

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**METAL YALITKAN METAL YAPILARIN FİZİKSEL VE ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Deniz ŞENER

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ANKARA
2022**

Her hakkı saklıdır

ÖZET

Doktora Tezi

METAL YALITKAN METAL YAPILARIN FİZİKSEL VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Deniz ŞENER

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. S. Tülay SERİN

Bu çalışmada, yalıtkan tabakası sol-jel yöntemiyle hazırlanan Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al(MIM) yapıların elektriksel ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. İlk olarak TiO₂ ve Cu-TiO₂ yalıtkan filmler farklı kalınlıklarda sol-jel daldırma yöntemi ile cam altlıklar üzerine kaplanmıştır. Filmlerin optik geçirgenlik spektrumları yardımıyla bant aralığı, kırılma indisi ve kalınlık gibi sabitleri hesaplandı. Ayrıca XRD ve Raman Spektrumları yardımıyla filmlerin yapısal özellikleri incelenmiştir. Daha sonra Al kaplı p-tipi silikon altlıklar üzerine TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmler kaplanarak Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıları oluşturulmuştur. Yapıların elektriksel parametreleri ve akım iletim mekanizmaları oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık akım-gerilim (I-V), ve karanlıkta kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri yardımıyla bulunmuştur.

Eylül 2022, 85 sayfa

Anahtar Kelimeler: Sol-Jel, TiO₂, İnce filmler, Elektriksel özellikler, MIM

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

ELECTRICAL AND PHYSICAL CHARACTERIZATION OF METAL INSULATOR METAL STRUCTURE

Deniz ŞENER

Ankara University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics Engineering

Supervisor: Prof.Dr. S. Tülay SERİN

In this study, the electrical and physical properties of Al/TiO₂/Al and Al/Cu-TiO₂/Al(MIM) structures whose insulator layer was prepared by the sol-gel method were investigated. Firstly, TiO₂ and Cu-TiO₂ insulating films were coated on glass substrates by sol-gel dipping method in different thicknesses. With the help of optical transmittance spectra of the films, constants such as band gap, refractive index, and thickness were calculated. In addition, the structural properties of the films were investigated with the help of XRD and Raman Spectra. Then, Al/TiO₂/Al and Al/Cu-TiO₂/Al structures were formed by coating TiO₂ and Cu-TiO₂ thin films on Al-coated p-type silicon substrates. The electrical parameters and current conduction mechanisms of the structures were calculated with the help of dark and light current-voltage (I-V) and dark capacitance-voltage (C-V) measurements at room temperature.

September 2022, 85 pages

Key Words : Sol-Gel, TiO₂, Thin films, Electrical properties, MIM

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER

Doktora tez çalışmam sürecinde sabırla özveriyle beni yönlendiren, destekleyen, bilgi ve deneyimlerini ve en önemlisi zamanını paylaşan değerli danışmanım Prof. Dr. Tülay SERİN' e (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) , tez çalışmam sürecinde önemli katkıları olan hocalarım Prof. Dr. Mehmet KABAK' a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) , Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL' a (Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Yoğun Madde Fiziği Anabilim Dalı), Prof. Dr. Ömer YAVAŞ' a (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı), laboratuvar çalışmalarında beni yalnız bırakmayan Dr. Aysun Arslan ALSAÇ' a, Dr. Hakan OT' a, hayatımın her anında bana inanan ve sevgisi ile güç veren sevgili annem Bahriye ŞENER' e ve bugün aramızda olmasada öğütleri ve sevgisi ile kalbimde her zaman yaşayacak olan sevgili babam Bahri ŞENER' e, beni destekleyen kardeşlerim Hatice ÜNLÜ' ye, Selma ŞENER' e, Emin Bülent ŞENER' e, Semra ERGÜN' e, Seher ŞENER AZER' e, Serpil ŞENER EŞİT' e, Ahmet Fahri ŞENER' e yeğenlerim Ezgi Nur ÜNLÜ' ye, Öykü ERGÜN' e, Bahri Utku ŞENER' e, Hüseyin İlkem ERGÜN' e, Bennu Duru ŞENER' e, Arya Bedda AZER' e, mesai arkadaşlarım Derya ELMAS' a, Haydar KELEŞ' e, Necati DANACI' ya ve rahmetle özlemle anacağım Ahmet Salih TORUN' a, üniversite hayatımın ilk gününden itibaren her zaman yanımda olan ve destekleyen sevgili arkadaşım Dr. Şeyda HORZUM ŞAHİN' e ve beni bu süreçte yüreklendiren, destekleyen dostlarıma en derin duygularıyla teşekkür ederim.

Deniz ŞENER
Ankara, Eylül 2022

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI

ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜRLER.....	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	7
2.1 İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri	7
2.1.1 XRD Spektrumları.....	7
2.1.2 Raman Spektrumları	8
2.2 İnce Filmlerin Fiziksel Özellikleri	9
2.2.1 UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumları.....	9
2.2.2 Optiksel yasak bant aralığı enerjisinin bulunması	11
2.2.3 Kırılma indisinin bulunması	11
2.2.4 Filmlerin kalınlık hesabı.....	13
2.2.5 Soğurum katsayısı ve sönüm katsayısı hesaplama	13
2.2.6 Dielektrik sabiti ve salınım enerjisi hesabı	15
2.3 İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi	16
2.3.1 Akım-gerilim belirtkenleri	16
2.3.2 Kapasite-gerilim belirtkenleri.....	19
2.3.3 Fotodiyot parametrelerinin hesaplanması.....	20
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	22
3.1 TiO ₂ Kristal Yapısı ve Özellikleri.....	22
3.2 Sol-Jel Yöntemi	24
3.3 Daldırma Tekniği	25
3.4 Alt Tabakaların Temizlenmesi	26
3.4.1 Cam alt tabakaların temizlenmesi.....	27
3.4.2 Silisyum alt tabakaların temizlenmesi	27

3.5	TiO ₂ Çözeltisinin Hazırlanması.....	28
3.6	Cam Alt Tabakasına Film Kaplama Aşamaları.....	29
3.7	Metal Yalıtkan Metal Yapının Oluşturulması	30
3.8	Film Üretimi ve Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar	31
4.	ARAŞTIRMA BULGULARI	36
4.1	Yapısal Analiz.....	36
4.2	Optiksel Analiz	40
4.3	Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al Yapılarının Elektriksel Analizi.....	57
4.3.1	Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapılarının I-V belirtkenleri.....	57
4.3.1	Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların C-V belirtkenleri.....	62
4.3.2	Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapılarının I-V belirtkenlerinin karşılaştırılması.....	67
4.3.3	Diyotların ışığa karşı tepkisi	72
5.	SONUÇ.....	76
	KAYNAKLAR	81
	ÖZGEÇMİŞ.....	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A^*	Richardson sabiti
Al	Alüminyum
Al_2O_3	Alüminyum oksit
C	Sığa
c	Işık hızı
cm	Santimetre
$C_{12}H_{28}O_4Ti$	Tetraizopropoksit
C_2H_5OH	Etil alkol
$C_4H_6CuO_4$	Bakır II asetat
$C_6H_{15}N$	Trietilamin
C_{ma}	Kuvvetli yığılma bölgesindeki kapasite
Cu	Bakır
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_0	Salınım enerjisi
E_d	Dağınım enerjisi
E_F	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_M	Maksimum elektrik alanı
eV	Elektron Volt
g	Gram
Gd_2O_3	Gadolinyum (III) oksit
G_{ma}	Kuvvetli yığılma bölgesindeki iletkenlik
H_2O	Su
h	Planck sabiti
$h\nu$	Foton enerjisi
I	Akım
I_0	Doyma akım
k	Sönüm katsayısı

k	Boltzmann sabiti
kg	Kilogram
m	metre
m^*	Serbest taşıyıcı etkin kütlesi
m_0	Durgun elektron kütlesi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	Deşik etkin kütlesi
N/m^*	Serbest taşıyıcı yoğunluğunun serbest taşıyıcı etkin kütlesine oranı
n	İdeallik faktörü
N	Serbest taşıyıcı yoğunluğu
N_C	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
Ni	Nikel
NiO	Nikel oksit
n_s	Alt tabaka kırılma indisi
N_{ss}	Ara yüzey durum yoğunluğu
q	Elektron yükü
R_s	Seri direnç
S_0	Ortalama salınım genliği
SiO_2	Silisyum dioksit
t	Kalınlık
T	Geçirgenlik yüzdesi
T	Sıcaklık
Ti	Titanyum
TiO_2	Titanyum dioksit
T_M	Maksimum geçirgenlik
T_m	Minimum geçirgenlik
T_s	Alt tabaka geçirgenliği
V	Gerilim
V_0	Kesme gerilimi
V_d	Difüzyon potansiyeli

W_d	Tüketme tabakası genişliği
α	Soğurma katsayısı
ε	Dielektrik sabiti
ε_0	Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
ε_1	Dielektrik sabitinin gerçel kısmı
ε_2	Dielektrik sabitinin sanal kısmı
ε_∞	Yüksek frekans dielektrik sabiti
ϕ_β	Sıfır beslem engel yüksekliği
ϕ_Φ	Fermi enerji yüksekliği
χ	Elektron ilgisi
λ	Dalga boyu
λ_0	Ortalama osilatör dalga boyu
q	Kırınım açısı
σ	Elektriksel iletkenlik
Ω	Direnç
τ	Optiksel gevşeme süresi
ω_π	Plazma frekansı
ν	Foton frekansı
%	Yüzde

Kısaltmalar

C-V	Kapasite-Gerilim
D.B	Değerlik bandı
DC	Doğru akım
DRAM	Dinamik Rastgele Erişimli Bellek
FED	Alan Emisyon Göstergesi
$h\nu$	Foton enerjisi
IC	Entegre devre
IR	Kızılötesi

I-V	Akım-Gerilim
İ.B	İletim bandı
MIM	Metal Yalıtkan Metal
RF	Radyo frekans
RRAM	Dirençli Anahtarlama Rasgele Erişim Belleği
TE	Termoiyonik Emisyon
UV-VIS	Morötesi ve görünür bölge
XRD	X-ışını Kırınımı



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1 Dört devre elamanının şematik gösterimi	3
Şekil 1.2 RRAM yapısı	4
Şekil 2.1 XRD Spektroskopisi şeması	7
Şekil 2.2 Raman Spektroskopi Şeması	8
Şekil 2.3 UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumunun elde edilmesinin şematik gösterimi	9
Şekil 2.4 Geçirgenlik-dalga boyu grafiği	10
Şekil 3.1 TiO ₂ kristal yapısı a) Rutil b) Anataz c) Brukit	23
Şekil 3.2 Daldırma yönteminin aşamalarının şematik gösterimi	25
Şekil 3.3 Cam alt tabakaların temizlenme aşamaları	27
Şekil 3.4 Çözelti hazırlama ve film kaplama aşamaları	29
Şekil 3.5 İnce film kaplama aşamaları	30
Şekil 3.6 Al kaplama işleminde kullanılan vakum düzeneği	30
Şekil 3.7 Elektriksel özellikleri analiz etmek için hazırlanan yapının şematik gösterimi	31
Şekil 3.8 KEY Marka Vakum Düzeneği	32
Şekil 3.9 Vecstar VCTF-4 difüzyon fırını 0-1200 °C	33
Şekil 3.10 UV-VIS-NIR spektrometresi	33
Şekil 3.11 I-V ve C-V sıcaklık ölçümleri için kurulmuş düzenek	34
Şekil 3.12 a) Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü b) Kapalı devre Janes CCS-350S kriyostati ve numune tutucu	35
Şekil 4.1 TiO ₂ ve Cu- TiO ₂ ince filmlerin XRD spektrumu	38
Şekil 4.2 TiO ₂ ve Cu-TiO ₂ ince filmlerin Raman spektrumları	39
Şekil 4.3 Farklı kalınlıklardaki TiO ₂ ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumu	40
Şekil 4.4 Farklı kalınlıklara sahip Cu katkılı TiO ₂ ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumu	41
Şekil 4.5 8 Katlı TiO ₂ ve Cu-TiO ₂ ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumları	41
Şekil 4.6 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO ₂ ince filmlerin n-λ grafiği	44
Şekil 4.7 Farklı kalınlıklarda kaplanan Cu-TiO ₂ ince filmlerin n-λ grafiği	44
Şekil 4.8 8 katlı TiO ₂ ve Cu- TiO ₂ ince filmlerin n-λ grafiği	45
Şekil 4.9 Farklı kalınlıklardaki TiO ₂ ince filmlerin k-λ grafiği	46
Şekil 4.10 Farklı kalınlıklardaki Cu-TiO ₂ ince filmlerin sönüm k-λ grafiği	46

Şekil 4.11 Aynı kalınlıktaki TiO ₂ ve Cu-TiO ₂ ince filmlerin $k-\lambda$ grafiği	47
Şekil 4.12 Farklı kalınlıklardaki TiO ₂ filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği.....	48
Şekil 4.13 Farklı kalınlıklardaki Cu-TiO ₂ ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafiği	48
Şekil 4.14 Aynı kalınlıktaki TiO ₂ ve Cu-TiO ₂ ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği	49
Şekil 4.15 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO ₂ ince filmin Urbach grafiği.....	50
Şekil 4.16 Farklı kalınlıklarda kaplanan Cu-TiO ₂ ince filmin Urbach grafiği.....	50
Şekil 4.17 Aynı kalınlıkta TiO ₂ ve Cu-TiO ₂ ince filmin Urbach grafiği	51
Şekil 4.18 Farklı kalınlıklara sahip TiO ₂ ince filmlerin $\varepsilon_1 - h\nu$ ve $\varepsilon_1 - \lambda^2$ grafiği	53
Şekil 4.19 Farklı kalınlıklara sahip TiO ₂ ince filmlerin $\varepsilon_2 - h\nu$ ve $\varepsilon_2 - \lambda^3$ grafiği	53
Şekil 4.20 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO ₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ ve $(n^2-1)^{-1}-(1/\lambda^2)$ grafikleri	54
Şekil 4.21 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO ₂ ince filmlerin gerçel $\varepsilon_1 - h\nu$ ve $\varepsilon_1 - \lambda^2$ grafiği.....	55
Şekil 4.22 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO ₂ ince filmlerin sanal $\varepsilon_2 - h\nu$ ve $\varepsilon_2 - \lambda^3$ grafiği	55
Şekil 4.23 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO ₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ ve $(n^2-1)^{-1}-(1/\lambda^2)$ grafikleri	56
Şekil 4.24 Al/TiO ₂ /Al yapıların I-V grafiği	58
Şekil 4.25 Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların I-V grafiği	58
Şekil 4.26 Farklı kalınlıkta TiO ₂ kaplı Al/TiO ₂ /Al diyotların LnI-V ve H-I grafiği	60
Şekil 4.27 Farklı kalınlıkta Cu-TiO ₂ kaplı Al/Cu-TiO ₂ /Al diyotların LnI-V ve H-I grafiği	60
Şekil 4.28 Farklı kalınlıkta TiO ₂ kaplı Al/TiO ₂ /Al diyotların F(V)-V grafiği.....	61
Şekil 4.29 Farklı kalınlıkta Cu-TiO ₂ kaplı Al/Cu-TiO ₂ /Al diyotların F(V)-V grafiği ..	61
Şekil 4.30 Farklı kalınlıklarda TiO ₂ kaplı diyotların C-V grafiği.....	63
Şekil 4.31 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO ₂ kaplı diyotların C-V grafikleri.....	63
Şekil 4.32 Farklı kalınlıklarda TiO ₂ kaplı diyotların G/ ω -V grafiği.....	64
Şekil 4.33 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO ₂ kaplı diyotların G/ ω -V grafiği.....	64
Şekil 4.34 Farklı kalınlıklarda TiO ₂ kaplı diyotların $1/C^2$ -V grafikleri	65
Şekil 4.35 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO ₂ kaplı diyotların $1/C^2$ -V grafikleri	65
Şekil 4.36 Farklı kalınlıklarda TiO ₂ kaplı diyotların Rs-V grafikleri	66
Şekil 4.37 Farklı kalınlıklarda kaplanmış Cu-TiO ₂ ince filmlerin Rs-V grafiği.....	66
Şekil 4.38 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların I-V grafiği	68
Şekil 4.39 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların ln I-V grafiği	68

Şekil 4.40 Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların dV/dLn(I)-I ve H-I grafiği	69
Şekil 4.41 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların F(V)-V grafiği.....	69
Şekil 4.42 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların C-V grafiği.....	70
Şekil 4.43 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların G/ω-V grafiği.....	71
Şekil 4.44 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların 1/C ² -V grafiği	71
Şekil 4.45 Aynı kalınlıkta Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ / Al yapıların R _S -V grafiği	72
Şekil 4.46 Aydınlık ve Karanlıkta ölçülen Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların I-V grafikleri.....	73
Şekil 4.47 Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların PS-V grafiği	74
Şekil 4.48 Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların D-V grafiği.....	74
Şekil 4.49 Al/TiO ₂ /Al ve Al/Cu-TiO ₂ /Al yapıların R-V grafiği.....	75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1 Sol-jel yöntemi avantaj ve dezavantajları	24
Çizelge 3.2 Çizelge Daldırma yöntemi avantajları	26
Çizelge 4.1 Örgü parametreleri (a ve c), birim hücre hacmi (V) kristalit boyutu (D), profil kalıntı faötörü (R_p), ağırlıklı profil değeri (R_{wp}) ve uygunluk fit değeri (χ^2) ölçümleri	38
Çizelge 4.2 Raman spektrumlarından elde edilen tepe değeri	40
Çizelge 4.3 Farklı kalınlıklardaki TiO_2 ince filmlerin optiksel parametreleri	42
Çizelge 4.4 Farklı kalınlıklardaki $Cu-TiO_2$ ince filmlerin optiksel parametreleri	43
Çizelge 4.5 Farklı kalınlarda kaplanan TiO_2 ve $Cu-TiO_2$ ince filmin E_g , E_u değeri...	51
Çizelge 4.6 TiO_2 ince filmlerin sonsuz kırılma indisi	54
Çizelge 4.7 $Cu-TiO_2$ ince filmlerin sonsuz kırılma indisi	56
Çizelge 4.8 Farklı kalınlıklarda TiO_2 kaplı diyotların I-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri	62
Çizelge 4.9 Farklı kalınlıklarda $Cu-TiO_2$ kaplı diyotların I-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri	62
Çizelge 4.10 Farklı kalınlıklarda TiO_2 kaplı diyotların yapıların C-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri	67
Çizelge 4.11 Farklı kalınlıklarda $Cu-TiO_2$ kaplı diyotların yapıların C-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri	67
Çizelge 4.12 Aynı kalınlıkta $Al/TiO_2/Al$ ve $Al/Cu-TiO_2 / Al$ yapıların I-V belirtkenlerinden elde edilen parametreler	70
Çizelge 4.13 Aynı kalınlıkta $Al/TiO_2/Al$ ve $Al/Cu-TiO_2 / Al$ yapıların C-V belirtkenleri yardımıyla bulunan parametreler	72
Çizelge 4.14 $Al/TiO_2/Al$ ve $Al/Cu-TiO_2/Al$ yapıların fotodiyot parametreleri	73

1. GİRİŞ

Feymann, 1959 yılında “Aşağıda Daha Çok Yer Var” başlıklı ünlü konuşmasında nanoteknolojiden açıkça bahsetmese de atom ve moleküllerin işlenebileceğini düşündürmüştür (Fanfair vd 2007). Bu konuşma nanoteknoloji ve nanobilimin başlangıcı kabul edilir. Feymann ile birlikte nanoteknoloji ve nanobilim çalışmaları hız kazanmıştır.

1974 yılında, Tokyo Üniversitesindeki Japon bilim adamı Nario Taniguchi yaptığı bir konferansta ince film biriktirme gibi nanometre boyuttaki yarı iletken süreçleri anlatmak için nanoteknoloji tanımını yapmıştır. Taniguchi, malzemelerin atom atom veya molekül molekül işlenmesi, ayrılması, birleştirilmesi veya bozulmasına nanoteknoloji demiştir (Taniguchi 1974).

Nanoteknolojinin hızla gelişmesi ile günümüz teknolojisinde Metal-Yalıtkan-Metal (MIM) kontaklar oldukça önem kazanmıştır.

Metal-Yalıtkan-Metal, iki metal tabaka arasında yer alan nano ölçekli bir yalıtkan tabakadan oluşan yapıdır. 1960’ lı yıllardan itibaren MIM yapılara daha çok ilgi artmıştır. Üretim ve nanoteknolojideki gelişmeler, her geçen yıl bu yapıların farklı uygulamalar için kullanılabileceğini göstermiştir. Nano ölçekli MIM diyotlarda, metaller arasındaki enerji bariyerini oluşturan ince yalıtkan tabaka elektron tünelleme mekanizmasını sağlar bu da belirli uygulamalar için avantajlıdır. Kızılötesi Algılama, MIM diyotların yaygın uygulamalarından biridir.

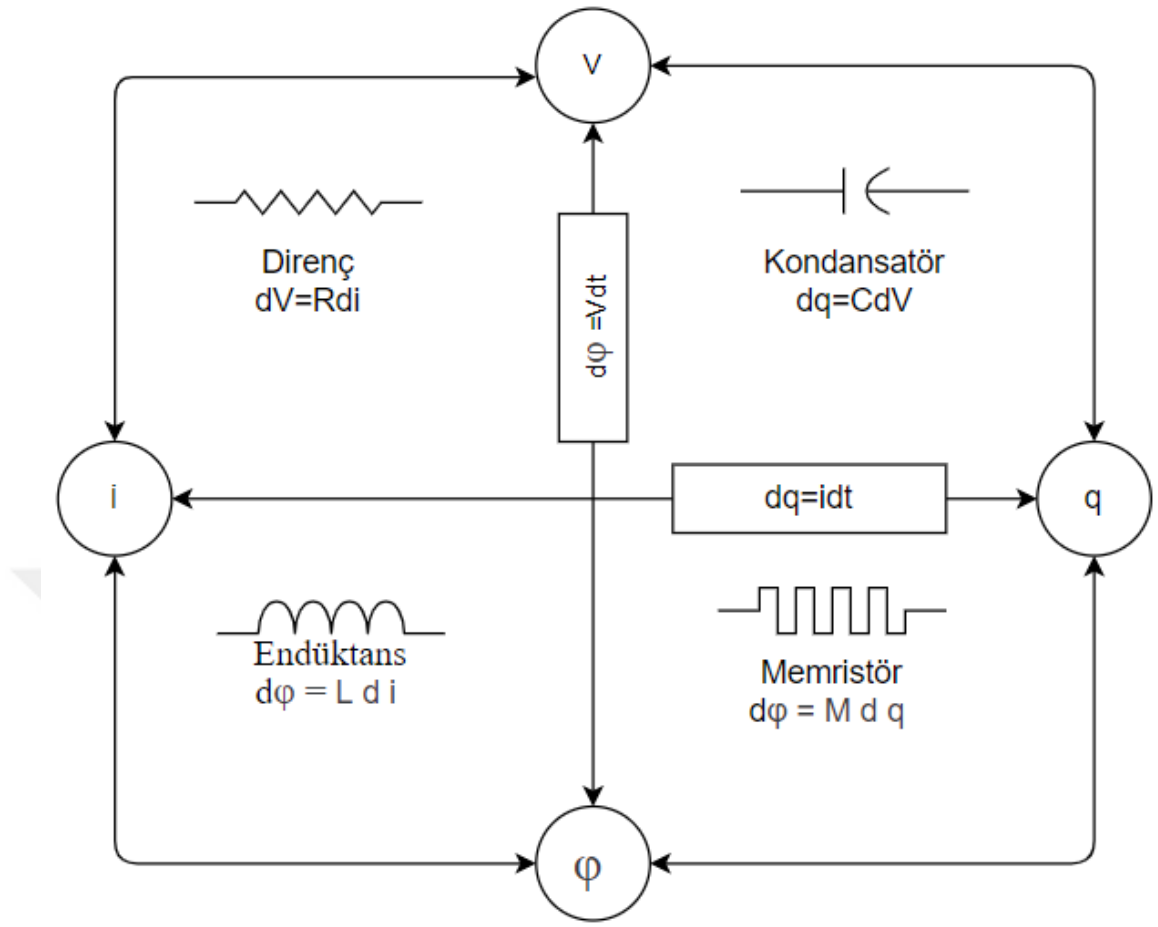
Rapor edilen araştırmalar, ince film MIM diyotlarının IR tespiti için kullanılabileceğini göstermektedir. Wiesendanger (1977), farklı metaller ve bunların doğal oksitleri tarafından oluşturulan ince film metal-oksit-metal tünel bağlantılarının, doğrusal olmayan tepki ile kızılötesi dedektörler gibi davranan geleneksel nokta temaslı diyotlar ürettiğini belirtmiştir. Heiblum (1978), Ni/NiO/Ni tarafından oluşturulan metal oksit metal yapısının yakın IR aralığı için algılama performansı sergilediğini ve yapıların

kararlı olduğunu ve pin diyotlarından farklı olarak yeniden üretilebilir bir şekilde başarılı bir şekilde üretildiğini sundu.

Metal-Yalıtkan-Metal (MIM) yapılar, modern çağda depolama cihazlarının ayrılmaz bir parçasıdır; örneğin yüksek dielektrikli oksit malzemeler, memristörler, dirençli anahtarlama rasgele erişim belleği (RRAM), minyatür kapasitörler ve alan emisyon göstergeleri (FED), mikro devreli cihazlar ve sensörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

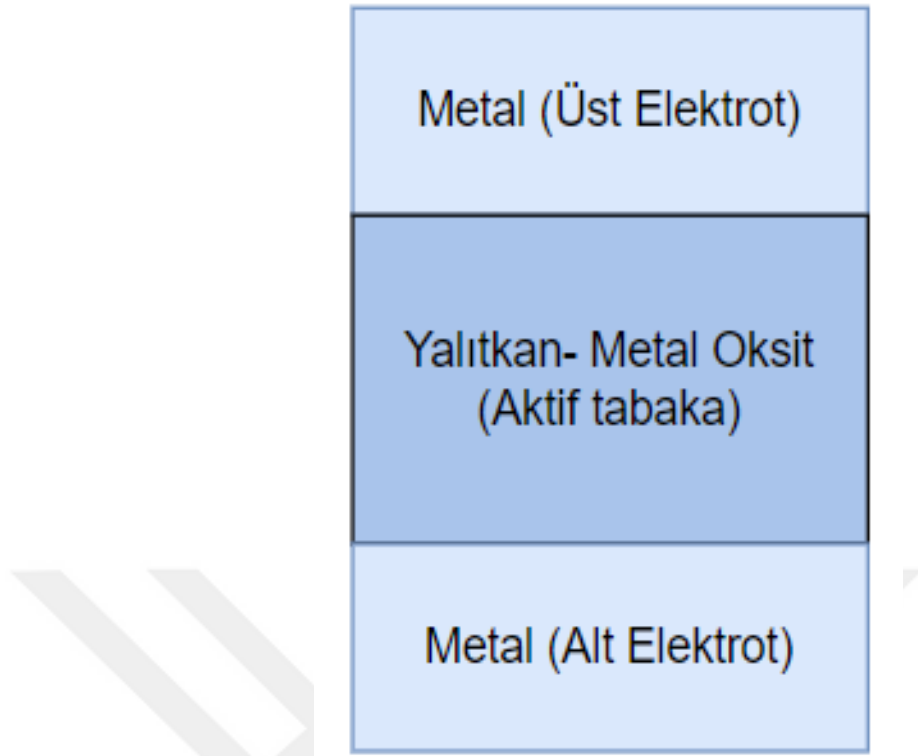
1971 yılı öncesi devre elemanları olarak kapasitör, direnç ve endüktans olarak üç temel eleman bilinirdi. Yük ile gerilim arasındaki ilişkiyi tanımlayan kondansatör 1745'te Ewald Georg Von Kleist tarafından, gerilim ve akım arasındaki ilişkiyi tanımlayan direnç 1827 yılında Georg Simon Ohm tarafından, akım ile akı arasındaki ilişkiyi tanımlayan endüktans ise 1831'de Michael Faraday tarafından tanımlanmıştır. Akı ile yük arasındaki ilişki ise henüz tanımlanmamıştır (Yeşil ve Babacan 2019), Leon Chua 1971 yılında bu eksikliği fark ederek hafızalı direnç olarak adlandırdığı memristörden bahsederek dördüncü devre elemanı olması gerektirdiğini söylemiştir. (Chua, 1971) Memristör aktif olmayan, iki uçlu, enerji depolama yeteneği olmayan, histerisiz akım gerilim eğrisine sahip, küçük boyutlarda ve doğrusal olmayan özellikte devre elemanı olarak tanımlanır.

2008'de HP tarafından fiziksel olarak üretilmeden önce memristör araştırmacıların dikkatini çekmeyi başaramadı (Williams vd 2008). 2008 yılından sonra ise memristör ile ilgili çalışmalar hız kazandı.



Şekil 1.1 Dört devre elamanının şematik gösterimi

Günümüzde bilgisayar parçalarında ve bir çok elektronik cihazlarda bellek en önemli parçalardan biridir. Bellekler geçici ve geçici olmayan olarak ikiye ayrılır. Kalıcı bellekler içine yazılan bilgileri saklayabilme yeteneğine sahiptir. Gelişmekte olan teknolojiler arasında, RRAM gelecekteki kalıcı bellekler için en önemli önemli adaylardan birisidir. Metal-Yalıtkan-Metal yapıya sahip RRAM, iki metal elektrot arasında yüksek direnç özelliğine sahip metal oksit tabakadan oluşmaktadır (Tekin, Serdar Burhan. 2018).



Şekil 1.2 RRAM yapısı

Metal - Yalıtkan - Metal (MIM) kapasitörler, iki paralel iletken metal arasında bir yalıtkan malzeme bulunan plakalardan oluşur (Ching-Wang vd 2007). MIM Kapasitörlerin kapasitansı, iki paralel plakanın aktif alanı, iletken metal plakalar arasındaki mesafe ve metal plakaların ayrılması için kullanılan yalıtkan malzemenin dielektrik sabitinin (k) değerinin bir fonksiyonudur (Tallman vd 2006).

Metal- Yalıtkan – Metal (MIM) kapasitörler bellek depolama için Dinamik Rastgele Erişimli Bellek (DRAM) hücrelerinde, mikroişlemcilerde, radyo frekansında (RF) ve karışık sinyalli entegre devreler (IC) de ayrıştırma ve filtrelemede mobil iletişim dahil olmak üzere bir çok devre elemanlarında kullanılır (Ko vd 2004, Sematech 2000, Tallman vd 2006, Ismael 2019).

Metal Yalıtkan Metal diyotlar, iki metal tabakanın arasına yerleştirilen ince yalıtkan tabakadan oluşur. Metal Yalıtkan Metal diyotun kuantum tünellemesi ve fotovoltajik etki üzerine kurulu akım üretim mekanizması, MIM diyotların güneş hücresi olarak

kullanılmasına olanak sağlar. Günümüzde teknolojik alandaki ilerlemeler, Metal Yalıtkan Metal diyotlarının üretimi ve birçok alanda kullanımları için araştırılmasını önemli hale getirmiştir. Metal Yalıtkan Metal diyotları; üretim maliyetindeki düşüklüğü, yüksek verim potansiyeline sahip olması ve birçok elektronik devre ile uyumluluğu gibi artı özelliklere sahiptir (Durmaz, Emre Can 2018).

Bu depolama cihazlarının kapasitesi dielektrik malzemenin kalınlığına ve elektrik yükünün yapı boyunca taşınmasına büyük ölçüde bağlıdır. Geçmişte dielektrik malzemeler Gd_2O_3 , Al_2O_3 ve SiO_2 gibi çeşitli dielektrik malzemeler kullanılmıştır (Shahnaz 2017). Metal oksitler fizik, kimya ve malzeme biliminin birçok alanında önemlidir. Metal elementler metalik, yalıtkan, yarıiletken özellikleri gösteren, oksit bileşenlerinin birçok çeşitini oluşturabilir. Metal oksitler, bağlanma yapıları, şekil ve boyutlarına göre farklılıklar içerir. Yapılarında ve bağlanmalarındaki farklılık, optik, manyetik ve fiziksel özelliklerini farklılaştırmakta bu durum metal oksitleri ilginç yapmaktadır. TiO_2 , ZnO , CdO , Ga_2O_3 , CuO , SnO_2 , In_2O_3 , PbO_2 , MgO ve GeO_2 son zamanlarda en fazla araştırma yapılan metal oksit malzemelerdir.

TiO_2 dalga boyu spektrumunda yüksek geçirgenlik değerine sahiptir. Geçiş metal oksit olan titanyum oksit (TiO_2) son yıllardaki araştırmalarda büyük önem kazanmıştır. Yüksek kırılma indisi, öz direnç ve dielektrik sabiti gibi optik ve elektriksel özelliklerinden dolayı çok ilgi çekmiştir. Filmin hazırlama şartlarına göre, dielektrik sabiti 7 ile 86 arasında değişmektedir. Kristal faz ve saflığına bağlı olarak, TiO_2 'nin bant aralığı 3,0 ile 3,5 eV arasında değişir. Bu özelliklerinden dolayı transistörler, kapasitörler, güneş pilleri ve sensörler gibi birçok elektronik ve optoelektronik cihaz uygulamasında SiO_2 yerine TiO_2 'in kullanılmaktadır. TiO_2 filmleri, kimyasal buhar biriktirme, sol-jel, buharlaştırma ve DC / RF magnetron püskürtme gibi farklı tekniklerle oluşturulabilir. Bunlar arasında, sol-jel tekniği en umut verici tekniklerden biridir (Fuyuki and Matsunami 1986, Büyükbaş 2014, Benli 2014). Bu yöntemlerden; sol-jel yönteminde kaplanan filmin mikro yapısının kolaylıkla kontrol edilmesi, optiksel ve elektriksel özelliklerinin kontrolünün kolaylığı, hazırlanan ortamla etkileşimde bulunmaması ve kullanılan düzeneğin kurulmasının daha ekonomik olmasıdır.

