

**SiO₂ VE ZrO₂ İNCE FİMLERİN HAZIRLANMASI VE OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

**PREPARATION OF SiO₂ AND ZrO₂ THIN FILMS AND
INVESTIGATION OF THEIR OPTICAL PROPERTIES**

HAKAN ÇALIŞKAN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

FİZİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2009

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI** 'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
(Prof. Dr. Süleyman ÖZÇELİK)

Üye (Danışman) :.....
(Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY)

Üye :.....
(Prof. Dr. Aynur ERAY)

Üye :.....
(Doç. Dr. Şadan ÖZCAN)

Üye :.....
(Yrd. Doç. Dr. Özlem DUYAR)

ONAY

Bu tez/...../..... tarihinde Enstitü Yönetim Kurulunca kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Erdem YAZGAN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

SiO₂ VE ZrO₂ İNCE FİMLERİN HAZIRLANMASI VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Hakan Çalışkan

ÖZ

Günümüz yüksek teknoloji uygulamalarında, özellikle cam ve diğer optik malzemeler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alttaşı malzemeleri sadece kendi optik özellikleri ile doğrudan sistemlerde kullanılmamaktadır. Çünkü kaplanmamış optik malzemeler istenen optik cevabı tek başına verememektedir. Elektromanyetik spektrumun çalışılan bölgesinde istenilen optik özelliklerin sağlanması için bu alttaşlar üzerine tek katmanlı veya çok katmanlı optik ince filmlerin kaplanması gerekmektedir. Böylece alttaşların optik geçirgenliği (T) ve optik yansıtması (R) elektromanyetik spektrumun istenilen aralığında çeşitli optik tasarımlarla artırılabilir veya azaltılabilir. Belirlenen optik tasarımın elde edilmesinde en önemli unsurlar alttaşın ve kaplama malzemesinin optik özellikleridir. Bu tez çalışmasında tek katmanlı SiO₂, ZrO₂ ve TiO₂ ince filmlerin optik özelliklerinin çok katmanlı ince film tasarımlarına olan etkileri detaylı olarak incelenmiştir.

Tek katmanlı SiO₂, ZrO₂ ve TiO₂ ince filmleri, RF/DC magnetron kopartma sistemi kullanılarak cam ve silisyum alttaşlar üzerine farklı deney koşullarında hazırlanmıştır. Uygulanan RF gücü, gaz konsantrasyonu ve kaplama basıncı gibi deneysel parametrelerin filmin optik davranışına etkileri incelenmiş ve kaliteli film hazırlamak için deneysel koşullar belirlenmiştir. Hazırlanan tek katmanlı ince filmlerin optik geçirgenliği ve optik yansıtması eş zamanlı olarak s ve p polarizasyonu ile spektrofotometrede ölçülmüş, Cauchy modeli kullanılarak kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) dalgaboyuna bağlı olarak elde edilmiştir.

Çok katmanlı ince film çalışmalarında, optik ince filmler için Matris teoremi kullanılarak, MATLAB programında özel olarak optik tasarım programı yazılmıştır. SiO₂ ve TiO₂ ince filmlerinin sıralı katmanları ile elektromagnetik spektrumun görünür bölgesinde 4, 6 ve 12 katmanlı dielektrik aynalar, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde 4 katmanlı yansıtmasız filtreler tasarlanmıştır. Tasarlanan dielektrik aynalar ve yansıtmasız filtreler iki kaynaklı RF/DC magnetron kopartma

sisteminde hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin dalgaboyuna bağlı deneysel ve kuramsal optik geçirgenlik ve optik yansıtma eğrileri karşılaştırılmış ve uyumlu oldukları gözlenmiştir. Elektromanyetik spektrumun görünür (400-650 nm) bölgesinde %99.3 yansıtan, tek yüzü kaplanmış %97.7 yansıtmayan ve iki yüzü kaplanmış %99.7 yansıtmayan; yakın kızılötesi (650-1100 nm) bölgesinde tek yüzü kaplanmış %97 yansıtmayan ve iki yüzü kaplanmış %99 yansıtmayan endüstriyel kalitede örnekler hazırlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: SiO₂, ZrO₂, TiO₂, Optik ince filmler, Optik filtre tasarımı, Dielektrik ayna, Yansıtmasız optik filtre.

Danışman: Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY, Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

PREPARATION OF SiO₂ AND ZrO₂ THIN FILMS AND INVESTIGATION OF THEIR OPTICAL PROPERTIES

Hakan Çalışkan

ABSTRACT

Today's in high-technology applications, glass and other optical materials are usually used in the systems which interact with light. These substrate materials with only their optical properties are not used directly in systems. Because uncoated substrates don't give desired optical answer. In order to providing desired optical features on studying range of the electromagnetic spectrum, single layer or multi layer optical thin films should be coated on these substrates. Thus, optical transmission (T) and optical reflection (R) of substrates on the desired range of the electromagnetic spectrum can be increased or decreased by using different optical designs. The most important factors in identified optical design are optical properties of substrate and coating material. In this thesis study, effects of optical properties of single layer SiO₂, ZrO₂ and TiO₂ thin films to multi layer optical designs were investigated in detail.

Single layer SiO₂, ZrO₂ and TiO₂ thin films were coated on glass and silicon substrates in RF/DC magnetron sputtering system. Effects of experimental parameters such as applied RF power, gas concentration and coating pressure to optical behavior of film were investigated and experimental conditions were determined for preparing high quality film. Optical transmission and optical reflection of prepared single layer thin films were measured simultaneously with s and p polarization at spectrophotometry. Using the Cauchy model, refractive index (n) and extinction coefficient (k) were obtained depending on wavelength.

Using matrix theory for optical thin films in multi layer thin film studies, optical design program was written as a special on MATLAB program. 4, 6 and 12 layer dielectric mirrors in visible region of electromagnetic spectrum and 4 layer antireflection filters in visible and near infrared region of electromagnetic spectrum were designed by sequential layers of SiO₂ and TiO₂. Designed dielectric mirrors and antireflection filters were prepared in RF/DC magnetron sputtering system

which has two source. Curves of optical transmission and optical reflection of prepared samples were compared and was observed to be compatible with each other. Industrial quality samples were prepared with %99.3 reflection, one side coated %97.7 antireflection (AR) and two side coated %99.7 antireflection in visible region of electromagnetic spectrum (400-650 nm) and with one side coated %97 antireflection and two side coated %99 antireflection in near infrared region of electromagnetic spectrum (650-1100 nm).

Keywords: SiO_2 , ZrO_2 , TiO_2 Optical thin films, Optical filter design, Dielectric mirror, Antireflection optical filter.

Advisor: Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY, Hacettepe University, Department of Physics Engineering

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam süresince çok değerli bilgi ve deneyimlerini esirgemeyen, bu çalışmaların yapılmasına olanak sağlayan ve gerekli altyapıyı kuran Sayın Hocam Prof. Dr. Hüseyin Zafer DURUSOY 'a sevgi ve saygılarımla çok teşekkür ederim.

Aynı hoşgörü ile bilgi ve deneyimlerini paylaşan Sayın Hocam Yrd. Doç. Dr. Özlem DUYAR 'a bütün yardımlarından ve desteklerinden dolayı çok teşekkür ederim.

Tez çalışmasında ortak çalışma imkanı bulduğum çalışma arkadaşım Ayşe Begüm ARIĞ 'a teşekkür ederim.

Manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli arkadaşlarım Sayın Canan DAĞDEVİREN ve Sayın Ahmet GÜVEN 'e teşekkür ederim.

Çalışmalarım süresince dolaylı veya doğrudan katkısı olan tüm Fizik Mühendisliği Bölümü personeline teşekkür ederim.

Bu çalışmaya SANTEZ projesi kapsamında destek veren TÜBİTAK 'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca hedeflerime ulaşmamı sağlayan ve bu konuda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen AİLEME sonsuz saygı ve sevgilerimle çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER.....	3
2.1. İnce Film Teknolojisi.....	3
2.1.1. İnce film nedir?.....	3
2.2. Vakum Bilimi	3
2.3. Pompalama Sistemleri	6
2.3.1. Mekanik pompa.....	6
2.3.2. Difüzyon pompası	7
2.4. İnce Film Kaplama Teknikleri	8
2.4.1. Fiziksel kopartma yöntemi	8
2.4.1.1. Kopartma (sputtering) olayı.....	8
2.4.1.2. Plazma oluşumu	11
2.4.1.3. Doğru akım (DC) kopartma.....	12
2.4.1.4. Radyo frekanslı (RF) kopartma.....	13
2.4.1.5. Magnetron kopartma.....	14
2.4.1.6. Yüzeyde iyon etkileşimi	16
2.5. Katıların Optik Özellikleri	17
2.5.1. Katılarda klasik yayılma ve soğurma.....	21
2.5.1.1. Atomik osilatörler	22
2.5.1.2. Titreşimsel osilatörler	24
2.5.1.3. Serbest elektron osilatörleri	25
2.5.2. Dispersiyon	27
2.5.3. Optik modeller.....	28
2.5.3.1. Cauchy modeli	29

2.5.3.2. Sellmeier modeli	29
2.6. Optik Kaplama Malzemeleri	30
2.6.1. Camlar	30
2.6.2. Silisyum (Si)	32
2.6.3. Silisyumdioksit (SiO ₂)	33
2.6.4. Zirkonyumdioksit (ZrO ₂)	33
2.6.5. Titanyumdioksit (TiO ₂)	33
2.7. İnce Filmlerde Matris Kuramı	34
3. OPTİK TASARIM ÇALIŞMALARI	42
3.1. Dielektrik Ayna Tasarımları	42
3.2. Yansıtmasız Filtre Tasarımları	48
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	52
4.1. Örnek Hazırlama Düzeneği	52
4.1.1. RF/DC magnetron kopartma sistemi	52
4.1.2. Sistemin çalıştırılması	54
4.1.3. UV-VIS-NIR spektrofotometresi	58
4.2. Tek Katmanlı ve Çok Katmanlı İnce Film Çalışmaları	61
4.2.1. Tek katmanlı ince film çalışmaları	62
4.2.2. Çok katmanlı ince film çalışmaları.....	74
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	84
KAYNAKLAR DİZİNİ	86
ÖZGEÇMİŞ	89

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$\text{\AA}$	: Angstrom (10^{-10} m)
nm	: Nanometre (10^{-9} m)
μm	: Mikrometre (10^{-6} m)
THz	: Tera Hertz (10^{12} Hz)
Ar	: Argon
O ₂	: Oksijen
B	: Manyetik Alan
E	: Elektrik Alan
λ	: Dalgaboyu
v	: Dalga Hızı
$\vec{S}$	: Poynting Vektörü
δ	: Faz Farkı
c	: Işığın Boşluktaki Yayılma Hızı (2.99792×10^8 m/s)
ϵ_0	: Boşluğun Elektrik Geçirgenliği (8.8542×10^{-12} C ² /N.m ²)
μ_0	: Boşluğun Manyetik Geçirgenliği ($4\pi \times 10^{-7}$ N/A ²)
m_0	: Elektron Kütlesi (9.10953×10^{-31} kg)
e	: Temel Elektriksel Yük (1.60219×10^{-19} C)
h	: Planck Sabiti (6.62618×10^{-34} J.s)
n_H	: Yüksek Kırma İndisi
n_L	: Düşük Kırma İndisi
n_s	: Alttaş Kırma İndisi
n_0	: Havanın Kırma İndisi
$\tilde{n}$	: Kompleks Kırma İndisi
n	: Gerçek Kırma İndisi
ϵ_r	: Bağlı Dielektrik Sabiti

ϵ_1	: Bağıl Dielektrik Sabitinin Gerçek Bileşeni
ϵ_2	: Bağıl Dielektrik Sabitinin Sanal Bileşeni
p	: P Polarizasyonu
s	: S Polarizasyonu
M	: Transfer Matrisi
r	: Yansıma Katsayısı
t	: Geçirgenlik Katsayısı
R	: Optik Yansıtma
T	: Optik Geçirgenlik
k	: Sönüm Katsayısı
α	: Soğurma Katsayısı
K_s	: Yay Sabiti
μ	: İndirgenmiş Kütle
I	: Işık Şiddeti
ω	: Frekans
ω_0	: Rezonans Frekansı
ω_p	: Plazma Frekansı
γ	: Sönüm Hızı
χ	: Elektrik Duygunluğu
N	: Katman Sayısı
A	: Hava
S	: Cam Alttaş
H	: Yüksek Kırma İndisli İnce Film
L	: Düşük Kırma İndisli İnce Film
RF	: Radyo Frekans
DC	: Doğru Akım

SiO ₂	: Silisyumdioksit
TiO ₂	: Titanyumdioksit
ZrO ₂	: Zirkonyumdioksit
CVD	: Chemical Vapor Deposition
PVD	: Physical Vapor Deposition
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Paslanmaz çelikten yapılmış vakum kazanı.	4
Şekil 2.2. Vakum derecesini tanımlayan çeşitli kavramların ilişkileri (Roth, 1990)..	5
Şekil 2.3. Mekanik pompa çalışma prensibi (Willey, 1996).....	6
Şekil 2.4. Difüzyon pompasının çalışma prensibi.	7
Şekil 2.5. Kopartma olayının gelişimi.....	9
Şekil 2.6. DC kopartma sistemi.	12
Şekil 2.7. RF kopartma sistemi.....	14
Şekil 2.8. RF magnetron kopartma sisteminde film oluşumu.....	15
Şekil 2.9. Optik ortama gelen ışığın yansıması, yayılması ve geçmesi.	17
Şekil 2.10. Dalga hava ortamından gelerek soğurucu Film 1 ve saydam Film 2'den geçerek ilerliyor. Faz hızı ve dalgaboyu her malzemede kırma indisine bağlı olarak değişir (Film 1: $n=4$, Film 2 : $n=2$, Hava : $n=1$).	19
Şekil 2.11. Rezonansa yakın frekanslarda bir dipol osilatöründe, (a) ϵ_1 ve ϵ_2 frekansa bağlı değişimi ve (b) n ve k 'nın frekansa bağlı değişimi (Fox, 2001).	24
Şekil 2.12. Sönümsüz serbest taşıyıcı gazının frekansın fonksiyonu olarak yansıtması (Fox, 2001).....	26
Şekil 2.13. SiO ₂ camının kızılötesi bölgesinden x-ışını bölgesine kadar kırma indisinin (a) ve sönüm katsayısının (b) frekansa bağlı değişimi (Fox, 2001).	28
Şekil 2.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplanmamış mikroskop camının dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (artı çizgi) eğrileri.	31
Şekil 2.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplanmamış 1737F camının dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (artı çizgi) eğrileri.	31
Şekil 2.16. 1737F camının geniş bir spektrumda dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik eğrisi.	32
Şekil 2.17. Silisyumun spektrumdaki dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik eğrisi..	32
Şekil 2.18. Tek katmanlı filmden ışık demetinin yansıması.	35

Şekil 3.1. Referans dalgaboyu 550 nm alınarak SiO ₂ -TiO ₂ sıralı katmanlarla tasarlanmış, film kalınlıkları $\lambda/4$ olan çok katmanlı optik ince filmlerin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimleri. a. 2 Katmanlı, b. 4 Katmanlı, c. 6 Katmanlı, d. 8 Katmanlı, e. 10 Katmanlı, f. 12 Katmanlı; S: Cam Alttaş, H: TiO ₂ ($n_H=2.39$), L: SiO ₂ ($n_L=1.46$), A: Hava, N: Toplam katman sayısı.	45
Şekil 3.2. Referans dalgaboyu 550 nm alınarak SiO ₂ -ZrO ₂ sıralı katmanlarla tasarlanmış, film kalınlıkları $\lambda/4$ olan çok katmanlı optik ince filmlerin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimleri. a. 6 Katmanlı, b. 12 Katmanlı, c. 18 Katmanlı, d. 24 Katmanlı S: Cam Alttaş, H: ZrO ₂ ($n_H=2.1$), L: SiO ₂ ($n_L=1.46$), A: Hava, N: Toplam katman sayısı.	46
Şekil 3.3. a. 12 Katmanlı SiO ₂ – ZrO ₂ dielektrik aynası ve b. 12 Katmanlı SiO ₂ – TiO ₂ dielektrik aynalarının dalgaboyuna bağlı model yansıtmaları ile, normal ayna ve kaplanmamış camın dalgaboyuna bağlı optik yansıtma değerlerinin karşılaştırılması.	47
Şekil 3.4. Referans dalgaboyu 650 nm alınarak tasarlanmış yüksek kırmızı yansıtan aynanın dalgaboyuna bağlı model yansıtma eğrisi. $S/(LH)^6/A$, S: Cam alttaş, L: SiO ₂ , H: TiO ₂ , A: Hava.	48
Şekil 3.5. Referans dalgaboyu 500 nm alınarak tasarlanmış dört katmanlı yansıtmasız filtrenin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimi. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, H: TiO ₂ ($n_H=2.39$), L: SiO ₂ ($n_L=1.46$), A: Hava.	49
Şekil 3.6. Referans dalgaboyu 800 nm alınarak, farklı katman kalınlıkları ile tasarlanmış 4 katmanlı optik filtre tasarımının dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimi. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, H: TiO ₂ ($n_H=2.39$), L: SiO ₂ ($n_L=1.46$), A: Hava.....	50
Şekil 3.7. Referans dalgaboyu 1100 nm alınarak, farklı katman kalınlıklarında tasarlanmış 4 katmanlı optik filtre tasarımının dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimi. $S/(HL)^2/A$, S:Cam Alttaş, H: TiO ₂ ($n_H=2.39$), L: SiO ₂ ($n_L=1.46$), A: Hava.....	51
Şekil 4.1. İki kafalı RF/DC magnetron kopartma (sputtering) sistemi.	52
Şekil 4.2. RF/DC magnetron kopartma sisteminin şematik gösterimi.	54

Şekil 4.3. Deney sisteminde kullanılan aygıtlar.	55
Şekil 4.4. (a) Kopartma kafaları ve (b) kalınlık ölçer.	57
Şekil 4.5. Aquila nkd-8000 UV-VIS-NIR spektrofotometresi dış görünümü.	60
Şekil 4.6. Aquila nkd-8000 UV-VIS-NIR spektrofotometresi iç görünümü.	60
Şekil 4.7. Tek katmanlı SiO ₂ ince filminin 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O ₂ konsantrasyonunda RF gücüne bağlı kaplama hızı değişimi.....	62
Şekil 4.8. 50 mTorr çalışma basıncı ve 75 W RF gücünde, %6 O ₂ konsantrasyonunda (yuvarlak çizgi) ve %10 O ₂ konsantrasyonunda (üçgen çizgi) mikroskop camları üzerine hazırlanmış tek katmanlı SiO ₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.....	63
Şekil 4.9. 50 mTorr çalışma basıncında ve %6 O ₂ konsantrasyonunda, 75 W (yuvarlak çizgi), 100 W (kare çizgi), 125 W (Üçgen çizgi) güçlerinde ve aynı kalınlıklarda 1737F camı üzerine hazırlanmış tek katmanlı SiO ₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.	64
Şekil 4.10. Tek katmanlı ZrO ₂ ince filminin 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O ₂ konsantrasyonunda RF gücüne bağlı kaplama hızı değişimi.....	65
Şekil 4.11. 50 mTorr çalışma basıncı, 150 W RF gücünde %6 O ₂ konsantrasyonunda (yuvarlak çizgi) ve %10 O ₂ konsantrasyonunda (üçgen çizgi) aynı kalınlıklarda mikroskop camları üzerine hazırlanmış olan tek katmanlı ZrO ₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.....	66
Şekil 4.12. 50 mTorr çalışma basıncında ve %6 O ₂ konsantrasyonunda 100 W (üçgen çizgi) ve 150 W (yuvarlak çizgi) güçlerinde 30 dakikalık sürede mikroskop camları üzerine hazırlanmış tek katmanlı ZrO ₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.....	67
Şekil 4.13. Cam alttaş üzerinde büyütülmüş tek katmanlı ZrO ₂ ince filminin dalgaboyuna bağlı deneysel (dairesel noktalar) ve kuramsal (sürekli çizgi) optik geçirgenlik ve yansıtma eğrileri.	68

Şekil 4.14. Tek katmanlı ZrO_2 ince filmin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.	69
Şekil 4.15. ZrO_2 ince filmin $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^2$ değişimi.	70
Şekil 4.16. 1737F cam alttaşı üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı, 100 W RF gücüne %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş tek katmanlı SiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri.	71
Şekil 4.17. Tek katmanlı SiO_2 ince filminin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.	71
Şekil 4.18. 1737F cam alttaşı üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı, 150 W RF gücü ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş tek katmanlı TiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri.	72
Şekil 4.19. Tek katmanlı TiO_2 ince filminin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.	73
Şekil 4.20. 1737F camının üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş 4 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. $S/(LH)^2/A$, S: Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.	74
Şekil 4.21. 1737F camının üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş 6 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. $S/(LH)^3/A$, S: Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.	75
Şekil 4.22. 6 katmanlı dielektrik aynanın her katman kalınlığının aynı oranda artırılması ile dalgaboyuna bağlı kuramsal model yansıtmanın spektrumun görünür bölgesinden yakın kızılötesi bölgesine doğru kayması. $S/(LH)^3/A$, S: Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.	76

- Şekil 4.23. Tasarlanmış olan 12 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. $S/(LH)^6/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.....77
- Şekil 4.24. Mikroskop camı üzerine 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda büyütülmüş iki katmanlı ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri. $S/(HL)/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.78
- Şekil 4.25. 1737F camının tek yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.....80
- Şekil 4.26. 1737F camının her iki yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. $A/(LH)^2/S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.....81
- Şekil 4.27. 1737F camının tek yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve % 6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.....82

Şekil 4.28. 1737F camının her iki yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. A/(LH)²/S/(HL)²/A, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.83

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Kopartma verimi (Wasa and Hayakawa, 1992).	10
Çizelge 2.2. Kopartma eşik verileri (Wasa and Hayakawa, 1992).	11
Çizelge 3.1. N=6 Katmanlı yüksek-düşük indisli çok katmanlı filmin n_L/n_H oranına karşı optik yansıtma değeri (Pedrotti et al., 2007).	43
Çizelge 3.2. SiO ₂ ve TiO ₂ ince filmleriyle oluşturulan çok katmanlı ince filmin katman sayısı N 'e bağlı olarak optik yansıtma değeri ($n_L/n_H = 0.611$).	44

1. GİRİŞ

Optik ince filmler, uygulama açısından önemli ince film kaplama alanlarından biridir. Optik kaplamalar hemen hemen bütün optik sistemler içinde ışıkla etkileşen tüm yüzeylerde kullanılmaktadır. Geniş bant ve dar bant yansıtmasız kaplamalar, kamera lenslerinde kullanılan yansıtmasız kaplamalar, güneş hücrelerinde kullanılan yansıtmasız kaplamalar, dielektrik aynalar, soğuk ve sıcak aynalar, lazerler için tam yansıtan aynalar, bant geçiren filtreler, kısa ve uzun dalga boyu geçiren filtreler, optik telekomünikasyonda kullanılan filtreler optik kaplamaların uygulama alanları olarak verilebilir. Geniş bir kullanım alanı olan bu optik ince filmlerin geliştirilmesi ve yerel üretim açısından geniş kapsamlı çalışmalar yapılmıştır.

Tez çalışması kapsamında tek katmanlı SiO_2 , ZrO_2 ve TiO_2 ince filmler cam ve silisyum alttaşlar üzerine RF magnetron kopartma yöntemi kullanılarak, reaktif O_2 gaz konsantrasyonu, RF gücü ve kopartma basıncı değiştirilerek, farklı deney koşullarında hazırlanmıştır. Her filmin spektrumdaki optik yansıtması ve optik geçirgenliği eş zamanlı olarak s ve p polarizasyonu ile spektrofotometrede ölçülmüş, Cauchy modeli kullanılarak filmlerin dalgaboyuna bağlı kırma indisi ve sönüm katsayısı belirlenmiştir. Bu optik özellikler hazırlanan filmlerin kalitesi hakkında bilgi vermektedir. En az soğurma ile beklenen optik davranışı gösteren filmler, kaliteli film olarak nitelendirilebilir. Kaliteli filmler hazırlamada en uygun deney koşulları belirlenmiştir.

Tek katmanlı ince filmlerin katmanlı olarak alttaş üzerine kaplanmasıyla, alttaşın optik davranışı tamamen değiştirilebilir. Bu işlemi kontrollü bir şekilde yapabilmek için bir optik tasarım programına ihtiyacımız vardır. Bu kapsamda, ince filmlerde Matris teoremi kullanılarak MATLAB programında hazırlanmış olan yazılım ile elektromanyetik spektrumda istenen optik davranışı gösteren tasarımlar geliştirilmiştir. Spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde çok katmanlı dielektrik aynalar ve yansıtmasız filtreler tasarlanmıştır.

Çok katmanlı deneysel çalışmalarda da, kaliteli tek katmanlı SiO_2 ve TiO_2 ince filmleri hazırlamak için belirlenen deney koşulları kullanılmış, düşük soğurganlığa sahip ve istenen optik davranışı gösteren çok katmanlı çalışmalar yapılmıştır. SiO_2 ve TiO_2 ince filmlerin ikili katmanları ile cam ve silisyum alttaşlar üzerine kaplanmış, spektrumun görünür bölge ile yakın kızılötesi bölgesinde dielektrik aynalar ve yansıtmasız filtreler deneysel olarak hazırlanmıştır.

SiO_2 ve TiO_2 ince filmlerin ikili katmanları ile spektrumun görünür bölgesinde 4, 6 ve 12 katmanlı yüksek yansıtan dielektrik aynalar, tek ve iki yüzü kaplanmış 4 katmanlı yansıtmasız filtre; yakın kızılötesi bölgesinde tek ve iki yüzü kaplanmış 4 katmanlı yansıtmasız filtreler deneysel olarak hazırlanmıştır. Hazırlanan çok katlı ince filmlerin optik yansıtma ve optik geçirgenlikleri spektrofotometre ile ölçülmüş, kuramsal modelleri ile karşılaştırıldığında uyumlu oldukları gözlenmiştir.

2. KURAMSAL BİLGİLER

2.1. İnce Film Teknolojisi

2.1.1. İnce film nedir?

İnce filmler, atomların ya da moleküllerin, kaplanacakları yüzeye vakum ortamında tek tek dizilmesi ile hazırlanan, kalınlıkları 1 Å ile birkaç µm arasında değişen kaplamalardır. İlk olarak Bunsen ve Grove 1852 yılında vakum sistemi içinde ince metal filmler elde etmişlerdir (Wasa and Hayakawa, 1992).

Kaplama teknikleri ve kaplama koşullarındaki farklılıklar hacimli malzemelerde bulunmayan pek çok özelliği ince filmlerde ortaya çıkarmaktadır ve ince film malzemelere, hacimli malzemelere göre daha üstün özellikler kazandırmaktadır.

İnce film teknolojisinin üstünlükleri aşağıda sıralanmıştır:

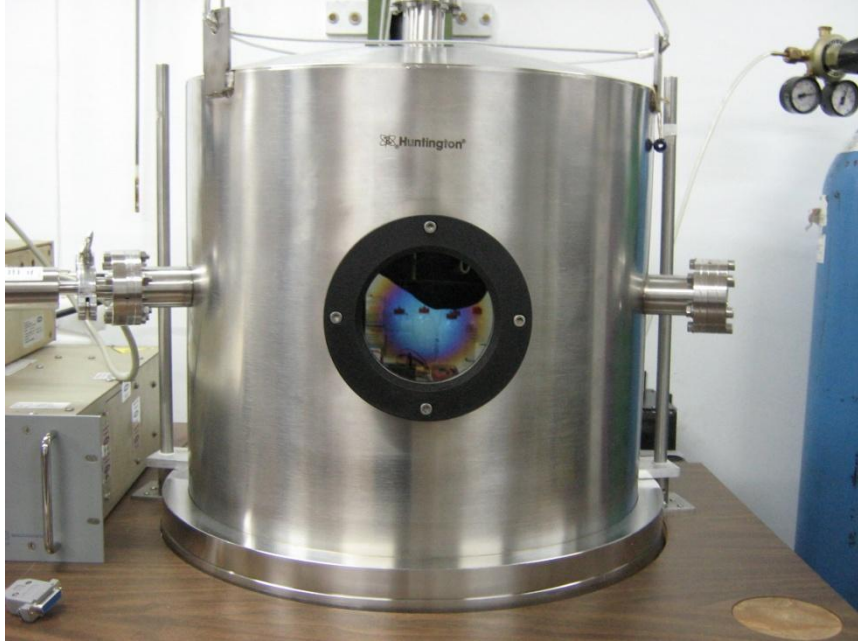
- Hacimli malzemelerde olmayan ölçüde saf örnek elde edilebilmesi,
- Atomik büyütmeye dolayısıyla filme özgü, önemli malzeme özelliklerinin tamamının elde edilebilmesi ve bu özelliklerin kontrol edilebilmesi,
- Küçük geometrilerin üç boyutta oluşturulabilmesi, örnek homojenliğinin kontrol edilebilmesi,
- Ardışık işlemlere imkan vermesi, böylece çok katmanlı ve çok değişik yapılarda kaplama elde edilebilmesi,
- Kalınlık, kristal yönelmesi ve çok katmanlı yapılardan kaynaklanan kuantum boyut etkileri ve diğer boyut etkilerinin kontrol edilebilmesi,
- Kaliteli malzemelerden tasarruf sağlanması,
- Hızlı, kolay kullanılabilir, endüstriyel ve ekonomik bir teknoloji olması.

2.2. Vakum Bilimi

Bir ortamdan gazların ne kadarını arındırmak gerektiği bu ortam içerisinde ne tür bir uygulama yapmak istediğimize bağlıdır. Eğer ince filmler hazırlanmak isteniyorsa çalışma ortamı yüksek vakum aralığında olmalıdır. Kapalı bir ortamdan gaz fazında olan tüm moleküllerin pompalanarak dışarı atılmasına vakuma alma denir. Vakum seviyesi düşük basınç değerleriyle anlatılır. Bu tür sistemlerde genellikle Pa ve Torr birimi kullanılır.

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ Torr} = 101,325 \text{ Pa} \quad , \quad 1 \text{ Torr} = 1 \text{ mm Hg} = 133 \text{ Pa}$$

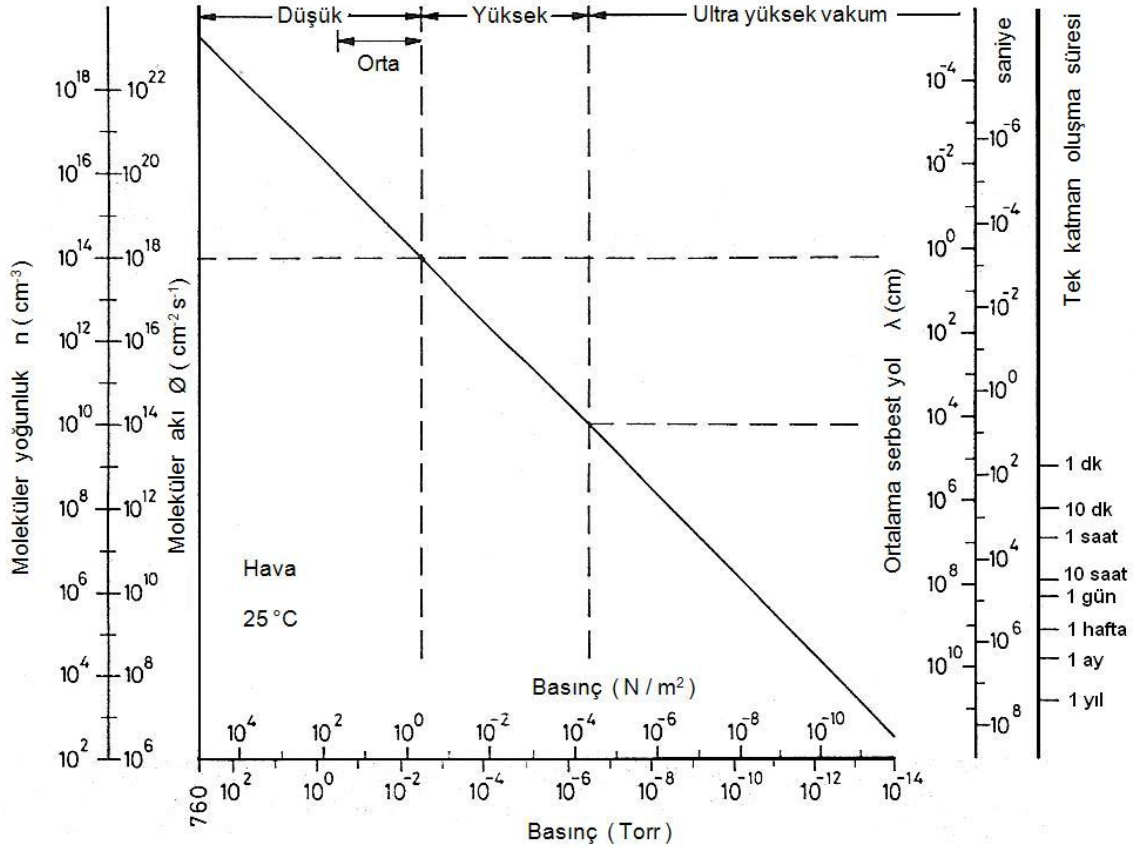
Çalışma odasının vakum seviyesi ne kadar iyi olursa yani taban basıncı ne kadar düşük olursa film de o kadar saf olur. Çalışma odasında vakum oluşturulurken en önemli parametrelerden biri de sistemin malzeme içeriğidir. Yüksek buhar basıncı malzemeler vakum sistemlerinin yapımında kullanılmazlar. Bu yüzden en çok kullanılan malzemelerden biri düşük buhar basıncına sahip olan paslanmaz çeliktir. Vakum kazanı paslanmaz çelikten yapılır (Şekil 2.1.). Sızdırmazlık elemanları olarak buhar basıncı düşük olan viton, saf metal (bakır, gümüş, altın), teflon o-ring, gasket ve contalar kullanılır.



Şekil 2.1. Paslanmaz çelikten yapılmış vakum kazanı.

Atmosferik basınçlarda, moleküller yüzeylere çarpar. Ayrıca moleküller arasında da yüzeylerde meydana gelen çarpışmalar ve etkileşmeler olmaktadır. Yüzeylerde kimyasal reaksiyonlar meydana gelmesi de olasıdır. Böylece yüzeyler çok hızlı bir şekilde kirlenmeye başlayacaktır. Uygun fiziksel ve kimyasal teknikle temizlendikten sonra yüksek vakum odasına konan herhangi bir malzeme bu basınç altında uzunca bir süre yüzeyine çarpacak parçacıkların sayısının azlığı

nedeniyle kirlenmeden kalacaktır. Vakum ortamındaki basınç seviyesine bağlı olarak, ortam içerisindeki moleküllerin ortalama serbest yolu (λ), moleküler yoğunluğu (n), moleküler akısı (Φ) ve tek katman oluşma süresi değişmektedir (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Vakum derecesini tanımlayan çeşitli kavramların ilişkileri (Roth, 1990).

