

**TİTANYUM DİOKSİTİN OPTİK
ÖZELLİKLERİNİN FABRİKASYON
PARAMETRELERİNE BAĞIMLILIĞI**

Hava POLAT

**Yüksek Lisans Tezi
Nanobilim ve Nano Mühendislik Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Tevhit KARACALI
2013
Her hakkı saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TİTANYUM DİOKSİTİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN
FABRİKASYON PARAMETRELERİNE BAĞIMLILIĞI**

Hava POLAT

NANOBİLİM ve NANO MÜHENDİSLİK ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her hakkı saklıdır



T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



TEZ ONAY FORMU

**TİTANYUM DİOKSİTİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN FABRİKASYON
PARAMETRELERİNE BAĞIMLILIĞI**

Doç. Dr. Tevhit KARACALI danışmanlığında, Hava POLAT tarafından hazırlanan bu çalışma **09/09/2013** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Nanobilim ve Nanomühendislik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği(3/3)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Tevhit KARACALI

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Kadem MERAL

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. İ.Yücel ÖZBEK

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma Tübitak 1001 ve BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir. Proje No:111T217 ve Proje No:2011/127

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

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TİTANYUM DİOKSİTİN OPTİK ÖZELLİKLERİNİN FABRİKASYON PARAMETRELERİNE BAĞIMLILIĞI

Hava POLAT

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Nanobilim ve Nano Mühendislik Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Tevhit KARACALI

Bu çalışmada radyo frekans magnetron saçtırma yöntemiyle farklı alttaş malzemeler üzerine farklı kalınlıklarda titanyum dioksit ince filmler büyütülmüştür. Büyütülen ince filmlerin optik özellikleri çeşitli spektroskopi teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Çalışmanın sonunda alttaş ve tavlama sıcaklığının TiO_2 ince filmlerin optik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Araştırma sonunda yasak enerji aralıklarına ve optik katsayılara ulaşılmıştır.

2013, 53 sayfa

Anahtar Kelimeler: TiO_2 , Optik Özellikler, Saçtırma, Yansıma

ABSTRACT

Master Thesis

FABRICATION PARAMETERS DEPENDENCY OF OPTICAL PROPERTIES OF TITANIUM DIOXIDE

Hava POLAT

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Nanoscience and Nano Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tevhit KARACALI

In this study we investigated optical properties of titanium dioxide thin films which is deposited on different substrate materials at different thickness by using radio frequency magnetron sputtering. Various spectroscopic techniques were used for the optical properties of thin films. At the end of the study investigated the effect of substrate and annealing temperature on the optical properties of titanium dioxide thin films. Optical band gap and optical coefficients were obtained at the end of the research.

2013, 53 pages

Keywords: TiO₂, Optical Properties, Sputtering, Reflectance

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma; Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Nano-teknoloji Laboratuvarında yapılmıştır.

Öncelikle tezimi hazırlamamda gerekli bilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen danışmanım çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Tevhit KARACALI'ya ve yüksek lisansım boyunca laboratuvar ortamında çalışmamı sağlayan, bilimsel tutum ve davranışlarıyla rol model olan çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Hasan EFEOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her anında yanımda olup tüm imkanlarını seferber eden sevgili aileme ve çalışmalarım boyunca desteğini esirgemeyen arkadaşım Süheyla GÜLLÜLÜ'ye çok teşekkür ederim.

Hava POLAT

Ağustos, 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	3
2.1. Titanyum	3
2.2. Oksijen.....	4
2.3. Titanyum dioksit.....	5
2.3.1. Anataz titanyum dioksit.....	5
2.3.2. Rutil titanyum dioksit.....	6
2.3.3. Brokit titanyum dioksit.....	6
2.4. Cam	8
2.5. Optik Katsayılar	8
2.6. Transfer Matris Metodu.....	12
2.7. Soğurma.....	19
2.7.1. Doğrudan bant geçişleri.....	21
2.7.2. Dolaylı bant geçişleri.....	22
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	25
3.1. Saçtırma (Sputtering)	25
3.1.1. Saçtırma teknikleri	26
3.1.1.a. DC saçtırma	26
3.1.1.b. RF saçtırma.....	27
3.1.1.c. Magnetron saçtırma	28
3.2. UV-VIS Spektrometresi	29
3.3. Spektral Yansıma Ölçüm Sistemi.....	30

3.4. Tavlama Sistemi	31
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	33
4.1. Cam Alttaş Üzerine TiO ₂ İnce Film Büyütülmesi.....	33
4.2. Si Alttaş Üzerine TiO ₂ İnce Film Büyütülmesi.....	36
4.2.1. Sabit sürede tavlanan numuneler.....	45
4.2.2. Sabit sıcaklıkta tavlanan numuneler.....	48
5. SONUÇ	51
KAYNAKLAR	52
ÖZGEÇMİŞ	54

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

α	Soğurma Katsayısı
B	Manyetik Alan
c	Işık Hızı
E	Elektrik Alan
E_g	Yasak Enerji Aralığı
I	Şiddet
κ	Sönüm Katsayısı
$\tilde{n}$	Kompleks Kırılma İndisi
n	Kırılma İndisi
R	Yansıtıcılık
S	Poynting Vektörü
T	Geçirgenlik
v	Hız
λ	Dalgaboyu
ϵ	Dielektrik Sabiti
μ_0	Boşluğun Manyetik Geçirgenlik Katsayısı
ϵ_0	Elektriksel Geçirgenlik Katsayısı

Kısaltmalar

DC	Doğru Akım
RF	Radyo Frekans
TMM	Transfer Matris Metodu
UV	Morötesi
VIS	Görünür

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Anataz TiO_2 birim hücresi ve bulk görünümü.....	5
Şekil 2.2. Rutil TiO_2 birim hücresi ve bulk görünümü.....	6
Şekil 2.3. Brokit TiO_2 birim hücresi ve bulk görünümü.....	7
Şekil 2.4. Tek katlı ince bir filmde ışık demetinin yansıması.....	13
Şekil 2.5. Temel soğurma eğrisi	21
Şekil 2.6. Doğrudan bant geçiş örneği	22
Şekil 2.7. Dolaylı bant geçiş örneği	23
Şekil 3.1. Saçtırma işleminin basit şematik gösterimi	25
Şekil 3.2. Saçtırma sistemi.....	26
Şekil 3.3. DC saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	27
Şekil 3.4. RF saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	28
Şekil 3.5. Magnetron saçtırma tekniğinin şematik gösterimi	29
Şekil 3.6. Soğurma ölçüm sistemi	30
Şekil 3.7. Spektral yansıma ölçüm sistemi	31
Şekil 3.8. Tavlama fırını	32
Şekil 4.1. Farklı alttaş sıcaklıklarında hazırlanan numunelere ait soğurma grafiği.....	34
Şekil 4.2. Yasak enerji aralığının alttaş sıcaklığıyla değişim grafiği.....	35
Şekil 4.3. Farklı alttaş sıcaklıklarında hazırlanan numunelere ait yansıma grafiği	36
Şekil 4.4. Hiç bir işlem uygulanmadan önce alınan yansıma spektrumu	37
Şekil 4.5. 200°C'de 15 dk tavllanmış S86_1 numunesine ait spektrum.....	38
Şekil 4.6. 400°C'de 15 dk tavllanmış S86_2 numunesine ait spektrum.....	38
Şekil 4.7. 500°C'de 15 dk tavllanmış S86_5 numunesine ait spektrum.....	39
Şekil 4.8. 500°C'de 30 dk tavllanmış S86_7 numunesine ait spektrum.....	39
Şekil 4.9. 500°C'de 45 dk tavllanmış S86_8 numunesine ait spektrum.....	40
Şekil 4.10. 500°C'de 60 dk tavllanmış S86_9 numunesine ait spektrum.....	40
Şekil 4.11. 600°C'de 15 dk tavllanmış S86_3 numunesine ait spektrum.....	41
Şekil 4.12. 700°C'de 15 dk tavllanmış S86_6 numunesine ait spektrum.....	41
Şekil 4.13. 700°C'de 30 dk tavllanmış S86_10 numunesine ait spektrum.....	42
Şekil 4.14. 700°C'de 60 dk tavllanmış S86_11 numunesine ait spektrum.....	42

Şekil 4.15. 700°C'de 120 dk tavllanmış S86_12 numunesine ait spektrum.....	43
Şekil 4.16. 800°C'de 15 dk tavllanmış S86_4 numunesine ait spektrum.....	43
Şekil 4.17. 800°C'de 60 dk tavllanmış S86_13 numunesine ait spektrum.....	44
Şekil 4.18. 900°C'de 60 dk tavllanmış S86_14 numunesine ait spektrum.....	44
Şekil 4.19. 15 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak kırılma indislerinin değişimi	45
Şekil 4.20. 15 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak sönüm katsayılarının değişimi.....	46
Şekil 4.21. 60 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklığına bağlı olarak kırılma indisinin değişimi	47
Şekil 4.22. 60 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak sönüm katsayılarının değişimi.....	47
Şekil 4.23. 500°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle kırılma indislerinin değişimi	48
Şekil 4.24. 500°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle sönüm katsayılarının değişimi	49
Şekil 4.25. 700°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle kırılma indislerinin değişimi	50
Şekil 4.26. 700°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle sönüm katsayılarının değişimi	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Titanyum atomunun yapısı ve temel özellikleri	3
Çizelge 2.2. Oksijen atomunun yapısı ve temel özellikleri	4
Çizelge 2.3. Titanyum dioksit fazlarına ait bazı özellikler	7
Çizelge 4.1. Büyütme parametreleri	33
Çizelge 4.2. Hesaplanan yasak enerji aralık değerleri	34
Çizelge 4.3. Numune büyütme parametreleri	37
Çizelge 4.4. 15 dk boyunca argon atmosferinde farklı sıcaklıklarda tavlanan numunelere ait veriler	45
Çizelge 4.5. 60 dk boyunca argon atmosferinde farklı sıcaklıklarda tavlanan numunelere ait veriler	46
Çizelge 4.6. Farklı sürelerde 500°C'de argon atmosferinde tavlanan numunelere ait veriler	48
Çizelge 4.7. Farklı sürelerde 700°C'de argon atmosferinde tavlanan numunelere ait veriler	49

1. GİRİŞ

Metal oksit malzemeler arasında geniş bant aralığına sahip olan titanyum dioksit (TiO_2), yüksek dielektrik sabiti ve kırılma indisi, yakın kızılötesi ve görünür bölgedeki yüksek geçirgenliği gibi optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı üzerinde yaygın olarak çalışılan yarıiletken malzemelerden bir tanesidir (Suciu *et al.* 2009; Kim *et al.* 2010; Phadke *et al.* 2010). TiO_2 bu özelliklerden dolayı, güneş pilleri (Zhao *et al.* 2005; Que and Hu 2006), kozmetik ürünleri, boya maddeleri, fotokatalizörler ve optoelektronik devre elemanlarında (Fujishima and Honda 1972) kullanılması gibi oldukça geniş bir uygulama alanına sahiptir. Yüksek dielektrik sabitine sahip malzemeler, Tamamlayıcı Metal-Oksit-Yarıiletken transistörlerde yalıtkan olarak kullanılmaktadır (Albertin *et al.* 2007). Son zamanlarda, TiO_2 Metal-Oksit-Yarıiletken-Alan Etkili Transistörler ve Kızılötesi detektörler gibi mikro elektronik devre elemanlarında kullanılan silisyum dioksitin (SiO_2) yerini almaya başlamıştır. TiO_2 , özellikle gaz sensör uygulamalarında oldukça önemlidir. TiO_2 ince filmlerin gaz algılama özelliği indirgen veya yükseltgen gaz molekülleriyle film yüzeyinin etkileşmesi neticesinde filmin elektriksel iletkenliğinin değişmesine dayanmaktadır (Sberveglieri *et al.* 2000).

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada titanyum dioksit ince filmler radyo frekans (RF) saçtırma yöntemi kullanılarak cam ve silisyum alttaş malzemeleri üzerine iki farklı seri olarak büyütülmüş ve elde edilen ince filmlerin optik özellikleri incelenmiştir

Birinci seride TiO_2 ince filmler cam alttaş üzerine 20 nm kalınlığında sadece alttaş sıcaklığı değiştirilip diğer büyütme parametreleri (RF gücü, altlık bias, oksijen ve argon gaz akış oranları ve döndürme hızı) sabit tutularak büyütülmüştür. Elde edilen ince filmlerin soğurma ölçümleri alınarak alttaş sıcaklığının optik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir.

İkinci seride ise TiO_2 ince filmler, yüzeyi oksitlenmiş silisyum üzerine 400 nm kalınlığında sabit alttaş sıcaklığında büyütülmüştür. Elde edilen ince filmler farklı sıcaklıklarda tavlansarak yansıma ölçümleri alınmış ve tavlama sıcaklığının optik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde TiO_2 'in yasak enerji aralık ve optik katsayı değerlerine ulaşılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Titanyum

Periyodik cetvelin 4. grubunda yer alan çok sert, gümüşü beyaz, parlak bir geçiş metal elementidir.

Çizelge 2.1. Titanyum atomunun yapısı ve temel özellikleri

Sembol	Ti	Ergime ısısı	14,15 kJ/mol
Atom numarası	22	Buharlaştırma ısısı	425 kJ/mol
Atom ağırlığı	47,867 g/mol	Kristal yapısı	Hegzagonal
Elektron dizilimi	[Ar]3d ² 4s ²	Kovalent yarıçapı	136 pm
Yoğunluk	4,506 g/cm ³	Atomik yarıçapı	140 pm
Erime noktası	1941 K	Isıl iletkenlik	(300K) 21,9 W/m.K
Kaynama noktası	3560 K	Elektronegatiflik	1,54

Yerkabuğunda kütle bakımından bollukta onuncu element olan titan (%0.58), klor, karbon, kükürt gibi çok bilinen elementlerin başında gelmektedir. Yerkabuğunda çok dağılmış olarak bulunduğundan işletilecek cevheri çok azdır. Demirden sağlamdır. Yüzeyinde beyaz oksit ve nitrür tabakaları mevcut olduğundan korozyona karşı dayanıklıdır. Titanın en önemli yükseltgenme basamağı +4, en önemli bileşiği de titania denen dioksittir (Sienko *et al.* 1976; Anonim 2013a; Anonim 2013b).

2.2. Oksijen

Oksijen, periyodik tabloda halojen grubunun bir üyesidir. Hemen hemen tüm elementlerle kolayca bileşik oluşturabilen bir ametaldır.

Çizelge 2.2. Oksijen atomunun yapısı ve temel özellikleri

Sembol	O	Ergime ısısı	(O ₂) 0,444 kJ/mol
Atom numarası	8	Buharlaştırma ısısı	(O ₂) 6,82 kJ/mol
Atom ağırlığı	15,9994 g/mol	Kristal yapısı	Kübik
Elektron dizilimi	1s ² 2s ² 2p ⁴	Isıl iletkenlik	0,02674 W/m.K
Yoğunluk	1,429 g/lit	Elektronegatiflik	3,44
Erime noktası	54,36 K	İyonlaşma enerjisi	1313,9 kJ/mol
Kaynama noktası	90,20 K	Görünüş	Renksiz

Standart şartlar altında, elementin iki atomu bağlanarak çok soluk mavi renkte, kokusuz, tatsız, diatomik yapıdaki, O₂ formülüne sahip dioksijen gazını oluşturur. Kütleli olarak hidrojen ve helyumdan sonra evrende ve yerkabuğunda en bol bulunan elementtir, bu kısmın kütleli kısmının neredeyse yarısını oksijen oluşturur (Anonim 2013b).

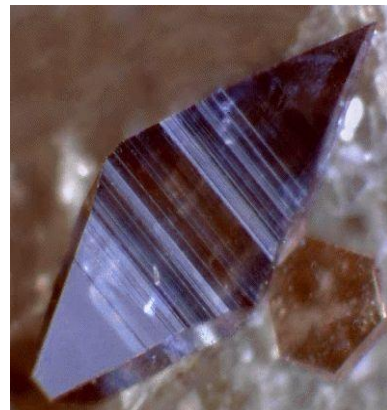
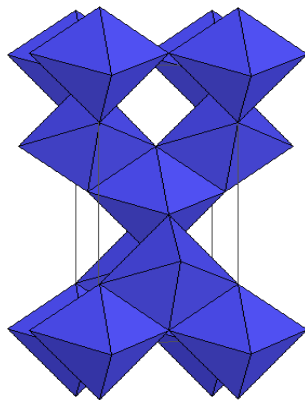
2.3. Titanyum dioksit

IV-VI grubu ikili bileşik yarıiletkenlerden birisidir. Titanyum atomu ile Oksijen atomunun bir araya gelmesiyle oluşur. Titanyum dioksit geniş bir bölgeyi içine alan geçirgenliği, yüksek kırılma indisi, düşük soğurganlığı, yüksek dielektrik sabiti, yüksek mekanik ve kimyasal dayanıklılığı ile iyi bir yalıtkan olma gibi üstün fiziksel özelliklere sahip bir malzemedir.