Bu çalışmada yapılarda yalıtkan tabaka olarak TiO_2 ve Cu katkılı TiO_2 filmler kullanılmıştır ve bu filmler sol-jel daldırma yöntemiyle büyütülmüştür. Öncelikli olarak cam alttabakalar üzerinde farklı kalınlıklarda TiO_2 ve Cu- TiO_2 ince filmler büyütülmüş optiksel geçirgenlik spektrumları yardımıyla optiksel sabitleri elde edilmiştir. Ayrıca hazırlanan filmlerin XRD ve Raman spektrumları ile yapıları incelenmiştir. TiO_2 ve Cu- TiO_2 filmleri, üzeri Al kaplanmış p-tipi silisyum üzerine kaplanarak Al/ TiO_2 /Al ve Al/Cu- TiO_2 /Al yapıları elde edilmiştir. Elde edilen yapıların oda sıcaklığında akım- gerilim (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

I-V ölçümlerinden sıfır beslem engel yüksekliği (ϕ_b), seri direnç (R_s), doyma akımı (I_0) ve ideallik faktörü (n)' nün bulunması, C-V ölçümlerinden sıfır beslem engel yüksekliği ($\phi_{b0(C-V)}$), fermi enerji yüksekliği (ϕ_F), tüketme tabakası genişliği (W_d), kesme gerilimi (V_0), difüzyon potansiyeli (V_d) bulunması amaçlanmıştır. Aynı zamanda ara yüzey enerji durumlarının değişimi incelenmiştir.

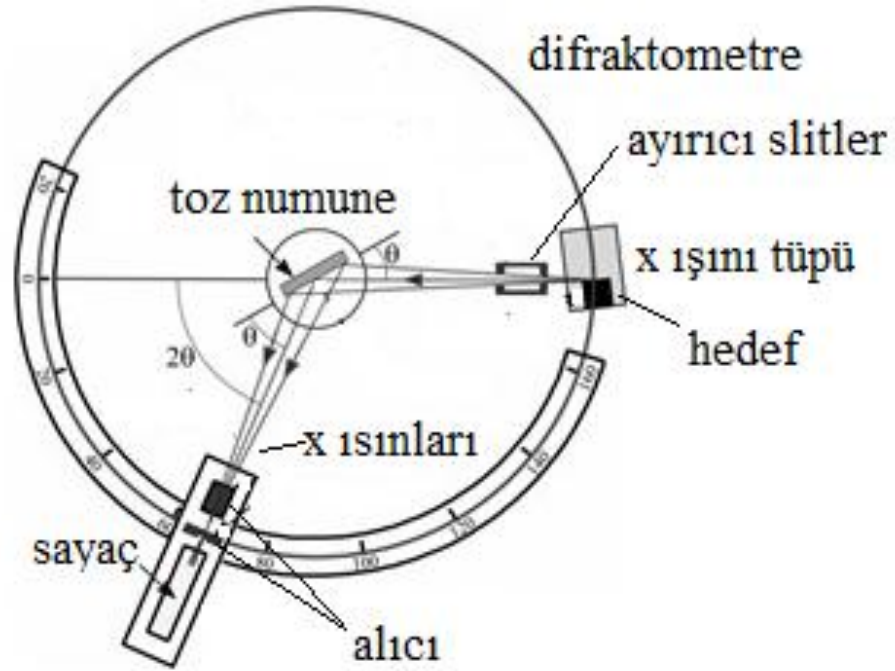
2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 İnce Filmlerin Yapısal Özellikleri

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin optiksel özellikleri XRD ve Raman spektrumları yardımıyla incelenmiştir.

2.1.1 XRD Spektrumları

İnce filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için XRD en önemli yöntemlerden biridir. XRD cihazları, ince film üzerine gönderilen ışınların örgü düzlemlerinde belirli açılarla saçılması ile spektrumlar oluşturur. Spektrumlardaki pikler ile örgüdeki atomların yerleşimleri belirlenir. Ayrıca ince filmlerin yapısı, tanecik boyutları, kristal yönelimleri gibi yapısal özellikleri hakkında bilgilere ulaşılır.

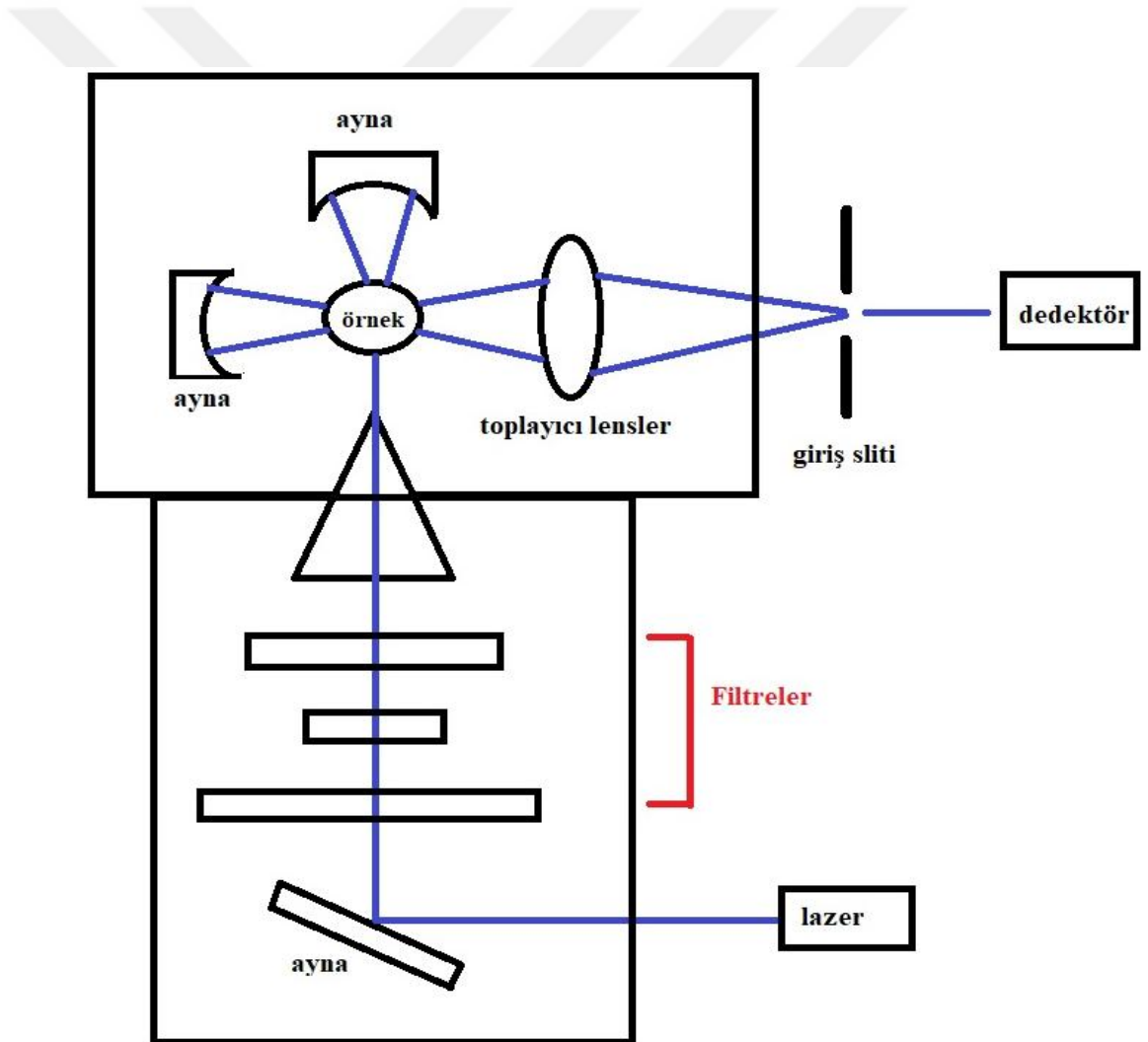


Şekil 2.1 XRD Spektroskopisi şeması

2.1.2 Raman Spektrumları

İnce filmlerin yapısal özelliklerini incelemek için kullanılan önemli yöntemlerden birisi de Raman Spektroskopisidir. Raman Spektrometresi malzemenin yakın kızılötesi, yakın UV veya görünür bölge ışını içeren lazer ile ışınlanması sonucu esnek olmayan saçılan fotonların belirlenen açılarda ölçülmesine dayanıyor. Bu açı genelde 90^0 dir.

Işık saçılması esnasında saçılan ışığın enerjisi, malzeme ile etkileşen ışığın enerjisine eşit ise Rayleigh saçılması, farklı ise bu saçılma türüne Raman saçılması denir. Gönderilen ışın ile etkileşen ışın arasındaki farka Raman Kayması denir.



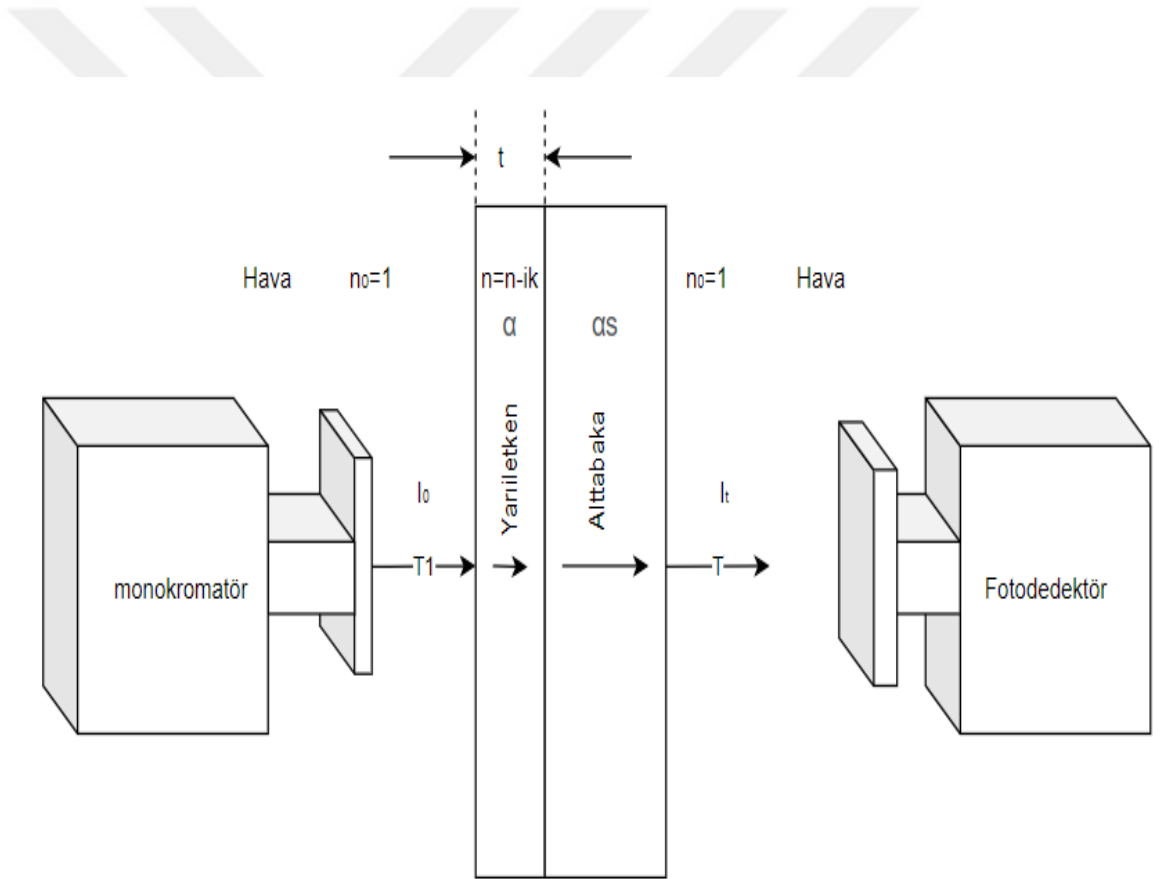
Şekil 2.2 Raman Spektroskopi Şeması

2.2 İnce Filmlerin Fiziksel Özellikleri

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin optiksel özellikleri UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumları yardımıyla incelenmiştir.

2.2.1 UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumları

Yarıiletkenlerin enerji bant aralığı, ince filmin soğurma katsayısının foton enerjisine bağlılığı ölçülerek elde edilir. Fotonun enerjisi enerji bant aralığından küçük ise fotonlar soğurulmadan geçer, büyük ise fotonlar soğurulur.



Şekil 2.3 UV-Vis-NIR geçirgenlik spektrumunun elde edilmesinin şematik gösterimi

Film üzerine gelen ışığın şiddeti I_0 olmak I_t geçen ışığın şiddeti aşağıdaki denklemle verilir.

$$I_t = I_0 e^{-\alpha(\lambda)t}$$

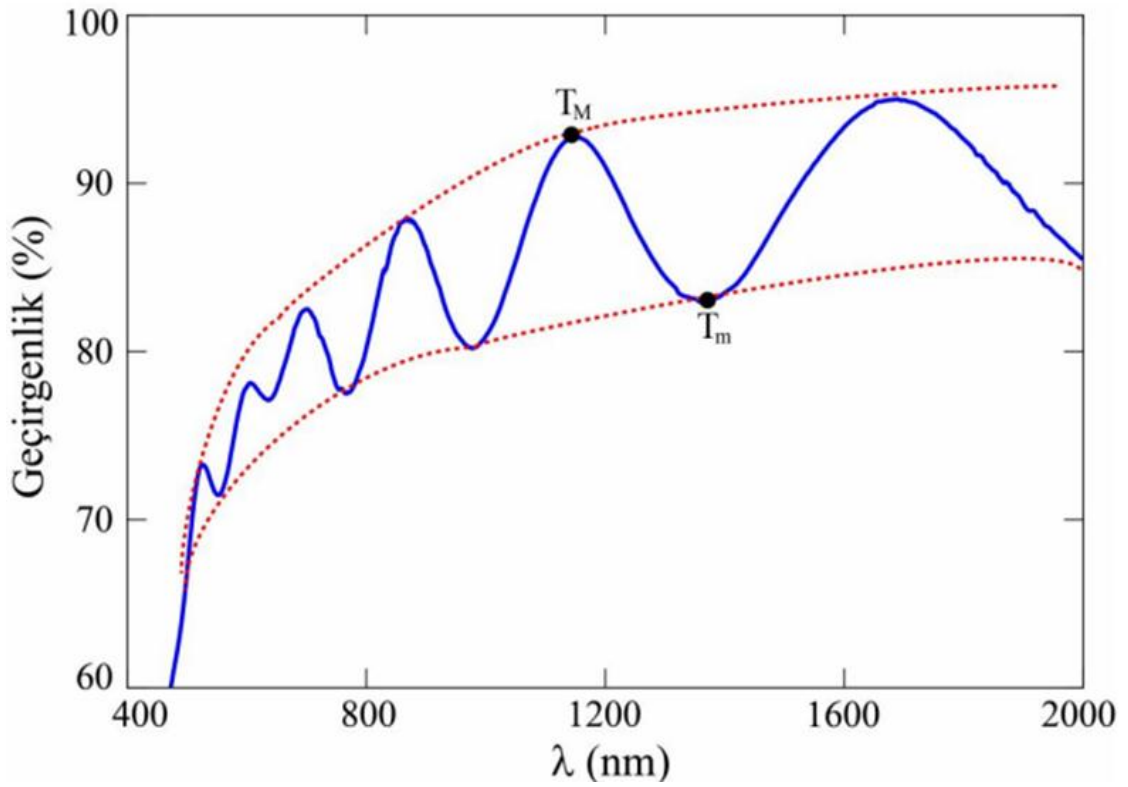
(2.1)

burada t ince filmin kalınlığını ve $\alpha(\lambda)$ dalgaboyuna bağılı soğurum katsayısını göstermektedir. Denklem 2.1 den $\alpha(\lambda)$

$$\alpha(\lambda) = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right) \quad (2.2)$$

elde edilir. Soğurma katsayısı numune ve dalga boyuna bağılı olarak değişir ve birimi cm^{-1} dir.

Geçirgenliğin dalga boyuna göre değişimi Şekil 2.4’ deki gibidir.



Şekil 2.4 Geçirgenlik-dalga boyu grafiği

UV-Vis- NIR geçirgenlik spektrumları ve 2.2 denklemi yardımıyla α soğurum katsayısı elde edilir.

2.2.2 Optiksel yasak bant aralığı enerjisinin bulunması

Soğurum katsayısı ile optiksel yasak enerji bant aralığı arasında ilişki Tauc ilişkisi olarak bilinir ve aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$\alpha h\nu = \alpha_0(h\nu - E_g)^n \quad (2.3)$$

Burada $h\nu$ foton enerjisini, α_0 sabiti, E_g optiksel yasak enerji bant aralığı ve n bir sabittir. n 'nin değeri izinli ve yasak direk geçişler için sırasıyla 1/2 ve 3/2 dir. n 'nin değeri izinli ve yasak indirekt geçişler içinse sırasıyla 2 ve 3 dür. TiO_2 filmlerin optiksel yasak enerji bant değerleri, filmler indirekt geçişli olduğundan $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafikleri oluşturulur. Grafiklerin çizgisel kısımlarının $h\nu$ eksenine ekstrapole edilmesinden E_g değerleri bulunur.

2.2.3 Kırılma indisinin bulunması

Şekil 2.4'de gösterilen T geçirgenlik spektrumu denklem (2.4) ile ifade edilir. Burada geçirgenlik dalga boyu, kalınlık, soğurma katsayısı, filmin ve alt tabakanın kırılma indislerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır.

$$T = T(\lambda, n_s, n, t, \alpha) \quad (2.4)$$

(2.4) denkleminde n_s biliniyorsa, T geçirgenlik değerini $n(\lambda)$ ve filmin soğurumu $x(\lambda)$ cinsinden $T = T(n, x)$ olarak yazılabilir (Swanepol 1983).

$$T = T(n, x) = \frac{Ax}{B - Cx \cos \phi + Dx^2} \quad (2.5)$$

burada

$$A = 16n^2n_s \quad (2.6)$$

$$B = (n + 1)^3(n + n_s^2)$$

$$C = 2(n^2 - 1)(n^2 - n_s^2)$$

$$D = (n - 1)^3(n - n_s^2)$$

$$\phi = \frac{4\pi nt}{\lambda}$$

$$x = e^{-\alpha t}$$

Alt tabaka kırılma indisi n_s , T_s alt tabaka geçirgenliğinden denklem 2.7 den bulunur.

$$n_s = \frac{1}{T} + \left(\frac{1}{T_s^2} - 1\right)^{1/2} \quad (2.7)$$

T_M ve T_m değerleri dalga boyunun sürekli fonksiyonudur (Manifacier 1976, Swanepoel 1983). Denklem (2.7)'de sabit dalga boyuna denk gelen maksimum T_M ve T_m minimum geçirgenliklerini bulmak için $\cos\phi$ için +1 ve -1 değerleri yazıldığı zaman;

$$\begin{aligned} T_M &= \frac{Ax}{B-Cx+Dx^2} \\ T_m &= \frac{Ax}{B+Cx+Dx^2} \end{aligned} \quad (2.8)$$

denklemleri elde edilir. Zayıf ve orta soğurum bölgesinde 2.8 denklemlerinin tersleri alınıp birbirlerinden çıkarıldığında x den bağımsız 2.9 denklemi elde edilir.

$$\frac{1}{T_M} - \frac{1}{T_m} = \frac{2C}{A} \quad (2.9)$$

Denklem (2.9)'da C ve A değerlerini yerine koyduğumuz zaman kırılma indisi için;

$$n = [N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}]^2 \quad (2.10)$$

denklemi elde edilir. Denklem (2.10)'de ki N ;

$$N = \frac{1}{2}(1 + n_s^2) + \frac{2n_s(T_M - T_m)}{T_M T_m} \quad (2.11)$$

eşitliği ile tanımlanır.

2.2.4 Filmlerin kalınlık hesabı

Yarıiletkenlerin elektriksel ve fiziksel özelliklerinin belirlenmesinde film kalınlığının önemi büyüktür. Film kalınlığı birçok yöntemle bulunabileceği gibi geçirgenlik spektrumundan yararlanarak da hesaplanır. Alt tabaka üzerinde homojen kalınlıkta büyütülen ince filmler Şekil 2.4 de geçirgenlik spektrumunda da görüldüğü gibi girişim pikleri verir.

Girişim piklerinin denklemi

$$2nt = m \lambda \quad (2.12)$$

burada m maksimum pik için tamsayı ve minimum pik için yarı tamsayıdır. Film kalınlığı bu pikler yardımıyla (2.13) denklemi kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde λ_1 ve λ_2 iki ardışık maksimum (veya minimum) pikin dalga boylarını, bu n_1 ve n_2 dalga boylarındaki filmin kırılma indislerini göstermektedir. Kırılma indisleri denklem 2.10 yardımıyla hesaplanır.

$$t = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(n_2 \lambda_1 - n_1 \lambda_2)} \quad (2.13)$$

2.2.5 Soğurum katsayısı ve sönüm katsayısı hesaplama

Optiksel spektrumlar üç bölgeye ayrılmaktadır.

Saydam Bölge: Geçirgenlik yüksektir. Dolayısıyla soğurum olmayacaktır ve soğurum katsayısı $\alpha = 0$ ve $x = e^{-\alpha t}$ denkleminde dolayı $x=1$ dir.

Zayıf ve Orta Soğurum Bölge: Bu bölgede soğurum katsayısı α sıfırdan farklı ve $x < 1$ 'dir.

Kırılma indisi değeri $n = [N + (N^2 - n_s^2)^{1/2}]^{1/2}$ denkleminde hesaplanır. Elde edilen kırılma indisi değerlerinden denklem (2.8)' deki A,B,C,D ve ϕ sabitleri elde edilir. x değeri T_M ve T_m eşitliklerine göre iki yöntemle hesaplanabilir (Swanepoel 1983).

T_M eşitliğine göre:

$$x = \frac{E_M - [E_M^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - n_s^2)]^{1/2}}{(n-1)^3 (n - n_s^2)} \quad (2.14)$$

$$E_M = \frac{8n^2 n_s}{T_m} - (n^2 - 1)(n^2 - n_s^2) \quad (2.15)$$

T_m eşitliğine göre:

$$x = \frac{E_m - [E_m^2 - (n^2 - 1)^3 (n^2 - n_s^2)]^{1/2}}{(n-1)^3 (n - n_s^2)} \quad (2.16)$$

$$E_m = \frac{8n^2 n_s}{T_m} - (n^2 - 1)(n^2 - n_s^2) \quad (2.17)$$

Ayrıca sonsuz alt tabaka için (Manifacier vd. 1976) x değerini

$$x = \frac{(n+1)(n_s+n)[1-(T_M/T_m)]^{1/2}}{(n-1)(n_s-n)[1+(T_M/T_m)]^{1/2}} \quad (2.18)$$

şeklinde elde edilir.

Güçlü Soğurum Bölge: Geçirgenlik pikleri yoktur. Soğurum katsayısı α değeri

$$\alpha = \frac{1}{t} \ln\left(\frac{1}{x}\right) \quad (2.19)$$

denkleminde hesaplanabilir.

Sönüm katsayısı (k) ise;

$$k = \frac{\alpha \lambda}{4\pi} \quad (2.20)$$

denkleminde elde edilir.

2.2.6 Dielektrik sabiti ve salınım enerjisi hesabı

Optiksel cihazların tasarımında ve optiksel iletişimde kırılma indisleri dağılımı önemlidir. Wemple ve DiDomenico (1969) tarafından tek salınım modeline göre analiz edilen kırılma indisi dağılımının foton enerjisi ile ilişkisi aşağıda verilmiştir.

$$n^2 = 1 + \frac{E_d E_0}{E_0^2 - (h\nu)^2} \quad (2.21)$$

burada E_0 salınım enerjisi ve E_d dağılım enerjisini göstermektedir. Kırılma indisinin dağılım değerleri aşağıdaki denkleme de fit edilebilir.

$$n^2 - 1 = \frac{S_0 \lambda_0^2}{1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda})^2} \quad (2.22)$$

burada S_0 ve λ_0 sırasıyla ortalama salınım genliği ve dalga boyudur. Sonsuz dalga boyundaki kırılma indisi 2.23 denkleminde elde edilebilir.

$$\frac{n_\infty^2 - 1}{n^2 - 1} = 1 - (\frac{\lambda_0}{\lambda})^2 \quad (2.23)$$

Aşağıdaki denklemde verilen kompleks dielektrik sabiti filmlerin optiksel özelliklerini karakterize eder.

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + i\varepsilon_2 \quad (2.24)$$

Dielektrik sabitinin ε_1 gerçekte ve ε_2 sanal kısımlarının Drude teorisine göre kırılma indisine bağlılığı aşağıdaki bağıntılarla verilir (Weijtens ve Van Loon 1991).

$$\varepsilon_1 = n^2 - k^2 = \varepsilon_\infty - (\frac{\varepsilon_\infty \omega_p^2}{4\pi^2 c^2}) \lambda^2 \quad (2.25)$$

$$\varepsilon_2 = 2nk = -(\frac{\varepsilon_\infty \omega_p^2}{8\pi^2 c^3 \tau}) \lambda^3 \quad (2.26)$$

Bu denklemlerde ϵ_{∞} yüksek frekans dielektrik sabiti, τ optiksel gevşeme süresi, c ışık hızı, ω_p plazma frekansı, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, N serbest taşıyıcı yoğunluğu ve m^* taşıyıcı etkin kütesidir. ω_p plazma frekansı $(n^2-k^2) - \lambda^2$ eğrisinin eğiminden elde edilir. Yüksek frekans dielektrik sabiti ise bu eğrinin doğrusal kısmının $\lambda^2=0$ a ekstrapole edilmesi ile elde edilir. ω_p plazma frekansı ve ϵ_{∞} değerleri 2.27 denkleminde kullanılarak N/m^* elde edilir.

$$\omega_p^2 = \frac{Ne^2}{\epsilon_{\infty} m^* \epsilon_0} \quad (2.27)$$

Sanal dielektrik sabiti ϵ_2 , E_0 ve E_d tek salınım parametreleri ilişkili olduğundan malzemenin optiksel özellikleri hakkında bilgi içerir.

2.3 İnce Filmlerin Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

2.3.1 Akım-gerilim belirtkenleri

Schotky diyotlar için yapıdan geçen düz beslem akımının termoionik emisyon kaynaklandığı kabul edilir (Card ve Rhoderick 1971). İdeal Schotky diyotların akım-gerilim ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$I = I_0 [\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1] \quad (2.28)$$

burada q elektron yükü, k Boltzmann sabiti ve I_0 ters doyma akımıdır. Akım ifadesi ideal olmayan diyotlar için 2.29 denklemiyle verilir.

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) [1 - \exp\left(\frac{qV}{kT}\right)] \quad (2.29)$$

burada n ideallik faktörüdür diyodun ideal durumdan sapmasını gösterir. İdeal diyot için $n=1$ dir.

Düz beslemde $V > 3kT/q$ gerilimlerde akım ifadesi,

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.30)$$

olarak yazılır (Rhoderick ve Williams 1988).

$\ln I - V$ grafiği bir doğru verir. Doğrunun $\ln I$ eksenini kestiği noktadan I_0 , doğrunun eğiminden ise n idealite faktörü elde edilir. Doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve tüketme bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük kabul edildiği Termoiyonik Emisyon (TE) teorisinin geçerli olduğu durumda I_0 doyma akımı

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.31)$$

denklemleri ile verilir. Bu denklemde A diyot alanı, A^* Richardson sabiti (n -Si: 120 A/cm^2K^2 , p -Si: 32 A/cm^2K^2) ve ϕ_{b0} sıfır beslem engel yüksekliğidir.

Cheung ve Cheung (1986), Schottky diyotlarında seri direnç (R_s) etkisini ve ideal durumdan sapmayı hesaba katarak (2.28) denkleminde verilen termoiyonik emisyon akım denklemini;

$$I = \left[A^*AT^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] = I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.32)$$

şeklinde tekrar ifade etmiştir. Bu denklem, akım yerine gerilim için tekrar düzenlenirse;

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.33)$$

ifadesi elde edilir. Bu denklemin $\ln(I)$ ' ya göre türevi alınarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.34)$$

Bu denklem $y=mx+c$ şeklinde bir doğrunun denklemidir ve $y=dV/d\ln(I)$, $x=I$, $m=R_s$, $c=nkT/q$ olacağı için denklemin eğiminden R_s , x eksenini (akım eksenini) kestiği noktadan da n bulunur. Bariyer (engel) yüksekliğini bulmak için ise $H(I)$ fonksiyonu denklem (2.35) deki tanımlanır ve

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.35)$$

denklem 2.35, denklem 2.36 şeklinde tekrar yazabiliriz.

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (2.36)$$

$H(I)$ - I ifadesi de bir doğru denklemidir ve grafiği de bir doğrudur. Doğrunun eğimi seri direnç, doğrunun düşey eksen kestiği noktadan elde edilen değerin idealite faktörü değerine bölünmesi de engel potansiyelini verir.

Seri direncin büyük olduğu durumlarda Norde (1979) tarafından $F(V)$ fonksiyonu seri direnç ve engel yüksekliğini belirlemek için önerilmiştir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (2.37)$$

ile tanımlanır. Burada $\gamma > n$ büyük keyfi sabit bir sayıdır ve $I(V)$ gerilime bağlı akımdır. Bariyer yüksekliğini ve seri direnci bulmak için aşağıdaki denklemler kullanılır.

$$\phi_{Bn} = F(V_{min}) + \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{\gamma}\right) V_{min} - \frac{kT(\gamma-n)}{qn} \quad (2.38)$$

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_{min}} \quad (2.39)$$

Burada; $F(V_{min})$ terimi, $F(V)$ - V grafiğinin minimum $F(V)$ değeri, V_{min} ise bu minimum değere karşılık gelen gerilimdir ve I_{min} ise, V_{min} deki akımdır.

2.3.2 Kapasite-gerilim belirtkenleri

Yalıtkan tabaka kalınlığı δ olan bir kontağın kapasite değeri aşağıdaki denklemle verilir (Neamen 1997).

$$C_i = \frac{\varepsilon_i A}{\delta} \quad (2.40)$$

Burada, A diyot alanı, C_i yalıtkan tabakanın kapasitesi ve ε_i yalıtkan tabakanın elektriksel geçirgenliğidir.

Diyotların sabit frekans değerinde ölçülmüş C - V ölçümleri yardımıyla çizilen $1/C^2$ - V grafiklerinden bazı diyot parametreleri belirtilebilir. Eğrilerin doğrusal kısımlarının ekstrapolasyonundan kesim potansiyeli (V_0) ve eğimlerinden verici yoğunlukları (N_D) bulunur.

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_0 + V)}{\varepsilon_s q A^2 N_D} \quad (2.41)$$

Arayüzey durumlarının bulunmadığı durumda kesim potansiyeli ve difüzyon potansiyeli arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir (Sze 1981).

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.42)$$

$$E_F = kT \ln \frac{N_C}{N_D} \quad (2.43)$$

Burada N_C iletim bandı etkin durum yoğunluğu olup aşağıdaki denklem yardımıyla bulunur;

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} \left(\frac{m_e^*}{m_0} \right)^{3/2} T^{3/2} \quad (2.44)$$

Burada m_e^* elektron etkin kütlesidir ve $m_e^* = 0,33m_0$ değerindedir.

Aynı zamanda engel yüksekliği C-V grafiği yardımıyla aşağıdaki denklemden bulunur.

$$\phi_{b(C-V)} = V_d + E_F - \Delta\phi_b \quad (2.45)$$

Schottky engel alçalması $\Delta\phi_b$ denklem 2.46 ile bulunur.

$$\Delta\phi_b = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s}} \quad (2.46)$$

E_m maksimum elektrik alan olup aşağıdaki denklemle verilir.

$$E_m = \sqrt{\frac{2qN_D V_d}{\epsilon_s}} \quad (2.47)$$

Wd tüketim bölgesi genişliği

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_d}{qN_D}} \quad (2.48)$$

denklemleri ile verilir.

C-V ölçümlerinden aynı zamanda aşağıdaki denklem kullanılarak R_s değerleri de bulunabilmektedir (Nicollian ve Brews 1982).

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + (\omega C_m)^2} \quad (2.49)$$

Burada ω açısal frekans, C_m ve G_m ölçülen kapasite ve iletkenlik değerleridir.