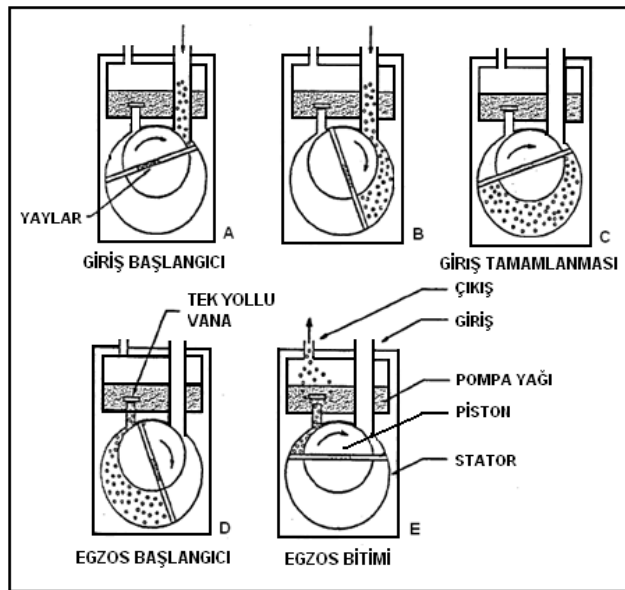
Moleküler yoğunluk (n), birim hacimdeki ortalama molekül sayısıdır. Ortalama serbest yol (λ), bir gaz içinde hareket eden bir molekülün diğer gaz molekülleri ile art arda çarpışmaları arasındaki ortalama uzaklıktır. Tek katman oluşma süresi ise tek molekül kalınlığında gaz katmanının kaplanması için geçen süredir. Bu süre ise yoğun tek katman oluşturmak için gerekli molekül sayısı (yaklaşık 8×10^{14} molekül/cm²) ve moleküler akı (Φ) (moleküllerin yüzeye çarpması) arasındaki oran ile verilir (Roth, 1990).

2.3. Pompalama Sistemleri

İyi bir ince film kaplaması için çalışma ortamının vakuma alınması şarttır. Bunun içinde sistemin pompalanması gerekmektedir. Farklı ince film büyütme teknikleri ve farklı basınç aralıklarına göre pompalar tasarlanmıştır. En yaygın olarak kullanılan pompalar; mekanik pompa, difüzyon pompası, soğurma pompası, turbo moleküler pompa, iyon pompası ve cryo pompadır. Bu pompalardan mekanik pompa ve difüzyon pompası ayrıntılı olarak incelenmiştir.

2.3.1. Mekanik pompa

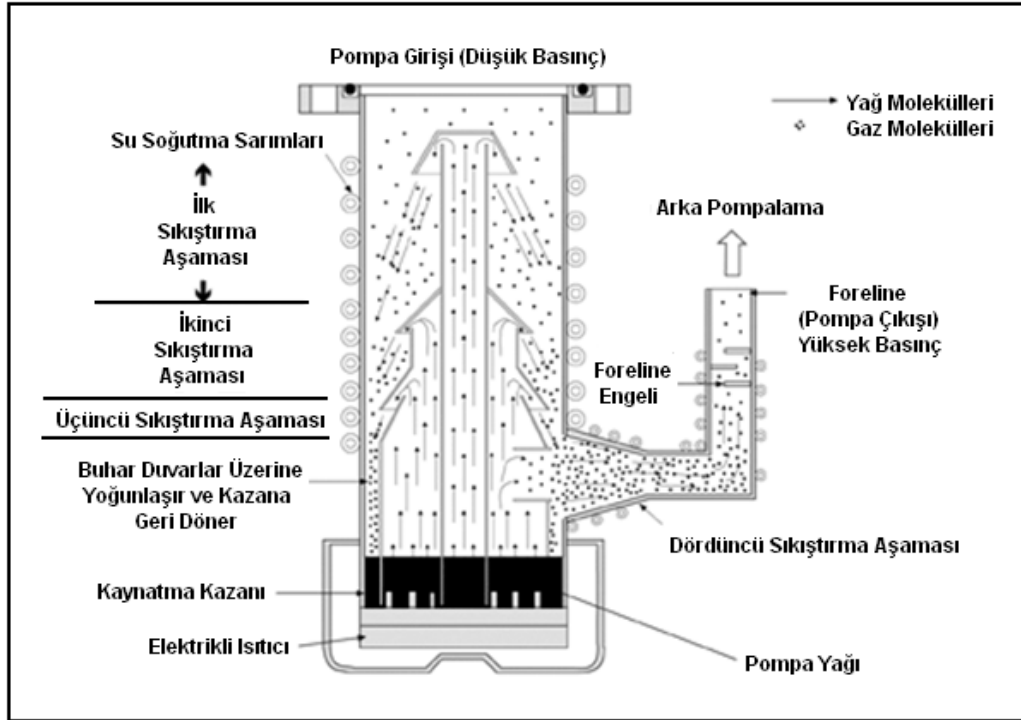
Mekanik pompa sıkıştırma-genleşme prensibine dayanarak çalışır. Çalışma aralığı $10^3 - 10^{-3}$ Torr 'dur. Bir yağ haznesinin içinde dönen bir pistondan ve pistonu döndüren bir elektrik motorundan oluşur (Şekil 2.3.). Piston döndükçe iki yanında bulunan paletler aracılığıyla çalışma odasına bağlı girişten veya difüzyon pompasının çıkışından havayı alır, yağın içinden geçirerek egzozdan dışarı atar. Bu pompa yüksek devirli çalıştığı için pompa yağı $90-100^{\circ}\text{C}$ 'ye dayanıklı özel bir yağdır. Yüksek vakum sistemlerinde mekanik pompa girişi bir hat üzerinden çalışma odasına bağlanırken bir başka hat üzerinden difüzyon pompasının çıkışına bağlıdır. Mekanik pompanın dezavantajı vakum ortamına yağ kaçırabilme olasılığının olmasıdır.



Şekil 2.3. Mekanik pompa çalışma prensibi (Willey, 1996).

2.3.2. Difüzyon pompası

Difüzyon pompasının çalışma aralığı $10^{-3} - 10^{-9}$ Torr dur. Difüzyon pompasının en önemli özelliği, mekanik bir hareketin olmamasıdır. Bu nedenle sürtünmeden kaynaklanan enerji kayıpları söz konusu değildir. Isıtılan gaz molekülleri vakum odasından çekilen gaz moleküllerine çarpar ve onları da çıkışa doğru sürükler. Difüzyon pompasının girişi 100 mTorr 'da çalışmaya açılabilir, çünkü bu seviyede oksijen gazının büyük bir bölümü mekanik pompayla pompalanmış demektir. Böylece difüzyon pompasının yağı oksitlenerek küçük parçalara ayrılmaz ve büyük moleküllü olma özelliğini yitirmez. Pompalama gücü, momentum aktarımına ve molekül kütlesine bağlıdır. Geri kaçan buharını tutmak için difüzyon pompasının çalışma odasına açılan giriş ağzına soğuk tuzak yerleştirilir. İçine sıvı azot doldurularak soğutulan soğuk tuzak geri kaçan yüksek enerjili yağ buharını üzerinde yoğunlaştırarak tutar. Aynı zamanda çalışma odasından pompalanan gaz moleküllerinin de bir kısmını tutar. Yağ buharları çatılara çarpıp aşağıya doğru düşerken difüzyon pompasının duvarlarına çarpar ve ısınmaya sebep olur, bu yüzden duvarların etrafında soğuk su dolaştırılır (Ohring, 2002) (Şekil 2.4.).



Şekil 2.4. Difüzyon pompasının çalışma prensibi.

2.4. İnce Film Kaplama Teknikleri

İnce film kaplama teknikleri, fiziksel buharlaştırma (PVD) ve kimyasal buharlaştırma (CVD) teknikleri olmak üzere iki ana başlık altında incelenir. Kaplama tekniğinin seçiminde fiziksel, kimyasal, teknolojik, teknik ve ekonomik özellikler rol oynar. Kaplama malzemesi, alttaşa uyumu, alttaş büyüklüğü ve şekli, sıcaklığa bağımlılık ve kaplama sonrası çalışma ortamı da kaplama tekniğini belirler. Fiziksel ve kimyasal buharlaştırma tekniğinin seçiminde en belirleyici faktör molekül enerjisidir. Kimyasal buharlaştırma ile kaplama 1000 °C gibi yüksek alttaş sıcaklıklarında, fiziksel buharlaştırmayla kaplama ise oda sıcaklığından 500 °C 'ye kadar olan alttaş sıcaklıklarında yapılır (Ohring, 2002).

Vakum ortamında fiziksel buharlaştırma teknikleriyle film oluşumu, sırasıyla film malzemesinin gaz fazına geçmesi, buharın kaynak ile alttaş arasındaki seyrekleştirilmiş gaz atmosferi üzerinden iletimi ve son olarak buharın alttaş üzerinde yoğunlaşması aşamalarından meydana gelir. Fiziksel buharlaştırma teknikleri aşağıdaki gibi sınıflandırılabilir:

- Isıl direnç ile buharlaştırma
- Lazer demeti ile buharlaştırma
- Elektron demeti ile buharlaştırma
- Flaş buharlaştırma
- Ark ile buharlaştırma
- Kopartma (Sputtering) tekniği ile buharlaştırma

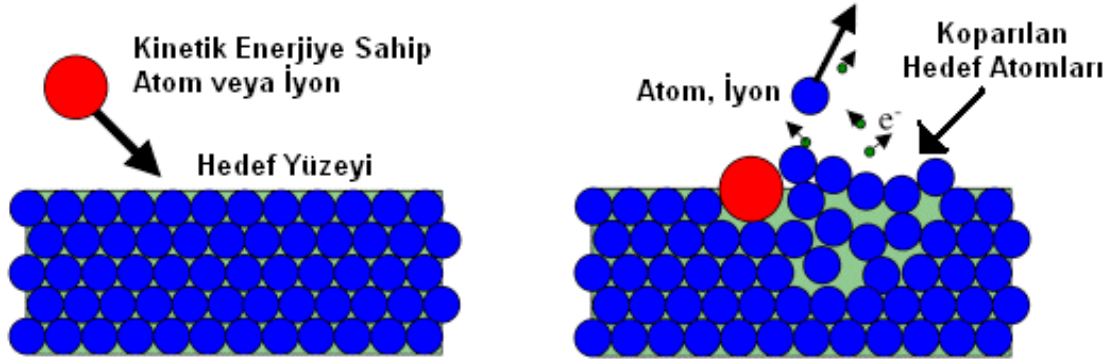
Tez çalışmasında, filmlerin hazırlanmasında fiziksel buharlaştırma tekniklerinden magnetron kopartma tekniği kullanılmıştır.

2.4.1. Fiziksel kopartma yöntemi

2.4.1.1. Kopartma (sputtering) olayı

Belirli enerjiye sahip parçacıkların bir hedef üzerine çarpması ile yüzey atomlarının ya da moleküllerinin serbest hale gelmesi olayına kopartma (sputtering) denir (Şekil 2.5.). Bombardıman pozitif iyonlarla yapılıyorsa katot koparması adını alır.

Koparılan parçacıklar yüzey kaplamak üzere anoda yerleştirilen alttaş üzerinde yoğunlaşırlar.



Şekil 2.5. Kopartma olayının gelişimi.

Kopartma olayı ilk olarak 1852 yılında Grove tarafından DC gaz yük boşalması tüpünde gözlenmiştir. Yük boşalması tüpünün katot yüzeylerinin gaz yük boşalması içinde enerjik iyonlar tarafından koparıldığını keşfetmiştir ve katot malzemeleri yük boşalması tüpünün iç duvarlarına kaplanmıştır (Wasa and Hayakawa, 1992). Malzeme işlemedeki yetersizlikler ve birçok gelişmenin bu yüzyılda geliştirilmesi gibi nedenler kopartma tekniğini yeni bir teknik olarak görmemizi sağlar. Ancak ilerleyen teknoloji ve ince film kaplama kullanım alanının gelişmesi ve değişmesi, düşük ve yüksek basınçlı kopartmayı, hem de üretim amaçlı bir kaplama tekniği haline getirmiştir.

Katot kopartmasında hedefe çarpan parçacıklardan kristal yapıya momentum aktarımı vardır. En basit durumda, momentum, iyondan direk yayınlanan atoma aktarılır. Ancak bu tür kopartma toplam kopartma miktarına çok az katkıda bulunur ya da hedef malzeme içinde daha içerilere sızabilir ve momentum bir atomdan diğer atoma aktarılır. İyonun madde içinden geçişi sırasında yeri değişen atomlar ve moleküller vurulmuş atomlar olarak adlandırılır. Bunlardan bazıları yüzeye dağıtılıp kopartılan atomları oluştururlar ve başka vurulmuş atomlar oluşturacak kadar yeterli enerjiye sahip olabilirler (Rancourt, 1987).

Kopartma işleminin etkin olabilmesi için bombardıman parçacıklarının atomik boyutlarda olması gerekmektedir. Elektron gibi parçacıklar gerekli momentumu

taşıyamayacak kadar küçük oldukları gibi, büyük parçacıklar da tek bir atom ya da molekülle etkileşim yapamayacak kadar büyük olabilirler (Ohring, 2002). Bombardıman esnasında kimyasal tepkime olmaması için asal gazlar tercih edilir. Ağır bir asal gaz yüksek bir kopartma verimine neden olur. Radon ağır, fakat radyoaktiftir. Periyodik tablo incelendiğinde asal gaz olarak, gerek düşük iyonlaşma potansiyeli, gerek ucuzluğu nedeniyle ve saf halde bulunabilirliği açısından çoğunlukla Argon gazı kullanılır. Bombardıman parçacıklarının yüklü ya da yüksüz olması aslında önemli değildir, ancak yüklü parçacıklar elektrik alan altında kolayca enerjiye hale getirilip yönlendirilebilirler, yüksüz parçacıkları hızlandırmak ve yönlendirmek kolay değildir. Bu nedenle kopartma işlemi argon iyonlarıyla yapılır.

Kopartma olayında önemli faktörlerden biri de malzemelerin kopartma verimidir. Kopartma verimi, iyon bombardımanından dolayı hedef yüzey atomlarının koparılma oranıdır ve her gelen iyon karşılık koparılan yüzey atomu sayısıdır. Kopartma verimi gelen parçacıkların enerjisi, hedef malzemeleri, gelen parçacıkların açıları ve hedef yüzeyinin kristal yapısı faktörlerinden etkilenir. Çizelge 2.1’de Si, Ti ve Zr hedef malzemelerinin farklı enerjideki Neon ve Argon iyonlarıyla bombardıman edilmesiyle elde edilecek kopartma verimi verilmektedir (Wasa and Hayakawa, 1992).

Çizelge 2.1. Kopartma verimi (Wasa and Hayakawa, 1992).

Hedef	Ne ⁺				Ar ⁺			
	100 (eV)	200 (eV)	300 (eV)	600 (eV)	100 (eV)	200 (eV)	300 (eV)	600 (eV)
Si	0.034	0.13	0.25	0.54	0.07	0.18	0.31	0.53
Ti	0.08	0.22	0.30	0.45	0.081	0.22	0.33	0.58
Zr	0.054	0.17	0.27	0.42	0.12	0.28	0.41	0.75

Hedef yüzeyine gelen iyonun hedeften atom kopartması için bir eşik enerjisi vardır. Eşik enerjisi, iyonların düşük enerji aralığında kopartma yapabilmesi için minimum gerekli enerjidir. Her hedef malzemesine ait eşik enerjisi vardır. Eşik enerjisi katot

yüzeyinin kirliliğine çok duyarlıdır. Ayrıca gelen iyonların açısı ve katot malzemesinin kristal yönelimi eşik değerlerini değiştirmektedir. Çizelge 2.2. 'de Si, Ti ve Zr hedef malzemelerinin Neon ve Argon asal gazlarındaki eşik değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kopartma eşik verileri (Wasa and Hayakawa, 1992).

Hedef	Ne	Ar
	Eşik enerjisi (eV)	
Si	-	-
Ti	22	20
Zr	23	22

Kopartma için istenen basınç ideal olarak düşük olmalıdır. Basıncın yüksek olması durumunda kopartılan atomların ortalama serbest yolu kısalmış, bu enerjilerinin azalması ve yönlerinden sapma olasılığının yüksek olması anlamına gelir. Alttaşı yüzeyine çarpan atomların enerjilerinin yüksek ve yönlerinin kontrol edilebilir olması kaplama tekniğinin bir özelliğidir ve kaplama veriminin artması demektir. Kopartma sisteminin yeterince verimli olması için çalışma odasının basıncının 1 - 100 mTorr arasında olması tercih edilir. Kopartma tekniğinin getirdiği en büyük kazanç ise, diğer yöntemlere göre daha homojen ve yüzey düzgünlüğü daha iyi kaplamalar elde edilebilmesidir. Çünkü kaplanan atomlar daha enerjiktir.

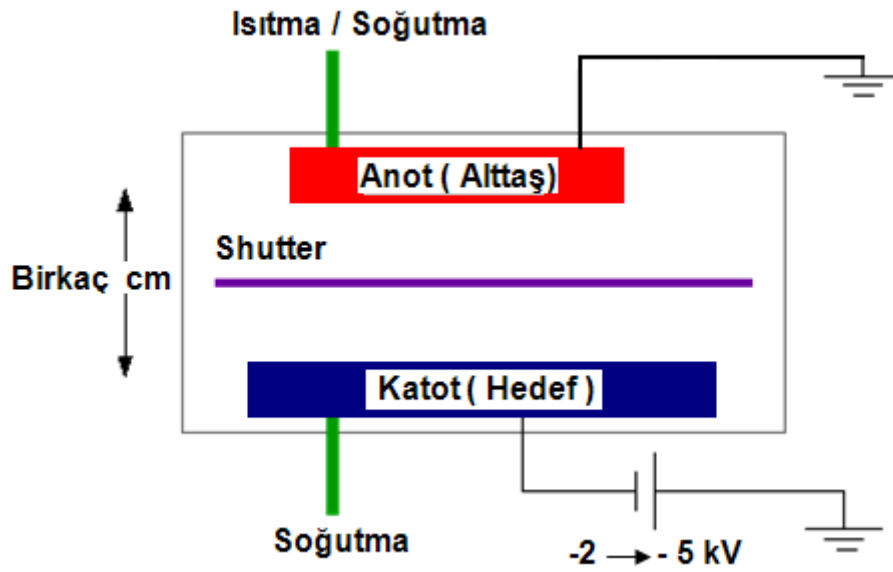
2.4.1.2. Plazma oluşumu

Plazma, bilinen tüm maddeler gibi atomlardan meydana gelir. Atomlar, bir çekirdek ve çekirdek etrafında dönen negatif (-) yüklü elektronlardan oluşur. Çekirdek ise pozitif (+) yüklü protonlar ve yüksüz nötronlardan oluşur. Bir atomda, çekirdek etrafında bulunan negatif yüklü elektronların sayısı, çekirdekte bulunan pozitif yüklü protonların sayısına eşitse, atomun elektriksel olarak yüksüz olduğu anlamına gelir. Böyle yüksüz atomlardan oluşan bir gaz, yeterince ısıtıldığında veya radyasyona maruz kaldığında, enerjilerin şiddetlerine bağlı olarak, sahip olduğu elektronları en dış yörüngesinden itibaren kaybetmeye başlar. En dış yörüngedeki elektron atoma bağlanma gücü en zayıf olandır. Elektron kaybeden

atomda, pozitif yüklerin sayısı, negatif yüklere göre daha fazla kaldığından bu atoma 'iyonize olmuş atom' ya da 'pozitif iyon' adı verilir. Böylece ortamda pozitif iyonlar ve negatif yüklü elektronlar serbest halde bulunur. Bu nedenle plazma 'iyonlaşmış gaz' olarak da bilinir.

2.4.1.3. Doğru akım (DC) kopartma

Kopartma ile kaplamada en basit yöntem, alttaşı-hedef ikilisini anot-katot gibi hazırlayıp doğru akım sürmektir. Doğru akım kopartma sistemi, bir çift düzlemsel metal elektrotlardan oluşur (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. DC kopartma sistemi.

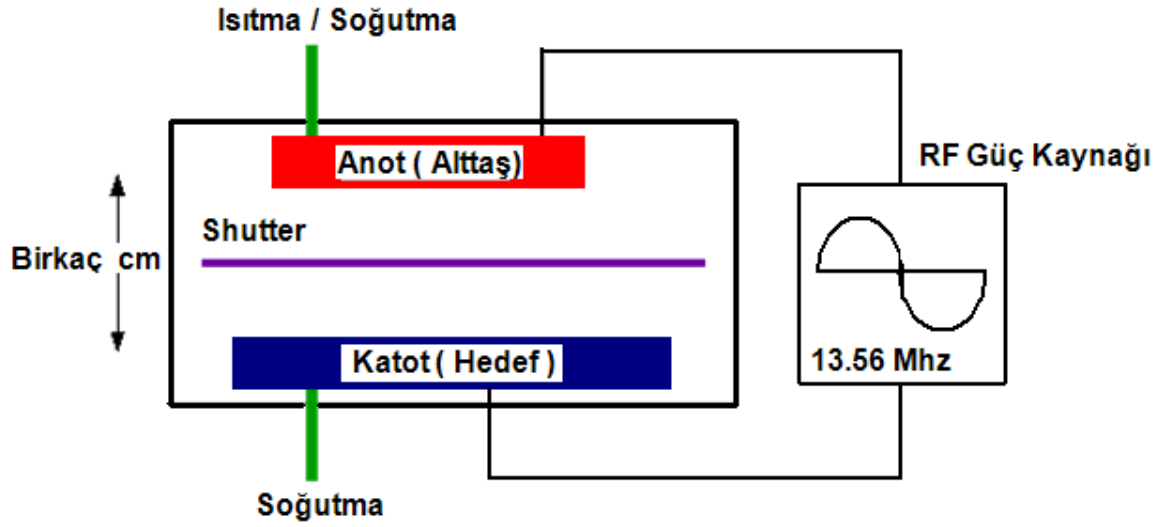
Elektrotlardan biri katot, diğeri ise anot olarak düzenlenmiştir. Katodun üst yüzeyine hedef malzeme yerleştirilirken, alt yüzeyine iyon bombardımanı sonucunda oluşan ısınmayı engellemek için genellikle su soğutması uygulanır. Katoda negatif yüksek DC voltaj uygulanır. Hedef genellikle metal gibi iletken malzemelerdir. Alttaşlar anot üzerine yerleştirilir. Genellikle çalışma bölgesi özel bir basınç değerine kadar (~ 0.01 Torr), Argon gazı ile doldurulur. Anot veya alttaş topraklanabilir, pozitif veya negatif olarak 'bias' yapılabilir, ısıtılabilir, soğutulabilir veya bu işlemlerin kombinasyonları şeklinde uygulanabilir. Katoda negatif kV'luk DC voltaj uygulandığında, elektrotlar arasında oluşan elektrik alanla ortamda bulunan elektronlar ivmelenirler ve Argon atomlarıyla çarpışarak, Argon iyonları ve

daha çok elektron oluşmasına neden olur. Böylece ortamda bulunan elektronlara, iyonlaşma sonucu oluşan ikincil elektronlar da eşlik eder. Bu Argon iyonlarının artması, verimin artması anlamına gelir. Elektrik alan, aynı zamanda Argon iyonlarını katot hedefe doğru yönlendirir. Hedef hızlandırılmış Argon iyonlarıyla bombardıman edilir ve hedef atomlarının bir kısmını yüzeyden kopartırlar. Hedeften kopartılan atomlar çarpışmalar sonucu gelişigüzel yönlerde hareket ederek, anot üzerindeki alttaşlar üzerinde yoğunlaşarak film oluştururlar. Bu teknikte, koparılan atom ya da molekülleri maksimum oranda alttaşa biriktirmek ve yüksek homojenlik sağlanması için alttaş-hedef ikilisinin eksenlerinin paralel, daha iyi kristalleşme sağlanması için ise birbirine dik olması gerekir.

Alttaş üzerindeki ince film kaplama oranı, hedeften kopartılan parçacık miktarına, dolayısıyla elektrotlar arasına uygulanan bir V gerilim değeri için hedefe gelen iyon akısı ve doğrusal olarak iyon akımına bağlıdır.

2.4.1.4. Radyo frekanslı (RF) kopartma

DC kopartma sisteminin iyon oluşturma olayı metalik elektrotlarla yapılır. Kaplama malzemesi olan hedef (katot) yalıtkan ise koparılan iyonların hedefin yüzeyinde birikmesi sonucu oluşacak yüzey yükü, bombardıman olayının devam etmesini engelleyecektir. Doğru akım yerine alternatif akım uygulanırsa hedefin kutuplanması sürekli değiştiği için iyonlarla ve elektronlarla sıralı olarak bombardıman edilecektir (Şekil 2.7.). Alternatif akım MHz veya daha yüksek frekanslıdır. Genelde kritik bir değer olmamasına karşın 13.56 MHz ya da katlarını üreten RF kaynakları kullanılır. Böylece hedef yüklenmesine engel olunması için hedef sırayla önce iyonlarla sonra elektronlarla bombardıman edilir. Kullanılan frekansın arttırılması hedefteki iyon akımını arttırır. RF kopartma sisteminde, güç kaynağıyla boşalma bölgesi arasında bir empedans uyumu bağlantısı gereklidir. Empedans uyumu olmaz ise, geri yansıyan güç, kaynağa zarar verebilir. RF kopartma sisteminde çalışma basıncı 1 mTorr' un üzerinde olmalıdır, böylece çalışma bölgesi içindeki RF elektrik alanı, gaz molekülleri ile ikincil elektronlar arasındaki çarpışma olasılığını arttırır (Wasa and Hayakawa, 1992).



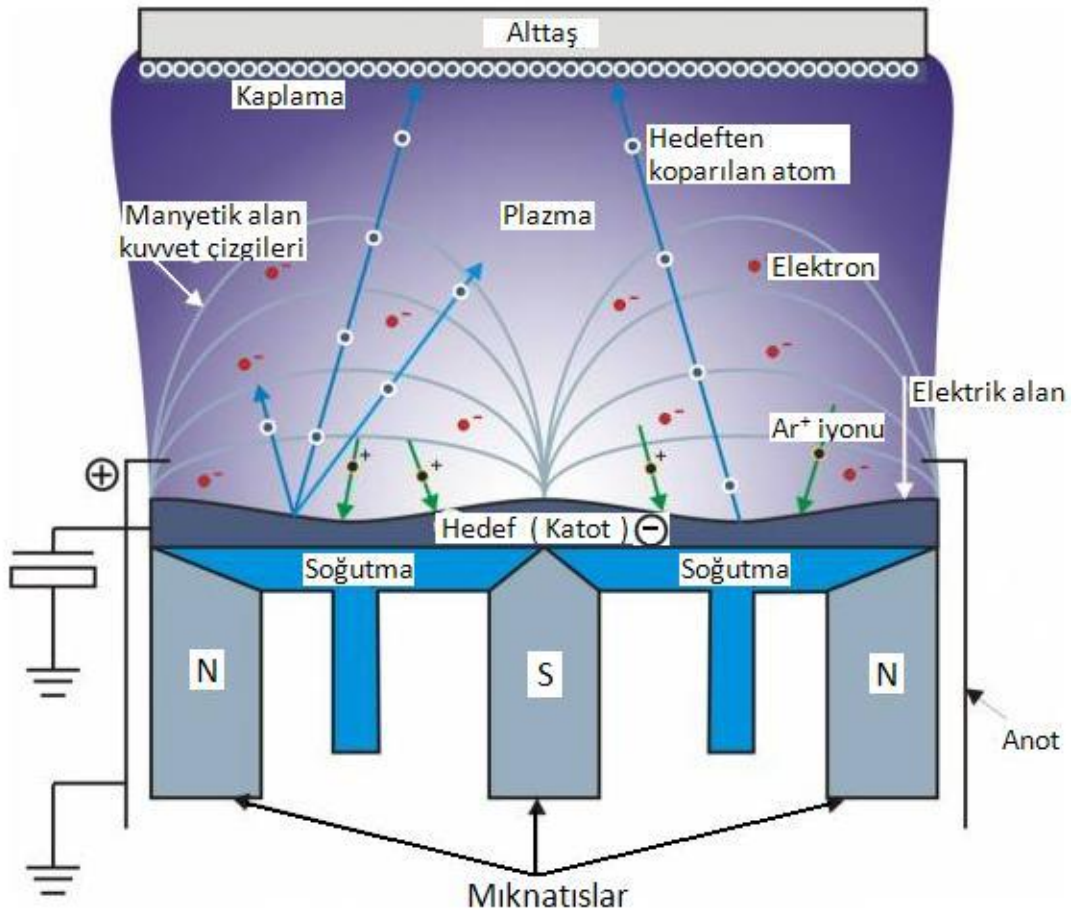
Şekil 2.7. RF kopartma sistemi.

2.4.1.5. Magnetron kopartma

Optik ve elektriksel uygulamalarda kullanılan ince filmlerin kopartma tekniği kullanılarak büyütülmesi son yıllarda belirgin şekilde artmıştır. Bunun temel nedeni yüksek performanslı magnetron katotlarının geliştirilmesidir. DC ve RF kopartma teknikleriyle karşılaştırıldığında, bir magnetron katot düşük çalışma basınçlarında yüksek büyütme oranına ve düşük alttaş sıcaklıklarında yüksek kaliteli filimler büyütme olanağına sahiptir. Buna ek olarak, buharlaştırmayla büyütme gibi diğer ince film büyütme metotlarıyla karşılaştırıldığında, daha büyük alanların kaplanmasındaki kararlılık ve filmin alttaşa daha iyi yapışması gibi avantajlara da sahiptir.

Magnetron kopartma yöntemi, genellikle metal ve metal alaşım filmlerin büyütülmesinde kullanılmaktadır. Bu metal filmler entegre devrelerin yapımında, ısı yansıtıcı ayna pencere kaplamalarında, sert kaplamalarda, optik kaplamalarda, krom filmler gibi kozmetik kaplamalarda kullanılırlar. Bu metot ayrıca, elektronik aletlerde aktif katmanlarda kullanılan yalıtkan filmlerin ve yarıiletken filmlerin büyütülmesinde de kullanılır. Magnetron sistemleri çalışma aralığının genişlemesi, elektronların hedef yakınında hapsedilerek alttaş yüzeyindeki elektron bombardımanı etkilerinin azaltılması ve aynı zamanda elektronların iyonizasyon etkilerinin artırılması için kullanılır. Bu genellikle elektrik ve manyetik alanlar birbirine dik düzenlenerek yapılır (Şekil 2.8.).

Magnetron kopartma sistemlerinde kullanılan manyetik alanlar sabit mıknatıslardan oluşur ve tipik olarak 100 Gauss civarındadır. Bu manyetik alandan ortamdaki elektronlar ve ağır iyonlar etkilenirler. Elektronlar hedef yüzeyinde manyetik alan etkisiyle oluşan manyetik alan çizgilerinin yörüngelerine girer ve burada hapsolurlar. RF güç kaynağı ile 13.56 Mhz frekansında alternatif voltaj uygulandığında ivmelenen elektronlar ortamda bulunan Argon atomlarıyla çarpışarak bu gaz atomlarını iyonlaştırır. İyonlaşan pozitif yüklü Argon atomları (Ar^+) ve elektronlar negatif kutuplu hedef üzerine hızla bombardıman ederek hedefe çarpar ve manyetik alan çizgileri altındaki bölgede hedef atomlarının bir kısmını kopartırlar. Hedef kutuplanması sürekli değiştiği için bu işlem sıralı olarak devam eder. Hedef yüzeyinden koparılan atomlar çarpışmalarla gelişigüzel hareket ederek, alttaş üzerine yoğunlaşarak film oluştururlar (Şekil 2.8.).



Şekil 2.8. RF magnetron kopartma sisteminde film oluşumu.

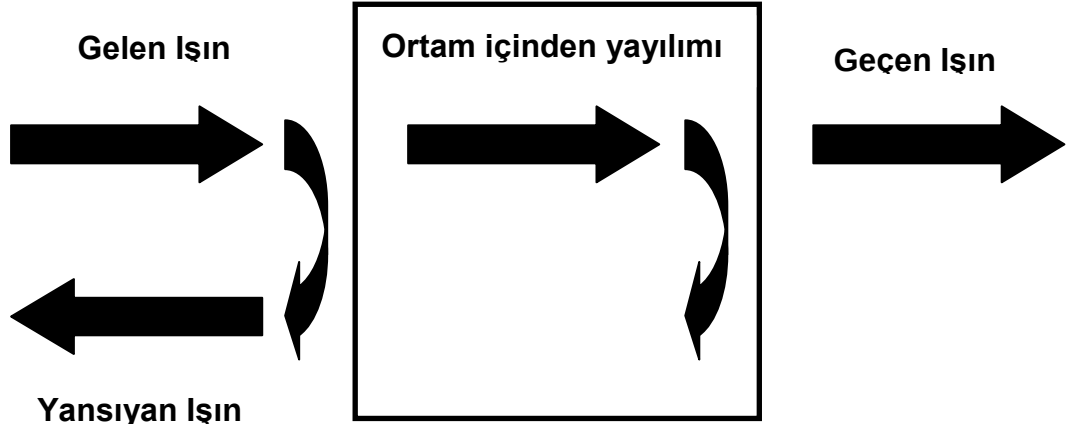
2.4.1.6. Yüzeyde iyon etkileşimi

Bir iyon bir katı yüzeye yaklaştığında meydana gelebilecek olaylar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Yüzeye gelen iyon yüzeyden yansıyabilir ve genellikle nötralize olur. Bu yansıma, malzemelerin yüzey tabakalarını karakterize eden ve temel iyon yüzey etkileşimleri hakkında bilgi veren, iyon saçılma spektroskopisi olarak bilinen bir analitik metodun temeline oluşturur.
- Yüzeye gelen iyon yüzeyden bir elektron salınmasına neden olabilir, bu elektronlara ikincil elektronlar adı verilir. Bir parçacık bir yüzeye çarptığı zaman, yüzeyden bir elektron sökülebilir. Her bir gelen parçacığa karşı, salınan elektronların sayısı, ikincil elektron sabiti ya da verimi olarak adlandırılır.
- İyon yüzey içine gömülebilir. Bu olay iyon ekimi olarak bilinir. Yaygın olarak entegre devre teknolojisinde, özel safsızlıkların derinlik profilleri ve kesin olarak kontrol edilen miktarlarıyla katkılanmış silikon tabanların yapımında kullanılır.
- İyon hedef malzemesi içinde bazı yapısal yeni düzenlemelerden sorumlu olabilir. Söz konusu yeni düzenlemeler, yapı içindeki elektriksel yük düzeylerinin ve dağılımlarının değişimini ve alaşım ya da bileşik hedeflerin sitokiyometrilerinin değişimini içerebilir.
- İyon yüzey atomlarıyla bir seri çarpışma yapabilir, bu hedeften atomların salınmasına neden olabilir. Bu salınma kopartma olarak adlandırılır.