Titanyum dioksit doğada kristal yapı olarak üç şekilde bulunur. Bunlar; anataz, rutil ve brokit yapısıdır.

2.3.1. Anataz titanyum dioksit

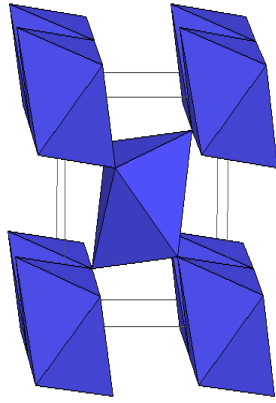
TiO_2 fotoiletkenliği, elektron-boşluk çifti üretiminin kolaylığı ve homojen yük dağılımını sağlayabilmesi gibi özellikleri ile ön plana çıkmaktadır. TiO_2 'nin bu özelliklerini en iyi şekilde gösteren fazı anatazdır (Hu and Yuan 2005). Birim hücresinde 12 atom ve 4 molekül bulunmaktadır. Tetragonal yapısıdır. Anataz TiO_2 kristaline ilişkin örnekler Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Anataz TiO_2 birim hücresi ve fotoğrafı (Anonim 2013c; Anonim 2013d)

2.3.2. Rutil titanyum dioksit

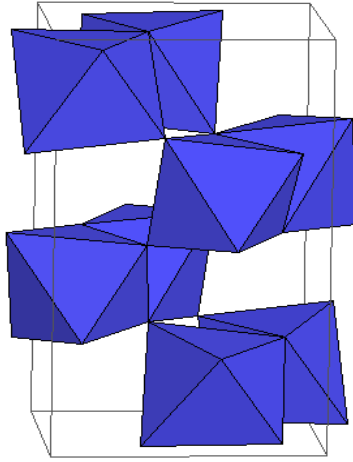
Kimyasal ve termal dengesi en yüksek olan fazdır. Birim hücresinde 6 atom ve 2 molekül bulunmaktadır. Rutil TiO_2 de anataz TiO_2 gibi tetragonal bir yapı göstermektedir. Rutil TiO_2 kristaline ilişkin örnekler Şekil 2.2’de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. Rutil TiO_2 birim hücresi ve fotoğrafı (Anonim 2013c; Anonim 2013d)

2.3.3. Brokit titanyum dioksit

Brokit fazı TiO_2 ’nin en düşük aktivasyon enerjisine sahip olan fazıdır. Çoğunlukla güneş hücrelerinde kullanılan brokit yapının üretimi diğer fazlara göre daha zordur. Brokit fazı düşük sıcaklıklarda üretilir çünkü yüksek sıcaklıklarda rutil faza dönüşmektedir. Genellikle doğada minerallerin yapısında yer almaktadır. Birim hücresinde 24 atom ve 8 molekül bulundurmaktadır. Ortorombik yapıdadır. Brokit TiO_2 kristaline ilişkin örnekler Şekil 2.3’de gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Brokit TiO_2 birim hücresi ve fotoğrafı (Anonim 2013c; Anonim 2013d)

Çizelge 2.3. Titanyum dioksit fazlarına ait bazı özellikler (Fujishima *et al.* 1999; Karvinen *et al.* 2003; Akkaya ve Tepehan 2011)

	Anataz	Rutil	Brokit
Kristal yapısı	Tetragonal	Tetragonal	Ortorombik
Örgü sabitleri (Å)	a=3,784	a=4,5936	a=9,166
	b=3,784	b=4,5936	b=5,436
	c=9,515	c=2,9587	c=5,145
Özgül ağırlık	4-4,5	4,2-4,4	4,14
Sertlik (mohs)	5-6	6-6,5	5,5-6
Yoğunluk (g/cm^3)	3,79	4,13	3,99
Yasak enerji aralığı	3,2	3,0	3,4-3,55
	direk bant aralığı	direk bant aralığı	indirek bant aralığı
Kırılma indisi	2-2,4	2,7	2-2,4

2.4. Cam

Camlar optik malzemeler için oldukça önemli, çoğunlukla saydam veya yarısaydam halde kullanılan, sert ve kırılğan olan inorganik katı bir malzemedir. Temel olarak eritilmiş kum (silika: SiO_2) ve diğer kimyasallardan meydana gelmiştir. Saf eriyik silika yalıtkandır ve yalıtkanların tüm özelliklerini göstermektedir. Görünür bölgede saydamdır fakat morötesi bölgede SiO_2 moleküllerinin elektronik geçişlerinden dolayı soğurur (Fox 2001). Değişik uygulamalar ve kullanım alanları nedeniyle istenilen özellikleri sağlayacak değişik cam türleri mevcuttur (Arığ 2010).

2.5. Optik Katsayılar

Makroskopik düzeyde ortamın optik özelliklerinin belirlenmesi çok sayıda parametre ile sağlanır. Yüzeydeki yansıma, yansıma katsayısı ya da yansıtıcılıkla ile tanımlanır. Genellikle R sembolü ile verilir ve yüzey üzerinden yansıyan elektromanyetik dalga şiddetinin yüzey üzerine gelen dalga şiddetine oranı olarak ifade edilir. Geçirme katsayısı ya da geçirgenlik olan T ise geçen elektromanyetik dalga şiddetinin yüzey üzerine gelen dalga şiddetine oranı olarak ifade edilir. Eğer ortamda soğurma veya saçılma yoksa (kayıpsız) enerjinin korunumu kanunundan aşağıdaki eşitlik yazılır.

$$R+T=1 \quad (2.5.1)$$

Kırılma indisi n , boş uzaydaki ışığın hızının c ortamda yayılan ışığın hızına v oranıdır.

$$n = c/v \quad (2.5.2)$$

Kırılma indisi ışığın frekansına bağlıdır. Bu etki dispersiyon olarak adlandırılır. Cam gibi renksiz geçirgen malzemelerin görünür bölgede dispersiyonları küçüktür.

Optik ortam tarafından soğurulan ışık soğurma katsayısı α ile belirlenir. Bu ortamın bir birim uzunluğunda soğurulan gücünün kesri olarak tanımlanır. dz kalınlıklı bir tabakadan geçen ve z yönünde yayılan ışığın şiddetindeki azalma Beer's yasası ile verilir.

$$dI = -\alpha dz \times I(z) \quad (2.5.3)$$

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z} \quad (2.5.4)$$

I_0 $z=0$ da ki ışığın şiddetidir.

Elektromanyetik dalgalar, malzemeler içerisinde boş uzaydakinden daha farklı bir şekilde yayılırlar. Bu nedenle dalganın hızında ve şiddetinde karmaşık (kompleks) kırılma indisiyle ($\tilde{n}$) tanımlanan bir değişim meydana gelir.

$$\tilde{n} = n + i\kappa \quad (2.5.5)$$

Karmaşık kırılma indisinin sanal bileşeni κ sönüm katsayısı olarak bilinir ve ortamın soğurma katsayısı ile direkt olarak ilişkilidir.

α ile κ arasındaki ilişki, karmaşık kırılma indisli ortam içerisinde yayılan düzlem elektromanyetik dalga göz önüne alınarak bulunabilir.

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 e^{(kz - \omega t)} \quad (2.5.6)$$

k dalga vektörü ve ω açısal frekanstır. $|\varepsilon_0|$ $z=0$ daki genliktir. Soğurmamayan ortamın kırılma indisi n , ışığın dalga boyu serbest uzayın dalga boyu λ ile kıyaslandığında n faktörüyle azalır. Bu nedenle k ve ω birbiri ile ilişkilidir.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda/n} = \frac{nw}{c} \quad (2.5.7)$$

Kırılma indisi karmaşık olarak ele alınırsa denklem,

$$k = \tilde{n} \frac{w}{c} = (n + ik) \frac{w}{c} \quad (2.5.8)$$

olur ve

$$\varepsilon(z, t) = \varepsilon_0 e^{i\left(\frac{w\tilde{n}z}{c} - wt\right)} = \varepsilon_0 e^{-\kappa wz/c} e^{i\left(\frac{wnz}{c} - wt\right)} \quad (2.5.9)$$

Işık dalgasının optik şiddeti elektrik alanın karesiyle orantılıdır.

$$I \propto \varepsilon \varepsilon^* \quad (2.5.10)$$

$$\alpha = \frac{2\kappa w}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (2.5.11)$$

λ ışığın serbest uzaydaki dalgaboyudur. Bu da κ nın soğurma katsayısı ile direkt olarak orantılı olduğunu göstermektedir.

Bir ortamın kompleks kırılma indisi ile dielektrik sabiti ϵ_r arasındaki ilişki Maxwell denklemleri kullanılarak aşağıdaki eşitlik türetilmiştir.

$$\tilde{n} = \sqrt{\epsilon_r} \quad (2.5.12)$$

Buna göre eğer kırılma indisi karmaşık ise dielektrik sabiti de karmaşık olmak zorundadır ve karmaşık rölatif dielektrik sabiti aşağıdaki gibidir.

$$\tilde{\epsilon}_r = \epsilon_1 - i\epsilon_2 \quad (2.5.13)$$

$$\tilde{n}^2 = \tilde{\epsilon}_r \quad (2.5.14)$$

Kompleks kırılma indisi ile dielektrik sabitinin reel ve sanal kısımlarını ayrı ayrı birleştirirsek

$$\epsilon_1 = n^2 - k^2 \quad (2.5.15)$$

$$\epsilon_2 = 2nk \quad (2.5.16)$$

ve

$$n = \frac{1}{\sqrt{2}} (\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{1/2})^{1/2} \quad (2.5.17)$$

$$k = \frac{1}{\sqrt{2}} (-\epsilon_1 + (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2)^{1/2})^{1/2} \quad (2.5.18)$$

ifadeleri elde edilir. Buna göre $\tilde{n}$ ve $\tilde{\epsilon}_r$ nin birbirlerinden bağımsız nicelikler olmadığı, ϵ_1 ve ϵ_2 biliniyorsa n ve k bulunabilir ya da tam tersi durumda olabilir. Ortam sadece zayıf soğurucuysa k nın çok küçük olduğu tahmin edilebilir ve böylece n ve k daha basit hale getirilebilir.

$$n = \sqrt{\epsilon_1} \quad (2.5.19)$$

$$k = \frac{\epsilon_2}{2n} \quad (2.5.20)$$

Bu eşitlikler bize dielektrik sabitinin sanal kısmı ile soğurmanın, gerçek kısmı ile kırılma indisinin belirlendiğini göstermektedir. Bu genelleme ortamın çok büyük soğurma katsayısına sahip olduğu durumlarda geçerli olmayabilir.

Yansıma katsayısı hem n hem de k ya bağlı olarak verilir. Hava (vakum) ortamındaki yansıma katsayısı için aşağıdaki eşitlik yazılır (Fox 2001).

$$R = \left| \frac{\tilde{n}-1}{\tilde{n}+1} \right|^2 = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \quad (2.5.21)$$

2.6. Transfer Matris Metodu

Transfer matris metodu (TMM) periyodik yapıların analizi için güçlü bir tekniktir. Son yıllarda çok katmanlı filmlere olan ilgi her geçen gün arttığı için bu yapıların yansıma ve geçirgenlik katsayılarını bulmak için kullanılmaktadır (Heavens 1965; Knittl 1976; Yeh 1988, Karacalı 2003).

Transfer matris metodu, Poynting vektörünü ele alınıp kısaca elektromanyetik teoriden bilinen bazı bağıntılar yardımıyla en iyi şekilde açıklanmaktadır (Pedrotti *et al.* 2007).

$$S = \epsilon_0 c^2 (E \times B) \quad (2.6.1)$$

(2.6.1) eşitliği ile Poynting vektörü verilmiştir. Burada ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, c ışık hızı, E elektrik alan şiddeti ve B manyetik alan şiddetini ifade etmektedir.

Herhangi bir dielektrik ortamda yayılan elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alan bileşenlerinin şiddetleri arasında aşağıdaki gibi bir ilişki vardır.

$$E = vB \quad (2.6.2)$$

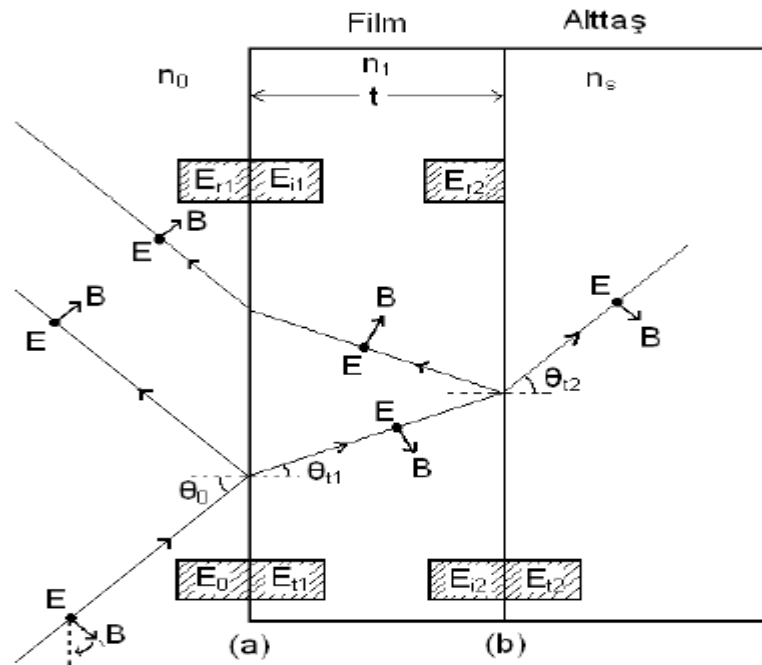
v ortamdaki ışık hızını ifade etmektedir. Vakum ortamında ilerleyen elektromanyetik dalganın hızı sabittir ve aşağıda verilen ifadeye eşittir.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (2.6.3)$$

Burada ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla boşluğun elektriksel ve manyetik geçirgenliğidir. Bu bağıntılar yardımıyla elektrik alan ve manyetik alan bileşenlerinin şiddetleri arasında

$$B = \frac{E}{v} = \frac{n}{c} E = n\sqrt{\epsilon_0\mu_0}E \quad (2.6.4)$$

ile verilen ilişki elde edilir. Tek katlı ince bir filmde ışık demetinin yansıması Şekil 2.4'te verilmektedir.



Şekil 2.4. Tek katlı ince bir filmde ışık demetinin yansıması

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere elektrik alan bileşeni geliş düzlemine dik olarak seçilmiştir. Yüzeye gelen ışık demetinin bir kısmı a arakesitinde dış yansıma uğrayarak kırılma indisi n_0 ile gösterilen ortama geri dönmektedir. Demetin geri kalanı ise kırılma indisi n_1 ve manyetik olmayan film içerisine geçmektedir. Burada bir kısmı b arakesitinde iç yansıma uğrarken bir kısmı kırılma indisi n_s ile gösterilen alttaş içerisine geçmektedir. Gelen ışık demetinin elektrik alan bileşenleri sayfa düzleminde dışarı doğru ($-z$ yönü) gösterilirken, manyetik alanın yönü sağ el kuralı ile

belirlenmektedir. a ve b sınırlarında elektrik alan bileşenlerinin büyüklükleri şu şekilde isimlendirilmiştir. E_0 a arakesitine gelen tüm ışınları, E_{r1} , a arakesitinde yansıyan tüm ışınları, E_{i2} , b arakesitinde alttaş yüzeyinden yansıyan tüm ışınları, E_{r2} b arakesitinden yansıyan tüm ışınları ve E_{i1} , b arakesitinden yansıyarak a arakesitine gelen ışınların tümünü göstermektedir.

$$E_a = E_0 + E_{r1} = E_{t1} + E_{i1} \quad (2.6.5)$$

$$E_b = E_{i2} + E_{r2} = E_{t2} \quad (2.6.6)$$

Manyetik alan bileşenleri,

$$B_a = B_0 \cos \theta_0 - B_{r1} \cos \theta_0 = B_{t1} \cos \theta_{t1} - B_{i1} \cos \theta_{t1} \quad (2.6.7)$$

$$B_b = B_{i2} \cos \theta_{t1} - B_{r2} \cos \theta_{t1} = B_{t2} \cos \theta_{t2} \quad (2.6.8)$$

ile verilir.

