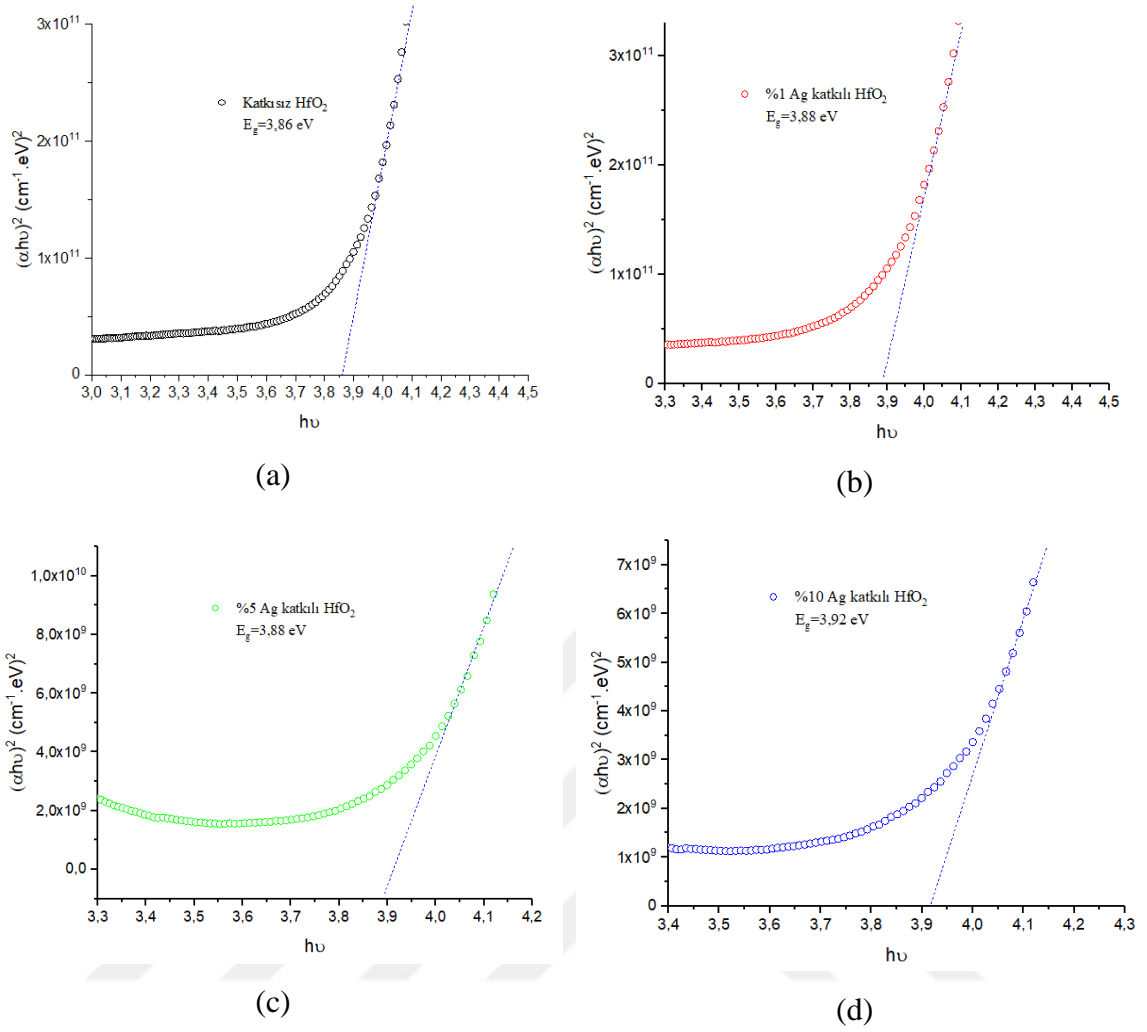


(b)



(c)

Şekil 4.4. HfO₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağlı (a) yansıma, (b) soğurma ve (c) kırma indisi eğrileri



Şekil 4.5. (a) Katkısız, (b) %1 Ag katkılı, (c) %5 Ag katkılı ve (d) %10 Ag katkılı HfO₂ ince filmler için hesaplanmış optik band aralığı değerleri