2.3.3 Fotodiyot parametrelerinin hesaplanması

Cihazların fotodiyot parametreleri olan fotosensitif PS, algılanabilirlik D ve foto duyarlılık R değerlerinin belirlenmesi için aydınlık I-V ölçümlerinden yararlanılır. PS,

D, R fotodiyot parametreleri aşağıdaki denklemler yardımı ile elde edilir (Uzun Çam vd 2021).

$$PS = \frac{I_{ph}}{I_d} = \frac{I_{ill}-I_d}{I_d} \quad (2.50)$$

$$D = \frac{R}{\sqrt{2qI_d/A}} \quad (2.51)$$

$$R = \frac{I_{ph}}{PA} \quad (2.52)$$

I_{ph} , I_{ill} ve I_d değerleri sırasıyla fotoakım, ışık altındaki akım ve karanlık ortamdaki akım değerleridir. P, gelen ışık yoğunluğu ve A aktif diyot alanı olarak tanımlanır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

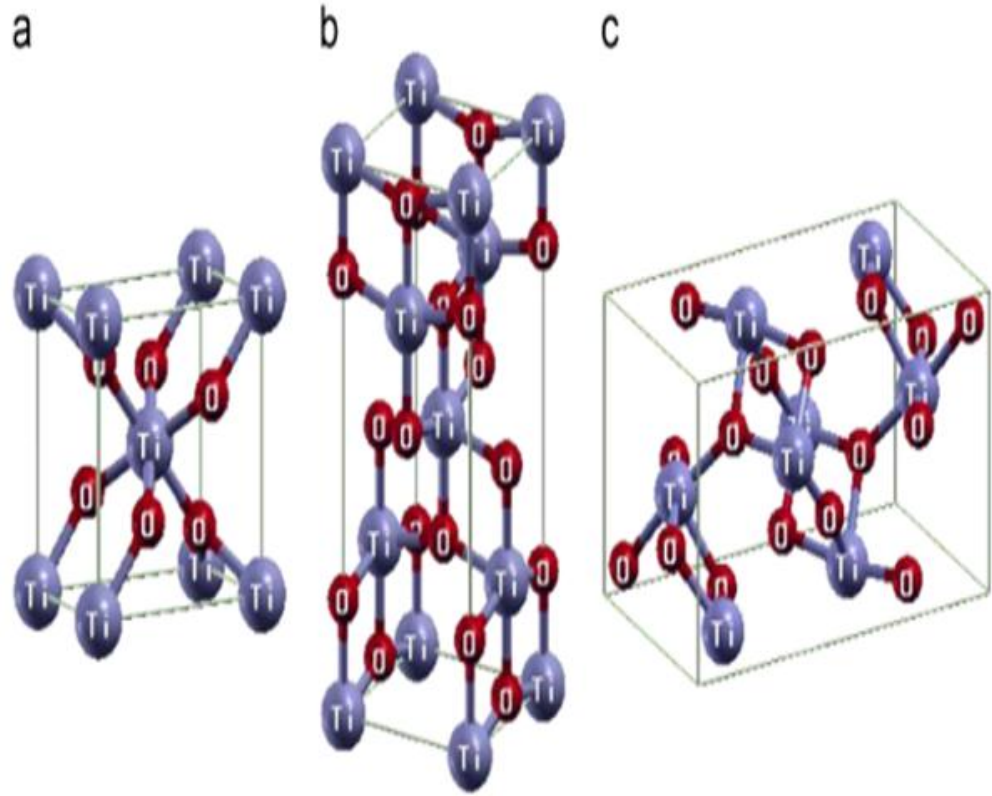
3.1 TiO₂ Kristal Yapısı ve Özellikleri

Periyodik cetvelinin IV ve VI. Sütunlarında yer alan titan ve oksijen atomlarının bir araya gelmesiyle oluşan n tipi yarıiletken olan TiO₂, kırılma indisi, öz direnç ve dielektrik sabiti gibi optiksel, elektriksel ve kimyasal özelliklerinden dolayı son yıllarda araştırmacıların dikkatini çekmiştir (Lui vd 2001, Kaiitvichvanukul vd 2005, Canan 2012, Turhan 2000). Yüksek geçirgenlik değerine, 3.0 eV ile 3.5 eV arasında değişen geniş yasak bant aralığına ve 2.4 ile 2.7 aralığında kırılma indislerine sahiptir (Karunagaran vd 2005). Bu özelliklerinden dolayı elektronik devrelerde devre elemanı (Walid vd 2005), güneş pillerinde (Karuppuchamy vd 2005), optik devrelerde (Visente vd 2001), gaz sensörlerinde (Rothschild vd 2003, Karunagaran vd 2005) kullanılmaktadır. Dielektrik sabitinin yüksek olması ve yalıtkan özelliğinden dolayı MIM, MISFET (alan etkili transistor) ve MIS (metal-insulator-semiconductor) uygulamalarda tercih edilmektedir (Kaya 2002, Bardakçı 2007).

TiO₂, 79.866 g/mol molekül ağırlığı , 4.23 g/cm³ yoğunluğu, 1843 °C erime noktası, 2972 °C kaynama noktası gibi fiziksel özelliklere sahiptir. Suda çözünmez durumda olan TiO₂'nin molar entropisi 50 kJ/mol ve oluşum entalpisi -945 kJ/mol dır (Canan 2012).

Bir geçiş metal oksidi olan TiO₂ brukit (ortorombik, a=9.166 Å, b=5.436 Å, c=5.135 Å), rutil (tetragonal, a=b=4.584 Å, c=2.953 Å) ve anataz (tetragonal, a=b=3.782 Å, c=9.502 Å) olmak üzere üç farklı fazda büyütülebilmektedir (Sönmezoğlu 2010).

Yarı kararlı durumda olan anataz 700 °C nin altında elde edilirken daha yüksek sıcaklıklarda daha kararlı olan rutil faz elde edilir.



Şekil 3.1 TiO₂ kristal yapısı a) Rutil b) Anataz c) Brukit

TiO₂'in avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Organik bileşenlerin parçalanmasını sağlar bu özelliği fotokatalizör olarak kullanılmasına yol açar.
- Ucuz bir materyaldir.
- Zehirli değildir.
- Kimyasal olarak kararlıdır.
- Yüksek miktarlarda üretimi kolaydır.
- Işığı çok iyi kırma özelliği nedeniyle silikonlu güneş pillerinde, yansımayı engellemesi nedeniyle de ince-film optik aletlerde kullanılır (Benli 2014).

3.2 Sol-Jel Yöntemi

Alışagelmiş yöntemlerde seramik, cam gibi inorganik maddeler 1500 °C gibi çok yüksek sıcaklıklardaki işlemler sonucu elde ediliyordu. Yüksek sıcaklıkların kaplanacak malzemeye zarar vermesi ve çalışma koşullarının zorluğu nedeniyle bu malzemelerin elde edilebileceği daha kolay kimyasal yöntemler araştırılmıştır (Bardakçı 2007).

Kimyasal bir yöntem olan sol-jel de diğer yöntemlere göre 100-600 °C gibi daha düşük sıcaklıklar gerekmektedir (Turhan 2000). Yöntemin ilk aşamasında başlangıç malzemeleri kullanılarak bir çözelti elde edilir. Sonraki aşamada bu çözelti dehidrolize edilir. Elde edilen çözelti alt tabakalar üzerine daldırma, döndürme ve ya sprey tekniği ile kaplanır. Alt tabaka üzerinde elde edilen amorf filmler, 500-800 °C gibi sıcaklıklarda ısıtılarak işlem uygulanarak yoğunlaştırılır, kristalleşir ve homojen filmler elde edilir (Sener 2006).

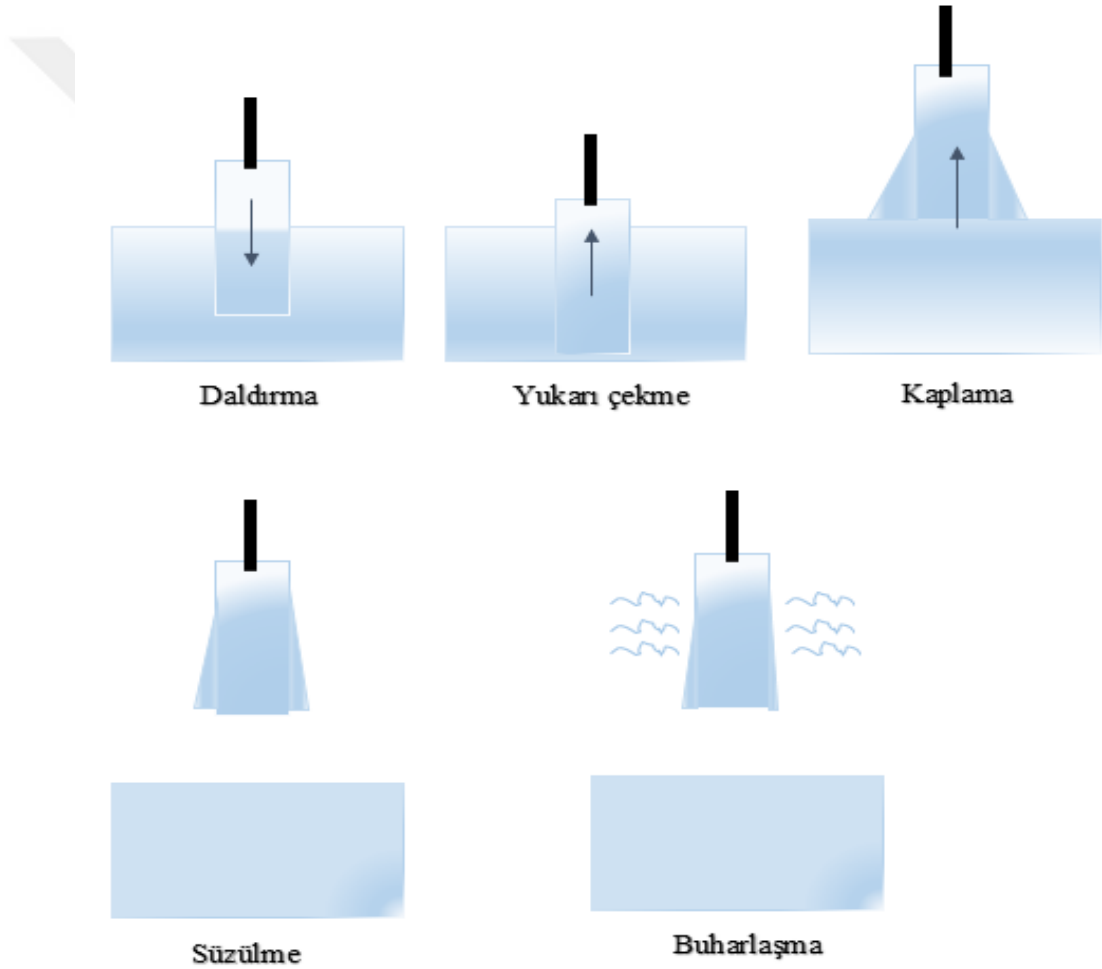
Sol-jel yöntemi diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında zaman avantajları ve dezavantajları Çizelge 3.1 de verilmiştir.

Çizelge 3.1 Sol-jel yöntemi avantaj ve dezavantajları

Avantajları	Dezavantajları
Vakumsuz ortam ve düşük sıcaklıklar yeterli.	Çözelti uzun ömürlü değildir.
Bulunduğu ortamla etkileşmede olmaz.	Hazırlanan solüsyonda kaplama sırasında kayıp fazladır.
Alt tabakada oluşan film kalınlığı her yerde aynı ve homojendir.	Çok katmanlı filmlerin elde edilmesi zaman alır.
Hava kirliliği oluşturmaz.	Solüsyon hazırlarken kullanılan maddeler zararlı olabilir.
Kolay kontrol edilir süreçlere sahiptir.	
Yapısı gözeneklidir.	
Alt tabakanın geometrisi önemsizdir.	
Enerji tasarrufu sağlar	
Basit araç ve malzeme kullanılır.	

3.3 Daldırma Tekniği

Daldırma tekniği, film kaplanacak alt tabakanın hazırlanan çözeltiye belirlenen sabit hızla daldırılması ve çıkarılması temeline dayanır. Filmin düzgün ve ince kaplanması için alt tabakanın hazırlanan çözeltiye daldırma ve çıkarılma işlemleri sırasında sarsıntısız, sabit hızda ve düzgün hareket etmesi sağlanmalıdır (Cömert 2019, Önar 2015). Homojen film elde etmek için kullanılan daldırma tekniği birçok tekniğe göre biraz daha basittir. Beş aşamadan oluşmaktadır.



Şekil 3.2 Daldırma yönteminin aşamalarının şematik gösterimi

alt tabakanın çözeltiye daldırıldığı ve çıkarıldığı aşamalarda aşağı ve yukarı hareket eden tabakaları ayıran ana akıntının şiddetine, çözeltinin akışkanlığına ve alt tabakanın

daldırma sırasındaki hızına bağlıdır (Abu-Dheir vd 2019, Krishna vd 2019). Film oluşumunu sağlayan kuvvetler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yukarı çekme işleminde alt tabaka ile solüsyonun oluşturduğu sürtünme kuvveti
- Yerçekimi kuvveti
- Solüsyonun yüzey gerilimi
- Solüsyonun eylemsizlik momenti
- Birleştirici veya ayırıcı basınç

Daldırma yöntemini diğer yöntemlerle karşılaştırdığımız zaman Çizelge 3.2 deki gibi avantajları vardır.

Çizelge 3.2 Çizelge Daldırma yöntemi avantajları

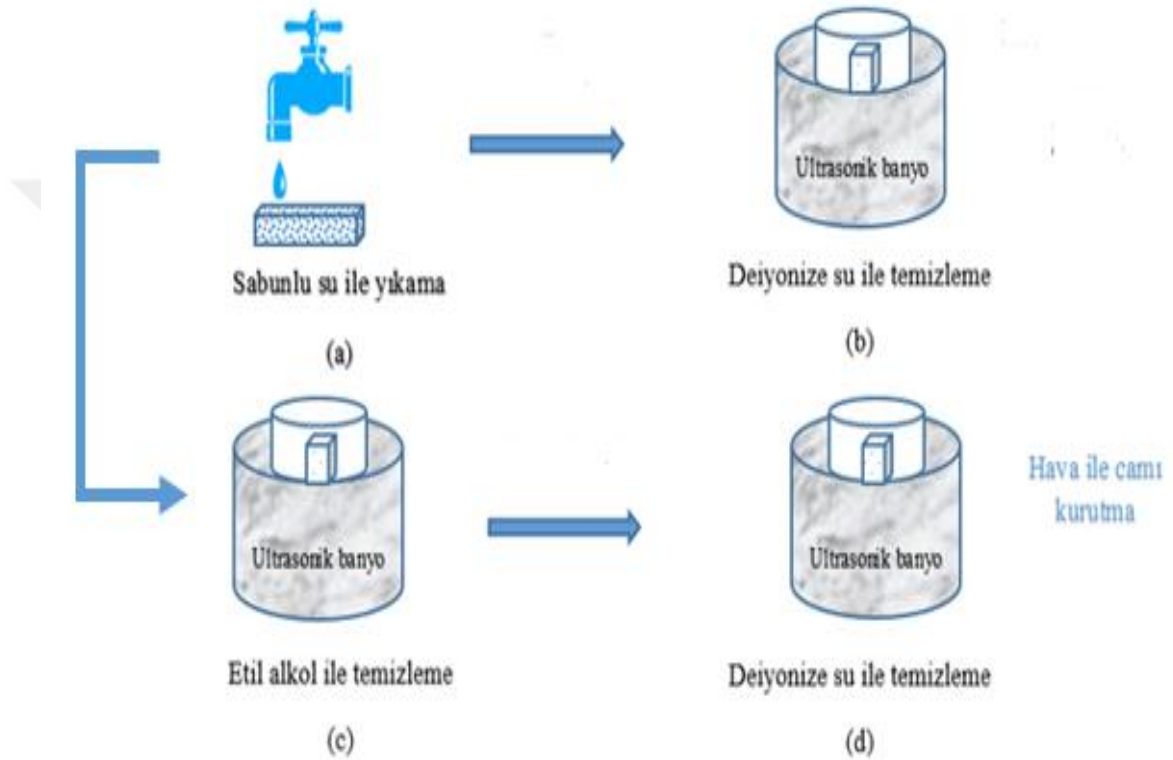
Daldırma Yöntemi Avantajları
Düzgün bir film elde edilebilir.
Filmin kalınlığı çok daha kolay kontrol edilebilir.
Birden fazla kaplama yapılabilir.
Farklı optik özelliklere sahip yöntemdir.
Herhangi bir geometri yapıda alt tabakalar için aynı özellikte film kaplanabilir.

3.4 Alt Tabakaların Temizlenmesi

TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmler, 1 mm×26 mm×76 mm boyutlu mikroskop camlar ve 1-20 Ω-cm öz dirençli, 140 µm kalınlığında, (111) düzleminde kesilmiş p-tipi Si alttabakalar üzerinde büyütülmüştür. Düzgün ince filmler elde edilebilmek için alt tabaka temizliğinin çok iyi yapılması gerekmektedir.

3.4.1 Cam alt tabakaların temizlenmesi

Cam alt tabakalar üzerindeki kir ve yağ tabakasının giderilmesi için sabunlu su ile temizlenmiştir. Daha sonra sırasıyla 10'ar dakika ultrasonik olarak deiyonize su (18M Ω), etil alkol ve deiyonize suda temizlenmiştir. Temizlenen camlar kurutulmuştur.



Şekil 3.3 Cam alt tabakaların temizlenme aşamaları

3.4.2 Silisyum alt tabakaların temizlenmesi

Temizleme işlemi üç aşamadan oluşur.

(i) Organik Temizleme: Kristal alt tabaka 1:1:5 oranlarında hazırlanan Amonyum hidroksit, Hidrojen peroksit ve 18M Ω deiyonize su karışım içinde 10 dakika süresince 60°C-70°C de kaynatılır. Ardından ultrasonik su banyosunda deiyonize su ile temizlenir.

(ii) Oksit Temizleme: Kristal alt tabaka 1:10 oranlarında hazırlanan Hidroflorik asit: 18MΩ deiyonize su karışım içinde 20 sn ultrasonik su banyosunda bekletilir. Deiyonize su ile temizlenir.

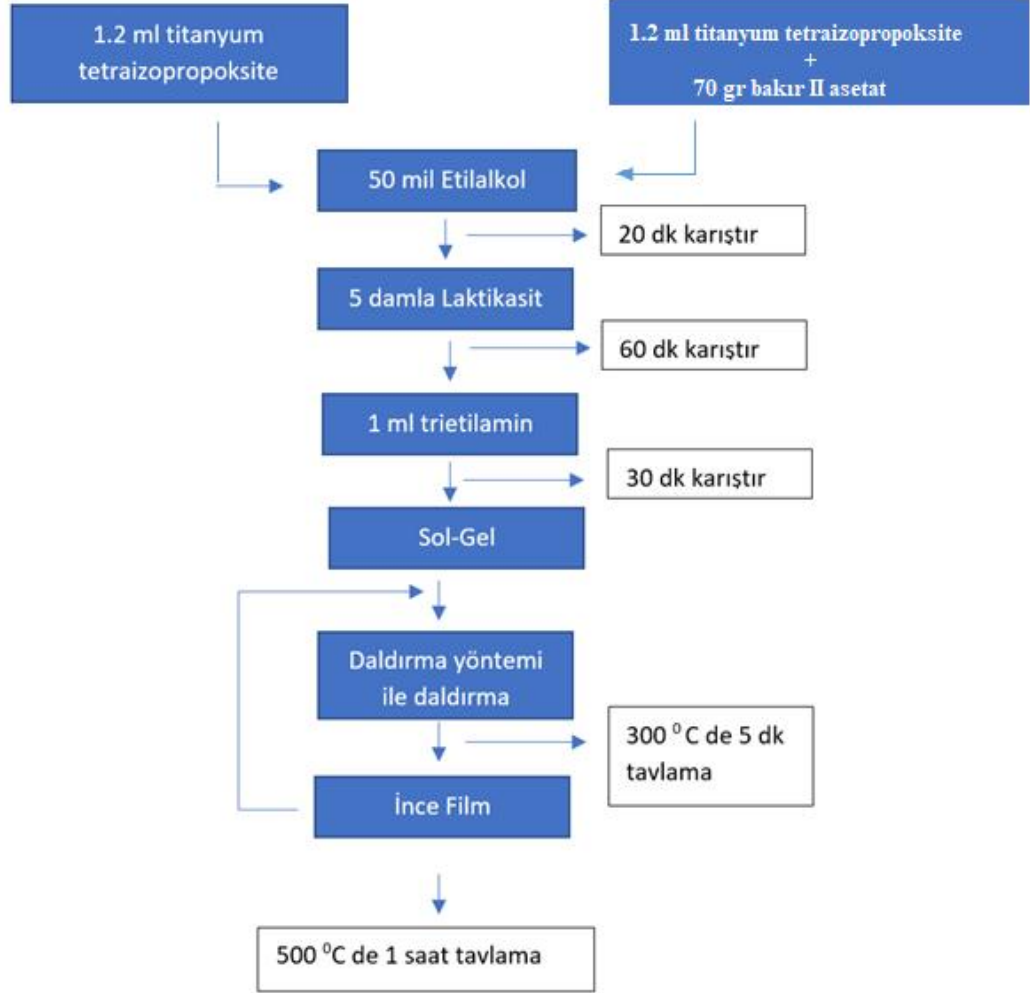
(iii) İyonik Temizleme: Kristal alt tabaka 1:1:6 oranlarında hazırlanan Hidroklorik asit, Hidrojen peroksit ve 18MΩ deiyonize su karışım içinde 10 dakika süresince 60°C-70°C de kaynatılır. Ardından ultrasonik su banyosunda deiyonize su ile temizlenir.

3.5 TiO₂ Çözeltisinin Hazırlanması

Katkısız TiO₂ ince film elde etmek için 50 ml etil alkol (C₂H₆O, Merck) içine 1.2 ml titanyum tetraizopropoksit (C₁₂H₂₈O₄Ti) eklendi ve çözülünceye kadar manyetik karıştırıcıda 20 dk karıştırıldı. Cu katkılı TiO₂ için ise aynı miktarda etil alkol içerisine bakır II asetat ((Cu(CH₃COO)₂.H₂O, Merck)) çözülünceye kadar manyetik karıştırıcıda karıştırıldı, 1.2 ml titanyum tetraizopropoksit eklendi ve manyetik karıştırıcıda 20 dk karıştırıldı. Daha sonra 5 damla laktik asit eklendi. Yaklaşık bir saat karıştırıldıktan sonra içerisine 1ml trietilamin (C₂H₅N)₃N, Merck eklendi ve yarım saat magnetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Katkısız TiO₂ ince film için hazırlanan çözelti için şeffaf bir çözelti elde edilirken Cu katkılı TiO₂ ince film için hazırlanan çözelti yeşil renkte elde edildi. Çözelti hazırlama ve film kaplama aşamaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Katkısız TiO₂

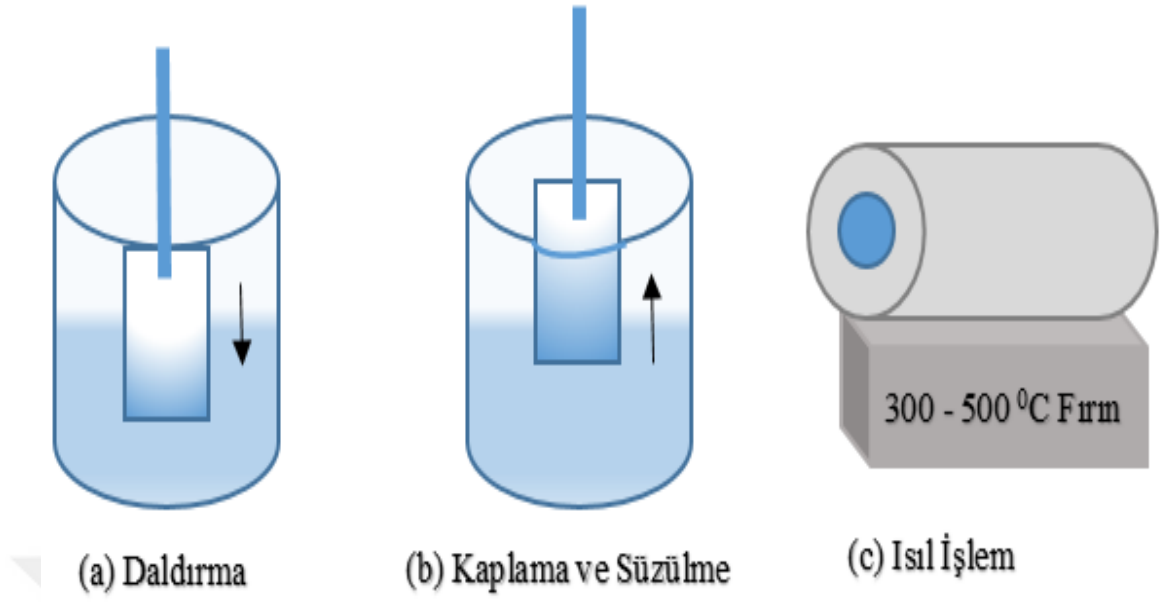
Cu katkılı TiO₂



Şekil 3.4 Çözelti hazırlama ve film kaplama aşamaları

3.6 Cam Alt Tabakasına Film Kaplama Aşamaları

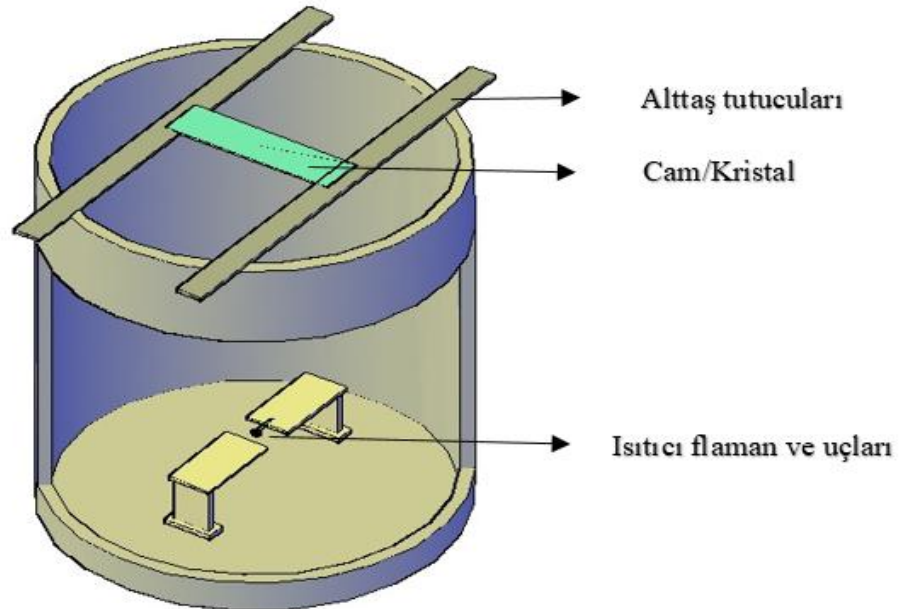
Temizlenme işleminden geçmiş cam yüzeyler 0-24 V. Redüktör motorlu ve dişli sistemden oluşan bilgisayar kontrollü sistem ile hazırlanan çözeltiye 0.3 cm/sn hızla daldırılıp aynı hızla çıkartılmıştır. Her bir daldırma işlemin ardından kaplanmış yüzeyler 300 °C sıcaklığındaki fırın içerisinde 5'er dakika tutulmuştur. Belirli sayıda tabaka kaplanmış olan filmler son olarak 500 °C'de 1 saat tavlansmıştır.



Şekil 3.5 İnce film kaplama aşamaları

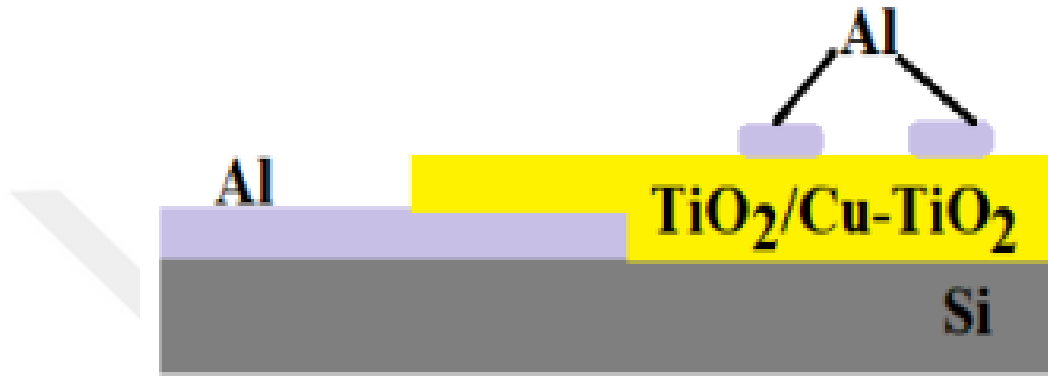
3.7 Metal Yalıtkan Metal Yapının Oluşturulması

Temizlenmiş p-tipi silisyum kristallerin parlak yüzeyleri Key Marka vakum düzeneğine yerleştirilerek 10^{-6} torr vakum altında alüminyum buharlaştırılarak kaplanmıştır.



Şekil 3.6 Al kaplama işleminde kullanılan vakum düzeneği

Al buharlaştırılarak kaplanan Si kristalleri sol-jel daldırma tekniği ile TiO_2 kaplanmıştır. Her daldırma işleminden sonra 300°C sıcaklığındaki fırında 5 dakika tutulmuştur. Belirli sayılarda bu işlem tekrarlandıktan sonra en son olarak 500°C de 1 saat tavlama işlemi yapılmıştır. Al kaplı Si kristalleri üzerinde büyütülen TiO_2 filmlerin üzerinde Al kontaklar vakum düzeneğinde daire şekilli maske yardımı ile alınmıştır. Üretilen yapının şematik gösterimi Şekil 3.7 de gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Elektriksel özellikleri analiz etmek için hazırlanan yapının şematik gösterimi

3.8 Film Üretimi ve Ölçümlerde Kullanılan Cihazlar

Human Zeneer Power marka cihazdan, alt tabakaların temizleme işlemlerinde kullanılan $18\text{ M}\Omega$ 'luk deiyonize suyu elde etmekte faydalanılmıştır.

Branson 12 marka cihaz ultrasonik banyo alttabakaların temizleme aşamasında, Clifton Cerastır marka manyetik karıştırıcı çözeltinin hazırlanma aşamasında kullanılmıştır.

Al metal kontakların alınmasında 10^{-7} Torr'a inebilen Key marka vakum düzeneği kullanılmıştır.



Şekil 3.8 KEY Marka Vakum Düzeneği

Film kaplamalarında bilgisayar ile kontrol edilebilen 0-24 V redüktör motorlu ve dişli sistemden yararlanılmıştır. Isısal işlemler için Şekil 3.9’da gösterilen Vecstar VCTF4 difüzyon fırını kullanılmıştır.



Şekil 3.9 Vecstar VCTF-4 difüzyon fırını 0-1200 °C

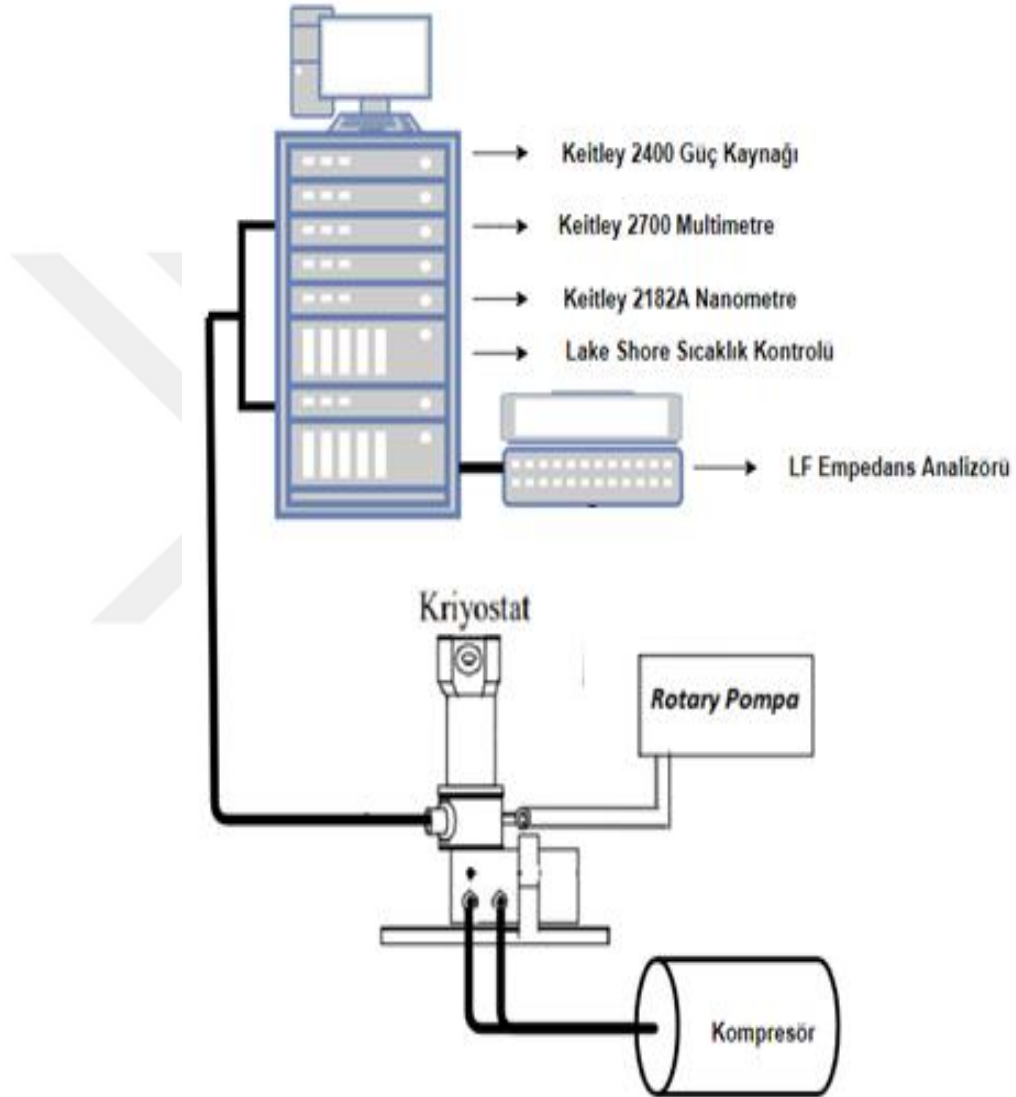
Hazırlanan ince filmlerin yansıma ve geçirgenlik spektrumlarının ölçümünde kullanılan UV-3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR spektrometresi şekil 3.10’de verilmiştir.



Şekil 3.10 UV-VIS-NIR spektrometresi

Al/TiO₂/p-Si ve Al/Cu-TiO₂/p-Si yapılarının oda ve düşük sıcaklıklardaki I-V ve C-V

ölçümleri için Şekil 3.11'deki düzenek kullanılmıştır. Bu düzenek bilgisayar kontrollü Keithley 2420 akım-gerilim kaynağı, HP 4192A empedans köprüsü, kapalı devre Janes CCS-350S kriyostat ve LakeShore 330 sıcaklık kontrol ünitesinden oluşmuştur ve bilgisayar kontrolü için Visual Basic ve Labviewde yazılmış programlardan yararlanılmıştır.