(2.6.7) ve (2.6.8) eşitlikleri düzenlenip elektrik alan bileşenleri cinsinden ifade edilirse,

$$B_a = \gamma_0 (E_0 - E_{r1}) = \gamma_1 (E_{t1} - E_{i1}) \quad (2.6.9)$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{i2} - E_{r2}) = \gamma_s E_{t2} \quad (2.6.10)$$

$$\gamma_0 = n_0 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_0 \quad (2.6.11)$$

$$\gamma_1 = n_1 \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t1} \quad (2.6.12)$$

$$\gamma_s = n_s \sqrt{\epsilon_0 \mu_0} \cos \theta_{t2} \quad (2.6.13)$$

E_{i2} ve E_{t1} arasında δ kadar faz farkı vardır.

$$\delta = k_0 \Delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} n_1 t \cos \theta_{t1} \quad (2.6.14)$$

Burada k_0 , boş uzayın dalga vektörünü, Δ ise a ve b arasındaki yol farkını göstermektedir.

$$E_{i2} = E_{t1} e^{-i\delta} \quad (2.6.15)$$

$$E_{i1} = E_{r2} e^{-i\delta} \quad (2.6.16)$$

Yukarıdaki iki eşitlik kullanılarak (2.6.6) ve (2.6.10) ile verilen b arakesitindeki sınır şartları içindeki E_{i2} ve E_{r2} yok edilirse,

$$E_b = E_{t1} e^{-i\delta} + E_{i1} e^{i\delta} = E_{t2} \quad (2.6.17)$$

$$B_b = \gamma_1 (E_{t1} e^{-i\delta} - E_{i1} e^{i\delta}) = \gamma_s E_{t2} \quad (2.6.18)$$

ifadelerine ulaşılır. Buradan E_{t1} ve E_{i1} , E_b ve B_b cinsinden şöyle yazılırlar,

$$E_{t1} = \left(\frac{\gamma_1 E_b + B_b}{2\gamma_1} \right) e^{i\delta} \quad (2.6.19)$$

$$E_{i1} = \left(\frac{\gamma_1 E_b - B_b}{2\gamma_1} \right) e^{-i\delta} \quad (2.6.20)$$

(2.6.19) ve (2.6.20) eşitlikleri, (2.6.5) ve (2.6.9) eşitliklerinde kullanılıp

$2\cos\delta = e^{i\delta} + e^{-i\delta}$ ve $2i\sin\delta = e^{i\delta} - e^{-i\delta}$ trigonometrik bağıntılarından faydalanıldığında a sınırı için elektrik ve manyetik alan bileşenleri tanımlanabilir.

$$E_a = E_b \cos \delta + B_b \left(\frac{i \sin \delta}{\gamma_1} \right) \quad (2.6.21)$$

$$B_a = E_b (i \gamma_1 \sin \delta) + B_b \cos \delta \quad (2.6.22)$$

Bu iki lineer denklem çifti matris formunda yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta & \frac{i \sin \delta}{\gamma_1} \\ i \gamma_1 \sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_b \\ B_b \end{bmatrix} \quad (2.6.23)$$

Bu 2x2'lik matrise filmin transfer matrisi adı verilir ve en genel formda şöyle yazılmaktadır.

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (2.6.24)$$

N katlı bir film için transfer matris aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{bmatrix} E_a \\ B_a \end{bmatrix} = M_1 M_2 M_3 \dots M_N \begin{bmatrix} E_N \\ B_N \end{bmatrix} = M_T \begin{bmatrix} E_N \\ B_N \end{bmatrix} \quad (2.6.25)$$

$$M_T = M_1 M_2 M_3 \dots M_N \quad (2.6.26)$$

Burada M_T bütün katmanları ifade etmektedir ve her bir katmana karşılık gelen transfer matrislerinin çarpımına eşittir. Transfer matrisini bulabilmek için (2.6.5), (2.6.6), (2.6.9) ve (2.6.10) eşitliklerindeki gerekli ifadeler yerlerine yazılıp matriste yerine konulursa,

$$E_a = E_0 + E_{r1} \quad (2.6.27)$$

$$E_b = E_{t2} \quad (2.6.28)$$

$$B_a = \gamma_0(E_0 - E_{r1}) \quad (2.6.29)$$

$$B_b = \gamma_s E_{t2} \quad (2.6.30)$$

$$\begin{bmatrix} E_0 + E_{r1} \\ \gamma_0(E_0 - E_{r1}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{t2} \\ \gamma_s E_{t2} \end{bmatrix} \quad (2.6.31)$$

elde edilir ve aşağıdaki ifade ile özdeşir.

$$1 + r = m_{11}t + m_{12}\gamma_s t \quad (2.6.32)$$

$$\gamma_0(1 - r) = m_{21}t + m_{22}\gamma_s t \quad (2.6.33)$$

Buradaki r yansıma ve t geçirme katsayıları için aşağıdaki eşitlikler yazılmaktadır.

$$r = \frac{E_{r1}}{E_0} \quad , \quad t = \frac{E_{t2}}{E_0} \quad (2.6.34)$$

(2.6.32) ve (2.6.33) eşitlikleri çözülerek, transfer matrisinin elemanları cinsinden sırası ile aşağıdaki gibi geçirme ve yansıma katsayıları elde edilir.

$$t = \frac{2\gamma_0}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (2.6.35)$$

$$r = \frac{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} - m_{21} - \gamma_s m_{22}}{\gamma_0 m_{11} + \gamma_0 \gamma_s m_{12} + m_{21} + \gamma_s m_{22}} \quad (2.6.36)$$

Matris teoremi ışığın film yüzeyine normal gelmesi durumunda geçerlidir. Işık demeti arakesitlere normal olarak gelirse denklemlerdeki tüm açılar sıfır olur ve şu şekli alır.

$$m_{11} = \cos\delta \qquad m_{12} = \frac{isin\delta}{n_1\sqrt{\epsilon_0\mu_0}}$$

(2.6.37)

$$m_{21} = in_1\sqrt{\epsilon_0\mu_0}\sin\delta \qquad m_{22} = \cos\delta$$

Bu matris elemanları (2.6.36) eşitliğinde yerine yazılır ve $\sqrt{\epsilon_0\mu_0}$ çarpan olarak alınırsa yansıma katsayısı aşağıdaki gibi olur.

$$r = \frac{n_1(n_0-n_s)\cos\delta+i(n_0n_s-n_1^2)\sin\delta}{n_1(n_0+n_s)\cos\delta+i(n_0n_s+n_1^2)\sin\delta} \quad (2.6.38)$$

r kompleks olduğu için ve R yansıtma yansıma genliğinin karesiyle orantılı olduğundan

$$R = |r|^2 \quad (2.6.39)$$

şeklinde yazılır. r yansımanın kompleks hali aşağıda verilmiştir.

$$r = \frac{A+iB}{C+iD} \quad (2.6.40)$$

$$|r|^2 = rr^* = \left(\frac{A+iB}{C+iD}\right)\left(\frac{A-iB}{C-iD}\right) = \frac{A^2+B^2}{C^2+D^2} \quad (2.6.41)$$

Yansıtıcılık,

$$R = \frac{n_1^2(n_0-n_s)^2\cos^2\delta+(n_0n_s-n_1^2)^2\sin^2\delta}{n_1^2(n_0+n_s)^2\cos^2\delta+(n_0n_s+n_1^2)^2\sin^2\delta} \quad (2.6.42)$$

şeklinde elde edilir.

Yansıtma için yapılan ilgili düzeltmeler geçirgenlik içinde yapıldığında geçirgenlik şu şekli alır.

$$t = \frac{2n_0n_1}{n_1(n_0+n_s)\cos\delta + i(n_0n_s+n_1^2)\sin\delta} \quad (2.6.43)$$

t de kompleks bir nicelik olup, geçirgenlik T, şu şekilde ifade edilebilir,

$$T = |t|^2 \left(\frac{n_s}{n_0} \right) \quad (2.6.44)$$

t'nin kompleks hali de aşağıdaki gibidir.

$$t = \frac{A}{C+iD} \quad (2.6.45)$$

$$|t|^2 = tt^* = \left(\frac{A}{C+iD} \right) \left(\frac{A}{C-iD} \right) = \frac{A^2}{C^2+D^2} \quad (2.6.46)$$

Geçirgenlik,

$$T = \frac{4n_0n_sn_1^2}{n_1^2(n_0+n_s)^2\cos^2\delta + (n_0n_s+n_1^2)^2\sin^2\delta} \quad (2.6.47)$$

şeklinde elde edilir.

2.7. Soğurma

Bir malzemenin üzerine ışık gönderildiğinde, ışık malzemenin elektriksel yükleriyle etkileşmektedir. Işık, üzerine düştüğü malzemenin bir elektronunu uyararak elektronun sahip olduğu enerji seviyesini daha yüksek bir enerji seviyesine çıkarıp enerji kaybına uğrar. Bu olaya soğurma denir. Soğurma yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarına ve bant tiplerine ilişkin bilgileri kesin bir biçimde vermektedir. Bu nedenle önemli

uygulama alanlarına sahiptir. t kalınlığında herhangi bir malzeme ışık ile etkileştiğinde soğurma

$$I=I_0e^{-\alpha t} \quad (2.7.1)$$

ile ifade edilir (Pankove 1971). Burada I_0 malzeme üzerine gönderilen ışığın şiddetini, I t kalınlığındaki malzemeden geçen ışığın şiddetini ve α soğurma katsayısını göstermektedir. Bu eşitlik malzemeden geçen ışığın şiddetinin α soğurma katsayısı ile üstel olarak azaldığını göstermektedir. Soğurma katsayısı ile yasak enerji aralığı arasındaki ilişki

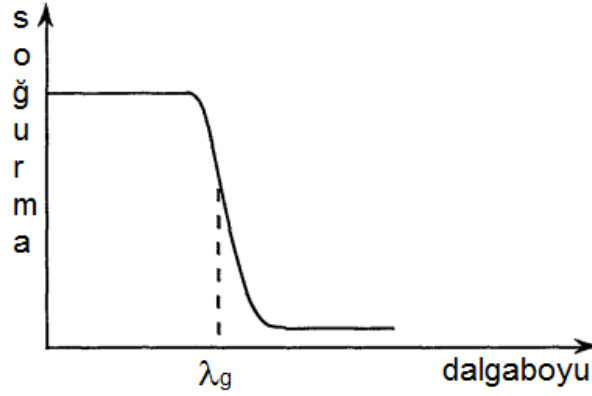
$$\alpha \propto (h\nu - E_g)^n \quad (2.7.2)$$

ile verilir.

Bir elektron uyarıldığında valans bandından iletim bandına geçer ve bu olay temel soğurma olarak adlandırılır (Pankove 1971). Temel soğurmanın gerçekleşmesi için soğurulacak fotonun sahip olduğu enerjinin yasak enerji aralığına eşit ya da büyük olması gerekmektedir. Yarıiletkenlerde temel soğurmanın dalga boyuna göre değişimi

$$\lambda_g = hc/E_g \quad (2.7.3)$$

şeklindedir ve λ_g yasak enerji aralığına eşit enerjili fotonun dalgaboyunu gösterir. λ_g değerinden daha küçük dalgaboylu fotonlar yarıiletken tarafından soğurulurken daha büyük dalgaboylu olanlar hemen hemen soğurulmadan geçerler. Temel soğurma sınırını gösteren eğri aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.5. Temel soğurma eğrisi

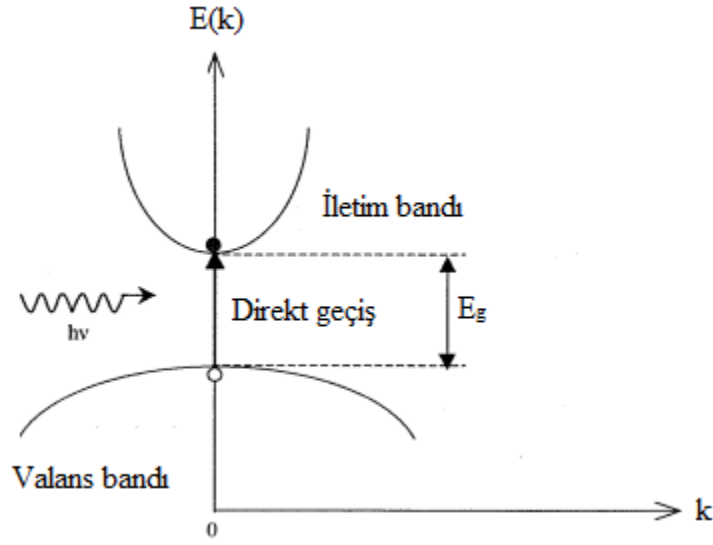
Şekilde görülen iki bölgeyi ayıran sınır temel soğurma sınırı olarak adlandırılır. Temel soğurma sınırında doğrudan ve dolaylı bant geçişi olmak üzere iki çeşit bant geçişi vardır (Fox 2001). İki geçişte de elektronlar valans bandından iletim bandına geçer yalnız farklı yollar kullanılır (Aybek 1996).

2.7.1. Doğrudan bant geçişleri

Doğrudan bant geçişi, valans bandında bulunan bir elektronun momentumunda bir değişiklik olmaksızın yaptığı bir geçiş olup

$$\Delta k=0 \quad (2.7.4)$$

eşitliği ile ifade edilmektedir. Burada k , fotonun momentumunu göstermektedir.



Şekil 2.6. Doğrudan bant geçiş örneği

Şekil 2.6'dan anlaşılacağı gibi elektron, yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük bir enerjiyi soğurup valans bandından iletim bandına geçerken valans bandında bir boşluk bırakır. İletim bandına geçen elektron ve valans bandındaki boşluğun momentumunda herhangi bir değişim söz konusu değildir. Korunum yasasından hareketle,

$$\frac{hc}{\lambda} = E_e - E_\lambda \geq E_g \quad (2.7.5)$$

$$\hbar \vec{k}_e + \hbar \vec{k}_b = 0 \quad (2.7.6)$$

eşitlikleri elde edilir. Burada E_e elektronun enerjisi, E_λ soğurulan ışığın enerjisi, k_e ve k_b sırasıyla elektrona ve boşluğa eşlik eden dalga vektörleridir. Eşitliklerde h Planck sabiti olup, $\hbar = h/2\pi$ 'dir.

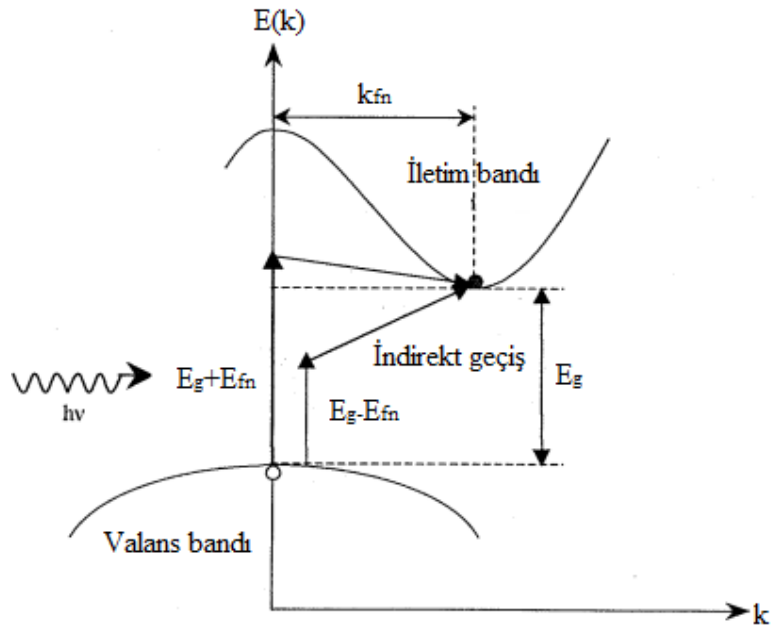
2.7.2. Dolaylı bant geçişleri

Dolaylı bant geçişi, valans bandının tepesi ile iletim bandının çukurunun aynı momentum değerine sahip olmadığı durumlarda gerçekleşir ve

$$\vec{k}_e + \vec{k}_b \neq 0 \quad (2.7.7)$$

$$\Delta k \neq 0 \quad (2.7.8)$$

eşitlikleri ile ifade edilir.