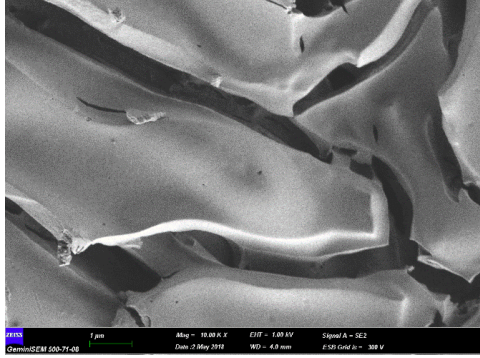
Şekil 4.5'te ise HfO₂ ince filmler için hesaplanmış optik band aralığı değerleri görülmektedir. Filmlerin optik band aralıkları ve Avantes UV fotospektrometre ile ölçülmüş kalınlık değerleri Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. HfO₂ ince filmlerin hesaplanmış optik band aralığı ve ölçülmüş kalınlık değerleri

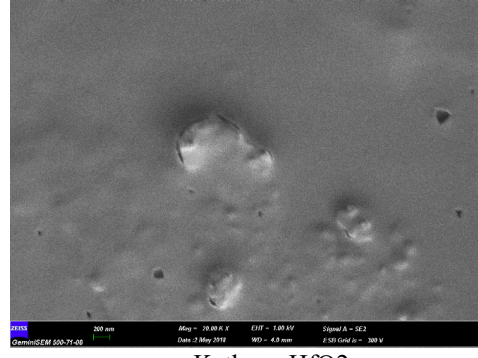
HfO ₂ İnce Filmler	E _g (nm)	δ (nm)
Katkısız	3,86	53
% 1 Ag Katkılı	3,88	57
% 5 Ag Katkılı	3,88	59
% 10 Ag Katkılı	3,92	66

4.3. HfO₂ İnce Filmlerin SEM Görüntüleri

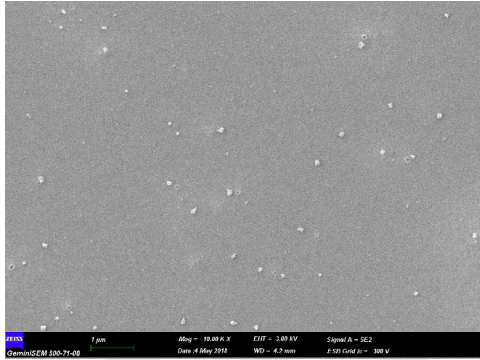
Şekil 4.6'da elde edilen filmlerin taramalı elektron mikroskopi görüntüleri (SEM) görülmektedir. Şekildeki görüntüler 1 µm ve 200 nm skalalarında alınmıştır.