Şekil 3.11 I-V ve C-V sıcaklık ölçümleri için kurulmuş düzenek



a)



b)

Şekil 3.12 a) Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü b) Kapalı devre Janes CCS-350S kriyostatı ve numune tutucu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde ilk olarak Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapılarında yalıtkan tabaka olarak kullanılan TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmlerin XRD ve Raman spektrumları çekilerek malzemenin yapısal özellikleri incelenmiştir. Daha sonra optiksel yasak enerji bant aralıkları, kırılma indisleri, kalınlıkları gibi parametreleri UV-Vis-NIR geçirme spektrumları yardımıyla bulunmuştur. Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapılarının I-V ve C-V ölçümleri yardımıyla elektriksel özellikleri incelenmiştir ve sonuçlar sunulmuştur.

4.1 Yapısal Analiz

Cam alt tabaka üzerinde büyütülen TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin XRD spektrumları 20-70° tarama aralığında CuK α radyasyon kaynağı kullanılarak Rikagu Miniflex 600 masa üstü Toz X ışını difraktometresi ile gerçekleştirilmiştir.

Aynı filmlerin Raman spektrumları Horiba XploRA Raman spektrometresi ile çekilmiştir. Raman saçılımlı ışığı toplamak için, 100x objektif büyütme (NA = 0.90) bir Olympus Bx41 geçirgenlik ve yansıma aydınlatma mikroskobu (Olympus, Fransa) kullanılmıştır. Raman sinyallerini 50–800 cm⁻¹ spektra aralığında ölçülmüştür. 532 nm'lik yeşil lazer uyarımı uygulanmıştır.

TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmlerin kristal yapısı, kristal boyutu ve düzlem yönü, Şekil 4.1'de gösterilen XRD deseninden bulunmuştur. Filmlerin XRD spektrumlarında 25.37, 37.99, 48.13 ve 54.15° lik 2 θ değerlerinde kırınım pikleri görülmektedir. Bu pikler ICSD kartlarıyla karşılaştırıldığında, TiO₂ anataz fazının (101), (004), (200), (105) ve (201) düzlemlerine ait olduğu görülmüştür. Ayrıca Cu-TiO₂'nin XRD spektrumunda, CuO ve Cu₂O ve Cu iyonlarına ait kırınım pikleri gözlenmez (H.Yang vd 2015). (101) düzlemine ait değerler dikkate alınarak kristal boyutu (D) Debye Scherrer formülünden yararlanılarak hesaplanmıştır.

$$D = 0.9\lambda / \beta \cos\theta \quad (4.1)$$

Burada β , θ ve λ maksimum pikin yarı genişliği, kırınım açısı ve X-ışınlarının dalga boyudur. Cu^{+2} (0.72 Å) ve Ti^{+4} (0.64 Å) iyonik yarıçaplarındaki farktan dolayı, TiO_2 filmi ile karşılaştırıldığında Cu- TiO_2 filminin tepe konumlarında bir kayma gözlenmiştir. TiO_2 filme kıyasla Cu- TiO_2 filminin pik şiddetinde bir artış da gözlenir. Bu gözlemle uyumlu olarak, Cu- TiO_2 filmleri için, Cu^{+2} 'nin iyonik yarıçapı Ti^{+4} 'nin iyonik yarıçapından daha büyük olduğu için, tepe konumlarındaki kayma daha düşük bir açıya doğrudur. Filmlerin kristal yapılarını ve örgü parametrelerini belirlemek için XRD spektrumları FullProf programı kullanılarak analiz edilmiştir. Sonuçlar, filmlerin I41/amd:1 uzay grubu ile tetragonal anataz yapısında kristalleştiğini göstermektedir:

Bragg yasası ile kristallerdeki kırınımına uğrayan dalgaların doğrultuları belirlenir. Bragg yasası denklem 4.2 gösterilmiştir.

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl}) = n\lambda \quad (4.2)$$

Denklemden yer alan θ_{hkl} , hkl düzleminde Bragg yansıma açısı, n yansımanın derecesini gösteren tam sayı ve d_{hkl} değeri hkl düzlemleri arasındaki uzaklık gösterir.

tetragonal yapı için örgü parametreleri aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır:

Tetragonal yapılar için düzlemler arası mesafe

$$d^2 = \frac{a^2}{h^2+k^2} + \frac{c^2}{l^2} \quad (4.3)$$

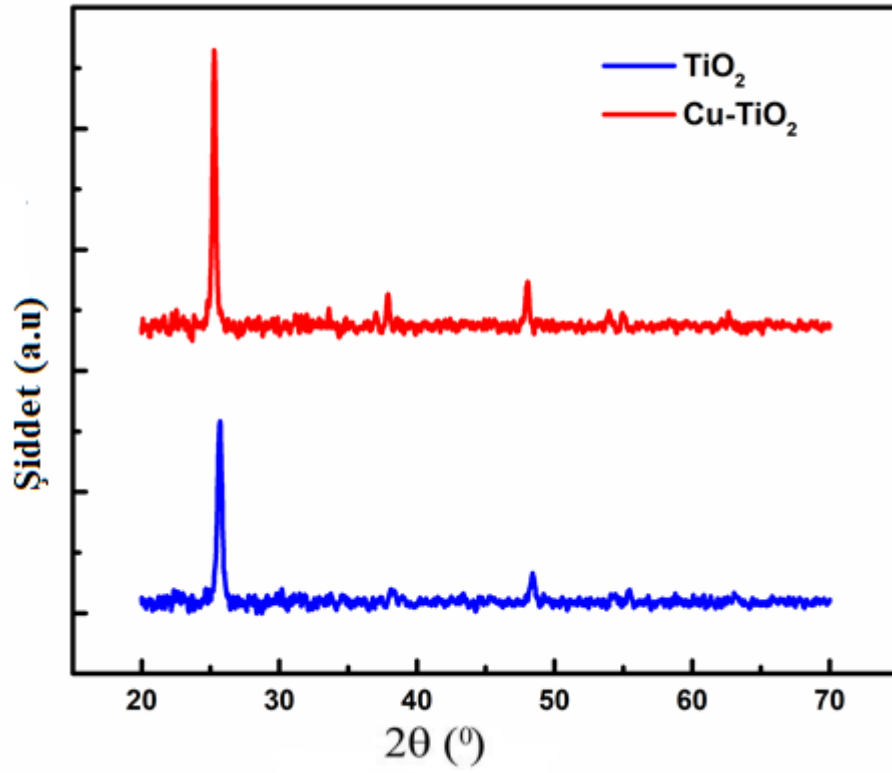
$$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$$

denklemleri ile hesaplanmıştır.

Hücre hacmi ise

$$V = a^2c \quad (4.4)$$

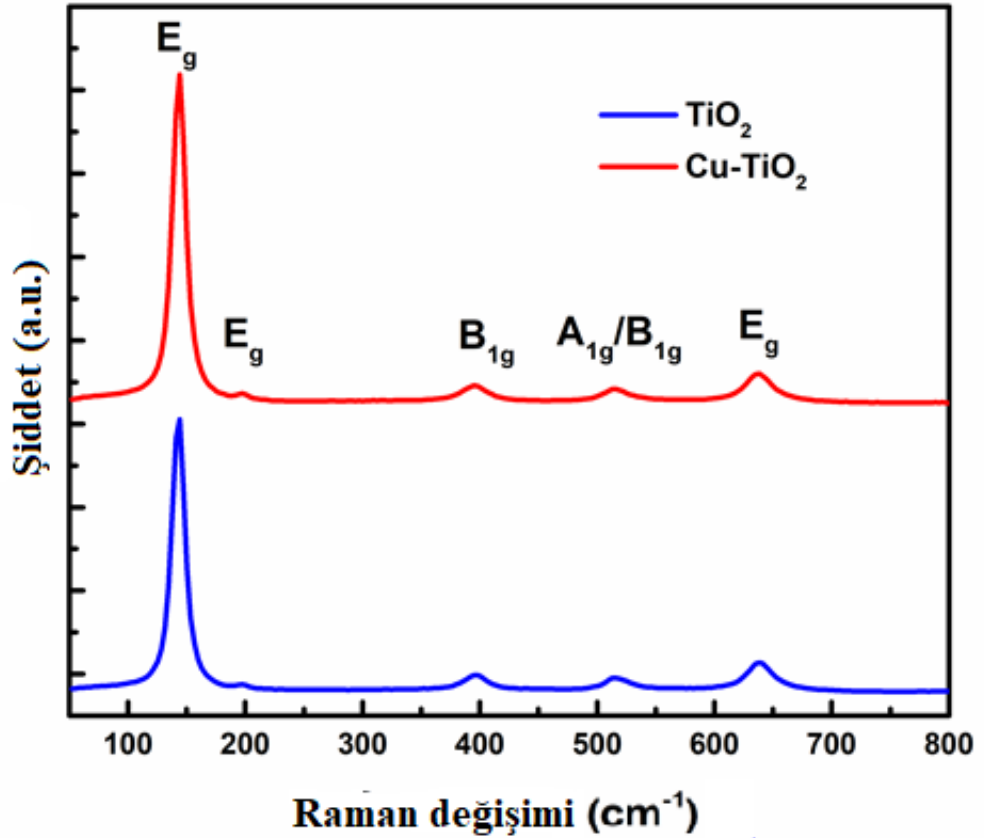
denklemleri ile elde edilmiştir. Hesaplanan parametreler Çizelge 4-1 de verilmiştir.



Şekil 4.1 TiO₂ ve Cu- TiO₂ ince filmlerin XRD spektrumu

Çizelge 4.1 Örgü parametreleri (a ve c), birim hücre hacmi (V) kristalit boyutu (D), profil kalıntı faötörü (R_p), ağırlıklı profil değeri (R_{wp}) ve uygunluk fit değeri (χ^2) ölçümleri

Numune	a(Å)	c(Å)	V(Å) ³	R _p	R _{wp}	χ^2	D(nm)
TiO ₂	3.777	9.469	135.109	4.16	5.39	1.65	21.1
Cu-TiO ₂	3.784	9.493	135.948	4.19	5.45	1.62	30.2



Şekil 4.2 TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin Raman spektrumları

Filmlerin yapısal özelliklerini araştırmak için Raman saçılma ölçümleri de yapılmıştır. Şekil 4.2'de gösterilen filmlerin Raman spektrumlarından elde edilen tepe değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Raman tepe değerleri 143, 197, 397, 517 ve 639 cm⁻¹ civarında gözlenir. 143 cm⁻¹'deki en güçlü ve keskin pikin anataz fazından kaynaklandığı görülmektedir. Bu pikler Raman titreşim modlarıyla uyumludur: Ör. 143, 197 ve 639 cm⁻¹'deki E_g modları, 397 cm⁻¹'deki B_{1g} modu ve 517 cm⁻¹'deki örtüşen A_{1g} ve B_{1g} modlarını göstermektedir. Raman spektrumlarından Cu katkılı TiO₂ filminde katkılama ile ilgili tepe noktalarına dair hiçbir kanıt ortaya çıkmamıştır. Bununla birlikte, 143 cm⁻¹'deki Raman pikinin yoğunluğunun artması, genişlemesi ve maviye kayması, örgüde Cu atomlarının varlığını gösterir. 143 cm⁻¹'deki Raman tepe saçılma yoğunluğu, TiO₂'de O-Ti-O'daki oksijen atomlarının simetrik gerilme titreşimleri ve birim hücre boyutunun göstergesidir (Sharma vd 2011, Hearne vd 2004). İyonik yarıçap farklılıklarından dolayı Cu'nun katkılanması TiO₂'nin örgü yapısını bozar. Ek olarak, Cu⁺² ve Ti⁺⁴ arasındaki yük farkı, örgü yük nötrlüğünü korumak için oksijen

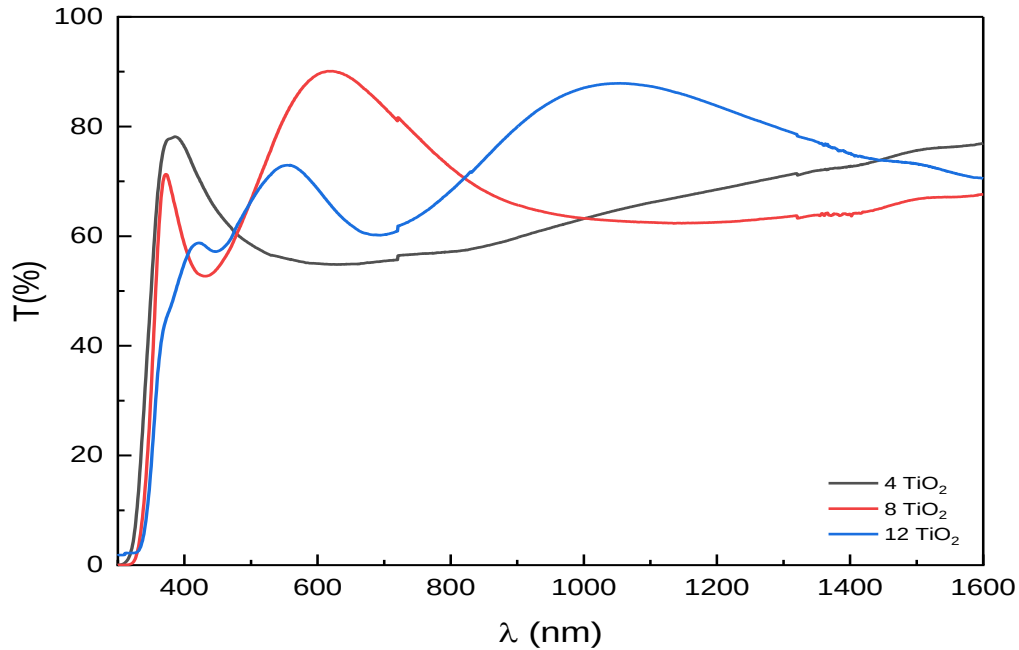
boşluklarının oluşmasına neden olur (Sahu vd. 2011, Choudhury vd. 2013). Bu değişiklik, anataz birim hücresinde bir genişleme olduğunu gösterir. Bu sonuçlar XRD sonuçları ile tam bir uyum içindedir.

Çizelge 4.2 Raman spektrumlarından elde edilen tepe değerleri

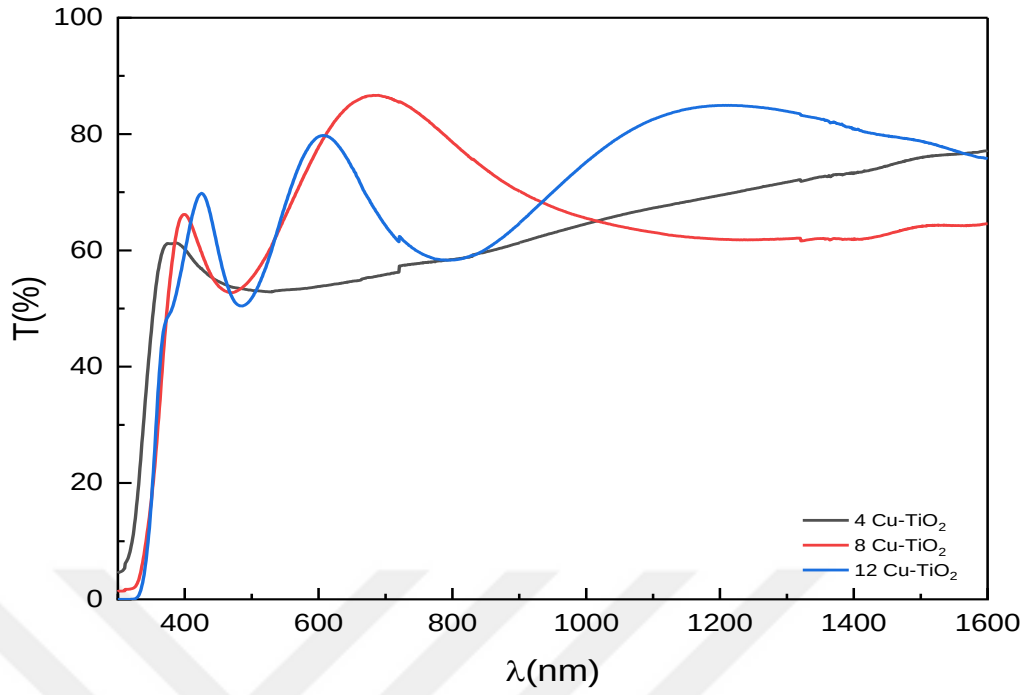
Numune	$E_g(\text{cm}^{-1})$	$E_g(\text{cm}^{-1})$	$B_{1g}(\text{cm}^{-1})$	$A_{1g}/B_{1g}(\text{cm}^{-1})$	$E_g(\text{cm}^{-1})$
TiO₂	143.03	196.18	396.29	517.89	638.63
Cu-TiO₂	143.60	196.52	395.24	516.69	637.78

4.2 Optiksel Analiz

Filmlerin optiksel parametrelerini bulmak için optiksel geçirgenlik spektrumları Shimadzu 3600 UV-Vis-NIR geçirme spektrometre yardımıyla 300-1600 nm dalga boyu aralığında ölçülmüştür. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de cam alt tabakalar üzerinde farklı kalınlıkta büyütülen TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin optiksel geçirgenlik spektrumları sırasıyla gösterilmiştir. Geçirgenlik spektrumlarında görülen girişim pikleri, filmlerin düzgün kaplandığını göstermektedir.

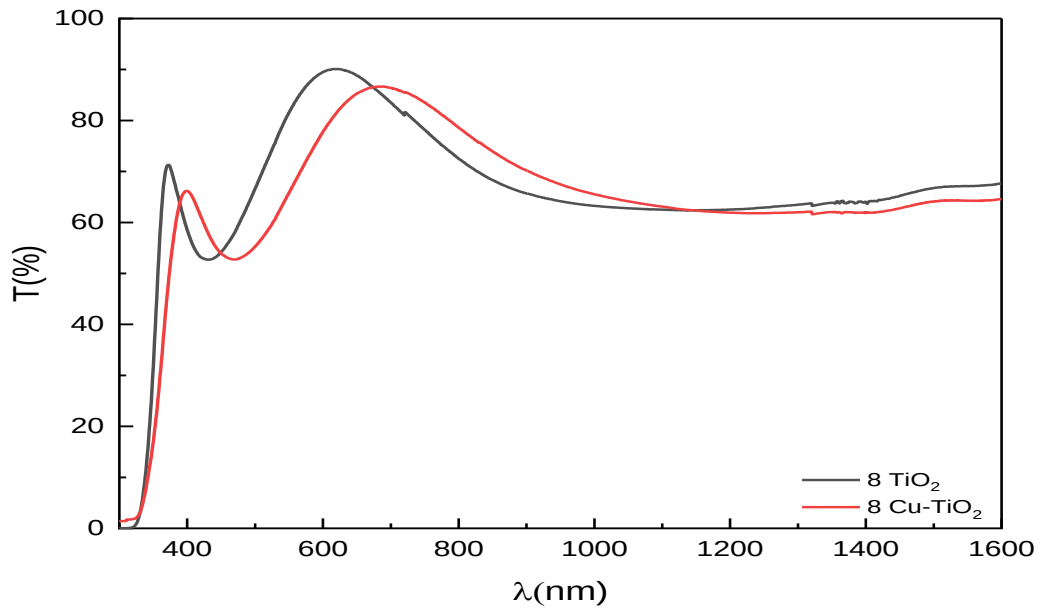


Şekil 4.3 Farklı kalınlıklardaki TiO₂ ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumu



Şekil 4.4 Farklı kalınlıklara sahip Cu katkılı TiO_2 ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumu

Filmler oldukça yüksek geçirgenliğe sahip olmasına rağmen bakır katkılamanın optiksel geçirgenlikte düşmeye sebep olduğunu Şekil 4.5 de aynı kalınlıktaki katkılı ve katkısız filmlerin geçirgenlik spektrumlarından görülebilir.



Şekil 4.5 8 Katlı TiO_2 ve Cu-TiO_2 ince filmlerin UV-Vis-NIR spektrumları

Filmlerin kalınlık, kırılma indisi ve optiksel bant aralığı gibi parametreleri filmlerin geçirgenlik spektrumunu yardımıyla bulunabilir. Bu parametrelerin hesabında Swanepoel yönteminden yararlanılmıştır.

Kırılma indisini hesaplamak için maksimum T_M ve uygun minimum T_m geçirgenlik değerleri kullanılarak denklem 2.11 yardımıyla N değerleri bulunmuştur. Bulunan N değerleri denklem 2.10 da kullanılarak kırılma indisi değerleri hesaplanmıştır. Hesaplamalarda camın kırılma indisi 1.5 alınmıştır. İki ardışık maksimum (veya minimum) için bulunan kırılma indisleri n_1 ve n_2 değerleri ve maksimumlara ait λ_1 ve λ_2 dalgaboyu değerleri denklem 2.13 de kullanılarak film kalınlığı bulunmuştur. Ortalama film kalınlığı değeri 2.12 denkleminde kullanılarak m ekstremum mertebeleri hesaplanır. Bulunan m değerleri maksimumlar için tam sayıya, minimumlar için yarı tamsayıya yuvarlatılır. Çizelge 4.3 ve 4.4' de TiO_2 ve Cu-TiO_2 filmlerin optiksel parametreleri verilmiştir.

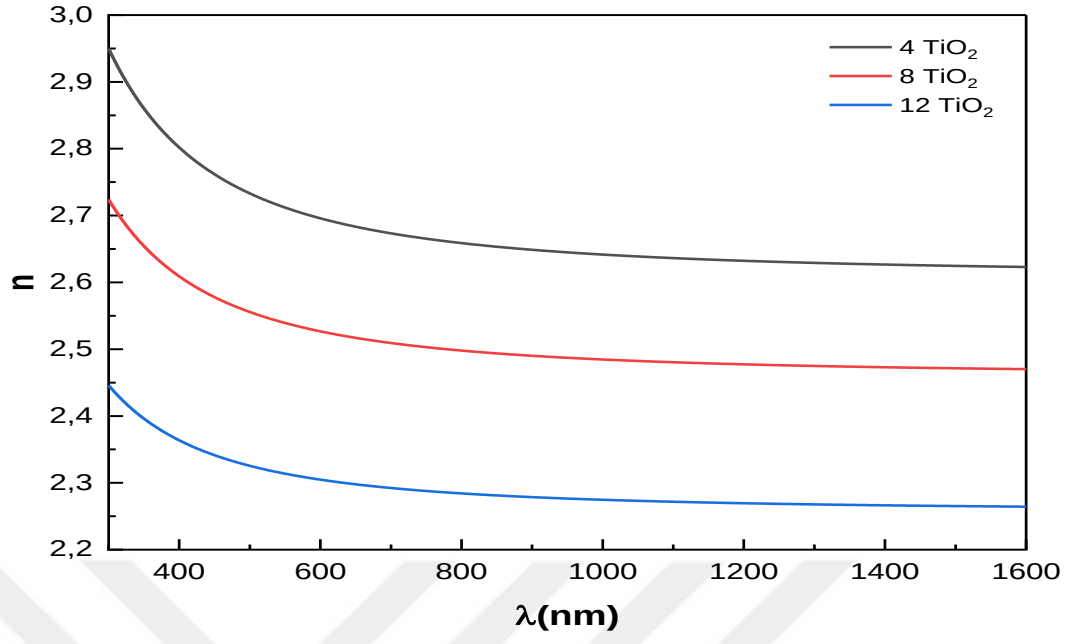
Çizelge 4.3 Farklı kalınlıklardaki TiO_2 ince filmlerin optiksel parametreleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	N	m	$t(\text{nm})$	n
4 TiO_2	633	0.81	0.51	0.51	0.50	83.79	2.71
	386	0.78	0.48	4.09	1.00	82.90	2.80
8 TiO_2	1195	0.82	0.59	3.15	0.50		2.42
	620	0.89	0.57	3.57	1.00	140.56	2.60
	433	0.74	0.52	3.43	1.50	115.11	2.54
	372	0.72	0.49	3.64	2.00	148.53	2.63
12 TiO_2	1030	0.86	0.86	2.88	0.50		2.30
	680	0.80	0.80	2.90	1.00	243.99	2.32
	571	0.77	0.77	2.95	1.50	213.14	2.34
	453	0.65	0.65	2.30	2.00	205.09	2.00

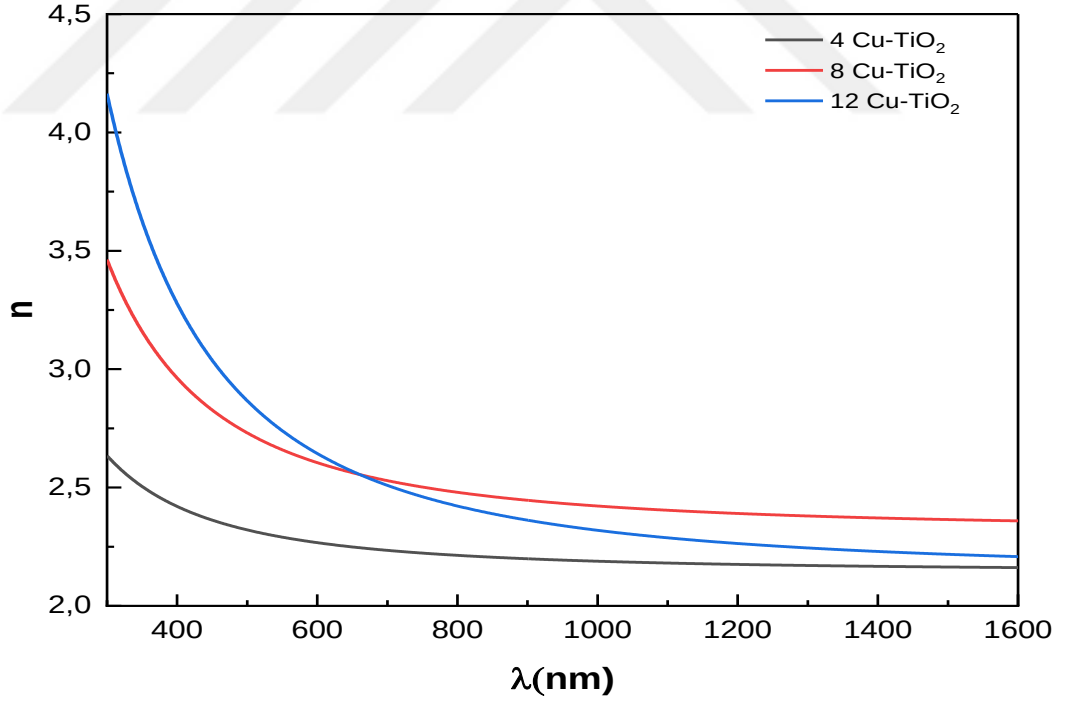
Çizelge 4.4 Farklı kalınlıklardaki Cu-TiO₂ ince filmlerin optiksel parametreleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	N	m	t(nm)	n
4 Cu-TiO ₂	527	0.69	0.50	3.35	0.50	87.14	2.52
	396	0.67	0.41	4.50	1.00	92.85	2.96
8 Cu-TiO ₂	2055	0.72	0.56	2.86	0.50		2.30
	1155	0.84	0.62	2.98	1.00	140.56	2.35
	713	0.88	0.55	3.72	1.50	146.7	2.67
	476	0.78	0.50	3.86	2.00	126.9	2.72
12 Cu-TiO ₂	812	0.84	0.56	3.32	1.50	92.85	2.51
	616	0.80	0.54	3.50	2.00	252.41	2.58
	477	0.73	0.51	3.49	2.50	247.38	2.57
	431	0.70	0.56	2.76	3.00	205.09	2.25

Swanepole yöntemiyle bulunan kırılma indisi değerleri, $n(\lambda)=a+b/\lambda^2$ Cauchy dispersiyon bağıntısına fit edilerek filmlere ait kırılma indisi- dalgaboyu denklemleri elde edilir ve bu denklemler yardımıyla piklerin bulunmadığı daha kısa dalga boylarındaki kırılma indisi değerleri elde edilebilir. TiO₂ ince filmler için kırılma indisi- dalgaboyu denklemleri dört katlı, sekiz katlı ve on iki katlı TiO₂ ince filmler için sırasıyla $n=2.6111 + (30511/\lambda^2)$, $n=2.4609 + 23690/\lambda^2$ ve $n=2.2577 + 16946/\lambda^2$ olarak elde edilmiştir. Cu -TiO₂ ince filmler için kırılma indisi- dalgaboyu denklemleri de dört katlı, sekiz katlı ve on iki katlı filmler için sırasıyla $n= 2.1446 + (44099/\lambda^2)$, $n= 2.3189 + (102992/\lambda^2)$ ve $n= 2.1368 + (182456/\lambda^2)$ bulunmuştur. TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmlerin bu denklemler yardımıyla elde edilen $n-\lambda$ grafikleri Şekil 4.4 ve Şekil 4.5 te verilmiştir. Kırılma indislerinin dalga boyu arttıkça azaldığı, ayrıca kalınlık arttıkça da azaldığı görülmektedir.

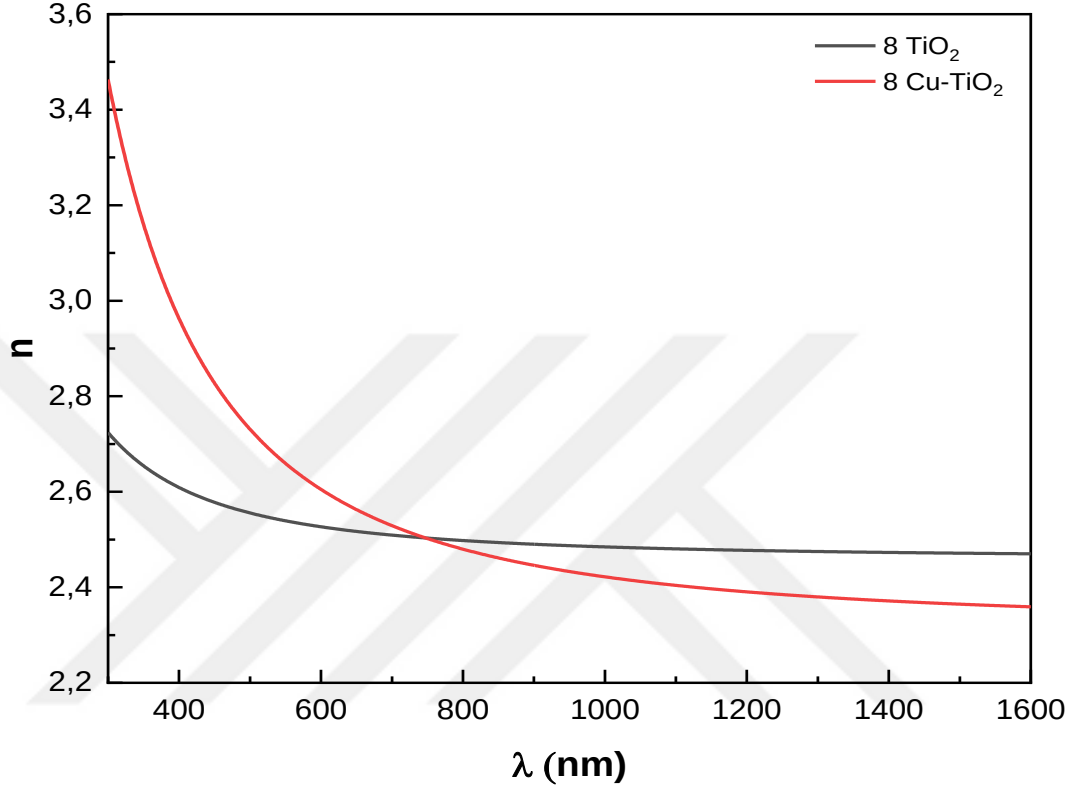


Şekil 4.6 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO₂ ince filmlerin n - λ grafiği



Şekil 4.7 Farklı kalınlarda kaplanan Cu-TiO₂ ince filmlerin n - λ grafiği

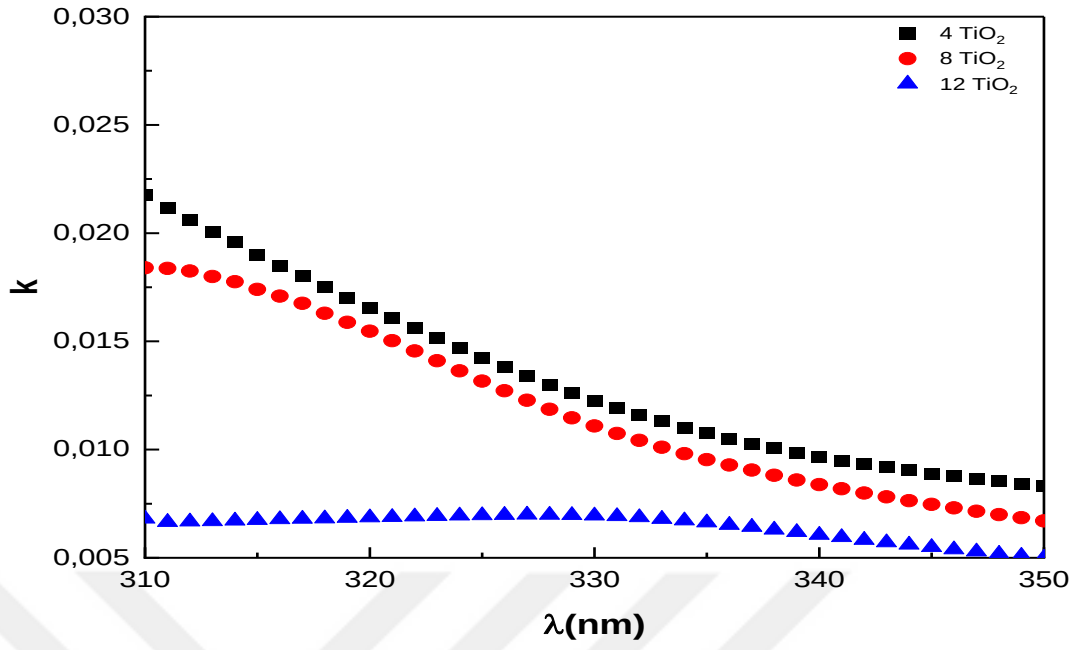
Şekil 4.8 ise aynı kalınlıktaki TiO_2 ile Cu-TiO_2 ince filmlerin $n-\lambda$ grafiklerini göstermektedir. Cu katkılamanın 300-750 nm dalga boyu aralığında filmin kırılma indisinde artmaya sebep olduğu görülmektedir.