Şekil 2.7. Dolaylı band geçiş örneği

Şekil 2.7'de görüldüğü gibi valans bandındaki bir elektron yasak enerji aralığına eşit enerjili fotonla uyarılmasına rağmen iletim bandına geçemez. Elektronun valans bandına geçebilmesi için enerjinin yanında momentumun da değişmesi gerekir. Bu durumda da geçiş doğrudan olmayıp dolaylı olarak gerçekleşmektedir. Dolaylı geçişte önce doğrudan geçişte olduğu gibi valans bandındaki bir elektron bir foton soğurur sonra iletim bandının çukuruna ulaşabilmesi için gerekli enerjiye sahip bir fonon soğurur ya da yayımlar. Momentumun korunumu için gerekli olan enerji fononun soğurulması ya da yayımlanması ile sağlanır ve

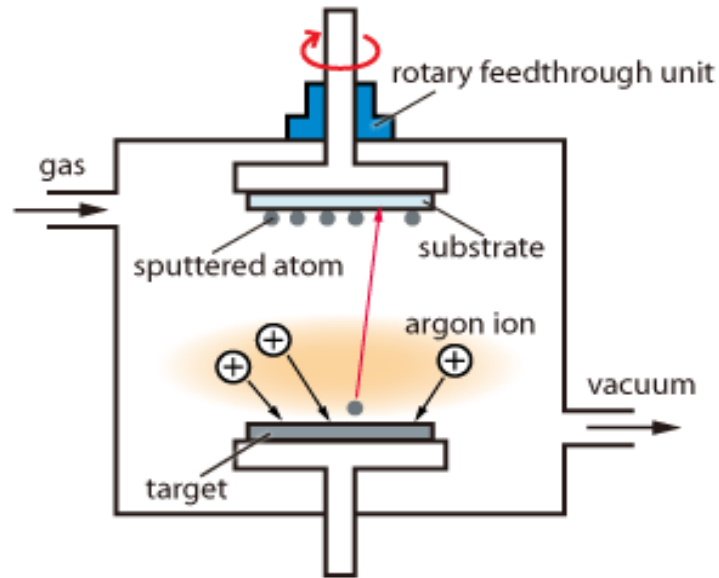
$$\hbar\vec{k} = \hbar\vec{k}_e \pm \hbar\vec{k}_{fn} \quad (2.7.9)$$

eşitliği ile verilir. Burada $\vec{k}$ fotona eşlik eden dalga vektörü ve $\vec{k}_{fn}$ fonona eşlik eden dalga vektörünü göstermektedir. $\vec{k}_{fn}$ 'nin işaretinin pozitif ve negatif olması sırasıyla fononun yayıldığı ve soğurulduğu anlamına gelmektedir.

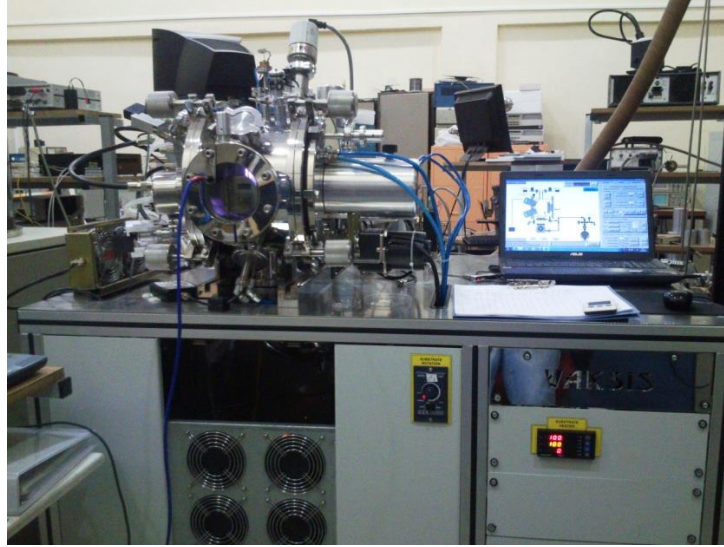
3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Saçtırma (Sputtering)

Saçtırma hedef malzeme atomlarının plazma iyon bombardımanı ile kopartılarak altlık malzemeye biriktirilmesi işlemidir. Biriktirme yapılacak hedef malzeme ile kaynak malzeme vakum seviyesi 10^{-7} Torr'a kadar inebilen bir sistem içerisinde yer alır ve saçtırma işlemi için genellikle iyonize edilmiş etkinlik göstermeyen (inert) bir gaz (Argon) kullanılır.



Şekil 3.1. Saçtırma işleminin basit şematik gösterimi (Anonim 2013e)



Şekil 3.2. Saçtırma sistemi

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı

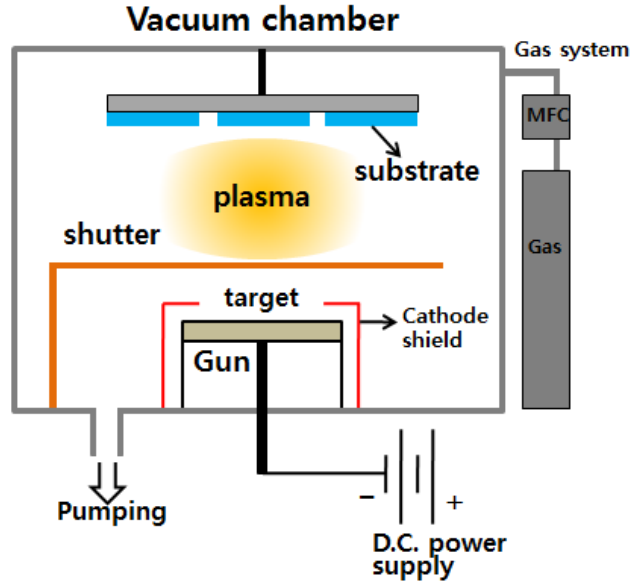
3.1.1. Saçtırma teknikleri

Literatürde birçok saçtırma tekniği mevcuttur. Genellikle bu tekniklerde kullanılan güç kaynaklarının özelliklerine göre değişik saçtırma teknikleri ortaya çıkmaktadır. Doğru akım (DC) saçtırma, radyo frekansı (RF) saçtırma, magnetron saçtırma bunlardan bazılarıdır (Çetin 2011).

3.1.1.a. DC saçtırma

Vakum odası içinde bulunan iki paralel elektroda hedef ve alttaş yerleştirilir ve bir pompa ile pompalanır ve istenilen basınç değerine geldiğinde vakum odasına soy gaz gönderilir. Elektrotlara DC voltaj uygulanır. Serbest kalan elektronlar elektrik alan tarafından hızlandırılır ve Ar atomlarını uyarırlar. Uyarılmış Ar atomları plazma oluşturur ve hedefe doğru yönelerek hedeften nötral atomları ve ikincil elektronları koparır. Koparılan atomlar saçılarak alttaş üzerine birikir ve ince film oluştururlar. İkincil elektronlar ise Ar atomları ile çarpışarak onları iyonize eder ve bu şekilde devam eder (Chenn 2004). DC saçtırma yönteminin zayıf yönü hem hedefin hem de alttaş

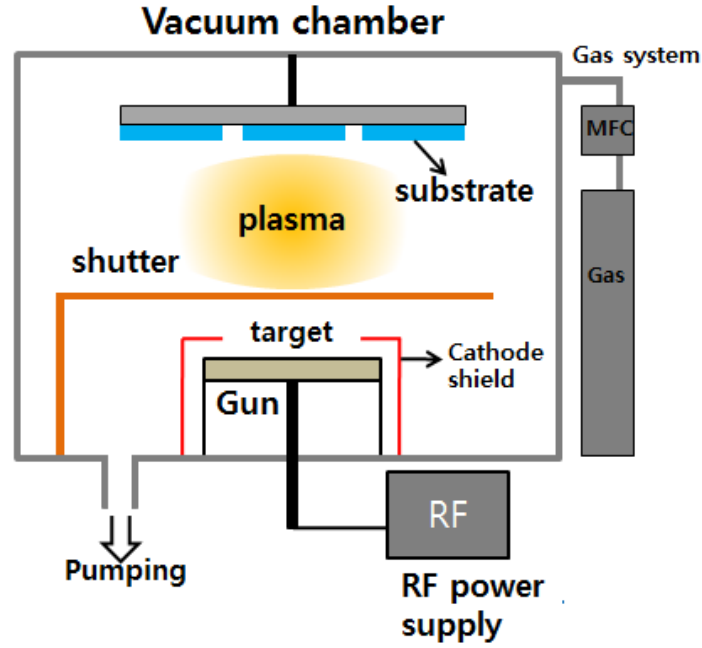
malzemesinin iletken olma zorunluluğudur. Aksi halde katotta biriken yük Ar iyonlarının çarpmasını engelleyip saçtırma olayının durmasına neden olmaktadır.



Şekil 3.3. DC saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonim 2013f)

3.1.1.b. RF saçtırma

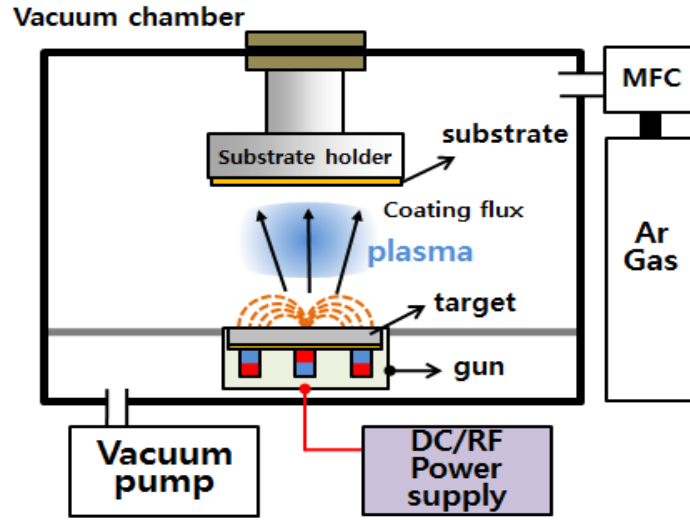
RF saçtırma tekniği iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin kaplanmasında kullanılır. Hedef yüzeyindeki yük birikimi iletken olmayan malzemelerin saçtırılmasında DC metotların kullanılmasını kısıtlamaktadır. Fakat güç kaynağının saçtırma tekniklerinde kullanılması iletken hedef kullanma mecburiyetini ortadan kaldırmıştır. Her ne kadar RF saçtırma tekniğindeki kaplama hızı, DC saçtırmaya oranla daha düşük olsa da yalıtkanların RF saçtırma tekniğiyle daha iyi bir şekilde kaplanabilmesi bu tekniğin geniş bir alanda kullanılabilmesini sağlamıştır.



Şekil 3.4. RF saçırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonim 2013f)

3.1.1.c. Magnetron saçırma

Kullanılan güç kaynağının cinsine bağlı olarak RF güç kaynağı kullanılıyorsa RF magnetron saçırma, DC güç kaynağı kullanılıyorsa DC magnetron saçırma adını almaktadır. Bu teknikte iyonlaşmış soy gaz atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektriksel alana ek olarak bu alana dik doğrultuda bir de manyetik alan uygulanır. Manyetik alan sayesinde elektronlar dairesel yörünge boyunca hareket ederler. Elektronların yolları uzadığı için hareketleri boyunca daha çok sayıda çarpışma yaparak hedef üzerinde iyon konsantrasyonunu artırırılar. Bu sayede hedeften atom koparma işlemi daha hızlı bir şekilde gerçekleşir ve aynı zamanda daha düşük basınçlarda plazma oluşturulabilir.



Şekil 3.5. Magnetron saçtırma tekniğinin şematik gösterimi (Anonim 2013f)

3.2. UV-VIS Spektrometresi

Bir UV-VIS (mor ötesi ve görünür bölge) spektrometresi ışık kaynağı, monokromatör ve dedektörden oluşur. Dedektörde elektrik sinyaline dönüşen optik sinyal, kaydedici veya galvanometre yardımıyla ölçülür.

Mor ötesi ve görünür bölgede kullanılan üç çeşit dedektör vardır. Bunlar, fotovoltaiik dedektörler, fototüpler ve foto çoğaltıcı tüplerdir.

Örneklerin bant aralığı enerji değerini belirlemek için farklı dalga boylu fotonlara karşılık örneğin soğurma katsayılarını bilmek gerekir. Bunun için, Şekil 3.6'da görülen cihaz soğurma ölçümleri için kullanılmıştır. Soğurma ölçümleri alınırken spektrometredeki çift ışığın birinin önüne ince film örneği diğerinin önüne de kaplanmamış alttaş olan cam konulur. Bu sayede alttaş camından kaynaklanan soğurma etkisi ortadan kaldırılır.

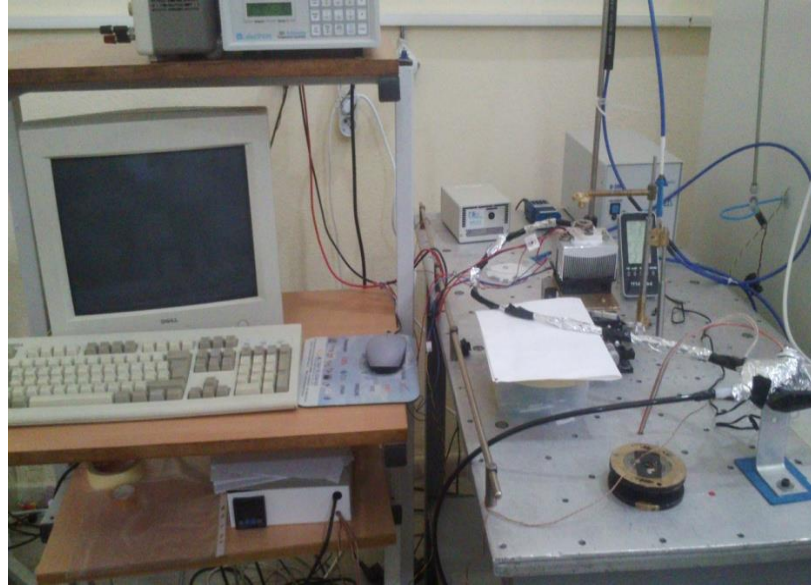


Şekil 3.6. Soğurma ölçüm sistemi

*Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizikokimya Araştırma Laboratuvarı

3.3. Spektral Yansım Ölçüm Sistemi

Yansım, numune yüzeyine gelen ışığa numuneden yansıyan ışığın oranı olarak tanımlanır. Spektral yansım ölçümleri ile dielektrik sabiti dolayısıyla kırılma indisi bilinen belirli kalınlıktaki tabakanın kalınlığı veya tabaka kalınlığı bilinen dielektrik tabakasının dielektrik sabiti dalgaboyuna bağlı olarak bulunabilir. Birden fazla birbirinden farklı kırılma indisi ve tabaka kalınlığına sahip çok tabakalı yapıların spektral yansım ölçümleri ve teorik olarak transfer matris metodu birlikte kullanılarak tabakaların kırılma indisleri ve tabaka kalınlıkları kestirilebilir (Karacalı ve Efeoğlu 2005). Şekil 3.7'de yansım ölçümleri için kullanılan sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Spektral yansımaya ölçüm sistemi

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı

3.4. Tavlama Sistemi

Tavlama, malzemelerin istenilen belirli bir sıcaklıkta belirli bir süre boyunca ısıtılıp daha sonra oda sıcaklığına kadar soğutulması işlemidir. Tavlama işlem sıcaklığı malzemeden malzemeye istenilen özelliklere göre değişebilir. Önemli olan sıcaklığın kristalin büyümesini önleyen bir aralıkta olmasıdır (Britannica 2013). Şekil 3.8'de tez çalışmasında kullanılan farklı gaz ortamlarında tavlama olanağı sunan ve sıcaklığı 1100°C'ye kadar çıkabilen tavlama fırını verilmiştir.



Şekil 3.8. Tavlama fırını

*Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Nanoteknoloji Araştırma Laboratuvarı

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada RF magnetron saçtırma yöntemi yardımıyla hem cam hem de Si alttaşları üzerine farklı büyütme parametreleri kullanılarak numuneler hazırlandı.

