



**ORTA KIZILÖTESİ ELEKTRO OPTİK UYGULAMALAR
İÇİN GENİŞ BANT ANTI YANSITICI KAPLAMALARIN
TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ**

Adem YENİSOY

**Doktora Tezi
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı
Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN
2019
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**ORTA KIZILÖTESİ ELEKTRO OPTİK UYGULAMALAR İÇİN
GENİŞ BANT ANTI YANSITICI KAPLAMALARIN TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Adem YENİSOY

**FİZİK ANABİLİM DALI
Katıhal Fiziği Bilim Dalı**

**ERZURUM
2019**

Her hakkı saklıdır



**ORTA KIZILÖTESİ ELEKTRO OPTİK UYGULAMALAR İÇİN GENİŞ
BANT ANTI YANSITICI KAPLAMALARIN TASARIMI VE
GELİŞTİRİLMESİ**

Prof.Dr. Sebahattin TÜZEMEN danışmanlığında, Adem YENİSOY tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/04/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.






Başkan: Prof.Dr. Sebahattin TÜZEMEN

Üye : Prof.Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Üye : Prof.Dr. Tevhid KARACALI

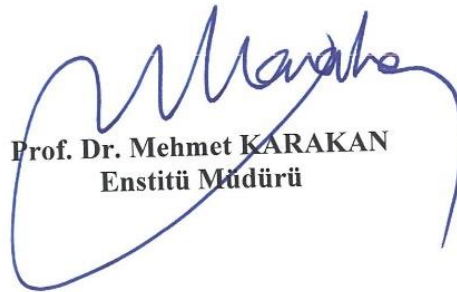
Üye : Prof.Dr. Rıdvan KARAPINAR

Üye : Doç.Dr. Ömer Faruk YÜKSEL

İmza : 
İmza : 
İmza : 
İmza : 
İmza : 

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu'nun **18.04/2019** tarih ve **...17.../...17.....** nolu kararı ile onaylanmıştır.


Prof. Dr. Mehmet KARAKAN
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Doktora Tezi

ORTA KIZILÖTESİ ELEKTRO OPTİK UYGULAMALAR İÇİN GENİŞ BANT ANTI YANSITICI KAPLAMALARIN TASARIMI VE GELİŞTİRİLMESİ

Adem YENİSOY

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN

Orta kızılötesi spektrumda çalışan elektro optik sistemlerde yer alan Kalsiyum Florür, Germanyum, Silisyum ve Çinko Sülfür tabanlı geçirgen optikler için geniş bant aralıklı ve ortalama yansıma değeri bant boyunca $R < \%0,3$ olan çok katmanlı anti yansıtıcı kaplamalar OptiLayer yazılımının da yardımıyla modellenmiştir. Tasarım çalışmalarında ihtiyaç duyulan alttaş optik parametreleri, çalışmalarda kullanılan şahit numunelerin MWIR bölgede ki spektral ölçümleri ve OptiChar yazılımının yardımıyla modellenmiştir. Çok katmanlı anti yansıtıcı kaplamaların tasarımı için ihtiyaç duyulan yüksek ve düşük kırılma indisli Germanyum ve Alüminyum Oksit malzemeleri optik parametreleri modellenen şahit numuneler üzerine optimize kaplama parametreleri ile kaplanarak spektral ölçümleri alınmıştır. Alınan spektral ölçümler ve OptiChar yazılımının da yardımıyla malzemelerin kırılma indis dağılımları dalga boyuna bağlı olarak modellenmiştir. Modelleme çalışmaları sonrası Kalsiyum Florür, Germanyum, Silisyum ve Çinko Sülfür malzemeler üzerine çok katmanlı anti yansıtıcı kaplamalar tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan kaplamalar farklı alttaşlar üzerine kaplandıktan sonra MWIR bölgede yapılan spektral ölçümler ve OptiRe yazılımının da yardımıyla çok katmanlı hata analizleri yapılarak kaplama prosesi aktif optimizasyon yöntemi ile geliştirilmiştir. Geliştirilen anti yansıtıcı kaplamalar MWIR bölgede çalışan elektro optik sistemlerde yer alan hassas optik bileşenlerin yansımaya bağlı optik performans kayıplarını önemli ölçüde azaltacak niteliktedirler. Geliştirilen ARC kaplamalar; geniş bant olarak tanımlanan 3.4–4.8 μm aralığı boyunca ortalama yansıma değerinin asgari katman kalınlığı ile $\%0,3$ 'ün altında olması ve MWIR optiklerinin üretildiği Kalsiyum Florür (CaF_2), Germanyum (Ge), Silisyum (Si) ve Çinko Sülfür (ZnS) olmak üzere 4 ana malzeme üzerine aynı yüksek verim ile geliştirilmiş olmalarından dolayı literatür de yer alacak olan ilk çalışma niteliğindedir.

2019, 138 sayfa

Anahtar Kelimeler: Elektro optik sistemler, Hassas optik, Optik kaplama, Anti yansıtıcı kaplamalar, MWIR

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

DESIGN AND DEVELOPMENT OF BROAD BAND ANTI REFLECTIVE COATINGS FOR MID WAVE INFRARED ELECTRO OPTICAL APPLICATIONS

Adem YENİSOY

Ataturk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
Solid State Physics

Supervisor: Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN

Broad band multi-layer anti reflective coatings on calcium fluoride, germanium, silicon and zinc sulfide for transmissive optics of mid wave infrared electro optical systems were designed with average reflection less than 0,3% with the use of OptiLayer software. Optical parameters of substrates required for design processes were modelled by OptiChar software in which spectral measurements of witness samples at MWIR region was used. Germanium and Aluminum Oxide thin films as high and low index materials respectively for multilayer anti reflective coatings were deposited on witness samples by optimized process parameters and their spectral measurements were performed for MWIR region. Refractive index of these materials were also modeled in OptiChar software by using spectral measurement data of layers deposited on witness samples which has already modeled. Based on modeling studies for both witness samples and layers, multi-layer anti-reflective design for calcium fluoride, germanium, silicon and zinc sulfide was designed. After coating layers obtained from design, coating processes for each design was actively developed with the help of random error analysis at OptiRe by using spectral measurement of multi-layers at MWIR region. Anti-reflective coatings which were developed in this work present promising results to reduce optical performance losses caused by reflection at the surface of optics used in electro optical systems at MWIR region. This study is the first of its kind with respect to the high efficiency of average reflection which is less than 0,3% in whole interval between 3,4 and 4,8 μm spectral region for calcium fluoride (CaF_2), germanium (Ge), silicon (Si) and zinc sulfide (ZnS) at the same time.

2019, 138 pages

Keywords: Electro-optical systems, Precision Optics, Optical coating, Anti reflective coatings, MWIR

TEŞEKKÜR

Doktora tezi olarak sunduğum bu alışma Atatürk Üniversitesi ile TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü'nün sahip olduğu imkânların katkılarıyla hazırlanmıştır.

Öncelikli olarak doktora çalışmalarım süresince beni teşvik eden, yardımını, iyi niyetini, sabrını ve desteğini bir an olsun esirgemeyen tez danışmanım ve değerli hocam Sayın Prof. Dr. Sebahattin TÜZEMEN'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim ve tasarım çalışmalarımda bir araya geldikçe veya her iletişim kurdukça değerli önerilerinden ve paylaşımlarından büyük fayda gördüğüm ve ilham aldığım Sayın Prof. Dr. Alexander TIKHONRAVOV ve Sayın Dr. Michael TRUBETSKOV'a teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım esnasında yaşadığım teknik problemlerin çözümü konusunda desteğini, fikir ve önerilerini paylaşan Bühler AG den Detlef SCHAEFER, Rolf STANDER ve Mehmet URSAVAŐ'a çok teşekkür ederim.

Bir araya geldiğimiz her fırsatta gerçekleştirdiğimiz tartışma ve fikir alışverişlerinden büyük fayda gördüğüm Sayın Doç. Dr. Cahit YEŐİLYAPRAK, Sayın Doç. Dr. Tahir ÇOLAKOĞLU, Hacı BATMAN ve Yusuf KASAP'a çok teşekkür ediyorum.

Bir araya getirmek ve bir arada tutabilmek için büyük çaba harcadığım, varlıklarından keyif ve enerji aldığım değerli ekip ve çalışma arkadaşlarım Ahmet ÖZBEK, Ayşenur EROĞLU, Ceyda ÖZDEMİR, Kemal RÜZGAR, İlker SEZEN, M. Halit SANCAR, Mustafa KILINÇ ve Yalçın DOKUDUR'a teşekkür ediyorum.

Bu çalışmanın ortaya çıkması için sağladığı değerli katkılardan dolayı Arzu ÖNAL'a çok teşekkür ediyorum.

Bazı insanlar vardır sağladıkları katkılar çalışmalarınızla sınırlı kalmaz, hayatınıza da yansır. Onlardan ikisi M. Kurtuluş ABAK ve H. Yasin ERGUNT'a teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımdaki her iniş çıkışta ve bunların getirisi olan her sonuçta koşulsuz desteklerini esirgemeyen geniş ailemde başta Annem, Babam ve kardeşlerim Gogo ile Erdem olmak üzere herkese teşekkürlerimi sunuyorum.

Son olarak uyandıkları her yeni günü kendileri için bir öncekinden daha güzel yapmayı amaç edinerek çalıştığım eşim ve en iyi arkadaşım Zehra, oğlum A. Fazıl ve kızım Ahsen'e varlıklarıyla hayatımı daha anlamlı hale getirdikleri için teşekkür ediyorum.

Adem YENİSOY

Nisan, 2019

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Elektromanyetik Spektrum.....	1
1.2. Elektro Optik Sistemler	5
1.3. Optik Bileşenler.....	7
1.4. Kızılötesi Spektrum.....	9
1.5. Tezin Kapsamı.....	11
2. KURAMSAL TEMELLER	13
2.1. Optik Kaplamalar	13
2.1.1. Yansıtıcı kaplamalar	13
2.1.2. Soğuk ve sıcak ayna kaplamaları	15
2.1.3. Demet ayırıcı kaplamalar	16
2.1.4. Bant geçirgen filtreler.....	16
2.1.5. Anti yansıtıcı kaplamalar.....	17
2.2. Anti Yansıtıcı Kaplamaların Çalışma Prensibi	18
2.3. Çok Katmanlı Sistemlerin Temelleri.....	20
2.3.1. Fresnel denklemleri	21
2.3.2. Yansıma ve geçirgenlik	25
2.3.3. Matris metodu.....	31
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	37
3.1. IR Malzemeler	37
3.1.1. Kalsiyum florür (CaF ₂).....	38
3.1.2. Germanyum (Ge).....	39
3.1.3. Silisyum (Si).....	40

3.1.4. Çinko sülfür (ZnS).....	42
3.2. İnce Film Tasarım Yazılımı	44
3.3. Optik Kaplama Teknolojisi	51
3.4. Optik Metroloji.....	56
3.4.1. Fizeau interferometresi.....	56
3.4.2. Temassız yüzey profilometresi.....	58
3.4.3. Spektrometre	59
3.4.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre - FTIR.....	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	63
4.1. Giriş	63
4.2. Şahit Numune Karakterizasyonu.....	64
4.2.1. CaF ₂ karakterizasyonu.....	65
4.2.2. Ge karakterizasyonu	67
4.2.3. Si karakterizasyonu	70
4.2.4. ZnS karakterizasyonu	73
4.3. Tek Katman Optimizasyonu.....	76
4.3.1. Ge optimizasyonu.....	77
4.3.2. Al ₂ O ₃ optimizasyonu	86
4.4. MWIR ARC Kaplamaların Geliştirilmesi.....	98
4.4.1. CaF ₂ MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi.....	99
4.4.2. Ge MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi	106
4.4.3. Si MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi	113
4.4.4. ZnS MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi.....	121
5. TARTIŞMA ve SONUÇ.....	127
5.1. CaF ₂ ARC Sonuçları	128
5.2. Ge ARC Sonuçları.....	129
5.3. Si ARC Sonuçları	131
5.4. ZnS ARC Sonuçları.....	132
5.5. Sonuçların Değerlendirilmesi.....	133
KAYNAKLAR	135
ÖZGEÇMİŞ	139

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

\vec{B}	Manyetik alan
\vec{E}	Elektriksel alan
A	Soğurma
A(0)	Airy Fonksiyonu
Ag	Gümüş
Ar	Argon
C	Santigrat
c	Işık Hızı
CaF₂	Kalsiyum Florür
cm⁻¹	Dalga sayısı
E	Enerji
E_v	Elektron volt cinsinden enerji
F	Finesse katsayısı
f	Işığın Frekansı
Ge	Germanyum
h	Planck Sabiti
Hz	Hertz
I	Aydınlanma şiddeti
K	Kelvin
MgF₂	Magnezyum Florür
n	Kırılma İndisi
n₀	Dış ortam kırılma indisi
n_H	Yüksek Kırılma İndisli Malzeme
n_L	Düşük Kırılma İndisli Malzeme
nm	Nanometre
n_s	Altaş kırılma indisi

\emptyset	Kayan faz açısı
O_2	Oksijen
PV	Tepeden vadiye
R	Yansıma
r	Dalga pozisyonu
rms	Mutlak kök kare
Si	Silisyum
T	Sıcaklık
T	Geçirgenlik
t	kalınlık, zaman
TE	Enine elektrik
TM	Enine manyetik
ZnS	Çinko Sülfür
Δ	Faz kayması
θ	Dalganın yüzeye geliş açısı
λ	Dalgaboyu
ω	Dalga açısal frekansı
ϵ	Dielektrik sabiti
μ	Manyetik alan geçirgenliği
μm	Mikro metre

Kısaltmalar

APRS	İleri plazma destekli reaktif saçtırma
ARC	Anti yansıtıcı kaplama
CTE	Termal genleşme katsayısı
CVD	Kimyasal fazdan buhar biriktirme
EMS	Elektromanyetik spektrum
EO	Elektro optik
EOS	Elektro optik sistemler
GPS	Coğrafik pozisyonlama sistemi

IAD	İyon destekli biriktirme
IBS	İyon demeti ile saçırma
IR	Kızılötesi spektrum
LWIR	Uzak kızılötesi
MCT	Cıva Kadmiyum Tellür
MF	Kök Fonksiyonu
MWIR	Orta kızılötesi
OMS	Optik kalınlık izleme sistemi
OT	Optik Kalınlık
PVD	Fiziksel fazdan buhar biriktirme
QCM	Kuvars kristal mikro balans
QWOT	Çeyrek dalga boyuna karşılık gelen optik kalınlık
ROIC	Detektöre entegre okuma devresi
SWIR	Yakın kızılötesi
UV	Morötesi spektrum
VIS	Görünür bölge

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Herschel'in kızılötesi radyasyonu keşif çalışması portresi (sol) ve deney şematığı (sağ).....	2
Şekil 1.2. Elektromanyetik spektrum.....	3
Şekil 1.3. Görünür ve kızılötesi bölge teleskobu (sol) ve kızılötesi arayıcı füze başlığı (sağ)	5
Şekil 1.4. Elektro optik bir sistemi oluşturan alt birimler.....	6
Şekil 1.5. Elektro optik sistemlerde kullanılan optik bileşenler	6
Şekil 1.6. Elektro optik sistemlerde kullanılan görünür (sol) ve IR (sağ) detektör dizgileri.....	7
Şekil 1.7. Yansıtıcı aynalar (sağ), geçirgen lensler (orta) ve demet ayırıcılar.....	8
Şekil 1.8. Atmosferin geçirgen olduğu IR pencereler.....	10
Şekil 2.1. Ag yansıtıcı kaplama	14
Şekil 2.2. Çok katmanlı dielektrik ayna.....	14
Şekil 2.3. Soğuk ayna kaplaması	15
Şekil 2.4. Sıcak ayna kaplaması.....	15
Şekil 2.5. Demet ayırıcı kaplama.....	16
Şekil 2.6. Görünür bölge bant geçirgen filtre	17
Şekil 2.7. Malzeme yüzeylerinde oluşan Fresnel yansımaları.....	17
Şekil 2.8. Tek dalgaboyu ARC kaplama.....	18
Şekil 2.9. Yıkıcı girişim ile yansıyan ışığın sönümlenmesi.....	19
Şekil 2.10. Yansıma yapan demetler arası girişim.....	28
Şekil 2.11. Ortam geçiş noktalarında TE dalga modu	31
Şekil 3.1. IR bölgede kullanılan optik malzemeler.....	37
Şekil 3.2. CaF_2 kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı	38
Şekil 3.3. MWIR bölgede CaF_2 için yansıma ve geçirgenlik spektrumları.....	39
Şekil 3.4. Ge kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı.....	39
Şekil 3.5. MWIR bölgede Ge için yansıma ve geçirgenlik spektrumları	40
Şekil 3.6. Si kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı	41
Şekil 3.7. MWIR bölgede Si için yansıma ve geçirgenlik spektrumları.....	41

Şekil 3.8. ZnS kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı	42
Şekil 3.9. MWIR bölgede ZnS için yansıma ve geçirgenlik spektrumları	43
Şekil 3.10. MWIR ARC kaplamaların geliştirildiği şahit numuneler.....	43
Şekil 3.11. MWIR ARC kaplamalarda kullanılan Al ₂ O ₃ (sol) ve Ge (sağ).....	44
Şekil 3.12. OptiLayer tasarım modülleri. OptiLayer (üst), OptiChar (orta) ve OptiRe (alt).....	45
Şekil 3.13. OptiLayer da demet ayırıcı tasarımı için spektral davranış tanımlaması	46
Şekil 3.14. Demet ayırıcı için kullanılacak alttaşın tanımlanması.....	47
Şekil 3.15. Demet ayırıcı için kullanılacak katman malzemelerinin tanımlanması.....	47
Şekil 3.16. Modelleme yönteminin belirlenmesi	48
Şekil 3.17. Hedef ile tasarım arası farklılık derecesinin belirlenmesi	48
Şekil 3.18. Tasarım ile oluşan kaplama katman sayısı	49
Şekil 3.19. OptiChar modülü ile numune ve tek katman modellemesi	50
Şekil 3.20. OptiRe modülü ile çok katman hata analizi.....	51
Şekil 3.21. IBS (sol) ve APRS (sağ) teknolojilerinin temel çalışma şekilleri	52
Şekil 3.22. IAD teknolojisinin temel çalışma şekli	53
Şekil 3.23. MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan IAD sistemi.....	54
Şekil 3.24. MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan IAD sisteminin proses haznesi.....	55
Şekil 3.25. Fizeau İnterferometresinin çalışma prensibi.....	57
Şekil 3.26. Çalışmalarda kullanılan Fizeau interferometresi	58
Şekil 3.27. Çalışmalarda kullanılan temassız yüzey profilometresi	59
Şekil 3.28. Spektrometrenin içyapısı	60
Şekil 3.29. Çalışmalarda kullanılan spektrometre	61
Şekil 3.30. Çalışmalarda kullanılan FTIR ölçüm sistemi	62
Şekil 4.1. CaF ₂ şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü	65
Şekil 4.2. CaF ₂ şahit numune yüzey form hatası ölçümü	66
Şekil 4.3. CaF ₂ şahit numune yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	66
Şekil 4.4. CaF ₂ şahit numuneye ait kırılma indisi dağılımlarının karşılaştırılması	67
Şekil 4.5. Ge şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü	68
Şekil 4.6. Ge şahit numune yüzey form hatası ölçümü	68
Şekil 4.7. Ge şahit numune yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	69

Şekil 4.8. Ge şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması.....	70
Şekil 4.9. Si şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü.....	71
Şekil 4.10. Si şahit numune yüzey form hatası ölçümü.....	71
Şekil 4.11. Si şahit numune yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	72
Şekil 4.12. Si şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması	73
Şekil 4.13. ZnS şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü	74
Şekil 4.14. ZnS şahit numune yüzey form hatası ölçümü	74
Şekil 4.15. ZnS şahit numune yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	75
Şekil 4.16. ZnS şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması.....	76
Şekil 4.17. Kalınlık optimizasyonu için test parçalarının hazırlanışı	78
Şekil 4.18. Ge kalınlık optimizasyon ölçümü.....	80
Şekil 4.19. CaF ₂ üzeri Ge filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	81
Şekil 4.20. CaF ₂ üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı	82
Şekil 4.21. Si üzeri Ge filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	83
Şekil 4.22. Si üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı.....	84
Şekil 4.23. ZnS üzeri Ge filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	84
Şekil 4.24. ZnS üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı.....	85
Şekil 4.25. Ge filmin CaF ₂ , Si ve ZnS üzeri MWIR bölgede kırılma indis dağılımları	86
Şekil 4.26. Al ₂ O ₃ kalınlık optimizasyon ölçümü.....	89
Şekil 4.27. CaF ₂ üzeri Al ₂ O ₃ filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	90
Şekil 4.28. CaF ₂ üzeri Al ₂ O ₃ filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı	91
Şekil 4.29. Ge üzeri Al ₂ O ₃ filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	92
Şekil 4.30. Ge üzeri Al ₂ O ₃ filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı.....	93
Şekil 4.31. Si üzeri Al ₂ O ₃ filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	93
Şekil 4.32. Si üzeri Al ₂ O ₃ filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı.....	94

Şekil 4.33. ZnS üzeri Al ₂ O ₃ filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri.....	95
Şekil 4.34. ZnS üzeri Al ₂ O ₃ filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı.....	96
Şekil 4.35. Al ₂ O ₃ filmin CaF ₂ , Ge, Si ve ZnS üzeri MWIR bölgede kırılma indis dağılımları	97
Şekil 4.36. B 270 üzeri Al ₂ O ₃ filmin 400–1000 nm arası kırılma indis dağılımı.....	98
Şekil 4.37. CaF ₂ üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları.....	100
Şekil 4.38. 1. aşama CaF ₂ üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	102
Şekil 4.39. CaF ₂ üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri	103
Şekil 4.40. 2. aşama CaF ₂ üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	104
Şekil 4.41. CaF ₂ üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri	105
Şekil 4.42. 3. aşama CaF ₂ üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	105
Şekil 4.43. CaF ₂ üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri	106
Şekil 4.44. Ge üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları.....	107
Şekil 4.45. 1. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	109
Şekil 4.46. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri ...	110
Şekil 4.47. 2. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	110
Şekil 4.48. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri ...	111
Şekil 4.49. 3. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	112
Şekil 4.50. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri ...	113

Şekil 4.51. Si üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları	114
Şekil 4.52. 1. aşama Si üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	116
Şekil 4.53. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri.....	117
Şekil 4.54. 2. aşama Si üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	117
Şekil 4.55. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri.....	118
Şekil 4.56. 3. aşama Si üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	119
Şekil 4.57. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri.....	120
Şekil 4.58. 4. aşama Si üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	120
Şekil 4.59. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri.....	121
Şekil 4.60. ZnS üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları	122
Şekil 4.61. 1. aşama ZnS üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	124
Şekil 4.62. ZnS üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri	125
Şekil 4.63. 2. aşama ZnS üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri	125
Şekil 4.64. ZnS üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri	126
Şekil 5.1. Geliştirilen MWIR ARC kaplamalar	128
Şekil 5.2. CaF ₂ ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansıma davranışları	128
Şekil 5.3. CaF ₂ ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları	129
Şekil 5.4. Ge ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansıma davranışları	130

Şekil 5.5. Ge ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları	130
Şekil 5.6. Si ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansıma davranışları	131
Şekil 5.7. Si ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları	131
Şekil 5.8. ZnS ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansıma davranışları	132
Şekil 5.9. ZnS ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları	133

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Tasarım sonucu ortaya çıkan katman parametreleri	50
Çizelge 3.2. Optik kaplama teknolojilerinin kıyas tablosu	54
Çizelge 4.1. Ge ince film kaplama parametreleri	78
Çizelge 4.2. Al ₂ O ₃ ince film kaplama parametreleri.....	87
Çizelge 4.3. CaF ₂ üzeri MWIR ARC tasarımı	99
Çizelge 4.4. CaF ₂ üzeri MWIR ARC tasarımın spektral yansıma ve geçirgenlik değerleri.....	101
Çizelge 4.5. Ge üzeri MWIR ARC tasarımı	107
Çizelge 4.6. Ge üzeri MWIR ARC tasarımın spektral yansıma ve geçirgenlik değerleri.....	108
Çizelge 4.7. Si üzeri MWIR ARC tasarımı.....	114
Çizelge 4.8. Si üzeri MWIR ARC tasarımın spektral yansıma ve geçirgenlik değerleri.....	115
Çizelge 4.9. ZnS üzeri MWIR ARC tasarımı	122
Çizelge 4.10. ZnS üzeri MWIR ARC tasarımın spektral yansıma ve geçirgenlik değerleri.....	123
Çizelge 5.1. CaF ₂ ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri	129
Çizelge 5.2. Ge ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri	130
Çizelge 5.3. Si ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri	132
Çizelge 5.4. ZnS ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri	133

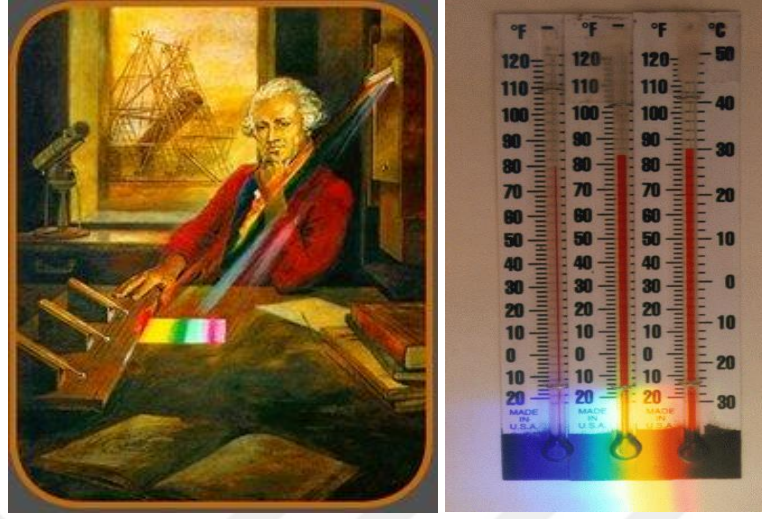
1. GİRİŞ

1.1. Elektromanyetik Spektrum

Elektromanyetik spektrum (EMS); ışığın bilinen tüm dalga boylarını içerisinde barındıran ve 150.000 yıldan fazla geçmişe sahip insanoğlunun son birkaç yüzyılda gerçekleştirdiği bilimsel çalışmalar sonucu keşfettiği ve zamanda milyarlarca yıl öncesine yolculuk yapabilmemizi sağlamasının yanı sıra günlük hayatımızın her anında etkisini hissetmemize olanak sağlayan en önemli olgulardan bir tanesidir.

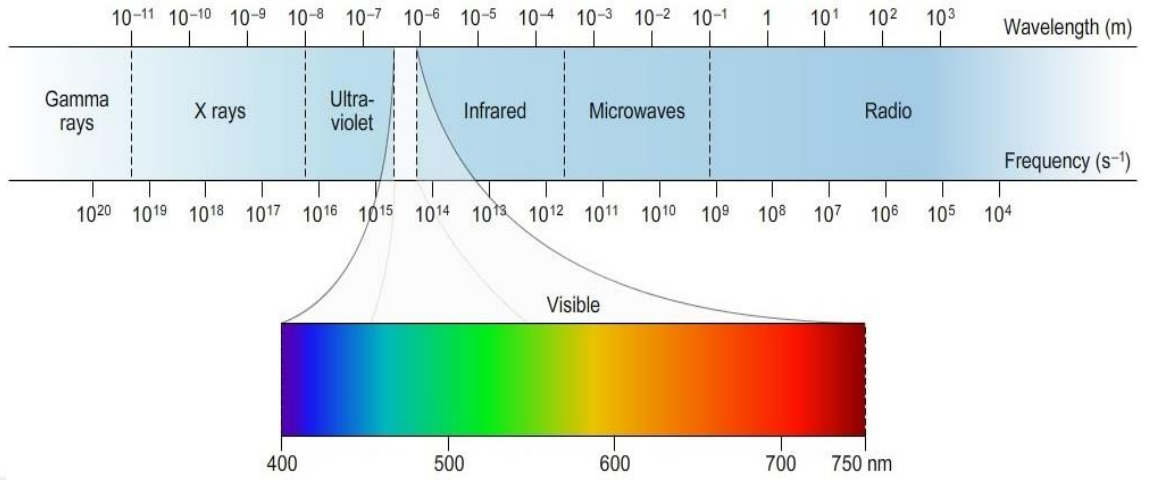
Tarihin büyük bir kısmında elektromanyetik spektrumun görünür (VIS) bölgeden ibaret olduğu düşünülmüş olup bilinen en eski çalışmalar Antik Yunanlılar tarafından ışığın düz çizgiler halinde hareket ettiği esas alınarak yansıma ve kırılma gibi temel özelliklerinin çalışılması üzerine gerçekleştirilmiştir (Haitel 2014).

Görünür bölgenin dışında bulunan elektromanyetik spektruma ilişkin ilk keşif 1800 yılında Herschel tarafından kızılötesi (IR) radyasyonun ölçülmesi ile gerçekleşmiştir (Caltech 2012). Herschel deneyi; prizmadan çıkan VIS dalga boylarının sıcaklıklarının termometre ile ölçülmesini amaçlamış olup deney esnasında referans termometrenin kırmızının yanında yani kızılötesi spektrumda bulunması sonucu diğer dalga boylarına kıyasla daha yüksek sıcaklığa ulaşmasının ışığın görünür bölge dışında kızılötesi olarak tanımlanan farklı bir bölgesinin olduğunun tespit edilmesi sonucunu doğurmuştur.



Şekil 1.1. Herschel'in kızılötesi radyasyonu keşif çalışması portresi (sol) ve deney şematığı (sağ)

Ertesi yıl Ritter tarafından görünür bölgenin diğer ucunda yapılan çalışmalar ile kimyasal reaksiyonları tetiklediği tespiti ile ismi daha sonradan verilen morötesi (UV) bölgenin keşfi gerçekleşmiştir (Hermann 2008). İlerleyen süreçte Faraday tarafından 1845 yılında elektromanyetik radyasyonun elektromanyetik alanla ilişkilendirilmesi ve 1860'lı yıllarda Maxwell tarafından elektromanyetik alan denklemlerinin geliştirilmesi ve teorik dalga hızının ışık hızına eşit olacağını göstermesi ile sonsuz ve farklı sayıda frekansa sahip dalgaların varlığının elektromanyetik spektrumu oluşturduğu ortaya konmuştur. Ardından 1886 yılında Hertz tarafından radyo ve mikro dalgaların keşfi, 1895 yılında Röntgen tarafından X-ışınlarının keşfi ve Gama ışınlarının 1910 yılında Bragg tarafından keşfedilmesi ile elektromanyetik spektrumun varlığı deneysel çalışmalarda da kanıtlanmıştır (Griffiths 1998).



Şekil 1.2. Elektromanyetik spektrum

Elektromanyetik spektrum da radyasyon enerji seviyesi büyükten küçüğe doğru sırasıyla Şekil 1.2’de görüldüğü gibi Gama, X-ışınları, Morötesi (UV), Görünür bölge, Kızılötesi (IR), Mikrodalgalar ve Radyo dalgaları şeklinde sıralanmakta olup artan enerji seviyesi/frekansa karşılık radyasyon dalgaboyu Denklem (1.1)’de ifade edildiği gibi azalmaktadır. Denklem (1.1)’de h Plank sabitini, c ise boşluktaki ışık hızını tanımlamaktadır.

$$E = hf = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Elektromanyetik spektrumun en yüksek enerji seviyesine sahip bölgesi olan Gama ışınlarının kristal bir yapı ve bu yapıya bağlı bir foto çoklayıcı tüp ile sinyalin güçlendirilmesi prensibi (Gopal 2006) kullanılarak atmosfer ötesi teleskoplar ile gözlenebilmesi sayesinde bilinen evrende yer alan en yüksek enerjili bölgeler veya nesnelere hakkında bilgi sahibi olabilmekteyiz. Diğer taraftan gama kaynakları; nükleer tıpta görüntüleme, kanser terapileri ve tohum/besinlerin sterilize edilmesi vb. amaçlar için yaygın şekilde kullanılmaktadır.

Gama ışınlarından sonra yüksek enerjili bir diğer radyasyon bölgesi olan X-ışınlarının hassas elektro optik sistemler ile görüntülenebilmesi ile nötron yıldızlarının çevresindeki toplanma diskleri, yıldız koronaları, nebula bulutları ve karadelikler gibi X-ışını yayılımı yapan bölgeler gözlemlenebilmektedir. Diğer taraftan vakum altında anot ve katot arası gerilim uygulanması sonucu meydana gelen elektron – hedef çarpışması ile oluşturulan X-ışınları ile tıpta radyolojik görüntüleme mümkün olmaktadır (Brown 2013).

Görünür bölgenin dalgaboyu olarak alt komşusu olan morötesi (UV) radyasyonun atomları iyonize etme, elektronlarından ayırma ve kimyasal reaksiyonlara sebep olmasından dolayı organizmalara zarar verebilecek niteliktedir. Bu özelliğinden dolayı güneş yanıkları ve cilt kanserine neden olmasının yanı sıra sterilizasyon amaçlı ışınlama uygulamaları yaygındır (Kumar and Dangi 2016). Diğer taraftan güneşimiz gibi yüzey sıcaklığı 5000–7000 K seviyesinde olan beyaz ve mavi yıldızlardan büyük oranda UV radyasyon yayılmaktadır.

Yaşam kaynağımız olan güneşin kızılötesi ile birlikte en yüksek seviyede yaydığı radyasyon aralığı olan görünür bölge; 400–700 nm spektral aralıkta olup yaşamsal döngünün sürdürülebilmesi, görme, haberleşme vb. sayısız isterlerimizi karşılamamıza olanak sağlamaktadır.

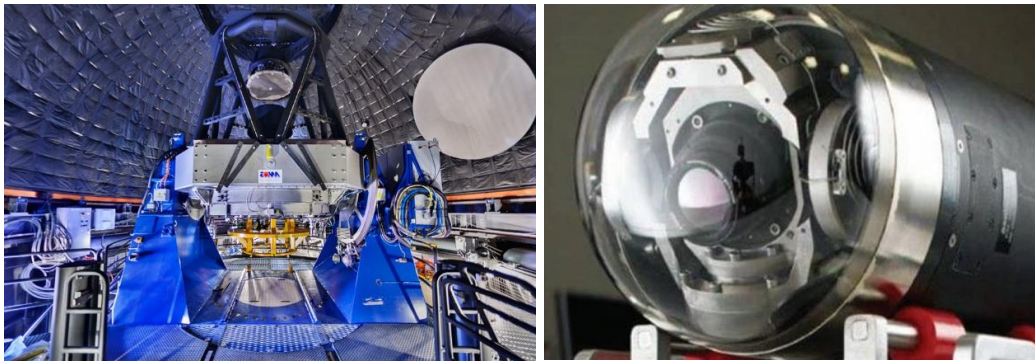
Görünür bölgeden sonra gelen kızılötesi spektrum (IR) temelde 750–2500 nm arası yakın, 2.5–10 μm arası orta ve 10 μm üzeri dalga boyuna karşılık gelen uzak IR bölgelerden oluşmaktadır. Söz konusu IR bölgeler içerisinde orta kızılötesi olarak tanımlanan alan, insanların vücut sıcaklığının ve geliştirdiğimiz sivil ve askeri pek çok teknolojinin çalışma sıcaklıklarının dalga boyuna karşılık gelen kısmını oluşturmakta olup görüntülenmesi üzerine oldukça yaygın araştırmalar yapılmaktadır. Astronomi de ise yaydıkları IR radyasyonun görüntülenebilmesi ile soğuk ve karanlık gaz bulutlarının, birleşen yıldızların yaydığı tozların, gezegenlerin ve aktif galaksiler hakkında bilgi sahibi olabilmekteyiz (Robinson 2013).

Kızılötesi spektrumdan sonra günümüzde özellikle kablosuz haberleşme, uydu iletişim, radar, küresel pozisyonlama/yön bulma, ısıtma vb. uygulamalar ile tanıdığımız mikrodalga spektrumu yer almaktadır. Astronomi de ise kullanılan radyo teleskoplar ile gezegenler, yıldızlar ve galaksilerden yayılan mikrodalga radyasyonunu görüntülemenin yanı sıra kozmik mikrodalga arka zemin radyasyonunun haritalanması ve bu sayede evrenin erken dönemlerine ilişkin bilgilerin elde edilmesi gibi kritik çalışma alanları bulunmaktadır (Naselsky *et al.* 2016).

Dalgaboyu olarak en yüksek değer aralığına sahip olan radyo dalgaları; metal yapıları antenlerin salınımı veya akım ile beslenmesi sonucu yayılmaktadır. Günümüzde radyo haberleşme, görsel ve işitsel iletişim, cep telefonları, iletişim uyduları, kablosuz haberleşme, küresel pozisyonlama (GPS) ve uzaktan kontrol gibi sayısız kullanım alanına sahiptir.

1.2. Elektro Optik Sistemler

Geçmişten günümüze nesnelere yayılan, yansıyan ve elektromanyetik spektrumun herhangi bir bölgesinden gelen radyasyonu algılayabilmek amacıyla Şekil 1.3'de gösterildiği üzere farklı elektro optik sistemler geliştirilmektedir.



Şekil 1.3. Görünür ve kızılötesi bölge teleskobu (sol) ve kızılötesi arayıcı füze başlığı (sağ)

Elektro optik sistemler olarak tanımlanan bu teknolojiler, Şekil 1.4’de görüldüğü üzere farklı alt unsurların bir araya gelmesi ile oluşmaktadır.



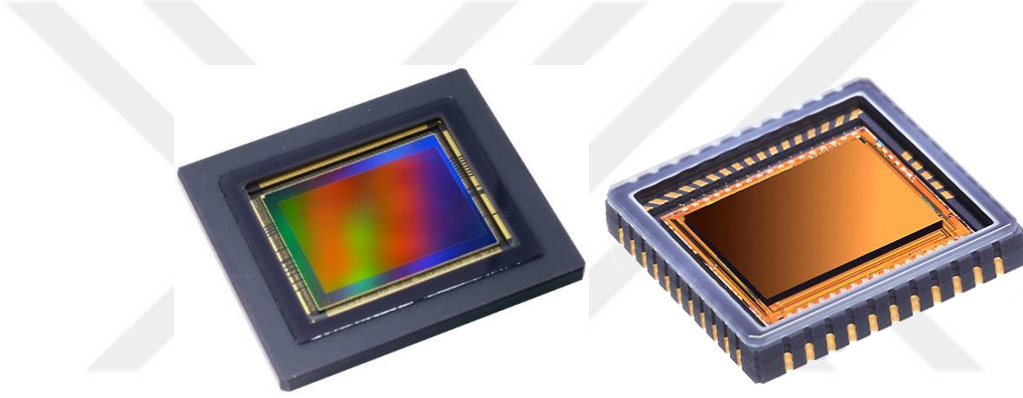
Şekil 1.4. Elektro optik bir sistemi oluşturan alt birimler

Elektro optik bir sistemin tasarımında; talep edilen çözünürlük, netlik, spektral aralık, hız vb. isterlere bağlı olarak görüntülenmesi amaçlanan nesneden yansıyan veya yayılan ışığın odaklanması, yansıtılması, kırılması vb. fiziksel olaylar ile görüntüyü oluşturması sağlanır (Karp and Stotts 2013). Görüntünün oluşumu amacıyla tasarıma bağlı olarak Şekil 1.5’de gösterilen aynalar, mercekler, prizmalar, filtreler gibi farklı optik bileşenler optik tasarıma bağlı olarak hassas mekanik tutucular ile birbirlerine hizalanır.



Şekil 1.5. Elektro optik sistemlerde kullanılan optik bileşenler

Görüntü optik bileşenler aracılığıyla oluşturulduktan sonra sistemin odak düzleminde yer alan detektör dizgisinin üzerine gelir. Bu noktada kaynaktan gelen ışık, detektör üzerinde elektriksel sinyale dönüşmüş olur. Temel olarak bir detektör dizgisi; görüntünün oluşturulacağı spektral bölgeye bağlı olarak farklı yarıiletken malzemelerden geliştirilen, tek veya çok sayıda satır ve sütundan oluşan transistor dizilimidir (Tüzemen and Tekmen 2011). Odak düzleminde yer alan detektör dizgisi aracılığıyla elektrik sinyale dönüştürülen görüntü, detektöre entegre okuma devresi (ROIC) aracılığıyla dijital sinyale dönüştürülür (Hobbs 2011). Farklı spektral bölgeler için geliştirilen detektörler dizgileri Şekil 1.6’da gösterilmektedir.



Şekil 1.6. Elektro optik sistemlerde kullanılan görünür (sol) ve IR (sağ) detektör dizgileri

1.3. Optik Bileşenler

Elektro optik sistemlerin tasarımında kullanılan optik bileşenler Şekil 1.7’de gösterildiği üzere yansıma ilkesi esas alınarak ışığın odaklandığı yansıtıcı (aynalar) veya kırılma ilkesi esas alınarak ışığın odaklandığı geçirgen (lensler, prizmalar, filtreler, demet ayırıcılar) yapıda olabilmektedirler. Elektro optik sistemler de tasarıma bağlı olarak tamamen yansıtıcı optikler ile katoptrik veya yansıtıcı optikler ile birlikte geçirgen optiklerin de kullanılması ile katadioptrik olarak geliştirilebilirler (Yoder 2008).



Şekil 1.7. Yansıtıcı aynalar (sağ), geçirgen lensler (orta) ve demet ayırıcılar (sol)

Söz konusu optik bileşenlerin idealden uzak performans göstermelerinin malzeme yapısındaki kusurlar, üretim sürecindeki hatalar, birbirlerine göre hizalanmaları esnasında meydana gelen konumsal kaymalar gibi pek çok nedeni vardır. Bu nedenlere bağlı olarak elde edilen görüntülerde ışığın optik bileşenlerle temas etmesi sonucu kaynaktan gelen ışığın kaybına neden olabilecek saçılma, geri yansıma veya genel anlamda aberasyon adı verilen odak kayması, renklenme gibi görüntü bozulmaları meydana gelebilmektedir (Mahajan 1998).

Optik bileşen kaynaklı görüntü bozulmalarını önlemek amacıyla bileşen yüzeyinin yüksek kalitede geliştirilerek pürüzlülük ve form bozukluğunun azaltılması, küresel yerine küresel olmayan yüzey formuna sahip optik bileşenlerin geliştirilmesi ile sistemlerde daha az sayıda optik bileşen kullanılması gibi yöntemler üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Williamson 2011).

Görüntü oluşumunda optik bileşen kaynaklı bozulmaları önlemek amacıyla izlenen yöntemlerden bir tanesi de ışığın optik bileşen ile temas ettiği anda yansıtıcı optikler için ışığın düşük seviyede yansımalarının veya geçirgen optikler için ışığın ön veya arka yüzeyden geri yansımalarının önüne geçecek nitelikte optik kaplamaların yüzeye uygulanmasıdır (Piegari and Flory 2013).