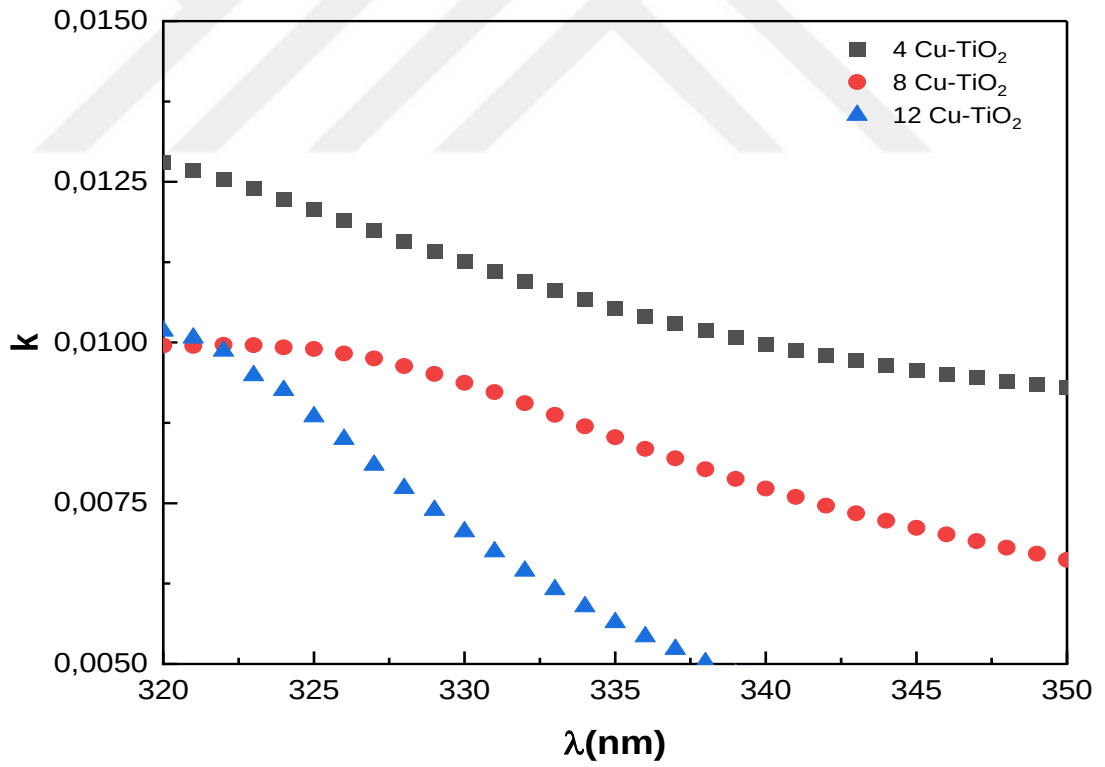
Şekil 4.8 8 katlı TiO_2 ve Cu-TiO_2 ince filmlerin $n-\lambda$ grafiği

Dalga boyları arttıkça geçirgenliğin artması ve soğurum katsayılarının azalmasından dolayı kırılma indislerinin azalması beklenmektedir. Şekil 4.8'deki $n-\lambda$ grafiği incelendiği zaman kırılma indislerinin artan dalga boyu ile azaldığı görülmektedir.

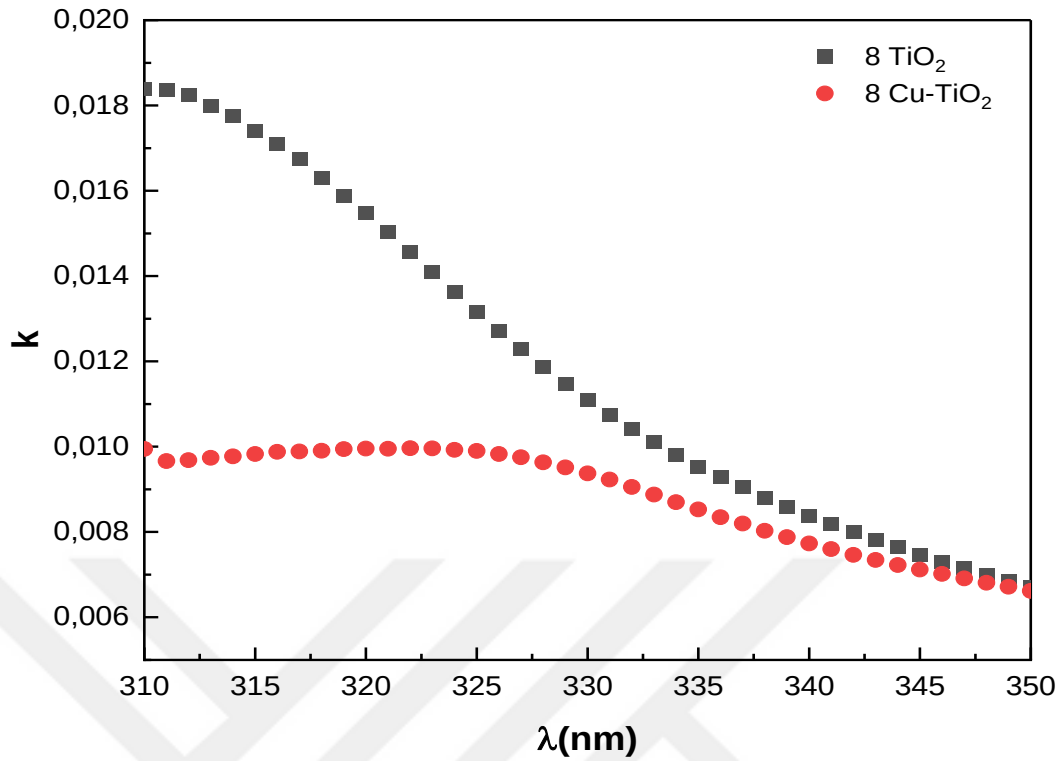
Bulunan kırılma indisleri denklem 2.20 ($x = \frac{(n+1)(n_s+n)[1-(T_M/T_m)^{1/2}]}{(n-1)(n_s-n)[1+(T_M/T_m)^{1/2}]}$) de kullanılarak x değerleri elde edilmiştir. Soğurum katsayı değerleri ise x değerleri denklem 2.21 ($\alpha = \frac{1}{t} \ln(\frac{1}{x})$) de kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan soğurum katsayıları denklem 2.22 ($k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi}$) de kullanılarak sönüm katsayıları elde edilmiştir. Şekil 4.9 , şekil 4.10 ve şekil 4.11 de elde edilen $k-\lambda$ grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 4.9 Farklı kalınlıklardaki TiO_2 ince filmlerin k - λ grafiği



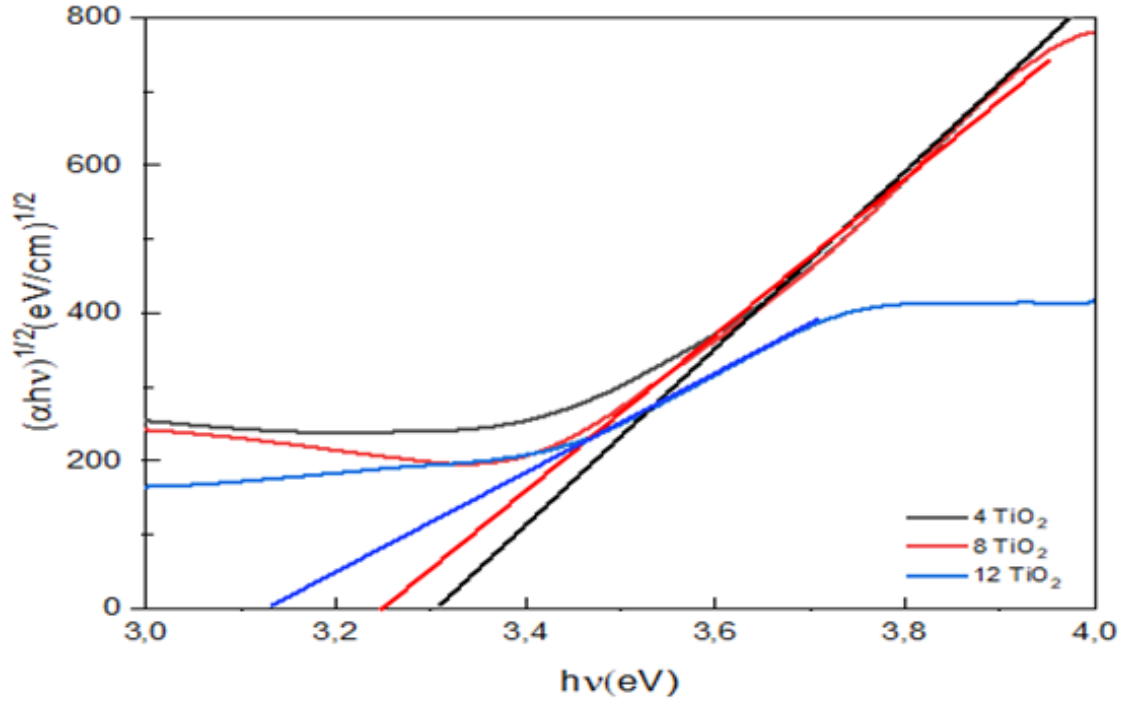
Şekil 4.10 Farklı kalınlıklardaki Cu-TiO_2 ince filmlerin sönüm k - λ grafiği



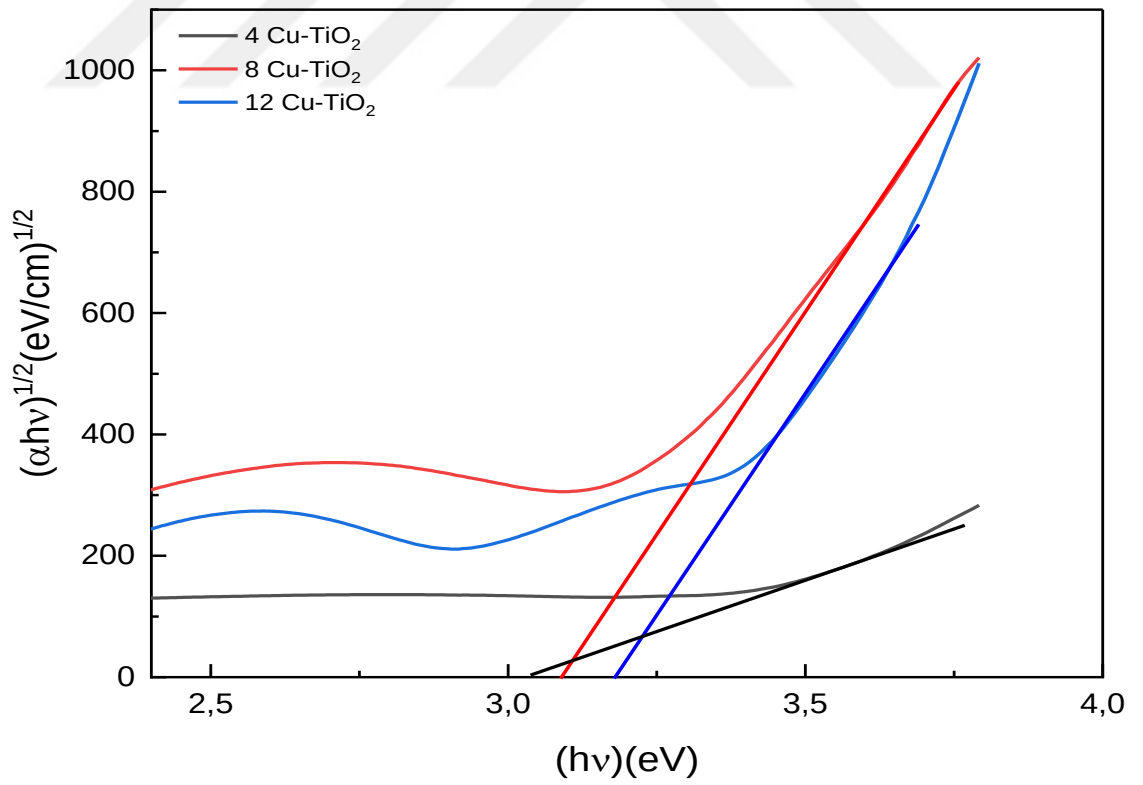
Şekil 4.11 Aynı kalınlıktaki TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin k - λ grafiği

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin sönüm k - λ grafiklerinden dalga boyu arttıkça sönüm katsayılarının azaldığı ve ayrıca filmlerin kalınlıkları arttıkça sönüm katsayısının azaldığı görülmektedir. Şekil 4.11 de aynı kalınlıktaki TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin k - λ grafiği incelendiği zaman katkılamanın sönüm katsayısını azalttığı görülmektedir.

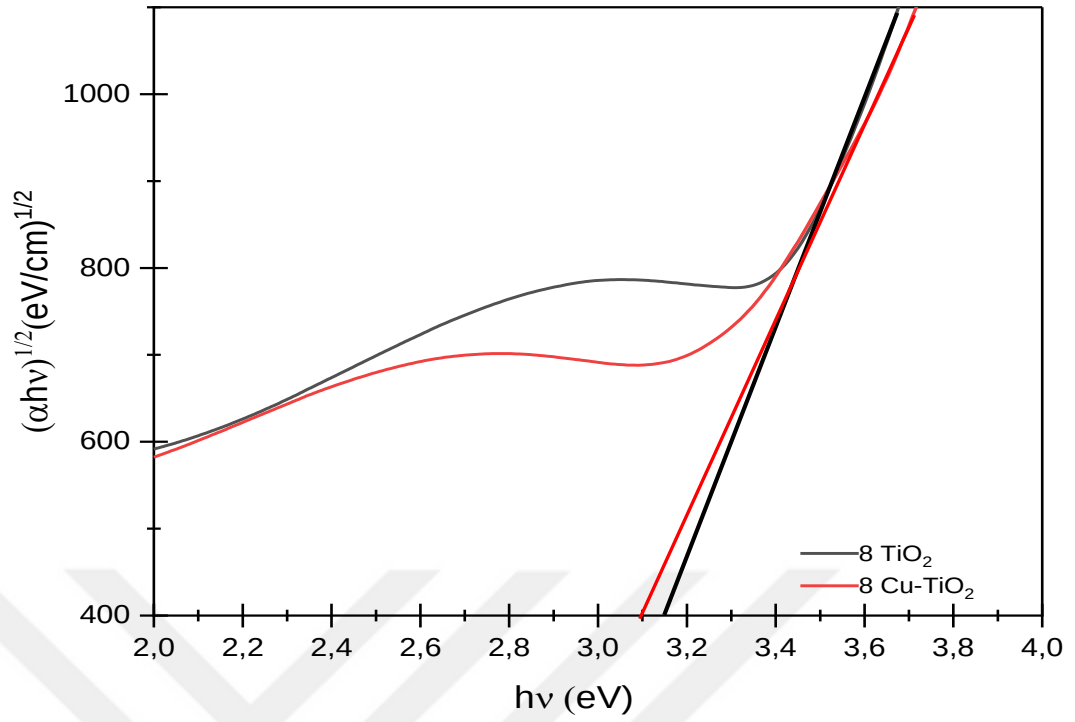
Denklem 2.22 den elde edilen soğurum katsayı değerleri, soğurum katsayısı ve optiksel yasak enerji bant aralığı arasındaki ilişkiyi veren Tauc denkleminde (denklem 2.3) kullanılarak filmlerin optiksel enerji bant aralıkları elde edilmiştir. TiO₂ ince filmler indirekt enerji bant aralığına sahip olduğu için Tauc denkleminde n değeri 2 olarak alınmıştır. Filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}-h\nu$ grafikleri Şekil 4-12, Şekil 4-13 ve Şekil 4-14 gösterilmiştir. Bu grafiklerin çizgisel kısımlarının enerji eksenine ekstrapolasyonundan optiksel enerji bant aralıkları bulunmuştur. Bulunan optiksel enerji bant değerleri Çizelge 4-5 de verilmiştir.



Şekil 4.12 Farklı kalınlıklardaki TiO_2 filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği

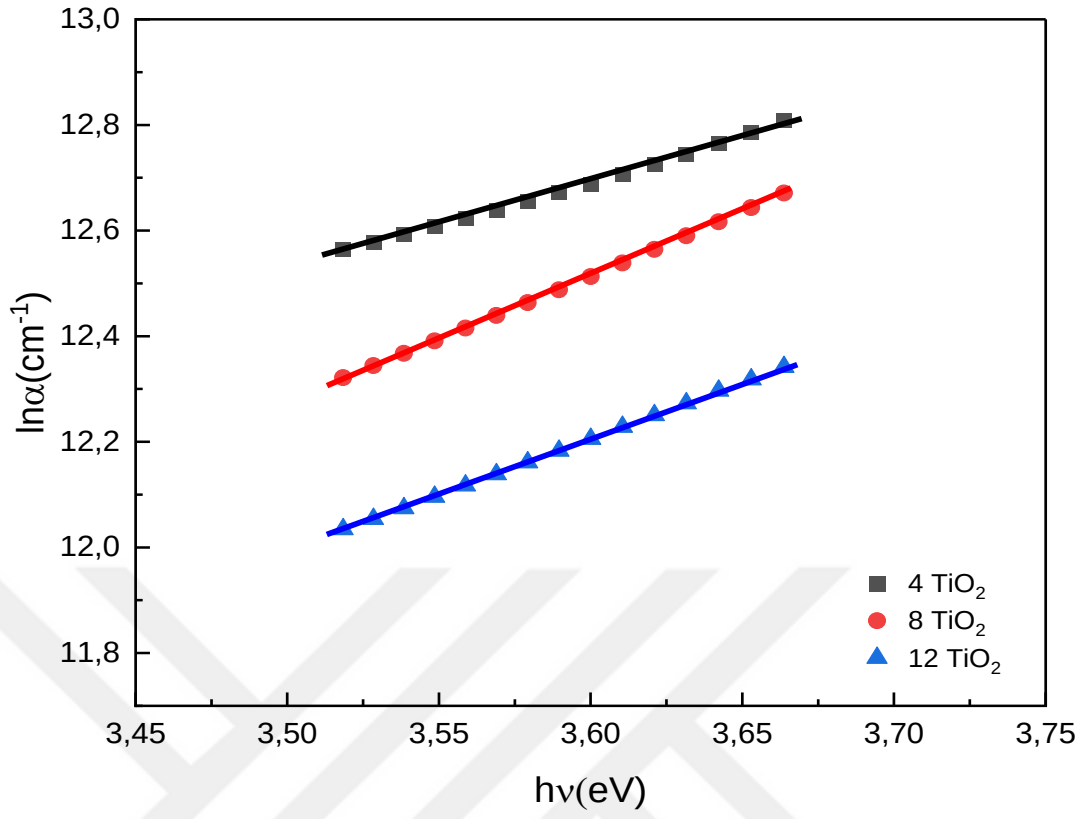


Şekil 4.13 Farklı kalınlıklardaki Cu-TiO_2 ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiği

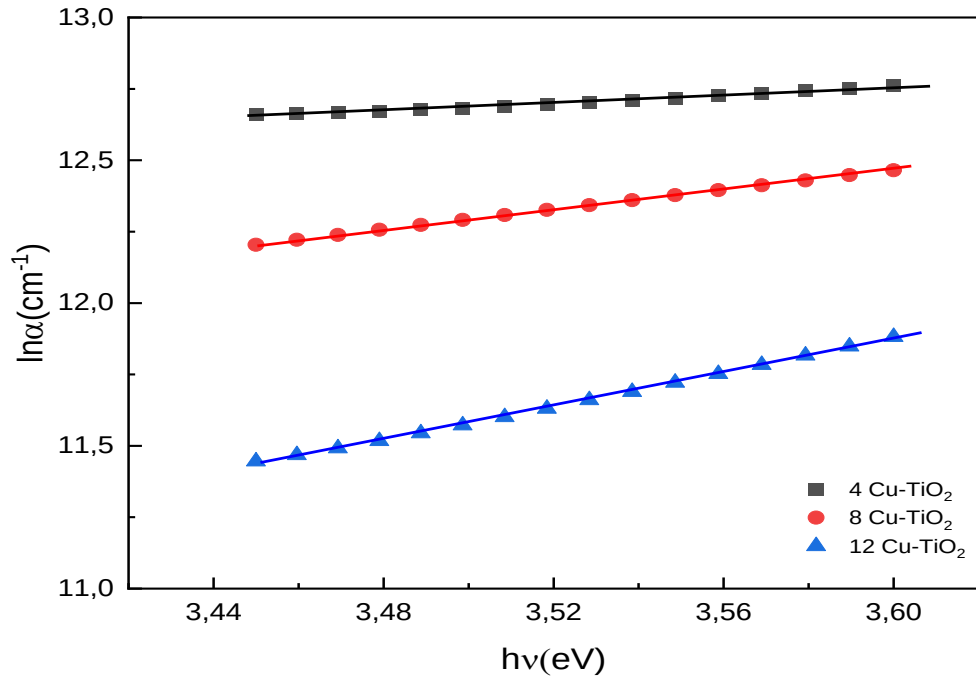


Şekil 4.14 Aynı kalınlıktaki TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmin $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği

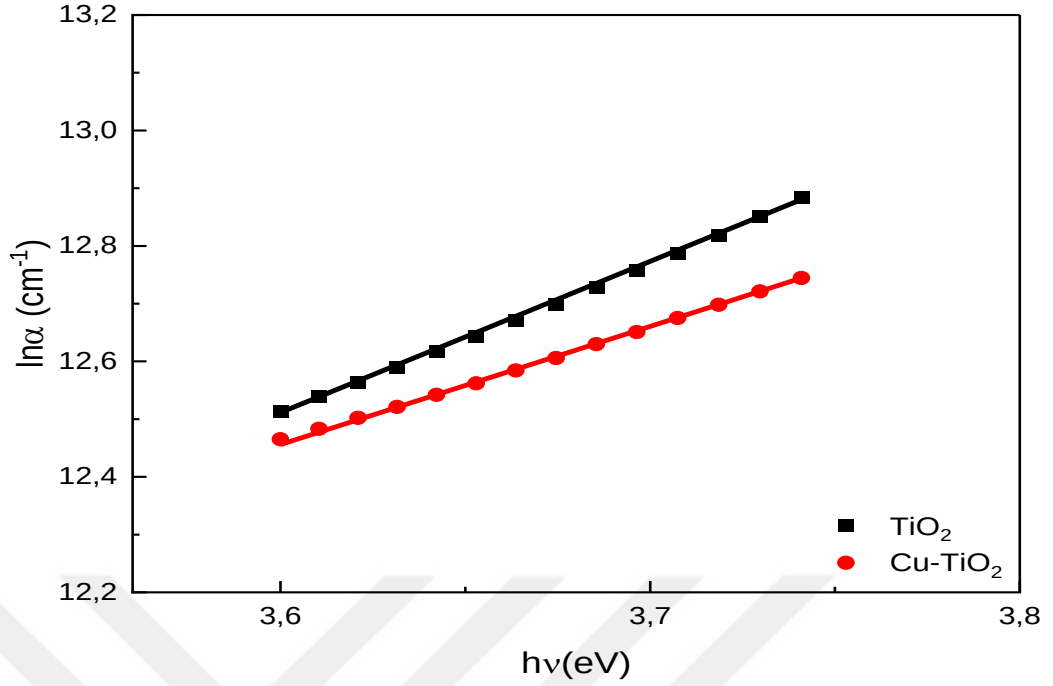
Kristal olmayan yarıiletkenlerde α soğurma katsayısı, foton enerjisine bağlıdır. Bant kenarına yakın bölgede soğurma katsayısı ve foton enerjisi arasındaki ilişki Urbach tarafından $\alpha = \alpha_0 \exp\left(\frac{h\nu}{E_u}\right)$ denklemiyle verilmiştir. Bu denklemde α_0 sabit ve E_u Urbach enerjisidir. Urbach enerji değeri bant enerjisine yakın bölgede çizilen $\ln\alpha - h\nu$ grafiklerinin eğiminin tersine eşittir. Filmlerin $\ln\alpha - h\nu$ grafikleri Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 gösterilmiştir. Filmlerin bu grafiklerden bulunan Urbach enerji değerleri Çizelge 4.5 de verilmiştir.



Şekil 4.15 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO₂ ince filmin Urbach grafiği



Şekil 4.16 Farklı kalınlıklarda kaplanan Cu-TiO₂ ince filmin Urbach grafiği



Şekil 4.17 Aynı kalınlıkta TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmin Urbach grafiği

Çizelge 4.5 Farklı kalınlarda kaplanan TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmin E_g, E_u değerleri

Numune	4 TiO ₂	8 TiO ₂	12 TiO ₂	4 Cu-TiO ₂	8 Cu-TiO ₂	12 Cu-TiO ₂
E _g (eV)	3.20	3.25	3.30	3.30	3.20	3.10
E _u (meV)	192	201	296	189	198	277

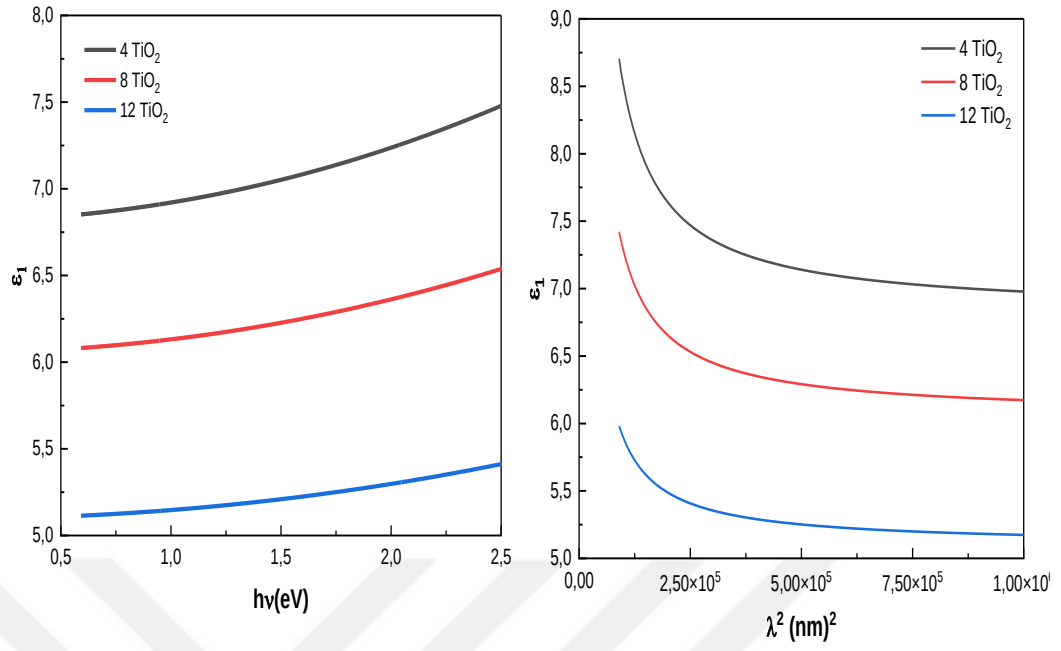
TiO₂ ince filmlerde kalınlığın değişimi ve Cu ile katkılandırmanın, bant aralığını değiştirdiği gözlenmiştir. Bant aralığının katkılandırma ile değişimi Burnstein Moss Etkisi olarak bilinir (Moss 1954, Burstein 1954). Katkılandırma sonucu bant aralığındaki değişim Burnstein Moss etkisini göstermektedir. Film kalınlığı arttıkça bant aralığının azaldığı ve yapının daha iletken bir yapıya dönüştüğünü görülmüştür.

Drude teorisine göre 2.25 ve 2.26 denklemleri kullanılarak elde edilen gerçek ve sanal dielektrik sabitlerinin foton enerjisine karşı grafikleri TiO₂ filmler için Şekil 4.18 ve

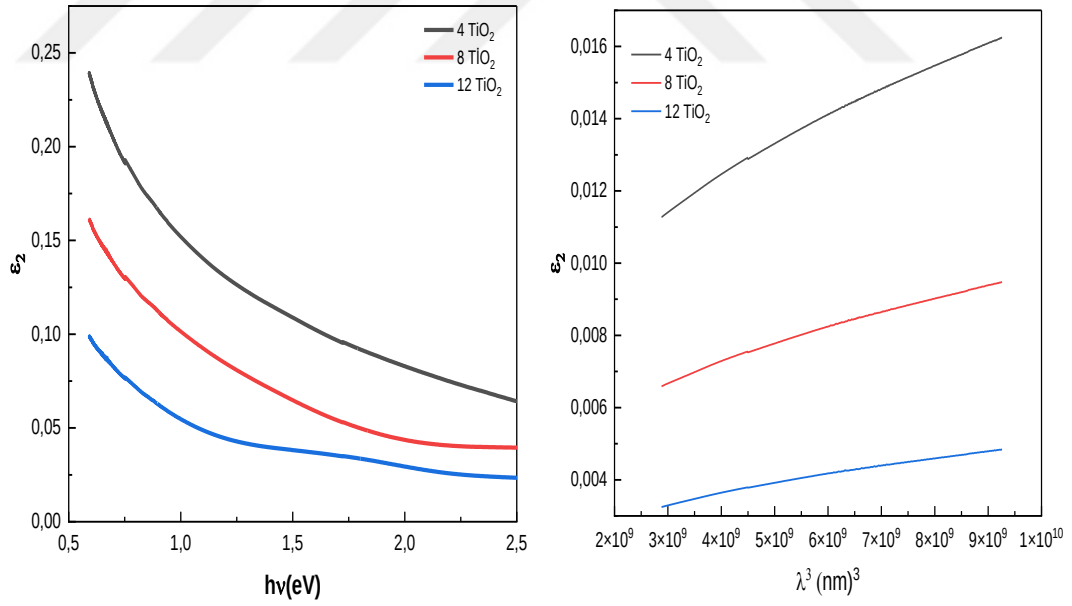
4.19'de ve Cu-TiO₂ filmler için Şekil 4.21 ve 4.22 de gösterilmiştir. Görünür bölgede gerçel ve sanal dielektrik sabitleri değişmektedir. Ayrıca gerçel dielektrik sabiti, sanal dielektrik sabitinden daha büyüktür ve her iki sabitin değeri de kalınlık arttıkça azalmaktadır. Aradaki bu fark elde edilen ince filmlerin bant aralıklarındaki durum yoğunluklarına bağlı olduğu söylenebilir. Şekil 4.18 da TiO₂ ve Şekil 4.21 Cu-TiO₂ filmler için çizilen $\epsilon_1 - \lambda^2$ grafiklerinin doğrusal kısımlarının $\lambda^2 = 0$ değerine ekstrapole edilmesi ile ϵ_∞ yüksek frekans dielektrik sabitleri ve aynı grafiğin eğiminden ω_p plazma frekansı değerleri elde edilmiştir. Bulunan ϵ_∞ ve ω_p değerleri denklem 2.27 de kullanılarak N/m^* değerleri elde edilmiş ve TiO₂ için Çizelge 4.6 de Cu-TiO₂ için Çizelge 4.7 de verilmiştir.

Wemple ve Didomenico kırılma indisi dağılımını tek salınım modeli ile tanımlamıştır. Bu modele göre kırılma indisi ve foton enerjisi arasındaki ilişki denklem 2. verilmiştir. Bu bağıntıya göre TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmler için sırasıyla Şekil 4.20 ve Şekil 4.23 de çizilen $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafiklerinden salınım enerjisi E_o ve dağılım enerjisi E_d değerleri bulunmuş Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de verilmiştir. E_d bantlar arası geçişlerin genliğini ve E_o ortalama enerji aralığıdır.

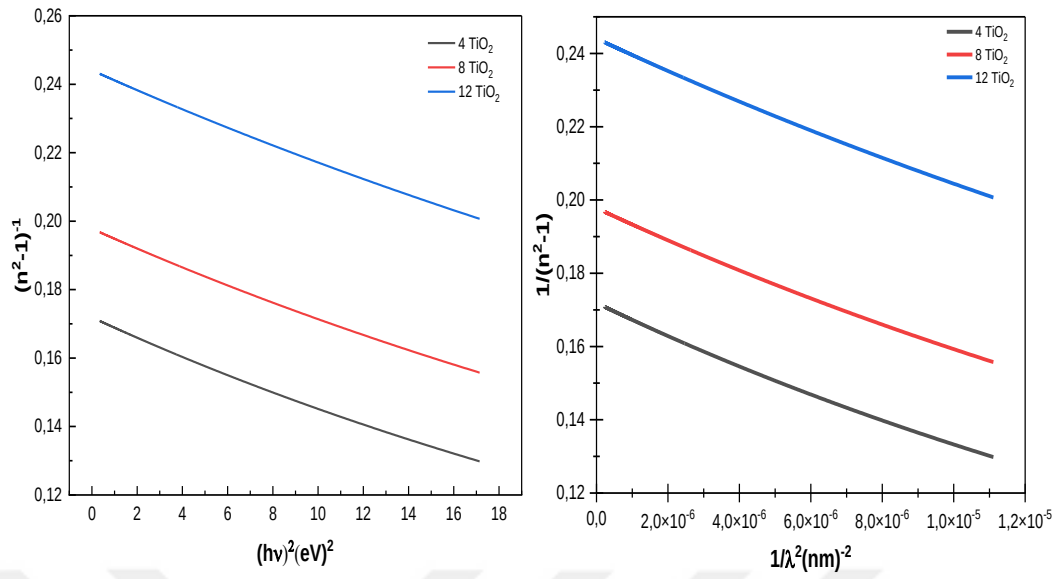
Şekil 4.20 ve Şekil 4.23 de verilen denklem 2.22 ye göre çizilen $(n^2-1)^{-1}-(\lambda)^{-2}$ grafiklerinden de filmlerin ortalama salınım genliği S_o ve ortalama dalga uzunluğu λ_o elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler denklem 2.23 de kullanılarak filmlerin n_∞ sonsuz kırılma indisleri bulunmuştur.