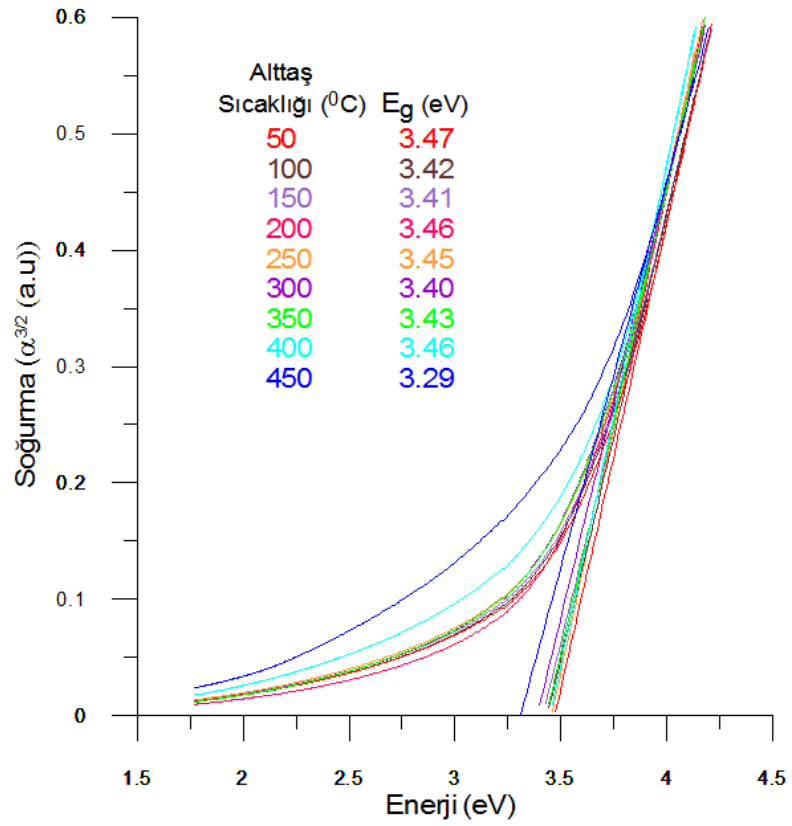
4.1. Cam Alttaş Üzerine TiO₂ İnce Film Büyütülmesi

Alttaş malzeme olarak cam kullanılıp üzerine TiO₂ ince film büyütüldü. Büyütme sırasında ana parametre olarak sadece alttaş sıcaklığı ele alındı ve alttaş sıcaklığı her numune için değiştirilirken diğer tüm parametreler Çizelge 4.1'de verildiği gibi sabit tutuldu.

Çizelge 4.1. Büyütme parametreleri

Proses Kodu	Alttaş Sıcaklığı(°C)	Alttaş Malzeme	Hedef	RF(W)	Kalınlık(nm)	Alttaş Bias	Ar (sccm)	O2 (sccm)	rpm
S68	50	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S65	100	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S63	150	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S62	200	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S64	250	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S66	300	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S69	350	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S70	400	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4
S71	450	cam	Ti	120	20	-20	15/15	0,4	4

Numuneler hazırlandıktan sonra optik soğurma ölçümleri alındı. Her soğurma ölçümü her bir numune için onar kez alındı. Soğurma ölçümlerinden alınan verilerden faydalanılarak soğurma ($\alpha^{3/2}$)'ya karşılık enerji (eV) grafikleri çizildi ve çizilen grafiklerin eğimlerinden Çizelge 4.2'de verilmiş olan yasak enerji aralıkları hesaplandı.

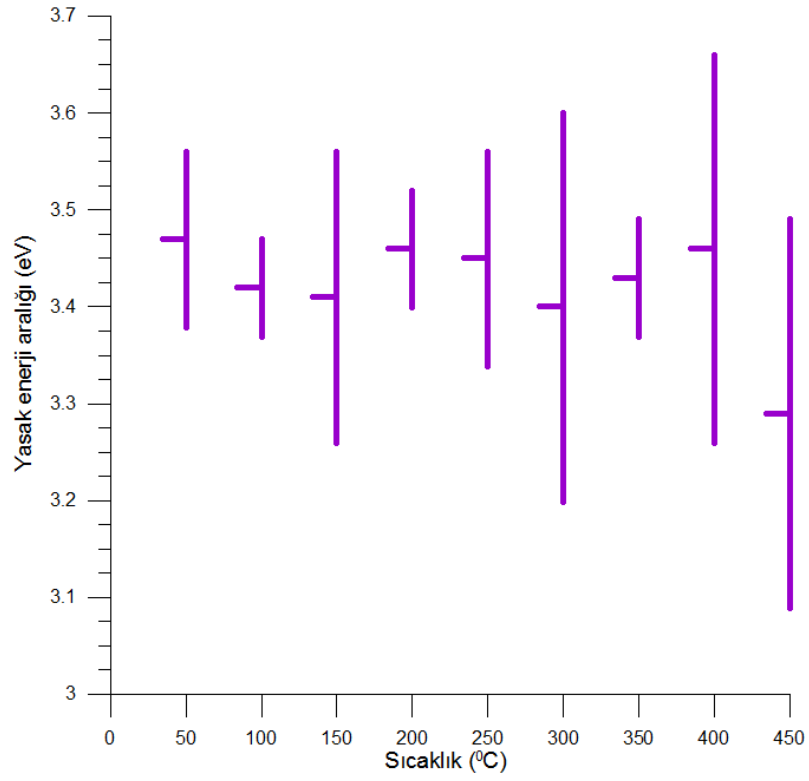


Şekil 4.1. Farklı alttaş sıcaklıklarında hazırlanan numunelere ait soğurma grafiği

Çizelge 4.2. Hesaplanan yasak enerji aralık değerleri

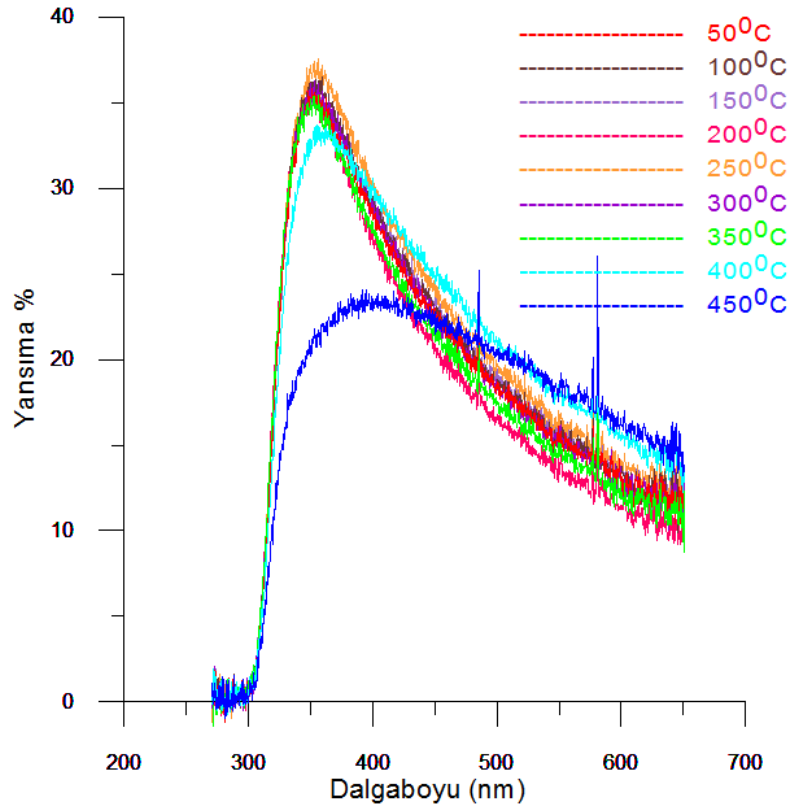
Proses Kodu	S62	S63	S64	S65	S66	S68	S69	S70	S71
E _g (eV)	3,46	3,41	3,45	3,42	3,40	3,47	3,43	3,46	3,29

Soğurma ölçümleri her bir numune için onar kez tekrarlandığından numune numune yasak enerji aralıklarının ortalamaları alınıp standart sapmaları hesaplandı. Yapılan hesaplamalar sonucunda yasak enerji aralığının alttaş sıcaklığıyla değişimine bakıldı.



Şekil 4.2. Yasak enerji aralığının alttaş sıcaklığıyla değişim grafiği

Soğurma ölçümlerinden sonra aynı numunelerin yansıma ölçümleri de alındı. Ölçümlerden alınan veriler yardımıyla yansıma (%)'ya karşılık dalgaboyu (nm) grafikleri çizildi ve alttaş sıcaklığının yansıma spektrumunda nasıl bir değişime sebep olduğuna bakıldı.



Şekil 4.3. Farklı alttaş sıcaklıklarında hazırlanan numunelere ait yansım grafiği

Şekil 4.2'den titanyum dioksitin optik band aralığının 400°C'ye kadar yaklaşık olarak sabit kaldığı ve 450°C'de ise azalan bir eğilim gösterdiği gözlemlendi. Alttaş olarak cam malzeme kullanılması daha yüksek sıcaklıklarda erime problemi ile karşılaşıldığından numune hazırlanamadı ve 450°C üstünde yasak enerji aralığının nasıl değiştiğine bakılamadı. Alınan ölçümler neticesinde 400°C'ye kadar alttaş sıcaklığının optik band aralığına etki etmediği ve yansım yüzdelерinin de hemen hemen aynı olduğu sonucuna varıldı.

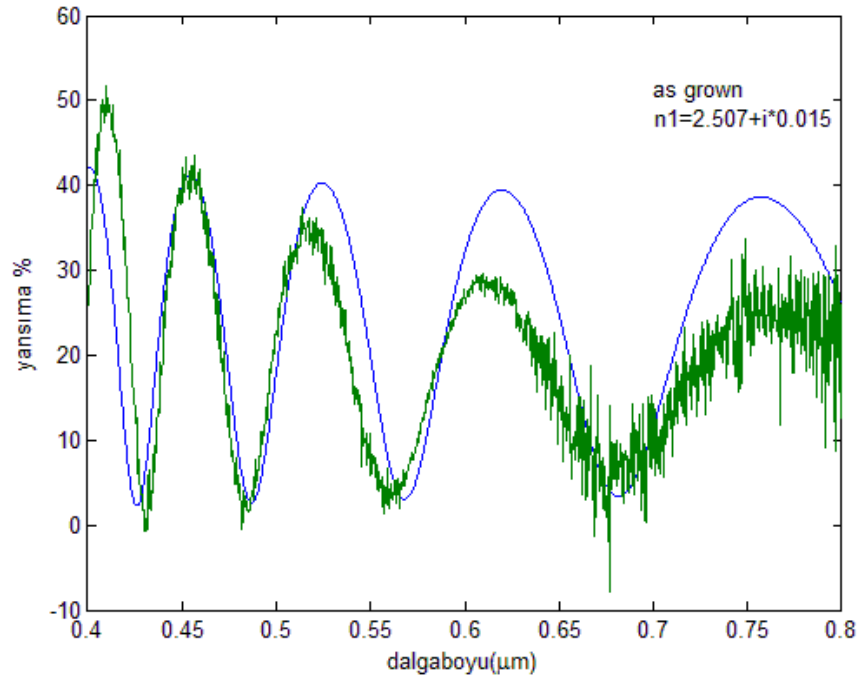
4.2. Si Alttaş Üzerine TiO₂ İnce Film Büyütülmesi

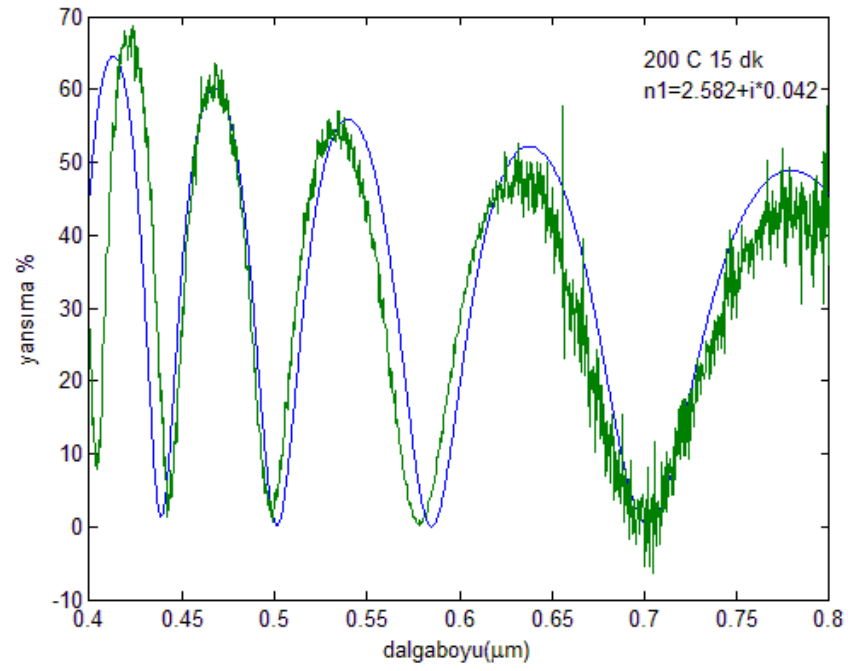
SiO₂ kaplı Si alttaş üzerine TiO₂ ince film büyütüldü. Numune büyütülürken ana parametre olarak kalınlık ele alındı ve numune kalınlığı 400 nm ile sınırlandırıldı. Hazırlanan numuneye ait ilgili büyütme parametreleri Çizelge 4.3'te verildiği gibidir.

Çizelge 4.3. Numune büyütme parametreleri

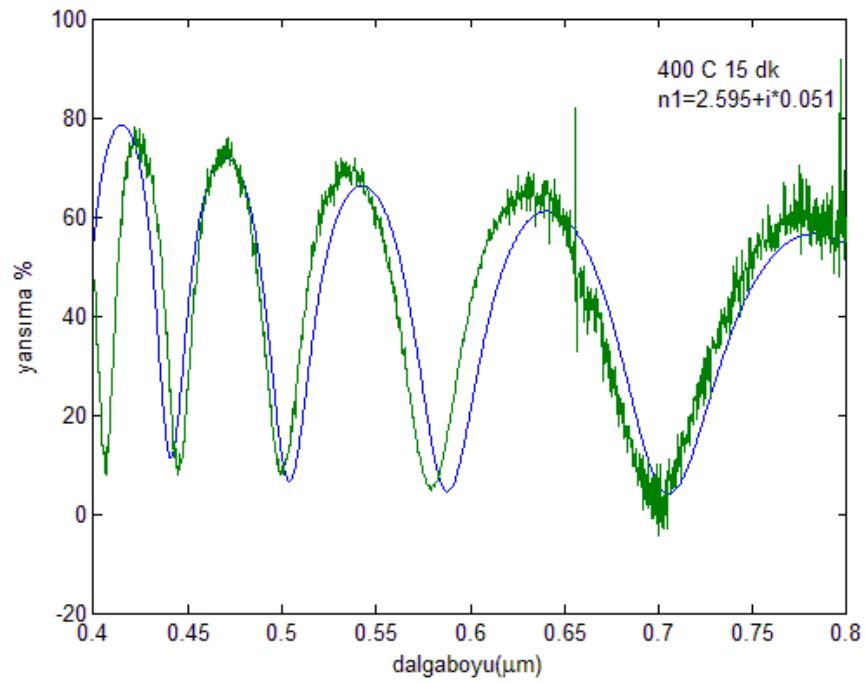
Proses Kodu	Alttaş Sıcaklığı(°C)	Alttaş Malzeme	Hedef	RF(W)	Kalınlık (nm)	Ar (sccm)	O ₂ (sccm)	rpm	Süre (dk)
S86	100	Si/SiO ₂	Ti	120	400	35	0.5	4	209

Hazırlanan S86 kodlu numune 15 parçaya bölündü. Bölünen her parça yeniden isimlendirildi ve her parçanın yansıma ölçümleri alındı. Daha sonra her numune argon atmosferinde farklı süre ve sıcaklıklarda tavlama işlemine tabi tutuldu ve tavlama işleminden sonra her numunenin yansıma ölçümleri alındı. Yansıma ölçümlerinden alınan veriler neticesinde yansıma karşılık dalgaboyu grafikleri çizildi ve Transfer Matris Metodu yardımıyla yaklaşık olarak 450 nm ile 500 nm dalgaboylu bölge arasında deneysel ile teori karşılaştırılıp her numunenin kırılma indisi ve sönüm katsayısına ulaşıldı. İlgili grafik ve çizelgeler aşağıda verilmektedir.