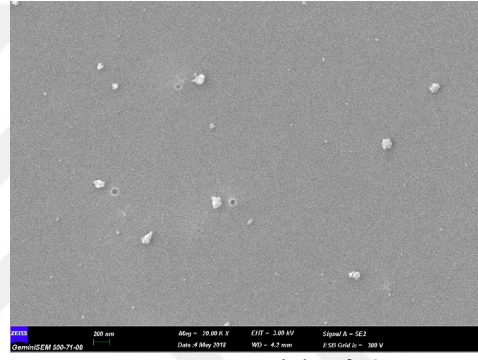
Katkısız HfO₂



Katkısız HfO₂



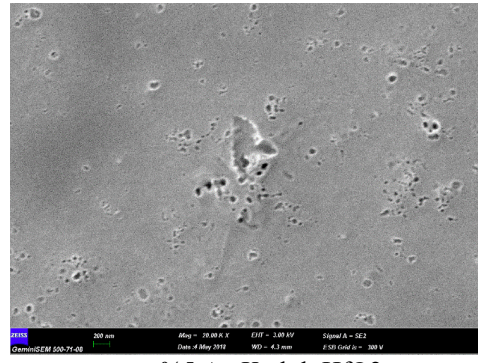
%1 Ag Katkılı HfO₂



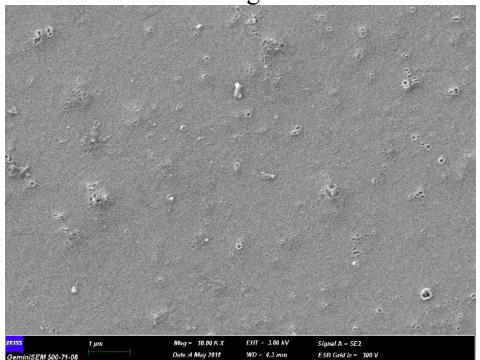
%1 Ag Katkılı HfO₂



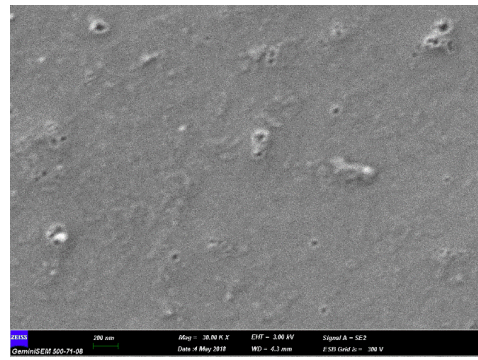
%5 Ag Katkılı HfO₂



%5 Ag Katkılı HfO₂



%10 Ag Katkılı HfO₂



%10 Ag Katkılı HfO₂

Şekil 4.6. Katkısız ve katkılı HfO₂ ince filmlerin SEM görüntüleri

5. TARTIŞMA

Tez çalışmamızda cam alt tabaka yüzeye katkısız, %1 Ag katkılı, %5 Ag katkılı ve %10 Ag katkılı HfO₂ ince filmler sol-jel daldırma yöntemiyle kaplanmıştır. Kaplanan filmlerin X-ışını kırınım deseni (XRD), UV-VIS spektrum ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

Katkısız HfO₂ ince filmin XRD deseni incelendiğinde 28,394 derecede (-111) yönelimine sahip monoklinik HfO₂ ile 31,732 derecede (111) yönelimine sahip yine monoklinik HfO₂ nin pikleri tespit edilmiştir. Elde edilen piklerin pdf analizlerinde ise 78-50 ile uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda da ortalama tanecik büyüklüğü 12,76 nm, bozuk yapı yoğunluğu $6,13 \times 10^{-3}$ lines/nm² ve birim alandaki tanecik sayısı ise $5,09 \times 10^{-2}$ 1/nm bulunmuştur. Kariper yaptığı çalışmada yine cam alt yüzeye HfO₂ ince filmi üç farklı yöntem kimyasal banyo depolama, SILAR ve sol-jel daldırma yöntemiyle kaplamış, elde ettiği XRD desenlerinden her üç yöntemle de 28,347 derecede (-111) pikini elde etmiştir (Kariper, 2014). Chen ve arkadaşları, p-Si alt tabaka yüzeye RF magnetron saçtırma yöntemiyle katkısız HfO₂ ince film kaplamasında XRD desenlerinde 28,3 (-111), 34,6 (020) ve 55,5 (221) dereceli pikler elde etmişlerdir (Chen ve ark., 2014). Tan ve arkadaşları, yine Si alt tabaka yüzeye RF magnetron saçtırma yöntemiyle katkısız HfO₂ ince film kaplamasında XRD desenlerinde 28,5 (-111) ve 31,7 (111) derecelerinde pikler elde etmişlerdir (Tan ve ark., 2010).

% 1, % 5 ve % 10 Ag katkılı HfO₂ ince filmlerin XRD desenlerinde ise sırasıyla 30,538; 30,541 ve 30,611 derecelerinde (111) yönelimlerine sahip monoklinik HfO₂ piklerine karşılık gelmektedir. Yine bu pikler standart PDF numarası 78-50 ile uyumludur. Yapılan hesaplamalarda katkılama sonucu ortalama tanecik büyüklüğünün 12,76 nm den %1 Ag katkılama ile 3,80 nm, %5 Ag katkılama ile 3,72 nm ve %10 Ag katkılama ile 3,52 nm e düştüğü gözlemlenmiştir. Chen ve arkadaşları, p-Si alt tabaka yüzeye RF magnetron saçtırma yöntemiyle %5, %8, %14,8 ve %23 iterbiyum (Yb) katkılı HfO₂ ince film kaplamasında XRD desenlerinde 30,4; 35,2; 50,6 ve 60,2 derecelerinde; (111), (002), (022), ve (113) düzlemlerinde kübik faza dönüştüğünü raporlamışlardır (Chen ve ark., 2014).