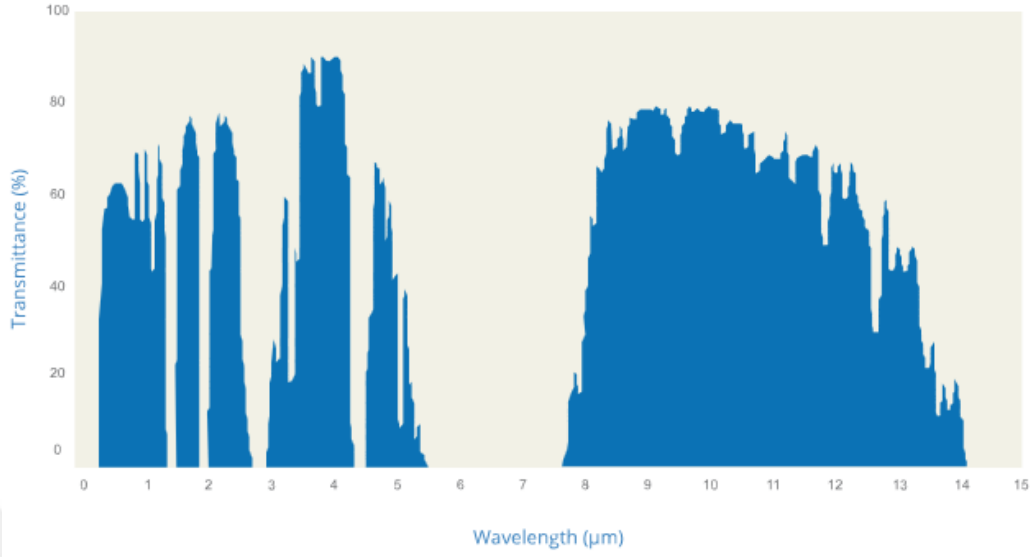
1.4. Kızılötesi Spektrum

Planck yasasına göre, 0 K üzerinde sıcaklığa sahip olan her nesne radyasyon yayar (Singh 2008). Bunun temel nedeni, nesnelerin yapısında bulunan moleküllerin sıcaklık ile uyarılmaları ve söz konusu uyarımın atomik seviyede elektronları hızlandırması sonucu radyasyon yayılmasıdır (Gaussorgue 1994). Radyasyon enerjisinin dalgaboyu ile ilişkisi Denklem (1.1) de ifade edilmişti. Üzerine gelen radyasyonun tamamını soğuran, yapısında oluşan radyasyonun tamamını yayan ve bu ideal durumda kara cisim olarak tanımlanan nesnelerin radyasyon yayılımı Denklem (1.2)'de gösterilen Planck yasası ile ifade edilmektedir.

$$E(\lambda, T) = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 [\exp(\frac{hc}{\lambda k T}) - 1]} \quad (1.2)$$

Elektro optik sistemlerin nesnelere yansıyan veya yayılan radyasyon aracılığıyla görüntüleme yapabildiğini önceki bölümlerde ifade etmiştik. Spektrumun kızılötesi (IR) bölgesinin günümüzde insanlar, canlılar ve geliştirdiğimiz sivil, askeri ve uzay teknolojilerinin operasyonel sıcaklıkları kaynaklı radyasyon yayılımlarının karşılık geldiği spektral bölge olması nedeniyle kritik rol oynamaktadır (Driggers *et al.* 2012).

Görünür ve mikro dalga arası 760 nm ile 1 mm lik dalgaboyu aralığını kapsayan IR bölgede görüntüleme yapılabilecek spektral aralıklar Şekil 1.8'de gösterildiği üzere atmosferde bulunan su ve gas moleküllerinin IR radyasyonu soğurmadığı dolayısıyla geçirgen olduğu bölgelerde yapılabilmektedir (Elder and Strong 1953).



Şekil 1.8. Atmosferin geçirgen olduğu IR pencereler

Atmosferik pencerenin yanı sıra görüntüleme sistemlerinde kullanılan detektörlerin spektral tepki aralıklarınının sınırlı genişliklerde olması da IR görüntüleme de bir diğer kısıtlayıcı unsurdur. Bu nedenle görüntüleme teknolojilerinde IR bölge 0.9–1.7 μm arası kısa kızılötesi (SWIR), 3–5 μm arası orta kızılötesi (MWIR) ve 8–14 μm arası uzun kızılötesi (LWIR) olarak üç alt bölgeye ayrılmıştır (Rogalski 2003).

SWIR bölge; sıcaklığı 1500–3500°C arasındaki nesnelere yayılan radyasyona karşılık geldiği gibi çok daha düşük sıcaklıklardaki nesnelere ortamdaki ilave ışık kaynakları sayesinde yansıyan ışığın da algılanabildiği ve genel olarak “yansıyan kızılötesi bölge” olarak tanımlanan spektral aralıktır (Andresen and Fulop 2003).

MWIR bölge; sıcaklığı 100–700°C arasındaki nesnelere yayılan radyasyona karşılık gelmekte olup görüntülenebilmesi için ilave dış ortam ışık kaynağına ihtiyaç duyulmamasından dolayı “termal kızılötesi” olarak (Schlessinger 2018) tanımlanmaktadır. Günümüzde özellikle motorlu kara araçları ve jet motorları gibi çalışma sıcaklığına bağlı radyasyon yayılımı parmak izi niteliğinde olup MWIR bölgeye karşılık gelen sistemlere karşı geliştirilen savunma sistemlerinde MWIR spektrumunda çalışan arayıcı görüntüleme sistemleri üzerine (Dakin and Brown 2017)

gerçekleştirdiğimiz bu tez çalışmasının da içeriğini oluşturacak nitelikte önemli çalışmalar yapılmaktadır.

LWIR bölge ise sıcaklığı -80 ile $+90^{\circ}\text{C}$ arasındaki nesnelere yayılan radyasyonu ilave dış ortam ışık kaynağı olmaksızın algılamaya olanak sağlayan termal IR bölgesidir. Bu bölge için geliştirilen görüntüleme teknolojilerinin temel amacı insan başta olmak üzere yaşayan canlıların dış ortam radyasyonuna bağlı olmadan doğrudan görüntülenebilmesidir (Rogalski 2003).

1.5. Tezin Kapsamı

Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere MWIR spektrum da gerçekleştirilen çalışmalar özellikle savunma sanayi de önemli yer tutmaktadır. Bu nedenle MWIR bölgede görüntüleme yapılabilmesine olanak sağlayan elektro optik sistemlerin geliştirilmesine yönelik çalışmalar için yarış halinde olan ülkelerde ciddi insan ve mali kaynak oluşturulmaktadır.

MWIR bölgede çalışan yarıiletken tabanlı detektörler arasında en geniş ve standart detektör çalışma bölgesi $3.4-4.8$ μm arası spektral tepkiye sahip MCT detektörlerdir (Ryzhii 2003). Dolayısıyla $3.4-4.8$ μm arası MWIR spektrum da görüntüleme yapabilen elektro optik sistemlerde kullanılan ve farklı malzemelerden geliştirilen geçirgen optik bileşenlerin söz konusu spektral aralıkta kaynaktan yayılan ışığın detektör düzlemine ulaşmaya kadar kayba uğramaması amacıyla yüksek geçirgenlikte olması gerekmektedir.

MWIR bölgede çalışan optikler için yüksek geçirgenlik sağlayan anti yansıtıcı (ARC) kaplamalar ile ilgili geçmişte tek dalga boyunda azami geçirgenlik sağlayan V eğrili kaplamalar (Saadallah and Saeed 2013), tanımlı spektral aralıkta %1 seviyelerinde geniş bant kaplamalar (Bhatt *et al.* 2010) veya MWIR/LWIR çift bant gibi özel ARC kaplamalar (Rahmlow *et al.* 2008) geliştirilmiştir.

Bu çalışmada da MWIR bölgede geniş bant ve standart spektral tepki aralığına sahip detektörler ile uyumlu geçirgen optikler için 3.4–4.8 μm arası çalışan çok katmanlı ARC kaplamalar geliştirilmiştir. Geliştirilen ARC kaplamalar; geniş bant olarak tanımlanan 3.4–4.8 μm aralığı boyunca ortalama yansıma değerinin asgari katman kalınlığı ile %0.3 ün altında olması ve MWIR optiklerinin üretildiği Kalsiyum Florür (CaF_2), Germanyum (Ge), Silisyum (Si) ve Çinko Sülfür (ZnS) olmak üzere 4 ana malzeme üzerine aynı yüksek verim ile geliştirilmiş olmalarından dolayı literatür de yer alacak olan ilk çalışma olma özelliğindedir. Diğer taraftan MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik kullanılan aktif optimizasyon yöntemi, MWIR optiklerin geliştirilmesine yönelik maliyet ve zaman etkin bir çözüm sunmakta olup gelecekte söz konusu alanda çalışmalar yapacak araştırmacılar için de fikir verici niteliktedir.

Kuramsal Temeller başlıklı 2. Bölümde; optik kaplamalar, anti yansıtıcı kaplamalar, çok katmanlı kaplama tasarımına yönelik fiziksel temeller ve tasarım optimizasyon süreçleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Materyal ve Yöntem başlıklı 3. Bölümde; MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan tasarım, analiz ve optimizasyon yazılımları, kaplama teknolojisi, karakterizasyon metrolojisi ve çalışmanın yöntemi ile ilgili bilgiler yer almaktadır.

Araştırma Bulguları başlıklı 4. Bölümde; tasarıma bağlı olarak MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine sonuçlar yer almaktadır.

Tartışma ve Sonuç başlıklı 5. Bölümde ise MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi sürecinde elde edilen sonuçların tasarım ile uyumu, sonuçların niteliği ve sağlayacağı katkı üzerine değerlendirmeler yer almaktadır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Optik Kaplamalar

Bir önceki bölümde bahsedildiği üzere elektro optik sistemler günümüzde sivil, askeri ve uzay alanlarında sayısız uygulama alanlarına sahip olmakla birlikte küresel ölçekte milyarlarca dolarlık da bir ekonomi oluşturmaktadır (Anonymous 2019).

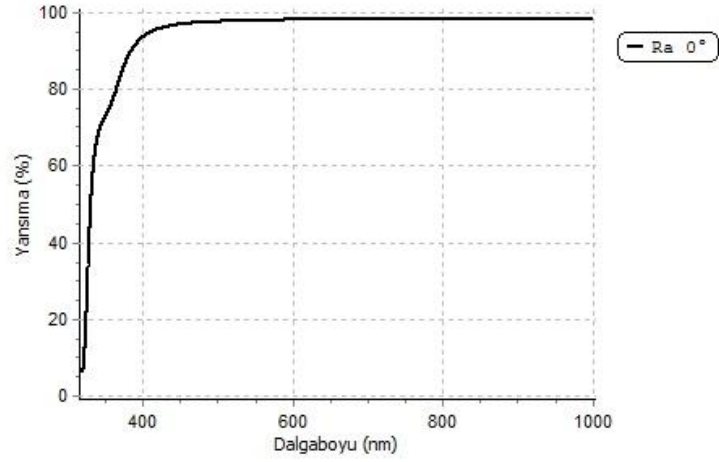
Elektro optik sistemlerde yer alan optik bileşenlerin tasarlanan spektral aralıkta yüksek verimli çalışabilmesi için tek veya çok katmanlı optik kaplamalar ile optik özelliklerinin iyileştirilmesi gerekmektedir (Stenzel 2014).

Optik bileşenlerin tasarım isterlerine bağlı olarak tanımlı herhangi bir spektral aralıkta gelen ışığı yansıtması (Cho *et al.* 2012), geçirmesi (Chiao *et al.* 1993), kısmen geçirmesi (Belyaev *et al.* 2014) veya sönmülmesi (Duma *et al.* 2009) gibi ihtiyaçlar oluşabilmektedir.

Bu nedenle optik bileşenlerin üzerlerine farklı spektral davranışlar sergileyecek optik kaplamaların tasarlanması ve geliştirilebilmesi büyük önem taşımakta olup farklı optik kaplamalara ilişkin bilgiler şu şekildedir.

2.1.1. Yansıtıcı kaplamalar

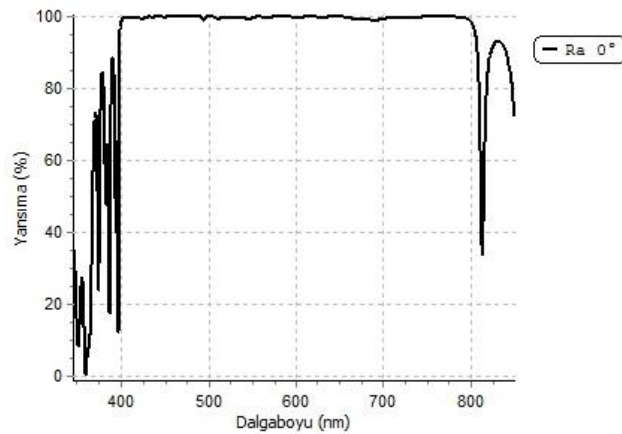
Yansıtıcı kaplamalar optik bileşen yüzeyinin belirli spektral aralıklarda gelen ışığın büyük bir kısmını yansıtan ayna özellikli kaplamalardır (Bely 2006).



Şekil 2.1. Ag yansıtıcı kaplama

Söz konusu kaplamalar ayna tabanlı elektro optik sistemler de tercih edilen ve Şekil 2.1’de gösterildiği gibi geniş spektral aralıkta çalışan metal tabanlı kaplamalar olabilmektedir.

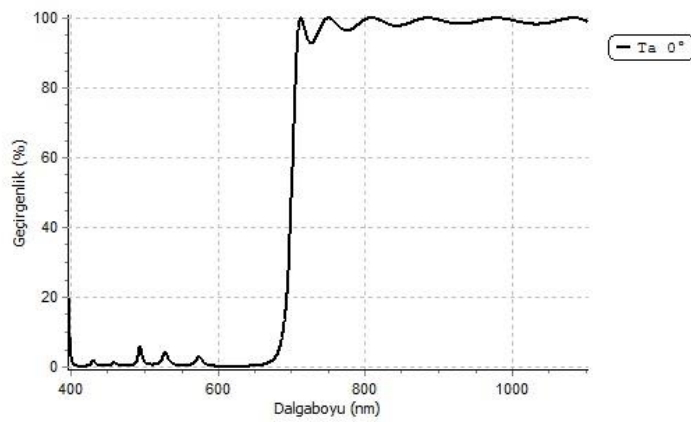
Metal kaplamaların yanı sıra yüksek yansıma isterlerine sahip olan (Razskazovskaya *et al.* 2015) ve Şekil 2.2’de gösterildiği gibi nispeten daha dar spektral aralıklarda çalışan çok katmanlı dielektrik kaplamalara da ihtiyaç duyulabilmektedir.



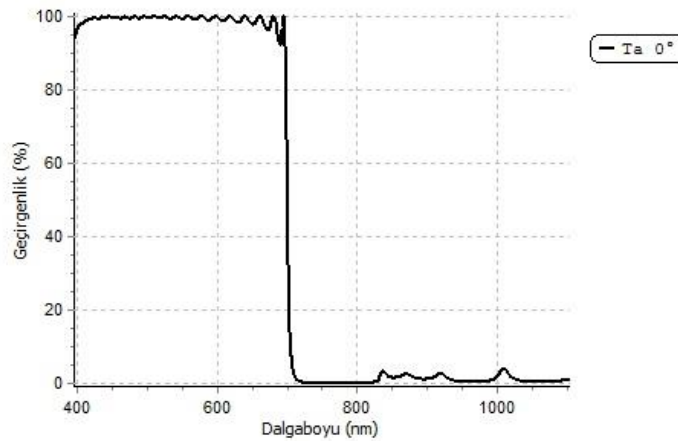
Şekil 2.2. Çok katmanlı dielektrik ayna

2.1.2. Soğuk ve sıcak ayna kaplamaları

Geniş ve dar spektrumlu yansıtıcı kaplamalar dışında elektro optik sistemlerde VIS radyasyon kaynaklı gürültüleri veya IR radyasyon kaynaklı ısınmaları engellemek amacıyla Şekil 2.3’de gösterildiği gibi soğuk veya Şekil 2.4’de gösterildiği gibi sıcak ayna kaplamaları da geliştirilebilmektedir (Elyutin *et al.* 2017).



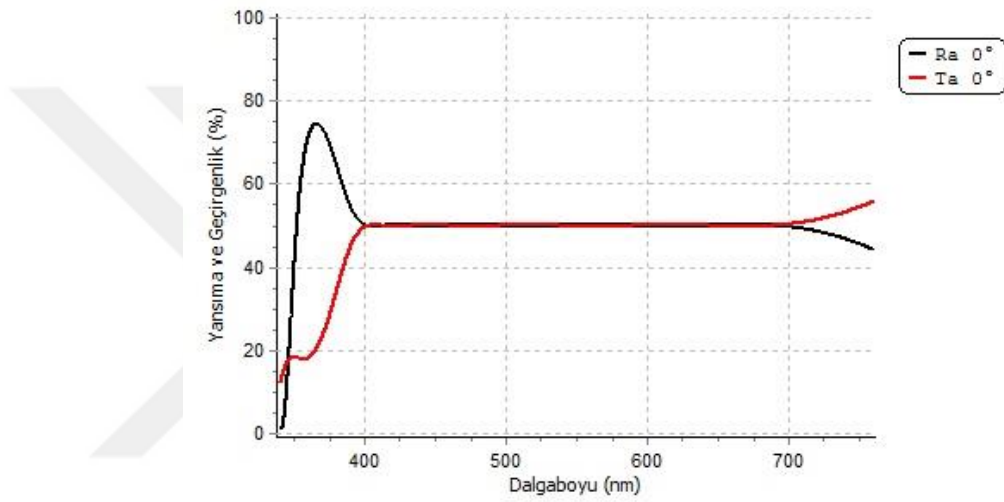
Şekil 2.3. Soğuk ayna kaplaması



Şekil 2.4. Sıcak ayna kaplaması

2.1.3. Demet ayırıcı kaplamalar

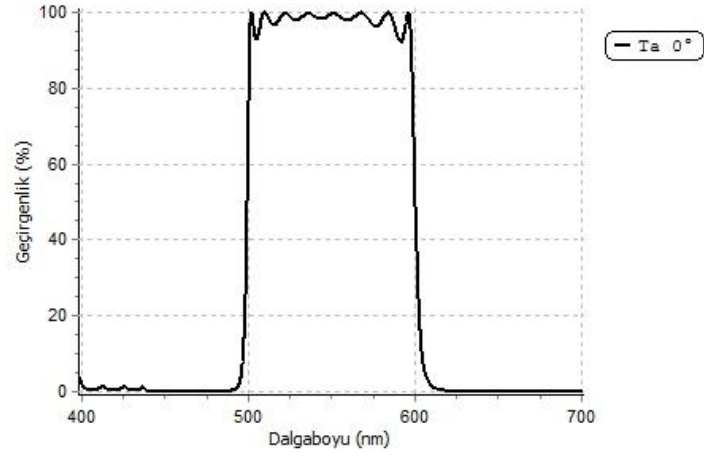
Demet ayırıcı kaplamalar, gelen ışığın %50 sinin yansıtılarak geri döndüğü ve %50 sinin de optik yüzeyden geçirildiği kaplamalardır (Rizea 2011). Söz konusu kaplamalarda Şekil 2.5’de gösterildiği üzere ışık %50 olarak ikiye ayrılabilir gibi farklı yüzdelerde yansıma ve geçirgenlik seviyelerinin ayarlanabilmesi de mümkündür.



Şekil 2.5. Demet ayırıcı kaplama

2.1.4. Bant geçirgen filtreler

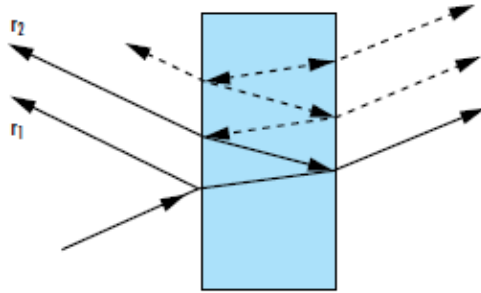
Geniş veya dar bir spektral aralıkta ışığın belirli seviyesini geçiren ve söz konusu spektral aralık dışında ışığı yansıtan kaplamalardır (Bach *et al.* 2003). Bant geçirgen filtreler Şekil 2.6’da gösterildiği şekilde geniş bant, dar bant veya tek dalga boyunda geliştirilebilmektedir.



Şekil 2.6. Görünür bölge bant geçirgen filtre

2.1.5. Anti yansıtıcı kaplamalar

Elektro optik sistemlerde kullanılan geçirgen optiklerin performansını etkileyen en önemli parametrelerden bir tanesi de ışığın malzemeden geçişi esnasında giriş ve çıkış yüzeylerinde oluşan Şekil 2.7’de gösterilen Fresnel yansımalarıdır. Kaplamasız bir camı göz önüne alırsak giriş ve çıkış yüzeylerinin her birinde ışık %4 seviyesinde yansıma yapmaktadır. Söz konusu yansımalarından dolayı camın geçirgenliği %92 seviyesindedir (Pulker *et al.* 1998).

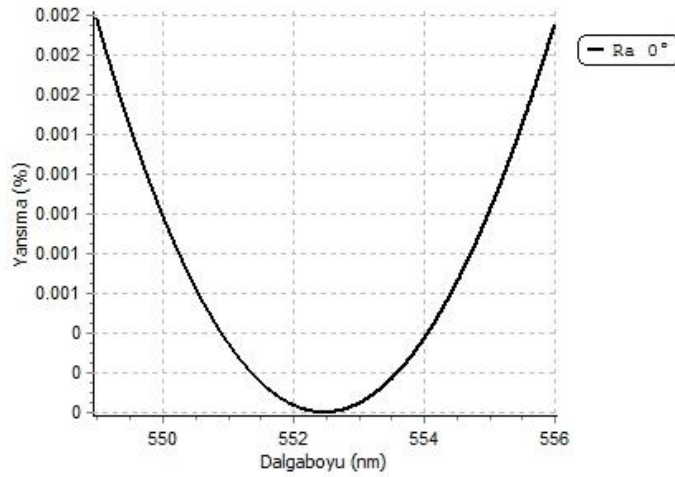


Şekil 2.7. Malzeme yüzeylerinde oluşan Fresnel yansımaları

Malzeme yüzeylerinde meydana gelen optik kayıplar geçirgenlik değerini düşürerek yüksek güçlü lazer uygulamalarında optik malzemelere zarar verebildiği gibi (He *et al.*

2004) malzemenin arka yüzeyinden geri yansıyan ışığın dedektör üzerinde hayali görüntüler de oluşturabilmektedir (Raut *et al.* 2011).

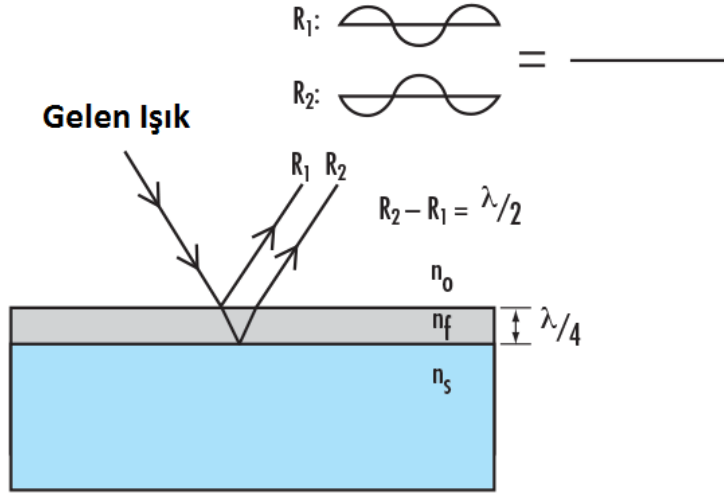
Bahsi geçen sebeplerden dolayı mercekler, pencereler, filtreler, prizmalar gibi geçirgen optik bileşenlerin yüzeylerinde yansımayı önleyici kaplamaların geliştirilmesi kritik önem taşımaktadır. Özellikle çok sayıda geçirgen optiğin kullanıldığı veya çok düşük ışık seviyelerinde görüntüleme yapılmaya çalışılan durumlarda kaynaktan gelen ışığın verimli şekilde kullanılabilmesi için yüksek verimli anti yansıtıcı kaplamaların geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır. Yüksek verimli anti yansıtıcı kaplamalara örnek olarak Şekil 2.8’de görünür bölgede tek dalga boyuna sahip ışık için tasarlanmış bir anti yansıtıcı kaplamanın spektral davranışı gösterilmektedir.



Şekil 2.8. Tek dalga boyu ARC kaplama

2.2. Anti Yansıtıcı Kaplamaların Çalışma Prensibi

Anti Yansıtıcı kaplamaların tasarımında dikkat edilmesi gereken temel parametre filmin giriş ve çıkış yüzeylerinden yansıyan ışığın faz farklarının 180° olmasıdır. Bu sayede Şekil 2.9’da gösterildiği gibi katmanın giriş ve çıkış yüzeylerinden yansıyan ışık demetleri yıkıcı girişim ile birbirlerini sönmüleyerek ışığın katman yüzeyinden geri yansımalarını engellemiş olurlar.



Şekil 2.9. Yıkıcı girişim ile yansıyan ışığın sönümlenmesi

Malzemenin optik kalınlığı (OT) denklem (2.1) de gösterildiği gibi kalınlık (t) ve kırılma indisinin (n) çarpımına eşittir.

$$OT = t \times n \quad (2.1)$$

Girişimin yıkıcı olabilmesi için kaplamanın optik kalınlığının anti yansıtıcı filmin çalışacağı ideal dalga boyunun $\frac{1}{4}$ ü ($\lambda/4$) seviyesinde olması ve bu sayede kaplamanın giriş ve çıkış yüzeylerinden geri yansıyan ışık demetleri arasında $\lambda/2$ seviyesinde optik güzergâh farkının oluşturulabilmesi esasına dayanmaktadır. Bu koşulların sağlanması durumunda kaplamanın giriş ve çıkış yüzeyinden yansıyan ışık demetleri yıkıcı girişim sonucu birbirlerini engellemektedirler. Filmin optik kalınlığının çalışma dalga boyunun çeyreğinin katları olması denklem (2.2) de gösterildiği üzere çeyrek dalga optik kalınlık (QWOT) olarak ifade edilmektedir.

$$t \times n = \frac{\lambda}{4} \times QWOT \quad (2.2)$$

Tek katmanlı ARC geliştirilmesinde kaplanacak filmin kırılma indisi (n_{film}) ile ortamın kırılma indisi (n_0) ve alttaş malzemenin kırılma indisi (n_s) arasında denklem (2.3) de gösterildiği şekilde bir eşitlik söz konusudur. Eşitliğe göre alttaşa bağlı olarak azami

anti yansıtıcı performansı elde etmek için ihtiyaç duyulan kaplamanın sahip olması gereken kırılma indisi denklem (2.3) e göre tanımlanmaktadır.

$$n_{\text{film}} = (n_0 \times n_s)^{1/2} \quad (2.3)$$

Tek katmanlı ARC için en yaygın uygulama görünür bölgede kırılma indisi 1,46 olan cam yüzey üzerine 550 nm de asgari anti yansıtıcılık elde edebilmek için kırılma indisi söz konusu eşitliği sağlamaya en yakın olan MgF_2 nin ($n=1,38$) kaplanmasıdır.

Denklem (2.3) için cam ve MgF_2 kırılma indisleri ortamın hava olduğu ($n_0=1$) durum için uygulandığında dahi ideal eşitlik saplanamadığı için yüksek verimli ARC geliştirilmesi için çok katmanlı ARC kaplama tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Anti yansıtıcı katmanın tek dalga boyunda elde edilmesi dışında çok daha geniş veya fazla sayıda spektral aralıklarda elde edilmesine de ihtiyaç duyulmaktadır (Schulz 2015).

Özellikle geniş spektral aralıkta görüntüleme yapan EO sistemlerde kullanılan optik bileşenlerin kayıpsız geçirim sağlamaları için geniş bant ARC kaplamaların geliştirilmesi gerekmektedir.

2.3. Çok Katmanlı Sistemlerin Temelleri

Önceki bölümde ifade edildiği gibi anti yansıtıcı kaplamaların tasarımında göz önünde bulundurulmuş temel kistas ışığın giriş ve çıkış yüzeylerinde yansıma yapmadan azami geçirgenlikle malzemeyi kat etmesidir. Işığın malzemeyi geçişi esnasında meydana gelebilecek kayıpların doğasını anlayabilmek için öncelikli olarak ışığın elektromanyetik davranışını anlamak gerekmektedir.

2.3.1. Fresnel denklemleri

Fresnel denklemleri ışığın bir malzemedan geçişi esnasında sergileyeceği davranışları ortam değişimine sebep olan geçiş noktalarında meydana gelebilecek kayıpları kırılım indisi ve gelen ışığın polarizasyonuna bağlı olarak ifade etmektedir.

Işığın bir yüzeye ulaştığı durumda sergileyeceği davranış ve polarizasyonunun geçirgenlik üzerine etkisini inceleyebilmek için tek dalga boyuna sahip ışığın dalga düzlemi denklem (2.4) ve (2.5) ile tanımlanmaktadır.

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} e^{i(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t)} \quad (2.4)$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_{0i} \cos(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t) \quad (2.5)$$

Bildiğimiz üzere ışığın polarizasyon durumu temelde birbirine dik 2 polarize dalga olarak tanımlanmaktadır. Dalganın doğrusal olarak polarize olması, \vec{E}_{0i} nin zamanla değişmemesi anlamına gelmektedir.

Benzer şekilde düzlemden yansıyan ve geçen dalgalar denklem (2.6a) ve (2.6b) de gösterildiği şekilde tanımlanabilmektedir.

$$\vec{E}_r = \vec{E}_{0r} \cos(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - w_r t) \quad (2.6a)$$

$$\vec{E}_t = \vec{E}_{0t} \cos(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - w_t t) \quad (2.6b)$$

Sınır koşullarında gelen, yansıyan ve düzlemden geçen dalgalar aynı anda var olacağı için denklem (2.8) de gösterildiği şekilde birbirlerine eşit olurlar.

$$\cos(\vec{k}_i \cdot \vec{r} - w_i t) = \cos(\vec{k}_r \cdot \vec{r} - w_r t) = \cos(\vec{k}_t \cdot \vec{r} - w_t t) \quad (2.7)$$

Sınır koşulu olan $\vec{r} = 0$ ve t nin aynı olduğu durumda ise;

$$w_i t = w_r t = w_t t \quad (2.8)$$

$$\vec{k}_i \cdot \vec{r} = \vec{k}_r \cdot \vec{r} = \vec{k}_t \cdot \vec{r} \quad (2.9)$$

olacak şekilde elde edilir. Gelen ve yansıyan dalganın aynı düzlemde olduğu düşünüldüğü zaman denklem (2.9) un ilk 2 terimi birbirine denklem (2.10) da gösterildiği şekilde eşit olacaktır.

$$k_i r \sin \theta_i = k_r r \sin \theta_r \quad (2.10)$$

Bu durumda gelen ve yansıyan dalgalar aynı dalga sayısına sahip olacaklarından dolayı ışığın gelen ve yansıyan kısımları arasındaki açılar birbirlerine eşit olacaktır. Denklem (2.11) ile ifade edilen bu eşitliğe aynı zamanda Yansıma yasası adı verilmektedir.

$$\theta_i = \theta_r \quad (2.11)$$

Diğer taraftan denklem (2.9) da 1. ve 3. terimlerin eşitliğinde k değerinin $k = \frac{n\omega}{c}$ ile tanımlanması sonucu denklem (2.12) de gösterildiği gibi Snell yasası elde edilmektedir.

$$n_i \sin \theta_i = n_t \sin \theta_t \quad (2.12)$$

Bölümün başında ifade edildiği gibi dalganın malzemeden geçişi sırasındaki geçiş yoğunluğu ışığın polarizasyonuna da bağlıdır. Işığın doğrusal polarizasyon modlarından enine elektriksel ve enine manyetik modların 2 tanesinin belirlenmesi ve bu 2 polarizasyon modunun doğrusal kombinasyonları ile dalganın tüm polarizasyon modları

elde edilebilmektedir. Bahse konu bu polarizasyon modları gelen dalga düzlemine dik \vec{E} ve \vec{B} alanlarına bağlı olarak tanımlanmaktadır.

Enine elektriksel mod, \vec{E} alanının gelen dalga düzlemine dik olması durumunda gözlenmektedir. Elektromanyetik durumlar yasasına göre sınır koşulları göz önüne alındığında \vec{E} ve \vec{B} alanlarının teğet bileşenleri sınır noktasında sürekli olmak zorundadırlar. Bu durumda \vec{E} ve \vec{B} alanlarının genlikleri denklem (2.13) ve (2.14) de gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$E_{0i} + E_{0r} = E_{0t} \quad (2.13)$$

$$B_{0i} \cos \theta_i = B_{0r} \cos \theta_r + B_{0t} \cos \theta_t \quad (2.14)$$

Elde edilen denklemlere göre ise elektrik ve manyetik alan genlikleri arasında denklem (2.15) de gösterildiği şekilde ilişki sağlanmış olur.

$$E = \frac{c}{n} B \quad (2.15)$$

Elde edilen genlik ilişkisine göre denklem (2.14) gelen ve yansıyan dalgaların aynı düzlemde olduğu göz önüne alınarak tekrardan yazıldığında

$$n_1 E_{0i} \cos \theta_i - n_1 E_{0r} \cos \theta_r = n_2 E_{0t} \cos \theta_t \quad (2.16)$$

Denklem (2.13) ve (2.16) kullanılarak enine elektriksel mod için yansıma katsayısı (r_{TE}) denklem (2.17) de gösterildiği şekilde elde edilmiş olur.

$$r_{TE} = \frac{E_{0r}}{E_{0i}} = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (2.17)$$

Denklem (2.13) ve (2.16) nin $\frac{E_{or}}{E_{oi}}$ için çözülmesi sonucunda da enine elektriksel mod için geçirgenlik katsayısı (t_{TE}) denklem (2.18) de gösterildiği şekilde elde edilmiş olur.

$$t_{TE} = \frac{E_{ot}}{E_{oi}} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t} \quad (2.18)$$

Enine manyetik mod ise \vec{B} alanının gelen ışığın dalga düzlemine dik olması durumunda gözlenmektedir. Elektromanyetik durumlar yasasına göre sınır koşulları göz önüne alındığında \vec{E} ve \vec{B} alanlarının paralel bileşenleri sınır noktasında sürekli olmak zorundadırlar.

Bu durumda elektrik ve manyetik alan genlikleri arasındaki ilişki denklem (2.19) ve (2.20) de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$-B_{0i} + B_{0r} = -B_{0t} \quad (2.19)$$

$$E_{0i} \cos \theta_i + E_{0r} \cos \theta_r = E_{0t} \cos \theta_t \quad (2.20)$$

Daha önce elde edilen denklem (2.17) ile denklem (2.19) ve (2.20) nin $\frac{E_{or}}{E_{oi}}$ ve $\frac{E_{ot}}{E_{oi}}$ için çözümü sonucunda enine manyetik mod için yansıma (r_{TM}) ve geçirgenlik (t_{TM}) katsayıları denklem (2.21) ve (2.22) de gösterildiği şekilde elde edilmiş olur.

$$r_{TM} = \frac{E_{or}}{E_{oi}} = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t} \quad (2.21)$$

$$t_{TM} = \frac{E_{ot}}{E_{oi}} = \frac{2 n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_t + n_2 \cos \theta_i} \quad (2.22)$$

Elde edilen (2.17), (2.18), (2.21) ve (2.22) denklemleri Fresnel denklemleri olarak tanımlanmakta olup Snell yasası ile söz konusu denklemler (2.23), (2.24), (2.25) ve (2.26) da gösterildiği şekilde yazılabilmektedirler.

$$r_{TE} = \frac{\sin(\theta_i - \theta_t)}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.23)$$

$$r_{TM} = \frac{\tan(\theta_i - \theta_t)}{\tan(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.24)$$

$$t_{TE} = \frac{2 \sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t)} \quad (2.25)$$

$$t_{TM} = \frac{2 \sin\theta_t \cos\theta_i}{\sin(\theta_i + \theta_t) \cos(\theta_i - \theta_t)} \quad (2.26)$$

2.3.2. Yansıtma ve geçirgenlik

Önceki bölümde ifade edildiği üzere anti yansıtıcı kaplamaların geliştirilmesinde temel ölçüt ışığın malzeme yüzeyinden geçişi esnasında şiddet kaybına uğramaması ve dolayısıyla geçirgenliğin azami seviyede olabilmesi için yansımanın asgari seviyeye getirilmesidir. Yansıtma (R) ve Geçirgenlik (T) malzeme yüzeyinden geçen veya geri dönen ışık demetinin gücü şeklinde tanımlanıp denklem (2.27) ve (2.28) de gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$R_{TE, TM} = \left(\frac{E_{or}}{E_{oi}} \right)^2 = r_{TE, TM}^2 \quad (2.27)$$

$$T_{TE, TM} = \left(\frac{E_{ot}}{E_{oi}} \right)^2 \frac{n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i} = \left(\frac{n_2 \cos\theta_t}{n_1 \cos\theta_i} \right) t_{TE, TM}^2 \quad (2.28)$$

Ortamın ışığı soğurmadığı kayıpsız durum göz önüne alındığında $R_{TE} + T_{TE} = 1$ ve $R_{TM} + T_{TM} = 1$ olmaktadır.

Diğer taraftan ışığın malzemeye yüzeyine dik olarak geldiği $\theta_i = 0$ durumunda enine elektrik ve manyetik modları ayrı olarak düşünmeksizin denklem (2.27) ve (2.28) in ortak yazımı olarak denklem (2.29) ve (2.30) elde edilmiş olur.

$$R = R_{TE} = R_{TM} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (2.29)$$

$$T = T_{TE} = T_{TM} = \frac{4 n_1 n_2}{(n_1 + n_2)^2} \quad (2.30)$$

Işığın malzeme yüzeyinden yansımaları esnasında gelen ve yansıyan ışığın \vec{E}_{TE} alanı yön değiştirdiğinde 2 ışık arasında π seviyesinde bir faz kayması oluşur. Bu durum ışığın geldiği ortamın kırılma indisi, yansıma yaptığı yüzeyin kırılma indisinden daha küçük olduğunda meydana gelir. Söz konusu faz kayması ve kaymaya bağlı kayıplar ise girişim kavramı ile açıklanmaktadır.

Girişim asgari 2 veya daha fazla sayıda dalganın aynı frekans değerine sahip olması ve eş fazlı olmaları durumunda üst üste binmesi şeklinde tanımlanabilir. Bu nedenle girişimin tanımlanabilmesi için faz kayması büyük önem taşımaktadır.

Doğada sınırsız sayıda girişim olayı meydana gelmesine rağmen dikkate aldığımız kısım ince film kaplamalarda optik özelliklerin kontrol edilebilmesine olanak sağlayan girişim olayıdır.

Işık malzeme yüzeyine ulaştığı anda bir kısmı malzemeyi geçer ve bir kısmı da malzeme yüzeyinden yansıma yaparak geri döner. Benzer şekilde malzemedeki geçen ışık da malzemenin bitiminde diğer ortama geçiş esnasında geri yansıma yaparak Şekil 2.9'da gösterildiği gibi malzemeye geri döner. Söz konusu olay kaplamada katman

sayısı arttıkça bir malzemeden diğer malzemeye geçiş esnasında sürekli olarak tekrarlamaktadır.

Bu durumun anlaşılabilmesi için ilk 2 yansıma yapan ışık demetlerini göz önüne alalım. Malzemenin arka yüzeyinden geri yansıyan 2.demet, malzemeye giriş esnasında geri yansıyan 1.demete göre $2t\cos\theta_t$ seviyesinde ilave yol alarak 1.demetin bulunduğu noktaya ulaşır. 2. demetin kat ettiği mesafenin içerisinde yol aldığı malzemenin kırılma indisi ile çarpımı denklem (2.31) de gösterilen optik güzergâh farkını (Δ) tanımlamaktadır.

$$\Delta = 2 n_t t \cos\theta_t \quad (2.31)$$

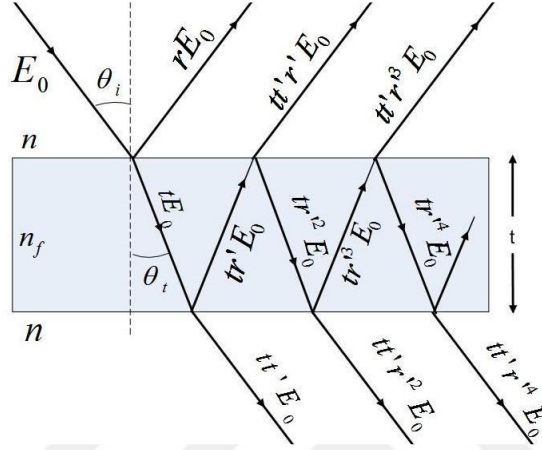
Denklem (2.31) de tanımlanan optik güzergâh farkı 1. ve 2. demet arasındaki faz farkını oluşturmaktadır. Bu durumda $\Delta = \lambda$ ise 2 demet eş fazlıdır ve aralarındaki girişim yapıcı olarak tanımlanır.

Diğer taraftan ışığın geldiği ortamın kırılma indisi malzemenin sahip olduğundan daha düşük ise 1. ve 2. demet arası faz kayması meydana gelir ve 2. demete $\pi=\lambda/2$ seviyesinde faz eklemesi olur. Bu durumda 2 demet arası eş fazlılık durumu ortadan kalkarak yıkıcı girişim meydana gelmiş olur.

Söz konusu çoklu yansımaların meydana geldiği durumlarda iç ve dış yansıma kavramlarının tanımlanması gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Işığın geldiği ortamın kırılma indisinin yansıma yaptığı malzemenin kırılma indisinden düşük olduğu durumda meydana gelen yansıma dış yansıma, tersi duruma ise iç yansıma adı verilmektedir.

Söz konusu durumlarda yansıma (r) ve geçirgenlik (t) katsayıları dış yansıma durumunda, yansıma (r') ve geçirgenlik (t') katsayıları ise iç yansıma durumunda tanımlanmaktadır.

Gelen ışığın genliğine (E_0) ve geliş açısına bağlı olarak Şekil 2.10'da gösterildiği şekilde malzemenin ön ve arka yüzeyinde meydana gelecek çoklu yansımaları bir mercekle toplamamız durumunda yüzeyin dikliği çevresinde girişim desenleri gözlemlenecektir. Söz konusu girişime çok demetli girişim adı verilmektedir.