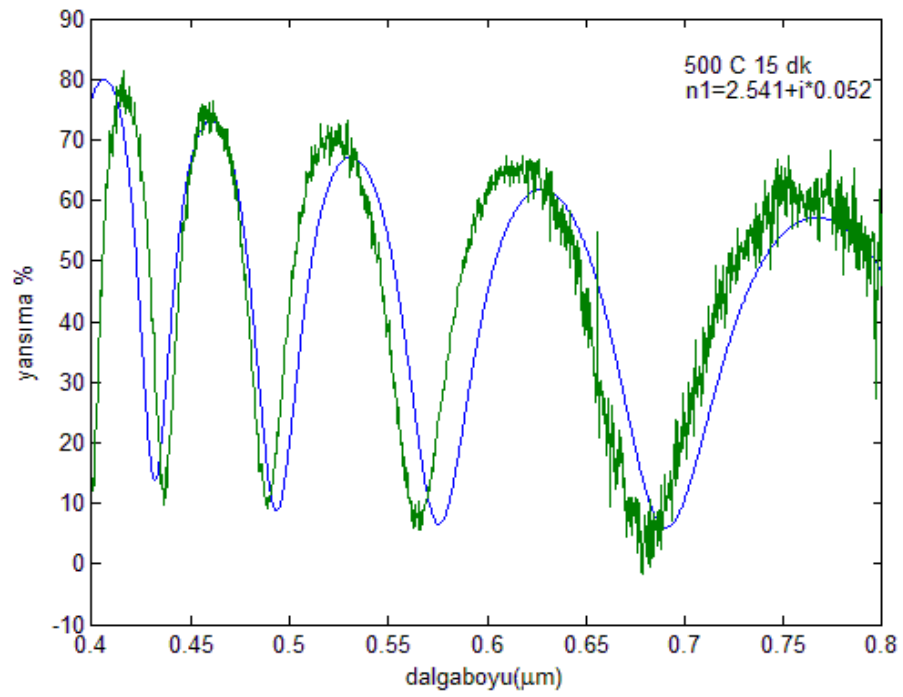
**Şekil 4.4.** Hiç bir işlem uygulanmadan önce alınan yansıma spektrumu



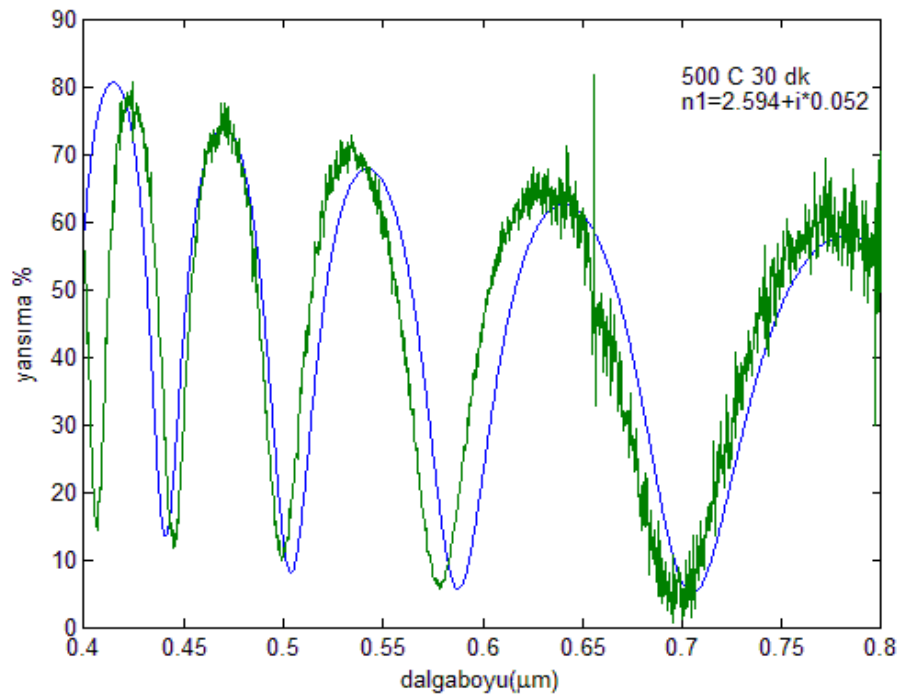
Şekil 4.5. 200°C'de 15 dk tavllanmış S86_1 numunesine ait spektrum



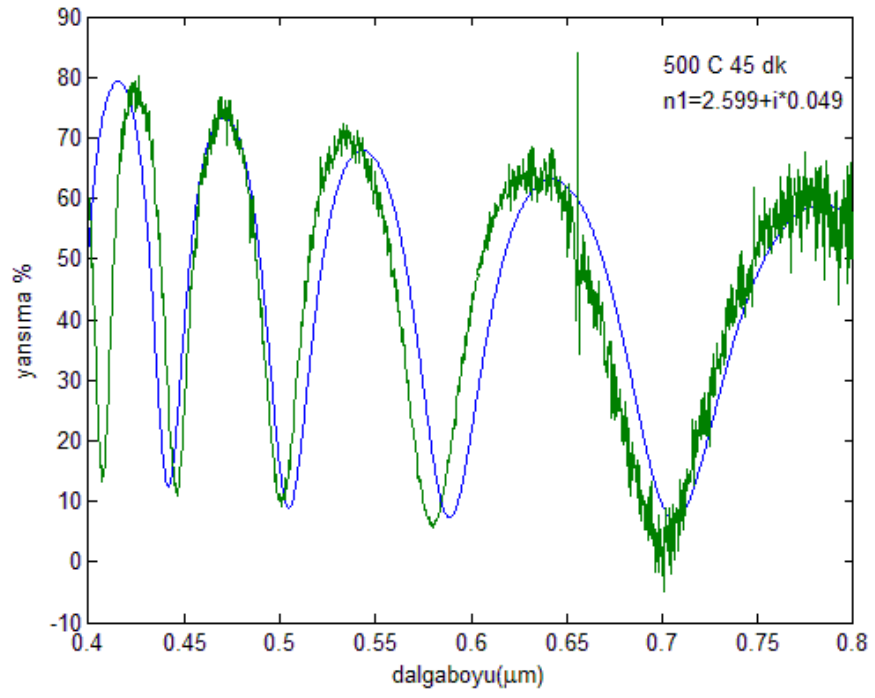
Şekil 4.6. 400°C'de 15 dk tavllanmış S86_2 numunesine ait spektrum



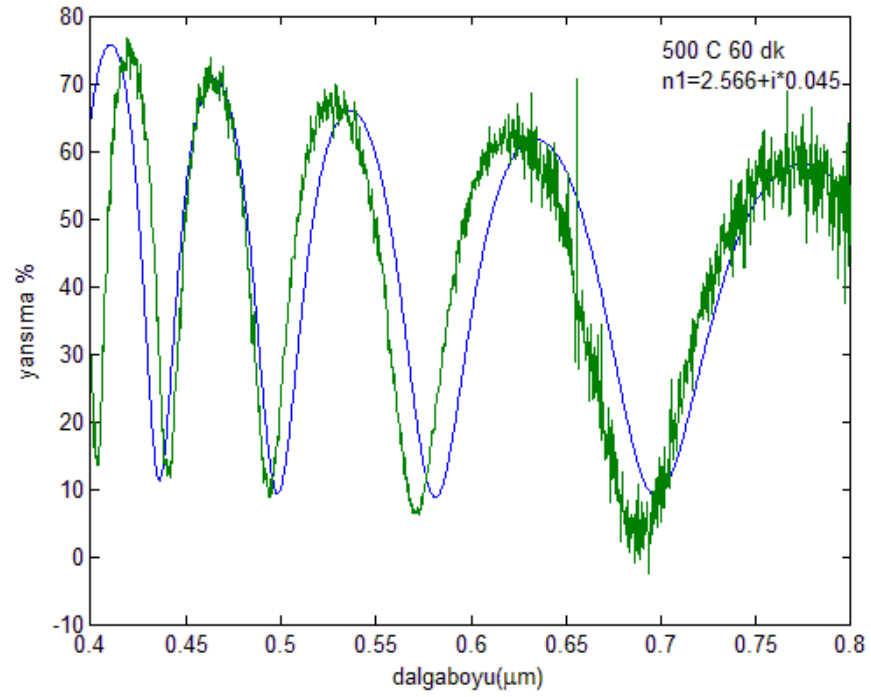
Şekil 4.7. 500°C'de 15 dk tavlanmış S86_5 numunesine ait spektrum



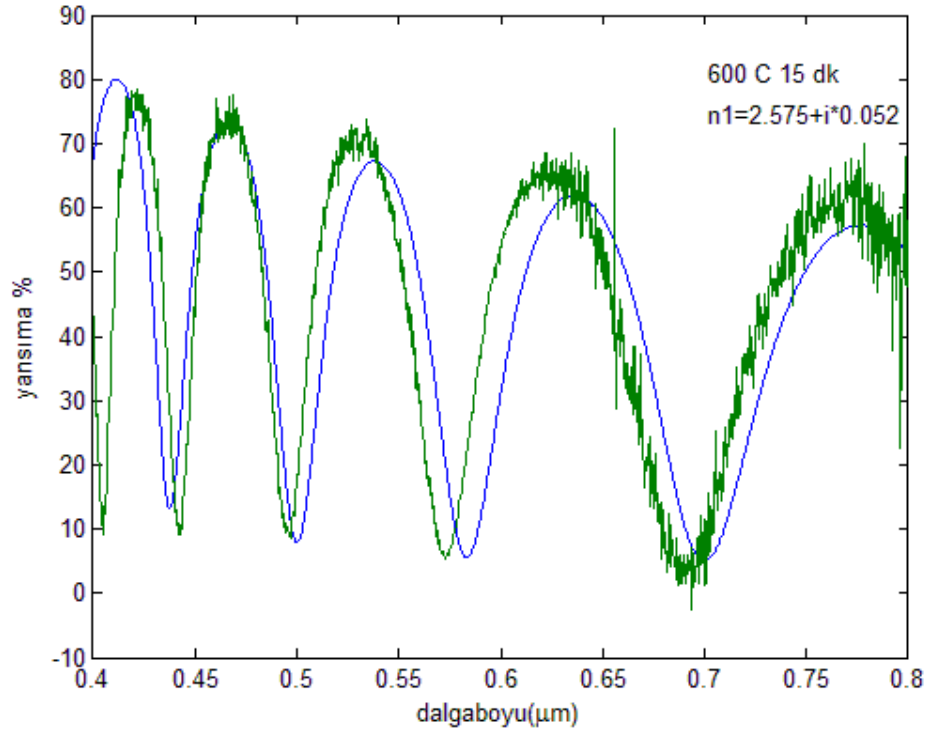
Şekil 4.8. 500°C'de 30 dk tavlanmış S86_7 numunesine ait spektrum



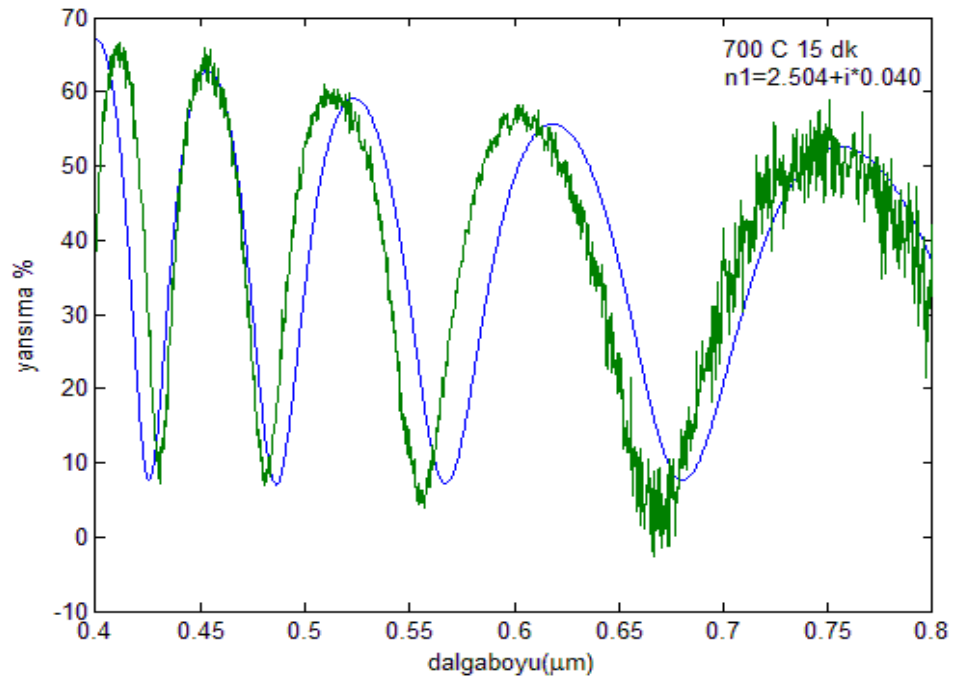
Şekil 4.9. 500°C'de 45 dk tavllanmış S86_8 numunesine ait spektrum



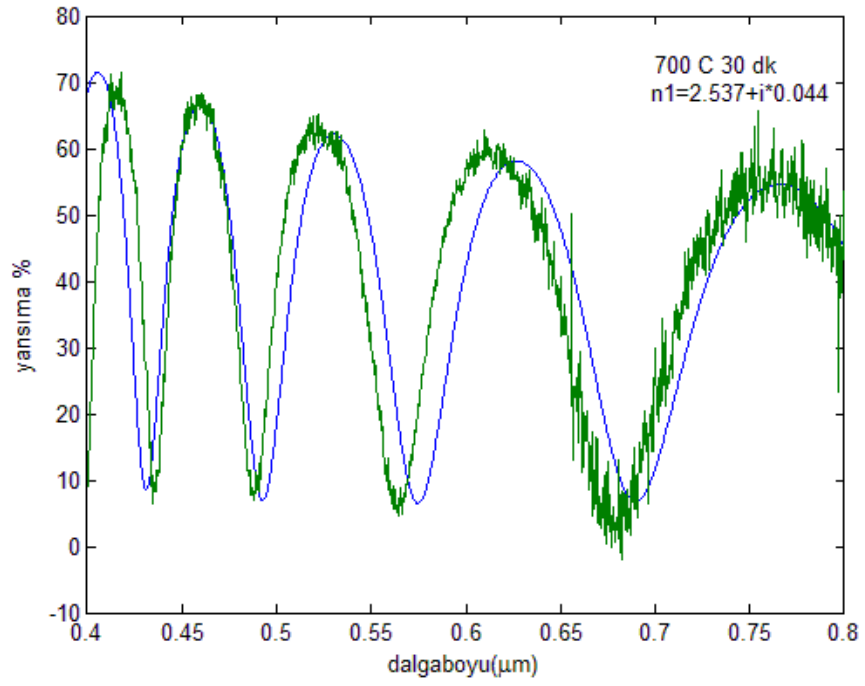
Şekil 4.10. 500°C'de 60 dk tavllanmış S86_9 numunesine ait spektrum



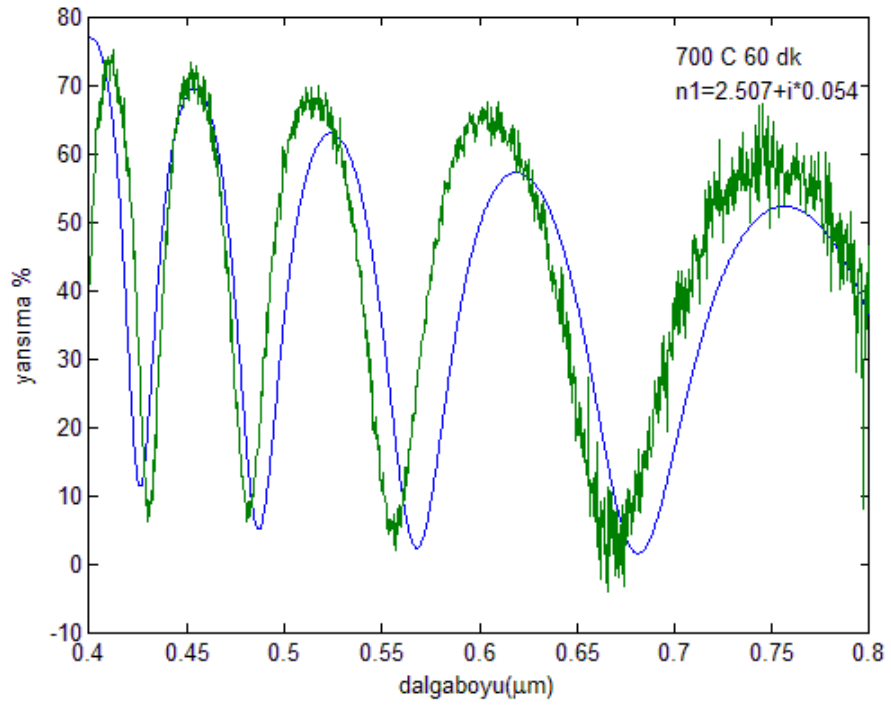
Şekil 4.11. 600°C'de 15 dk tavllanmış S86_3 numunesine ait spektrum