2.5. Katıların Optik Özellikleri

Işığın malzemeyle olan etkileşiminde üç olgu meydana gelmektedir. Bunlar yansıma, soğurma ve geçirgenliktir. Işığın bir kısmı malzeme yüzeyinden yansır, diğer kısmı malzeme içinde yayılır. Malzeme içinden yayılan ışık malzeme iç yüzeyinden tekrar yansiyabilir veya diğer tarafa doğru geçebilir (Fox, 2001) (Şekil 2.9.).



Şekil 2.9. Optik ortama gelen ışığın yansıması, yayılması ve geçmesi.

Yansıma, ortamların kırma indislerinin farklı olmasından meydana gelir. Bu farklılık optik ortamda ışık dalgalarının boş uzaydakine göre daha küçük hızlarda yayılmasına neden olur. Hızdaki bu azalma 'Snell Kırılma Yasası' ile tanımlanan ışık ışınlarının ara yüzeylerde kırılmasına yol açar. Kırılma ışık dalgasının şiddetine etki etmez.

Soğurma, ortamda ışığın yayılması sırasında ışığın frekansının ortamdaki atomların geçiş frekanslarıyla rezonansa girmesi durumunda meydana gelir. Bu durumda şiddette azalma olacaktır. Ortamın geçirgenliği açık bir şekilde soğurma ile ilişkilidir. Çünkü sadece soğrulmayan ışık iletilecektir (Fox, 2001).

Bir malzemenin optik özelliklerinin incelenmesi ile birçok bilgi edinilir. Yüzeylerdeki yansıma, yansıma katsayısı (R) veya yansıtıcılık olarak verilir ve yansıyan gücün gelen güce oranıdır. Geçirgenlik katsayısı (T) ise geçen gücün gelen güce oranıdır.

Enerjinin korunumu gereği,

$$R + T + Soğurma + Saçılma = 1 \quad (2.1)$$

Eğer ortamda soğurma veya saçılma yok ise, ki bu geręek sistemler için doğru olmaz:

$$R + T = 1 \quad (2.2)$$

Geçirgen bir ortam içinde ışının yayınıını kırma indisi (n) ile tanımlanır. Kırma indisi, vakumdaki c ışık hızıyla karşılaştırıldığında malzeme içinde hareket eden ışığın faz hızını ifade eder:

$$n = \frac{c}{v} \quad (2.3)$$

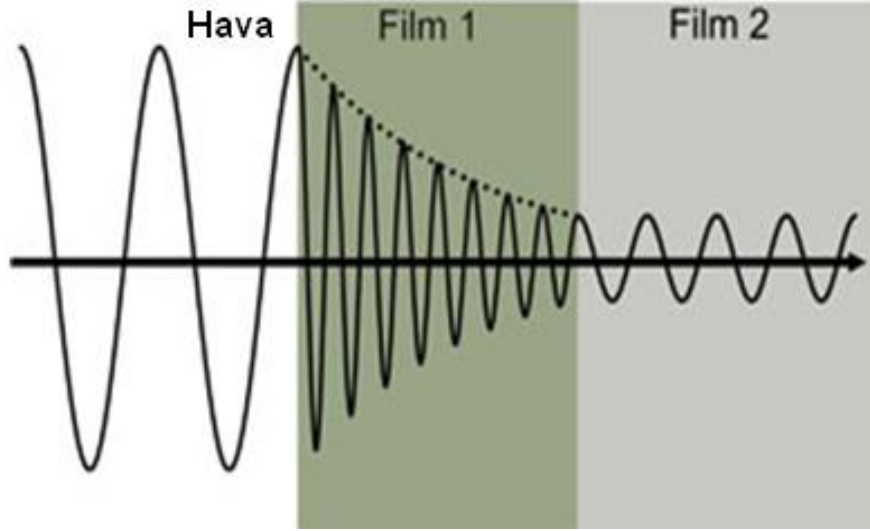
Kırma indisi gelen ışığın frekansına bağlıdır. Bu etki dispersiyon olarak verilir. Optik ortamda ışığın soğrulması soğurma katsayısı (α) ile verilir. Soğurma katsayısı, ortamda bir birim uzunluktaki soğrulan güç oranıdır. Işın z yönünde yayılırsa ve z pozisyonundaki şiddeti (her birim alandaki optik güç) $I(z)$ ise, dz kalınlığının artan dilimi içindeki şiddet azalması şu şekilde verilir:

$$dI = -\alpha dz \times I(z) \quad (2.4)$$

Malzemenin gelen ışığı soğurmasıyla kaybolan ışık şiddeti Beer yasası ile verilir:

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.5)$$

Burada I_0 , $z = 0$ da bulunan optik ışık şiddetidir (Şekil 2.10.).



Şekil 2.10. Dalga hava ortamından gelerek soğurucu Film 1 ve saydam Film 2'den geçerek ilerliyor. Faz hızı ve dalgaboyu her malzemede kırma indisine bağlı olarak değişir (Film 1: $n=4$, Film 2 : $n=2$, Hava : $n=1$).

Optik sabitler malzeme içinde yayılan ışığın etkileşimini tanımlar. Bir malzemenin içinden ışık geçirilmesiyle, bu malzemenin optik sabitleri ara yüzden yansımayı ve geçirgenliği belirler.

Soğurgan bir ortamın kırma indisi kompleks kırma indisi ($\tilde{n}$) ile verilir:

$$\tilde{n} = n + ik \quad (2.6)$$

$\tilde{n}$ 'in gerçek kısmı olan n , normal kırma indisi ile aynıdır. $\tilde{n}$ 'in sanal kısmı k sönüm katsayısı olarak ifade edilir. Kırma indisinin artmasıyla ışığın malzeme içindeki hızı azalır. Frekans sabit olduğundan, hızdaki bir azalma beraberinde dalgaboyuna da bir azalma getirir. Sönüm katsayısı malzeme içindeki dalgaın kaybettiği enerjiyi tanımlamaktadır ve ortamın soğurma katsayısı α ile doğrudan ilişkilidir:

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.7)$$

Burada λ ışığın boş uzaydaki dalgaboyudur.

Ortamın kırma indisi, bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r) ile ilişkilendirilebilir:

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.8)$$

Bu gösteriyor ki, n kompleks ise ϵ_r 'nin de kompleks olmalıdır:

$$\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_1 + i\epsilon_2 \quad (2.9)$$

Böylece $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ birbirleriyle ilişkilidir:

$$\tilde{n}^2 = \tilde{\epsilon}_r \quad (2.10)$$

Gerekli düzenlemeler yapıldığında $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ 'nin gerçekte ve sanal bölümleri arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır:

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.11)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.12)$$

ve

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.13)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(-\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

Bu analiz gösteriyor ki $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ bağımsız değişkenler değildir. Eğer ϵ_1 ve ϵ_2 'yi biliyorsak n ve k 'yı bulabiliriz veya tam tersi.

Yansıtma, n ve k ya bağlı olarak:

$$R = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (2.15)$$

normal gelişte optik ortam ve hava arasındaki yansıtma katsayısını verir. Kalınlığı x olan soğurgan bir ortamın geçirgenliği “Eş.2.16.” ile verilir:

$$T = (1 - R_1)e^{-\alpha x}(1 - R_2) \quad (2.16)$$

Burada R_1 ve R_2 sırasıyla ön ve arka yüzeylerin yansıtmasıdır. Bu formül Bkz. Şekil 2.9.’da gösterilen optik ortamın içinden geçirilen ışığın geçirgenliğini bulmada uygulanabilir. Eğer optik ortamın ön ve arka yüzeylerindeki yansıtma eşit R yansıtmasına sahipse o zaman geçirgenlik aşağıdaki formda verilir:

$$T = (1 - R)^2 e^{-\alpha x} \quad (2.17)$$

Cam gibi geçirgen malzemelerde spektrumun ultraviyole ve yakın kızılötesi bölgeleri aralığında, görünür bölgede soğurma katsayısı çok küçüktür. k ve ϵ_2 ihmal edilebilir ve böylece $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ ‘nin de gerçek sayıları n ve ϵ_1 alınabilir. Bu durumda geçirgen optik malzemelerin özellikleri verilirken kırma indisinin ve dielektrik sabitinin sadece gerçek kısımları dikkate alınır. Diğer yandan eğer ortamda bir soğurma varsa, $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ ‘nin gerçek ve sanal kısımlarının ikisinin birlikte göz önüne alınması gerekir (Fox, 2001).

2.5.1. Katılarda klasik yayılma ve soğurma

Işığın yayılmasında klasik model, Maxwell ‘in elektromanyetik dalga teorisi ve dipol osilatörü kavramlarıyla geliştirilmiştir. Katılarda klasik model, ışığı elektromanyetik dalga, atomları ve molekülleri ‘klasik dipol osilatörleri’ olarak ele alır. Ortamda her biri kendine ait karakteristik rezonans frekansına sahip birçok farklı osilatör tipleri bulunmaktadır. Bunlar atomik osilatörler, titreşimsel osilatörler ve serbest elektron osilatörleridir. Işık bu osilatörler (titreşiciler) tarafından farklı bantlarda soğurulabilir (Fox, 2001).

2.5.1.1. Atomik osilatörler

Atomların salınan dipoller gibi dikkate alınması fikri 1878 'de Henrick Antoon Lorentz tarafından önerilmiştir. Atomik osilatör modelinde elektron çekirdeğe göre sabit bir yörüngededir ve dengeden küçük yer değiştirmeler için yay geri çağırıcı kuvvetini belirtir. Negatif yüklü elektron ve pozitif yüklü çekirdek arasındaki uzaklık ile orantılı büyüklükte bir elektrik dipolü oluştururlar. Atomik dipollerin doğal rezonans frekansı:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{K_s}{\mu}} \quad (2.18)$$

İle verilir. Burada K_s yay sabiti ve μ indirgenmiş kütledir. Burada her atom içinde çeşitli dipoller vardır ve verilen her atom birçok geçiş frekanslarına sahiptir. Yakın kızılötesi, görünür ve ultraviyole spektral bölgelerinde ($10^{14} - 10^{15}$ Hz) sınır elektronlarından dolayı rezonanslar meydana gelir. Eğer ortamdaki bir atomun ω_0 rezonans frekansıyla, bu ortama dışarıdan gönderilen elektromanyetik dalganın ω frekansının çakışması, çok büyük genliklerde osilasyonlara neden olur ve dışarıdan gelen dalga, atoma enerjisini transfer eder. Böylece $\omega = \omega_0$ olması durumunda, atom ışıktan gelen enerjiyi soğurur. Soğurma gücü soğurma katsayısı α ile karakterize edilir ve dalganın şiddeti de Beer yasasına göre üssel olarak azalır (Bkz. "Eş. 2.5.") (Fox, 2001).

Eğer ω , rezonans frekanslarından herhangi biriyle çakışmazsa, atomlar soğurma yapmaz ve ortam saydam olur. Bu durumda ışık dalgası ω kendi frekansında atomların rezonans olmayan osilasyonlarını kullanır. Atomların osilasyonları sürücü dalgayı faz gecikmesiyle takip eder. Faz gecikmesi zorlanmış osilatörlerin standart bir özelliğidir ve sönüm sayesinde meydana gelir (Fox, 2001).

Rezonans olmayan etkileşmelerden dolayı dalganın yavaşlaması tekrarlayan saçılma süreçleri olarak düşünülebilir. Saçılma hem koherent ve hem de elastiktir ve her atom bir Huygens nokta kaynağı gibi davranır. Saçılmış ışık ileri yönde yapıcı girişim ve diğer yönlerde yıkıcı girişim yapar ve böylece tekrarlanan saçılma sürecinde ışının yönü değişmemiş olur. Bununla birlikte her saçılma olayı, ortam içindeki faz yayılmasının yavaşlamasına neden olan bir faz gecikmesi oluşturur.

Lorentz osilatör modelinde atomik dipollerin yer değiştirmesi, sönümlü harmonik osilatörleri gibi alınır. Çarpışma sürecinde salınan dipollerin enerjilerini kaybetmesiyle sönüm oluşur. Katılarda, bu olay kristal içinde ısı olarak uyarılmış fononlar ile tipik olarak bir etkileşim meydana getirir. Sönüm terimi azalan pik soğurma katsayısı ve genişleyen soğurma çizgisi etkisine sahiptir. Bağıl dielektrik sabiti (ϵ_r), “Eş. 2.19.” ile verilir:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \chi + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \frac{1}{(\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega)} \quad (2.19)$$

Rezonansa yakın frekanslarda, bir dipol osilatörünün bağıl dielektrik sabitinin gerçek (ϵ_1) ve sanal (ϵ_2) kısımlarının frekansa bağımlılığına ‘Lorentzian’ denir ve “Eş. 2.20.” ve “Eş. 2.21.” ile verilir:

$$\epsilon_1(\Delta\omega) = \epsilon_\infty - (\epsilon_{st} - \epsilon_\infty) \frac{2\omega_0\Delta\omega}{4(\Delta\omega)^2 + \gamma^2} \quad (2.20)$$

$$\epsilon_2(\Delta\omega) = (\epsilon_{st} - \epsilon_\infty) \frac{\gamma\omega_0}{4(\Delta\omega)^2 + \gamma^2} \quad (2.21)$$

Burada, $\epsilon_r(0)$ düşük frekans limiti ve $\epsilon_r(\infty)$ yüksek frekans limitidir. ϵ_{st} , durağan elektrik alanlara dielektrik cevabı göstermektedir.

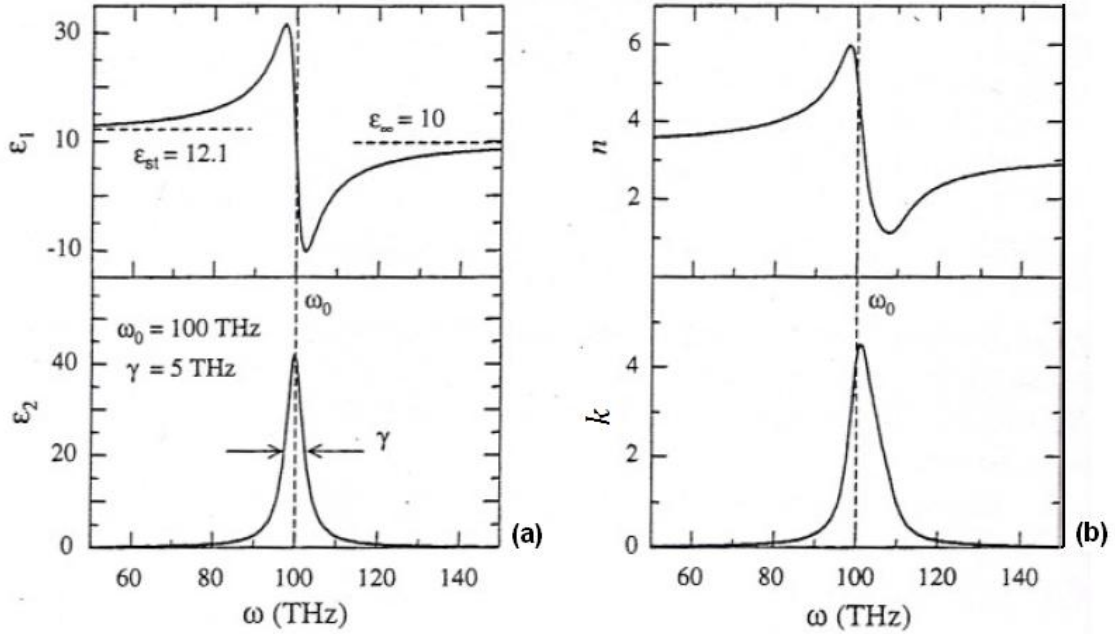
$$\epsilon_r(0) \equiv \epsilon_{st} = 1 + \chi + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0 \omega_0^2} \quad (2.22)$$

$$\epsilon_r(\infty) \equiv \epsilon_\infty = 1 + \chi \quad (2.23)$$

N, birim hacimdeki atom sayısı; ω_0 , rezonans frekansı; e, elektronun elektrik yükünün büyüklüğü; m_0 , elektron kütlesi; γ , sönüm hızı; χ , elektrik duygunluğu; ϵ_0 , boşluğun elektriksel geçirgenliğidir.

$\omega_0=100$ THz, $\gamma = 5$ THz, $\epsilon_{st}=12.1$ ve $\epsilon_\infty= 10$ olan bir osilatör için, ϵ_1 ve ϵ_2 ‘nin frekansa bağlı olarak değişimi ve kırma indisinin gerçek (n) ve sanal (k) kısımları

ϵ_1 ve ϵ_2 kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 2.11.). Bu sayılar, iyonik bir kristalde kızılötesi soğurma çizgilerinin tipik sayılarıdır (Fox, 2001).



Şekil 2.11. Rezonansa yakın frekanslarda bir dipol osilatöründe, (a) ϵ_1 ve ϵ_2 frekansa bağlı değişimi ve (b) n ve k 'nın frekansa bağlı değişimi (Fox, 2001).

2.5.1.2. Titreşimsel osilatörler

Optik ortamın iyonik olduğu durumda atom zıt yüklü iyonları içerir. Kristal örgü içerisinde bu yüklü atomların denge konumlarından titreşmeleri salınan bir dipol momentini meydana getirir. Böylece iyonik optik bir ortam ile ışık etkileşimini düşündüğümüz zaman, titreşimsel osilatörlerden dolayı meydana gelen optik etkileri düşünmeliyiz.

Klasik polar molekülü iki yüklü atomdan oluşur ve bunlar kararlı bir düzen içerisinde birbirlerine bağlıdır. Burada yay, aralarında moleküler bağ olarak gösterilmektedir. Atomlar denge konumları etrafında titreşim yapabilir ve atomların içince sınır elektronlarına benzer bir yolla salınan bir elektrik dipolüne neden olabilir. Eş. 2.18 'e baktığımızda indirgenmiş kütlenin daha büyük olmasından dolayı titreşimler düşük frekanslarda meydana gelecektir. Böylece titreşimler kızılötesi frekanslarında $\omega/2\pi \sim 10^{12} - 10^{13}$ Hz meydana gelir. Bu moleküler

titreşimler kızılötesi spektral bölgesinde güçlü soğurma çizgileriyle ilişkilidirler. Kristalimsi katı polar moleküllerinin yoğunlaşmasından oluşmuştur. Atomlar pozitif ve negatif iyonların değişen bir dizisinde düzenlenir ve bu salınan dipol dalgalarını oluşturur. Bu osilasyonlar örgü titreşimleriyle ilişkilidirler ve kızılötesi spektral bölgesindeki frekanslarda meydana gelirler. Polar kristalin örgü titreşimleri kızılötesi spektral bölgesinde güçlü optik etkileri artırır. Bu etkiler bunlara ek olarak kristali kapsayan atomların sınır elektronlarından meydana gelir. Bu iki dipol tipi birbirlerinden çok farklı frekanslarda meydana gelir. Çünkü rezonanslar keskindir ve çok farklı frekanslarda oluşur. Böylece örgü titreşimlerinin frekanslarında sınır elektronlarının rezonans etkileri ihmal edilebilir (Fox, 2001).

2.5.1.3. Serbest elektron osilatörleri

Elektronik ve titreşimsel dipollerin ikisi de sınır osilatörlerine örnektir. Aksine metallerde ve katılanmış yarıiletkenler önemli sayıda serbest elektron içermektedir. Serbest elektronlar hiçbir atoma sınır değildir. Yer değiştirdiklerinde ve elektromanyetik dalga ile etkileştikleri zaman, geri çağırıcı bir kuvvet oluşmaz. Bunun anlamı yay sabiti sıfırdır ve doğal titreşim frekansı $\omega_0 = 0$ 'dır.

Metallerin serbest elektron modeli Paul Drude 'a atfedilir ve dipol osilatör modelinin uygulamaları serbest elektron sistemlerinde genellikle "Drude-Lorentz modeli" olarak verilir. Başından sonuna kadar $\omega_0 = 0$ alınması dışında, dipol osilatör modeli tamamen geçerlidir.

Ağır iyonlar ve elektronların doğal gazı plazma olarak adlandırılır. Metaller ve katılanmış yarıiletkenler plazmalar gibi ele alınabilir çünkü eşit sayıda değişmeyen pozitif iyonları ve serbest elektronları içerirler. Serbest elektron plazması, plazma frekansı olarak adlandırılan özel bir frekansa kadar kuvvetli bir şekilde yansıtır. Serbest elektron plazması için sönüm olmayan bir sistemde ($\gamma=0$) kompleks dielektrik sabiti "Eş. 2.24" ile verilir:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.24)$$

Burada,

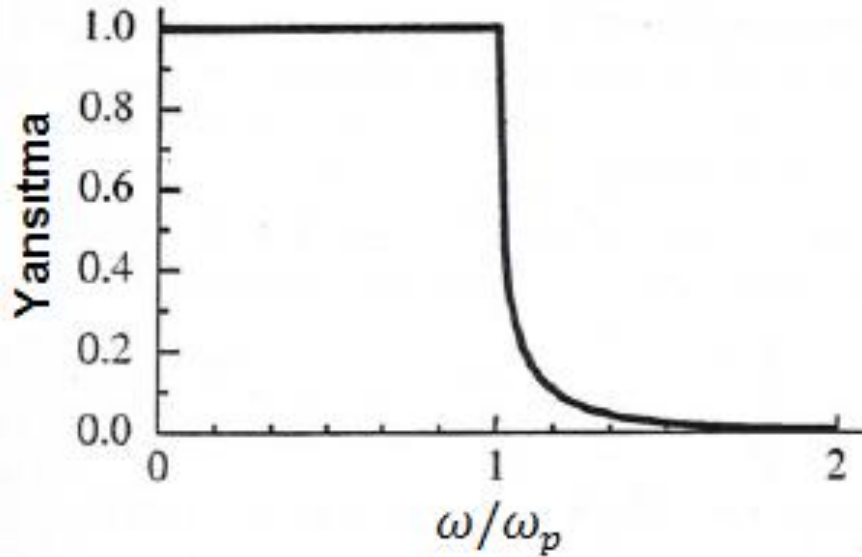
$$\omega_p = \left(\frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_0} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.25)$$

plazma frekansıdır.

Ortamın kompleks kırma indisi $\tilde{n}$, kompleks dielektrik sabiti ile $\tilde{n} = \sqrt{\epsilon_r}$ ilişkisi vardır (Bkz. “Eş. 2.10.”). Bunun anlamı, $\omega < \omega_p$ için $\tilde{n}$ sanal, $\omega > \omega_p$ için $\tilde{n}$ pozitif ve $\omega = \omega_p$ için $\tilde{n}$ değeri sıfırdır. Yansıtma R , “Eş. 2.26.” ile hesaplanabilir:

$$R = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 \quad (2.26)$$

$\tilde{n}$ 'in frekansa bağıllığı yansıtma eşitliğinde yerine konulursa $\omega \leq \omega_p$ için $R \cong 1$ olur ve elektromanyetik dalgalar ortamdaki tamamen yansır. $\omega > \omega_p$ için yansıtma azalır ve bu aralıkta metal saydam olur. $\omega = \infty$ için yansıtma sıfıra yaklaşır (Şekil 2.12.) (Fox, 2001).



Şekil 2.12. Sönümsüz serbest taşıyıcı gazının frekansın fonksiyonu olarak yansıtması (Fox, 2001).

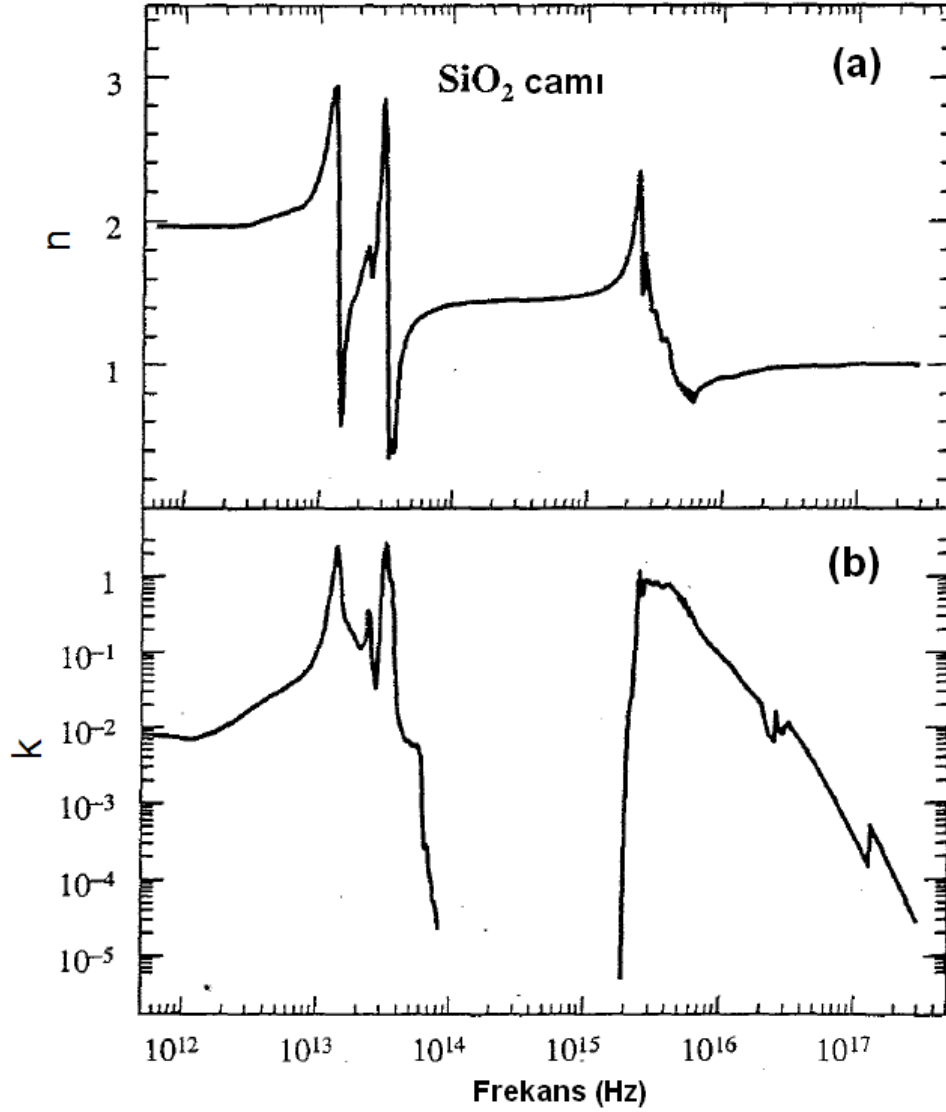
2.5.2. Dispersiyon

Malzemelerin optik özelliklerinin dalgaboyuna bağılılığı 'dispersiyon' olarak tanımlanır. Işığın frekansı değiştikçe malzemelerin optik sabitlerinin değerleri de değişmektedir.

Görünür spektral bölgede saydam olan tipik optik malzemeler genel bir davranışa sahiptir (Şekil 2.13.). Renksiz malzemelerin geçirgenlik aralığı ultraviyole bölgesindeki elektronik soğurmada ve kızılötesi bölgesindeki titreşimsel soğurmada belirlenebilir.

SiO₂ bir cam olduğundan düzenli bir kristal örgüye sahip değildir. SiO₂ moleküllerinin kendi içinde titreşimsel kuantum uyarmaları kızılötesi soğurmalarına neden olur. Bu soğurmalar kızılötesi bölgesindeki farklı titreşimsel molekül modlarına uyan pikler olarak görülür (Şekil 2.13.).

SiO₂ içindeki ultraviyole soğurmasına interband elektronik geçişleri neden olmaktadır. SiO₂ temel bant aralığı yaklaşık 10 eV 'dur ve foton enerjisi bu değeri aştığında interband geçişleri mümkündür. Bu yüzden ultraviyole bölgesinde 2×10^{15} Hz (150 nm)'de bir soğurma eşiği gözleriz. Aşırı derecede yüksek soğurma katsayısına $\sim 10^8 \text{ m}^{-1}$ sahip 3×10^{15} Hz civarındaki interband soğurma pikleri yavaş yavaş yüksek frekanslara doğru azalır. İkincil pikler $\sim 3 \times 10^{16}$ Hz ve 1.3×10^{17} Hz de görülür. Bunlar silikon ve oksijen atomlarının iç çekirdek elektronlarının geçişlerinden meydana gelir (Fox, 2001).



Şekil 2.13. SiO₂ camının kızılötesi bölgesinden x-ışını bölgesine kadar kırma indisinin (a) ve sönüm katsayısının (b) frekansa bağlı değişimi (Fox, 2001).

2.5.3. Optik modeller

Kırma indisinin frekans veya dalgaboyu arasındaki ilişkisi 'dispersiyon ilişkisi' olarak adlandırılmaktadır. Kırma indisi n ve sönüm katsayısı k dalgaboyuna bağlıdır. Spektrofotometrik veya elipsometrik ölçümlerle filmlerin dalgaboyuna bağlı optik yansıtma ve optik geçirgenlik eğrilerinin ölçümleri alındıktan sonra bazı optik modeller kullanılarak filmlerin kalınlığı t , kırma indisi n , sönüm katsayısı k , soğurma katsayısı α ve enerji band aralığı E_g gibi optik özellikleri bulunabilir. Optik modeller uygulanacak filmin cinsine ve özelliklerine göre değişim göstermektedir.

2.5.3.1. Cauchy modeli

Dielektrikler, organikler ve yarıiletkenler gibi genel saydam malzemelerde kırma indisi - dalgaboyu ilişkisi Cauchy modelinde şu şekilde verilir:

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (2.27)$$

Burada A, B, ve C malzemeye özgü katsayılarıdır. Cauchy denklemi görünür spektrum bölgesinde çeşitli optik camlarda uygulanmaktadır. Cauchy dispersiyon ilişkisinin daha genel bir formu:

$$n = n_{-2}(h\nu)^{-2} + n_0 + n_2(h\nu)^2 + n_4(h\nu)^4 \quad (2.28)$$

Burada $h\nu$ foton enerjisi ve n_0 , n_{-2} , n_2 , n_4 sabitlerdir. Genel Cauchy denklemi genellikle geniş foton enerji aralığında kullanılması uygundur (Kasap, 2006).

2.5.3.2. Sellmeier modeli

Sellmeier ilişkisi de saydam dalgaboyu aralığında uygundur. Dispersiyon ilişkisi şu şekilde verilir:

$$n^2 = 1 + \frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_2^2} + \frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_3^2} + \dots \quad (2.29)$$

Burada λ_1 , λ_2 , λ_3 rezonans frekanslarıdır ve sabittir. A_1 , A_2 ve A_3 'de sabittir. Eğer Sellmeier katsayıları biliniyorsa, çeşitli dalgaboylarındaki kırma indisinin hesaplanmasında, Sellmeier denklemi oldukça kullanışlı yarı deneysel bir ifadedir (Kasap, 2006).

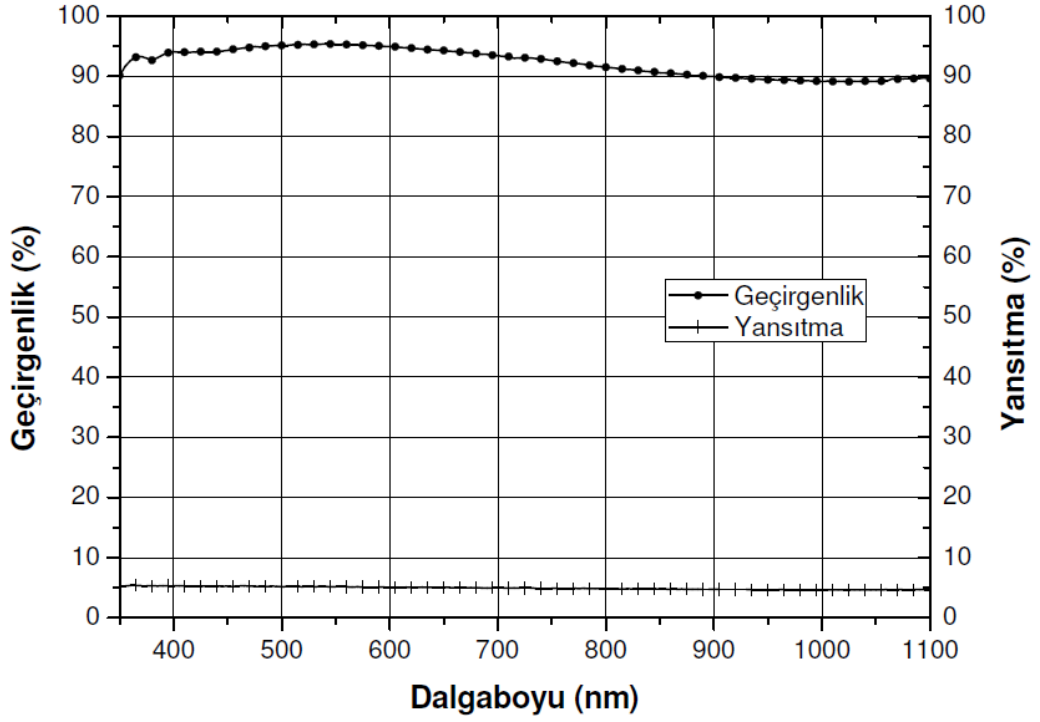
2.6. Optik Kaplama Malzemeleri

Bu tez kapsamında yapılan tek katmanlı ve çok katmanlı ince film kaplama çalışmalarında alttaş malzemesi olarak cam ve silisyum, kaplama malzemeleri olarak SiO_2 , ZrO_2 ve TiO_2 kullanılmıştır.