Elde edilen katkısız ve Ag katkılı HfO₂ ince filmlerin dalgaboyuna bağılı geçirgenlikleri 500 nm dalgaboyunda sırasıyla % 72, % 70, % 66 ve % 67 mertebesinde bulunmuştur. HfO₂ yapısına Ag katkı oranı arttıkça 350 nm'den itibaren geçirgenlikler düşmüştür. % 5 ve % 10 Ag katkılı HfO₂ ince film yapılarının geçirgenlikleri 404 nm'de % 30 ve % 24'e kadar inmiştir. Filmlerin kırma indisleri de 500 nm dalgaboyunda 1,84; 1,89; 1,99 ve 1,97 değerlerinde bulunmuştur. Kariper'in çalışmasında cam alt yüzeye HfO₂ ince filmi üç farklı yöntem kimyasal banyo depolama, SILAR ve sol-jel daldırma yöntemiyle kaplamış olduğu filmlerin geçirgenliklerini sırasıyla % 67, % 44 ve % 86 olarak raporlamıştır (Kariper, 2014). Kariper çalışmasında da kırma indislerini sırasıyla 1,89; 2,47 ve 1,46 olarak hesaplamıştır. Ramzan ve arkadaşları e-beam buharlaştırma yöntemiyle alt tabaka sıcaklığını değiştirerek HfO₂ ince filmleri kaplamışlardır (Ramzan ve ark., 2013). Alt tabaka sıcaklığına bağılı olarak geçirgenliklerini % 80-90 mertebesinde bulmuşlardır.

Çalışmamızda katkısız ve % 1, % 5 ve % 10 Ag katkılı HfO₂ ince filmler için hesaplanmış optik band aralığı değerleri sırasıyla 3,86; 3,88; 3,88 ve 3,92 eV olarak hesaplanmıştır. Literatürde HfO₂ için optik band aralığı değeri 5,5-6 eV arasında olduğu raporlanmıştır (Kasap ve Capper, 2006). Deng ve arkadaşları Si ve kuartz üzerine RF magnetron saçtırma yöntemiyle elde ettikleri HfO₂ ince filmlerin optik band aralıklarını 5,45-5,75 eV arasında hesaplamışlardır (Deng ve ark., 2014). Ramzan ve arkadaşları is e-beam buharlaştırma yöntemiyle alt tabaka sıcaklığını değiştirerek HfO₂ ince filmlerin optik band aralığı değerlerini filmlerin tavlama öncesi ve sonrasındaki UV-VIS ölçümlerinden optik band aralığı değerlerini hesaplamışlardır (Ramzan ve ark., 2013). Yaptıkları analizlerde HfO₂ ince filmler için tavlama öncesinde optik band aralığı değerlerini 4,35-4,45 eV mertebesinde hesaplamışlardır. Tavlama sonrasında ise değerler 3,40-3,65 eV mertebesine düşmüştür. Tavlama sonrası band aralığındaki düşmeyi amorf yapıdan çoklu kristal yapıya geçmeyi, yapısal geçişin ve kristal düzlemlerinin band yapısına güçlü bir şekilde bağılı olduğuna atfetmişlerdir (Al-Kuhaili, 2004; Wang ve ark., 2004; He ve ark., 2007). Hakeem ve arkadaşları da yine e-beam buharlaştırma yöntemiyle elde ettikleri HfO₂ ince filmi tavlama öncesi ve sonrasında band aralığı değerlerini 4,45 ev ve 3,97 eV olarak hesaplamışlardır (Hakeem ve ark., 2015). Hakeem ve arkadaşları da band aralığı değerindeki bu düşmeyi amorf yapıdan çoklu kristal yapıya geçmeyi, yapısal geçişin ve kristal düzlemlerinin band yapısına güçlü bir şekilde bağılı olduğuna atfetmişlerdir. Görüldüğü gibi bizim çalışmamızda hesapladığımız band aralığı değerleri 3,86-3,92 eV mertebesinde hesaplanmış,

değerlerin düşük çıkmasının nedenini elde edilen filmlerin son olarak yüksek sıcaklıkta tavlama ile yapısal geçişe atfedebiliriz.

Taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntülerine göre elde ettiğimiz filmlerden katkısız HfO₂ film kaplı yüzeyde çatlaklar gözlenmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklıkta oksijenli tavlama dolayısıyla yüzeyin kırılmalı bir yapıya dönüşmesidir. Ag katkılı olduğunda ise filmlerin yüzeyinde birlikte çökmenin etkisiyle dağınık olarak farklı bölgelerde adacıklı yapılar oluşmuştur. Ag katkılanması artırıldığında özellikle % 5 Ag katkılı olduğunda yüzeyde gözenekli yapılar oluştuğu görülmektedir. Bunun nedeni ise yüzeyde daha fazla taneciklerin tutunamamasından dolayı adacıklı yapı halindeki Hf-Ag oksit tanecikleri yapıyı terk etmiş ve bu gözeneklere neden olmuş olabilir. Özellikle % 10 Ag katkılı olduğunda bu gözeneklerin azalmasının nedeni ise yüzey doygunluğuna ulaştığı için daha fazla Hf-Ag oksit taneciklerinin tutunamamasından dolayı çok daha az adacıklı yapı oluşmuş ve bu az miktardaki tanecikler yüzeyi terk ederek az miktarda gözenekli yapı oluşumuna neden olmuştur.

KAYNAKLAR

- Al-Kuhaili M. F., (2004) “Optical properties of hafnium oxide thin films and their application in energy-efficient windows” *Optical Materials* 383-387-27
- Aydoğan, Ş., 2001 Katıhal Fiziği Nobel Akademik Yayıncılık Türkiye
- Aynibal, F., “IVB Grubu Metal Borürlerin ve Lantan Hekzabörürün Mekanokimyasal Reaksiyon Ortamında Sentezlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 60-62, 2009
- Boher P, Defranciaux C, Heinrich P, Wolsenholme J, Bender H (2004) “VUV spectroscopic ellipsometry applied to the characterization of high-k dielectrics” *Mat Sci Eng B*109:64
- Bouchenaki, C., Ullrich, B. and Zielenger, J.P., 1991. “Preparation Characterization and Bistable Photoconductivity Properties of Thin CdS Layers”, *J. Opt. Soc. Am.*, B8, 691-700
- Callegari A, Cartier E, Gribelyuk M, Okorn-Schmidt HF, Zabel T (2001) “Physical and electrical characterization of Hafnium oxide and Hafnium silicate sputtered films” *J Appl Phys*
- Chen S., Liu Z., Feng L., Che X., Zhao X., (2014) “Effect of ytterbium inclusion in hafnium oxide on the structural and electrical properties of the high-k gate dielectric” *Journal Of Rare Earths* 580: 32
- Cullity, B.D. (1978) *Elements of X-Ray Diffraction*. 2nd Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., Reading, MA, 102.
- Deng B., He G., Lv J. G., Chen X. F., Zhang J. W., Zhang M., Sun Z. Q., (2014) “Modulation of the structural and optical properties of sputtering-derived HfO₂ films by deposition power” *Optical Materials* 245-250: 37
- Durmuş, O. 2011 Vanadyum oksit ince filmlerinin sol-jel yöntemi ile hazırlanması ve karakterizasyon Yer Bilgisi: İstanbul Teknik Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü / Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı
- Essary C, Howard JM, Craciun V, Craciun D, Singh RK (2004) “Kinetics of interfacial layer formation during deposition of HfO₂ on silicon” *Thin Solid Films* 450:111
- Fang Q, Zhang JY, Wang ZM, He G, Yu J, Boyd JW (2003) “ High-k dielectrics by UV photo-assisted chemical vapour deposition” *Microel Eng* 66:621
- Fang Q, Zhang JY, Wang Z, Modreanu M, O’Sullivan BJ, Hurley PK, Leedham TL, Huywel D, Audier MA, Jiminez C, Senateur JP, Boyd JW (2004) “Interface of ultrathin HfO₂ films deposited by UV-photo-CVD” *Thin Solid Films* 453–454:203