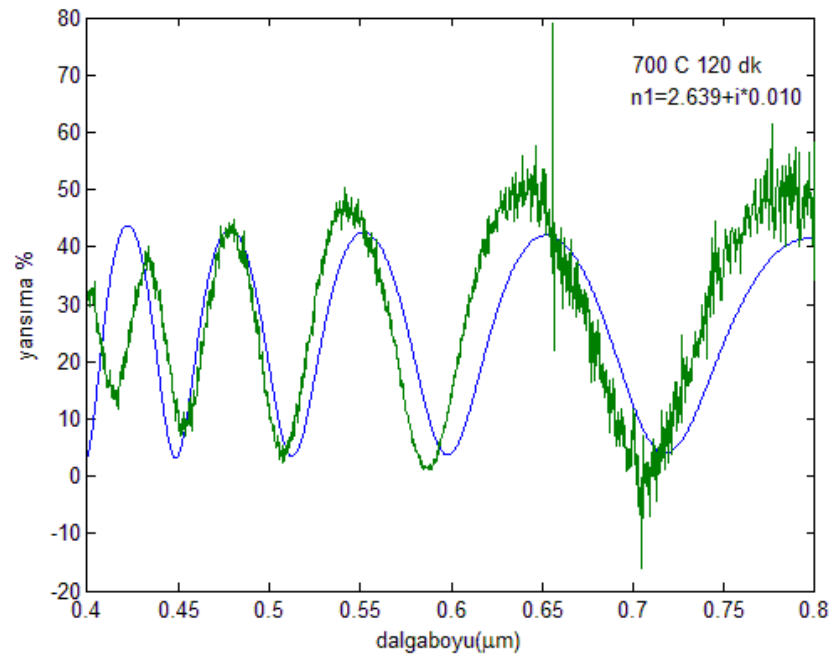
Şekil 4.12. 700°C'de 15 dk tavllanmış S86_6 numunesine ait spektrum



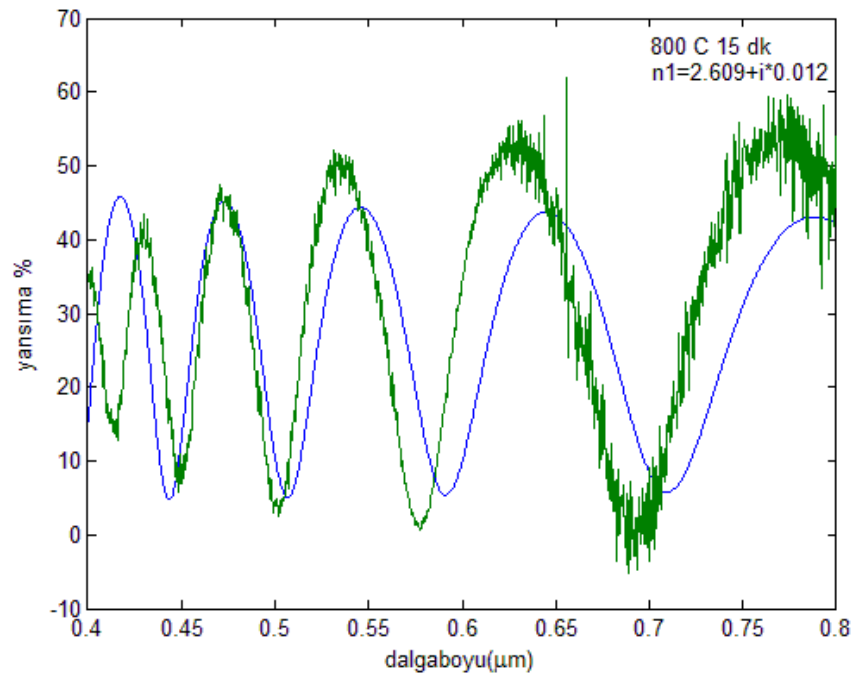
Şekil 4.13. 700°C'de 30 dk tavllanmış S86_10 numunesine ait spektrum



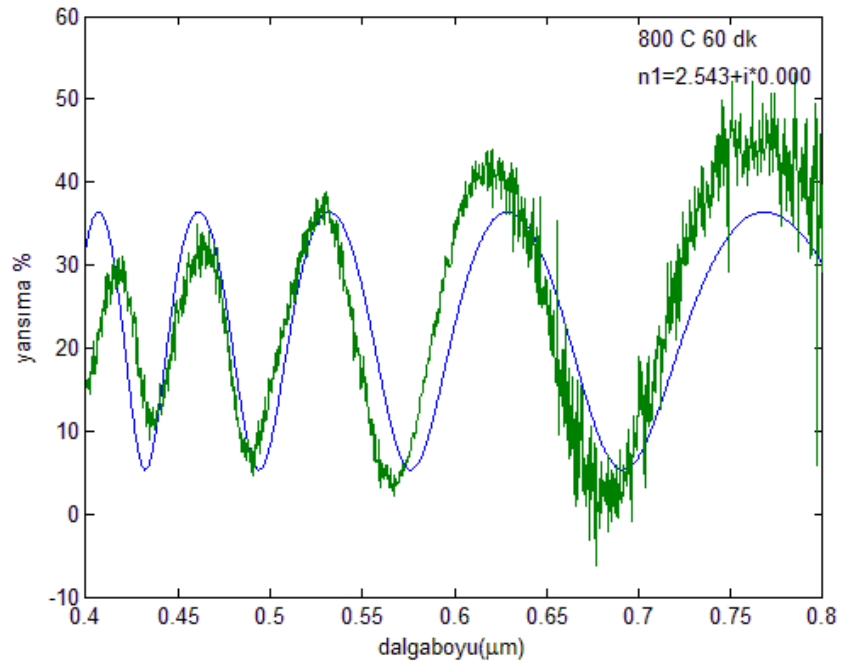
Şekil 4.14. 700°C'de 60 dk tavllanmış S86_11 numunesine ait spektrum



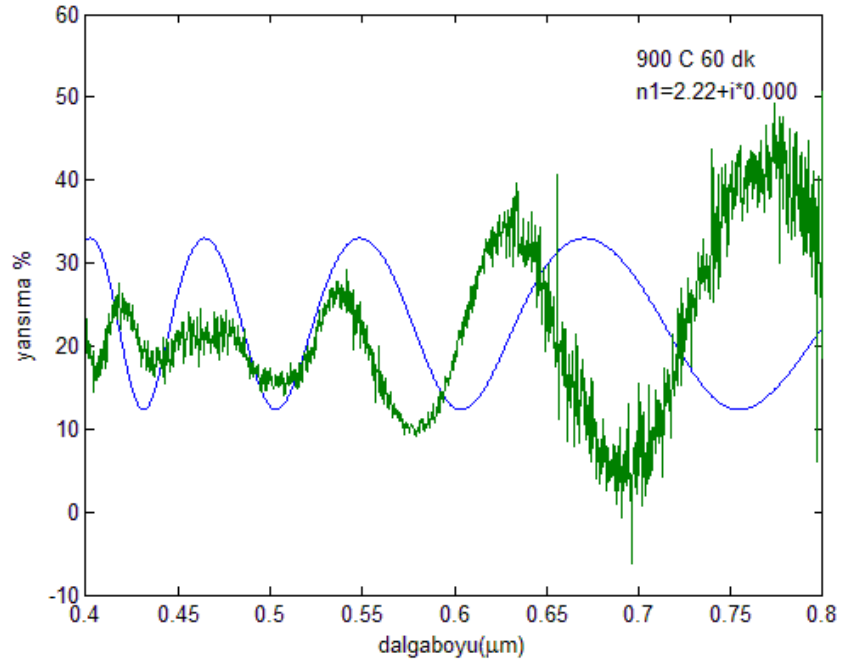
Şekil 4.15. 700°C'de 120 dk tavllanmış S86_12 numunesine ait spektrum



Şekil 4.16. 800°C'de 15 dk tavllanmış S86_4 numunesine ait spektrum



Şekil 4.17. 800°C'de 60 dk tavllanmış S86_13 numunesine ait spektrum



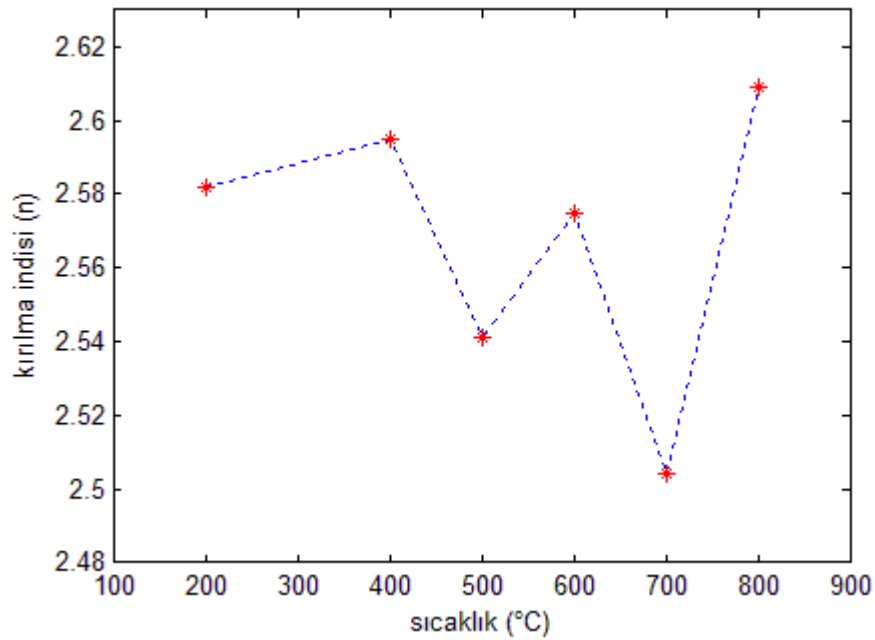
Şekil 4.18. 900°C'de 60 dk tavllanmış S86_14 numunesine ait spektrum

Yapılan çalışmalar neticesinde sabit tavlama süresi ve sabit tavlama sıcaklıklarında kırılma indisleri ve sönüm katsayılarını içeren çizelgeler oluşturuldu. Bu çizelgeler yardımıyla kırılma indisleri ve sönüm katsayılarının tavlama süresi ve tavlama sıcaklığıyla değişimlerini gösteren grafikler çizildi.

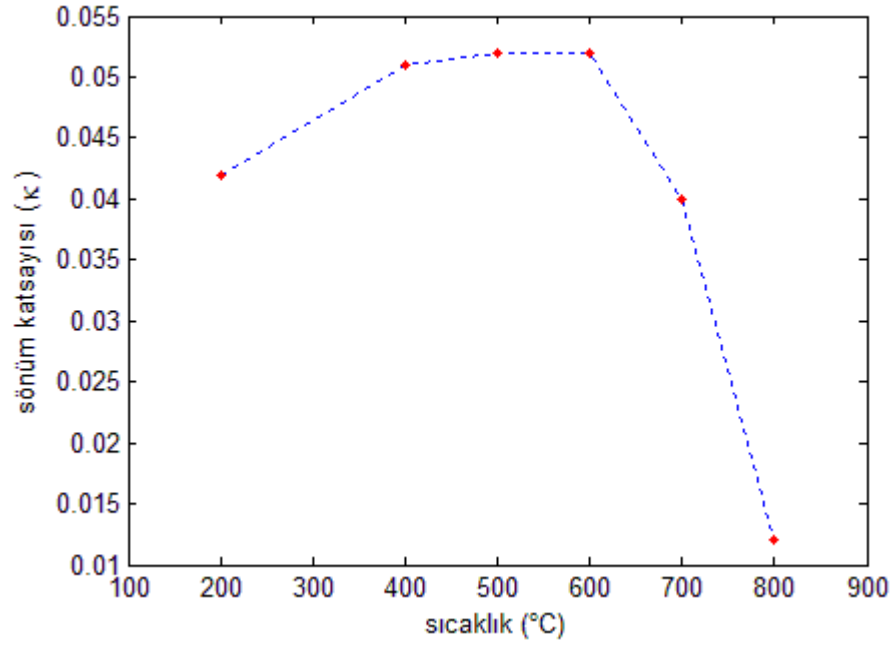
4.2.1. Sabit sürede tavlanan numuneler

Çizelge 4.4. 15 dk boyunca argon atmosferinde farklı sıcaklıklarda tavlanan numunelere ait veriler

Numune Adı	Süre (dk)	Tavlama Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	n	κ
S86_1	15	200	2.582	0.042
S86_2	15	400	2.595	0.051
S86_3	15	500	2.541	0.052
S86_4	15	600	2.575	0.052
S86_5	15	700	2.504	0.040
S86_6	15	800	2.609	0.012



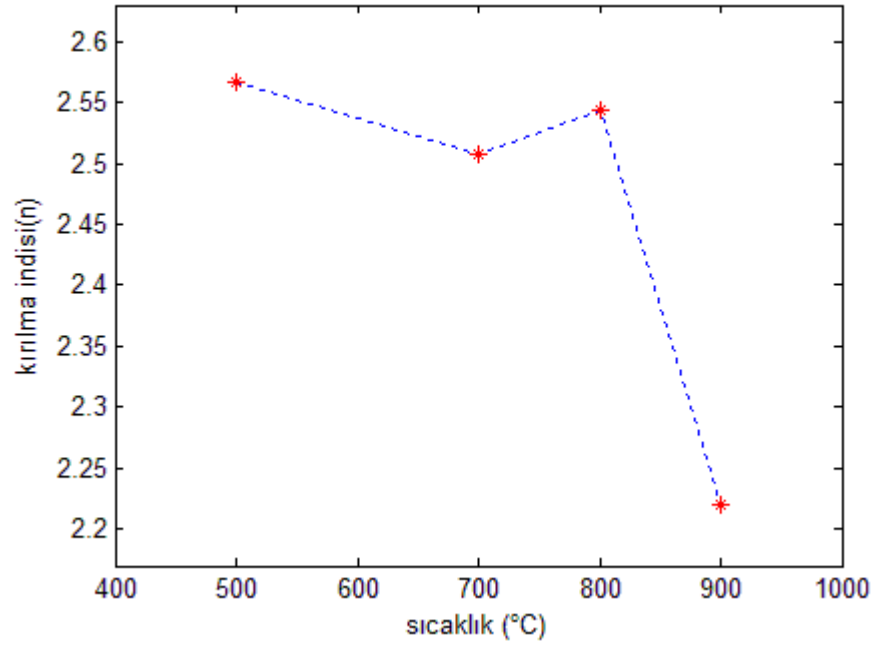
Şekil 4.19. 15 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak kırılma indislerinin değişimi



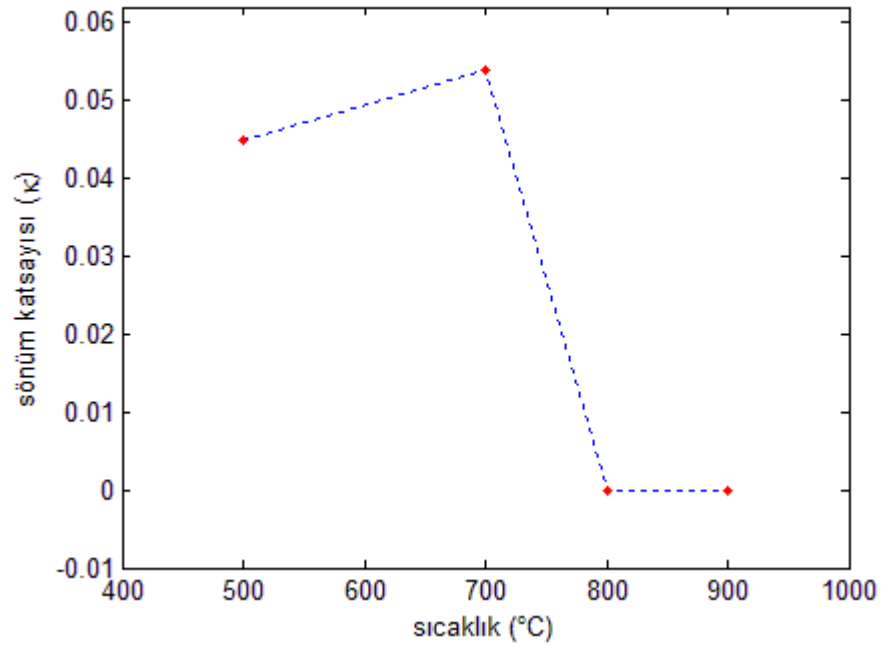
Şekil 4.20. 15 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak sönüm katsayılarının değişimi

Çizelge 4.5. 60 dk boyunca argon atmosferinde farklı sıcaklıklarda tavlanan numunelere ait veriler

Numune Adı	Süre (dk)	Tavlama Sıcaklığı (°C)	n	κ
S86_9	60	500	2.566	0.045
S86_11	60	700	2.507	0.054
S86_13	60	800	2.543	0.000
S86_14	60	900	2.220	0.000



Şekil 4.21. 60 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklığına bağlı olarak kırılma indisinin değişimi