Şekil 2.10. Yansıma yapan demetler arası girişim

Denklem (2.32) de yansıma yapan 2 demet arasında meydana gelen faz kayması tanımlanmaktadır.

$$\emptyset = k \Delta, k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.32)$$

Diğer taraftan Şekil 2.10'da gösterildiği gibi ilk 3 yansıyan demet denklem (2.33), (2.34) ve (2.35) de gösterildiği şekilde tanımlanmaktadır.

$$E_1 = r E_0 e^{i\omega t} \quad (2.33)$$

$$E_2 = t t' r' E_0 e^{i(\omega t - \emptyset)} \quad (2.34)$$

$$E_3 = t t' r'^3 E_0 e^{i(\omega t - 2\emptyset)} \quad (2.35)$$

Temelde yansıyan 3 demet için yansıma ve geçirgenlik davranışlarının belirlenmesine çalışılmasına rağmen gerçekte çok daha fazla yansımanın meydana gelmekte olduğunu göz önünde bulundurmanız gerekmektedir. Bu durumda yansıyan N. dalga sayısı için toplam yansıma genliği denklem (2.36) da gösterildiği şekilde yazılır.

$$E_N = t t' r'^{(2N-3)} E_0 e^{i[wt-(N-1)\theta]} \quad (2.36)$$

Denklem (2.28) in N sayıda yansıma için toplanması sonucu elde edilecek yansıyan dalga genlik toplamları denklem (2.37) de ki gibi elde edilmiş olur.

$$E_R = E_0 e^{iwt} \left[r + t t' r' e^{-i\theta} \sum_{n=2}^N r'^{(2N-4)} e^{-i(N-2)\theta} \right] \quad (2.37)$$

Gerçekleştirilen toplama işlemi ile denklem (2.37) nin sadeleştirilmesi sonucunda denklem (2.38) elde edilmiş olur.

$$E_R = E_0 e^{iwt} \left[\frac{r(1-e^{-i\theta})}{1-r^2 e^{-i\theta}} \right] \quad (2.38)$$

Birim yüzeye ortalama sürede düşen ışınım miktarı olarak tanımlanan aydınlanma denklem (2.39) da gösterildiği şekilde ifade edilmektedir.

$$I = \varepsilon_0 c^2 \langle |\vec{E} \times \vec{B}| \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 c E_R^2 \quad (2.39)$$

Bu durumda yansıyan ve geçen dalgalar için aydınlanma denklemleri (2.40) ve (2.41) de gösterildiği şekilde tanımlanır.

$$I_R = \frac{2 r^2 (1-\cos\theta)}{1+r^4-2r^2 \cos\theta} I_i \quad (2.40)$$

$$I_T = \frac{(1-r^2)^2}{1+r^4-2r^2 \cos\theta} I_i \quad (2.41)$$

Söz konusu denklemlerde yer alan I_i değeri, denklem (2.39) da gösterilen gelen dalganın aydınlanma değerini ifade etmektedir.

Işığın malzemeden geçişini tanımlayan geçirim şiddetinin denklem (2.42) de gösterildiği şekilde Airy fonksiyonu $A(\emptyset)$ cinsinden tanımlanması modellemede işlem kolaylığı sağlamaktadır. Söz konusu Airy fonksiyonu denklem (2.43) de tanımlanmakta olup denklemde yer alan Finesse (F) katsayısı denklem (2.44) de gösterildiği şekilde sınır koşullarında ki yansımayı ifade etmektedir.

$$I_T = \frac{t t'}{1-r^2} A(\emptyset) I_i \quad (2.42)$$

$$A(\emptyset) = \frac{1}{1+F \sin^2 \frac{\emptyset}{2}} \quad (2.43)$$

$$F = \left(\frac{2r}{1-r^2} \right)^2 \quad (2.44)$$

Yukarıda tanımlanmış olan denklemlerin tamamı ışığın bir malzemenin yüzeyinde ki sınır koşulları ile karşılaştığı zaman sergileyeceği davranışları ifade etmektedirler. Bu bakış açısı ile çok katmanlı ince filmlerin aslında yüzey sınır koşullarında ışığın sergileyeceği davranışların toplamı olduğunu ifade edebiliriz.

Işığın söz konusu davranışları sergilemesi sonucu çok katmanlı film yapısından elde edilecek r ve t değerlerini katman sayısına göre tek tek hesaplamak ve toplam davranışı tanımlamak gerçekte pratik bir çözüm sunmamaktadır. Bu durumda Matris Metodu adı verilen yöntemin kullanılarak çok katmanlı yapıların ışığın r ve t davranışlarına etkileri toplam şekilde ele alınabilmektedir.

2.3.3. Matris metodu

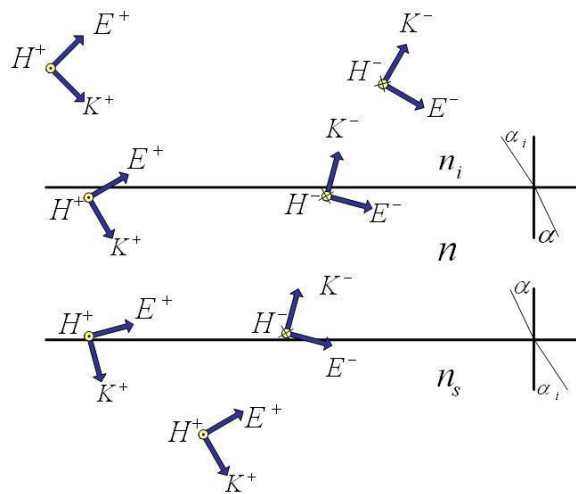
Tek katmanlı ince bir filmin ön ve arka yüzeylerindeki dalgaların birbirleriyle ilişkisi söz konusu filmin karakteristik matrisini ifade eder. Dalgaların birbirleriyle ilişkisini tanımlayan 2x2 lik bir matris, ışığın malzeme yüzeyindeki sınır koşullarında oluşan yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin yanı sıra filmin optik parametrelerini de elde etmemize olanak sağlamaktadır.

Şekil 2.11’de gösterildiği üzere (Thelen 1989) 1. sınır koşulunda elektrik ve manyetik alanların teğet bileşenlerinin sürekli olduğu sınır koşulları denklem (2.45) ve (2.46) da ifade edilmektedir.

$$E(x_1) = E^+(x_1 - \varepsilon) + E^-(x_1 - \varepsilon) = E^+(x_1 + \varepsilon) + E^-(x_1 + \varepsilon) \quad (2.45)$$

$$H(x_1) = (\varepsilon_0 \mu_0)^{\frac{1}{2}} [E^+(x_1 - \varepsilon) - E^-(x_1 - \varepsilon)] n_i \cos \theta_i$$

$$= (\varepsilon_0 \mu_0)^{\frac{1}{2}} [E^+(x_1 + \varepsilon) - E^-(x_1 + \varepsilon)] n \cos \theta_t \quad (2.46)$$



Şekil 2.11. Ortam geçiş noktalarında TE dalga modu

Denklem (2.45) ve (2.46) da yer alan $E^+(x_1 - \varepsilon)$ ve $E^+(x_1 + \varepsilon)$ ifadeleri x_1 sınır koşulunun üst ve alt bölgelerinde geliş yönünde hareket eden dalgaları tanımlamaktadır. Söz konusu denklemler x_2 sınır koşulu için tekrardan yazılacak olursa (2.47) ve (2.48) elde edilmiş olur.

$$E(x_2) = E^+(x_2 - \varepsilon) + E^-(x_2 - \varepsilon) = E^+(x_2 + \varepsilon) \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} H(x_2) &= (\varepsilon_0 \mu_0)^{\frac{1}{2}} [E^+(x_2 - \varepsilon) - E^-(x_2 - \varepsilon)] n_s \cos \theta_t \\ &= (\varepsilon_0 \mu_0)^{\frac{1}{2}} [E^+(x_2 + \varepsilon)] n_s \cos \theta_{t2} \end{aligned} \quad (2.48)$$

Söz konusu denklemlerin yazılması esnasında çıkış yüzeyinden ışığın yansımamasından dolayı $E^-(x_2 + \varepsilon)$ terimleri denklemlerden çıkartılmıştır.

Bu aşamada E^+ ve E^- nin her iki sınır koşulunda $E(x_1)$ ve $E(x_2)$ şeklinde yazılmasıyla karakteristik matris elde edilir ve katmanın optik parametreleri hakkında bilgi sahibi olunur. Bu durumda denklem (2.31) ve (2.32) ile dalğanın $\emptyset = (2\pi/\lambda) n t \cos \theta_t$ lik bir faz kaymasında filmin kırılma indisi (n), kalınlığı (t), optik kalınlığı (OT) ve ilgili dalga boyuna karşılık gelen çeyrek dalga optik kalınlığı (QWOT) elde edilmiş olur.

Ardından 2 dalğanın farklı sınır koşullarında (x_1 ve x_2) birbirlerine bağlanması denklem (2.49) ve (2.50) de gösterildiği şekilde gerçekleşir.

$$E^+(x_2 - \varepsilon) = E^+(x_1 + \varepsilon) e^{-i\emptyset} \quad (2.49)$$

$$E^-(x_2 - \varepsilon) = E^-(x_1 + \varepsilon) e^{+i\emptyset} \quad (2.50)$$

Denklem (2.49) un (2.47) ve (2.48) in içerisine yazılarak $E^+(x_1 + \varepsilon)$ ve $E^-(x_1 + \varepsilon)$ için çözümlenmesinin ardından denklem (2.51) ve (2.52) elde edilmiş olur.

$$E(x_1) = E(x_2)\cos\emptyset + \frac{(\varepsilon_0\mu_0)^{\frac{1}{2}}H(x_2)\sin\emptyset}{ncos\theta_t} \quad (2.51)$$

$$(\varepsilon_0\mu_0)^{\frac{1}{2}}H(x_1) = E(x_2)incos\theta_t\sin\emptyset + (\varepsilon_0\mu_0)^{\frac{1}{2}}H(x_2)\cos\emptyset \quad (2.52)$$

Vakum ortamında tanımlı empedans değerinin $Z_0 = (\mu_0/\varepsilon_0)^{\frac{1}{2}}$ denklem (2.51) ve (2.52) de tanımlanması ile (2.53) ve (2.54) elde edilmiş olur.

$$E(x_1) = E(x_2)\cos\emptyset + \frac{Z_0H(x_2)\sin\emptyset}{ncos\theta_t} \quad (2.53)$$

$$H(x_1) = (1/Z_0)E(x_2)incos\theta_t\sin\emptyset + H(x_2)\cos\emptyset \quad (2.54)$$

Aynı hesaplamalar enine manyetik mod (TM) için de yapılırsa denklem (2.55) ve (2.56) elde edilmiş olur.

$$E(x_1) = E(x_2)\cos\emptyset + \frac{Z_0H(x_2)\sin\emptyset}{n/cos\theta_t} \quad (2.55)$$

$$H(x_1) = \left(\frac{1}{Z_0}\right)E(x_2)i(n/cos\theta_t)\sin\emptyset + H(x_2)\cos\emptyset \quad (2.56)$$

Elde edilen 2 çift denklem seti (2.57) de gösterildiği şekilde matris formunda yazılır.

$$\begin{bmatrix} E(x_1) \\ H(x_1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\emptyset & \frac{Z_0\sin\emptyset}{b} \\ \frac{incos\theta_t\sin\emptyset}{Z_0} & \cos\emptyset \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(x_2) \\ H(x_2) \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Oluşturulan eşitlik seti tek katman için karakteristik matrisi tanımlamaktadır. Yapıda N sayıda katmanın yer alması durumunda sistemin toplam matrisi denklem (2.58) de görüleceği üzere her bir katmanın bireysel matrislerinin çarpımından oluşmaktadır.

$$\begin{bmatrix} E(x_1) \\ H(x_1) \end{bmatrix} = M_1 M_2 \dots M_N \begin{bmatrix} E(x_{N+1}) \\ H(x_{N+1}) \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Elde edilen matristen de görüleceği üzere sistem matrisinden filmin kırılma indisi (n), kalınlığı (t), optik kalınlığı (OT) ve ilgili dalga boyuna karşılık gelen çeyrek dalga optik kalınlığı (QWOT) gibi optik parametreler elde edilebilir. Sistemin r ve t değerlerinin elde edilebilmesi için de E(x₁) ve E(x₂) nin E⁺ ve E⁻ cinsinden yazılması gerekmektedir.

Denklem (2.57) nin (2.45), (2.46) ve (2.48) kullanılarak tekrardan yazılması ile (2.60) elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} E^+(x_1 - \varepsilon) + E^-(x_1 - \varepsilon) \\ (\varepsilon_0/\mu_0)^{\frac{1}{2}}[E^+(x_1 - \varepsilon) - E^-(x_1 - \varepsilon)]n_i \cos\theta_i \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} E^+(x_2 + \varepsilon) \\ (\varepsilon_0/\mu_0)^{\frac{1}{2}}[E^+(x_2 + \varepsilon)]n_s \cos\theta_{t2} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

Hareket eden her dalganın hareket yönünde ilerleyen tüm dalgaların toplamından oluştuğunu düşündüğümüzde r ve t, denklem (2.61) ve (2.62) ile ifade edilir.

$$r = \frac{E^-(x_1 - \varepsilon)}{E^+(x_1 - \varepsilon)} \quad (2.61)$$

$$t = \frac{E^+(x_2 + \varepsilon)}{E^+(x_1 - \varepsilon)} \quad (2.62)$$

Elde edilen denklemler ile (2.60) tekrardan yazılacak olursa (2.63) matrisi elde edilmiş olur.

$$\begin{bmatrix} 1 + r \\ (\varepsilon_0/\mu_0)^{\frac{1}{2}}[1 - r]n_i \cos\theta_i \end{bmatrix} = M_1 \begin{bmatrix} t \\ (\varepsilon_0/\mu_0)^{\frac{1}{2}}tn_s \cos\theta_{t2} \end{bmatrix} \quad (2.63)$$

Elde edilen matris sistemi genişletildiği takdirde denklem (2.62) yansıma ve geçirgenlik genliklerini karakteristik matris element terimleri şeklinde vermektedir.

Çok katmanlı yapılarda hedeflenen yansımaya ve geçirgenlik değerlerini elde edebilmek amacıyla katmanların, giriş ve çıkış ortamlarının sahip olduğu optik parametreler ve matris sistemleri kullanılarak hesaplanmaktadır.

Söz konusu hesaplamalar uygulamaya özel farklı spektral isterlere göre yansımaya ve geçirgenlik değerlerine hedef değerler tanımlanarak oluşturulan sistem matrislerin çözümü sonucunda hedef değerlere ulaşmak için ihtiyaç duyulan katman sayısı ile katmanların optik özelliklerinin tersine çözümü ile elde edilmektedir.

Hedeflenen spektral davranışların elde edilebilmesi amacıyla sistem matrislerini çözmeye yarayan matematiksel araçlar hedef davranış ile katman sayısı, katmanların kalınlığı, kırılma indisleri vb. optik parametreleri kullanarak gerçekleştirilen hesaplama sonucu elde edilen davranışı birbirlerine benzetme yöntemiyle çalışmaktadırlar.

Bahsi geçen benzetim kök fonksiyonu (MF) denilen tek değerli bir fonksiyonun hedef ile optimize edilen tasarımlar arası farkını ifade etmektedir. Kök fonksiyonunun $MF = 0$ olması, hedeflenen ile matris yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonrasında elde edilen spektral davranışların birbirlerine eşit olmasını ifade etmektedir (Dobrowolski and Kemp 1990).

Çok katmanlı bir sistemin tasarımı temelde katmanların sınır koşullarında meydana gelen girişim etkisi ile belirlendiğinden bir önceki katman veya ortamdaki gelen dalgaların faz ve genlikleri en önemli fiziksel parametreleri oluşturmaktadırlar.

Malzemelerin kalınlık ve dalga boyuna bağlı kırılma indislerinin optimizasyon süreçlerinde kullanılması ile hedef ve optimizasyon arası kök fonksiyon değeri farklı modelleme yöntemleri ile asgari seviyeye getirilmeye çalışılmaktadır (Tikhonravov and Trubetskoy 1995).

Bu çalışmada ise optik kaplamaların geliştirilmesine yönelik geliştirilmiş matematiksel hesaplama araçlarından ince film tasarım programı olarak tanımlanan “OptiLayer” yazılımı kullanılmıştır.

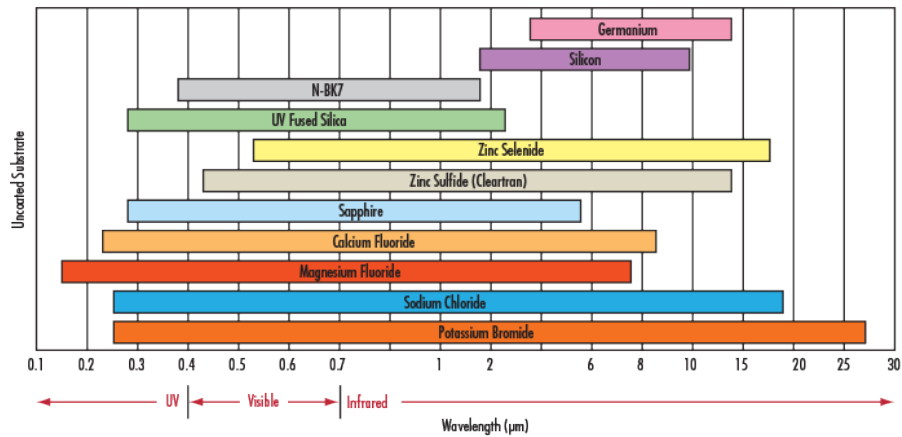


3. MATERYAL ve YÖNTEM

Bu bölümde öncelikli olarak MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılacak IR optik malzemeler ve kaplama katman malzemeleri ile ilgili bilgiler verilecektir. Ardından MWIR ARC tasarımında kullanılan yazılımlara ilişkin bilgiler verilecektir. Daha sonra optik kaplama teknolojilerine ilişkin bilgiler verilerek bu çalışmada kullanılan kaplama teknolojisi açıklanacaktır. Son olarak, optik kaplamaların geliştirilmesi sürecinde kritik rol oynayan metroloji sistemlerine ilişkin bilgiler verilecek ve geliştirme sürecine ilişkin döngüsel yöntem açıklanacaktır.

3.1. IR Malzemeler

Görünür bölge için çok sayıda optik malzeme bulunmasına karşın IR bölgede düşük soğurma katsayılı, yüksek geçirgenlikte ve ayna, lens, prizma vb. formlarında işlenebilir malzeme sayısı kısıtlıdır (Klocek 1991). IR bölgede optik bileşen geliştirmek için kullanılan malzemelerin geçirgen oldukları spektral aralıklar Şekil 3.1'de gösterilmektedir.



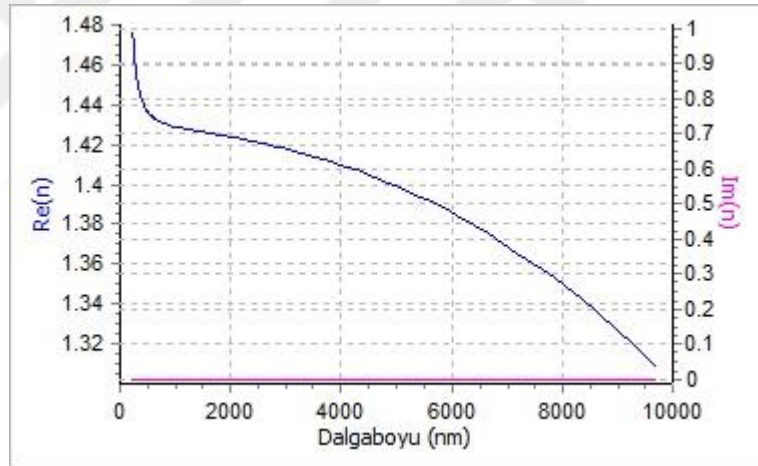
Şekil 3.1. IR bölgede kullanılan optik malzemeler

IR bölgede kullanılacak optik malzemelerin seçimi esnasında göz önünde bulundurulması gereken temel unsurlar; sıcaklığa bağlı boyutsal değişiminin (CTE)

küçük olması, yüksek geçirgenlik, işlenebilme kolaylığı ve malzeme maliyeti şeklinde özetlenebilir. Bu çalışma kapsamında geliştirilen MWIR ARC kaplamalar için 1” (25,4 mm) çap ve 1 mm kalınlığa sahip olan ve optik kaplama süreçlerinde şahit numune (Witness Sample) olarak tanımlanan standart CaF_2 , Ge, Si ve ZnS şahit numuneler kullanılmıştır.

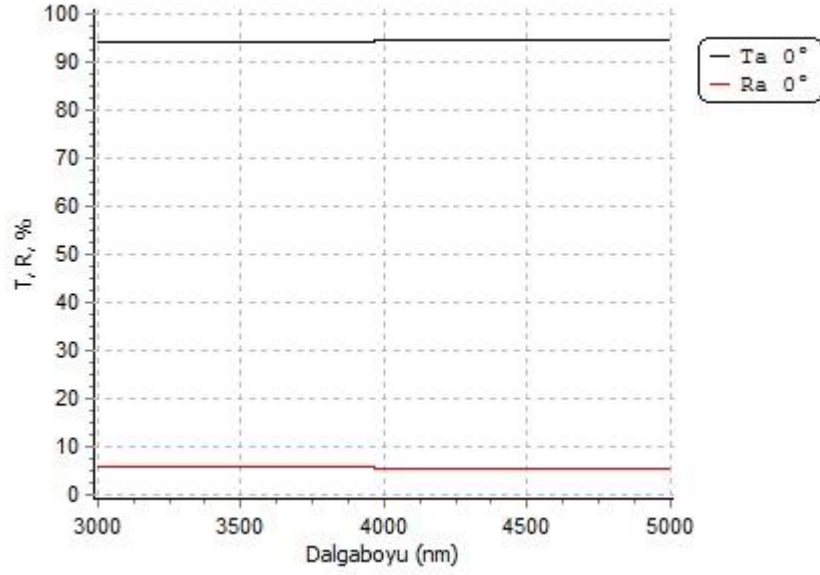
3.1.1. Kalsiyum florür (CaF_2)

IR bölgede geniş kullanım alanına sahiptir. MWIR bölgede Şekil 3.2’de gösterildiği gibi 1,4–1,45 arası kırılma indisine sahip olup sıcaklığa bağlı indis değişimi (dn/dT) $-10,6$ ppm/ $^{\circ}\text{C}$ seviyesindedir.



Şekil 3.2. CaF_2 kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı (Malitson 1963)

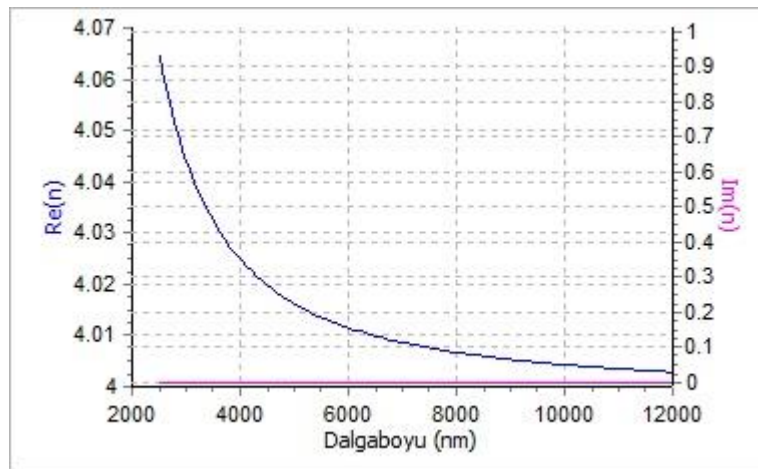
Homojen indis dağılımına ve Şekil 3.3’de gösterildiği gibi %94–95 arası ortalama geçirgenliğe sahip olmasından dolayı üzerine ARC kaplama yapılmadan veya ARC kaplama ile MWIR uygulamalarda yaygın şekilde kullanılmaktadır (Ristau 2014).



Şekil 3.3. MWIR bölgede CaF_2 için yansıtma ve geçirgenlik spektrumları

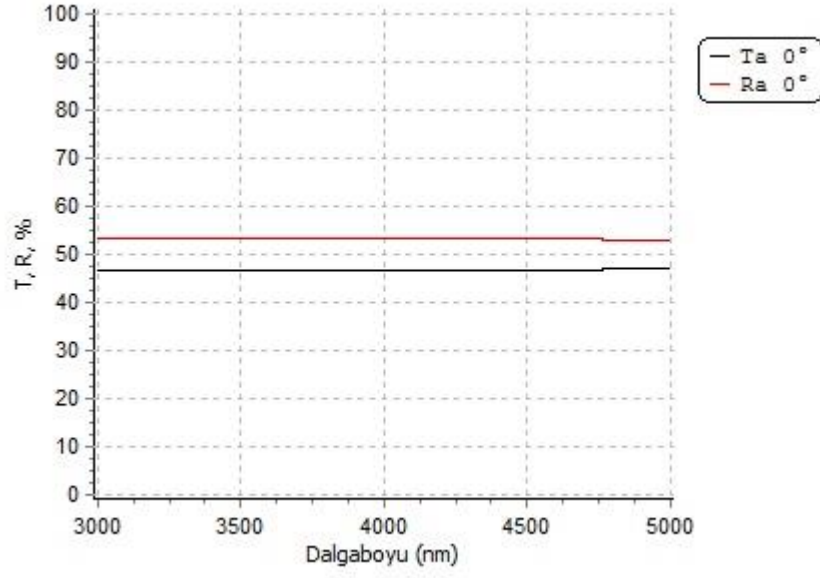
3.1.2. Germanyum (Ge)

Kristal yapılı olan Germanyum, MWIR uygulamalarda en yaygın kullanılan malzemelerden birisidir. MWIR bölgede Şekil 3.4’de gösterildiği gibi 4,01–4,05 arası kırılma indisine sahip olup sıcaklığa bağlı indis değişimi (dn/dT) 396 ppm/°C seviyesindedir.



Şekil 3.4. Ge kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı (Icenogle *et al.* 1976)

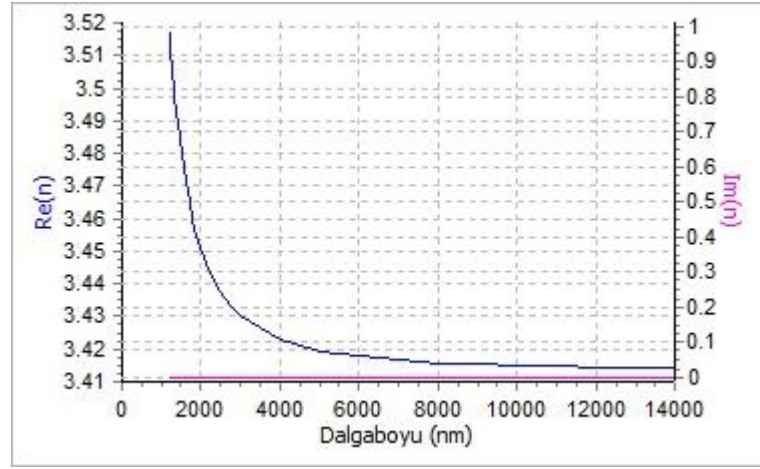
Yüksek kırılma indisine sahip olması ve MWIR/LWIR bölgelerde Şekil 3.5’de gösterildiği gibi %46–47 arası ortalama geçirgenliğe sahip olmasından dolayı termal görüntüleme de ARC kaplamalar ile kullanılmaktadır (Simmons and Potter 2000).



Şekil 3.5. MWIR bölgesinde Ge için yansıma ve geçirgenlik spektrumları

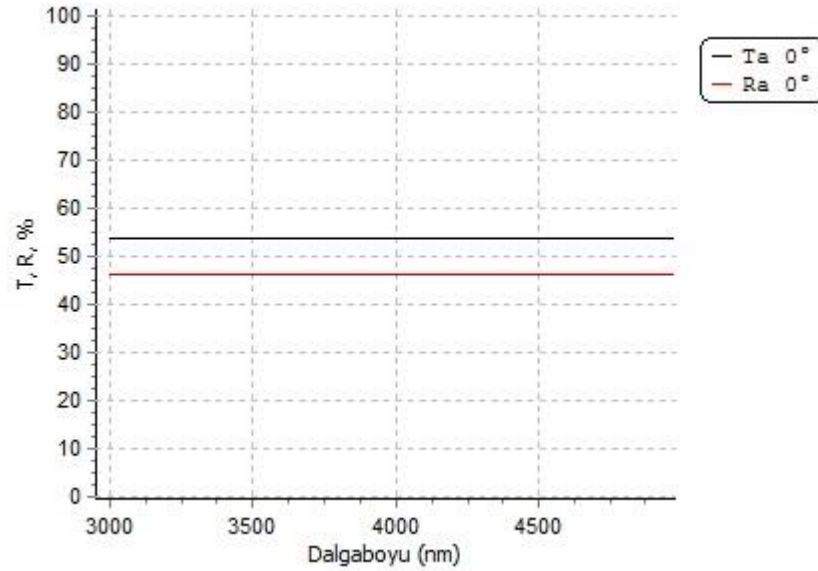
3.1.3. Silisyum (Si)

Kristal yapıya sahip olan Silisyum, özellikle MWIR uygulamalarda yaygın kullanılan malzemedir. MWIR bölgesinde Şekil 3.6’da gösterildiği gibi 3,42–3,43 arası kırılma indisine sahip olup sıcaklığa bağlı indis değişimi (dn/dT) 1,60 ppm/°C seviyesindedir.



Şekil 3.6. Si kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı (Li 1993)

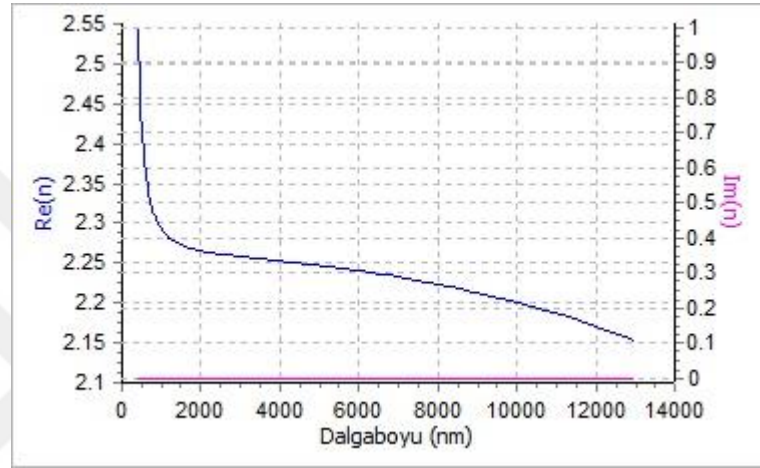
Yüksek kırılma indisine sahip olması ve MWIR bölgede Şekil 3.7’de gösterildiği gibi %53–54 seviyesinde ortalama geçirgenliğe sahip olmasından dolayı termal görüntüleme de ARC kaplamalar ile kullanılmaktadır (Simmons and Potter 2000).



Şekil 3.7. MWIR bölgede Si için yansımaya ve geçirgenlik spektrumları

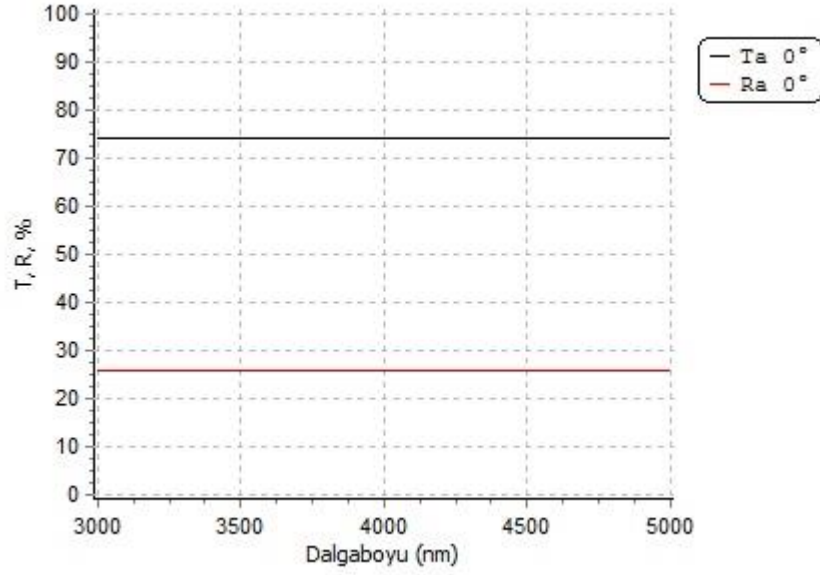
3.1.4. Çinko sülfür (ZnS)

SWIR, MWIR ve LWIR bölgelerde geniş kullanım alanına sahiptir. MWIR bölgede Şekil 3.8’de gösterildiği gibi 2,25–2,27 arası kırılma indisine sahip olup sıcaklığa bağlı indis değişimi (dn/dT) 38,7 ppm/°C seviyesindedir.



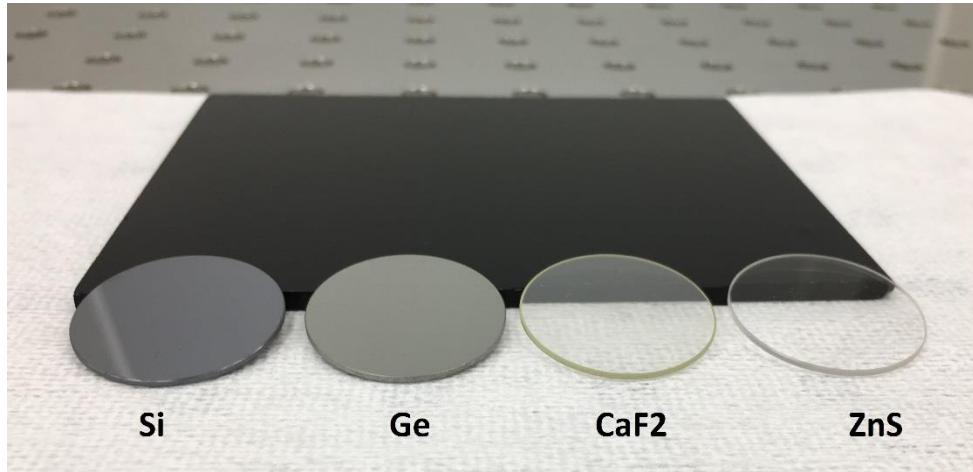
Şekil 3.8. ZnS kırılma indisi ve sönümlenme katsayısının spektral dağılımı (Debenham, 1984)

MWIR bölgede Şekil 3.9’da gösterildiği gibi %74–75 seviyesinde ortalama geçirgenliğe sahip olmasından dolayı termal görüntüleme de ARC kaplamalar ile kullanılmaktadır (Simmons and Potter 2000).



Şekil 3.9. MWIR bölgede ZnS için yansımaya ve geçirgenlik spektrumları

MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan CaF₂, Ge, Si ve ZnS şahit numuneler Şekil 3.10'da gösterilmektedir.



Şekil 3.10. MWIR ARC kaplamaların geliştirildiği şahit numuneler

Şahit numunelerin üzerlerine ARC kaplamaların geliştirilebilmesi için yüksek ve düşük kırılım indisine sahip asgari 2 farklı katman malzemesine ihtiyaç duyulmaktadır. Geliştirme süreçlerinde kullanılan kaplama sisteminde kararlı şekilde kaplanabilirliği,

indis farkının yüksek olması sayesinde asgari katman sayısı ile hedeflenen spektral isterlere maliyet etkin şekilde ulaşabilmeye olanak sağlaması, yüksek kararlılık ve dayanım gibi özellikleri göz önüne alınarak yüksek saflıkta ($> \%99,9$) Al_2O_3 (nL) ve Ge (nH) malzemelerinin kullanılmasına karar verilmiştir. Çalışmalarda kullanılan nL ve nH malzemeler Şekil 3.11’de gösterilmektedir.



Şekil 3.11. MWIR ARC kaplamalarda kullanılan Al_2O_3 (sol) ve Ge (sağ)

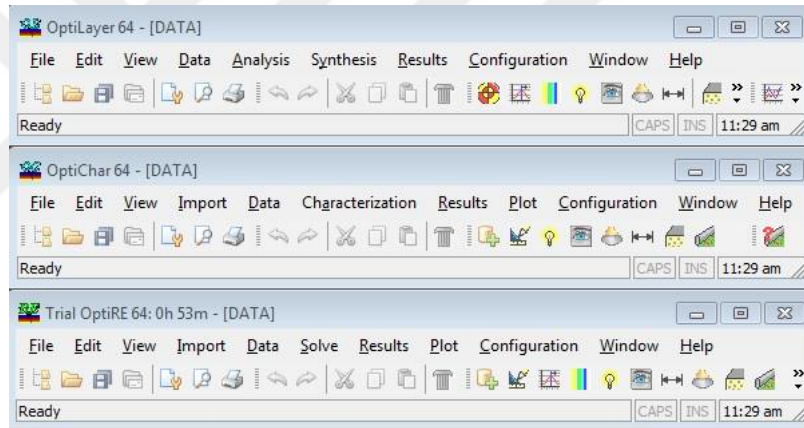
3.2. İnce Film Tasarım Yazılımı

Çok katmanlı optik kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk ayağını; talep edilen spektral geçirgenlik ve yansıma hedeflerinin tanımlanarak, kaplamaların üzerlerine geliştirileceği malzemelerin ve kaplama katmanı olarak kullanılacak malzemelerin optik özelliklerinin tanımlanması ile optimizasyon yapılabilmesine olanak sağlayan ince film modelleme algoritmaları veya ticari yazılımları oluşturur (Macleod 2017). Bu yazılımların kullanımı; çok katmanlı optik kaplamaların modellenmesi, kaplamalar da kullanılan taban ve katman malzemelerinin karakterizasyonu ve çok katmanlı optik kaplamaların aktif optimizasyonuna (Kaiser and Pulker 2013) olanak sağlamaktadır.

Bu çalışmada çok katmanlı MWIR ARC kaplamaların tasarımı, analizi, taban ve katman karakterizasyonu ile aktif optimizasyon süreçlerinde 1992 yılından itibaren Prof. Alexander Tikhonravov ve Dr. Michael Trubetskov tarafından geliştirilmekte olan Optilayer ince film yazılımları kullanılmıştır. Söz konusu yazılım temelde 3 alt

modülden oluşmaktadır. Farklı tasarım ve analiz çalışmalarında aynı veri tabanını kullanan alt modüller Şekil 3.12’de gösterilmekte olup modüllerin temel kullanım amaçları şunlardır;

- OptiLayer: Optik kaplama tasarımı, değerlendirme, hata analizi, izleme, hesaplamalı imalat
- OptiChar: Spektral fotometrik ve elipsometrik ölçüm verileri ile alttaş ve tek katman karakterizasyonu
- OptiRe: Spektral fotometrik ve elipsometrik ölçüm verileri ile çok katmanlı optik kaplamaların karakterizasyon ve optimizasyonları



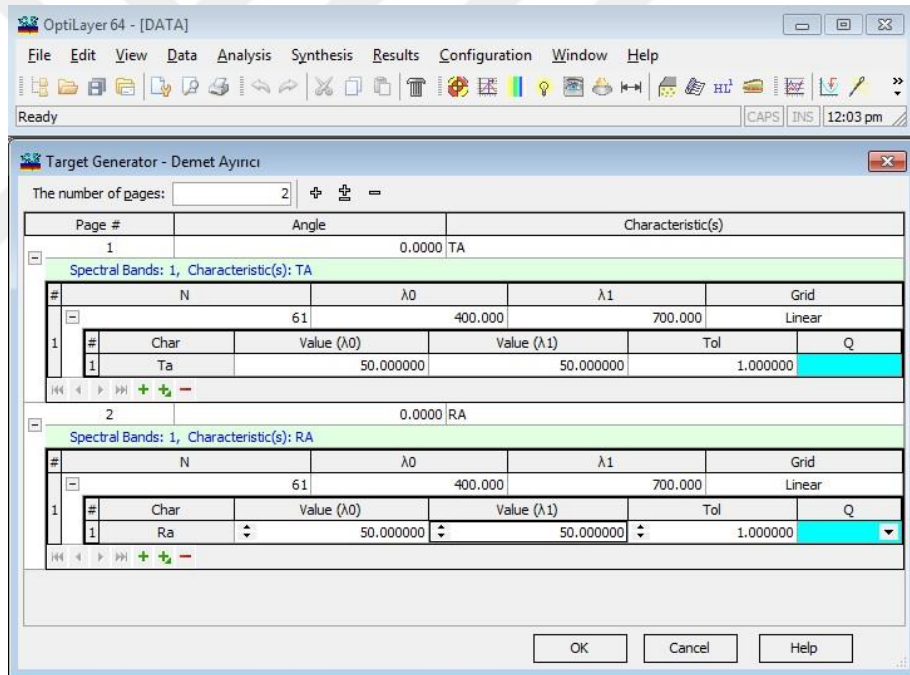
Şekil 3.12. OptiLayer tasarım modülleri. OptiLayer (üst), OptiChar (orta) ve OptiRe (alt)

OptiLayer modülü; herhangi bir spektral aralık veya açı değerinde modelleme yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Yazılımda spektral parametreler dalgaboyu (nm), dalga sayısı (cm^{-1}), enerji (eV) ve frekans (Hz) şeklinde, açısal parametreler ise derece veya radyan olarak tanımlanabilmektedir. Tasarlanabilecek optik kaplamaların bazıları şunlardır;

- Anti Yansıtıcı / Yansıtıcı Kaplamalar
- Bant Geçirgen Filtreler
- Demet Ayırıcılar

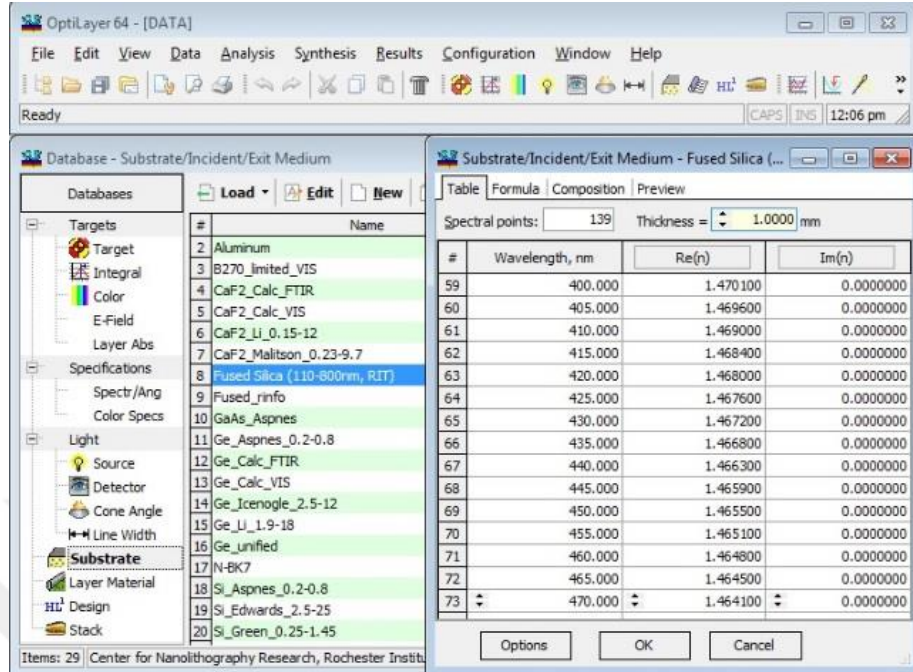
- Polarizörler
- Renk Kaplamaları
- Yüksek Güç Lazer Kaplamaları

OptiLayer programının temel çalışma ilkesi öncelikli olarak tasarlanması amaçlanan optik kaplamanın spektral davranışının tanımlanmasıdır. Örneğin görünür spektrum olan 400–700 nm arasında gelen ışığın %50'sini yansıtan ve %50'sini geçiren bir demet ayırıcı tasarımı için öncelikli olarak demet ayırıcının hedeflenen spektral davranışı; üzerine 0°'lik açı ile dik gelen ışık için 400–700 nm dalgaboyu aralığında %50 geçirgenlik ve %50 yansıma olarak Şekil 3.13'de gösterildiği gibi tanımlanır.

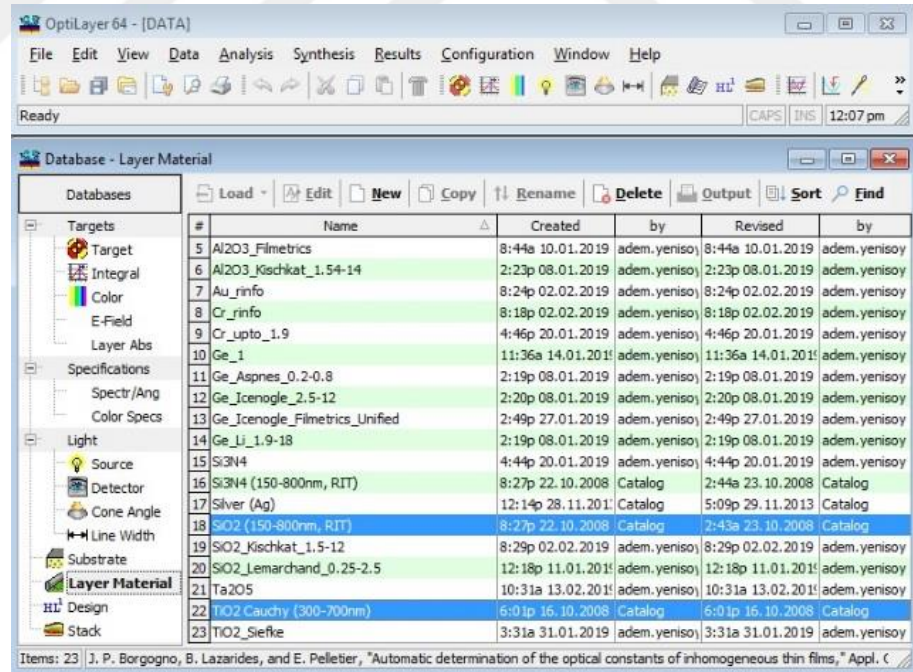


Şekil 3.13. OptiLayer da demet ayırıcı tasarımı için spektral davranış tanımlaması

Tasarımda hedeflenen spektral davranış tanımlandıktan sonra Şekil 3.14'de gösterildiği gibi kaplamanın üzerine geliştirileceği alttaş ve Şekil 3.15'de gösterildiği gibi kaplama da kullanılacak yüksek (nH) ve düşük (nL) kırılma indisli malzemeler tanımlanır.



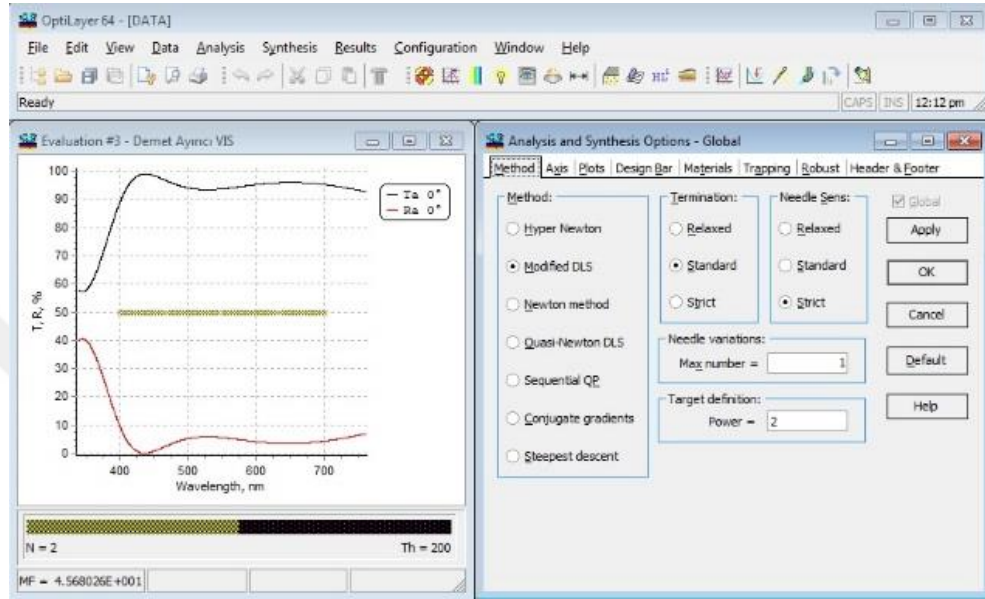
Şekil 3.14. Demet ayırıcı için kullanılacak alttaşın tanımlanması



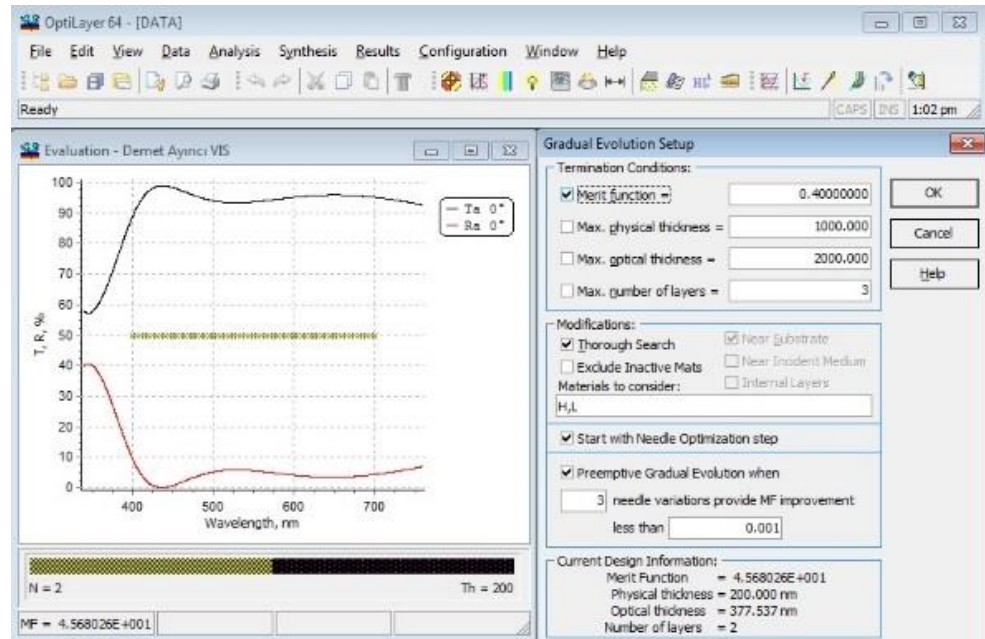
Şekil 3.15. Demet ayırıcı için kullanılacak katman malzemelerinin tanımlanması

Tanımlanan spektral davranışı elde etmek için kullanılacak alttaş ve katman malzemeleri tanımlandıktan sonra tasarımın yapılmasında esas alınacak modelleme

yöntemi Şekil 3.16'da gösterildiği şekilde tanımlandıktan sonra Şekil 3.17'de ki gibi hedef ile optimizasyon arası farklılığın ölçüsü olan kök fonksiyonu (MF) belirlenerek tasarım gerçekleştirilir.

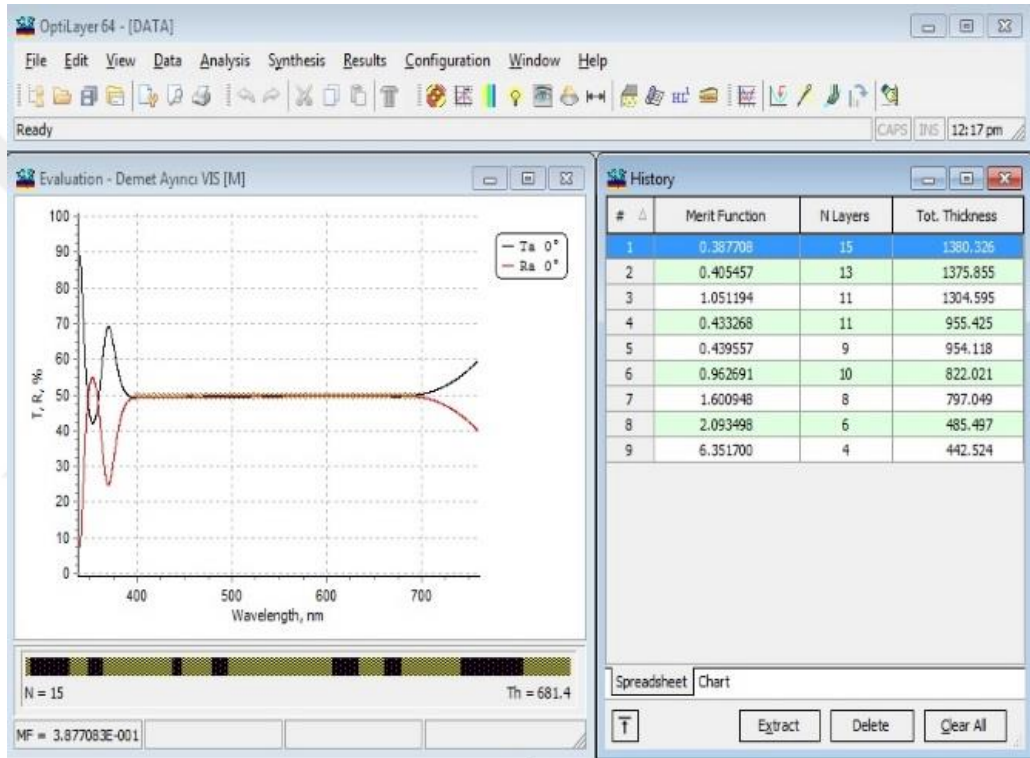


Şekil 3.16. Modelleme yönteminin belirlenmesi



Şekil 3.17. Hedef ile tasarım arası farklılık derecesinin belirlenmesi

Tasarım ile hedef spektral davranışın benzetimi sınırlanan kök fonksiyon değerine ulaştığında tasarım aşaması sonlanmış olur. Tasarımın kullanılan katman malzemelerine bağlı olarak spektral davranışı sağlamak için Şekil 3.18’de gösterildiği gibi kaplanması gereken ardışık katman sayısı ve Çizelge 3.1’de gösterildiği gibi katmanlara ilişkin referans dalga boyunda fiziksel kalınlık, optik kalınlık, çeyrek dalga optik kalınlık ve katman sırası gibi çıktılar elde edilir.

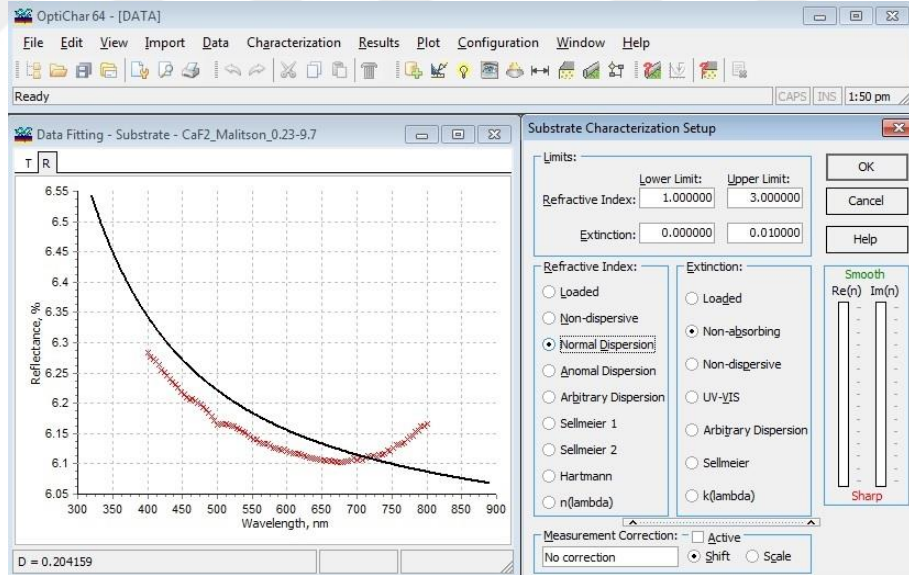


Şekil 3.18. Tasarım ile oluşan kaplama katman sayısı

Çizelge 3.1. Tasarım sonucu ortaya çıkan katman parametreleri

#	Physical th.	Optical th.	QWOT	Abbr	State	Material
1	6.411	14.854	0.10803	H	A	TiO2
2	48.799	71.16	0.517531	L	A	SiO2
3	22.817	52.87	0.384509	H	A	TiO2
4	18.475	26.941	0.195933	L	A	SiO2
5	87.919	203.721	1.48161	H	A	TiO2
6	10.789	15.733	0.114422	L	A	SiO2
7	37.718	87.397	0.635617	H	A	TiO2
8	19.658	28.666	0.20848	L	A	SiO2
9	131.365	304.392	2.21376	H	A	TiO2
10	32.92	48.004	0.349123	L	A	SiO2
11	31.118	72.104	0.524393	H	A	TiO2
12	21.724	31.678	0.230387	L	A	SiO2
13	73.705	170.785	1.24207	H	A	TiO2
14	78.82	114.938	0.835909	L	A	SiO2
15	59.16	137.082	0.996963	H	A	TiO2

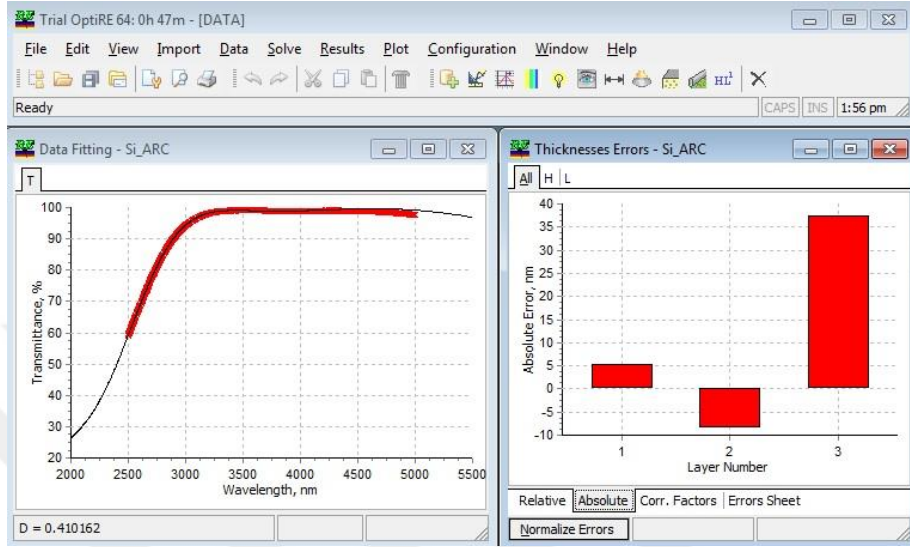
Tasarım sürecinde kullanılan OptiChar modülü ise optik kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan alltaş ve katman malzemelerinin spektral ölçüm sonuçları ile Şekil 3.19'da gösterildiği gibi karakterize edilebilmesine olanak sağlar.



Şekil 3.19. OptiChar modülü ile numune ve tek katman modellemesi

Yazılım; alltaş veya katmanların kırılma indisi ve sönümlenme katsayılarının dalgaboyuna bağlı olarak Cauchy ve Sellmeier gibi matematiksel dağılım modellerine

(Fujiwara 2007) benzetimini amaçlayarak malzemelerin optik karakteristiklerini tasarım aşamasına girdi veya revizyon olarak sağlamaya olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.20. OptiRe modülü ile çok katman hata analizi

OptiLayer ile modellenen optik kaplamaların geliştirilmesi sürecinde kullanılan OptiRe modülü ise Şekil 3.20’de gösterildiği gibi kaplamaların spektrometrik ölçümlerini ve tasarım verilerini girdi olarak alarak katman kalınlık, indis veya sönümlenme katsayısında sistematik veya rastgele meydana gelebilen üretim hatalarının analizlerinin yapılmasına ve kaplama sürecine geri bildirim sağlanabilmesine olanak sağlamaktadır.

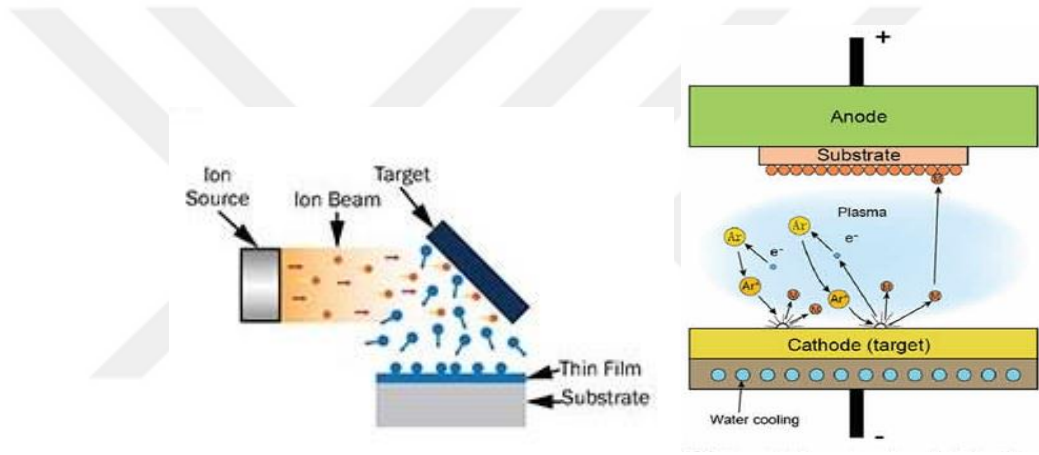
3.3. Optik Kaplama Teknolojisi

Teknik olarak bir malzemenin bir alttaş üzerine kaplanabilmesi amacıyla geçmişten günümüze geliştirilmiş olan çok sayıda teknoloji vardır (Tracton 2005). Bunlardan en önemlileri kimyasal yöntemle biriktirme (CVD), epitaksiyel büyütme ve fiziksel buharlaştırma (PVD) teknolojileridir (Mattox 2004).

Teknolojilerin kıyasına yönelik kabiliyet ve uygulama alanları göz önüne alındığında optik kaplamaların büyük bir kısmı PVD yöntemleriyle geliştirilmektedir (Baumeister

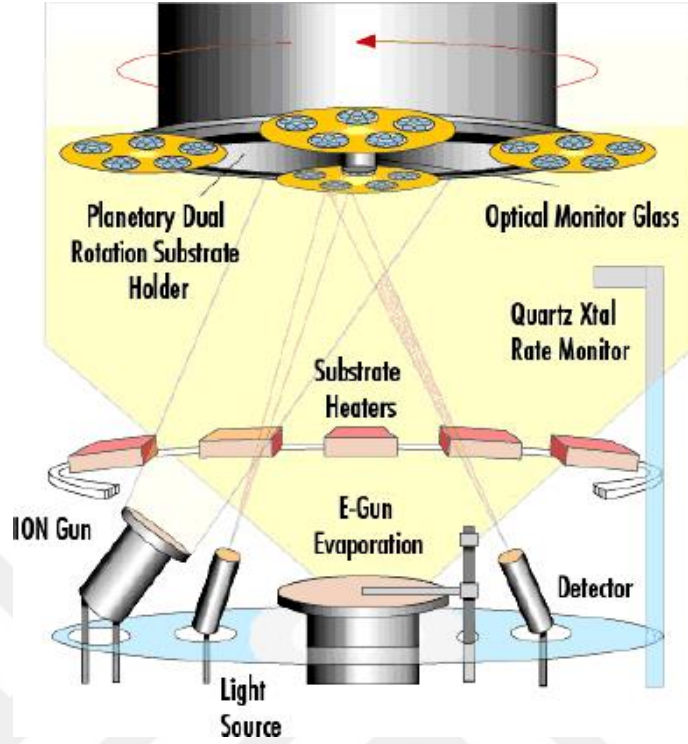
2004). PVD teknolojileri arasında da iyon demeti ile saçırma (IBS), ileri plazma reaktif saçırma (APRS) ve iyon destekli biriktirme (IAD) yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır (Czajkowski 2010).

IBS yönteminde, Şekil 3.21’de gösterildiği gibi kaynaktan yayılan iyon demetinin kaplama katmanını oluşturacak hedef malzemeye çarptırılması sonucunda meydana gelen enerji aktarımı ile hedef malzemeden saçılan parçacıkların altaş üzerinde biriktirilmesi sağlanır.



Şekil 3.21. IBS (sol) ve APRS (sağ) teknolojilerinin temel çalışma şekilleri

APRS yönteminde ise, Şekil 3.21’de gösterildiği gibi kaplama katmanını oluşturacak hedef malzeme ve altaşa farklı potansiyel fark uygulanması sonucu elektriksel alan oluşturulur. Oluşan elektrik alanında iyonize hale getirilen asal gazın iyonları hedef malzemeye çarparak enerji transfer ilkesine göre malzemeden parçaların saçılmasına neden olur. Saçılan parçalar elektrik alan ve plazma ortamında proses gazları ile reaksiyona girerek reaktif şekilde altaş üzerine biriktirilir.



Şekil 3.22. IAD teknolojisinin temel çalışma şekli

Optik kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan en etkili teknolojilerden birisi de IAD sistemleridir. IAD sistemlerinde Şekil 3.22’de gösterildiği gibi katman malzemesi kendisinden daha yüksek erime sıcaklığına sahip olan bir direnç malzemesi içerisinde direncin akım sürülmesi sonucu veya elektron demetinin doğrudan katman malzemesinin üzerine çarptırılmasıyla eritilerek ortamda bulunan iyon veya sıcaklık kaynaklarıyla kaplamanın üzerine yapılacağı alttaş üzerine biriktirilir.

Çizelge 3.2. Optik kaplama teknolojilerinin kıyas tablosu

Kaplama Teknolojileri	IAD	IBS	APRS
Kabiliyetler			
Yatırım ve İşletme Maliyeti	+++	+	++
Malzeme ve Geometri Esnekliği	+++	++	+
Üretim kapasitesi	+++	+	++
Tekrarlanabilirlik	+	++	+++
Spektral Hassasiyet	+	++	+++
Stabilite	++	+++	++
Proses Süresi	++	+	+++
Uygulama Alanları			
ARC Kaplamalar	+++	+	++
Yansıtıcı Kaplamalar	+++	++	+
Bant Geçirgen Filtreler	+	++	+++
Polarize Kaplamalar	+	++	+++
Yüksek Katmanlı (>100) Kaplamalar	+	++	+++

Optik kaplama teknolojilerinin Çizelge 3.2’de gösterildiği gibi sahip oldukları kabiliyetler ve uygulama alanları göz önüne alındığında tek bir teknoloji ile tüm optik kaplama ihtiyaçlarına çözüm üretilemeyeceği görülmektedir. Bu nedenle ihtiyaç duyulan optik kaplama türlerine bağlı olarak teknoloji yatırımları yapılmaktadır. Bu çalışmada ise MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine olanak sağlayan ve Şekil 3.23’de gösterilen IAD sistemi kullanılmıştır.

**Şekil 3.23.** MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan IAD sistemi

Çalışmalarda kullanılan IAD sistemi, Şekil 3.24’de gösterildiği üzere $10^{-6} - 10^{-7}$ mbar yüksek vakum ortamında, 1 adet termal ve 2 adet O₂ beslemeli elektron demeti ile kaplama yapabilmeye olanak sağlamaktadır.



Şekil 3.24. MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan IAD sisteminin proses haznesi

Sistem buharlaştırma kaynaklarının yanı sıra, ihtiyaç durumunda Oksijen (O₂) destekli Argon (Ar) plazması ile kaplama malzemesinin alttaş yüzeyine birikiminde ihtiyaç duyduğu topaklanma enerjisini artırmaya ve oksijen bileşikli yapılarda (SiO₂, Al₂O₃ vb.) malzemenin yapısal bütünlüğünü sağlamaya dolayısıyla da kırılma indis dağılımını homojen oluşturmaya olanak sağlayan bir plazma kaynağına da sahiptir.

Plazma kaynağı dışında topaklanma enerjisinin artırılması, kaplama homojenitesinin artırılması ve alttaş yüzeyinde kaplamaya bağlı oluşabilecek yüzey gerilimini azaltmak amacıyla 300°C’ye kadar çıkabilen ısıtma sistemine de sahiptir.

Sistemde ayrıca kaplama homojenitesini artırmak amacıyla alttaşların hem sabit bir merkez hem de kendi eksenleri etrafında eş zamanlı rotasyon yapabildiği gezegensel rotasyon mekanizması yer almaktadır.

Geliştirilen kaplamaların kalınlık ölçümlerini yapabilmek amacıyla 4'lü kuvars kristal mikrobals (QCM) ve geçirgen kaplama malzemelerin hassas optik kalınlık kontrolü için 12 gözlem pencerele spektral optik kalınlık izleme sistemi yer almaktadır. MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesinde kullanılan katman malzemelerinin kalınlık kontrolü Al₂O₃ (nL) optik kalınlık izleme sistemi ile Ge (nH) için de optik kalınlık monitörünün spektral çalışma aralığı olan 400–1000 nm arası yüksek soğurucu olmasından dolayı QCM ile yapılmıştır.

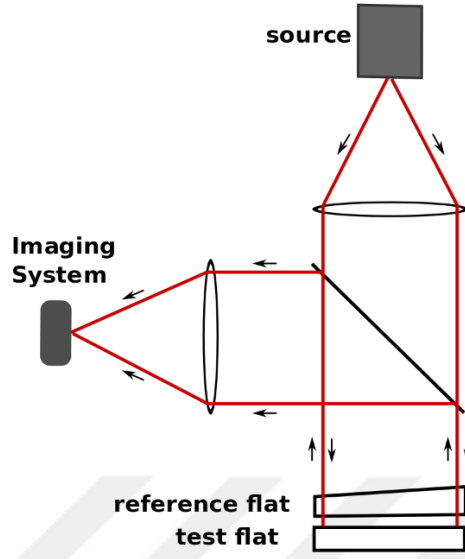
Çalışmalarda kullanılan IAD sistemi, manuel veya otomatik kaplama yapmaya olanak sağlar nitelikte olup çok katmanlı kaplama süreçlerinde farklı senaryolarda çok aşamalı reçete programlama ve uygulamaya olanak sağlamaktadır.

3.4. Optik Metroloji

Bu bölümde çalışmada kullanılan interferometre, temassız yüzey profilometresi, spektrometre ve FTIR sistemlerine ilişkin bilgiler yer almaktadır.

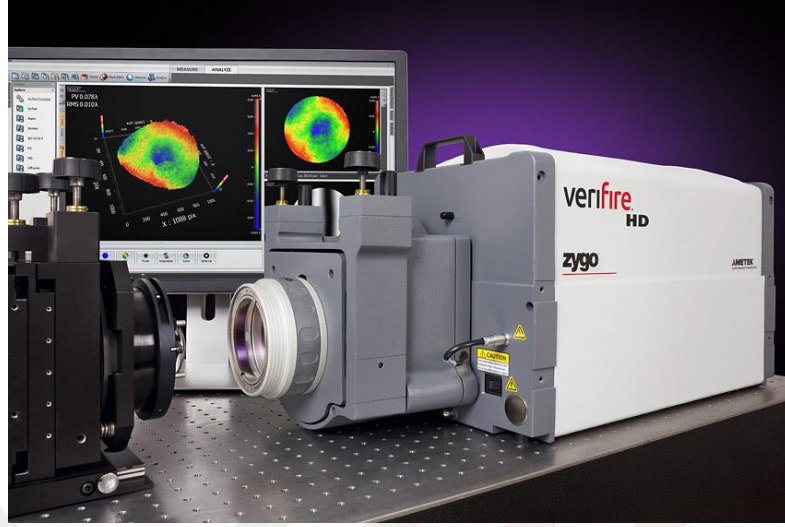
3.4.1. Fizeau interferometresi

Şahit numunelerin yüzey form hatalarının ölçümünde kullanılan Fizeau interferometresinin çalışma prensibi Şekil 3.25'de gösterilmektedir.



Şekil 3.25. Fizeau İnterferometresinin çalışma prensibi

Fizeau interferometresi, optik bileşenlerin test standardı olan 632.8 nm (He-Ne lazer) lik dalga boyuna sahip bir ışık kaynağından çıkan ışığın bir demet ayırıcından geçerek %50 sinin görüntüleme sensörünün üzerine, kalan %50 sinin de hareketli referans optikten geçerek test edilecek parçanın üzerine gönderilmesi şeklinde çalışır. Test ışığın referans optikten geçişi esnasında oluşan referans dalga düzlemi, test parçasının yüzeyinden yansırken yüzeyde yer alan kusurlardan dolayı kısmi bozulmaya uğrar. Bu durumda dalga düzlemi, referans optiğe kıyasla bozulan ve bozulmayan bölgelerde yapıcı ve yıkıcı girişim oluşturur. Söz konusu girişim deseni ile referans optiğe kıyasla test edilen parçanın yüzeyindeki form bozukluğunun azami ve asgari tepe noktaları (PV) ile form bozukluğunun rms değerleri kaynak test dalga boyunun katları şeklinde elde edilir. (Briers 1972). Çalışmalarda kullanılan Fizeau interferometresi Şekil 3.26'da gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Çalışmalarda kullanılan Fizeau interferometresi

3.4.2. Temassız yüzey profilometresi

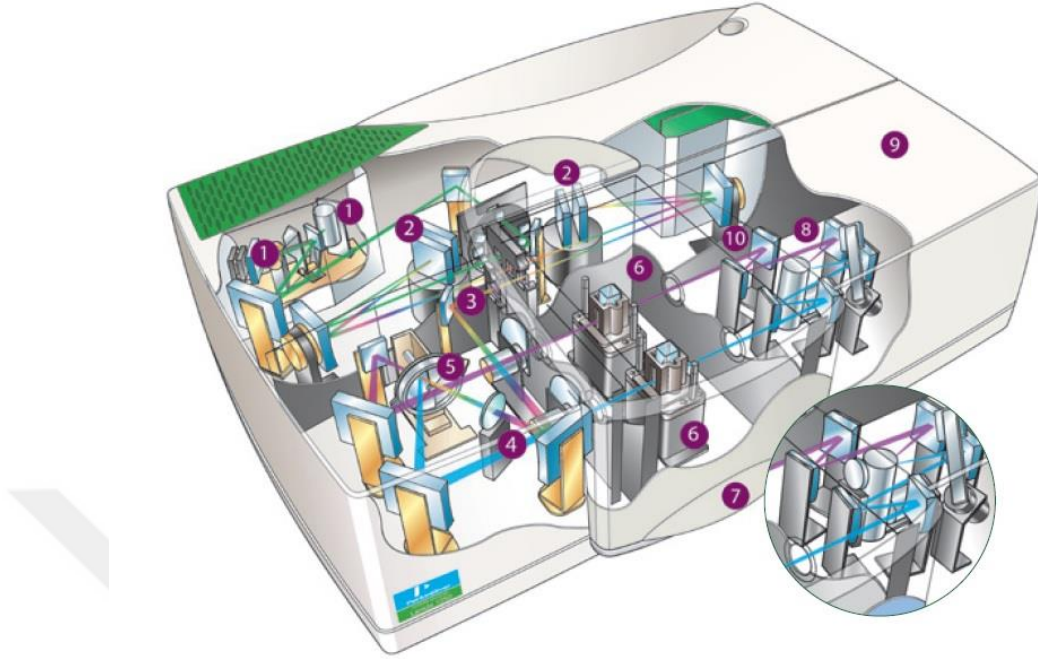
Çalışma prensibi olarak Fizeau interferometreye benzeyen ve malzeme yüzeyindeki form bozukluklarını yapıcı ve yıkıcı girişim desenleri ile analiz etmeye olanak sağlayan temassız yüzey profilometresi, malzeme yüzeyinde tahribatsız ölçüm yapabilmeye olanak sağlamaktadır. Bu sebeple, MWIR ARC kaplamalarda şahit numune olarak kullanılan malzemelerin yüzey pürüzlülüklerinin ve kaplanan malzemelerin fiziksel kalınlıklarının ölçümleri amacıyla Şekil 3.27’de gösterilen temassız yüzey profilometresi kullanılmıştır.



Şekil 3.27. Çalışmalarda kullanılan temassız yüzey profilometresi

3.4.3. Spektrometre

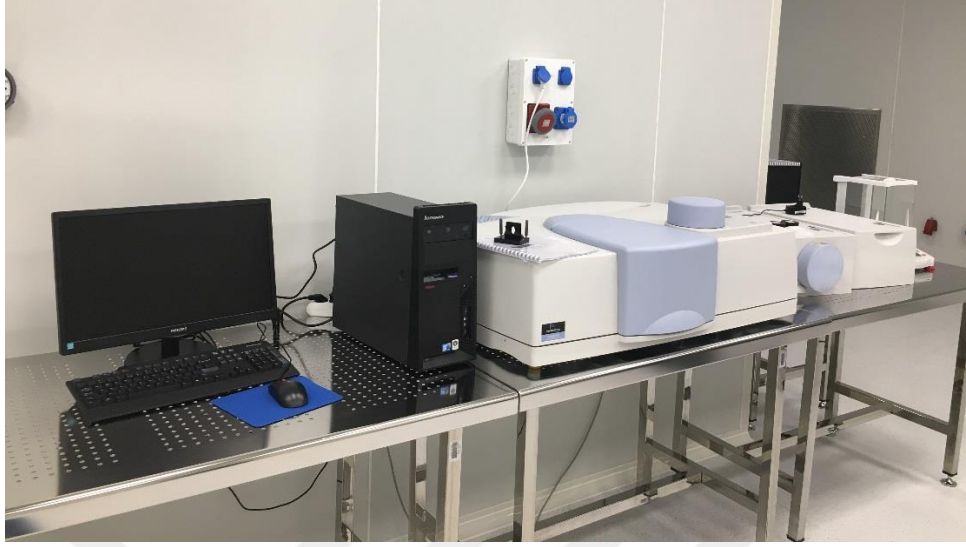
Geliştirilen optik kaplamaların 250–3300 nm arası spektral aralıklarda geçirgenlik, soğurma, sabit ve değişken açılı yansıma ölçümlerini yapmaya olanak sağlayan spektrometrenin içyapısı Şekil 3.28’de gösterilmektedir.



Şekil 3.28. Spektrometrenin içyapısı

Çalışmalarda kullanılan ve içyapısı Şekil 3.28'de gösterilen spektrometrede farklı spektral aralıklarda radyasyon yayılımı yapan Döteryum ve Tungsten lambalarından (1) çıkan ışık, holografik ızgaralardan (2) dalga boyuna ayrıştırılarak geçtikten sonra ışığın demet yüksekliğini ayarlayan demet maskesinden (3) geçer. Ardından ışık ihtiyaca göre polarizasyon önleyiciden (4) geçerek veya doğrudan numune ve referans ışık arasında sabit frekansta döngü yapabilen ışık modülatöründen (5) geçerek numune tutucunun (6) yer aldığı tek veya çift numune ile ölçüm yapılabilen (9) haznede (7) üzerine düşerek detektörler tarafından (8 ve 10) toplanır.

Çalışmalarda kullanılan şahit numunelerin ve katman malzemelerinin görünür bölge kırılma indis dağılımlarının hesaplanabilmesi için duyulan yansıma ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 3.29'da gösterilen spektrometre ile yapılmıştır.

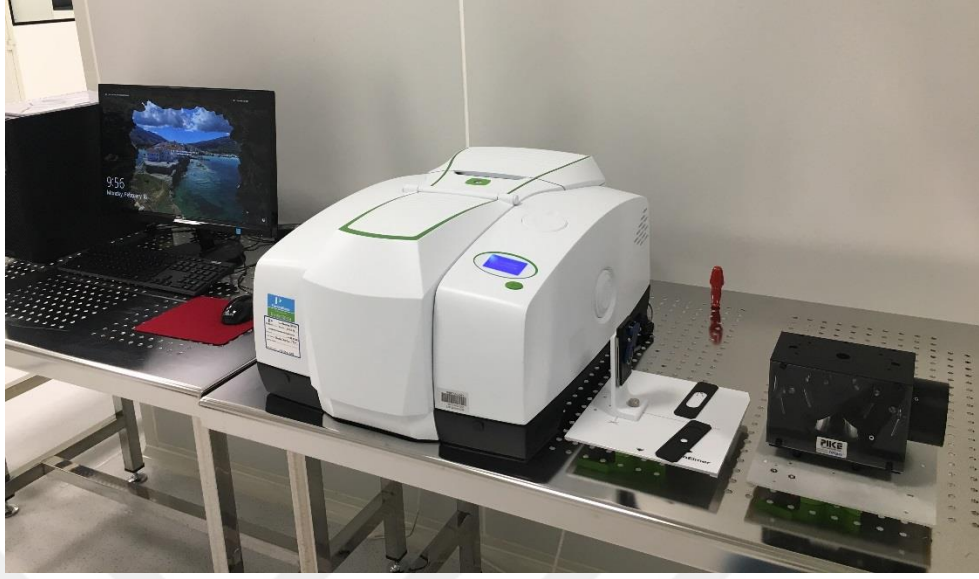


Şekil 3.29. Çalışmalarda kullanılan spektrometre

3.4.4. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektrometre - FTIR

MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümlerinin yapılabildiği FTIR sisteminde öncelikli olarak geniş spektral aralıkta yayılım yapabilen bir kaynaktan çıkan ışık demet ayırıcıdan geçer. Ayrılan ışık demetleri test edilecek numune ile birlikte sabit ve hareketli referans aynalardan oluşan interferometrik tarama sistemine geçer ve bu esnada farklı düzeltici optikler, dijital atmosferik soğurma önleyici filtreler ile detektör tarafından algılanır (Moore 2016).

Spektral olarak 2,5 ile 25 μm arasında ölçüm yapılabilen ve Şekil 3.30'da gösterilen sistemde çalışmalar doğrultusunda MWIR ARC kaplamaların 3,4–4,8 μm spektral aralıkta yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3.30. Çalışmalarda kullanılan FTIR ölçüm sistemi

MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik izlenen yöntem aşağıdaki şekilde özetlenmektedir.

- Tasarıma göre kullanılacak şahit numune ve katman malzemelerin hazırlanması
- Tasarımda tanımlanan şahit numunelerin karakterizasyonu
- Şahit numunelerin karakterizasyon verileri ile kırılma indislerinin hesaplanması
- Hesaplanan indis değerleri ile tek katman kaplama tasarımı
- Katman malzemelerinin tek katman şeklinde şahit numune üzerine kaplanması
- Tek katman karakterizasyonu
- Tek katman karakterizasyon verileri ile kırılma indislerinin hesaplanması
- Hesaplanan kırılma indislerine göre çok katman ARC tasarımı
- ARC kaplamanın yapılması
- ARC kaplama karakterizasyonu
- Çok katmanlı hata analizi ile ARC katmanların analizi
- Analize bağlı olarak hedef spektral davranış değerlerine ulaşmak amacıyla kaplama parametrelerinin aktif optimizasyonu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Giriş

MWIR ARC kaplamaların CaF_2 , Ge, Si ve ZnS şahit numuneler üzerine geliştirilmesine yönelik çalışmalarda numunelerin üretici firma tarafından hazırlanması ve temiz oda ortamında paketlenmiş olmasından dolayı özel bir temizlik süreci uygulanmamıştır. Şahit numuneler karakterizasyon ve kaplama öncesi 50:50 bileşimde Aseton ve Alkol karışımı ile optik yüzey temizleme bezleri ile temizlenmiştir.

Temizlik aşamasının ardından şahit numunelerin yüzey kalitelerinin katman malzemelerin kaplanabilmesine uygunluğu tespit edilmiştir. Şahit numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri temassız yüzey profilometresi ile yüzey form hataları da Fizeau interferometresi ile ölçülmüştür.

Yüzey karakterizasyon çalışmalarının ardından şahit numuneler MWIR ARC kaplamaların geliştirileceği spektral aralık olan 3,4–4,8 μm dalga boyu aralığında yansıma ve geçirgenlik ölçümleri yapılarak numunelerde soğurma olup olmadığı test edilmiştir. Spektral ölçümler OptiChar yazılımı ile modellenerek şahit numunelerin MWIR aralıkta kırılım indis dağılımlarının foksiyonel tanımları elde edilmiştir. Şahit numunelerin kırılım indis dağılımları literatürde yer alan dağılımlarla karşılaştırılarak tasarım çalışmalarında alttaşı verisi olarak elde edilmiştir.

Şahit numunelerin karakterizasyonlarından sonra MWIR ARC kaplamalarında nH ve nL olarak kullanılacak Ge ve Al_2O_3 malzemelerinin tek katman optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda film kalınlıklarının spektral ve profilometrik ölçümler ile doğrulanması, malzemelerin kırılım indislerinin MWIR aralıkta modellenmesi ve homojen indis dağılımı için kaplama parametrelerinin optimizasyonları yapılmıştır.

Tek katman karakterizasyon çalışmalarının ardından çok katmanlı MWIR ARC kaplamaları 4 farklı alttaş üzerine elde edilen şahit numune, nH ve nL malzemelerin kırılım indis dağılımları ile tasarlanmıştır. Yapılan tasarımların ardından optik kaplama reçeteleri oluşturularak çok katmanlı kaplamaların spektral davranışlarına göre kaplama reçeteleri aktif şekilde optimize edilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

4.2. Şahit Numune Karakterizasyonu

Çalışmanın bu aşamasında sırasıyla CaF₂, Ge, Si ve ZnS şahit numunelerin yüzey ve spektral karakterizasyonları yapılarak kırılım indis dağılımları literatürde yer alan değerler ile karşılaştırılmıştır.

Şahit numunelerin MWIR bölgede soğurma katsayılarının sıfır olduğu yansıma ve geçirgenlik ölçümleri ile denklem (4.1) den faydalanılarak elde edilmiştir.

$$T + R + A = 1 = \%100 \quad (4.1)$$

Elde edilen yansıma ve geçirgenlik ölçümleri ile şahit numunelerin MWIR bölgede ki kırılma indis dağılımları denklem (4.2) de gösterildiği gibi Cauchy ve denklem (4.3) de gösterildiği gibi Sellmeier dağılım fonksiyonlarına benzetilerek fonksiyon katsayıları belirlenmiştir.

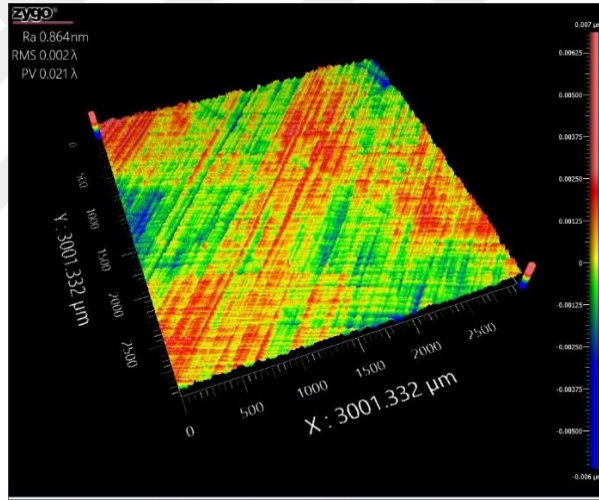
$$n(\lambda) = A_0 + \frac{A_1}{\lambda^2} + \frac{A_2}{\lambda^4} \quad (4.2)$$

$$n^2(\lambda) = A_0 + \frac{A_1\lambda^2}{(\lambda^2 - A_2)} + \frac{A_3\lambda^2}{(\lambda^2 - A_4)} \quad (4.3)$$

4.2.1. CaF₂ karakterizasyonu

CaF₂ şahit numunenin temizlik aşamasından sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 2,75x Michelson tipi interferometrik objektif ile 3 x 3 mm² lik numune alanında yapılmıştır.

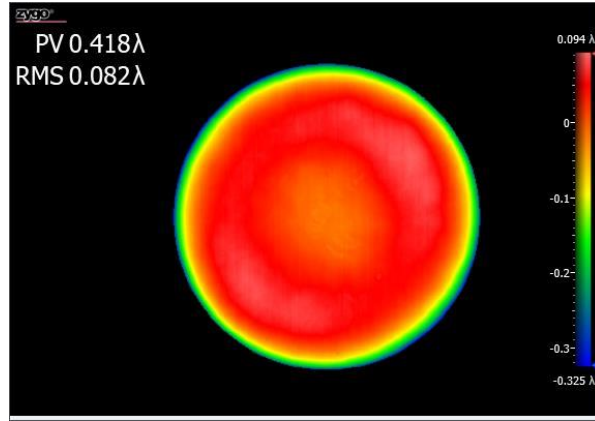
CaF₂ şahit numune yüzeyinin farklı bölgelerinde yapılan ölçümlerin sonucunda Şekil 4.1'de gösterildiği gibi yüzey pürüzlüğü ortalama 0,864 nm olarak elde edilmiştir. Elde edilen pürüzlülük değeri, numuneler için standart optik kalite isteri olan < 2nm değeri ile uyumludur.



Şekil 4.1. CaF₂ şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü

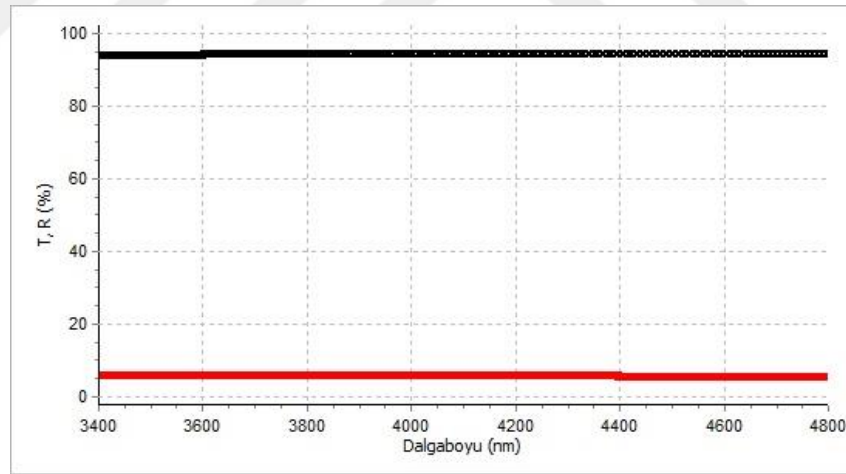
Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ardından CaF₂ şahit numunenin yüzey form bozukluğu ölçümleri 63.2 nm ($\lambda_{\text{test}} / 10$) PV yüzey bozukluğuna sahip referans geçirim düzlemi kullanılarak Fizeau Interferometresi ile yapılmıştır.

CaF₂ şahit numunenin form hatası ölçümü sonucunda Şekil 4.2'de gösterildiği gibi PV değeri 264,5 nm ($\lambda_{\text{test}} / 2,4$) ve RMS değeri 51,9 nm ($\lambda_{\text{test}} / 12,2$) olarak elde edilmiş olup tedarik isteri olan < 316,4 nm ($\lambda_{\text{test}} / 2$) PV değeri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.2. CaF₂ şahit numune yüzey form hatası ölçümü

Yüzey karakterizasyonunun ardından CaF₂ şahit numunenin MWIR ARC kaplamaların geliştirileceği spektral aralık olan 3,4–4,8 µm dalga boyu aralığında yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.3’de gösterildiği gibi FTIR spektrometresi ile ölçülmüştür.



Şekil 4.3. CaF₂ şahit numune yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

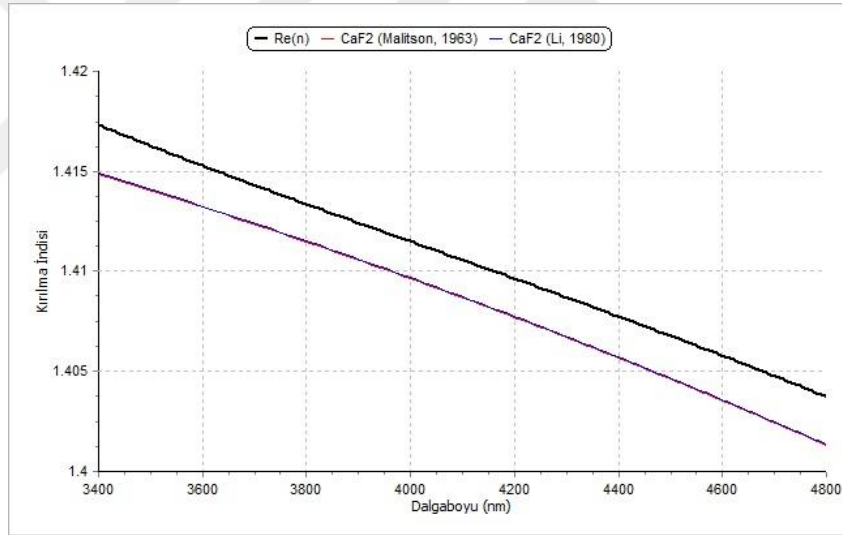
Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve malzemenin soğurma katsayısının 3,4–4,8 µm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile malzemenin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için CaF₂ kırılma indis dağılımı Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,009032 ve

Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,003042 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup CaF_2 için MWIR bölgede kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.4) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 1,946 + \frac{0,061 \lambda^2}{(\lambda^2 - 3,028)} + \frac{0,137 \lambda^2}{(\lambda^2 - 92,105)} \quad (4.4)$$

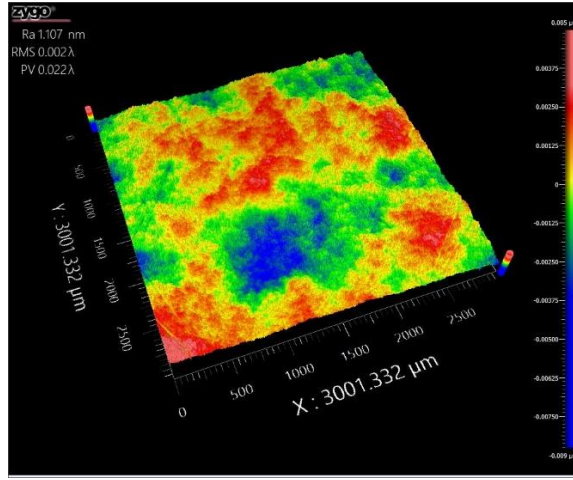
CaF_2 için elde edilen ile literatürde yer alan (Malitson 1963; Li 1980) kırılma indislerinin MWIR bölgede dağılımları Şekil 4.4'de gösterilmekte olup CaF_2 üzeri MWIR ARC tasarımında modelleme sonucu elde edilen indis dağılım fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 4.4. CaF_2 şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması

4.2.2. Ge karakterizasyonu

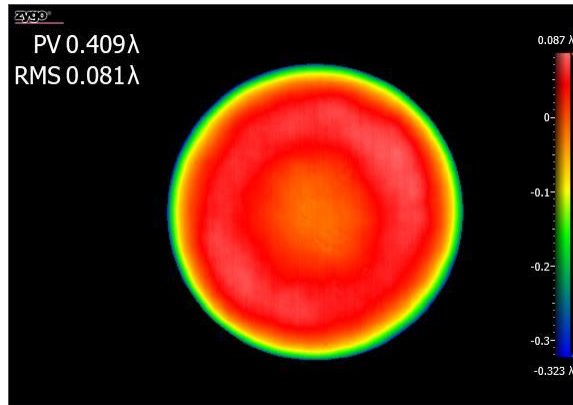
Ge şahit numunenin temizlik aşamasından sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 2,75x Michelson tipi interferometrik objektif ile 3 x 3 mm² lik numune alanında yapılmıştır.



Şekil 4.5. Ge şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü

Ge şahit numune yüzeyinin farklı bölgelerinde yapılan ölçümlerin sonucunda Şekil 4.5'de gösterildiği gibi yüzey pürüzlüğü ortalama 1,107 nm olarak elde edilmiştir. Elde edilen pürüzlülük değeri, numuneler için standart optik kalite isteri olan $< 2\text{nm}$ değeri ile uyumludur.

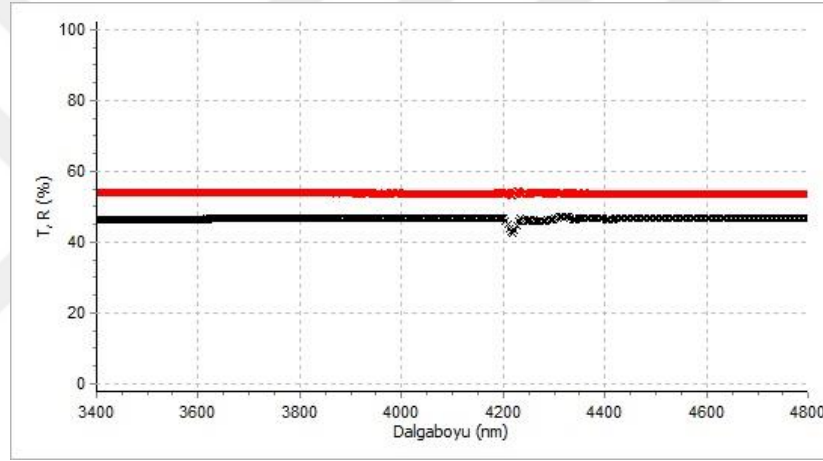
Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ardından Ge şahit numunenin yüzey form bozukluğu ölçümü 63.2 nm ($\lambda_{\text{test}} / 10$) PV yüzey bozukluğuna sahip referans geçirim düzlemi kullanılarak Fizeau Interferometresi ile yapılmıştır.



Şekil 4.6. Ge şahit numune yüzey form hatası ölçümü

Ge şahit numunenin form hatası ölçümü sonucunda Şekil 4.6’da gösterildiği gibi PV değeri 258,8 nm ($\lambda_{\text{test}} / 2,45$) ve RMS değeri 51,3 nm ($\lambda_{\text{test}} / 12,3$) olarak elde edilmiş olup tedarik isteri olan $< 316,4$ nm ($\lambda_{\text{test}} / 2$) PV değeri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yüzey karakterizasyonunun ardından Ge şahit numunenin MWIR ARC kaplamaların geliştirileceği spektral aralık olan 3,4–4,8 μm dalga boyu aralığında yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.7’de gösterildiği gibi FTIR spektrometresi ile ölçülmüştür.



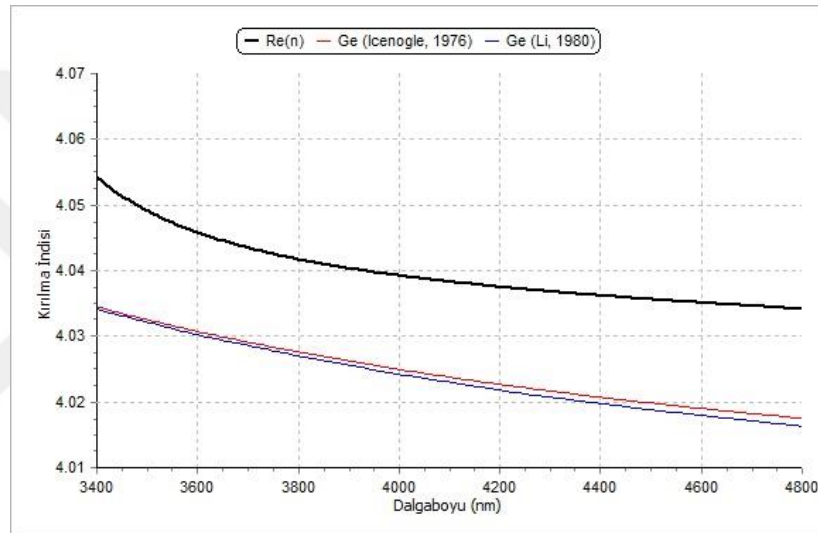
Şekil 4.7. Ge şahit numune yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve malzemenin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile malzemenin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için Ge kırılma indisi dağılımı Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,009812 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,00355 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup Ge için MWIR bölgede kırılma indisi dağılım fonksiyonu denklem (4.5) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 16,229 + \frac{0,044 \lambda^2}{(\lambda^2 - 9,249)} + \frac{0,083 \lambda^2}{(\lambda^2 - 92,139)} \quad (4.5)$$

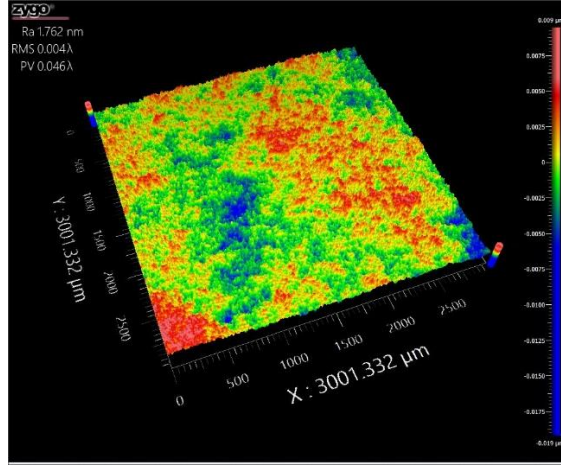
Ge için elde edilen ile literatürde yer alan (Icenogle, 1976 ve Li, 1993) kırılma indislerinin MWIR bölgede dağılımları Şekil 4.8'de gösterilmekte olup Ge üzeri MWIR ARC tasarımında modelleme sonucu elde edilen indis dağılım fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 4.8. Ge şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması

4.2.3. Si karakterizasyonu

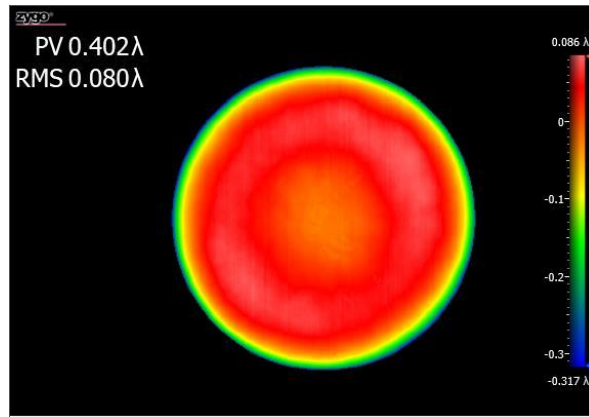
Si şahit numunenin temizlik aşamasından sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 2,75x Michelson tipi interferometrik objektif ile 3 x 3 mm² lik numune alanında yapılmıştır.



Şekil 4.9. Si şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü

Si şahit numune yüzeyinin farklı bölgelerinde yapılan ölçümlerin sonucunda Şekil 4.9'da gösterildiği gibi yüzey pürüzlüğü ortalama 1,762 nm olarak elde edilmiştir. Elde edilen pürüzlülük değeri, numuneler için standart optik kalite isteri olan $< 2\text{nm}$ değeri ile uyumludur.

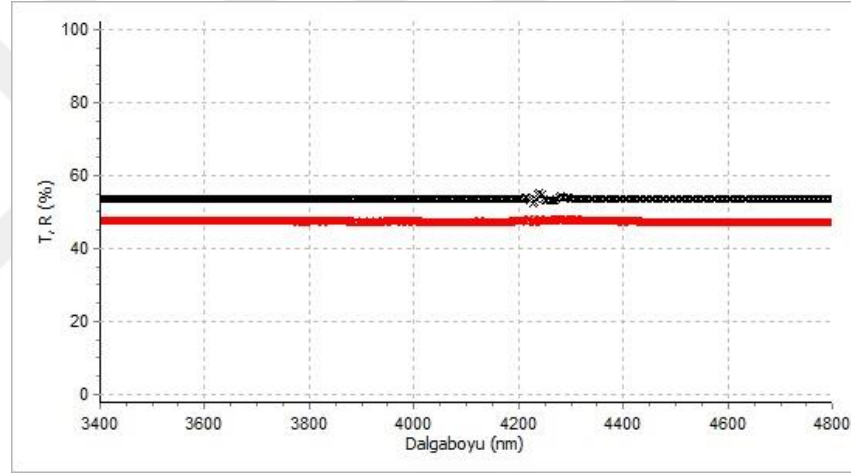
Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ardından Si şahit numunenin yüzey form bozukluğu ölçümü 63.2 nm ($\lambda_{\text{test}} / 10$) PV yüzey bozukluğuna sahip referans geçirim düzlemi kullanılarak Fizeau Interferometresi ile yapılmıştır.



Şekil 4.10. Si şahit numune yüzey form hatası ölçümü

Si şahit numunenin form hatası ölçümü sonucunda Şekil 4.10'da gösterildiği gibi PV değeri 254,4 nm ($\lambda_{\text{test}} / 2,49$) ve RMS değeri 50,6 nm ($\lambda_{\text{test}} / 12,5$) olarak elde edilmiş olup tedarik isteri olan $< 316,4$ nm ($\lambda_{\text{test}} / 2$) PV değeri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Yüzey karakterizasyonunun ardından Si şahit numunenin MWIR ARC kaplamaların geliştirileceği spektral aralık olan 3,4–4,8 μm dalga boyu aralığında yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.11'de gösterildiği gibi FTIR spektrometresi ile ölçülmüştür.



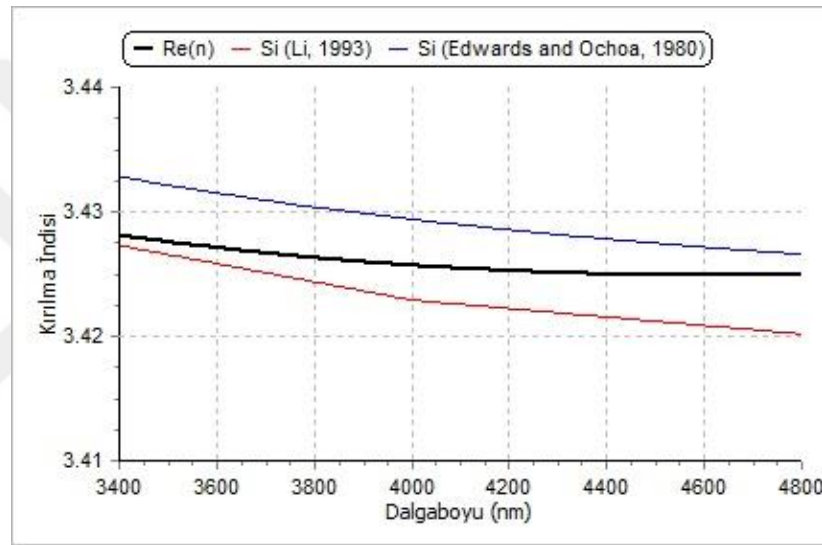
Şekil 4.11. Si şahit numune yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve malzemenin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile malzemenin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için Si kırılım indis dağılımı Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,002706 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,002371 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup Si için MWIR bölgede kırılım indis dağılım fonksiyonu denklem (4.6) da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 12,109 - \frac{0,499 \lambda^2}{(\lambda^2+3,627)} - \frac{0,155 \lambda^2}{(\lambda^2-92,191)} \quad (4.6)$$

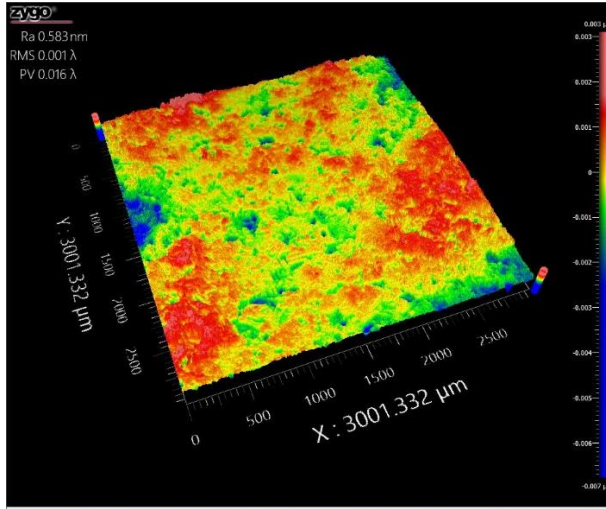
Si için elde edilen ile literatürde yer alan (Edwards and Ochoa 1980; Li 1993) kırılma indislerinin MWIR bölgede dağılımları Şekil 4.12’de gösterilmekte olup Si üzeri MWIR ARC tasarımında modelleme sonucu elde edilen indis dağılım fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Si şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması

4.2.4. ZnS karakterizasyonu

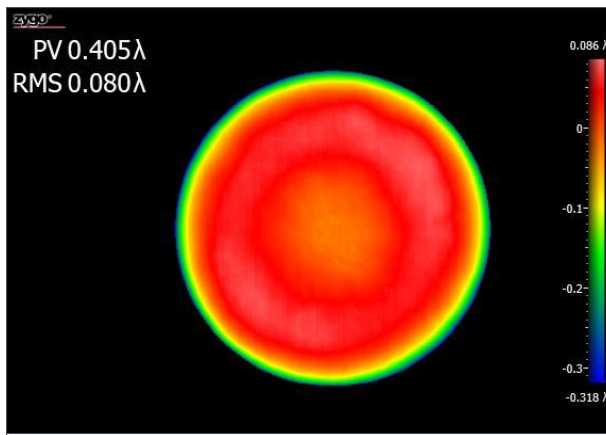
ZnS şahit numunenin temizlik aşamasından sonra yüzey pürüzlülük ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 2,75x Michelson tipi interferometrik objektif ile 3 x 3 mm² lik numune alanında yapılmıştır.



Şekil 4.13. ZnS şahit numune yüzey pürüzlülük ölçümü

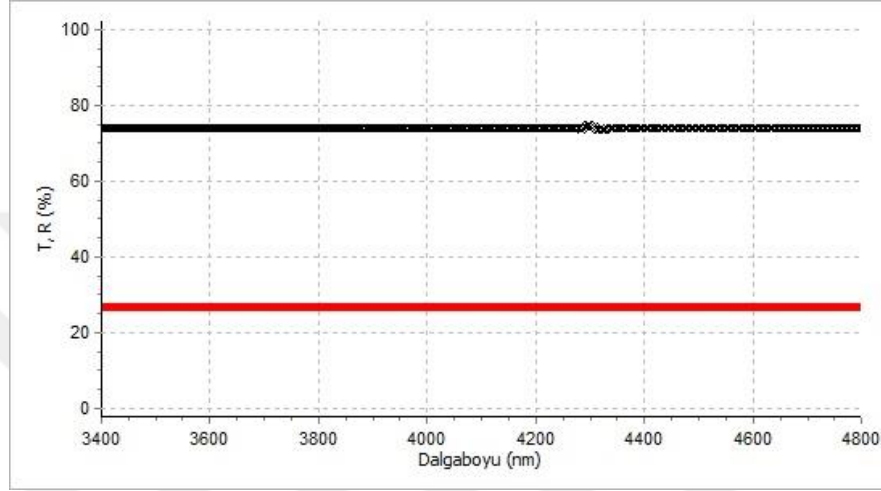
ZnS şahit numune yüzeyinin farklı bölgelerinde yapılan ölçümlerin sonucunda Şekil 4.13'de gösterildiği gibi yüzey pürüzlüğü ortalama 0,583nm olarak elde edilmiştir. Söz konusu değer numuneler için standart optik kalite isteri olan $< 2\text{nm}$ değeri ile uyumludur.

Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinin ardından ZnS şahit numunenin yüzey form bozukluğu ölçümü 63.2 nm ($\lambda_{\text{test}} / 10$) PV yüzey bozukluğuna sahip referans geçirim düzlemi kullanılarak Fizeau Interferometresi ile yapılmıştır.



Şekil 4.14. ZnS şahit numune yüzey form hatası ölçümü

ZnS şahit numunenin form hatası ölçümü sonucunda Şekil 4.14’de gösterildiği gibi PV değeri 256,3 nm ($\lambda_{\text{test}} / 2,47$) ve RMS değeri 50,6 nm ($\lambda_{\text{test}} / 12,5$) olarak elde edilmiş olup tedarik isteri olan $< 316,4$ nm ($\lambda_{\text{test}} / 2$) PV değeri ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.15. ZnS şahit numune yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

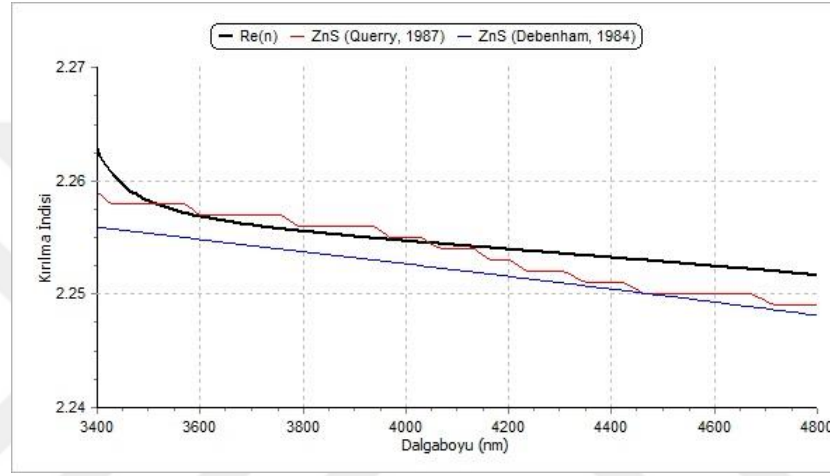
Yüzey karakterizasyonunun ardından ZnS şahit numunenin MWIR ARC kaplamaların geliştirileceği spektral aralık olan 3,4–4,8 μm dalga boyu aralığında yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.15’de gösterildiği gibi FTIR spektrometresi ile ölçülmüştür.

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve malzemenin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile malzemenin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için ZnS kırılım indis dağılımı Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,010974 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,002375 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup ZnS için MWIR bölgede kırılım indis dağılım fonksiyonu denklem (4.7) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 5,098 + \frac{1,504e^{-3} \lambda^2}{(\lambda^2-11,070)} + \frac{0,088 \lambda^2}{(\lambda^2-88,405)} \quad (4.7)$$

ZnS için elde edilen ile literatürde yer alan (Debenham, 1984 ve Query 1987) kırılma indislerinin MWIR bölgede dağılımları Şekil 4.16'da gösterilmekte olup ZnS üzeri MWIR ARC tasarımında modelleme sonucu elde edilen indis dağılımı kullanılmıştır.



Şekil 4.16. ZnS şahit numuneye ait kırılma indis dağılımlarının karşılaştırılması

4.3. Tek Katman Optimizasyonu

Çalışmanın bu aşamasında MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmalarda katman malzemesi olarak kullanılan Ge (nH) ve Al₂O₃ (nL) için gerçekleştirilen tek katman optimizasyon çalışmaları yer almaktadır.

Optimizasyon çalışmalarında öncelikli olarak nH ve nL malzemelerin homojen ve literatür ile uyumlu kırılma indis dağılımlarına sahip olmaları için optimum kaplama parametreleri belirlenmiştir.

Kaplama parametrelerinin belirlenmesinin ardından nH ve nL için kalınlık kontrol katsayıları (Tooling Faktör) kaplamaların fiziksel kalınlıklarının kaplama sonrası

ölçülmesi ile çok aşamalı olarak denklem (4.8) de gösterildiği şekilde optimize edilmiştir.

$$T_{güncel} = T_{başlangıç} \times \frac{t_{ölçülen}}{t_{QCM}} \quad (4.8)$$

Denklem (4.8) de t_{QCM} kaplama esnasında sistemin kalınlık kontrol sisteminin gösterdiği değeri, $t_{ölçülen}$ kaplama sonrası katmanın profilometre ölçümü sonucu elde edilen gerçek kalınlığını, $T_{başlangıç}$ kaplama esnasında kalınlık kontrol sistemine girilen değeri tanımlamaktadır.

Kaplama kontrol katsayısının hassas şekilde optimize edilmesi sayesinde kalınlık okuma esnasında QCM hata payı azaltılarak tasarım ile üretim arası kalınlık dolayısıyla spektral davranış farklılıkları asgari seviyeye çekilmiştir.

Malzemelerin kalınlık kontrol katsayılarının belirlenmesinden sonra nH ve nL için yansıma ve geçirgenlik ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen ölçümler ve bir önceki bölümde karakterize edilen şahit numunelerin indis dağılımları ile katman malzemelerinin MWIR bölgede kırılma indis dağılımları OptiChar ile modellenerek elde edilen kırılma indis dağılımları literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır.

4.3.1. Ge optimizasyonu

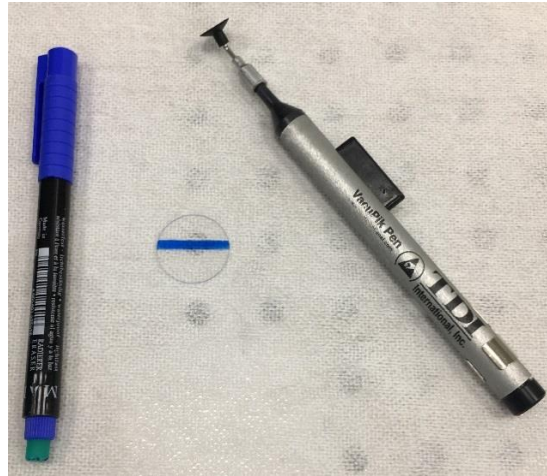
Ge ince filmlerin kırılma indislerinin kaplama parametrelerine bağlı olarak değişimine dair literatürde çeşitli çalışmalar yer almaktadır (Salzburg and Villa 1958; Lukes 1960). Çalışmaların tamamından elde edilen sonuç yüksek homojenite ve ideal indis dağılımı elde etmek amacıyla buharlaşan Ge atomlarının alttaş yüzeyinde etkin şekilde toplanarak kararlı film yapısı oluşturabilmesi için sıcaklık, düşük vakum seviyesi ve yüksek enerjili kaplama yöntemleri ile buharlaştırılmasının gerekliliğidir.

Bu sebeple kaplanan Ge filmler için yüksek sıcaklık ($> 200^{\circ}\text{C}$) prosesi tercih edilmiştir. Ge kaplama süreçlerinde uygulanan temel kaplama parametreleri Çizelge 4.1’de gösterildiği şekilde uygulanmıştır.

Çizelge 4.1. Ge ince film kaplama parametreleri

Temel Parametreler	Değer
Vakum Seviyesi	1×10^{-6} mbar
Sıcaklık	250°C
Ön Isıtma Süresi	3600 s
Rotasyon Hızı	60 rpm
Kaplama Hızı	0.2 nm/s

Katmanların kalınlık optimizasyonu için kullanılan B270 test camlarda Şekil 4.17’de gösterildiği gibi asetat kalemi ile izolasyon tabakası oluşturulmuştur.



Şekil 4.17. Kalınlık optimizasyonu için test parçalarının hazırlanışı

Hazırlanan test parçalarının üzerine üzerine kaplama yapıldıktan sonra izolasyon tabakasının üzerine kaplanmış olan film bant yardımıyla kaldırılarak izolasyon tabakası aseton ile temizlenerek katman kalınlığının ölçülebileceği adım yüksekliği elde edilmiştir.

Kalınlık optimizasyonu için 1. kaplama prosesinde T_0 değeri 100 alınarak QCM değeri 200 nm olan Ge film kaplanmıştır. Kaplama sonrası film kalınlığı temassız yüzey profilometresi ile ölçüldüğünde kaplamanın gerçek kalınlığı 156 nm olarak elde edilmiştir.

Ölçülen kalınlık değeri ile denklem (4.8) kullanılarak T_1 değeri 78 olarak elde edilmiştir.

$$T_1 = 100 \times \frac{156 \text{ nm}}{200 \text{ nm}}$$

Elde edilen T_1 değerinin QCM sistemine tanımlanması ve aynı kaplama parametreleri ile QCM değeri 200 nm olan Ge film kaplanarak tekrarlanan profilometrik ölçüm sonucu film kalınlığı 216 nm olarak ölçülmüştür.

Ölçüm sonucu elde edilen kalınlık değeri ile denklem (4.8) de tekrarlanan hesaplama sonucu T_2 değeri 84,2 olarak belirlenmiştir.

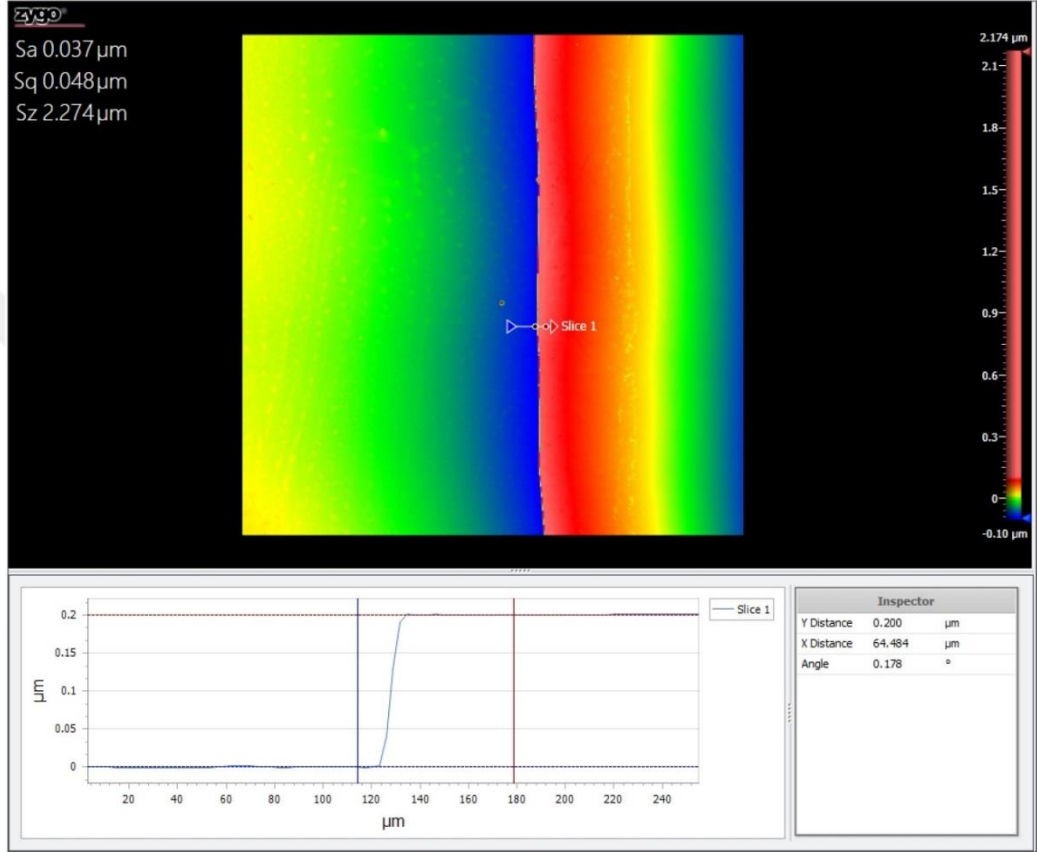
$$T_2 = 78 \times \frac{216 \text{ nm}}{200 \text{ nm}}$$

QCM sisteminde değer 84,2 olarak güncellenmesinin ardından QCM değeri 200 nm olarak kaplanan filmin profilometrik ölçümü ile film kalınlığı 192 nm olarak elde edilmiştir.

Ölçüm sonucu elde edilen kalınlık değeri ile denklem (4.8) de tekrarlanan hesaplama sonucu T_3 değeri 80,8 olarak belirlenmiştir.

$$T_3 = 84,2 \times \frac{192 \text{ nm}}{200 \text{ nm}}$$

QCM sisteminde değerin 80,8 olarak g¼ncellenmesinin ardından QCM değeri 200 nm olarak kaplanan filmin profilometrik ¼l¼m¼ ile film kalınlığı 200 nm olarak Şekil 4.18 de g¼sterildięi gibi elde edilmiştir.



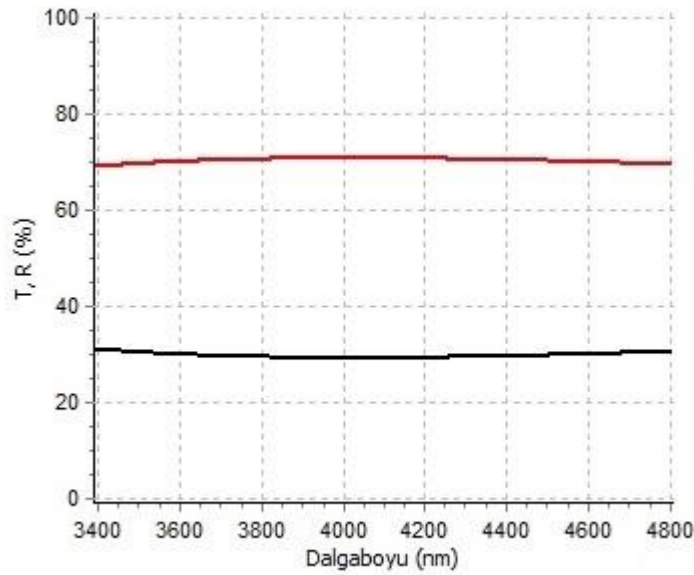
Şekil 4.18. Ge kalınlık optimizasyon ¼l¼m¼

Ge filmlerin kalınlık optimizasyonuna y¼nelik ¼alıřma, sistemin QCM okuma değeri ile profilometrik ¼l¼m sonucunun aynı değeri vermesi ile sonu¼landırılmıřtır. Kalınlık optimizasyonu i¼in B270 test camlarının alttaş olarak kullanıldığı ve Ge filmlerin MWIR ARC kaplamalarda şahit numune ve nL olarak kullanılan CaF_2 , Ge, Si, ZnS ve Al_2O_3 malzemeleri ¼zerine farklı kalınlıklarda kaplanabileceği g¼z ¼n¼ne alındığında Ge i¼in elde edilen kalınlık kontrol katsayısı bařlangı¼ seviyesinde yeterli olmakla birlikte ¼ok katmanlı kaplamalarda uygulanan modelleme y¼ntemi ile aktif şekilde optimize edilecektir.

Kalınlık kontrol katsayısının optimizasyon çalışmalarından sonra Ge ince film için MWIR bölgede kırılma indis dağılımları CaF_2 , Si ve ZnS şahit numuneler üzerine kaplanan 250 nm kalınlığında Ge filmlerin yansımaya ve geçirgenlik spektrumlarının ölçümleri ve şahit numune karakterizasyonu aşamasında elde edilen altta kırılma indis dağılımları ile OptiChar modülünde modellenmiştir.

Çalışmanın bu aşamasında Ge ince film ve üzerine kaplandığı Ge şahit numunenin tek bir malzeme gibi davranacak olmasından dolayı modelleme algoritması çalışmayacağından Ge şahit numune üzerine Ge ince film kaplama çalışması gerçekleştirilmemiştir.

CaF_2 üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Ge filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.19'da gösterilmektedir.



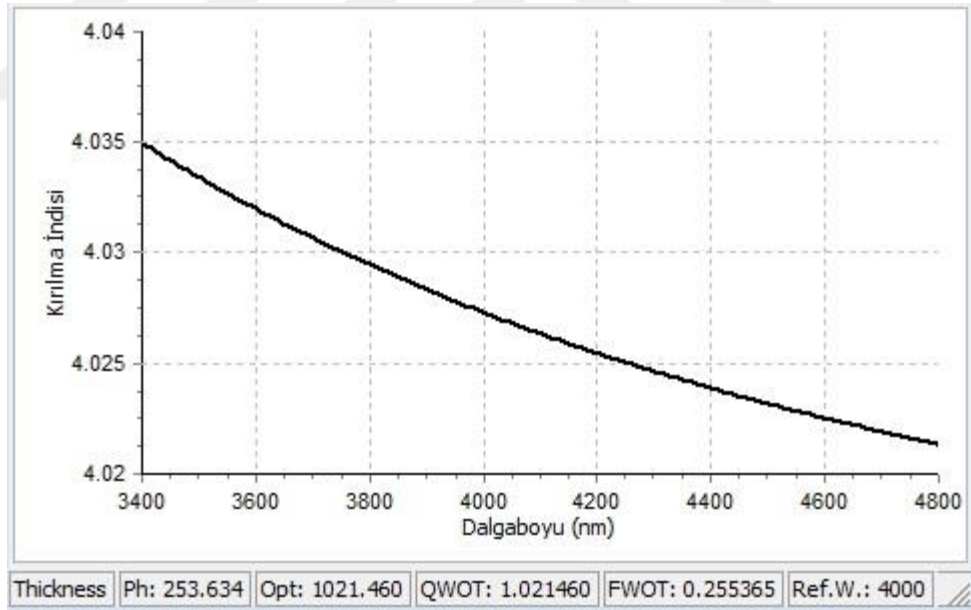
Şekil 4.19. CaF_2 üzeri Ge filmin yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve CaF_2 üzeri 250 nm kalınlığındaki Ge ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Ge filmin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılma indisi dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,000247 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000155 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup CaF₂ üzeri Ge film için MWIR bölgede kırılma indisi dağılım fonksiyonu denklem (4.9) da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

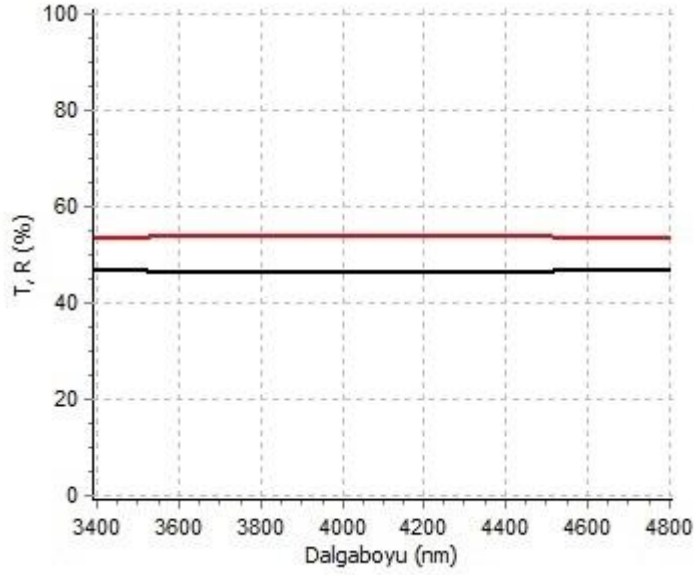
$$n^2(\lambda) = 19,055 - \frac{3,038 \lambda^2}{(\lambda^2 + 1,052)} - \frac{0,537 \lambda^2}{(\lambda^2 - 600)} \quad (4.9)$$

Elde edilen kırılma indisi dağılım fonksiyonuna göre CaF₂ üzeri 250 nm Ge filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.20’de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 253,634 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.20. CaF₂ üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indisi dağılımı

Si üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Ge filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.21’de gösterilmektedir.



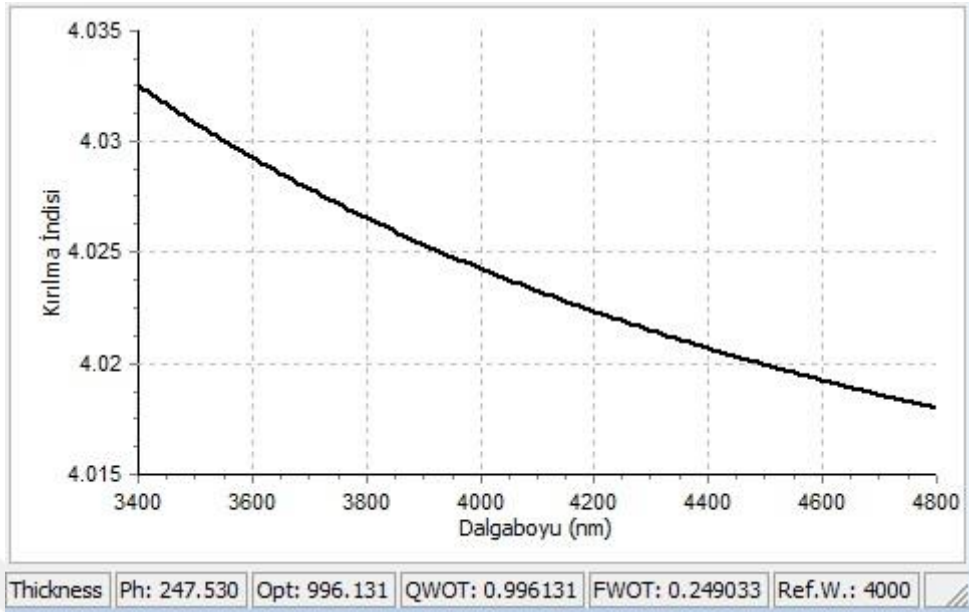
Şekil 4.21. Si üzeri Ge filmin yansıtma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansıtma ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve Si üzeri 250 nm kalınlığındaki Ge ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Ge filmin yansıtma ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılım indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,000117 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000389 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup Si üzeri Ge film için MWIR bölgede kırılım indis dağılım fonksiyonu denklem (4.10) da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

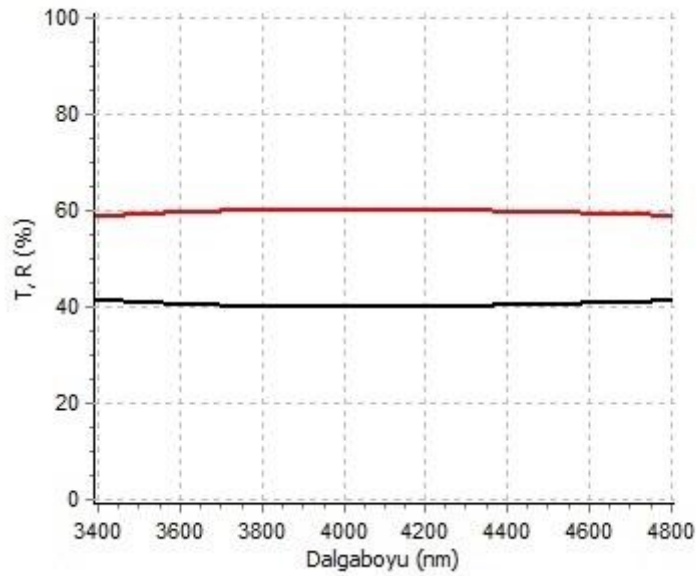
$$n^2(\lambda) = 4,005 + \frac{0,296}{\lambda^2} + \frac{0,326}{\lambda^4} \quad (4.10)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre Si üzeri 250 nm Ge filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.22’de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 247,530 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.22.Si üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı

ZnS üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Ge filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.23’de gösterilmektedir.



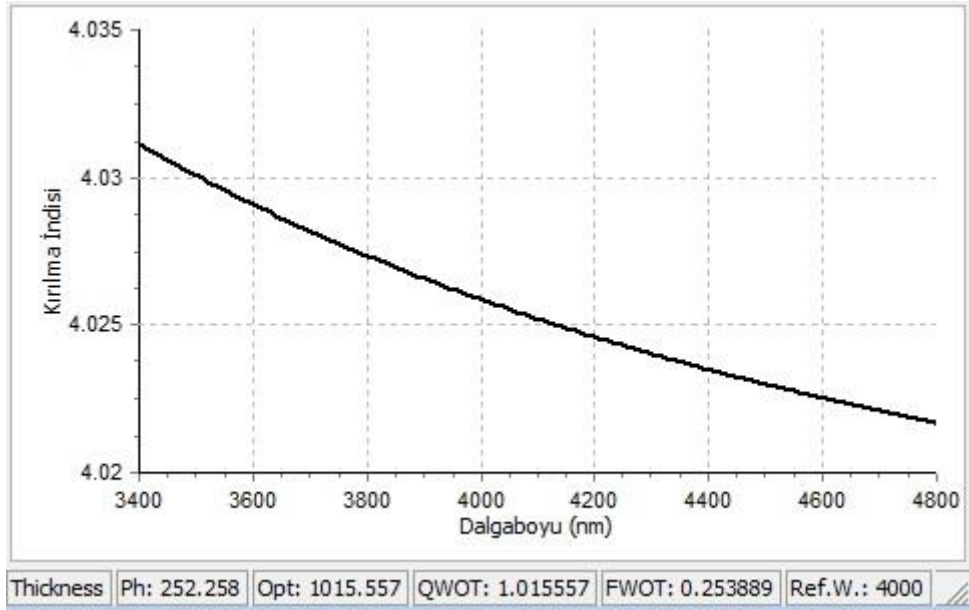
Şekil 4.23. ZnS üzeri Ge filmin yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve ZnS üzeri 250 nm kalınlığındaki Ge ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 µm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Ge filmin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılma indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,000099 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000189 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup ZnS üzeri Ge film için MWIR bölgede kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.11) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

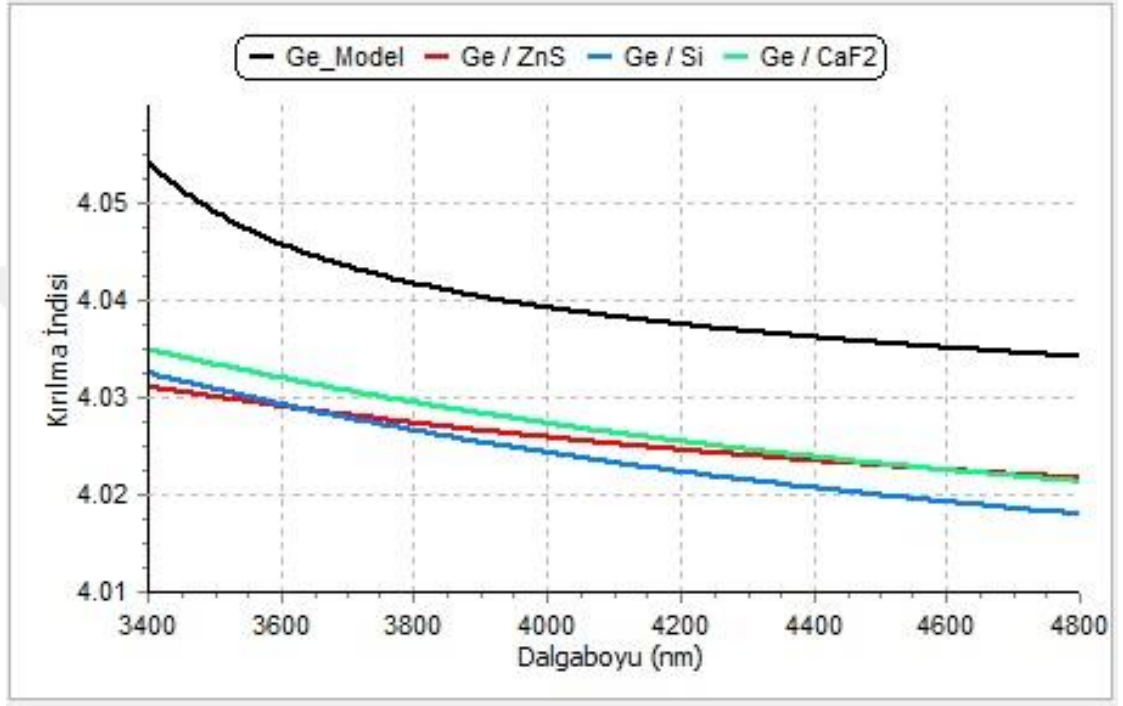
$$n^2(\lambda) = 4,012 + \frac{0,220}{\lambda^2} \quad (4.11)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre ZnS üzeri 250 nm Ge filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.24’de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 252,258 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.24. ZnS üzeri Ge filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere Ge katmanı üzerine kaplandığı CaF_2 , Si ve ZnS şahit numunelerin malzeme ve yüzey özelliklerine bağlı olarak Şekil 4.25’de gösterildiği gibi farklı kırılma indis dağılımları gösterebilmektedirler.



Şekil 4.25. Ge filmin CaF_2 , Si ve ZnS üzeri MWIR bölgede kırılma indis dağılımları

CaF_2 , Ge, Si ve ZnS üzeri Ge filmler için elde edilen farklı kırılma indis dağılım modelleri ve değerleri MWIR ARC kaplamaların tasarım aşamalarında nH olarak kullanılmıştır.

4.3.2. Al_2O_3 optimizasyonu

Al_2O_3 filmlerin kırılma indislerinin plazma (Zhu *et al.* 2018), sıcaklık (Kim *et al.* 2006) ve O_2 akışı (Shakouri 2015) gibi kaplama parametrelerine bağlı olarak değişimine dair literatürde çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Çalışmalardan elde edilen sonuç yüksek homojenite ve ideal indis dağılımı elde etmek amacıyla buharlaşan Al_2O_3 atomlarının alttaş yüzeyinde etkin şekilde topaklanarak kararlı film yapısı oluşturabilmesi için

yüksek sıcaklık, Al₂O₃ ün yapısal olarak kararlı buharlaştırılabilmesi için de plazma desteğinin gerekliliği olmuştur.

Bu sebeple kaplanan Al₂O₃ filmler için yüksek sıcaklıkta (> 200 °C) plazma destekli kaplama prosesi tercih edilmiştir. Al₂O₃ kaplama süreçlerinde uygulanan temel kaplama parametreleri Çizelge 4.2’de gösterildiği şekilde uygulanmıştır.

Çizelge 4.2. Al₂O₃ ince film kaplama parametreleri

Temel Parametreler	Değer
Vakum Seviyesi	1 x 10 ⁻⁶ mbar
Sıcaklık	250 °C
Ön Isıtma Süresi	3600 s
Plazma Argon Akışı	10 sccm
Plazma O ₂ Akışı	5 sccm
Rotasyon Hızı	60 rpm
Kaplama Hızı	0.2 nm/s

Katmanların kalınlık optimizasyonu için kullanılan B270 test camlar Şekil 4.17’de gösterildiği gibi hazırlanmıştır.

Kalınlık optimizasyonu için 1. kaplama prosesinde T₀ değeri 100 alınarak QCM değeri 250 nm olan Al₂O₃ film kaplanmıştır. Kaplama sonrası film kalınlığı temassız yüzey profilometresi ile ölçüldüğünde kaplamanın gerçek kalınlığı 355 nm olarak elde edilmiştir.

Ölçülen kalınlık değeri ile denklem (4.8) kullanılarak T₁ değeri 142 olarak elde edilmiştir.

$$T_1 = 100 \times \frac{355 \text{ nm}}{250 \text{ nm}}$$

Elde edilen T_1 değerinin QCM sistemine tanımlanması ve aynı kaplama parametreleri ile QCM değeri 250 nm olan Ge film kaplanarak tekrarlanan profilometrik ölçüm sonucu film kalınlığı 211 nm olarak ölçülmüştür.

Ölçüm sonucu elde edilen kalınlık değeri ile denklem (4.8) de tekrarlanan hesaplama sonucu T_2 değeri 119,8 olarak belirlenmiştir.

$$T_2 = 142 \times \frac{211 \text{ nm}}{250 \text{ nm}}$$

QCM sisteminde değerin 119,8 olarak güncellenmesinin ardından QCM değeri 250 nm olarak kaplanan filmin profilometrik ölçümü ile film kalınlığı 287 nm olarak elde edilmiştir.

Ölçüm sonucu elde edilen kalınlık değeri ile denklem (4.8) de tekrarlanan hesaplama sonucu T_3 değeri 137,5 olarak belirlenmiştir.

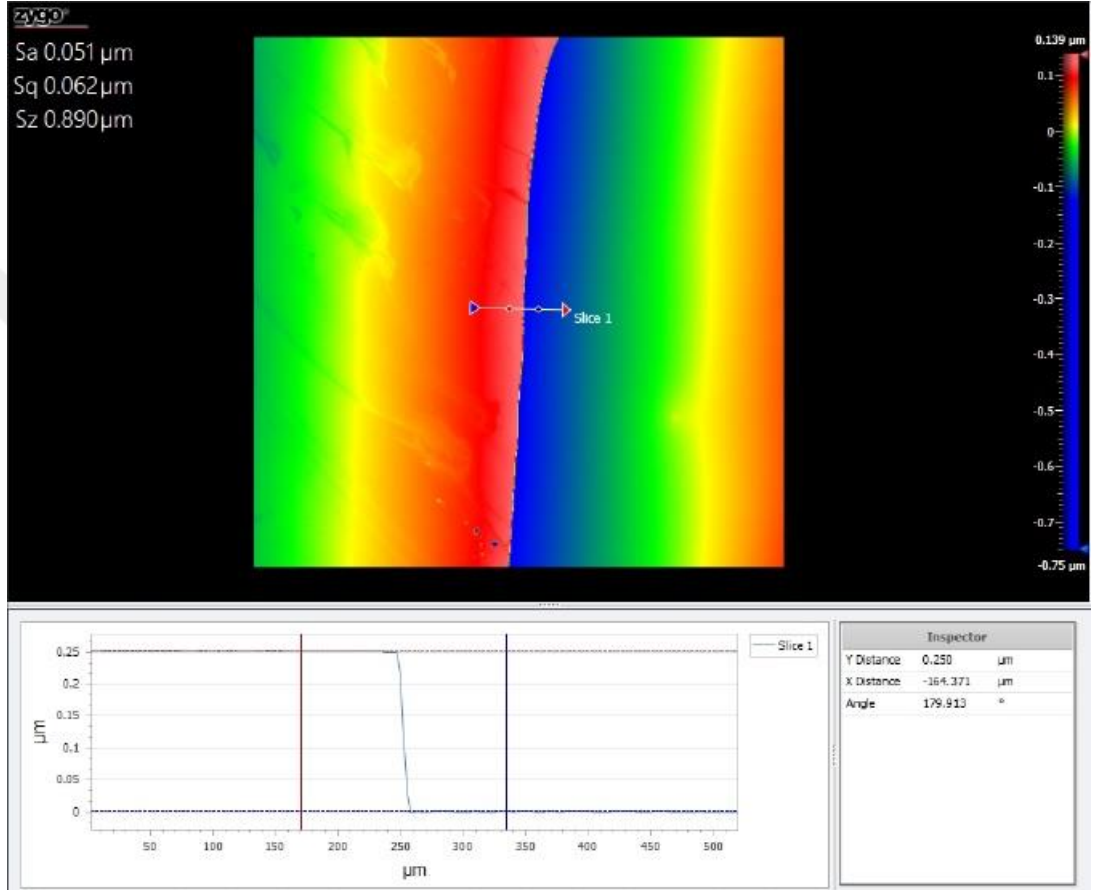
$$T_3 = 119,8 \times \frac{287 \text{ nm}}{250 \text{ nm}}$$

QCM sisteminde değerin 137,5 olarak güncellenmesinin ardından QCM değeri 250 nm olarak kaplanan filmin profilometrik ölçümü ile film kalınlığı 236 nm olarak elde edilmiştir.

Ölçüm sonucu elde edilen kalınlık değeri ile denklem (4.8) de tekrarlanan hesaplama sonucu T_4 değeri 129,8 olarak belirlenmiştir.

$$T_4 = 137,5 \times \frac{236 \text{ nm}}{250 \text{ nm}}$$

QCM sisteminde değerin 129,8 olarak g¼ncellenmesinin ardından QCM değeri 250 nm olarak kaplanan filmin profilometrik ¼l¼m¼ ile film kalınlığı 250 nm olarak Şekil 4.26 da g¼sterildięi gibi elde edilmiştir.

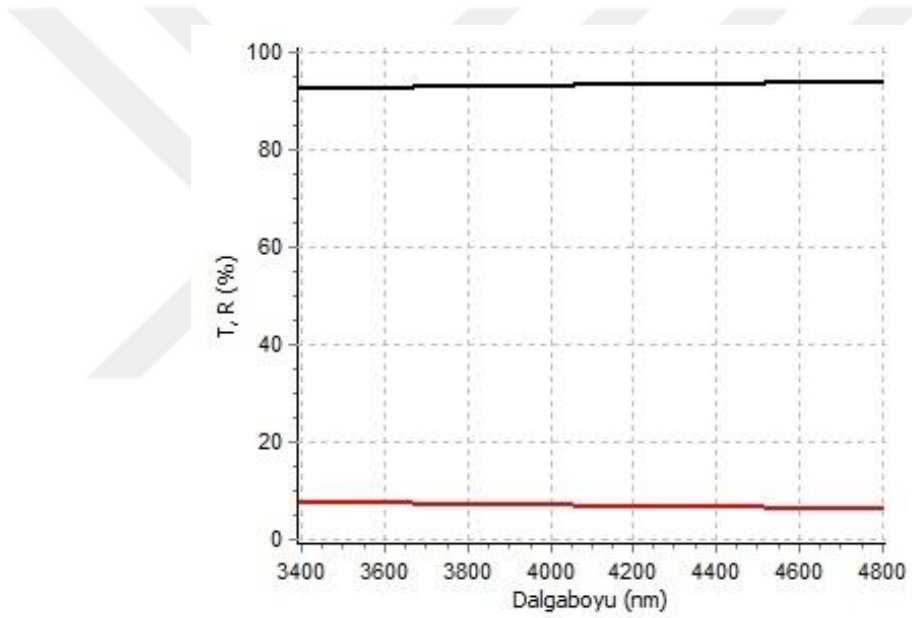


Şekil 4.26. Al₂O₃ kalınlık optimizasyon ¼l¼m¼

Al₂O₃ filmlerin kalınlık optimizasyonuna yönelik çalışma, sistemin QCM okuma değeri ile profilometrik ¼l¼m¼ sonucunun aynı değeri vermesi ile sonuşlandırılmıştır. Kalınlık optimizasyonu için B270 test camlarının alttaş olarak kullanıldığı ve Al₂O₃ filmlerin de MWIR ARC kaplamalarda şahit numune ve nH olarak kullanılan CaF₂, Ge, Si ve ZnS malzemeleri üzerine farklı kalınlıklarda kaplanabileceği g¼z ¼n¼ne alındığında Al₂O₃ için elde edilen kalınlık kontrol katsayısı başlangıç seviyesinde yeterli olmakla birlikte çok katmanlı kaplamalarda uygulanan modelleme y¼ntemi ile aktif Şekilde optimize edilecektir.

Kalınlık kontrol katsayısının optimizasyon çalışmalarından sonra Al_2O_3 ince film için MWIR bölgede kırılma indis dağılımları CaF_2 , Ge Si ve ZnS şahit numuneler üzerine kaplanan 250 nm kalınlığında Al_2O_3 filmlerin yansıma ve geçirgenlik spektrumlarının ölçümleri ve şahit numune karakterizasyonu aşamasında elde edilen altta kırılma indis dağılımları ile OptiChar modülünde modellenmiştir.

CaF_2 üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Al_2O_3 filmin MWIR bölgede elde edilen yansıma ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.27’de gösterilmektedir.



Şekil 4.27. CaF_2 üzeri Al_2O_3 filmin yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

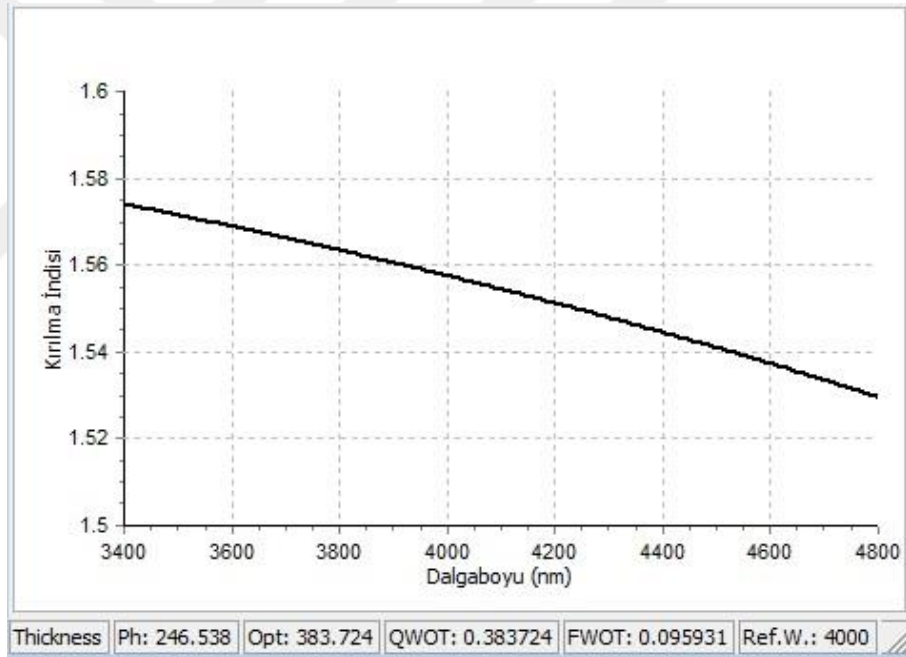
Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansıma ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve CaF_2 üzeri 250 nm kalınlığındaki Al_2O_3 ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 μm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Al_2O_3 filmin yansıma ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılma indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,001132 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000108

katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup CaF_2 üzeri Al_2O_3 film için MWIR bölgede kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.12) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

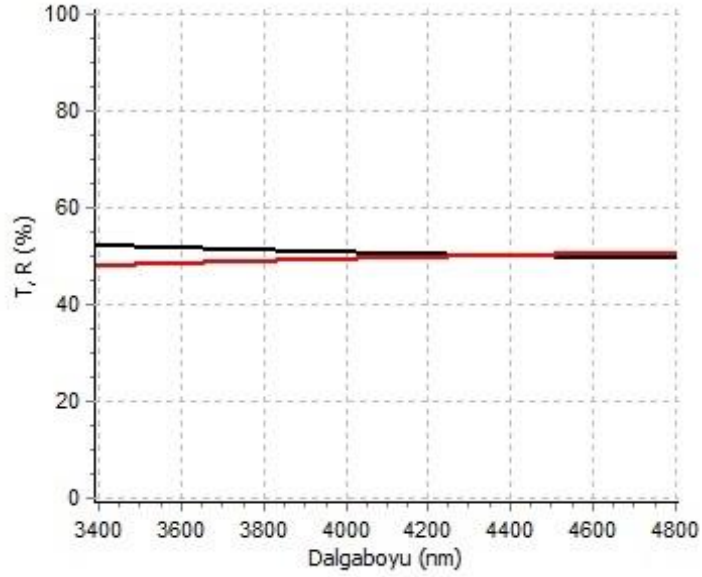
$$n^2(\lambda) = 2,549 - \frac{7,132 \lambda^2}{(\lambda^2 + 45,271)} + \frac{5,455 \lambda^2}{(\lambda^2 - 34,190)} \quad (4.12)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre CaF_2 üzeri 250 nm Al_2O_3 filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.28'de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 246,538 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.28. CaF_2 üzeri Al_2O_3 filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı

Ge üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Al_2O_3 filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.29'da gösterilmektedir.



Şekil 4.29. Ge üzeri Al₂O₃ filmin yansıtma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansıtma ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve Ge üzeri 250 nm kalınlığındaki Al₂O₃ ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 µm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

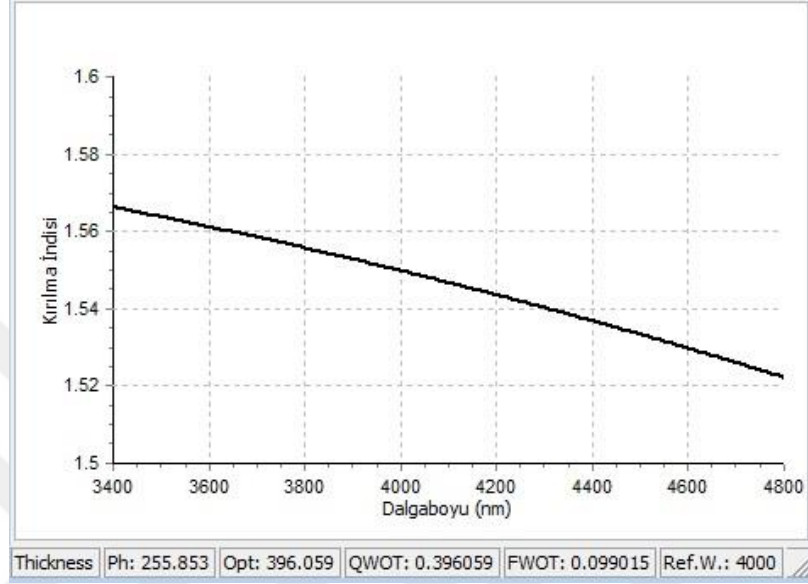
OptiChar yazılımı ile Al₂O₃ filmin yansıtma ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılma indis dağılımı modellenmiştir.

Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,001829 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000213 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup Ge üzeri Al₂O₃ film için MWIR bölgede kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.13) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 2,561 + \frac{0,046 \lambda^2}{(\lambda^2 + 5,843)} + \frac{7,006 \lambda^2}{(\lambda^2 - 599,958)} \quad (4.13)$$

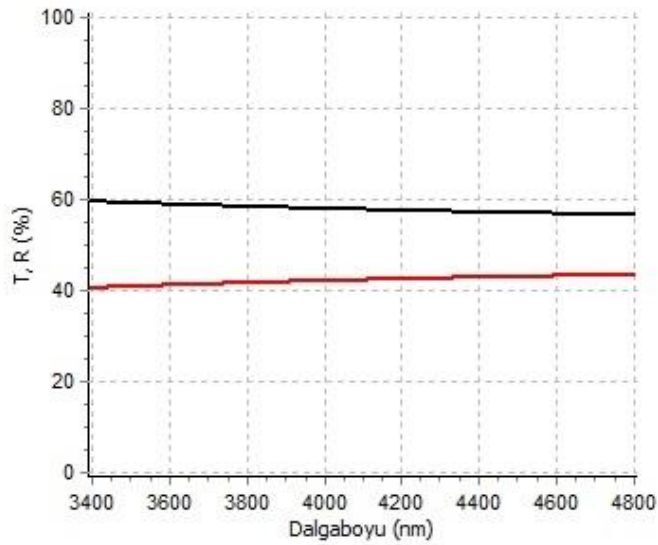
Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre Ge üzeri 250 nm Al₂O₃ filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.30'da gösterildiği şekilde olup film kalınlığı

modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 255,853 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.30. Ge üzeri Al_2O_3 filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı

Si üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Al_2O_3 filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.31’de gösterilmektedir.



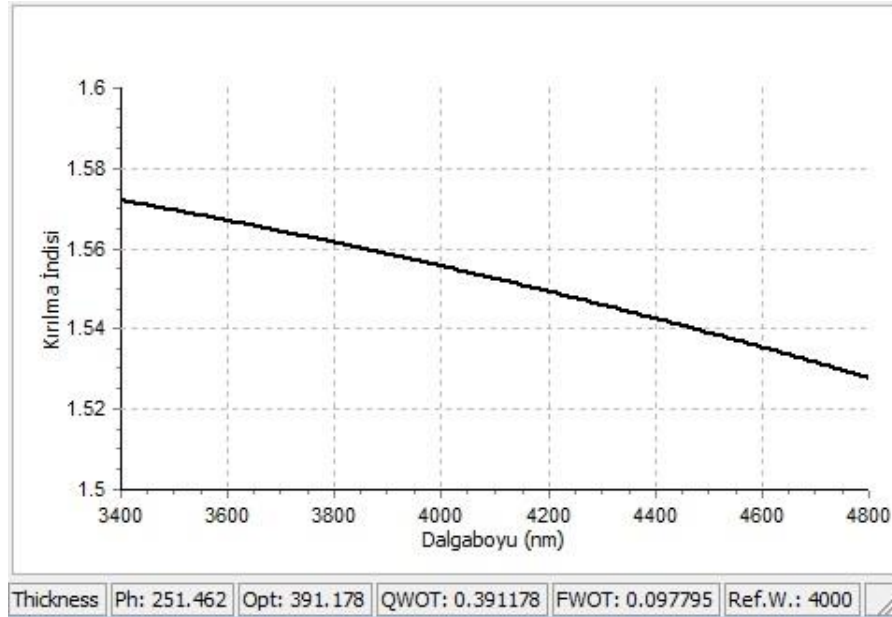
Şekil 4.31. Si üzeri Al_2O_3 filmin yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve Si üzeri 250 nm kalınlığındaki Al₂O₃ ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 µm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Al₂O₃ filmin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılma indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,001935 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000214 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup Si üzeri Al₂O₃ film için MWIR bölgede kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.14) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

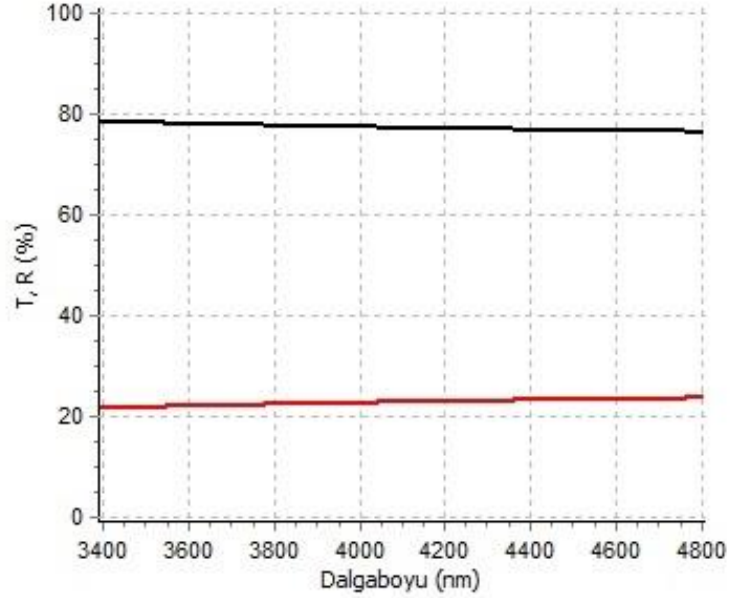
$$n^2(\lambda) = 2,582 + \frac{0,055 \lambda^2}{(\lambda^2 + 8,331)} + \frac{7,172 \lambda^2}{(\lambda^2 - 599,997)} \quad (4.14)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre Si üzeri 250 nm Al₂O₃ filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.32’de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 251,462 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.32. Si üzeri Al₂O₃ filmin MWIR bölgede kırılma indis dağılımı

ZnS üzerine kaplanan 250 nm kalınlığındaki Al₂O₃ filmin MWIR bölgede elde edilen yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.33’de gösterilmektedir.



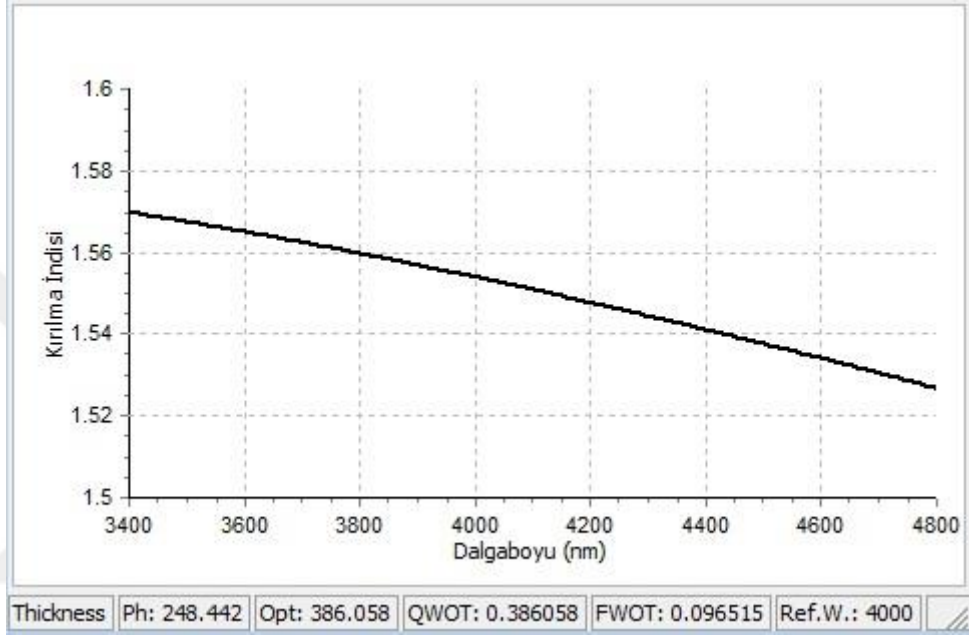
Şekil 4.33. ZnS üzeri Al₂O₃ filmin yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen ölçüm verileri spektral olarak toplandığında yansımaya ve geçirgenlik değerlerinin toplamının %100 olduğu ve ZnS üzeri 250 nm kalınlığındaki Al₂O₃ ince filmin soğurma katsayısının 3,4–4,8 µm arasında sıfır olduğu görülmüştür.

OptiChar yazılımı ile Al₂O₃ filmin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak MWIR bölge için filmin kırılım indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,001629 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,000151 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup ZnS üzeri Al₂O₃ film için MWIR bölgede kırılım indis dağılım fonksiyonu denklem (4.15) de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

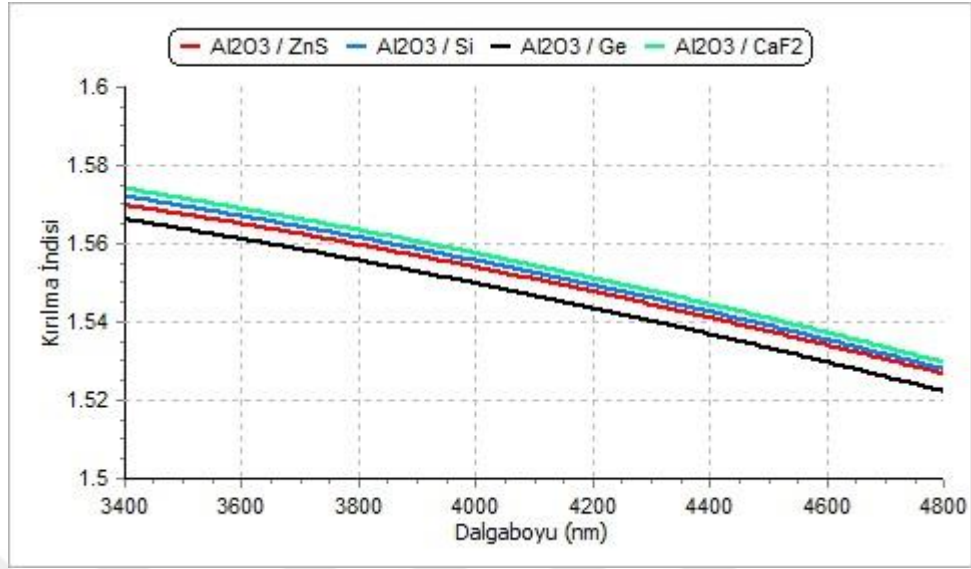
$$n^2(\lambda) = 2,518 - \frac{9,721 \lambda^2}{(\lambda^2 + 36,971)} + \frac{8,270 \lambda^2}{(\lambda^2 + 30,701)} \quad (4.15)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre ZnS üzeri 250 nm Al_2O_3 filmin MWIR bölgedeki dağılımı Şekil 4.34'de gösterildiği şekilde olup film kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 248,442 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.34. ZnS üzeri Al_2O_3 filmin MWIR bölgedeki kırılma indis dağılımı

Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere Al_2O_3 katmanı üzerine kaplandığı CaF_2 , Ge, Si ve ZnS şahit numunelerin malzeme ve yüzey özelliklerine bağlı olarak Şekil 4.35'de gösterildiği gibi farklı kırılma indis dağılımları gösterebilmektedirler.



Şekil 4.35. Al₂O₃ filmin CaF₂, Ge, Si ve ZnS üzeri MWIR bölgede kırılma indis dağılımları

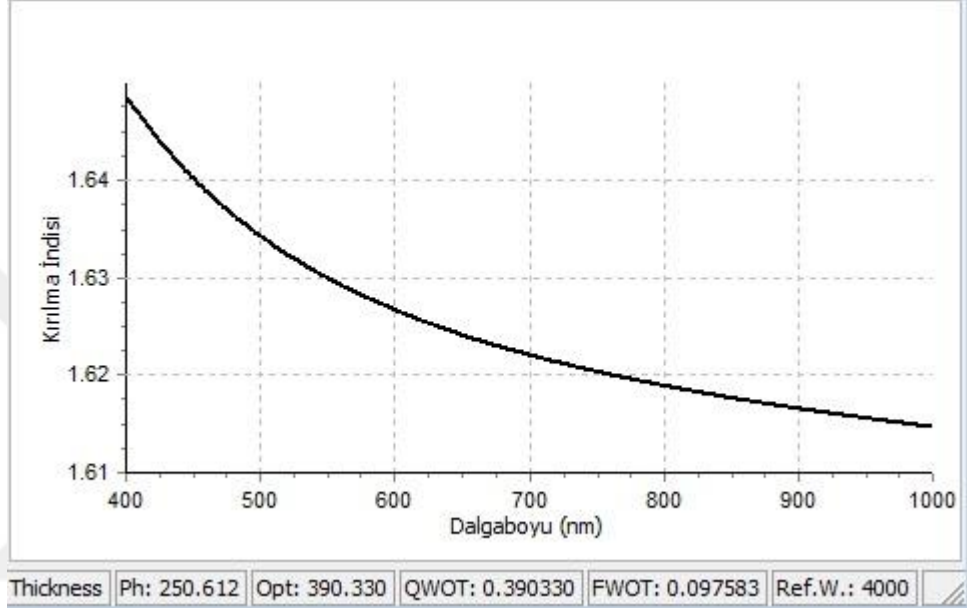
CaF₂, Ge, Si ve ZnS üzeri Al₂O₃ filmler için elde edilen farklı kırılma indis dağılım modelleri ve değerleri MWIR ARC kaplamaların tasarım aşamalarında nL olarak kullanılmıştır.

Çok katmanlı MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesin Al₂O₃ filmlerin yüksek kalınlık hassasiyeti ile kaplanabilmesi için 400–1000 nm arası spektral çalışma aralığı olan optik kalınlık izleme sistemi kullanılmıştır. Bu nedenle Al₂O₃ için 400–1000 nm arası kırılma indis dağılımı optik kalınlık izleme sisteminde test camı olarak kullanılan B 270 üzerinde de elde edilmiştir.

OptiChar yazılımı ile Al₂O₃ filmin yansıma ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak 400 – 1000 nm arası için filmin kırılma indis dağılımı modellenmiştir. Modelleme Cauchy fonksiyonuna benzetimde 0,000168 ve Sellmeier fonksiyonuna benzetimde 0,001867 katsayı farkı ile gerçekleştirilmiş olup B 270 üzeri Al₂O₃ film için 400–1000 nm arası kırılma indis dağılım fonksiyonu denklem (4.16) da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

$$n^2(\lambda) = 1,608 + \frac{0,007}{\lambda^2} - \frac{5,202 e^{-5}}{\lambda^4} \quad (4.11)$$

Elde edilen kırılma indis dağılım fonksiyonuna göre B270 üzeri 250 nm Al_2O_3 filmin 400–1000 nm arası dağılımı Şekil 4.36’da gösterildiği şekilde olup filmin kalınlığı modellemeye göre şeklin sol alt tarafında da görüleceği üzere 250,612 nm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.36. B 270 üzeri Al_2O_3 filmin 400–1000 nm arası kırılma indis dağılımı

4.4. MWIR ARC Kaplamaların Geliştirilmesi

Çalışmanın bu aşamasında MWIR ARC kaplamaların tasarımı ve aktif optimizasyon yöntemi ile geliştirilmesi ile ilgili süreçler yer almaktadır. MWIR ARC kaplamaların tasarım aşamasında CaF_2 , Ge, Si ve ZnS şahit numunelerin karakterizasyon çalışmaları sonucunda elde edilen kırılma indis dağılımları ile nH ve nL malzemelerin farklı şahit numuneler üzerinde modellenen kırılma indis dağılımları kullanılmıştır.

Tasarım aşamasında MWIR ARC kaplamalar için 0° geliş açısı ile hedeflenen spektral isterler ideal durum olan $R=0\%$ ve $T=100\%$ şeklinde tanımlanmıştır. Tasarım esnasında spektral davranış olarak belirlenen kabul kriterleri ise yüksek verimli geniş bant MWIR ARC kaplamalar sınıfına giren $R<1\%$ ve $T>99\%$ şeklindedir. Tasarım aşamasında göz

önünde bulundurulan en önemli hususlardan bir tanesi de hedef spektral davranışlara maliyet etkin çözümlerle ulaşmak için asgari katman kalınlığını elde etmek olmuştur.

4.4.1. CaF₂ MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi

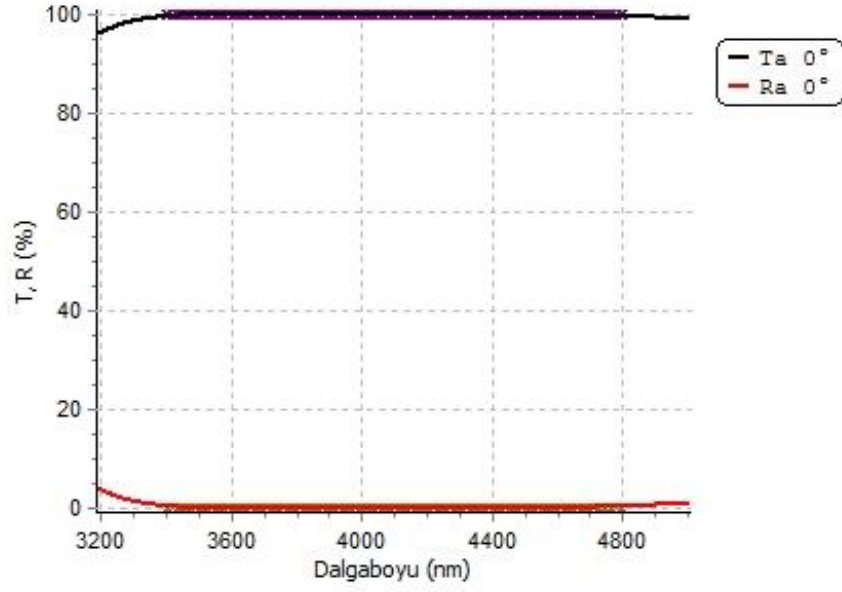
CaF₂ üzeri MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk aşamasında önceki bölümlerde elde edilmiş olan şahit numune, nH ve nL kırılım indis dağılım modelleri kullanılarak 3,4–4,8 µm arası R=%0 ve T=%100 hedef spektral davranışlar ile tasarım yapılmıştır.

Optilayer modülünde hedef spektral davranışların, şahit numune, nH ve nL malzemelerinin tanımlanması ile gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda R<%1 ve T>%99 spektral davranışa sahip ARC tasarımı Çizelge 4.3’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 4.3. CaF₂ üzeri MWIR ARC tasarımı

Katman Sayısı	Fiziksel Kalınlık (nm)	Optik Kalınlık	QWOT	Malzeme
1	814.069	1326.933	9.650422	nL
2	59.101	304.982	2.218054	nH
3	371.877	606.16	4.408435	nL
4	82.111	423.722	3.081616	nH
5	800.868	1305.415	9.49393	nL

Optimizasyon çalışması sonrasında CaF₂ üzeri ARC kaplamaların MWIR bölgede yansıma ve geçirgenlik davranışları Şekil 4.37’de gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.37. CaF₂ üzeri ARC kaplama tasarımının yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları

Optimizasyon sonucu elde edilen 5 katmanlı tasarımın MWIR bölgede 3,4–4,8 µm arası sahip olduğu yansımaya ve geçirgenlik değerleri Çizelge 4.4’de gösterilmektedir.

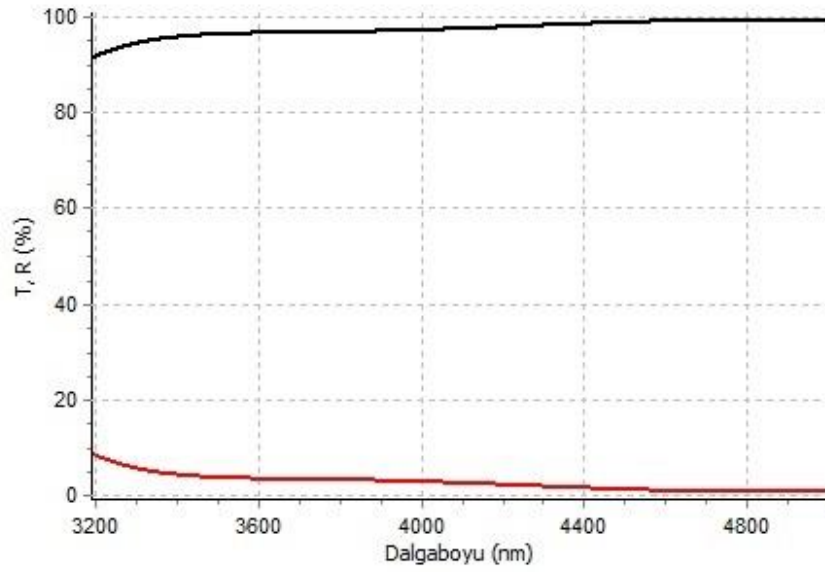
Çizelge 4.4. CaF₂ üzeri MWIR ARC tasarımının spektral yansıma ve geçirgenlik değerleri

Dalgaboyu (nm)	R (%)	T (%)
3400	0.3987	99.6013
3450	0.17974	99.82026
3500	0.06955	99.93045
3550	0.02847	99.97153
3600	0.02836	99.97164
3650	0.0499	99.9501
3700	0.08018	99.91982
3750	0.11101	99.88899
3800	0.13747	99.86253
3850	0.15695	99.84305
3900	0.16829	99.83171
3950	0.1715	99.8285
4000	0.16717	99.83283
4050	0.1563	99.8437
4100	0.14029	99.85971
4150	0.12066	99.87934
4200	0.09906	99.90094
4250	0.07725	99.92275
4300	0.0571	99.9429
4350	0.04047	99.95953
4400	0.02927	99.97073
4450	0.02545	99.97455
4500	0.03093	99.96907
4550	0.04761	99.95239
4600	0.07735	99.92265
4650	0.12196	99.87804
4700	0.18309	99.81691
4750	0.26238	99.73762
4800	0.36124	99.63876

CaF₂ üzeri tasarlanan MWIR ARC kaplamanın 3,4–4,8 μm arası ortalama yansıma değeri R=%0,12 ve geçirgenlik değeri T=%99, 88 olarak elde edilmiş olup R ve T değerleri hedef spektral aralık boyunca R için %1 ve T için %99 değerinin üzerinde yer almaktadır.

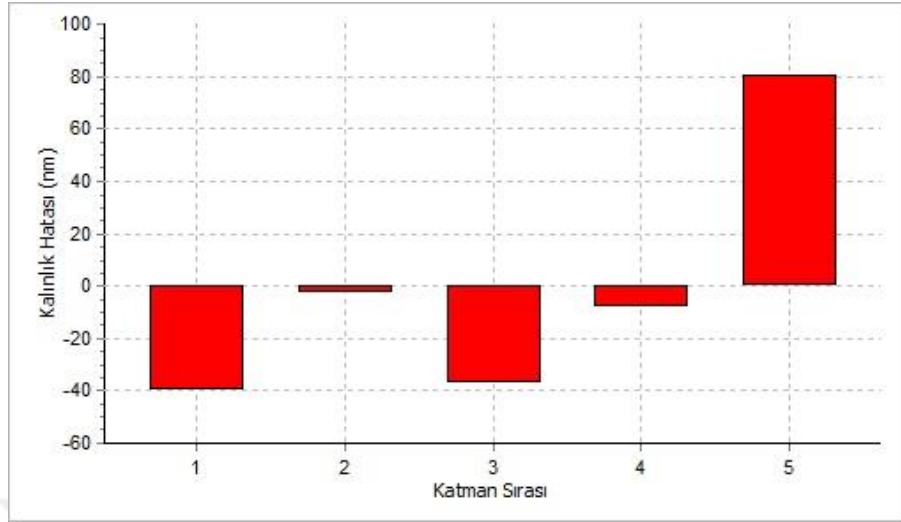
Tasarımı yapılan CaF_2 üzeri MWIR ARC kaplama için oluşturulan kaplama prosesi Çizelge 4.1 ve 4.2’de tanımlanan reçeteler ile ön ısıtma, kaplama ve soğuma döngüsünde uygulanmıştır.

1. aşama kaplama sonrası CaF_2 üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.38’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.38. 1. aşama CaF_2 üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=2,33$ ve $T=97,67$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

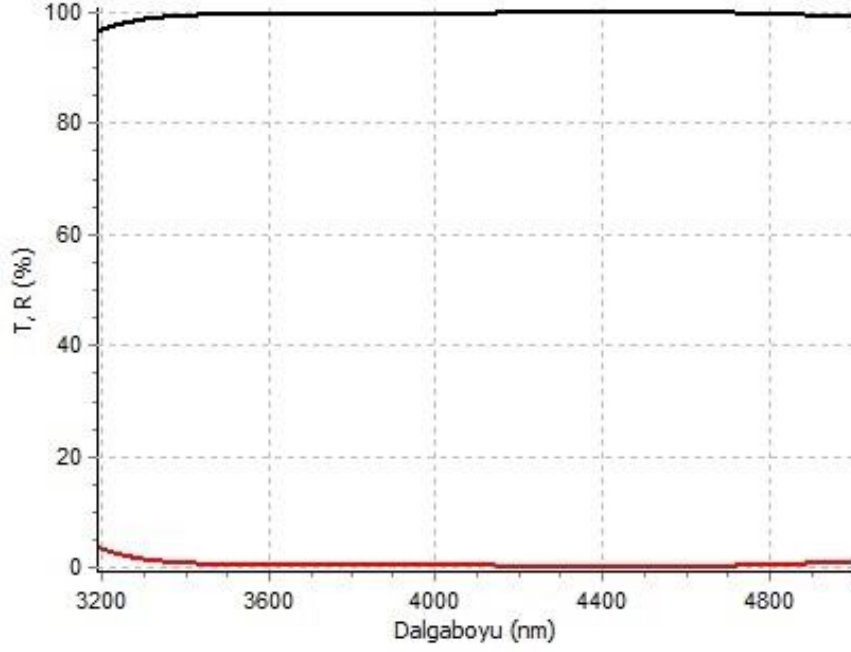


Şekil 4.39. CaF₂ üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri

OptiRe modülü kullanılarak 1. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.39'da gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için 1,05, 2. katman için 1,03, 3. katman için 1,07, 4. katman için 1,05 ve 5. katman için - 1,097 çarpanları ile revize edilmiştir.

Güncellenen tasarım ile 2. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra CaF₂ üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.40'da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

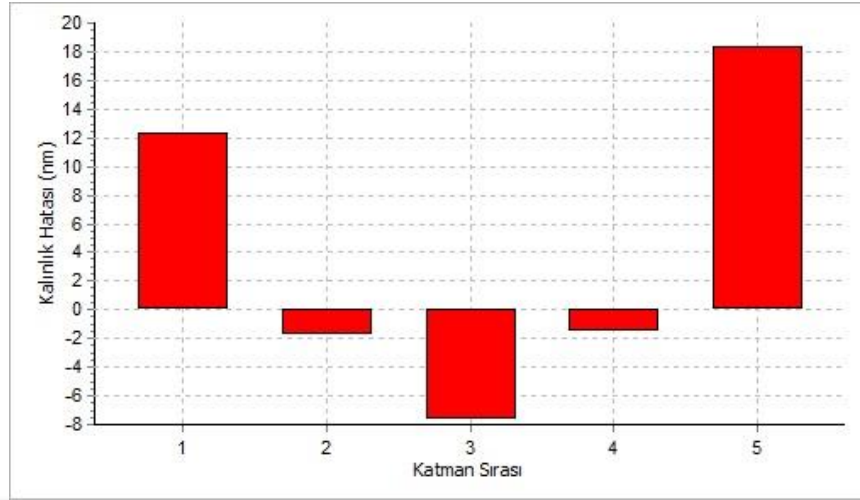


Şekil 4.40. 2. aşama CaF_2 üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=\%0,27$ ve $T=\%99,73$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

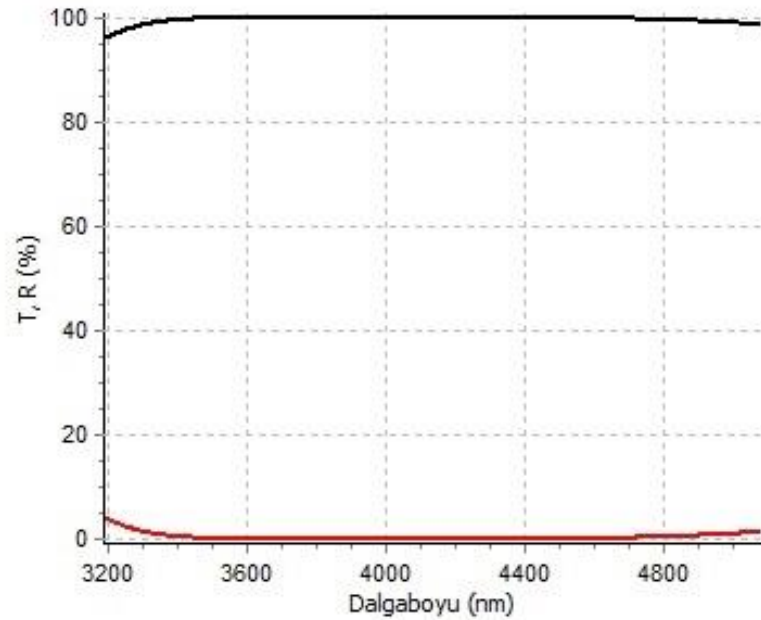
OptiRe modülü kullanılarak 2. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.41’de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,05, 2. katman için 1,03, 3. katman için - 1,021, 4. katman için 1,018 ve 5. katman için - 1,03 çarpanları ile revize edilmiştir.



Şekil 4.41. CaF₂ üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri

Güncellenen tasarım ile 3. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra CaF₂ üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.42’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

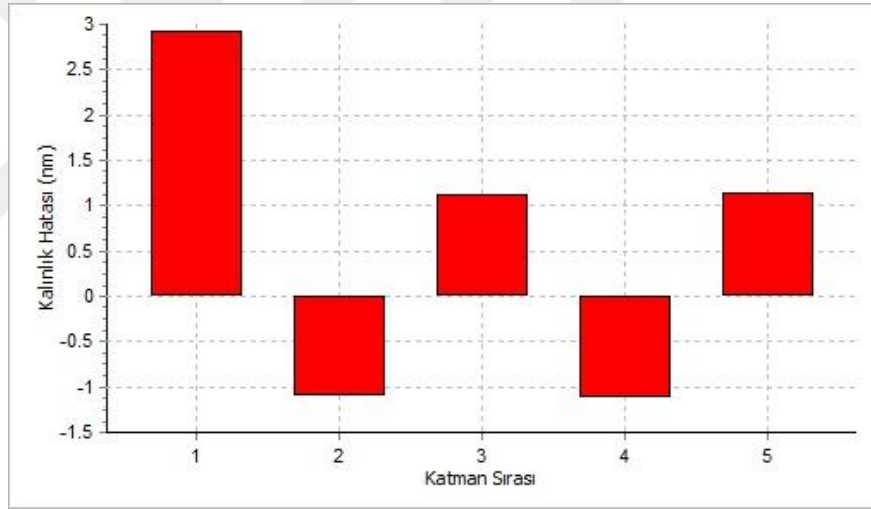


Şekil 4.42. 3. aşama CaF₂ üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,119$ ve $T=99,881$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

OptiRe modülü kullanılarak 3. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.43'de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayılarının optimizasyonu tasarım da elde edilen R ve T değerlerine ulaşıldığı için sonuçlandırılmıştır.



Şekil 4.43. CaF_2 üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri

CaF_2 üzeri MWIR ARC kaplamalarda 3 optimizasyon sonucunda tasarımda $R=0,12$ olan ortalama yansımaya değeri $R=0,119$ ve tasarımda $T=99,88$ olan ortalama geçirgenlik değeri $T=99,881$ olarak elde edilmiştir.

4.4.2. Ge MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi

Ge üzeri MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk aşamasında önceki bölümlerde elde edilmiş olan şahit numune, nH ve nL kırılım indis dağılım

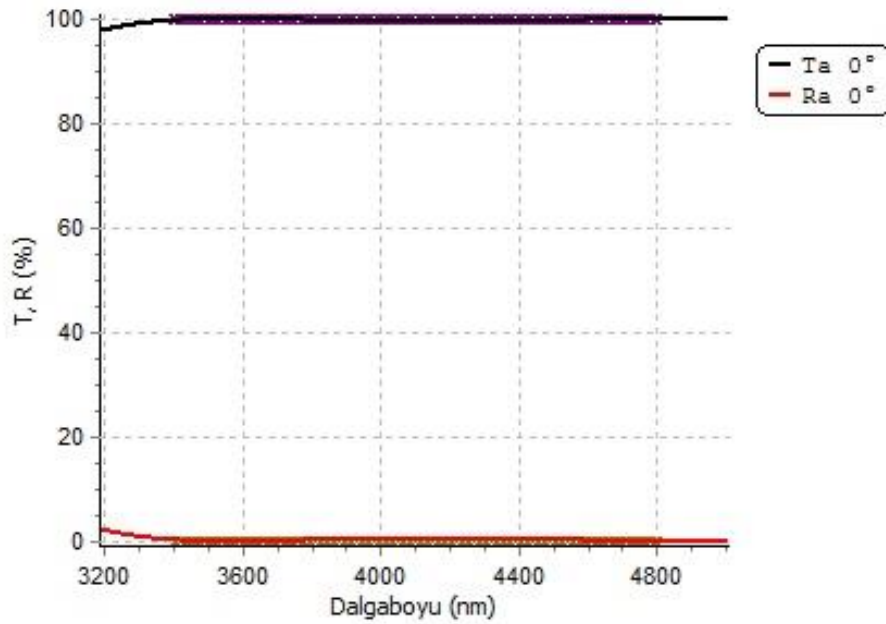
modelleri kullanılarak 3,4–4,8 μm arası $R = \%0$ ve $T = \%100$ hedef spektral davranışlar ile tasarım yapılmıştır.

Optilayer modülünde hedef spektral davranışların, şahit numune, nH ve nL malzemelerinin tanımlanması ile gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda $R < \%1$ ve $T > \%99$ spektral davranışa sahip ARC tasarımı Çizelge 4.5’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 4.5. Ge üzeri MWIR ARC tasarımı

Katman Sayısı	Fiziksel Kalınlık (nm)	Optik Kalınlık	QWOT	Malzeme
1	134.969	220	1.6	nL
2	105	541.838	3.940638	nH
3	725.46	1182.5	8.6	nL

Optimizasyon çalışması sonrasında Ge üzeri ARC kaplamaların MWIR bölgede yansımaya ve geçirgenlik davranışları Şekil 4.44’de gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.44. Ge üzeri ARC kaplama tasarımının yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları

Optimizasyon sonucu elde edilen 3 katmanlı tasarımın MWIR bölgede 3,4–4,8 μm arası sahip olduğu yansımaya ve geçirgenlik değerleri Çizelge 4.6’da gösterilmektedir.

Çizelge 4.6. Ge üzeri MWIR ARC tasarımın spektral yansımaya ve geçirgenlik değerleri

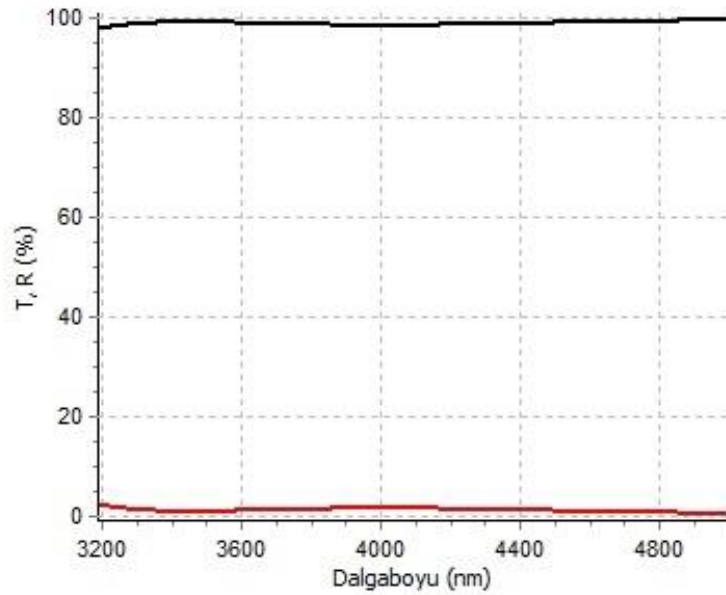
Dalgaboyu (nm)	R (%)	T (%)
3400	0.27878	99.72122
3450	0.11747	99.88253
3500	0.03282	99.96718
3550	0.0047	99.9953
3600	0.01654	99.98346
3650	0.05483	99.94517
3700	0.10881	99.89119
3750	0.17015	99.82985
3800	0.23244	99.76756
3850	0.29104	99.70896
3900	0.34266	99.65734
3950	0.3852	99.6148
4000	0.4174	99.5826
4050	0.43881	99.56119
4100	0.44958	99.55042
4150	0.45022	99.54978
4200	0.44158	99.55842
4250	0.42487	99.57513
4300	0.40137	99.59863
4350	0.37252	99.62748
4400	0.3398	99.6602
4450	0.30473	99.69527
4500	0.26882	99.73118
4550	0.23355	99.76645
4600	0.20031	99.79969
4650	0.17047	99.82953
4700	0.14534	99.85466
4750	0.12607	99.87393
4800	0.11377	99.88623

Ge üzeri tasarlanan MWIR ARC kaplamanın 3,4–4,8 μm arası ortalama yansımaya değeri $R=0,253$ ve geçirgenlik değeri $T=99,747$ olarak elde edilmiş olup R ve T değerleri

hedef spektral aralık boyunca R için %1 ve T için %99 değerinin üzerinde yer almaktadır.

Tasarımı yapılan Ge üzeri MWIR ARC kaplama için oluşturulan kaplama prosesi Çizelge 4.1 ve 4.2’de tanımlanan reçeteler ile ön ısıtma, kaplama ve soğuma döngüsünde uygulanmıştır.

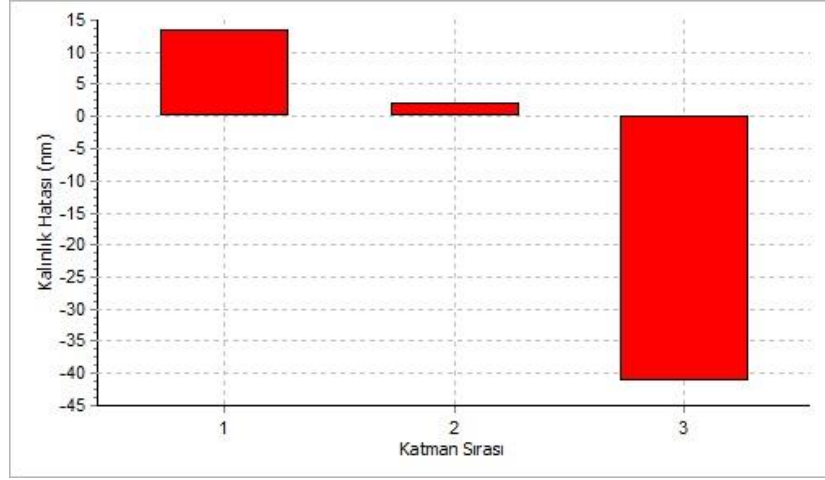
1. aşama kaplama sonrası Ge üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.45’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.45. 1. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede R = %1,30 ve T = %98,7 ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

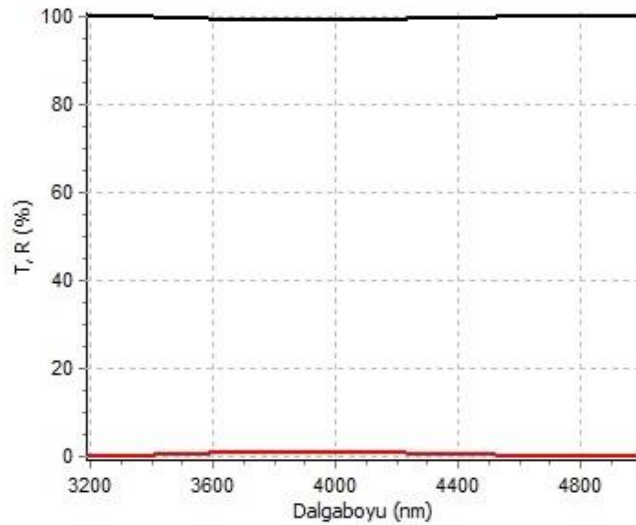
OptiRe modülü kullanılarak 1. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.



Şekil 4.46. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.46’da gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,1, 2. katman için – 1,01 ve 3. katman için 1,06 çarpanları ile revize edilmiştir.

Güncellenen tasarım ile 2. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra Ge üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.47’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

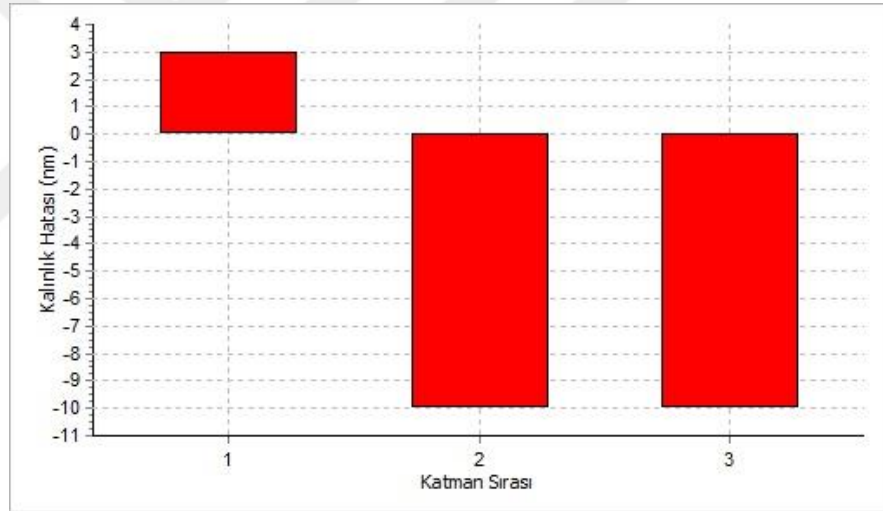


Şekil 4.47. 2. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,83$ ve $T=99,17$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

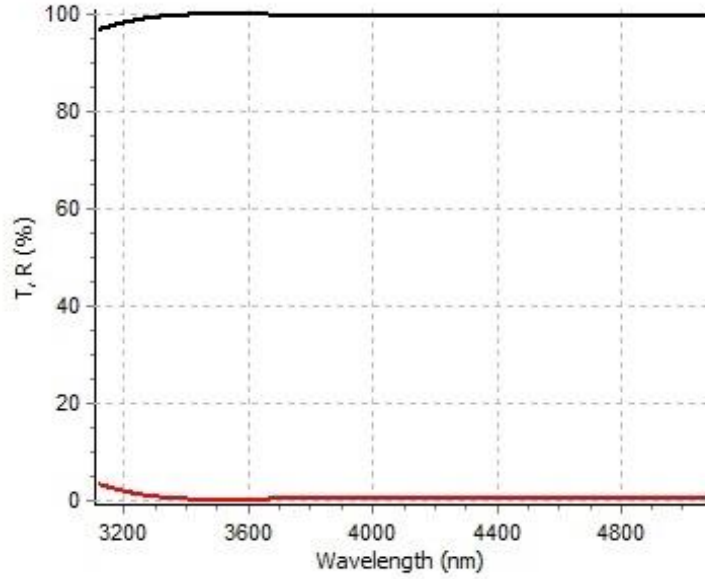
OptiRe modülü kullanılarak 2. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.48'de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,02, 2. katman için 1,11 ve 3. katman için 1,03 çarpanları ile revize edilmiştir.



Şekil 4.48. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri

Güncellenen tasarım ile 3. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra Ge üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.49'da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

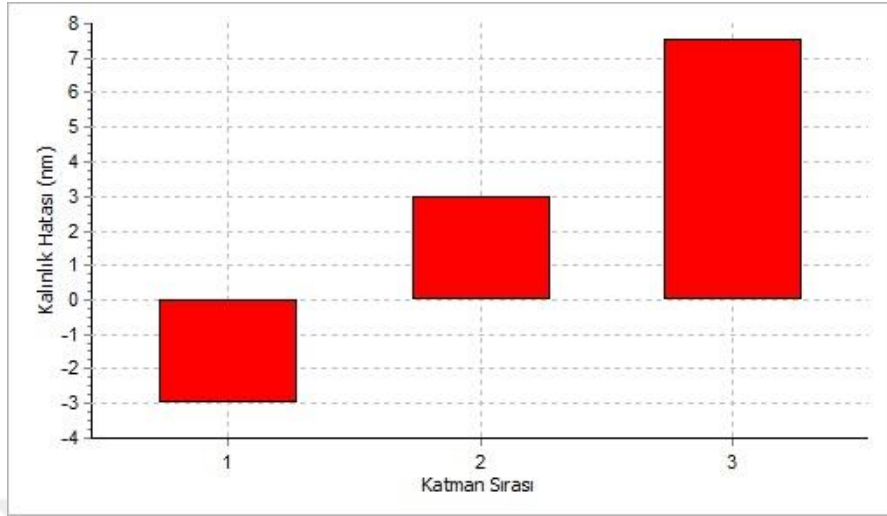


Şekil 4.49. 3. aşama Ge üzeri ARC kaplama yansıtma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,256\%$ ve $T=99,744\%$ ortalama yansıtma ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

OptiRe modülü kullanılarak 3. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.50'de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayılarının optimizasyonu tasarım da elde edilen R ve T değerlerine ulaşıldığı için sonuçlandırılmıştır.



Şekil 4.50. Ge üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri

Ge üzeri MWIR ARC kaplamalarda 3 optimizasyon sonucunda tasarımda $R=0,253$ olan ortalama yansımaya değeri $R=0,256$ ve tasarımda $T=99,747$ olan ortalama geçirgenlik değeri $T=99,744$ olarak elde edilmiştir.

4.4.3. Si MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi

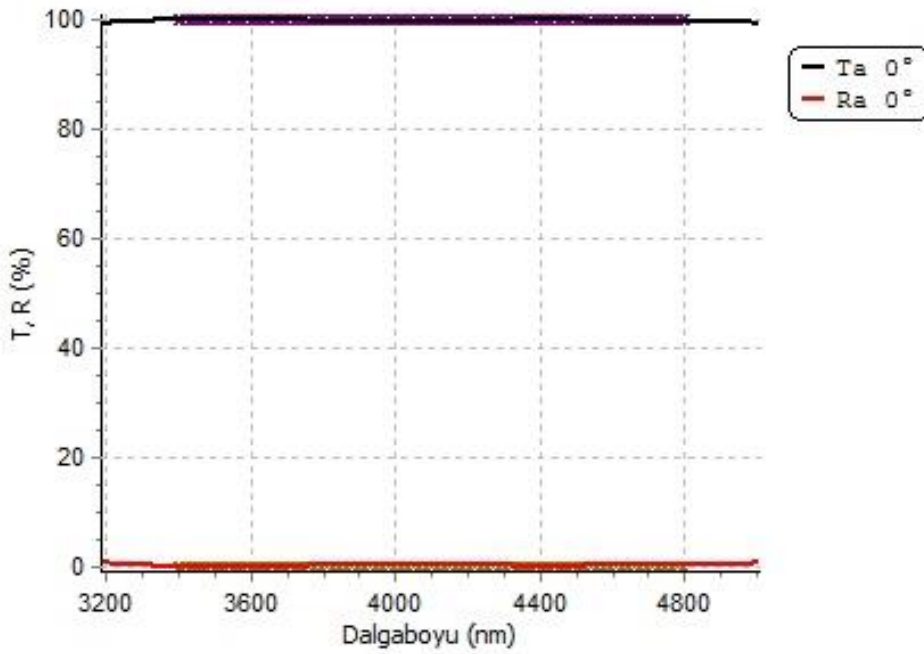
Si üzeri MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk aşamasında önceki bölümlerde elde edilmiş olan şahit numune, nH ve nL kırılım indis dağılım modelleri kullanılarak 3,4–4,8 μm arası $R=0$ ve $T=100$ hedef spektral davranışlar ile tasarım yapılmıştır.

Optilayer modülünde hedef spektral davranışların, şahit numune, nH ve nL malzemelerinin tanımlanması ile gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda $R < 1$ ve $T > 99$ spektral davranışa sahip ARC tasarımı Çizelge 4.7’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. Si üzeri MWIR ARC tasarımı

Katman Sayısı	Fiziksel Kalınlık (nm)	Optik Kalınlık	QWOT	Malzeme
1	134.969	220	1.6	nL
2	85	438.631	3.19004	nH
3	705.521	1150	8.363636	nL

Optimizasyon çalışması sonrasında Si üzeri ARC kaplamaların MWIR bölgede yansıma ve geçirgenlik davranışları Şekil 4.51’de gösterildiği şekildedir.

**Şekil 4.51.** Si üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları

Optimizasyon sonucu elde edilen 3 katmanlı tasarımın MWIR bölgede 3,4–4,8 μm arası sahip olduğu yansıma ve geçirgenlik değerleri Çizelge 4.8’de gösterilmektedir.

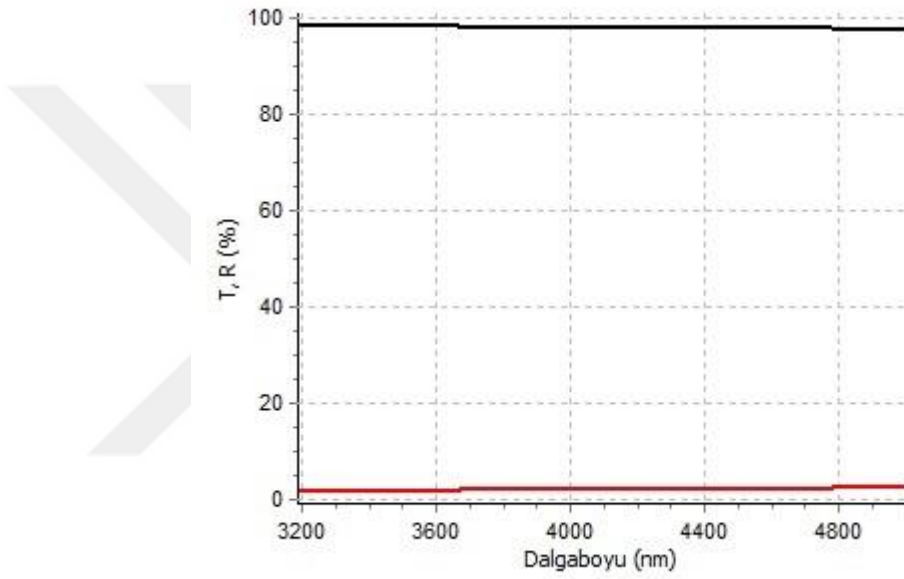
Çizelge 4.8. Si üzeri MWIR ARC tasarımının spektral yansımaya ve geçirgenlik değerleri

Dalgaboyu (nm)	R (%)	T (%)
3400	0.11236	99.88764
3450	0.08818	99.91182
3500	0.08744	99.91256
3550	0.10196	99.89804
3600	0.12504	99.87496
3650	0.15192	99.84808
3700	0.17891	99.82109
3750	0.20361	99.79639
3800	0.22434	99.77566
3850	0.24025	99.75975
3900	0.25098	99.74902
3950	0.25665	99.74335
4000	0.25763	99.74237
4050	0.25469	99.74531
4100	0.24858	99.75142
4150	0.24023	99.75977
4200	0.23062	99.76938
4250	0.22084	99.77916
4300	0.21194	99.78806
4350	0.20493	99.79507
4400	0.20081	99.79919
4450	0.20052	99.79948
4500	0.20493	99.79507
4550	0.21485	99.78515
4600	0.23099	99.76901
4650	0.25405	99.74595
4700	0.28455	99.71545
4750	0.32306	99.67694
4800	0.36996	99.63004

Si üzeri tasarlanan MWIR ARC kaplamanın 3,4–4,8 μm arası ortalama yansımaya değeri $R = \%0,212$ ve geçirgenlik değeri $T = \%99,788$ olarak elde edilmiş olup R ve T değerleri hedef spektral aralık boyunca R için $\%1$ ve T için $\%99$ değerinin üzerinde yer almaktadır.

Tasarımı yapılan Si üzeri MWIR ARC kaplama için oluşturulan kaplama prosesi Çizelge 4.1 ve 4.2’de tanımlanan reçeteler ile ön ısıtma, kaplama ve soğuma döngüsünde uygulanmıştır.

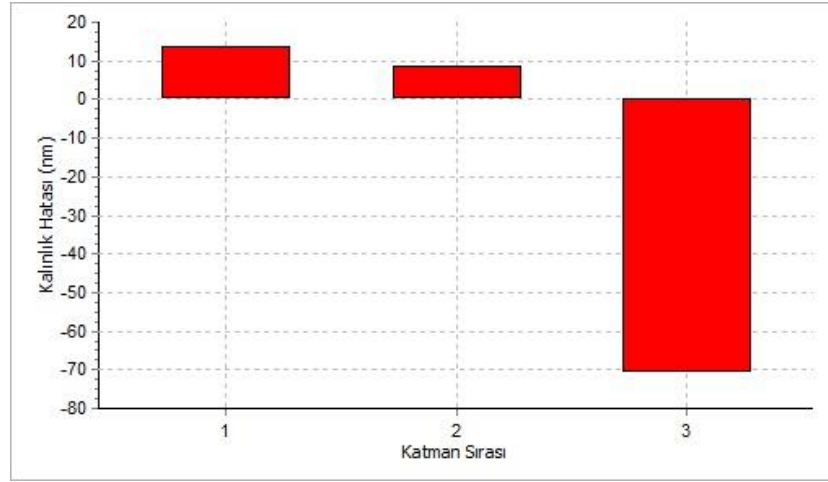
1. aşama kaplama sonrası Si üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.52’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.52. 1. aşama Si üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R = \%2,07$ ve $T = \%97,93$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

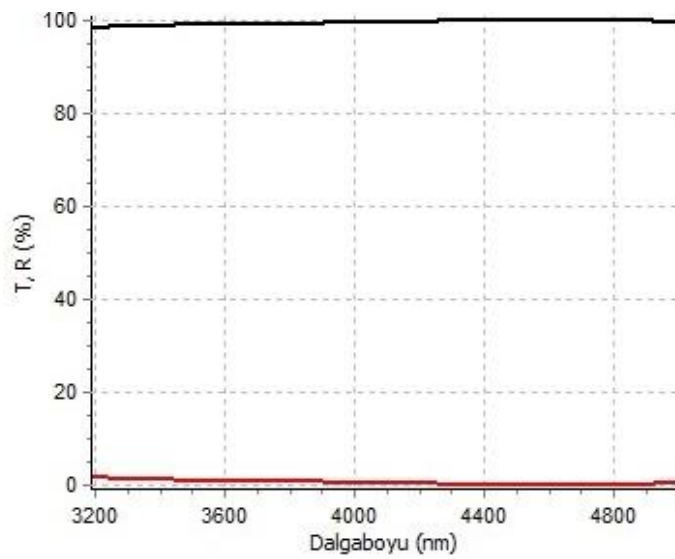
OptiRe modülü kullanılarak 1. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.



Şekil 4.53. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.53’de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,09, 2. katman için – 1,12 ve 3. katman için 1,11 çarpanları ile revize edilmiştir.

Güncellenen tasarım ile 2. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra Si üzeri MWIR ARC kaplamaların yansıma ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.54’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

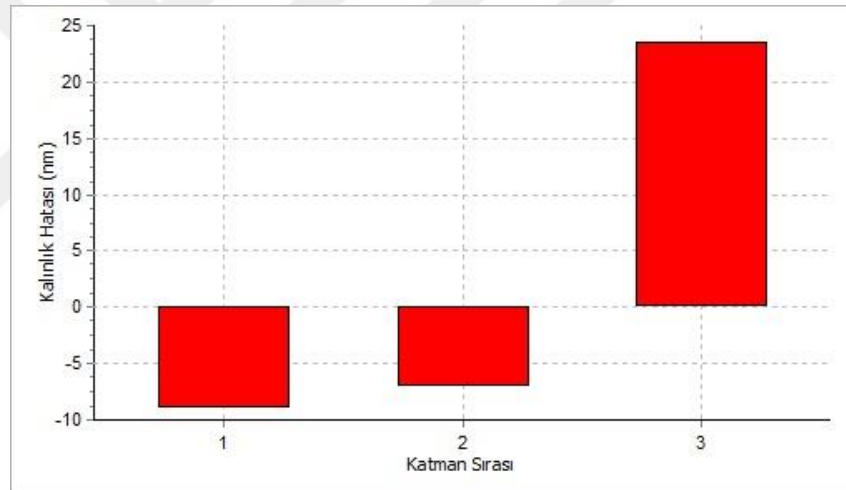


Şekil 4.54. 2. aşama Si üzeri ARC kaplama yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R = \%0,44$ ve $T=\%99,56$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

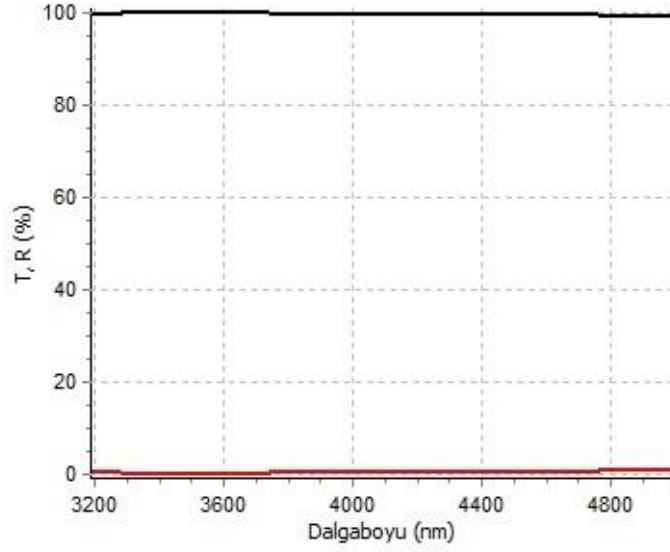
OptiRe modülü kullanılarak 2. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.55’de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için 1,05, 2. katman için 1,08 ve 3. katman için - 1,03 çarpanları ile revize edilmiştir.



Şekil 4.55. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri

Güncellenen tasarım ile 3. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra Si üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.56’da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

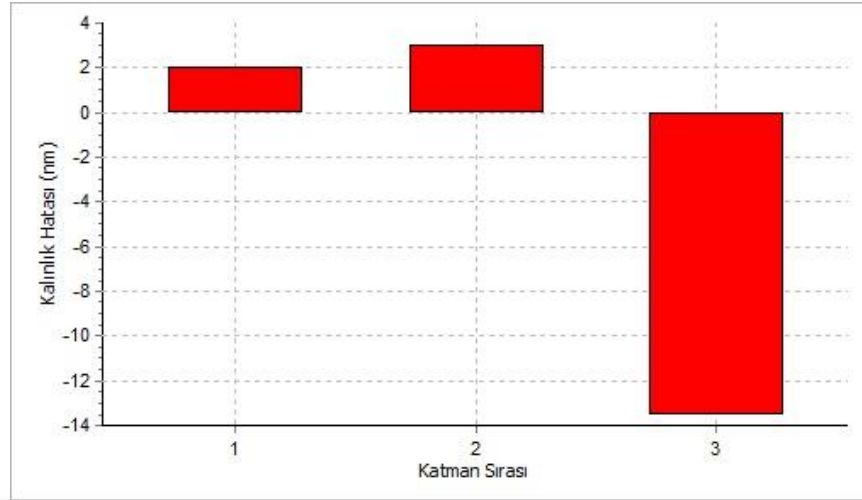


Şekil 4.56. 3. aşama Si üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,33$ ve $T=99,67$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

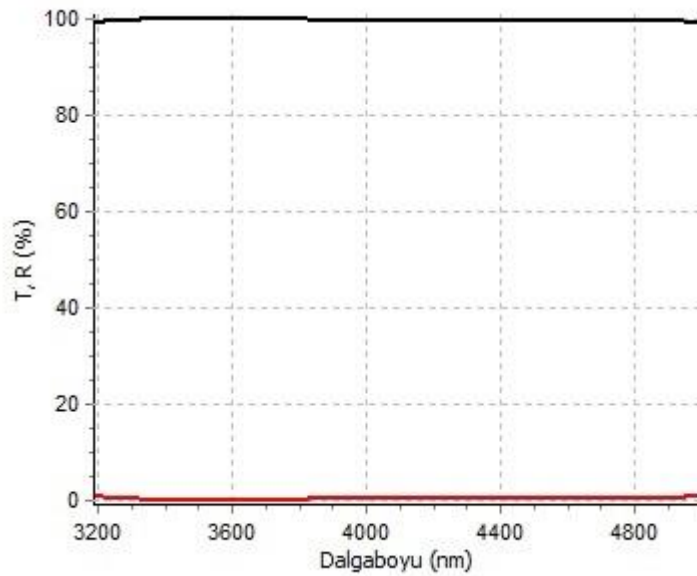
OptiRe modülü kullanılarak 3. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.57'de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,015, 2. katman için - 1,04 ve 3. katman için 1,02 çarpanları ile revize edilmiştir.



Şekil 4.57. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri

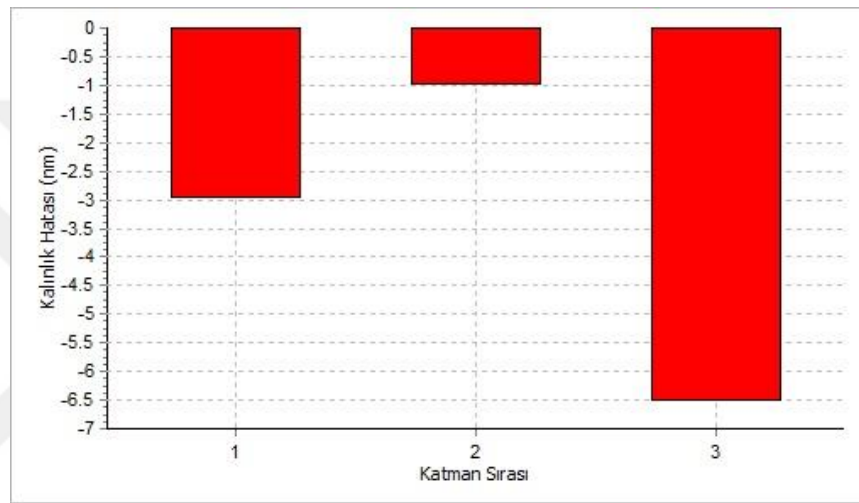
Güncellenen tasarım ile 4. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra Si üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.58’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.58. 4. aşama Si üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,214$ ve $T=99,786$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

OptiRe modülü kullanılarak 4. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.



Şekil 4.59. Si üzeri ARC katman kalınlıklarının 3. aşama kaplama hata seviyeleri

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.59'da gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayılarının optimizasyonu tasarım da elde edilen R ve T değerlerine ulaşıldığı için sonuçlandırılmıştır.

Si üzeri MWIR ARC kaplamalarda 4 optimizasyon sonucunda tasarımda $R=0,212$ olan ortalama yansımaya değeri $R=0,214$ ve tasarımda $T=99,788$ olan ortalama geçirgenlik değeri $T=99,786$ olarak elde edilmiştir.

4.4.4. ZnS MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi

ZnS üzeri MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk aşamasında önceki bölümlerde elde edilmiş olan şahit numune, nH ve nL kırılım indis

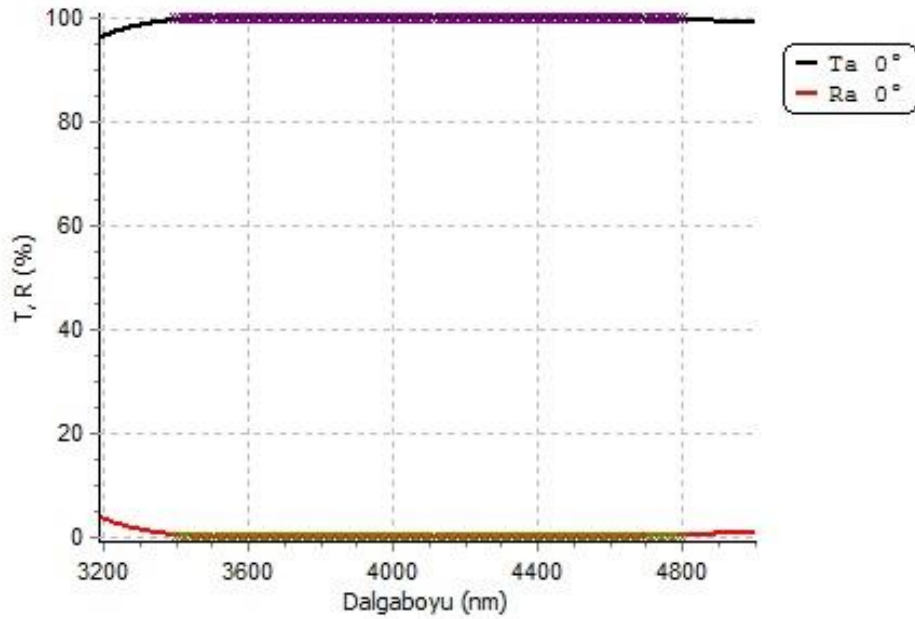
dağılım modelleri kullanılarak 3,4–4,8 μm arası $R=0\%$ ve $T=100\%$ hedef spektral davranışlar ile tasarım yapılmıştır.

Optilayer modülünde hedef spektral davranışların, şahit numune, nH ve nL malzemelerinin tanımlanması ile gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda $R<1\%$ ve $T>99\%$ spektral davranışa sahip ARC tasarımı Çizelge 4.9'da gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

Çizelge 4.9. ZnS üzeri MWIR ARC tasarımı

Katman Sayısı	Fiziksel Kalınlık (nm)	Optik Kalınlık	QWOT	Malzeme
1	72.937	376.381	2.737317	nH
2	267.67	436.302	3.173108	nL
3	92.279	476.193	3.46322	nH
4	780.882	1272.838	9.257005	nL

Optimizasyon çalışması sonrasında ZnS üzeri ARC kaplamaların MWIR bölgede yansıma ve geçirgenlik davranışları Şekil 4.60'da gösterildiği şekildedir.



Şekil 4.60. ZnS üzeri ARC kaplama tasarımının yansıma (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) davranışları

Optimizasyon sonucu elde edilen 4 katmanlı tasarımın MWIR bölgede 3,4–4,8 μm arası sahip olduğu yansımaya ve geçirgenlik değerleri Çizelge 4.10’da gösterilmektedir.

Çizelge 4.10. ZnS üzeri MWIR ARC tasarımının spektral yansımaya ve geçirgenlik değerleri

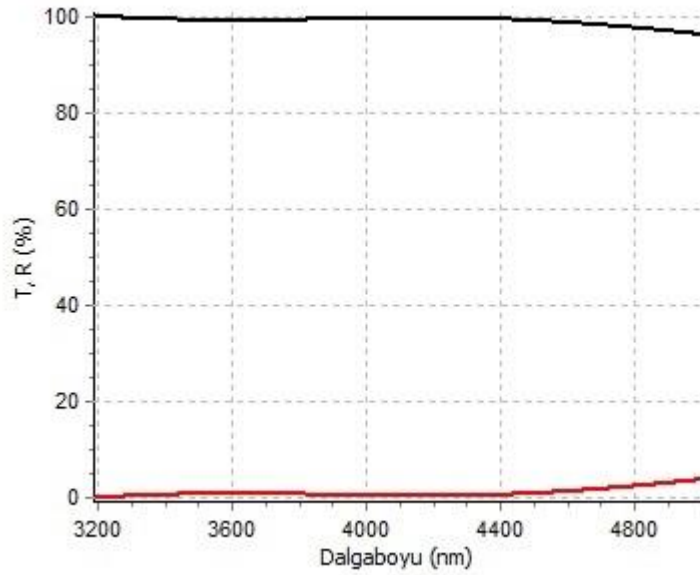
Dalgaboyu (nm)	R (%)	T (%)
3400	0.44013	99.55987
3450	0.201	99.799
3500	0.07444	99.92556
3550	0.02439	99.97561
3600	0.02294	99.97706
3650	0.04909	99.95091
3700	0.08753	99.91247
3750	0.12769	99.87231
3800	0.16258	99.83742
3850	0.18816	99.81184
3900	0.20252	99.79748
3950	0.20541	99.79459
4000	0.19766	99.80234
4050	0.181	99.819
4100	0.15765	99.84235
4150	0.13009	99.86991
4200	0.10091	99.89909
4250	0.07279	99.92721
4300	0.04826	99.95174
4350	0.02967	99.97033
4400	0.01918	99.98082
4450	0.01871	99.98129
4500	0.02988	99.97012
4550	0.05406	99.94594
4600	0.09239	99.90761
4650	0.1457	99.8543
4700	0.21451	99.78549
4750	0.29931	99.70069
4800	0.40014	99.59986

ZnS üzeri tasarlanan MWIR ARC kaplamanın 3,4–4,8 μm arası ortalama yansımaya değeri R=%0,137 ve geçirgenlik değeri T=%99,863 olarak elde edilmiş olup R ve T

değerleri hedef spektral aralık boyunca R için %1 ve T için %99 değerinin üzerinde yer almaktadır.

Tasarımı yapılan ZnS üzeri MWIR ARC kaplama için oluşturulan kaplama prosesi Çizelge 4.1 ve 4.2’de tanımlanan reçeteler ile ön ısıtma, kaplama ve soğuma döngüsünde uygulanmıştır.

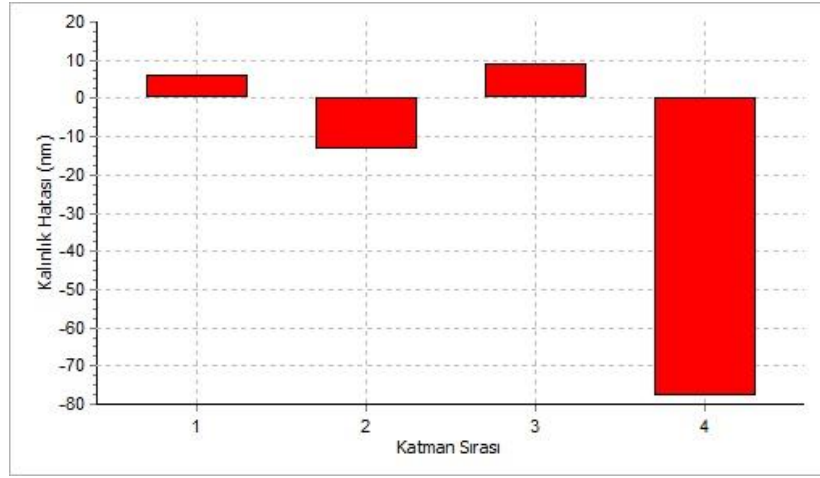
1. aşama kaplama sonrası ZnS üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.61’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.



Şekil 4.61. 1. aşama ZnS üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede R=%0,75 ve T=%99,25 ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

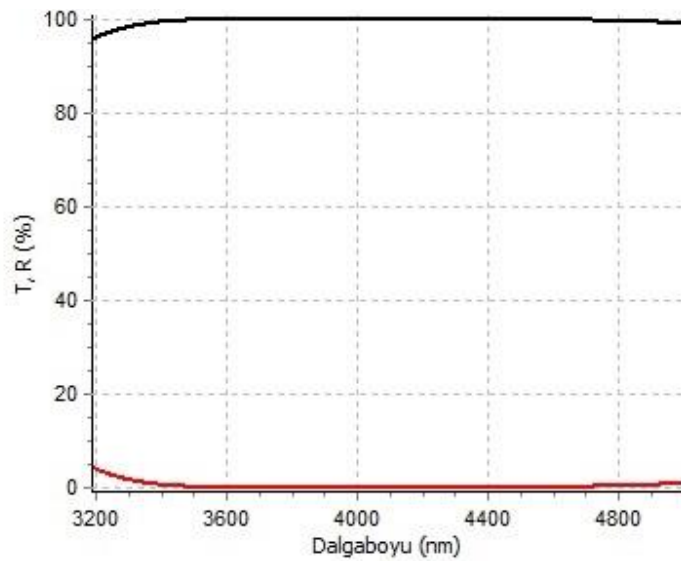
OptiRe modülü kullanılarak 1. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.



Şekil 4.62. ZnS üzeri ARC katman kalınlıklarının 1. aşama kaplama hata seviyeleri

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.62’de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayıları 1. katman için - 1,1, 2. katman için 1,05, 3. katman için - 1,1 ve 4. katman için 1,11 çarpanları ile revize edilmiştir.

Güncellenen tasarım ile 2. aşama kaplama prosesi gerçekleştirildikten sonra ZnS üzeri MWIR ARC kaplamaların yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri Şekil 4.63’de gösterildiği şekilde elde edilmiştir.

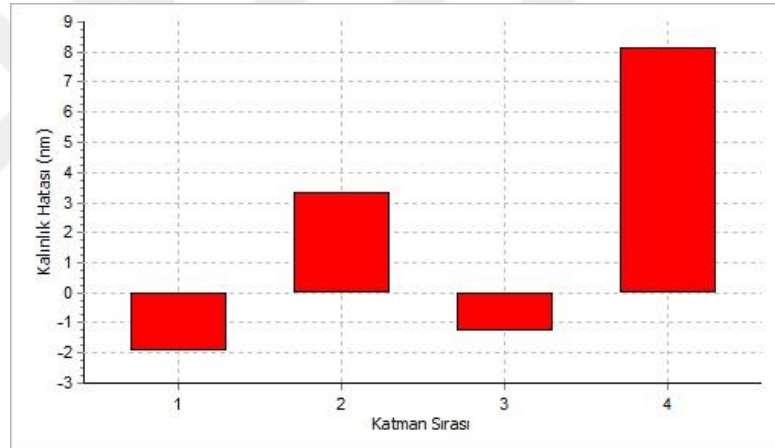


Şekil 4.63. 2. aşama ZnS üzeri ARC kaplama yansımaya (kırmızı) ve geçirgenlik (siyah) ölçümleri

Elde edilen kaplama MWIR bölgede $R=0,139$ ve $T=99,861$ ortalama yansımaya ve geçirgenlik değerlerine sahiptir.

OptiRe modülü kullanılarak 2. kaplama aşamasından sonra elde edilen ölçüm sonuçlarına göre kaplama katman karakterizasyonu tasarım verileri ile tersine çözümlenmiş katman kalınlık hataları elde edilmiştir.

Elde edilen katman kalınlık hataları Şekil 4.64'de gösterildiği şekilde olup katmanlar için kalınlık kontrol katsayılarının optimizasyonu tasarım da elde edilen R ve T değerlerine ulaşıldığı için sonuçlandırılmıştır.



Şekil 4.64. ZnS üzeri ARC katman kalınlıklarının 2. aşama kaplama hata seviyeleri

ZnS üzeri MWIR ARC kaplamalarda 2 optimizasyon sonucunda tasarımda $R=0,137$ olan ortalama yansımaya değeri $R=0,139$ ve tasarımda $T=99,863$ olan ortalama geçirgenlik değeri $T=99,861$ olarak elde edilmiştir.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

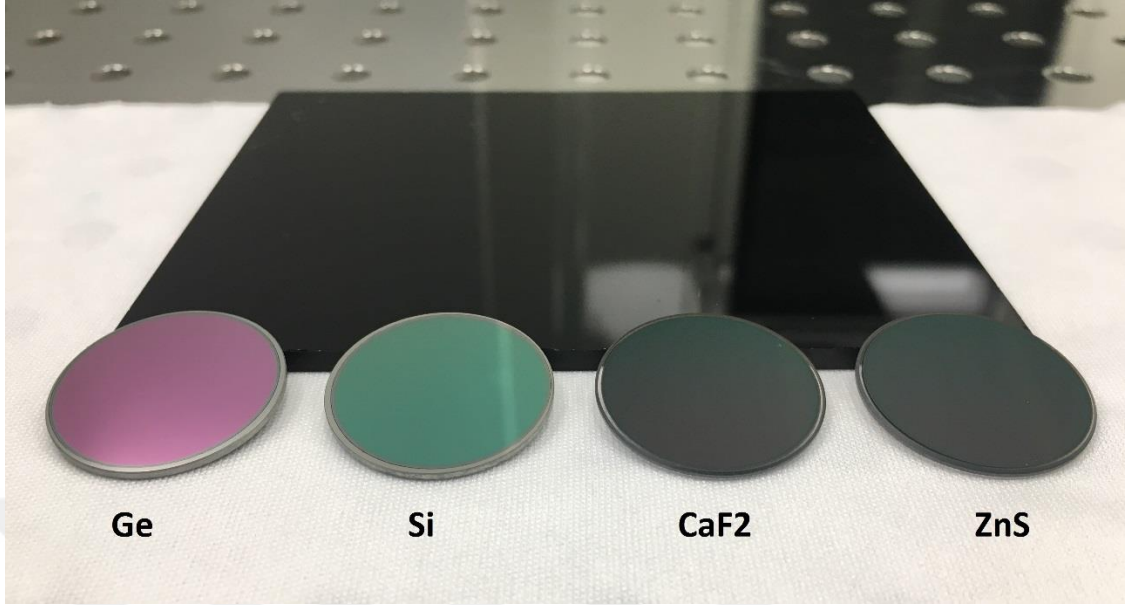
Bu çalışmada MWIR bölgede çalışan Elektro-Optik sistemlerde yer alan hassas optik bileşenler için ARC kaplamaların farklı IR malzemeler üzerine geliştirilmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmaların ilk aşamasında IR malzemelerin 3,4–4,8 μm arası yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri ile söz konusu spektral aralıkta kırılma indis dağılımları elde edilmiştir.

Daha sonra şahit numuneler için elde edilen kırılma indisleri ile kaplamalarda kullanılan nH ve nL malzemelerin yansımaya ve geçirgenlik ölçümleri kullanılarak nH ve nL malzemeler için 3,4–4,8 μm arası kırılma indis dağılımları modellenmiştir.

Katmanların kırılma indislerinin modellenmesinin ardından 4 farklı malzeme üzerine MWIR ARC kaplama tasarımları yapılarak aktif optimizasyon süreci ile tasarımda elde edilen spektral davranışlar elde edilinceye kadar proses optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

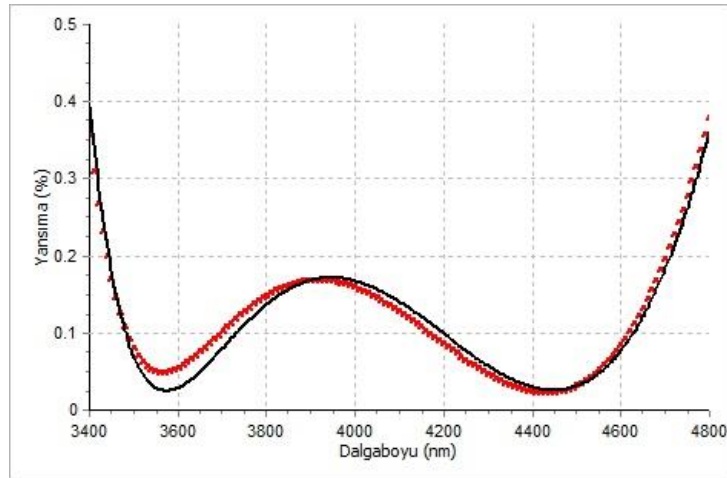
Çalışmalar sonucunda CaF_2 , Ge, Si ve ZnS malzemeler üzerine geliştirilen MWIR ARC kaplamalar Şekil 5.1’de gösterilmektedir.



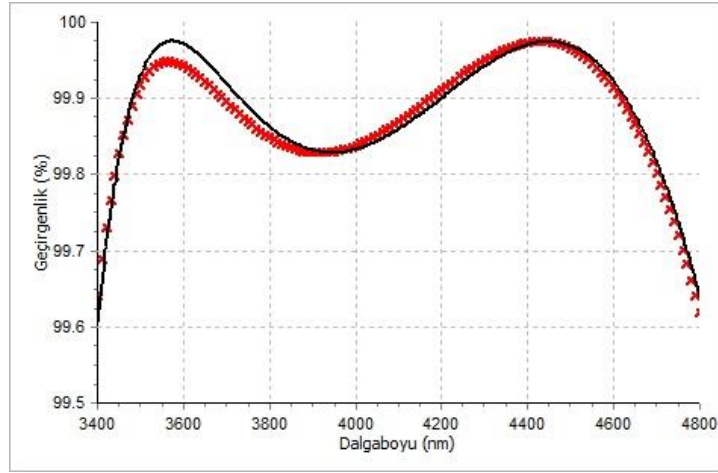
Şekil 5.1. Geliştirilen MWIR ARC kaplamalar

5.1. CaF₂ ARC Sonuçları

CaF₂ üzeri MWIR ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme çalışmaları sonucu elde edilen yansımada davranışları Şekil 5.2’de, geçirgenlik davranışları ise Şekil 5.3’de gösterilmektedir. Kaplamalar 3 aşamalı optimizasyon sonucunda Çizelge 5.1’de gösterilen spektral isterler ile elde edilmiştir.



Şekil 5.2. CaF₂ ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansımada davranışları



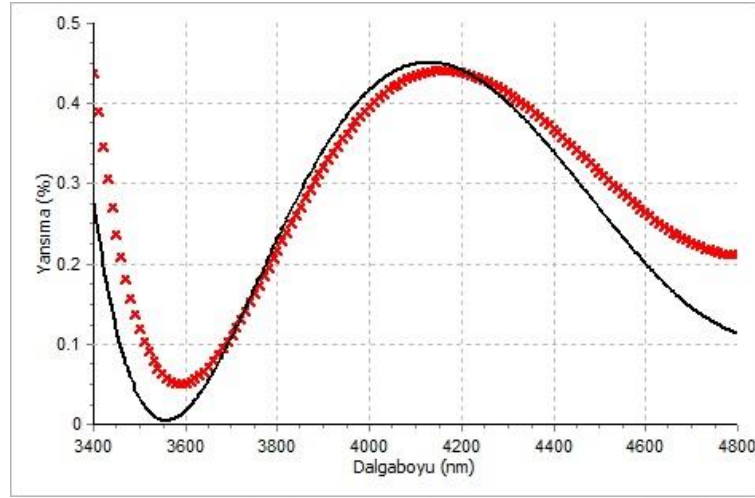
Şekil 5.3. CaF₂ ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları

Çizelge 5.1. CaF₂ ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri

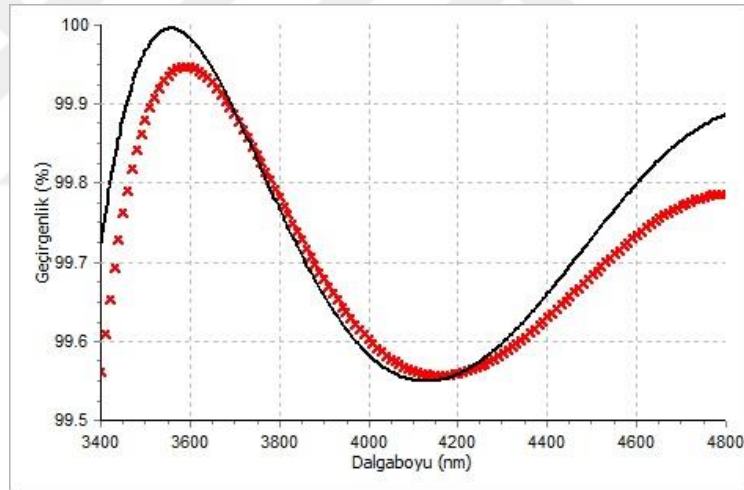
Parametre	Tasarım	Geliştirme
R (%)	0,12	0,119
T (%)	99,88	99,881

5.2. Ge ARC Sonuçları

Ge üzeri MWIR ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme çalışmaları sonucu elde edilen yansıma davranışları Şekil 5.4'de, geçirgenlik davranışları ise Şekil 5.5'de gösterilmektedir. Kaplamalar 3 aşamalı optimizasyon sonucunda Çizelge 5.2'de gösterilen spektral isterler ile elde edilmiştir.



Şekil 5.4. Ge ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansımaya davranışları



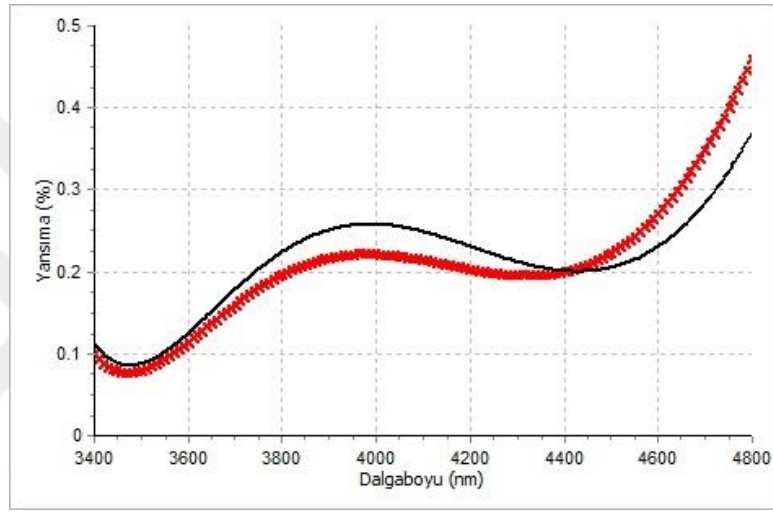
Şekil 5.5. Ge ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları

Çizelge 5.2. Ge ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri

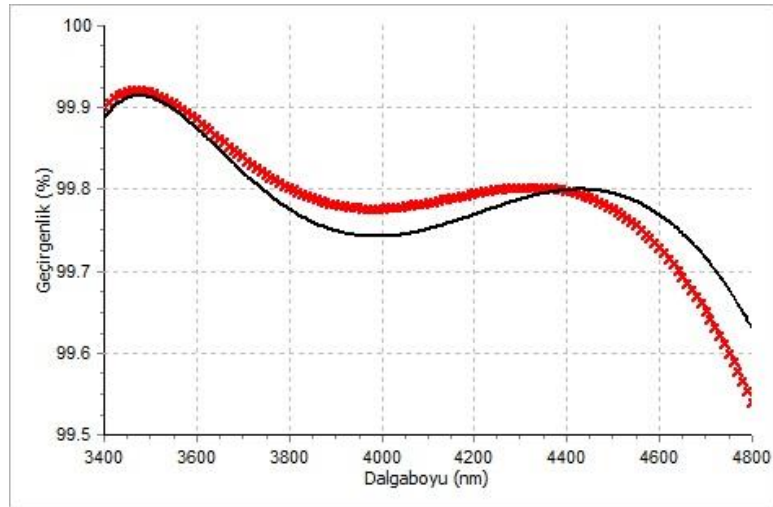
Parametre	Tasarım	Geliştirme
R (%)	0,253	0,256
T (%)	99,747	99,744

5.3. Si ARC Sonuçları

Si üzeri MWIR ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme çalışmaları sonucu elde edilen yansımada davranışları Şekil 5.6'da, geçirgenlik davranışları ise Şekil 5.7'de gösterilmektedir. Kaplamalar 4 aşamalı optimizasyon sonucunda Çizelge 5.3'de gösterilen spektral isterler ile elde edilmiştir.



Şekil 5.6. Si ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansımada davranışları



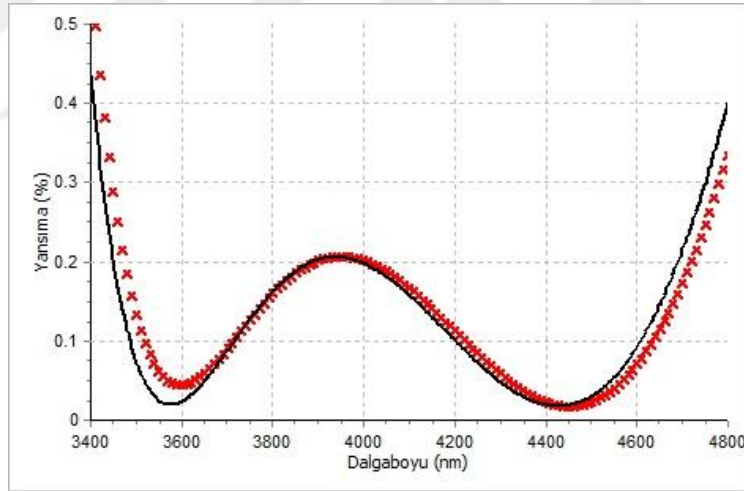
Şekil 5.7. Si ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları

Çizelge 5.3. Si ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri

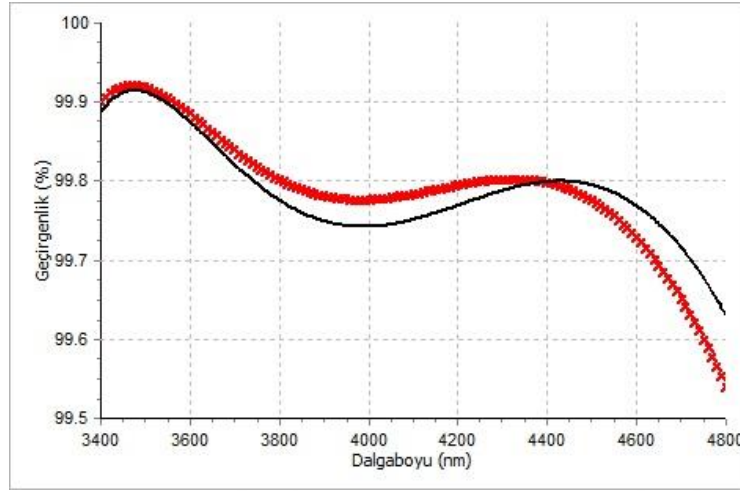
Parametre	Tasarım	Geliştirme
R (%)	0,212	0,214
T (%)	99,788	99,786

5.4. ZnS ARC Sonuçları

ZnS üzeri MWIR ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme çalışmaları sonucu elde edilen yansıma davranışları Şekil 5.8’de, geçirgenlik davranışları ise Şekil 5.9’da gösterilmektedir. Kaplamalar 2 aşamalı optimizasyon sonucunda Çizelge 5.4’de gösterilen spektral isterler ile elde edilmiştir.



Şekil 5.8. ZnS ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) yansıma davranışları



Şekil 5.9. ZnS ARC kaplamaların tasarım (kırmızı) ve geliştirilen (siyah) geçirgenlik davranışları

Çizelge 5.4. ZnS ARC kaplamaların tasarım ve geliştirme sonucu elde edilen spektral parametreleri

Parametre	Tasarım	Geliştirme
R (%)	0,137	0,139
T (%)	99,863	99,861

5.5. Sonuçların Değerlendirilmesi

Çalışmalar sonucu elde edilen MWIR ARC kaplamaların en önemli özelliği geniş bant MWIR detektörlerin çalışma aralığı olan 3,4–4,8 μm arası 1400 nm lik oldukça geniş bir spektral aralık için geliştirilmiş olmalarıdır.

Ayrıca MWIR ARC kaplamaların 4 farklı IR malzemenin tamamında ve 1400 nm lik spektral aralık boyunca $R < 0,5$ ortalama yansımaya değerine ulaşılmış olması da çalışmanın en önemli kazanımlarından bir tanesi olmuştur.

Çalışmanın en önemli sonuçlarından bir tanesi de farklı IR malzemeler üzerine geliştirilen MWIR ARC kaplamaların seri üretime aktarımı göz önüne alınarak maliyet

etkinliğini sağlamak amacıyla söz konusu spektral davranışları asgari katman sayısı ile geliştirilmiş olmasıdır.

Elde edilen MWIR ARC kaplamalar literatürde yer alan tek dalgaboyunda azami geçirgenlik sağlayan V tipi (Saadallah and Saeed 2013) ve çift bant ARC kaplamalardan (Zabeida *et al.* 2001) çok daha geniş spectral aralıkta yüksek geçirgenlik değerlerine sahiptir.

MWIR ARC kaplamaların geliştirilmesi sürecinde tasarımda yer alan katman sayısının artırılması ile çok daha düşük yansıma ve geçirgenlik değerlerine ulaşılabileceği gibi tasarım ile geliştirilen kaplamaların spektral davranışlarının benzetiminde aktif optimizasyon sayıları artırılarak iyileştirmeler elde edilebilir.

Bu durumda yüksek katman sayılarının getireceği kaplama süreci kaynaklı hata seviyeleri artacağından aktif optimizasyon sayılarında ciddi artışın meydana gelebileceği ve geliştirilecek MWIR ARC kaplamaların maliyet etkin bir bakış açısıyla geliştirilmesinin amaçlanması söz konusu aşamalarda göz önünde bulundurulması gereken temel unsurlardır.

KAYNAKLAR

- Andresen, B. F., Fulop, G. F., 2003. *Infrared Technology and Applications*. SPIE Press, USA.
- Anonymous 2019. Forecast International. <https://www.forecastinternational.com>
- Bach, H., Krause, D., 2003. *Thin Films on Glass*. Springer Science & Business Media, New York, USA.
- Baumeister, P., 2004. *Optical Coating Technology*. SPIE Press, USA.
- Bely, P., 2006. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. Springer Science & Business, New York, USA.
- Belyaev, B. A., Tyurnev, V. V., Shabanov, V. F., 2014. Design of optical bandpass filters based on a two-material multilayer structure. *Optics Letters*, 39:12, 3512-3515.
- Bhatt, M., Nautiyal, B. B., Bandyopadhyay, P. K., 2010. High efficiency antireflection coating in MWIR region (3.6–4.9 μm) simultaneously effective for Germanium and Silicon optics. *Infrared Physics & Technology*, 53: 1, 33-36.
- Briers, J. D., Interferometric testing of optical systems and components: a review. *Optics and Laser Technology*, 4:1, 28-41.
- Brown, J. G., 2013. *X-Rays and Their Applications*, Springer, New York, USA.
- Chiao, S. C., Zhou, J. L., Macleod, H. A., 1993. Optimized design of an antireflection coating for textured silicon solar cells. *Applied Optics*, 32: 28, 5557-5560.
- Cho, H. J., Lee, J., C., Lee, S. H., 2012. Design and Development of an Ultra-low Optical Loss Mirror Coating for Zerodur Substrate. *Journal of the Optical Society of Korea*, 16:1, 80-84.
- Czajkowski, A., 2010. Optical coating technology and applications: past and present to future. *Photonik International*, 2010/1.
- Debenham, M., 1984. Refractive indices of zinc sulfide in the 0.405-13- μm wavelength range. *Applied Optics*, 23, 2238-2239.
- Dobrowolski, J. A., Kemp, R. A., 1990. *Applied Optics*, 29, 2876-2893.
- Driggers, R. G., Friedman, M. H., Nichols, J., 2012. *Introduction to Infrared and Electro-optical Systems*. Artech House, Norwood, Massachusetts, USA.
- Duma, V. F., Nicolov, M., 2009. Neutral density filters with Risley prisms: analysis and design. *Applied Optics*, 48:14, 2678-2685.
- Edwards, D. F., Ochoa, E., 1980. Infrared Refractive Indexes of Silicon. *Appl. Opt.*, 19, 4130-4131.
- Elder, T., Strong, J., 1953. The infrared transmission of atmospheric windows, *Journal of the Franklin Institute*, 255/3: 189-208.
- Elyutin, V. V., Butt, M. A., Khonina, S. N., 2017. Modeling of a Cold mirror based on $\text{TiO}_2/\text{MgF}_2$ and $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ at 45° angle of incidence. *Information Technology and Nanotechnology*.
- Fujiwara, H., 2007. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Gaussorgues, G., 1994. *Infrared Thermography*, Chapman & Hall, London, UK.
- Gopal, B., 2006. *Physics and radiobiology of nuclear medicine*. 3rd ed., Springer, New York, USA

- Griffiths, D. J., 1998. *Introduction to Electrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Haitel, G., 2014. *Origins and Grand Finale*, 83 p. iUniverse, Indiana, USA
- He, H. B., Zhao, Y. A., Zhang D. P., Gao, W. D., Zhan, M. Q., Fan, Z. X., Shao, J. D., 2004. Investigation of laser induced damage of dielectric optical coatings. Fifth International Conference on Thin Film Physics and Applications, Proc. of SPIE Vol. 5774.
- Hermann, B., 2008. Johann Wilhelm Ritter: the Founder of Scientific Electrochemistry. Review of Polarography, 54:99-103. "Herschel Discovers Infrared Light", Cool Cosmos Classroom activities. Orjinalden alıntı, <http://coolcosmos.ipac.caltech.edu/> (25.02.2012)
- Hobbs, P. C. D., 2011. *Building Electro-Optical Systems: Making It all Work*. John Wiley & Sons, New Jersey, USA.
- Icenogle, H. W., Platt, B. C., Wolfe, W. L., 1976. Refractive indexes and temperature coefficients of germanium and silicon. *Applied Optics*, 15, 2348-2351.
- Kaiser, N., Pulker, H. K., 2013. *Optical Interference Coatings*. Springer, New York, USA.
- Karp, S., Stotts, L. B., 2013. *Fundamentals of Electro-Optic Systems Design: Communications, Lidar, and Imaging*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Kim, S. K., Lee, S., W., Hwang, C., S., Min, Y., 2006. Low Temperature (<100°C) Deposition of Aluminum Oxide Thin Films by ALD with O₃ as Oxidant. *Journal of the Electrochemical Society*, 153(5).
- Klocek, P., 1991. *Handbook of Infrared Optical Materials*. CRC Press, Florida, USA.
- Kumar, A., Dangi, V., 2016. Electromagnetic Spectrum and Its Impact on Human Life. *International Journal of All Research Education and Scientific Methods*. Volume 4, Issue 8.
- Li, H. H., 1980. Refractive index of alkaline earth halides and its wavelength and temperature derivatives. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 9, 161-289.
- Li, H. H., 1993. Refractive index of silicon and germanium and its wavelength and temperature derivatives. *J. Phys. Chem., Ref. Data* 9, 561-658.
- Lukes, F., 1960. The temperature dependence of the refractive index of germanium. *Czech, J. Phys.*, 10(10), 742-8.
- Macleod, H. A., 2017. *Thin-Film Optical Filters*. CRC Press, Florida, USA.
- Mahajan, V. N., 1998. *Optical Imaging and Aberrations: Ray geometrical optics*, 141 p. SPIE Press, USA.
- Malitson, I. H., 1963. A redetermination of some optical properties of calcium fluoride. *Applied Optics*, 2, 1103-1107.
- Mattox, D. M., 2004. *The Foundations of Vacuum Coating Technology*. Springer Science & Business Media, New York, USA.
- Moore, E., 2016. *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR): Methods, Analysis and Research Insights*. Nova Science Publishers, New York, USA.
- Naselsky, P. D., Novikov, D. I., Novikov, I. D., 2006. *The Physics of the Cosmic Microwave Background*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Piegari, A., Flory, F., 2013. *Optical Thin Films and Coatings: From Materials to Applications*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

- Pulker, H. K., Schmidt, H., Aegerter, M. A., 1999. *Coatings on Glass*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands.
- Querry, M. R., 1987. Optical constants of minerals and other materials from the millimeter to the ultraviolet. Contractor Report CRDEC-CR-88009.
- Rahmlow, T. D., Lazo-Wasem, J. E., Wilkinson, S., Tinker, F., 2008. Dual band antireflection coatings for the infrared. *Infrared Technology and Applications XXXIV*, Vol 6940, 69400T-2.
- Raut, H. K., Ganesh, V. A., Nairb, A. S., Ramakrishna, S., 2011. Anti-reflective coatings: A critical, in-depth review. *Energy Environ. Sci.*, 4, 3779.
- Razskazovskaya, T., Luu T., Trubetskov, M., Goulielmakis, E., Pervak, V., 2015. Nonlinear absorbance in dielectric multilayers. *Optica* 2, 803.
- Ristau, D., 2014. *Laser-Induced Damage in Optical Materials*. CRC Press, Florida, USA.
- Rizea, A., 2011. Design technique for all-dielectric non-polarizing beam splitter plate. *Opto-Electronics Review*, 20:1, 96-99.
- Robinson, M. R., 2013. *Night Vision: Exploring the Infrared Universe*, 23 p. Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Rogalski, A., 2003. Infrared detectors: status and trends. *Progress in Quantum Electronics*, 27: 59-210.
- Ryzhii, V., 2003. *Intersubband Infrared Photodetectors*. World Scientific, Singapore.
- Saadallah, F. H., Saeed, N. T., 2013. Design of an Antireflection Coating for Mid-wave Infrared Regions in the Range (3000-5000) nm. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management*, 2:11.
- Salzburg, C. D., Villa, J. J., 1958. Index of refraction of germanium. *J. Opt. Soc. Am.*, 48(8), 579.
- Schlessinger, M., 2018. *Infrared Technology Fundamentals*. Routledge, Abingdon on Thames, UK.
- Schulz, U., 2015. Broadband antireflection coatings for optical lenses. *SPIE Newsroom*, 10.1117/2.1201509.006093.
- Shakouri, R., 2014. The Best Balance of Oxygen Flow and Deposition Rate to Give Little Absorption of Aluminum Oxide Film Deposited by Electron Beam Evaporation Technique. *Applied Physics Research*, Vol. 7, No. 3.
- Simmons, J., Potter, K. S., 2000. *Optical Materials*. Academic Press. Massachusetts, USA.
- Singh, R. B., 2008. *Introduction to Modern Physics*. New Age International, New Delhi, India.
- Stenzel, O., 2014. *Optical Coatings: Material Aspects in Theory and Practice*. Springer Science & Business, New York, USA.
- Thelen, A., 1989. *Design of Optical Interference Coatings*. McGraw-Hill, New York, USA.
- Tikhonravov, A. V., Trubetskov, M.K., 1995. *OSA Technical Digest Series*, 17, 75-77.
- Tracton, A. A., 2005. *Coatings Technology Handbook*. CRC Press, Florida, USA.
- Tüzemen, S., Tekmen, S., 2011. *Yarıiletken Devre Elemanları Fiziği*. Nobel Yayın Dağıtım, İstanbul, Türkiye.
- Williamson, R. 2011. *Field Guide to Optical Fabrication*. SPIE Press, USA.
- Yoder, P. R., 2008. *Mounting Optics in Optical Instruments*, 156 p. SPIE Press, USA.

- Zabeida, O., Amassian, A., Larouche, S., Lavigne, C., Klemberg-Sapieha, J. E., Martinu, L., 2001. Plasma deposition of anti-reflective coatings on spherical lenses. Optical Society of America, OIC, WA7-1.
- Zhu, Z., Sippola, P., Lipsanen, H., Savin, H., Merdes, S., 2018. Influence of plasma parameters on the properties of ultrathin Al_2O_3 films prepared by plasma enhanced atomic layer deposition below 100 °C for moisture barrier applications. Japanese Journal of Applied Physics, 57, 125502.



ÖZGEÇMİŞ

1986 yılında Erzurum'da doğan Adem YENİSOY ilk, orta ve lise öğrenimini Erzurum'da tamamladı. 2004 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik bölümünü kazandı. 2010 yılında aynı bölümden mezun oldu. 2010 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Anabilim Dalı Katıhal Fiziği Bilim Dalı'nda doktora başladı. 2012 - 2014 yıllarında TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Malzeme Enstitüsü Fotonik Teknolojiler Grubunda Araştırmacı olarak yeni nesil fotovoltaik hücrelerin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yaptı. 2016 yılında TÜBİTAK Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsünde Uzman Araştırmacı olarak çalışmaya başladı. Hali hazırda aynı kurumda çalışmalarını sürdüren Adem YENİSOY; sivil, askeri ve uzay uygulamaları için Türkiye'nin ilk büyük çaplı hassas optik geliştirme altyapısı olan Optik Sistemler Araştırma Laboratuvarı (OPMER) ve kızıl ötesi bölgede çalışan hassas optiklerin geliştirilmesini amaçlayan Hassas Optik projelerinin yöneticiliklerini yapmaktadır.