



**GERMANYUM TEK KRİSTAL OPTİK PENCERE ÜZERİNE YANSIMA
ÖNLEYİCİ İNCE FİLM GELİŞTİRİLMESİ**

Abdullah KARACA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

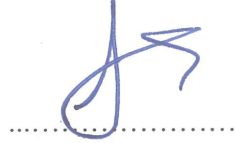
MAYIS 2018

Abdullah KARACA tarafından hazırlanan “GERMANYUM TEK KRİSTAL OPTİK PENCERE ÜZERİNE YANSIMA ÖNLEYİCİ İNCE FİLM GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Semran SAĞLAM

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Başkan: Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK

Fizik Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

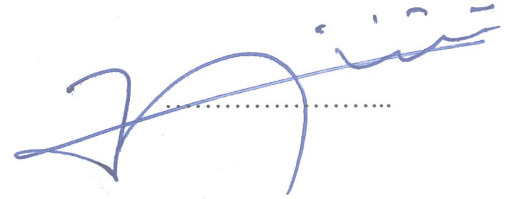
Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Üye: Dr. Öğr. Üyesi Gökhan SÜRÜCÜ

Elektrik ve Enerji Anabilim Dalı, Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.



Tez Savunma Tarihi: 18/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah KARACA

18/05/2018

GERMANYUM TEK KRİSTAL OPTİK PENCERE ÜZERİNE YANSIMA ÖNLEYİCİ İNCE FİLM GELİŞTİRİLMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah KARACA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Kızılötesi(KÖ) görüntüleme sistemlerinde optik özelliklerinden dolayı mercek veya optik pencere olarak Germanyum (Ge) yarıiletkeni tercih edilmektedir. Ge, kızılötesi bölgede 2-14 μm (atmosferik şeffaf pencere bölgeleri) dalgaboyu aralığında %46 optik geçirgenlik göstermektedir. Ge'nin yüzeyinde oluşan bu yansımaya kayıpları, yansımaya önleyici kaplamalar (ARC) ile azaltılabilir. ARC, yüzeyde oluşan yansımaya kayıplarını azaltarak geçen ışığın şiddetini artırır. Böyle kaplamalar için malzemelerin 2-14 μm dalgaboyu aralığında optik geçirgenliği ve kırılma indisleri Ge ile uyumlu olması gerekmektedir. ARC'nin ince film kalınlığı Fresnel Denklemleri ve Bragg Yasası ile belirlenir. Belirlenen film kalınlığında yansımaya önleyici ince film kaplanan yüzeyde, %2'den daha az yansımaya kaybı oluşur. Bu tezde, n-tipi Ge optik pencereler üzerine farklı kaplama şartlarında RF magnetron püskürtme yöntemi ile çinko sülfür (ZnS) yansımaya önleyici ince filmler kaplandı. Elde edilen ZnS ince filmlerin optik, yapısal ve morfolojik analizleri sırasıyla Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR), X-ışını kırınımı (XRD) ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ölçüm sistemleri ile incelendi. Kırılma indisi ve kalınlık değerlerine bağlı olarak, geliştirilen yansımaya önleyici kaplamaların 3-5 μm ve 8-12 μm bölgeleri için KÖ uygulamalarda kullanılabilir olduğu değerlendirildi.

Bilim Kodu : 20217

Anahtar Kelimeler : Germanyum, Tek Kristal, İnce Film, Yansımaya Önleyici, Optik Geçirgenlik

Sayfa Adedi : 74

Danışman : Prof. Dr. Semran SAĞLAM

THE DEVELOPMENT OF ANTI-REFLECTION THIN FILM ON GERMANIUM SINGLE CRYSTAL OPTICAL WINDOW

(M. Sc. Thesis)

Abdullah KARACA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

Germanium (Ge) semiconductor is preferred as lens or optical window due to its optical properties in infrared (IR) imaging systems. Ge has an optical transmission of 46% at the wavelength range of 2-14 μm (atmospheric transparent window regions) in infrared region. These reflection losses taking place on the surface of Ge can be reduced by antireflective coatings (ARCs). ARC increases the intensity of light passing by reducing reflection losses on the surface. The optical transmittance and refractive indices of the materials for such coatings should be compatible with Ge at the wavelength range of 2-14 μm . The thin film thickness of the ARC is determined by the Fresnel Equations and the Bragg Law. The reflection loss less than 2% occur on the surface on which AR thin film is coated with determined film thickness. In this study, Zinc Sulfide (ZnS) anti-reflection thin films were deposited on n-type Ge optical windows by RF magnetron sputtering at different coating conditions. Optical, structural and morphological analysis of the obtained ZnS thin films were examined by Fourier transform infrared spectrometry (FTIR), X-ray diffraction (XRD) and Atomic force microscopy (AFM) measurement systems, respectively. Finally, it was evaluated that the developed ARCs are usable depending on values of refractive indice and film thickness for 3-5 μm and 8-12 μm regions in IR applications.

Science Code : 20217

Key Words : Germanium, Single Crystal, Thin Film, Anti-reflection, Optical Transmission

Page Number : 74

Supervisor : Prof. Dr. Semran SAĞLAM

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans çalışmam boyunca, derslerim ve tez aşaması sürecinde beni yönlendiren, engin bilgi birikimi ve tecrübelerini paylaşarak bana birçok şey katan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Semran SAĞLAM'a çok teşekkür ederim.

Hazırlamış olduğum bu çalışmanın ortaya çıkması sürecinde, beni yönlendiren, gerekli her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi müdürü Sayın Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK hocama sonsuz teşekkür ederim.

Eylül 2015 döneminde katılmış olduğum GAZİ – FOTONİK araştırma grubunun bünyesinde bulunan bütün hocalarıma ve arkadaşlarıma bana göstermiş oldukları sabır ve anlayışlarından dolayı çok teşekkür ediyorum.

Yakın dönemde edindiğim lisans dönem arkadaşım Sayın Zekeriya KARAAHMET, yakın arkadaşım Orçun DEMİR, Eşi ve Ailesine yüksek lisansım boyunca bana vermiş oldukları desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Şahsım adına, ne kadar şanslı olduğumu bu gün bir kez daha anlamama sebep olan değerli aileme ve güzel insanlara; her ne kadar karşılığını ödeyemeyecek olsam da yanımda olup, mutlu olmam için yaptıklarından dolayı bir nebze olsun teşekkür ederim.

Bu tez, 2016K121220 nolu proje kapsamında Kalkınma Bakanlığı, 115F048 nolu proje ile TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Kalkınma Bakanlığı ve TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER	5
2.1. Tek Kristal Germanyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	5
2.2. Malzeme Seçimi ve Ortak Özellikleri.....	8
2.2.1. Çinko sülfür	11
2.3. Fresnel Denklemleri	14
2.3.1 s - Polarize durumu.....	17
2.3.2. p - Polarize durumu	18
2.4. Yansıma Önleyici Kaplama (ARC).....	23
2.4.1. Tek katman yansıma önleyici kaplama.....	23
2.4.2. Çok katman yansıma önleyici kaplama	25
2.4.3. Ge optik pencerelerin kalınlıklarının optik geçirgenliğe etkisi	27
2.4.4. İki yüzeyi yansıma önleyici ince film kaplanan Ge optik pencerelerin optik geçirgenlikleri.....	28
3. MATERYAL VE METOT	31
3.1. İnce Film Kaplama Teknikleri	31
3.2. Püskürtme Yöntemi	32

	Sayfa
3.2.1. Doğru akım (DC) püskürtme yöntemi	34
3.2.2. Radyo frekansı (RF) püskürtme yöntemi	35
3.2.3. RF ve DC magnetron püskürtme yöntemi	36
4. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER.....	39
4.1. Eş Püskürtme Sistemi	39
4.2. X Işınları Kırınımı (XRD)	40
4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)	42
4.4. Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR)	44
4.5. Profilometre	46
5. ARC İNCE FİLM ÜRETİMİ VE ARAŞTIRMA BULGULARI	49
5.1. ARC İnce Filmlerin Üretimi.....	49
5.1.1. Ge optik pencere numunelerinin temizlenmesi.....	49
5.1.2. ZnS ince filmlerin üretilmesi.....	50
5.1.3. ZnS ince filmlerinin kaplama parametreleri ve film kalınlıkları	50
5.2. ZnS İnce Filmlerin Optik, Yapısal ve Yüzey Analizleri	52
5.2.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) analizleri	52
5.2.2. X- Işını kırınımı (XRD) analizleri	58
5.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri	60
6. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	65
KAYNAKLAR	67
ÖZGEÇMİŞ	72

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Ge'ye ait oda sıcaklığında bazı fiziksel parametreler	6
Çizelge 2.2. Ge'nin belirli dalgaboylarındaki kırılma indisleri	10
Çizelge 2.3. Düşük kırılma indisine sahip malzemeler.....	10
Çizelge 2.4. Orta kırılma indisine sahip malzemeler.	10
Çizelge 2.5. Yüksek kırılma indisine sahip malzemeler.....	11
Çizelge 5.1. Ge optik pencereleri için tek yüzey kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları.....	51
Çizelge 5.2. Ge optik pencereleri için çift yüzey kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları.....	51
Çizelge 5.3. Ge optik pencereler için farklı kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları.....	52
Çizelge 5.4. Basınç değişiminin parçacık büyüklüğüne etkisi	60
Çizelge 5.5. Tek yüzey ZnS ince filmlerin basınç değerlerine göre RMS değerleri	64

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. 1.0-3.5 mm arasındaki alttaş kalınlıkları için Ge'nin optik geçirgenliği.	6
Şekil 2.2. Ge'nin dalgaboyuna göre soğurma katsayısı	7
Şekil 2.3. ARC'de kullanılabilecek bazı malzemelerin optik geçirgenlik dalgaboyu aralıkları	9
Şekil 2.4. ZnS kristal yapıları a) Kübik (Zinc Blende) b) Hegzagonal würtzite.....	12
Şekil 2.5. Bir arayüzeydeki ışığın durumları; gelen, yansıyan ve kırılan ışık.....	15
Şekil 2.6. Yüzeğe gelen ışık ve geliş düzlemi arasındaki ilişki a) p-polarize ışık b) s-polarize ışık.....	17
Şekil 2.7. Tek katman ARC ince film üzerine gelen, yansıyan ve geçen ışık aralarında oluşan optik yol farkı	22
Şekil 3.1. Fiziksel Buhar Birikiminin (PVD) şematik gösterimi.	31
Şekil 3.2. Kimyasal Buhar Birikiminin (CVD) şematik gösterimi	32
Şekil 3.3. Püskürtme yöntemi ile hedef malzeme atomlarının bombardıman edilerek koparılmasının şematik gösterimi	33
Şekil 3.4. Plazma ortamının oluşturulması	33
Şekil 3.5. Püskürtme (sputtering) tekniği çeşitleri.....	34
Şekil 3.6. DC püskürtme sistemi şematik gösterimi	35
Şekil 3.7. RF püskürtme sistemi şematik gösterimi	36
Şekil 3.8. DC magnetron püskürtme sistemi şematik gösterimi	37
Şekil 4.1. Kristal düzlemine gelen ve yansıyan X-ışınları	40
Şekil 4.2. AFM çalışma prensibi	43
Şekil 5.1. Kaplama yapılmamış Ge optik pencerenin optik geçirgenlik ölçümü	53
Şekil 5.2. 3-5 µm dalgaboyu aralığı için, tek yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü..	53
Şekil 5.3. 8-12 µm dalgaboyu aralığında, tek yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü	54
Şekil 5.4. 3-5 µm dalgaboyu aralığı için, çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü	55
Şekil 5.5. 3-5 µm dalgaboyu aralığı için ARC-14 numunesinin FTIR ölçümü	56

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. ARC-15 ve ARC-16 numunelerine ait çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümleri	57
Şekil 5.7. ARC-17 ve ARC-18 numunelerine ait çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümleri	58
Şekil 5.8. Farklı kaplama basınçlarında elde edilen ZnS ince filmlerinin XRD grafiği	59
Şekil 5.9. ZnS'nin Kübik ve Hegzagonal Würtzite yapısının XRD grafiği	59
Şekil 5.10. Kaplanmamış Ge optik pencerenin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	60
Şekil 5.11. ARC-2 (3 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	61
Şekil 5.12. ARC-3 (3 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	61
Şekil 5.13. ARC-6 (20 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	62
Şekil 5.14. ARC-7 (20 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	62
Şekil 5.15. ARC-8 (30 mTorr basınç) numunesinin AFM) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	63
Şekil 5.16. ARC-9 (30 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü	63

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Eş-Püskürtme sistemi (NVTS-500 marka)	39
Resim 4.2. APD 2000 PRO XRD cihazı	41
Resim 4.3. Cantilever Ucu	42
Resim 4.4. Nanomanyetik Marka Pro-AFM sistemi	43
Resim 4.5. Bruker Vertex 80 FTIR Spektrometresi	45
Resim 4.6. “Veeco Dektak-150” profilometresi	47
Resim 4.7. “Veeco Dektak-150” profilometre tablası ve iğnesi	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
$\text{\AA}$	Angstrom
Ar	Argon
Ar⁺	Argon iyonu
Cs	Sezyum
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat
d	Düzlemler arası mesafe
Dk	Dakika
Ge	Germanyum
I	Akım
I_{max}	Maksimum akım
I_{min}	Minimum akım
$\vec{k}$	Dalga vektörü
K	Kelvin
L	Uzunluk
λ	Dalga boyu
mA	Miliamper
mTorr	MiliTorr
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
nm	Nanometre
N	Azot
n	Kırılma indisi
n	Taşıyıcı yoğunluğu
p	Deşik yoğunluğu
r	Yansıma katsayısı
R	Yansıma
ρ	Özdirenç

Simgeler**Si****t****T****TE****TM** **θ** **V****W****2D****3D****Açıklamalar**

Silisyum

Geçirgenlik katsayısı

Geçirgenlik

Transverse elektrik

Transverse manyetik

Bragg açısı

Voltaj

Watt

İki boyutlu

Üç boyutlu

Kısaltmalar**Açıklamalar****AC**

Alternatif akım

AFM

Atomik kuvvet mikroskobu

ARC

Yansıma önleyici kaplama

CVD

Kimyasal buhar biriktirme

DC

Doğru akım

FTIR

Kızılötesi dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi

FWHM

Pik yarı genişliği

IR

Kızılötesi

LWIR

Uzak kızılötesi bölge

MWIR

Orta kızılötesi bölge

MOCVD

Metal organik kimyasal buhar biriktirme

NWIR

Yakın kızılötesi bölge

PECVD

Plazma destekli kimyasal buhar biriktirme

PVD

Fiziksel buhar biriktirme

RF

Radyo frekansı

RG

Reaktif gaz

RMS

Kare ortalama karekök

UV

Mor ötesi

XRD

X-ışını kırınımı

1. GİRİŞ

Kızılötesi (KÖ) görüntüleme sistemleri günümüzde çok önemli bir yer edinmiştir. $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ üzerindeki tüm nesneler bir enerji (ısı) yayar. Nesnelerin sıcaklığına bağlı olarak değişkenlik gösteren enerjileri, kızılötesi (Infrared) bölgeye karşılık gelmektedir [1]. KÖ bölge görüntüleme sistemleri, nesnelerden yayılan ısıdaki çok küçük değişimleri de dahil olmak üzere KÖ bölgede algılayabilen ve görüntüleme cihazları ile doğrudan temas etme ihtiyacı olmaksızın görüntüye dönüştürebilen optik sistemlerdir [2]. Görüntüleme sistemlerinden elde edilen görüntüler KÖ bölgeye karşılık gelen renk ve şekillerden oluşur.

Kızılötesi görüntüleme sistemleri; gözle tespit edilemeyen, ancak ciddi sonuçlara yol açabilen küçük problemleri net olarak görmemizi sağlamaktadır. Genelde güvenlik amaçlı kullanılan bu sistemler çok çeşitli sektörlerde kullanıma açıktır. Ayrıca Gece görüş sistemleri ve askeri tekniklerin gelişmesi, KÖ görüntülemenin önemini daha da arttırmıştır. Beyaz bir duvar önünde bulunan beyaz bir objenin fark edilmesi son derece zor olduğu gibi ortam sıcaklığına eşit bir sıcaklıktaki bir objenin de görüntülenmesi de son derece zordur. Bu tür kameralarda kullanılan mercekler veya optik pencereler çok küçük sıcaklık farklarını yakalayabilen ($0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ gibi) ve bu farklılıktan görüntü oluşturabilen özelliklerde olması gerekmektedir. Örnek olarak bir füze arayıcısı verilebilir. Füze arayıcısı, uzak bir noktadaki füzeden gelen ışınlam ile füzenin yerini tespit etmek zorundadır. Buda füze arayıcı sisteminde meydana gelen optik kayıpların azaltılmasıyla mümkün olabilir. Yansıma kaybına ek olarak, görüntü netliğini azaltan bazı ışınlamalarında engellenmesi gerekmektedir. Bu kayıplar, azaltıldığında görüntüleme veya arayıcı sistemleri nesneden gelen ışınlam ile konumunu daha iyi şartlar altında belirleyebilmektedir.

Kullanılmakta olan KÖ görüntüleme sistemleri; mercek veya optik pencere, dedektör, görüntü işleme elektronik cihazları, kumanda araçları, veri işleme ve depolama cihazları, bilgisayar yazılımı gibi birçok sayıda elektronik ve mekanik parçalardan oluşur. Bu bileşenler termal görüntüleme sisteminin tip ve modeline bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Ancak her kameranın en az bir merceği vardır. Bu tür kameralarda, tek kristal Germanyum (Ge) yarıiletkeninden elde edilen yüksek optik özelliklere sahip mercek veya optik pencereler daha çok tercih edilmektedir [3]. Bu kameralarda kullanılan mercek, kızılötesi ışınlamı dedektör üzerine odaklar. Dedektör üzerine düşen ışınlam bir fotoakım oluşturur ve bu sinyal görüntü işleme cihazlarıyla termal bir görüntüye dönüştürülür. KÖ

görüntüleme sistemlerinde, genelde, kısa (SWIR) ve uzak kızılötesi dalgaboyu (LWIR) bölgesinde, sırasıyla, 3-5 μm ve 8-12 μm dalgaboyu aralığında yüksek optik geçirgenliğe sahip malzemeler mercek olarak kullanılır [4].

Kullanılabilecek mercek malzemelerinin sahip olduğu yüksek kırılma indisinden dolayı hava ortamında malzemenin yüzeyi oldukça yüksek yansıtıcı özellik gösterebilmektedir. Merceklerin yüksek yansıtma özelliği, kullanıldıkları KÖ görüntüleme sistemlerinde görüntü netliğini de azaltmaktadır. Görüntü netliği, KÖ görüntüleme sistemleri için önemli olmaktadır. Bu görüntü netliği de, kullanılan mercek veya optik pencere yüzeylerinde oluşan optik yol farkının engellenmesi ile artırılabilir. Mercek yüzeyinde oluşan optik yol farkı ortadan kalktığında KÖ görüntü malzemelerinde optik yansıma azalmakta, optik geçirgenlik artmakta ve görüntü netliği olabildiğince maksimum olmaktadır. Bu optik yol farkı mercek veya optik pencere üzerine ince film kaplama ile azaltılabilir. Kullanılan malzeme yüzeyine büyütülen ince film kaplamalar yansıma önleyici kaplamalar (ARC) olarak adlandırılır [5]. ARC'nin fiziksel altyapısını girişim oluşturmaktadır [6].

ARC'nin temel amacı, kullanılan malzemelerin yüzeyinden yansıyan ışığın azaltılması ve iletilen ışığın yoğunluğunun artırılmasıdır. ARC istenen yüzeyde, en basit yöntem ise tek dalgaboyunda optik geçirgenlik için tek katman yansıma önleyici kaplama (SLARC) yapılmasıdır. SLARC için kullanılan malzemenin optik geçirgenliği ve kaplama kalınlığı önemli olmaktadır. Bu tür kaplamada malzemenin sahip olduğu optik geçirgenlik, yüzeyden hangi dalgaboyunda optik geçirgenlik olabileceğini sınırlamaktadır. Kaplama kalınlığı ise, film yüzeyinde oluşan girişimde hangi dalgaboyunda optik geçirgenlik istenildiğini belirlemektedir. Çok katman yansıma önleyici kaplamalar (MLARC), SLARC kaplamalara göre daha karmaşık olmaktadır. MLARC sistem yüzeyinde oluşan optik kayıpları azaltmakta ve kaplama malzemelerine göre geniş dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik gösterebilmektedir. MLARC tasarımı, genellikle bazı yaklaşımlarla optimize edilmekte ve ardışık olarak bir düşük kırılma indisli ve bir yüksek kırılma indisli malzemelerin, alttaş üzerine ince film kaplanması ile oluşturulmaktadır.

ARC kaplamaları, birçok film kaplama tekniği kullanılarak malzemelerin optik geçirgenlik performansını arttırmak için kullanılır. Bu kaplamalar için fiziksel buhar birikimi (PVD) ve kimyasal buhar birikimi (CVD) temelli çeşitli ince film teknikleri kullanılmaktadır. CVD, metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD), plazma geliştirmeli kimyasal buhar

biriktirme (PECVD), kimyasal çözelti kaplaması (CSC), kimyasal banyo kaplaması (CBD), sol-jel metot, spin kaplama, atomik katman biriktirme (ALD) gibi kendi içinde farklı teknik ve yöntemlerle alttaş malzemesi üzerine kimyasal olarak buhar birikimi ile ARC ince film kaplamaları yapılmaktadır. PVD temelli ince film teknikleri içerisinde ise buharlaştırma (rezistans ile buharlaştırma, ark yöntemi, elektron demetiyle buharlaştırma, lazer ile buharlaştırma) ve sıçratma (DC sıçratma, RF sıçratma, manyetik alan sıçratma, iyon demetiyle sıçratma) yöntemleri en çok tercih edilen yöntemlerdir. Farklı teknikler uygulanarak hedef malzemeden koparılan atomların, alttaş üzerine yönlendirilmesi ile film kaplaması gerçekleştirilmektedir [7-10].

Bu çalışmada, iyi film kalitesine sahip filmlerin üretilmesine olanak sağlayan ve üretim sürecinde yüksek vakum, farklı büyütme parametrelerinin uygulanması gibi film özelliklerini etkileyen özelliklerin kontrol edilmesini kolaylaştıran magnetron püskürtme (sputtering) tekniği kullanıldı.

Mercek ve optik pencere olarak termal kameralarda kullanılan Ge yarıiletkenin yüksek kırılma indisi ($n=4.00$) sebebiyle optik geçirgenliği %46 civarındadır [11]. Katkısız Ge'nin, %50'den fazla olan yansıma kaybı, sadece Ge için değil aynı zamanda 2-14 μm dalgaboyu aralığında termal kameralarda mercek veya optik pencere olarak kullanılan birçok malzemede de olmaktadır. Bundan dolayı KÖ görüntüleme sistemlerinde kullanılan malzemeye yansıma önleyici kaplama (ARC) yapılması kaçınılmazdır [12].

Bu tez çalışmasının amacı, KÖ görüntüleme sistemlerinde (111) yönelimli Ge tek kristal yarıiletkeninden elde edilen optik pencerelerin optik geçirgenliğini yansıma önleyici ince film kaplamalar ile arttırmaktır. Bu amaç doğrultusunda, 3-5 μm ve 8-12 μm dalgaboyu aralığı için Ge optik pencerenin tek ve çift yüzeyine ARC olarak tek katman ZnS ince film kaplama yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında üretilen yansıma önleyici ZnS ince filmler, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Magnetron Eş Püskürtme (sputtering) sistemi kullanılarak Ge optik pencereler üzerine kaplandı. Kaplamaları yapılan ARC filmlerin aynı merkezde bulunan profilometre ile film kalınlıkları, Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR) ile optik geçirgenlikleri, X-Işını Kırınım (XRD) deseni ile kristal yapı analizleri ve Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) ile yüzey özellikleri incelendi.

Tezin İkinci Bölümünde, Ge yarıiletkeninin fiziksel ve kimyasal özellikleri ve kullanım alanları hakkında bilgiler verildi. Ge üzerine yansıma önleyici olarak kaplama yapılabilecek malzemelerin tanıtımı, ortak özellikleri gibi bilgiler ile kaplama tasarımı için kullanılan eşitlikler ifade edildi. Ayrıca bu bölümde yansıma önleyici kaplamanın optiği, tasarımı ve optimizasyonu hakkında teorik bilgiler verildi. Çalışmanın Üçüncü Bölümünde, ZnS ince filmlerin üretiminde kullanılan magnetron püskürtme (sputtering) yöntemi ve özellikleri hakkında bilgi verildi. Dördüncü Bölümde, bu çalışmada kullanılan deneysel cihazlar tanıtılırken, Beşinci Bölümde filmlerin üretim aşamaları ve deneysel olarak elde edilen ölçüm sonuçları incelendi. Altıncı Bölümde ise elde edilen sonuçların değerlendirmeleri yapıldı ve öneriler ifade edildi.