Şekil 4.18 Farklı kalınlıklara sahip TiO_2 ince filmlerin $\epsilon_1 - h\nu$ ve $\epsilon_1 - \lambda^2$ grafiği



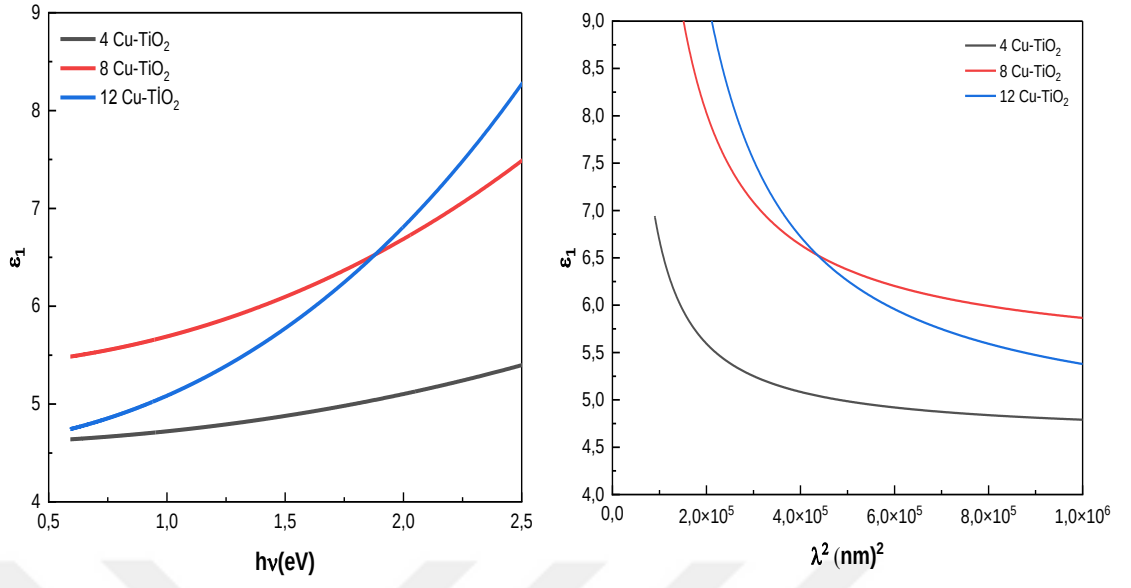
Şekil 4.19 Farklı kalınlıklara sahip TiO_2 ince filmlerin $\epsilon_2 - h\nu$ ve $\epsilon_2 - \lambda^3$ grafiği



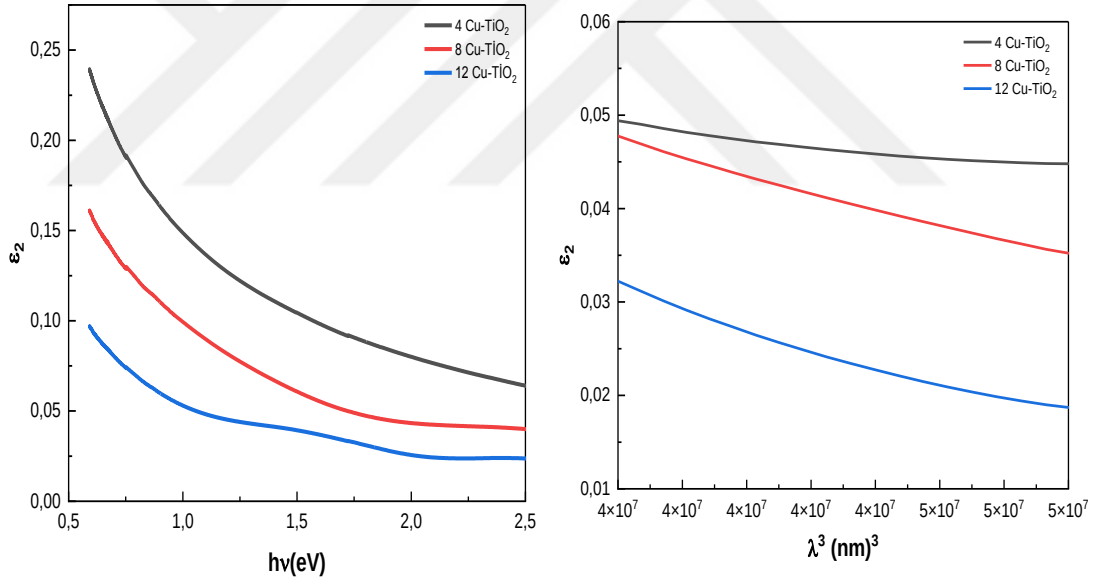
Şekil 4.20 Farklı kalınlıklarda kaplanan TiO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(hv)^2$ ve $(n^2-1)^{-1}-(1/\lambda^2)$ grafikleri

Çizelge 4.6 TiO₂ ince filmlerin sonsuz kırılma indisi (n_∞), yüksek frekans dielektrik sabiti (ϵ_∞), plazma frekansı (ω_p), serbest taşıyıcı yoğunluğunun serbest taşıyıcı etkin kütlesine oranı (N/m^*), optiksel gevşeme τ , salınım enerjisi E_0 , dağınım enerjisi E_d , S_0 , n_∞ , λ_0

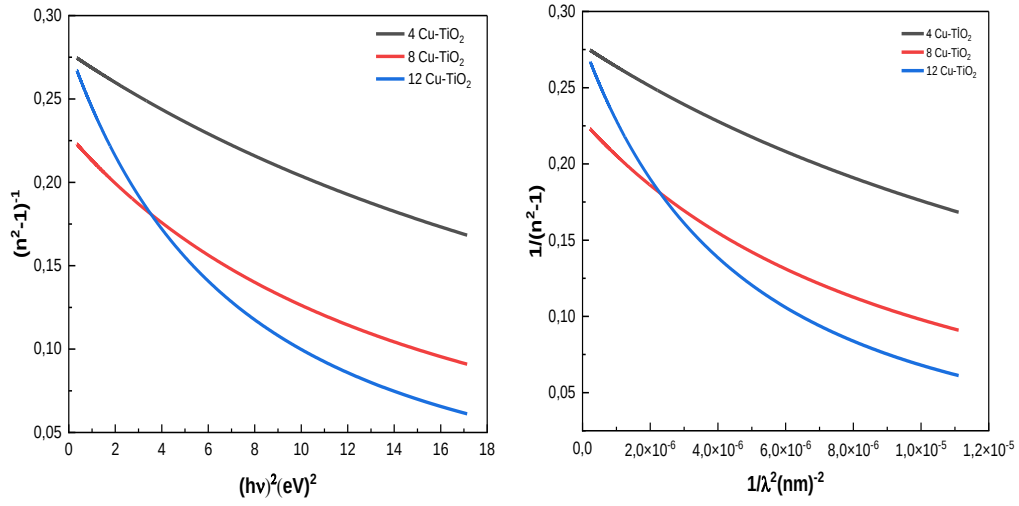
Numune	4 TiO ₂	8 TiO ₂	12 TiO ₂
ω_p ($\times 10^6$ rad/s)	11.40	9.17	9.90
ϵ_∞	7.40	6.50	5.40
N/m^* ($10^{16}/\text{cm}^3$)	1.03	0.58	0.56
τ ($\times 10^{-7}$ s)	4.50	3.20	6.10
E_0 (eV)	0.02	0.02	0.02
E_d (eV)	0.12	0.12	0.10
S_0 ($\times 10^{-4}$ nm ⁻²)	2.50	2.52	2.46
n_∞	2.61	2.46	2.26
λ_0 (nm)	152.83	141.83	129.15



Şekil 4.21 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO₂ ince filmlerin gerçel ϵ_1 - $h\nu$ ve ϵ_1 - λ^2 grafiği



Şekil 4.22 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO₂ ince filmlerin sanal ϵ_2 - $h\nu$ ve ϵ_2 - λ^3 grafiği



Şekil 4.23 Farklı kalınlıklara sahip Cu-TiO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(hv)^2$ ve $(n^2-1)^{-1}-(1/\lambda^2)$ grafikleri

Çizelge 4.7 Cu-TiO₂ ince filmlerin sonsuz kırılma indisi (n_∞), yüksek frekans dielektrik sabiti (ϵ_∞), plazma frekansı (ω_p), serbest taşıyıcı yoğunluğunun serbest taşıyıcı etkin kütlesine oranı (N/m^*), optiksel gevşeme τ , salınım enerjisi E_0 , dağılım enerjisi E_d , S_0 , n_∞ , λ_0

Numune	4 Cu-TiO ₂	8 Cu-TiO ₂	12 Cu-TiO ₂
$\omega_p (\times 10^6 \text{ rad/s})$	11.96	20.30	24.12
ϵ_∞	5.28	7.19	7.81
$N/m^* (10^{17}/\text{kgm}^3)$	1.43	3.17	4.86
$\tau (\times 10^{-6} \text{ s})$	3.20	1.39	7.10
$E_0 (\text{eV})$	0.03	0.04	0.05
$E_d (\text{eV})$	0.16	0.21	0.25
$S_0 (\times 10^{-5})$	9.22	6.93	4.13
n_∞	2.61	2.46	2.26
$\lambda_0 (\text{nm})$	251.49	270.31	315.37

4.3 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al Yapılarının Elektriksel Analizi

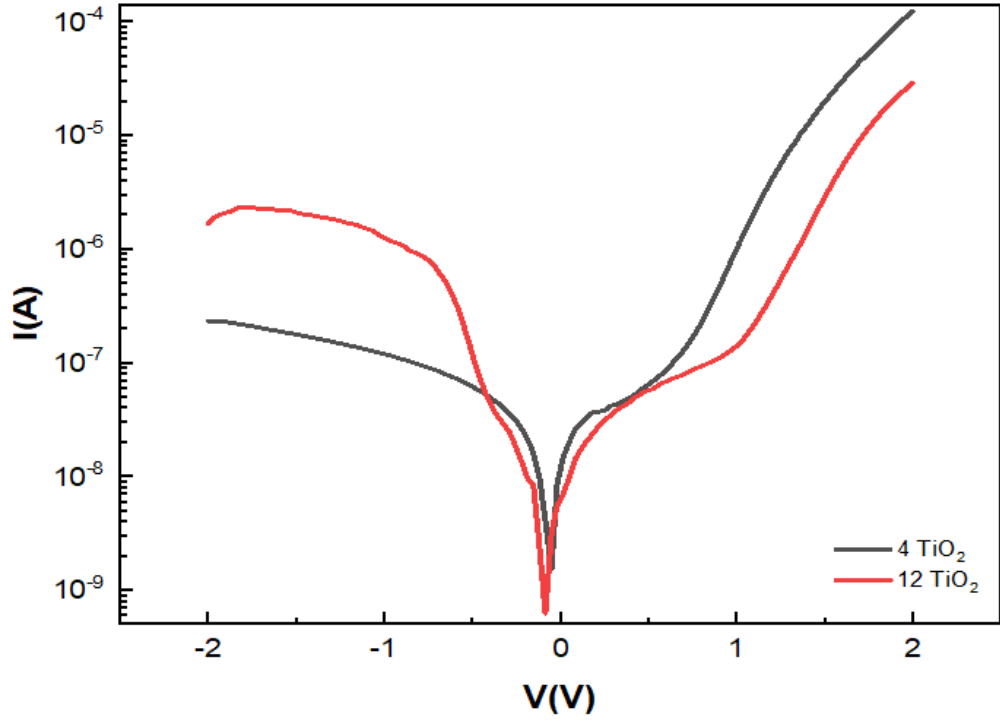
Bu bölümde I-V ve C-V ölçümleri yardımıyla Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların elektriksel analizi yapılmıştır. Yapıların oda sıcaklığında, $\pm 2 V$ gerilim aralığında karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V ölçümleri yapılmıştır. Karanlık I-V ölçümleri yardımıyla Cheung ve Cheung, Norde yöntemleri kullanılarak n, engel yüksekliği ve Rs diyot parametreleri bulunmuştur.

Aynı yapılar için oda sıcaklığında, karanlıkta $\pm 2 V$ gerilim aralığında C-V ve G/ ω -V ölçümleri yapıldı. Bu ölçümler yardımıyla da yapının V_D difüzyon potansiyeli ve Rs direnç değerleri bulunmuştur.

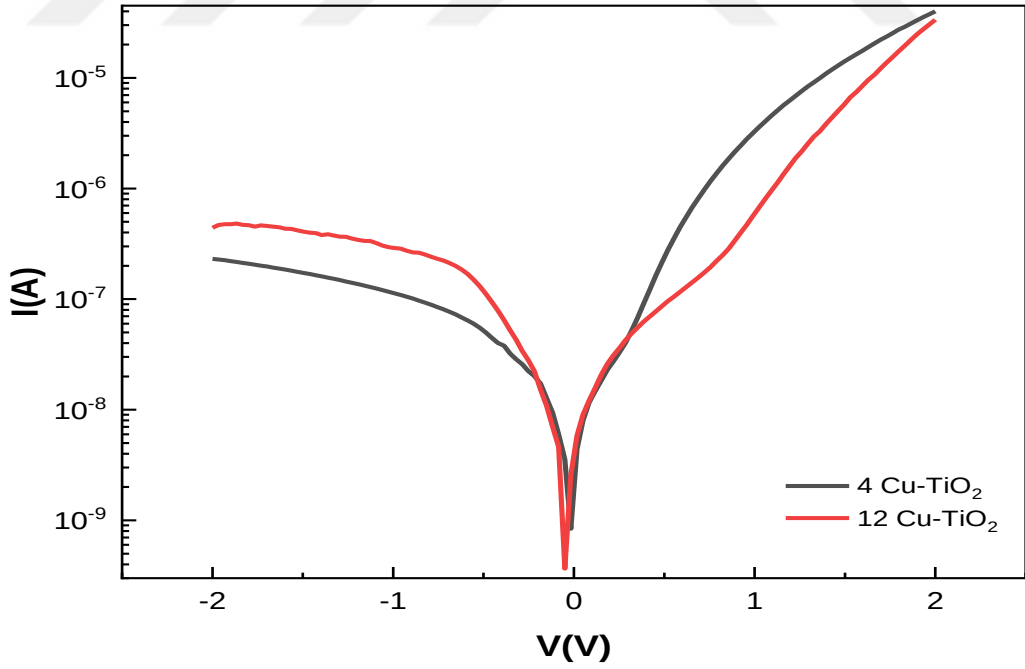
4.3.1 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapılarının I-V belirtkenleri

Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al Yapıların diyot özellikleri karanlıkta ve oda sıcaklığında Şekil 3.11 deki ölçüm sistemi kullanılarak I-V ölçümleriyle incelenmiştir. Yapılardaki TiO₂ ve Cu-TiO₂ tabakalar farklı kalınlıkta büyütülmüş böylece hem kalınlığın hem de katkılamanın diyot özelliklerine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.24 ve Şekil 4.25 sırasıyla Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların $\pm 2V$ gerilim aralığında ve oda sıcaklığında I-V grafiklerini göstermektedir. Şekillerden görüldüğü üzere kalınlık arttıkça düz beslemde akımın azaldığı ters beslemde ise arttığı görülmüştür. Al/TiO₂/Al yapılarının doğrultma oranları $\pm 2V$ değerinde hesaplanmış ve kalınlık artmasıyla doğrultma oran değerininin 535.75 den 17.52 azaldığı görülmüştür. Al/Cu-TiO₂/Al yapılarda ise doğrultma oranı kalınlık artışıyla 35.7 dan 8.1 e azalmıştır.

Yapıların I-V karakteristikleri TE, Cheung's ve Norde yöntemiyle araştırılmıştır. TE yöntemi Denklem 2.30 la tanımlanmıştır. TE' a göre $\ln I$ -V grafikleri doğrusaldır. Eğimleri diyot ideallik faktörünü verir. Doyma akımı I_o , doğrunun $\ln I$ eksenini kestiği noktadan elde edilir. Bu I_o değerlerinden sıfır beslemdeki engel yükseklikleri hesaplanır. Elde edilen değerler Çizelge 4.6 ve Çizelge 4.7 de verilmiştir.



Şekil 4.24 $\text{Al}/\text{TiO}_2/\text{Al}$ yapıların I-V grafiği

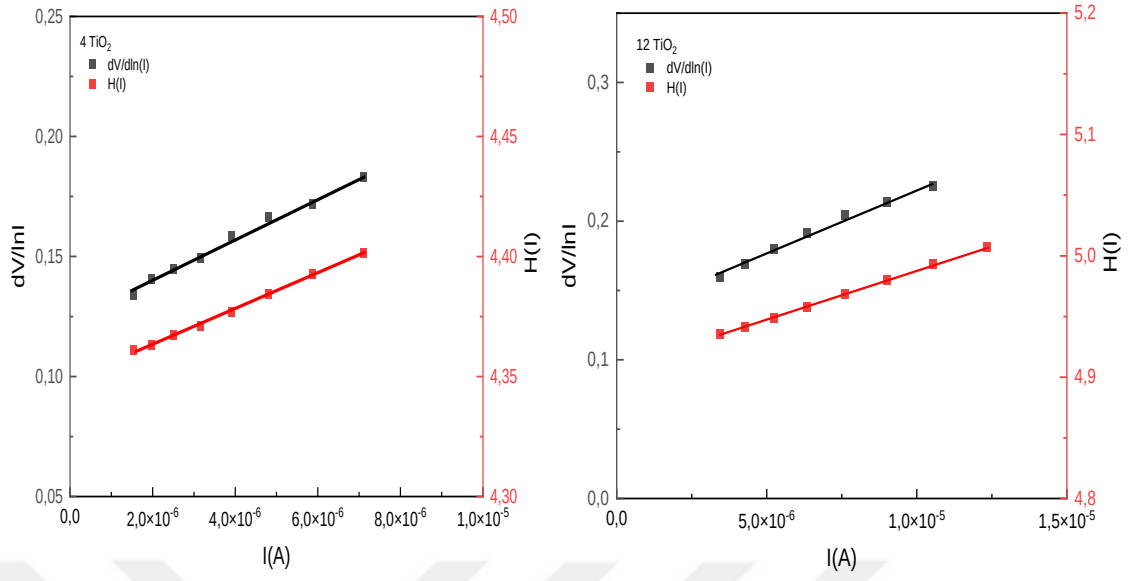


Şekil 4.25 $\text{Al}/\text{Cu-TiO}_2/\text{Al}$ yapıların I-V grafiği

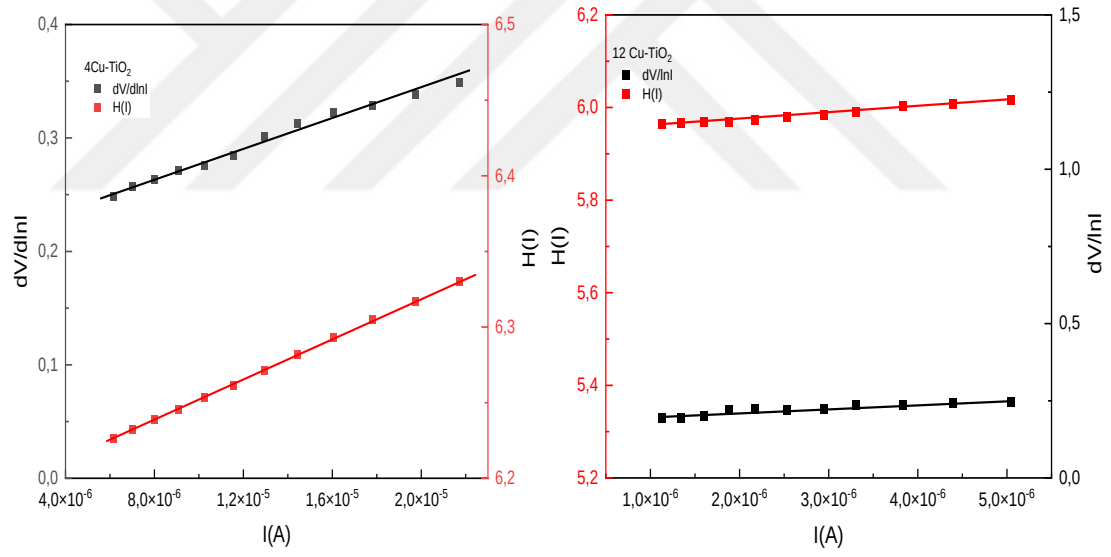
Yapıların n , ϕ_b ve R_s değerleri Cheung's yöntemi kullanılarak da hesaplanmıştır. Bu yöntemle göre seri direnç düz beslemde $\ln I$ - V grafiğinin kıvrılma bölgesinde etkilidir. 2.34 ve 2.35 denklemleri kullanılarak $dV/d\ln I$ ve $H(I)$ fonksiyonları belirlenmiştir. Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların $dV/d\ln I$ - I ve $H(I)$ - I grafikleri sırasıyla Şekil 4.27 ve Şekil 4.28 de verilmiştir. R_s ve n değerleri $dV/d\ln I$ - I grafiklerinden, engel yüksekliği ve R_s değerleri $H(I)$ - I grafiklerinden hesaplanmıştır. Elde edilen değerler Çizelge 4.8 ve Çizelge 4.9 de verilmiştir.

Diyotların seri direnç ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamak için Norde yöntemi de kullanılmıştır. Bu yöntemle göre diyot ideallik sabitinden daha büyük keyfi sabit γ seçilmiştir. Denklem 2.36 kullanılarak $F(V)$ değerleri hesaplanmış ve yapıların $F(V)$ - V grafikleri çizilmiştir. Şekil 4.28 ve Şekil 4.29 bu grafikleri gösterir. $F(V)$ - V grafiklerin minimum noktasındaki fonksiyon değeri $F(V_{min})$ ve minimum gerilim değerleri 2.37 denkleminde kullanılarak engel yükseklikleri hesaplanmıştır. Minimum gerilim değeri ve bu gerilimde yapıdan geçen akım değeri denklem 2.38 de kullanılarak R_s değeri hesaplanmıştır. Elde edilen değerler verilmiştir.

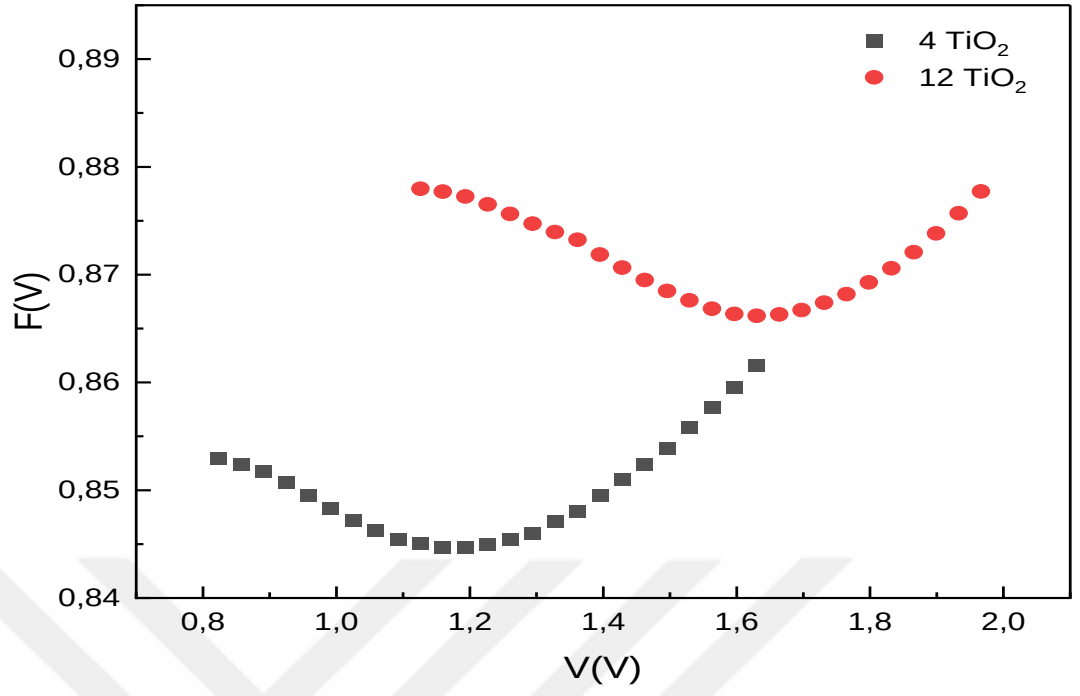
Çizelge 4.8 den görüldüğü gibi ideallik faktörü TE yöntemiyle 4 katlı TiO₂ filmi kaplı Al/ TiO₂/Al yapısının 7.88 olarak bulunmuştur. TiO₂'nin kalınlığı artınca ideallik faktörü 5.89'e azalmıştır. Al/ Cu-TiO₂/Al katkılı yapılarda ise ideallik faktörü aynı kalınlıkta üretilen Al/ TiO₂/Al yapıların ideallik faktöründen daha büyüktür. Arayüzey tabakasının kalınlığı artarken ideallik faktörü azalırken Cu katkılarla ideallik faktörünün arttığı görülmektedir. İdeallik faktörü $n>1$ olması yapıların ideallikten saptığını göstermektedir. Bu sonuçlar arayüzey durumları nedeniyle. İdeallik faktörünün yalıtkan tabakanın kalınlığı ve arayüzey durumlarına bağlılığını verir. Seri direnç üç farklı yöntemle elde edilmiştir. Bulunan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Engel yüksekliğinin her iki yapıda da kalınlık arttıkça arttığı ve katkılarla azaldığı görülmektedir.



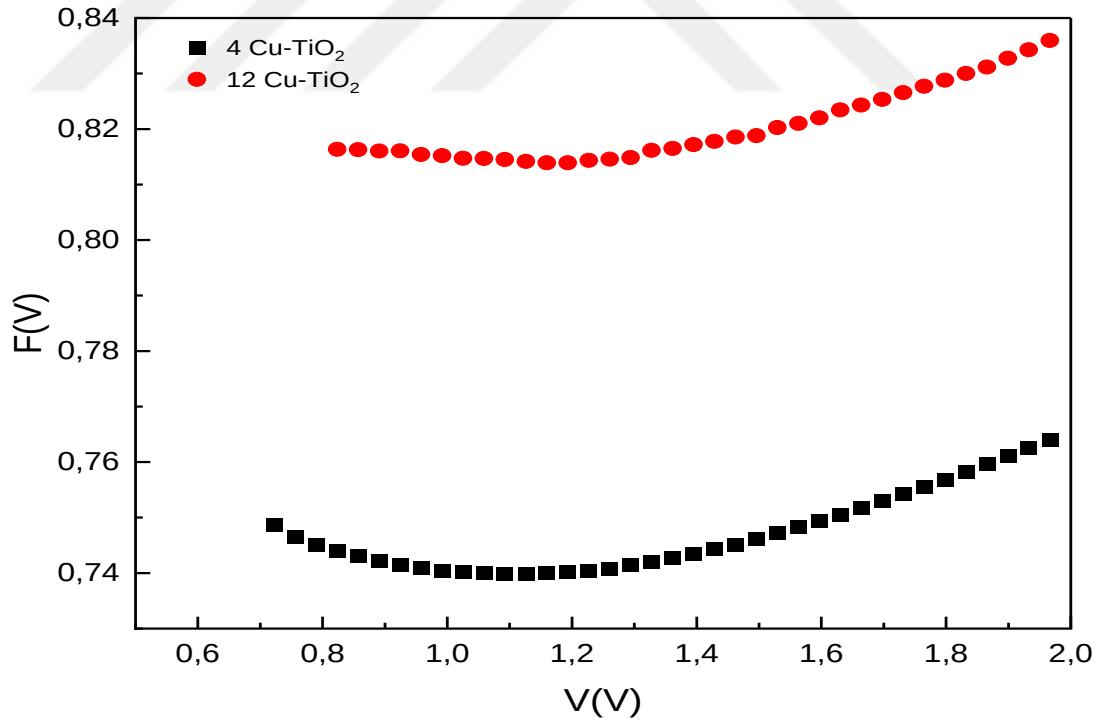
Şekil 4.26 Farklı kalınlıkta TiO₂ kaplı Al/TiO₂/Al diyotların LnI-V ve H-I grafiği



Şekil 4.27 Farklı kalınlıkta Cu-TiO₂ kaplı Al/Cu-TiO₂/Al diyotların LnI-V ve H-I grafiği



Şekil 4.28 Farklı kalınlıkta TiO₂ kaplı Al/TiO₂/Al diyotların $F(V)$ - V grafiği



Şekil 4.29 Farklı kalınlıkta Cu-TiO₂ kaplı Al/Cu-TiO₂/Al diyotların $F(V)$ - V grafiği

Çizelge 4.8 Farklı kalınlıklarda TiO₂ kaplı diyotların I-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri

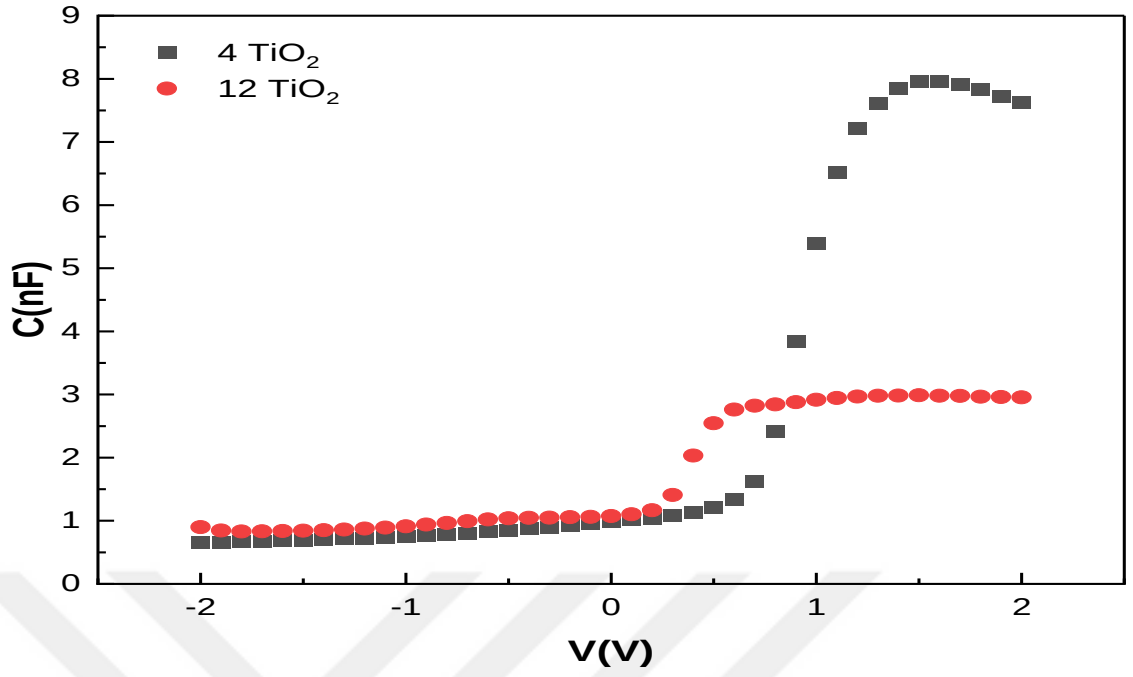
Film	ϕ_B (IV)	ϕ_B (Fv)	ϕ_B (HI)	n (IV)	n (dV/lnI)	Rs (HI)	Rs (Fv)	Rs (dV/dlnI)	$I_0 \times 10^{-6}$
4TiO ₂	0.76	0.80	0.88	7.88	4.94	7452.8	7080.88	7210.70	3.91
12TiO ₂	0.78	0.78	0.94	5.89	5.24	7922.7	5994.93	8266.40	7.60

Çizelge 4.9 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO₂ kaplı diyotların I-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri

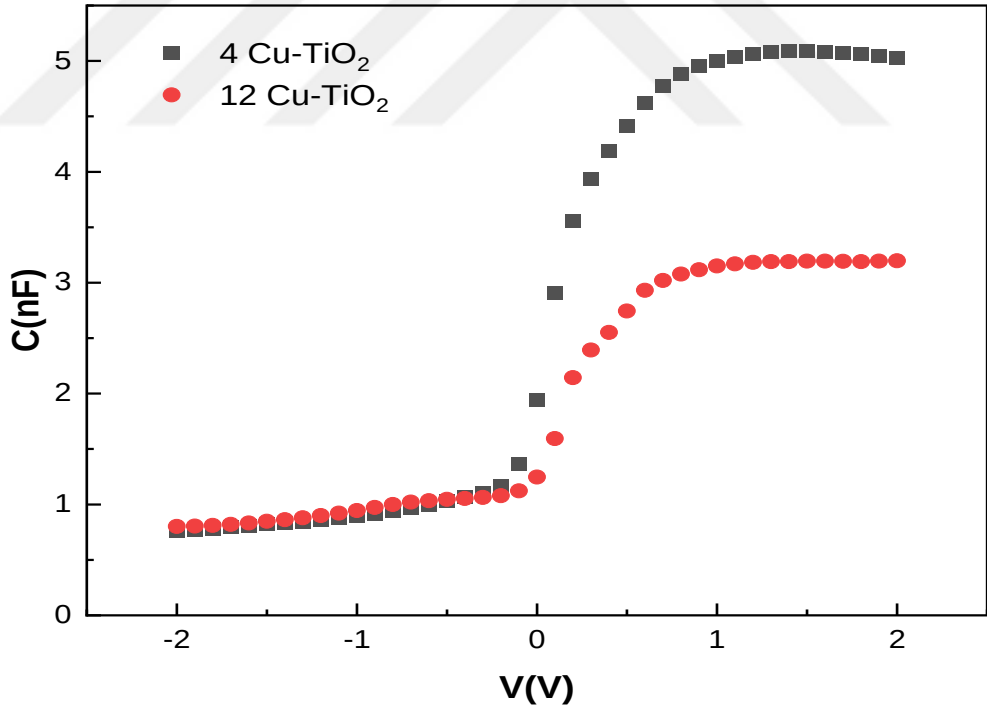
Film	ϕ_B (IV)	ϕ_B (Fv)	ϕ_B (HI)	n (IV)	n (dV/lnI)	Rs (HI)	Rs (Fv)	Rs (dV/dlnI)	I_0 ($\times 10^{-6}$)
4Cu-TiO ₂	0.46	0.73	0.72	13.90	12.88	7138	12861.67	7076	3.60
12Cu-TiO ₂	0.65	0.82	0.83	8.64	7.19	14348	15584.46	12484	1.34

4.3.1 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların C-V belirtkenleri

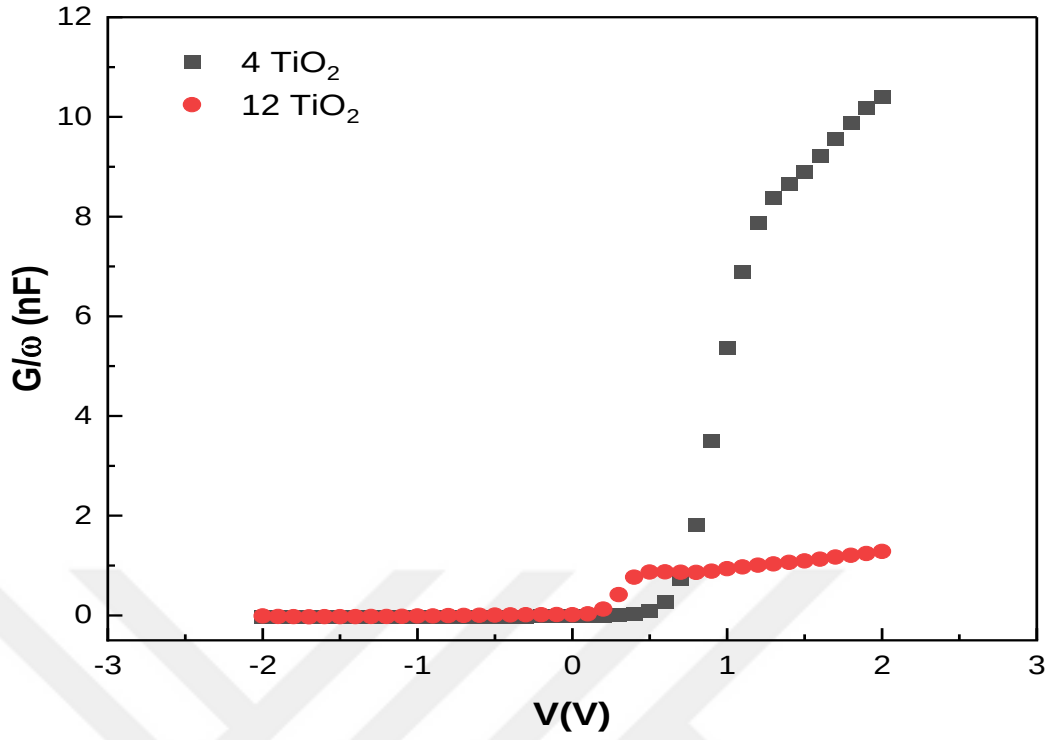
Al/TiO₂/Al yapıların farklı kalınlıklarda 100kHz frekansta, karanlıkta ve oda sıcaklığında yapılan C-V ve $G/\omega - V$ ölçümleri sırasıyla Şekil 4.30 ve Şekil 4.32 de gösterilmiştir. Farklı kalınlıktaki Al/Cu-TiO₂/Al yapılarının C-V ve $G/\omega - V$ ölçümleri de Şekil 4.37 ve Şekil 4-38 de gösterilmiştir. Şekil 4.31 ve Şekil 4.33 deki C-V ölçümleri yapı kapasitesinin gerilimin bir fonksiyonu olduğunu ve yapıda bir engelin oluştuğunu göstermektedir. TiO₂ ve Cu-TiO₂ kalınlığı arttıkça kapasite değerinin azaldığı da C-V grafiklerinden görülmektedir. Cu katkılama da C-V karakteristiklerini değiştirmiştir.