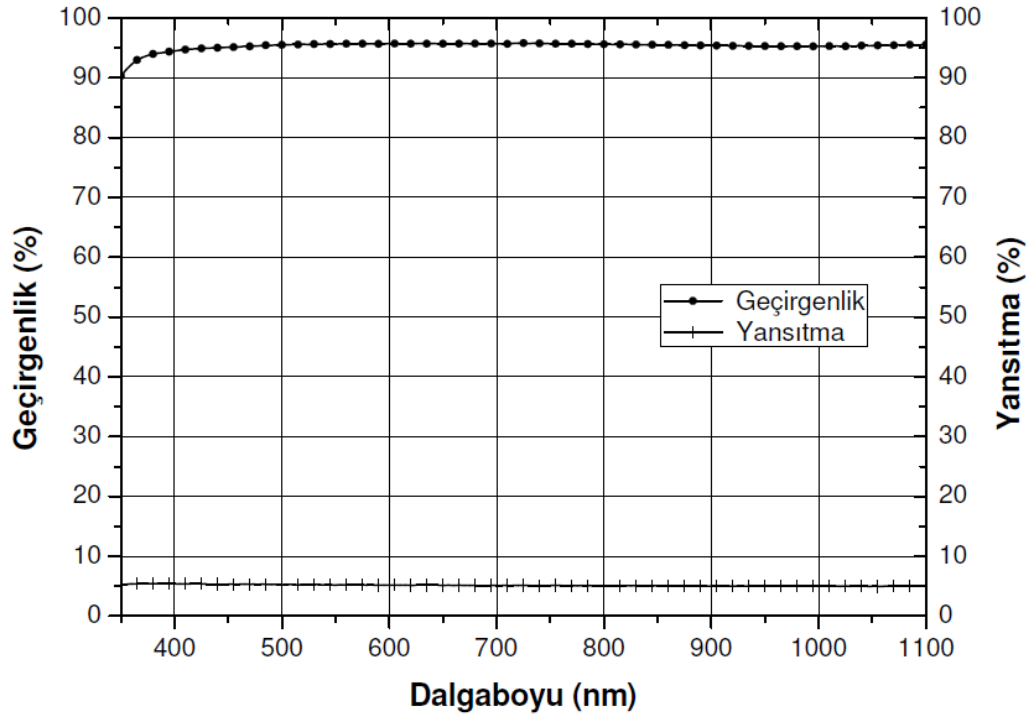
2.6.1. Camlar

Camlar oldukça önemli optik malzemelerdir. Aşırı soğutulmuş alkali ve toprak alkali metal oksitleriyle, diğer bazı metal oksitlerin çözülmesinden oluşan bir sıvı olup ana maddesi (SiO_2) silisyum dioksittir. Camlar erimiş haldeki amorf yapısını koruyarak katılaştan inorganik cisimler olarak tanımlanabilir. Üretim sırasında hızlı soğuma nedeniyle kristal yapı yerine amorf yapı oluşur. Bu yapı cama sağlamlık ve saydamlık özelliğini kazandırır. Saf erimiş silis yalıtkandır ve yalıtkan özelliklerinin bütün karakteristiklerini gösterir. Görünür bölgede geçirgendir ama ultraviyole bölgesinde SiO_2 moleküllerinin elektronik geçişlerinden ve kızılötesi bölgesinde titreşimsel soğurmadan dolayı bu bölgelerde soğurma yapar. Geçirgenlik aralığı ultraviyole bölgesinde 200 nm 'den kızılötesi bölgesine 2000 nm 'ye kadar uzanır.

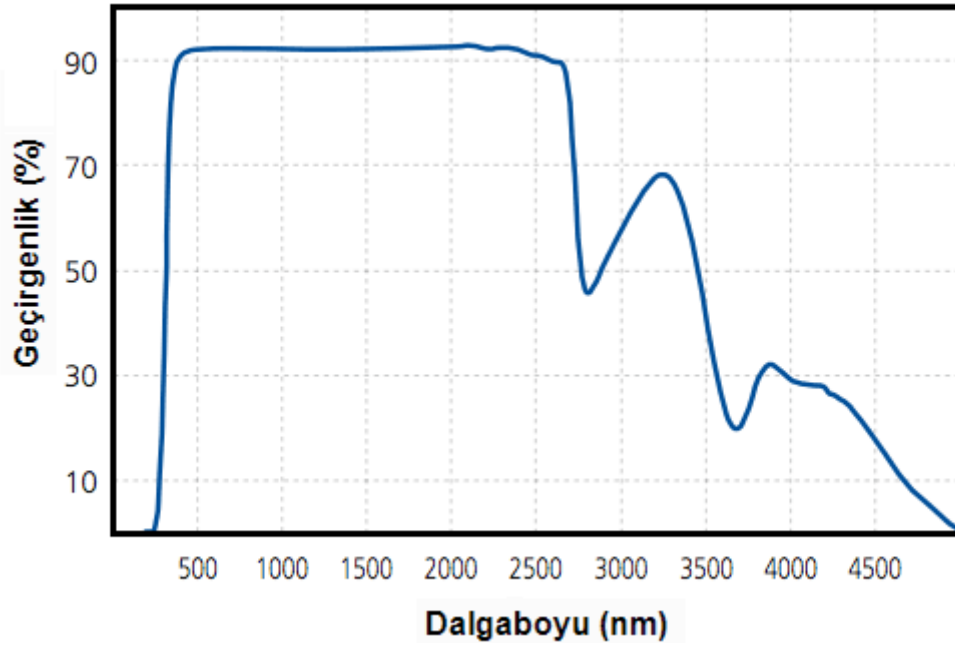
Tez çalışmasında kullanılan optik cam malzemeler 1737F camı ve mikroskop camıdır. Mikroskop camı özellikle görünür bölgede yüksek optik geçirgenliğe sahiptir (Şekil 2.14.). Deneysel çalışmalarda özellikle tercih edilen cam türüdür. 1737F camı ise optik özellikleri bakımından oldukça kullanışlı, geniş bir spektrumda yüksek geçirgenliğe ve düşük soğurganlığa sahiptir. Özellikle spektrumun ultraviyole bölgesini geçirmemesi tercih edilme nedenlerinden biridir. Panel göstergelerde, fiber ve ayna kaplamalarında, mikro elektronik uygulamalarda, optik pencerelerde, optoelektronikte yaygın olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.15.; Şekil 2.16.).



Şekil 2.14. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplanmamış mikroskop camının dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (artı çizgi) eğrileri.



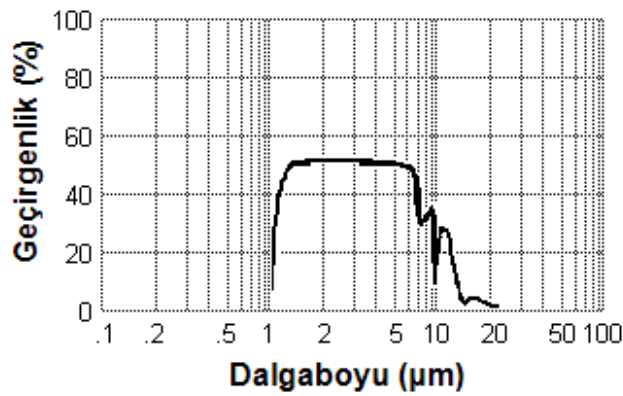
Şekil 2.15. Deneysel çalışmalarda kullanılan kaplanmamış 1737F camının dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (artı çizgi) eğrileri.



Şekil 2.16. 1737F camının geniş bir spektrumda dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik eğrisi.

2.6.2. Silisyum (Si)

Silisyum genellikle kızılötesi yansıtıcılar ve 1.5 μm – 8 μm aralığındaki pencereler için alttaş malzemesi olarak kullanılmaktadır (Şekil 2.17.). Yüksek ısıl iletkenliği ve düşük yoğunluğundan dolayı lazer aynalarında sıkça tercih edilen bir malzemedir.



Şekil 2.17. Silisyumun spektrumdaki dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik eğrisi.

2.6.3. Silisyumdioksit (SiO_2)

Görünür bölgede düşük kırma indisli (550 nm 'de $n=1.46$) malzeme olarak sık kullanılan oksit malzemelerden birisidir. Kuvartz diğer pek çok okside göre çok dayanıklı bir malzeme olduğundan genellikle optik filtrelerde üst katman koruma malzemesi olarak da kullanılmaktadır. SiO_2 dielektrik özellikleri iyi ve ısı şoklarına karşı dayanıklı bir malzemedir. Sahip olduğu yüksek erime noktası (1700°C) nedeniyle ısı buharlaştırma teknikleri kullanılamamaktadır. Özellikle yüksek kırma indisine sahip TiO_2 ile sıralı olarak kaplandığında çok katlı dielektrik ayna veya çok katlı yansıtmasız kaplama (AR Coating) yapmak mümkündür. Genellikle SiO_2 filmlerin büyütülmesi için elektron demetiyle buharlaştırma ve kopartma teknikleri kullanılmaktadır.

2.6.4. Zirkonyumdioksit (ZrO_2)

ZrO_2 ince filmler yakın ultraviyole bölgesinden (240 nm) orta kızılötesine (8 μm) kadar çok geniş bir dalgaboyu aralığında, yüksek kırma indisine (550 nm 'de $n=2.1$) sahip olması, düşük soğurganlığı, oksitlenmeye karşı büyük direnç göstermesi ve kimyasal kararlılığı nedeni ile lazer aynaları, geniş bant girişim filtreleri, elektro optik aygıtlar gibi optik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek erime noktası (2680°C) sayesinde yüksek ısıya dayanıklıdır (Gao et al., 2000; Ma et al., 2007). Düşük ısı iletkenliğe sahiptir. 600°C 'nin üzerinde elektriksel iletkenidir ve oksijen sensör hücrelerinde, yüksek sıcaklıklardaki indüksiyon fırınlarında hassas ısıtıcı olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek sertliğe sahiptir.

2.6.5. Titanyumdioksit (TiO_2)

TiO_2 ince filmler 400 ve 1000 nm dalgaboyu aralığında yüksek kırma indisi (550 nm 'de $n=2.4$) ve düşük soğurganlığından dolayı çok yaygın olarak kullanılan geçiş metali oksitlerinden biridir. Sertliği ve diğer oksitlerle kombine kullanılması durumundaki kararlılığı gibi pek çok eşsiz mekanik ve dielektrik malzeme özelliklerine sahiptir. Genellikle kopartma ve elektron demetiyle buharlaştırma teknikleriyle beklenen özelliklere sahip katmanlar elde etmek mümkündür. Sahip olduğu yüksek erime noktası (1843°C) nedeniyle ısı buharlaştırma tekniğinin kullanılması uygun değildir.

2.7. İnce Filmlerde Matris Kuramı

Bu tez çalışması kapsamı içerisinde optik kaplamaların tasarımı ve performanslarının karakterizasyonu için, transfer matrisi hesaplama yöntemi kullanılıp ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bu metot ilk kez 1950 yılında F. Abelés tarafından önerilmiştir ve o tarihten bu yana daha da geliştirilmiştir. Bu metodun temeli, bir optik katman için bütün yansıtılmış ya da geçirilmiş demetlerin elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin Maxwell denklemlerinin genel sınır şartlarını sağlayacak şekilde toplanmasıdır (Duyar, 2006; Pedrotti et al., 2007).

Burada elektromanyetik kuramdan bildiğimiz bağıntıları kısaca özetleyelim.

Poynting vektörü Eş.2.30 ile verilmektedir:

$$\vec{S} = \varepsilon_0 c^2 (\vec{E} \times \vec{B}) \quad (2.30)$$

Bir dielektrik ortamda yayılan elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin genlikleri arasında “Eş. 2.31.” ile verilen ilişki vardır:

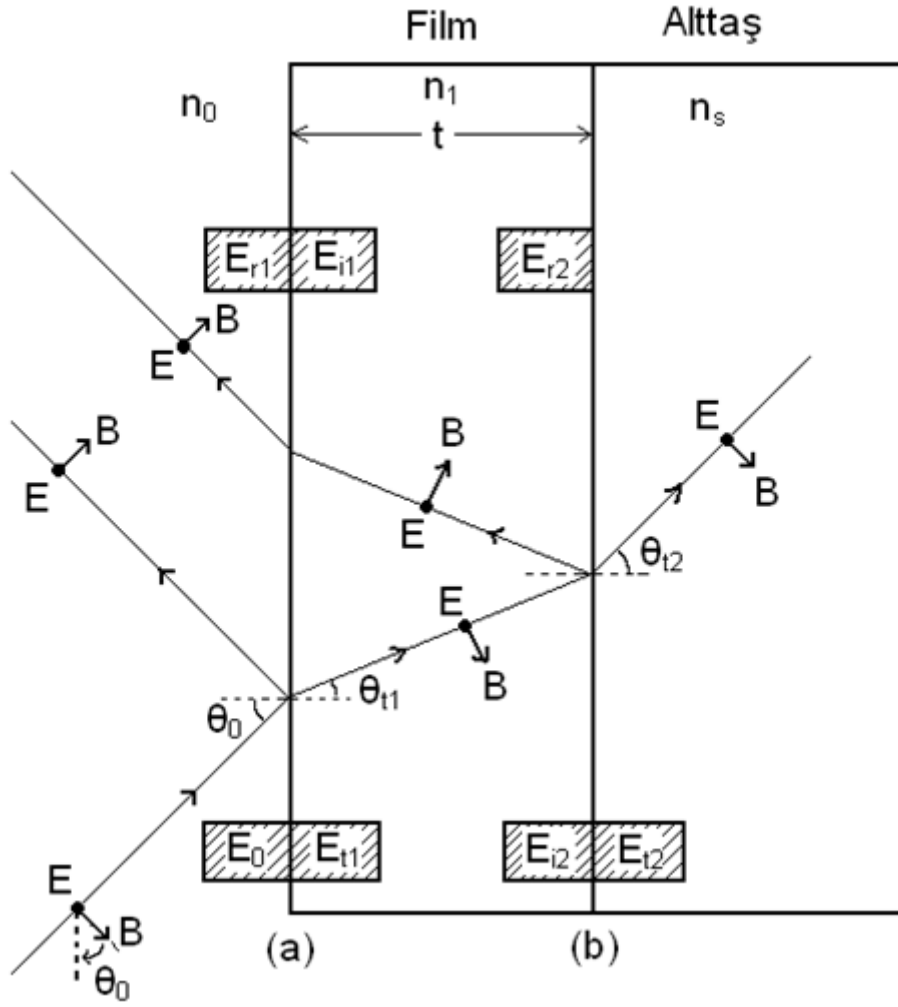
$$E = vB \quad (2.31)$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (2.32)$$

ε_0 ve μ_0 sırasıyla boşluğun elektrik geçirgenliği ve manyetik geçirgenliğidir. Böylece manyetik ve elektrik alan bileşenlerinin genlikleri arasındaki ilişki:

$$B = \frac{E}{v} = \left(\frac{n}{c}\right) E = n\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} E \quad (2.33)$$

ile verilir. Tek katmandan bir ışık demetinin yansıması incelenerek Maxwell sınır koşullarının uygulanacağı nicelikler tanımlanabilir (Şekil 2.18.).



Şekil 2.18. Tek katmanlı filmde ışık demetinin yansıması.

Işık demetinin elektrik alan bileşeni, geliş düzlemine dik seçilmiştir (Şekil 2.18). Yüzeye gelen ışık demetinin bir kısmı, ilk olarak, arakesit (a) düzleminde dış yansımaya uğrayarak kırma indisi n_0 ile gösterilen dış ortama çıkmaktadır. Demetin geri kalan kısmı, kırma indisi n_1 olan manyetik olmayan ($\mu = \mu_0$) film içerisine geçmekte ve burada bir kısmı arakesit (b) düzleminde iç yansımaya uğrarken, bir kısmı kırma indisi n_s ile gösterilen alttaş malzemesi içerisine geçmektedir. Her bir demet boyunca elektrik alan bileşenleri sayfa düzleminden dışarı doğru (-z yönü) gösterilirken, manyetik alan bileşenleri de “Eş. 2.30” ‘u sağlayacak yönde gösterilmiştir. Manyetik alanın y bileşeninin yansımada ters döndüğüne dikkat edilmelidir (Pedrotti et al., 2007).

Örneğin, E_{r1} , (a) arakesitinde filmde yansıtılan bütün çok katlı yansımaların toplamını gösterirken; E_{r2} , (b) arakesitinde alttaş yüzeyinden yansıtılan bütün çok katlı yansımaların toplamını göstermektedir.

Öncelikle filmin homojen ve izotropik olduğu varsayılmaktadır. (a) ve (b) arakesitleri üzerine gelen düzlem dalgaların elektrik ve manyetik alan bileşenleri için sınır koşullarını basit olarak inceleyelim: $\vec{E}$ ve $\vec{B}$ alanlarının teğet bileşenleri arakesit üzerinde sürekli olup, her iki taraftaki büyüklükleri birbirine eşittir. Şekil 2.18. 'deki durum düşünüldüğünde; $\vec{E}$, her yerde (a) ve (b) arakesitlerine teğet iken; $\vec{B}$, y yönünde teğet bir bileşen ve x yönünde dik bir bileşenden oluşturmaktadır. Böylece her iki arakesit de elektrik alan bileşenleri için sınır şartları:

$$E_a = E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \quad (2.34)$$

$$E_b = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \quad (2.35)$$

ile verilir. Manyetik alan bileşenleri:

$$B_a = B_0 \cos \theta_0 - B_{r1} \cos \theta_0 = B_{t1} \cos \theta_{t1} - B_{i1} \cos \theta_{t1} \quad (2.36)$$

$$B_b = B_{i2} \cos \theta_{t1} - B_{r2} \cos \theta_{t1} = B_{t2} \cos \theta_{t2} \quad (2.37)$$

İle verilir. “Eş.2.34.”, “Eş.2.35.”, “Eş.2.36.” ve “Eş.2.37.” kullanılarak yeniden düzenlenerek elektrik alan bileşenleri cinsinden ifade edilir.

$$B_a = \gamma_0 (E_0 - E_{r1}) = \gamma_1 (E_{t1} - E_{i1}) \quad (2.38)$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{i2} - E_{r2}) = \gamma_s E_{t2} \quad (2.39)$$

$$\gamma_0 = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_0 \quad (2.40)$$

$$\gamma_1 = n_1 \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} \quad (2.41)$$

$$\gamma_s = n_s \sqrt{\varepsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t2} \quad (2.42)$$

E_{i2} , E_{t1} 'den sadece faz farkı δ 'dan dolayı farklıdır.

$$\delta = k_0 \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 t \cos \theta_{t1} \quad (2.43)$$

$$E_{i2} = E_{t1} e^{-i\delta} \quad (2.44)$$

$$E_{i1} = E_{r2} e^{-i\delta} \quad (2.45)$$

“Eş. 2.35.” ve “Eş. 2.39.”, “Eş. 2.44.” ve “Eş. 2.45.” kullanılarak (b) 'deki sınır koşulları içinde E_{i2} ve E_{r2} yok edildiğinde,

$$E_b = E_{t1} e^{-i\delta} + E_{i1} e^{i\delta} = E_{t2} \quad (2.46)$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{t1} e^{-i\delta} - E_{i1} e^{i\delta}) = \delta_s E_{t2} \quad (2.47)$$

ile ifade edilir. “Eş. 2.46.” ve “Eş.2.47.” kullanılarak E_{t1} ve E_{i1} , E_b ve B_b cinsinden,

$$E_{t1} = \left(\frac{\gamma_1 E_b + B_b}{2\gamma_1} \right) e^{i\delta} \quad (2.48)$$

$$E_{i1} = \left(\frac{\gamma_1 E_b - B_b}{2\gamma_1} \right) e^{-i\delta} \quad (2.49)$$

bağıntıları ile verilir.

(a) sınırı için “Eş. 2.48.” ve “Eş. 2.49.”, “Eş. 2.34.” ve “Eş.2.38.” da kullanılıp, $2\cos\delta = e^{i\delta} + e^{-i\delta}$ ve $2i\sin\delta = e^{i\delta} - e^{-i\delta}$ trigonometrik bağıntılarından yararlanıldığında:

$$E_a = E_b \cos \delta + B_b \left(\frac{i \sin \delta}{\gamma_1} \right) \quad (2.50)$$

$$B_a = E_b (i \gamma_1 \sin \delta) + B_b \cos \delta \quad (2.51)$$

elde edilir. Bu iki denklem çifti “Eş. 2.52.” de verildiği gibi bir matris formunda ifade edilebilir:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{\gamma_1} \\ i \gamma_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix} \quad (2.52)$$

“Eş. 2.53.” de genel formu ile verilmiş olan 2×2 ‘lik matris, filmin ‘transfer matrisi’ olarak adlandırılır.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.53)$$

Eğer sınır (b) ‘de alttaşı değil de başka bir film arakesiti olsaydı, “Eş. 2.52.” aynı şekilde kalırdı. E_b ve B_b alanları ikinci bir transfer matrisiyle, ikinci film katmanının altındaki sınırda, E_c ve B_c alanlarıyla ilişkilendirilirdi. Bu formalizmi N katmanlı bir yapı için genelleştirilirse:

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_N \begin{bmatrix} E_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (2.54)$$

M_T bütün çok katmanlı yapıyı ifade etmektedir ve her bir katmana ait transfer matrislerinin çarpımına eşittir.

$$M_T = M_1 M_2 M_3 \dots M_N \quad (2.55)$$

Şimdi inceleyeceğimiz durum için transfer matrisini bulabilmek için “Eş. 2.34.”, “Eş. 2.35.”, “Eş. 2.38.” ve “Eş. 2.39.” ‘e dönerek gerekli ifadeleri yerlerine yazılırsa:

$$E_a = E_0 + E_{r1} \quad (2.56)$$

$$E_b = E_{t2} \quad (2.57)$$

$$B_a = \gamma_0(E_0 - E_{r1}) \quad (2.58)$$

$$B_b = \gamma_s E_{t2} \quad (2.59)$$

$$\begin{bmatrix} E_0 + E_{r1} \\ \gamma_0(E_0 - E_{r1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta & \frac{i \sin\delta}{\gamma_1} \\ i\gamma_1 \sin\delta & \cos\delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2} \\ \gamma_s E_{t2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2} \\ \gamma_s E_{t2} \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

“Eş. 2.60.”, “Eş. 2.61.” ve “Eş. 2.62.” ile verilen ifadelerle özdeşleşir.

$$E_0 + E_{r1} = m_{11}E_{t2} + m_{12}\gamma_s E_{t2} \quad (2.61)$$

$$\gamma_0(E_0 - E_{r1}) = m_{21}E_{t2} + m_{22}\gamma_s E_{t2} \quad (2.62)$$

Bu iki denklemi E_0 ile bölünüp, yansıma katsayısı olarak r ve geçirgenlik katsayıları t kullanılırsa,

$$1 + r = m_{11}t + m_{12}\gamma_s t \quad (2.63)$$

$$\gamma_0(1 - r) = m_{21}t + m_{22}\gamma_s t \quad (2.64)$$

Yansıma ve geçirgenlik katsayıları, “Eş. 2.65.” ile verilir:

$$r = \frac{E_{r1}}{E_0} \quad \text{ve} \quad t = \frac{E_{t2}}{E_0} \quad (2.65)$$

“Eş. 2.63.” ve “Eş. 2.64.” çözülürse, transfer matrisinin elemanları cinsinden sırası ile “Eş. 2.66.” ve “Eş. 2.67.” ile verilen yansıma ve geçirme katsayıları elde edilir.

$$r = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} - m_{21} - \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (2.66)$$

$$t = \frac{2 \gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (2.67)$$

“Eş. 2.52” ile verilen matris elemanları ile birlikte “Eş. 2.66.” ve “Eş. 2.67.” artık tek ya da çok katmanlı filmin yansıtma ve geçirgenlik özelliklerinin hesaplanmasına imkan verir.

Matris teorisini, basit olması için, ışığın film yüzeyine normal gelmesi durumunda inceleyelim. Işığın yüzeye normal olarak gönderilmesi, pratikte çok yaygın olarak uygulanır ve burada elde edeceğimiz sonuçlar ışığın yüzeye normale yakın gelişleri için de oldukça kullanışlıdır. Işık demeti bütün arakesit yüzeylerine normal olarak gelirse, bu şimdiye kadar incelediğimiz bağıntılardaki bütün açıların sıfır olması sonucunu getirir. Bu durumda, “Eş. 2.52” ile verilen matris elemanları yazılırsa:

$$\begin{aligned} m_{11} &= \cos\delta & m_{12} &= \frac{i \sin\delta}{n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \\ m_{21} &= i n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \sin\delta & m_{22} &= \cos\delta \end{aligned} \quad (2.68)$$

Bu matris elemanları “Eş. 2.66.” de yerine yazıp, sabit $\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}$ terimleri çarpan olarak alınırsa, bazı basitleştirmeler yapıldıktan sonra, yansıtma katsayısı r yeniden bu özel durum için elde edilir:

$$r = \frac{n_1(n_0 - n_s)\cos\delta + i(n_0 n_s - n_1^2)\sin\delta}{n_1(n_0 + n_s)\cos\delta + i(n_0 n_s + n_1^2)\sin\delta} \quad (2.69)$$

Artık yansıtma R , parametreler cinsinden ifade edilebilir.

$$R = |r|^2 \quad (2.70)$$

Yansıtma katsayısı r , kompleks bir niceliktir.

$$r = \frac{A + iB}{C + iD} \quad (2.71)$$

$$|r|^2 = rr^* = \left(\frac{A+iB}{C+iD} \right) \left(\frac{A-iB}{C-iD} \right) = \frac{A^2+B^2}{C^2+D^2} \quad (2.72)$$

Sonuç olarak yansıtma,

$$R = \frac{n_1^2(n_0 - n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s - n_1^2)^2 \sin^2 \delta}{n_1^2(n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \delta} \quad (2.73)$$

şeklinde elde edilmiş olur (Pedrotti et al., 2007).

Benzer şekilde geçirgenliğin elde edilmesinde “Eş. 2.67.” deki geçirgenlik katsayısı ifadesinde “Eş. 2.68.” deki matris elemanları yerine yazılıp, sabit $\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}$ terimleri çarpan olarak alınırsa, bazı basitleştirmeler yapıldıktan sonra, geçirme katsayısı t yeniden bu özel durum için elde edilir.

$$t = \frac{2 n_0 n_1}{n_1(n_0 + n_s) \cos \delta + i(n_0 n_s + n_1^2) \sin \delta} \quad (2.74)$$

Geçirgenlik T , parametreler cinsinden ifade edilebilir.

$$T = |t|^2 \left(\frac{n_s}{n_0} \right) \quad (2.75)$$

Geçirme katsayısı t , kompleks bir niceliktir.

$$t = \frac{A}{C + iD} \quad \text{ve} \quad t = \frac{A}{C - iD} \quad (2.76)$$

$$|t|^2 = tt^* = \left(\frac{A}{C+iD} \right) \left(\frac{A}{C-iD} \right) = \frac{A^2}{C^2+D^2} \quad (2.77)$$

Sonuçta geçirgenlik,

$$T = \frac{4 n_0 n_s n_1^2}{n_1^2 (n_0 + n_s)^2 \cos^2 \delta + (n_0 n_s + n_1^2)^2 \sin^2 \delta} \quad (2.78)$$

ile verilir.

3. OPTİK TASARIM ÇALIŞMALARI

Çok katmanlı optik kaplamalar belirlenen amaçlar doğrultusunda derin ultraviyole bölgesinden uzak kızılötesi bölgesine kadar bütün optik spektrum için tasarlanabilmektedir. Optik kaplamaların tasarımı, kaplama üzerine gelen ışığın katmanlar arasında ardışık yansımalarından dolayı uğradığı girişim etkilerinin amaçlanan optik cevabı elde edecek şekilde, katman kırma indisleri ve kalınlıklarının belirlenmesi yöntemiyle, dalgaboyuna bağlı optik yansıtmanın hesaplanarak elde edilmesini gerektirmektedir. İnce filmlerde matris teorisinden elde edilen sonuçlar, MATLAB programında kullanılarak çeşitli tasarım programları yazılmıştır. Tasarım programlarında polarize olmayan (unpolarized) ışığın film yüzeyine normal geldiği varsayılmıştır. Işığın yüzeye normal olarak gönderilmesi ile elde edilen sonuçlar, ışığın yüzeye normale yakın gelişleri için de oldukça kullanışlıdır.

Kuramsal tasarım çalışmaları kapsamında TiO_2 - SiO_2 ve ZrO_2 - SiO_2 malzeme çiftleri kullanılarak elektromanyetik spektrumun değişik bölgeleri için yansıtmasız ve geniş bant yansıtmasız kaplamalar, lazerler için yüksek yansıtan dielektrik aynalar, bant geçiren filtreler ile teknolojik ve bilimsel uygulamalarıyla kritik öneme sahip olan pek çok optik filtre tasarımı yapılmıştır.

3.1. Dielektrik Ayna Tasarımları

Dielektrik aynalar zor çalışma şartlarında yüksek yansıtma özelliğine sahiptirler. Bu aynaların optik modellemesinde, düşük kırma indisli SiO_2 ($n=1.46$) filmi yüksek kırma indisli ZrO_2 ($n=2.1$) veya TiO_2 ($n=2.39$) filmleriyle ikili katmanlar şeklinde sıralı olarak alınır. Referans dalgaboyu dikkate alınarak her katmanın optik kalınlığı çeyrek dalgaboyu ($\lambda/4$) olan katmanlardan oluşacak şekilde belirlenir ve bu nedenle her katmanın ara yüzeyinden yansıyan ışınlar yapıcı girişim yapar.

Yüksek yansıtımlı katmanlar için transfer matrisinde her katmanın optik kalınlığının $\lambda/4$ alınmasıyla, gerekli çözümler yapıldığında normal geliş açısında ve λ 'da kuramsal optik yansıtma:

$$R_{max} = \left[\frac{(n_0/n_s)(n_L/n_H)^{N-1}}{(n_0/n_s)(n_L/n_H)^{N+1}} \right]^2 \quad (3.1)$$

İle verilir. Burada N toplam katman sayısı, n_0 havanın kırma indisi, n_s alttaşın kırma indisi, n_L düşük kırma indisi ve n_H yüksek kırma indisidir. Bu denklem ile düşük ve yüksek kırma indisine sahip iki filmin istenilen katman sayısında sıralı olarak oluşturmasıyla elde edilen dielektrik filmin optik yansıtması kuramsal olarak bulunabilir. Burada önemli olan nokta dielektrik filmin optik modellemesinde kullanılan ince film malzemelerinin kırma indislerinin birbirlerine oranının (n_L/n_H) küçük ve sıfıra yakın olmasıdır. Bu oran sıfıra yaklaştıkça oluşturulan dielektrik aynanın optik yansıtması da % 100 'e yaklaşmaktadır (Çizelge 3.1.).

Çizelge 3.1. N=6 Katmanlı yüksek-düşük indisli çok katmanlı filmin n_L/n_H oranına karşı optik yansıtma değeri (Pedrotti et al., 2007).

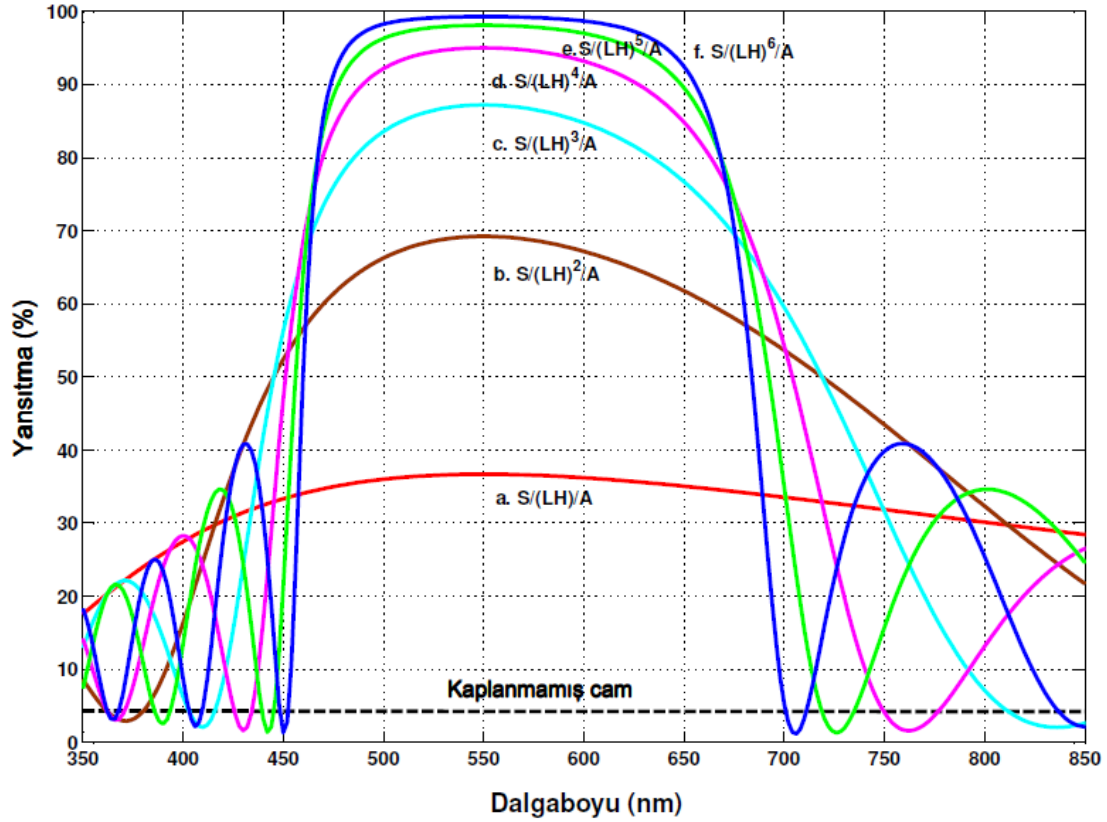
n_L/n_H	$R(\%)$
1.00	4.26
0.91	21.01
0.83	40.82
0.77	57.77
0.71	70.44
0.67	79.35
0.625	85.48
0.59	89.67
0.56	92.55
0.53	94.56
0.50	95.97

Çizelge 3.2. SiO₂ ve TiO₂ ince filmleriyle oluşturulan çok katmanlı ince filmin katman sayısı N 'e bağlı olarak optik yansıtma değeri ($n_L/n_H = 0.611$).