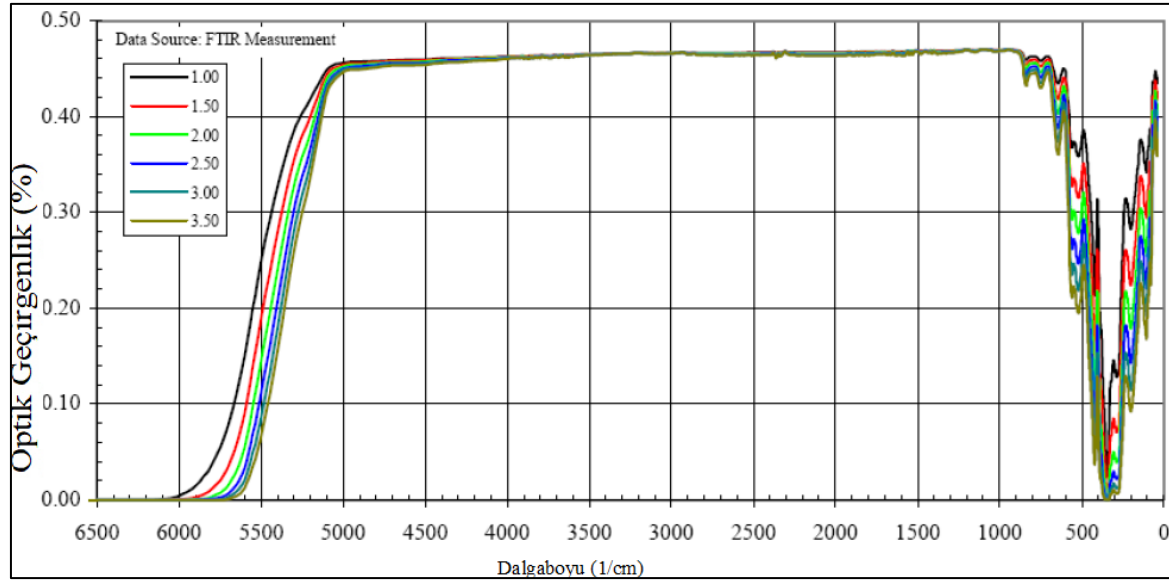
2. GENEL BİLGİLER

2.1. Tek Kristal Germanyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Yarıiletkenler, günümüz teknolojisinin en önemli temel malzemelerinden biridir ve doğrudan ya da dolaylı olarak elektronik cihazların içinde bulunmaktadır. Böyle cihazların üretiminde doğada element olarak bulunan Germanyum (Ge) ve Silisyum (Si) yarı iletkenleri çoğunlukta kullanılmaktadır. Ayrıca bazı cihazlarda kullanılan diğer yarıiletkenler ise çeşitli büyütme teknikleri ile yapay olarak üretilmektedir. Elektronik ve optoelektronik cihazlardan verim ve daha iyi performans ihtiyacı arttıkça, yarıiletken üretiminin saflık derecesi ve tek kristal olarak üretimi atılmıştır. Ge ve Si'yi tek kristal olarak büyütme için Czochralski, Bridgman, Kryopolous gibi teknikler kullanılmaktadır [13-15].

Ge'yi tek kristal büyütme için en çok kullanılan yöntem ise Czochralski tekniğidir. İlk hacimli (bulk) olarak tek kristal Ge, 1948'de Bell Laboratuvarı'nda Teal ve Little, Czochralski tekniği kullanılarak büyütmüşlerdir [16]. 1950'lerden sonra tek kristal Ge'nin yüksek saflıkta üretilmesi ile radyasyon dedektörü uygulamalarına, KÖ uygulamalar için mercek ve optik pencere olarak kullanımı, güneş hücreleri için alttaş üretimi, lazer ve fotodiyot gibi birçok yarıiletken uygulamalarına büyük katkı sağlamıştır. Bu ilerlemelerle birlikte Ge, sahip olduğu özellikleri itibarıyla, savunma sanayisinde, elektrik-elektronikte, cam-optik sanayinde, uzay teknolojilerinde, sağlık sektörü de dâhil birçok alanda kullanılabilen bir ürün haline gelmiştir.

Yüksek kırılma indisi ve dağılma (dispersiyon) özellikleri gibi optik nitelikleri nedeni ile Ge, KÖ görüntüleme için önemli olan atmosferik şeffaf pencere bölgelerini (3-5 μm ve 8-12 μm) içine alan 2-18 μm dalgaboyu aralığında 300 K de homojen olarak kızılötesi geçirgenliğe ve 0.67 eV enerji bant aralığına sahiptir. Germanyum 760-780 N/mm^2 Knoop sertliği, 58.61 $\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ termal iletkenliği ve yüksek mekanik dayanıma sahip bir malzemedir [17, 18].



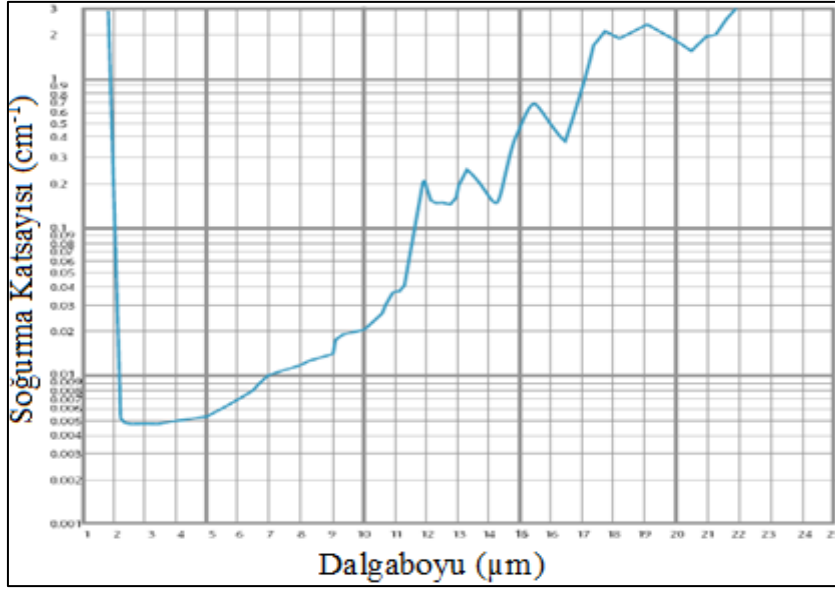
Şekil 2.1. 1.0-3.5 mm arasındaki alttaş kalınlıkları için Ge'nin optik geçirgenliği [19]

Kızılötesi optik uygulamalarda kullanılan malzemenin kütlece ağırlık ve ekonomiklik gibi nedenlere bağlı olarak, optik geçirgenliğin kalınlığa bağlı değişiminin incelenmesi yararlıdır. Literatürde, kalınlığı 1.0-3.5 mm aralığında değişen altı farklı Ge yarıiletkeninin optik geçirgenlikleri, dalgaboyunun fonksiyonu olarak Şekil 2.1.'deki gibi verilmektedir [20]. Bu çalışma; Ge'nin sahip olduğu optik geçirgenliğin, kalınlıktan bağımsız olduğunu göstermektedir.

Ge, gümüş renginde, sert ve kırılğan bir elementtir. Periyodik cetvelde IV. Grup elementlerinden olup, atom numarası 32 ve 72.59 atom ağırlığı bulunmaktadır. Ge'nin sahip olduğu bazı fiziksel özellikleri Çizelge 2.1.'de ifade edilmektedir [21].

Çizelge 2.1. Ge'ye ait oda sıcaklığında bazı fiziksel parametreler [22]

Elektron dizilimi	$[Ar] 3d^{10} 4s^2 4p^2$
Yoğunluk	5,3234 gr/cm ³
Yasak enerji aralığı	0,661 eV
Örgü sabiti	5,658 Å
Erime sıcaklığı	938,25 °C
Kaynama sıcaklığı	2833°C



Şekil 2.2. Ge'nin dalgaboyuna göre soğurma katsayısı [20]

Ge'nin valans bandında dört elektronu bulunmaktadır. Tek kristal Ge için katkısız halde taşıyıcı olarak holler ve elektron sayıları yaklaşık olarak eşit olmaktadır. Elektronik cihazlarda elektriksel iletim için elektronların veya hollerin fazlalık durumları önemli olmaktadır. Ge için elektron ve hol sayıları yaklaşık olarak eşit olduğundan istenildiği durumlarda katkı atomları eklenerek içerisinde taşıyıcı atomların miktarları ayarlanabilir. Katkı atomu, cihazın elektriksel özelliklerinin ayarlanmasına ve daha verimli olmasına olanak sağlamaktadır. Bu durumda Ge'nin elektronları ile iletim sağlanması istenilirse Ge'ye beş valans elektronu bulunan bir katkı atomu eklemesi bir elektron fazlalığı oluşturmaktadır. Elektron fazlalığı, Ge'yi n-tipi oluşturmaktadır. Ge'ye üç valans elektronu bulunan katkı atomları eklenirse, hol fazlalığı olmakta ve p-tipi Ge oluşturmaktadır [23]. p-tipi Ge'de iletim için hol fazlalığından yararlanılmaktadır.

Ge'nin optik özellikleri sıcaklık farkına duyarlıdır. Sıcaklık 100°C'nin üzerine çıktığında Ge'nin elektron veya hol iletimi düşmeye başlar. Ge'nin 2–18 μm dalgaboyu aralığında yüksek optik geçirgenlik göstermesine karşın, sıcaklık artmasıyla beraber serbest taşıyıcıların soğurumu artar ve dolayısıyla 2–18 μm dalgaboyu aralığında iletim azalır.

Ge, Antimon (Sb) veya Arsenik (As) gibi elektron fazlalığı olan V. grup bir atomla katkılандığında ise öz direnci azalır. Öz direncin azalması n-tipi Ge'de soğurma katsayısının düşmesini ve 2–18 μm dalgaboyu aralığında optik geçirgenliğin artmasını sağlamaktadır. Bu durumda Ge'nin n-tipi katkılı olarak kullanmak avantaj sağlamaktadır.

Ge'nin soğurmayı minimize etmek için kullanılan katkı maddesi miktarı $5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ ile $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ arasında olması gerekmektedir [23]. Ge'ye, bu miktarlarda katkı malzemesi eklenirse n-tipi ve oda sıcaklığında 0.02 cm^{-1} den daha az bir soğurma katsayısı olmaktadır.

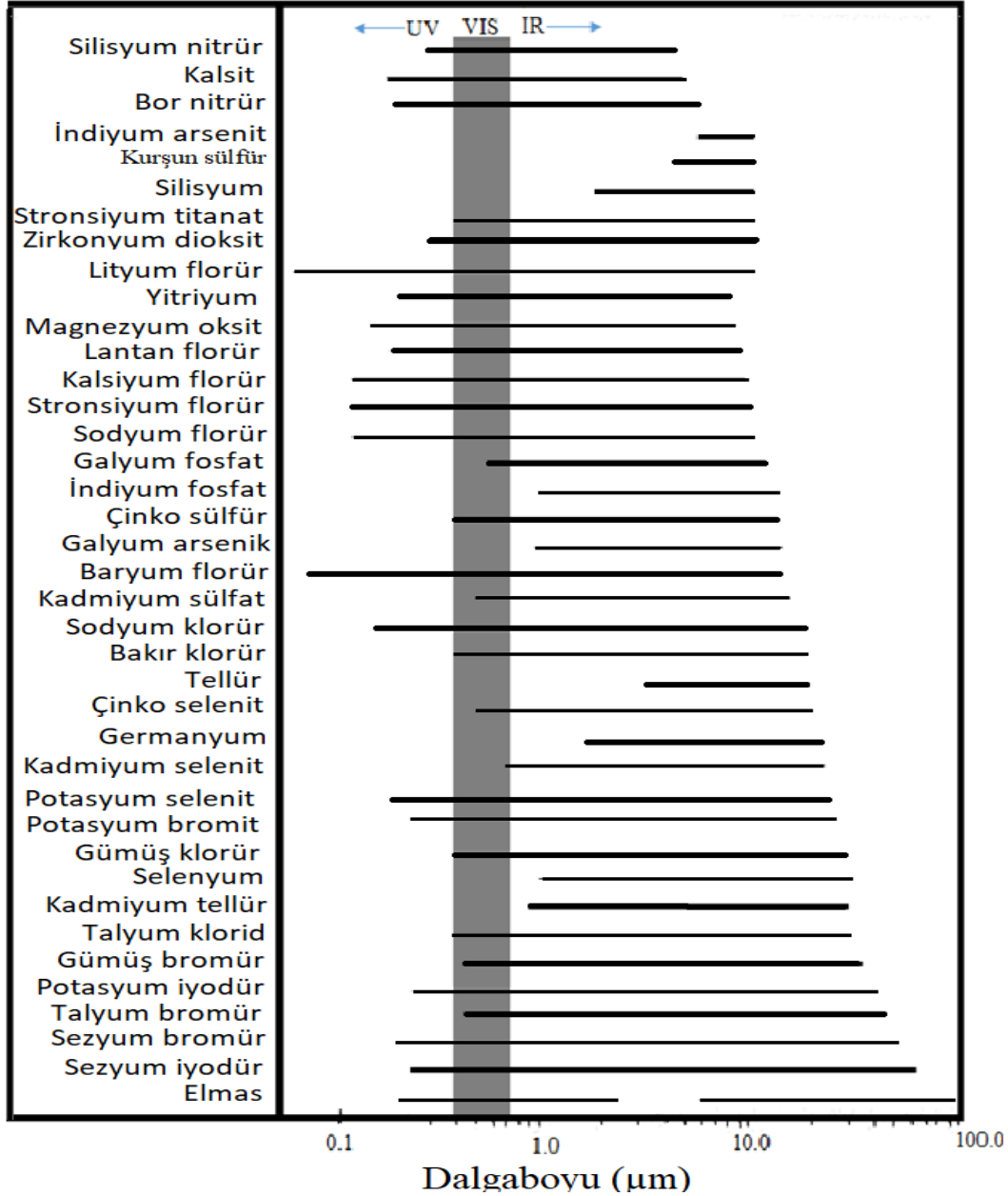
2.2. Malzeme Seçimi ve Ortak Özellikleri

Optik ince film kaplamaları, bir malzemenin yüzeyinden geri yansıyan ışığın azaltılması için gereklidir. Optik ince film kaplamaları için kullanılan malzemelerin sahip olduğu optik ve elektriksel özellikleri alttaş malzemelerin istenilen dalga boylarında optik özelliklerini arttırmaktadır.

ARC kaplamaları, malzeme yüzeyinden yansıyan ışığın yapıcı girişim yapmasını sağlamakta ve geçen ışığın ise şiddetini arttırmaktadır. Böyle kaplamalarda ana unsuru, ince film kaplamak istenilen malzemenin sahip olduğu kırılma indisi ve optik geçirgenliği bulunan dalga boyları aralıkları oluşturmaktadır. Bu unsurlar alttaş malzemesi ile uyumlu olduğunda yüzeyden geri yansıyan ışığın şiddeti azaltılabilir.

Kızılötesi bölgede görüntüleme sistemleri mercekleri ve optik pencerelerinin yüzeylerine, yansıma önleyici kaplama yapılabilmesi için, kullanılacak malzemenin özellikle 2-14 μm dalga boyları aralığında optik geçirgenliği bulunması gerekmektedir. Kullanılabilecek malzemeler belirlendikten sonra ARC tasarımları yapılabilir.

ARC, tek katman veya çok katman yansıma önleyici olarak tasarlanması gerektiğinden malzemeler kırılma indisleri, bu tasarımları sınırlamaktadır. İnce film üretilen malzemenin sahip olduğu kırılma indisleri, alttaş malzemesinin yüzeyinden geçen ışığın şiddetinin büyüklüğünü tanımlanması için kullanılmaktadır. Bu durumda kırılma indisi kaplama malzemesi seçimini kısıtlamaktadır. Hem optik geçirgenlik hem de kırılma indisi göz önüne alındığında 2-14 μm dalga boyları aralığı için kaplama malzemeleri sınırlı sayıda olmaktadır. Şekil 2.3.'te KÖ uygulamalar için kaplama yapılabilecek bazı malzemelerin sahip olduğu optik geçirgenlik dalga boyları aralıkları verilmiştir. Şekil 2.3'te verilen malzemeler ARC kaplamasına uygun olsa da bu malzemelerin sahip olduğu kırılma indisleri dikkate alındığında kullanılabilecek malzeme sayısı fazla olmamaktadır.



Şekil 2.3. ARC’de kullanılabilecek bazı malzemelerin optik geçirgenlik dalgaboyu aralıkları [24]

Çizelge 2.2. ile Ge’nin, atmosferik şeffaf pencere bölgelerine karşılık gelen 2-14 μm aralığında sahip olduğu kırılma indisleri verilmiştir. Ge’nin, sahip olduğu kırılma indisinin yüksek olmasından dolayı tek katman veya çok katman yansıma önleyici kaplamaların yapılmasını mümkün kılmaktadır. Yüksek kırılma indisine sahip olan bir materyal üzerine ince film kaplama için elektromanyetik sınır koşulları altında Fresnel Denklemleri, Snell ve Bragg Yasalarının belirlediği şartlara göre belirlenen parametreler değerlendirildiğinde kaplama yapılabilir.

Yansıma önleyici ince film kaplamaları için kullanılan film kaplama yöntemleri ve ince film parametrelerinin yanında, kaplama yapılacak malzemenin dayanıklılık, radyoaktiflik ve diğer fiziksel özellikleri de dikkate alınmalı ve malzemelerin çevre etmenlerine uygun olarak tasarımı ve kaplaması yapılmalıdır.

Çizelge 2.2. Ge'nin belirli dalgalıboyındaki kırılma indisleri [11]

Dalgaboyu (μm)	Kırılma İndisi (n)
0,5	4,388
4	4,025
10	4,004

Germanyum üzerine yansıma önleyici kaplamaların tasarımı malzemelerin kırılma indislerine göre ayrılabilir. Bu ayırma işlemi hangi malzemenin SLARC veya MLARC kaplamasında kullanılabilir olduğunu göstermektedir. Kırılma indislerine göre, düşük (1,3 ~1,6), orta (2 ~ 2,6), ve yüksek (3 ~ 4) kırılma indislerine sahip malzemeler olarak kaplama malzemesi seçimi ve ARC'nin türüne göre tasarımı yapılmalıdır. Kızılötesi bölgede, Çizelge 2.3. ile düşük kırılma indisi, Çizelge 2.4 ile orta kırılma indisi ve Çizelge 2.5. ile yüksek kırılma indisi bulunan malzemelerin sahip olduğu optik geçirgenlik dalgalıboyu aralıkları verilmiştir [11].

Çizelge 2.3. Düşük kırılma indisine sahip malzemeler

Malzeme Adı	Kırılma İndisi (4 μm)	Kırılma İndisi (10 μm)	Optik Geçirgenlik Aralığı (μm)
Sezyum Bromür (CsBr)	1,66	1,66	0,35 – 32,00
Seryum Florid (CeF ₃)	1,42	1,47	0,30 – 13,00
Kalsiyum Florid (CaF ₂)	1,41	-	0,15 – 10,00
Magnezyum Florid (MgF ₂)	1,34	-	0,20 – 8,00
Baryum Florid (BaF ₂)	1,33	1,42	0,25 – 15,00

Çizelge 2.4. Orta kırılma indisine sahip malzemeler

Malzeme Adı	Kırılma İndisi (4 μm)	Kırılma İndisi (10 μm)	Optik Geçirgenlik Aralığı (μm)
Kadmiyum Tellür (CdTe)	2,69	2,67	0,90 – 25,00
Kadmiyum Selenit (CdSe)	2,40	2,40	0,70 – 25
Kadmiyum Sülfür (CdS)	2,40	2,26	0,50 – 14
Çinko Selenit (ZnSe)	2,43	2,40	0,60 – 15
Çinko Sülfür (ZnS)	2,25	2,20	0,4 - 12

Çizelge 2.5. Yüksek kırılma indisine sahip malzemeler

Malzeme adı	Kırılma indisi (4 μm)	Kırılma indisi (10 μm)	Optik Geçirgenlik Aralığı (μm)
Kurşun Tellür (PbTe)	5,60	5,60	3,50 – 40,00
Toryum Florid (ThF ₄)	4,15	4,15	0,70 – 25,00
AMTIR(Ge,As,Se)	2,51	2,50	0,50 – 14,00

SLARC kaplamaları, orta kırılma indisi aralığına sahip malzemelerin, alttaş malzemesi üzerine tek katman olarak kaplanabilmektedir. Bu malzemelerin kırılma indisleri, Ge optik pencerenin kırılma indisi ile uyumlu olduğundan belirlenen kalınlık değerlerinde yansıma önleyici olarak kaplama yapılabilir.

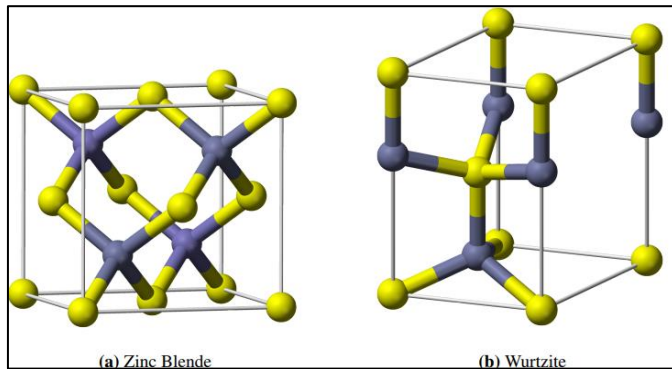
MLARC kaplamaları ise Ge optik pencere üzerine bir yüksek ve bir düşük kırılma indisine sahip malzemelerin, tasarım ile belirlenen birkaç katman olarak kaplama malzemelerinin üst üste kaplaması ile yapılabilmektedir.

MLARC kaplamalarında iki malzemenin sahip olduğu kırılma indisleri Vektör Modeli, Alternatif Vektör Modeli, Smith Modeli, Smith-Chart modeli gibi matematiksel yaklaşımlarla optimize edilmektedir [25]. Bu modellerle ince film oluşturmak istenen malzemelerin kırılma indisleri alttaş malzemesinin kırılma indisi ile orantılı olmasını sağlayan film kalınlık değerleri belirlenir. Verilen yaklaşımlarla belirlenen filmlerin kalınlık değerleri alttaş malzemesi üzerine kaplama yapıldığında istenilen dalgaboyu aralığında hızlı spektral tepki verdiği gibi geniş bant dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik değeri artmaktadır. Yansıma değerleri ise %2'den de az değerlerde olmaktadır. Şekil 2.3.'te ifade edilen malzemeler haricinde birkaç malzeme de bu listeye girmektedir. Ancak üretim teknikleri, kolay ve ucuz üretim göz önüne alındığında liste dışında kalan malzemeler fazla tercih edilmemektedir.

2.2.1. Çinko sülfür

Elektronik ve optoelektronik uygulamalarda II-VI. grup bileşik yarıiletkenlerin kullanımı geniştir. II-VI. grup bileşik yarıiletkenlerin sahip olduğu optik özellikler, elektronik cihazların daha verimli ve düşük maliyetli olmasına olanak sağlamaktadır. Bu bileşik yarıiletken malzemelerinden biri olan çinko sülfür (ZnS), geniş direk bant aralığına (3,5–

3,93 eV) sahip doğal n-tipi bir yarıiletken malzemedir [26]. ZnS ince filmleri, güneş hücreleri, mavi ışık yayan diyot, alan etkili transistör, optik sensörler gibi optoelektronik uygulamalarında kullanılabilir. Genel olarak sarı ile beyaz arasında bir renge sahip olan ZnS, toz veya kristal olarak bulunur. Molekül kütlesi 97,474 g/mol, yoğunluğu 4,090 g/cm³ ve erime sıcaklığı 1020°C olan ZnS, Şekil 2.4.'te gösterildiği gibi Kübik (Zinc Blend) ve Hegzagonal Würtzite olarak iki farklı kristal yapıda bulunur [27].



Şekil 2.4. ZnS kristal yapıları a) Kübik (Zinc Blende) b) Hegzagonal Würtzite [27]

SLARC için ince film üretilecek malzemenin kırılma indisi ve optik geçirgenlik dalgaboyları göz önünde bulundurulduğunda ZnS'nin kırılma indisi 4 μm için 2,25 ve 10 μm için 2,20 civarındadır [28]. ZnS, 0,4-12 μm aralığında optik geçirgenlik göstermesinden dolayı KÖ görüntüleme için kullanılabilir olduğu gibi, ZnS'ün kırılma indisi ile Ge'nin kırılma indisi karşılaştırıldığında ZnS'nin ARC için uygun bir malzeme olduğu görülmektedir. Ayrıca ZnS ince filmlerinin ucuz, kolay ve birçok ince film üretim tekniği ile üretilabilir olması avantaj sağlamaktadır.

ZnS ince filmleri, termal buharlaştırma, RF sputtering, moleküler demet epitaksi (MBE), metalorganik buhar faz epitaksiyel büyütme (MOVPE), CVD, elektrokimyasal büyütme, MOCVD gibi birçok yöntemle bir alttaş malzemesi üzerine ince film olarak kaplama yapılabilmektedir [27]. Kolay üretimin yanında ZnS ince filmleri sahip olduğu düşük zehirlilik (toksin) değeri, yüksek derecede mekanik mukavemete dayanıklı dolayı elektronik uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Son yıllarda ZnS ince filmleri üzerine yapılan çalışmaların birinde, Nadeem ve Ahmed (2000), literatürde yapılan çalışmaların bir kısmını özetlemiş ve Corning (7059) cam üzerine dirençli ısıtma tekniği ile ZnS ince filmlerini elde etmişlerdir. Görünür, UV ve

yakın KÖ bölgeler için soğurma, yansıma, geçirgenlik, bant aralığı ve kırılma indisi özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarında, 360 nm-1100 nm dalgaboyu aralığında %99 optik geçirgenlik elde etmiş ve ZnS ince filmlerinin üretiminde yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen kaplamanın ince filmlerin kalitesini iyileştireceğini ifade etmişlerdir. Cam üzerine kaplanan ZnS ince filmlerinin çoğunlukla (111) yönelimli Kübik Zinc Blend yapıda büyüdüğünü ve 3,44 eV ile 3,84 eV arasında enerji bant aralığında bulunduğunu ifade etmişlerdir [29].

D. S. Hobbs (2005), KÖ görüntüleme sisteminde kullanılabilecek bazı malzemelerin yüzeylerini incelemiş ve bu malzemelerin, ince film formlarına ait optik geçirgenlik sonuçlarını vermiştir [30].