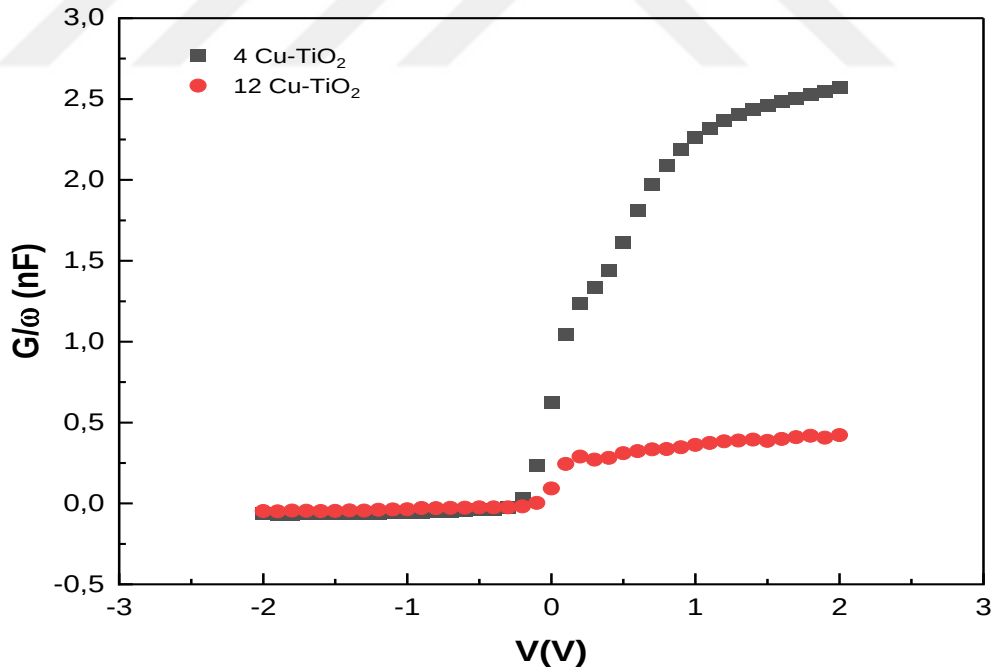
Şekil 4.30 Farklı kalınlıklarda TiO₂ kaplı diyotların C-V grafiği



Şekil 4.31 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO₂ kaplı diyotların C-V grafikleri



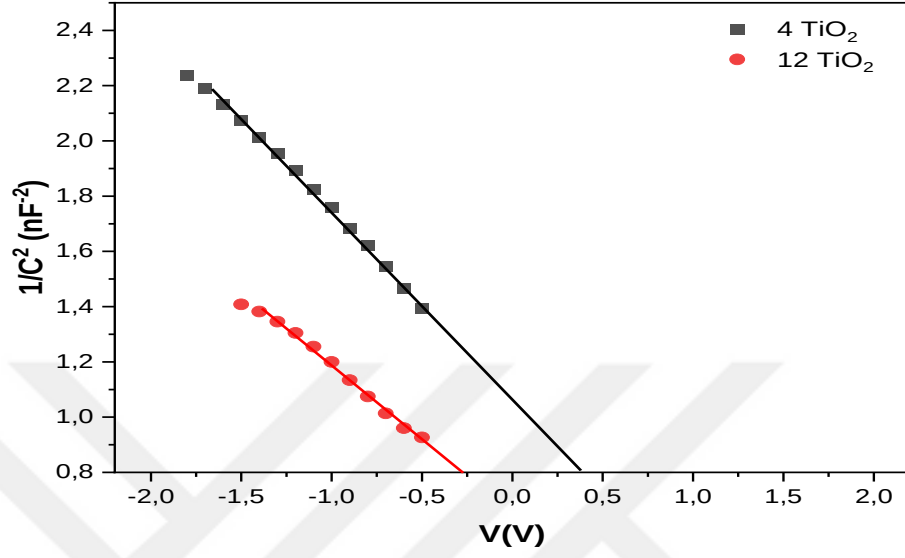
Şekil 4.32 Farklı kalınlıklarda TiO₂ kaplı diyotların G/ω -V grafiği



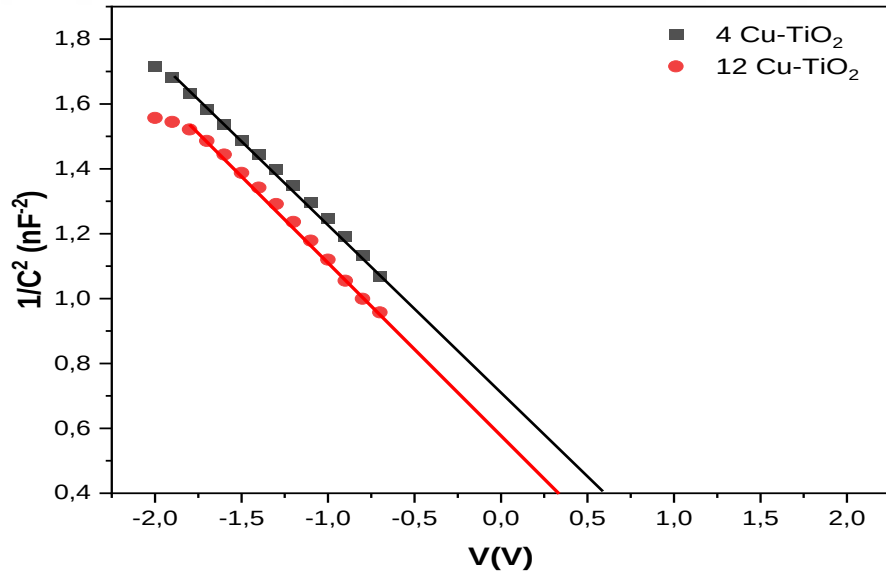
Şekil 4.33 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO₂ kaplı diyotların G/ω -V grafiği

Yapıların C^{-2} -V grafikleri Şekil 4.34 ve Şekil 4.35 de gösterilmiştir. Grafiklerin ters beslemde doğrusal olması eklem anı eklem olduğunu göstermektedir. Denklem 2.44

ve 2.45 yardımıyla yapıların N_D ve V_d değerleri bulunmuş ve Çizelge 4.10 ve Çizelge 4.11 de verilmiştir.

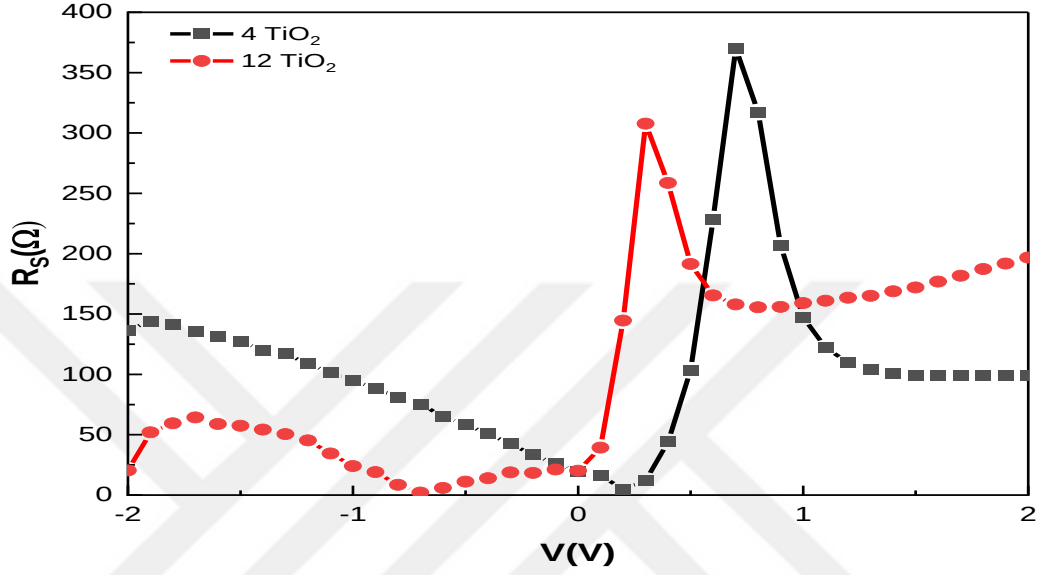


Şekil 4.34 Farklı kalınlıklarda TiO₂ kaplı diyotların $1/C^2$ -V grafikleri

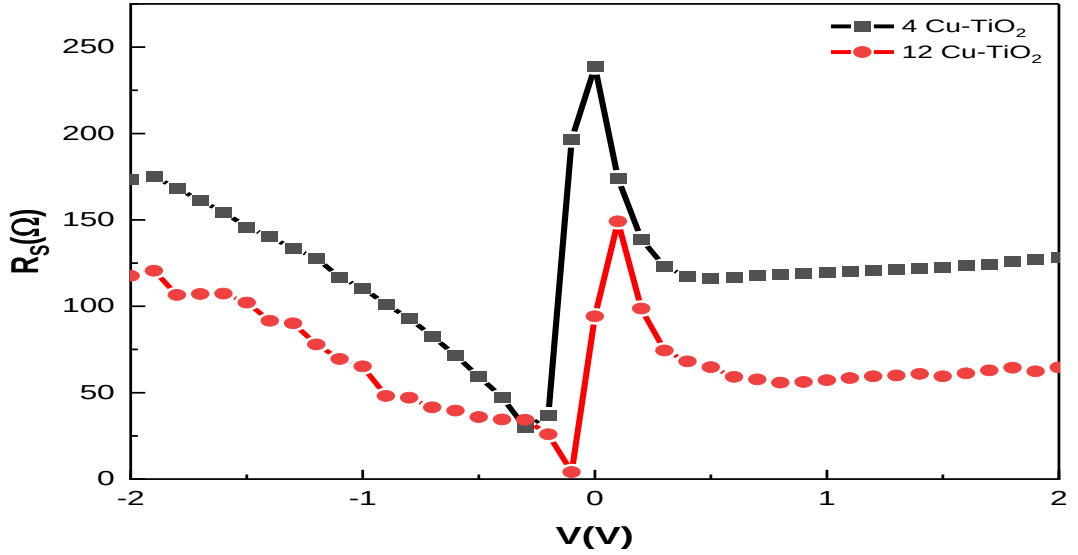


Şekil 4.35 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO₂ kaplı diyotların $1/C^2$ -V grafikleri

Denklem (2.55) kullanılarak uygulanan gerilimin fonksiyonu olarak R_s değerleri hesaplanmıştır ve Şekil 4.36 ve Şekil 4.37 de gösterilmiştir. R_s değerleri bir pik değerine sahip olduğu pikin pozisyonu kalınlığa ve katkılamaya bağlı olarak değiştiği görülmüştür.



Şekil 4.36 Farklı kalınlıklarda TiO_2 kaplı diyotların R_s -V grafikleri



Şekil 4.37 Farklı kalınlıklarda kaplanmış Cu-TiO_2 ince filmlerin R_s -V grafiği

Çizelge 4.10 Farklı kalınlıklarda TiO₂ kaplı diyotların yapıların C-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri

Filmler	V ₀ (V)	V _d (V)	N _D x10 ¹⁶ (cm ⁻³)	W _D x10 ⁻⁵ (cm)	Em kV/cm	E _f (eV)	φ _B eV	Δφ _B meV
4TiO ₂	1.70	1.73	2.02	3.31	102.60	0.0047	1.66	0.12
12TiO ₂	1.03	1.09	2.07	2.56	80.90	0.0048	1.31	0.11

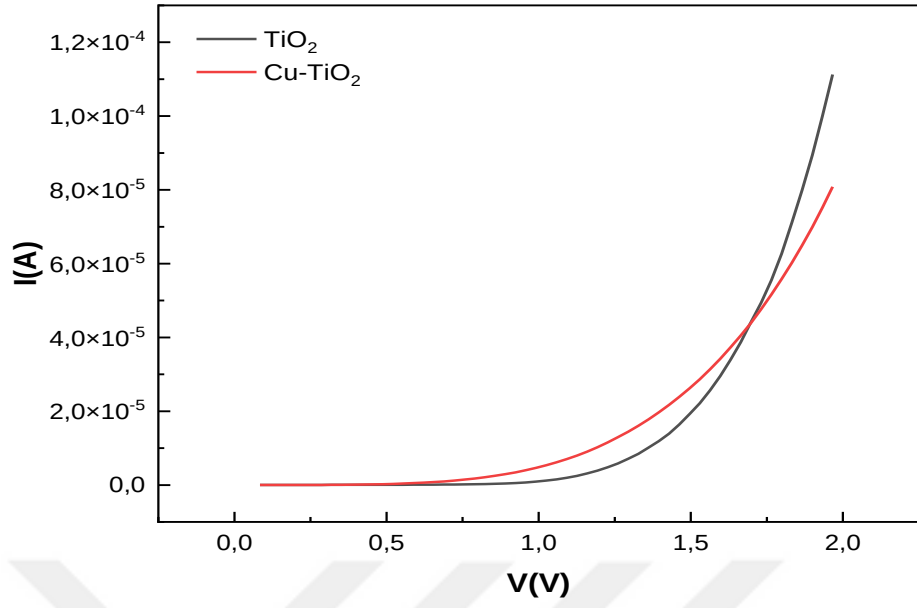
Çizelge 4.11 Farklı kalınlıklarda Cu-TiO₂ kaplı diyotların yapıların C-V belirtkenlerinden bulunan parametreleri

Filmler	V ₀ (V)	V _d (V)	N _D x10 ¹⁶ (cm ⁻³)	W _D x10 ⁻⁵ (cm)	Em kV/cm	E _f (eV)	φ _B eV	Δφ _B meV
4Cu-TiO ₂	1.48	1.51	2.43	2.82	105	0.0049	1.56	0.13
12Cu-TiO ₂	1.18	1.21	2.36	2.55	92.31	0.0048	1.27	0.12

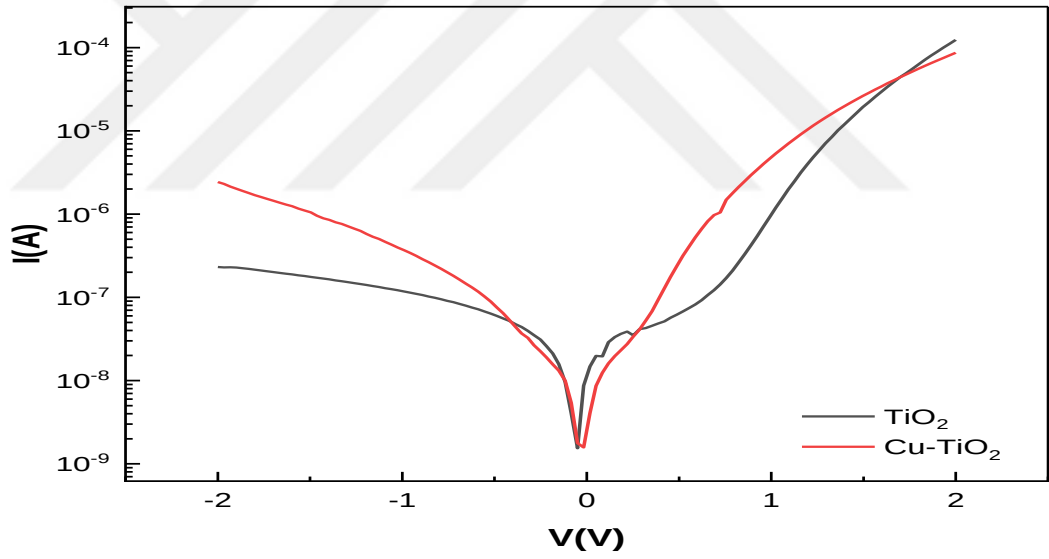
4.3.2 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapılarının I-V belirtkenlerinin karşılaştırılması

p-Si kristal üzerine vakum sistemi ile buharlaştırarak kaplanmış Al üzerine sol-gel daldırma tekniği ile 4 kez kaplanmış TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmler kaplandı. Kaplanan ince filmler üzerinde maske yardımı ve vakum sistemi ile Al buharlaştırılarak metal kontaklar oluşturuldu. Elde edilen aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların oda sıcaklığında ±2V gerilim altında I-V ve C-V ölçümleri alınarak, katkılamanın elektriksel belirtkenlere etkisi incelendi. C-V ölçümlerinde frekans 100kHz olarak ayarlandı.

Hazırlanan yapıların ±2Volt gerilim altında yapılan I-V ölçümlerinden lnI-V grafikleri oluşturuldu. lnI-V grafiği eğimlerinden idealite faktörleri, lnI eksenini kestiği noktalardan doyma akım ve sıfır beslemdeki engel yükseklik değerleri hesaplandı.

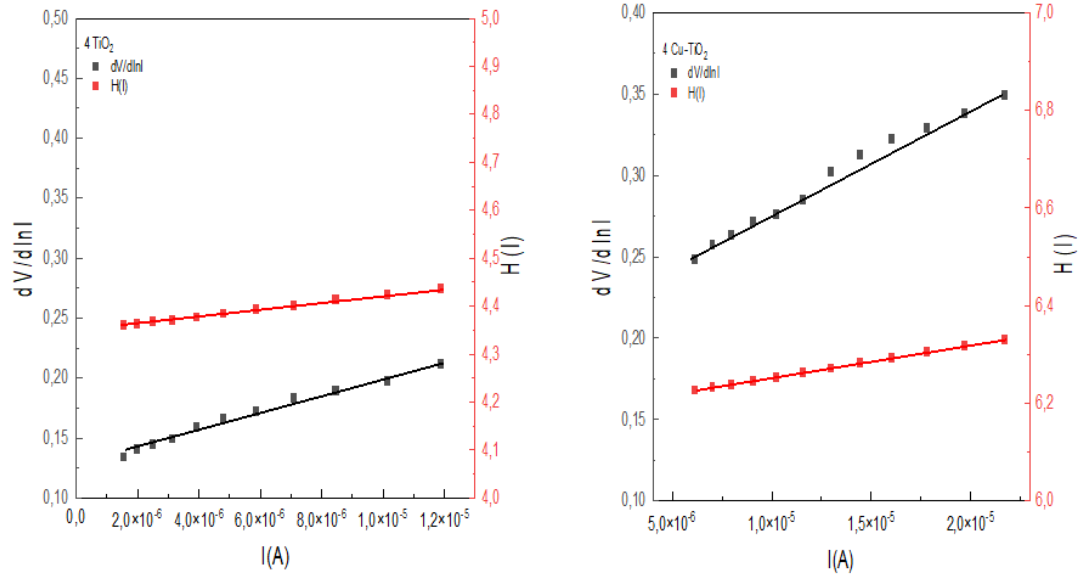


Şekil 4.38 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların I-V grafiği

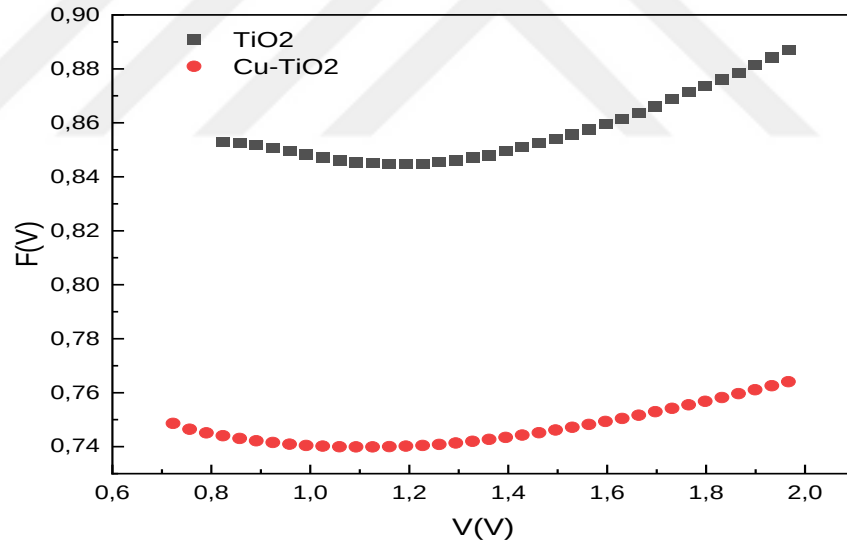


Şekil 4.39 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların ln I-V grafiği

Yapıların $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I grafikleri Şek. 4.40 de ve $F(V)$ - V grafikleri Şekil 4.41 de gösterilmiştir. Bu grafikler yardımıyla bulunan ϕ_{b0} , R_s ve n değerleri Çizelge 4.12 de verilmiştir.



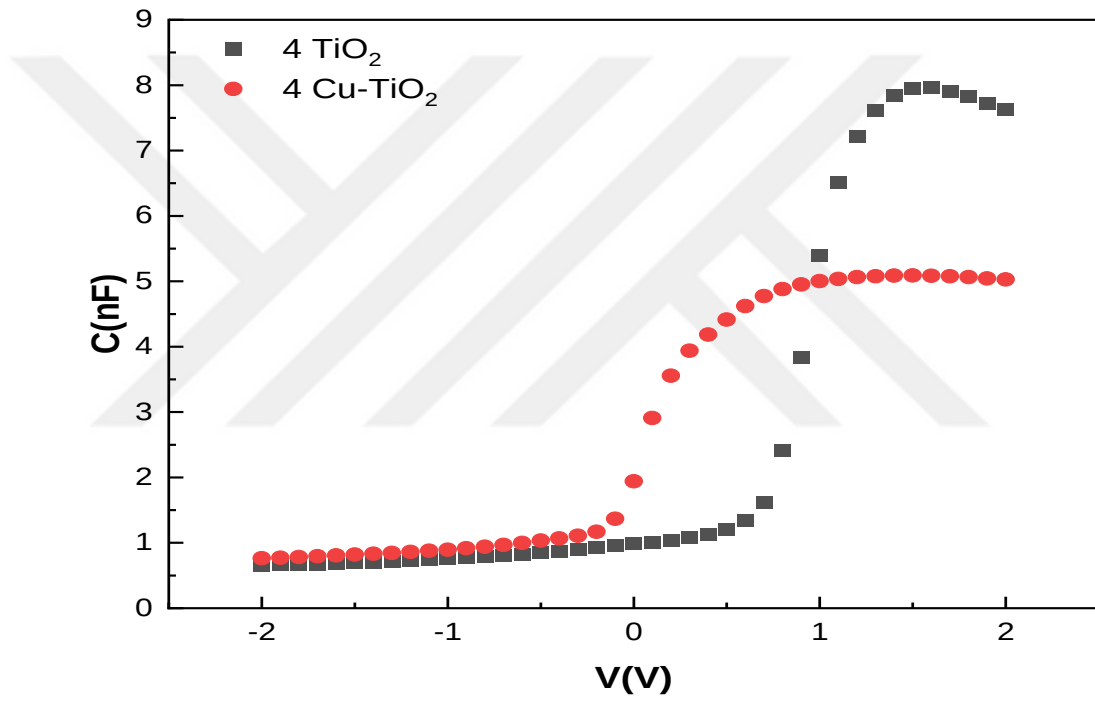
Şekil 4.40 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların $dV/d\ln(I)$ -I ve H-I grafiği



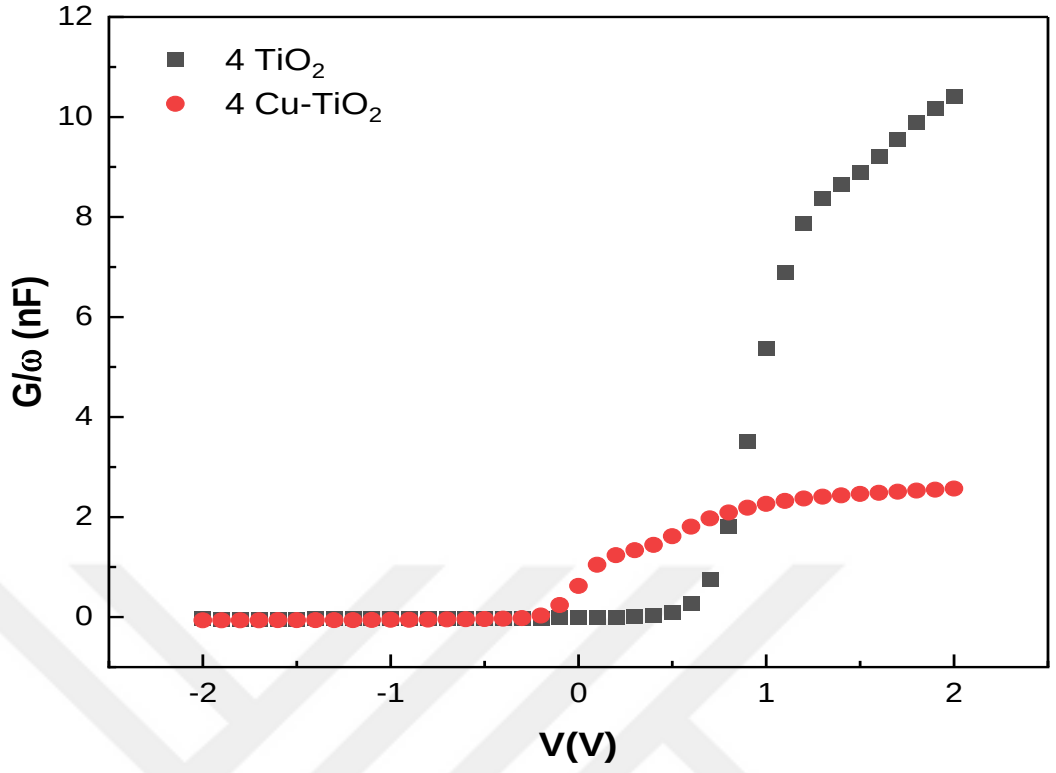
Şekil 4.41 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların $F(V)$ -V grafiği

Çizelge 4.12 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların I-V belirtkenlerinden elde edilen parametreler

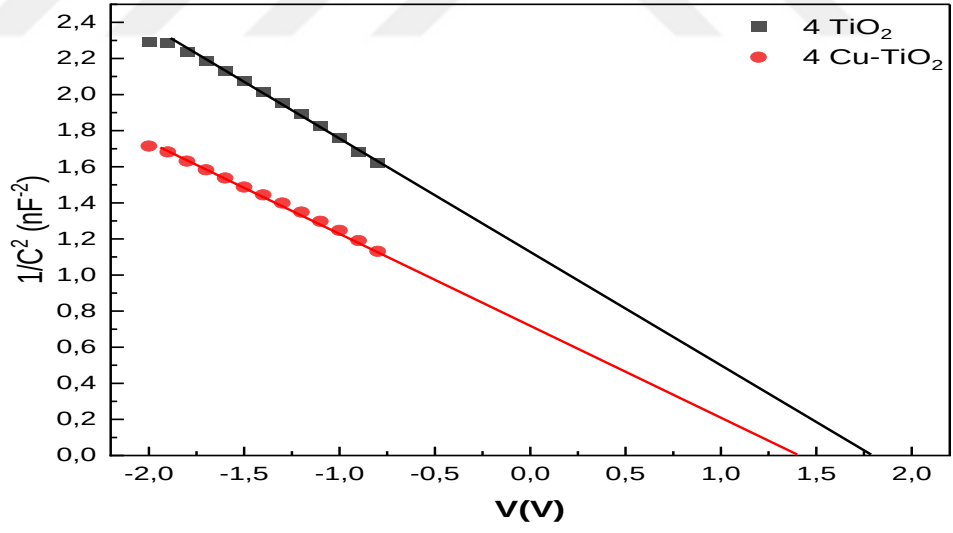
Filmler	ϕ_B (IV)	ϕ_B (Fv)	ϕ_B (HI)	n (IV)	n (dV/dlnI)	R _s (HI)	R _s (Fv)	R _s (dV/dlnI)	I ₀ (x10 ⁻⁶)
TiO ₂	0.762	0.80	0.88	7.88	4.94	7452.8	7080.882	7210.7	3.91
Cu-TiO ₂	0.46	0.73	0.72	13.90	12.88	7138	12861.67	7076	3.60



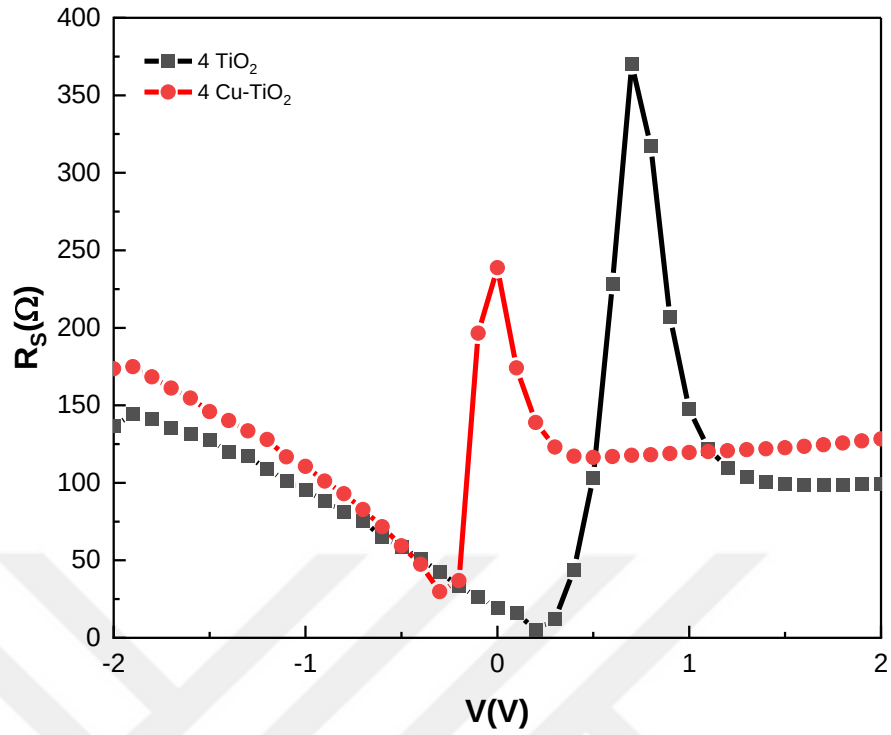
Şekil 4.42 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ /Al yapıların C-V grafiği



Şekil 4.43 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların G/ω -V grafiği



Şekil 4.44 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların $1/C^2$ -V grafiği



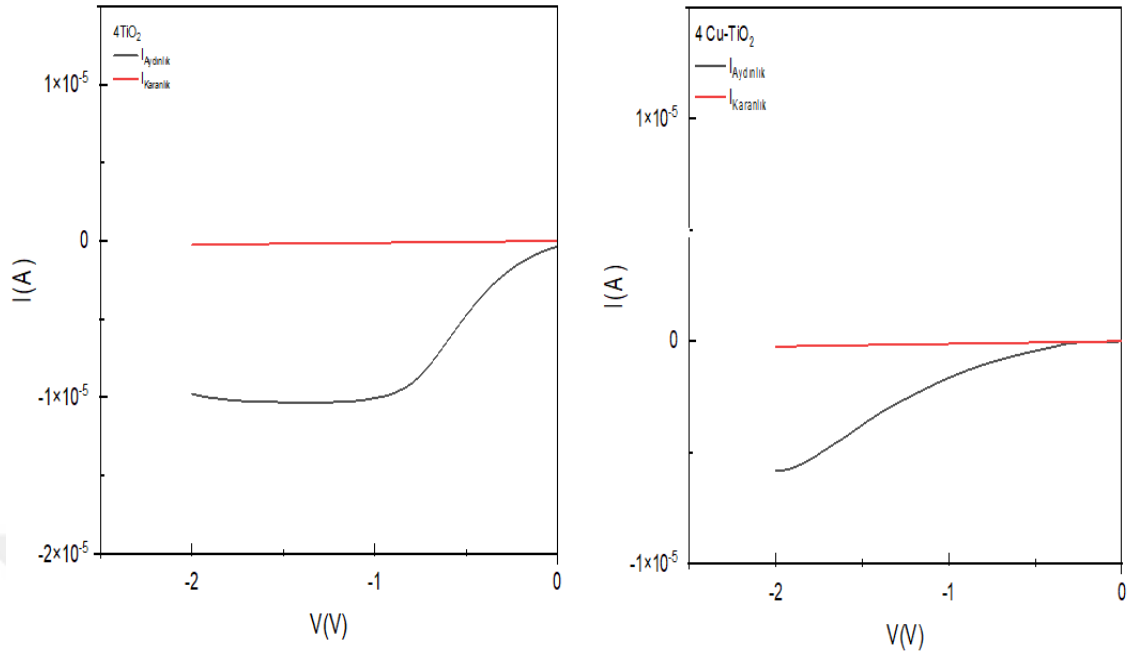
Şekil 4.45 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların R_s-V grafiği

Çizelge 4.13 Aynı kalınlıkta Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂ / Al yapıların C-V belirtkenleri yardımıyla bulunan parametreler

Filmler	V ₀ (V)	V _d (V)	N _D ×10 ¹⁵ (cm ⁻³)	W _D ×10 ⁻⁵ (cm)	Em kV/cm	E _f (eV)	φ _B (eV)	Δφ _B (meV)
4TiO ₂	1.70	1.73	2.02	3.31	102.60	0.0047	1.66	0.12
4Cu-TiO ₂	1.48	1.51	2.43	2.82	105.00	0.0049	1.56	0.13

4.3.3 Diyotların ışığa karşı tepkisi

Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların ışığa karşı duyarlılığını belirlemek için 100 μW/cm⁻² yoğunluktaki ışık altında I-V ve karanlık ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.45 de I-V grafikleri görülmektedir. I-V ölçümleri ve denklem 2.50, 2.49, 2.51 yardımıyla yapıların sırasıyla ışık algılama (D), ışık hassaslığı (PS) ve ışık duyarlılığı (R) parametreleri hesaplanmıştır. Çizelge 4.14 de elde edilen parametreler verilmiştir.

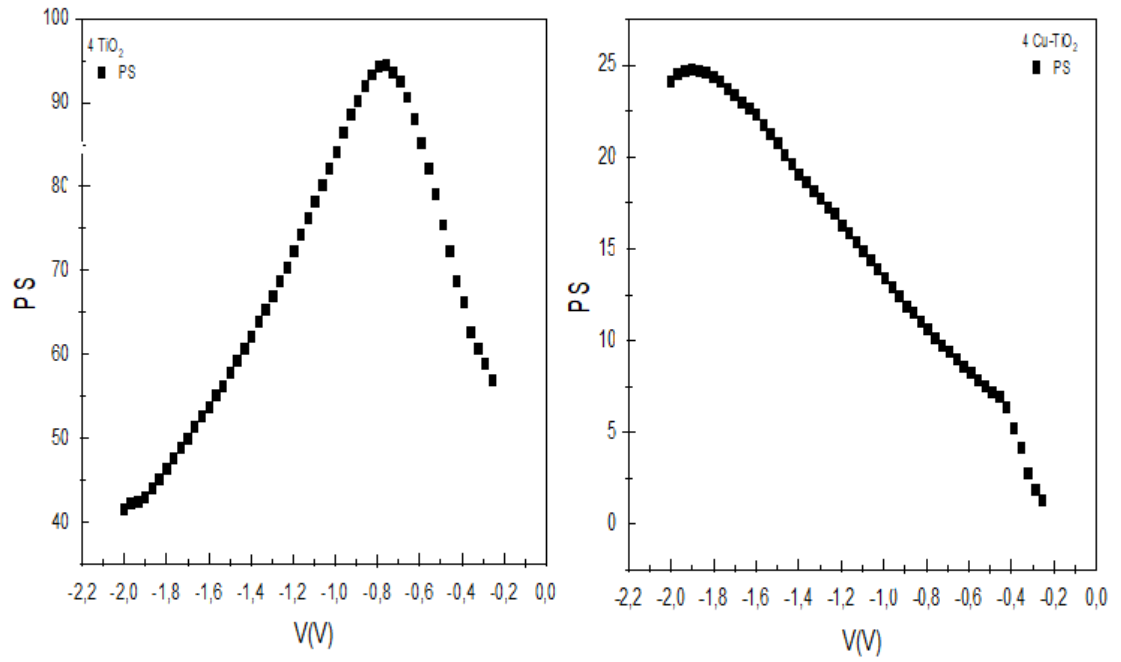


Şekil 4.46 Aydınlik ve Karanlıkta ölçülen Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların I-V grafikleri

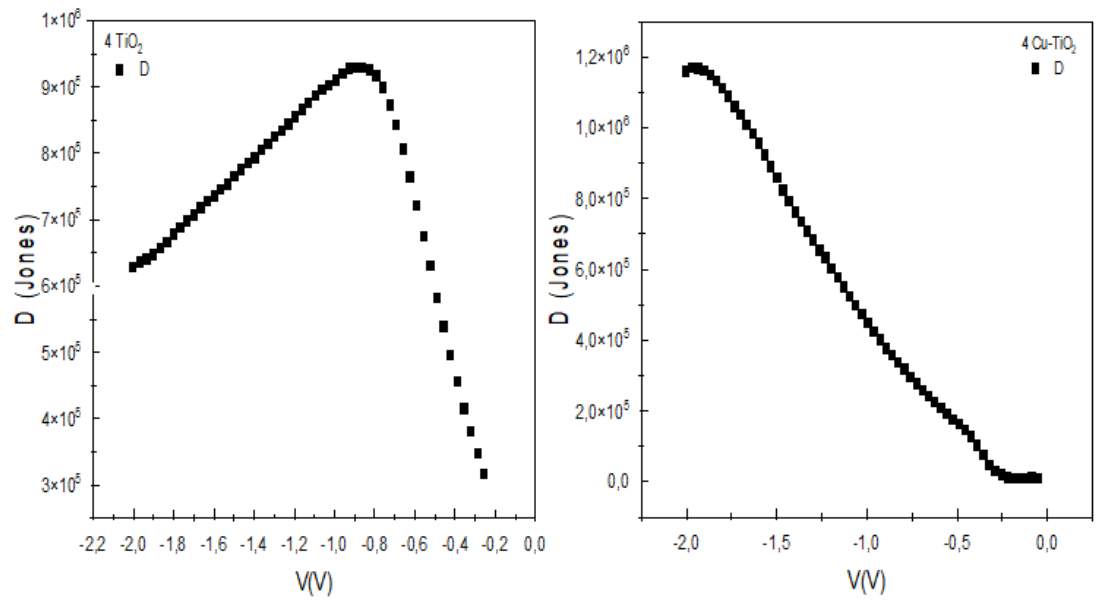
Çizelge 4.14 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların fotodiyot parametreleri

-1V(V) için	PS	D (x10 ⁹ Jones)	R (mA/W)
TiO ₂	82.00	2.85	3.18
Cu-TiO ₂	13.82	0.47	0.51

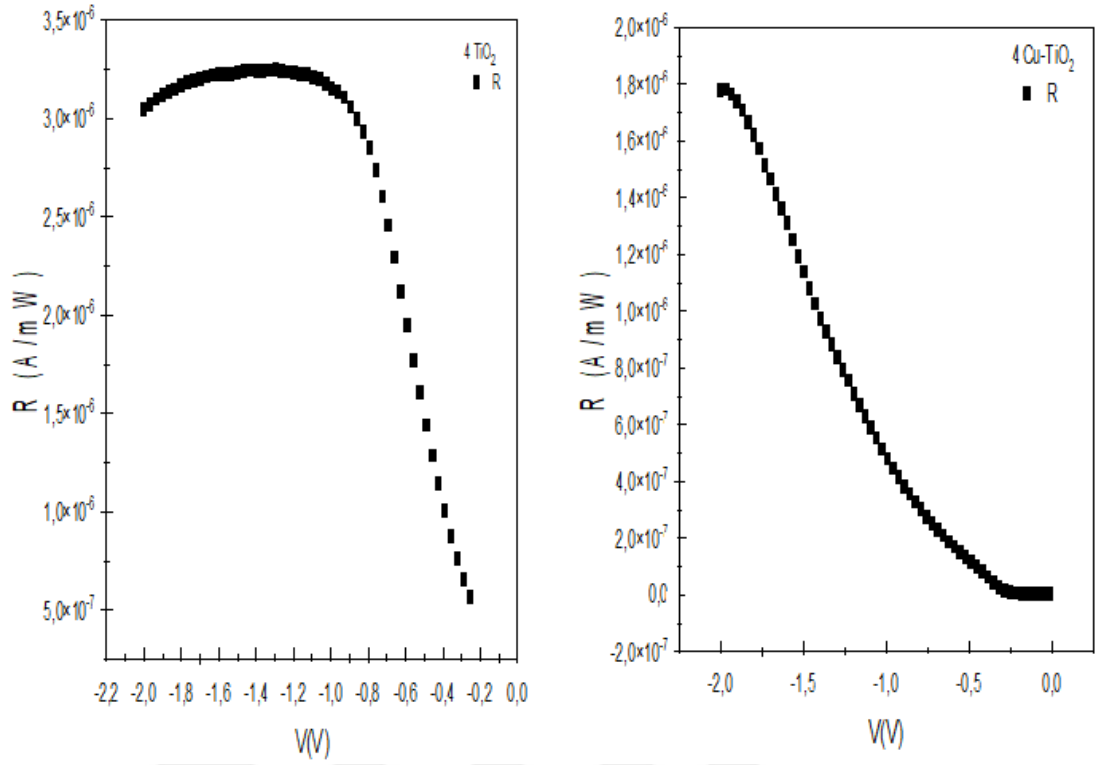
Şekil 4.47, 48 ve 49 de Cu ile katkılandırılmış TiO₂ ve katkısız TiO₂ ile hazırlanan yapıların fotodiyot parametrelerinin grafikleri görülmektedir.



Şekil 4.47 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların PS-V grafiği



Şekil 4.48 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların D-V grafiği



Şekil 4.49 Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların R-V grafiği

Şekil 4.47 ve 4.48'a göre ışığın duyarlılık ve algılama grafikleri benzer görülmektedir. Değerler katkısız TiO₂ ile hazırlanan yapılar için -2V ile -0.7V aralığında değerler artarken -0.7V ta maksimum noktaya ulaştıktan sonra azaldığı görülmektedir. Cu ile katkılandırılarak hazırlanan yapılarda ise benzerlik göstermekle birlikte çok kısa bir süre değerler artarken -1.8V ta maksimum değere ulaşmakta ve daha sonra azaldığı görülmektedir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada yalıtkan tabakası sol-jel yöntemiyle hazırlanmış Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların elektriksel ve fiziksel belirtkenleri araştırılmıştır. Öncelikli olarak cam alttabakalar üzerinde farklı kalınlıklarda hazırlanmış TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin optiksel özellikleri incelenerek, yasak enerji bant aralığı değerleri ve optiksel sabitler bulunmuştur. TiO₂ ince filmleri, üzeri Al kaplanmış p-tipi silisyum alt tabakalar üzerine kaplanarak, bu yapılardan Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıları elde edilmiştir. Elde edilen yapıların oda sıcaklığında (I-V) ve kapasite-gerilim (C-V) ölçümleri gerçekleştirilmiştir.

I-V ölçümlerinden sıfır beslem engel yüksekliği (ϕ_b), seri direnç (R_s), doyma akımı (I_0) ve ideallik faktörü (n)' nün bulunması, C-V ölçümlerinden sıfır beslem engel yüksekliği ($\phi_{b0(C-V)}$), fermi enerji yüksekliği (ϕ_F), tüketme tabakası genişliği (W_d), kesme gerilimi (V_0), difüzyon potansiyeli (V_d) bulunması amaçlanmıştır.

Bu temel elektriksel belirtkenler yardımıyla yapıların ara yüzey enerji durumlarının değişimi tespit edilmiştir. Elde edilen bu veriler yardımıyla en iyi belirtkenlere sahip Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapısı belirlenmiştir.

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin XRD ve Raman spektrumları çekilerek elde edilen grafikler yardımı ile ince filmlerin yapısal özellikleri ve Cu ile katkılandırmanın TiO₂ ince film yapısındaki etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Cam alt tabaka üzerinde kaplanan TiO₂ ince film ve Cu-TiO₂ ince filmlerin XRD desenleri incelenmiş ve elde edilen spektrumda (101), (004), (200), (105) ve (201) düzlemlerinde piklerin olduğu görülmüştür. ISCD karşılaştırıldığı zaman TiO₂ nin anataz yapıda olduğu görülmüştür. Cu-TiO₂ nin pikleri kontrol edildiği zaman TiO₂ nin pikleri ile aynı olduğu görülmüştür. (Hyang vd 2015) makalesinde CuO ve Cu₂O nun Cu iyonlarının piklerinin görülmeyeceği durumu ile örtüşmektedir.

(101) düzlemi göz önüne alınarak TiO_2 ve Cu-TiO_2 ince filmlerinin kristal boyutu Debby Scherrer formüllerinden hesaplanmıştır. Tetragonal yapıda olduğu belirlenen TiO_2 ve Cu-TiO_2 'nin örgü parametreleri, hücre hacmi, kristalit boyutu değerleri hesaplanmıştır. Cu ile katkılandırma sonucu hesaplanan bu değerlerde artış olduğu görülmüştür.

TiO_2 ve Cu-TiO_2 ince filmlerin Raman spektrumlarından 143, 197, 397, 517 ve 639 cm^{-1} civarlarında tepe değerleri elde edilmiştir. En güçlü ve keskin olan pik, filmin anataz yapıda olduğunu gösterir. Cu katkılı ince filmin Raman spektrumu incelendiği zaman TiO_2 ince filme ait piklerle aynı piklere sahip olduğu fakat 143'deki en keskin ve güçlü pikin yoğunluğunun arttığı, genişlediği ve maviye kaydığı görülür. Bu durum Cu atomlarının varlığını göstermektedir.

Cam alt tabaka üzerinde kaplanan TiO_2 ince film ve Cu-TiO_2 ince filmlerin UV-vis-NIR ölçümleri sonucu elde edilen optiksel geçirgenlik spektrumları incelendiği zaman kaplama sayısı arttıkça geçirgenlik eğrilerinde pik sayılarında artış görüldü. Bu durum kaplama sayıları arttıkça kalınlığın alt tabaka üzerinde homojen dağıldığını göstermektedir. Geçirgenlik spektrumlarında TiO_2 ince filmler için geçirgenliğin NIR bölgesinde %85 civarında olduğu gözlemlenirken TiO_2 ince film Cu ile katkılandırıldığı zaman geçirgenliğin azaldığı görüldü.

Geçirgenlik spektrumlarından filmlerin enerji bant aralıkları, urbach enerjileri, filmlerin kalınlıkları ve dielektrik sabitleri hesaplandı. Farklı daldırma sayılarında hazırlanan TiO_2 ince film kalınlıkları 83.35nm, 131.82 nm ve 228.56 nm olarak hesaplanırken enerji bant aralığı 3.2 eV -3.3 eV aralığında hesaplandı. Aynı daldırma sayısı ile hazırlanmış Cu-TiO_2 ince filmde katkılandırma ile film kalınlığında artış ve enerji bant aralığında artma görüldü. Bulunan değerlerin (Gonzalez ve Santiago 2007)'nin yayınında yayınlanan değerlere yakın değerler olduğu görülmüştür. Katkılandırma ile enerji bant değerinin azalması hazırlanan filmin daha iletken yapıya dönüştüğünü bize göstermektedir. TiO_2 ve Cu-TiO_2 ince filmler için soğurum katsayıları hesaplandı. Soğurum katsayıları TiO_2 ince filmlerde 4 katlı için 2.99×10^5 , 8 katlı için 2.08×10^5 ve 12 katlı için 1.32×10^5 hesaplanmıştır. Cu-TiO_2 ince filmler için ise 4 katlılar için 3.47×10^5 ,

8 katlı için 2.02×10^5 ve 12 katlı için 1.24×10^5 hesaplanmıştır. Kalınlık arttıkça soğurma katsayısında azalma olduğu ve Cu katkılandırmanın filmlerin soğurma katsayılarını genel olarak düşürdüğü görülmüştür.

Ayrıca Tauc denklemi yardımıyla elde edilen bant aralığı değerleri katkısız 4 katlı TiO_2 ince film için 3.2 iken 8 kat ve 12 kat TiO_2 ince filmler için 3.25 ve 3.3 eV'tur. Cu katkılı TiO_2 için ise 4,8 ve 12 katlılar için sırasıyla band aralığı 3.3, 3.2, 3.1 dir. Bu durum kaplama sayısı arttıkça TiO_2 ince filmler için bant aralığı değerlerinin arttığını Cu katkılı ince filmler için ise azaldığını göstermektedir. Ayrıca elde edilen band aralıklarının literatürle uyumlu olduğu görülmüştür (Gonzalez and Santiago 2007). TiO_2 ince filmler için optiksel bant aralığında bulunan lokalize durumların genişliğini ifade eden Urbach enerjisi değerleri hesaplanmıştır. Buna göre katkısız 4-8 ve 12 kez kaplanmış TiO_2 ince filmlerin Urbach enerjileri sırasıyla 192, 201 ve 296 meV, olarak elde edilmiştir. Cu katkılı TiO_2 için ise Urbach enerjileri sırasıyla 189, 198 ve 277 meV olarak elde edilmiştir.

Katkılandırma sonucu Urbach enerjisindeki azalma, Cu ile katkılandırmanın atomik kusurların ve atomik düzensizliklerin azalması ve iletim bandına uzak yerleşim seviyelerin varlığının oluşması olarak yorumlanabilir.

UV-Vis-Nır ölçümleri sonucu elde edilen grafiklerden Swanepoel zarf yöntemi kullanılarak kırılma indisleri hesaplanmıştır. TiO_2 için kırılma indisleri 2 ile 2.8 aralığında, Cu- TiO_2 için kırılma indisleri 2.3-2.96 aralığında elde edilmiştir. Anataz yapılarıdaki TiO_2 kırılma indisleri ile yakın değerler elde edildiği görülmüştür (Möls vd 2019) Kırılma indislerinin dalga boyuna göre grafikleri çizilmiştir. Dalga boyları arttıkça geçirgenliğin artması ve soğurma katsayılarının azalmasından dolayı kırılma indislerinin azalması beklenmektedir. TiO_2 ve Cu- TiO_2 filmlerin çizilen $n-\lambda$ grafiklerine göre kırılma indislerinin dalga boyu arttıkça azaldığı, ayrıca kalınlık arttıkça da azaldığı görülmüştür. Ayrıca Cu katkılamanın 300-750 nm dalga boyu aralığında filmin kırılma indisinde artmaya sebep olduğu görülmektedir.

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin k - λ grafiklerinden dalga boyu ve kalınlık arttıkça sönüm katsayısının azaldığı görülmüştür. TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri karşılaştırıldığı zaman katkılandırmanın sönüm katsayısını azalttığı görülmüştür.

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmler için Drude teorisine göre elde edilen gerçek ve sanal dielektrik sabitlerinin foton enerjisine karşı grafikleri çizilmiştir. Görünür bölgede gerçel ve sanal dielektrik sabitleri değişmektedir. Ayrıca gerçek dielektrik sabiti, sanal dielektrik sabitinden daha büyüktür ve her iki sabitin değeri de kalınlık arttıkça azalmaktadır. Aradaki bu fark elde edilen ince filmlerin bant aralıklarındaki durum yoğunluklarına bağlı olduğu söylenebilir. TiO₂ ve Cu-TiO₂ filmler için çizilen $\epsilon_1 - \lambda^2$ grafiklerinin doğrusal kısımlarının $\lambda^2 = 0$ değerine ekstrapole edilmesi ile ϵ_∞ yüksek frekans dielektrik sabitleri ve aynı grafiğin eğiminden ω_p plazma frekansı değerleri elde edilmiştir. Bulunan ϵ_∞ ve ω_p değerleri kullanılarak N/m^3 değerleri elde edilmiştir. TiO₂ ince film ile Cu-TiO₂ ince filmler için hesaplanan bu değerlerde farklılıklar olduğu görülmüş ve katkılandırmanın optiksel sabitleri değiştirdiği görüşmüştür.

Çalışmanın ikinci bölümünde $\pm 2 V$ gerilim aralığında I-V, C-V ve G/ ω -V ölçümleri yardımıyla Al/TiO₂/Al ve Al/Cu-TiO₂/Al yapıların elektriksel analizi yapılmıştır. Yapıların oda sıcaklığında, $\pm 2 V$ gerilim aralığında karanlık ve aydınlık ortamlardaki I-V ölçümleri yapılmıştır. Karanlık I-V ölçümleri yardımıyla Cheung ve Cheung, Norde yöntemleri kullanılarak n , engel yüksekliği ve R_s diyot parametreleri bulunmuştur. Bu ölçümler yardımıyla da yapının V_D difüzyon potansiyeli ve R_s direnç değerleri bulunmuştur.

Kalınlık arttıkça düz beslemde akımın azaldığı ters beslemde ise arttığı görülmüştür. Al/TiO₂/Al yapılarının doğrultma oranları $\pm 2V$ ta hesaplanmış ve kalınlık artmasıyla 535,75 den 17.52 azaldığı görülmüştür. Al/Cu-TiO₂/Al yapılarda ise doğrultma oranı kalınlık artışıyla 35.7 dan 8.1 e azalmıştır.

İdeallik faktörü TE yöntemiyle 4 katlı TiO₂ filmi kaplı Al/ TiO₂/Al yapısının 7.88 olarak bulunmuştur. TiO₂'nin kalınlığı artınca ideallik faktörü 5.89 azalmıştır. Al/ Cu-

TiO₂/Al katkılı yapılarda ise ideallik faktörü aynı kalınlıkta üretilen Al/ TiO₂/Al yapıların ideallik faktöründen daha büyüktür. Arayüzey tabakasının kalınlığı artarken ideallik faktörü azaldığı, Cu katkılamaıyla ideallik faktörünün arttığı görülmektedir. İdeallik faktörü $n>1$ olması yapıların ideallikten saptığını göstermektedir. Bu sonuçlar arayüzey durumları nedeniyledir. İdeallik faktörünün yalıtkan tabakanın kalınlığı ve arayüzey durumlarına bağlılığını verir. Seri direnç üç farklı yöntemle elde edilmiştir. Bulunan değerlerin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Engel yüksekliğinin her iki yapıda da kalınlık arttıkça arttığı ve katkılamaıyla azaldığı görülmektedir.

C-V ölçümleri yapı kapasite değerlerinin gerilimin bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. C-V grafikleri yapıda bir engelin oluştuğunu göstermektedir. TiO₂ ve Cu-TiO₂ kalınlığı arttıkça kapasite değerinin azaldığı da C-V grafiklerinden görülmektedir. Cu katkılamanın da C-V karakteristikleri değiştirmiştir. R_s değerleri bir pik değerine sahip olduğu pikin pozisyonu kalınlığa ve katkılamaıya bağlı olarak değiştiği görülmüştür.

TiO₂ ve Cu-TiO₂ ince filmlerin fotodiyot özelliklerini incelemek için 100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ yoğunluktaki ışık altında I-V ölçümleri gerçekleştirildi. Ölçümler sonucu çizilen grafiklerde akımdaki artış sebebiyle filmlerin ışığa duyarlı olduğu görülmüştür. Ayrıca Cu ile katkılandırmanın ışığa duyarlılığını etkilediği görülmüştür. Yapılan hesaplamal sonucu elde edilen P ve D değerlerinin V ye göre çizilen grafiklerin aynı olduğu görülmüştür.

KAYNAKLAR

- Akkal, B., Benemara, A., Gruzza, B. and Bideux, L. 2000. Characterization of Interface States at Au/InSb/InP(100) Schottky Barrier Diodes As A Function of Frequency. Vacuum, 57; 219-228
- Anonim. 2018. Web Sitesi: <http://ulutem.gantep.edu.tr/pages.php?url=raman-spektroskopu-laboratuvari-25> Erişim Tarihi: 26.08.2022.
- Bakır Oksit/Çinko Oksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Figen Özyurt Kuş, 2010 Dr. Tezi
- Burstein, E. 1954. Anomalous Optical Absorption Limit in InSb. Phys. Rev., 93, 632-633.
- Büyükbaş, Uluşan*, A. Tataroğlu, A. Impedance spectroscopy of Au/TiO₂/n-Si metal-insulator-semiconductor (MIS) capacitor, Physica B 580 (2020) 411945
- Canan C. 2012 Titanya (TiO₂) Metal Oksit Nano Malzemeler / Titania (TiO₂) Metal Oxide Nanomaterials, Doktora Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, Edirne
- Card, H.C. and Rhoderick, E.H. 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. J. Phys. D: Appl. Phys., 4; 1589-1601.
- Chattopadhyay, P. and Daw, A.N. 1986. On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode. Solid-State Electronics, 29(5); 555-560.
- Cheung, S.K. and Cheung, N.W. 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. Appl. Phys. Lett., 49(2); 85-87.
- Ching-Chiun Wang, Cha-Hsin Lin, Wen-Miao Lo, L.-S. L. 2007. MIM Capacitor Structure and Method of Manufacturing The Same. United States, 1(19), 225–229.
- Choudhury, B. Dey M. and Choudhury, A. Defect generation, d-d transition, and band gap reduction in Cu-doped TiO₂ nanoparticles, International Nano Letters 3 (2013) 25.
- Chua L, 1971. Memristor-The missing circuit element, IEEE Trans. Circuit Theory. 18:507–519.
- Çam, Ş. U., Serin, T. ve Yazıcı, A. N., 2021. Effect of Sn doping concentration on structural, optical and electrical properties of ZnS/p-Si (111) diodes fabricated by sol-gel dip-coating method. Materials Science in Semiconductor Processing, 127, 105693.

- Fanfair, D., Desai, S., Kelty, C., 2007. The Early History Of Nanotechnology. Creative Commons Attribution License.
- Fernández-Garcia, G. and A. Rodriguez, J., 2007. Metal Oxide Nanoparticles. Nanomaterials: Inorganic and Bioinorganic Perspectives, 79479.
- Fuyuki, T. and Matsunami, H. 1986. Electronic Properties of the Interface between Si and TiO₂ Deposited at Very Low Temperatures. Japanese Journal Of Applied Physics, 25, 1288.
- Gonzalez, A.E.J. and Santiago, S.G. 2007. Structural and optoelectronic characterization of TiO₂ films prepared using the sol-gel technique. Semic. Sci. Tech. 22, 709-716.
- Gümüş İle Doplmuş Nano-TiO₂' İin Özelliklerinin İncelenmesi, Yıldız Benli, 2014 Dr. Tezi
- Hearne, G. R. Zhao, J. Dawe, A. M. Pischedda, V. Maaza, M. Nieuwoudt, M. K. Kibasomba, P. Nemraoui, O. Comins, J. D. Witcomb, M. J. Effect of grain size on structural transitions in anatase TiO₂: A Raman spectroscopy study at high pressure, Phys. Rev. B 70 (2004)
- H. Wang, Y. Li, X. Ba, L. Huang, Y. Yu, 2015. TiO₂ thin films with rutile phase prepared by DC magnetron co-sputtering at room temperature: effect of Cu incorporation, Appl. Surf. Sci. 34549–56
- Ismaail, Abdullah Mudher 2019 Çift Dielektrik Katmanlı (Al₂O₃-Bst) Tamamı Seramik Kapasitörün Üretimi Ve Karakterizasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta
- Ko, S. Y., Oh, J. I., Choi, J. C., Lee, K. H., Bae, Y. H., Jung, Y. C., & Lee, Y. H. 2004. MIM Capacitors Using ALD Al₂O₃ for RF IC and DRAM Applications. MRS Proceedings, 833, 2–6.
- Manifacier, J. C., Gasiot, J. and Fillard, J. P. 1976. A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing film. J. Phys. E: Sci. Instrum, 9, 1002-1004.
- Manifacier, J. C., Gasiot, J. and Fillard, J. P. 1976. A simple method for the determination of the optical constants n, k and the thickness of a weakly absorbing film. J. Phys. E: Sci. Instrum, 9, 1002-1004.
- Moss, T. S. 1954. The Interpretation of the Properties of Indium Antimonide. Proc. Phys. Soc. B, 67, 775-782.
- Möls, K., Aarik, L., Mändar, H., Kasikov, A., Niilisk, A., Rammula, R. ve Aarik, J. 2019. Influence of phase composition on optical properties of Ti : Dependence

of refractive index and band gap on formation of Ti -II phase in thin films. *Optical Materials*, 96, 109335.

- Neamen, D.A. 1997. *Semiconductor Physics and Devices*, 2nd ed. Mc Graw-Hill, 746.
- Nicollian, E.H. and Brews, J.R. 1982. *Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology*. John Wiley&Sons Publ., 906, New York.
- Norde, H. 1979. A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes With High Series Resistance. *J. Appl. Phys.*, 50; 5052-5053.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. 1988. *Metal-semiconductor Contacts*. Clarendon Press, 252, Oxford.
- Sahu, M. Biswas, P. Single-step processing of copper-doped titania nanomaterials in a flame aerosol reactor, *Nanoscale Res. Lett.* 6 (2011) 441-455.
- Sematech, I. 2000. Applications of Metal-Insulator-Metal (MIM) Capacitors. *Al SEMATECH Technology Transfer*, 12(Mim), 1–12. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/f89e/16bff9396031f251441eb73b8f708bb3699d.pdf>
- Shahnaz Akbar, Khalid Mahmood, M.F. Wasiq, M.Y. Nadeem, Muhammad Azhar Khan, Field and temperature dependent current-voltage characteristics of Al-Lu₂O₃-Al metal-insulator-metal diodes, *Volume 520*, 1 September 2017, Pages 112-115
- Sharma, B.L. and Purohit, R.K. 1974. *Semiconductor Heterojunctions*. Pergamon, 216 p., Oxford, New York.
- Sharma, S. Chaudhary, S. Kashyap, S. C and Sharma, S. K. Room temperature ferromagnetism in Mn doped TiO₂ thin films: Electronic structure and Raman investigations, *J. Appl. Phys.* 109 (2011)
- Singh, A. 1985. Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. *Solid-State Electron*, 28(3); 223-232.
- Sönmezoğlu, S. 2010 Nano Tanecikli TiO₂ İnce Filmlerin Yapısal, Morfolojik Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat
- Swanepoel, R. 1983. Determination of the thickness and optical constant of amorphous silicon. *J. Phys. E. Sci. Instrum*, 16, 1214-1222.
- Tallman, M. J., Santner, C., & Miller, R. B. 2006. MIM multilayer capacitor. *American Semiconductor, Inc.*, Boise, ID (US), 1(12).

- Taniguchi, N., "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'". Proceedings of the International Conference on Production Engineering, Tokyo, 1974, Part II.
- Tekin, Serdar Burhan. 2018 Yeni Nesil Uçucu Olmayan Bellekler İçin Hfo2 Tabanlı Rezistif Ram Aygıtlarının Analiz Ve Değerlendirmesi , Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mikro ve Nanoteknoloji, Ankara
- Turhan İ, TiO₂ Ve Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Hazırlanması Ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans, İstanbul Teknik Ün. 2000
- Weijtens, C. H. L. and Van Loon, P. A. C. 1991. Influence of annealing on the optical properties of indium tin oxide. Thin Solid Films, 196, 1-10.
- Wemple, S. H. and DiDomenico, M. 1969. Oxygen-Octahedra Ferroelectrics. II. Electro-optical and Nonlinear-Optical Device Applications. J. Appl. Phys., 40; 735-752.
- Yeşil, A. ve Babacan, Y. 2019 Elektronik Olarak Ayarlanabilir Memristör Tabanlı Chua Devresinin Gerçeklenmesi. Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 9(1): 121-129.