N (Katman Sayısı)	R(%)
2	36.69
4	69.25
6	87.21
8	95.02
10	98.11
12	99.29
14	99.73
16	99.90
18	99.96
20	99.98
22	99.99

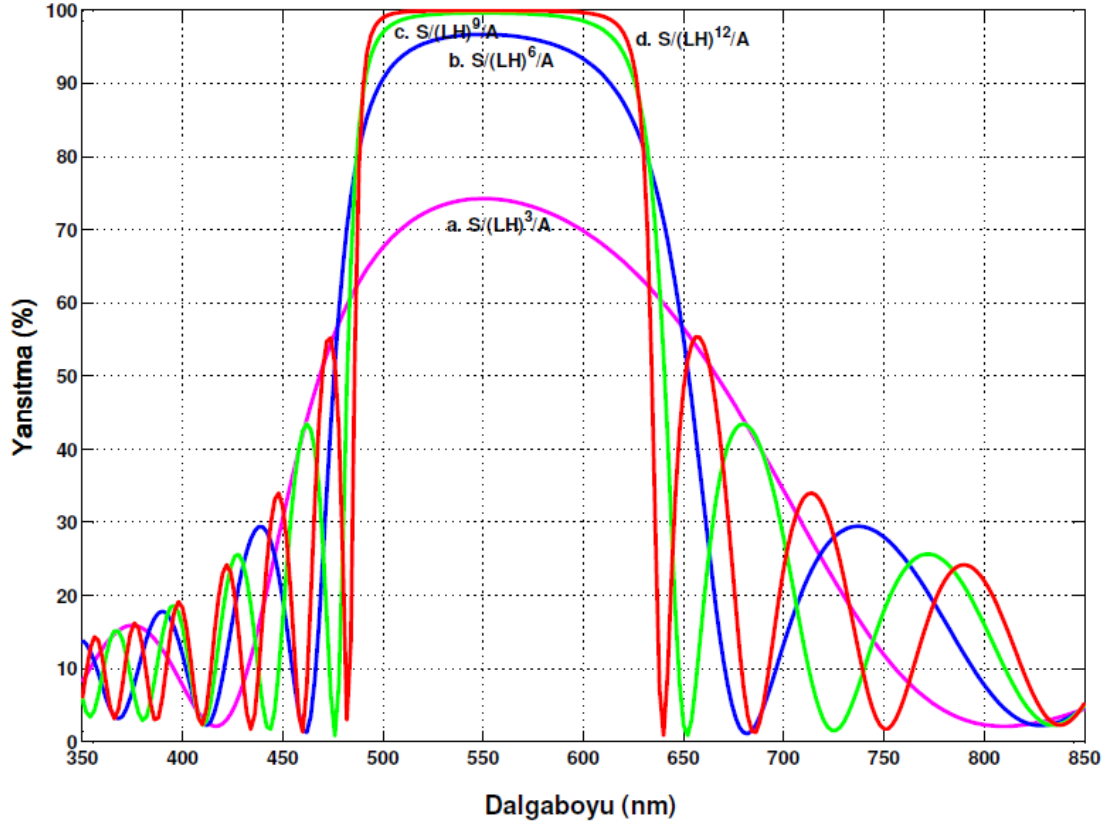
SiO₂ ve TiO₂ ince filmleri kullanılarak elektromanyetik spektrumun görünür bölgesi için cam alttaşı üzerine optik kalınlığı $\lambda/4$ olan katmanlardan oluşacak şekilde tasarımı yapılmış çok katmanlı kaplamanın dalgaboyuna bağlı yansıtma değişimleri verilmiştir (Şekil 3.1.). Görüldüğü gibi 550 nm referans değerinde iki katlı kaplamada yansıma değeri %37 oranındayken, altı katlı kaplamada %88, on iki katlı kaplamada ise bu değer %99 civarlarındadır. Bu değerler kuramsal optik yansıtma değerleri ile tamamen uyum içerisindedir (Çizelge 3.2.).

Günlük hayatta kullanılan sıradan bir aynanın optik yansıtmasının %88 civarında olduğunu düşünürsek, burada sunulan örneklerin oluşturduğu yüksek mekanik sertliğe ve ısı dayanıklılığına sahip dielektrik aynanın önemi daha iyi ortaya çıkacaktır. Şekil 3.1.'de yer alan model çalışmadan da görüldüğü gibi, katman sayısının 8 ve üzerine çıkarılması ile %95 'den büyük optik yansıtma elde edilecektir.



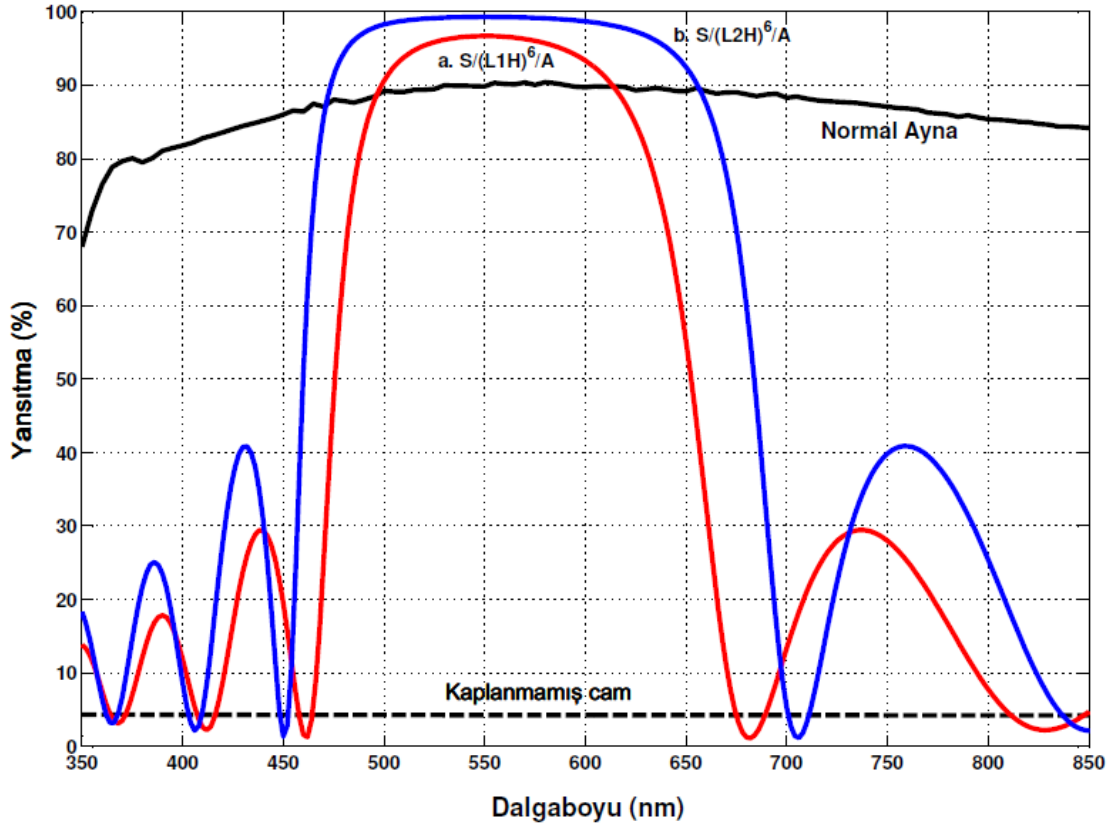
Şekil 3.1. Referans dalgaboyu 550 nm alınarak $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ sıralı katmanlarla tasarlanmış, film kalınlıkları $\lambda/4$ olan çok katmanlı optik ince filmlerin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimleri. a. 2 Katmanlı, b. 4 Katmanlı, c. 6 Katmanlı, d. 8 Katmanlı, e. 10 Katmanlı, f. 12 Katmanlı; S: Cam Alttaş, H: TiO_2 ($n_H=2.39$), L: SiO_2 ($n_L=1.46$), A: Hava, N: Toplam katman sayısı.

Aynı yöntemle SiO_2 ve ZrO_2 ince filmleri kullanılarak elektromanyetik spektrumun görünür bölgesi için cam alttaş üzerine optik kalınlığı $\lambda/4$ olan katmanlardan oluşacak şekilde tasarımı yapılmış çok katmanlı kaplamanın dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimleri verilmiştir (Şekil 3.2.). Şekilden görüldüğü gibi 550 nm referans dalgaboyu değerinde altı katmanlı kaplamada yansıma değeri %74 oranındayken, on iki katmanlı kaplamada %96, on sekiz katmanlı kaplamada %99.6 ve yirmi dört katmanlı kaplamada ise bu değer %99.9 civarındadır.



Şekil 3.2. Referans dalgaboyu 550 nm alınarak $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ sıralı katmanlarla tasarlanmış, film kalınlıkları $\lambda/4$ olan çok katmanlı optik ince filmlerin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimleri. a. 6 Katmanlı, b. 12 Katmanlı, c. 18 Katmanlı, d. 24 Katmanlı S: Cam Alttaş, H: ZrO_2 ($n_H=2.1$), L: SiO_2 ($n_L=1.46$), A: Hava, N: Toplam katman sayısı.

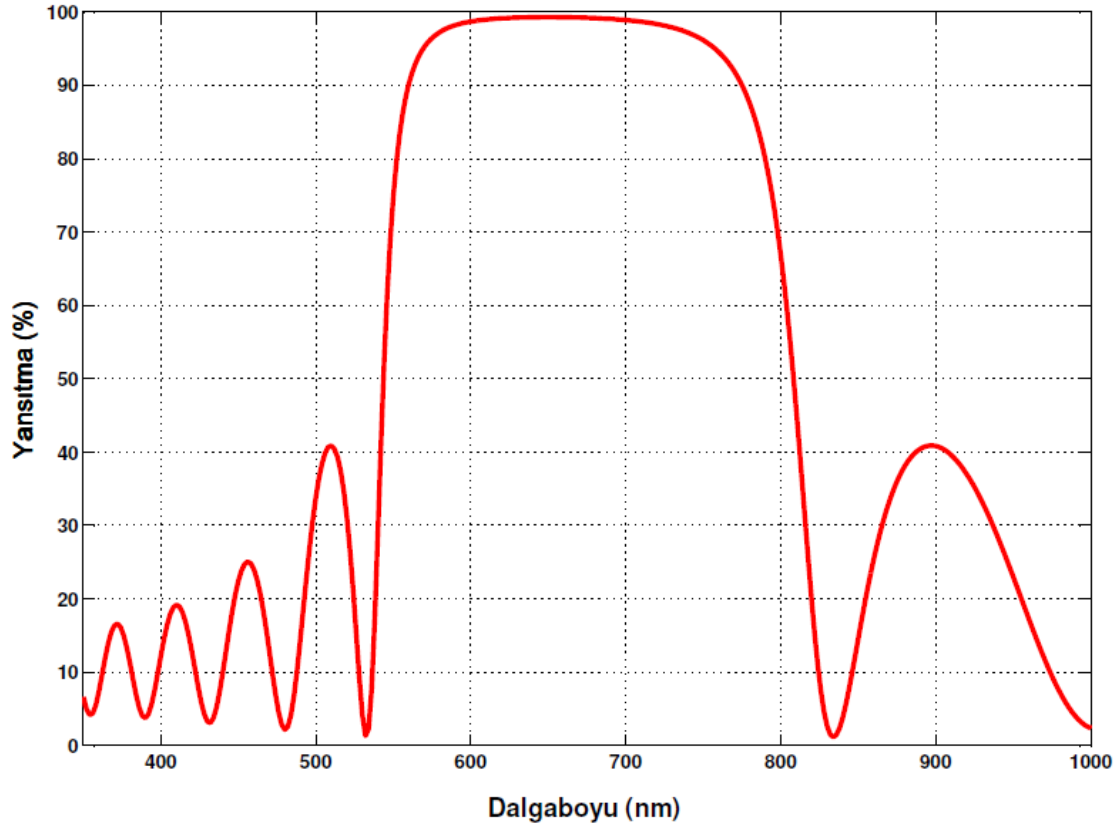
Çok katmanlı dielektrik ayna tasarımlarında ZrO_2 'de aynı TiO_2 gibi yüksek kırma indisli malzeme olarak kullanılabilir. Ama ZrO_2 kırma indisinin TiO_2 kırma indisine göre küçük olmasından dolayı, dielektrik ayna tasarımıındaki temel prensip olan n_L/n_H oranının büyümesine yol açar. Bu sebeple aynı katman sayısı ve kalınlığa sahip bir dielektrik ayna oluşturmak için yüksek indisli malzeme olarak genellikle TiO_2 ince filmi seçilir. 550 nm referans dalgaboyunda, ikili $\text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2$ ve $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ katmanlarıyla tasarlanmış on iki katmanlı dielektrik aynaların dalgaboyuna bağlı optik yansıtma değerlerinin karşılaştırılması gösterilmiştir (Şekil 3.3.). Normal aynaya göre her iki tasarımda daha iyi sonuç vermektedir.



Şekil 3.3. a. 12 Katmanlı $\text{SiO}_2 - \text{ZrO}_2$ dielektrik aynası ve b. 12 Katmanlı $\text{SiO}_2 - \text{TiO}_2$ dielektrik aynalarının dalgaboyuna bağlı model yansıtmaları ile, normal ayna ve kaplanmamış camın dalgaboyuna bağlı optik yansıtma değerlerinin karşılaştırılması.

Aynı katman sayısında, ZrO_2 filmleriyle hazırlanan çok katmanlı dielektrik aynaların dezavantajı, TiO_2 filmleriyle hazırlanan dielektrik aynalara göre daha az optik yansıtma vermesidir (Şekil 3.3.).

Çok katmanlı dielektrik aynalar özellikle spesifik çalışmalarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulama örneklerinden biri ise lazer sistemlerinde sıkça kullanılan yüksek kırmızı yansıtan aynalardır (red mirror). Bu aynanın dalgaboyuna bağlı olarak optik yansıtma değişimi gösterilmiştir (Şekil 3.4.). Şekilde görüldüğü gibi tasarım 650 nm 'de % 99 civarında optik yansıtma vermektedir.

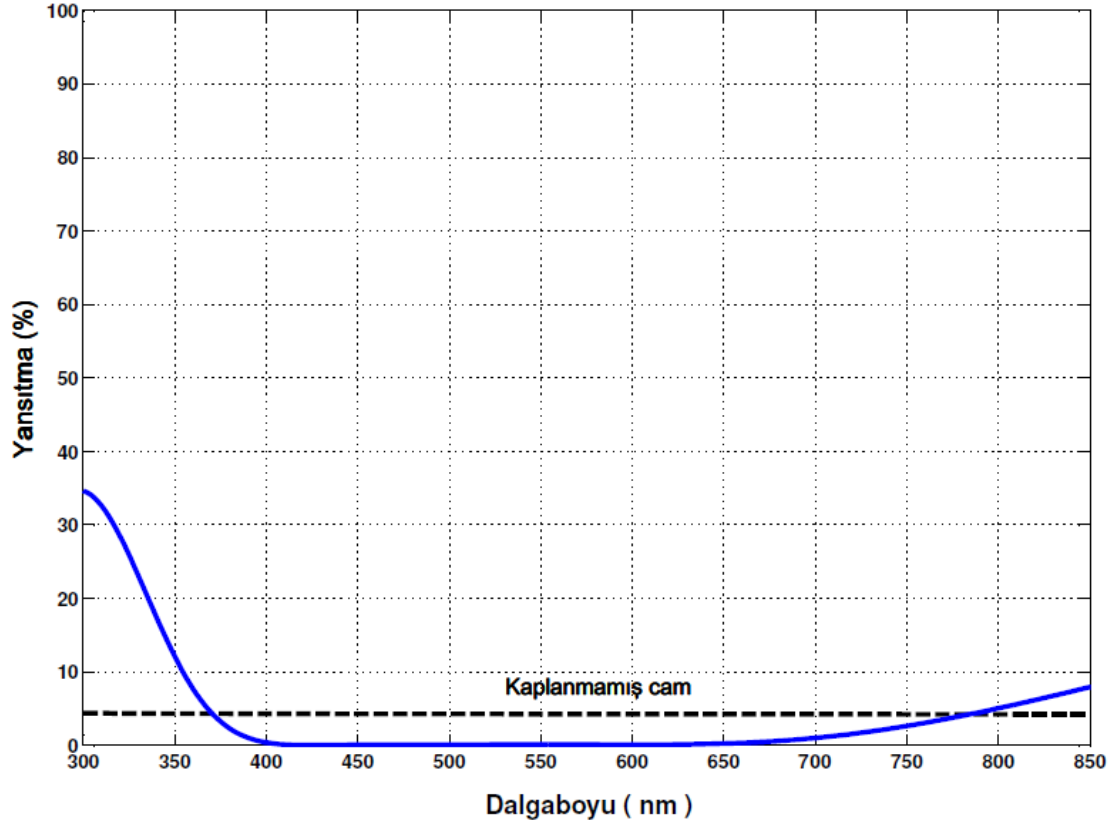


Şekil 3.4. Referans dalgaboyu 650 nm alınarak tasarlanmış yüksek kırmızı yansıtan aynanın dalgaboyuna bağlı model yansıtma eğrisi. $S/(LH)^6/A$, S: Cam alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.

3.2. Yansıtmasız Filtre Tasarımları

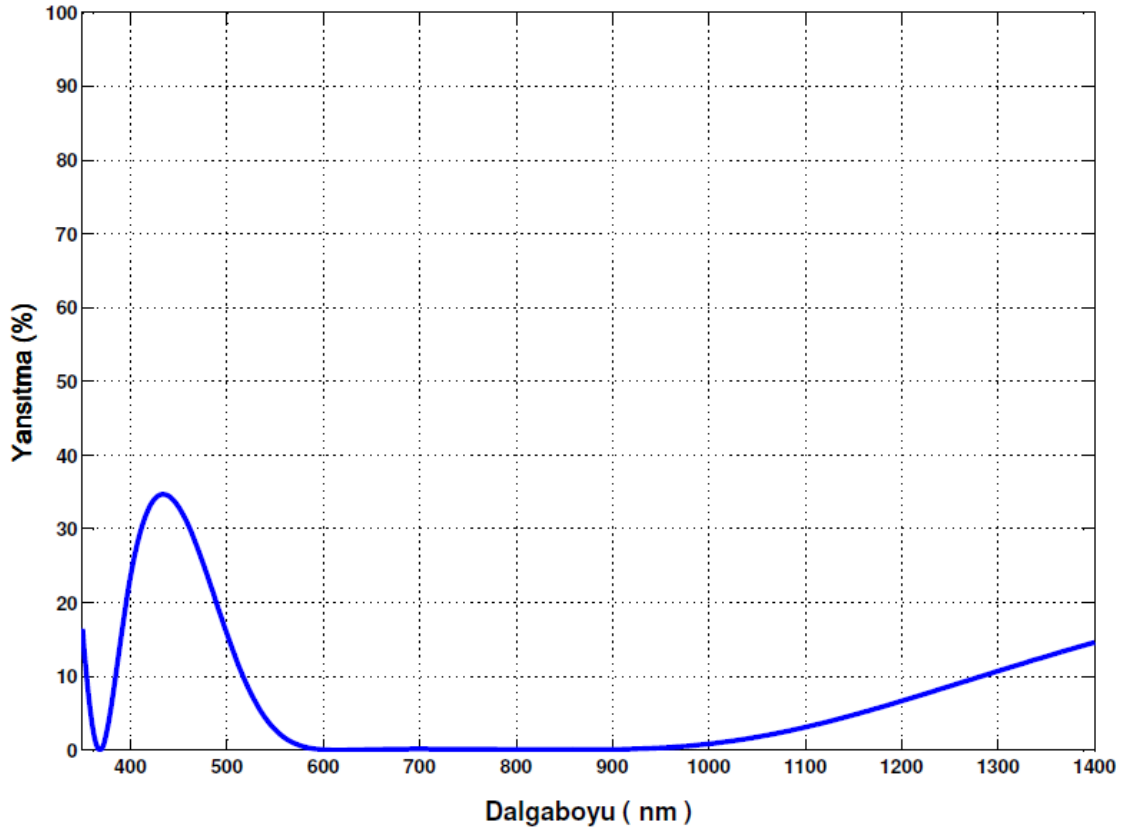
SiO_2 ve TiO_2 ince filmleriyle yüksek yansıtımlı dielektrik ayna tasarımları yapılabildiği gibi yansıtmasız filtre tasarımları da yapmak mümkündür. Yansıtmasız filtre tasarımlarında çalışılan spektral bölgeye göre katmanları oluşturan filmlerin kalınlıkları özel olarak belirlenir. Çok katmanlı yansıtmasız filtrelerde her katman ara yüzünden yansıyan ışınlar yıkıcı girişim yaparak toplam yansıma neredeyse sıfır olur (Jeong et al., 2004). Yansıtmasız kaplamalar çok çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Özellikle cam lenslerde, gözlük camlarında, lazerlerde, güneş panellerinde, IR diyotlarda, çok amaçlı geniş ve dar bant geçiren filtrelerde, mimaride kullanılan camlarda, otomobil camlarında, Lcd ve plazma ekranlarında kullanılmaktadır (Durusoy vd., 2003; Duyar ve Durusoy, 2004).

Elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde referans dalgaboyu 500 nm alınarak, SiO₂ ve TiO₂ ince filmlerinin özel olarak belirlenmiş kalınlıkları kullanılarak hazırlanmış 4 katmanlı yansıtmasız filtre tasarımının model yansıtma değişimi Şekil 3.5.'de gösterilmiştir. Burada 400 nm ve 650 nm arasında yansıtma neredeyse sıfırdır. Bu özelliği sayesinde görünür bölgede yansıma yapması istenmeyen camlar için bu tasarım kullanılabilir (Şekil 3.5.).



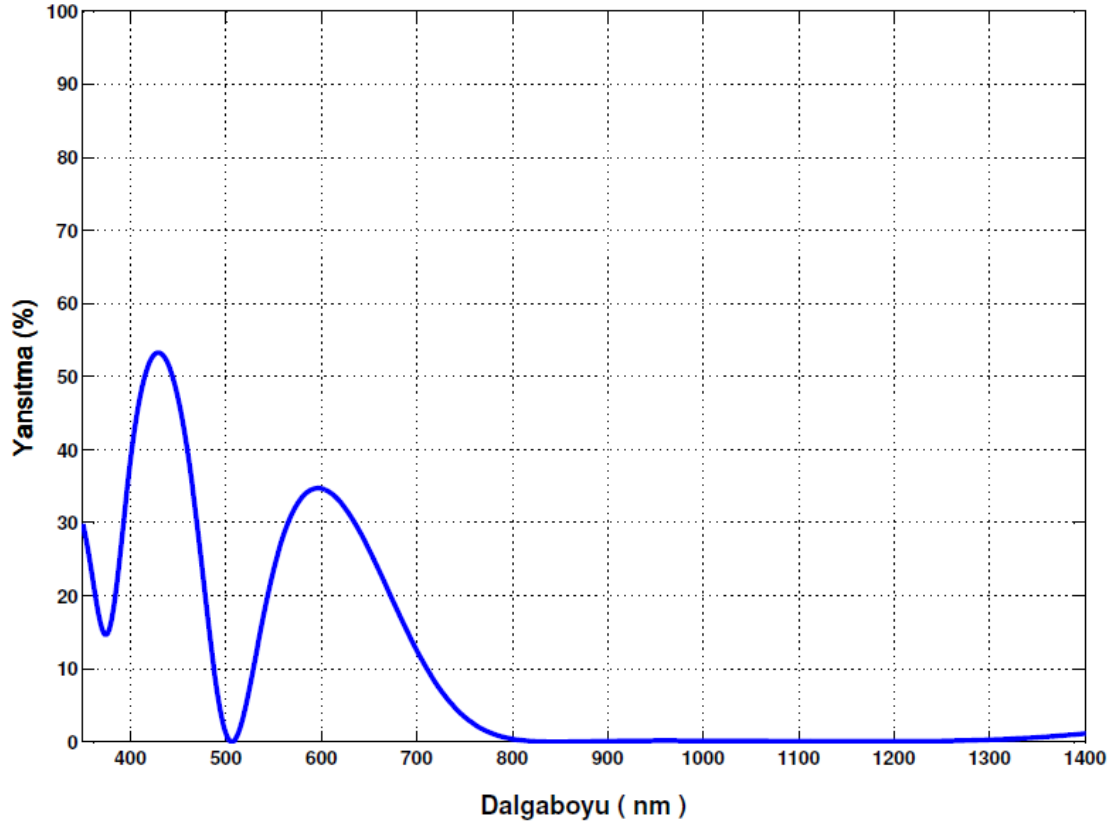
Şekil 3.5. Referans dalgaboyu 500 nm alınarak tasarlanmış dört katmanlı yansıtmasız filtrenin dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimi. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Altaş, H: TiO₂ ($n_H=2.39$), L: SiO₂ ($n_L=1.46$), A: Hava.

Referans dalgaboyu 800 nm alınarak, TiO_2 – SiO_2 sıralı katmanlarıyla ve farklı katman kalınlıklarında tasarlanmış 4 katmanlı optik filtrenin dalgaboyuna bağılı olarak model yansıtma değışimi görölmektedir (Şekil 3.6.). Kızılötesi bölgesinde her katmanın kalınlığı büyüyeceğı için bu bölgelerde katmanlı film yapmak gittikçe zorlaşır. Film kalınlığı arttıkça film içinde oluşacak stres nedeni ile filmin pul pul dökölmesi tehlikesi vardır. Bu nedenle 3-5 μm ve 8-12 μm gibi endüstriyel-savunma alanı olan bölgelerde katmanlı film hazırlamak için iyon bombardımanı yardımı olan özel kaplama sistemleri geliştirilmiştir.



Şekil 3.6. Referans dalgaboyu 800 nm alınarak, farklı katman kalınlıkları ile tasarlanmış 4 katmanlı optik filtre tasarımının dalgaboyuna bağılı model yansıtma değışimi. $S/(HL)^2/A$, S: Cam Alttaş, H: TiO_2 ($n_H=2.39$), L: SiO_2 ($n_L=1.46$), A: Hava.

Optik alışmalar konusunda birçok uygulaması olan elektromanyetik spektrumun yakın kızılötesi bölgesi hedeflenerek 4 katmanlı optik filtre tasarımı yapılmış ve dalga boyuna bağlı model yansıtma değişimi verilmiştir (şekil 3.7.). Özellikle savunma sanayi uygulamalarına örnek olarak gece görüş sistemlerinde çok katlı filtrelerin çok önemli bir yeri vardır.



şekil 3.7. Referans dalgaboyu 1100 nm alınarak, farklı katman kalınlıklarında tasarlanmış 4 katmanlı optik filtre tasarımının dalgaboyuna bağlı model yansıtma değişimi. $S/(HL)^2/A$, S:Cam Altaş, H: TiO_2 ($n_H=2.39$), L: SiO_2 ($n_L=1.46$), A: Hava

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

4.1. Örnek Hazırlama Düzenegi

4.1.1. RF/DC magnetron kopartma sistemi

Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü İnce Film Hazırlama ve Ölçüm Laboratuvarında bulunan çok katmanlı ince film hazırlama sistemi; paslanmaz çelikten yapılmış bir kazan, difüzyon pompası, mekanik pompa, magnetron kafa (2 adet), basınçölçerler (iyon, thermocouple, kapasitans gauge), RF/DC güç kaynağı, gaz akış kontrolcüsü (4 gaz girişli), kalınlık ölçer (2 adet), saf gaz besleyen kütle akışmetreleri (3 adet), saf gazlar (Argon, Oksijen ve Azot) ve kapalı devre su sisteminden oluşmaktadır (Şekil 4.1.).



Şekil 4.1. İki kafalı RF/DC magnetron kopartma (sputtering) sistemi.

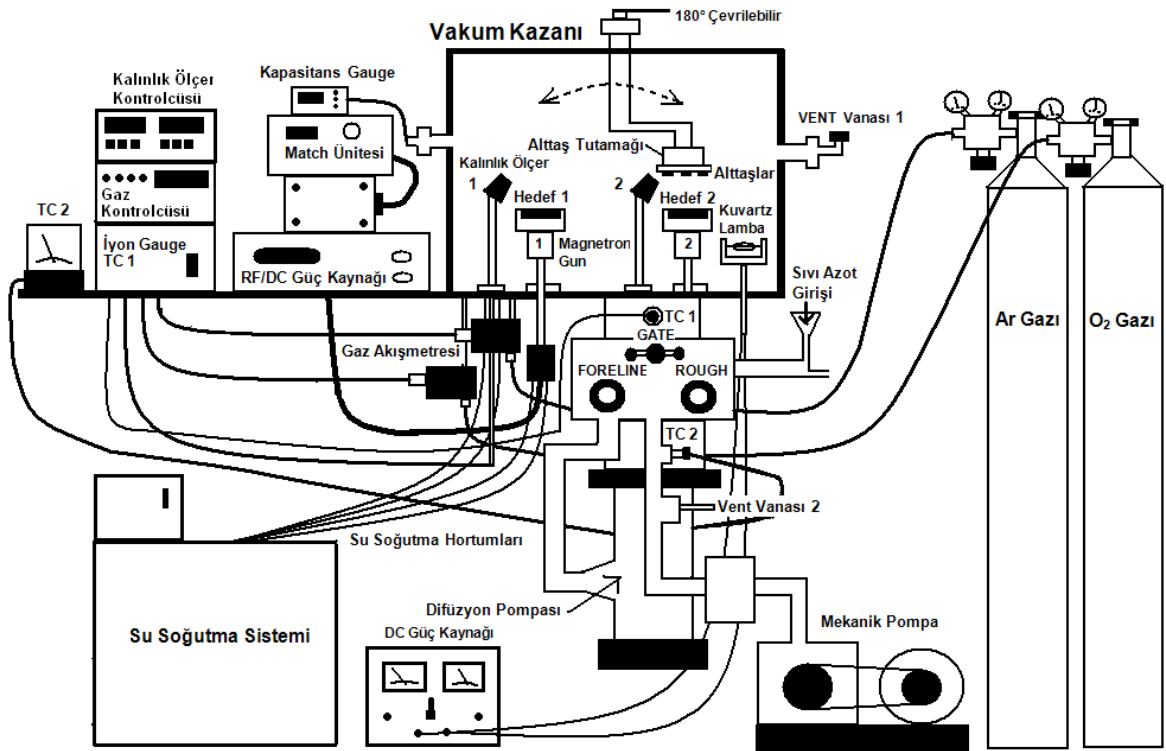
Tez çalışması kapsamında optik ince filmler silisyum ve cam olmak üzere, iki farklı alttaş üzerine kaplanmaktadır. Kaplanan filmlerin kalitesi, filmin kaplanacağı alttaşın temizliğiyle yakından ilgidir. Alttaşların temizliği özellikle filmlerin iyi yapışması/kristallenmesi açısından çok önemlidir. Temiz olmayan alttaşlar üzerine kaplanmış filmlerin kristallenmesi kötüdür ve hatta film yüzeyinde gözle görülebilecek kusurlar oluşabilir. Bu yüzden alttaşlar, kaplama işlemine geçilmeden önce büyük bir titizlikle, kimyasal temizlikten geçirilir. Vakum odasında bulunan diğer parçalar da, yerleşmeden önce kimyasal temizlik işleminden geçirilmiştir. Parçaların bir kısmı mekanik temizleme ve parlatma işlemlerinden geçirildikten sonra, kimyasal temizlemeden geçirilmiştir. Alttaşların temizliğinde izlenen yöntem şu şekildedir:

- Alttaşlar, ılık deterjanlı su doldurulmuş beherle ultrasonik temizleyiciden geçirilirler. Böylece eğer yüzeylerinde yağ kalıntıları varsa, bu kalıntılar temizlenmiş olur.
- Bu işlemten sonra alttaşlar, üzerinde deterjan kalmadığından emin olana kadar damıtılmış su ile ultrasonik temizleyici kullanılarak durulanmalıdır.
- Alttaşlar gerek duyulduğu takdirde kimyasal aşındırma için asetik asit doldurulmuş beherle ultrasonik temizleyiciden geçirilir, daha sonra saf su doldurulmuş beherle ultrasonik temizleyiciden geçirilip durulanır.
- Alttaşlar aseton doldurulmuş beherle ultrasonik temizleyiciden geçirilir. Bu işlemten sonra saf su ile durulama yapılmaz.
- Son olarak alttaşlar, izopropil alkol doldurulmuş beherle ultrasonik temizleyiciden geçirilip, tek yönde üflenerek saf Argon ya da N₂ gazları ile kurutulurlar.

Temizlenmiş alttaşlar, vakum odasına yerleştirilecek olan temizlenmiş diğer parçalar ya da hazırlanmış filmler uygun kapalı kutularda saklanır. Vakum ortamında kullanılan hiçbir malzeme çıplak elle tutulmaz. Bu işlemler için özel eldiven ve SS304-TEFLON kaplanmış cımbız kullanılır.

4.1.2. Sistemin çalıştırılması

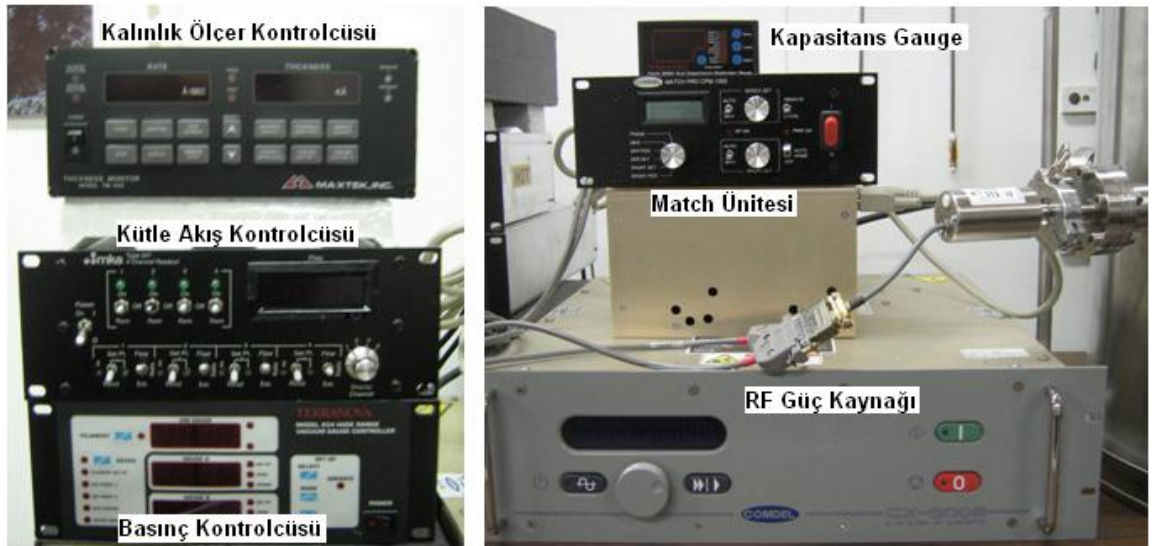
Öncelikle sistemde şalterler ve kapalı devre su girişi için vanalar açılır. Temizlenen alttaşlar, alttaş tutucuya yerleştirilip sabitlendikten sonra kazan içindeki yuvasına yerleştirilir (Şekil 4.2.). Kazan kapatıldıktan sonra VENT 1 vanası kapatılır. Vakum kazanının ısınmasını sağlayan Kuvartz lambaların yanması için DC güç kaynağı çalıştırılır. Mekanik pompayı difüzyon pompasının çıkışına bağlayan boru üzerindeki VENT 2 vanası kapalı değilse kapatılır, bununla birlikte FORELINE ve ROUGH vanaları kontrol edilir, bu vanaların kapalı olması gerekir. (VENT vanaları sistemi atmosfere açmaktadır, bu nedenle sistemi vakuma almadan önce kesinlikle kapatılmalıdır).



Şekil 4.2. RF/DC magnetron kopartma sisteminin şematik gösterimi.

Mekanik pompa çalıştırılır. Mekanik pompanın FORELINE ve ROUGH vanalarına kadar olan bölgeyi vakuma alması için beklenir. TC Gauge (TC2) 'den basınç kontrol edilir. Basıncın 10-20 mTorr seviyelerine inmesi beklenir. Difüzyon pompasındaki yağın pompa çalışırken oksitlenmesini önlemek için ilk olarak difüzyon pompasının içinin mekanik pompa yardımıyla pompalanması gerekir. Bu nedenle ilk olarak FORELINE vanası açılır. TC2'den basınç gözlenir. Basınç 10-20

mTorr civarına geldiğinde FORELINE vanası kapatılır. Vakum kazanı VENT 1 vanası kontrol edilir çünkü kazan içerisi vakumlanmadan önce VENT 1 vanasının kesinlikle kapalı olması gerekmektedir. Çalışma ortamının vakuma alınması için FORELINE vanası kapalı durumda iken ROUGH vanası açılır. Fakat bu işlem sırasında mekanik pompayı fazla zorlamamak için vana yavaş yavaş açılır. Çalışma ortamının basıncı basınçölçer (TC1) göstergesinden takip edilir. Basınç ~20 mTorr civarına geldiğinde ROUGH vanası kapatılır. (Mekanik pompa ile çalışma ortamı uzun süre ($30\text{dk} < t_{\text{mekanik}}$) vakuma alınmamalıdır. Çünkü mekanik pompanın yağı çalışma ortamına kaçabilir). ROUGH vanası kapalı durumda iken, FORELINE vanası tekrar açılır. Difüzyon pompasının fişi takılır. Difüzyon pompasının normal çalışma durumuna gelmesi için 30-40 dk gereklidir. Bu süre içerisinde difüzyon pompasının girişinde olan soğuk tuzağın sıvı azot girişinden aralıklarla sıvı azot takviyesi yapılır. Difüzyon pompasının yağı yeterli sıcaklığa ulaştığında GATE vanası yavaş yavaş açılarak tamamen açık hale getirilir. Artık difüzyon pompası çalışma ortamını pompalamaya başlamıştır. Basınç kontrolcüsünün İyon Gauge göstergesinden çalışma ortamının basıncı kontrol edilir. Vakum kazanı içindeki basınç değerinin yaklaşık $1-2 \times 10^{-6}$ Torr seviyesine kadar inmesi beklenir (Şekil 4.2.).



Şekil 4.3. Deney sisteminde kullanılan aygıtlar.

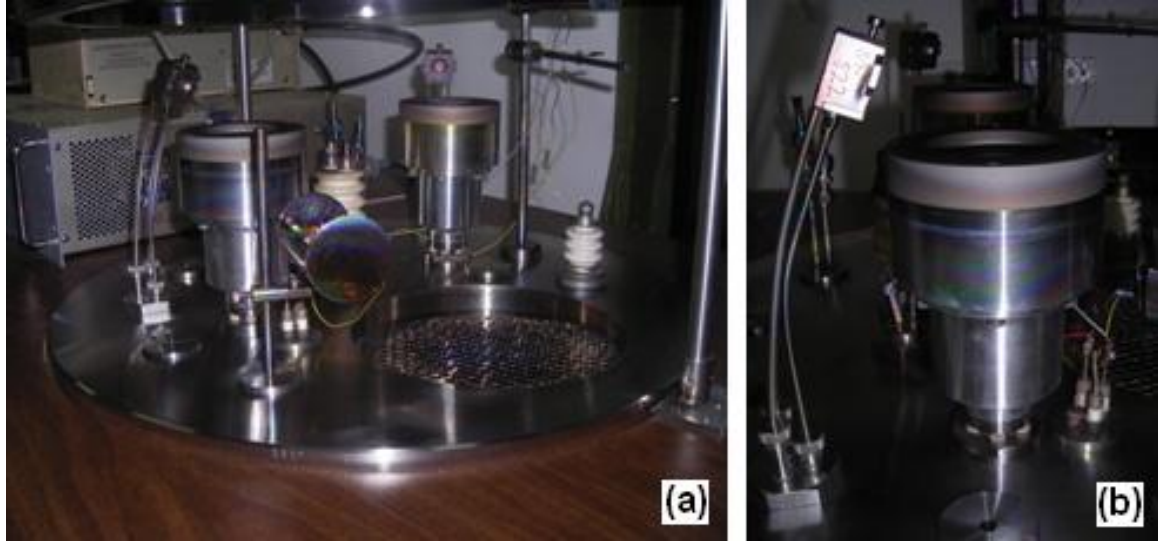
Çalışma ortamı basıncı $1-2 \times 10^{-6}$ Torr civarına indiğinde gaz hatlarının temizlenmesi amacıyla kütle akış kontrolcüsü çalıştırılır (Şekil 4.3.). Kütle akış kontrolcüsünde Argon (Ar) ve Oksijen (O_2) gazları farklı akışmetre kanallarına bağlıdır. Sırasıyla Ar ve O_2 gaz hatlarının temizlenmesi için kütle akış kontrolcüsünden içeri belirlenen gaz akışları ayarlanır. Birkaç kez 5 'er dakika süreyle tutularak gaz hatları temizlenir. Gaz hattı temizliğinden sonra çalışma ortamında çok az miktarda da olsa Ar ve O_2 gazları olacağından 5-10 dk daha $1-2 \times 10^{-6}$ Torr civarında vakuma alma işlemi devam etmelidir.

Sistemin taban basıncı $1-2 \times 10^{-6}$ Torr civarında iken, GATE vanası tamamen kapanır ve yarım tur açılır. Bu işlemle vakum kazanı içindeki basıncın yavaş yavaş artması sağlanır. Vakum kazanı basıncı $\sim 1 \times 10^{-4}$ Torr civarında sabitlenir.

O_2 gazı konsantrasyonu, çalışma ortamındaki O_2 gazı kısmi basıncına göre belirlenir. Kütle akış kontrolcüsünden O_2 gazının kütle akış değeri ayarlanarak, çalışma ortamına O_2 gazı verilir. Vakum kazanındaki basınç artışı Kapasitans Manometresinden izlenir. (Gazların kısmi basınçlarının ayarlanmasında ve deney sırasında çalışma basıncının kontrol edilmesinde Kapasitans Manometresi kullanılır.). Vakum kazanı basıncını O_2 gazı kısmi basıncına sabitlemek için, kütle akış kontrolcüsünden O_2 gazı kütle akış değeri artırılır veya azaltılır. O_2 gazı kısmi basıncı sabitlendiğinde, çalışma ortamına Ar gazı verilir. Ar gazı kütle akış değeri artırılarak veya azaltılarak çalışma basıncının 1-50 mTorr mertebelerine gelmesi ve sabitlenmesi sağlanır.

RF güç kaynağı çalıştırılmadan önce kopartma kafalarını ve kalınlık ölçerleri soğutmada kullanılan kapalı devre su sistemi çalıştırılır. RF güç kaynağında uygulanacak güç değeri girilir, çalıştırılır. Eğer çalışma basıncı ve Ar gazı basıncı yeterli ise plazma oluşur. Plazma oluşmamışsa veya plazma şiddeti az ise RF güç kaynağından gelen yansıma vardır. Bu yansıma değeri RF güç kaynağının göstergesinde görülebilir. Yansıma miktarını azaltmak amacıyla uyum (matching) aygıtı kullanılır. Kaplanacak olan filme ait yoğunluk ve empedans değerleri kalınlık ölçer kontrolcüsündeki ilgili bölüme girilir (Bkz. Şekil 4.2.; Şekil 4.3.).

Deney sisteminde kalınlık ölçer ile alttaş arasında belli bir açı ve mesafe olduğu için mutlaka 'Tooling faktörü' her kalınlık ölçer için ayrı ayrı belirlenmelidir. Tooling faktörü parametresi, kaplama sistemindeki kalınlık ölçerin hassas kristal hızı ve alttaşların kaplanma hızı arasında farklılığa neden olan geometrik faktörleri gidermektedir (Şekil 4.4.).



Şekil 4.4. (a) Kopartma kafaları ve (b) kalınlık ölçer.

Kaplama işlemine başlamadan önce deneyde kullanılacak hedefin yüzeyi plazma ile yaklaşık 10 dakika kadar temizlenir. Bu sistemde alttaş tutucu kendi ekseninde dönmüyor ve sabittir. Alttaş tutucunun hareketi, alttaş tutucuya bağlı vakum kazanı dışındaki tutamakla 180° lik bir açıda kontrol edilir. Ayrıca alttaşların hedefe olan uzaklıkları da sabit ve 52 mm 'dir. Belirlenen deney koşulları sağlandığında alttaş tutucu hedef üzerine getirilerek deneye başlanır. Deney süresince kalınlık ölçerden film kalınlığı gerçek zamanlı olarak izlenebilir. Belirlenen film kalınlığına ulaşıldığında, alttaş tutucu hedef üzerinden çekilerek film kaplama işlemi sonuçlanmış olur.

Bütün işlemler çok katmanlı filmler hazırlanırken de aynı şekilde yapılır. Çok katmanlı filmlerin hazırlanmasında, alttaşlar sırasıyla belirlenen film kalınlıklarına ulaşıncaya kadar film1 ve film2 hedeflerinin üzerinde bekletilerek kaplanma işlemi tamamlanır.

Kaplama işlemi bittikten sonra uygulanan RF gücü kapatılır. Sırasıyla Ar ve O₂ gazları kapatılarak, gazların deney öncesinde belirlenen kısmi basınç değerlerinin değişip değişmediği kontrol edilir. GATE vanası tamamen açılır. Çalışma ortamı basıncı tekrar $2-3 \times 10^{-6}$ Torr mertebelerine inene kadar beklenir. Bu mertebelere gelindiğinde GATE vanası tamamen kapatılır. Difüzyon pompası kapatılır. Soğuk tuzak etrafına sarılmış ısıtıcıya gerilim uygulanarak tuzak ısıtılır. Bu şekilde soğuk tuzağa yapışmış olan su ve yağ gibi istenmeyen maddeler buharlaşarak mekanik pompayla dışarı atılır. Difüzyon pompasının yağı soğuduğunda sistem tamamen kapatılır, FORELINE vanası kapatılır. (ROUGH vanası kapalıdır). Mekanik pompa VENT vanası açılır.

Kaplanan örneklerin düşük basınçlı vakum kazanından çıkarılması için VENT 1 vanasının açılması gerekir. Bu şekilde çalışma ortamı basıncı atmosfer basıncına ulaşır. Alttaş tutamağı dikkatli bir şekilde yuvasından çıkarılır ve kaplanan alttaşlar uygun, temizlenmiş kaplara konulur.

4.1.3. UV-VIS-NIR spektrofotometresi

Hacettepe Üniversitesi Fizik Mühendisliği Bölümü İnce Film Hazırlama ve Ölçüm Laboratuvarında bulunan nkd-8000 spektrofotometresi ile, tek veya çok katmanlı ince filmlerin, alttaşların optik özellikleri belirlenebilir. Spektrofotometrenin özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

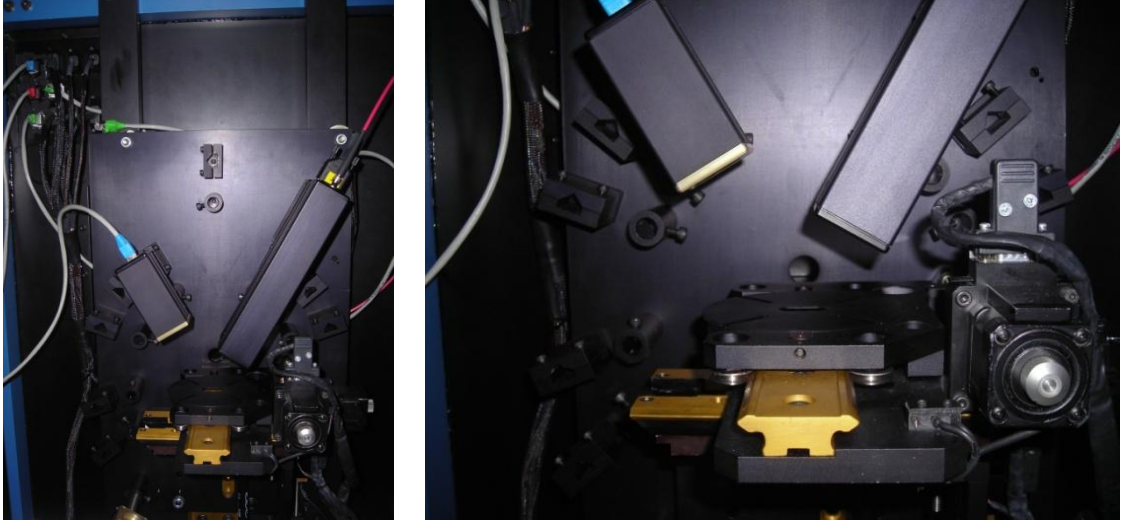
- 280 nm – 2300 nm spektrum aralığında eş zamanlı optik geçirgenlik (R) ve optik yansıtma (T) ölçümü,
- Ölçümlerde s ve p polarizasyonu seçimi,
- Malzemenin cinsine göre farklılık gösteren optik modellerin kullanılmasıyla kırma indisi (n), sönüm katsayısı (k) ve film kalınlığı (d) 'nin kesin olarak belirlenmesi,
- XY hareketli platformu ile örnek konumlandırması,
- Geliş açısı 30°, 50°, 70° gibi belirli açılarda çalışma imkanı,
- Geçirgen alttaşların ölçümü,
- Tek katmanlı ve çok katmanlı filmler için simülasyon imkanı.

Hazırlanan ince filmlerin ölçümünü almak için önce nkd-8000 sistemi açılır (Şekil 4.5.) daha sonra bilgisayar içindeki 'Pro-Optix' programı çalıştırılır. Pro-Optix programı açıldığında nkd-8000 sisteminin lambası yanar. Ölçüm almaya başlamadan önce lambanın en az 15-20 dakika ısınması beklenir. Ölçümü alınacak örnek nkd-8000 sisteminin içindeki örnek platformu üzerine yerleştirilir. Normalizasyon detektöründen gelen ışığın örneğin üzerine düşüp düşmediğine bakılır.

Ölçümü alınacak örnek temiz olmalıdır. Örnek yerleştirme işlemi yapılırken eldiven giyilmelidir. İnce film kaplanan örneklerde kaplanan yüzey üstte kalacak şekilde yerleştirilir. Kaplanmamış alttaşı ölçümlerinde bu durum önemli değildir. Yeni ölçüm almak için Pro-Optix programı içindeki ara yüze alttaşı üzerindeki film (katman) sayısı girilir. Alttaşı bölümünde malzemenin geçirgen veya opak olmasına göre seçim yapılır. Örnek üzerine gelen ışığın polarizasyon türü (p veya s polarizasyonlarından biri) seçilir. Işığın gelme açısı girilir. Kullanılan alttaşı malzemesi seçilir ve yaklaşık alttaşı kalınlığı girilir. Eğer alttaşın dalgaboyuna bağlı n-k değerlerinin ve kalınlığının bulunması isteniyorsa buna göre seçim yapılır. Her katmanın malzeme türü seçilir. Film kalınlığı yaklaşık olarak girilir. Filmin dalgaboyuna bağlı n-k değerlerinin ve kalınlığının bulunması isteniyorsa buna göre seçim yapılır. Dalgaboyu aralığına ve hangi sıklıkla ölçüm alınmasına ilişkin bilgiler girilir. Başlangıç, bitiş dalgaboyu ve dalgaboyu adımı girilir. X-Y stage kullanılarak örneğin platform üzerindeki konumu girilir. Ölçüm işlemi bittikten sonra dalgaboyuna bağlı optik yansıtma ve optik geçirgenlik eğrileri veri tabanına kaydedilir (Şekil 4.5.; Şekil 4.6.).



Şekil 4.5. Aquila nkd-8000 UV-VIS-NIR spektrofotometresi dış görünümü.



Şekil 4.6. Aquila nkd-8000 UV-VIS-NIR spektrofotometresi iç görünümü.

4.2. Tek Katmanlı ve Çok Katmanlı İnce Film Çalışmaları

Tez çalışmasında önce tek katmanlı ince filmler, daha sonra çok katmanlı dielektrik aynalar ile yansıtmasız filtreler hazırlanmıştır.

Tek katmanlı SiO_2 , ZrO_2 ve TiO_2 ince filmler RF gücü, gaz konsantrasyonu ve kaplama basıncı gibi deneysel parametrelerin filmin optik davranışına etkileri incelenmiş ve kaliteli film hazırlamak için gerekli deneysel koşullar belirlenmiştir. Filmlerin kalitesi, dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) değişimi elde edilerek değerlendirilmiş ve literatürdeki örneklerle eşdeğer optik davranışa sahip olduğu belirlenmiştir (Pulker, 1979; Jeong et al., 2004).

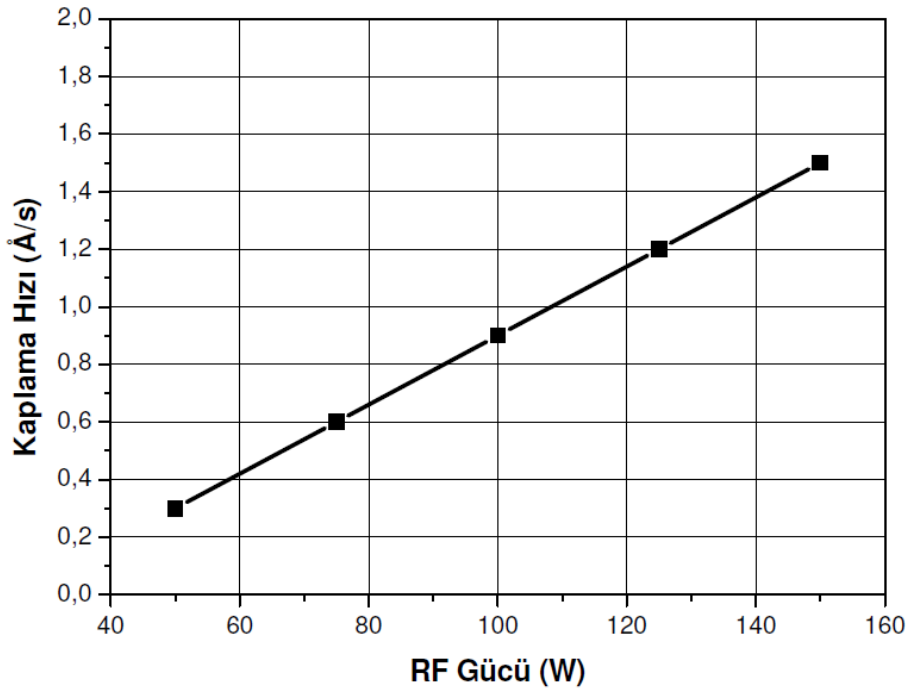
Optik tasarım programında, elektromanyetik spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde, dielektrik ayna ve yansıtmasız filtre tasarımları yapılmıştır. Optik tasarımlardan bazıları, SiO_2 ve TiO_2 ince filmlerin sıralı katmanları ile deneysel olarak hazırlanmış, optik yansıtma ve optik geçirgenlik ölçümleri spektrofotometrede s ve p polarizasyonda 30° geliş açısında alınmıştır.

Kuramsal modellerde tasarımlar, polarize olmayan ışığın film yüzeyine normal geldiği varsayılarak yapılmıştır. Bu kapsamda, tasarım programı kullanılarak hazırlanan kuramsal model ile deneysel olarak hazırlanan filmin spektrofotometrede alınmış ölçümlerinin karşılaştırmasıyla görülen farklılıkların nedenlerden biri, kuramsal model ve deneysel ölçümlerin polarizasyon ve geliş açılarının farklı olmasıdır. Tasarım programında kullanılan filmlerin kırma indisi ve sönüm katsayılarında dispersiyon ilişkisinin kullanılmaması, hazırlanan çok katmanlı ince film çalışmaları için, spektrumun bazı bölgelerinde dalgaboyuna bağlı deneysel ve kuramsal optik yansıtma, optik geçirgenlik değişimleri arasındaki farklılıkların önemli bir nedenidir.

4.2.1. Tek katmanlı ince film çalışmaları

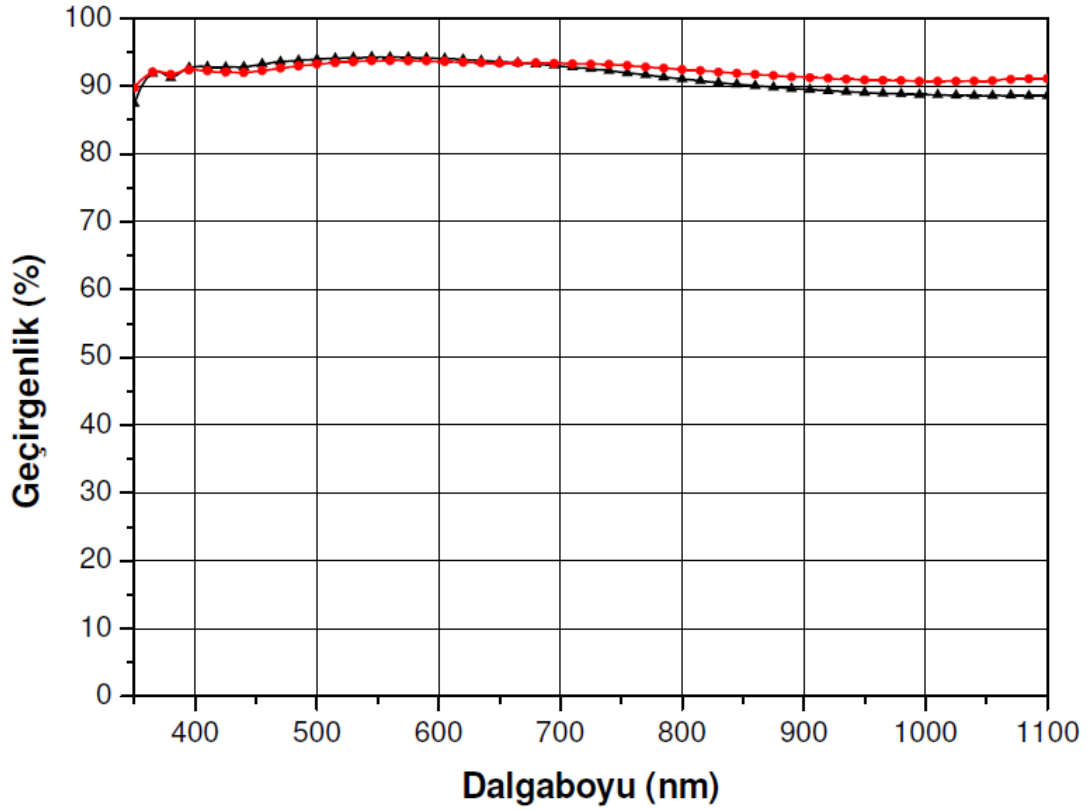
RF magnetron kopartma tekniği kullanılarak Si, Zr ve Ti hedeflerinden reaktif olarak cam ve silikon alttaşlar üzerine tek katmanlı SiO_2 , ZrO_2 ve TiO_2 filmler, uygulanan RF gücü ve çalışma ortamında bulunan O_2 gazı konsantrasyonu değiştirilerek farklı deney koşulları altında hazırlanmıştır. Değiştirilen RF gücünün ve O_2 konsantrasyonunun filmlerin optik özelliklerinde ne gibi etkiler meydana getirdiği gözlenmiştir.

Tek katmanlı SiO_2 ince filmler 50 W, 75 W, 100 W, 125 W ve 150 W gibi farklı RF güçleri ile % 6 ve % 10 'luk O_2 konsantrasyonlarında cam ve silisyum alttaşları üzerine kaplanmıştır. 125 W ve üzeri güçlerde kaplama hızının yüksek olmasının silisyummonoksit (SiO) oluşumunu tetiklediği görülmüştür. RF gücünün artmasıyla filmin kaplanma hızı da artmıştır (Şekil 4.7.). Bunun nedeni, artan RF gücüyle birlikte argon iyonlarının kinetik enerjisinin artışı, hedef civarında Ar iyonlarının yoğunluğunun artması ile hedeften kopartılan atom sayısının artışı ve sonuç olarak kaplanma hızının artışı olarak açıklanabilir.



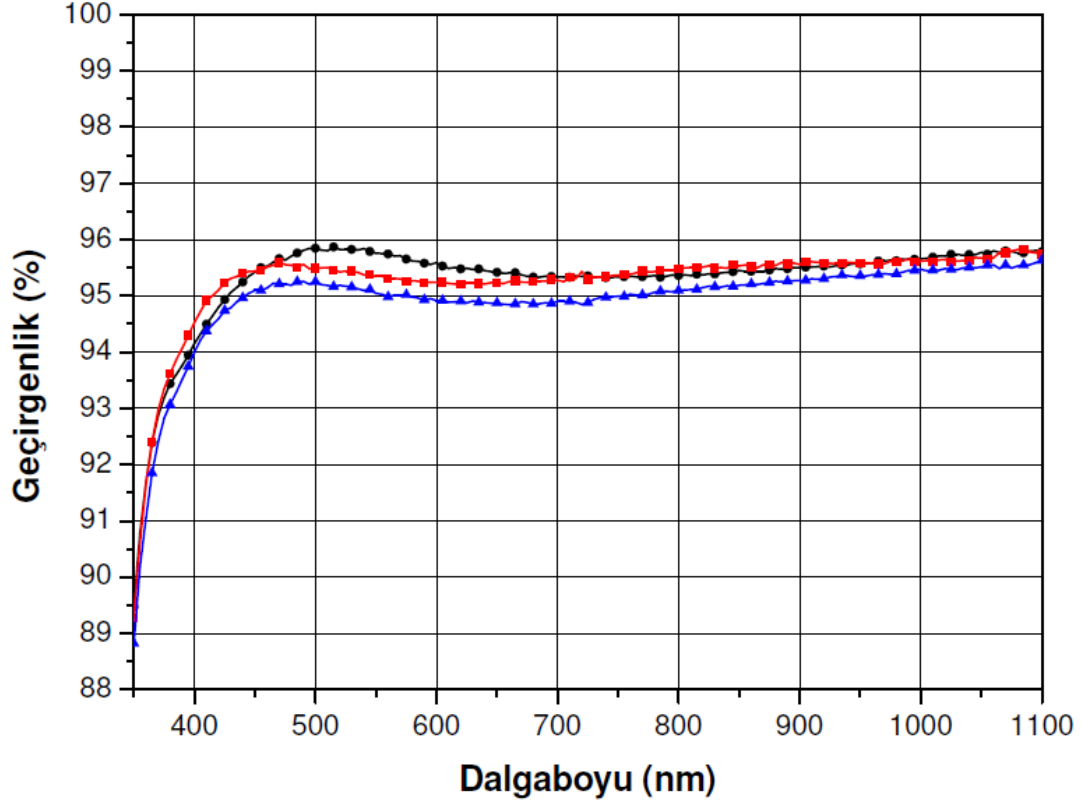
Şekil 4.7. Tek katmanlı SiO_2 ince filminin 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda RF gücüne bağlı kaplama hızı değişimi.

Spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde %6 O₂ konsantrasyonu ile hazırlanan tek katmanlı SiO₂ ince filmlerin optik geçirgenliğinin, %10 O₂ konsantrasyonu ile hazırlanan örneklerle göre daha iyi olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.8.). %10 O₂ konsantrasyonunda hazırlanan filmlerde spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde soğurma daha fazladır.



Şekil 4.8. 50 mTorr çalışma basıncı ve 75 W RF gücünde, %6 O₂ konsantrasyonunda (yuvarlak çizgi) ve %10 O₂ konsantrasyonunda (üçgen çizgi) mikroskop camları üzerine hazırlanmış tek katmanlı SiO₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.

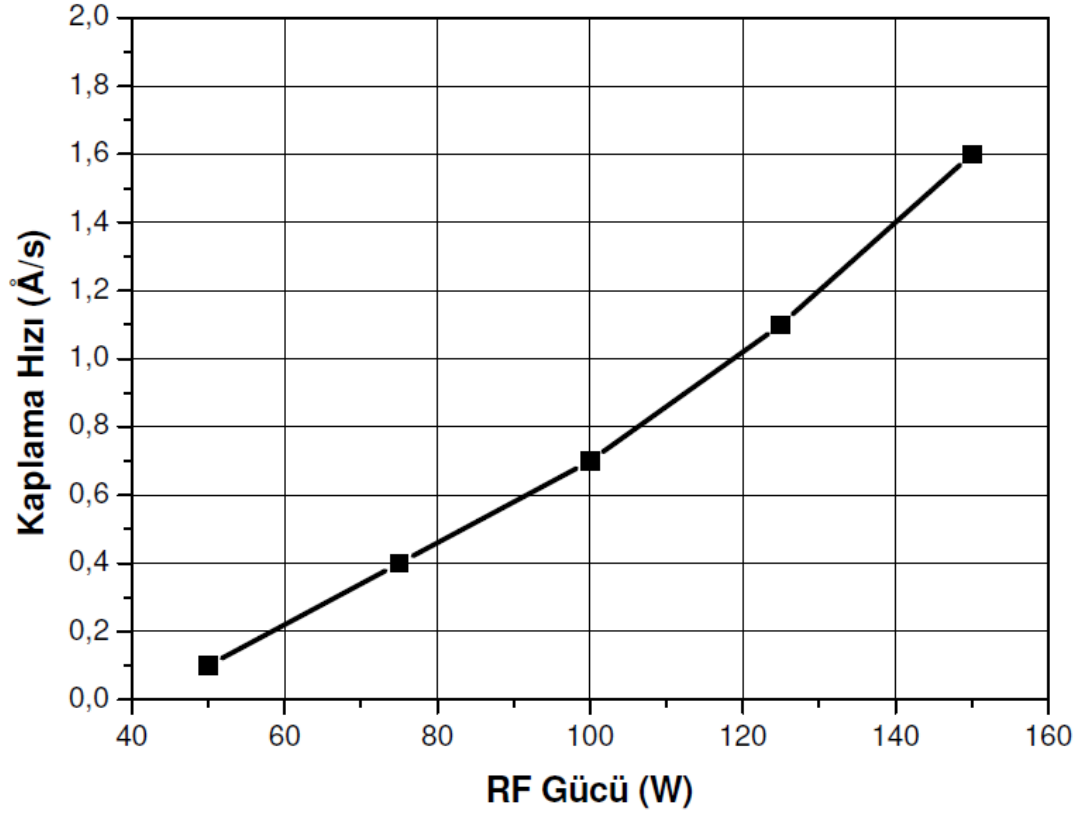
RF güç değişiminin hazırlanan tek katmanlı SiO₂ filmlerinin optik geçirgenliklerine etkisi azda olsa vardır. Uygulanan RF gücü azaldıkça (125 W → 75W) spektrumun görüner bölgesinde optik geçirgenliğin bir miktar arttığı ama yakın kızılötesi bölgesinde dikkate değer bir değişimin olmadığı belirlenmiştir (Şekil 4.9.).



Şekil 4.9. 50 mTorr çalışma basıncında ve %6 O₂ konsantrasyonunda, 75 W (yuvarlak çizgi), 100 W (kare çizgi), 125 W (Üçgen çizgi) güçlerinde ve aynı kalınlıklarda 1737F camı üzerine hazırlanmış tek katmanlı SiO₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.

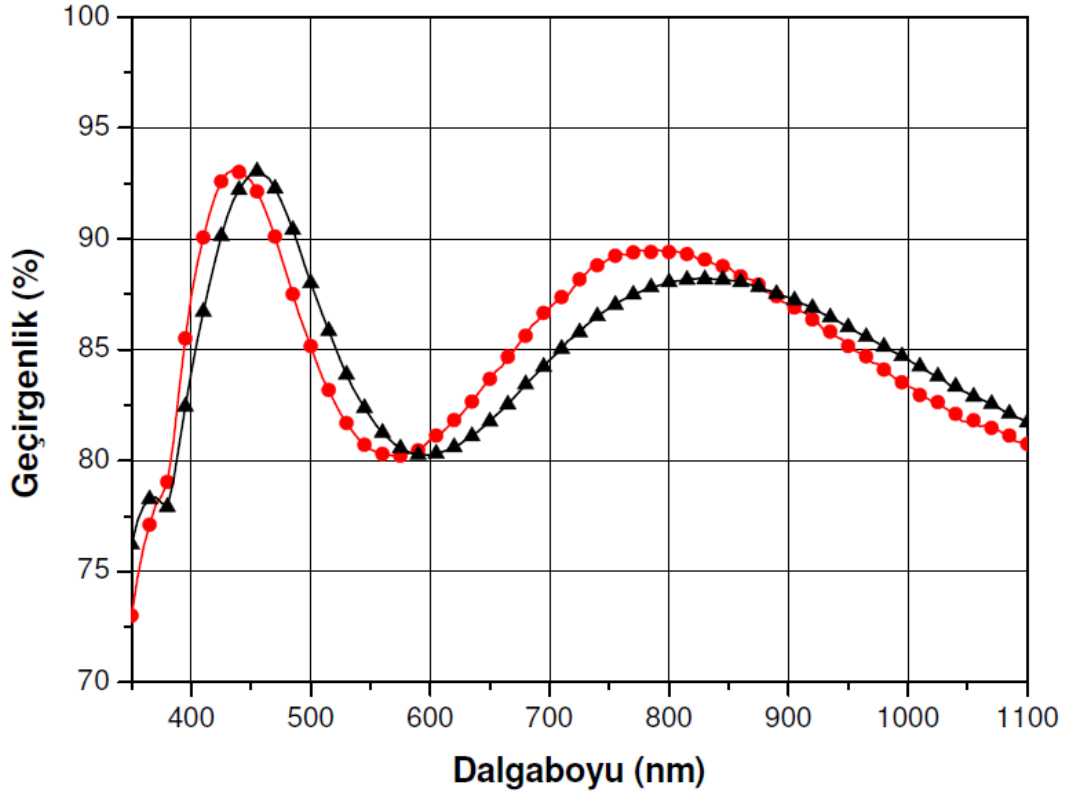
Tüm bu veriler sonucunda 75 W RF gücü ve % 6 O₂ konsantrasyonu, kaliteli tek katmanlı SiO₂ ince filminin hazırlanması için belirlenen deney koşullarıdır.

Tek katmanlı ZrO_2 ince filmler, 100 W ve 150 W gibi farklı RF güçleri ile %6 ve %10 'luk O_2 konsantrasyonlarında cam ve silisyum alttaşları üzerine kaplanmıştır. Uygulanan RF gücünün artmasıyla filmin kaplanma hızı da artmıştır (Şekil 4.10.).



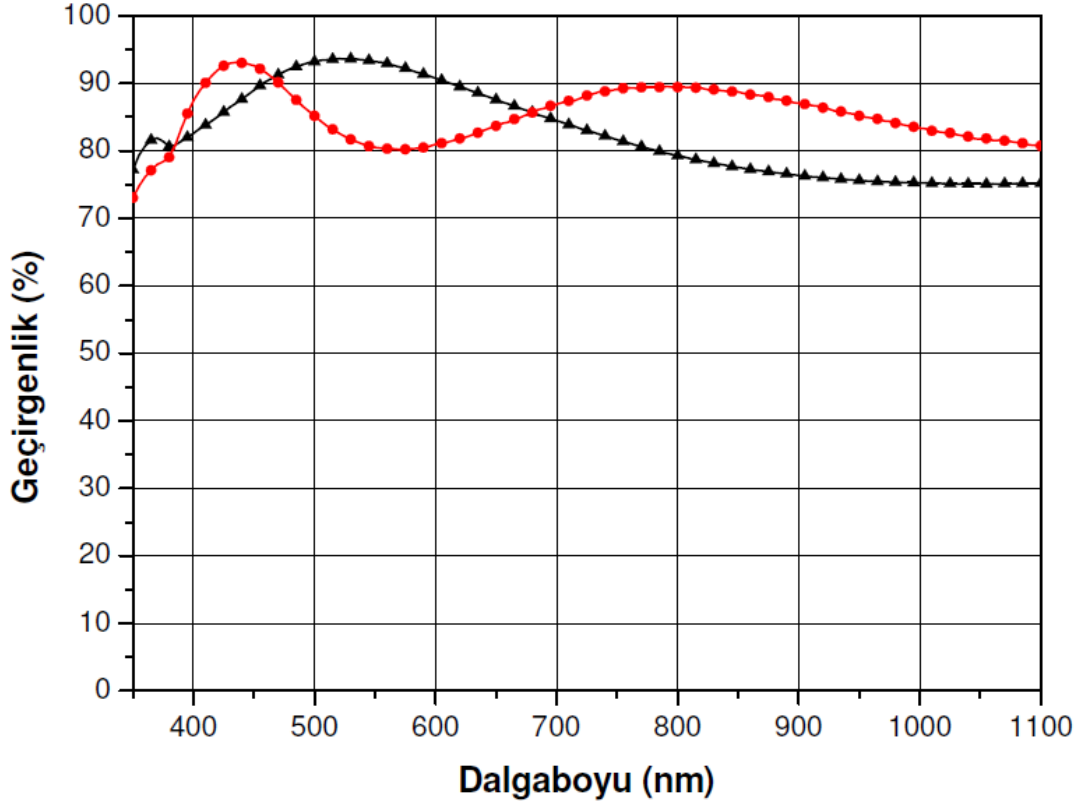
Şekil 4.10. Tek katmanlı ZrO_2 ince filminin 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda RF gücüne bağlı kaplama hızı değişimi.

Spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde %6 O₂ konsantrasyonu ile hazırlanan tek katmanlı ZrO₂ ince filmlerin optik geçirgenliğinin, %10 O₂ konsantrasyonu ile hazırlanan örneklere göre daha iyi olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.11.). Oksijen konsantrasyonunun artmasıyla spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde soğurmanın arttığı görülmektedir.



Şekil 4.11. 50 mTorr çalışma basıncı, 150 W RF gücünde %6 O₂ konsantrasyonunda (yuvarlak çizgi) ve %10 O₂ konsantrasyonunda (üçgen çizgi) aynı kalınlıklarda mikroskop camları üzerine hazırlanmış olan tek katmanlı ZrO₂ ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.

Tek katmanlı ZrO_2 filminin hazırlanmasında RF gücünün artmasıyla, filmlerin kaplama hızları da artmakta, filmin kalınlığı artmaktadır. Bunun sonucunda spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerindeki dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlik eğrileri de değişmektedir (Şekil 4.12.).

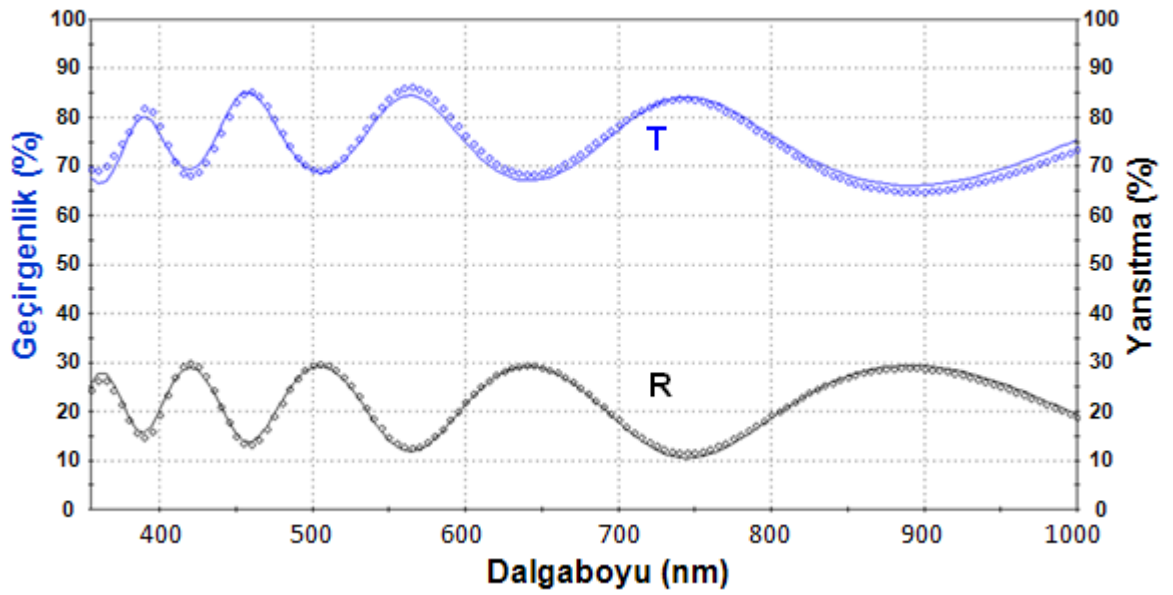


Şekil 4.12. 50 mTorr çalışma basıncında ve %6 O_2 konsantrasyonunda 100 W (üçgen çizgi) ve 150 W (yuvarlak çizgi) güçlerinde 30 dakikalık sürede mikroskop camları üzerine hazırlanmış tek katmanlı ZrO_2 ince filmlerinin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik eğrileri.

Bu veriler sonucunda kaliteli tek katmanlı ZrO_2 ince filminin hazırlanması için 100 W RF gücü ve %6 O_2 konsantrasyonu belirlenen deney koşullarıdır.

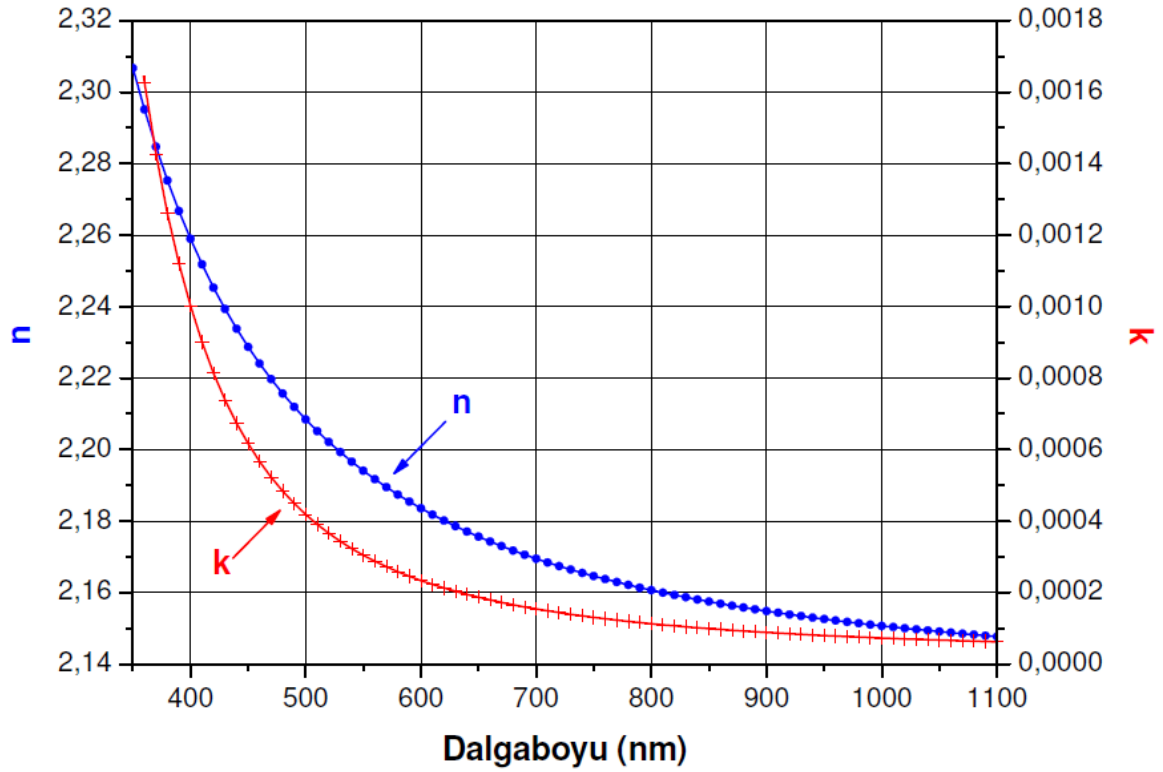
Tek katmanlı TiO_2 ince filmleri, 100 W, 150 W ve 200 W gibi SiO_2 ince filmlerine göre daha yüksek RF güçleri ile %6 ve %10'luk O_2 konsantrasyonlarında hazırlanmıştır. Bunun nedeni ise titanyumun silisyuma oranla daha sert bir malzeme olması ve titanyumun oksijen bağlanma enerjilerinin daha büyük olmasıdır. Bu nedenle daha enerjik plazma, TiO_2 oluşumuna olumlu katkı vermektedir.

RF magnetron kopartma tekniği kullanılarak, Zr hedeften reaktif olarak cam alttaş üzerinde hazırlanmış ZrO_2 ince filminin dalga boyuna bağlı p polarizasyon optik geçirgenlik ve yansıtma değişimleri Şekil 4.13.'de görülmektedir. Aynı grafik üzerinde ortagonalize Cauchy modeli kullanılarak elde edilmiş uyuşum değişimleri de görülmektedir.



Şekil 4.13. Cam alttaş üzerinde büyütülmüş tek katmanlı ZrO_2 ince filminin dalgaboyuna bağlı deneysel (daireli noktalar) ve kuramsal (sürekli çizgi) optik geçirgenlik ve yansıtma eğrileri.

Tek katmanlı ZrO_2 ince filminin ortagonalize Cauchy modeli uyuşum işlemi sonucunda elde edilmiş, dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) değişimleri verilmiştir. Şekil 4.14. 'de görüldüğü gibi oldukça yüksek kırma indisine ve çok düşük soğurganlığa sahip kaliteli ZrO_2 ince filmi hazırlanmıştır.



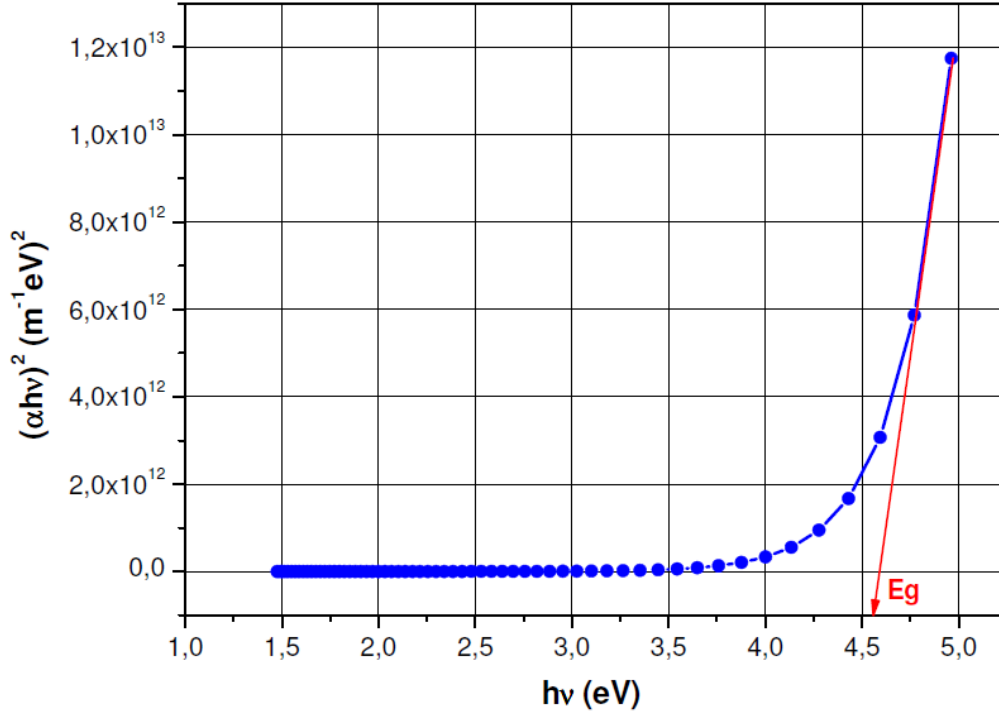
Şekil 4.14. Tek katmanlı ZrO₂ ince filmin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.

Filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi için yasak enerji aralığının E_g belirlenmesi de gerekir. Yüksek soğurma bölgesinde ($k > 10^4 \text{ cm}^{-1}$) gelen fotonun enerjisine bağlı olarak soğurma sabiti “Eş. 4.1.” ile verilir (Sreemany and Sen, 2004):

$$\alpha = \left[\frac{B(h\nu - E_g)^p}{h\nu} \right] \quad (4.1)$$

Bu eşitlikte B sabit ve p optik soğurma işlemi karakterize eden bir indistir. Teorik olarak p , sırası ile direkt izinli ve dolaylı izinli, direkt yasaklanmış ve dolaylı yasaklanmış geçişler için 1/2, 2, 3/2 ve 3 'e eşittir. Bu çalışmada $p=1/2$ olarak alınmıştır (Zhao et al., 2008).

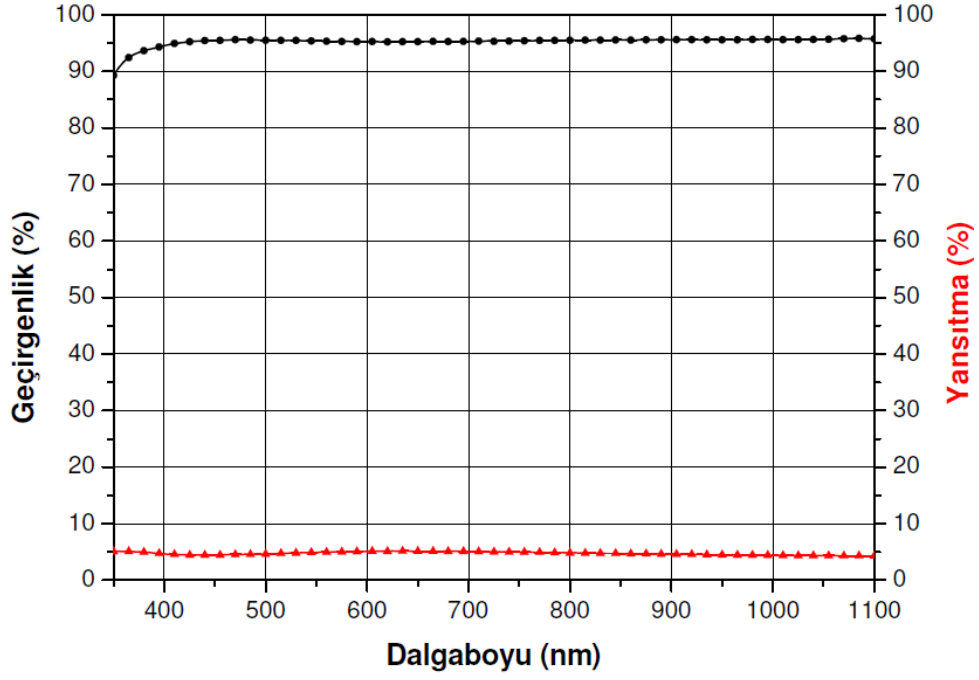
Şekil 4.15. 'de $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^2$ değişimi verilmiş olup, soğurma kenarına çizilen teğet ile tek katmanlı ZrO_2 ince filmin yasak enerji aralığı $E_g \approx 4.6$ eV olarak belirlenmiştir.



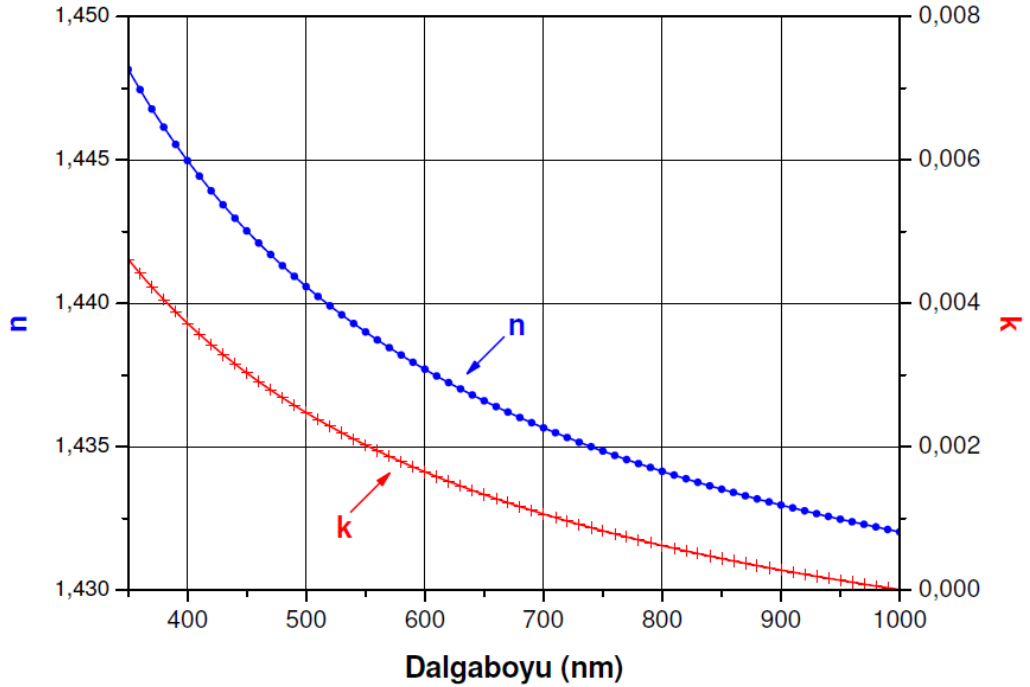
Şekil 4.15. ZrO_2 ince filmin $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^2$ değişimi.

RF magnetron kopartma tekniği kullanılarak Si hedeften reaktif olarak cam alttaş üzerinde tek katmanlı SiO_2 ince filmler hazırlanıp, optik karakterizasyonları yapılmıştır. Şekil 4.16.'da tek katmanlı SiO_2 ince filminin dalga boyuna bağlı p polarizasyon optik geçirgenlik ve yansıtma değişimleri görülmektedir.

Tek katmanlı SiO_2 ince filminin ortagonalize Cauchy modeli kullanılarak uyuşum işlemi sonucunda, dalgaboyuna bağlı kırma indisi ve sönüm katsayısı değişimleri belirlenmiştir (Şekil 4.17.). SiO_2 filmin kalınlığı uyuşum işlemi sonucunda yaklaşık 215 nm olarak bulunmuştur. SiO_2 filmin $\lambda=550$ nm 'deki kırma indisi $n=1.438$ olarak belirlenmiştir. Böylece oldukça düşük kırma indisine sahip, kaliteli, soğurganlığı düşük SiO_2 ince filmi hazırlanmıştır.

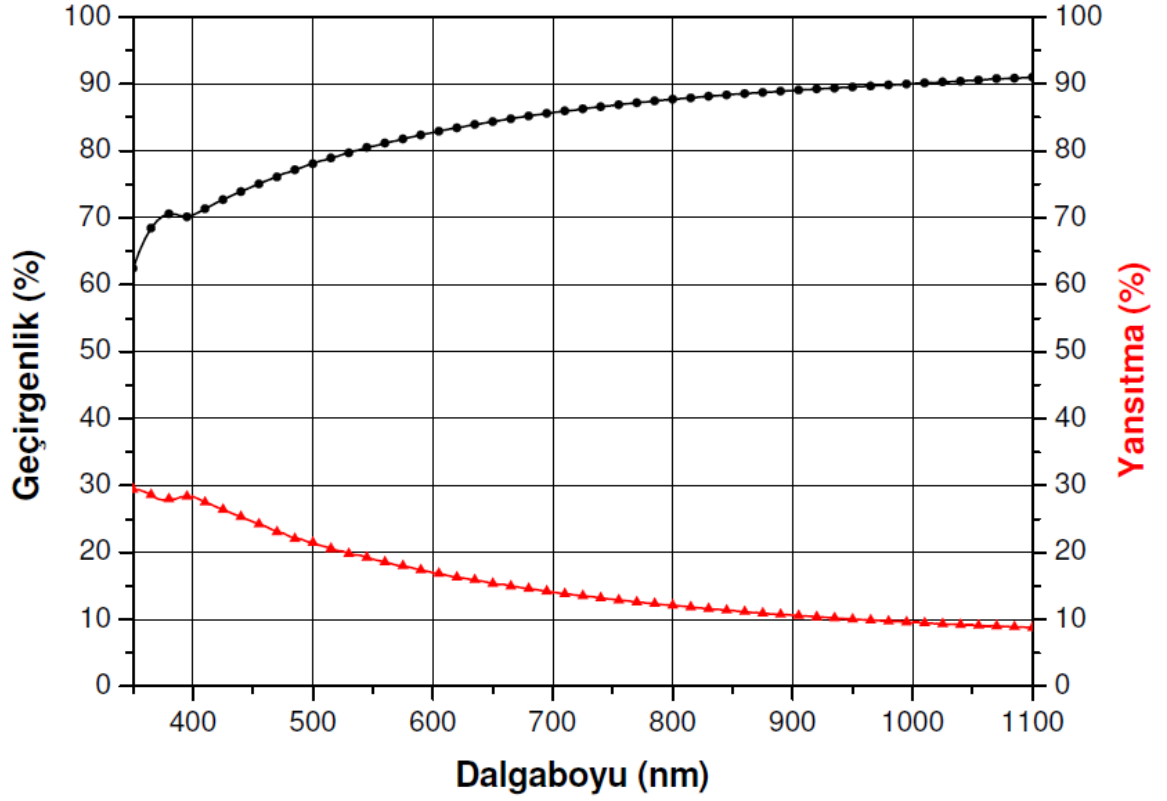


Şekil 4.16. 1737F cam alttaşı üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı, 100 W RF gücü ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş tek katmanlı SiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri.



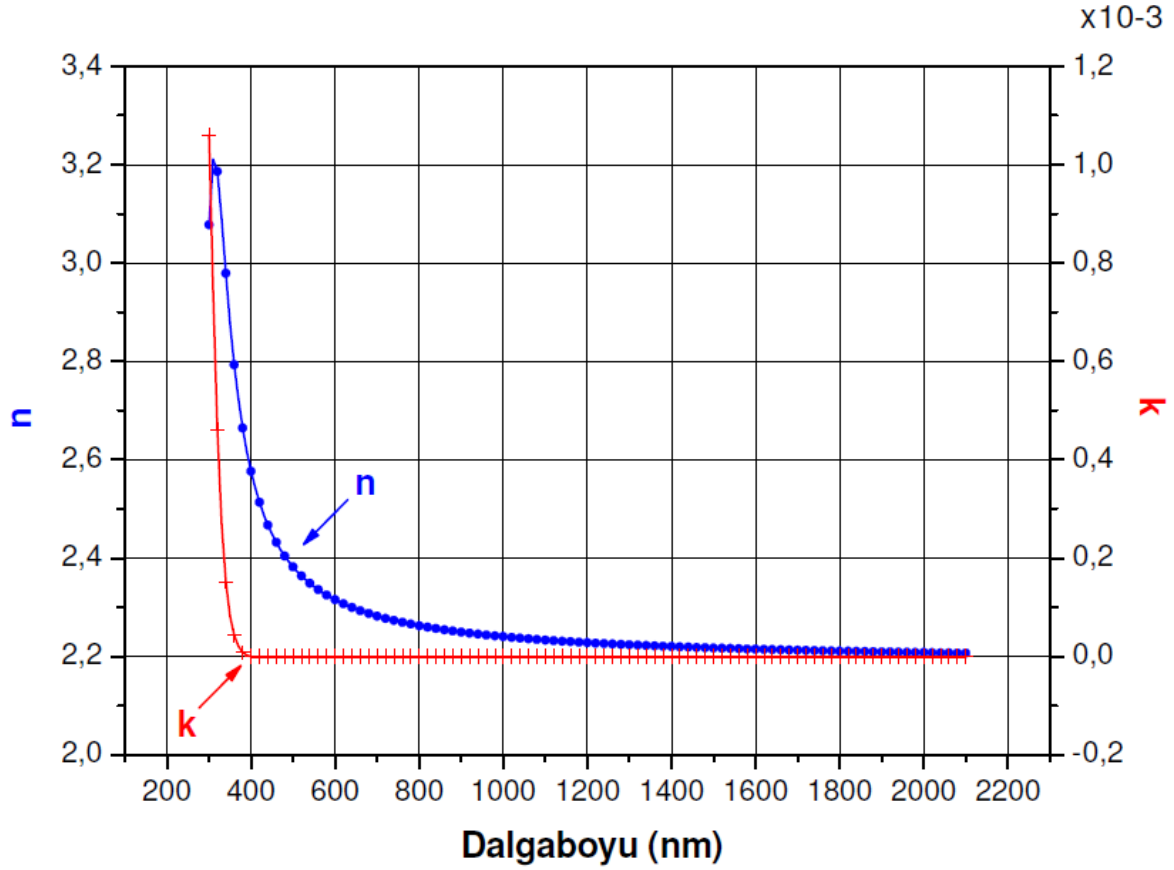
Şekil 4.17. Tek katmanlı SiO_2 ince filminin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.

Şekil 4.18.'de RF magnetron kopartma tekniği kullanılarak cam alttaşı üzerine büyütülmüş tek katmanlı TiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı p polarizasyon optik geçirgenlik ve yansıtma değişimleri görülmektedir.



Şekil 4.18. 1737F cam alttaşı üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı, 150 W RF gücü ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş tek katmanlı TiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri.

Cauchy modeli kullanılarak uyuşum işlemi sonucunda, tek katmanlı TiO_2 ince filmin dalgaboyuna bağlı kırma indisi ve sönüm katsayısı değişimleri Şekil 4.19.'da gösterilmiştir. Tek katmanlı TiO_2 ince filminin kalınlığı 21 nm olarak belirlenmiştir. Şekil 4.19.'da görüldüğü gibi, hazırlanan tek katmanlı TiO_2 ince filmi, oldukça yüksek kırma indisine ve çok düşük soğurganlığa sahiptir.

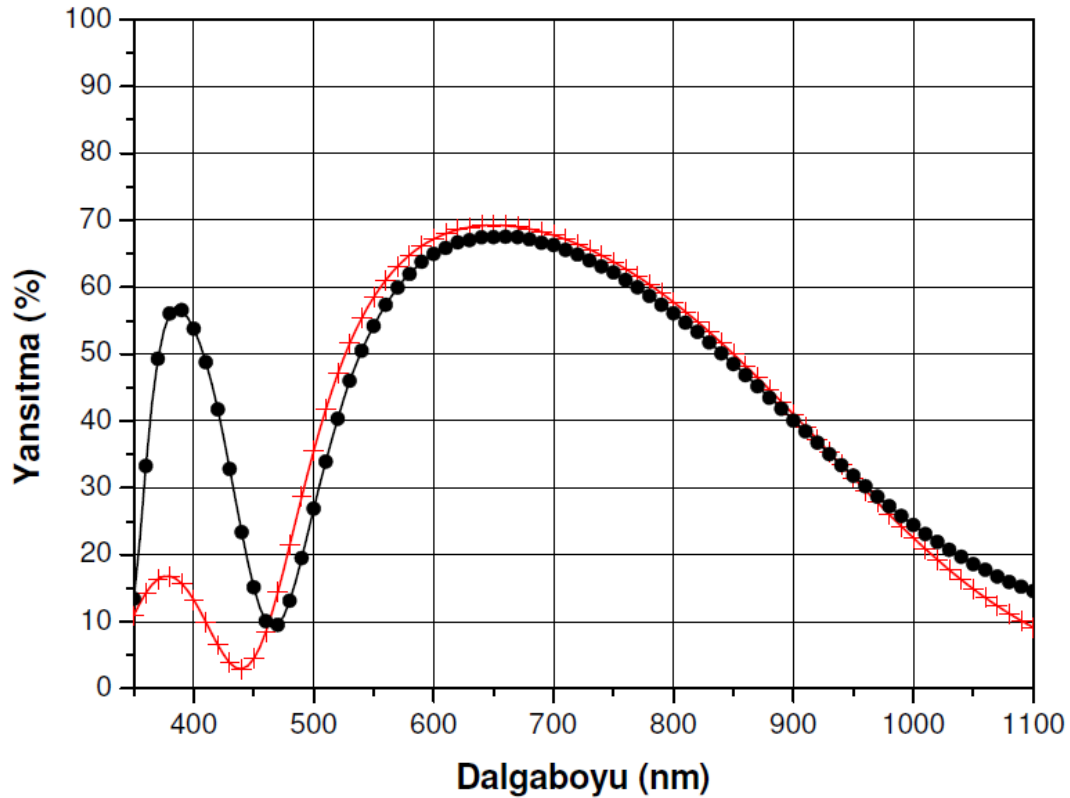


Şekil 4.19. Tek katmanlı TiO_2 ince filminin uyuşum işlemi sonucunda elde edilen dalgaboyuna bağlı kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) 'nın değişimi.

4.2.2. Çok katmanlı ince film çalışmaları

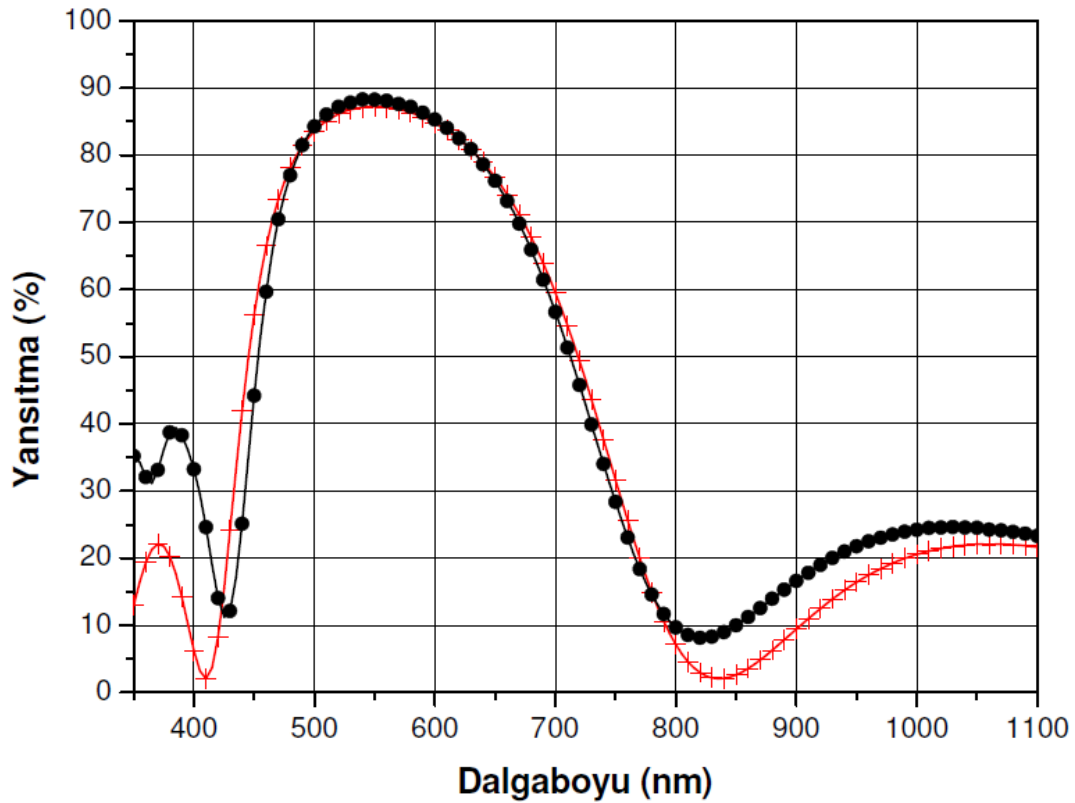
Birinci aşamada çok katmanlı yüksek yansıtımlı dielektrik aynalar, $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ malzeme çiftlerinin ikili katmanları ile 4, 6 ve 12 katmanlı olarak spektrumun görünür bölgesinde hazırlanmıştır. Hazırlanan dielektrik aynaların dalgaboyuna bağlı optik yansıtması spektrofotometrede ölçülmüş, kuramsal modelleri ile karşılaştırılmıştır. Kuramsal modeller ve deneysel sonuçlar birbiri ile uyum içerisindedir.

Referans dalgaboyu 650 nm alınarak hazırlanmış olan 4 katmanlı dielektrik ayna örneğinde, dalgaboyuna bağlı kuramsal model ve deneysel optik yansıtma değişimi uyum içerisindedir. Hazırlanan örnek kırmızı ışığı %67 oranında yansıtmaktadır (Şekil 4.20.).



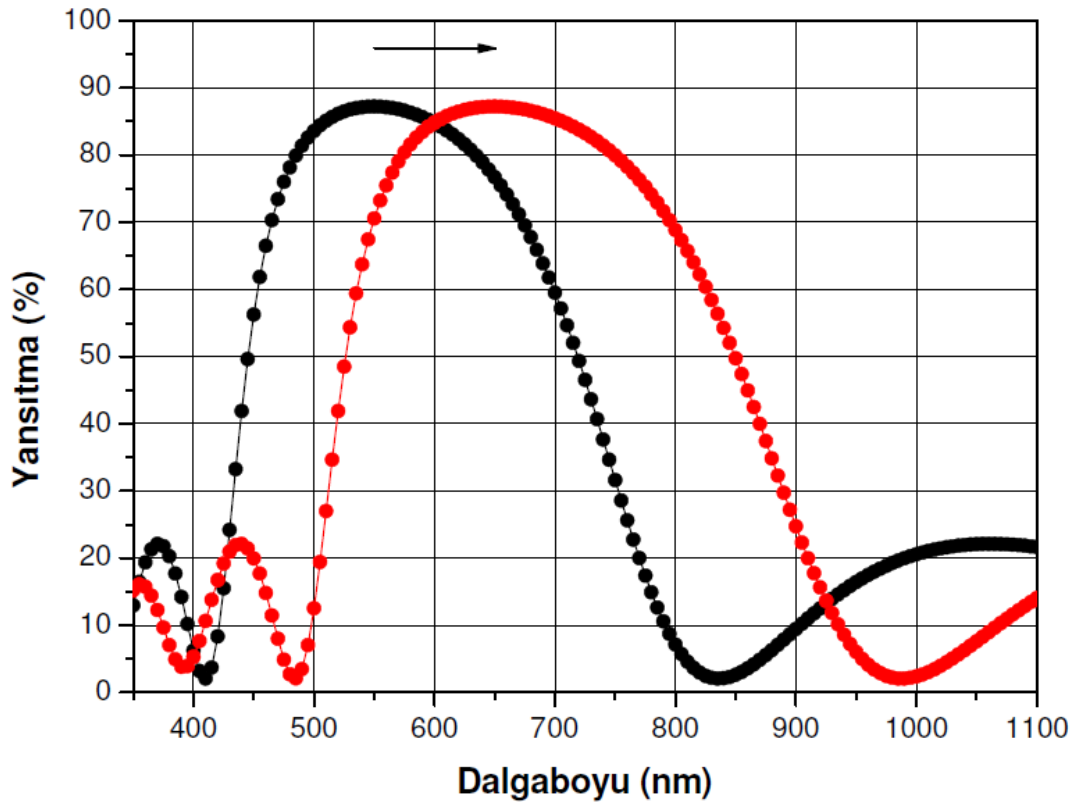
Şekil 4.20. 1737F camının üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş 4 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. $\text{S}/(\text{LH})^2/\text{A}$, S: Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.

Referans dalgaboyu 550 nm alınarak, cam alttaş üzerine görünür bölge için tasarlanmış olan 6 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal ve deneysel optik yansıtma değişimleri uyum içersindedir (Şekil 4.21.). Referans dalgaboyu civarında yaklaşık %88 optik yansıtma elde edilmiştir. Bu kaplama katman kalınlıkları ve indislerinin değişimi hakkında kolayca fikir sahibi olabilmek amacı ile Şekil 4.21.'de görüldüğü gibi 400 nm civarında keskin pikleri olacak şekilde tasarlanmıştır.



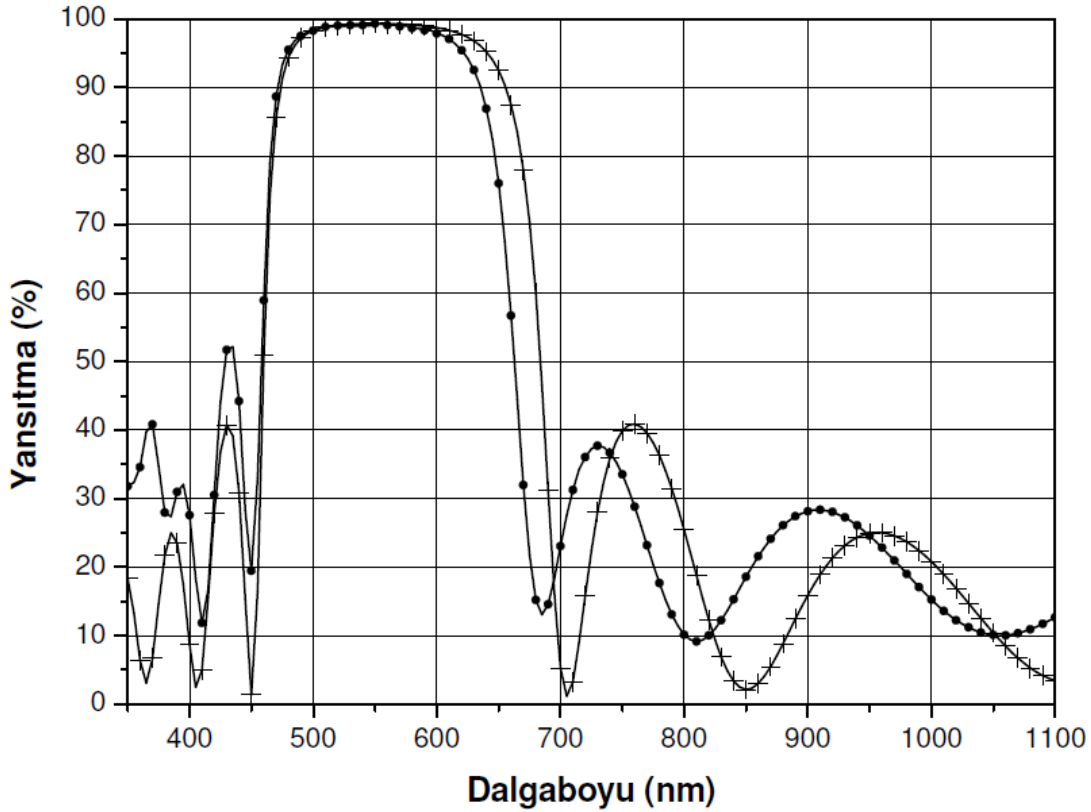
Şekil 4.21. 1737F camının üzerinde 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş 6 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. S/(LH)³/A, S: Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.

Çok katmanlı dielektrik ayna tasarımlarında her katmanın kalınlığı (t) referans dalgaboyuna (λ) göre aynı oranda artırılarak veya azaltılarak, dielektrik ayna tasarımı spektrumunda kaydırılabilir. Referans dalgaboyu $\lambda=550$ nm olan 6 katmanlı dielektrik ayna tasarımı her katman kalınlığı referans dalgaboyu $\lambda=650$ nm olacak şekilde aynı oranda artırılmasıyla, optik tasarım görünür bölgeden yakın kızılötesi bölgesine kaymıştır (Şekil 4.22.). Katman kalınlıkları ile referans dalgaboyunun aynı oranda artırılmasıyla tasarımın dalgaboyuna bağlı optik yansıtması değişmemiştir. Bunun sebebi dielektrik ayna tasarımı için yapıcı girişim şartı olan her katmanın optik kalınlığının ($n.t$) çeyrek dalgaboyu ($\lambda/4$) olacak şekilde alınmasıdır.



Şekil 4.22. 6 katmanlı dielektrik aynanın her katman kalınlığının aynı oranda artırılması ile dalgaboyuna bağlı kuramsal model yansıtmanın spektrumun görünür bölgesinden yakın kızılötesi bölgesine doğru kayması. $S/(LH)^3/A$, S: Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.

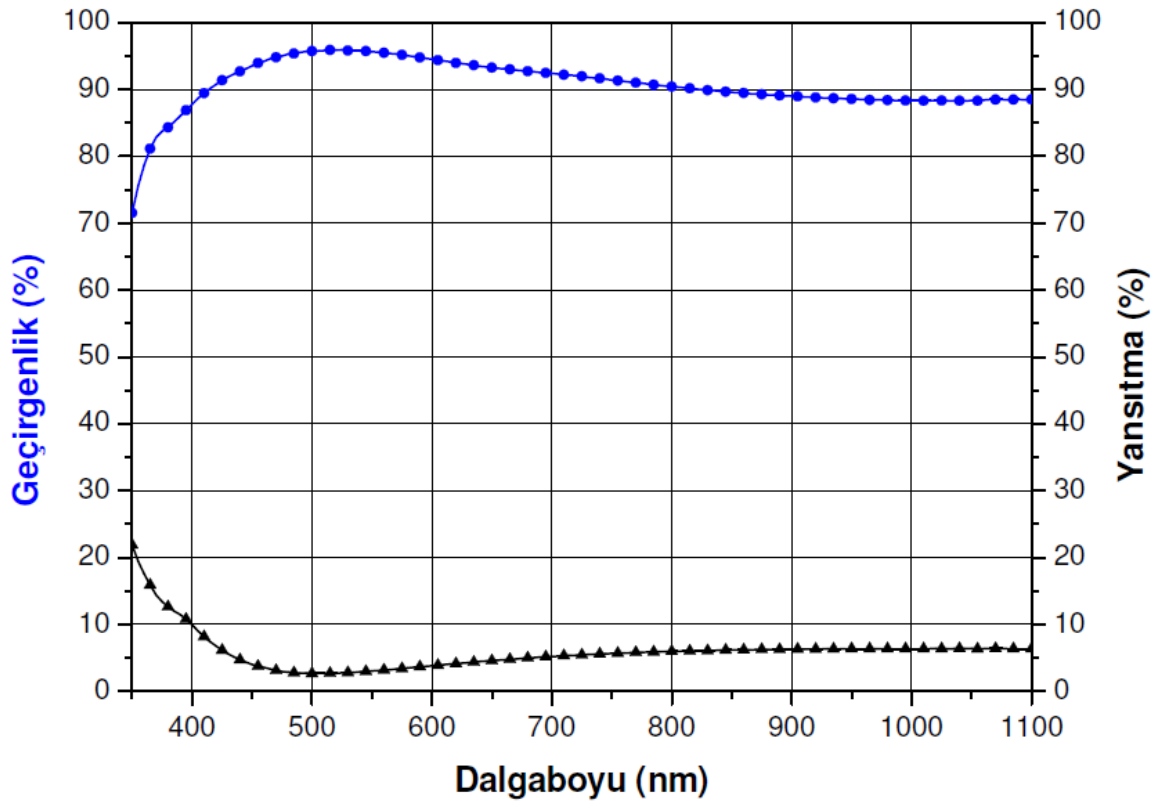
Referans dalgaboyu 550 nm alınarak 1737F cam alttaş üzerine görünür bölge için tasarlanmış olan 12 katmandan oluşan dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model ve deneysel s polarizasyon optik yansıtma değişimi şekil 4.23.'de g r lmektedir. Referans dalgaboyu civarında optik yansıtma yaklaşık %99.3 oranındadır. Hazırlanan 12 katmanlı dielektrik ayna çok yüksek yansıtma özelliği ile, sanayide ve bilimsel çalışmalarda görünür bölgede yüksek yansıtma gerektiren sistemlerde, özellikle lazer uygulamalarında rahatlıkla kullanılabilir.



şekil 4.23. Tasarlanmış olan 12 katmanlı dielektrik aynanın dalgaboyuna bağlı kuramsal model (artı çizgi) ve deneysel s polarizasyon (yuvarlak çizgi) optik yansıtma değişimleri. $S/(LH)^6/A$, S: Cam Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.

İkinci aşamada ise çok katmanlı yansıtmasız filtreler, TiO_2 - SiO_2 malzeme çiftlerinin ikili katmanları ile 2 ve 4 katmanlı olarak spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde tasarlanmış ve deneysel olarak hazırlanmıştır. Yansıtmasız filtre tasarımlarında her katmanın kalınlığı farklıdır ve özel olarak seçilmektedir. Deneysel çalışmalarda katman kalınlıklarında ve indislerde meydana gelebilecek ufak bir farklılık, hazırlanan filtrenin istenen optik cevabı vermemesine yol açar.

Yüksek ve düşük kırma indisli malzeme olarak sırası ile TiO_2 ve SiO_2 seçilip tasarlanmış olan iki katmanlı bir “V kaplama” hazırlanmıştır (Şekil 4.24). Cam alttaş üzerinde hazırlanmış olan iki katmanlı kaplamanın p polarizasyonunda dalga boyuna bağlı optik geçirgenlik ve yansıtma değişimleri verilmiştir. Sadece iki katman ile 500 nm referans dalgaboyu civarında yansıma oldukça düşmüş ve geçirgenlik artmıştır.

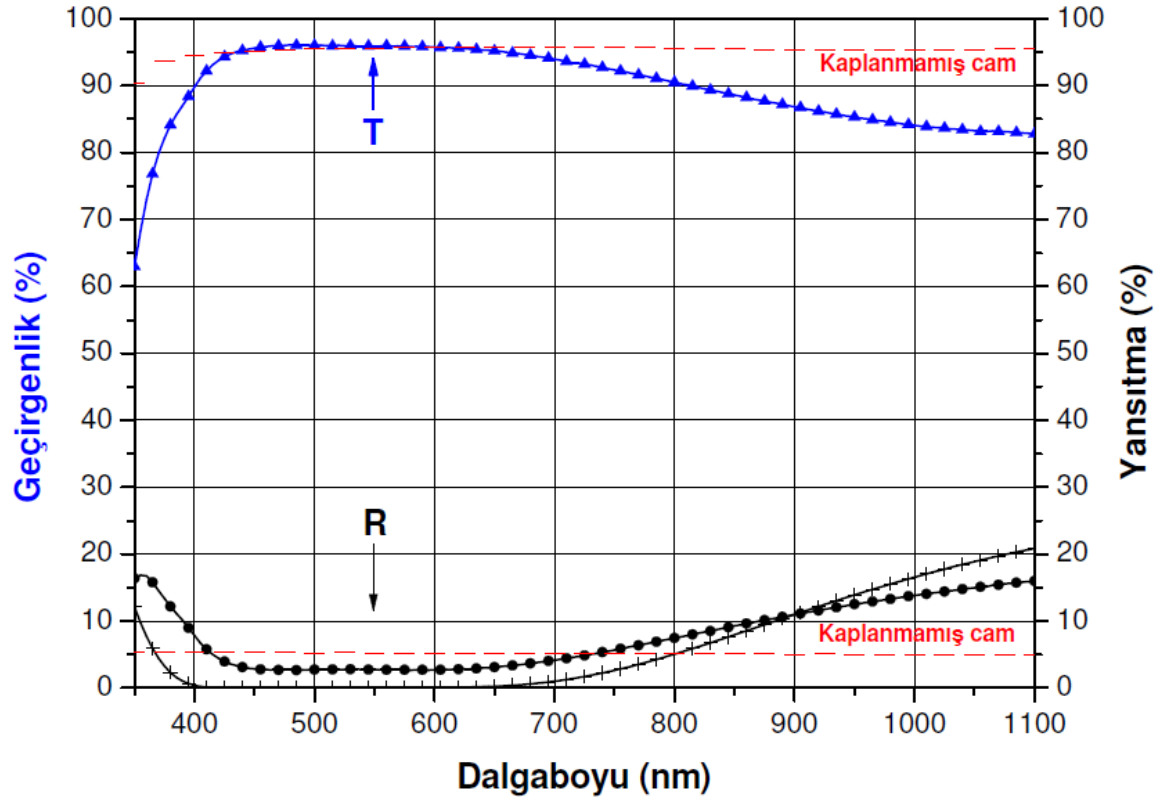


Şekil 4.24. Mikroskop camı üzerine 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O_2 konsantrasyonunda büyütülmüş iki katmanlı ince filmin dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (yuvarlak çizgi) ve optik yansıtma (üçgen çizgi) eğrileri. S/(HL)/A, S: Cam Alttaş, L: SiO_2 , H: TiO_2 , A: Hava.

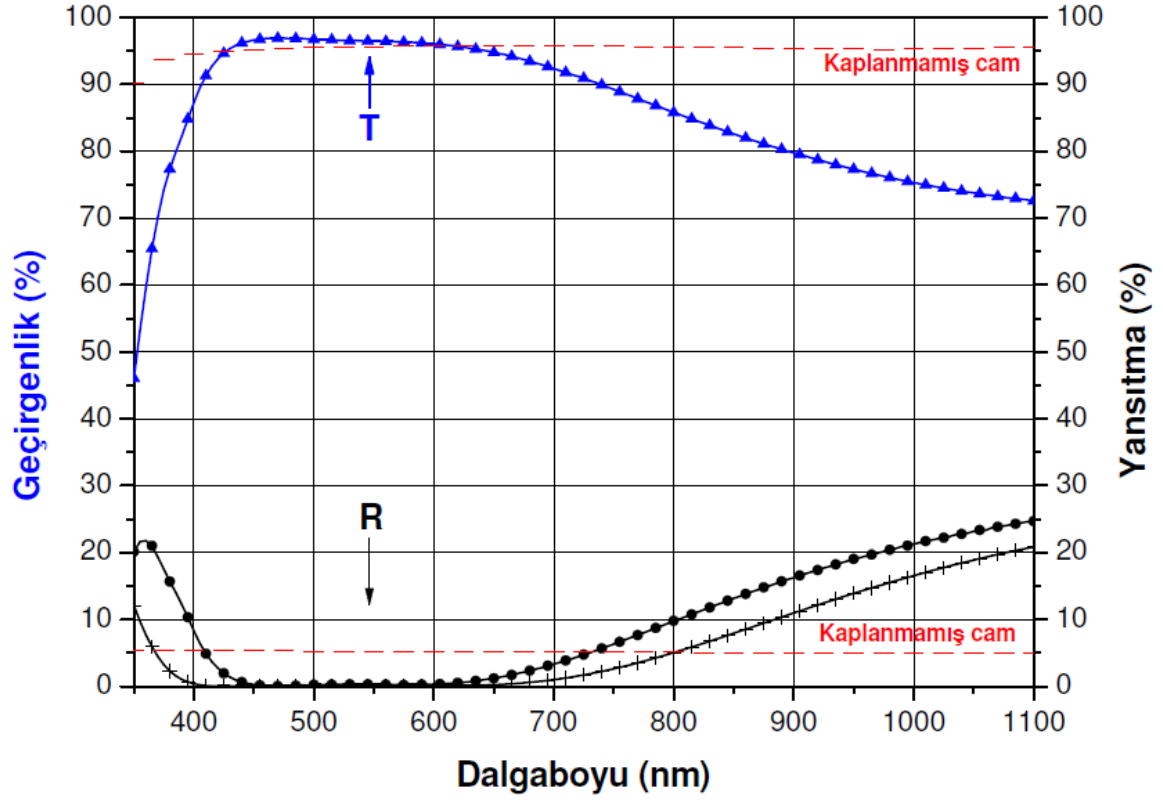
Yüksek ve düşük kırma indisli malzeme olarak sırası ile TiO_2 ve SiO_2 kullanılarak tasarlanmış olan dört katmanlı yansıtmasız filtreler hazırlanmış ve optik karakterizasyonları yapılmıştır. Yapılan bu dört katmanlı yansıtmasız kaplamalar görünür bölgeden başlayarak yakın kızılötesi bölgesine kadar olan spektrumda değişik şekillerde tasarlanarak kaplanmış ve elde edilen filtrelerin her katmanının kalınlığı aynı oranda değiştirilerek, kaplamaların optik cevabının elektromanyetik spektrumun istenilen bölgesine kaydırılabileceği görülmüştür.

Dikkate alınması gereken önemli bir nokta vardır. Buraya kadar rapor edilen örneklerin sadece bir yüzü kaplanmaktadır, her iki yüzü de kaplandığı zaman yansıtma neredeyse sıfır olacaktır. Çift yüzü de TiO_2 - SiO_2 malzeme çiftleriyle sıralı olarak dört katman olacak şekilde kaplanmış yansıtmasız ince film örneklerin optik yansıtması büyük ölçüde azaltılmış, görünür bölgede hazırlanan örnekte %0.3 yansıtma ve yakın kızılötesi bölgesinde hazırlanan örnekte %1 yansıtma elde edilmiştir. Bu tür örnekler endüstriyel değere sahip filtreler olarak değerlendirilebilir.

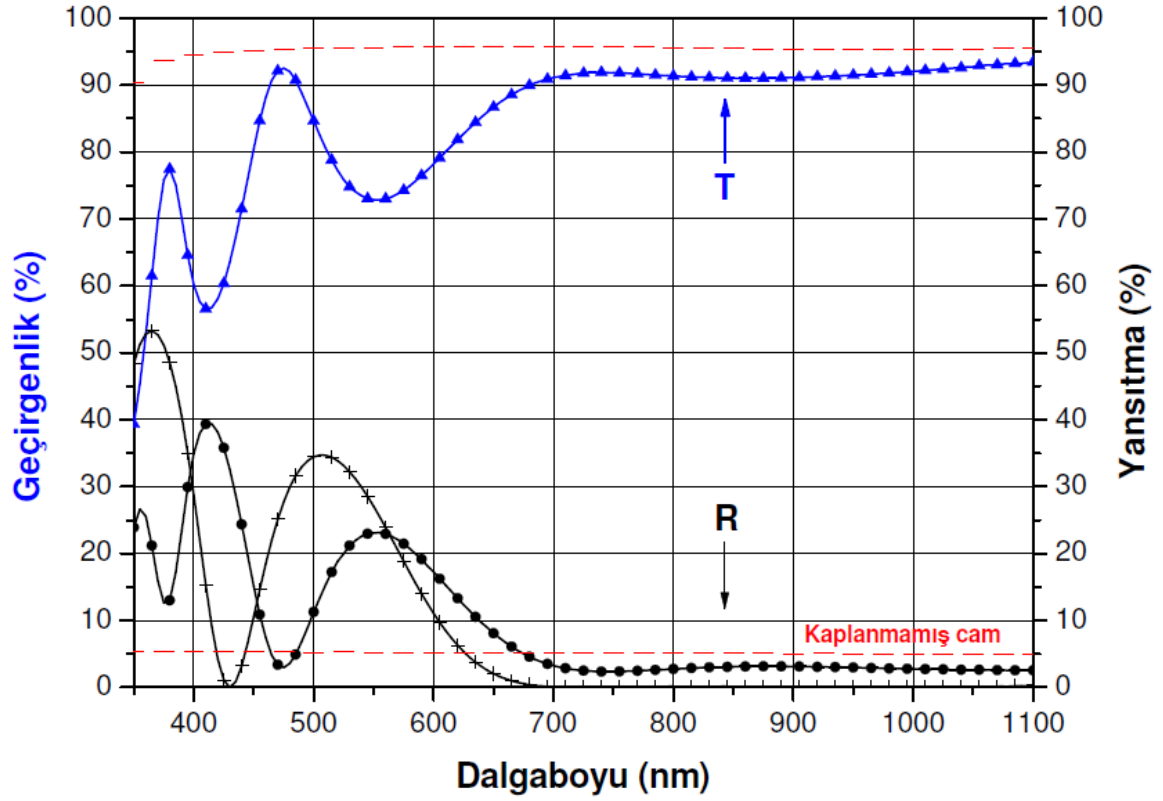
Hazırlanan yansıtmasız çok katmanlı filmlerin optik yansıtması azalırken, optik geçirgenliği aynı oranda artmadığı gözlenmiştir. Bunun nedeni ise kullanılan cam alttaşın ve oluşturulan filmin soğurganlığıdır. Optik yansıtması azalırken, optik geçirgenliği artan yüksek geçirgenliğe sahip yansıtmasız çok katmanlı filmlerin hazırlanması için kullanılan alttaşın çalışılan spektral bölgede son derece kararlı ve soğurganlığı en az seviyede olmalıdır.



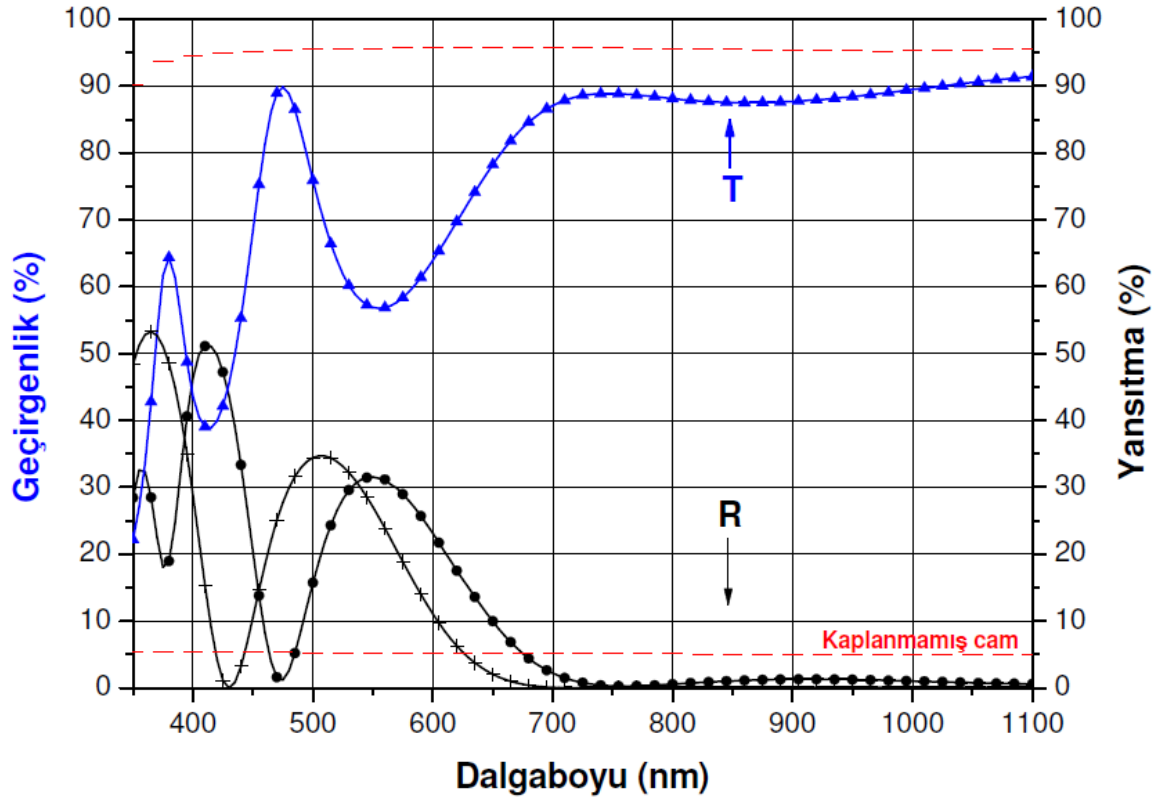
Şekil 4.25. 1737F camının tek yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. S/(HL)²/A, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.



Şekil 4.26. 1737F camının her iki yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun görünür bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. A/(LH)²/S/(HL)²/A, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.



Şekil 4.27. 1737F camının tek yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve % 6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgaboyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. S/(HL)²/A, S: Cam Altaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.



Şekil 4.28. 1737F camının her iki yüzü üzerinde, 50 mTorr çalışma basıncı ve %6 O₂ konsantrasyonunda, spektrumun yakın kızılötesi bölgesinde büyütülmüş dört katmanlı ince film tasarımının dalgalı boyuna bağlı deneysel p polarizasyon optik geçirgenlik (üçgen çizgi) ve optik yansıtma (yuvarlak çizgi), kuramsal model yansıtma (artı çizgi), kaplanmamış 1737F camının optik geçirgenlik (kesikli çizgi) ve optik yansıtma (kesikli çizgi) eğrileri. A/(LH)²/S/(HL)²/A, S: Cam Alttaş, L: SiO₂, H: TiO₂, A: Hava.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Tez çalışması kapsamında ilk aşamada tek katmanlı SiO_2 , ZrO_2 ve TiO_2 ince filmler, RF magnetron kopartma tekniği kullanılarak, cam ve silikon alttaşlar üzerine farklı deneysel koşullar altında kaplanmıştır. Her film için uygulanan RF gücü ve O_2 konsantrasyonu parametreleri değiştirilerek, filmlerin optik davranışına etkisi incelenmiştir. Düşük soğurganlığa sahip ve kaliteli tek katmanlı ince filmlerin oluşturulması için deneysel koşullar belirlenmiştir. Hazırlanan örneklerin spektrofotometrik ölçümleri alınarak, görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde dalgaboyuna bağlı optik geçirgenlikleri (T) ve optik yansıtması (R) elde edilmiştir. Daha sonra ortagonalize Cauchy modeli kullanılarak uyşum işlemi sonucunda, her filmin kırma indisi (n) ve sönüm katsayısı (k) dalgaboyuna bağlı olarak belirlenmiştir. Böylece hazırlanan tek katmanlı ince filmlerin optik karakterizasyonları yapılmıştır. Düşük soğurganlığa sahip ve kaliteli ince filmlerin hazırlanmasında belirlenen deney koşulları, üçüncü aşamada çok katmanlı filmlerin hazırlanmasında kullanılarak, istenen optik davranışa ve düşük soğurganlığa sahip çok katmanlı filmler hazırlanmıştır.

İkinci aşamada, ince filmlerde matris kuramında verilen kuramsal optik yansıtma değişimi MATLAB programında yazılarak, çeşitli dielektrik ayna ve yansıtmasız filtre tasarımları yapılmıştır. Spektrumun görünür bölgesinde $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ ve $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ çiftleri kullanılarak çok katmanlı yüksek yansıtan dielektrik ayna tasarımları yapılmıştır. Yüksek yansıtmalı dielektrik aynalar için $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ çiftinin daha uygun olduğu ve $\text{SiO}_2\text{-ZrO}_2$ çiftine göre daha fazla optik yansıtma verdiği gözlenmiştir. Spektrumun görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde yıkıcı girişim yaparak optik yansıtmayı sıfırlaması için belirlenen özel katman kalınlıklarında $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ çiftleri kullanılarak dört katmanlı yansıtmasız filtre tasarımları yapılmıştır.

Üçüncü aşamada, yüksek-düşük kırma indisli $\text{TiO}_2\text{-SiO}_2$ çiftlerinin cam ve silisyum alttaşlar üzerine sıralı olarak kaplanması ile görünür bölgede dört, altı ve on iki katmanlı dielektrik aynalar hazırlanmıştır. Hazırlanan deneysel örneklerin optik yansıtması spektrofotometre ile ölçülmüştür. Deneysel sonuçlar kuramsal modelleri ile karşılaştırıldığında uyumlu oldukları gözlenmiş, sadece iki malzeme kullanılarak görünür bölgede çok yüksek yansıma gerektiren uygulamalarda

kullanılabilecek düzeyde dielektrik aynaların hazırlanmasının mümkün olduğu görülmüştür. Bunun yanı sıra görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde, cam alttaşın tek yüzüne ve her iki yüzüne dört katmanlı yansıtmasız filtreler hazırlanmasıyla, bu faktörün filtrelerin optik davranışına olan etkisi incelenmiştir. Cam alttaşın her iki yüzünün kaplanmasıyla, tek yüzü kaplanan cama göre daha düşük yansıtma verdiği sonucuna varılmıştır. Bu tür çalışmalar ise görünür ve yakın kızılötesi bölgelerinde yansıtmanın istenmediği birçok uygulamada kullanılabilir.

Kaliteli ince film hazırlamada ve safsızlıkların önlenmesinde önemli olan bazı unsurlar vardır. Çalışma odasının temiz olması ve odadaki parçacık sayısı önemli unsurlardan biridir. Odadaki parçacık sayısına ve büyüklüğe göre sınıflandırılan temiz odalarda (clean room) ince film hazırlanmalıdır. Böylece atmosferden gelebilecek safsızlıklar azaltılabilir. Vakum kazanında ise taban basıncının ultra yüksek vakum seviyesine getirilerek, hazırlanan filmlerde oluşabilecek safsızlıklar önlenabilir. Diğer bir safsızlık kaynağı hedef malzemesinin yüzeyinde oluşabilecek oksit tabakasıdır. Deney sırasında kaplama işlemine başlamadan önce hedef yüzeyi, 10-15 dakika plazma ile iyon-temizleme (ion-cleaning) işlemi uygulanarak temizlenmelidir.

Bu çalışmada kaplama işlemi sürerken alttaş tutamağı dönmemektedir. Bu yüzden alttaş üzerinde hazırlanan filmin kalınlığında bir gradyent oluşmaktadır. Alttaş tutamağının kendi eksenini etrafında döndürülmesi ile bu sorun çözülebilir.

Alttaş olarak kullanılan malzemelerin spektral bölgedeki optik davranışı ve soğurganlığı çok önemlidir. Çalışılan spektral bölgede düşük soğurganlığa sahip alttaşlar kullanılmalıdır (Safir, kuartz gibi).

Çok katmanlı çalışmalarda, yüksek yansıtımlı ince filmler hazırlanması için kırma indisleri oranı sıfıra en yakın olan düşük ve yüksek kırma indisli malzemeler seçilmelidir. Çok katmanlı yansıtmasız kaplamalarda ise, optik yansıtmanın sıfıra indirilebilmesi için kullanılan alttaşın her iki yüzünün de aynı optik tasarımla kaplanması gerekmektedir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Durusoy, H.Z., Duyar, Ö., Aydınli, A. ve Ay, F., 2003, Influence of substrate temperature and bias voltage on the optical transmittance of TiN films, Vacuum, 70, 21-28.
- Duyar, Ö. and Durusoy, H.Z., 2004, Design and preparation of antireflection and reflection optical coatings, Turkish Journal of Physics, 28, 139-144.
- Duyar, Ö., 2006, Tam Yansıtan ve Hiç Yansıtmayan Çok Katmanlı Dielektrik Filimler, Doktora Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 126s.
- Fox, M., 2001, Optical Properties of Solids, Oxford University Press, New York, 305p.
- Gao, P., Meng, L.J., dos Santos, M.P., Teixeira, V. and Andritschky, M., 2000, Characterization of ZrO₂ films prepared by rf reactive sputtering at different O₂ concentrations in the sputtering gases, Vacuum, 56, 143-148.
- Jeong, S.H., Kim, J.K., Kim, B.S., Shim, S.H. and Lee, B.T., 2004, Characterization of SiO₂ and TiO₂ films prepared using rf magnetron sputtering and their application to anti-reflection coating, Vacuum, 76, 507-515.
- Kasap, S.O., 2006, Principles of Electronic Materials and Devices, McGraw-Hill, Canada, 874p.
- Ma, C.Y., Lapostolle, F., Briois, P. and Zhang, Q.Y., 2007, Effect of O₂ gas pressure on structures and dielectric characteristics of rf sputtered ZrO₂ thin films, Applied Surface Science, 253, 8718-8724.
- Ohring, M., 2002, Materials Science of Thin Films, Academic Press, New Jersey, 794p.
- Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.S. and Pedrotti, L.M., 2007, Introduction To Optics, Pearson Education, USA, 622p.
- Pulker, H.K., 1979, Characterization of optical thin films, Applied Optics, 18, 1969-1977.
- Rancourt, J.D., 1987, Optical Thin Films User's Handbook, McGraw-Hill, California, 289p.

Roth, A., 1990, Vacuum Technology, Elsevier Science, Israel, 554p.

Sreemany, M. and Sen, S., 2004, A simple spectrophotometric method for determination of the optical constants and band gap energy of multiple layer TiO₂ thin films, Materials Chemistry and Physics, 83, 169-177.

Zhao, S., Ma F., Xu K.W. and Liang H.F., 2008, Optical properties and structural characterization of bias sputtered ZrO₂ films, Journal of Alloys and Compounds, 453, 453-457.

Wasa, K. and Hayakawa S., 1992, Handbook Of Sputter Deposition Technology, Noyes Publications, Osaka, 304p.

Willey, R.R., 1996, Practical Design and Production of Optical Thin Films, Marcel Dekker, Michigan, 284p.

BİLİMSEL ETKİNLİKLER

1. 15. Yoğun Madde Fiziği Toplantısı, 2008, SiO₂ ve TiO₂ İnce Filmler Kullanarak Yansıtmasız Filtre ve Yalıtkan Aynaların Tasarımı ve Hazırlanması, Bilkent Üniversitesi, Poster Sunumu.
2. International Workshop on New Trends in Science and Technology, 2008, Design and Manufacture of Antireflecting Filters and Dielectric Mirrors By Means of SiO₂ and TiO₂ Thin Films, Çankaya Üniversitesi, Poster Sunumu.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Hakan ÇALIŞKAN

Doğum Yeri : Ankara

Doğum Yılı : 1984

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu :

Lise : 1998 – 2002 Keçiören İncirli Yabancı Dil Ağırlıklı Lise

Lisans : 2002 – 2007 Hacettepe Üniversitesi, Fizik Mühendisliği Bölümü

Yabancı Dil : İngilizce

İş Tecrübesi : 2008 – 2009 Öz Lodos Enerji, Proje Mühendisi