M. A. Jabber (2009), germanyum, silisyum ve cam alttaşlar üzerine, görünür ve KÖ bölgelerde optik geçirgenliği olan bazı malzemeleri tek, ikili ve üçlü tabaka olacak şekilde ince film kaplamış ve optik yansıma değerlerini incelemiştir. Ge üzerine ZnS ince film kaplama yapmış ve 4 µm için optik yansıma değerini belirlemiştir [31].

S.A.R Firoozifar ve arkadaşları (2011), Ge alttaş üzerine ZnS ince filmlerini yansıma önleyici olarak kaplama yapmış ve adezyon dayanıklılığı belirlemiştir [32].

Hwang ve arkadaşları (2012), ZnS ince filmlerini 100, 200, 300 ve 400°C alttaş sıcaklıklarında corning (E2000) cam alttaş üzerine kaplama yapmışlardır. Görünür bölgede optik geçirgenliğe etkisini ve enerji bant aralığını (3,79 eV) belirlemiştir [33].

Son dönemdeki çalışmaların çoğunluğunu cam alttaş üzerine farklı kaplama yöntemleri kullanılarak, ZnS ince filmlerinin UV ve yakın KÖ bölgelerinde optik, yapısal ve yüzey özellikleri incelenmektedir. Ayrıca ZnS ince filmleri bazı farklı alttaşlar üzerine ince film olarak kaplamaları yapılmış ve bu yapılar üzerinde gösterdikleri optik ve yapısal özellikleri incelenmiştir.

Herhangi bir amaç için üretilen ince filmlerin optik özelliklerini araştırmak önem arz etmektedir. Çünkü yarıiletken malzeme ile yapılan bir elektronik cihazın bünyesinde bulunan ince filmin elektronik yapısı ve özellikleri, cihazın doğrudan ince filmin optik özellikleri ile bağlantılı olmaktadır. Bu bağlamda ince filmlerin optik özelliklerin

belirlenmesi ile cihazların içinde yüklerin davranışı ve taşınması gibi yapı sınırları, cihazların üretilmesi için büyük miktarda bilgi sağlamaktadır. Bu bilgiler aracılığı ile yarıiletken malzemelerden elde edilen elektronik cihazların kullanımı ve kolaylık derecesi artmaktadır.

Bu tez çalışmasında, tek katman yansıma önleyici kaplama malzemesi olarak ZnS kullanılmış, optik özellikleri incelenmiştir.

2.3. Fresnel Denklemleri

Yansıma önleyici kaplamalarda ana unsur geçecek olan ışığın enerjisini arttırmaktır. Bu bağlamda malzeme yüzeyinden yansıyan ve gecen ışığın şiddetini hesaplamak için ışığın elektromanyetik doğasını incelemek gerekir. Fresnel Denklemleri, kırılma indisleri farklı olan ortamların oluşturduğu bir arayüzeydeki ışığın davranışını tanımlar. Ara yüzeyde iletilen enerjinin sadece ortamların kırılma indislerine değil, gelen ışığın polarizasyon durumuna da bağlı olduğunu gösterir.

Bu bölümde ışığın bir arayüzeydeki davranışını ve iletilen enerjiyi nasıl etkilediği incelenmiştir. Yansıyan ve geçen ışık şiddeti teorik olarak ifade edilecektir.

Bir ara yüzeydeki ışık için monokromatik bir düzlem dalga tanımlayalım;

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{[i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t)]} \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \cos(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t) \quad (2.2)$$

Yansıyan veya geçen ışıklar için yukarıdaki eşitlikler kullanılırsa;

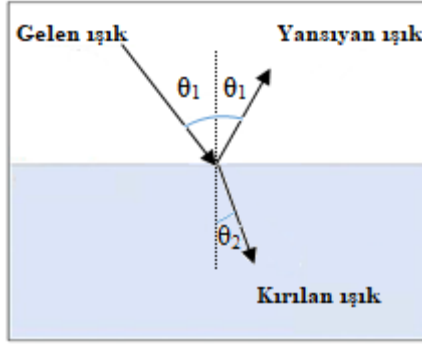
$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{[i(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - w_r t)]} \quad (2.3)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{[i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - w_t t)]} \quad (2.4)$$

ifadeleri elde edilir. Eş. 2.3 ve Eş. 2.4'te verilen $\vec{E}_r$ yansıyan ışığa, $\vec{E}_t$ 'de geçen ışığa ait ifadelerdir [25]. Yukarıda verilen elektromanyetik dalga denklemleri ışığın herhangi bir

polarize durumu için tanımlanabilir. $\vec{E}_{0i}$, $\vec{E}_{0r}$, $\vec{E}_{0t}$ durumları zamandan bağımsızdır ve sabittir.

Şekil 2.5'te görüldüğü gibi, gelen ışık, kırılma indisi n_i olan ortamdan n_t olan ortama geçtiğinde gelen ışık, yansıyan ışık ve kırılan (geçen) ışık aynı noktadan çıkar.



Şekil 2.5. Bir arayüzeydeki ışığın durumları; gelen, yansıyan ve kırılan ışık [34]

Bu durumda; Elektromanyetik dalga için aşağıda verilen Maxwell'in sınır değer koşulları dikkate alınması gerekmektedir [25].

- Elektrik alanın teğetsel bileşenleri ($\mathbf{E}_t$) her iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.
- Manyetik alanın teğetsel bileşenleri ($\mathbf{H}_t$) her iki ortamın sınırı boyunca süreklidir.
- Elektrik akının normal bileşenleri ($\mathbf{D}$) her iki ortamın sınırları boyunca süreklidir.
- Manyetik akının normal bileşenleri ($\mathbf{B}$) her iki ortamın sınırları boyunca süreklidir.

Ara yüzeye gelen, geçen ve yansıyan ışığın, sınır şartlarını sağlaması gerekmektedir. Maxwell'in sınır şartlarını, madde yüzeyinde ışığın temas ettiği noktaya uygulanır ve Eş. 2.2, 2.3 ve 2.4'te ki ifadelerde $\vec{r} = 0$ olarak alınırsa;

$$(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t) = (\vec{k}_r \cdot \vec{r} - w_r t) = (\vec{k}_t \cdot \vec{r} - w_t t) \quad (2.5)$$

$$w_i t = w_r t = w_t t \quad (2.6)$$

elde edilir. Eş. 2.6 ifadesinin zamandan bağımsız olduğu görülür. Bu durumda;

$$w_i = w_r = w_t \quad (2.7)$$

olarak alınabilir. $t = 0$ durumunda, Eş. 2.7'de verilen frekans eşitliğini kullanılırsa;

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad (2.8)$$

ifadesi elde edilir. Eş. 2.8'den;

$$k_i \cdot r \sin \theta_i = k_r \cdot r \sin \theta_r \quad (2.9)$$

sonucuna ulaşılır. Gelen ve yansıyan ışık aynı ortamda yayılır. Dolayısıyla bu iki dalganın dalga sayıları ($\vec{k}$) eşittir. Dalga sayısının eşit olmasından, gelen ve yansıyan ışığın yüzeyin normali ile yaptığı açı eşit olur. Bu ise yansıma yasası olarak bilinir ve Eş. 2.10 ile ifade edilmiştir.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.10)$$

Eş. 2.8 yardımıyla gelen ışık ile geçen ışığın karşılaştırılması yapılırsa;

$$k_i \cdot r \sin \theta_i = k_t \cdot r \sin \theta_t \quad (2.11)$$

ifadesine ulaşılır. Bu ifade gelen ve geçen ışığın ara yüzeyde sağlaması gereken faz koşulunu yani bilinen ismiyle Snell Yasasını verdi. Bu sonuç ara yüzeye gelen dalganın ortamların kırılma indisi ile orantılı olup ikinci ortamda kırılacağını söylemektedir. Eş. 2.11'deki k_i ve k_t terimleri;

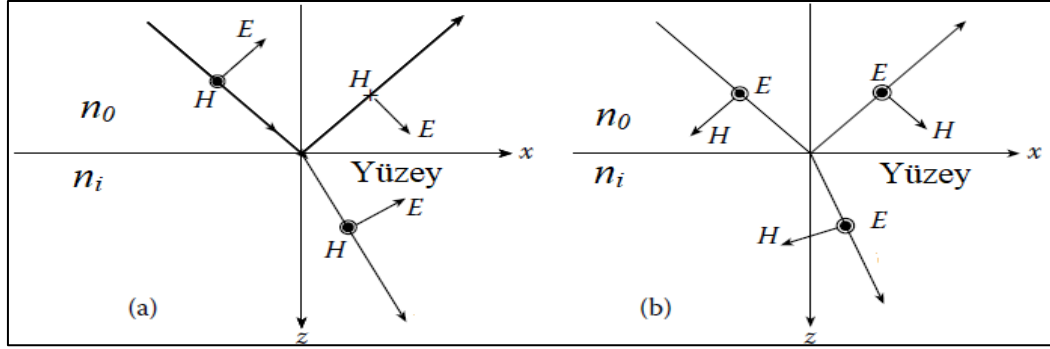
$$|\vec{k}_{i,t}| = n_{i,t} \frac{\omega}{c} \quad (2.12)$$

olarak ifade edilirse, Snell yasası;

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.13)$$

haline dönüşecektir [25]. Eş. 2.10 ve Eş. 2.13 ifadeleri, ara yüzeyde elektrik ve manyetik alanın teğetsel bileşenlerinin yüzey alanı boyunca sürekli olması şartından elde edilmiştir. İletilen ışık yoğunluğu ise Fresnel Denklemlerinden ifade edilen bağıntılardan ışığın

polarize durumlarına bağlı olduğu belirtilmiştir. Işığın iki polarize durumunu incelenmesi diğer durumlarının da bu iki polarize durumun lineer ifadesi olduğu için yeterli olacaktır. Polarize durumu incelemek için yüzeye gelen ışığın kutuplanma doğrultusu geliş düzlemine göre tanımlanabilir.



Şekil 2.6. Yüzeye gelen ışık ve geliş düzlemi arasındaki ilişki a) p-polarize ışık b) s-polarize ışık

Bu durumda Şekil 2.6’da görüldüğü üzere herhangi bir doğrultuda olan alan genliği;

1. Geliş düzlemine paralel ($\vec{E}''_{oi}$)
2. Geliş düzlemine dik bileşenler ($\vec{E}^{\perp}_{oi}$)

olmak üzere iki vektör bileşen olarak ayrılabilir. Alanın genliği ve geliş düzlemiyle yaptığı açığa ait ifadeler sırasıyla Eş. 2.15 ve Eş. 2.16 ile verilmiştir:

$$|\vec{E}_{oi}| = \sqrt{(\vec{E}''_{oi})^2 + (\vec{E}^{\perp}_{oi})^2} \quad (2.14)$$

$$\tan \theta_i = \frac{\vec{E}^{\perp}_{oi}}{\vec{E}''_{oi}} \quad (2.15)$$

2.3.1 s - Polarize durumu

Gelen ışığın elektrik alan ($\vec{E}$) bileşeni, yüzeye dik ise Transverse Electric (TE) modu (s-polarize durum) olarak tanımlanmaktadır. Maxwell’in sınır koşul kuralları Şekil 2.5.’te gelen, yansıyan ve kırılan ışığa uygulanır ve $\vec{E}$ ile $\vec{B}$ alanlarının teğetsel bileşenlerinin yüzey sınırı boyunca sürekli olması ilkesi uygulanılırsa;

$$\vec{E}_{0i} + \vec{E}_{0r} = \vec{E}_{0t} \quad (2.16)$$

$$\vec{B}_{0i} \cos \theta_i - \vec{B}_{0r} \cos \theta_r = \vec{B}_{0t} \cos \theta_t \quad (2.17)$$

olduğu görülecektir. $\vec{E}$ ve $\vec{B}$ 'nin birbiri ile olan bağıntısı ise;

$$E = \frac{c}{n} B \quad (2.18)$$

ifadesi ile verilmekte olup, bu bağıntı Eş. 2.17'de yerine yazılır ve elde edilen ifade düzenlenirse;

$$n_i \vec{E}_{0i} \cos \theta_i - n_i \vec{E}_{0r} \cos \theta_r = n_t \vec{E}_{0t} \cos \theta_t \quad (2.19)$$

olacaktır. $\theta_i = \theta_r$ olduğundan, Eş. 2.19 düzenlenirse;

$$r_{TE} = \frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.20)$$

ifadesine ulaşılabacaktır. Bu r_{TE} ifadesi TE modu için yansıma katsayısıdır. Aynı işlemler geçen ışık için tekrarlanırsa geçirgenlik katsayısı (t_{TE}) aşağıdaki gibi elde edilir:

$$t_{TE} = \frac{\vec{E}_{0t}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \quad (2.21)$$

2.3.2. p - Polarize durumu

TE modunda gelen ışığın elektrik alan ($\vec{E}$) bileşeni yüzeye dik iken Transverse Magnetic (TM) modunda ise manyetik alan ($\vec{B}$) bileşeni yüzeye diktir. Burada yansıma ve geçirme katsayılarını bulmak için $\vec{E}$ ve $\vec{B}$ nin paralel bileşenleri Maxwell'in yüzey boyunca süreklidir şartı kullanılırsa;

$$-\vec{B}_{0i} + \vec{B}_{0r} = \vec{B}_{0t} \quad (2.22)$$

$$\vec{E}_{0i} \cos \theta_i - \vec{E}_{0r} \cos \theta_r = \vec{E}_{0t} \cos \theta_t \quad (2.23)$$

ifadeleri elde edilir. TE modu için gerçekleştirilen yansıma ve geçirme katsayısı hesaplamaları TM modu için de gerçekleştirilirse;

$$r = \frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{n_t \cos \theta_i - n_i \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.24)$$

$$t = \frac{\vec{E}_{0t}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{2 n_i \cos \theta_i}{n_t \cos \theta_i + n_i \cos \theta_t} \quad (2.25)$$

olduğu görülecektir. TE ve TM modları için yapılan bu hesaplamalar sonucunda elde edilen Eş. 2.20, 2.21, 2.24 ve 2.25, Fresnel Denklemleridir. Bu eşitlikler için Snell Yasasından faydalanarak yeniden düzenlemeler yapılırsa ifadeler;

$$r_{TE} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.26)$$

$$t_{TE} = \frac{2 \sin \theta_t \cos \theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.27)$$

$$r_{TM} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.28)$$

$$t_{TM} = \frac{2 \cos \theta_i \sin \theta_t}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (2.29)$$

haline dönüşür. Bu katsayılar doğrultusunda Eş. 2.1, Eş. 2.3 ve Eş. 2.4 gelen, yansıyan ve geçen ışık için tekrar yazılırlarsa;

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{[i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t)]} \quad (2.1)$$

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} e^{[i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - \omega_i t + \varphi_r)]} \quad (2.3)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} e^{[i(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - \omega_t t + \varphi_t)]} \quad (2.4)$$

ifadelerine ulaşılır. Fresnel yansıma ve geçirgenlik katsayıları, geçen ve yansıyan ışığın genlikleri hakkında bilgi vermektedir. Birim alandaki enerji yoğunluğu ise elektrik akısı ile orantılı olan Poynting Vektör hesabı ile tanımlanır. Poynting Vektörü;

$$S = E \times H = \frac{1}{\mu_0} E \times B \quad (2.30)$$

ifadesi ile verilir. Buradan yola çıkarak Eş. 2.1’de dalga fonksiyonun karmaşık (complex) olan çarpım katsayısı, Poynting Vektör hesabında lineer hesaplamalar için manyetik alan bileşeninin complex eşlenik alınarak hesaba alınması, akım-enerji değerinin ortalama beklenen değerinin ifade edilmesini sağlamaktadır. Bu durumda Poynting Vektörü ifadesi;

$$S = \frac{1}{\mu_0} E \times B^* \quad (2.31)$$

ifadesini almakta ve ortalama akım ifadesinin büyüklüğü;

$$\bar{I} = \frac{1}{2\mu_0} E_{max} B_{max} = \frac{1}{2\mu_0 c} E_{max}^2 = \frac{c}{2\mu_0} B_{max}^2 \quad (2.32)$$

olarak Poynting Vektörü ile elde edilir. Eş. 2.32’de düzenlemeler yapıldıktan sonra ortalama akım yoğunluğu Fresnel katsayıları ile ifade edilirse geçirme ve yansıtma katsayılarının ifadeleri;

$$\bar{I} = \frac{1}{2} r \cdot r^* (|Genlik|^2) \quad (2.33)$$

$$R_{TE,TM} = \left(\frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} \right)^2 = r^2 \quad (2.34)$$

$$T_{TE,TM} = \left(\frac{\vec{E}_{0t}}{\vec{E}_{0i}} \right)^2 \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} = \frac{n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i} t^2 \quad (2.35)$$

haline gelecektir [25]. Eş. 2.36 ve Eş. 2.37, yansıma ve geçirgenlik hesaplamalarında sıklıkla kullanılır. Soğurma ihmal edildiğinde yansıma ve geçirme katsayılarının büyüklüklerinin toplamı;

$$R_{TE} + T_{TE} = 1 \quad (2.36)$$

$$R_{TM} + T_{TM} = 1 \quad (2.37)$$

ifadelerinde de belirtildiği üzere 1'e eşittir. Bir diğer özel durum ise gelen ışığın geliş açısının $\theta_i = 0^\circ$ olduğu durumdur. Bu durumda hesaplamada $\cos(\theta_i = 0) = 1$ olduğu için TE ve TM modu arasındaki fark oluşmaz ve neticesinde yansıma ile geçirgenlik katsayıları için

$$R = R_{TE} = R_{TM} = \left(\frac{n_t - n_i}{n_i + n_t}\right)^2 \quad (2.38)$$

$$T = T_{TE} = T_{TM} = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2} \quad (2.39)$$

şeklinde özel durum söz konusu olacaktır. Bu özel durumlar ışığın polarize durumları ile oluşan faz farkı veya optik yol farkının oluşma sebebidir. r_{TE} değeri için $n_t > n_i$ olduğu durumda $\theta_i > \theta_t$ olur ve bütün θ_i değerleri için negatif olacaktır. Oluşan bu negatif değerlerin oluşması gelen ve yansıyan ışık arasında 180° faz farkı olacağını göstermektedir. Gelen ve geçen ışığın kutuplanma noktası hep aynı olmasından dolayı TE modunun geçirgenlik katsayısı (t_{TE}) değeri ise gelen ışığın bütün açılarında pozitif değere sahip olmaktadır.

$$r_{TE} = \frac{\vec{E}_{0r}}{\vec{E}_{0i}} = \frac{n_i \cos \theta_i - n_t \cos \theta_t}{n_i \cos \theta_i + n_t \cos \theta_t} \approx \frac{-n_t \cos \theta_t}{n_t \cos \theta_t} = -1 \quad (2.40)$$

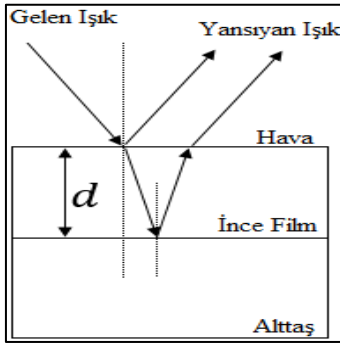
$$\vec{E}_{0i} = -\vec{E}_{0r} \quad (2.41)$$

r_{TM} değeri ise, $n_t > n_i$ olduğu durumda, $\theta_i = 0^\circ$ de pozitif bir değerden başlayarak gelen ışığın açısının değişmesi ile azalır ve özel bir geliş açısı (θ_B) değerinde sıfıra eşit olmaktadır.

θ_B açısına kutuplanma (Brewster) açısı denir. Bu özel açı değerinde $r_{TM} = 0$ olduğundan gelen ışığın tamamı geçecektir. θ_B özel açı değerinden büyük değerlerdeki geliş açı değerlerinde ise gelen ışığın yansıma katsayısı negatif değere eşit olur ve yansıyan ve gelen ışık arasında 180° faz farkı oluşur. TM modunda TE modunda ki gibi optik yol farkı hesaplamalarında kutuplanma açısı dikkate alınarak optik geçirgenlik hesaplamalarına katılmalıdır.

Şekil 2.7.'de tek katman ince film kaplama yapılmış bir alttaş üzerine gelen ışığın, film yüzeyinden yansımaya uğrayıp, geçen ışığın ise alttaş üzerinden tekrar yansıdığı görülmektedir. Gelen ışığın bir kısmı film yüzeyinden geçer ve diğer kısmı ise yansır. Geçen ışık ise film kalınlığı kadar yol aldıktan sonra alttaş yüzeyinde tekrar yansır ve geçer. Alttaş yüzeyinden yansıyan ışık tekrar film kalınlığı kadar yol aldıktan sonra ortamı terk etmektedir. İnce film yüzeyinden ve alttaş yüzeyinden oluşan bu iki yansıma arasında optik yol farkı oluşmaktadır. Bu oluşan optik yol farkı faz farkına neden olmaktadır. Işığın aldığı bu optik yol (Δ) farkı şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta = 2n_t d \cos \theta_t \quad (2.42)$$



Şekil 2.7. Tek katman ARC ince film üzerine gelen, yansıyan ve geçen ışık aralarında oluşan optik yol farkı [35]

Yüzeyde yansıyan ve geçen ışık arasında yapıcı girişim oluşturmak için yansıma oluşan bölgenin kırılma indisi, geçen ortamınkinden küçük olması gerekmektedir. TE ve TM durumlarından da görüldüğü gibi optik yol farkı 180° olması ve iki yansımanın aynı fazda olmasından dolayı yapıcı girişim oluşturulabilir. 180° 'lik optik yol farkına karşılık $\lambda/2$ kadarlık faz farkı meydana gelmektedir. Yapılan hesaplamalarda karmaşık durumlardan kaçınmak için şekil 2.7'de gelen ışığın yüzeyden ve alttaş üzerinden yansıması gösterilmiştir. Normalde olması gereken ise film yüzeyinden yansıma, iç

yansıma ve geçen ışık olmalıdır. Elde edilen eşitliklerden ışığın şiddeti, Fresnel kat sayılarına bağımlılığı yüzey de oluşan yansıma durumları ve faz farkları ifade edilmiştir. Alttaş üzerine yapılan ince film kalınlığı ile ilgili hesaplamalar yansıma önleyici kaplama (ARC) bölümünde verilecektir.

2.4. Yansıma Önleyici Kaplama (ARC)

Günlük hayatta kullanılan malzemelerde ortaya çıkan ışık kayıpları, gelişen teknolojik görüntüleme sistemlerinin merceklerinde oluşan kayıpların en aza indirilmesi ve malzeme yüzeyinde oluşan dış ortamın etkilerini önlemek için özellikle UV ve KÖ uygulamalar için uygulanmaktadır. ARC kaplamaları, günümüzde çok fazla alanda kullanılan kaplamalar olmakla birlikte, büyük avantajlar sağlamaktadır.

KÖ görüntüleme sistemlerinin sahip olduğu merceklerin, yüksek kırılma indisine sahip malzemeler olmasından dolayı yüksek yansıma değerlerinin bulunduğu ilk bölümde ifade edildi. Yansıma önleyici kaplamalar, malzemelerin sahip olduğu yüksek kırılma indislerinden dolayı hava-malzeme ara yüzeyinde oluşan söndürücü girişimi yapıcı girişime dönüştürülmeyi sağlamak için tasarlanmaktadır. ARC kaplamalar Ge, Si, safir, cam, kuartz gibi altlık olarak kullanılan malzemelere uygulanabilir.

2.4.1. Tek katman yansıma önleyici kaplama

Yansıma önleyici kaplamaların en basit olan şeklidir. Tek katman yansıma önleyici (SLARC) kaplama, bir malzemenin Fresnel ve Bragg yasaları ile belirlenen kalınlıkta, alttaş üzerine tek katman kaplanmasıdır. SLARC için ince film kaplama malzemesinin kırılma indisinin alttaş malzemesinin kırılma indisinden küçük olması durumunda SLARC kaplama yapılabilir. Böyle kaplamalar için genellikle kullanılan malzemeler orta kırılma indisine sahip olmaktadır. Diğer malzemelerden elde edilecek olan SLARC film kalınlıkları olarak mikron mertebelerine ulaşmaktadır.

SLARC kaplamalarda optik geçirgenlik istenilen tek dalgaboyu için hesaplamalar yapılır ve film kalınlıkları belirlenir. Belirlenen dalgaboyu ince film kaplaması yapıldığında, malzemenin kırılma indisinin sağladığı tek dalgaboyu için maksimum optik geçirgenlik elde edilebilir.

SLARC için en temel olarak maksimum düzeyde optik geçirgenlik ve kolay optimizasyon istenildiğinde öncelik olarak malzemenin kırılma indisi önemlidir. Kullanılan malzemenin kırılma indisi, Fresnel Denklemlerinden çıkarılan Eş. 2.40 ve Eş. 2.41'den bulunan geçirgenlik ve yansıma hesaplamalarında geliş açısının 0° olduğu ve $\Delta = 0, \pi, 2\pi \dots$ durumlarda optik geçirgenlik minimum değerde olmaktadır.

$$R_{max} = \left(\frac{n_t - n_i}{n_i + n_t} \right)^2 \quad (2.38)$$

$$T_{min} = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2} \quad (2.39)$$

Eş. 2.40 ve 2.41'de elde edilen R ve T değerlerini hava ile film arayüzeyi oluşturur ve film ile alttaş arasında Şekil 2.7.'de görüldüğü gibi alttaş üzerinde ikinci bir ekstremum noktası oluşmaktadır. Bu nokta için olan hesaplamalar için girişim denklemi yazılır ve film kalınlığı hesabı yapılabilir. Girişim denkleminde SLARC için film kalınlığı;

$$2n_i d = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda, m = 0, 1, 2, 3 \dots \quad (2.43)$$

ifadesi ile bulunur. Burada d film kalınlığı, n_i ince film oluşturulacak malzemenin kırılma indisi ve λ optik geçirgenlik istenilen dalgaboyudur.

$\lambda = 4 \mu m$ 'de minimum yansıma değeri elde etmek için, ZnS'nin kırılma indisi 2.20, $m = 0$ alınırsa; film kalınlığı $d = 4,4444 \times 10^{-7} m = 444,44 nm$ olmaktadır. $\lambda = 10 \mu m$ 'de minimum yansıma değeri elde etmek için 1136,36 nm kalınlıklı ince film kaplanması gerekmektedir.

R_{min} değeri $\Delta = \frac{\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \frac{5\lambda}{2}, \frac{7\lambda}{2} \dots$ değerlerinde optik geçirgenlik maksimum, yansıma ise minimum değer alır ve bu durumda teorik olarak tek dalgaboyu için yansıma değeri sıfıra eşit olur. Numune üzerindeki her bir noktada gelen ışığın geliş açısının değişmesi ve filmin farklı dalgaboylarına karşılık oluşan optik yol sebebi ile yansıma değerlerinin diğer dalga boylarında sıfırdan farklı bir değerde oluşmaktadır. Belirlenen film kalınlığı değerinde

alttaş üzerine kaplama yapıldığında oluşan ikinci ekstremum noktası için eşitlikler tekrarlanır ise optik geçirgenlik ve yansımaya;

$$T_{max} = \frac{4n^2 n_i n_t}{(n_i n_t + n^2)^2}, n = \sqrt{n_t n_i} \quad (2.44)$$

$$R_{min} = \frac{(n_t n_i - n^2)^2}{(n_t n_i + n^2)^2}, n = \sqrt{n_t n_i} \quad (2.45)$$

ifadeleri olarak elde edilir. Eş. 2.44 ve Eş. 2.45, tek katman yansımaya önleyici filmler için teorik olarak optik geçirgenliğin maksimum ve yansımının minimum ifadelerini vermektedir. Burada n_t alttaşın kırılma indisi, n_i 'de ince film kaplama yapılan malzemenin kırılma indisi. Birçok SLARC kaplamaları için optik geçirgenlik ifadelerini yaklaşık olarak sağladığından dolayı Eş. 2.44 ve Eş. 2.45 oluşturmaktadır.

2.4.2. Çok katman yansımaya önleyici kaplama

Çok katman yansımaya önleyici (MLARC) ince film tasarlamasında ise iki farklı temel yöntem uygulaması bulunmaktadır.

- İlk yöntem; tek katman ARC üzerine aynı spektral bölge de optik geçirgenliğe sahip, ancak kırılma indisi ilk ARC malzemesinden küçük başka bir malzeme ile homojen olmayan ince film kaplama yapılmasıdır (Double Layer ARC).
- İkinci yöntem ise kullanılacak alttaş üzerine, Vektör Metodu, Vektör Alternatif Hesaplama Metodu, Smith Metodu, Smith Chart (grafik) Metodu, Çember Diyagram Metodu gibi matematiksel hesaplama yöntemlerinden biri ile sentezlenmiş iki veya daha fazla malzemenin belirli kalınlıklarla sırası ile bir düşük bir büyük kırılma indisli malzemelerle kaplamasıdır [36].

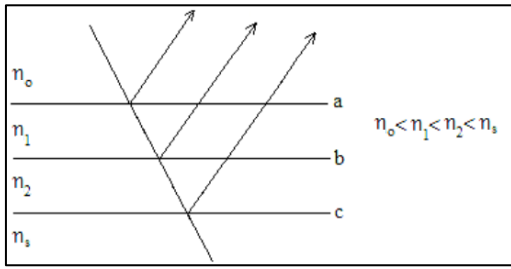
MLARC kaplamalarında üç veya daha fazla katman kaplama ile geniş dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik elde etmek mümkün olmaktadır. MLARC kaplamalarında kolay uygulanabilirliği olduğundan dolayı vektör metodu çoğunlukla tercih edilir. Bu metod iki varsayım yapılmaktadır. İlk varsayım, oluşturulacak tüm katmanların gelen ışığı soğurmadığı kabul edilmektedir. İkincisi ise her bir arayüzde gelen ışığın tek katman kaplamada olduğu gibi etkileşimde bulunduğu kabul edilerek Şekil 2.8'de her bir

katmandaki yansımaların katsayıları vektör olarak ifade edilerek toplanır, film kalınlığı ve yansıma katsayısı belirlenir.

$$r_k = \frac{n_{k-1} - n_k}{n_{k-1} + n_k} \quad (2.46)$$

$$\delta_k = \frac{2\pi n_k d_r}{\lambda} \quad (2.47)$$

Çok katman yansıma önleyici ince filmlerde vektör metodu kullanılarak her hangi bir katmanın, yansıma katsayısını r_k , katman kalınlığını δ_k ifade etmektedir. Ayrıca kaplama yapılan yöntem de böyle kaplamalar için önem arz etmektedir. Çok katman ARC de kalınlık hassasiyeti yüksek olmasından dolayı ince film üretimi zor olmaktadır.



Şekil 2.8. Çok katman ARC ince film üzerine gelen ve yansıyan ışık [25]

MLARC kaplamalarında kullanılan yöntemlerin istenilen spektral bölgede hızlı tepki elde edilmektedir. MLARC avantaj sağlamakla beraber ilk kaplanan malzemenin optik geçirgenlik aralığı, yapılan çok katman kaplamanın optik geçirgenlik değerlerinin sınırları olmaktadır.

MLARC kaplamaları için yukarda verilen bazı çeşitli tasarım teknikleri bulunmaktadır. Her bir tasarım kendi içinde farklı uygulamalar ile kaplama yapılacak malzemeye her bir katman için farklı kalınlık değerleri hesaplamalarla bulunmaktadır. Bu kalınlık hesaplamasının kolaylığı için bilgisayar yazılımı aracılığı ile kullanmak avantaj sağlamaktadır. Kullanılan yazılıma literatür ile uyumlu olarak kullanılabilecek malzemeler tanımlandığında bu malzemeler için istenilen kalınlık ve optik geçirgenlik değerleri elde edilebilmektedir. Böyle programların yapmış olduğu hesaplamalar hassasiyet bakımından tam dalgaboyu değerini esas almakta ve o dalgaboyu için gerekli olan kalınlık değerini

hesaplamaktadır. MLARC kaplamalarında üç veya üçten fazla malzeme kullanıldığında kullanılan yazılım uygulamalarının, ARC tasarımında ve kaplama parametrelerin belirlenmesinde kolaylık sağladığı aşikârdır.

2.4.3. Ge optik pencerelerin kalınlıklarının optik geçirgenliğe etkisi

Film kalınlığı d olan tek katman ARC ince film malzemesi, herhangi bir alttaş malzemesi üzerine büyütüldüğünde optik geçirgenlik değerini ve bu kalınlık değerine karşılık gelen dalgaboyu hesaplamaları Eş. 2.39 ve Eş. 2.43’de verilmişti. Bu ifadeler sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$T = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2}, \quad n = \sqrt{n_t n_i} \quad \text{ve} \quad 2nd = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda, \quad m = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Optik geçirgenlik, film kalınlığının ve dalgaboyunun periyodik bir fonksiyonudur. Burada dalgaboyuna göre istenilen optik geçirgenlik değeri için belirlenen film kalınlığı alttaşın kalınlığından çok küçüktür. Alttaş kalınlığı $1 \text{ mm} = 10^6 \text{ nm}$ iken film kalınlığı 400 nm civarındadır. Bu değerlerde ince film üzerine gelen ışık, film üzerinden alttaşa aktarılır ve ortam içinden geçer. Alttaşın arka yüzeyinde yansılarda meydana gelecektir ve bu yansımalar ilave bir tabaka üzerinden ölçülemeyeceğinden ihmal edilir. Sonsuz uzunlukta kabul edilen bir alttaş malzemesi için ortalama olarak yapılan optik geçirgenlik ifadesini teorik olarak Eş. 2.41 ile ifade edilmiştir.

İnce film ile kaplanan alttaş malzemesinin kalınlığı optik geçirgenlik hesaplamalarına dahil edilebilir. Ölçülen optik geçirgenlik değerleri yarım dalgaboyunun periyodik bir fonksiyonudur. Bundan dolayı;

$$T_{ort} = \frac{4n_i n_t}{(n_i + n_t)^2}$$

$$T_{alttaş+film} = \frac{n}{n_t} \left[\frac{4n_i n_t}{n_i + n_t} \right]^2 \quad (2.48)$$

elde edilir. Burada $n = \sqrt{n_t n_i}$ ile ifade edilir. 1 mm kalınlıkta Ge optik penceresi üzerine 420 nm ZnS ARC ince film kaplaması ile elde edilen optik geçirgenlik $T_{ort} =$

0,646609 civarı olurken $T_{teori} = 0,63$ olmaktadır. Burada yapılan hesaplamalar ile ölçüm sistemlerindeki hassasiyet geliştirildikçe değişen alttaş kalınlık değerlerinin optik geçirgenliğe olan katkısı anlaşılabacaktır.

2.4.4. İki yüzeyi yansıma önleyici ince film kaplanan Ge optik pencerelerin optik geçirgenlikleri

Bazı uygulamalarda kullanılan materyalin her iki yüzeyide istenilen optik özellikleri sağlaması için ince filmle kaplama yapılabilir. KÖ görüntüleme sistemlerinde kullanılan Ge optik pencerelerde, yüksek optik geçirgenlik değerleri sağlayabilmesi için her iki yüzeyide kaplama yapılması gereken o uygulamalardan biridir. Her iki yüzeyide ince film ile kaplama yapıldığında optik geçirgenlik değeri tek yüzey kaplamada elde edilen optik geçirgenlik değerine göre çok daha fazla olmaktadır.

Ge optik pencerenin kalınlığı, optik geçirgenlik istenilen dalgaboyundan çok büyük olduğundan tek yüzeyde elde edilen optik geçirgenlik değerinin her iki yüzey için entegre edilmesi durumunda çift yüzey kaplama için optik geçirgenlik değerinin teorik sonucu elde edilebilir. Bu entegre işlemi için, her bir yüzeyde geçen ışığı, bir sonraki yüzey için gelen ışık olarak hesaplama işlemlerinde kullanılması ile her bir ara yüzeyde geçirgenlik ve yansıma hesaplamaları yapılmalıdır. Bu işlem, kullanılan alttaş malzemesinin arka yüzeyinden geçen ışık olarak hesaplama yapıldığında oluşan geçirgenlik hesaplaması çift yüzeyin optik geçirgenlik değerini vermektedir [35].

Alttaş olarak kullanılan malzemenin kalınlık değeri ihmal edildiğinde, her bir ara yüzeyde yapılan hesaplamalar sonucunda çift yüzey ARC kaplamaları için elde edilen optik geçirgenlik hesaplamalarında genelleme yapılırsa;

$$T_{\zeta y} = \frac{T_1 T_2}{1 - R_2 \bar{R}_1} \quad (2.49)$$

$$R_{\zeta y} = R_1 + \frac{T_1 \bar{T}_1 R_2}{1 - R_2 \bar{R}_1} \quad (2.50)$$

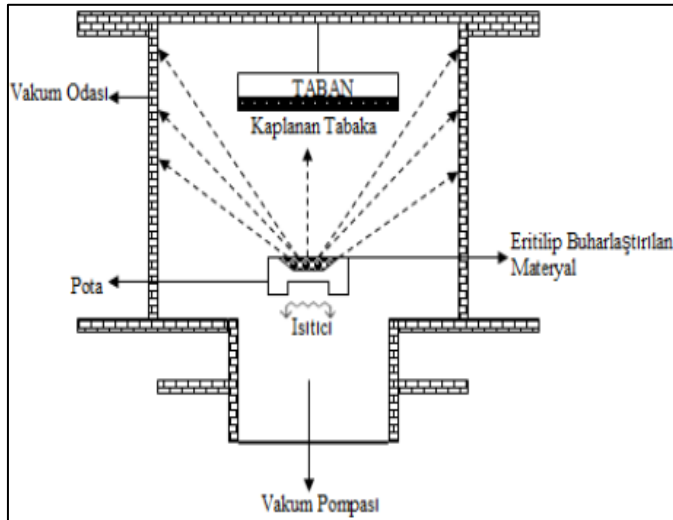
olarak Eş. 2.49 ve Eş. 2.50 elde edilebilir. Bu denklemler de T_1 ve R_1 ifadeleri hava ortamından filme, T_2 ve R_2 değerleri film ortamından alttaş malzemesine geçen ışığın geçirgenlik ve yansımaya değerleridir. $\overline{T}_1$ ve $\overline{R}_1$ değerleri ise alttaş üzerinden geçen ışığın arka yüzeyinde oluşan optik geçirgenlik ve yansımaya değerleridir.

3. MATERİYAL VE METOT

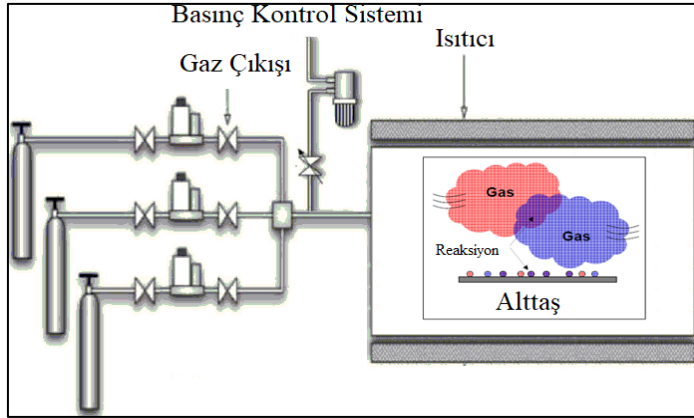
3.1. İnce Film Kaplama Teknikleri

Günümüzde teknolojik gelişmelerin temel ve belirleyici unsurlarından birini oluşturan ince film teknolojisi, kişisel bilgisayar ve donanımlardan, haberleşme sistemlerine kadar çoğu elektronik aracın içinde doğrudan veya dolaylı olarak bulunmaktadır. Farklı amaçlar için kullanılan ince filmler, çeşitli özellikleri dikkate alınarak farklı üretim teknikleri ile üretilmektedir. Film kaplama sistemlerinde gelişen vakum cihazlarının yardımı ile üretilen ince filmlerin kalitesi artmaktadır. Modern tekniklerle üretilen ince filmlerin kristal yapıları, elektriksel ve optik özellikleri araştırılmaktadır.

Bilimsel ve endüstriyel bir öneme sahip olan ince filmler, malzemenin fiziksel hallerine göre bazı tekniklerle üretilmektedir. Fiziksel olarak buhar fazda büyütülebilen ince film depolama teknolojileri, fiziksel (PVD) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) olarak iki bölüme ayrılır. Şekil 3.1 ile PVD, Şekil 3.2 ile CVD'nin şematik olarak gösterimi ifade edilmiştir.



Şekil 3.1. Fiziksel Buhar Birikiminin (PVD) şematik gösterimi [9]



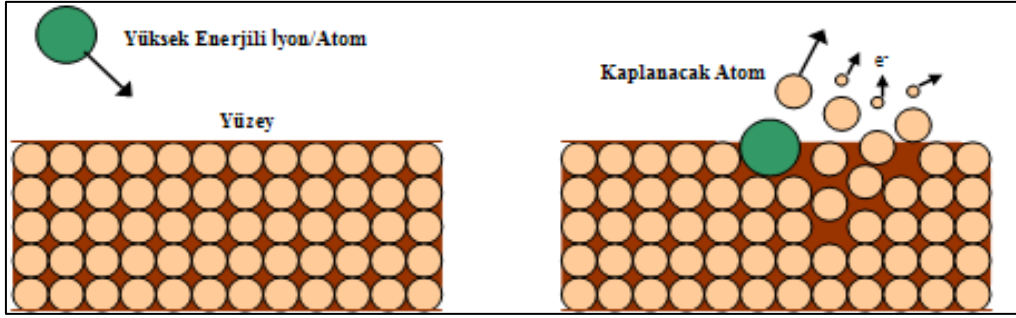
Şekil 3.2. Kimyasal Buhar Birikiminin (CVD) şematik gösterimi [37]

Fiziksel buhar birikiminde (PVD), alttaş üzerine ince film kaplama yapılacak olan hedef malzeme katı iken CVD de kullanılan malzeme sıvı veya gazdır. Her iki kaplama yöntemi de kendi içinde kaplama şekillerine ve durumlarına göre bazı bölümlere ayrılmaktadır [38, 39]. Bu tez çalışmasında PVD yönteminin bir bölümü olan Püskürtme Yönteminin çeşitleri anlatılmış ve RF Magnetron Püskürtme (Sputtering) Yöntemi kullanılmıştır.

3.2. Püskürtme Yöntemi

Püskürtme yöntemi, ince film oluşturulmak istenen hedef malzemelerin yüzeyine, genellikle plazma veya iyon tabancası ile hızlandırılmış olan atomik boyuttaki yüksek enerjili gaz iyonlarının Şekil 3.3'teki gibi çarptırılarak, hedef malzemenin atomlarının yüzeyden sıçratılması ve koparılan atomların buhar fazına geçerek alttaş malzemesi üzerine biriktirilmesiyle oluşan ince film kaplama tekniğidir.

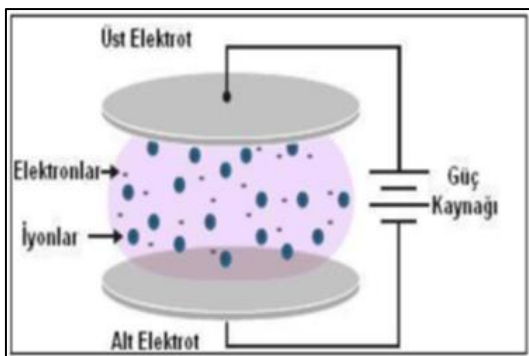
İnce film üretiminde, kaplama parametrelerinin kontrolü oldukça önemli olmaktadır. Püskürtme yöntemi ise bu parametrelerin kontrolüne kolaylık sağlaması ile çok tercih edilen yöntemlerden biri olmaktadır. Bu nedenle püskürtme (sıçratma, sputtering) yöntemi, endüstriyel açıdan ince film kaplanmada önemli bir yöntem haline gelmiştir.



Şekil 3.3. Püskürtme yöntemi ile hedef malzeme atomlarının bombardıman edilerek koparılmasının şematik gösterimi [40]

Püskürtme yöntemi ile ilk ince film kaplama 1852 yılında Bunsen ve Grove tarafından D.C. (doğru akım) gaz boşalma (glow discharge) tüpünde gözlemlenmiştir. Bir gaz deşarjı esnasında, deşarj tüpünün katot yüzeyinin yüksek enerjili iyonlarla etkileşime girerek püskürtme işleminin gerçekleştiğini ve deşarj tüpünün iç duvarlarında katot malzemesinin biriktiği görülmüştür. O dönemde bu olay hedef malzemenin bozulmasına neden olduğundan istenilmemekteydi. Ancak 1877’de Wright tarafından başarılı bir şekilde püskürme ile biriktirme veya depolama işlemi yapılmıştır [41].

Günümüzdeki teknolojik gelişmeler ile sistem içinde ultra yüksek vakum, sistem içine yerleştirilen bazı elektrot veya iyon tabancası gibi kaplama hızının artırma uygulamaları ile yüksek kaliteli ince filmler elde edilmesine olanak sağlamaktadır.



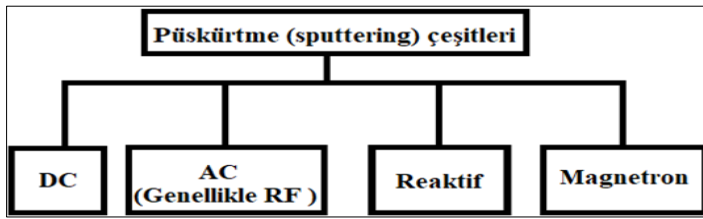
Şekil 3.4. Plazma ortamının oluşturulması [42]

Şekil 3.4’te görüldüğü gibi sistemin yükleme odasının içine hedef ve altlık malzemesi yerleştirildikten sonra oda vakuma alınır (genellikle 5×10^{-4} ile 5×10^{-7} Torr arasında). Belirlenen vakum değerine gelen sistem içine bir soygaz (genellikle argon gazı)

gönderilerek sistem içi basınç 10^{-3} ile 10^{-1} Torr arasında bir değere geldiğinde, iki elektrot arasına güç uygulanarak plazma ortamı oluşturulmaktadır.

Püskürtme işlemi hedef malzemeden bağımsız olarak gerçekleştiğinden farklı buhar basınçlarında başarıyla ince film üretimi yapılabilinmektedir. Ayrıca metaller, alaşımlar, oksitler, nitrürler, sülfürler, florürler, karbürler gibi çoğu önemli hedef malzemeler ticari olarak uygun saflıkta temin edilebilmektedir.

Püskürtme tekniği ile ince film depolama işlemleri Şekil 3.5.'da görüldüğü gibi DC, AC, Reaktif ve Manyetik alanda sıçratma (magnetron) olmak üzere dört yöntem ile yapılmaktadır. Ayrıca her yöntemin kendi içinde oluşturduğu bazı tekniklerde bulunmaktadır [43].

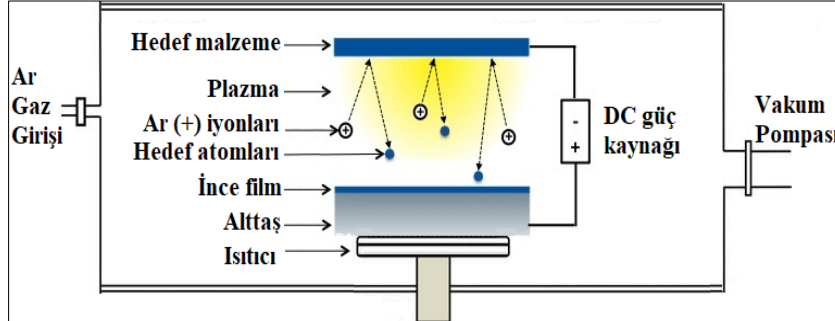


Şekil 3.5. Püskürtme (sputtering) tekniği çeşitleri

3.2.1. Doğru akım (DC) püskürtme yöntemi

DC püskürtme tekniği en basit ve en çok kullanılan yöntem olmakla beraber, Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi bir çift düzlemsel elektrottan oluşan bir yapısı bulunmaktadır. Elektrotlara hedef (target) malzemesi katot ve kaplanacak olan altlık malzemedede anot olacak şekilde yerleştirilir. Sistem içi vakuma alındığında ve elektrotlar arasına doğru (DC) akım uygulandığında sistem içinde plazma ortamı oluşur. Anot ve katot arasında oluşan negatif potansiyel fark nedeniyle hedef malzemenin yüzeyinden elektronlar yayılmasına ve ivmelenmesine neden olur. İvmelenen elektronlar ise kinetik enerjileri maksimum olduğu duruma kadar çıkacak ve ortam içindeki gaz molekülleri ile çarpışmaları sonucu gaz moleküllerini tekrar iyon haline geçirebilecektir. Oluşturulan gaz iyonları ise katota bağlı olan hedef malzemenin yüzeyine bombardıman olarak hedef yüzeyine enerji aktarımı gerçekleşecektir. Aktarılan enerjinin bir kısmı hedefte ısı enerjisine dönüşürken bir kısmı da hedef atomları tarafından soğurulur. Soğurulan enerji ile hedef parçacıkları yüzeyden

ayrılabilircek yeterlilikte enerjiye ulaştıklarında hedef yüzeyinden ayrılır ve doğrudan alttaş yüzeyinde ince film oluşturur [44, 45].



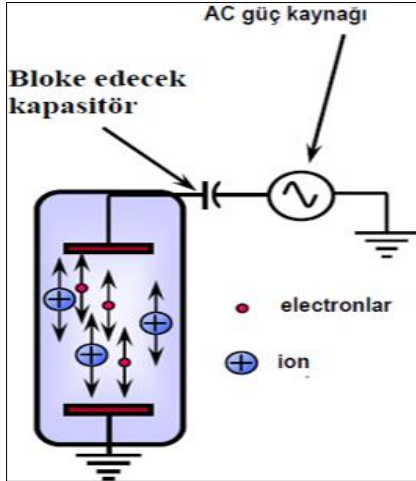
Şekil 3.6. DC püskürtme sistemi şematik gösterimi [46]

DC püskürtme sisteminde kullanılan hedefin yüzeyi yalıtkan olması durumunda yüzeyde yükler toplanacak ve iyon bombardımanına engel olacaktır. Bu yüzden hedef malzemenin elektriksel iletkenliğe sahip olması gerekmektedir. Ayrıca hedef malzemenin fazla ısınması durumunun engellenmesi için su soğutması uygulanarak hedef malzemesinin soğutulması gerekmektedir.

DC püskürtme sisteminin pahalı olması ve ince film biriktirme hızının da yavaş olmasına rağmen, elektriksel iletken malzemelerin depolanmasında tercih edilen bir metottur. En önemli avantajı ise plazmanın homojen olarak geniş bir bölgede oluşturulabilmesidir [47].

3.2.2. Radyo frekansı (RF) püskürtme yöntemi

DC püskürtme tekniğinde kullanılan hedef malzeme yalıtkan olduğu durumda, sistem içine plazma ortamı oluşmaz ya da devam edemez. Bu durumda güç kaynağı DC yerine alternatif voltaj (genellikle Radyo Frekansı) uygulanarak plazma ortamı oluşturulur. Kullanılan güç kaynağından dolayı RF püskürtme yöntemi olan bu yöntem de hedef malzeme bombardıman edilmesi yarım periyot sürerken diğer yarım periyotta herhangi bir yük birikimi meydana gelmez. RF püskürtme sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.7.'de verilmiştir.



Şekil 3.7. RF püskürtme sistemi şematik gösterimi [48]

RF püskürtme sistemi, sistem odasındaki diğer gazların temizliği, plazma ortamında oluşturulan iyonların ortalama yollarının kısaltılması gibi nedenlerden dolayı düşük vakum değerine ihtiyaç duymaktadır. Düşük vakum değerlerinin karşılanması için ultra yüksek vakum pompası kullanılmaktadır. Bu şekilde sistem içi basınç 1-15 mTorr değerlerine kadar düşmektedir.

RF ve DC püskürtme sistemlerinin her ikisi içinde kullanılan gazın düşük vakum seviyelerinde iyonlaşmasını arttırmak ve plazma ortamını sürdürmek için sistem içine ısıtıcı ve pozitif potansiyelli bir elektrot eklemeleri yapılabilir.

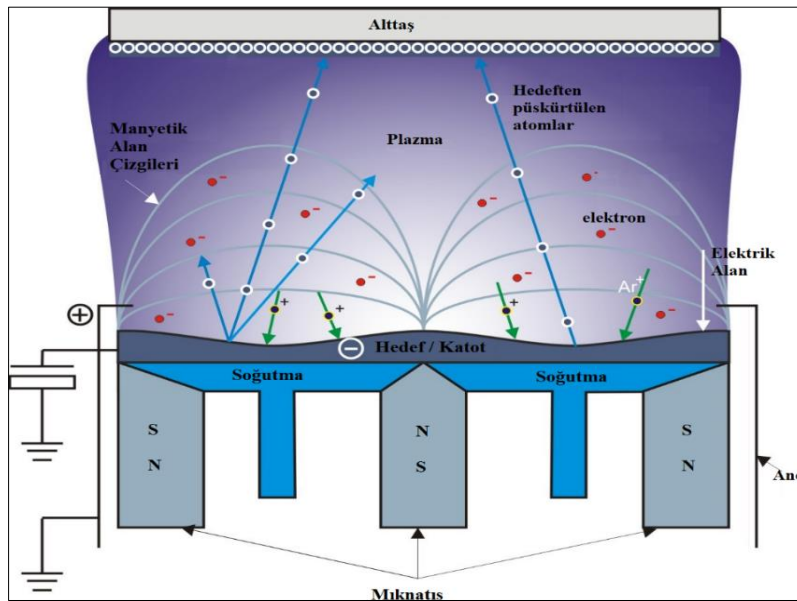
3.2.3. RF ve DC magnetron püskürtme yöntemi

RF ve DC püskürtme yönteminin güç kaynağı ve kullanılan hedef malzemenin iletkenlik ve yalıtkanlık özellikleriyle ayrıldığı ifade edildi. RF ve DC magnetron püskürtme yöntemlerinde ise RF ve DC püskürtme yöntemlerinin sistem içine yerleştirilen hedef malzemeler için kullanılan tutucunun altına mıknatıs veya elektromıknatıs yerleştirilir.

Şekil 3.8'deki gibi elektrotlara akım verildiğinde oluşan elektrik alanına dik bir manyetik alan oluşturulması amaçlanır. E ve B manyetik alanları birbirine dik oluşturulursa plazma ortamı içindeki elektronlar E ve B alanlarına dik olacak şekilde kapalı bir yörüngede hareket ederek hedef malzemenin yüzeyine paralel hareket etmesi sağlanır. Hedef malzemenin yüzeyine paralel olan elektronlar malzemenin yüzeyinde çarpışmaların fazla olmasını sağlayarak, hem iyonizasyon hem de plazma ortamı arttıracaktır.

Elektronların daha fazla çarpışmalar ile iyonizasyon etkisini arttırıldığında RF veya DC püskürtme yöntemlerinde kullanılan vakum değerinin yükselmesine sebep olmaktadır. Yüksek vakum altında hedef yüzeyinden kopan atomlarının sayısı arttırmakta ve ayrıca alttaş üzerine birikim hızı nispeten daha fazla olmaktadır.

Püskürtme yöntemleri genellikle kullanılan güç kaynaklarına göre isimlendirilmektedir. RF veya DC güç kaynağı kullanan diğer püskürtme yöntemlerinde sistem içine ilave ısıtıcı, fazladan elektrot, reaktif gazlar gibi bazı çeşitli değişiklikler uygulayarak ince filmlerin büyüme hızlarını, parçacık büyüklüklerini artırma ve azaltma gibi bazı film özelliklerini kontrol etmek amacı ile püskürtme yöntemlerine eklemeler yapılmaktadır. Bu eklemelerin yanı sıra kullanılan güç kaynağı, soy gaz atomu gibi sistem içinde değişiklik yapılarak püskürtme yöntemi içinde bazı teknikler elde edilerek ince film kaplama uygulamalarında kullanılabilmektedir.



Şekil 3.8. DC magnetron püskürtme sistemi şematik gösterimi [49]

Püskürtme yönteminin genel olarak avantajları;

- Elementler, alaşımlar ve bileşikler de dahil olmak üzere her hangi bir malzeme püskürtme yöntemi ile bir alttaş malzemesi üzerine biriktirilebilir olması,
- Püskürtme için kullanılan hedef malzemeler kararlı ve uzun ömürlü olması,
- Püskürtme koşullarına göre kaplama parametrelerinin kolayca değiştirilebilir olması,
- Reaktif gaz ortamında büyütme yapılabilmesi,

- Düşük basınç altında büyütme gerçekleştirilmesi,
- Kullanılan alttaş malzemesinin temizlenebilirliği,
- Kaplanan malzemenin alttaş yüzeyine tutunmasının iyi düzeylerde olmasıdır. [50].

Püskürtme yönteminin genel olarak dezavantajlarıysa;

- Hedef malzemenin alttaş üzerine birikim hızı düşük olduğu gibi harcanan enerjinin fazla olması,
- Kaplama kalınlıklarının sınırlı olması,
- Alttaş üzerinde oluşan filmlerin homojen olarak yüzey ve kaplama kalınlığı elde edilememesi,
- Hedef malzemelerin ve üretim tekniğinin yüksek maliyetlerinin olması,
- Hedef malzeme üzerine transfer edilen enerjinin büyük miktarının ısı enerjisi olarak kaybedilmesidir [50].

Püskürtme yöntemleri, birçok elektronik ve optoelektronik uygulamaların yanında biyoaktif seramik kaplamalar, implant materyal üzerine seramik kaplama yapımı, dinamik ram (Random Access Memory) uygulamaları, elektriksel yalıtım uygulamaları ve nanokristal toz elde edilmesi gibi uygulamalarda da kullanılmaktadır.

4. KULLANILAN DENEYSEL SİSTEMLER

4.1. Eş Püskürtme Sistemi

Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan Resim 4.1.'de verilen Eş-Püskürtme Sistemi, püskürtme sistemleri gibi ince film üretmektedir. Sistem içine 2 inç çapında 3 adet altlık malzemesi yerleştirilebildiği gibi 4 inç çapına kadar altlık malzemeler üzerine ince film büyütülmesine olanak sağlamaktadır. Bu sistemde bir adet DC ve iki adet RF güç kaynağı bulunmaktadır. Sistemin numune tutucusunun, z-ekseni etrafında dönebilme özeliği ve sistemin eş odalı (konfokal) geometriye sahip olması ile homojen dağılım gösterebilen ince filmler üretilmesine olanak sağlamaktadır [51].

Eş-püskürtme sistemi, hedef malzemeler için alttaşın hedefe olan uzaklığı, basınç, güç vb. parametreleri değiştirmeye olanak sağladığı gibi alttaş sıcaklığını da 600°C'ye kadar çıkarabilmektedir.



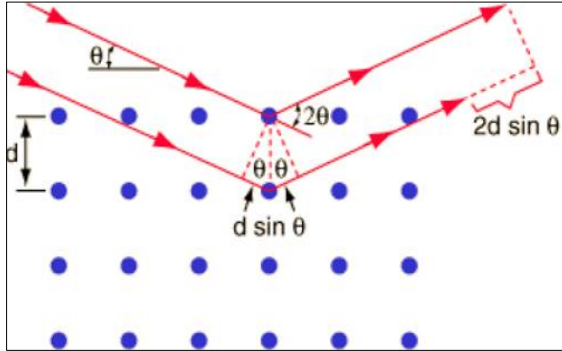
Resim 4.1. Eş-Püskürtme sistemi (NVTS-500 marka)

Bu tez çalışmasında, Eş Püskürtme Sisteminin RF güç kaynağı kullanılarak, %99,9 saflıktaki ZnS hedef malzemesinden Ge optik pencere üzerine farklı kaplama basınç değerleri uygulanarak yansıma önleyici ince film kaplamaları gerçekleştirildi.

4.2. X Işınları Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı (XRD), bir malzemenin kristal yapısı hakkında numuneye zarar vermeden bilgi vermektedir. X ışınları 0,1–100 Å dalgaboyu aralığına dolayısıyla yüksek enerji aralığına sahiptir. X-ışınlarının sahip olduğu bu dalgaboyu aralığı katılarda atomlar arasında ki mesafe ile kıyaslanılabilir derecede olduğundan, kristalin atomik yapısını XRD desenleri sayesinde anlaşılabilir.

X-ışını demeti, bir kristal üzerine θ açısı ile gönderildiğinde kristalin atomları tarafından θ açısı ile tekrar yansıtılır. Yansıyan ışınların aynı dalgaboyuna ve faz farkına karşılık gelen kısmı birbirini güçlendirerek yapıcı girişim oluşturur. Zıt faz farkına sahip olan ışınlar ise birbirini söndürür. Yapıcı girişim oluşturan yansıyan X-ışınları, kırınım deseni oluşturabilmesi için Bragg kanuna uyması gerekmektedir. Bragg kanunu, atomik düzlemlerden yansıyan ışınların yapıcı girişim oluşturmaları için, farklı düzlemlerden yansıyan ışınlar arasındaki optik yol farkı kullanılan ışının dalgaboyunun tam katlarına eşit olmalıdır [52].



Şekil 4.1. Kristal düzlemine gelen ve yansıyan X-ışınları [53]

Gelen X-ışınının dalgaboyu λ , kristalin atomik düzlemler arası uzaklığı d ve θ yansıma açısıdır. Bu durumda birinci gelen X-ışını ile ikinci gelen X-ışını arasında $2d \sin \theta$ yol farkı oluşmaktadır. Bu optik yol farkı, kullanılan ışığın dalgaboyunun tam katlarına eşit olduğunda yapıcı girişim olması sağlanır.

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (4.1)$$

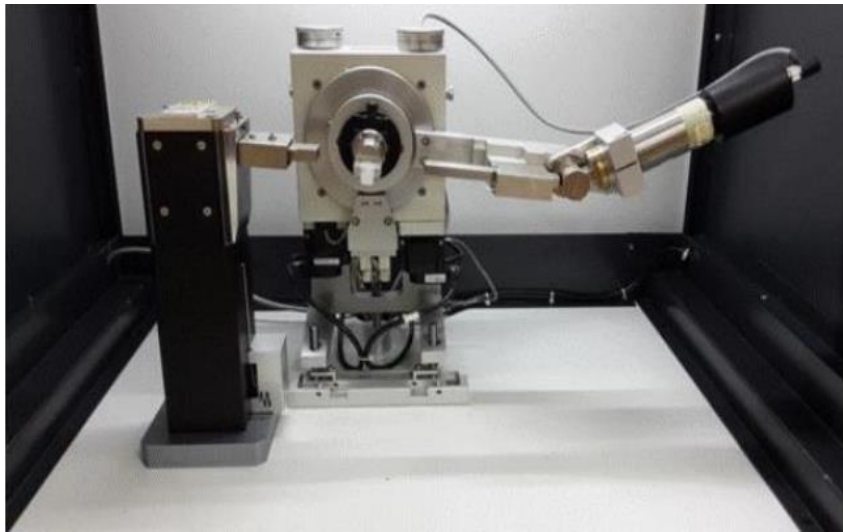
Eş. 4.1. bir kristalin, yapısal özelliklerini ifade etmek için kullanılmaktadır [54]. Burada n bir tam sayıdır. Atomların kristal içine özdeş yerleştikleri varsayılarak ve kullanılan X-ışının dalgaboyunda bilindiğine göre atomlar arası d mesafesi hesaplanabilir. Birim hücresi a ve c örgü parametreleri olan hegzagonal yapılı kristaller için düzlemler arasındaki uzaklık ve örgü parametresi arasındaki ilişki:

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad \text{ve} \quad c = \frac{\lambda l}{2 \sin \theta} \quad (4.2)$$

ifadesi ile verilir [51]. Eş. 4.2’de verilen (hkl) , Miller İndisleridir. Eş. 4.1 ve 4.2.’den, geliştirilen ZnS ince filmlerinin detaylı yapısal özelliklerinin bilgileri elde edilebilir. Ayrıca Scherrer Denklemi ile büyütülen filmlerin parçacık büyüklükleri hesaplamaları yapılabilir. Scherrer denklemi Denklem 4.3 ile ifade edilmektedir. Burada $k=0,9$, β ilgili pik şiddetinin yarı genişliği ve λ kullanılan X-ışını kaynağının dalgaboyunu oluşturmaktadır.

$$\text{Parçacık büyüklüğü} = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4.3)$$

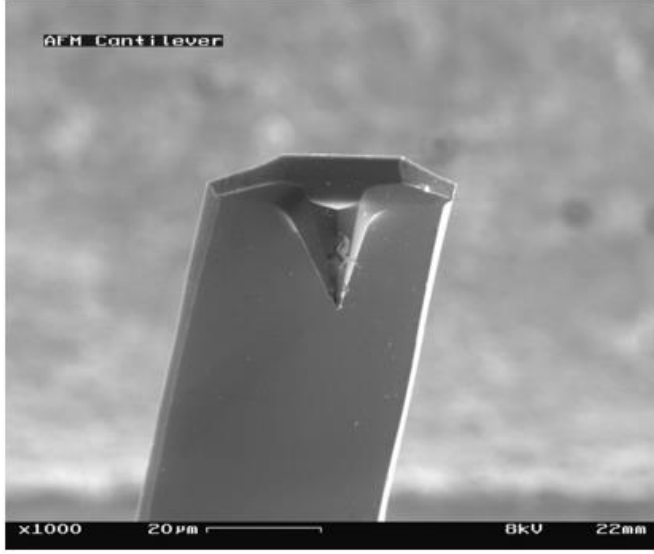
ZnS ince filmlerinin XRD ölçümleri, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan $\text{CuK}_{\alpha 1}$ (1,540 Å) kaynaklı APD 2000 PRO cihazı (Resim 4.2.) yardımı ile belirlendi [55].



Resim 4.2. APD 2000 PRO XRD cihazı [55]

4.3. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

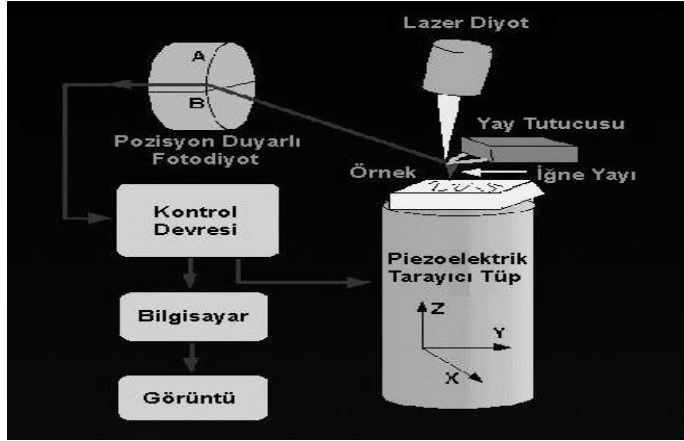
Atomik kuvvet mikroskobu (AFM), katı veya sıvı haldeki numunelerin yüzeylerine zarar vermeden yüzey topografisini nanometre (nm) seviyesinde görüntüleyebilen ve moleküller arasındaki etkileşimleri ölçebilen bir sistemdir. AFM cihazında bulunan özel bir iğne (cantilever ucu) ile numune yüzeyi incelenir.



Resim 4.3. Cantilever Ucu [56]

İğne (cantilever ucu) numune yüzeyine atomik bir uzaklıkta olacak şekilde yerleştirilir. İğne yüzey üzerinde hareket ettikçe numune ile iğne arasında oluşan atomik kuvvet denge çubuğu aşağı, yukarı hareket eder [57]. İğnenin yönelimli hareketi Hooke yasasına uymaktadır. Numune yüzeyinde belirlenen bölge boyunca yüzey için x-, y-, ve z- boyunca çok hassas bir şekilde iğne ile taranır. Yüzey taraması yapılırken, iğnenin denge çubuğundaki küçük değişimleri belirlenir ve kuvvet hesaplanabilir [58].

Denge çubuğunun hareketleri piezoelektrik seramikten yapılan tarama ünitesi tarafından incelenmektedir. Numune ile iğne arasındaki denge çubuğunun hareketlerini algılanması için lazer ve dedektör olarak harekete duyarlı fotodiyot kullanılır. Tarama ünitesinde kullanılan harekete duyarlı fotodiyottan elde edilen akım, yükselteçler aracılığıyla kontrol ünitesine gönderilir. Kontrol ünitesinden bilgisayara aktarılan veriler bir yazılım aracılığıyla iki boyutlu (2D) veya üç boyutlu (3D) görüntüye dönüştürülür. AFM tekniğinin çalışma prensibi Şekil 4.2.'de verilmektedir.



Şekil 4.2. AFM çalışma prensibi [59]

AFM ile yüzey ölçümü alınan bir malzemenin;

- Yüzeyinin nasıl görüldüğü ve yüzeyde bulunan moleküllerin arasındaki ilişki,
- Maddeyi oluşturan parçacıkların büyüklükleri, şekli ve bu parçacıkların birbiriyle etkileşimleri ile ilgili yüzey morfolojilerinin ifadeleri,
- Malzeme yüzeyindeki nano boyutlarda aşınma, korozyon, pürüzlülük, sürtünme gibi nanomekanik özellikleri hakkında bilgilerini sağlamaktadır [60].

ZnS ince film kaplanmış Ge optik pencere numunelerinin yüzey özelliklerinin incelenmesi Resim 4.4'te görülen AFM cihazı ile elde edilmiştir.



Resim 4.4. Nanomanyetik Marka Pro-AFM sistemi [61]

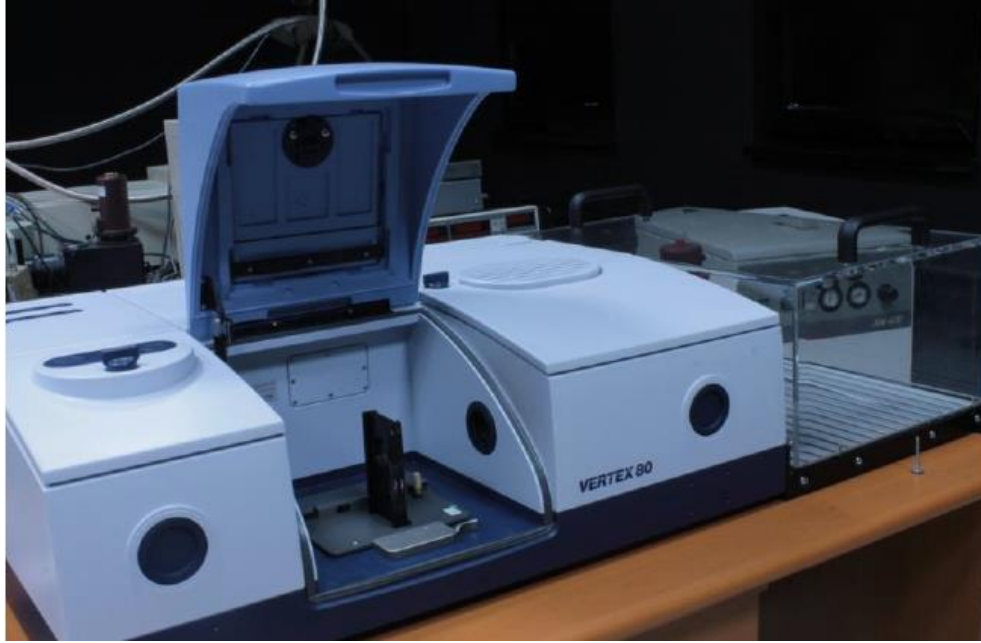
4.4. Fourier Dönüştümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR)

Kızılötesi (IR) spektroskopisi organik, inorganik ve biyolojik numunelerin yapılarının açıklanmasında kullanılan bir analitik tekniktir [62]. Bütün spektroskopik tekniklerdeki gibi KÖ spektroskopisi de numunede bulunan atomların veya moleküllerin elektromanyetik ışınlama etkileşimine dayanır. Bu teknik, temel olarak bir numune üzerine düşürülen kızılötesi radyasyonun, numune tarafından dalga boyunun bir fonksiyonu olarak soğurma miktarının ölçülmesidir. Ayrıca numunenin optik geçirgenlik (*transmission*) veya yansıtması (*reflection*) ölçümlerinde alınabilmektedir [63].

KÖ ışınının dalga boyu aralığı 0,78 – 1000 μm 'dir. Bu aralık için kızılötesi ışınlama yakın (0,78–2,5 μm) [64], orta (2,5–50 μm) ve uzak (50-1000 μm) kızılötesi bölgeler şeklinde bölümlere ayrılır [65]. Yakın ve orta (3-5 μm ve 8-12 μm atmosferik pencere bölgelerini de kapsayan) kızılötesi bölgeleri daha yoğunlukla kullanılmaktadır [66].

KÖ ışınları, numunenin atomlarını bağlayan kovalent bağlar etrafında titreşime sebep olmaktadır. Bu titreşimlerin soğurma frekanslarına karşılık gelen piklere FTIR spektrometresi kullanılarak dönüştürülür. FTIR spektroskopisi, genelde yüzeyden birkaç mikronda bulunan kimyasal bağları ve molekül yapısını belirlemede kullanılmaktadır. 2500–25000 nm dalga boyu aralığında KÖ ışınları bir malzeme üzerine gönderilerek, malzeme içerisindeki bağların enerji düzeylerine göre soğurma veya geçirgenlik ölçüm işlemi yapılmaktadır. Ölçüm alınan numunelerin analiz aralığı genellikle 2–25 μm aralığında yapılmaktadır [67].

FTIR cihazlarında kullanılan ışık kaynaklarına monokromatör uygulanmaz. Işık kaynağından gelen tüm frekansların numune üzerinde aynı anda etkileşmesi ile tüm frekanslardaki verilerin zamanla değişimlerinin verileri alınır. Alınan veriler, bilgisayarda bulunan Fourier dönüşümü yapan bir yazılım ile dönüştürülerek soğurma veya geçirgenlik piki olarak elde edilir. Bu cihazların ayrıca kalibrasyon işlemi kolay olduğu gibi ölçüm hızı ve duyarlılığı açısından avantaj sağlamaktadır [68].



Resim 4.5. Bruker Vertex 80 FTIR Spektrometresi

Ge optik pencere üzerine kaplanan ZnS ince filmlerin optik geçirgenlikleri Resim 4.5.'de verilen Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Bruker Vertex 80 FTIR spektrometresi ile belirlenmiştir [69]. Vertex 80 FTIR cihazında, HeNe lazer güç kaynağı, hava soğutmalı DLaTGS dedektör, geniş bant MCT dedektör ve yakın KÖ bölgede çalışan InGaAs diyot dedektör bulunmaktadır.

Bu cihaz, referans olarak kaydedilen P_0 şiddetindeki elektromanyetik ışınımı tekrar numune üzerine göndererek geçen veya soğurulan ışığı, iki frekans arasındaki titreşimler farkı ile belirlemektedir.

Geçen ışığın şiddeti P_0 değerinden P değerine azalır. Bu azalma ile geçirgenlik;

$$T = \frac{P_0}{P} \quad (4.3)$$

$$\%T = \frac{P_0}{P} \times 100 \quad (4.4)$$

eşitliği ile tanımlanır[69].

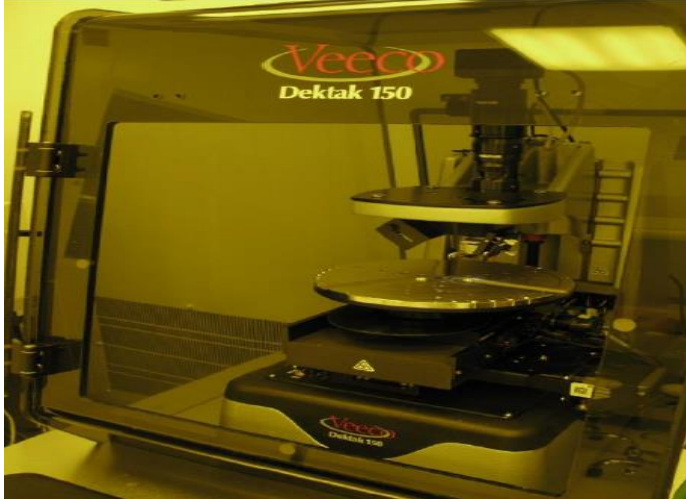
4.5. Profilometre

Profilometreler, dedektör ve numune yerleştirilen tabla olmak üzere iki bölümden oluşmaktadırlar. Bu cihazlarda dedektör veya tabla hareketli olabildiği gibi her ikisi de hareketli olabilmektedir. Bu hareket kabiliyeti sayesinde, profilometreler numune üzerinde belirlenen referans noktasından başlayarak yüzeyde tarama yaptıktan sonra numune üzerinde kalınlık ölçümü yapılabilmektedir.

Profilometreler, iğneli (kalem tipi) ve optik olmak üzere iki farklı profilometre çeşidi vardır [40]. Her iki yöntemde de yüzey pürüzlülüğü incelenebildiği gibi kalınlık ölçümü de yapılabilmektedir. İğneli profilometre, AFM de olduğu gibi yüzeyi algılamak için kalem tipi bir sivri uç kullanılır. Kalınlık ölçümü için iğne ucu, numune yüzeyi boyunca fiziksel olarak temas ettirilerek belirli bir yol boyunca hareket etmesi sağlanır. İğne hareketi boyunca tarama yaparken iğne ile örnek yüzey arasındaki kuvvet kontrol edilerek geri besleme döngüsü ile ölçümler alınmaktadır. Ayrıca iğnenin fiziksel olarak teması yüksek çözünürlükte bilgi alınabilmesine olanak sağlasa da, bazı numunelerin hassas yüzeyine zarar verebildiği gibi numune de iğnenin ucuna zarar verebilir. Bu nedenle x-, y- ve z-yönünde hareket eden iğne, yüzeyle teması sürdürürken yavaş bir şekilde hareket etmelidir.

Optik profilometreler de ise iğne yerine laser ışını kullanılarak fiziksel temas olmamaktadır. Laser ışını, numune yüzeyini 3 boyutlu olarak algılaması sağlandığında yüzey pürüzlülüğü ve ince filmler için kalınlık ölçümü alınmaktadır [70].

Her iki profilometre ile kalınlık ölçüm yöntemi için numune üzerinde kaplama yapılmadan önce referans alınması gereken bir nokta bulundurulmalıdır. Referans noktasından alınan yükseklik ölçümü, kaplama yapılan yüzeyin üzerinden tarama işlemine devam eder. Her iki nokta arasındaki yükseklik farkı kaplanmış olan ince filmlerin film kalınlığını oluşturur. Bu tez çalışmasında elde edilen ZnS ince filmlerinin kalınlık ölçümleri, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Laboratuvarında bulunan Resim 4.6.'daki "Veeco Dektak-150" kalem tipi (iğne uçlu) profilometre ile yapılmıştır [40].



Resim 4.6. “Veeco Dektak-150” profilometresi



Resim 4.7. “Veeco Dektak-150” profilometre tablası ve iğnesi

5. ARC İNCE FİLM ÜRETİMİ VE ARAŞTIRMA BULGULARI

5.1. ARC İnce Filmlerin Üretimi

Tez çalışması kapsamında, Ge optik pencerenin sahip olduğu %46 optik geçirgenliği arttırmak için optik pencere üzerine eş püskürtme sistemi kullanılarak ZnS ince filmleri yansıma önleyici olarak kaplama yapılmıştır. Ayrıca Ge optik pencerelerin dışında sistem içine Si ve cam altlık malzemeleri eklenerek ince film kalınlıklarını ve büyütme oranlarını kontrol amaçlanmıştır. Sistem içine alttaş malzemelerinin yüklemesi yapıldı ve bu numunelere belirlenen parametreler uygulanarak ince film büyütme işlemi gerçekleştirildi. Bu süreç sonunda yansıma önleyici olarak elde edilen ZnS ince filmlerin optik, yapısal ve yüzey özellikleri incelenmiştir.

5.1.1. Ge optik pencere numunelerinin temizlenmesi

İnce film hazırlama süreçlerinde ilk adım alttaş olarak kullanılacak malzemelerin temizlenmesi adımıdır. Alttaş olarak kullanılan malzemelerin yüzeyinde oluşabilecek kolay uzaklaştırılabilen kirliliklerin temizlenmesi gerekmektedir. Temizlik işlemi, ince filmlerin altlık yüzeyine homojen ve kaliteli büyütülmesini sağlamaktadır. Aksi takdirde numune üzerinde bulunabilecek kirlilikler, altlık malzemesi üzerine film kaplaması yapıldıktan sonra yapılan ölçümlerle anlaşılabilir ve kirlilik bulunan konumda yanlış çekirdeklemesine, yüzey pürüzlülüklerinin bulunmasına gibi film kalitesini etkileyecek nedenler ortaya çıkmaktadır.

Kirlilik temizleme işlemi genelde film oluşturulmak için ultrasonik banyo içerisinde alkol-aseton, deiyonize su ile temizlikten oluşmaktadır. İnce film kaplama yapılacak olan Ge optik pencereler ve Si alttaş numunelerinin yüzey kirliliklerinin temizliğinin kolay olması için ultrasonik banyo temizliğinde kullanılan deiyonize su 80°C sıcaklıkta tutuldu. Alttaş numuneleri için 10 dakika etil alkol-ultrasonik banyo, 10 dakika aseton-ultrasonik banyo ve 10 dakika deiyonize su-ultrasonik banyo olarak uygulandı. Cam numuneleri için ise bu işlemler yapılmadan önce köpüklü su ile yıkama işlemine tabi tutulduktan sonra aynı işlemlerden geçirildi. Ultrasonik banyo işleminden sonra numuneler deiyonize su ile yıkandı ve kuru azot (N₂) gazı ile kurutuldu. Temizlik işlemleri tamamlanan her numune,

ince film kaplama için kullanılacak olan eş-püskürtme sistem odasına (chamber) yüklemeleri yapılarak büyütme için vakum altına alındı.

5.1.2. ZnS ince filmlerin üretilmesi

Ge, Si ve cam numuneler, temizlik işleminden sonra Gazi Üniversitesi, Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi bünyesinde bulunan RF magnetron Eş-püskürtme (sputtering) cihazının tam merkezine yerleştirildi. Elde edilmek istenen ZnS ince filmleri için sistem içine %99,9 saflıkta ZnS hedef malzemesi sistemin katot bölümüne alttaşı 15 mm mesafe olacak şekilde yerleştirildi. Sistem içine numunelerin yerleştirilme işlemi yapıldıktan sonra sistemin vakuma gelmesi beklandı. Yüksek vakuma alınan sisteme Ar gazı verilerek 3 mTorr mertebesine ulaşınca kadar vakum değerinin düşmesi beklandı ve vakum düşmesi beklenirken kullanılan numuneler için alttaşı sıcaklığı 100°C'ye ulaşması sağlandı. Yansıma önleyici kaplamada bileşik yarıiletken kullanılacağından dolayı, alttaşı üzerinde malzemenin atomlarının farklı yapışma katsayıları bulunmaktadır. Bu durumda bileşiklerden bir tanesi diğerine göre daha uçucu olmaktadır. Alttaşı sıcaklığı ise bu durumun engellenmesi için kullanılabilir olduğu gibi filmlerin tanecik büyüklüklerinin arttırılması içinde kullanılabilir. Üretilen ZnS ARC ince filmleri için kullanılan alttaşı sıcaklığı 100°C ve güç 100W olarak ayarlandı. Numuneler için belirlenen kaplama kalınlıklarında ve farklı basınç değerlerinde ince film büyütme yapıldı. Püskürtme sisteminde kaplaması yapılan ince filmler vakum ortamının kırılması ile sistem içinden çıkarıldı.

Üretilen ZnS ARC ince filmleri için kullanılan alttaşı sıcaklığı 100°C ve güç 100W olarak ayarlandı. Numuneler için belirlenen kaplama kalınlıklarında ve farklı basınç değerlerinde ince film büyütme yapıldı. Püskürtme sisteminde kaplaması yapılan ince filmler vakum ortamının kırılması ile sistem içinden çıkarıldı.

5.1.3. ZnS ince filmlerinin kaplama parametreleri ve film kalınlıkları

Üretilen ZnS ince filmleri için alttaşı sıcaklığı, kaplama gücü gibi literatürle uyumlu olan kaplama parametreleri ince filmlerin üretilmesi bölümünde verildi. Basınç, film kalınlığı gibi parametreler ise her bir numunenin üretim sürecine etki etmektedir. İstenilen dalga boylarına karşılık teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerle uyumlu olarak ince filmler için kaplama parametreleri çizelgeler ile verildi ve bu parametreler doğrultusunda ZnS ince filmleri üretildi.

ZnS ince filmlerinin kaplama süreçleri için bazı numuneler optimizasyon amacıyla üretilmiştir. Bu numunelerin büyütme sürelerine karşılık büyütme oranları belirlendi ve istenilen optik kalınlık değerleri için kullanıldı. Çizelge 5.1’de Ge optik pencerelerinin tek yüzeyleri için kaplama parametreleri ve kaplama kalınlıkları verilmiştir. ZnS ince filmlerinin kalınlıkları ‘Veeco Dektac 150’ kalem tipi profilometre kullanılarak belirlendi.

Çizelge 5.1. Ge optik pencereleri için tek yüzey kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları

Numune Kodu	Kaplama Basıncı (mTorr)	Kaplama Süresi (dk)	Kaplama Kalınlığı (nm)
ARC-1	3	30	50-55
ARC-2	3	120	519,2-541,95
ARC-3	3	195	1166,32-1055,94
ARC-4	3	75	314,7-358,45
ARC-5	3	95	555,35-621,5
ARC-6	20	60	205,39-217,10
ARC-7	20	100	430,15-447,07
ARC-8	30	110	300,62-330,40
ARC-9	30	125	412,66-430,96
ARC-10	3	195	1195,78-1226,72

Ge optik pencereler için tek yüzey kaplama dışında, bazı numunelerde aynı basınç ve farklı basınç değerlerinde çift yüzey kaplamaları yapıldı. Aynı basınç değerinde çift yüzey kaplamaların kaplama süreleri, kaplama basınçları ve ince film kalınlıkları Çizelge 5.2.’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. Ge optik pencereleri için çift yüzey kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları

Numune Kodu	Kaplama Basıncı (mTorr)	Kaplama Süresi (dk)		Kaplama Kalınlığı (nm)	
		Ön Yüzey	Arka Yüzey	Ön Yüzey	Arka Yüzey
ARC-11	3	80	80	429,0	477,61
ARC-12	20	100	100	422,53	434,45
ARC-13	30	115	115	335,15	372,15

Aynı basınç değerleri uygulanarak, Ge optik pencerelerin her iki yüzeyi üzerine farklı kalınlık değerlerinde ARC ince filmler büyütüldü. Ayrıca bu işlemlere ek olarak diğer bir farklı basınç değeri altında farklı kalınlıklarda ince filmlerin büyütmesi yapıldı ve Çizelge 5.3.’de kaplama parametreleri ve kalınlıkları verildi.

Çizelge 5.3. Ge optik pencereler için farklı kaplama parametreleri ve ince film kalınlıkları

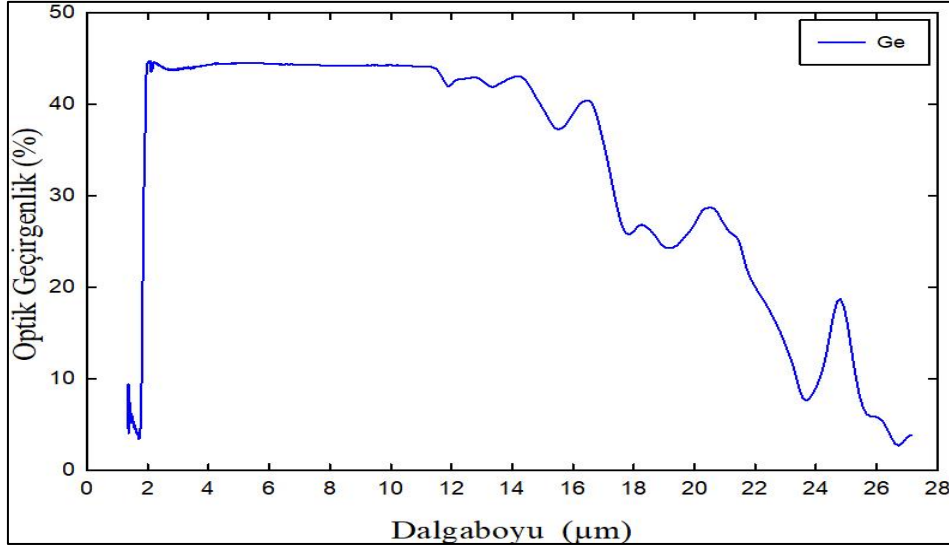
Numune Kodu	Kaplama Basıncı (mTorr)		Kaplama Süresi (dk)	Kaplama Kalınlığı (nm)	
	Ön Yüzey	Arka Yüzey		Ön Yüzey	Arka Yüzey
ARC-14	3	3	75-95	314,7	555,35
ARC-15	3	3	75-120	314,7	519,2
ARC-16	3	3	75-195	314,7	1195,65
ARC-17	3	3-20	80-180	429,00	429,00+422,53
ARC-18	3-20	3-20	180-180	429,0+422,53	429,0+422,53

5.2. ZnS İnce Filmlerin Optik, Yapısal ve Yüzey Analizleri

Ge optik pencere üzerine kaplanan ZnS ince filmleri optik geçirgenliği için FTIR ölçümleri, film kalınlıkları için profilometre, ince filmlerin kristal yapıları için XRD ve yüzey pürüzlülüğü için AFM ölçümleri yapıldı. Cam ve Si alttaşları üzerine kaplanan ZnS ince filmlerin de bazı teknik ve yapısal özelliklerinin kontrolü için ölçümleri alındı.

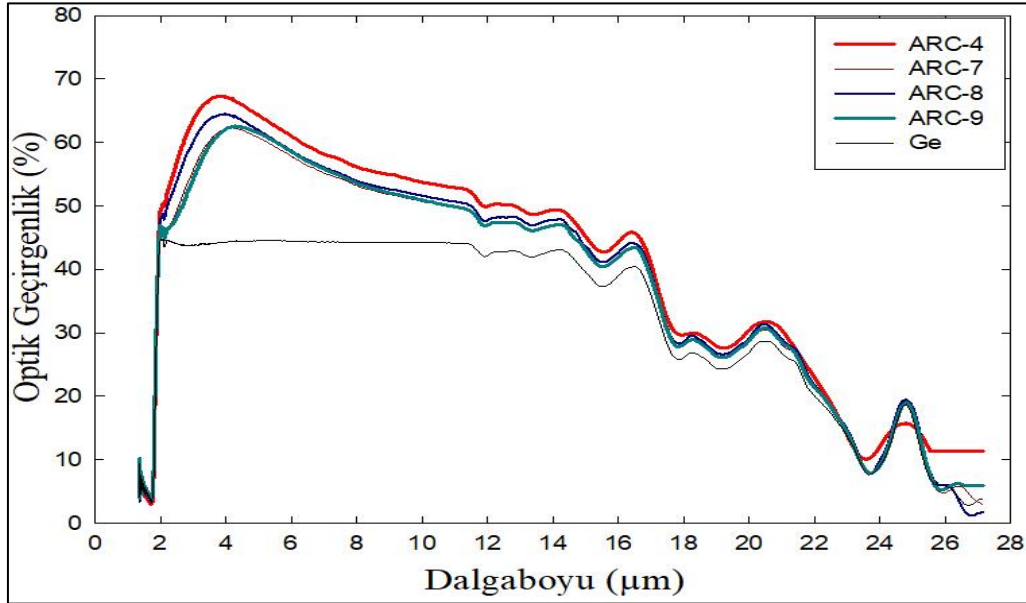
5.2.1. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometresi (FTIR) analizleri

Eş-Püskürtme sistemi ile Ge optik pencereler üzerine, tek katman ARC ince film için yapılan hesaplamalar sonucunda bulunan film kalınlığı değerine yakın kalınlıklı ZnS ince filmleri üretildi. Kaplanmamış ve ZnS ince filmi ile kaplanmış Ge optik pencerelerin KÖ bölgede optik geçirgenlikleri FTIR ölçümü ile belirlendi. Şekil 5.1.'de kaplanmamış n-tipi Ge optik pencere için FTIR ile elde edilen optik geçirgenlik ölçüm sonucu verilmiştir. Bu sonuç literatür de verilen Ge'nin optik geçirgenliği olan %46 değeri ile uyumludur. Ayrıca kaplanmamış Ge optik pencerenin geçirgenlik değeri ZnS ince filmi ile kaplama yapılmış olan bütün numunelerin ölçüm sonuçlarının karşılaştırması amacı ile verilecektir.



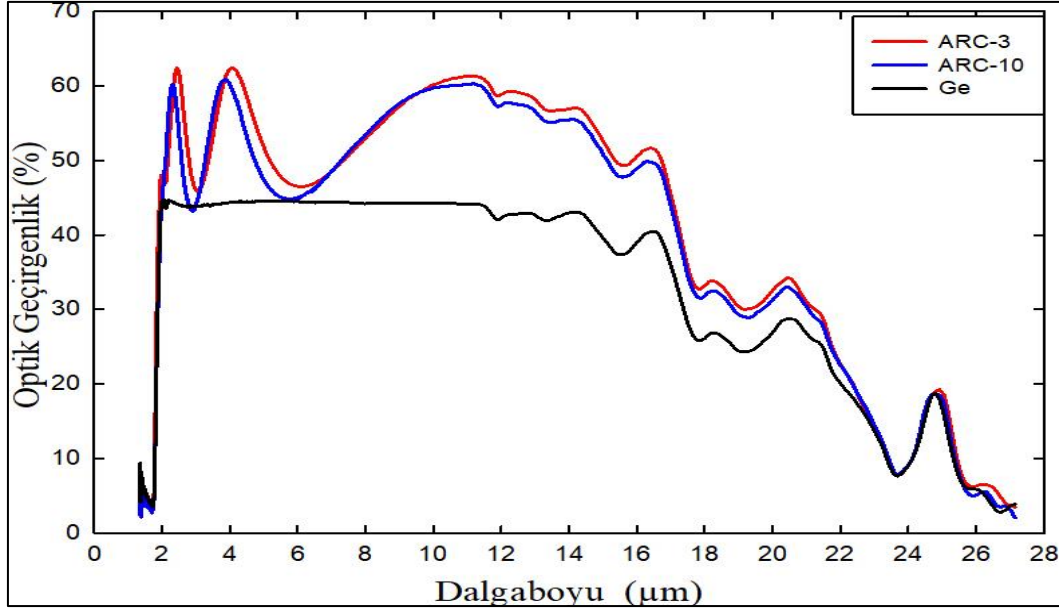
Şekil 5.1. Kaplama yapılmamış Ge optik pencerenin optik geçirgenlik ölçümü

3-5 μm dalgaboyu aralığı için tek yüzey ZnS ince film kaplanmış Ge optik pencerelerin optik geçirgenlik ölçümleri Şekil 5.2.'de verilmiştir.



Şekil 5.2. 3-5 μm dalgaboyu aralığı için, tek yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü

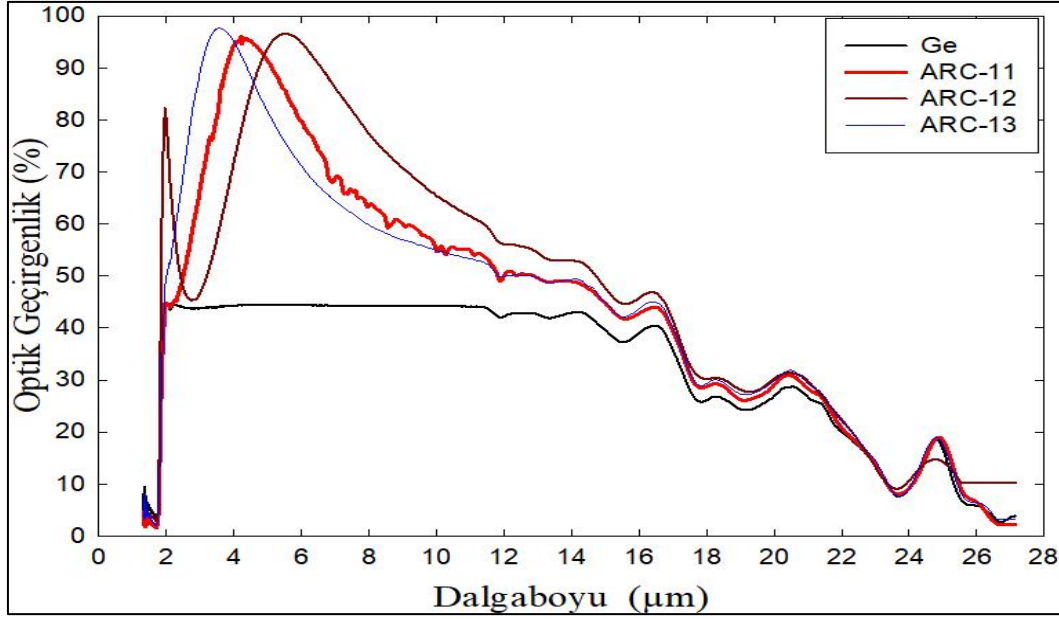
8-12 μm dalgaboyu aralığı için tek yüzey ZnS ince film kaplanmış Ge optik pencerelerin optik geçirgenlik ölçümleri Şekil 5.3.'de verilmiştir.



Şekil 5.3. 8-12 μm dalgaboyu aralığında, tek yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü

Şekil 5.2. ve Şekil 5.3.'te verilen FTIR optik geçirgenlik ölçümleri sonucunda tek yüzey ZnS yansıma önleyici ince filmlerin optik geçirgenlikleri, 3-5 μm dalgaboyu aralığı için maksimum %67, 8-12 μm dalgaboyu aralığı için maksimum %62 olarak belirlenmiştir. ZnS ince filmlerinin 3-5 μm dalgaboyu aralığında farklı basınç değerleri için elde edilen optik geçirgenlik sonuçlarından, 3 mTorr basınç altında kaplanan ince filmlerin optik geçirgenlik değerinin diğer basınç değerlerinde elde edilenlerden fazla olduğu görülmüştür.

Ge optik pencerelerin her iki yüzeyine, kaplama parametrelerinde verilen kaplama şartlarında ZnS ince filmler büyütüldü. Büyütülen ZnS ince filmlerin, 3-5 μm dalgaboyu bölgesinde FTIR optik geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 5.4.'te verilmiştir.



Şekil 5.4. 3-5 μm dalgaboyu aralığı için, çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümü

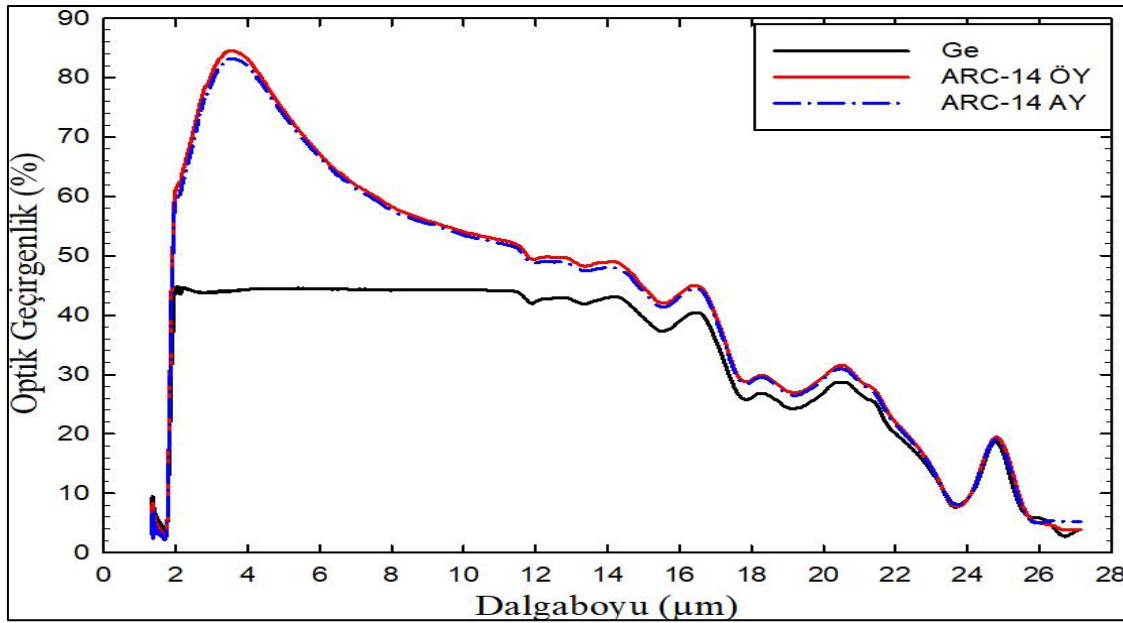
Şekil 5.4.'te elde edilen FTIR sonuçları her iki yüzeyi için aynı kaplama kalınlığı ve parametrelerinden elde edilen ince filmlerin optik geçirgenlik değerlerini ifade etmektedir. ZnS ince filmleri doğrusal büyümediği ve hesaplamalar ile bulunan 4 μm dalgaboyuna karşılık gelen optik kalınlık değerine ulaşamadığından optik geçirgenlik sonuçlarında kaymalar olduğu gözlenmiştir. Buna karşılık elde edilen optik geçirgenlik değerleri, ince film kalınlıklarının karşılık geldiği dalgaboylarında maksimum değerlere ulaşmaktadır. Çift yüzey büyütme işlemi tek yüzeye göre daha zor bir süreç gerektirirken, elde edilen ölçüm sonuçlarından 4 μm dalgaboyu için optik geçirgenlik değerinin %97 dolaylarında olduğu görülmektedir.

Çift yüzey kaplamalarda, optik geçirgenliğin maksimum olduğu kaplama kalınlıklarının bir sınırı bulunmaktadır. Bu sınır değerinin üzerine çıkıldığında optik geçirgenlik değerleri kalınlık değeri arttıkça azalmaktadır. 8-12 μm dalgaboyu aralığı için tek yüzey kaplamada 1130 nm kalınlıkta ince film kaplama gereklidir. 1130 nm kalınlıklı çift yüzey ince filmler, Ge optik pencere üzerine kaplama yapıldığında optik geçirgenliğin maksimum olduğu kaplama kalınlık sınırı aşılmaktadır. Bu sınırlar aşıldığında optik geçirgenlik değerleri tek katman yansıma için dalgalanma göstermekte ve dalgaboylarına karşılık farklı optik geçirgenlik değerleri ölçülmektedir.

Çift yüzey ZnS ince filmlerinin üretiminde her iki yüzeyi farklı kalınlıklarda ve farklı basınç değerlerine karşılık üst üste büyütme işlemleri yapıldı. Parametrelerdeki değişikliklere göre elde edilen bazı numunelerin optik geçirgenlikleri incelendi. Böyle numunelerden elde edilen optik geçirgenlik değerlerinin hem 3-5 μm hem de 8-12 μm dalga boylarında optik geçirgenlik değerlerinin arttığı gözlemlendi.

ARC-14. numunesi

Ge optik pencerelerin her iki yüzeyine başarılı bir şekilde ZnS ince filmler büyütüldü. ZnS ince filmlerinin çift taraflı olarak kaplama sürecinde ilk üretilen ARC-14 numunesi için 3 mTorr basınç değerinde bir yüzeyi 75 dakikada 314 nm kalınlıkla ZnS ince film kaplanırken, arka yüzeyi yine aynı basınç değerinde 95 dakika 555,35 nm kalınlıkla ZnS ince film üretildi. Üretilen ARC-14 numunesinin, her iki yüzeyi için optik geçirgenlik ölçüm sonuçları Şekil 5.5.'te verilmiştir. ARC-14 numunesinin her iki yüzeyinden alınan geçirgenlik değerleri arasında maksimum noktası dışında her iki ölçüm değerleri birbirine yakındır. Maksimum noktadaki ölçüm sonuçlarındaki %2 civarında oluşan değer farkı, yüzeylerin farklı kalınlık değerlerinde olmasından ve FTIR ölçüm işleminde yüzeylerin farklı noktalarına karşılık gelen soğurmalarından kaynaklanmaktadır.

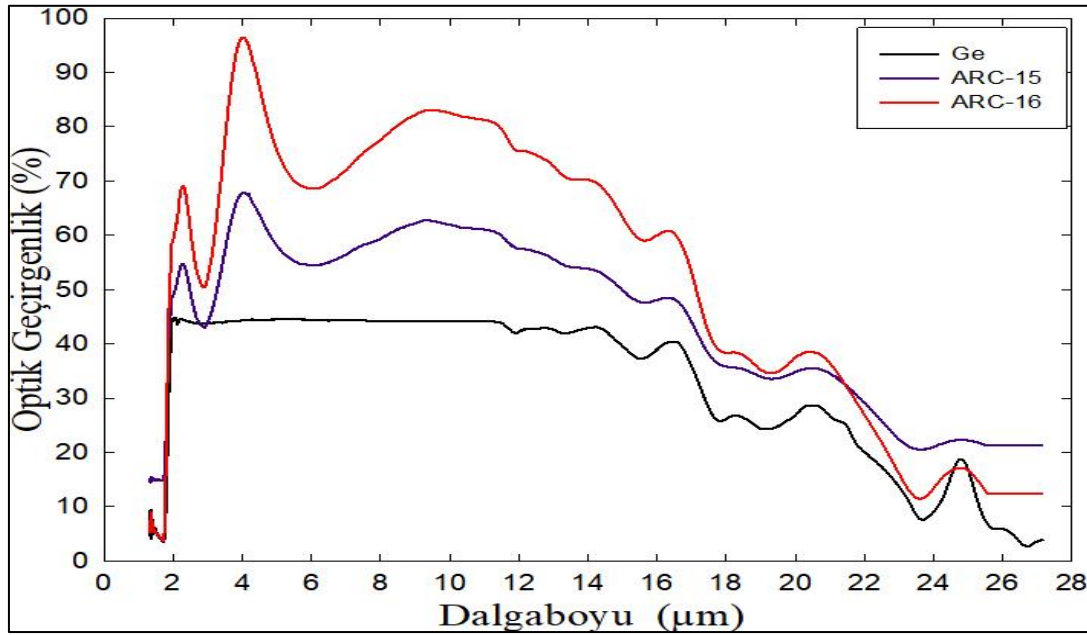


Şekil 5.5. 3-5 μm dalgaboyu aralığı için ARC-14 numunesinin FTIR ölçümü

ARC-15 ve ARC-16 numuneleri

ARC-15 ve ARC-16 numuneleri 3 mTorr basınç altında hazırlandı ve her iki numune için bir yüzeyleri aynı kalınlıklı ZnS ince filmler büyütülürken diğer yüzeylerine farklı kalınlıklı ZnS ince filmler büyütüldü. İki numune için kalınlık farkının etkisi incelendi. Numunelerin bir yüzeyleri aynı kalınlık değerlerinde büyütülmüşken, diğer yüzeyleri farklı kalınlık değerlerinde büyütülmüş olup sırasıyla kalınlık değerleri 519,2 nm ve 1195,65 nm civarlarındadır. Aynı basınç değerinde oluşturulan filmlerde kalınlık değerleri ve ARC-14'te elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında, 3-5 μm için hesaplanan kalınlık değerinin üzerine çıkıldığında 8-12 μm dalgaboyu için Şekil 5.6'da optik geçirgenlik ölçüm sonuçlarından görülmektedir.

8-12 μm dalgaboyu aralığı için hesaplanan dalgaboyu yaklaşık olarak 1195,65 nm kalınlık değerine yakındır. ARC-16'te elde edilen film kalınlığı bu değerde olduğundan 8-12 μm de optik geçirgenlik değeri minimum %75 ve maksimum olarak %84 optik geçirgenlik değeri ölçüldü. Ayrıca ARC-16 numunesi 8-12 μm aralığı dışında 3-5 μm dalgaboyu için de %70 civarında optik geçirgenlik gözlemlendi ve her iki dalgaboyu aralığında geniş bant optik geçirgenlik belirlendi.

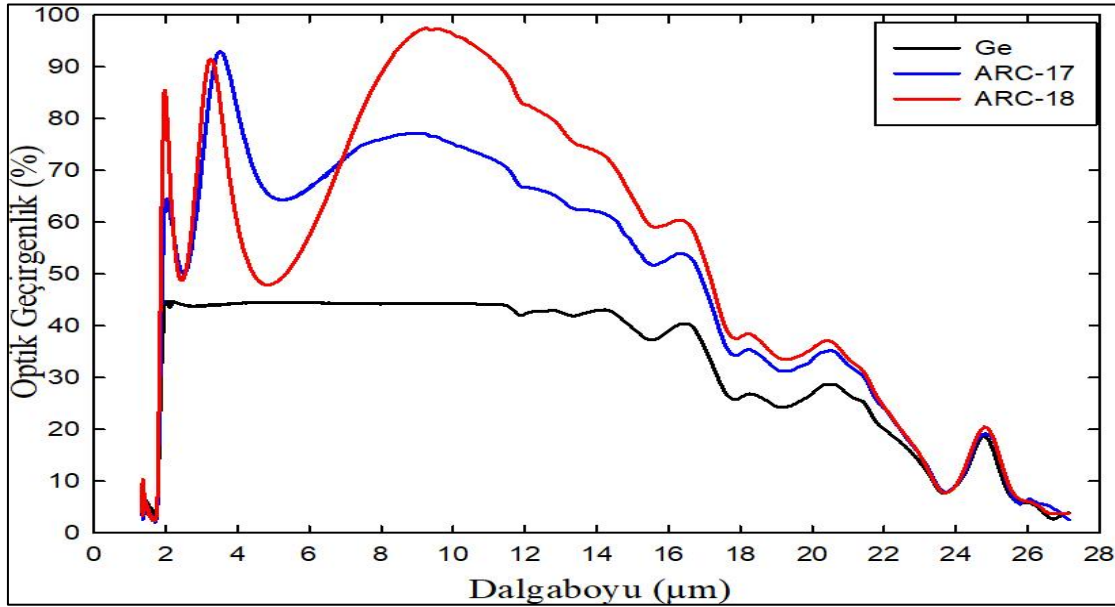


Şekil 5.6. ARC-15 ve ARC-16 numunelerine ait çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümleri

ARC-17 – ARC-18 numuneleri

ARC-17 numunesinde, her iki yüzeyine 3 mTorr basınç altında üretilen 429,00 nm kalınlıklı ZnS ince filmleri kaplanmış olan Ge optik pencerenin bir yüzeyine tekrar 20 mTorr basınçta 422,53 nm ince film kaplanması ile oluşan durumun optik geçirgenliği ölçüm sonuçları Şekil 5.7.'de verilmiştir. Ayrıca ARC-18'de ise Ge optik pencerenin her iki yüzeyine 3 mTorr'da 429,00 nm ve 20 mTorr basınçta 422,53 nm üst üste büyütülmüş olan ZnS ince filmlerin optik geçirgenlik ölçüm sonuçları da Şekil 5.7.'de verilmiştir.

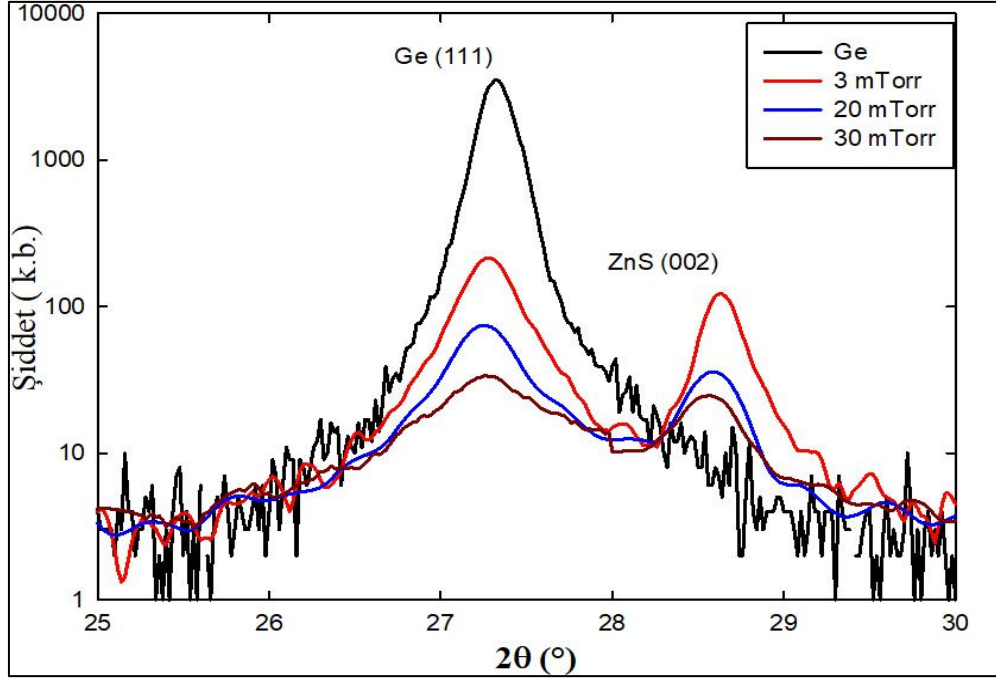
8-12 μm dalgaboyu aralığı için ARC-15 ve ARC-16 için yapılan ölçüm sonuçları incelendiğinde ARC-17 ve ARC-18 numuneleri, çift yüzey kaplama durumlarının FTIR ile elde edilen optik geçirgenliğim %98 olarak maksimum ölçümleri oluşturduğu görülmektedir.



Şekil 5.7. ARC-17. ve ARC-18 numunelerine ait çift yüzey ZnS ince filmlerin FTIR ölçümleri

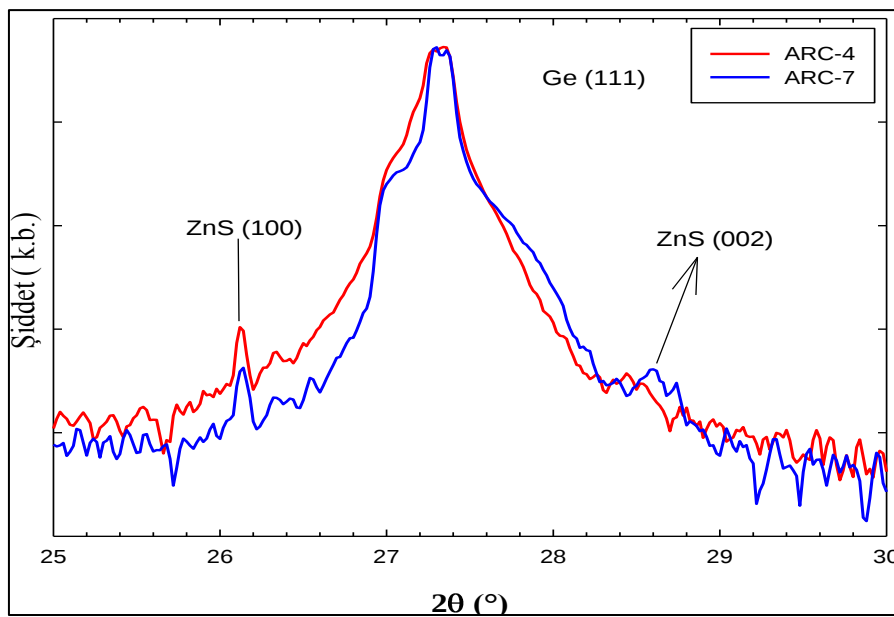
5.2.2. X- Işını kırınımı (XRD) analizleri

Farklı kaplama basınçları altında Püskürtme tekniği ile Ge optik pencere üzerine kaplanan ZnS ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri APD 2000 PRO X-ışını kırınım cihazı ile elde edildi. 3 mTorr, 20 mTorr ve 30 mTorr olarak farklı büyütme basınç değerlerinde üretilen ZnS ince filmlerin XRD ölçümleri Şekil 5.8.'de verilmiştir.



Şekil 5.8. Farklı kaplama basınçlarında elde edilen ZnS ince filmlerinin XRD grafiği

ZnS ince filmlerinin XRD ölçümlerinden, hegzagonal würtzite yapısının (002) yönelimli olduğu görüldü (*JCPDS dosya no: 36-1450*). Ayrıca bazı ZnS ince filmlerinin XRD ölçümlerinden ZnS'ün kübik yapı (*JCPDS dosya no: 01-077-2100*) ile hegzagonal würtzite yapılarının bir arada olduğu gözlemlendi. İki yapının da elde edildiği XRD ölçümleri Şekil 5.9'da verilmiştir.



Şekil 5.9. ZnS'nin Kübik ve Hegzagonal Würtzite yapısının XRD grafiği

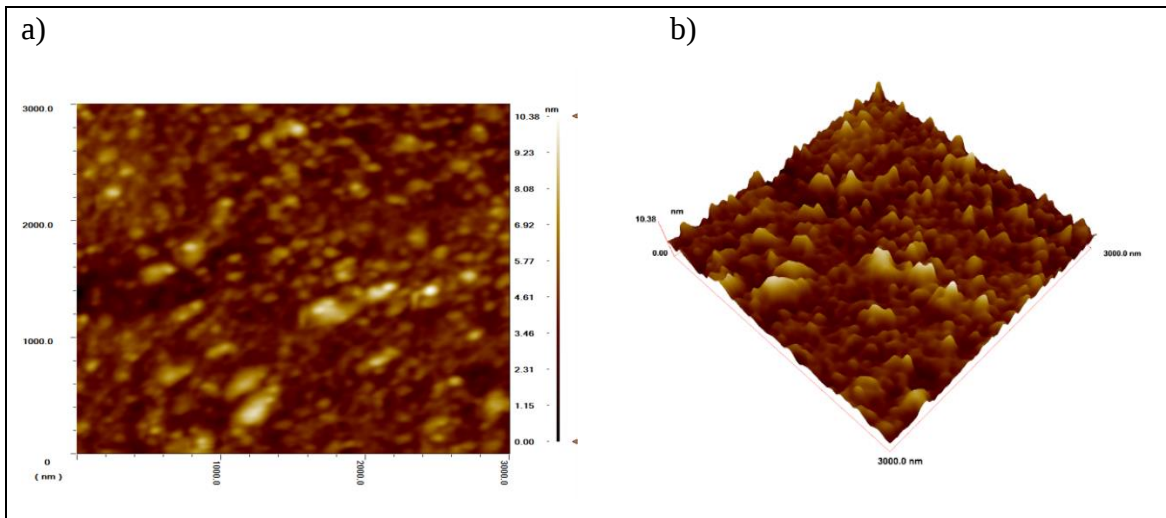
Çizelge 5.4. Basınç değişiminin parçacık büyüklüğüne etkisi

Numune	2 θ (°)	FWHM (rad)	d ₍₀₀₂₎ (Å)	Parçacık Büyüklüğü (nm)
3 mTorr	28,60	0,261	3,1188	32,83
20 mTorr	28,61	0,235	3,1199	36,46
30 mTorr	28,62	0,228	3,1210	37,59

XRD grafiğinden elde edilen 2 θ değerlerinden, farklı basınçlarda üretilen ZnS'in hegzagonal Würtzite yapısının 2 θ =28.60° civarında belirgin pikleri gözlemlenmektedir. Çizelge 5.4 ile düzlemler arası mesafe ve basınç değişiminin parçacık büyüklüklerinin etkisi ifade edilmektedir. Buradan püskürtme sisteminde yüksek büyütme oranından dolayı atomların düzgün bir şekilde dizilmesi için yeterli zamanları olmadığından dolayı ZnS ince filmlerin polikristal yapıda büyüdüğü anlaşılmaktadır.

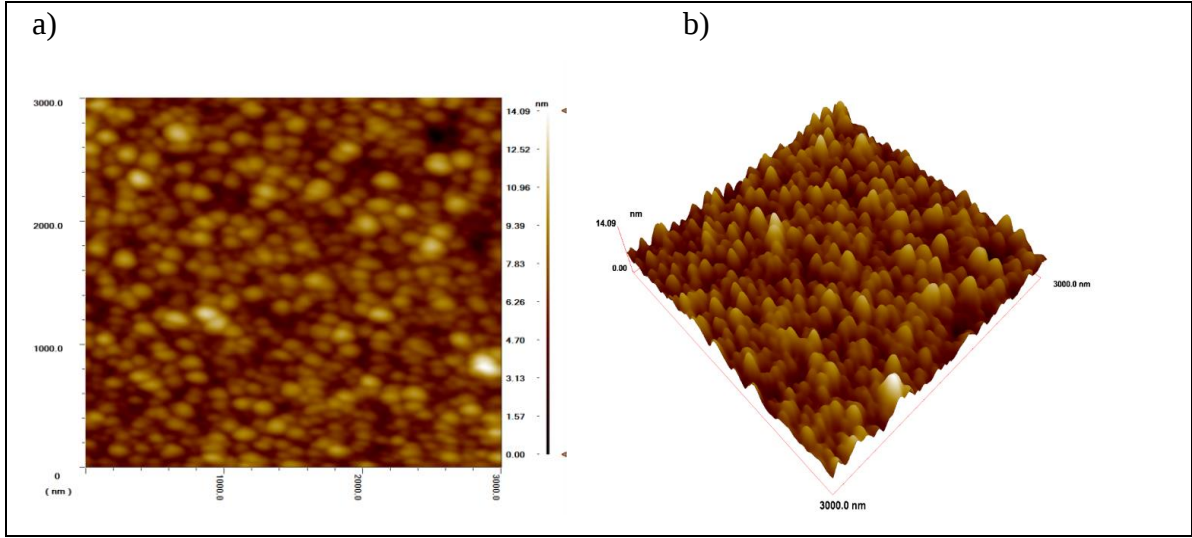
5.2.3. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) analizleri

Ge optik pencere üzerine büyütülen ZnS ince filmleri için yüzey özellikleri Atomik Kuvvet mikroskobu (AFM) yardımı ile belirlendi. ZnS kaplanmış ve kaplanmamış Ge optik pencere üzerinde 3×3 μm^2 'lik alanın taranmasıyla yüzey görüntüleri elde edildi ve bu alan üzerinde kare-ortalama-karekök (RMS) değerleri belirlendi. AFM görüntüleri, farklı basınç değerlerine karşılık gelen yüzey görüntüleri, kaplanmamış Ge optik pencereden başlayarak, 3 mTorr, 20 mTorr ve 30 mTorr olacak biçimde Şekil 5.10. ile Şekil 5.16. arasında 2 boyutlu ve 3 boyutu olarak verilmiştir.

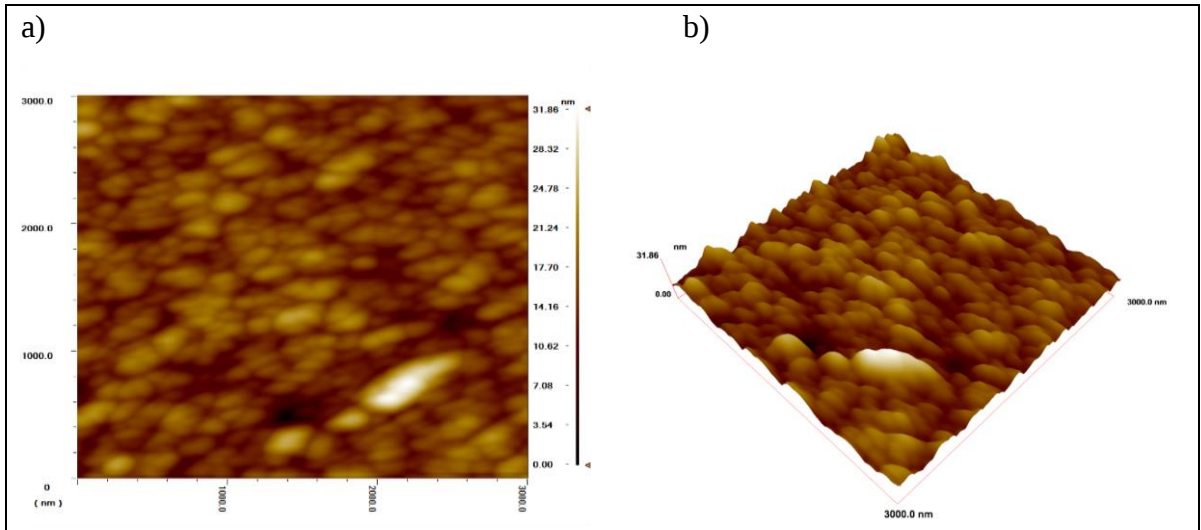


Şekil 5.10. Kaplanmamış Ge optik pencerenin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

3 mTorr basınç altında kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri

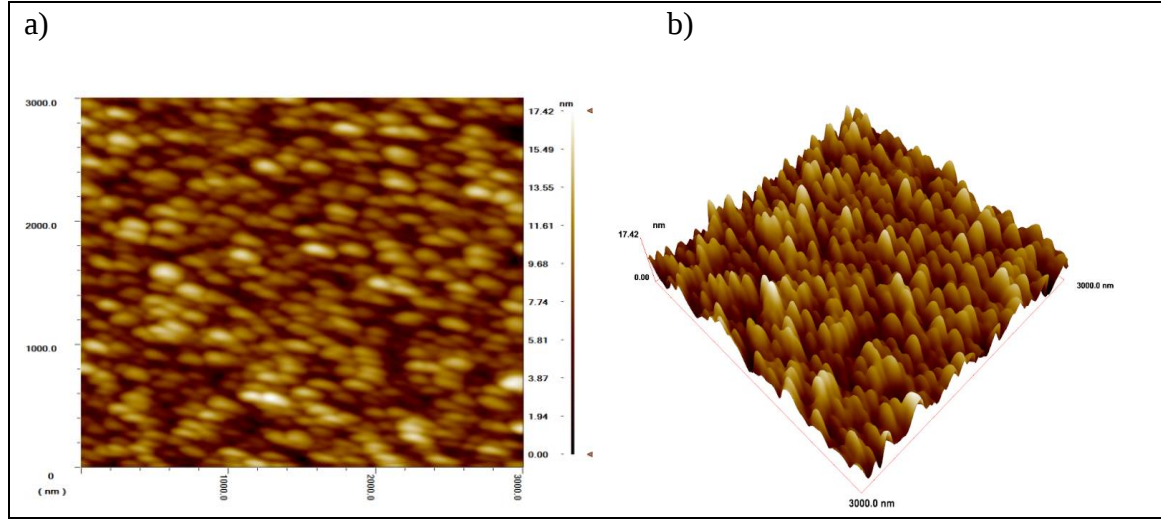


Şekil 5.11. ARC-2 (3 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

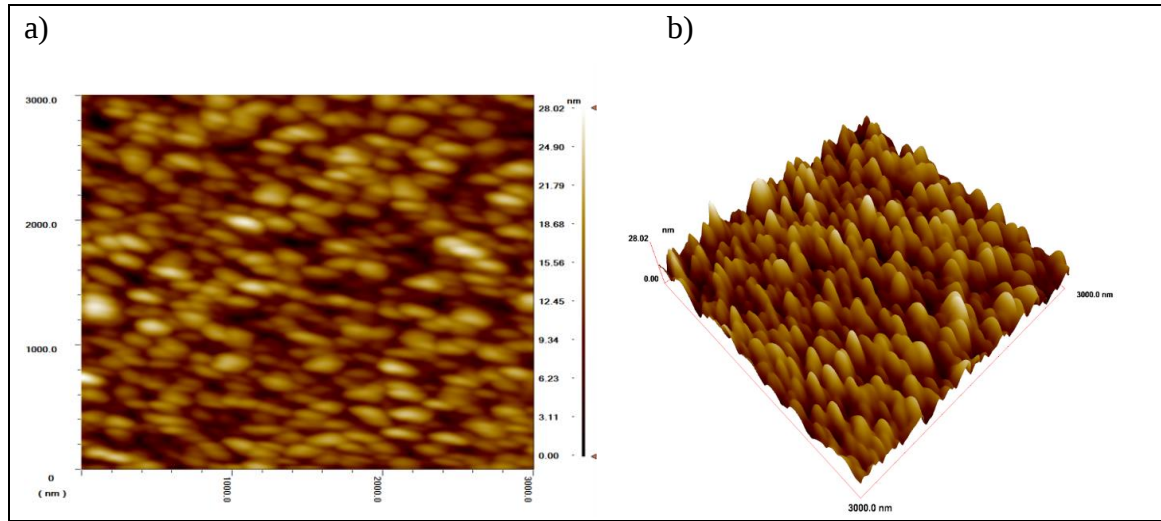


Şekil 5.12. ARC-3 (3 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

20 mTorr basınç altında kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri

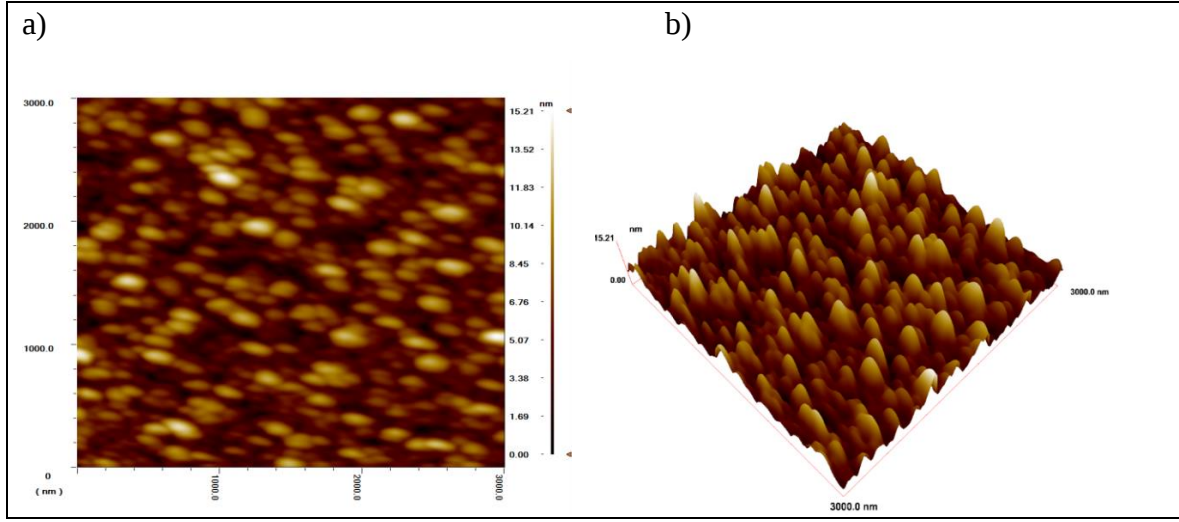


Şekil 5.13. ARC-6 (20 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

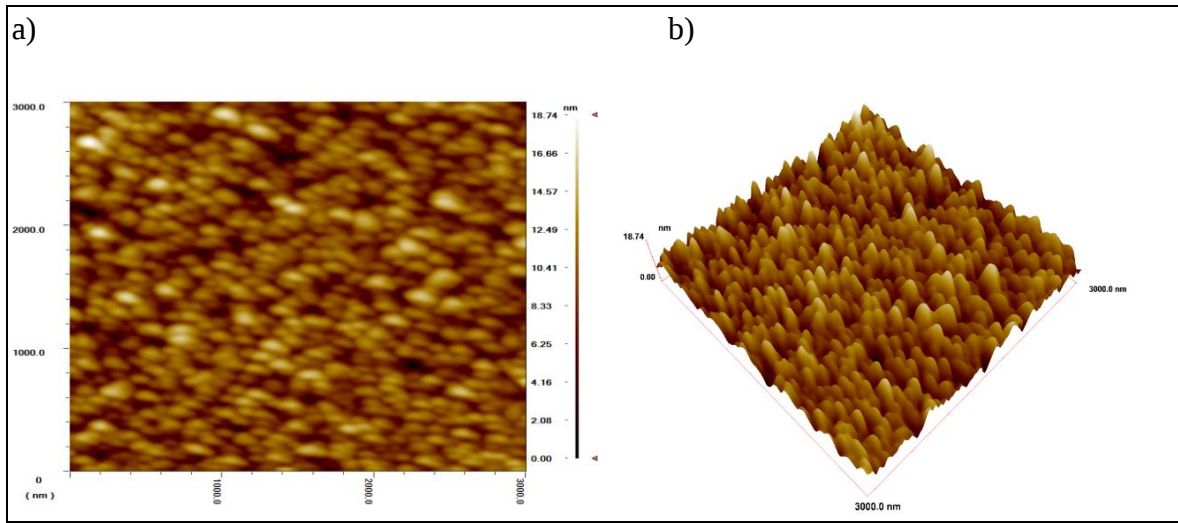


Şekil 5.14. ARC-7 (20 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

30 mTorr basınç altında kaplanmış numunelerin AFM görüntüleri



Şekil 5.15. ARC-8 (30 mTorr basınç) numunesinin AFM) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü



Şekil 5.16. ARC-9 (30 mTorr basınç) numunesinin AFM a) 2D görüntüsü b) 3D görüntüsü

Numunelerin, AFM cihazı ile belirlenen yüzey pürüzlülüğünün göstergesi olan RMS değerleri Çizelge 5.4.'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Tek yüzey ZnS ince filmlerin basınç değerlerine göre RMS değerleri

Numune Kodu	Kaplama Basıncı (mTorr)	RMS (nm)
ARC-1	3	1,99
ARC-2	3	1,51
ARC-3	3	3,14
ARC-4	3	1,14
ARC-5	3	3,65
ARC-10	3	2,21
ARC-6	20	2,54
ARC-7	20	4,09
ARC-11	20	2,48
ARC-8	30	2,31
ARC-9	30	2,27
ARC-12	30	2,68

AFM görüntülerinden elde edilen RMS değerleri değerlendirildiklerinde, Ge optik pencere üzerine ZnS ince filmlerinin homojen olarak dağılım gösterdiği anlaşılmaktadır. Ayrıca, ölçüm sonuçlarından 400 nm civarında kalınlığı olan ince filmlerde RMS değerinin düşük basınç değerlerinde yüzey pürüzlülüğüyle de orantılı olarak düşmekte olduğu görülmektedir.

Ge optik pencereler üzerine kaplama parametreleri uygulandığında üretilen ZnS ince filmlerin kristal kalitesi olarak iyi düzeyde ve polikristal olarak büyüdüğü gözlemlendi. Üretilen filmlerin tutunum derecesinin ne düzeyde olduğu ve dayanıklılığının kontrolü için adezyon testleri bulunmaktadır [71]. Bu testlerden en basit yöntem olan yapışkan bant testi film yüzeylerine uygulanmıştır. Bant testi kaplama yapılmış Ge'nin film kaplı yüzeyine endüstriyel olarak kullanılan bir yapışkanın yapıştırılıp üzerine bastırılması ile yapılmıştır. Yüzey üzerindeki bant, anlık bir kuvvet uygulanarak yüzeyden ayrılmıştır. Yüzey deformasyonu ve bant üzerinde ZnS atomlarının bulunup bulunmadığı incelendiğinde saydam olan bant üzerinde, atomların ayırt edilebilir renklerle yüzeye tutunumu ifade edilebilir. Ge üzerine uygulanan bant testi ile ZnS atomlarının tutunum derecesinin ve dayanıklılığının iyi düzeyde olduğu anlaşılmıştır.

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, ZnS yansıma önleyici ince filmler, Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama Ve Araştırma Merkezi bünyesinde yer alan NVTs-500 marka Eş-Püskürtme sistemi kullanılarak, (111) yönelimli n-tipi (Sb-katkılı) Ge optik pencereler üzerine tek yüzey ve çift yüzey, tek katman yansıma önleyici olarak kaplandı. ARC filmleri için püskürtme sistemine, 100 W güç değeri ve 100°C alttaş sıcaklığı uygulandı. Sistem içi basıncın, film kalitesine etkisini incelemek için 3, 20 ve 30 mTorr farklı basınç parametrelerinde ince film kaplamaları yapıldı. Büyütülen ZnS ince filmlerinin film kalınlıkları profilometre ile belirlendikten sonra, yapısal özellikleri için X-ışını kırınımı (XRD), optik geçirgenlik için Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi (FTIR), yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi için Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) kullanılmıştır.

Farklı basınç altında kaplanan ince filmlerin, XRD sistemi ile kırınım desenleri elde edilerek 2θ değerleri belirlendi. Belirlenen 2θ değerlerine karşılık JCPDS-ICDD kartları kullanılarak elde edilen ZnS ince filmlerinin hegzagonal würtzite yapıda (002) yönelimli polikristal olarak büyüdüğü ve ayrıca ZnS'in sahip olduğu (100) yönelimli kübik yapısının da, bazı filmlerde hegzagonal würtzite yapısı ile ikili yapıda büyümüş olduğu gözlemlendi. Numunelerin AFM ölçümleri ile $3 \times 3 \mu\text{m}^2$ 'lik alanın taranmasıyla yüzey görüntüleri elde edilmiş, yüzey özellikleri incelenerek yüzey pürüzlülüğünün ölçüsü olan RMS değerleri her numune için belirlenmiştir. RMS değerleri, basınç değerinin düşmesi ile azalmakta olduğu görülmüştür ve ARC-4 numunesinin 1,14 nm'lik RMS değeriyle en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Üretilen ZnS ince filmlerin dayanıklılığının ve yüzeye tutunum derecesinin bir göstergesi olan yapışkan bant testi uygulanmıştır. Yapışma test sonuçlarında, film yüzeyinde ve bant üzerinde görünür olarak ZnS atomlarında kopma olmadığı gözlemlenmiştir. Bu gözlem sonucunda numune yüzeyine ZnS atomlarının tutunum derecesinin ve film yüzeyi üzerinde dayanıklılığının iyi düzeyde olduğu anlaşılmaktadır.

Tek yüzey ve çift yüzey olarak Ge optik pencere üzerine kaplanan ZnS ince filmlerinin optik geçirgenlikleri incelenmiştir. 3-5 μm dalgaboyu aralığında, değişen basınç farklarına göre 3 mTorr basınç ile elde edilen filmlerin, tek yüzey kaplamalarda %67, çift yüzey için %98 optik geçirgenlik değerleri tek dalga boyu için maksimum değerler olarak

belirlenmiştir. Diğer atmosferik pencere bölgesi olan 8-12 μm dalgaboyu aralığı çalışmaları, tek yüzey kaplama için %61, çift yüzey kaplama için %98 değerinde tek dalgaboyu için maksimum optik geçirgenlik elde edilmiştir. Üretilen ZnS ince filmlerinde görülen geniş dalgaboyu aralığında optik geçirgenlik, çok katman yansıma önleyici ince film çalışmaları ile maksimum optik geçirgenliğin yanı sıra geniş bant optik geçirgenlik elde edilebileceği anlaşılmıştır.

Sonuç olarak, Kızılötesi görüntüleme sistemlerinde kullanılan Ge mercek veya optik pencerenin her iki yüzeyine, istenilen dalgaboyu aralığına göre belirlenen kalınlık değerlerinde ince film kaplama yapıldığında optik geçirgenliğin tek dalgaboyu için %98 civarında elde edilebildiği görüldü. Ge optik pencerelerin üzerine geliştirilen yansıma önleyici kaplamaların sonucunda 3-5 ve 8-12 μm bölgeleri için KÖ uygulamalarında kullanılabilir olduğu değerlendirilmektedir.

KAYNAKLAR

1. Donlon, C.J. (2001). IR Radiometers A2 - Steele, John H, in *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Second Edition). Academic Press, Oxford, 319-330.
2. Çalışan, M. ve Türkoğlu, İ. (2011). *Termal kameralar ve uygulamaları*. Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu, Fırat Üniversitesi, Elazığ.
3. Depuydt, B., M. De Jonghe, W. De Baets, I. Romandic, A. Theuwis, C. Quaeyhaegens, C. Deguet, T. Akatsu, ve F. Letertre (2007). Chapter 1 - *Germanium Materials, in Germanium-Based Technologies*. Elsevier, Oxford, 11-I.
4. Gade, R.ve Moeslund, T.B. (2014). Thermal Cameras and Applications: a Survey. *Machine Vision and Applications*, 25(1), 245-262.
5. Kala, M.B., Bandyopadhyay, P.K. and Nautiyal B.B. (2012). Thorium free antireflection coating in MWIR region on Silicon optics. *Infrared Physics & Technology*, 55(5), 409-411.
6. Chen, H. T., Zhou, J., O'Hara, J. F., Chen, F., Azad, A. K. and Taylor, A. J. (2010). Antireflection coating using metamaterials and identification of its mechanism. *Physical Review Letters*, 105(7), 073901.
7. Jilani, A., Abdel-wahab, M. S. and Hammad, A. H. (2017). Advance Deposition Techniques for Thin Film and Coating, *Modern Technologies for Creating the Thin-film Systems and Coatings*, InTech.
8. Kern, W. (2012). *Thin film processes II. Vol. 2*. New York: Academic Press.
9. Sönmezoğlu, S., Koç, M. ve Akin, S. (2012). İnce Film Üretim Teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(5), 389-401.
10. Wasa, K., Kitabatake, M. and Adachi, H. (2004). *Thin film materials technology: sputtering of control compound materials*. Japan: Springer Science & Business Media.
11. Harris, D.C. (1998). Durable 3–5 μm transmitting infrared window materials. *Infrared Physics & Technology*, 39(4), 185-201.
12. Kala, M.B., Bandyopadhyay, P. and Nautiyal, B. (2012). Thorium free antireflection coating in MWIR region on Silicon optics. *Infrared Physics & Technology*, 55(5), 409-411.
13. Brown, R.A. (1988). Theory of transport processes in single crystal growth from the melt. *AIChE Journal*, 34(6), 881-911.
14. Ostrach, S. (1983). Transport phenomena in materials processing. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 404(1), 256-268.
15. Tekin, B. (2011). *Katkılı Yarı İletken Alaşımların Yapısal Analizlerinin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

16. Teal, G. K., Sparks, M., & Buehler, E. (1951). Growth of germanium single crystals containing p– n junctions. *Physical Review*, 81(4), 637.
17. Hilton, A. R. (1973). Infrared transmitting materials. *Journal of Electronic Materials*, 2(2), 211-225.
18. Claeys, C.ve Simoen, E. (2011). *Germanium-based technologies: from materials to devices*. Amsterdam: Elsevier, 17.
19. Hawkins, G. J. (1998). *Spectral Characterisation of Infrared Optical Materials and Filters*, Doctoral dissertation, University of Reading, England.
20. Üçer, B. (2009). *Design and Production Of Antireflection Coating For Ge, ZnSe and ZnS in 8-12 Micrometer Wavelength Region*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
21. Çat, Y. (2013). *Katkısız ve Katkili (Sb) Ge Tek Kristallerin Büyütülmesi, Yapısal ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3-4.
22. Kınacı, B. (2013). *III-V Grubu Güneş Hücre Yapılarının Epitaksiyel Büyütülmesi ve Karakterizasyonu*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
23. Baran, V. (2013). *Czochralski Tekniğiyle Katkısız ve Sb Katkılı Ge Tek Kristallerinin Büyütülmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
24. Klocek, P. (2017). *Handbook of infrared optical materials*. Florida: CRC Press, 32.
25. Macleod, H.A. (2010). *Thin-Film Optical Filters*. (Fourth ed.), London: CRC Press.
26. Islam, M., Hossain, M., Aliyu, M., Sulaiman, Y., Karim, M., Sopian, K. and Amin, N. (2012). Comparative Study of ZnS Thin Films Grown by Chemical Bath Deposition and Magnetron Sputtering. in *Electrical & Computer Engineering (ICECE), 2012 7th International Conference on*. IEEE.
27. Salih, A.T., Najim, A.A., Muhi, M.A. ve Gbashi, K.R. (2017). Single-Material Multilayer ZnS As Anti-Reflective Coating For Solar Cell Applications. *Optics Communications*, 388, 84-89.
28. Rogalski, A. and Chrzanowski, K. (2002). Infrared devices and techniques. *Optoelectronics Review*, 10(2), 111-136.
29. Nadeem, M., Ahmed, W. and Wasiaq, M. (2005). ZnS thin films—an overview. *Journal of Research Science*, 16, 105-112.
30. Hobbs, D.S. ve MacLeod, B.D. (2005). *Design, Fabrication and Measured Performance of Anti-Reflecting Surface Textures in Infrared Transmitting Materials*. Defense and Security. SPIE. Orlando, Florida
31. Mushtak, A.j. (2009). Design of high efficiency multilayer antireflection coatings for visible and infrared substrates. *Journal of College of Education*, 733-746.

32. Firoozifar, S. A. R., Behjat, A., Kadivar, E., Ghorashi, S. M. B. and Zarandi, M. B. (2011). A study of the optical properties and adhesion of zinc sulfide anti-reflection thin film coated on a germanium substrate. *Applied Surface Science*, 258(2), 818-821.
33. Hwang, D. H., Ahn, J. H., Hui, K. N., San Hui, K. and Son, Y. G. (2012). Structural and optical properties of ZnS thin films deposited by RF magnetron sputtering. *Nanoscale Research Letters*, 7(1), 26.
34. Soykuvvet, H. (2015). *İki Yönlü Yanal Etki Algılayıcı Optik Sistem Tasarımı ve Bu Sistemin Operasyonel Kullanımı ile Işıma Kaynaklarının Konumlarının Bulunması*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
35. Chambouleyron, I. and Martínez, J. (2002). *Optical properties of dielectric and semiconductor thin films*. New York : Elsevier. 593-622.
36. Musset, A. and Thelen, A. (1970). *IV multilayer antireflection coatings*. New York : Elsevier.
37. Eskandar, N. S. (2017). *Investigations on Nitrogen Doped Graphene Synthesized by Modified Chemical Vapor Deposition*, Yüksek Lisans Tezi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği, Koç Üniversitesi, İstanbul.
38. Mattox, D.M. (2010). *Handbook of physical vapor deposition (PVD) processing*. Elsevier, 2-10.
39. Yan, X.-T. and Xu, Y. (2010). *Chemical vapour deposition, an integrated engineering design for advanced materials*. Germany: Springer Science & Business Media, 1-21.
40. Enönlü, E. (2017). *Mikro Manyetik Soğutucularda Kullanılacak Ni-Mn Tabanlı Manyetik İnce Filmlerin Üretimi ve Bunların Yapısal, Manyetik ve Manyetik Soğutma Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
41. Wasa, K. and Hayakawa, S. (1992). *Handbook of sputter deposition technology*. New Jersey: Noyes Publications 177.
42. Çam, E. (2012). *D.C. Magnetron Sputtering Yöntemiyle Bakır Oksit Filmlerin Büyütülmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
43. McClanahan, E. D. and Laegreid, N. (1991). Production of thin films by controlled deposition of sputtered material, in *Sputtering by Particle Bombardment III*. Springer. 339-377.
44. Ot, H. (2015). *Oksijen Basıncının D.C. Magnetron Sputtering Tekniğiyle Büyütülen CuO Filmlerin Optiksel ve Elektriksel Özellikleri Üzerindeki Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
45. Tüzemen, E.Ş. (2007). *ZnO İnce Filmlerinin Eldesi Ve Aygıt Üretimi İçin Parametrelerinin Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

46. Hasenkamp, W. (2013). Flexible Micro/Nanofabricated Systems for Medical Devices and Implants. Doktora Tezi, Fen, Teknoloji ve Mühendislik Fakültesi, İsviçre.
47. Ağırseven, O. (2011). *Silisyum Karbonitrür İnce Filmlerin Reaktif Doğru Akım Manyetik Alanda Siçratma Yöntemiyle Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
48. Salari, M.A. (2012). *RF Magnetron Püskürtme Yöntemi İle ZnO:AL₂O₃ İnce Filmlerin Üretimi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
49. Neggers, I.J. and Bergshoeff, N. (2011). Microstructure analysis of PVD deposited thin copper films. 9.
50. Şeker, S. (2017). *Magnetron Siçratma Yöntemi ile Tekstil Yüzeylerine İnce Film Oluşturarak Antibakteriyel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
51. Akın, N. (2015). *ZnO Tabanlı UV Dedektör Geliştirilmesi ve Prototip Üretimi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
52. Yıldırım, E. (2013). *ZnSe Yarıiletken İnce Filmlerinin Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin.
53. Alaydın, B.Ö. (2014). *Ge üzerine büyütülen GaAs yapısının X-ışını kırınım yöntemi ile incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sivas.
54. Whittig, L. and Allardice, W. (1986). X-ray diffraction techniques. *Methods of Soil Analysis, Part 1—Physical and Mineralogical Methods, (methodsofsoilan1)*, America: Soil Science Society of America, 331-362.
55. Kurtuluş, G. (2014). *p-Si, GaAs ve Ge Alttaşlar Üzerine Al: ZnO Filmlerin Büyütülmesi; Yapısal, Optik ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
56. İnternet Grossman Lisa Focus: Electric Field from a Built-In Flex. Phys. Rev. Focus. URL:<http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fphysics.aps.org%2Fstory%2Fv28%2Fst5&date=2018-05-03> Son Erişim Tarihi: 03.05.2018.
57. Den Boef, A. (1990). Preparation of magnetic tips for a scanning force microscope. *Applied physics letters*, 56(20), 2045-2047.
58. Kokkokoğlu, M. (2010). *RF Saçtırma Yöntemiyle Üretilen Alüminyum Nitrit (AlN) İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri*. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
59. Şener, D. (2006). *Sol-Gel Yöntemiyle Hazırlanan Metal Oksit İnce Filmlerin Elektriksel, Yapısal ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

60. Clauss, W., Zhang, J., Bergeron, D. and Johnson, A. (1999). Application and calibration of a quartz needle sensor for high resolution scanning force microscopy. *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, 17(4), 1309-1312.
61. Özkök, Y. (2017). *Medikal Uygulamalar İçin Reaktif Püskürtme Yöntemi ile Titanyum Nitrür (TiN) ve Titanyum Oksinitrür (TiN_xO_y) İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
62. Ünal, D. (2012). *Silisyum Tabanlı Nanokristallerin Yapısal ve Optiksel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırşehir.
63. Stuart, B. (2005). *Infrared spectroscopy*. New Jersey: John Wiley & Sons.
64. Palmer, S.J., Reddy, B.J. and Frost, R.L. (2009). Characterisation of red mud by UV–vis–NIR spectroscopy. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(5), 1814-1818.
65. Maklakov, L.I. and Suchkova, G.G. (2008). Quantum chemistry studies of far-infrared spectra of aromatic urethanes. *Spectrochimica Acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 71(1), 238-244.
66. McKellar, A. and Appadoo, D. (2008). High-resolution synchrotron far-infrared spectroscopy of acrolein: The vibrational levels below 700 cm⁻¹. *Journal of Molecular Spectroscopy*, 250(2), 106-113.
67. Bacsik, Z., Mink, J. and Keresztury, G. (2004). FTIR spectroscopy of the atmosphere. I. Principles and methods. *Applied Spectroscopy Reviews*, 39(3), 295-363.
68. Berthomieu, C. and Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis Research*, 101(2), 157-170.
69. Başköse, C. (2016). *Yansıtıcı ve Yansıma Önleyici Optik İnce Film Malzemelerinin Üretimi Analiz ve Test Süreçleri*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
70. Laguarda, F., Al-Khatib, I. and Artigas, R. (1998). Laser profiler based on the depth from focus principle. *Journal of Optics*, 29(3), 236.
71. Valli, J. (1986). A review of adhesion test methods for thin hard coatings. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces and Films*, 4(6), 3007-3014.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KARACA, Abdullah
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 12.05.1990, K.Maraş
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (542) 566 62 34
 e-mail : abduallahkaraca27@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi / Fizik	Devam ediyor
Lisans	Karadeniz Teknik Üniversitesi /Fizik	2014
Lise	Bayraktar Lisesi	2009

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2018-Halen	Karadeniz Teknik Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2016-2018	Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi	Bursiyer

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. T.ASAR, A.KARACA, S.SAĞLAM, S.ÖZÇELİK (2017). “*The Improvement of the optical transmission on the Sb-doped Ge optical window with ZnS ARC.*” Italian Crystal Growth 2017 (Özet Bildiri/Poster), Milano, İtalya.
2. Abdullah KARACA, Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK (2017) “*The Development of Antireflection Film on Germanium Optical Windows.*” Turkish Physical Society 33. International Physics Congress (Özet Bildiri/Poster), Muğla, Türkiye.
3. Abdullah KARACA, Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK (2017). “*Germanium Tek Kristal Optik Pencere Üzerine Yansıma Önleyici İnce Film Geliştirilmesi.*” Fotonik 2017 (Özet Bildiri/Poster), İstanbul, Türkiye.

4. Abdullah KARACA, Meltem DÖNMEZ, Gürkan KURTULUŞ, Alp Deniz YAMAN Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK (2017). “8-12 mikrometre Dalgaboyu Aralığı İçin Germanyum Optik Pencere Üzerine Yansıma Önleyici İnce Film Geliştirilmesi.” 23. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı (Özet Bildiri/Poster), Ankara, Türkiye.
5. Abdullah KARACA, Yunus ÇAT, Veysel BARAN, Semran SAĞLAM, Süleyman ÖZÇELİK (2018) “MWIR bölgesi için Yansıma Önleyici İnce Film Kaplama/ Anti-Reflection Thin Film Coating for MWIR Region.” I. Işık ve Işık Temelli Teknolojiler Çalıştayı, (Özet Bildiri/Poster), Ankara, Türkiye.

Hobiler

Yüzme, Yürüyüş, Dağcılık, Balık Tutmak, Kalem Koleksiyonu



GAZİ GELECEKTİR..