- Ferrari S, Modreanu M, Scarel G, Fancinelli M (2004) "X-Ray reflectivity and spectroscopic ellipsometry as metrology tools for the characterization of interfacial layers in high- κ materials" *Thin Solid Films* 450:124
- Gruger H, Kunath Ch, Kurth E, Sorge S, Pufe W, Pechstein T, (2004) "High quality r.f. sputtered metal oxides (Ta₂O₅, HfO₂) and their properties after annealing" *Thin Solid Films* 447–448:509
- Hakeem A., Ramzan M., Ahmed E., Rana A. M., Khalid N. R., Niaz N. A., Shakoor A., Samia Ali, Ureed Asghar, Nadeem M. Y., (2015) "Effects of vacuum annealing on surface and optical constants of hafnium oxide thin films" *Materials Science in Semiconductor Processing* 98: 30
- He G, Fang Q, Liu M, Zhu LO, Zhang LD (2004) "The structural and interfacial properties of HfO₂/Si by the plasma oxidation of sputtered metallic Hf thin films" *J Cryst Growth* 268:155
- He G., Zhu L. Q., Liu M., Fang Q., Zhang L. D., (2007) "Optical and electrical properties of plasma-oxidation derived HfO₂ gate dielectric films" *Appl Surf Sci* 3413-3418: 253(7)
- Kariper I. A., (2014) "Production Of Hfo₂ Thin Films Using Different Methods: Chemical Bath Deposition, Silar And Sol-Gel Process" *International journal of minerals metallurgy and materials* 832-838: 21
- Kasap, S., Capper, P., 2006 "dielectric materials for microelectronics" Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials
- Kidchob T, Malfatti L, Serra F, Falcaro P, Enzo S, Innocenzi P (2007) "Hafnia sol-gel films synthesized from HfCl₄: Changes of structure and properties with the firing temperature" *J Sol-Gel Sci Technol* 42:89–93
- Lee BH, Kang L, Nieh R, Qi WJ, Lee JC (2000) "Thermal stability and electrical characteristics of ultrathin hafnium oxide gate dielectric reoxidized with rapid thermal annealing" *App Phys Lett* 76–14:1926
- Ramzan M., Wasig M. F., Rana A. M., Ali S., Ndeem M. Y., (2013) "Characterization of e-beam evaporated hafnium oxide thin films on post thermal annealing" *Appl Surf Sci* 617-622: 283
- Robertson J., Chen C. W., 1999., "Schottky barrier heights of tantalum oxide, barium strontium titanate, lead titanate, and strontium bismuth tantalate" *Appl. Phys. Lett.* 74, 1168
- Robertson J., 2000. "Band offsets of wide-band-gap oxides and implications for future electronic devices" *J. Vac. Sci. Technol. B* 19, 2212
- Sun JK, Cho BJ, Ming FL, Yu X, Zhu C, Chin A et al. (2003) "PVD HfO₂ for high-precision MIM capacitor applications" *IEEE Electron Device Lett* 387: 24

- Tan T., Liu Z., Lu H., Liu W., Tian H., (2010) "Structure and optical properties of HfO₂ thin films on silicon after rapid thermal annealing" *Optical Materials* 432-435: 32 (3)
- Wan Y., Zhou X., (2017) "Formation mechanism of hafnium oxide nanoparticles by a hydrothermal route" *RSC Adv* 7:7763-7773:7
- Wang SJ, Lim PC, Huan ACH, Liu CL, Chai JW, Chow SY, Pan JS, Li Q, Ong K (2003) "Reaction of SiO₂ with hafnium oxide in low oxygen pressure" *App Phys Lett* 82-13:2047
- Wang Y., Lin Z., Cheng X., Xiao H., Zhang F., Zou S., (2004) "Study of HfO₂ thin films prepared by electron beam evaporation" *Appl Surf Sci* 93-99:228
- Wang ZJ, Kumagai T, Kokawa H, Ichiki M, Maeda R (2008) "Preparation of hafnium oxide thin films by sol-gel method" *J Electroceram* 21:499-502

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Şehmus KAVAL
Uyruğu : TÜRKİYE
Doğum Yeri ve Tarihi : HAKKARİ 30.04.1984
Telefon : 0542 624 44 35
e-mail : sehmus.kawal@gmail.com

EĞİTİM

Derece	Adı, ilçe, il	Bitirme Yılı
Lise	: Hakkari Lisesi Merkez Hakkari	2004
Önlisans	: Hakkari Meslek Yüksek Okulu Merkez Hakkari	2010
Lisans	: Batman Üniversitesi Merkez Batman	2015

UZMANLIK ALANI

Fizik Öğretmeni

YABANCI DİLLER

İngilizce