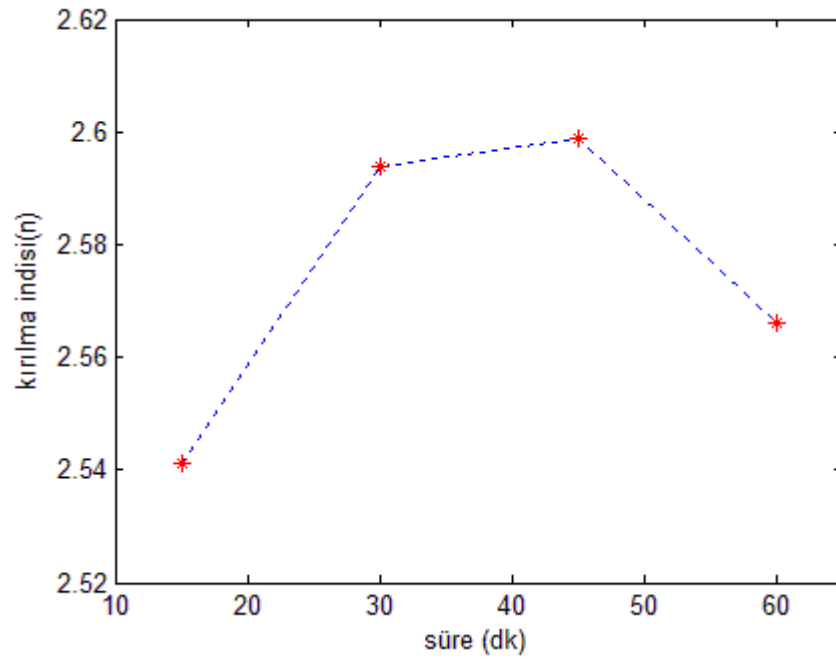


Şekil 4.22. 60 dk süreyle tavlanan numunelerin tavlama sıcaklıklarına bağlı olarak sönüm katsayılarının değişimi

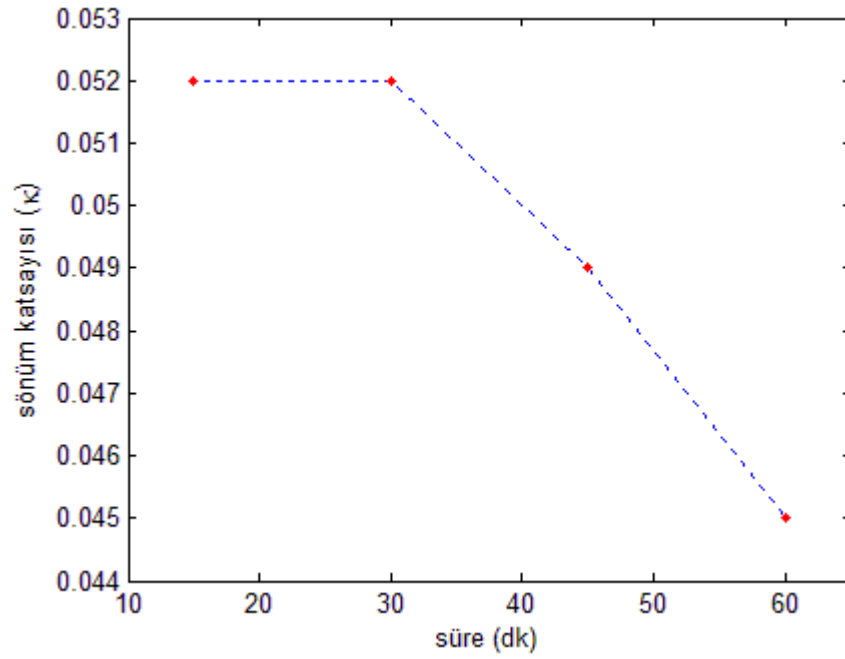
4.2.2. Sabit sıcaklıkta tavlanan numuneler

Çizelge 4.6. Farklı sürelerde 500°C'de argon atmosferinde tavlanan numunelere ait veriler

Numune Adı	Süre (dk)	n	K
S86_5	15	2.541	0.052
S86_7	30	2.594	0.052
S86_8	45	2.599	0.049
S86_9	60	2.566	0.045



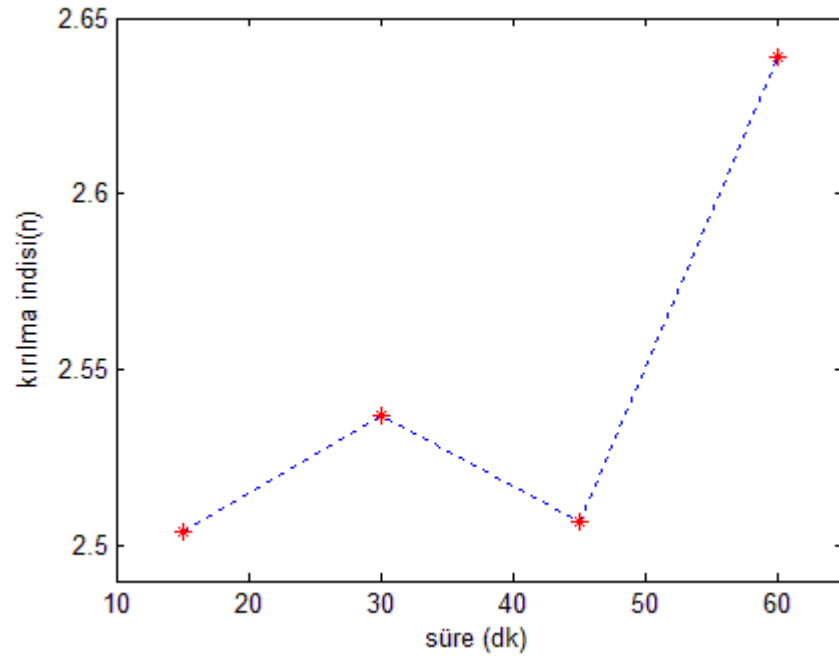
Şekil 4.23. 500°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle kırılma indislerinin değişimi



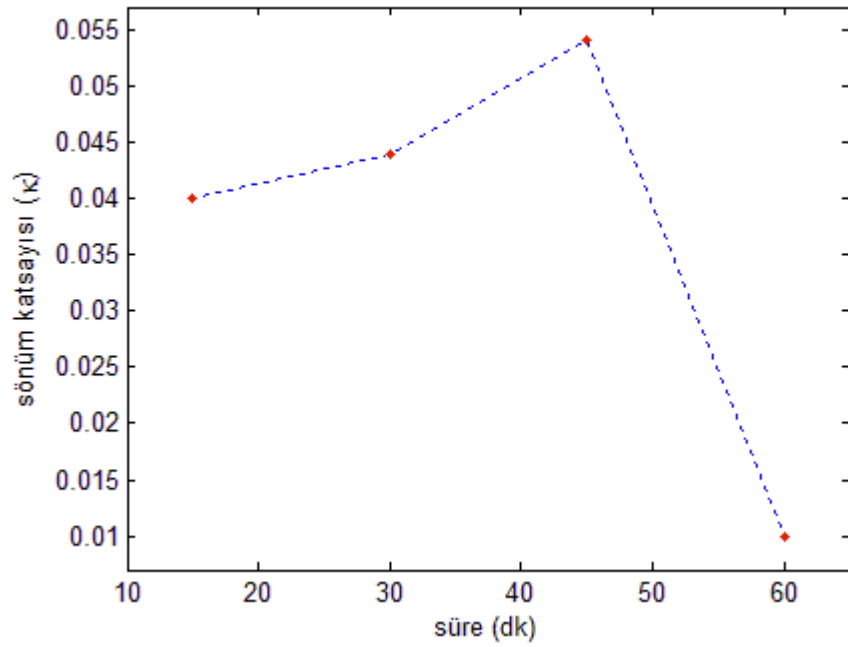
Şekil 4.24. 500°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle sönüm katsayılarının değişimi

Çizelge 4.7. Farklı sürelerde 700°C'de argon atmosferinde tavlanan numunelere ait veriler

Numune Adı	Süre	n	κ
S86_6	15 dk	2.504	0.040
S86_10	30 dk	2.537	0.044
S86_11	60 dk	2.507	0.054
S86_12	120 dk	2.639	0.010



Şekil 4.25. 700°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle kırılma indislerinin değişimi



Şekil 4.26. 700°C'de tavlanan numunelerin tavlama süreleriyle sönüm katsayılarının değişimi

5. SONUÇ

Bu çalışmada farklı alttaş malzemeler üzerine farklı büyütme parametreleri uygulanarak titanyum dioksit ince filmler oluşturulmuş ve optik özellikleri incelendi. Cam ve silisyum dioksit alttaş malzemeleri üzerine büyütülen titanyum dioksit ince filmlerin optik karakterizasyonları yapıldı.

Farklı alttaş sıcaklıklarında cam üzerine büyütülen ince filmlerin soğurma ve yansıma ölçümleri alındı. Soğurma ölçümleri yardımıyla alınan verilerden yasak enerji aralıkları hesaplandı. Hesaplanan yasak enerji aralıkları ise yaklaşık olarak aynı değerleri verdi. Elde edilen değerler, değişken olarak ele alınan alttaş sıcaklığının optik bant aralığı üzerinde dikkate değer bir etkisinin olmadığını gösterdi. Ayrıca alınan yansıma ölçümlerinden yansıma yüzdelерinin de aynı değerlerde olması alttaş sıcaklığını değiştirmenin incelenen optik özellikleri etkilemediğini gösterdi.

Silisyum dioksit üzerine büyütülen titanyum dioksit ince filmler ise farklı süre ve sıcaklıklarda tavlama işlemlerine tabi tutuldu ve yansıma ölçümleri alındı. Alınan yansıma ölçümlerinden 700°C'de 1 saat tavlanan numune de dahil olmak üzere yansıma spektrumlarının artan dalgaboyu ile azaldığı, 700°C'de 2 saat tavlanan numuneden sonra ise tam tersi durumun olduğu gözlemlendi. Yüksek sıcaklıklara gidildikçe yansıma spektrumlarında gözlenen değişim ve kullandığımız transfer matris metodunun deneyselle örtüşmemesi artık soğurmanın baskın hale geldiğini ve kullandığımız metodun yetersiz kaldığını gösterdi. (Ye et al. 2007; Mathews *et al.* 2009; Hasan *et al.* 2010) kırılma indisinin artan tavlama sıcaklığı ile küçük adımlarla arttığını, sönüm katsayısının ise azaldığını gözlemlemiştir. Elde edilen sonuçlar tavlama sıcaklığının artmasıyla kırılma indisinin kararsız bir durum sergilediğini, sönüm katsayısının ise azaldığını göstermiş olup (Mechiakh et al. 2010) çalışmasının sonuçlarıyla paralellik içerdi.

KAYNAKLAR

- Akkaya Arıer, Ü.Ö., ve Tepehan, F.Z., 2011. Influence of heat treatment on the particle size of nanobrookite TiO₂ thin films produced by sol–gel method,” Surface & Coatings Technology, 37–42.
- Albertin, K.F., Valle, M.A., and Pereyra, I., 2007. Study of MOS Capacitors with TiO₂ and SiO₂/TiO₂ Gate Dielectric, Journal Integrated Circuits and Systems, 2(2), 89 – 93.
- Anonim, 2013a. <http://www.superbilgiler.com> Erişim Tarihi: 20.03.2013.
- Anonim, 2013b. <http://tr.wikipedia.org/wiki/> Erişim Tarihi: 25.03.2013.
- Anonim, 2013c. <http://ruby.colorado.edu/~smyth/min/tio2.html> Erişim Tarihi: 06.01.2013
- Anonim, 2013d. <http://pro-kamni.ru/brukit> Erişim Tarihi: 06.01.2013
- Anonim, 2013e. <http://en.rigaku-mechatronics.com/case/sputtering-systems.html> Erişim Tarihi: 02.01.2013
- Anonim, 2013f. <http://marriott.tistory.com/97> Erişim Tarihi: 15.01.2013
- Arığ, A.B., 2010. TiN ve TiO₂ İnce Filmlerin Hazırlanması ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara.
- Aybek A.Ş., 1996. Zn(In₂S₃)S Yarıiletken Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri. Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Britannica encyclopedia, 2013. <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/> .
- Çetin, N. E., 2011. Radyo Frekansı Saçırma Tekniği Kullanılarak Üretilen ZnO İnce filmlerinin Bazı Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir.
- Chenn, R. L., 2004. Thin Film Deposition, Applied Physics, 298.
- Fox, M., 2001. Optical Properties of Solids, Part 1, Introduction, Oxford University Press, New York, 1-11.
- Fujishima, A. and Honda, K., 1972. Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode, Nature, 238, 37 – 38.
- Fujishima, A., Hashimoto, K. and Watanabe, T., 1999. TiO₂ photocatalysis: Fundamentals and Applications, BKC, Inc Publishers, Japan.
- Hasan, M.M., Haseeb, A. S. M. A., Saidur, R., Masjuki, H. H., Hamdi, M., 2010. Influence of Substrate and Annealing Temperatures on Optical Properties of RF Sputtered TiO₂ Thin Films, Optical Materials, 690-695.
- Heavens, O., S., 1965. Optical Properties of Thin Films, Dover, New York.
- Hu, Y. ve Yuan, C. (2005), Low-temperature preparation of photocatalytic TiO₂ thin films from anatase sols, Journal of Crystal Growth, 274, 563–568.
- Karacalı, T., 2003. Darbeli anodizasyon tekniği ile gözenekli ve Si ve gözenekli Si tabanlı fabry-perot yapılarının üretimi: Yapısal ve optik özelliklerinin incelenmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum.
- Karacalı, T., ve Efeoğlu H., 2005. Spektral Yansıma Ölçüm Sistemi, CEBİT Bilişim Fuarı, İstanbul.
- Karvinen, S., Hirva, P. ve Pakkanen, T.A., 2003. “Ab initio quantum chemical studies of cluster models for doped anatase and rutile TiO₂,” Journal of Molecular Structure (Theochem), 626, 271–277.

- Kim, N. J., La, Y. H., Im, S. H., Ryu, B. K., 2010. Optical and Structural Properties of Fe-TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-Gel Dip Coating, *Thin Solid Films*, 518, e156 -e160.
- Knittl, Z., 1976. *Optics of Thin Films: An Optical Multilayer Theory*, Wiley, London.
- Mathews N.R., Morales Erik R., Cortes-Jacome M.A., Toledo Antonio J.A., 2009. TiO₂ Thin Films-Influence of Annealing Temperature on Structural, Optical and Photocatalytic Properties, *Solar Energy*, 1499-1508.
- Mechiakh, R., Sedrine, N. B., Chtourou, R., Bensaha, R., 2010. Correlation Between Microstructure and Optical Properties of Nano-Crystalline TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-gel Dip Coating, *Applied Surface Science*, 670-676.
- Pankove, J.I., 1971. *Optical Processes in Semiconductor*.
- Pedrotti, F.L., Pedrotti, L.S., Pedrotti, L.M., 2007, *Introduction to Optics*, Pearson Education, USA, 476p.
- Phadke, S., Sorge, J. D., Hachtmann, S., Birnie, D. P., 2010. Broad Band Optical Characterization of Sol-Gel TiO₂ Thin Film Microstructure Evolution with Temperature, *Thin Solid Films*, 518, 5467 – 5470.
- Sberveglieri, G., Comini, E., Faglia, G., Atashbar, M.Z., Wlodarski, W., 2000. Titanium dioxide Thin Films Prepared for Alcohol Microsensor Applications, *Sensors and Actuators B*, 66, 139 – 141.
- Sienko, M.,J., Plane, A.,R., 1976. *Chemistry: Principles and Properties*. 363-364p.
- Suciu, R. C., Indrea, E., Silipas, T. D., Dreve, S., Rosu, M. C., Popescu, V., Popescu, G. and Nascu, H. I., 2009. TiO₂ Thin Films Prepared by Sol-Gel Method, *Journal of Physics:Conference Series*, 182, 012080 – 012084.
- Que, W., Uddin, A., Hu, X., 2006. Thin Film TiO₂ Electrodes Derived by Sol-Gel Process for Photovoltaic Applications, *Journal of Power Sources*, 159, 353 – 356.
- Ye, Q., Liu, P.Y., Tang, Z.F., Zhai, L., 2007. Hydrophilic Properties of Nano-TiO₂ Thin Films Deposited by RF Magnetron Sputtering, *Vacuum*, 627-631.
- Yeh, P., 1988. *Optical Waves in Layered Media*, Wiley, New York.
- Zhao, J., Wang, X., Chen, R., Li, L., 2005. Fabrication of Titanium Oxide Nanotube Arrays by Anodic Oxidation, *134(10)*, 705 – 71

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Erzurum'da doğdu. İlköğretimini 19 Mayıs İlköğretim okulunda tamamladı. Orta öğretimini Erzurum Lisesi'nde yabancı dil ağırlıklı olarak okudu. 2011 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümünü bitirdi. Aynı yıl Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Nanobilim ve Nanomühendislik ana bilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı.