

**ANKARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

DOKTORA TEZİ

**PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLEN KATKILI SnO₂/Si
HETEROEKLEMLERİN İNCELENMESİ**

Sibel GÜRAKAR

FİZİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ANKARA

2015

Her hakkı saklıdır

TEZ ONAY SAYFASI

Sibel GÜRAKAR tarafından hazırlanan “**Püskürtme Yöntemiyle Büyütülen Katkılı SnO₂/Si Heteroeklemlerin İncelenmesi**” adlı tez çalışması 29.12.2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Tülay SERİN

Jüri Üyeleri

Başkan : Prof. Dr. Şemsettin ALTINDAL
Gazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü

Üye : Prof. Dr. Tülay SERİN
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. Bora ALKAN
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Prof. Dr. İlker DİNÇER
Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Üye : Doç. Dr. Abdullah YILDIZ
Yıldırım Beyazıt Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim DEMİR
Enstitü Müdürü

ETİK

Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

29.12.2015

Sibel GÜRAKAR

ÖZET

Doktora Tezi

PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE BÜYÜTÜLEN KATKILI SnO_2/Si HETEROEKLEMLERİN İNCELENMESİ

Sibel GÜRAKAR

Ankara Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Tülay SERİN

Bu çalışmanın amacı SnO_2/Si heteroeklem yapılarının elektriksel özelliklerinde yapının bir tabakası olan SnO_2 ince filmlerin Sb, Co, In, Cu ve Al atomlarıyla katkılanmasıyla oluşacak değişiklikleri incelemektir. Bu amaçla, katkılı SnO_2 ince filmler alt tabaka olarak cam ve Si kristalleri kullanılarak püskürtme yöntemiyle büyütülmüştür. X-ışınları toz kırınım yöntemiyle filmlerin yapı analizi yapılmıştır. Filmlerin optiksel ölçümleri yapılarak yasak enerji bant aralıkları ve optiksel sabitler belirlenmiştir. İnce filmlerin iki nokta yöntemiyle iletkenlik-sıcaklık ölçümlerinden aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve akım-iletim mekanizmaları belirlenmiştir. SnO_2/Si heteroeklem yapıların akım-gerilim-sıcaklık, kapasite-gerilim-sıcaklık ve kapasite-frekans-sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden yararlanarak yapı parametreleri bulunmuş ve oda sıcaklığında yapılara ait bant diyagramları belirlenmiştir.

Aralık 2015, 162 sayfa

Anahtar Kelimeler: İnce filmler, Heteroeklem, Püskürtme Yöntemi, Oksit Yarıiletkenler, SnO_2

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

THE INVESTIGATION OF DOPED SnO₂/Si HETEROJUNCTIONS GROWN BY SPRAY PYROLYSIS METHOD

Sibel GÜRAKAR

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

Supervisor: Prof. Dr. Tülay SERİN

The aim of this work is to investigate the changes that will occur on the electrical properties of SnO₂/Si heterojunction structures by doping SnO₂ thin films with Sb, Co, In, Cu and Al atoms which is one layer of structure. For this purpose, doped SnO₂ thin films were grown with the use of glass and Si crystals as substrate by spray pyrolysis method. The structural analyses of films were done with X-rays powder diffraction method. By doing optical measurements of films, forbidden energy band gaps and optical constants were determined. For thin films from conductivity-temperature measurements by two point probe method, activation energies were calculated and current-transport mechanisms were determined. Current-voltage-temperature, capacitance-voltage-temperature and capacitance-frequency-temperature measurements of SnO₂/Si heterojunction structures were done. By using the measurements done, the structural parameters were found and band diagrams belonging to structures were determined at room temperature.

December 2015, 162 pages

Key Words: Thin films, Heterojunction, Spray Pyrolysis, Oxide Semiconductor, SnO₂

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmam süresince hem bilimsel hem de hayatta bir yol gösterici olarak yanımda yer alan, ilgi, sevgi ve tecrübelerini benden esirgemeyen, benim için çok kıymetli ve saygı değer hocalarım sayın Prof. Dr. Tülay SERİN'e (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı) ve Prof. Dr. Necmi SERİN'e (Ankara Üniversitesi Fizik Mühendisliği Anabilim Dalı),

XRD çekimlerindeki yardımlarından dolayı başta sayın Prof. Dr. Yusuf Kağan KADIOĞLU (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı) olmak üzere, Ankara Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (YEBİM)'e, hem XRD ölçümlerindeki özverili ve fedakar çalışmalarından dolayı hem de deneysel çalışan bir insanı en iyi anlayan canım arkadaşım Arş. Gör. Kıymet DENİZ'e (Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı),

Bütün hayatım boyunca olduğu gibi bu tez çalışmam boyunca da beni kalplerinden destekleyen ve hayatımın en önemli iki varlığı olan çok sevdiğim annem Bircan GÜRAKAR'a ve babam Hüseyin Avni GÜRAKAR'a yaptıkları ve yaşattıkları her şey için teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamı 23.04.2011 tarihinde kaybettiğim ama desteğini ve gücünü her zaman yanımda hissettiğim babam Hüseyin Avni GÜRAKAR'a, varlığıyla bana yaşama gücü ve enerjisi veren annem Bircan GÜRAKAR'a ve 06.12.2015 tarihinde kaybettiğim yaşama sevincim, çok sevdiğim ve canımın içi dedem Baha İLKDOĞAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunar ve ithaf ederim.

Sibel GÜRAKAR
Ankara, Aralık 2015

İÇİNDEKİLER

TEZ ONAY SAYFASI.....	i
ETİK.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
SİMGELER DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER.....	4
2.1 İnce Filmlerin Geçirgenlik Spektrumları	4
2.2 İnce Filmlerin Kalınlıkları ve Kırılma İndisleri.....	6
2.3 Grafıksel Yöntem	8
2.4 Soğurma Katsayısı ve Sönüm Katsayısı.....	9
2.5 Eg Yasak Enerji Bant Aralığı	10
2.6 Wemple-DiDomenico Tek-Osilatör Modeli	11
2.7 Örgü Dielektrik Sabiti	13
2.8 Si Kristali Üzerinde Büyütölen İnce Filmlerin Optik Parametrelerinin Analizi	13
2.9 Cam Üzerinde Büyütölen İnce Filmlerin Taşıyıcı İletim Mekanizmaları	22
2.10 Heteroeklem Yapıların Bant Diyagramları	25
2.11 Hetero Yapıların Akım-Gerilim (I-V) Belirtkenleri	28
2.12 Hetero Yapıların Kapasite-Gerilim (C-V) Belirtkenleri	32
2.13 SnO ₂ /n-Si Yapısının Bant Diyagramının Belirlenmesi	36
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	38
3.1 SnO ₂ Malzemesi.....	38
3.2 Püskürtme Yöntemi	38
3.3 Alt tabakaların Temizlenmesi.....	39
3.4 SnO ₂ Çözeltisinin Hazırlanması	40
3.5 SnO ₂ İnce Filmlerin Kaplanması.....	41
3.6 Ölçüm Düzenekleri.....	41
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	44
4.1 SnO ₂ İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin XRD İle İncelenmesi.....	45
4.2 SnO ₂ İnce Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının İncelenmesi.....	54
4.3 SnO ₂ İnce Filmlerin Yansıma Spektrumlarının İncelenmesi	92
4.4 SnO ₂ İnce Filmlerin Taşıyıcı İletim Mekanizmalarının İncelenmesi	99
4.5 Oda Sıcaklığında SnO ₂ /Si Yapısının Elektriksel Belirtkenlerinin Belirlenmesi	105
4.6 Düşük Sıcaklıklarda SnO ₂ /Si Yapısının Elektriksel Belirtkenlerinin Belirlenmesi	115
4.7 SnO ₂ /n-Si Yapısının Bant Diyagramı.....	138
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	142
KAYNAKLAR	153
ÖZGEÇMİŞ.....	161

SİMGELER DİZİNİ

A	Diyot alanı
Al	Alüminyum
A_t	Soğurma
A^*	Etkin Richardson sabiti
c	Işık hızı
cm	Santimetre
C	Sığa
C_{HF}	Yüksek frekanstaki kapasite
C_{LF}	Düşük frekanstaki kapasite
C_i	Oksit tabakasının kapasitesi
C_{ma}	Kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasite
Co	Kobalt
Cu	Bakır
C_2H_5OH	Etanol
d	Film kalınlığı
$\bar{d}$	Ortalama film kalınlığı
D	Kristalit boyutu
d_{hkl}	hkl düzlemleri arasındaki uzaklık
e	Elektronun yükü
eV	Elektron volt
E_a	Aktivasyon enerjisi
E_d	Dispersiyon enerjisi
E_f	Fermi enerjisi
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_m	Maksimum elektrik alanı
E_o	Tek-osilatör enerjisi
f	Osilatör dayanıklılığı
g	Gram
G_{ma}	Kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen iletkenlik
h	Planck sabiti
HCl	Hidroklorik asit
hv	Foton enerjisi
I	Akım
I_0	Doyma akımı
$J_{tün}$	Tünelleme akım yoğunluğu
In	İndiyum
k	Boltzmann sabiti
k	Filmin sönüm katsayısı
k_1	Si alt tabaka üzerindeki ince filmin sönüm katsayısı
k_2	Si kristali alt tabakasının sönüm katsayısı
kg	kilogram
L	Tanecik boyutu
L_D	Debye uzunluğu
m	Yansımanın derecesi
maks	Maksimum

min	Minimum
ml	Mililitre
m_0	Durgun elektron kütlesi
m_0	Yaklaşık yansıma derecesi
m_1	İlk yansıma derecesi
M_{-1}	-1. Momentum
M_{-3}	-3. Momentum
m^*	Etkin kütle
n	İdealite faktörü
n	Filmin reel kırılma indisi
n	Yansımanın derecesi
n_a	Havanın kırılma indisi
n_1	Si kristali alt tabakasının kırılma indisi
N	Taşıyıcı yoğunluğu
N_C	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_D	Verici yoğunluğu
N'_D	Kuramsal verici yoğunluğu
N_{IS}	Tüketim bölgesi fermi seviyesindeki durum yoğunluğu
N_{Si}	Silisyum taşıyıcı yoğunluğu
N_{ss}	Ara yüzey durum yoğunluğu
n_a	Havanın kırılma indisi
n_c	Filmin kompleks kırılma indisi
$n^2(0)$	Optiksel dielektrik sabiti
nm	Nanometre
P	Yansımanın derecesi
Q_t	Tanecik sınırındaki durum yoğunluğu
r	Kompleks yansıma genliği
r_{01}	Hava-film ara yüzeyindeki yansıma genliği
r_{12}	Film-alt tabaka ara yüzeyindeki yansıma genliği
R	Yansıma
R_m	Minimum yansıma
R_M	Maksimum yansıma
R_s	Ara yüzeyin iç yansıması
R_s	Seri direnç
R'_s	Ara yüzeyin dış yansıması
s	Alt tabakanın kırılma indisi
Sb	Antimon
$SbCl_3$	Antimon tri-klorür
$SnCl_2 \cdot 5H_2O$	Kalay klorür
SnO_2	Kalay oksit
t	Alt tabakanın kalınlığı
T	Tesla
T	Filmden geçen ışığın geçirgenliği
T	Sıcaklık
T_M	Maksimum geçirgenlik
T_{M0}	Kalınlığı her yerde aynı olan filmin maksimum geçirgenliği
T_m	Minimum geçirgenlik
T_{m0}	Kalınlığı her yerde aynı olan filmin minimum geçirgenliği

T_s	Ara yüzeyin iç geçirgenliği
T'_s	Ara yüzeyin dış geçirgenliği
T_α	Girişim deseninden bağımsız geçirgenlik
T_0	Filme gelen ışığın geçirgenliği
V	Gerilim
V_d	Difüzyon potansiyeli
V_{etk}	Etkin engel yüksekliği
V_0	Kesme gerilimi
W_D	Tüketim bölgesi genişliği
x	Soğurum
z	Derinlik
α	Soğurum katsayısı
α_s	Alt tabakanın soğurum katsayısı
$\text{\AA}$	Angstrom
β	Pikin maksimum şiddetinin yarısındaki genişlik
Δd	Kalınlıktaki farklılık
ΔE_c	İletim bandındaki süreksizlik
ΔE_v	Değerlik bandındaki süreksizlik
$\Delta \phi_b$	Schottky engel alçalması
δ	Filmin içindeki faz farkı teriminin reel kısmı
δ	Oksit tabakasının kalınlığı
ϵ	Malzemenin dielektrik sabiti
ϵ_i	Oksit tabakasının elektriksel geçirgenliği
ϵ_L	Örgü dielektrik sabiti
ϵ_0	Serbest uzayın elektriksel geçirgenliği
ϵ_s	Silisyumun dielektrik sabiti
ϵ_∞	Optiksel dielektrik sabiti
η	Zayıflama parametresi
γ	Keyfi sabit sayı
Φ	İş fonksiyonu
ϕ_{b0}	Sıfır beslem engel yüksekliği
χ	Elektron ilgisi
λ	Dalga boyu
θ_{hkl}	Bragg yansıma açısı
σ	Elektriksel iletkenlik
μ	Mikro
x	Filmin içindeki faz farkı teriminin sanal kısmı
x_{r12}	Film-alt tabaka ara yüzeyindeki yansıma genliği
ω	Açısal frekans
ν	Frekans
$\%$	Yüzde

Kısaltmalar

AFM	Atomik Kuvvet Mikroskobu
-----	--------------------------

C-f	Kapasite-frekans
C-V	Kapasite-gerilim
I-V	Akım-gerilim
MS	Metal/Yarıiletken
MIS	Metal/Yalıtkan/Yarıiletken
MOS	Metal/Oksit/Yarıiletken
RCA	Radio Corporation of America
TE	Termoionik emisyon
UV-VIS	Ultraviole-Visible (Mor Ötesi ve Görünür Bölge)
XRD	X-ışını Kırınımı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Saydam alt tabaka üzerindeki ince film sistemi.....	4
Şekil 2.2 İnce filmin geçirgenlik spektrumu	5
Şekil 2.3 Si alt tabakası üzerindeki GaN ince filmin yansıma spektrumu	14
Şekil 2.4 Film–alt tabaka sisteminin modeli	15
Şekil 2.5 Si kristalinden ışığın yansıması ve geçişi	18
Şekil 2.6 Si kristalinin yansıma ve geçirgenlik spektrumları.....	19
Şekil 2.7 Dejenere filmlerin tanecik sınırındaki olası taşıyıcı geçiş mekanizmaları	23
Şekil 2.8 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramları.....	26
a. $V_{D1} < \Delta E_c$, b. $V_{D1} > \Delta E_c$	26
Şekil 2.9 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramı	26
Şekil 2.10 $\chi_1 < \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramları	27
a. $V_{D2} > \Delta E_c$, b. $V_{D2} < \Delta E_c$	27
Şekil 2.11 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramı	28
Şekil 3.1 Deney düzeneği.....	39
Şekil 3.2 UV-VIS-NIR spektrometresi	41
Şekil 3.3 Elektriksel ölçüm sistemi	42
Şekil 3.4 LF empedans analizörü	43
Şekil 4.1 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları	46
Şekil 4.2 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları.....	46
Şekil 4.3 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları.....	47
Şekil 4.4 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları	47
Şekil 4.5 n-Si üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları.....	48
Şekil 4.6 n-Si üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları	48
Şekil 4.7 p-Si üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları.....	49
Şekil 4.8 p-Si üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin XRD spektrumları	49
Şekil 4.9 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin geçirme spektrumları	54
Şekil 4.10 SnO ₂ ince filmin zarf içine alınmış geçirme spektrumu	55
Şekil 4.11 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin n-λ grafikleri	58
Şekil 4.12 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin 1/2-n/λ grafikleri.....	59
Şekil 4.13 Cam üzerindeki SnO ₂ ince filmin 1/2-θ grafiği	60
Şekil 4.14 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin k-λ grafikleri	60
Şekil 4.15 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin (αhv) ² -hv grafikleri.....	61
Şekil 4.16 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin (n ² -1) ⁻¹ -(hv) ² grafikleri.....	62
Şekil 4.17 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin n ² -λ ² grafikleri.....	63
Şekil 4.18 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin a. ε ₁ -λ, b. ε ₂ -λ grafikleri.....	64
Şekil 4.19 Cam üzerindeki Sb:SnO ₂ ince filmlerin a. σ ₁ -λ, b. σ ₂ -λ grafikleri	65
Şekil 4.20 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin geçirme spektrumları	66
Şekil 4.21 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin n-λ grafikleri	67
Şekil 4.22 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin 1/2-n/λ grafikleri.....	68
Şekil 4.23 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin k-λ grafikleri.....	69
Şekil 4.24 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin (αhv) ² -hv grafikleri	69
Şekil 4.25 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin (n ² -1) ⁻¹ -(hv) ² grafikleri.....	70
Şekil 4.26 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin n ² -λ ² grafikleri	71
Şekil 4.27 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin a. ε ₁ -λ, b. ε ₂ -λ grafikleri.....	72

Şekil 4.28 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , b. σ_2 - λ grafikleri	73
Şekil 4.29 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin geçirme spektrumları	74
Şekil 4.30 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin n- λ grafikleri	76
Şekil 4.31 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin $l/2$ -n/ λ grafikleri.....	77
Şekil 4.32 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin k- λ grafikleri	77
Şekil 4.33 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ -h ν grafikleri.....	78
Şekil 4.34 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}$ -(h ν) ² grafikleri.....	79
Şekil 4.35 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin n ² - λ^2 grafikleri	80
Şekil 4.36 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri.....	81
Şekil 4.37 Cam üzerindeki In:SnO ₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , ve b. σ_2 - λ grafikleri.....	82
Şekil 4.38 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin geçirme spektrumları	83
Şekil 4.39 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin n- λ grafikleri.....	85
Şekil 4.40 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin $l/2$ -n/ λ grafikleri	86
Şekil 4.41 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin k- λ grafikleri.....	86
Şekil 4.42 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ -h ν grafikleri	87
Şekil 4.43 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}$ -(h ν) ² grafikleri	88
Şekil 4.44 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin n ² - λ^2 grafikleri	89
Şekil 4.45 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri	90
Şekil 4.46 Cam üzerindeki Co:SnO ₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , b. σ_2 - λ grafikleri.....	91
Şekil 4.47 SnO ₂ /n-Si ince filmlerin yansıma spektrumları	92
Şekil 4.48 SnO ₂ /n-Si numunesinin zarf içine alınmış yansıma spektrumu.....	93
Şekil 4.49 n-Si üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin n- λ grafikleri	95
Şekil 4.50 n-Si üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin $l/2$ -n/ λ grafikleri	96
Şekil 4.51 n-Si kristalinin yansıma ve geçirgenlik spektrumları	97
Şekil 4.52 SnO ₂ /n-Si ince filmlerin k- λ grafikleri	98
Şekil 4.53 n-Si üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ -h ν grafikleri.....	98
Şekil 4.54 Sb:SnO ₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri.....	99
Şekil 4.55 Cu ve Al:SnO ₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri.....	101
Şekil 4.56 In:SnO ₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri.....	102
Şekil 4.57 Co:SnO ₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri	103
Şekil 4.58 n-Si üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri.....	104
Şekil 4.59 Al/SnO ₂ /n-Si yapılarının lnI-V grafikleri	105
Şekil 4.60 Al/SnO ₂ /p-Si yapılarının lnI-V grafikleri	106
Şekil 4.61 Al/SnO ₂ , % 5 In ve % 3 Co:SnO ₂ /n-Si yapılarının grafikleri.....	107
a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I.....	107
Şekil 4.62 Al/% 3 In ve % 5 Co:SnO ₂ /n-Si yapılarının grafikleri	108
a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I.....	108
Şekil 4.63 Al/SnO ₂ , % 3 ve % 5 Co:SnO ₂ /p-Si yapılarının grafikleri	109
a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I.....	109
Şekil 4.64 Al/% 3 ve % 5 In:SnO ₂ /p-Si yapılarının grafikleri	110
a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I.....	110
Şekil 4.65 a. Al/SnO ₂ /n-Si ve b. Al/SnO ₂ /p-Si yapılarının F (V)-V grafikleri	111
Şekil 4.66 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki C-V grafikleri.....	113
Şekil 4.67 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki G-V grafikleri	113
Şekil 4.68 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki R _s -V grafikleri.....	114
Şekil 4.69 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki R _s -f grafikleri	114

Şekil 4.70 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri.....	116
Şekil 4.71 Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı: a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri	118
Şekil 4.72 Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı: a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri	120
Şekil 4.73 Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri	122
Şekil 4.74 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri	124
Şekil 4.75 a. Al/SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapıları için ϕ_{b0} ve n'nin sıcaklıkla değişimleri	126
Şekil 4.76 a. Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapıları için ϕ_{b0} ve n'nin sıcaklıkla değişimleri	127
Şekil 4.77 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısı için ϕ_{b0} ve n'nin sıcaklıkla değişimleri	128
Şekil 4.78 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapıları için n-1000/T grafikleri	128
Şekil 4.79 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısı için $\ln(I_0/T^2)$ -1000/T ve 1000/nT grafikleri	129
Şekil 4.80 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri.....	129
Şekil 4.81 a. Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri	130
Şekil 4.82 a. Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri	131
Şekil 4.83 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C ⁻² -V grafikleri ...	132
Şekil 4.84 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki R _s -V grafikleri.....	135
Şekil 4.85 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri	135
Şekil 4.86 a. Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri	136
Şekil 4.87 a. Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al, b. Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri	137
Şekil 4.88 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının bant diyagramı	139
Şekil 4.89 Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının bant diyagramı	139
Şekil 4.90 Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının bant diyagramı	140
Şekil 4.91 Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının bant diyagramı.....	140
Şekil 4.92 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının bant diyagramı.....	141

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 4.1 Cam alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO ₂ ince filmler.....	44
Çizelge 4.2 n ve p-Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO ₂ ince filmler.....	45
Çizelge 4.3 Cam üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin örgü sabitleri ve oranları.....	51
Çizelge 4.4 Si kristali üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin örgü sabitleri ve oranları.....	52
Çizelge 4.5 n-Si kristali üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin kristalit boyutları	52
Çizelge 4.6 p-Si kristali üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin kristalit boyutları	53
Çizelge 4.7 Cam üzerindeki SnO ₂ ince filmlerin kristalit boyutları	53
Çizelge 4.8 SnO ₂ :Sb numunelerinin λ , T _M , T _m , T _{M0} ve T _{m0} değerleri	56
Çizelge 4.9 SnO ₂ :Sb numunelerinin λ , n ₁ , d ₁ , m, d ₂ , n ₂ ve Δd değerleri.....	57
Çizelge 4.10 SnO ₂ :Sb numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertebe değerleri	59
Çizelge 4.11 Sb:SnO ₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri.....	62
Çizelge 4.12 Sb:SnO ₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m* değerleri.....	63
Çizelge 4.13 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerinin λ , T _M , T _m , T _{M0} ve T _{m0} değerleri.....	66
Çizelge 4.14 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerinin λ , n ₁ , d ₁ , m, d ₂ , n ₂ ve Δd değerleri	67
Çizelge 4.15 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertebe değerleri	68
Çizelge 4.16 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri	70
Çizelge 4.17 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m* değerleri.....	71
Çizelge 4.18 In:SnO ₂ numunelerinin λ , T _M , T _m , T _{M0} ve T _{m0} değerleri.....	74
Çizelge 4.19 In:SnO ₂ numunelerinin λ , n ₁ , d ₁ , m, d ₂ , n ₂ ve Δd değerleri	75
Çizelge 4.20 In:SnO ₂ numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertebe değerleri.....	76
Çizelge 4.21 In:SnO ₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri	79
Çizelge 4.22 In:SnO ₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m* değerleri.....	80
Çizelge 4.23 Co:SnO ₂ numunelerinin λ , T _M , T _m , T _{M0} ve T _{m0} değerleri.....	83
Çizelge 4.24 Co:SnO ₂ numunelerinin λ , n ₁ , d ₁ , m, d ₂ , n ₂ ve Δd değerleri	84
Çizelge 4.25 Co:SnO ₂ numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertebe değerleri.....	85
Çizelge 4.26 Co:SnO ₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri	88
Çizelge 4.27 Co:SnO ₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m* değerleri	89
Çizelge 4.28 SnO ₂ /n-Si numunelerinin optik parametreleri	94
Çizelge 4.29 SnO ₂ /n-Si numunelerinin d ve m değerleri	96
Çizelge 4.30 SnO ₂ /n-Si numunelerinin optiksel bant aralıkları	99
Çizelge 4.31 Sb:SnO ₂ numunelerinin L, N, L _D , V _B , l ₂ , Q _t ve V _{etk} değerleri.....	100
Çizelge 4.32 Cu ve Al:SnO ₂ numunelerinin L, N, L _D , V _B , l ₂ , Q _t ve V _{etk} değerleri.....	101
Çizelge 4.33 In:SnO ₂ numunelerinin L, N, L _D , V _B , l ₂ , Q _t ve V _{etk} değerleri.....	102
Çizelge 4.34 Co:SnO ₂ numunelerinin L, N, L _D , V _B , l ₂ , Q _t ve V _{etk} değerleri	103
Çizelge 4.35 n-Si üzerindeki SnO ₂ numunelerinin L, N, L _D , V _B , l ₂ , Q _t ve V _{etk} değerleri.....	104
Çizelge 4.36 Al/SnO ₂ /n-Si yapılarının oda sıcaklığındaki I-V belirtkenleri	112
Çizelge 4.37 Al/SnO ₂ /p-Si yapılarının oda sıcaklığındaki I-V belirtkenleri	112
Çizelge 4.38 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	117
Çizelge 4.39 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri.....	117

Çizelge 4.40 Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	119
Çizelge 4.41 Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	119
Çizelge 4.42 Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	121
Çizelge 4.43 Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	121
Çizelge 4.44 Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	123
Çizelge 4.45 Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	123
Çizelge 4.46 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	125
Çizelge 4.47 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri	125
Çizelge 4.48 Al/% 3 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri.....	133
Çizelge 4.49 Al/% 5 Co:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri.....	133
Çizelge 4.50 Al/% 3 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri.....	134
Çizelge 4.51 Al/% 5 In:SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri.....	134
Çizelge 4.52 Al/SnO ₂ /n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı N _{IS} değerleri.....	138

1. GİRİŞ

Metal oksit yarıiletken (MOS)-tipi Schottky diyotlar son yıllarda çok ilgi çekmektedirler. Yeni yarıiletken malzemelerin karakterizasyonunda önemli araştırma alanlarından ve aynı zamanda bu yapıların üretilmesi teknolojik olarak kullanışlı cihazların inşasında önemli rol oynar. Uygulamada, ideal davranıştan sapmalara neden olan birkaç olası hata kaynağı vardır ve bu etkiler dikkate alınmalıdır. Bunlar metal ve yarıiletken arasındaki oksit tabakasının, ara yüzey durum yoğunluğunun ve seri direncin etkilerini içerir (Nagatomo vd. 1979). Nagatomo vd. (1979) tarafından Al/SnO₂/n-tipi Si Schottky diyotlarının güneş pilleri olarak kullanılabilmesinde I-V, C-V karakteristiklerinin, ara yüzey durumlarının ve seri direncin rolü araştırılmıştır. Bu tip kontakta ara yüzeyde oksit tabakası olduğundan bunlar MOS diyotlar olarak belirlenirler (Barış 2014). Al/SnO₂/n-tipi Si Schottky diyotlarının seri direnç ve ara yüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılımı Altındal vd. (2003) tarafından belirlenmiştir.

1977 yılında yapılan diğer bir çalışmada, Nash ve Anderson SnO₂/Si heteroeklem güneş pillerinde meydana gelen bozulma mekanizmalarının, bu sistemde doğal olup olmadığını, doğru işlem veya tasarımla engellenip engellenemeyeceğini araştırmışlardır. Bu yapılardaki bozulmaların seri direncin artması ve zamanla açık devre geriliminde meydana gelen değişikliklerden oluştuğunu belirtmişlerdir. Pratik uygulamalar için yeterli olan ömür sürelerine sahip SnO₂/Si heteroeklem güneş pillerinin elde edilebilmesi için, ara yüzey tabakasının yüksek direnci küçük değerlere sınırlandırılmalıdır.

1990 yılında Peršin vd. poli-Si/SnO₂ heteroeklemlerin elektriksel ve foto voltaik özelliklerini araştırmış. DC-gerilim karakteristikleri 90-360 K sıcaklık aralığında karanlıkta, I-V karakteristikleri güneş ışığında 300 K'de çıkış I-V eğrileri ile birlikte ölçülmüştür. poli-Si/SnO₂ heteroeklemlerin foto voltaik özelliklerinin SnO₂'ye metal ızgaralı ön kontak uygulayarak ve daha düşük tabaka direncine sahip daha kalın SnO₂ filmler kullanarak iyileştirilebileceğini belirlediler.

2010 yılında, Juybari vd. tavlama işleminin ve orta tabakanın, p-n heteroeklemlerin özellikleri üzerine etkilerini araştırdı. Bir orta tabaka eklemenin, düz beslem eşik ve ters beslem kırılma geriliminin artmasına ve tavlama sıcaklığı 700 °C'ye doğru arttıkça, düz beslem eşik geriliminin artması ve ters beslem kırılma geriliminin azalmasına neden olduğunu buldu.

Maleki ve Rozati (2013), alt tabakanın tipinin ve büyütme sıcaklığının Si/SnO₂ diyotların özellikleri üzerine etkisini araştırmış. Yüksek sıcaklıklarda, tek-kristal Si üzerinde büyütülen numunelerin polikristal Si üzerinde büyütülenlerden daha düşük dirence sahip olduklarını belirledi. XRD desenlerinden, daha yüksek sıcaklıklarda büyütülen numunelerin daha iyi kristallendiğini elde etti. I-V ölçümleri, polikristal Si/SnO₂ diyotlar için artan alt tabaka sıcaklığı ile seri direncin ve engel yüksekliğinin azaldığını, tek-kristal Si içinse bu parametrelerin artacağını gösterdi.

SnO₂ ince filmler teknolojik açıdan önemli olan geçirgen ve elektriksel olarak iletken oksit (TCO) malzemeler arasında yer almaktadır (Huang vd. 2009). İletken oldukları kadar geçirgen de olmalarına ilaveten silikon gibi yarıiletkenlerle çok yüksek potansiyel engeli oluşturma kabiliyetine sahiptirler. Bu çekici özellikleriyle optoelektronik cihazlarda, n-p ve n-n heteroeklem yapılarında ve güneş pillerinde ön kontak olarak kullanılmaktadır. SnO₂ ince filmler; katı hal gaz sensörleri (Ling ve Tsai 2006), algılayıcı yüzeyler, güneş pilleri (Khrypunov vd. 2006), şeffaf elektrotlar, manyetik medya kaydı, organik ışık saçan diyotlar (Tuğluoğlu 2007), fototransistörler, düz panel ekranlar ve dokunmatik ekranlar (Kikuchi vd. 2002) gibi geniş uygulama alanlarına sahip olması nedeniyle teknolojik olarak en önemli metal oksit malzemeler arasında yer almaktadır.

Katkılı veya katkısız SnO₂ ince filmler, kimyasal buhar biriktirme, metal organik biriktirme, radyo frekans sputtering, magnetron sputtering, hidrotermal yöntem, spin kaplama, sol-jel daldırma ve püskürtme gibi çeşitli yöntemlerle büyütülebilirler. SnO₂ ince filmlerin yapısal, elektronik iletim ve optiksel özellikleri; büyütülme yöntemine, yöntemin koşullarına, katkı atomlarının türüne ve sayısına bağlı olarak değişmektedir. Püskürtme yöntemi; farklı katkı atomlarının eklenmesinin kolay olduğu, tekrarlanabilir

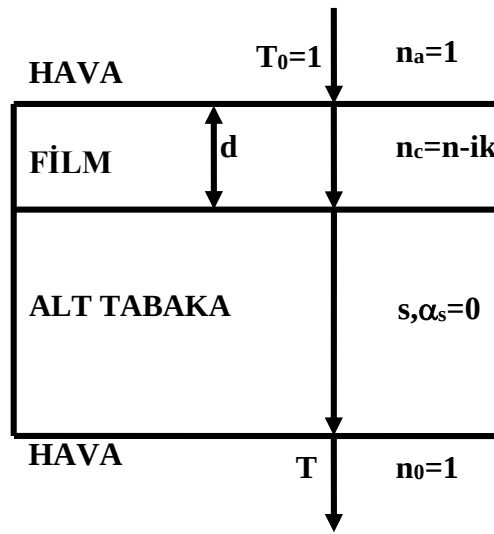
üretimin sağlandığı, endüstri ve güneş pili uygulamaları için gereken homojen geniş yüzey kaplamalarında; yüksek büyütme oranı ve kütle üretim kapasitesine sahip filmlerin elde edilebildiği, basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu nedenlerle farklı yöntemler arasında püskürtme yöntemi katkılı SnO_2 ince filmlerin büyütülmesi için en uygun olanıdır. Stokiyometrik SnO_2 mükemmel bir yalıtkandır. Fakat malzeme püskürtme yöntemi ile büyütüldüğünde yarı-metalik olur.

Bu tez çalışmasında, daha önce yapılan araştırmalardan farklı olarak hem farklı atomlarla hem de farklı oranlarda katkılı SnO_2/Si heteroeklemler incelenmiştir. Bunun için söz konusu ince filmler hem cam hem de Si alt tabakalar üzerinde püskürtme yöntemiyle büyütülmüştür. Tüm numunelerin yapısal analizleri X-ışınları toz kırınım (XRD) yöntemiyle yapılmıştır. Ayrıca filmlerin optiksel ölçümleri alınmış, yasak enerji bant aralığı değerleri ve optiksel sabitler bulunmuştur. SnO_2 ince filmlerin farklı sıcaklıklarda yapılan iletkenlik ölçümlerinden yararlanarak aktivasyon enerjileri ve akım iletim mekanizmaları belirlenmiştir. SnO_2 ince filmleri büyütürken Si kristali alt tabaka olarak kullanılarak, heteroeklem yapılar elde edilmiştir. Bu yapıların akım-gerilim-sıcaklık, kapasite-gerilim-sıcaklık ve kapasite-frekans-sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümlerden yapıya etki eden parametreler belirlenerek, farklı atomlarla ve farklı oranlarda katkılamanın söz konusu parametrelere etkisi araştırılmıştır. Ayrıca alınan ölçümlerden yararlanarak yapılara ait bant diyagramları oda sıcaklığı için çizilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1 İnce Filmlerin Geçirgenlik Spektrumları

Belli kalınlıktaki saydam bir alt tabaka üzerindeki bir ince filme gelen ışığın geçirgenliğinin 1 ($T_0=1$) ve filmde geçen ışığın geçirgenliğinin T olduğu bir sistem şekil 2.1’de gösterilmiştir.

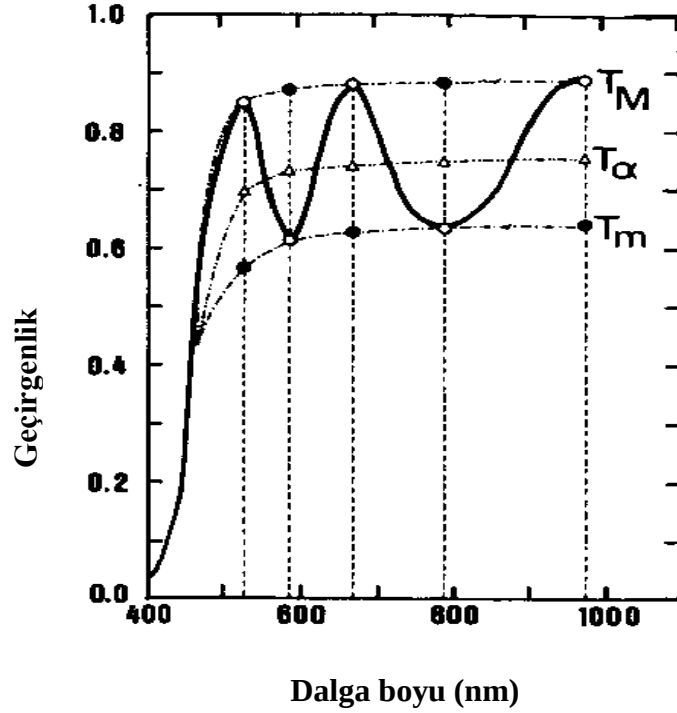


Şekil 2.1 Saydam alt tabaka üzerindeki ince film sistemi

İnce film d kalınlığına ve $n_c=n-ik$ ile verilen kompleks kırılma indisine sahiptir. Burada n kırılma indisinin reel, sönüm katsayısı olan k ise sanal kısmını göstermektedir. Saydam alt tabaka, filmin d kalınlığından birkaç kat daha büyük bir kalınlık değerine, s kırılma indisine ve $\alpha_s=0$ olan soğurum katsayısına sahiptir. Sistemi çevreleyen havanın kırılma indisi $n_a=1$ ’dir.

Belli kalınlıktaki bir saydam alt tabaka üzerine kaplanan ince filmin geçirgenlik spektrumu şekil 2.2’de verilmektedir. Piklerin maksimum (T_M) ve minimum (T_m) noktalarından oluşan bu spektrum bir girişim desenine benzetilebilir. Eğer d kalınlığı filmin her yerinde aynı değere sahipse, girişim etkileri şekil 2.2’de kalın bir çizgiyle gösterilen spektrumun daha belirgin bir hal almasına neden olur. Eğer ince film kalınlığı

d; filmin her yerinde aynı değilse, bütün girişim etkileri yok edilir ve şekil 2.2’de kesikli çizgi ile gösterilen girişim deseninden bağımsız bir T_α geçirgenlik eğrisi elde edilir.



Şekil 2.2 İnce filmin geçirgenlik spektrumu

Girişim saçakları için temel denklem aşağıdaki gibi verilir:

$$2nd = m\lambda \quad (2.1)$$

Burada m maksimumlar için tam sayı, minimumlar için yarı tamsayıdır. n kırılma indisini göstermektedir. Denklem (2.1) n ve d 'nin çarpılmasıyla ilgili bilgi içerir ancak n ve d 'yi bu eşitlikten ayrı ayrı belirlemenin bir yolu yoktur.

Manifacier vd. (1976) tarafından yapılan analizler T_M ve T_m 'nin λ 'nın sürekli bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Swanepoel'un (1983) yönteminde, girişim deseni bir zarf içine alınır. Zarfın üst kısmı T_M ile alt kısmı T_m ile belirtilir. Bu değerler dalga boyuna bağlı olarak bulunur. Böylece herhangi bir λ için, T_M 'ye karşılık gelen bir T_m değeri vardır.

2.2 İnce Filmlerin Kalınlıkları ve Kırılma İndisleri

Denklem (2.2), zayıf ve orta soğurma bölgesinde T_M ve T_m 'den $n(\lambda)$ 'nın hesaplanması için kullanılabilir.

$$n_1 = \left[N + (N^2 - s^2)^{1/2} \right]^{1/2} \quad (2.2)$$

Burada s , saydam alt tabakanın kırılma indisidir. N aşağıda verildiği gibidir:

$$N = 2s \frac{T_{M0} - T_{m0}}{T_{M0} T_{m0}} + \frac{s^2 + 1}{2} \quad (2.3)$$

Burada T_{M0} ve T_{m0} , kalınlığı her yerde aynı olan bir filmin belirli bir dalga boyundaki maksimum ve karşılık gelen minimum geçirgenliğini göstermektedir. Kalınlığı her yerde aynı olan filmin T_{M0} ve T_{m0} zarflarını belirlemek için, kalınlığı her yerde aynı olmayan bir filmin spektrumunun kalınlık, kırılma indisi ve soğurma katsayısı gibi aynı optik sabitlerle kalınlığı her yerde aynı olan filmin spektrumuna dönüştürülmesi gerekir. Kalınlığı her yerde aynı olan olmayan filmin deneysel T_M ve T_m zarfları ile kalınlığı her yerde aynı olan filmin T_{M0} ve T_{m0} değerleri arasındaki ilişki Swanepoel (1984) tarafından aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$T_{M,m} = \frac{(T_{M0} T_{m0})^{1/2}}{\theta} \tan^{-1} \left[\left(\frac{T_{M0}}{T_{m0}} \right)^{\pm 1/2} \tan \theta \right] \quad (2.4)$$

Burada (+) T_M ve (-) T_m durumunu göstermektedir. Denklem (2.4)'ün geçerli olduğu aralık ve θ ifadesi sırasıyla şöyledir:

$$0 < \theta < \pi/2 \text{ veya } 0 < \Delta d < \lambda/4n \quad (2.5)$$

$$\theta=2\pi n\Delta d/\lambda \quad (2.6)$$

Kalınlığı her yerde aynı olan filmin T_{M0} ve T_{m0} değerlerini geçirgen bölgede belirlemek için, öncelikle T_{m0} ve θ değerlerinin elde edilmesi gerekir. İlk yaklaşım olarak T_{M0} aşağıdaki denklemden bulunur:

$$T_{M0} = T_s = \frac{2s}{s^2 + 1} \quad (2.7)$$

Kalınlığı her yerde aynı olmayan filmin T_M ve T_m ile bulunan T_{M0} değerlerinin (2.4) denkleminde yerine yazılmasıyla T_{M0} ve T_{m0} elde edilmiş olur. (2.4) denkleminde bulunan iki eşitliğin çözülmesi için Márquez vd. (1992) tarafından belirtilen aynı anda ve kısa sürede köke yakınsayan bir algoritma (Newton-Raphson iterasyonu) kullanılır. θ , T_M ve T_m belirlendikten sonra, bu değerler denklem (2.4)'te tekrar kullanılarak T_{M0} ve T_{m0} elde edilir.

Elde edilen T_{M0} ve T_{m0} önce (2.3) denkleminde yerine yazılarak N ve sonra da (2.2) denkleminde n_1 bulunur. Kırılma indisinin bu ilk hesabının doğruluğu filmin kalınlığı hesaplandıktan sonra arttırılabilir. n_1 ve n_2 iki ardışık maksimum ve minimum (veya minimum ve maksimum) λ_1 ve λ_2 dalga boylarındaki kırılma indislerine karşılık gelmektedir. Bu durumda filmin kalınlığını veren ifade şu şekildedir (Minkov 1989):

$$d_1 = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4(\lambda_1 n_2 - \lambda_2 n_1)} \quad (2.8)$$

(2.8) denklemini ile d_1 değerleri ve bu değerlerin ortalaması olan $\bar{d}_1$ belirlenebilir. $\bar{d}_1$ ve n_1 değerleri (2.9) denkleminde yerine yazılarak farklı ekstremumlar için yansımanın derecesini gösteren m_0 hesaplanabilir:

$$m_0 = \frac{2n_1 \bar{d}_1}{\lambda} \quad (2.9)$$

Her ekstremum noktasına ait olan m tamsayı veya yarı tamsayı değerleri belirlenir. m ve n_1 değerleri (2.10) denkleminde yerine yazılarak yeni bir d_2 kalınlığı hesaplanır ve bu değerlerin ortalaması olan $\overline{d_2}$ bulunur. Böylece d 'nin gerçek değerine daha büyük bir doğrulukla yaklaşılr.

$$d_2 = \frac{m\lambda}{2n_1} \quad (2.10)$$

m ve d 'nin kesin değerleri (2.11) denkleminde yerine yazılarak her λ için n bulunabilir. Böylece yeni bir n_2 kırılma indisinin değerleri elde edilir.

$$n_2 = \frac{m\lambda}{2d_2} \quad (2.11)$$

n_2 kırılma indisinin değerleri (2.12) denklemi ile verilen iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntısına fit edilebilir. Bu bağıntı kullanılarak daha kısa dalga boylarına ekstrapole edilmesiyle spektrumu genelleştiren bir teorik fonksiyon elde edilir (Moss 1959).

$$n(\lambda) = a + b/\lambda^2 \quad (2.12)$$

Burada a ve b sabitleri göstermektedir. $n-1/\lambda^2$ grafiğinin eğiminden b ve grafiğin n eksenine ekstrapole edilmesiyle a sabitlerinin değerleri bulunmaktadır. a ve b sabitleri bilindiğinde bağıntı yardımıyla herhangi bir dalga boyu için kırılma indisinin değeri daha büyük bir doğrulukla bulunabilmektedir.

2.3 Grafiksel Yöntem

m ve d değerleri basit bir grafiksel yöntem kullanılarak da elde edilebilir. İlk ekstremum noktasına ait olan yansıma derecesi m_1 olsun. Denklem (2.1) spektrumun ekstremumları için yeniden yazılabilir:

$$2nd = (m_1 + l/2)\lambda \quad l = 0,1,2,3... \quad (2.13)$$

(2.13) ifadesinin düzenlenmesiyle aşağıdaki denklem elde edilir:

$$l/2 = 2d(n/\lambda) - m_1 \quad (2.14)$$

(2.14) ile verilen ifade doğrusal bir formdadır. Eğer $l/2 - n/\lambda$ grafiği çizilirse, eğimi $2d$ değerine sahip ve $l/2$ eksenini $-m_1$ değerinde kesen bir doğru elde edilir. Böylece d ve m_1 değerleri belirlenmiş olur.

(2.6) denkleminin (2.14) denkleminde yerine yazılmasıyla şu ifade elde edilir:

$$\frac{l}{2} = \frac{\bar{d}}{\pi \Delta d} \theta - m_1 \quad (2.15)$$

Burada Δd kalınlıktaki farklılığı göstermektedir. Eğer $l/2 - \theta$ grafiği geçirgen bölge için çizilirse, $l/2$ eksenini kestiği noktadan m_1 ve eğiminden, bulunan ortalama kalınlık değeri kullanılarak Δd elde edilir.

2.4 Soğurma Katsayısı ve Sönüm Katsayısı

Kırılma indisi değerleri Cauchy dispersiyon bağıntısından bilindiği için soğurum $x(\lambda)$, şekil 2.2’de verilen girişim deseninden bağımsız geçirgenlik eğrisi T_α ’dan Swanepoel (1983) tarafından geliştirilen ve optiksel çalışmalarda sıklıkla kullanılan eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$x = \frac{A - (A^2 - 4T_\alpha^2 BC)^{1/2}}{2T_\alpha C} \quad (2.16)$$

Burada A, B ve C bağıntıları şu şekildedir:

$$A = 16n^2s \quad (2.17)$$

$$B = (n+1)^3(n+s^2) \quad (2.18)$$

$$C = (n-1)^3(n-s^2) \quad (2.19)$$

x soğurum eşitliği denklem (2.20) ile verildiği gibidir:

$$x = \exp(-\alpha d) \quad (2.20)$$

(2.20) denkleminden, soğurum katsayısı α çekilirse

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{x}\right) \quad (2.21)$$

bağıntısı elde edilir. d ve (2.16) denkleminden bulunan x değerleri bilindiğinden α bu bağıntıdan hesaplanabilir.

Sönüm katsayısı k, α ve λ değerlerinin (2.22) bağıntısında kullanılmasıyla bulunabilir.

$$k = \frac{\alpha\lambda}{4\pi} \quad (2.22)$$

2.5 E_g Yasak Enerji Bant Aralığı

(2.21) denkleminden bulunan soğurum katsayısı kullanılarak yasak enerji bant aralığı Tauc bağıntısından hesaplanır (Tauc 1972).

$$\alpha h\nu = \alpha_0 (h\nu - E_g)^n \quad (2.23)$$

Burada $h\nu$: Foton enerjisi, α_0 : Sabit ve n sayısı direkt, yasaklı direkt, indirekt ve yasaklı indirekt geçişleri gösterir ve sırasıyla $n=0.5, 1.5, 2$ veya 3 olabilir.

2.6 Wemple-DiDomenico Tek-Osilatör Modeli

Kırılma indisinin frekansa (ν) bağıllığı Wemple-DiDomenico (WDD) tek-osilatör modeli dispersiyon bağıntısı yardımıyla bulunabilir. (Wemple ve DiDomenico 1971)

$$n^2(h\nu)-1 = \frac{E_o E_d}{E_o^2 - (h\nu)^2} \quad (2.24)$$

Burada E_o tek-osilatör enerjisini ve E_d dispersiyon enerjisini göstermektedir. (2.24) denkleminin yeniden düzenlenmesiyle (2.25) ile verilen şekli elde edilir:

$$\left(n^2(h\nu)-1\right)^{-1} = \frac{E_o}{E_d} - \frac{(h\nu)^2}{E_o E_d} \quad (2.25)$$

$(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafiğinden elde edilen doğru yardımıyla E_o ve E_d değerleri belirlenebilir. Doğrunun eğimi $(E_o E_d)^{-1}$ ve düşey eksen kestiği nokta E_o/E_d değerine sahiptir.

Kırılma indisinin $h\nu=0$ durumundaki değeri (2.24) ifadesinde bu şartın yerine yazılmasıyla elde edilen (2.26) denklemi yardımıyla bulunabilir.

$$n(0) = \sqrt{1 + \frac{E_d}{E_o}} \quad (2.26)$$

$n^2(0)$ veya ϵ_∞ optik dielektrik sabitini göstermektedir ve bu ifadenin bağıntısı (2.26) denkleminin karesinin alınmasıyla elde edilir.

$$n^2(0) = 1 + \frac{E_d}{E_o} = \epsilon_\infty \quad (2.27)$$

Osilatör dayanıklılığı f , şu şekilde verilir:

$$f = E_o E_d \quad (2.28)$$

Tek-osilatör modelinin E_o ve E_d parametreleri optik spektrumun M_{-1} ve M_{-3} momentumlarına iki ifadeyle bağlıdır:

$$E_o^2 = \frac{M_{-1}}{M_{-3}} \quad (2.29)$$

$$E_d^2 = \frac{M_{-1}^3}{M_{-3}} \quad (2.30)$$

Bu iki ifadenin yeniden düzenlenmesiyle aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$M_{-1} = \frac{E_d}{E_o} \quad (2.31)$$

$$M_{-3} = \frac{E_d}{E_o^3} \quad (2.32)$$

Bu bağıntılarda bilinen E_o ve E_d değerlerinin yerine yazılmasıyla M_{-1} ve M_{-3} momentumları hesaplanır.

2.7 Örgü Dielektrik Sabiti

Kırılma indisinin örgü dielektrik sabitine ϵ_L bağılılığı şu denklemle verilir:

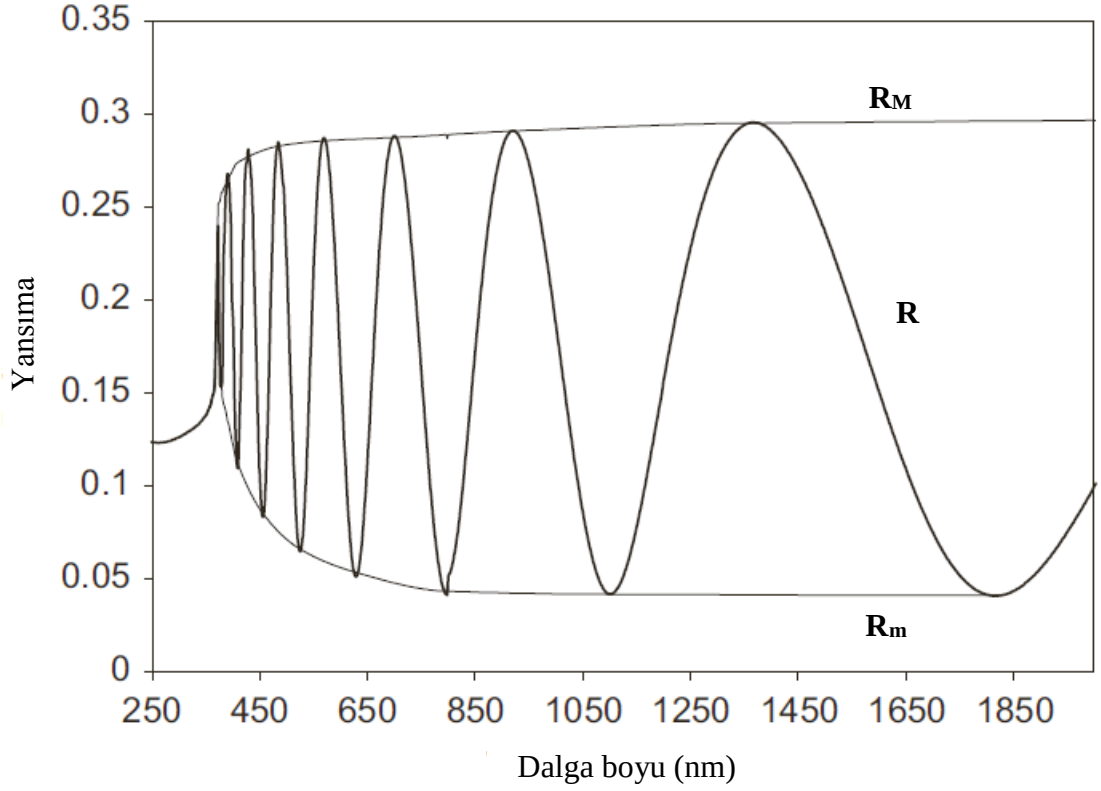
$$n^2 = \epsilon_L - \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 c^2} \right) \left(\frac{N}{m^*} \right) \lambda^2 \quad (2.33)$$

Burada N/m^* taşıyıcı yoğunluğunun etkin kütleye oranını, c ışık hızını, e elektronun yükünü, ϵ_0 ise serbest uzayın elektriksel geçirgenliğini göstermektedir.

$n^2-\lambda^2$ grafiğinden elde edilen doğrunun n^2 eksenine ekstrapole edilmesiyle ($\lambda^2=0$) ϵ_L değeri bulunur. Doğrunun eğiminden ise e , c ve ϵ_0 yerine yazılarak N/m^* belirlenir.

2.8 Si Kristali Üzerinde Büyütülen İnce Filmlerin Optik Parametrelerinin Analizi

Si kristali üzerinde büyütülen SnO_2 ince filmlerin kırılma indisi, kalınlık, soğurma katsayısı, sönüm katsayısı ve yasak enerji bant aralığı gibi optiksel parametrelerinin belirlenmesinde El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntem kullanılabilir. Bu yöntemle analiz yapabilmek için soğurucu bir alt tabaka üzerindeki soğurucu bir ince filmin yansıma spektrumu, ışığın yüzeye geliş açısı dik olacak şekilde alınmaktadır. Dik geliş açısı, deneysel olarak daha basit olması nedeniyle seçilir. Bu spektrum, şekil 2.3'te gösterilmektedir (El-Naggar vd. 2009). Bu yöntemde, Swanepoel (1983) tarafından geliştirilen metoda benzer şekilde girişim deseni bir zarf içine alınır. El-Naggar vd. (2009) yönteminde, zarfın üst kısmı olan maksimum değerler R_M ile alt kısmı olan minimum değerler ise R_m ile gösterilir. Bu değerler dalga boyuna (λ) bağlı olarak bulunur. Böylece her bir λ için, R_M 'ye karşılık gelen bir R_m değeri elde edilir. Çizilen zarf yardımıyla her dalga boyu için R_M ve R_m belirlendikten sonra, filmin kırılma indisi ve kalınlık değerlerinin belirlenmesinde izlenen hesaplama adımları Swanepoel (1983) yöntemindekiyle aynı şekildedir.

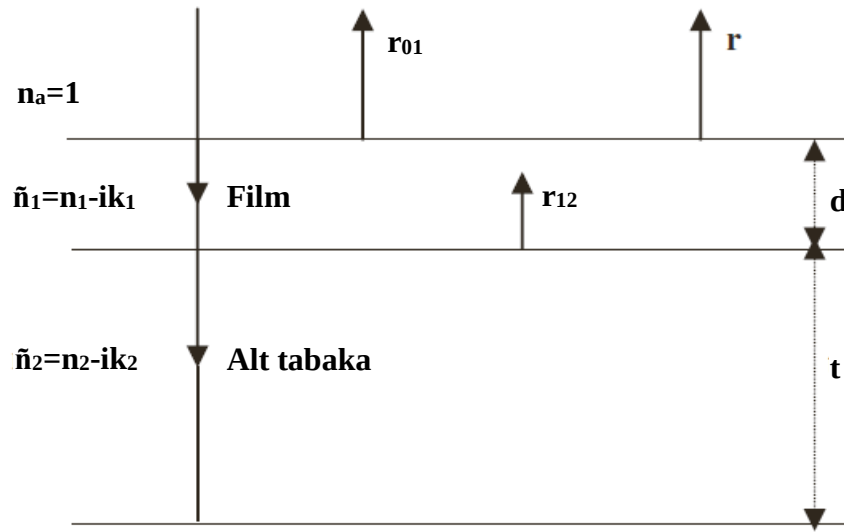


Şekil 2.3 Si alt tabakası üzerindeki GaN ince filmin yansıma spektrumu

El-Naggar vd. (2009) tarafından belirtilen yaklaşımda, spektrumun farklı bölgeleri için farklı denklemler uygulanmamakta, tüm spektrum için basit denklemlerden oluşan tek bir set uygulanmaktadır. Bu yöntemin uygulanabilmesi için gereken koşullar şu şekilde özetlenebilir:

- (1) Film ve alt tabaka optiksel olarak izotropik ve homojen olmalıdır.
- (2) Film ile alt tabakanın kırılma indisi arasında bir fark olmalıdır.
- (3) Filmin kenarları düz ve pürüzsüz olmalıdır.
- (4) Girişim saçaklarının görünebilir olması için film, düşük veya orta soğurmaya sahip olmalıdır.
- (5) Yeterli sayıda girişim ekstremumları sağlaması için filmin optiksel kalınlığı yeterince yüksek olmalıdır.
- (6) Kaynağın monokromatikliği, filmin içindeki optik yol farkı ile karşılaştırılabilir olmalıdır.

Geliş açısı film–alt tabaka sistemine dik olan paralel bir ışık demeti şekil 2.4’te gösterilmektedir. Filmin içindeki optik yol farkı, gelen demetin koherent uzunluğundan daha azdır. Bu nedenle filmin içinde, koherent girişim saçaklarını oluşturan çok sayıda yansıma olmaktadır. Alt tabakanın arka yüzeyinden gerçekleşen yansımalar ihmal edilmektedir. Bunun nedeni, alt tabakanın arka taraftaki yansımaları etkisiz kılmaya yetecek şekilde soğuruyor olmasıdır. Aksi takdirde alt tabaka pürüzlenirdi veya kararırdı.



Şekil 2.4 Film–alt tabaka sisteminin modeli

Şekil 2.4’te, Si kristali üzerindeki bir ince film gösterilmektedir ve film–alt tabaka sistemi kırılma indisi $n_a=1$ olan hava ortamında bulunmaktadır. İnce, paralel kenarlı, izotropik ve homojen film ortalama d kalınlığına ve $\tilde{n}_1=n_1-ik_1$ ile gösterilen kompleks kırılma indisine sahiptir. Kompleks kırılma indisi ifadesinde, n_1 , filmin kırılma indisinin reel kısmını ve sönüm katsayısı olan k_1 ise filmin kırılma indisinin sanal kısmını göstermektedir. İnce film, kalınlığı t ve kompleks kırılma indisi, $\tilde{n}_2=n_2-ik_2$ olan soğurucu bir alt tabaka üzerindedir. El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntemle göre, film–alt tabaka sisteminde gerçekleşen yansımanın kompleks genliği denklem (2.34)’te verildiği gibidir (Azzam ve Bashara 1977).

$$\mathbf{r} = \frac{\mathbf{r}_{01} + \mathbf{r}_{12} \exp(-i2\delta_1)}{1 + \mathbf{r}_{01} \mathbf{r}_{12} \exp(-i2\delta_1)} \quad (2.34)$$

$$\delta_1 = \frac{2\pi d_1 \tilde{n}_1}{\lambda} \quad (2.35)$$

Burada r_{01} ve r_{12} sırasıyla, hava–film ve film–alt tabaka ara yüzeylerindeki Fresnel yansımaya katsayılarıdır:

$$r_{01} = \frac{1 - \tilde{n}_1}{1 + \tilde{n}_1} \quad (2.36)$$

$$r_{12} = \frac{\tilde{n}_1 - \tilde{n}_2}{\tilde{n}_1 + \tilde{n}_2} \quad (2.37)$$

Martínez-Antón (2000) tarafından maksimum yansımaya olan R_M için üst ve minimum yansımaya olan R_m için alt zarfı veren ifadeler aşağıdaki gibidir:

$$R_M = \left[\frac{r_{01} + x r_{12}}{1 + x r_{01} r_{12}} \right]^2 \quad (2.38)$$

$$R_m = \left[\frac{r_{01} - x r_{12}}{1 - x r_{01} r_{12}} \right]^2 \quad (2.39)$$

Burada x filmin içindeki faz farkı teriminin sanal kısmını göstermektedir ve (2.20) denkleminde belirtildiği gibidir.

(2.38) ve (2.39) denklemlerinden, hava-film ara yüzeyindeki yansımaya genliği elde edilir:

$$r_{01} = \frac{(1 + R_m^{1/2} R_M^{1/2}) \pm [(1 - R_M)(1 - R_m)]^{1/2}}{[R_M^{1/2} + R_m^{1/2}]} \quad (2.40)$$

Filmdeki soğurumdan etkilenen, film-alt tabaka ara yüzeyindeki yansımaya genliği aşağıdaki şekilde elde edilir:

$$x r_{12} = \frac{(1 - R_m^{1/2} R_M^{1/2}) \pm [(1 - R_M)(1 - R_m)]^{1/2}}{[R_M^{1/2} - R_m^{1/2}]} \quad (2.41)$$

(2.40) ve (2.41) denklemlerinde, filmin kırılma indisi (n_1), alt tabakanın kırılma indisinden (n_2) daha az iken işaret negatif ve $n_1 > n_2$ iken işaret pozitif olarak alınmaktadır. Hava-film ara yüzeyindeki yansıma genliği olan r_{01} , her λ için R_M ve R_m değerleri (2.40) denkleminde yerine yazılarak hesaplanır. (2.36) denkleminde $k_1=0$ alarak n_1 için çözülürse, $n_1 > 1$ olduğu durumda, filmin kırılma indisinin ilk yaklaşık değeri olan n_{10} için aşağıdaki ifade elde edilir:

$$n_{10} \approx \frac{(1+r_{01})}{(1-r_1)} \quad (2.42)$$

Böylece El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntemle göre kırılma indisinin değeri ilk yaklaşıklıkla elde edilmiş olur.

n_{10} kırılma indislerinin (2.8) denkleminde yerine yazılmasıyla, her yapıcı ve yıkıcı girişim saçağı için film kalınlığının yaklaşık değerleri hesaplanır. Elde edilen kalınlık değerlerinin ortalaması alınarak yaklaşık olarak ortalama kalınlık değeri $\bar{d}_1$ hesaplanır.

$\bar{d}_1$ ve n_{10} değerleri kullanılarak, her ekstremum noktasına karşılık gelen dalga boyu için m_0 değeri (2.1) denkleminde elde edilir. Bulunan sonuçlar en yakın tamsayıya veya yarı tamsayıya yuvarlanarak m değeri belirlenir.

Film kalınlığının değerleri son olarak, her ekstremum noktasına karşılık gelen dalga boyu için elde edilen m ve n_{10} değerleri (2.1) denkleminde yerine yazarak bulunur. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak, tüm dalga boyları için geçerli olan ortalama kalınlık değeri ($\bar{d}$) daha büyük bir doğrulukla hesaplanır.

Filmin kırılma indisinin değeri (n_{12}) son olarak, her dalga boyu için belirlenen m ve $\bar{d}$ değerlerini (2.1) denkleminde yerine yazarak elde edilir. n_{12} , kırılma indisinin değerleri (2.12) denklemi ile verilen iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntısına fit edilebilir. Bu bağıntı kullanılarak daha kısa dalga boylarına ekstrapole edilmesiyle spektrumu genelleştiren bir teorik fonksiyon elde edilir (Moss 1959).

El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntemle göre filmin sönüm katsayısı olan k_1 şu adımlar izlenerek belirlenir:

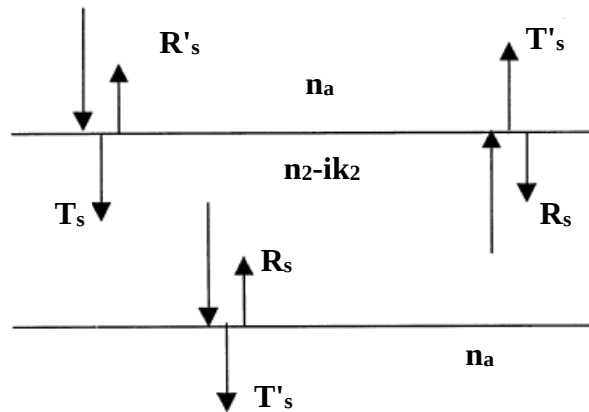
Her λ için x_{r12} değeri (2.41) denkleminde hesaplanır. Filmin sönüm katsayısının ilk değeri olan k_{1i} , (2.37) ve (2.41) denklemleri kullanılarak elde edilen ifadede bulunur:

$$\ln(x_{r12}) = \frac{-4\pi k_{1i} d}{\lambda} + \ln(r_{12}) \quad (2.43)$$

Film-alt tabaka ara yüzeyindeki yansıma genliği olan r_{12} , (2.37) denkleminde aşağıdaki gibi elde edilir:

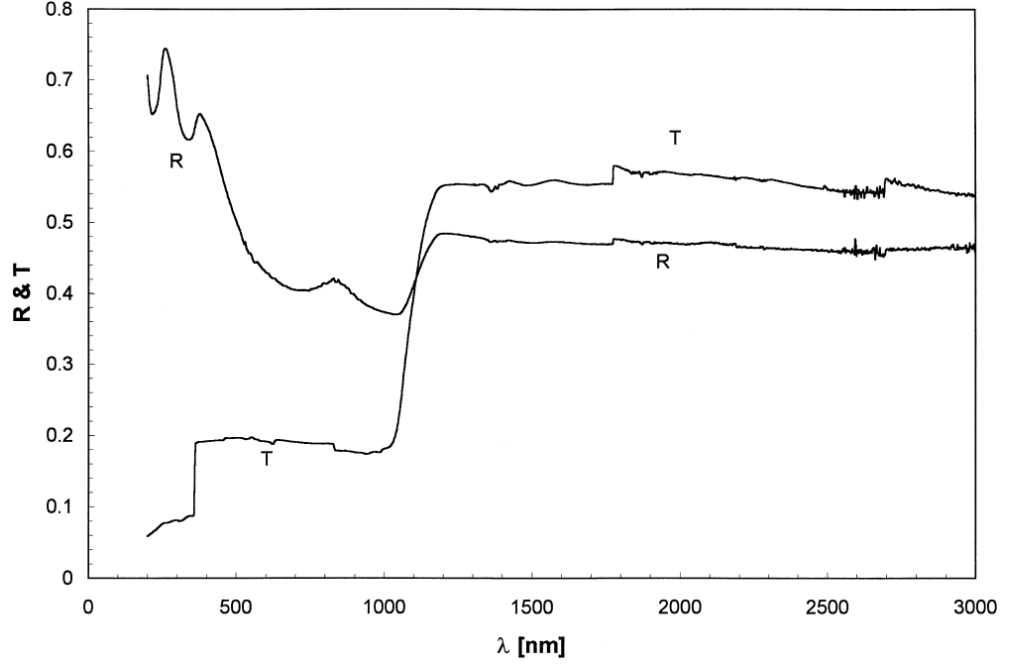
$$r_{12} = \left[\frac{(n_2 - n_1)^2 + (k_2 - k_1)^2}{(n_2 + n_1)^2 + (k_2 + k_1)^2} \right]^{1/2} \quad (2.44)$$

Alt tabaka olarak kullanılan Si kristalinin kırılma indisi ve sönüm katsayısının belirlenmesi için izlenen yol şu şekildedir: İki tane paralel düzlemli yüzle sahip olan homojen ve katı bir malzemeden ışığın yansıması ve geçişi şekil 2.5'te gösterilmiştir. Burada görülen ışık şeması, tabakanın yansıması olan R ve geçirgenliği olan T parametrelerini sırasıyla, ara yüzey katmanının iç ve dış yansıması olan R_s , R'_s ve iç ve dış geçirgenliği olan T_s , T'_s cinsinden ifade etmek için verilmiştir. n_a , havanın kırılma indisini göstermektedir.



Şekil 2.5 Si kristalinden ışığın yansıması ve geçişi

Katmandan yansıyan ve geçen ışık bir spektrometre tarafından analiz edildiğinde, elde edilen spektrumlar şekil 2.6'da verilmektedir (Khashan ve El-Naggar 2000).



Şekil 2.6 Si kristalinin yansıma ve geçirgenlik spektrumları

Tabakanın yansıması olan R ve geçirgenliği olan T parametrelerinin bağıntıları aşağıdaki şekildedir (Kortüm 1969, Potter 1985):

$$R=R_s^1+R_s \frac{\eta^2 T_s T_s^1}{1-\eta^2 R_s^2} \quad (2.45)$$

$$T=\eta \frac{T_s T_s^1}{1-\eta^2 R_s^2} \quad (2.46)$$

Bu bağıntılarda bulunan η , zayıflama parametresidir ve tabakanın α , soğurma katsayısına etki ettiğinden önemli bir rol oynar. Lambert soğurma yasasına göre, zayıflama parametresi (2.20) denklemindeki gibidir (Kortüm 1969). Burada t , Si tabakasının kalınlığını göstermektedir. Bu yöntemde tabakanın ölçülen R ve T spektrumundan η değeri belirlenmeye çalışılmaktadır. Ancak, (2.45) ve (2.46) denklemlerinden η belirlenemez. Çünkü bu denklemlerde bulunan ara yüzeyin yansıma ve geçirgenliği

bilinmemektedir. Söz konusu parametreler, kırılma indisine (n_2) ve sönüm katsayısına (k_2), yüzeye dik geliş açısı için Fresnel formülüne göre aşağıdaki gibi bağlıdır (Sokolov 1967, Ward 1994):

$$R_s = R_s^t = \frac{(n_2 - n_a)^2 + k_2^2}{(n_2 + n_a)^2 + k_2^2} \quad (2.47)$$

$$T_s = T_s^t = \frac{4n_a \sqrt{n_2^2 + k_2^2}}{(n_2 + n_a)^2 + k_2^2} \quad (2.48)$$

(2.47) ve (2.48) denklemleri, (2.45) ve (2.46) denklemleri ile birlikte ara yüzey yansıması ve geçirgenliği için çözülürse, aşağıdaki bağıntılar elde edilir:

$$R_s = \frac{R}{1 + \eta T} \quad (2.49)$$

$$T_s = \sqrt{(1 - \eta^2 R_s^2)} T / \eta \quad (2.50)$$

Bu iki denklem incelendiğinde, sağ taraflarında bilinmeyen η parametresinin bulunduğu görülmektedir. R_s ve T_s değerlerini belirleyebilmek için, bu değerler ile ortamın zayıflama parametresinin bulunmasını sağlayan ve veri indirgeme işlemine dayanan iterasyon yöntemi seçilir (Khashan ve El-Naggar 2000). Burada uygulanan yaklaşım, aşağıda verilen korunum yasasına dayanır (Potter 1985):

$$R_s + T_s + A_t = 1 \quad (2.51)$$

Burada A_t , yansıma ve geçirmenin toplamının bire normalizasyondan sapmasının bir ölçüsü olan soğurmayı göstermektedir. A_t 'nin bilinmesi η 'nın bulunmasını sağlar. η ile A_t arasındaki ilişki, Lambert soğurma yasasına göre aşağıdaki şekildedir (Kortüm 1969):

$$I = I_0 \exp(-\alpha z) \quad (2.52)$$

Bu yasa, ışık ortamın içinde eşit bir şekilde artan dz uzunluğunu geçerken, bağlı şiddetin her bir zaman diliminde diferansiyel formda düzenli olarak nasıl kaybedildiğini şu şekilde tanımlar:

$$dI/I = -\alpha dz \quad (2.53)$$

Numunenin içindeki z derinliği, $I=I_0$ olan ön ara yüzeyinden dik olarak ölçülür. Dağıtıcı ortamda, t kalınlığı boyunca soğurmanın ifadesi aşağıdaki gibidir (Temple 1985):

$$A_t = -\left(\int_0^t dI\right)/I_0 \quad (2.54)$$

(2.54) denklemindeki integrali, (2.52) ve (2.20) bağıntıları kullanılarak alınırsa elde edilen ifade şu şekildedir:

$$A_t = 1 - \eta \quad (2.55)$$

Eğer A_t bilinirse, η belirlenebilir. R_s ve T_s bilindiğinde, (2.51) denkleminde elde edilen aşağıdaki eşitlikten A_t tekrar bulunabilir:

$$A_t = 1 - (R_s + T_s) \quad (2.56)$$

η değeri bilindiğinde, sönüm katsayısı aşağıdaki denklemden bulunabilir:

$$k_2 = -(\lambda/4\pi t) \ln \eta \quad (2.57)$$

k_2 değeri bulunduktan sonra kristalin kırılma indisi, (2.47) ile verilen Fresnel formülünün çözülmesiyle elde edilen bağıntıdan belirlenebilir:

$$n_2 = n_a \left[\frac{1+R_s}{1-R_s} + \sqrt{\frac{4R_s}{(1-R_s)^2} - \frac{k_2^2}{n_a^2}} \right] \quad (2.58)$$

Si alt tabakasının yansıma ve geçirgenlik spektrumundan, Si alt tabakasının kırılma indisinin reel ve sanal kısımları hesaplandıktan sonra (2.44) denkleminde r_{12} belirlenir. (2.43) denkleminde yer alan $\ln(r_{12})$ teriminin hesaplanmasında, filmin ve alt tabakanın sönüm katsayılarının, bu terim üzerine ihmal edilebilir bir etkisi olduğu için ihmal edilmiştir. Bu yaklaşım altında, (2.44) denklemi aşağıdaki ifadeye dönüşür:

$$r_{12} \approx \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \quad (2.59)$$

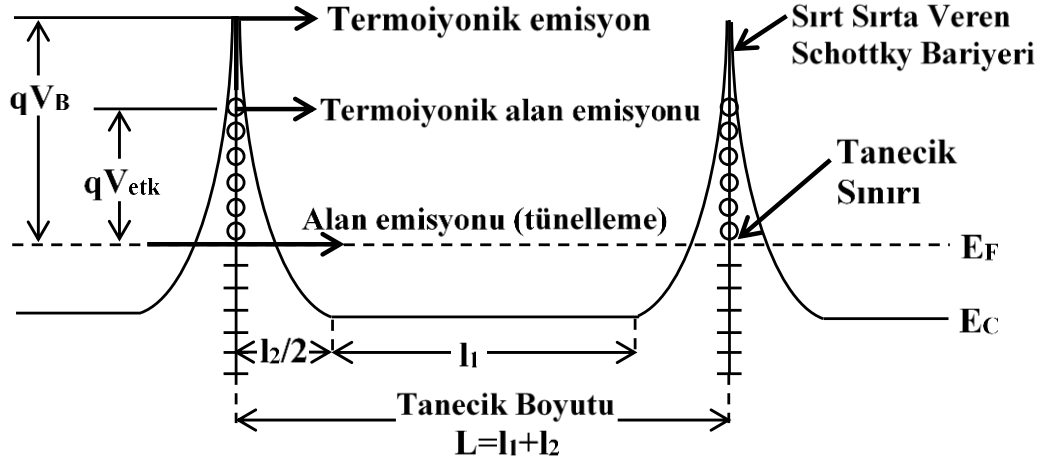
(2.59) denkleminde r_{12} değeri yaklaşık olarak hesaplanır. Filmin sönüm katsayısının ilk değeri olan k_{1i} , (2.43) denkleminde xr_{12} ve r_{12} değerleri yerine yazılarak bulunur. k_{1i} değerleri hesaplandıktan sonra, r_{12} değerleri, film ve alt tabaka sönüm katsayıları da dahil edilerek tekrar hesaplanır. Her λ için xr_{12} ve r_{12} değerleri elde edildikten sonra, xr_{12} teriminin r_{12} terimine bölünmesiyle x değeri belirlenir. Filmin soğurma katsayısı olan α_1 (2.21) denkleminde hesaplanabilir. Filmin sönüm katsayısının değeri son olarak, (2.22) denkleminde bulunur.

2.9 Cam Üzerinde Büyütülen İnce Filmlerin Taşıyıcı İletim Mekanizmaları

Orton ve Powell (1980) polikristal yarıiletkenlerin bant iletimini tanecik boyutu L ile Debye uzunluğunu (L_D) kıyaslayarak araştırdı. L_D ifadesi şu şekildedir:

$$L_D = (\epsilon \epsilon_0 kT / e^2 N)^{1/2} \quad (2.60)$$

Burada ϵ , ϵ_0 , k ve e sırasıyla malzemenin bağıl dielektrik sabitini, boş uzayın dielektrik sabitini, Boltzmann sabitini ve elektronun yükünü göstermektedir. Ara yüzey tuzak durumları tanecik sınır bölgelerinde $L \geq 2L_D$ durumunda potansiyel engellerini yaratırlar. Düz iletim bandının oluştuğu söylenebilir.



Şekil 2.7 Dejenere filmlerin tanecik sınırındaki olası taşıyıcı geçiş mekanizmaları

Şekil 2.7’de dejenere filmler için tanecik sınırındaki sırt sırta veren Schottky engelini enerji bant diyagramını göstermektedir (Seto 1975). Tanecik sınırındaki üç olası iletim mekanizması gösterilmektedir; (i) tanecik sınırı üzerinden termoiyonik emisyon, (ii) tanecik sınırı boyunca termoiyonik alan emisyonu ve (iii) tanecik sınırı boyunca alan emisyonu (direkt tünelleme). Kolaylık olması açısından, tanecik L cm kadar boyuta sahip bir kare olarak kabul edilmiştir. Potansiyel engelini yüksekliği V_B ve genişliği l_2 olan bir dikdörtgen olduğu varsayılırsa, tünel akımı kolay bir şekilde elde edilebilir.

Holm (1951) tarafından yapılan çalışmaya göre, engel üzerine uygulanan çok küçük bir voltaj (V) için tünelleme akım yoğunluğu ($J_{\text{tün}}$) şu ifadeyle verilir:

$$J_{\text{tün}} = \left[q^2 V \left(\sqrt{2m^* V_B} \right) / h^2 l_2 \right] \exp \left[-4\pi l_2 \left(\sqrt{2m^* V_B} \right) / h \right] \quad (2.61)$$

Burada m^* ve h , sırasıyla etkin taşıyıcı kütlesi ve Planck sabitini göstermektedir. Tünel etkisi tarafından oluşan iletkenlik ($\sigma_{\text{tün}}$) şu hale gelir:

$$\sigma_{\text{tün}} = \left[L q^2 \left(\sqrt{2m^* V_B} \right) / (h^2 l_2) \right] \exp \left[-4\pi l_2 \left(\sqrt{2m^* V_B} \right) / h \right] \quad (2.62)$$

Bu denklem $\sigma_{\text{tün}}$ teriminin tanecik boyutu ile orantılı olduğunu gösterir. L , m^* , V_B ve l_2 bilinmeyen niceliklerdir ve (2.62) denkleminden belirlenebilirler. L , yapı analizinden bulunur ve m^* literatürden alınır.

$$Q_t = Nl_2 \quad (2.63)$$

$$V_B = qQ_t^2 / 8\epsilon N \quad (2.64)$$

(2.63), (2.64) ve (2.62) denklemleri eşzamanlı olarak çözüldüğünde, V_B ve l_2 değerleri elde edilir. Burada Q_t terimi, tanecik sınırlarındaki aralık durum yoğunluğunu göstermektedir.

Tanecik sınırı boyunca termoiyonik emisyon, polikristal yarıiletken filmler için tipik tanecik sınırı saçılma mekanizması olarak bilinir. Maxwell-Boltzmann istatistiklerine göre, sırt sırta veren Schottky engeli boyunca termoiyonik emisyon tarafından sınırlandırılan iletkenlik (σ) ifadesi (Seto 1975) şu şekildedir:

$$\sigma = Lq^2 N (2\pi m^* kT)^{-1/2} \exp(-qV_B/kT) \quad (2.65)$$

Termoiyonik alan emisyonu iki adımdan oluşur; (i) tanecik sınır bölgesinde tuzaklanmış veya serbest yüklerin termal aktivasyonu ve (ii) şekil 2.7'de gösterildiği gibi potansiyel engeli boyunca termal olarak aktifleşmiş yüklerin tünellemesi (De Groot vd. 1984). Sırt sırta veren Schottky engeli boyunca termoiyonik alan emisyonu için kinetik denklem, (2.65) ifadesinin yeniden düzenlenmesiyle elde edilir:

$$\sigma = BT^{-1/2} \exp(-V_{\text{etk}}/kT) \quad (2.66)$$

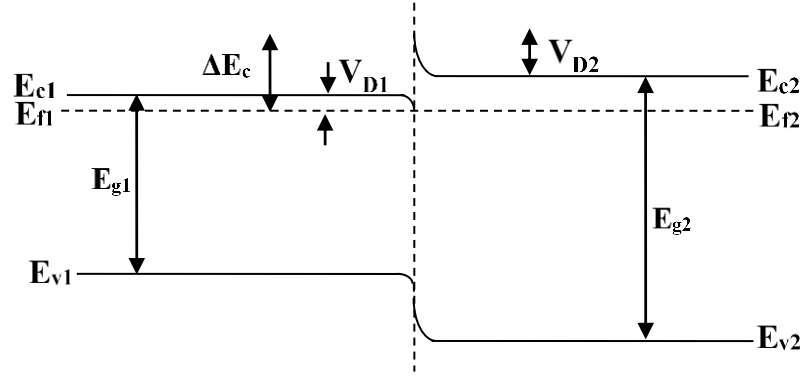
Burada B , sıcaklığa (T) zayıf şekilde bağlı bir parametredir ve V_{etk} , elektronların olası tünelleme durumlarına termal emisyonu için etkin engel yüksekliğini göstermektedir (Tarng 1978).

2.10 Heteroeklem Yapıların Bant Diyagramları

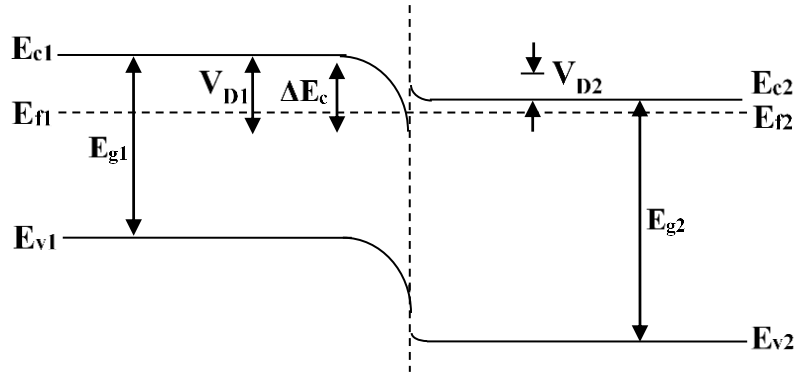
Bir heteroeklem genellikle iki farklı malzeme arasındaki ara yüzey olarak tanımlanır. Bu heteroeklemler, ara yüzey yakınında bir malzemeden diğerine geçişteki mesafeye göre ani veya kademeli olarak sınıflandırılabilirler. Örneğin ilk durum için geçiş birkaç atomik mesafede, sonraki durum için ise birkaç difüzyon uzaklığı mertebesindeki mesafelerde meydana gelir. Diğer bir sınıflama heteroeklemi, eklem her iki tarafında bulunan malzemenin iletkenliğinin tipine göre isimlendirmeyi içerir. Eğer iki yarıiletken aynı tip iletkenliğe sahipse eklem izotip heteroeklem, aksi takdirde anizotip heteroeklem olarak isimlendirilir.

Ara yüzey yakınındaki enerji bant profili, bir heteroeklemin akım-iletim mekanizmasını anlamada önemli bir yer tutar. Teorik olarak ara yüzey durumları bulunmadığında herhangi bir heteroeklemin enerji bant profili, heteroeklemi oluşturan iki yarıiletkenin elektron ilgileri, yasak enerji bant aralıkları ve iş fonksiyonlarına bağlıdır. Bu üç parametre arasından, elektron ilgisi ve yasak enerji bant aralığı belirli bir yarıiletkenin temel özelliklerindendir ve katkılama bağımsızdır. İş fonksiyonu ise katkılama bağı olarak değişir.

Uygulanan gerilim, built-in gerilimini azaltacak polaritede olduğunda izotip heteroeklemin düz beslemde olduğu söylenebilir. n-n heteroeklemlerin enerji bant profilleri, yarıiletkenlerin elektron ilgilerine, iş fonksiyonlarına ve enerji bant aralıklarına bağlı olarak dört duruma sınıflandırılabilirler (Sharma ve Purohit 1974). Tüm çizimler için $E_{g1} < E_{g2}$ olarak alınmıştır. $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ ve düz beslemde + gerilimin daha küçük bant aralıklı malzemeye uygulanması koşullarının sağlandığı durum, $V_{D1} < \Delta E_c$ ve $V_{D1} > \Delta E_c$ için sırasıyla şekil 2.8.a, b’de verilmiştir.



(a)

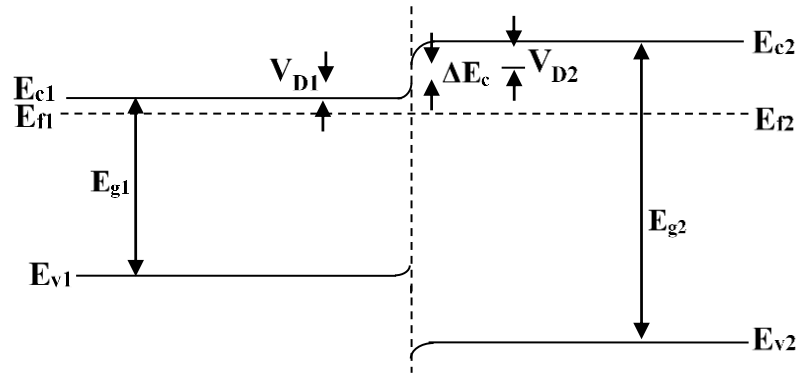


(b)

Şekil 2.8 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramları

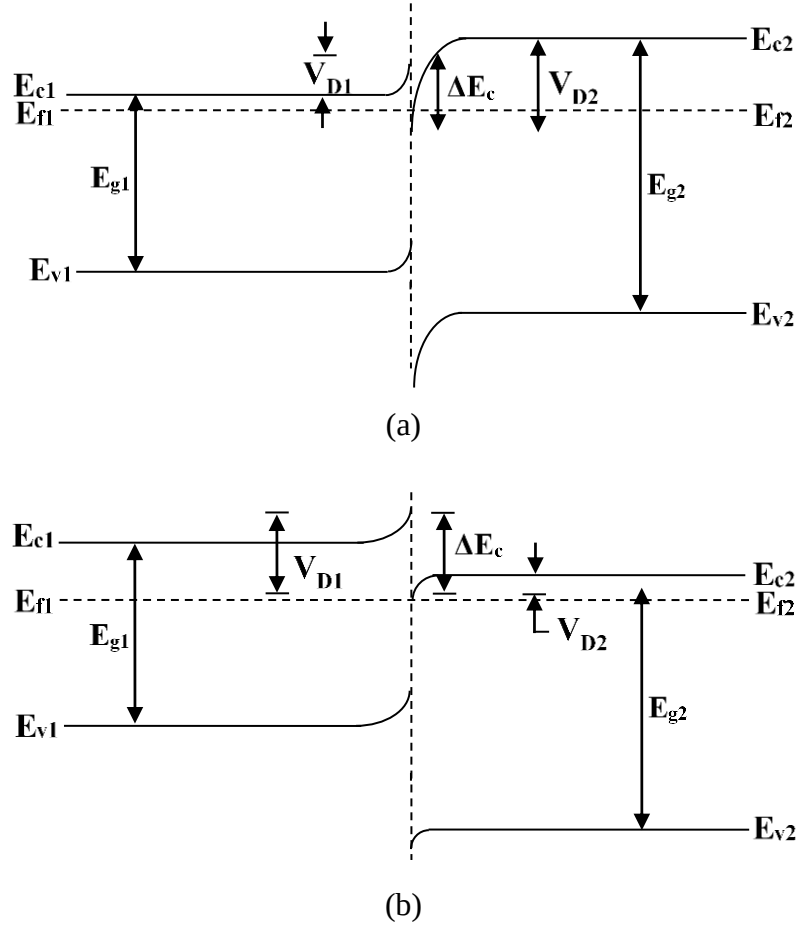
a. $V_{D1} < \Delta E_c$, b. $V_{D1} > \Delta E_c$

$\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ ve düz beslemde + gerilimin daha büyük bant aralıklı malzemeye uygulanması koşullarının sağlandığı durum, şekil 2.9'da verilmiştir.



Şekil 2.9 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} < \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramı

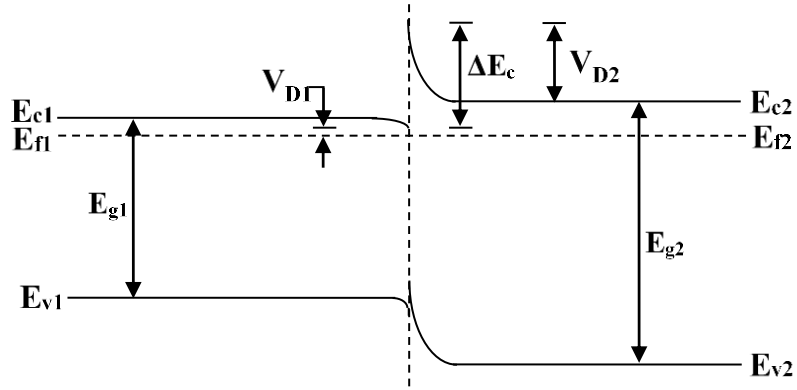
$\chi_1 < \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2$ ve düz beslemde + gerilimin daha büyük bant aralıklı malzemeye uygulanması koşullarının sağlandığı durum, $V_{D2} > \Delta E_c$ ve $V_{D2} < \Delta E_c$ için sırasıyla şekil 2.10.a, b’de verilmiştir.



Şekil 2.10 $\chi_1 < \chi_2$, $\phi_1 < \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2$ için bant diyagramları

a. $V_{D2} > \Delta E_c$, b. $V_{D2} < \Delta E_c$

$\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$ ve düz beslemde + gerilimin daha küçük bant aralıklı malzemeye uygulanması koşullarının sağlandığı durum, şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11 $\chi_1 > \chi_2$, $\phi_1 > \phi_2$, $\chi_1 + E_{g1} > \chi_2 + E_{g2}$ için bant diyagramı

2.11 Hetero Yapıların Akım-Gerilim (I-V) Belirtkenleri

Kalınlığı her yerde aynı olan ince oksit tabakaya sahip bir Schottky diyot için, uygulanan düz beslem gerilimi ile yapıdan geçen akım arasındaki ilişkinin termoiyonik emisyon akımından kaynaklandığı kabul edilir (Card ve Rhoderick 1971) ve

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.67)$$

ile verilir. Burada; q: elektronun yükü, k: Boltzmann sabiti, I: yapıdan geçen akım, I_0 : çoğunluk taşıyıcıları için doyma akımı ve V: uygulanan gerilimdir.

Gerçekte diyotlarda I-V karakteristiği denklem (2.67)'deki ideal durumu sağlamaz. Gerçek diyot için akım ifadesi,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \right] \quad (2.68)$$

şeklindedir. Burada n idealite faktörüdür. Denklem (2.67), $V > 3kT/q$ için,

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (2.69)$$

şeklinde yazılabilir (Rhoderick ve Williams 1988). $\ln I$ 'nın V 'ye göre grafiği bir doğrudur. Bu doğrunun eğiminden idealite faktörü n hesaplanabilir. Doğrunun akım eksenini kestiği noktadan I_0 değeri belirlenir. Termoiyonik Emisyon (TE) mekanizmasından kaynaklanan akımın etkin olduğu durumda

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (2.70)$$

bağıntısıyla verilir. Burada A , A^* ve ϕ_{b0} sırasıyla diyot alanı, etkin Richardson sabiti (n -Si için $120 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ ve p -Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$) ve sıfır beslem engel yüksekliğidir. ϕ_{b0} (2.70) denkleminde elde edilir.

Akım-gerilim belirtkenlerini belirlerken seri direnç (R_s) etkisi Cheung'ler tarafından geliştirilen fonksiyonlar yardımıyla hesaplamaya katılabilir (Cheung ve Cheung 1986). Bu yöntemle göre, seri direnç $\ln I$ - V grafiklerinin tam dönüm noktasından itibaren etkilidir. (2.68) denkleminin her iki tarafının logaritması alınıp, bu yöntemle göre yeniden düzenlenirse,

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\phi_b + IR_s \quad (2.71)$$

elde edilir. Bu denklemin $\ln I$ 'ya göre türevi alınır,

$$\frac{d(V)}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (2.72)$$

bulunur. Engel yüksekliğini bulmak için,

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.73)$$

ile verilen bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanabilir. Denklem (2.71) ve (2.72)'den faydalanarak,

$$H(I)=n\phi_b+IR_s \quad (2.74)$$

elde edilir. Bağıntıdan görüleceği üzere $H(I)$ - I 'nin grafiği bir çizgisel doğru verir. Bu doğrunun eğiminden seri direnç ve düşey eksenini kestiği noktadan da (2.72) denkleminde bulunan idealite faktörü değeri yerine yazılarak potansiyel engeli hesaplanır.

Yüksek seri dirence sahip Schottky kontaklarında, seri direnç, ideallik faktörü ve engel yüksekliği gibi temel diyot parametrelerini tayin etmek amacıyla yeni yöntemler geliştirilmiştir. Öncelikle Norde (1979) tarafından geliştirilmiş olup, $n=1$ durumu için seri direnç ve engel yüksekliğini, tanımlanan orijinal bir $F(V)$ fonksiyonu yardımıyla elde edilmesini amaçlamaktadır. Bu yöntem, R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklıkla değişmediği durumlara uygulandığı için sadece bir sıcaklıktaki I - V eğrisine ihtiyaç vardır. Daha sonraları Sato ve Yasamura (1985), Norde (1979) tarafından sunulan yöntemi geliştirerek idealite faktörünün 1'den büyük olduğu ($1 < n < 2$) durumlarda da n , R_s ve ϕ_b değerlerinin hesaplanabileceğini gösterdiler. Bu yöntem R_s ve ϕ_b 'nin sıcaklık ile değiştiği durumlara da uygulanabileceğinden en az iki farklı sıcaklıktaki I - V eğrisine ihtiyaç vardır.

Seri direnç büyükse standart $\ln I$ - V grafiğinin değerlendirilmesi daha karışık bir hal alacağından, bunun yerine Norde (1979) tarafından verilen

$$F(V)=\frac{V}{2}-\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I}{A A^* T^2}\right) \quad (2.75)$$

fonksiyonunun çözümlenmesiyle, engel yüksekliği ϕ_b için daha güvenilir bir değer elde edilebilir. (2.68) denkleminin her iki tarafının $\ln$ 'i alınıp (2.75)'te yerine yazılırsa,

$$F(V)=\left(\frac{n-2}{2n}\right)V+\frac{IR_s}{n}+\phi_{b0} \quad (2.76)$$

elde edilir. Burada $R_s=0$ ideal durumu için $F(V)$ - V grafiğinin eğimi, $(n-2)/2n$ olan bir doğrudur ve $F(V)$ eksenini $V=0$ 'da kestiği nokta doğrudan ϕ_{b0} 'ı verir. Fakat seri direnç sıfırdan farklı ise $F(V)$ fonksiyonu bir minimumdan geçer ve

$$F(V)=F_{R_s}(V)=\frac{V}{2}-\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{V}{A A^* T^2 R_s}\right) \quad (2.77)$$

olur. Bohlin (1986) ise, idealite faktörünün $1 < n < \gamma$ olması durumunda (1'den çok büyük) Schottky engel diyodunun I-V ölçümünden elde edilen R_s , ϕ_{b0} ve n 'in belirlenmesini mümkün kılan Norde (1979) tarafından belirlenen fonksiyonu yeniden düzenledi. Buna göre; fonksiyonun ilk terimi olan $V/2$ ifadesi yerine V/γ terimini kullanmıştır. Burada γ , idealite faktöründen küçük olmamak üzere ($\gamma > n$) keyfi bir sabit sayıdır. Buna göre (2.75) denklemi

$$F(V,\gamma)=\frac{V}{\gamma}-\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I}{A A^* T^2}\right) \quad (2.78)$$

şeklinde yazılabilir. (2.69) denkleminde her iki tarafın $\ln$ 'ini alıp denklem (2.78)'de yerine yazılırsa,

$$F(V,\gamma)=\left(\frac{1}{\gamma}-\frac{1}{n}\right)V+\phi_{b0}+\frac{IR_s}{n} \quad (2.79)$$

ifadesi elde edilir. Eğer R_s sıfırdan farklıysa ve (2.78) denklemindeki I ifadesi, seri direnç cinsinden yerine yazılırsa

$$F(V,\gamma)=\frac{V}{\gamma}-\frac{kT}{q}\ln\left(\frac{V}{R_s A A^* T^2}\right) \quad (2.80)$$

olur. (2.79) denkleminin V 'ye göre diferansiyeli alınır ve gerekli düzenlemeler yapırsa ϕ_{b0} ve R_s için sırasıyla

$$\phi_{b0}=F(V_{0I,2},\gamma_{I,2})+\left(\frac{1}{n}-\frac{1}{\gamma_{I,2}}\right)V_{0I,2}-\frac{kT(\gamma_{I,2}-n)}{(qn)} \quad (2.81)$$

$$R_s=\frac{kT(\gamma_{I,2}-n)}{qI_{0I,2}} \quad (2.82)$$

ve (2.81) denkleminde idealite faktörü için

$$n = \frac{(V_{01} - V_{02} + \gamma_2 kT/q - \gamma_1 kT/q)}{[F(V_{02}, \gamma_2) - F(V_{01}, \gamma_1) - V_{02}/\gamma_2 + V_{01}/\gamma_1]} \quad (2.83)$$

$$n = \frac{\gamma_1 I_{02} - \gamma_2 I_{01}}{I_{02} - I_{01}} \quad (2.84)$$

ifadeleri elde edilir. İdealite faktörünün azalan sıcaklıkla artması, T_0 etkisi olarak bilinmektedir (Padovani ve Summer 1965). Aşağıdaki denklemle gösterilmektedir. Burada n_0 ve T_0 , $n-1/T$ grafiğinden belirlenecek sabitlerdir.

$$n(T) = n_0 + \frac{T_0}{T} \quad (2.85)$$

Ayrıca seri direnç, kapasitans-gerilim (C-V) ölçümlerinden de hesaplanabilir (Nicollian ve Brews 1982). Bu yöntemde seri direnç, kuvvetli yığılma bölgesinde elde edilen kapasite ve iletkenlik ($1/R$) (kondüktans) değerlerinden

$$R_s = \frac{G_{ma}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (2.86)$$

eşitliğinden hesaplanabilir. Burada C_{ma} ve G_{ma} sırasıyla kuvvetli yığılma bölgesinde ölçülen kapasite ve iletkenlik değerleridir.

2.12 Hetero Yapıların Kapasite-Gerilim (C-V) Belirtkenleri

Metal/Yarıiletken (MS) yapılar üretilirken ara yüzeyde bir oksit (veya yalıtkan) tabaka oluşmaktadır (Neamen 1997). Bu tabakanın kalınlığı (δ), yüksek frekans C-V karakteristiklerinde

$$C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{\delta} \quad (2.87)$$

denklemleri kullanılarak bulunabilir. Burada C_i : ara yüzey oksit tabakasının kapasitesini, A : diyot alanını, ϵ_i ve ϵ_0 sırasıyla ara yüzey tabakasının ve boş uzayın elektriksel geçirgenliğini göstermektedir. SnO_2 için $\epsilon_i=7\epsilon_0$ (Manifacier vd. 1977) değerine sahiptir.

Belirli bir frekans değerinde yapılan C-V ölçümlerinden yararlanarak yapıların belirtkenlerinin belirlenmesi için C^{-2} -V eğrileri çizilir. C^{-2} -V eğrilerinin lineer kısımlarının gerilim eksenine ekstrapole edilmesiyle kesme gerilimleri (V_0) ve eğimlerinden verici yoğunlukları (N_D) bulunur. Ara yüzey durumları bulunmadığında, V_0 ile difüzyon potansiyeli (V_d) arasındaki bağıntı

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.88)$$

şeklindedir (Sze 1981). Ara yüzey durumları söz konusu olduğunda, (2.88) denklemleri

$$V_0 = \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) (1 + \alpha) \quad (2.89)$$

halini alır (Akkal vd. 2000). Burada

$$\alpha = \frac{qN_{ss}\delta}{\epsilon_i} \quad (2.90)$$

ile verilir ve N_{ss} , ara yüzey durum yoğunluklarını göstermektedir (Singh 1985). Ara yüzey durumları dikkate alındığında C^{-2} -V doğrularının eğimi

$$\frac{dC^{-2}}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_D} \frac{1}{(1 + \alpha)} \quad (2.91)$$

ile hesaplanır. ϵ_s , silisyumun dielektrik sabitidir ve $\epsilon_s=11.8\epsilon_0$ değerine sahiptir. Burada bulunan ikinci terim,

$$c_2 = \frac{1}{1+\alpha} \quad (2.92)$$

c_2 şeklinde bir sabit ile tanımlanır ve

$$c_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_D (d(C^{-2})/dV)} = \frac{N_D}{N_D'} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qN_{ss}\delta} \quad (2.93)$$

ifadesiyle verilir (Chattopadhyay ve Daw 1986). Burada N_D ve N_D' sırasıyla deneysel olarak C^{-2} -V grafiğinin eğiminden ve kuramsal olarak bulunan verici yoğunluklarını göstermektedir. Kuramsal ve deneysel olarak bulunan verici yoğunluklarının denklem (2.93)'e göre oranından c_2 bulunur. c_2 değerlerinin (2.92) denkleminde kullanılmasıyla α ve (2.90) denkleminde de N_{ss} değerleri elde edilir.

Fermi enerji seviyelerini hesaplamak için

$$E_f = kT \ln \left(\frac{N_C}{N_D} \right) \quad (2.94)$$

bağıntısından yararlanılır. Burada N_C , iletim bandındaki etkin durumların yoğunluğu olup,

$$N_C = 4.82 \times 10^{15} \left(\frac{m^*}{m_0} \right)^{3/2} T^{3/2} \quad (2.95)$$

bağıntısından hesaplanır. Burada m^* , elektronların etkin kütlesi olup $m^* = 0.33m_0$ değerine sahiptir (Sze 1981) ve m_0 , durgun elektron kütlesini göstermektedir.

C-V grafiklerinden yararlanarak $\phi_{b(C-V)}$ değerleri

$$\phi_{b(C-V)} = V_d + E_f - \Delta\phi_b \quad (2.96)$$

ifadesinden bulunabilir. Burada $\Delta\phi_b$, Schottky engel alçalmasını göstermektedir ve

$$\Delta\phi_b = \sqrt{\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (2.97)$$

ile verilir. E_m maksimum elektrik alanıdır ve

$$E_m = E(x=0) = \sqrt{\frac{2qN_D V_d}{\epsilon_s\epsilon_0}} \quad (2.98)$$

bağıntısıyla verilir. (2.92) denkleminde bulunan α değerlerinin (2.89) denkleminde kullanılmasıyla V_d belirlenir. (2.98) denkleminde elde edilen E_m sonuçlarının (2.97) denkleminde kullanılmasıyla da $\Delta\phi_b$ saptanır. Tüm bu sonuçların (2.96) denkleminde yerine yazılmasıyla da $\phi_{b(C-V)}$ hesaplanmış olur.

Ara yüzey durum yoğunlukları ayrıca I-V ölçümlerinden de belirlenebilir. Bunun için Card ve Rhoderick (1971) tarafından ara yüzey durum yoğunluğuna ve yalıtkan kalınlığına bağlı olarak idealite faktörü

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{ss} \right) \quad (2.99)$$

ile verilir. Bu denklemin yeniden düzenlenmesiyle

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[(n-1) \left(\frac{\epsilon_i}{\delta} \right) - \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} \right) \right] \quad (2.100)$$

ifadesi elde edilir. Burada W_D , tüketim bölgesinin genişliği olmak üzere

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_d}{qN_D}} \quad (2.101)$$

bağıntısından bulunabilir.

Yüksek frekanstaki kapasiteyi (C_{HF}), tüketim bölgesi kapasitesiyle ve düşük frekanstaki (C_{LF}) fazlalığı ara yüzey (C_{IS}) durumlarıyla ilişkilendirilebilir. Tüketim bölgesi Fermi seviyesindeki durum yoğunluğu (N_{IS}), ara yüzey durumlarının en düşük limiti basitçe (2.102) denklemi ile hesaplanabilir (Tavakolian ve Sites 1988).

$$N_{IS} = \frac{C_{LF} - C_{HF}}{q} \quad (2.102)$$

2.13 SnO₂/n-Si Yapısının Bant Diyagramının Belirlenmesi

n-tipi Si yarıiletkenine ait elektron ilgisi ($\chi=4.05$ eV) ve E_g yasak bant aralığı (1.1 eV) değerleri, Basu ve Dutta (1993) tarafından yapılan çalışmadan alınmıştır. SnO₂ için elektron ilgisi ($\chi=4.80$ eV) değeri literatürden (Mangamma ve Gnanasekaran 2000) alınmıştır.

Yarıiletkenin katkısız ve fermi seviyesi arasındaki farkı veren;

$$E_f - E_i = kT \ln \left(\frac{N_{Si}}{n_i} \right) \quad (2.103)$$

bağıntısında deneysel olarak ölçülen Si taşıyıcı yoğunluğu ve diğer sabit değerler yerine yazıldığında $E_f - E_i = 0.27$ eV bulunmuştur (Oda sıcaklığında $n_i = 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ olarak alınmıştır). Bant aralığının yarısından bulunan bu değer çıkarılmasıyla $E_c - E_f = 0.28$ eV olarak bulunmuştur (Sze 1981).

n-tipi yarıiletken için iş fonksiyonu;

$$\Phi_n = \chi_n + E_{an} \quad (2.104)$$

ifadesinde değerler yerine yazılarak, iş fonksiyonu 4.33 eV olarak hesaplanmıştır.

İletim bandındaki süreksizlik;

$$\Delta E_c = \chi_2 - \chi_1 \quad (2.105)$$

ifadesiyle, değerlik bandındaki süreksizlik ise;

$$\Delta E_v = \Delta E_g - \Delta E_c \quad (2.106)$$

bağıntısı ile verilir.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

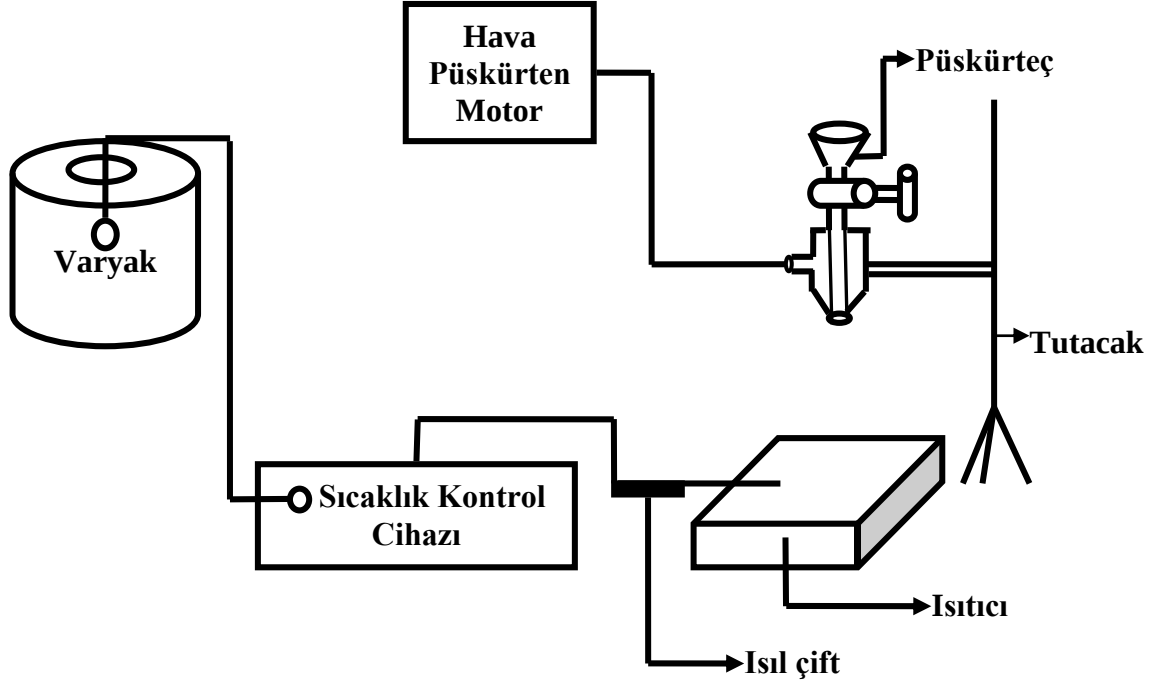
3.1 SnO₂ Malzemesi

SnO₂ tetragonal kristal yapıda kristalleşir. n-tipi ve doğrudan bant aralıklı bir yarıiletkenidir (Joseph vd. 2009). SnO₂ geniş yasak enerji bant aralığına sahip ($E_g=3.6-4.0$ eV) malzemelerden olduğu için optik spektrumun büyük bir bölgesinde geçirgendir (Bagheri vd. 2008, Khan vd. 2010). Kimyasal olarak kararlı ve yüksek sıcaklık değişimlerine dayanıklı malzeme olduğu için çalışmalarda sıklıkla tercih edilmektedir (Karunakaran vd. 2013). Bu nedenle optoelektronik cihazlarda, n-p ve n-n heteroeklem yapılarında ve güneş pillerinde ön kontak olarak kullanılmaktadır. SnO₂ ince filmler; katı hal gaz sensörleri, algılayıcı yüzeyler, güneş pilleri, şeffaf elektrotlar, manyetik medya kaydı, organik ışık saçan diyotlar, fototransistörler, düz panel ekranlar ve dokunmatik ekranlar gibi geniş uygulama alanlarına sahip olması nedeniyle teknolojik olarak en önemli metal oksit malzemeler arasında yer almaktadır. Magnetron sputtering (Montero vd. 2010), kimyasal buhar depolama (Yu vd. 2012), atmalı lazer depolama (Xiao vd. 2010), elektron demet buharlaştırma (Haireche vd. 2013), püskürtme (Elangovan vd. 2004) ve sol-jel (Dua ve Biswas 2013) yöntemleri SnO₂ ince film büyütürken kullanılan yöntemlerin başlıcalarındandır.

3.2 Püskürtme Yöntemi

SnO₂ ince filmlerin yapısal, elektronik iletim ve optiksel özellikleri; büyütülme yöntemine, yöntemin koşullarına, katkı atomlarının türüne ve sayısına bağlı olarak değişmektedir. Püskürtme yöntemi; farklı katkı atomlarının eklenmesinin kolay olduğu, tekrarlanabilir üretimin sağlandığı, endüstri ve güneş pili uygulamaları için gereken homojen geniş yüzey kaplamalarında; yüksek büyütme oranı ve kütle üretim kapasitesine sahip filmlerin elde edilebildiği, basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu nedenlerle farklı yöntemler arasında püskürtme yöntemi katkılı SnO₂ ince filmlerin büyütülmesi için en uygun olanıdır. Ayrıca stokiometrik SnO₂ mükemmel bir yalıtkandır. Fakat malzeme püskürtme yöntemi ile büyütüldüğünde yarı-metalik olur.

SnO₂ ince filmlerin üretildiği püskürtme düzeneği şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 Deney düzeneği

Şekilde görüldüğü gibi deney düzeneğinde bir püskürteç, bir ısıtıcı, varyak, sıcaklık kontrol cihazı ve hava püskürten motor bulunmaktadır. Hazırlanan çözelti belirli sıcaklıkta sabit tutulan cam ve Si kristal alt tabakalar üzerine sıcaklık değişikliği olmayacak şekilde püskürtülmüştür. Burada sıcaklık kontrol cihazı ile alt tabaka sıcaklığı kontrol edilmiş ve istenilen sıcaklıkta kalmasına dikkat edilmiştir.

3.3 Alt tabakaların Temizlenmesi

Kaliteli film elde edilmesinde alt tabaka temizliği önemli bir faktördür. Bu çalışmada alt tabaka olarak cam lameller kullanılmıştır. Cam lameller ultrasonik su banyosunda sırasıyla 10 dakika etanol (C₂H₅OH, Merck), 10 dakika saf suda tutularak temizlenmiştir. Daha sonra camlar kurutulmuştur.

Deneyde n-tipi ve p-tipi, 1-20 Ω -cm özdirençli, 140 μ m kalınlığa sahip ve (111) düzleminde kesilmiş Wafer Works Corp. firmasına ait tek bir yüzeyi parlatılmış silisyum tek kristalleri kullanılmıştır. Kristaller kaplama öncesinde RCA (Radio Corporation of America) kimyasal yöntemiyle temizlenmiştir (Kern 1993). Bu aşamalar aşağıda anlatılmıştır.

Organik Temizleme: 1:1:5 oranında sırasıyla amonyum hidroksit (NH_4OH , Merck), hidrojen peroksit (H_2O_2 , Merck) ve 18 M Ω 'luk deiyonize su temiz bir beherde karıştırılarak içerisine silisyum kristalleri konmuş ve 10 dakika boyunca 60-70 °C'de kaynatılmıştır.

Oksit Temizleme: 1:10 oranında sırasıyla hidroflorik asit (HF , Merck) ve 18 M Ω 'luk deiyonize su temiz bir beherde karıştırılarak içerisine silisyum kristalleri konmuş ve 30 saniye boyunca ultrasonik banyoda bırakılmıştır.

İyonik Temizleme: 1:1:6 oranında sırasıyla hidroklorik asit (HCl , Merck), hidrojen peroksit ve 18 M Ω 'luk deiyonize su temiz bir beherde karıştırılarak içerisine silisyum kristalleri konmuş ve 10 dakika boyunca 60-70 °C'de kaynatılmıştır. Her bir işlem sonrasında silisyum kristalleri 18 M Ω 'luk deiyonize su ile iyice çalkalanmıştır. Daha sonra kristaller kurumaya bırakılmıştır.

3.4 SnO₂ Çözeltisinin Hazırlanması

0,8 molar (M) SnO₂ çözeltisi hazırlamak için ilk önce yeterli miktarda kalay klorür ($\text{SnCl}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, Merck) 2.5 veya 5 ml hidroklorik asit (HCl , Merck) içinde 90 °C'de 10 dakika ısıtılarak çözülür ve 15 ml etanol eklenip karıştırılarak başlangıç çözeltisi oluşturulmuştur. HCl eklenmesi etanol ile seyreltilirken oluşan polimer molekülleri yıkmak için gerekmektedir. Farklı atomlar katkılanması için, gerekli miktardaki maddeler etanol içerisinde çözülerek başlangıç çözeltisine eklenmiştir.

3.5 SnO₂ İnce Filmlerin Kaplanması

SnO₂ ince filmler; hazırlanan SnO₂ çözeltisinin, önceden 400 °C'ye ısıtılmış cam ve Si kristal alt tabakaların üzerine 26 cm mesafeden püskürtme yöntemiyle kaplanmıştır. En büyük elektriksel iletkenlik ya da başka bir ifadeyle en düşük öz direnç değeri 400 °C sıcaklık değerinde elde edildiğinden, püskürtme sıcaklığı olarak seçilmiştir. (Serin vd. 2006)

İnce filmler n-Si kristali ve p-Si kristali üzerinde büyütüldükten sonra ön ve arka kontak olarak vakum sisteminde Al buharlaştırılmıştır. p-Si kristallerinin arka tarafına Al buharlaştırdıktan sonra alaşım elde edebilmek için 580 °C fırında 3 dakika bekletilmiştir. Elde edilen heteroeklem yapıların, diyot alanı 0.007854 cm²'dir.

3.6 Ölçüm Düzenekleri

Numunelerin yansıma ve geçirgenlik spektrumlarının ölçümünde kullanılan UV-3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR spektrometresi şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2 UV-VIS-NIR spektrometresi



Şekil 3.3 Elektriksel ölçüm sistemi

İki nokta yöntemine göre iletkenlik, dört nokta yöntemine göre Hall etkisi, diyotlar için akım-gerilim, kapasite-gerilim ve kapasite-frekans ölçümlerinin alındığı düzenek şekil 3.3'te verilmiştir. Burada görülen parçaların isimleri şu şekildedir: 1) Keithley 2182A Nanovoltmetre, 2) Lake Shore 331 Sıcaklık kontrolcüsü, 3) Keithley 2700 Multimetre, 4) Keithley 2400 Güç kaynağı, 5) Nanomagnetics Instruments μ Prob Hall Gaussmetresi, 6) Nanomagnetics Instruments Manyetik Güç kaynağı.

Diyotların kapasite-gerilim ve kapasite-frekans ölçümlerinde kullanılan Hewlett Packard 4192A LF empedans analizörü şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4 LF empedans analizörü

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Değişik miktarlarda HCl içerecek şekilde, farklı oranlarda ve farklı atomlarla katkılanarak cam alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Cam alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler

Numune	HCl Miktarı	Katkı Oranı	Katkı Atomu	Alt tabaka
SnO ₂	2.5 ml	Katkısız	–	Cam
% 1 Sb:SnO ₂	2.5 ml	% 1	Sb	Cam
% 2 Sb:SnO ₂	2.5 ml	% 2	Sb	Cam
% 3 Sb:SnO ₂	2.5 ml	% 3	Sb	Cam
% 4 Sb:SnO ₂	2.5 ml	% 4	Sb	Cam
SnO ₂	5 ml	Katkısız	–	Cam
% 2 Cu:SnO ₂	5 ml	% 2	Cu	Cam
% 2 Al:SnO ₂	5 ml	% 2	Al	Cam
% 1 In:SnO ₂	5 ml	% 1	In	Cam
% 2 In:SnO ₂	5 ml	% 2	In	Cam
% 3 In:SnO ₂	5 ml	% 3	In	Cam
% 5 In:SnO ₂	5 ml	% 5	In	Cam
% 1 Co:SnO ₂	5 ml	% 1	Co	Cam
% 2 Co:SnO ₂	5 ml	% 2	Co	Cam
% 3 Co:SnO ₂	5 ml	% 3	Co	Cam
% 5 Co:SnO ₂	5 ml	% 5	Co	Cam

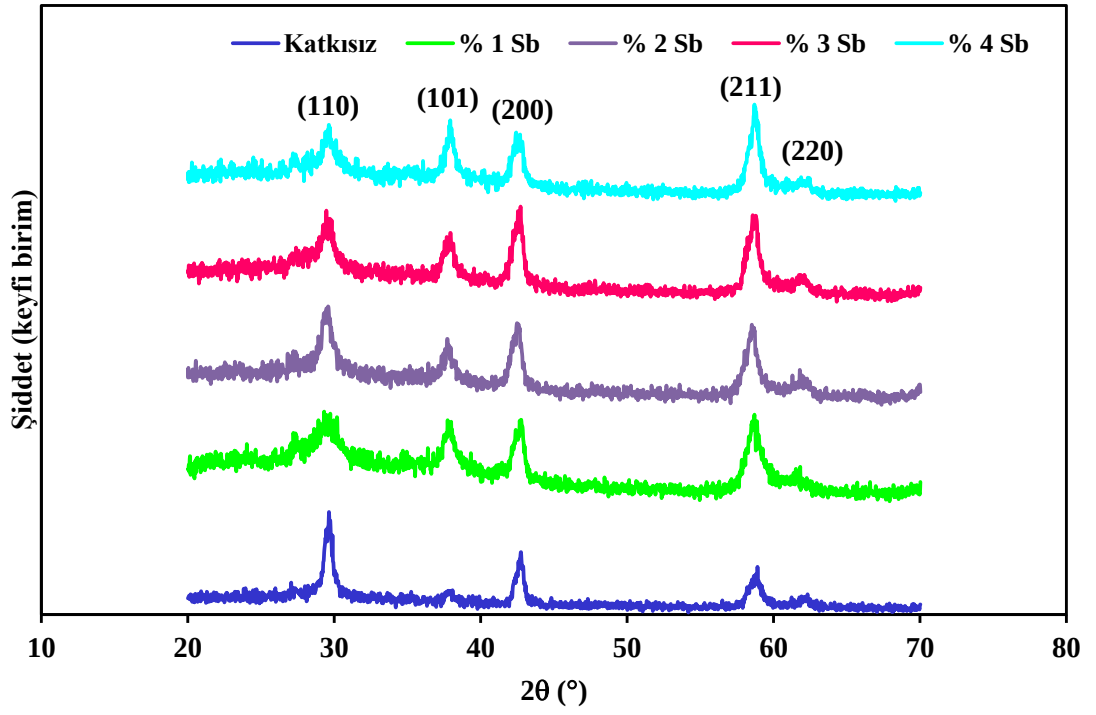
Aynı miktarda HCl içerecek şekilde, farklı oranlarda ve farklı atomlarla katkılanarak n-tipi ve p-tipi Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.2 n ve p-Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler

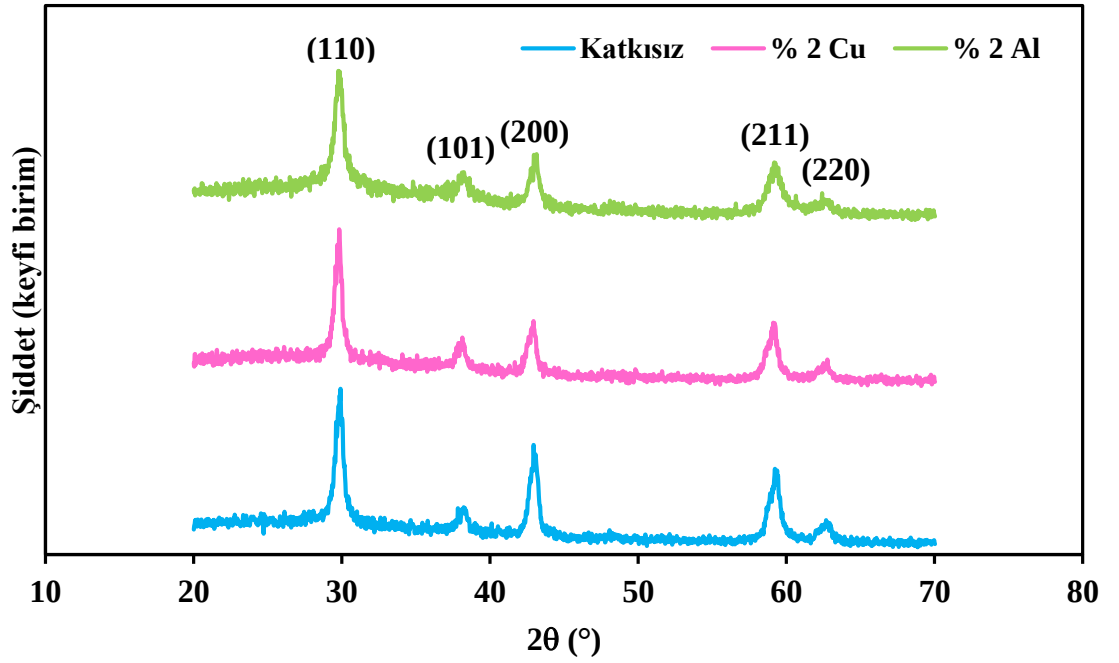
Numune	HCl Miktarı	Katkı Oranı	Katkı Atomu	Alt tabaka
SnO₂/n-Si	5 ml	Katkısız	–	n-tipi Si
% 3 Co:SnO₂/n-Si	5 ml	% 3	Co	n-tipi Si
% 5 Co:SnO₂/n-Si	5 ml	% 5	Co	n-tipi Si
% 3 In:SnO₂/n-Si	5 ml	% 3	In	n-tipi Si
% 5 In:SnO₂/n-Si	5 ml	% 5	In	n-tipi Si
SnO₂/p-Si	5 ml	Katkısız	–	p-tipi Si
% 3 Co:SnO₂/p-Si	5 ml	% 3	Co	p-tipi Si
% 5 Co:SnO₂/p-Si	5 ml	% 5	Co	p-tipi Si
% 3 In:SnO₂/p-Si	5 ml	% 3	In	p-tipi Si
% 5 In:SnO₂/p-Si	5 ml	% 5	In	p-tipi Si

4.1 SnO₂ İnce Filmlerin Yapısal Özelliklerinin XRD İle İncelenmesi

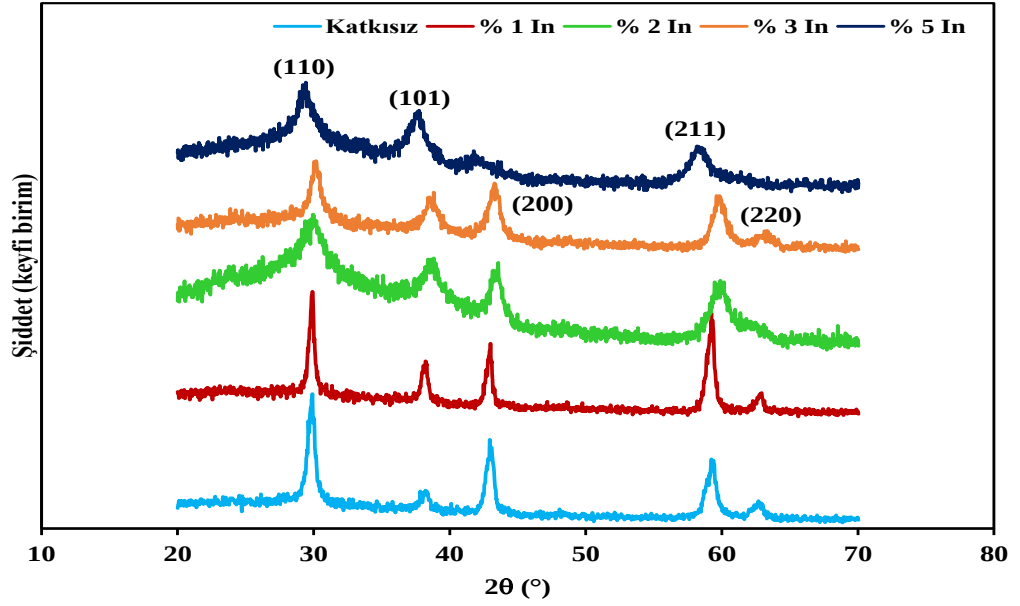
Cam lameller üzerinde büyütülen ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için X-ışını toz kırınımı çekilmiştir. Bunun için, dalga boyu 1.788970 Å olan CoK α radyasyonlu Inel-EQUINOX 1000 X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. 2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.1’de verilmiştir.



5 ml HCl içeren katkısız, % 2 oranında Cu ve Al katkılı SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.2’de verilmiştir.

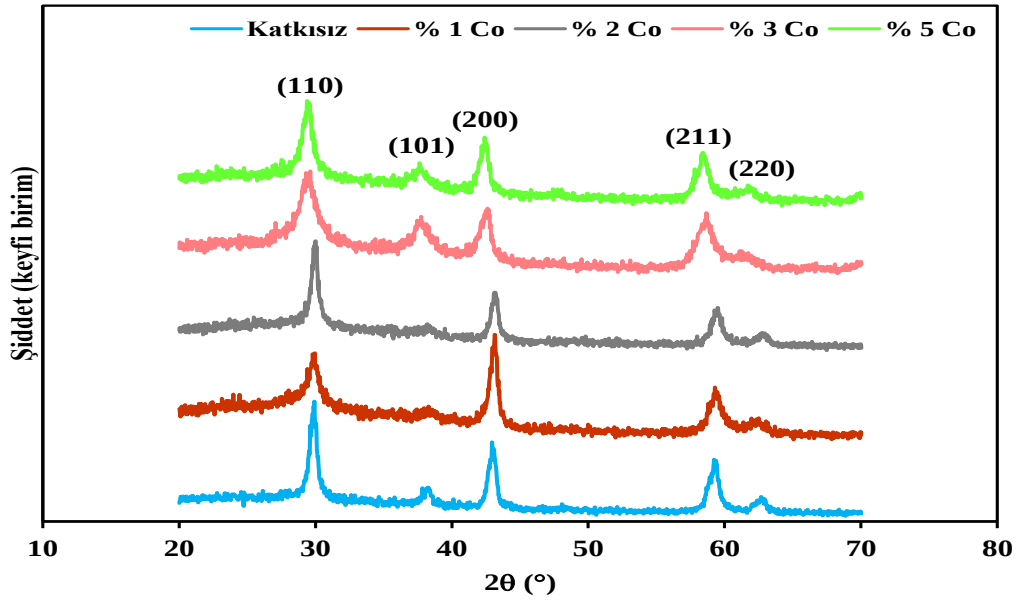


5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında In katkılı SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.3'te verilmiştir.



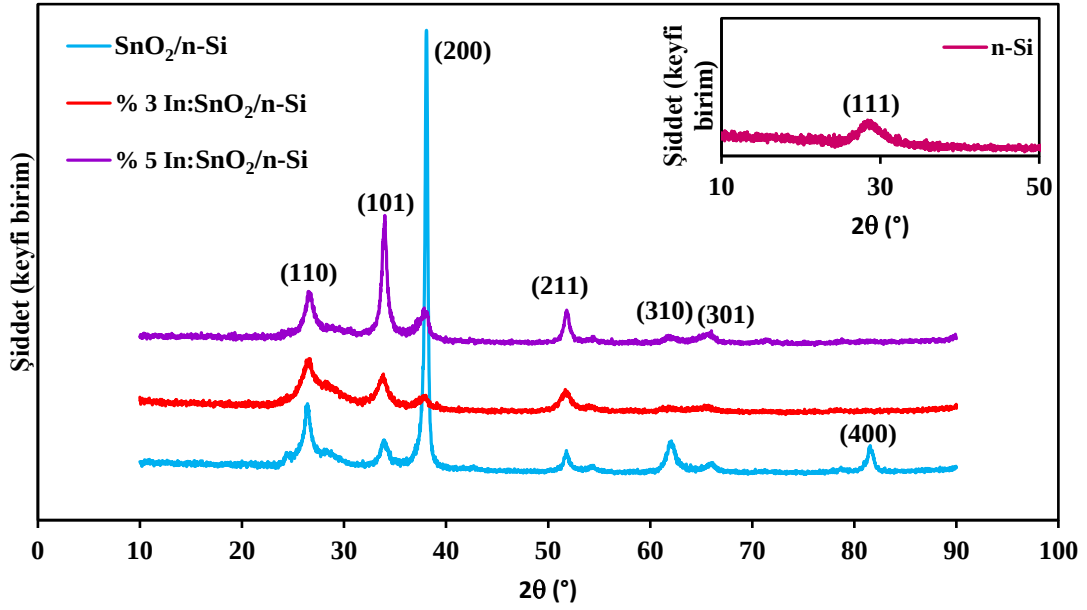
Şekil 4.3 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları

5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında Co katkılı SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.4'te verilmiştir.

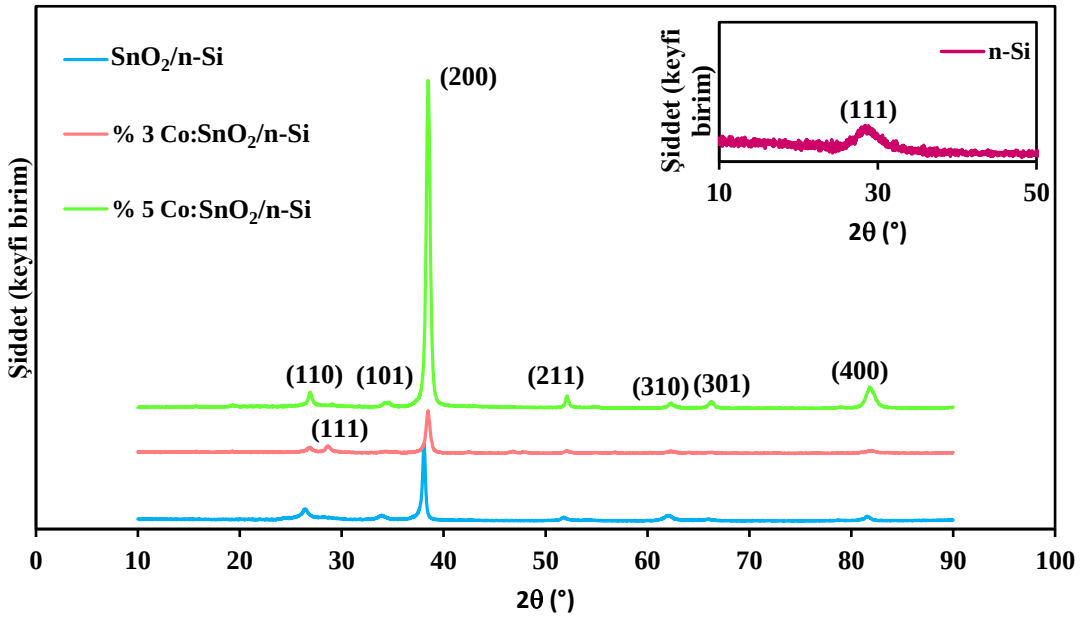


Şekil 4.4 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları

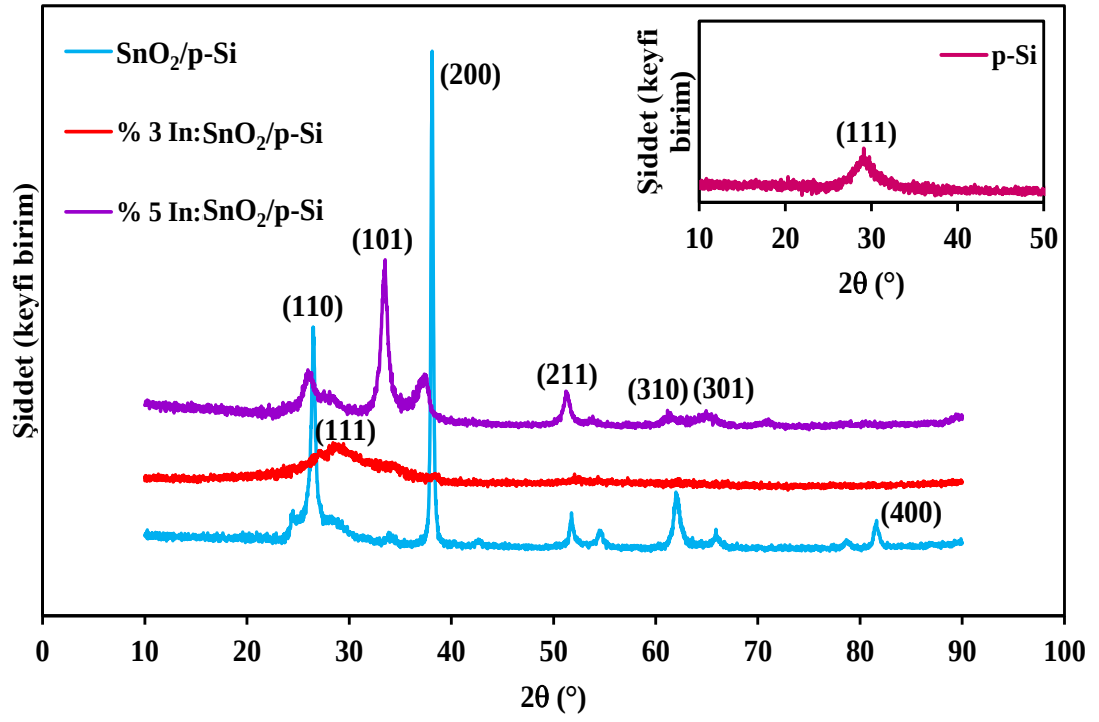
Hazırlanan ince filmlerin yapısal özelliklerinin incelenmesi için X-ışını toz kırınımı çekilmiştir. Bunun için, dalga boyu 1.545013 Å olan CuK α radyasyonlu Rigaku-D/max-III C X-ışını difraktometresi kullanılmıştır. n-tipi ve p-tipi Si kristali üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları sırasıyla şekil 4.5-4.8’de verilmiştir.



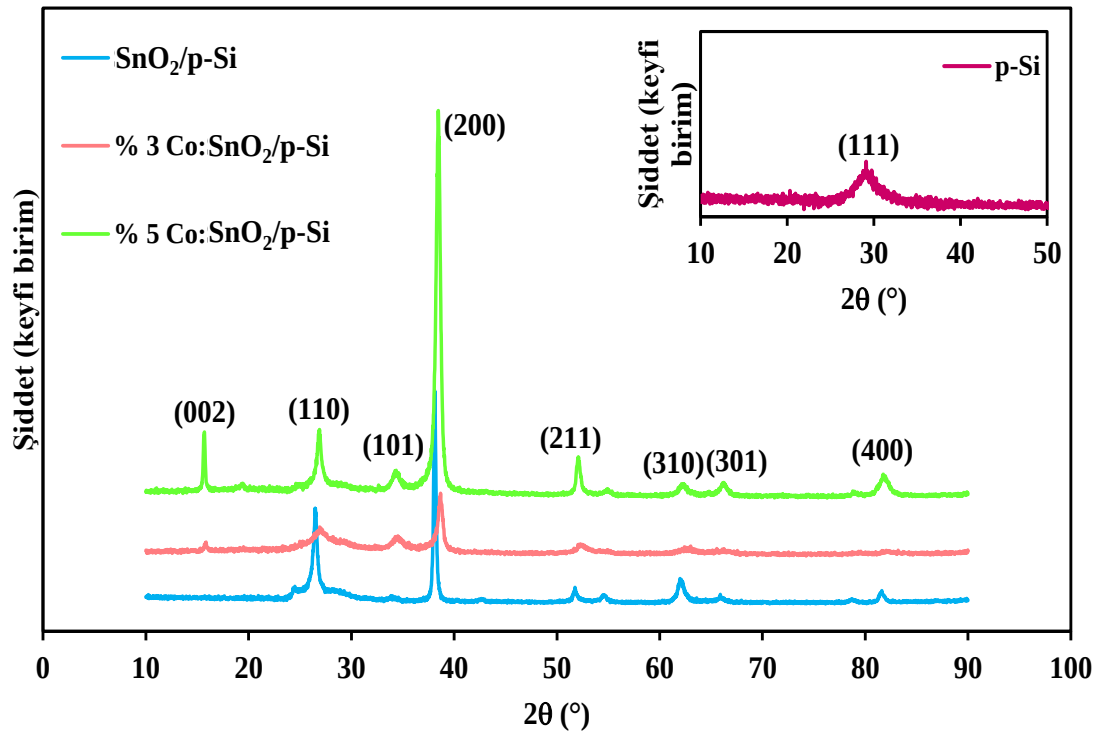
Şekil 4.5 n-Si üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları



Şekil 4.6 n-Si üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları



Şekil 4.7 p-Si üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları



Şekil 4.8 p-Si üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları

Kristale gelip kırınımına uğrayan dalgaların yapıcı girişim yapacakları doğrultular Bragg yasası ile belirlenir. Bu yasaya göre, birbirine paralel iki düzlemden yansıyan X-ışınları arasındaki yol farkı dalga boyunun tam katlarına eşitse yapıcı girişim olur. Bragg yansıması aşağıdaki denklemdeki gibi verilir:

$$2d_{hkl}\sin(\theta_{hkl})=n\lambda \quad (4.1)$$

Denklemdeki θ_{hkl} bir hkl düzleminden Bragg yansıma açısı, d_{hkl} değeri hkl düzlemleri arasındaki uzaklık ve n yansımanın derecesini gösteren tam sayıdır. Düzlemler arası uzaklık, d_{hkl} , herhangi bir hkl yansımasından birim hücre boyutları kullanılarak hesaplanır.

Bilinen Miller indisleri ve kırınım deseninden tetragonal kristal yapı için sistemin örgü parametreleri aşağıdaki denklemden hesaplanabilir:

$$\textbf{Tetragonal: } 1/d_{hkl}^2 = \{(h^2 + k^2)/a^2\} + (l^2/c^2) \quad (4.2)$$

Kristalin herhangi bir hkl doğrultusundaki kristalit boyutu (D) Debye-Scherrer formülü kullanarak aşağıdaki eşitlikteki gibi elde edilir.

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos \theta_{hkl}} \quad (4.3)$$

Denklemdeki λ , toz kırınımında kullanılan X-ışının dalga boyu, β pikin maksimum şiddetinin yarısındaki genişliği ve θ Bragg yansıma açısıdır.

Düzlemler arası mesafeler, XRD spektrumundan elde edilen 2θ değerleri ve denklem (4.1) ile verilen Bragg Yasası kullanılarak bulunmuştur. Tetragonal kristal yapı için düzlemler arası uzaklığı veren (4.2) bağıntısının kullanılmasıyla da ince filmlerin örgü sabitleri olan a ve c hesaplanmıştır. Sonuçlar cam ve n ve p-tipi Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler için sırasıyla çizelge 4.3-4.4'te verilmiştir. Cam üzerinde

büyütülen ve farklı miktarlarda HCl içeren katkısız SnO₂ ince filmlerin içerdiği HCl miktarı parantez içerisinde belirtilmiştir.

Çizelge 4.3 Cam üzerindeki SnO₂ ince filmlerin örgü sabitleri ve oranları

Numune	a (Å) (deneysel)	c (Å) (deneysel)	c/a (deneysel)
SnO ₂ (2.5 ml)	4.942	3.246	0.66
% 1 Sb:SnO ₂	4.893	3.253	0.66
% 2 Sb:SnO ₂	4.972	3.253	0.65
% 3 Sb:SnO ₂	4.961	3.240	0.65
% 4 Sb:SnO ₂	4.955	3.237	0.65
SnO ₂ (5 ml)	4.902	3.308	0.67
% 2 Cu:SnO ₂	4.916	3.318	0.67
% 2 Al:SnO ₂	4.902	3.312	0.68
% 1 In:SnO ₂	4.902	3.304	0.67
% 2 In:SnO ₂	4.902	3.256	0.66
% 3 In:SnO ₂	4.888	3.257	0.67
% 5 In:SnO ₂	4.989	3.341	0.67
% 1 Co:SnO ₂	4.916	3.299	0.67
% 2 Co:SnO ₂	4.888	3.295	0.67
% 3 Co:SnO ₂	4.981	3.337	0.67
% 5 Co:SnO ₂	4.975	3.342	0.67

Çizelge 4.4 Si kristali üzerindeki SnO₂ ince filmlerin örgü sabitleri ve oranları

Numune	a (Å) (deneysel)	c (Å) (deneysel)	c/a (deneysel)
SnO ₂ /n-Si	4.757	3.177	0.67
% 3 Co:SnO ₂ /n-Si	4.686	3.034	0.65
% 5 Co:SnO ₂ /n-Si	4.683	3.190	0.68
% 3 In:SnO ₂ /n-Si	4.778	3.189	0.67
% 5 In:SnO ₂ /n-Si	4.733	3.175	0.67
SnO ₂ /p-Si	4.757	3.203	0.67
% 3 Co:SnO ₂ /p-Si	4.669	3.133	0.67
% 5 Co:SnO ₂ /p-Si	4.688	3.142	0.67
% 3 In:SnO ₂ /p-Si	4.686	3.157	0.67
% 5 In:SnO ₂ /p-Si	4.843	3.214	0.66

XRD spektrumlarından elde edilen aç değeri ve pikin maksimum şiddetinin yarısındaki genişlik değeri (β) (4.3) denklemi ile verilen Debye-Scherrer bağıntısında kullanılarak her bir filmin kristalit boyutu (D) hesaplanmıştır. Kristalitin en büyük şiddete sahip tercih ettiği yönetime karşılık gelen yansıma açılarının ait oldukları (hkl) düzlemleri JCPDS 41-1445 numaralı karttan alınmıştır. Bu değerler n-tipi ve p-tipi Si ve cam alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler için sırasıyla çizelge 4.5-4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 n-Si kristali üzerindeki SnO₂ ince filmlerin kristalit boyutları

Numune	(hkl) Düzlemi	2 θ (°)	β (°)	D (Å)
SnO ₂ /n-Si	(200)	38.08	0.22	388.17
% 3 Co:SnO ₂ /n-Si	(200)	38.47	0.24	356.22
% 5 Co:SnO ₂ /n-Si	(200)	38.49	0.35	237.56
% 3 In:SnO ₂ /n-Si	(110)	26.36	0.32	259.10
% 5 In:SnO ₂ /n-Si	(101)	33.99	0.08	1055.55

Çizelge 4.6 p-Si kristali üzerindeki SnO₂ ince filmlerin kristalit boyutları

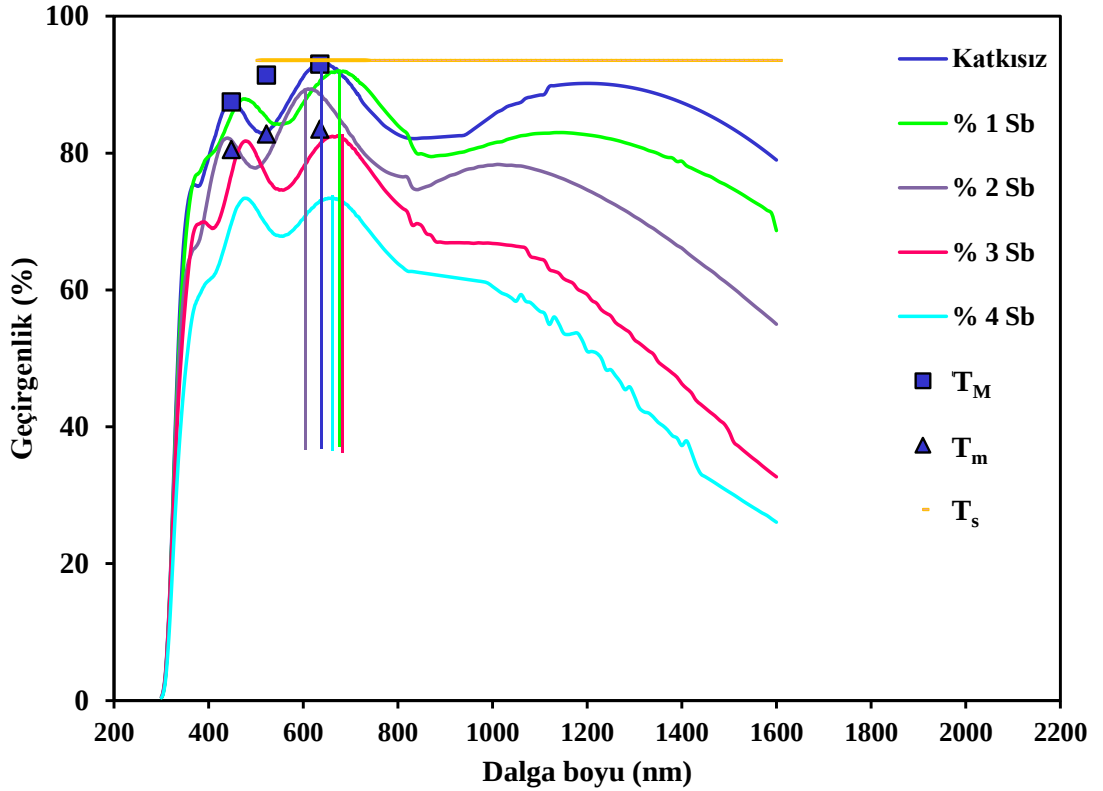
Numune	(hkl) Düzlemi	2θ (°)	β (°)	D (Å)
SnO ₂ /p-Si	(200)	38.12	0.19	427.09
% 3 Co:SnO ₂ /p-Si	(200)	38.64	0.51	164.52
% 5 Co:SnO ₂ /p-Si	(200)	38.46	0.15	534.54
% 3 In:SnO ₂ /p-Si	(111)	28.78	0.95	86.83
% 5 In:SnO ₂ /p-Si	(101)	33.48	0.43	191.59

Çizelge 4.7 Cam üzerindeki SnO₂ ince filmlerin kristalit boyutları

Numune	(hkl) Düzlemi	2θ (°)	β (°)	D (Å)
SnO ₂ (2.5 ml)	(110)	29.66	0.29	323.27
% 1 Sb:SnO ₂	(211)	58.65	0.71	149.34
% 2 Sb:SnO ₂	(110)	29.48	0.59	161.57
% 3 Sb:SnO ₂	(200)	42.67	0.24	419.29
% 4 Sb:SnO ₂	(211)	58.73	0.35	298.84
SnO ₂ (5 ml)	(110)	29.91	0.62	154.53
% 2 Cu:SnO ₂	(110)	29.82	0.57	167.33
% 2 Al:SnO ₂	(110)	29.91	0.67	141.44
% 1 In:SnO ₂	(110)	29.91	0.44	218.37
% 2 In:SnO ₂	(110)	29.91	2.85	33.48
% 3 In:SnO ₂	(110)	30.00	0.83	115.52
% 5 In:SnO ₂	(110)	29.37	0.83	115.37
% 1 Co:SnO ₂	(200)	43.21	0.66	150.83
% 2 Co:SnO ₂	(110)	30.00	0.53	181.51
% 3 Co:SnO ₂	(110)	29.43	0.95	100.97
% 5 Co:SnO ₂	(110)	29.47	0.35	269.30

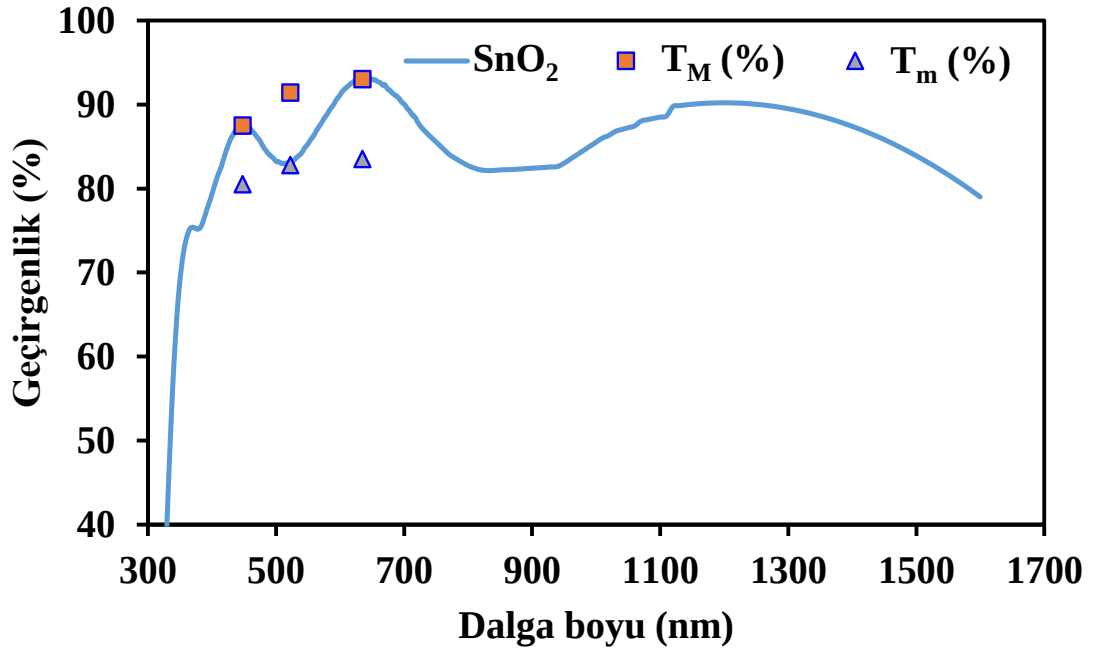
4.2 SnO₂ İnce Filmlerin Geçirgenlik Spektrumlarının İncelenmesi

Cam lameller üzerinde büyütülen Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları 300-1600 nm ve diğer filmler 300-2500 nm dalga boyu aralığında şekil 3.2’de verilen UV-3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR spektrometresi ile ölçülmüştür. 2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin ve camın geçirgenlik spektrumları şekil 4.9’da verilmiştir. Şekil üzerinde verilen düz ve renkli çizgiler, ait oldukları numunenin optik parametrelerinin analizi için belirlenen en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu göstermektedir.



Şekil 4.9 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları

Cam lamel üzerinde büyütülen ve 2.5 ml HCl içeren SnO₂ ince filminin 300-1600 nm dalga boyu aralığındaki geçirme spektrumu şekil 4.10’da verilmiştir. Şekilde Swanepoel’un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Bu çizim benzer şekilde tüm numuneler için yapılmıştır.



Şekil 4.10 SnO₂ ince filmin zarf içine alınmış geçirme spektrumu

Şekil 4.10'dan kalınlığı her yerde aynı olmayan filmin T_M , T_m ve bu değerlere karşılık gelen dalga boyları belirlenmiştir. $s=1.5$ alınıp (2.7) denkleminde T_{M0} bulunmuştur. T_M , T_m ve T_{M0} değerlerinin (2.4) denkleminde yerine yazılması ve bu iki eşitliğin çözülmesiyle T_{m0} ve θ elde edilir. θ , T_M ve T_m değerleri denklem (2.4)'te tekrar kullanılarak kalınlığı her yerde aynı olan filme ait T_{M0} ve T_{m0} belirlenir. Elde edilen T_{M0} ve T_{m0} önce (2.3) denkleminde yerine yazılarak N ve sonra da (2.2) denkleminde n_1 bulunur.

İki ardışık maksimum ve minimum (veya minimum ve maksimum) dalga boylarındaki kırılma indislerinin (2.8) denkleminde kullanılmasıyla d_1 değerleri ve ortalamalarının alınmasıyla da $\bar{d}_1$ belirlenebilir.

λ , $\bar{d}_1$ ve n_1 değerleri (2.9) denkleminde yerine yazılarak farklı ekstremumlar için yansımanın derecesini gösteren m_0 hesaplanabilir. m_0 sonuçlarının maksimum için tam sayıya veya minimum için yarı tam sayıya yuvarlanması ile m değerleri belirlenir.

λ , n_1 ve belirlenen m değerleri (2.10) denkleminde yerine yazılarak yeni bir d_2 kalınlığı hesaplanır ve ortalamalarının alınmasıyla da $\overline{d_2}$ bulunur.

m ve d 'nin kesin değerleri (2.11) denkleminde yerine yazılarak her λ 'daki n bulunabilir. Böylece yeni bir n_2 kırılma indisinin değerleri elde edilir. n_2 kırılma indisinin değerleri (2.12) denklemi ile verilen iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntısına fit edilebilir. Bu hesaplamalar cam lameller üzerinde büyütülen bütün SnO_2 ince filmler için yapılmıştır. 2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO_2 ince filmler için elde edilen sonuçlar sırasıyla çizelge 4.8-4.9'da verilmiştir. Çizelge 4.8'de eğik olarak verilen değerler, geçirgenlik spektrumundan belirlenen deneysel verilerdir.

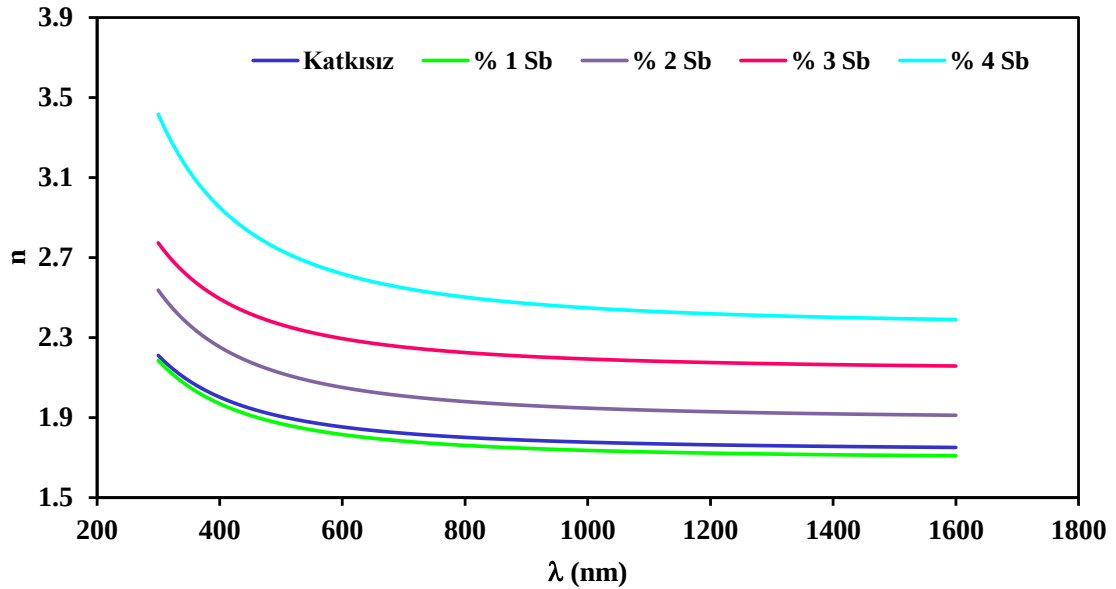
Çizelge 4.8 SnO_2 :Sb numunelerinin λ , T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	T_{M0}	T_{m0}
Katkısız	635	0.930	0.835	0.934	0.832
	522	0.914	0.828	0.919	0.824
	448	0.875	0.805	0.881	0.799
% 1 Sb	675	0.920	0.835	0.929	0.828
	553	0.895	0.840	0.903	0.833
	475	0.880	0.842	0.888	0.835
% 2 Sb	611	0.895	0.773	0.914	0.759
	505	0.848	0.778	0.878	0.753
	437	0.820	0.775	0.875	0.728
% 3 Sb	675	0.850	0.750	0.926	0.694
	555	0.840	0.750	0.933	0.681
	475	0.817	0.725	0.953	0.629
	420	0.770	0.693	0.881	0.612
% 4 Sb	660	0.750	0.660	0.898	0.559
	548	0.737	0.665	0.893	0.556
	475	0.740	0.680	0.922	0.552

Çizelge 4.9 SnO₂:Sb numunelerinin λ , n_1 , d_1 , m , d_2 , n_2 ve Δd değerleri

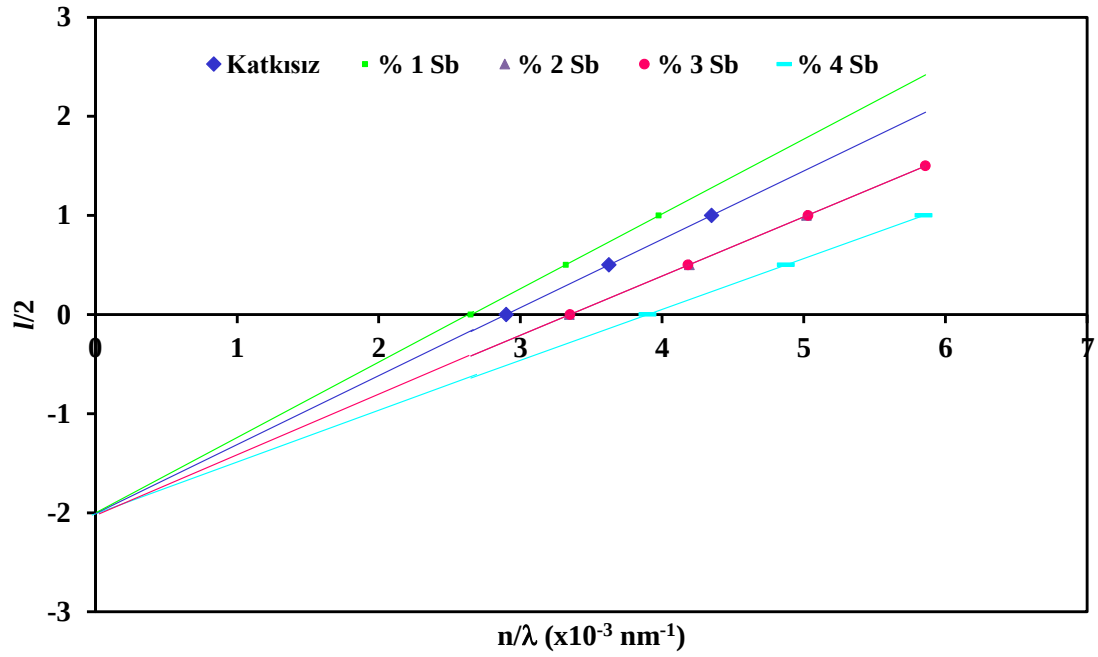
Numune	λ (nm)	n_1	d_1 (nm)	m_0	m	d_2 (nm)	n_2
Katkısız	635	1.832		1.97	2.0	346.67	1.841
	522	1.837	394.48	2.41	2.5	355.28	1.892
	448	1.963	289.28	2.99	3.0	342.27	1.948
	$\bar{d}_1 = 341.88 \text{ nm}$ $\bar{d}_2 = 344.94 \text{ nm}$ $\Delta d = 17.11 \text{ nm}$						
% 1 Sb	675	1.795		2.02	2.0	375.98	1.789
	553	1.827	388.07	2.51	2.5	378.34	1.833
	475	1.889	370.54	3.02	3.0	377.02	1.889
	$\bar{d}_1 = 379.3 \text{ nm}$ $\bar{d}_2 = 377.11 \text{ nm}$ $\Delta d = 29.37 \text{ nm}$						
% 2 Sb	611	2.047		1.94	2.0	298.52	2.046
	505	2.081	324.40	2.38	2.5	303.36	2.114
	437	2.230	254.25	2.95	3.0	293.90	2.195
	$\bar{d}_1 = 289.33 \text{ nm}$ $\bar{d}_2 = 298.59 \text{ nm}$ $\Delta d = 30.57 \text{ nm}$						
% 3 Sb	675	2.236		2.16	2.0	301.86	2.261
	555	2.288	308.95	2.69	2.5	303.26	2.324
	475	2.483	226.21	3.41	3.0	286.96	2.387
	420	2.433	442.53	3.78	3.5	302.14	2.462
	$\bar{d}_1 = 325.89 \text{ nm}$ $\bar{d}_2 = 298.56 \text{ nm}$ $\Delta d = 16.21 \text{ nm}$						
% 4 Sb	660	2.649		2.37	2.0	249.07	2.573
	548	2.657	299.86	2.86	2.5	257.80	2.670
	475	2.711	290.84	3.37	3.0	262.77	2.777
	$\bar{d}_1 = 295.35 \text{ nm}$ $\bar{d}_2 = 256.55 \text{ nm}$ $\Delta d = 10.45 \text{ nm}$						

Çizelge 4.9'daki n_2 değerleri, (2.12) denklemi ile verilen iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntısına fit edilebilir. Bu bağıntı kullanılarak daha kısa dalga boylarına ekstrapole edilmesiyle tüm spektrum için kırılma indisi değerleri elde edilir. 2.5 ml HCl içeren Sb:SnO₂ ince filmler için en küçük kareler yöntemine göre fit edilerek belirlenen Cauchy dispersiyon bağıntıları ve karşılık gelen r^2 , korelasyon katsayılarının değerleri sırasıyla şu şekildedir: Katkısız için; $n=1.7345+(42867/\lambda^2)$ ve 1.00, % 1 Sb için; $n=1.6906+(44500/\lambda^2)$ ve 0.99, % 2 Sb için; $n=1.8885+(58300/\lambda^2)$ ve 0.99, % 3 Sb için; $n=2.1354+(57351/\lambda^2)$ ve 0.99, % 4 Sb için; $n=2.3521+(95802/\lambda^2)$ ve 0.99. Katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin bu denklemlerden elde edilen n değerlerinin dalga boyuna bağlılığı şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.11 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin n - λ grafikleri

Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için Sb:SnO₂ ince filmlerin Cauchy dispersiyon bağıntılarından bulunan n değerleri kullanılarak çizilen $1/2-n/\lambda$ grafikleri şekil 4.12'de verilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi $2d$ ve sabit kısmı ise $-m_1$ değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak d ve m_1 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.10'da verilmiştir. Çizelge 4.10'da ayrıca Swanepoel yönteminden belirlenen kalınlık ile yansımının kaçınıcı dereceden olduğunu gösteren değer ve numunelerin geçirgenlik spektrumunda en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu belirtilmiştir.

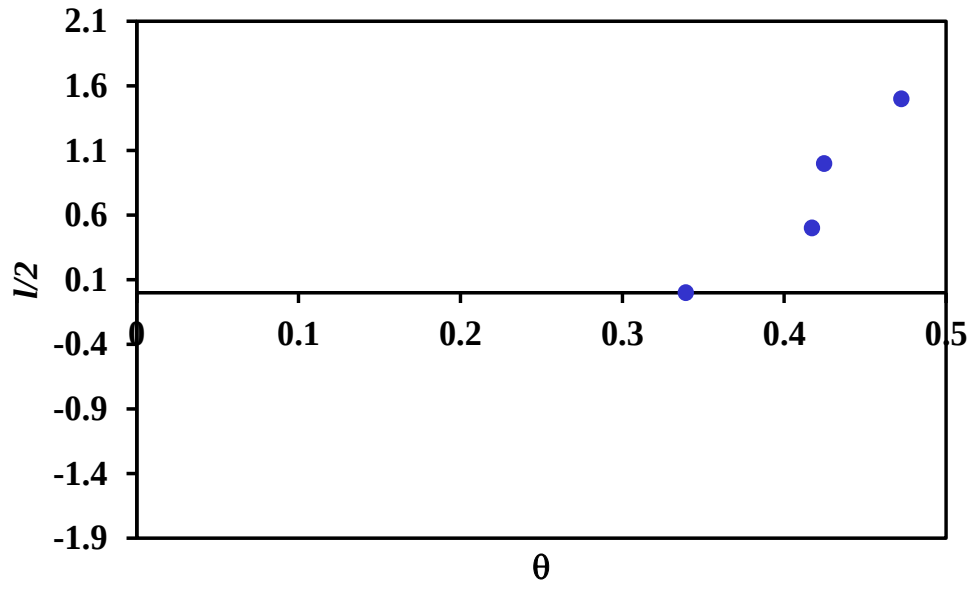


Şekil 4.12 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin $l/2$ - n/λ grafikleri

Çizelge 4.10 SnO₂:Sb numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertbe değerleri

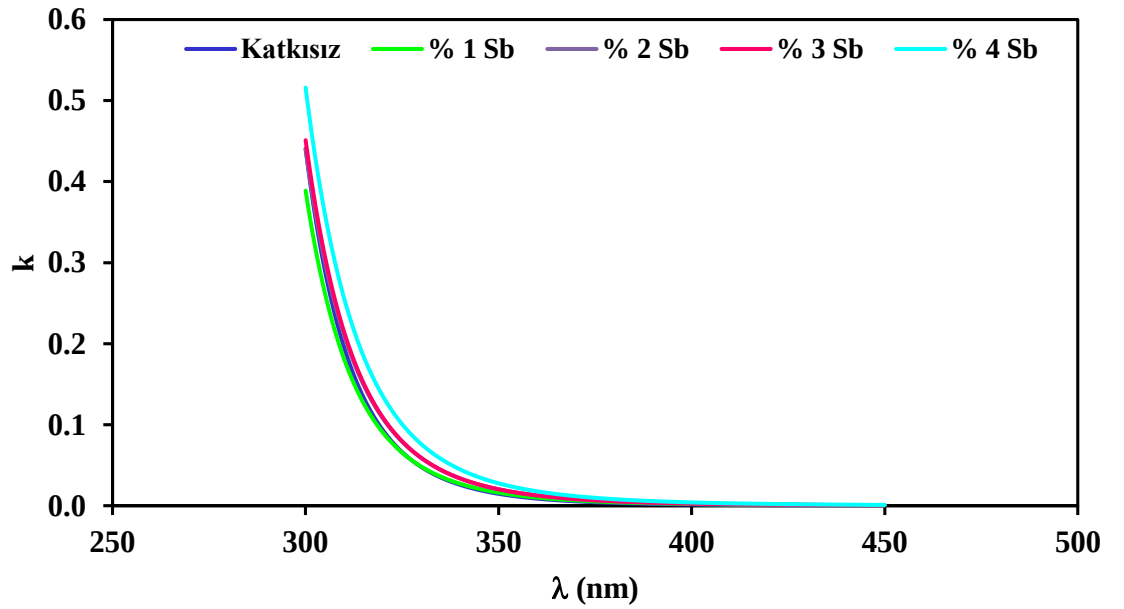
Numune	$\bar{d}_2$ (nm)	d (nm)	m	m_1	Pik
Katkısız	344.94	344.95	2.0	2.0	maks
% 1 Sb	377.11	377.31	2.0	2.0	maks
% 2 Sb	298.59	298.73	2.0	2.0	maks
% 3 Sb	298.56	298.59	2.0	2.0	maks
% 4 Sb	256.55	256.59	2.0	2.0	maks

Cam lamel üzerinde büyütülen ve 2.5 ml HCl içeren SnO₂ ince filmin $l/2$ - θ grafiği şekil 4.13'te verilmiştir. $l/2$ - θ grafiği geçirgen bölge için çizilirse, $l/2$ eksenini kestiği noktadan m_1 ve eğiminden, bulunan ortalama kalınlık değeri kullanılarak Δd elde edilir. Bu grafikler cam lamel üzerinde büyütülen tüm numuneler için çizilmiştir. Grafiklerden Δd değerleri elde edilmiş ve çizelge 4.9'da verilmiştir.



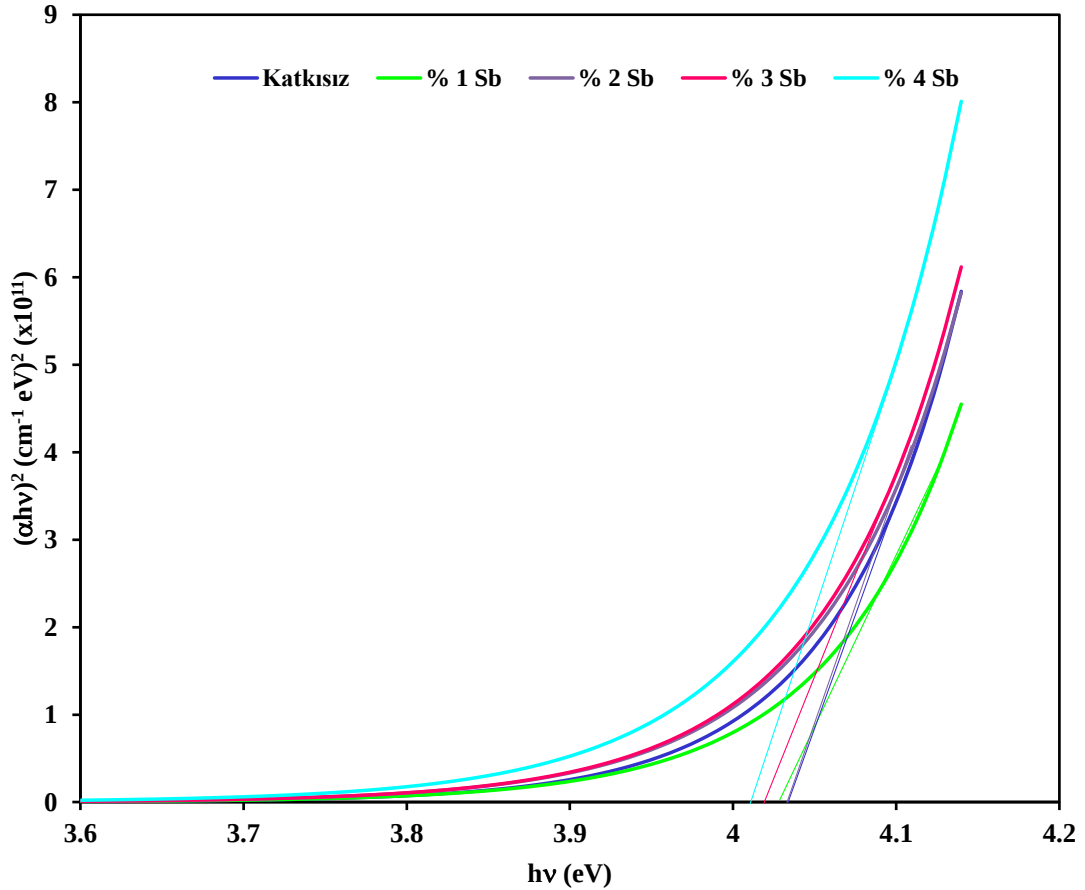
Şekil 4.13 Cam üzerindeki SnO₂ ince filmin $I/2-\theta$ grafiği

(2.16) denkleminde x değerleri bulunur. Sb:SnO₂ ince filmlerin kalınlık ve x değerleri bilindiğinden (2.21) bağıntısından α hesaplanır. Sönüm katsayısı k , α ve λ değerlerinin (2.22) bağıntısında kullanılmasıyla belirlenir. Sb:SnO₂ ince filmlerin $k-\lambda$ grafikleri şekil 4.14'te verilmiştir.



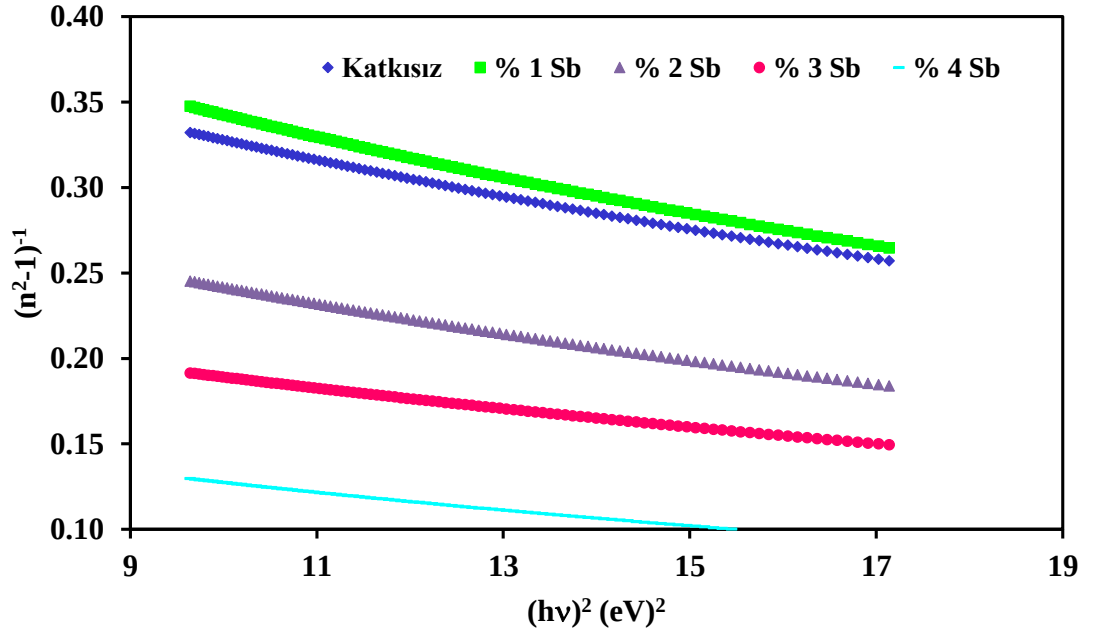
Şekil 4.14 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin $k-\lambda$ grafikleri

Sb:SnO₂ ince filmlerde direkt bir bant geçişi için (2.23) denkleminde $n=0.5$ alınarak şekil 4.15'te gösterilen $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların $h\nu$ eksenine ekstrapole edilmesiyle, eksen kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve çizelge 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4.15 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri

Sb:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri şekil 4.16'da gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi $(E_o E_d)^{-1}$ ve sabit kısmı ise E_o/E_d değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak E_o ve E_d değerleri belirlenmiştir. Bilinen E_o ve E_d değerlerinin (2.28) ve (2.31)-(2.32)'ye kadar yer alan denklemlerde kullanılmasıyla f , M_{-1} ve M_{-3} momentumları hesaplanmıştır. Sırasıyla (2.26), (2.27) denklemlerinden bulunan $n(v=0)$ ve ϵ_∞ ile birlikte belirlenen bütün WDD parametreleri çizelge 4.11'de verilmiştir.

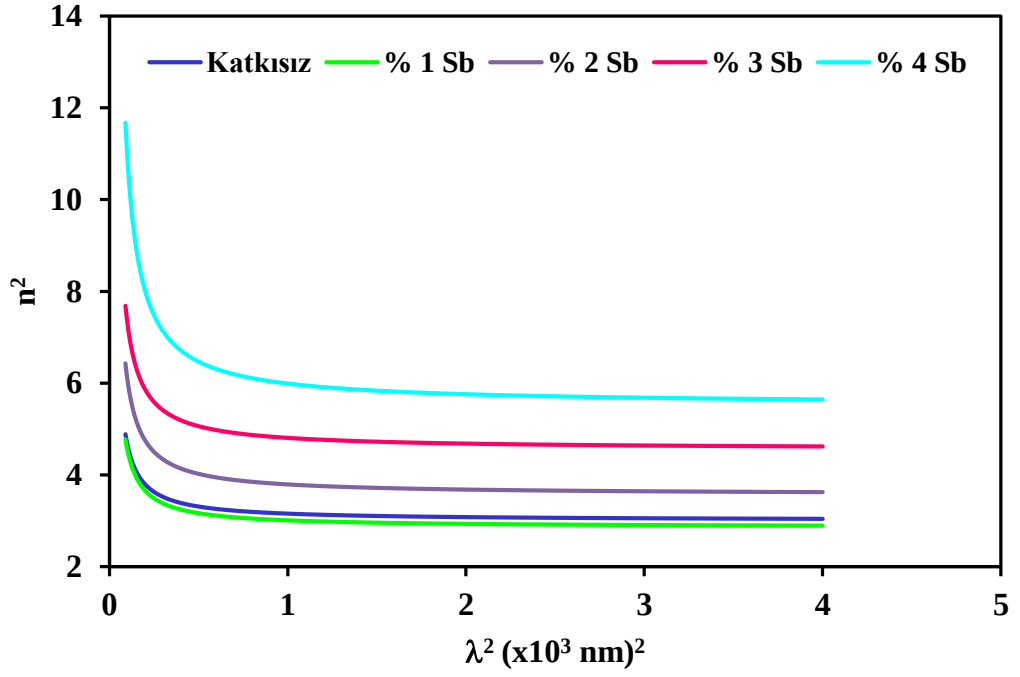


Şekil 4.16 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(hv)^2$ grafikleri

Çizelge 4.11 Sb:SnO₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri

Numune	E ₀ (eV)	E _d (eV)	f (eV) ²	M ₋₁	M ₋₃ (eV) ⁻²	n(v=0)	ε _∞	E _g (eV)
Katkısız	6.50	15.22	99.01	2.34	0.055	1.828	3.341	4.030
% 1 Sb	6.38	14.12	90.09	2.21	0.054	1.792	3.212	4.030
% 2 Sb	5.12	16.69	85.47	3.26	0.124	2.064	4.259	4.033
% 3 Sb	6.88	17.51	120.48	2.55	0.054	1.883	3.546	4.020
% 4 Sb	5.67	15.07	85.47	2.66	0.083	1.912	3.657	4.010

Sb:SnO₂ ince filmlerin $n^2-\lambda^2$ grafikleri şekil 4.17’de gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun n^2 eksenine ekstrapole edilmesiyle ϵ_L ve eğiminden N/m^* belirlenmiştir. Bu sonuçlar çizelge 4.12’de verilmiştir.



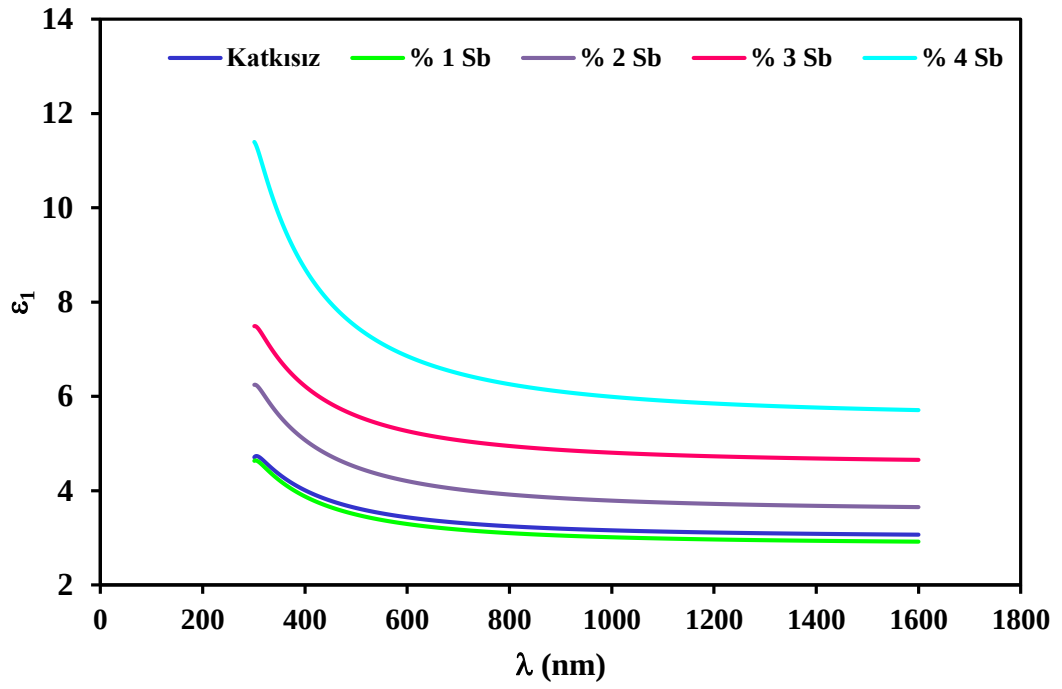
Şekil 4.17 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin n^2 - λ^2 grafikleri

Çizelge 4.12 Sb:SnO₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m^* değerleri

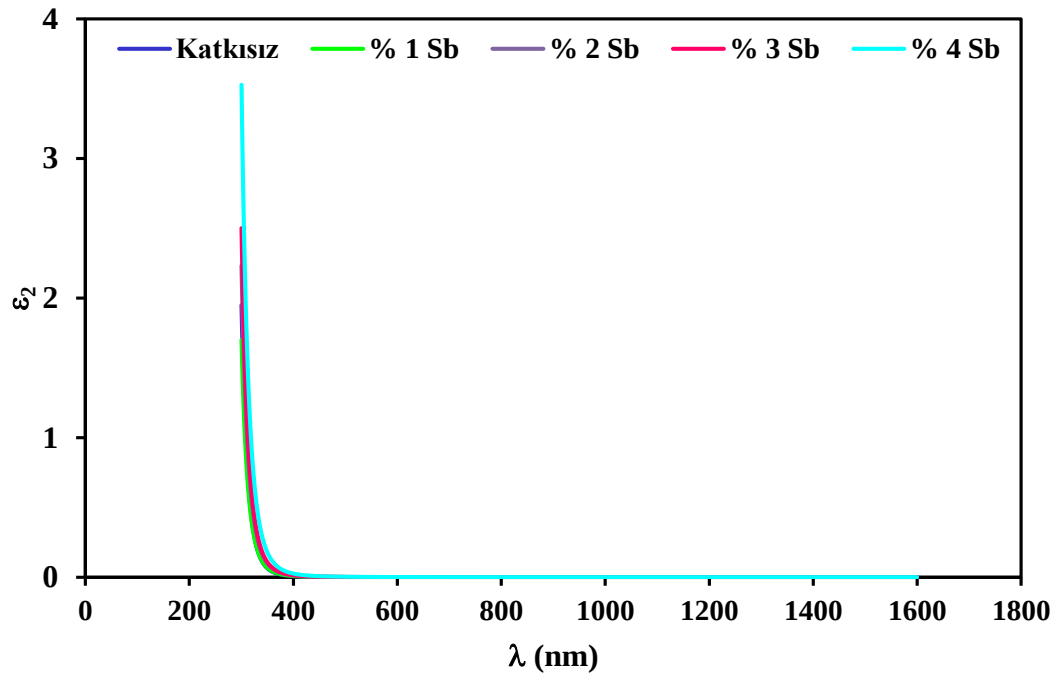
Numune	ϵ_L	$N/m^* (m^{-3}kg^{-1})$
Katkısız	3.127	7.82×10^{54}
% 1 Sb	2.978	7.82×10^{54}
% 2 Sb	3.742	1.17×10^{55}
% 3 Sb	4.755	1.56×10^{55}
% 4 Sb	5.893	2.74×10^{55}

Kompleks elektronik dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları olan ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerinin dalga boyuna bağılılığı sırasıyla şekil 4.18.a, b’de gösterilmiştir.

Kompleks optik iletkenliğinin reel ve imajiner kısımları olan σ_1 ve σ_2 değerlerinin dalga boyuna bağılılığı sırasıyla şekil 4.19.a, b’de gösterilmiştir.

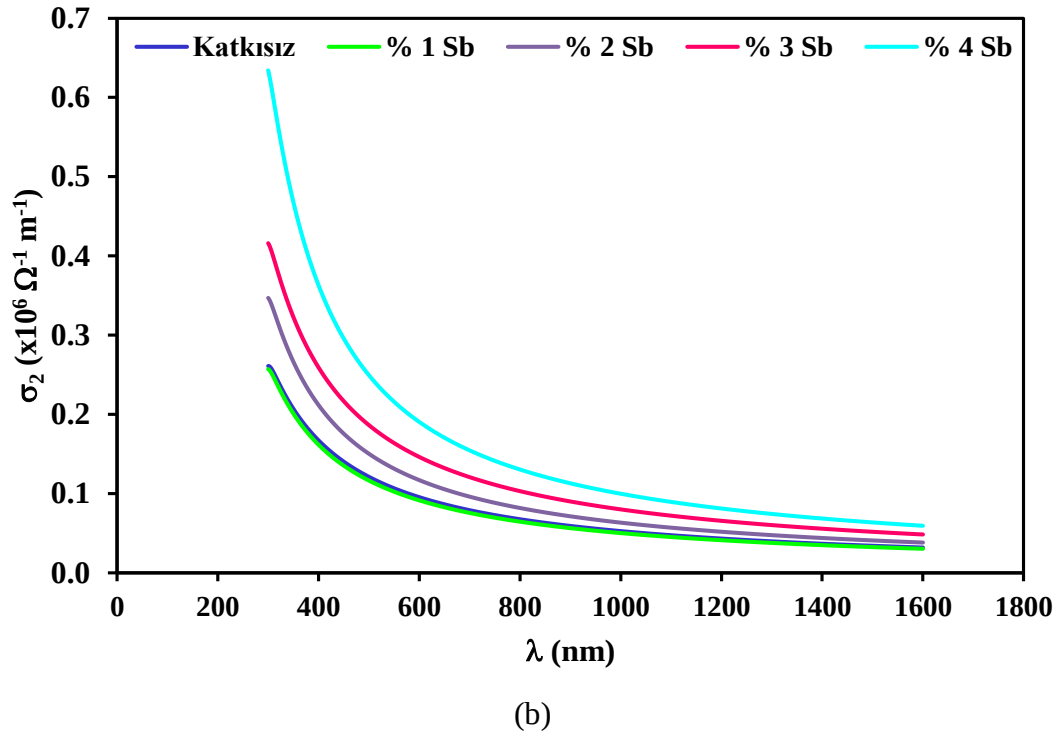
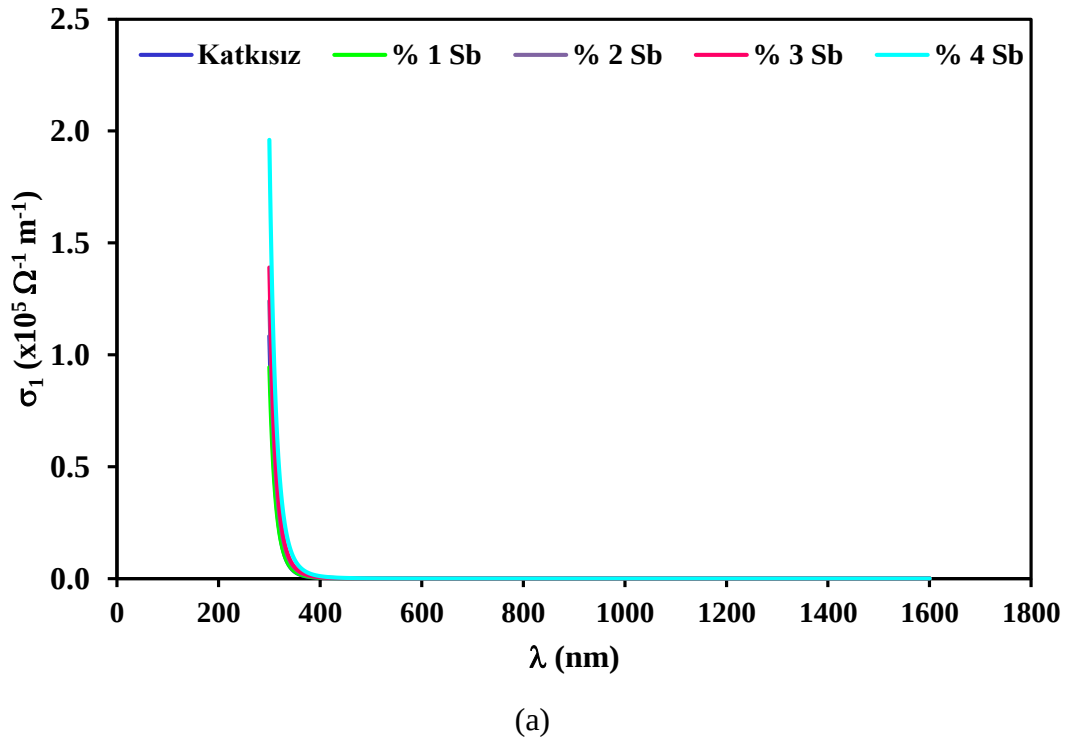


(a)



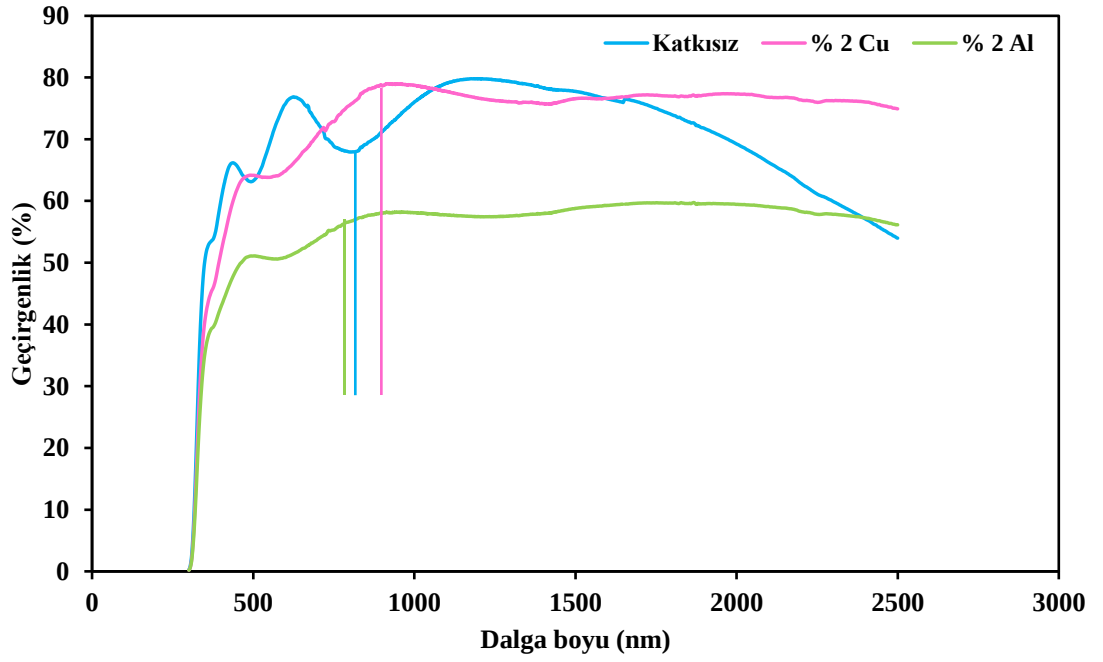
(b)

Şekil 4.18 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri



Şekil 4.19 Cam üzerindeki Sb:SnO₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , b. σ_2 - λ grafikleri

5 ml HCl içeren katkısız, % 2 oranında Cu ve Al katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4.20 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları

Şekil 4.20’de verilen geçirme spektrumları Swanepoel’un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Her dalga boyuna karşılık gelen T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri çizelge 4.13’te verilmiştir. Bu veriler kullanılarak bulunan d , m , n ve Δd sonuçları ise çizelge 4.14’te belirtilmiştir.

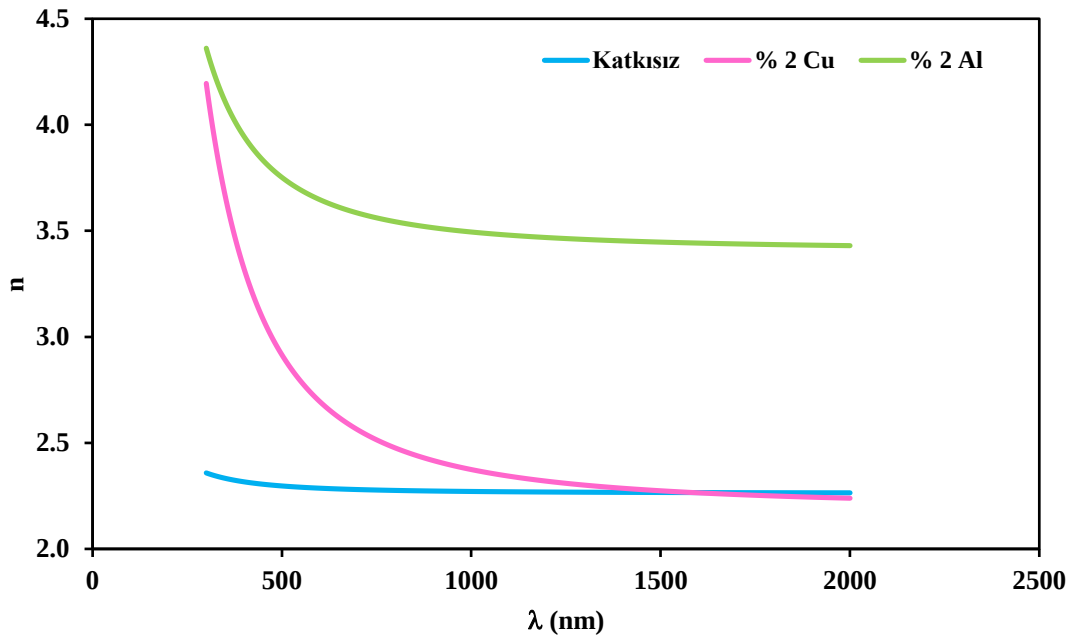
Çizelge 4.13 Cu ve Al:SnO₂ numunelerinin λ , T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	T_{M0}	T_{m0}
Katkısız	817	0.851	0.730	0.868	0.718
	615	0.850	0.712	0.891	0.684
	495	0.817	0.703	0.881	0.658
% 2 Cu	830	0.787	0.705	0.899	0.623
	605	0.690	0.630	0.831	0.529
	495	0.641	0.599	0.850	0.457
% 2 Al	900	0.58	0.522	0.820	0.377
	620	0.52	0.472	0.779	0.322

Çizelge 4.14 Cu ve Al:SnO₂ numunelerinin λ , n_1 , d_1 , m , d_2 , n_2 ve Δd değerleri

Numune	λ (nm)	n_1	d_1 (nm)	m_0	m	d_2 (nm)	n_2
Katkısız	817	2.214		1.43	1.5	276.815	2.276
	615	2.249	263.995	1.93	2.0	273.495	2.285
	495	2.405	207.868	2.57	2.5	257.251	2.299
	$\bar{d}_1 = 263.995$ nm $\bar{d}_2 = 269.187$ nm $\Delta d = 31.856$ nm						
% 2 Cu	830	2.414		0.98	1.0	171.925	2.456
	605	2.657	168.487	1.48	1.5	170.764	2.686
	495	3.014	147.258	2.05	2.0	164.211	2.929
	$\bar{d}_1 = 168.487$ nm $\bar{d}_2 = 168.966$ nm $\Delta d = 49.389$ nm						
% 2 Al	900	3.413		0.84	1.0	131.847	3.515
	620	3.744	111.268	1.34	1.5	124.191	3.632
	$\bar{d}_1 = 111.268$ nm $\bar{d}_2 = 128.019$ nm $\Delta d = 38.538$ nm						

5 ml HCl içeren Cu ve Al:SnO₂ ince filmler için çizelge 4.14’te verilen n_2 değerlerinden elde edilen Cauchy dispersiyon bağıntıları ve karşılık gelen r^2 değerleri sırasıyla şu şekildedir: Katkısız için; $n=2.2627+(8673.4/\lambda^2)$ ve 0.99, % 2 Cu için; $n=2.1943+(180059/\lambda^2)$ ve 1.00, % 2 Al için; $n=2.4093+(85720/\lambda^2)$ ve 1.00. Katkısız, % 2 oranında Cu ve Al katkılı SnO₂ ince filmlerin bu denklemlerden elde edilen n değerlerinin dalga boyuna bağılılıkları şekil 4.21’de verilmiştir.

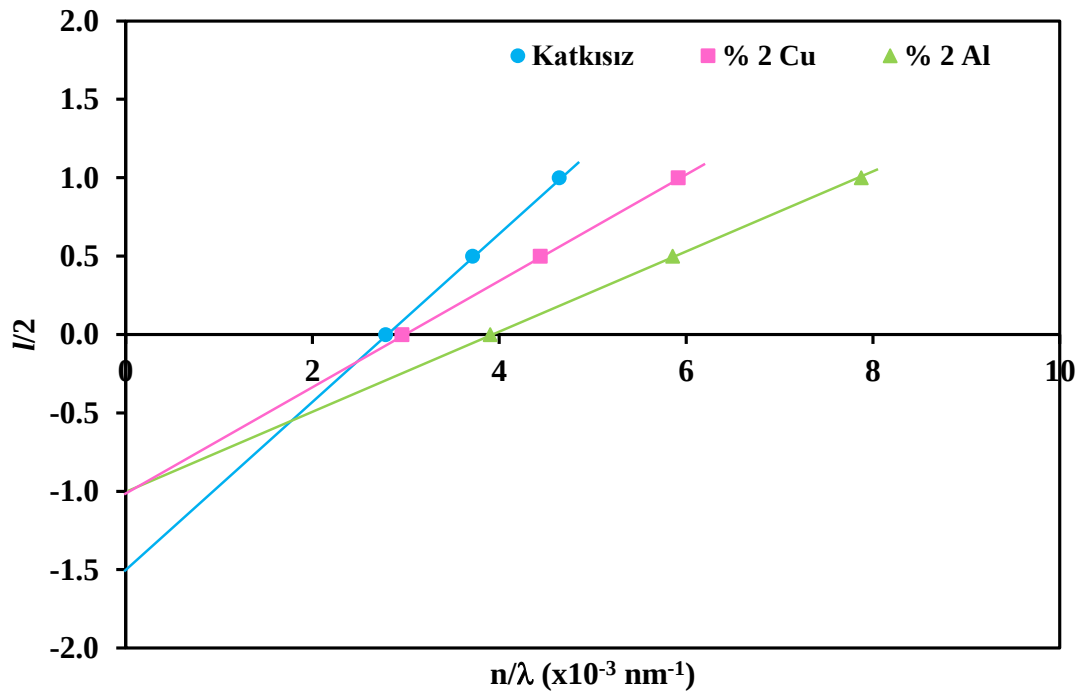


Şekil 4.21 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin n - λ grafikleri

Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin Cauchy dispersiyon bağıntılarından bulunan n değerleri kullanılarak çizilen $l/2-n/\lambda$ grafikleri şekil 4.22’de verilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi $2d$ ve sabit kısmı ise $-m_1$ değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak d ve m_1 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.15’te verilmiştir. Çizelge 4.15’te ayrıca Swanepoel yönteminden belirlenen kalınlık ile yansımanın kaçınıcı dereceden olduğunu gösteren değer ve numunelerin geçirgenlik spektrumunda en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu belirtilmiştir.

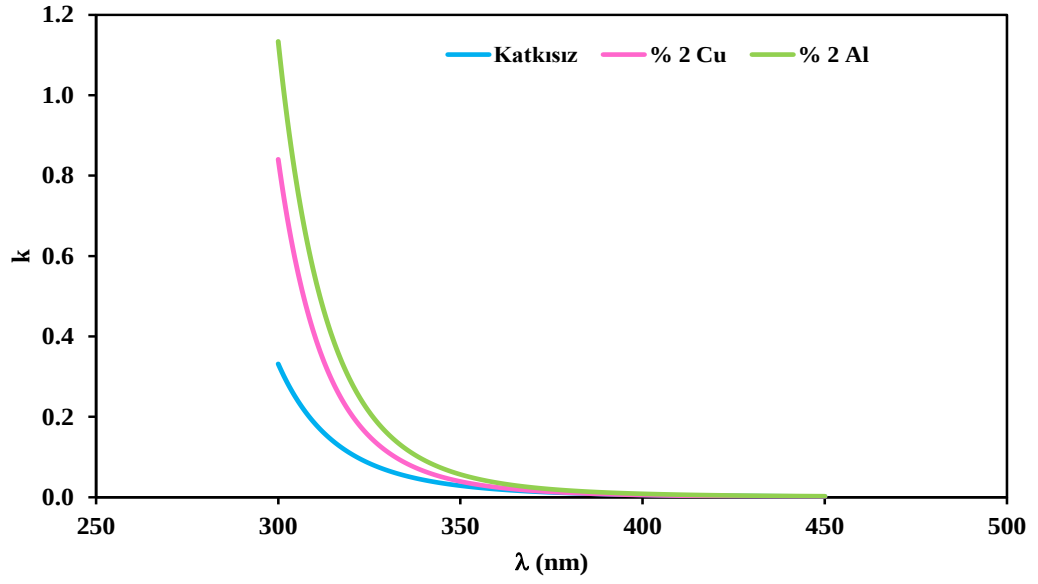
Çizelge 4.15 Cu ve Al:SnO₂ numunelerin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve mertebe değerleri

Numune	$\bar{d}_2$ (nm)	d (nm)	m	m_1	Pik
Katkısız	269.187	269.225	1.5	1.5	min
% 2 Cu	168.966	168.985	1.0	1.0	maks
% 2 Al	128.019	128.020	1.0	1.0	maks



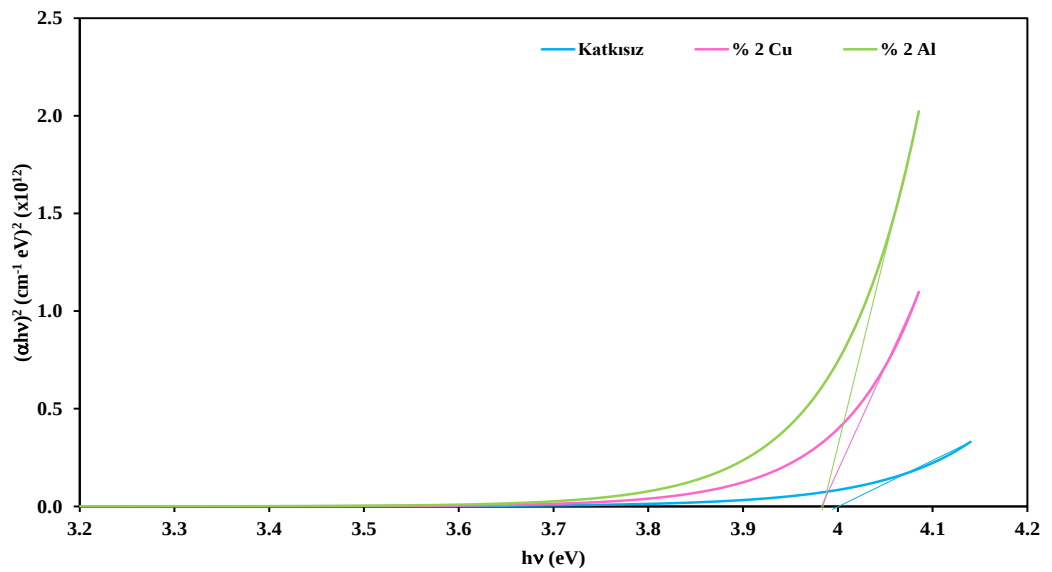
Şekil 4.22 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin $l/2-n/\lambda$ grafikleri

Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri şekil 4.23'te verilmiştir.



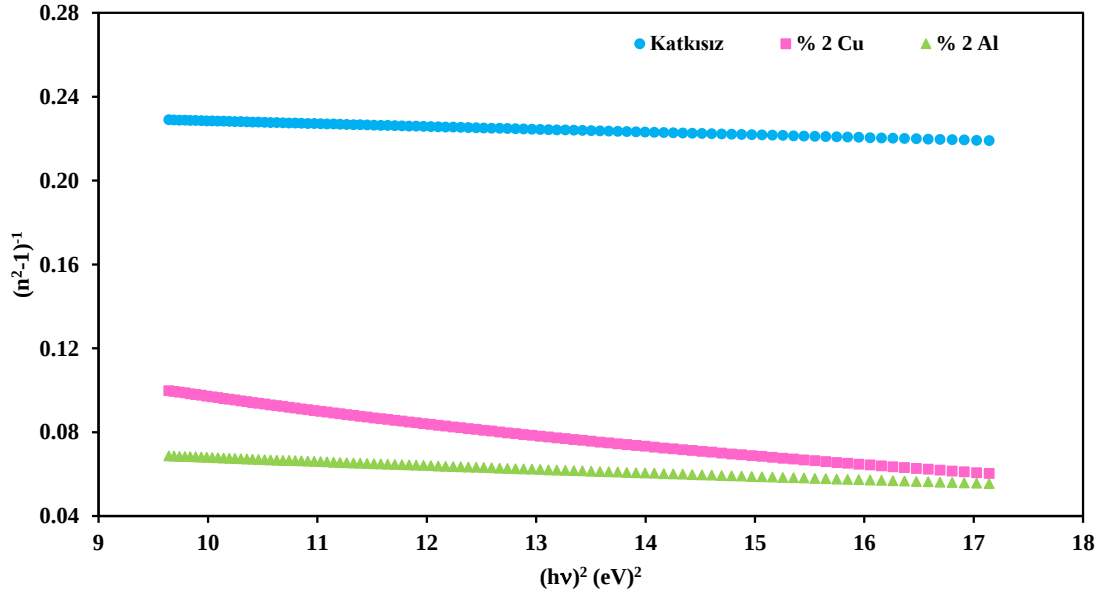
Şekil 4.23 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri

Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerde direkt bir bant geçişi için (2.23) denkleminde $n=0.5$ alınarak şekil 4.24'te gösterilen $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların $h\nu$ eksenine ekstrapole edilmesiyle, eksen kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve çizelge 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.24 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2$ - $h\nu$ grafikleri

Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri şekil 4.25'te gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. WDD parametreleri çizelge 4.16'da verilmiştir.

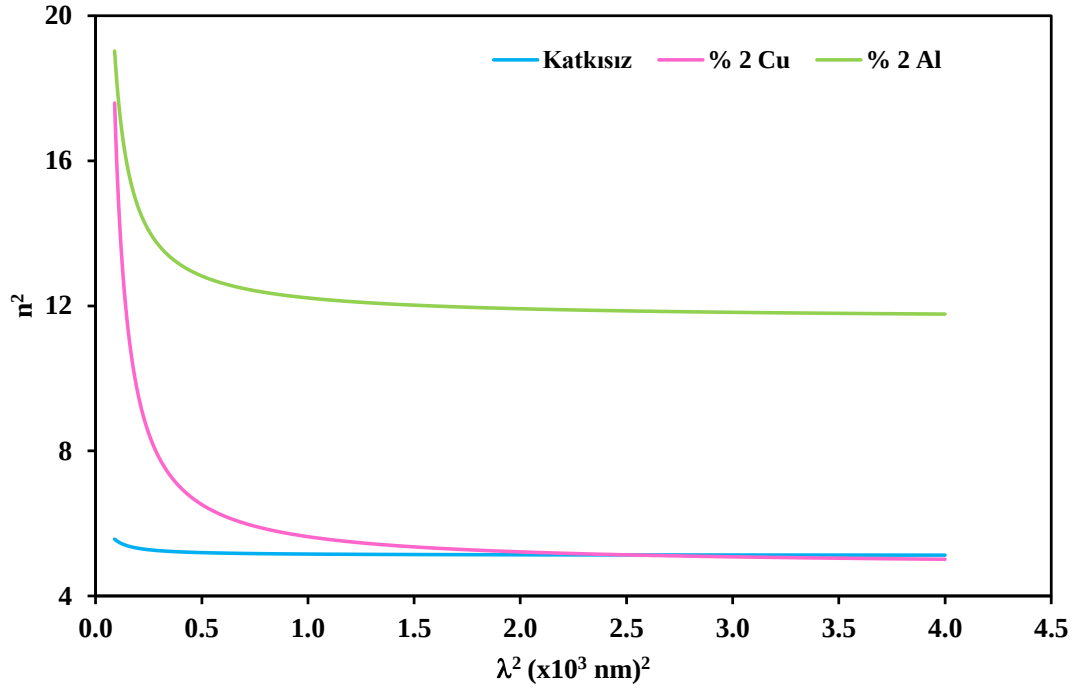


Şekil 4.25 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri

Çizelge 4.16 Cu ve Al:SnO₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri

Numune	E ₀ (eV)	E _d (eV)	f (eV) ²	M ₋₁	M ₋₃ (eV) ⁻²	n(v=0)	ε _∞	E _g (eV)
Katkısız	13.63	56.43	769.23	4.14	0.022	2.267	5.139	4.00
% 2 Cu	5.30	35.62	188.68	6.73	0.234	2.779	7.725	3.98
% 2 Al	6.89	80.66	555.56	11.71	0.247	3.565	12.710	3.98

Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin $n^2-\lambda^2$ grafikleri şekil 4.26'da gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun n^2 eksenine ekstrapole edilmesiyle ε_L ve eğiminden N/m* belirlenmiştir. Bu sonuçlar çizelge 4.17'de verilmiştir.

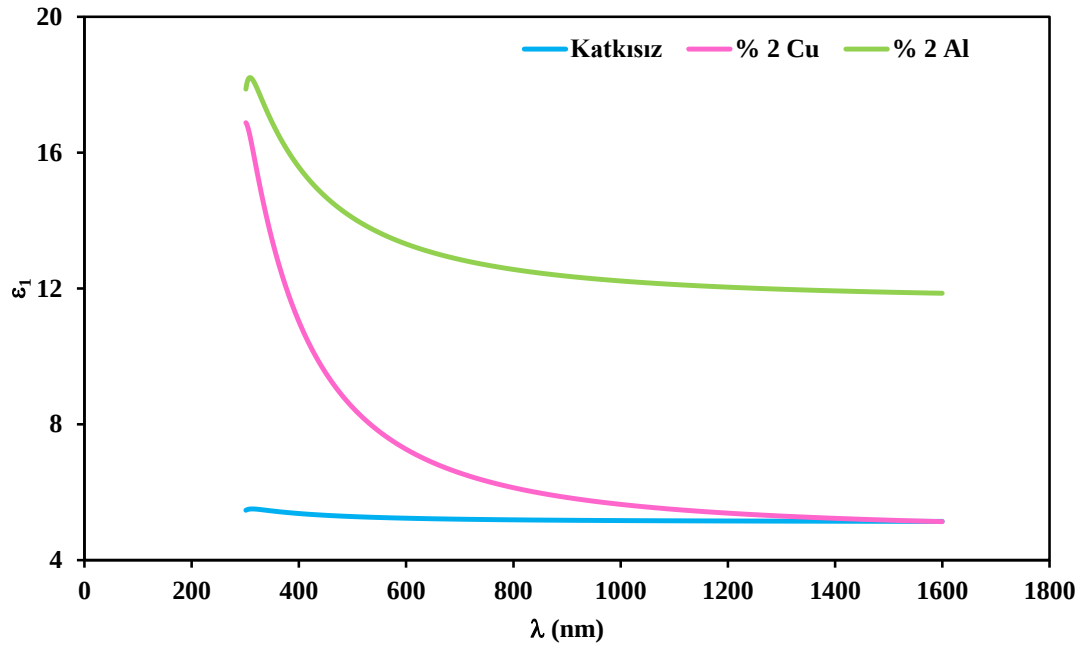


Şekil 4.26 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin n^2 - λ^2 grafikleri

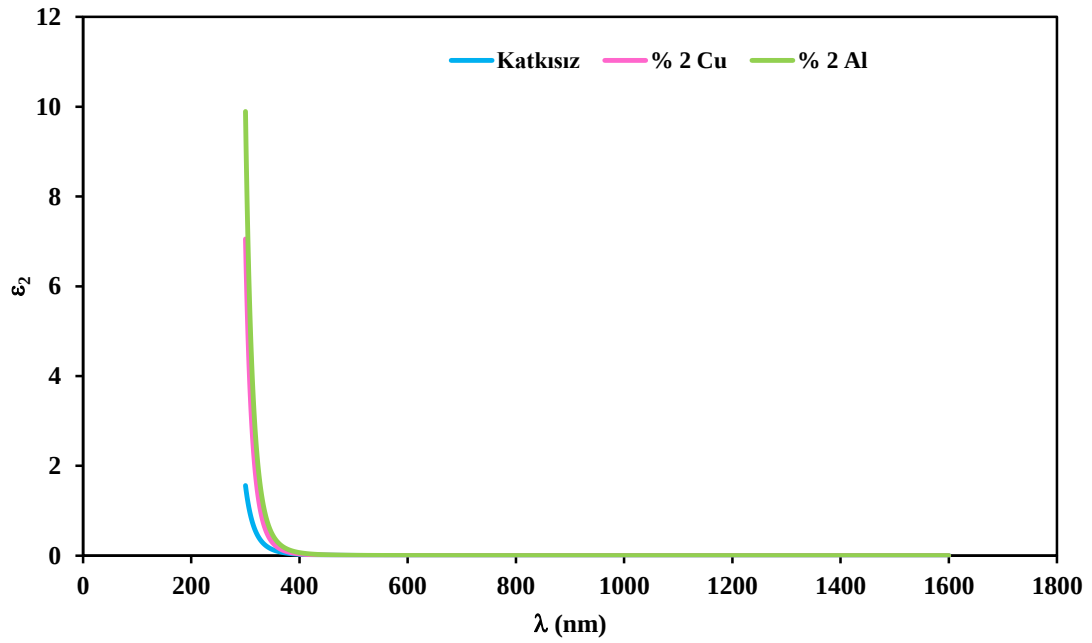
Çizelge 4.17 Cu ve Al:SnO₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m^* değerleri

Numune	ϵ_L	$N/m^* (m^{-3}kg^{-1})$
Katkısız	5.144	1.56×10^{54}
% 2 Cu	5.305	2.74×10^{55}
% 2 Al	11.981	1.95×10^{55}

Kompleks elektronik dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları olan ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.27.a, b’de gösterilmiştir.



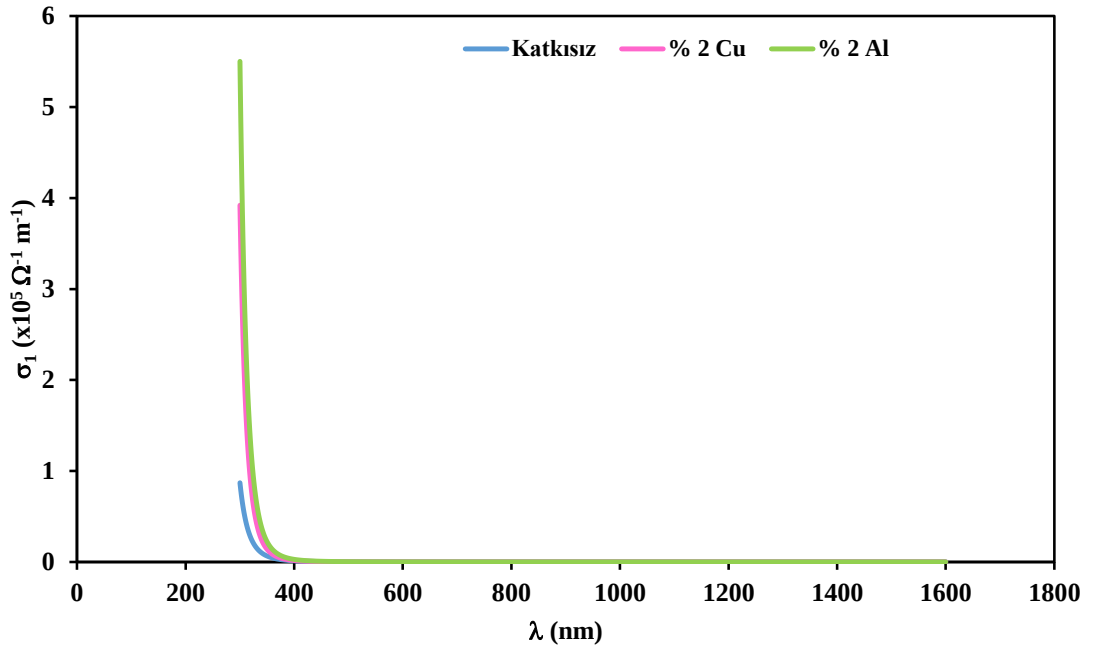
(a)



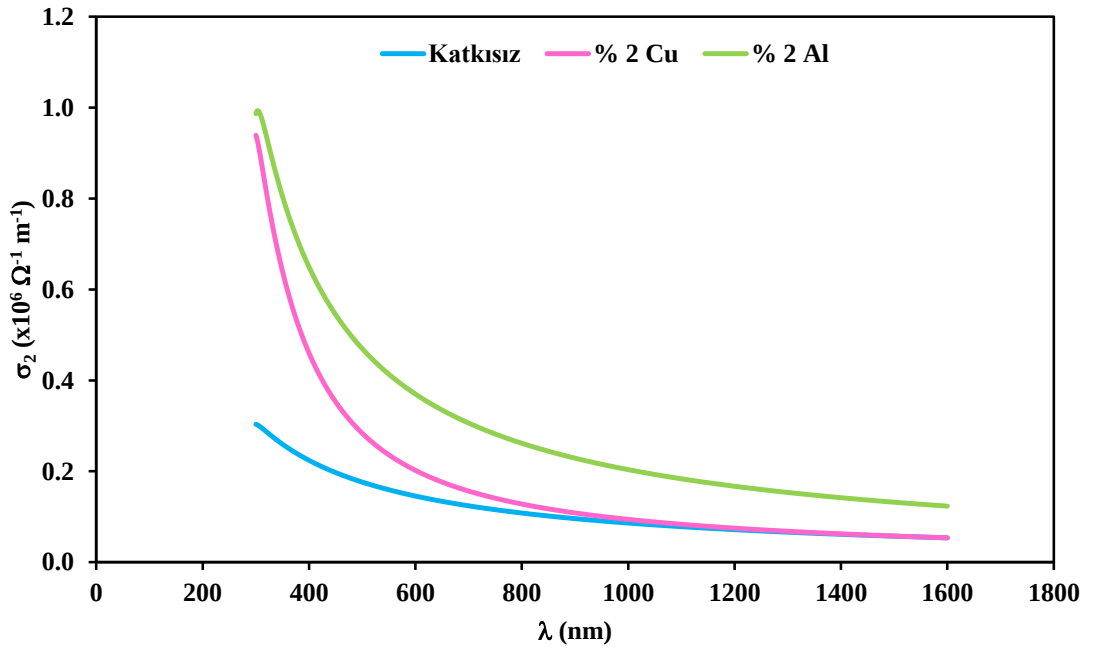
(b)

Şekil 4.27 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri

Kompleks optik iletkenliğinin reel ve imajiner kısımları olan σ_1 ve σ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.28.a, b'de gösterilmiştir.



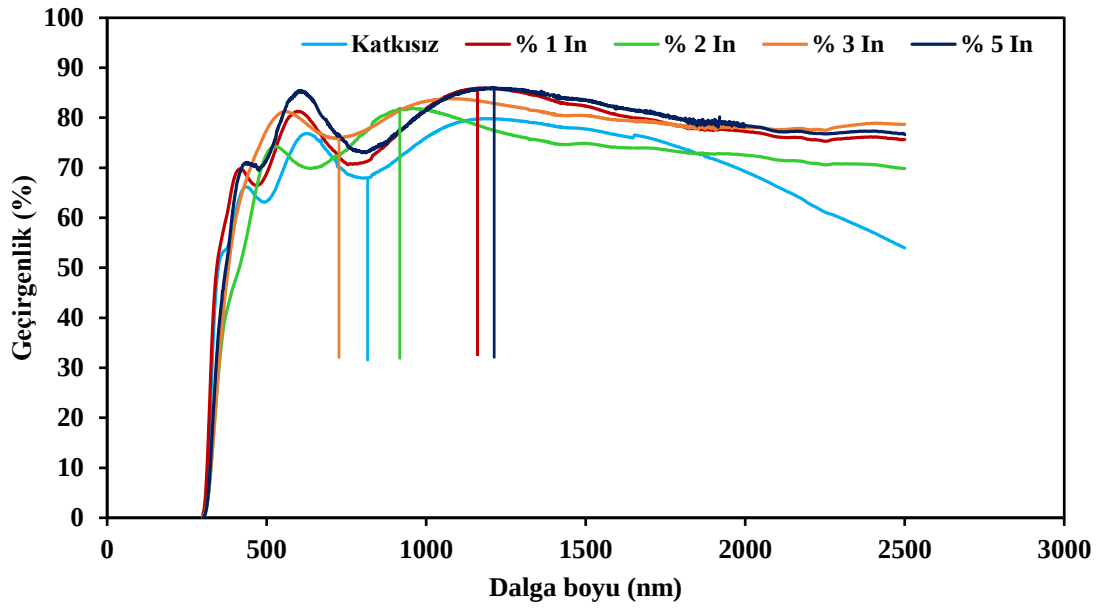
(a)



(b)

Şekil 4.28 Cam üzerindeki Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , b. σ_2 - λ grafikleri

5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında In katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları

Şekil 4.29’da verilen geçirme spektrumu Swanepoel’un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Her dalga boyuna karşılık gelen T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri çizelge 4.18’de verilmiştir. Bu veriler kullanılarak bulunan d , m , n ve Δd sonuçları ise çizelge 4.19’da belirtilmiştir.

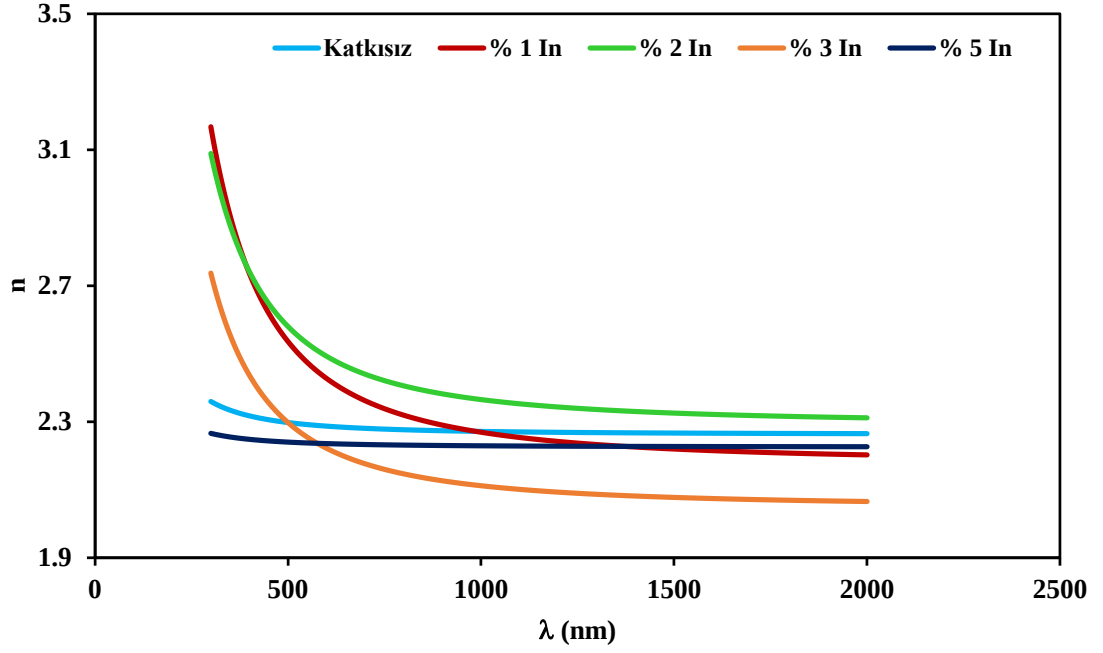
Çizelge 4.18 In:SnO₂ numunelerinin λ , T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	T_{M0}	T_{m0}
% 1 In	1130	0.862	0.747	0.920	0.705
	780	0.839	0.710	0.923	0.653
	608	0.813	0.686	0.919	0.617
% 2 In	940	0.820	0.720	0.914	0.652
	650	0.770	0.700	0.906	0.601
% 3 In	718	0.820	0.759	0.880	0.709
	558	0.813	0.756	0.895	0.690
% 5 In	1210	0.860	0.735	0.868	0.729
	808	0.857	0.730	0.878	0.715
	607	0.855	0.718	0.902	0.686

Çizelge 4.19 In:SnO₂ numunelerinin λ , n_1 , d_1 , m , d_2 , n_2 ve Δd değerleri

Numune	λ (nm)	n_1	d_1 (nm)	m_0	m	d_2 (nm)	n_2
% 1 In	1130	2.184		0.91	1.0	258.677	2.248
	780	2.353	230.801	1.42	1.5	248.666	2.328
	608	2.466	240.562	1.91	2.0	246.589	2.419
	$\bar{d}_1 = 235.682$ nm $\bar{d}_2 = 251.311$ nm $\Delta d = 46.545$ nm						
% 2 In	940	2.339		0.92	1.0	200.897	2.375
	650	2.501	184.050	1.42	1.5	194.949	2.463
	$\bar{d}_1 = 184.050$ nm $\bar{d}_2 = 197.923$ nm $\Delta d = 60.519$ nm						
% 3 In	718	2.205		1.71	1.5	244.229	2.170
	558	2.214	278.955	2.21	2.0	252.074	2.249
	$\bar{d}_1 = 278.955$ nm $\bar{d}_2 = 248.152$ nm $\Delta d = 52.938$ nm						
% 5 In	1210	2.199		0.95	1.0	275.104	2.228
	808	2.236	263.314	1.45	1.5	271.058	2.232
	607	2.261	261.018	1.95	2.0	268.476	2.235
	$\bar{d}_1 = 262.166$ nm $\bar{d}_2 = 271.546$ nm $\Delta d = 33.934$ nm						

5 ml HCl içeren In:SnO₂ ince filmler için çizelge 4.19’da verilen n_2 değerlerinden elde edilen Cauchy dispersiyon bağıntıları ve karşılık gelen r^2 değerleri sırasıyla şu şekildedir: % 1 In için; $n=2.1797+(88915/\lambda^2)$ ve 0.99, % 2 In için; $n=2.2936+(71586/\lambda^2)$ ve 1.00, % 3 In için; $n=2.0502+(61782/\lambda^2)$ ve 1.00, % 5 In için; $n=2.2258+(3594/\lambda^2)$ ve 0.99. % 1-5 oranında In katkılı SnO₂ ince filmlerin bu denklemlerden elde edilen n değerlerinin dalga boyuna bağılılıkları şekil 4.30’da verilmiştir.

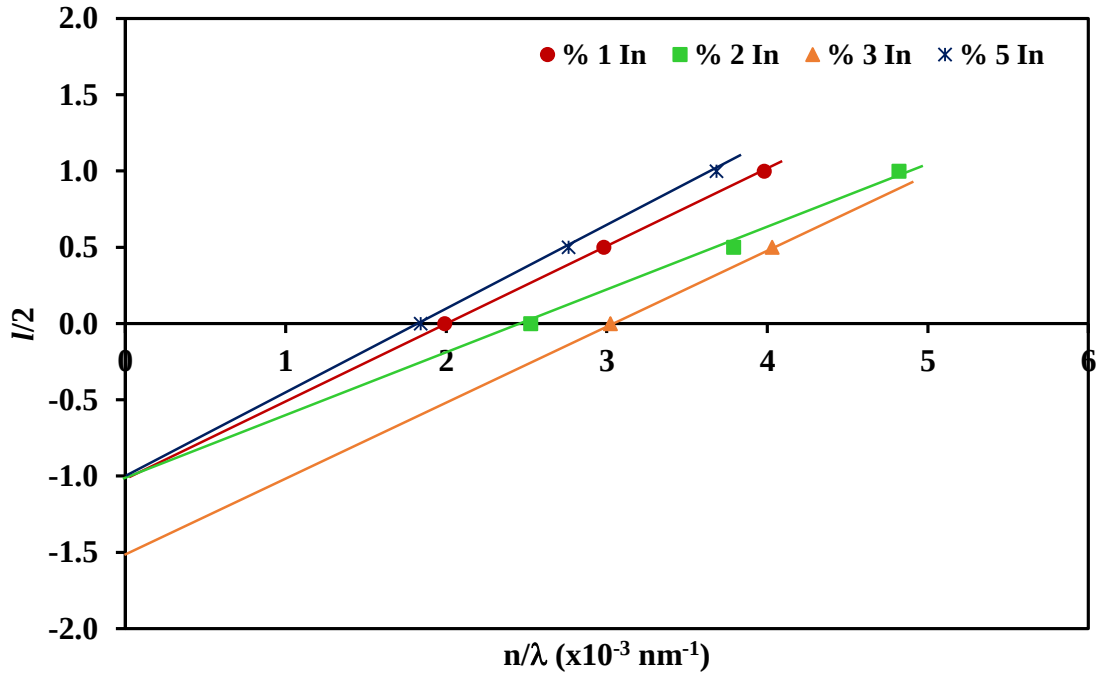


Şekil 4.30 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin n-λ grafikleri

Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için In:SnO₂ ince filmlerin Cauchy dispersiyon bağıntılarından bulunan n değerleri kullanılarak çizilen $1/2-n/\lambda$ grafikleri şekil 4.31’de verilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi $2d$ ve sabit kısmı ise $-m_1$ değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak d ve m_1 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.20’de verilmiştir. Çizelge 4.20’de ayrıca Swanepoel yönteminden belirlenen kalınlık ile yansımanın kaçınıcı dereceden olduğunu gösteren değer ve numunelerin geçirgenlik spektrumunda en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu belirtilmiştir.

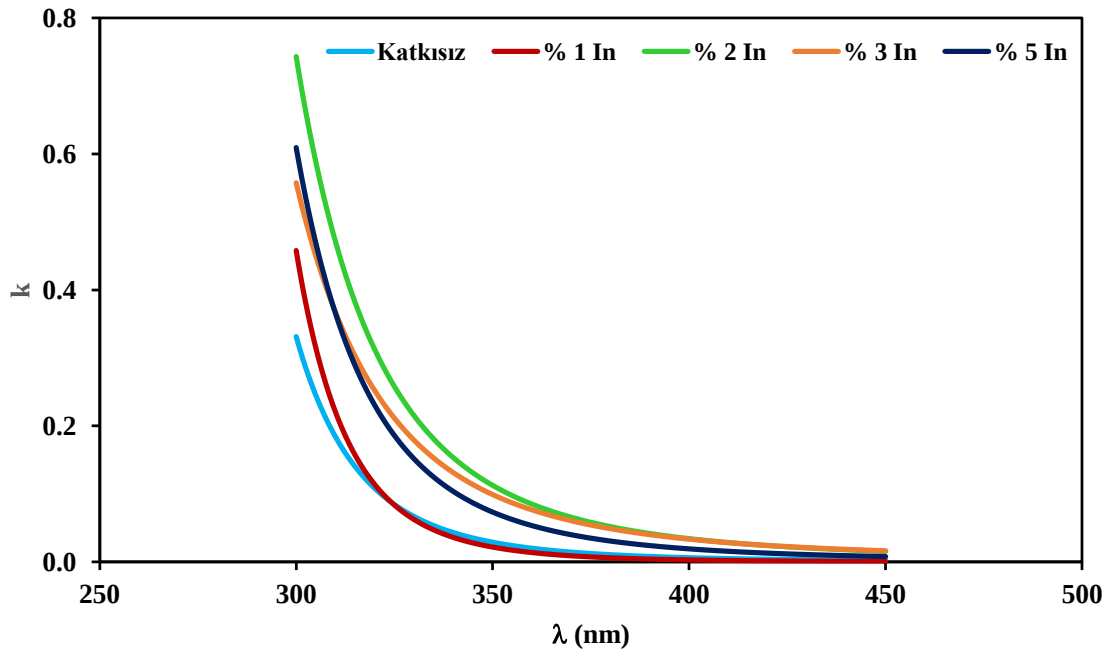
Çizelge 4.20 In:SnO₂ numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve merteye değerleri

Numune	$\bar{d}_2$ (nm)	d (nm)	m	m_1	Pik
% 1 In	251.311	251.245	1.0	1.0	maks
% 2 In	197.923	197.925	1.0	1.0	maks
% 3 In	248.152	248.150	1.5	1.5	min
% 5 In	271.546	271.530	1.0	1.0	maks



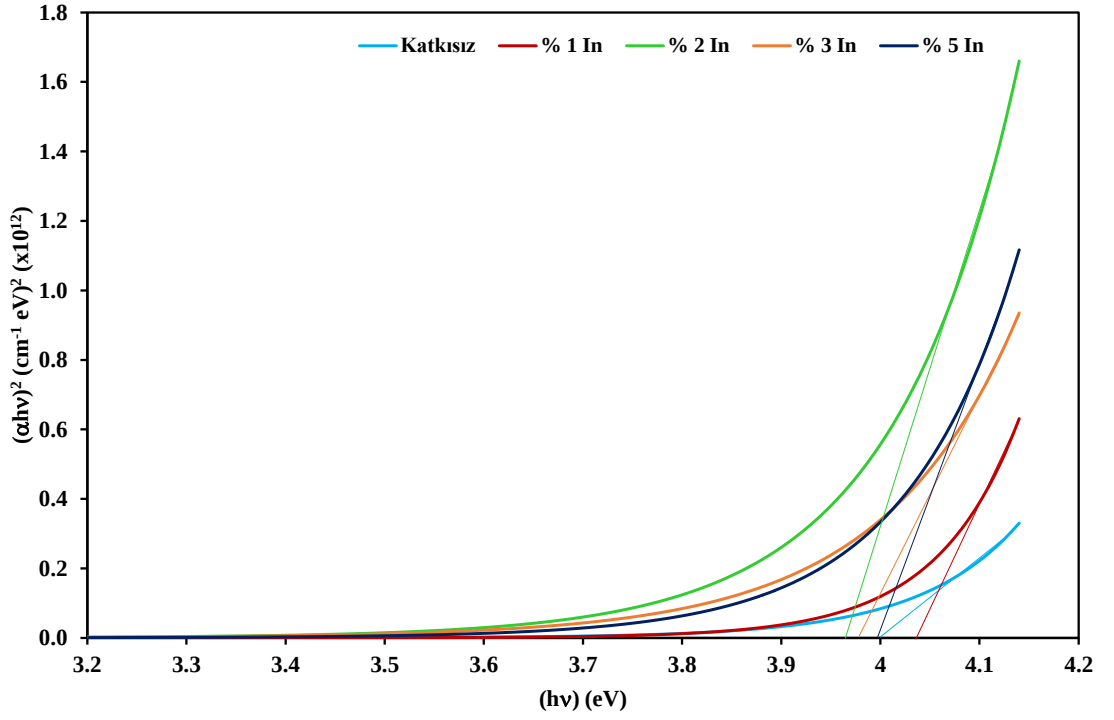
Şekil 4.31 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin $I/2$ - n/λ grafikleri

In:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri şekil 4.32’de verilmiştir.



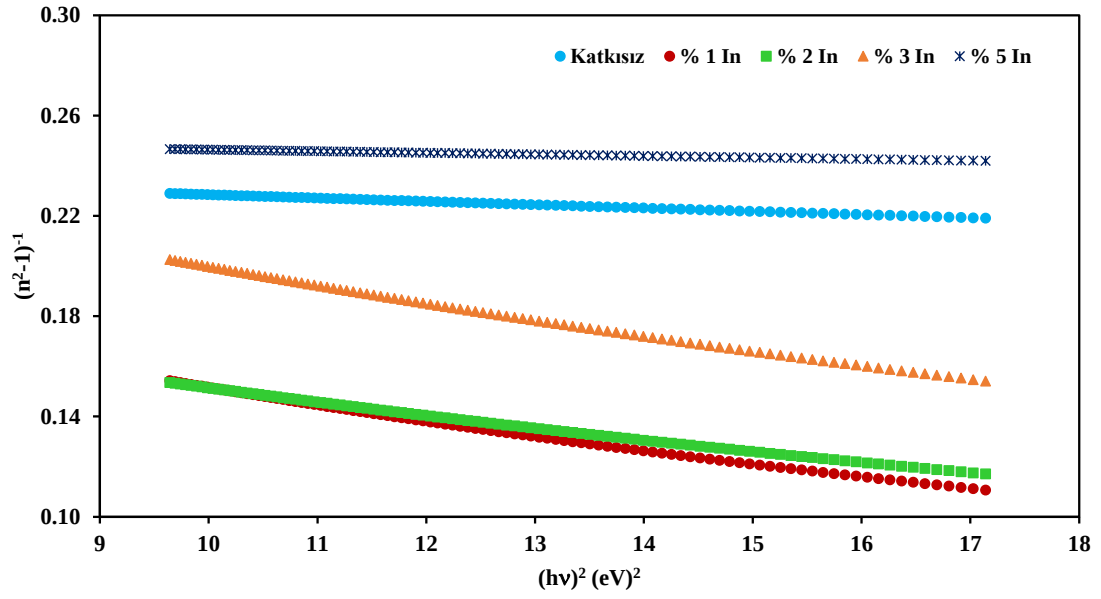
Şekil 4.32 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri

In:SnO₂ ince filmlerde direkt bir bant geçişi için (2.23) denkleminde n=0.5 alınarak şekil 4.33'te gösterilen $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların $h\nu$ eksenine ekstrapole edilmesiyle, eksen kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve çizelge 4.21'de verilmiştir.



Şekil 4.33 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri

Sb:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri şekil 4.34'de gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. WDD parametreleri çizelge 4.21'de verilmiştir.

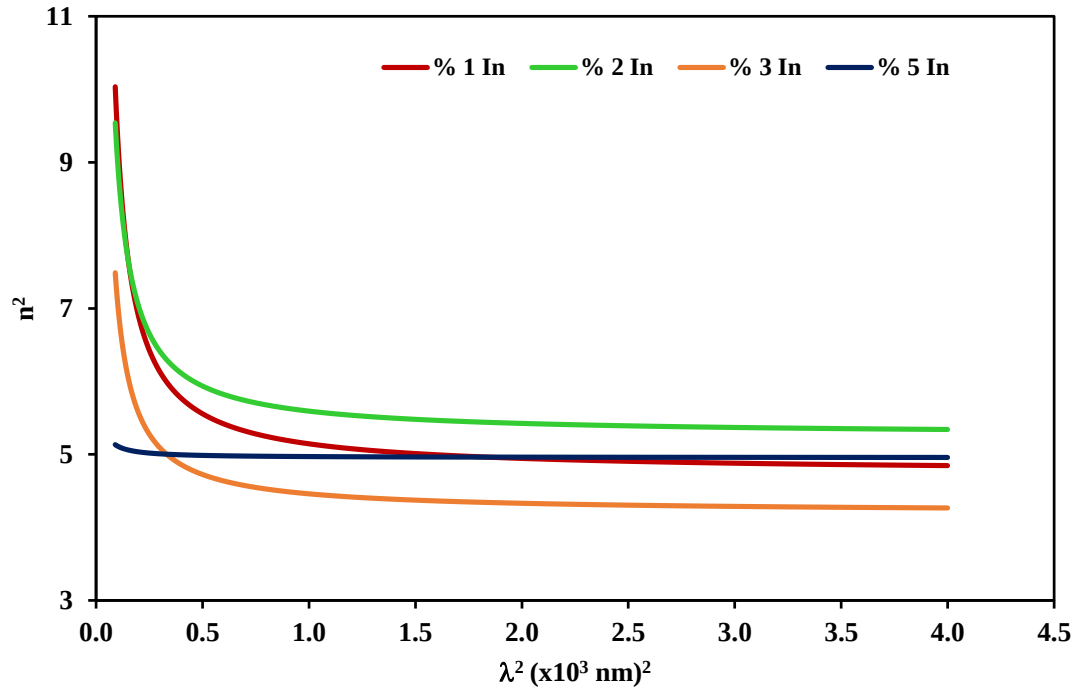


Şekil 4.34 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(hv)^2$ grafikleri

Çizelge 4.21 In:SnO₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri

Numune	E_0 (eV)	E_d (eV)	f (eV) ²	M_{-1}	M_{-3} (eV) ⁻²	$n(v=0)$	ϵ_∞	E_g (eV)
% 1 In	5.95	28.48	169.49	4.79	0.135	2.405	5.785	4.04
% 2 In	6.38	31.98	204.08	5.01	0.123	2.451	6.010	3.96
% 3 In	6.37	24.14	153.85	3.79	0.093	2.188	4.789	3.98
% 5 In	20.52	81.21	1666.67	3.96	0.009	2.226	4.957	4.00

In:SnO₂ ince filmlerin $n^2-\lambda^2$ grafikleri şekil 4.35'te gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun n^2 eksenine ekstrapole edilmesiyle ϵ_L ve eğiminden N/m^* belirlenmiştir. Bu sonuçlar çizelge 4.22'de verilmiştir.

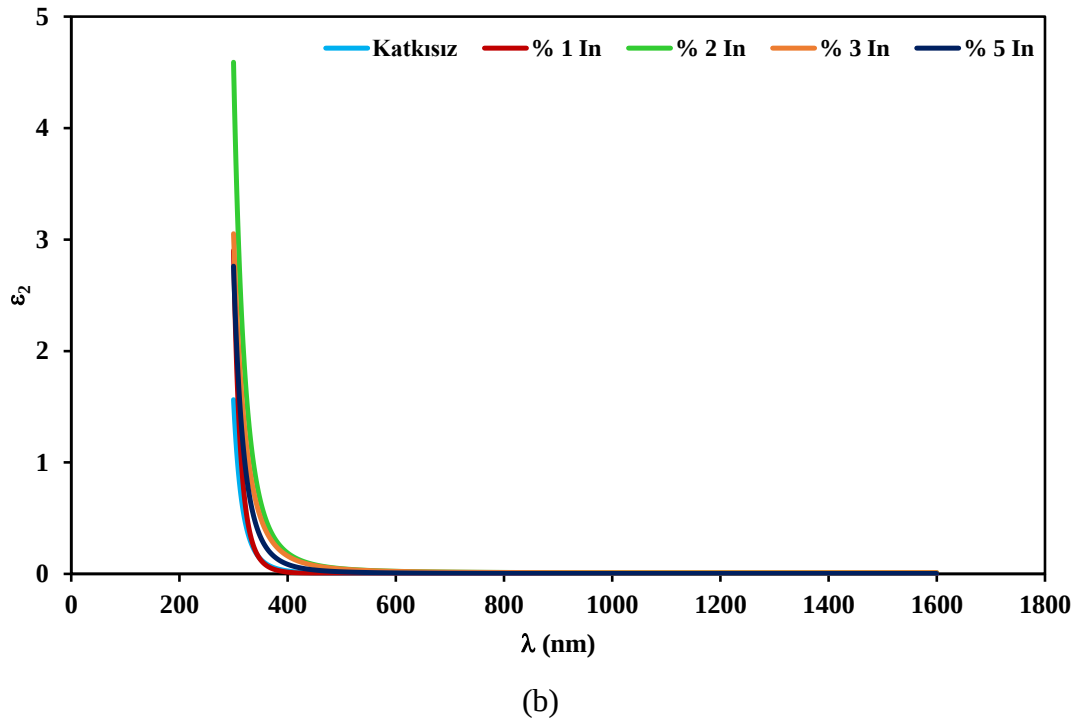
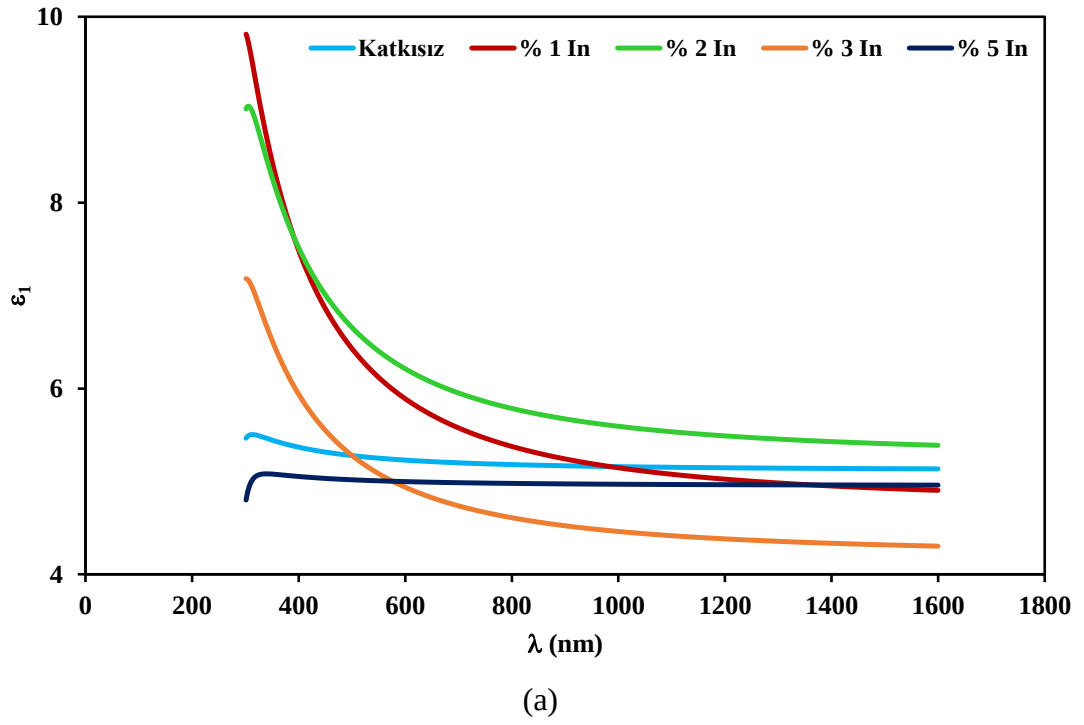


Şekil 4.35 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin n^2 - λ^2 grafikleri

Çizelge 4.22 In:SnO₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m^* değerleri

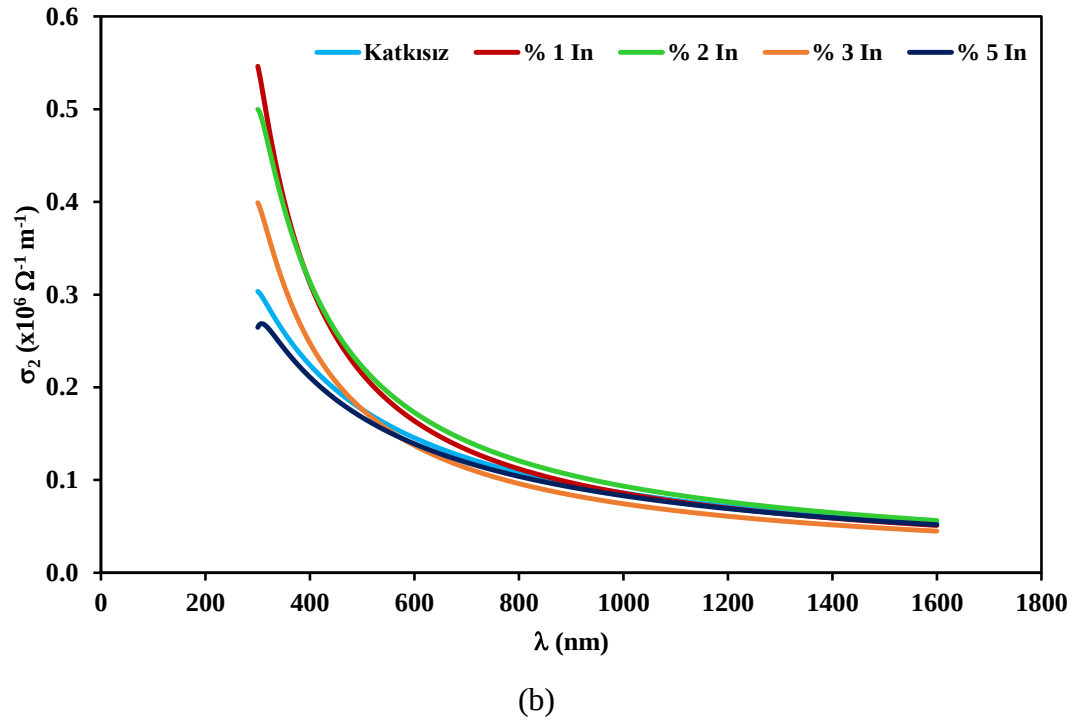
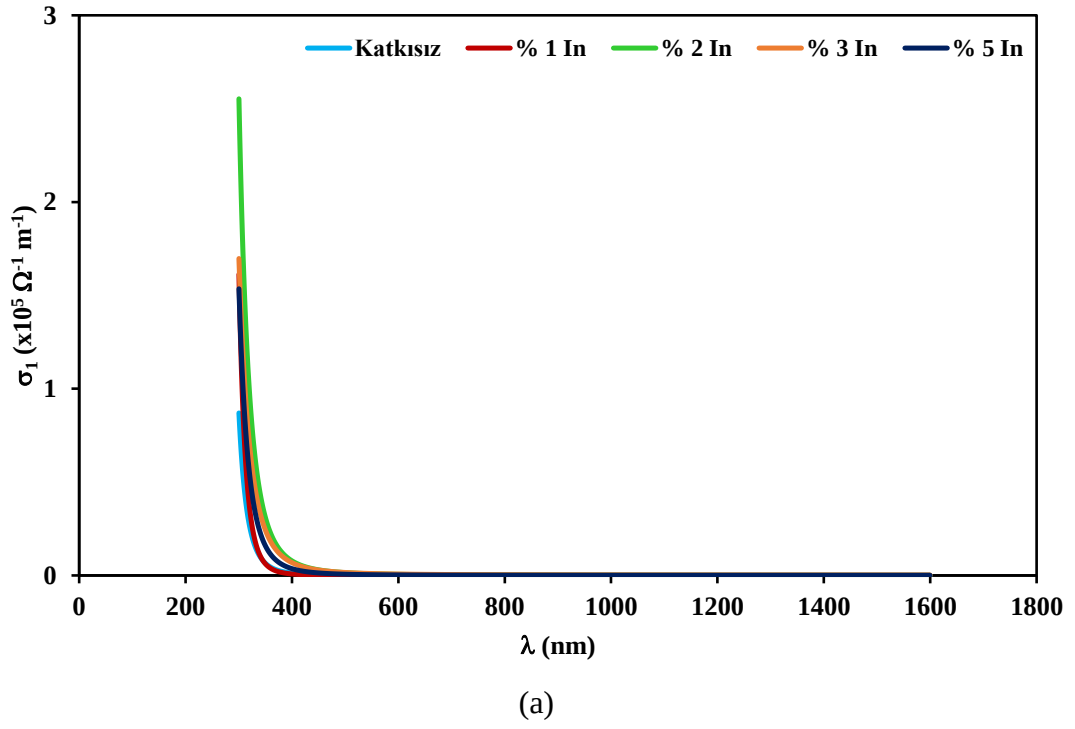
Numune	ϵ_L	$N/m^* (\text{m}^{-3}\text{kg}^{-1})$
% 1 In	4.994	1.56×10^{55}
% 2 In	5.466	1.17×10^{55}
% 3 In	4.362	7.82×10^{54}
% 5 In	4.964	7.82×10^{53}

Kompleks elektronik dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları olan ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.36.a, b’de gösterilmiştir.



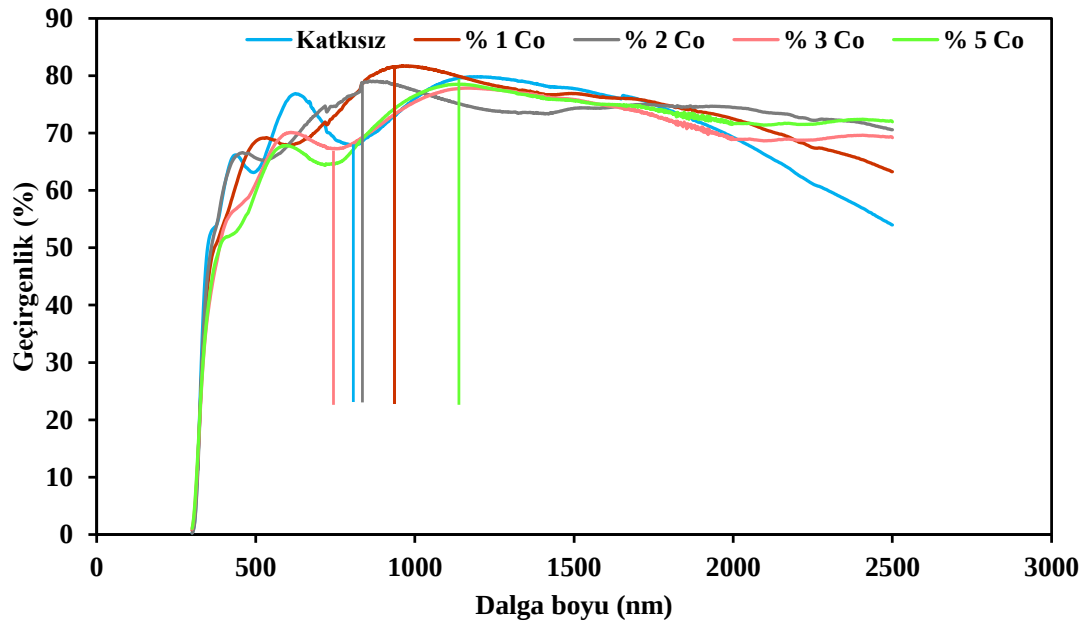
Şekil 4.36 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri

Kompleks optik iletkenliğinin reel ve imajiner kısımları olan σ_1 ve σ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.37.a, b'de gösterilmiştir.



Şekil 4.37 Cam üzerindeki In:SnO₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , ve b. σ_2 - λ grafikleri

5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında Co katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları şekil 4.38’de verilmiştir.



Şekil 4.38 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları

Şekil 4.38’da verilen geçirme spektrumu Swanepoel’un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Her dalga boyuna karşılık gelen T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri çizelge 4.23’te verilmiştir. Bu veriler kullanılarak bulunan d , m , n ve Δd sonuçları ise çizelge 4.24’te belirtilmiştir.

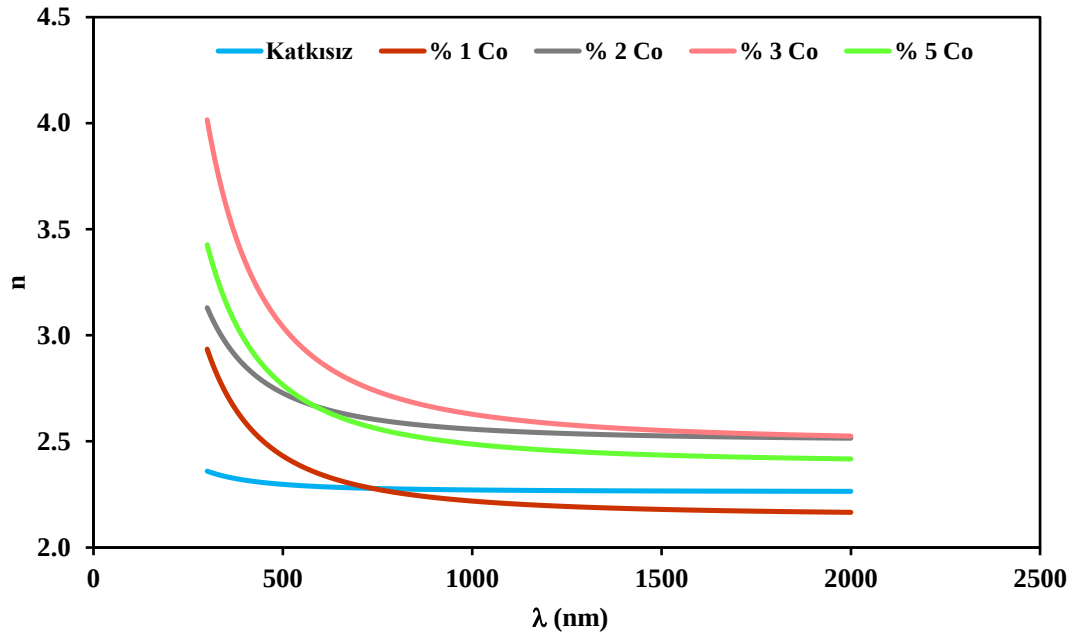
Çizelge 4.23 Co:SnO₂ numunelerinin λ , T_M , T_m , T_{M0} ve T_{m0} değerleri

Numune	λ (nm)	T_M	T_m	T_{M0}	T_{m0}
% 1 Co	960	0.818	0.725	0.888	0.673
	665	0.740	0.685	0.817	0.624
	520	0.690	0.655	0.805	0.564
% 2 Co	838	0.794	0.665	0.916	0.587
	568	0.718	0.650	0.841	0.561
	443	0.668	0.613	0.969	0.431
% 3 Co	760	0.725	0.673	0.876	0.562
	600	0.702	0.652	0.893	0.518
% 5 Co	1098	0.785	0.665	0.839	0.628
	757	0.720	0.648	0.786	0.598
	591	0.680	0.615	0.832	0.509

Çizelge 4.24 Co:SnO₂ numunelerinin λ , n_1 , d_1 , m , d_2 , n_2 ve Δd değerleri

Numune	λ (nm)	n_1	d_1 (nm)	m_0	m	d_2 (nm)	n_2
% 1 Co	960	2.228		1.08	1.0	215.399	2.224
	665	2.256	233.534	1.58	1.5	221.123	2.311
	520	2.464	185.675	2.21	2.0	211.049	2.409
	$\bar{d}_1 = 233.534$ nm $\bar{d}_2 = 215.857$ nm $\Delta d = 54.837$ nm						
% 2 Co	838	2.566		1.08	1.0	163.305	2.533
	568	2.543	176.568	1.58	1.5	167.499	2.576
	443	3.284		2.62	2.0	134.916	2.678
	$\bar{d}_1 = 176.568$ nm $\bar{d}_2 = 165.402$ nm $\Delta d = 38.998$ nm						
% 3 Co	760	2.747	190.205	1.48	1.5	207.514	2.728
	600	2.852	219.487	1.95	2.0	210.383	2.872
	$\bar{d}_1 = 204.846$ nm $\bar{d}_2 = 208.949$ nm $\Delta d = 52.678$ nm						
% 5 Co	1098	2.504		1.00	1.0	219.271	2.471
	757	2.414	275.024	1.39	1.5	235.162	2.556
	591	2.787	163.818	2.07	2.0	212.072	2.660
	$\bar{d}_1 = 219.421$ nm $\bar{d}_2 = 222.168$ nm $\Delta d = 52.569$ nm						

5 ml HCl içeren Co:SnO₂ ince filmler için çizelge 4.23'te verilen n_2 değerlerinden elde edilen Cauchy dispersiyon bağıntıları ve karşılık gelen r^2 değerleri sırasıyla şu şekildedir: % 1 Co için; $n=2.1481+(70826/\lambda^2)$ ve 0.99, % 2 Co için; $n=2.5006+(56691/\lambda^2)$ ve 0.99, % 3 Co için; $n=2.4904+(137200/\lambda^2)$ ve 1.00, % 5 Co için; $n=2.3937+(92986/\lambda^2)$ ve 1.00. % 1-5 oranında Co katkılı SnO₂ ince filmlerin bu denklemlerden elde edilen n değerlerinin dalga boyuna bağılılıkları şekil 4.39'da verilmiştir.

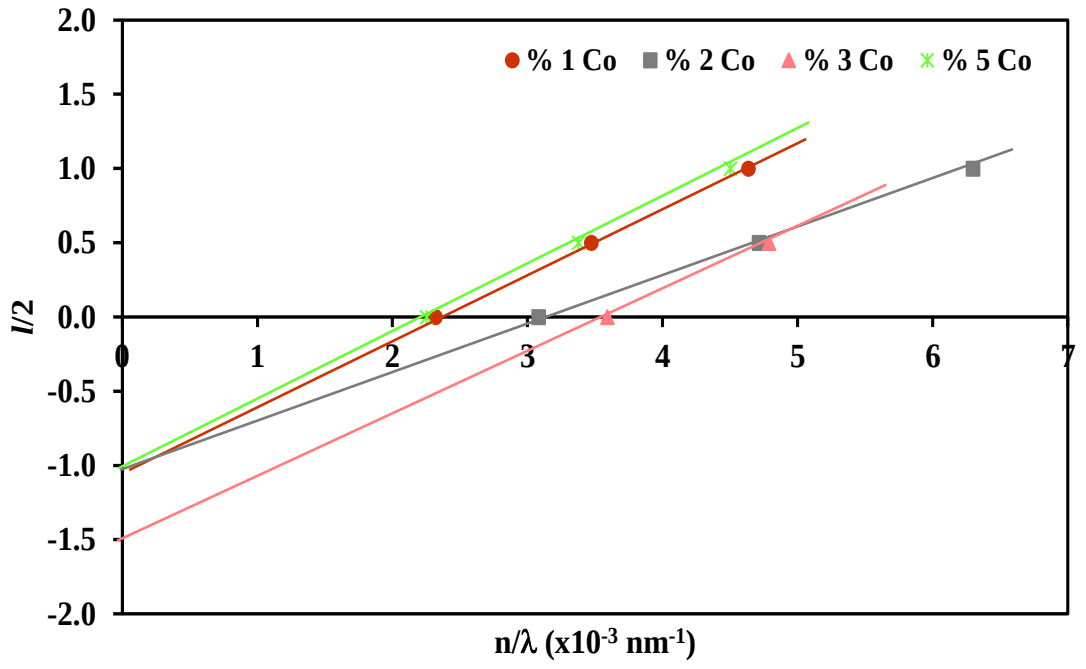


Şekil 4.39 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin n-λ grafikleri

Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için Co:SnO₂ ince filmlerin Cauchy dispersiyon bağıntılarından bulunan n değerleri kullanılarak çizilen $1/2-n/\lambda$ grafikleri şekil 4.40'ta verilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi 2d ve sabit kısmı ise $-m_1$ değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak d ve m_1 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.25'te verilmiştir. Çizelge 4.25'te ayrıca Swanepoel yönteminden belirlenen kalınlık ile yansımanın kaçınıcı dereceden olduğunu gösteren değer ve numunelerin geçirgenlik spektrumunda en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu belirtilmiştir.

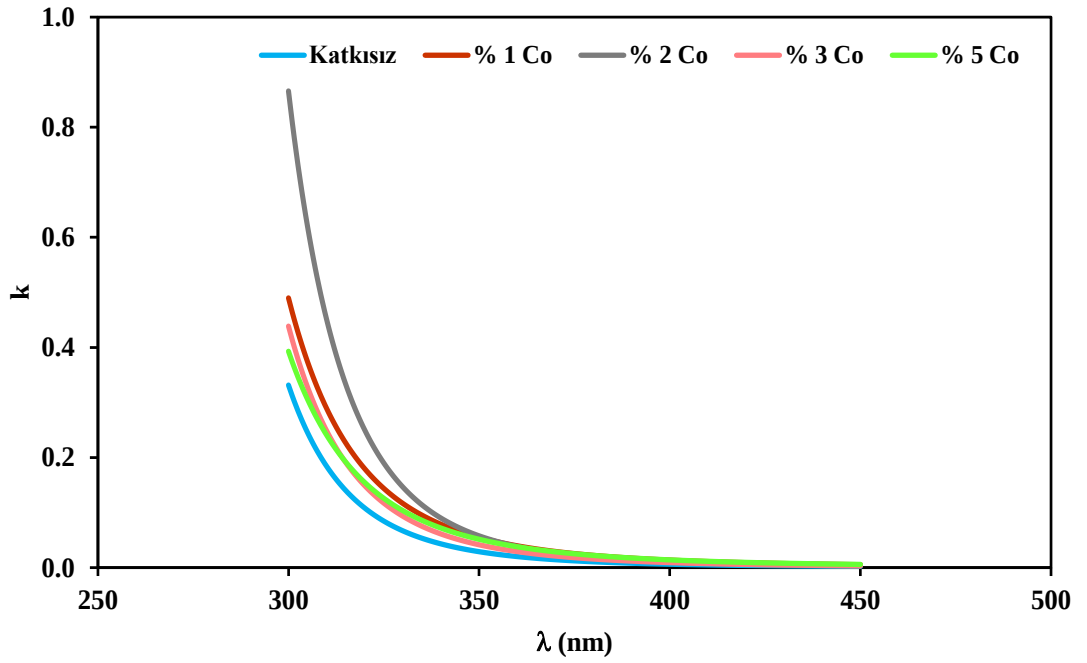
Çizelge 4.25 Co:SnO₂ numunelerinin sırasıyla Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve merteye değerleri

Numune	$\bar{d}_2$ (nm)	d (nm)	m	m_1	Pik
% 1 Co	215.857	215.795	1.0	1.0	maks
% 2 Co	165.402	155.440	1.0	1.0	maks
% 3 Co	208.949	208.950	1.5	1.5	min
% 5 Co	222.168	222.180	1.0	1.0	maks



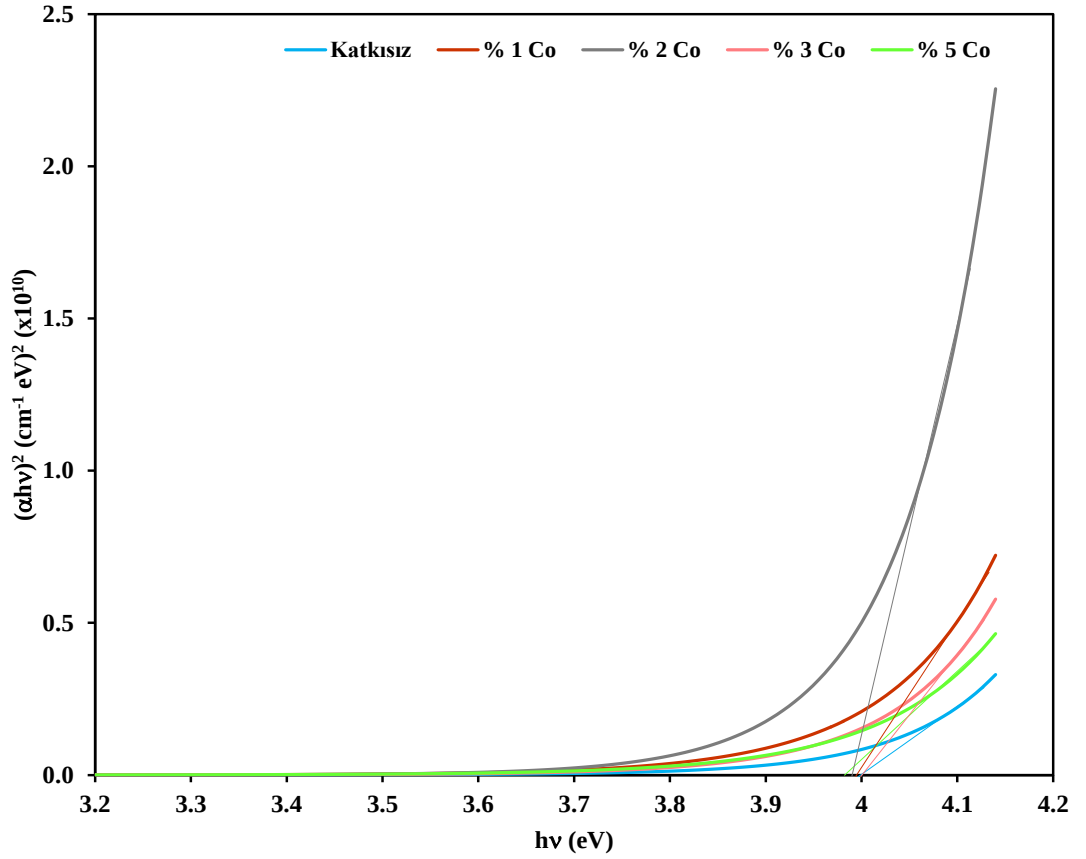
Şekil 4.40 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin $l/2$ - n/λ grafikleri

Co:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri şekil 4.41’de verilmiştir.



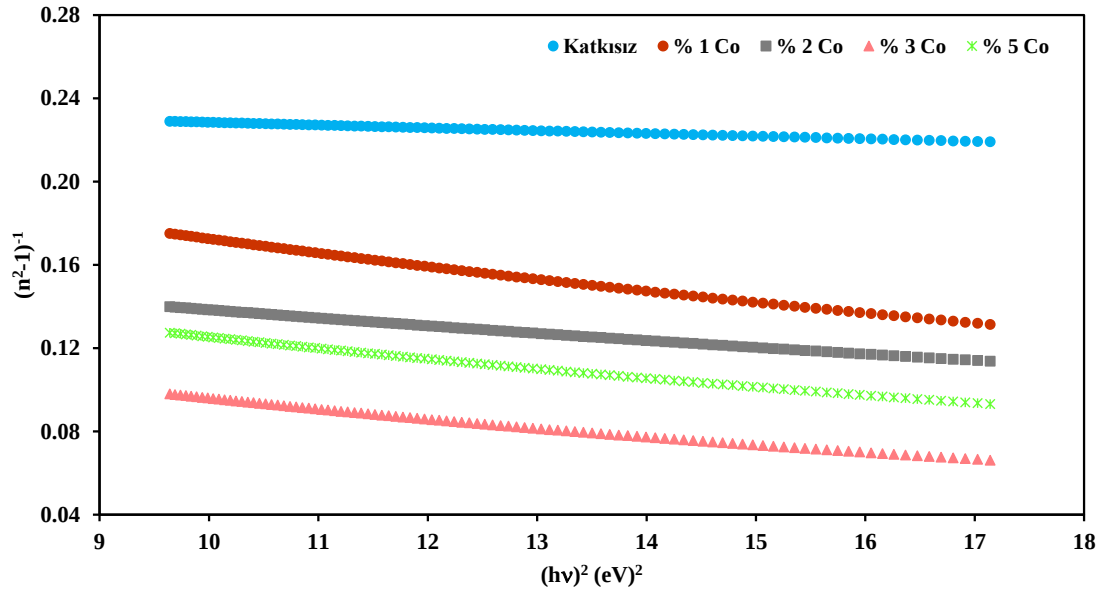
Şekil 4.41 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin k - λ grafikleri

Co:SnO₂ ince filmlerde direkt bir bant geçişi için (2.23) denkleminde n=0.5 alınarak şekil 4.42’de gösterilen $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların hν eksenine ekstrapole edilmesiyle, eksenı kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve izelge 4.26’da verilmiştir.



şekil 4.42 Cam zerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri

Co:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri şekil 4.43’te gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. WDD parametreleri izelge 4.26’da verilmiştir.

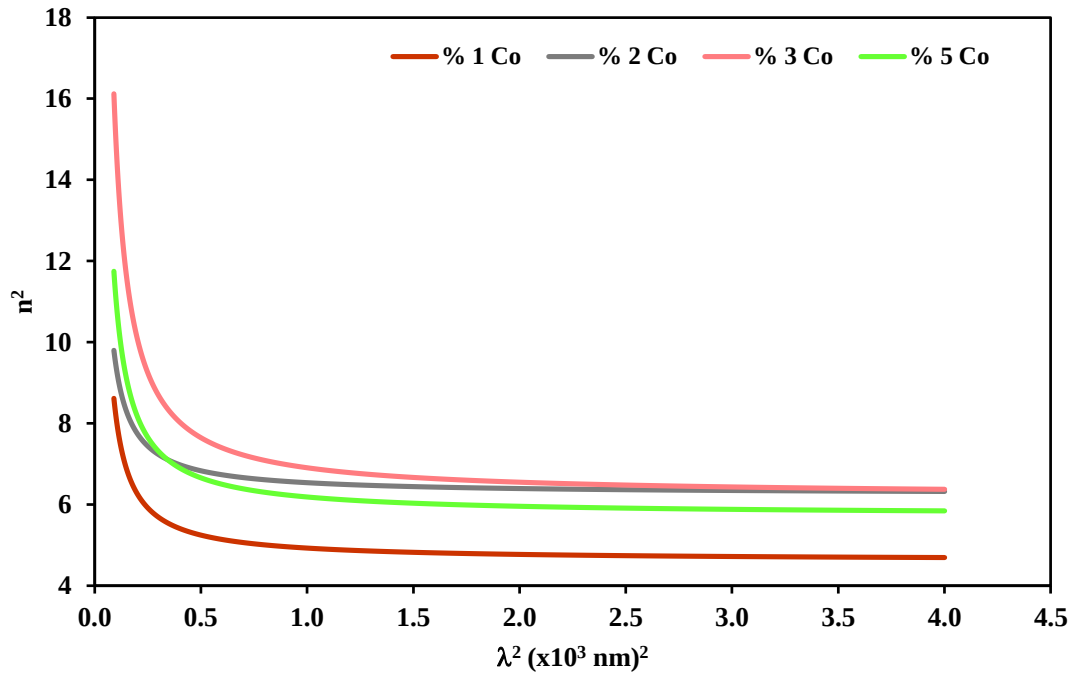


Şekil 4.43 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(hv)^2$ grafikleri

Çizelge 4.26 Co:SnO₂ numunelerinin Wemple-DiDomenico parametreleri

Numune	E_0 (eV)	E_d (eV)	f (eV) ²	M_{-1}	M_{-3} (eV) ⁻²	$n(v=0)$	ϵ_∞	E_g (eV)
% 1 Co	6.25	27.13	169.49	4.34	0.111	2.311	5.342	4.00
% 2 Co	7.03	40.62	285.71	5.77	0.117	2.603	6.774	3.99
% 3 Co	5.66	41.08	232.56	7.26	0.227	2.874	8.257	4.00
% 5 Co	6.09	35.70	217.39	5.86	0.158	2.620	6.862	3.99

Co:SnO₂ ince filmlerin $n^2-\lambda^2$ grafikleri şekil 4.44'te gösterilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun n^2 eksenine ekstrapole edilmesiyle ϵ_L ve eğiminden N/m^* belirlenmiştir. Bu sonuçlar WDD parametrelerinden olan ve sırasıyla (2.26), (2.27) denklemlerinden bulunan $n(v=0)$ ve ϵ_∞ ile birlikte çizelge 4.27'de verilmiştir.

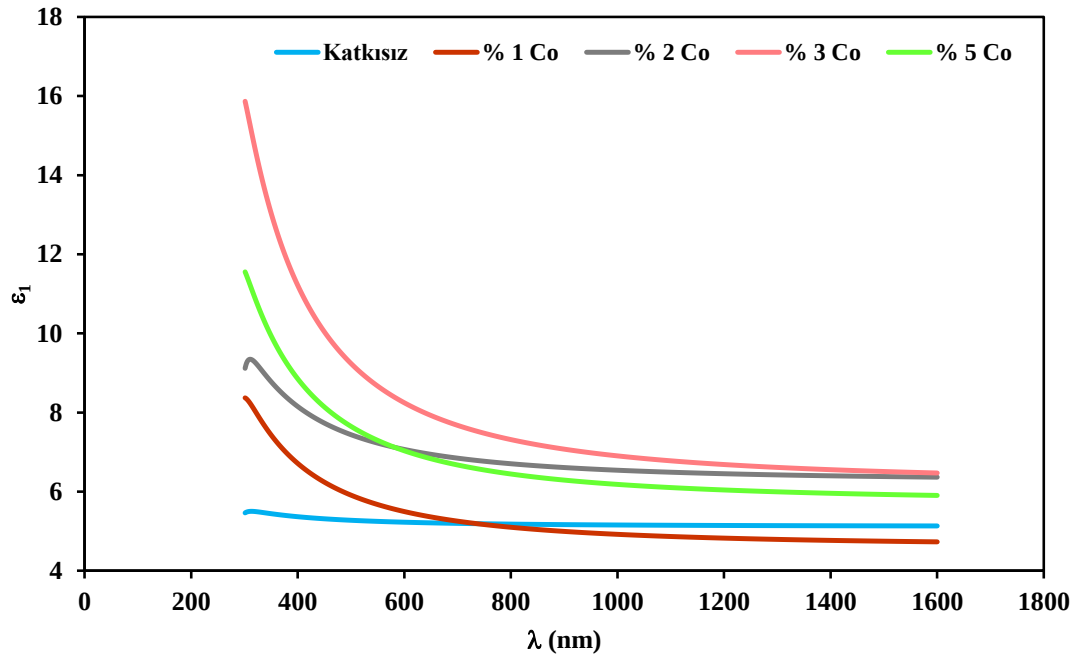


Şekil 4.44 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin n^2 - λ^2 grafikleri

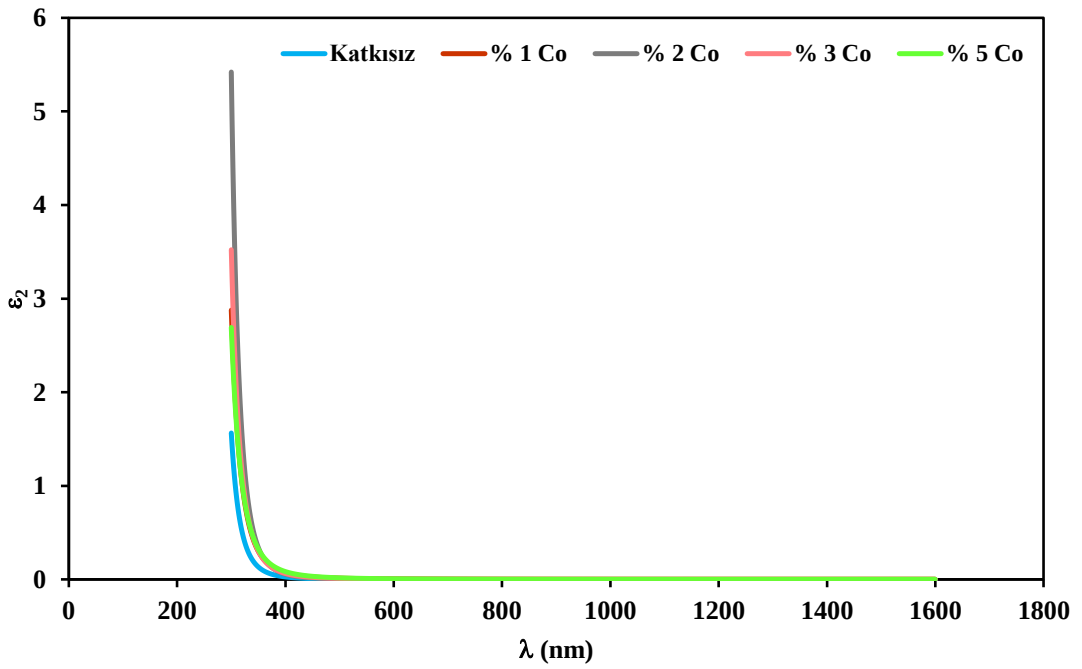
Çizelge 4.27 Co:SnO₂ numunelerinin ϵ_L ve N/m^* değerleri

Numune	ϵ_L	$N/m^* (m^{-3}kg^{-1})$
% 1 Co	4.805	1.17×10^{25}
% 2 Co	6.430	1.17×10^{25}
% 3 Co	6.632	2.74×10^{25}
% 5 Co	6.009	1.56×10^{25}

Kompleks elektronik dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları olan ϵ_1 ve ϵ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.45.a, b’de gösterilmiştir.



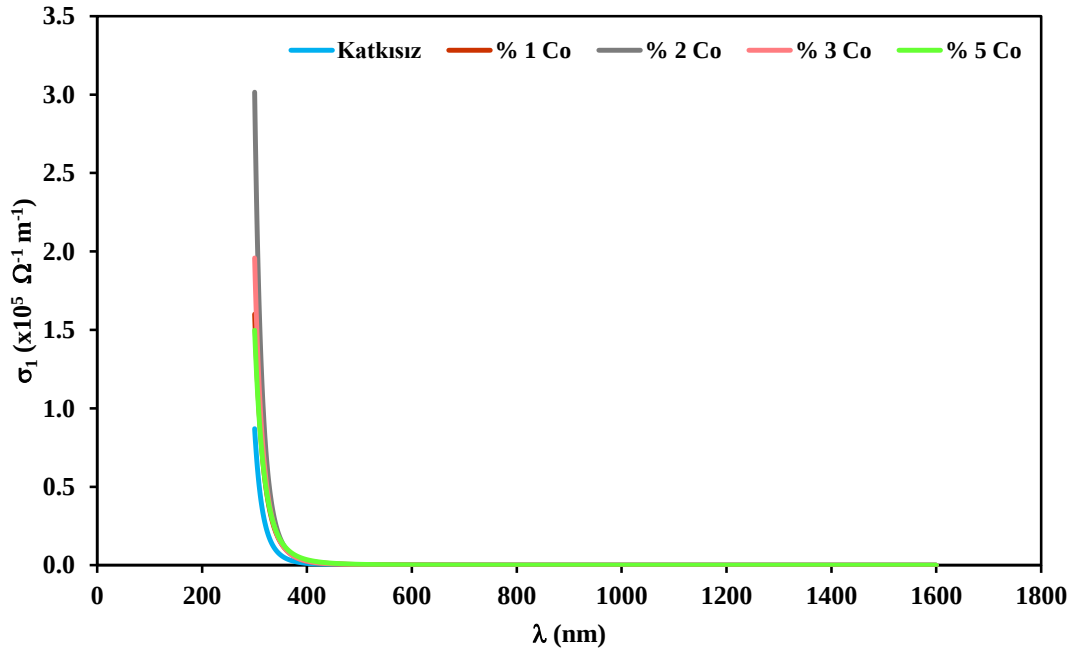
(a)



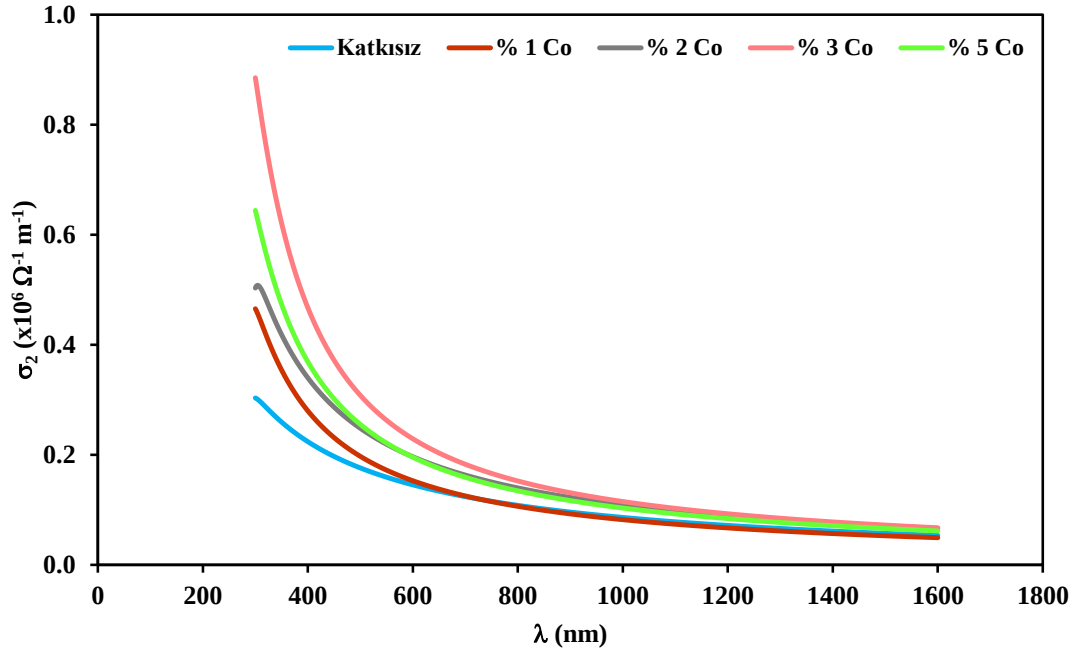
(b)

Şekil 4.45 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin a. ϵ_1 - λ , b. ϵ_2 - λ grafikleri

Kompleks optik iletkenliğinin reel ve imajiner kısımları olan σ_1 ve σ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığı sırasıyla şekil 4.46.a, b'de gösterilmiştir.



(a)

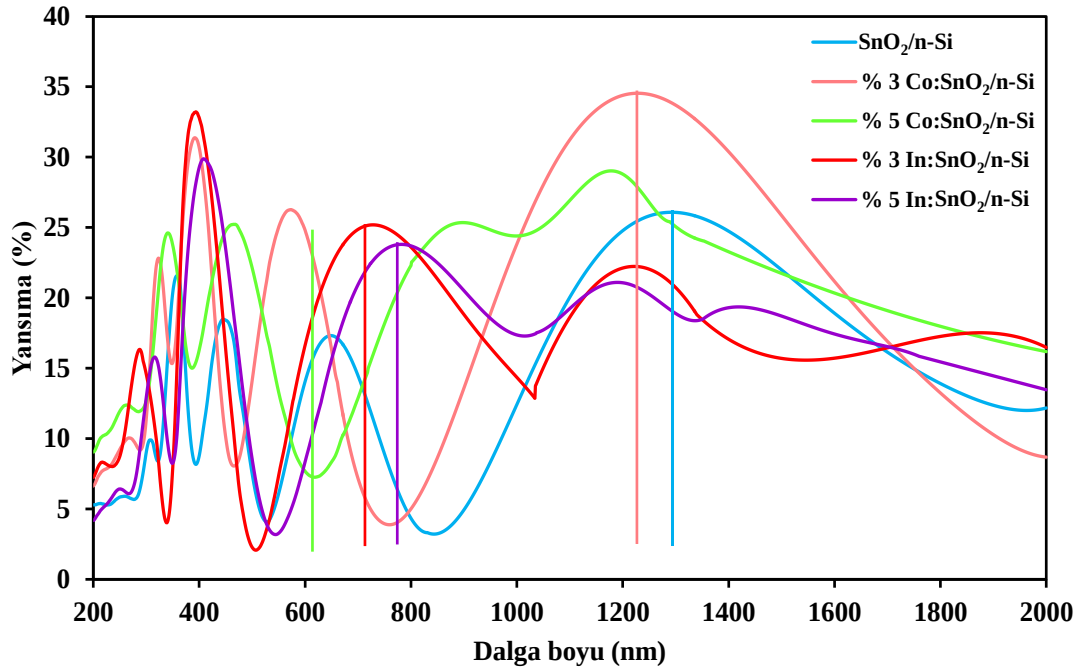


(b)

Şekil 4.46 Cam üzerindeki Co:SnO₂ ince filmlerin a. σ_1 - λ , b. σ_2 - λ grafikleri

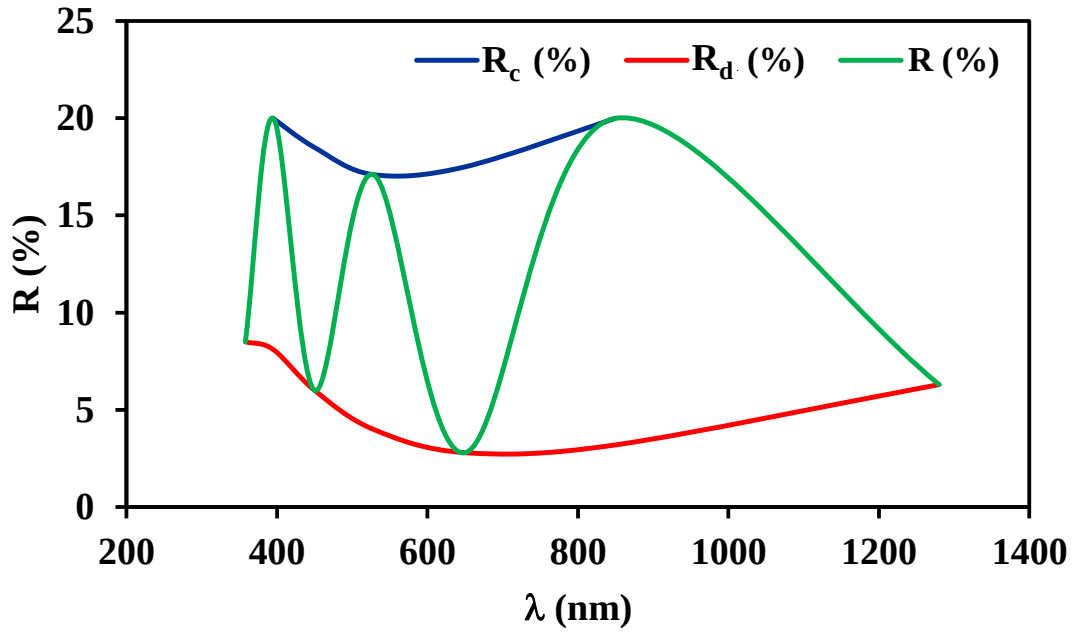
4.3 SnO₂ İnce Filmlerin Yansım Spektrumlarının İncelenmesi

n-Si kristali üzerinde büyütülen katkısız ve hem farklı malzemelerle hem de farklı oranlarda katkılı SnO₂ ince filmlerin yansım spektrumları 200-2000 nm dalga boyu aralığında şekil 3.2’de verilen UV-3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR spektrometresi ile ölçülmüş ve şekil 4.47’de verilmiştir.



Şekil 4.47 SnO₂/n-Si ince filmlerin yansım spektrumları

SnO₂/n-Si numunesinin 300-1300 nm dalga boyu aralığındaki yansım spektrumu şekil 4.48’de verilmiştir. Şekilde Swanepoel (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Bu çizim n-Si kristali üzerinde büyütülen tüm numuneler için yapılmıştır. El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntem yardımıyla filmlerin kalınlıkları ve kırılma indislerinin değerleri belirlenmiştir.



Şekil 4.48 SnO₂/n-Si numunesinin zarf içine alınmış yansıtma spektrumu

El-Naggar vd. (2009) tarafından belirtilen yöntem için, şekil 4.48'den R_M , R_m ve bu değerlere karşılık gelen dalga boyları belirlenir. r_{01} , her λ için R_M ve R_m değerleri (2.40) denkleminde yerine yazılarak hesaplanır. r_{01} değerlerinin (2.42) denkleminde yerine yazılmasıyla kırılma indisinin değeri ilk kez bulunmuş olur ve n_{10} ile gösterilmektedir.

n_{10} değerlerinin (2.8) denkleminde yerine yazılmasıyla, her yapıcı ve yıkıcı girişim saçığı için filmin kalınlık değerleri hesaplanır. Elde edilen kalınlık değerlerinin ortalaması alınarak yaklaşık olarak ortalama kalınlık değeri $\bar{d}_1$ hesaplanır.

$\bar{d}_1$ ve n_{10} değerleri kullanılarak, her ekstremum noktasına karşılık gelen dalga boyu için m_0 değeri (2.1) denkleminde bulunur. m_0 sonuçlarının maksimum için tam sayıya veya minimum için yarı tam sayıya yuvarlanması ile m değerleri belirlenir.

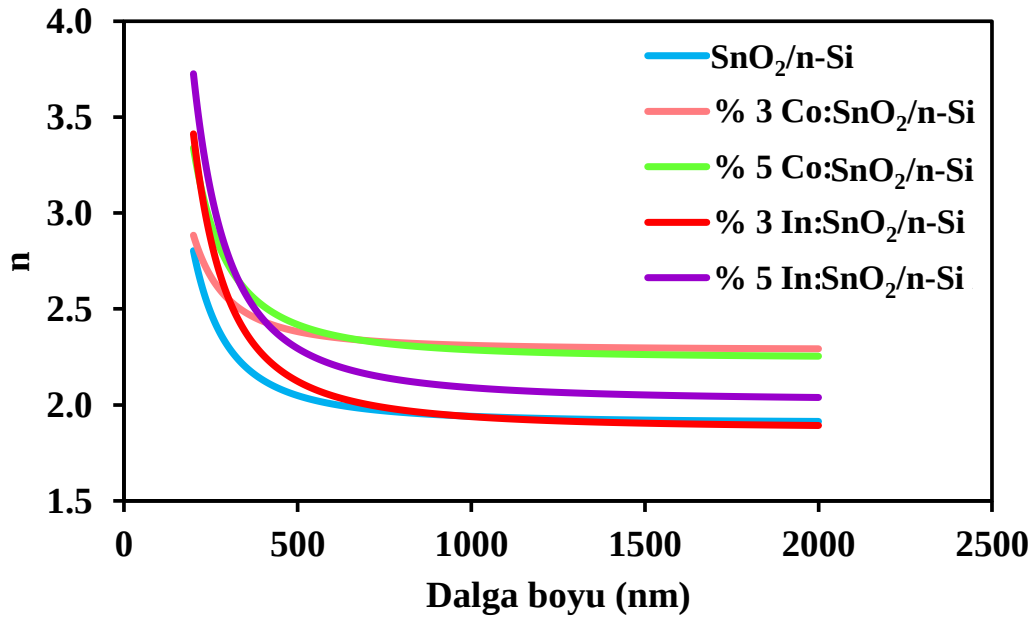
Film kalınlığının değerleri son olarak her ekstremum noktasına karşılık gelen dalga boyu için elde edilen m ve n_{10} değerleri (2.1) denkleminde yerine yazılarak bulunur. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak, tüm dalga boyları için geçerli olan ortalama kalınlık değeri ($\bar{d}$) daha büyük bir doğrulukla hesaplanır.

Filmin kırılma indisinin değeri (n_{12}) son olarak her dalga boyu için belirlenen m ve $\bar{d}$ değerlerini (2.1) denkleminde yerine yazarak elde edilir. Bahsedilen bu hesaplamalar n-Si kristali üzerinde büyütülen tüm numuneler için yapılmış ve El-Naggar vd. (2009) yönteminden elde edilen değerler çizelge 4.28’de verilmiştir.

Çizelge 4.28 SnO₂/n-Si numunelerinin optik parametreleri

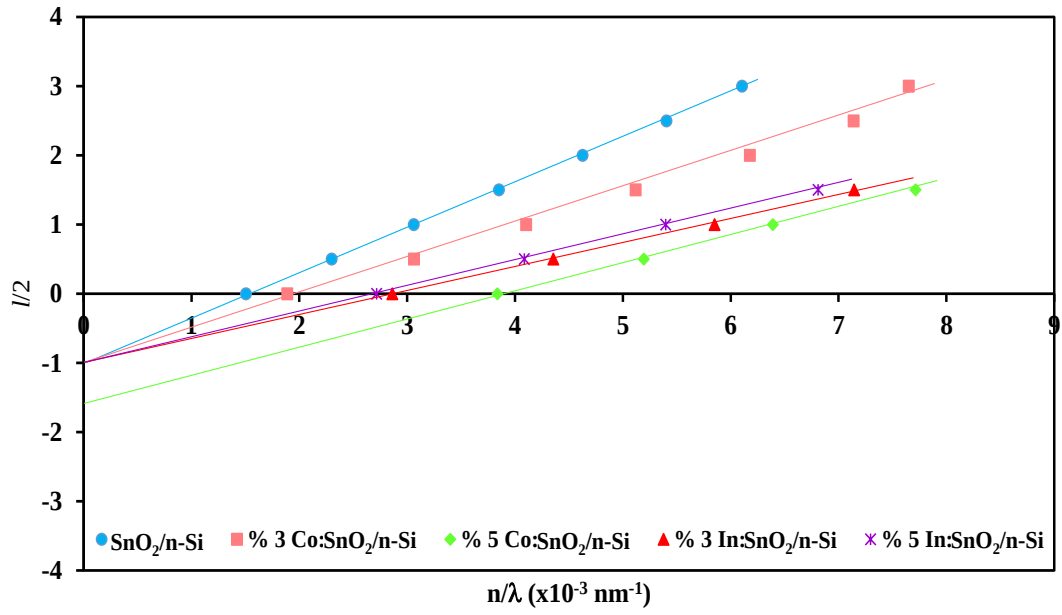
λ (nm)	R_M (%)	R_m (%)	n_{10}	d_1 (nm)	m_0	m	d (nm)	n_{12}
1280	26.1	6.30	2.271		1.05	1.0	281.764	1.966
850	20.0	3.20	1.939	493.735	1.34	1.5	328.820	1.958
650	17.5	2.80	1.849	443.602	1.68	2.0	351.562	1.997
528	17.1	4.00	1.901	330.397	2.12	2.5	347.115	2.027
450	18.5	6.00	2.034	271.979	2.67	3.0	331.836	2.074
395	20.0	8.10	2.168	258.048	3.24	3.5	318.813	2.125
358	22.0	8.50	2.246	318.758	3.70	4.0	318.806	2.199
SnO₂/n-Si				$\bar{d}_1=294.796$ nm	$\bar{d}=325.531$ nm			
1220	34.5	5.95	2.516		0.96	1.0	242.470	2.498
760	29.1	3.90	2.233	285.240	1.36	1.5	255.227	2.335
575	26.3	5.40	2.233	264.655	1.80	2.0	257.520	2.355
468	29.7	7.80	2.455	183.490	2.43	2.5	238.292	2.396
395	31.2	11.5	2.675	163.850	3.14	3.0	221.518	2.427
348	27.0	15.3	2.688	262.044	3.58	3.5	226.523	2.494
328	23.0	12.8	2.452		3.47	4.0	267.573	2.687
% 3 Co:SnO₂/n-Si				$\bar{d}_1=231.856$ nm	$\bar{d}=244.160$ nm			
615	25.4	7.30	2.297		1.57	1.5	200.787	2.371
470	25.2	12.35	2.507	156.397	2.24	2.0	187.484	2.416
395	25.1	14.80	2.600	200.206	2.76	2.5	189.897	2.538
340	24.5	14.00	2.549	272.943	3.15	3.0	200.041	2.621
% 5 Co:SnO₂/n-Si				$\bar{d}_1=209.849$ nm	$\bar{d}=194.552$ nm			
700	25.5	6.30	2.253		1.24	1.0	155.321	2.020
490	30.8	2.20	2.171	206.524	1.71	1.5	169.313	2.121
390	33.5	2.50	2.271	179.508	2.25	2.0	171.752	2.251
338	26.4	3.80	2.150		2.46	2.5	196.534	2.439
% 3 In:SnO₂/n-Si				$\bar{d}_1=193.016$ nm	$\bar{d}=173.230$ nm			
785	24.0	8.00	2.286		1.24	1.0	171.716	2.111
550	27.4	6.00	2.296	198.016	1.77	1.5	179.670	2.219
440	30.0	5.00	2.322	226.508	2.24	2.0	189.465	2.366
370	23.8	8.00	2.280		2.62	2.5	202.885	2.487
% 5 In:SnO₂/n-Si				$\bar{d}_1=212.262$ nm	$\bar{d}=185.934$ nm			

El-Naggar vd. (2009) yönteminden son olarak bulunan kırılma indisi (n_{12}) değerlerinin (2.12) ile verilen denkleme fit edilmesiyle elde edilen iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntıları ve karşılık gelen r^2 değerleri sırasıyla şu şekildedir: $\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ için; $n=1.9045+(35941/\lambda^2)$ ve 0.99, % 3 $\text{Co}:\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ için; $n=2.2864+(23948/\lambda^2)$ ve 0.98, % 5 $\text{Co}:\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ için; $n=2.2426+(43889/\lambda^2)$ ve 0.98, % 3 $\text{In}:\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ için; $n=1.8773+(61430/\lambda^2)$ ve 0.98, % 5 $\text{In}:\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ için; $n=2.0224+(68103/\lambda^2)$ ve 0.99. n-Si üzerinde büyütülen SnO_2 ince filmlerin bu denklemlerden elde edilen n değerlerinin dalga boyuna bağlılıkları şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.49 n-Si üzerindeki SnO_2 ince filmlerin n-λ grafikleri

Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için n-Si kristali üzerindeki SnO_2 ince filmlerin n_{12} değerleri kullanılarak çizilen $1/2-n/\lambda$ grafikleri şekil 4.50’de verilmiştir. Grafikler doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrunun eğimi $2d$ ve sabit kısmı ise $-m_1$ değerine sahiptir. Doğrunun denkleminde yararlanarak d ve m_1 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.29’da verilmiştir. Çizelge 4.29’da El-Naggar vd. (2009) yönteminden belirlenen m ve kalınlık değerleri de verilmiştir. Çizelge 4.29’da ayrıca yansıma spektrumunun en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu belirtilmiştir.

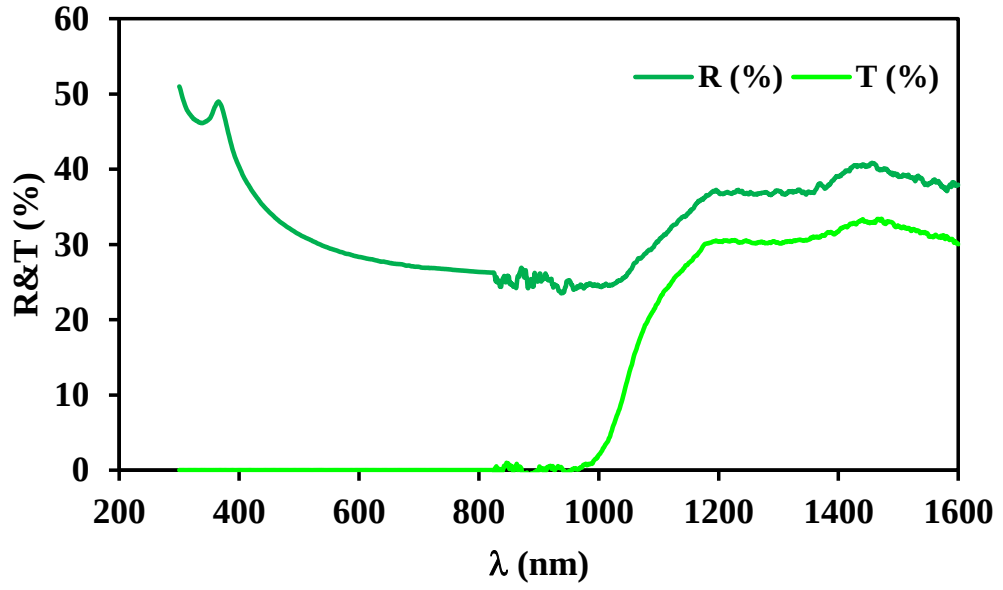


Şekil 4.50 n-Si üzerindeki SnO₂ ince filmlerin $l/2$ - n/λ grafikleri

Çizelge 4.29 SnO₂/n-Si numunelerinin d ve m değerleri

Numune	El-Naggar vd.		Grafiksel		Pik
	$\bar{d}$ (nm)	m	d (nm)	m	
SnO ₂	325.531	1.0	325.530	1.0	Maks
% 3 Co:SnO ₂	244.160	1.0	244.160	1.0	Maks
% 5 Co:SnO ₂	194.552	1.5	194.550	1.5	Min
% 3 In:SnO ₂	173.230	1.0	173.230	1.0	Maks
% 5 In:SnO ₂	185.934	1.0	183.930	1.0	Maks

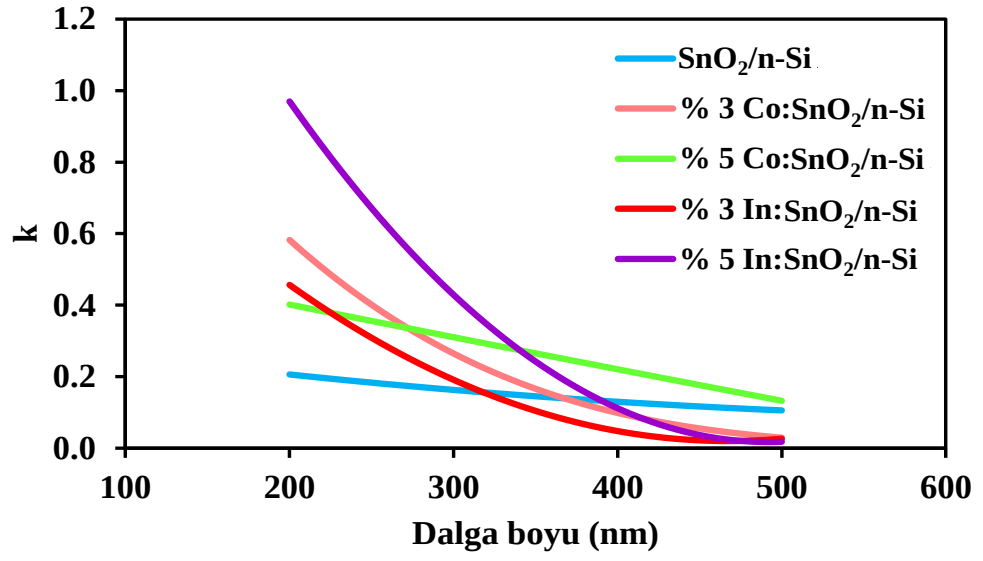
Soğurum ve sönüm katsayıları da El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntemle belirlenmiştir. Söz konusu yöntemle göre bu değerlerin elde edilmesi için öncelikle, n-Si kristalinin yansıma ve geçirgenlik spektrumları 300-1600 nm dalga boyu aralığında şekil 3.2’de verilen UV-3600 SHIMADZU UV-VIS-NIR spektrometresi ile ölçülmüş ve şekil 4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.51 n-Si kristalinin yansıtma ve geçirgenlik spektrumları

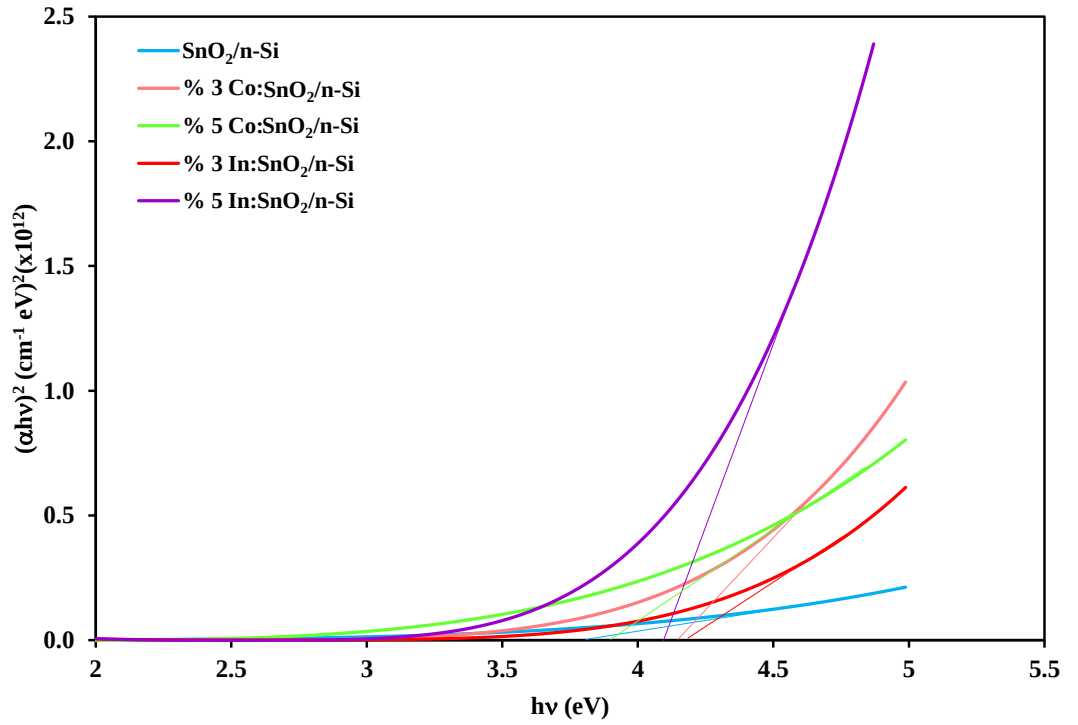
Şekil 4.51’de verilen spektrumlar yardımıyla, n-Si kristalinin kırılma indisi ve sönüm katsayısının belirlenmesi için ilk yaklaşım olarak (2.49) ve (2.50) denklemlerinde $\eta=1$ alınır. R_s ve T_s değerleri bu yaklaşım altında bulunur. (2.56) denkleminde, bu değerler yerine yazılarak A_t hesaplanır. (2.55) denkleminde A_t bilindiğinden, η belirlenir. Belirlenen η değeri (2.49) ve (2.50) denklemlerinde yerine konularak yeni R_s ve T_s değerleri bulunur. Bu işlemlere, yeni η değerleri denklemlere yazıldığında, A_t değeri sabitlenene kadar devam edilir. A_t değeri sabitlendiğinde elde edilen η parametresinin (2.57) denkleminde yerine yazılmasıyla, sönüm katsayısı elde edilir. Sönüm katsayısı belirlendikten sonra, R_s ve n_a ile birlikte (2.58) denkleminde kırılma indisinin değeri belirlenir.

Her λ için x_{r12} değeri (2.41) denkleminde hesaplanır. Si alt tabakasının kırılma indisinin reel ve sanal kısımları hesaplandıktan sonra, ilk yaklaşım olarak alt tabakanın ve filmin k değerleri sıfır alınmıştır. (2.44) denkleminde r_{12} belirlenir. (2.43) denkleminde k_{1i} elde edilir. n ve k değerleri (2.44) denkleminde yerine yazılarak r_{12} tekrar bulunur. x_{r12}/r_{12} oranından x ve daha sonra sırasıyla (2.21) ve (2.22) denklemlerinden filme ait olan k ve α değerleri bulunur. Söz konusu hesaplamalardan n-Si üzerinde büyütülen SnO_2 ince filmler için elde edilen $k-\lambda$ grafikleri şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52 SnO₂/n-Si ince filmlerin k-λ grafikleri

SnO₂ ince filmlerde direkt bir bant geçişi için (2.23) denkleminde n=0.5 alınarak şekil 4.53'te gösterilen $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların hν eksenine ekstrapole edilmesiyle, eksen kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve çizelge 4.30'da verilmiştir.



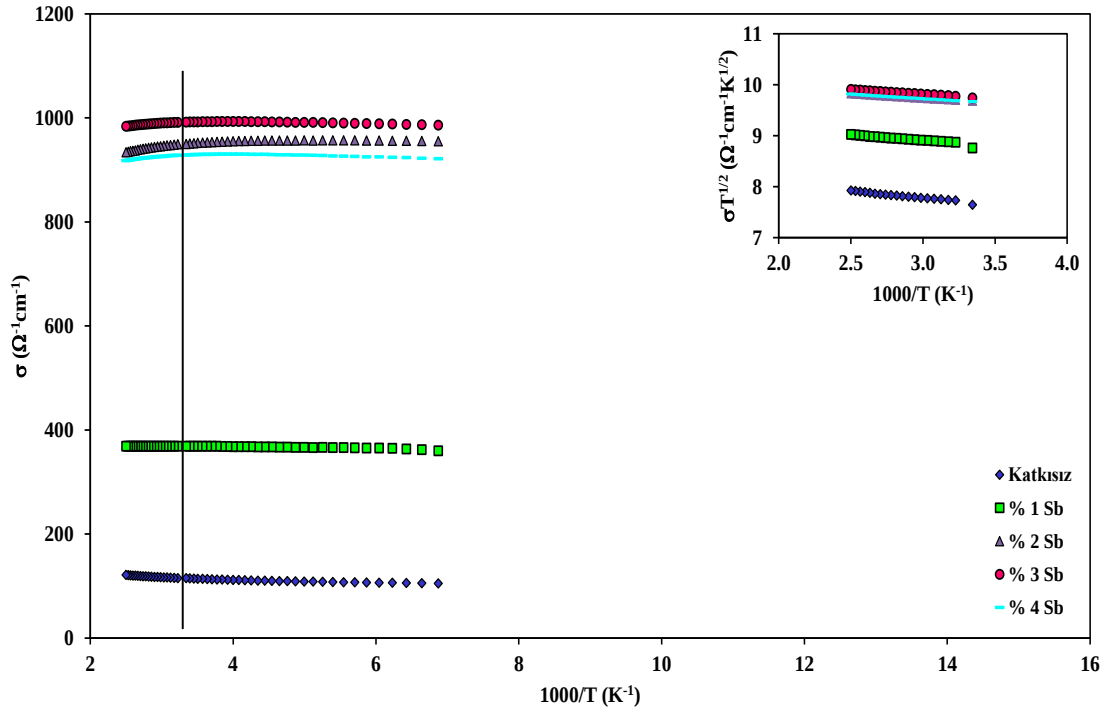
Şekil 4.53 n-Si üzerindeki SnO₂ ince filmlerin $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri

Çizelge 4.30 SnO₂/n-Si numunelerinin optiksel bant aralıkları

Numune	E _g (eV)
SnO ₂ /n-Si	3.82
% 3 Co:SnO ₂ /n-Si	4.16
% 5 Co:SnO ₂ /n-Si	3.90
% 3 In:SnO ₂ /n-Si	4.19
% 5 In:SnO ₂ /n-Si	4.10

4.4 SnO₂ İnce Filmlerin Taşıyıcı İletim Mekanizmalarının İncelenmesi

Cam lameller üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmlerin elektriksel iletkenlikleri iki nokta yöntemi kullanılarak incelenmiştir. İki nokta yöntemi ile ince filmlerin sıcaklığa bağlı I-V ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerin alınmasında, Keithley 2400 güç kaynağı, Keithley 2182A Nanovoltmetre, Keithley 2700 Multimetre ve Lake Shore 331 sıcaklık kontrolcüsü sisteminden oluşan ve şekil 3.3’de verilen düzenek kullanılmıştır.



Şekil 4.54 Sb:SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri

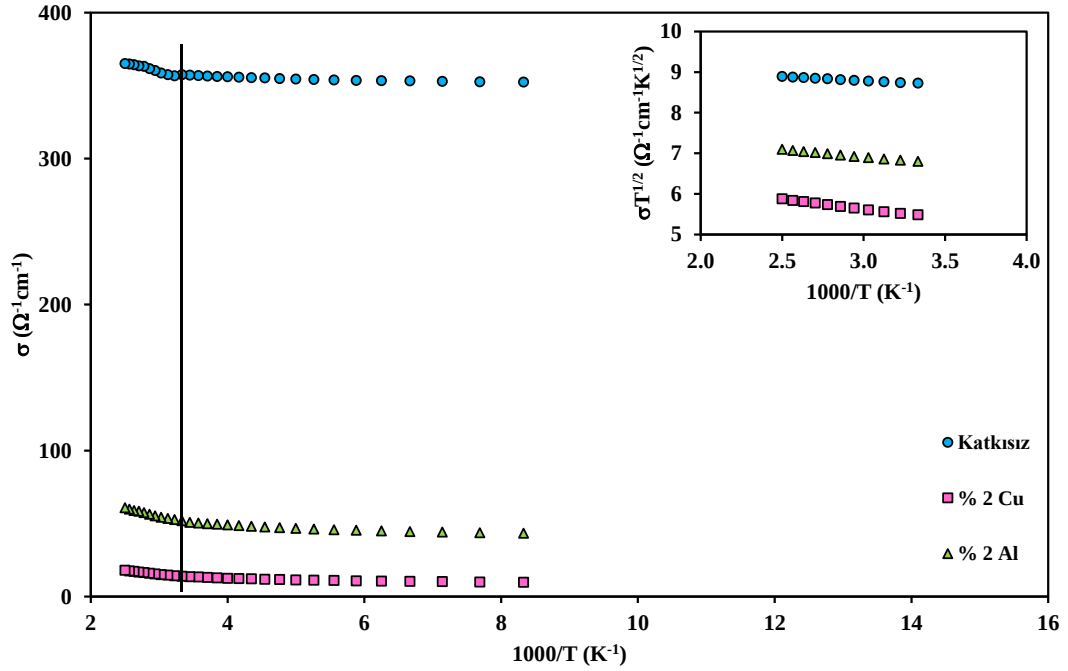
2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin, 140-400 K sıcaklık aralığındaki σ -1000/T ve 300-400 K sıcaklık aralığındaki $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafikleri şekil 4.54'te verilmiştir. $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafiği (2.66) denkleminde uyan biçimde doğrusaldır ve fit edilmesinden belirlenen V_{etk} değerleri çizelge 4.31'de belirtilmiştir.

Şekil 3.3'te verilen düzenek kullanılarak tüm numunelerin oda sıcaklığında ve 0.5 Tesla (T) manyetik alan uygulanarak Hall etkisi ölçümleri alınmıştır. Filmlerdeki taşıyıcı yoğunluğu N, alınan bu Hall etkisi ölçümünden belirlenmiştir. Orton ve Powell (1980) tarafından elde edilen Debye uzunluğu ifadesi denklem (2.60) ile verilmiştir. Burada malzemenin bağıl dielektrik sabiti Jousse (1985) tarafından belirtildiği gibi 12 olarak alınmıştır. Her numune için L_D değeri hesaplanmıştır. Atomik kuvvet mikroskopundan (AFM) tanecik boyutu, L belirlenmiştir. Polikristal SnO₂ için, Jousse (1985) etkin taşıyıcı kütlelerinin $m^*=0.15m_0$ olarak alınabileceğini belirtmiştir. (2.62) denklemi ile verilen $\sigma_{\text{tün}}$ terimi oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik değerini göstermektedir. (2.62)-(2.64) denklemleri eşzamanlı olarak çözüldüğünde, Q_t , V_B ve l_2 değerleri bulunur. Sb:SnO₂ ince filmler için elde edilen tüm bu sonuçlar çizelge 4.31'de verilmiştir.

Çizelge 4.31 Sb:SnO₂ numunelerinin L, N, L_D , V_B , l_2 , Q_t ve V_{etk} değerleri

Numune	L (Å)	N (cm ⁻³)	L_D (Å)	V_B (eV)	l_2 (Å)	Q_t (cm ⁻²)	V_{etk} (eV)
Katkısız	1616	7.79×10^{19}	4.71	0.091	24.9	1.94×10^{13}	0.031
% 1 Sb	747	1.31×10^{20}	3.63	0.054	14.7	1.94×10^{13}	0.034
% 2 Sb	808	3.20×10^{20}	2.32	0.059	9.9	3.16×10^{13}	0.013
% 3 Sb	2097	4.27×10^{20}	2.01	0.143	13.3	5.69×10^{13}	0.017
% 4 Sb	1494	6.72×10^{20}	1.60	0.175	11.8	7.91×10^{13}	0.013

5 ml HCl içeren katkısız, % 2 oranında Cu ve Al katkılı SnO₂ ince filmlerin, 120-400 K sıcaklık aralığındaki σ -1000/T ve 300-400 K sıcaklık aralığındaki $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafikleri şekil 4.55'te verilmiştir. $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafiği (2.66) denkleminde uyan biçimde doğrusaldır ve fit edilmesinden belirlenen V_{etk} değerleri çizelge 4.32'de belirtilmiştir.



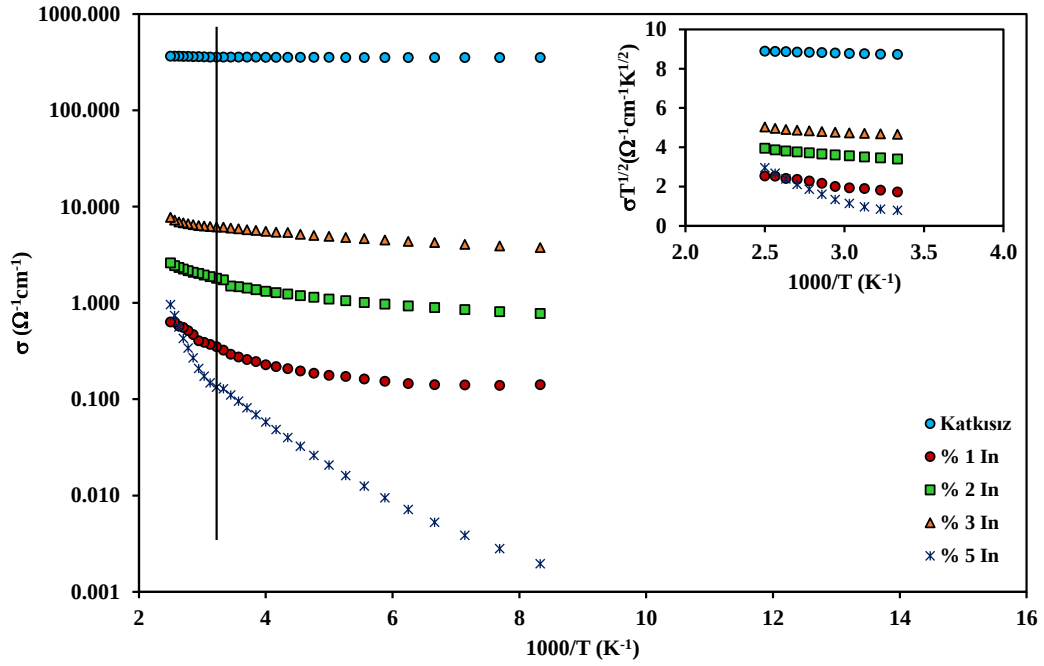
Şekil 4.55 Cu ve Al:SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri

Hall etkisi ölçümünden elde edilen filmlerdeki taşıyıcı yoğunluğu N , (2.60) denkleminde bulunan Debye uzunluğu L_D değeri, AFM'den belirlenen tanecik boyutu L , (2.62)-(2.64) denklemlerinden belirlenen Q_t , V_B ve l_2 değerleri çizelge 4.32'de verilmiştir.

Çizelge 4.32 Cu ve Al:SnO₂ numunelerinin L , N , L_D , V_B , l_2 , Q_t ve V_{etk} değerleri

Numune	L (Å)	N (cm ⁻³)	L_D (Å)	V_B (eV)	l_2 (Å)	Q_t (cm ⁻²)	V_{etk} (eV)
Katkısız	775	1.65×10^{20}	3.23	0.056	14.8	2.00×10^{13}	0.018
% 2 Cu	837	5.27×10^{18}	18.10	0.192	27.4	3.71×10^{13}	0.043
% 2 Al	707	4.99×10^{19}	5.88	0.132	22.8	3.07×10^{13}	0.032

5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında In katkılı SnO₂ ince filmlerin, 120-400 K sıcaklık aralığındaki σ -1000/T ve 300-400 K sıcaklık aralığındaki $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafikleri şekil 4.56’da verilmiştir. $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafiği (2.66) denkleminde uyan biçimde doğrusaldır ve fit edilmesinden belirlenen V_{etk} değerleri çizelge 4.33’te belirtilmiştir.



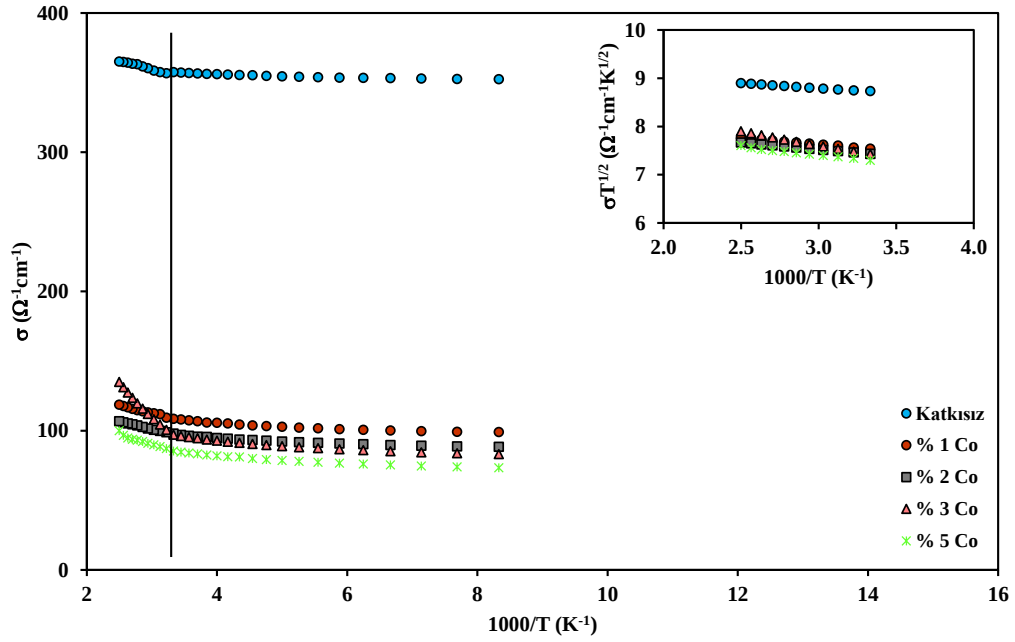
Şekil 4.56 In:SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri

Hall etkisi ölçümünden elde edilen filmlerdeki taşıyıcı yoğunluğu N , (2.60) denkleminde bulunan Debye uzunluğu L_D değeri, AFM’den belirlenen tanecik boyutu L , (2.62)-(2.64) denkleminde belirlenen Q_t , V_B ve l_2 değerleri çizelge 4.33’te verilmiştir.

Çizelge 4.33 In:SnO₂ numunelerinin L , N , L_D , V_B , l_2 , Q_t ve V_{etk} değerleri

Numune	L (Å)	N (cm ⁻³)	L_D (Å)	V_B (eV)	l_2 (Å)	Q_t (cm ⁻²)	V_{etk} (eV)
% 1 In	1092	6.68×10^{17}	50.82	0.017	117.5	7.85×10^{11}	0.015
% 2 In	175	1.84×10^{18}	30.60	0.212	28.9	3.90×10^{13}	0.056
% 3 In	578	2.02×10^{19}	9.25	0.066	41.8	8.42×10^{12}	0.023
% 5 In	577	8.08×10^{17}	46.22	0.020	115.5	9.33×10^{11}	0.012

5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-5 oranında Co katkılı SnO₂ ince filmlerin, 120-400 K sıcaklık aralığındaki σ -1000/T ve 300-400 K sıcaklık aralığındaki $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafikleri şekil 4.57’de verilmiştir. $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafiği (2.66) denklemine uyan biçimde doğrusaldır ve fit edilmesinden belirlenen V_{etk} değerleri çizelge 4.34’te belirtilmiştir.



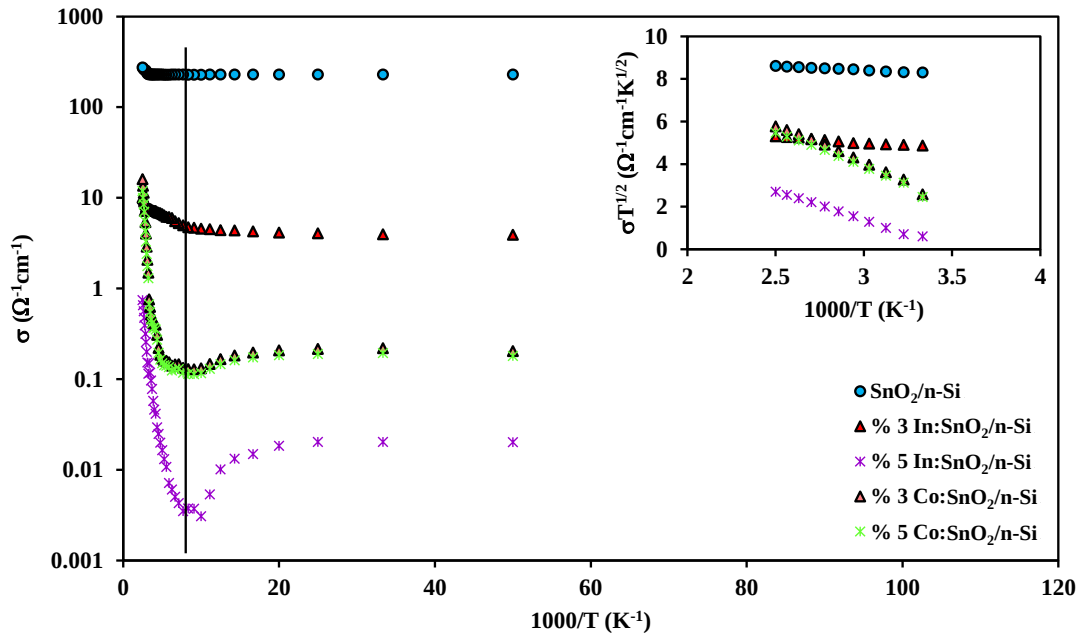
Şekil 4.57 Co:SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri

Hall etkisi ölçümünden elde edilen filmlerdeki taşıyıcı yoğunluğu N , (2.60) denkleminde bulunan Debye uzunluğu L_D değeri, AFM’den belirlenen tanecik boyutu L , (2.62)-(2.64) denkleminde belirlenen Q_t , V_B ve l_2 değerleri çizelge 4.34’te verilmiştir.

Çizelge 4.34 Co:SnO₂ numunelerinin L , N , L_D , V_B , l_2 , Q_t ve V_{etk} değerleri

Numune	L (Å)	N (cm ⁻³)	L_D (Å)	V_B (eV)	l_2 (Å)	Q_t (cm ⁻²)	V_{etk} (eV)
% 1 Co	754	1.02×10^{20}	4.11	0.086	21.2	2.17×10^{13}	0.021
% 2 Co	908	5.11×10^{19}	5.81	0.059	24.9	1.27×10^{13}	0.020
% 3 Co	505	7.41×10^{19}	4.83	0.060	20.7	1.54×10^{13}	0.034
% 5 Co	1347	1.79×10^{19}	9.83	0.069	45.3	8.08×10^{12}	0.024

5 ml HCl içeren katkısız, % 3 ve % 5 oranında In ve Co katkılı ve n-Si kristali üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmlerin, 20-400 K sıcaklık aralığındaki σ -1000/T ve 300-400 K sıcaklık aralığındaki $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafikleri şekil 4.58’de verilmiştir. $\ln(\sigma T^{1/2})$ -1000/T grafiği (2.66) denkleminin uyan biçimde doğrusaldır ve fit edilmesinden belirlenen V_{etk} değerleri çizelge 4.35’te belirtilmiştir. Hall etkisi ölçümünden elde edilen filmlerdeki taşıyıcı yoğunluğu N, (2.60) denkleminde bulunan Debye uzunluğu L_D değeri, AFM’den belirlenen tanecik boyutu L, (2.62)-(2.64) denkleminde belirlenen Q_t , V_B ve l_2 değerleri de çizelge 4.35’te verilmiştir.



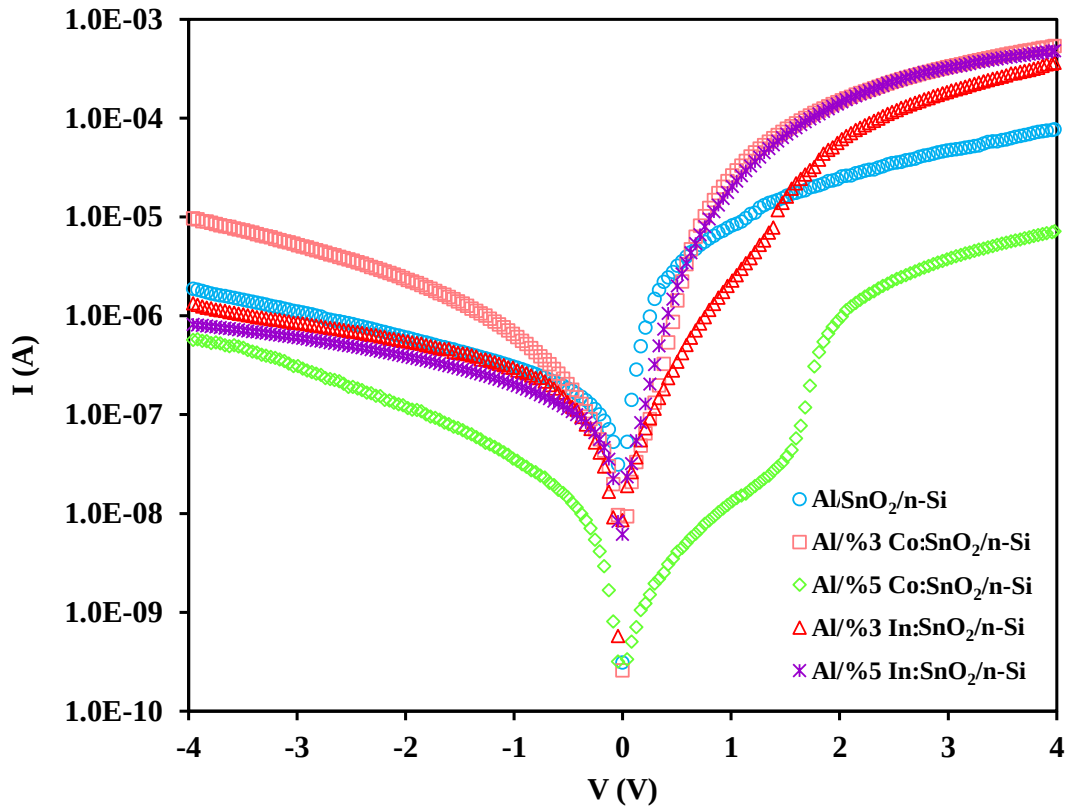
Şekil 4.58 n-Si üzerindeki SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri

Çizelge 4.35 n-Si üzerindeki SnO₂ numunelerinin L, N, L_D , V_B , l_2 , Q_t ve V_{etk} değerleri

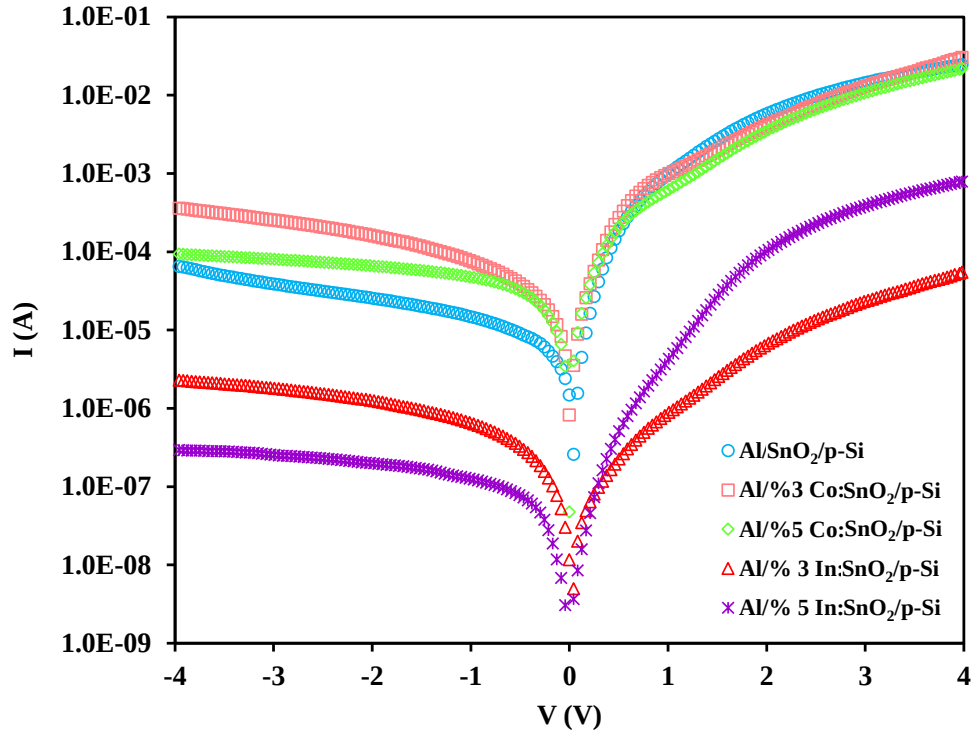
Numune	L (Å)	N (cm ⁻³)	L_D (Å)	V_B (eV)	l_2 (Å)	Q_t (cm ⁻²)	V_{etk} (eV)
SnO ₂	1941	1.56×10^{20}	3.33	0.124	20.5	3.20×10^{13}	0.021
% 3 In	1296	2.05×10^{17}	91.86	0.004	102.1	2.09×10^{11}	0.020
% 5 In	5278	6.15×10^{19}	5.30	0.292	50.2	3.08×10^{13}	0.106
% 3 Co	1781	6.18×10^{16}	167.09	0.004	183.9	1.14×10^{11}	0.305
% 5 Co	1188	8.25×10^{17}	45.74	0.018	106.4	8.78×10^{11}	0.296

4.5 Oda Sıcaklığında SnO₂/Si Yapısının Elektriksel Belirtkenlerinin Belirlenmesi

I-V belirtkenlerini ölçmek için, Keithley 2182A nanovoltmetre, Lake Shore 331 sıcaklık kontrolcüsü, Keithley 2700 multimetre, Keithley 2400 güç kaynağından oluşan bir sistem kullanılmıştır ve şekil 3.3'te gösterilmiştir. n-tipi ve p-tipi Si üzerinde katkısız, % 3 ve 5 oranında In ve Co katkılı SnO₂ ince filmler büyütüldükten sonra ön ve arka kontaklar Al buharlaştırılarak elde edilen yapıların oda sıcaklığında yapılan I-V ölçümlerinden elde edilen lnI-V grafikleri sırasıyla şekil 4.59-4.60'ta verilmiştir. Bu I-V belirtkenlerden düz beslem akımının aynı gerilimdeki (4 V) ters beslem akımına oranından hesaplanan doğrultma çarpanları (r) (Mridha ve Basak 2006) belirlenmiştir. Aynı numunelerin düz beslem lnI-V grafiklerinin eğimlerinden denklem (2.69) yardımıyla idealite faktörleri, grafiklerin lnI eksenini kestiği noktalardan doyma akım değerleri ve (2.70) denkleminde sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Elde edilen bu sonuçlar n-Si ve p-Si üzerinde büyütülen yapılar için sırasıyla çizelge 4.36-4.37'de verilmiştir.

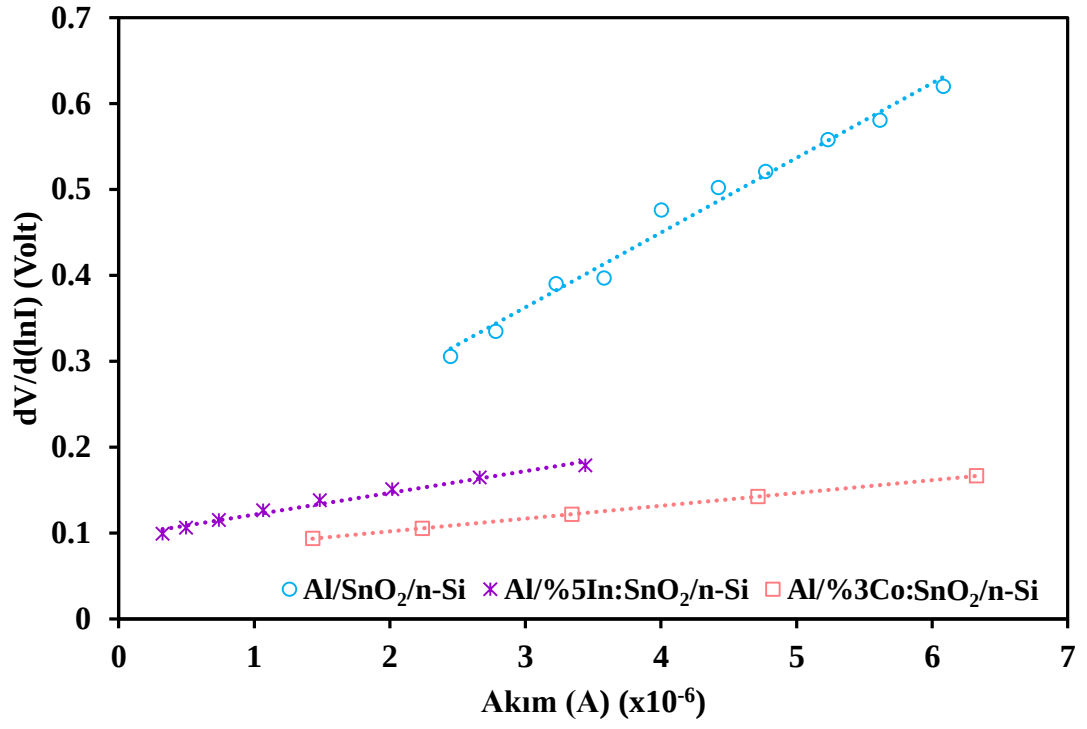


Şekil 4.59 Al/SnO₂/n-Si yapılarının lnI-V grafikleri

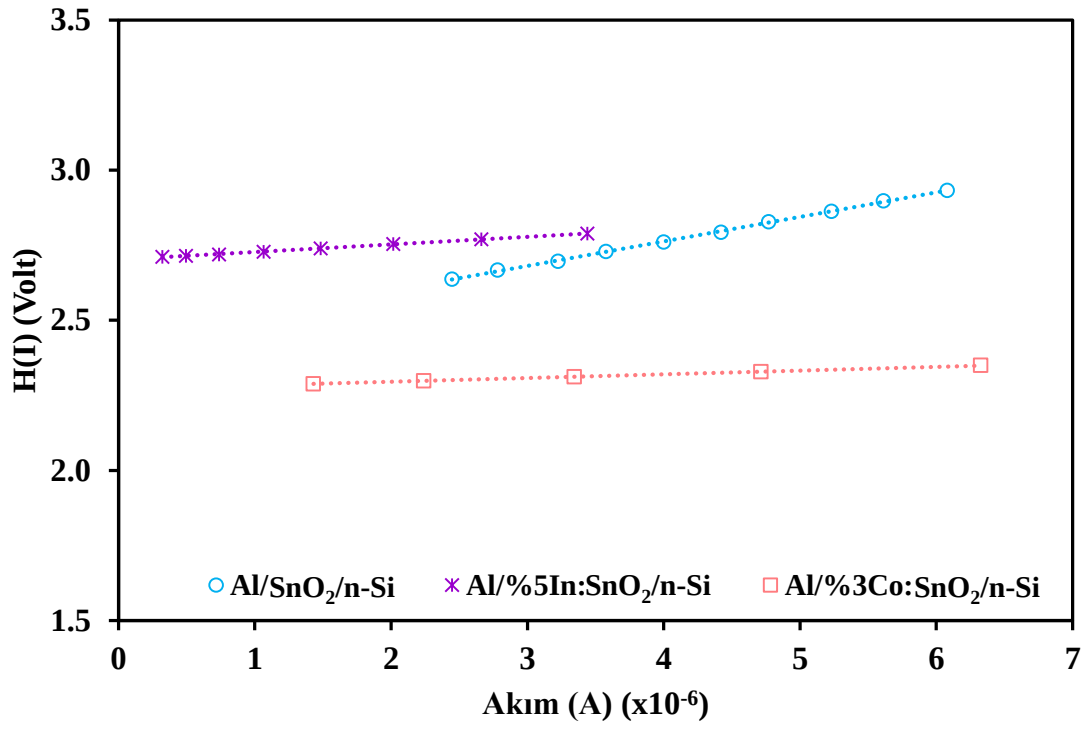


Şekil 4.60 Al/SnO₂/p-Si yapılarının lnI-V grafikleri

Al/SnO₂/n-Si ve Al/SnO₂/p-Si yapılarının ara yüzey durumlarını belirlerken seri direnç (R_s) etkisi de göz önüne alınmıştır. Bunun için Cheung'ler tarafından geliştirilen fonksiyonlar kullanılmıştır (Cheung ve Cheung 1986). Bu yöntemle göre, seri direnç düz beslem lnI-V grafiklerinin tam dönüm noktasından itibaren etkilidir. $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I grafikleri şekil 4.61-4.64'te verilmiştir. Bu grafiklerin çizilmesinden (2.72) ve (2.74) denklemlerine uyan çizgisel doğrular elde edilmiştir. Bu doğruların eğimlerinden seri direnç değerleri hesaplanmıştır. $dV/d(\ln I)$ -I ve $H(I)$ -I doğrularının y-eksenini kestiği noktalardan sırasıyla idealite faktörleri ve sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. $H(I)$ -I doğrusundan bulunan ϕ_{b0} değerinin (2.70) denkleminde kullanılmasıyla doyma akım değerleri belirlenmiştir. Bohlin (1986) tarafından belirlenen yöntemle göre seri direnç değerini belirlemek için öncelikle $\gamma_{1,2} > n$ olmak üzere keyfî iki sabit seçilir. (2.78) denkleminde söz konusu sıcaklık için $F(V, \gamma)$ değerleri bulunur ve $F(V, \gamma)$ -V grafiği şekil 4.65'te verildiği gibi çizilir. Grafiğin minimum noktasına karşılık gelen gerilim ve deneysel sonuçlardan da bu gerilimde ölçülen akım değerleri (I_0 doyma akımı) belirlenir. Belirlenen bu değerlerin (2.81), (2.82) ve (2.84) denklemlerinde kullanılmasıyla, sırasıyla ϕ_{b0} , R_s ve n elde edilir. Elde edilen bu sonuçlar n-Si ve p-Si üzerinde büyütülen yapılar için sırasıyla çizelge 4.36-37'de verilmiştir.



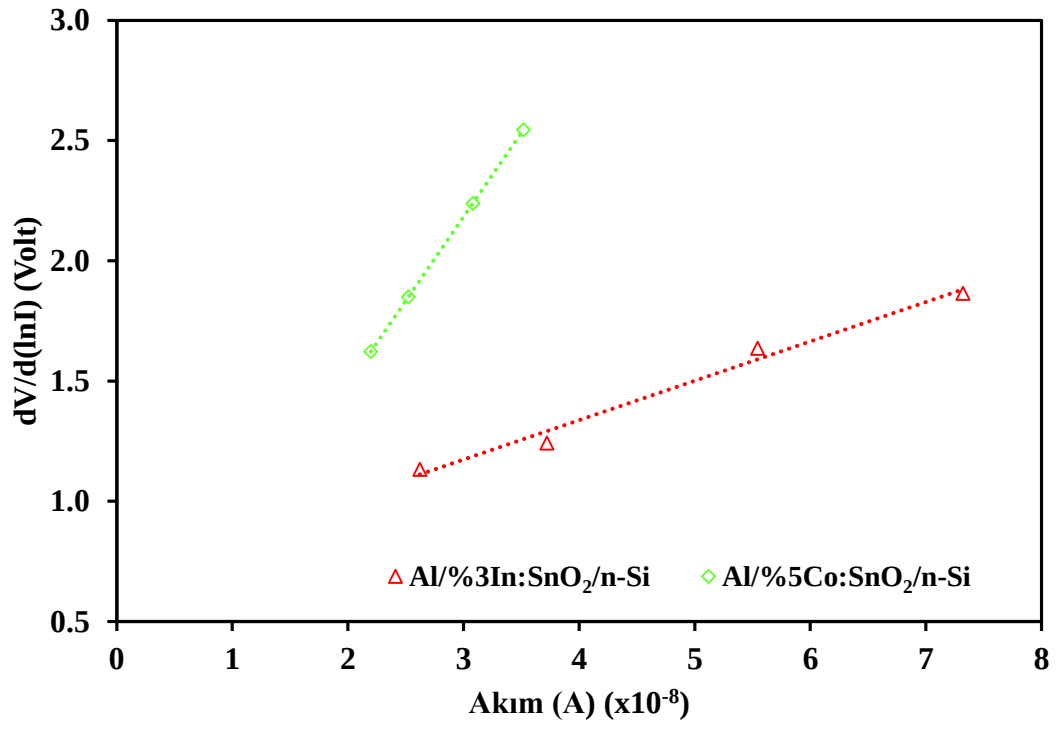
(a)



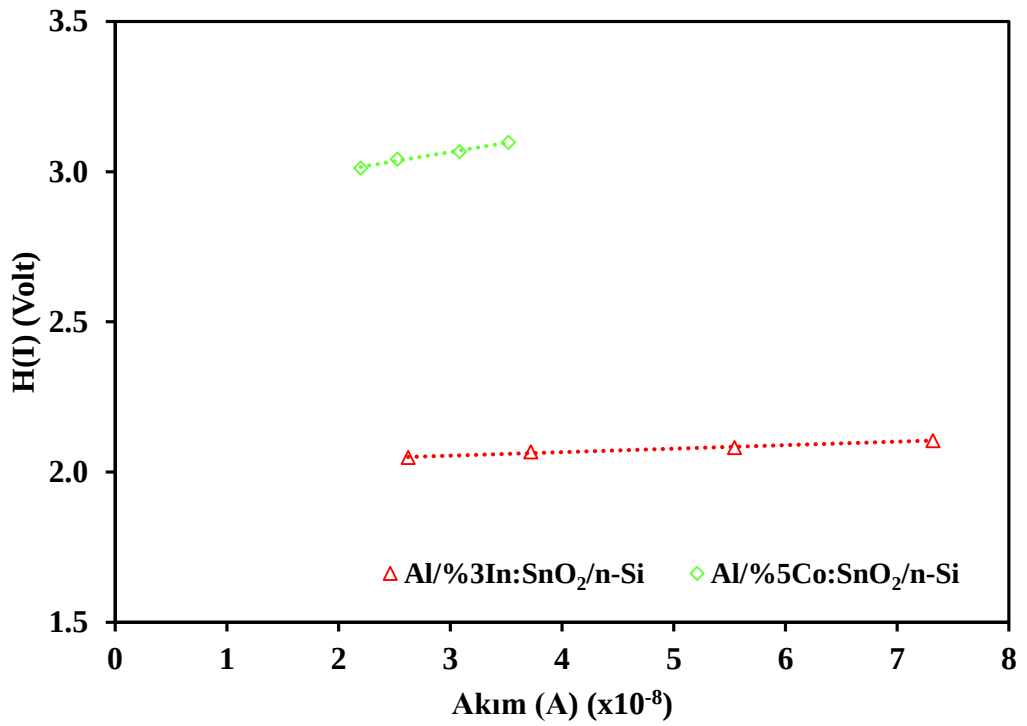
(b)

Şekil 4.61 Al/SnO₂, % 5 In ve % 3 Co:SnO₂/n-Si yapılarının grafikleri

a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I



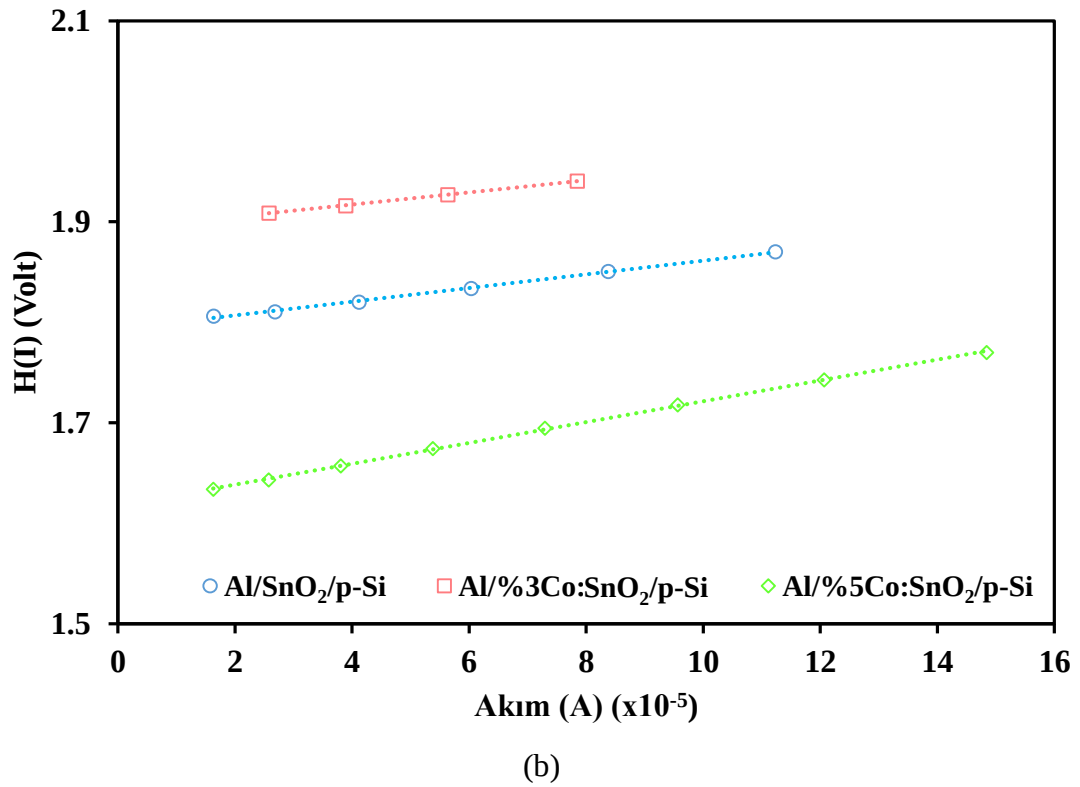
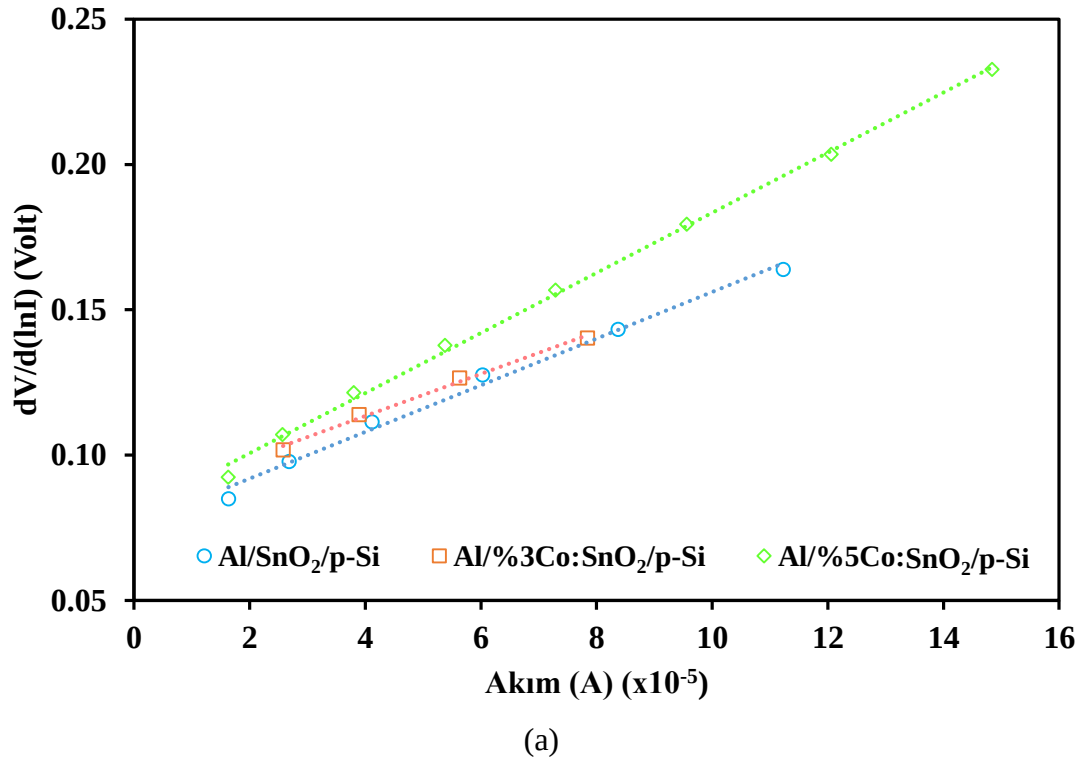
(a)



(b)

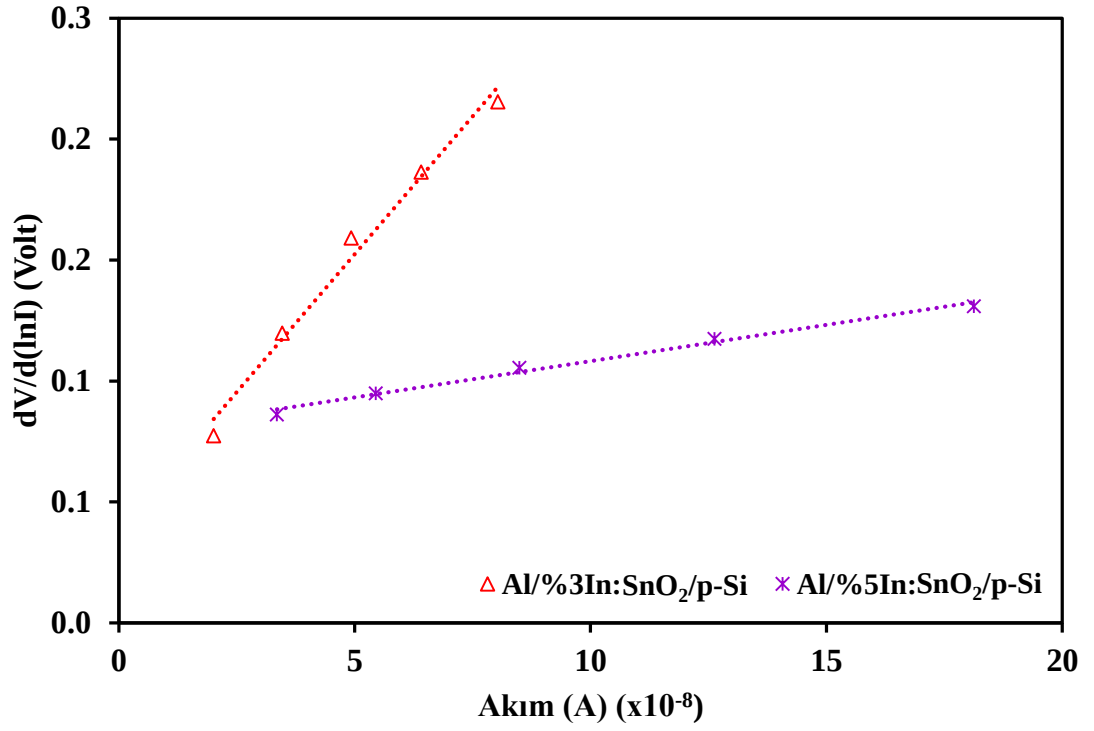
Şekil 4.62 Al/% 3 In ve % 5 Co:SnO₂/n-Si yapılarının grafikleri

a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I

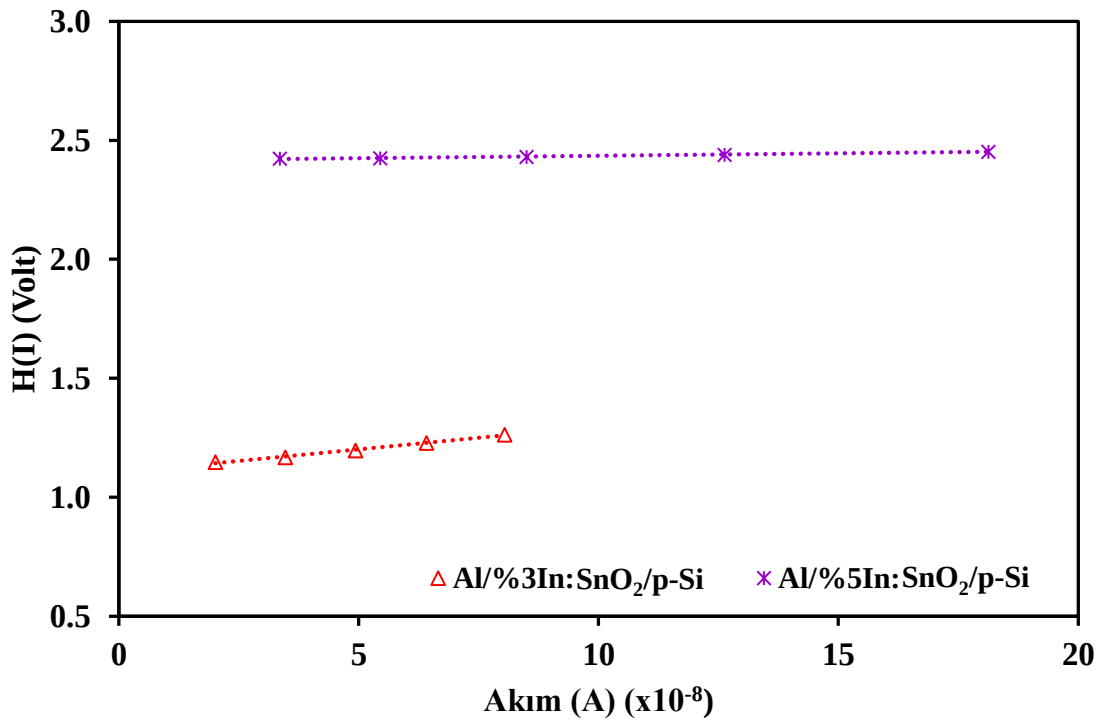


Şekil 4.63 Al/SnO₂, % 3 ve % 5 Co:SnO₂/p-Si yapılarının grafikleri

a. $dV/d(\ln I)$ -I, b. $H(I)$ -I



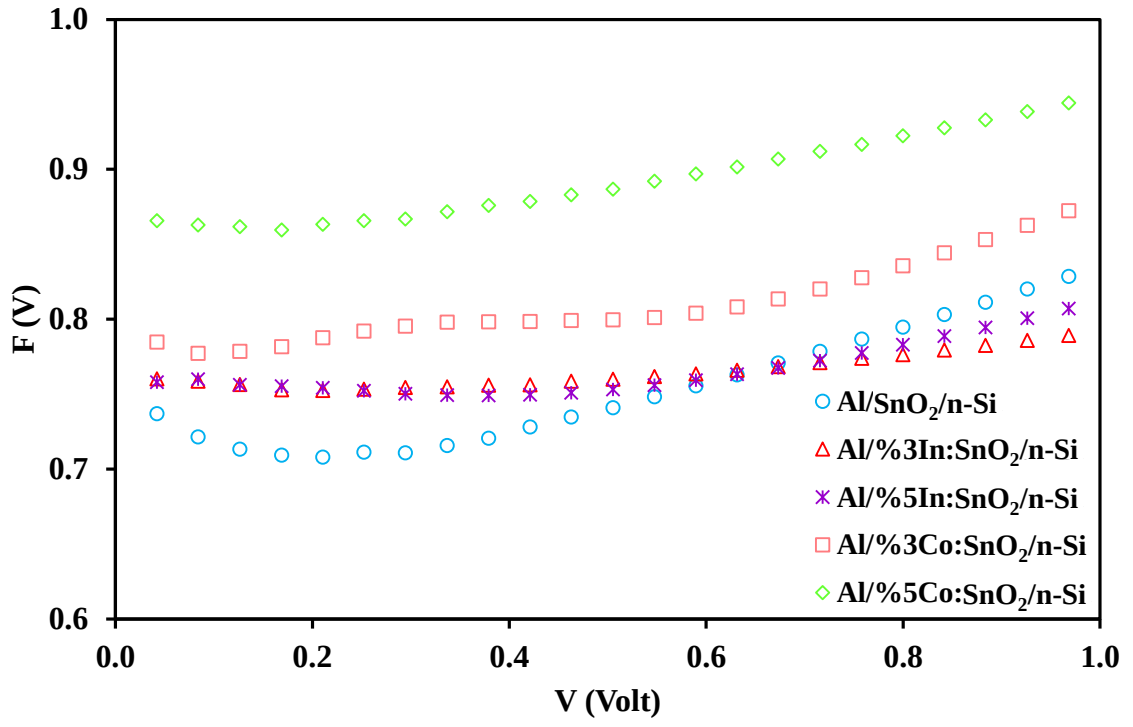
(a)



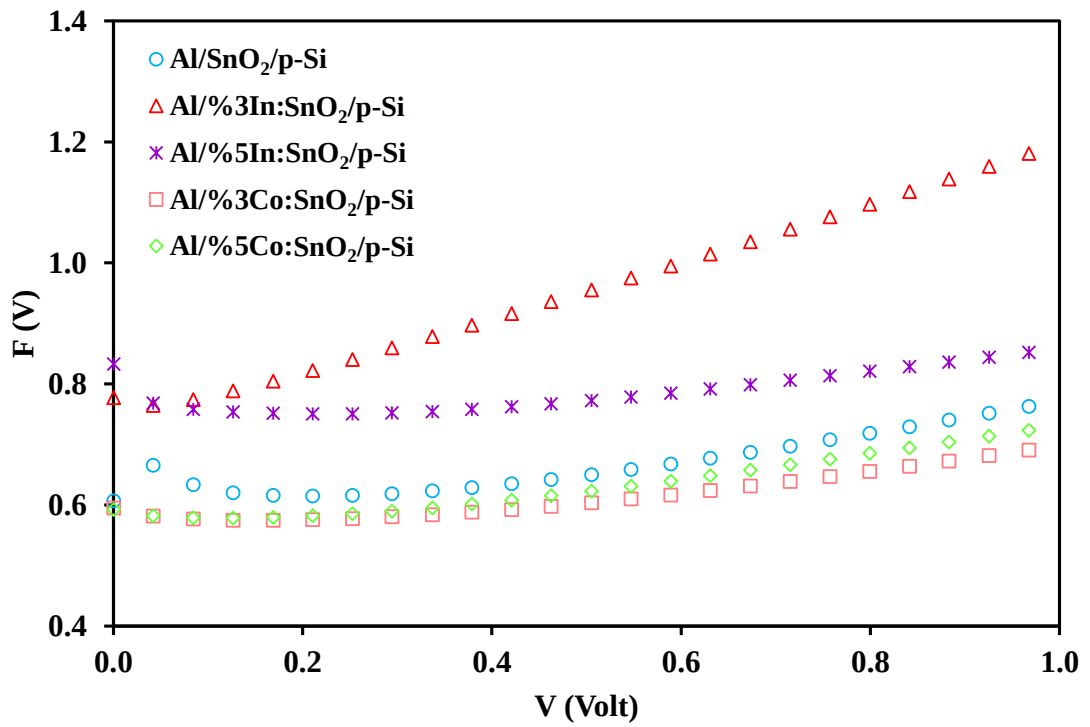
(b)

Şekil 4.64 Al/% 3 ve % 5 In:SnO₂/p-Si yapılarının grafikleri

a. dV/d(lnI)-I, b. H(I)-I



(a)



(b)

Şekil 4.65 a. $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ ve b. $\text{Al}/\text{SnO}_2/\text{p-Si}$ yapılarının F (V)- V grafikleri

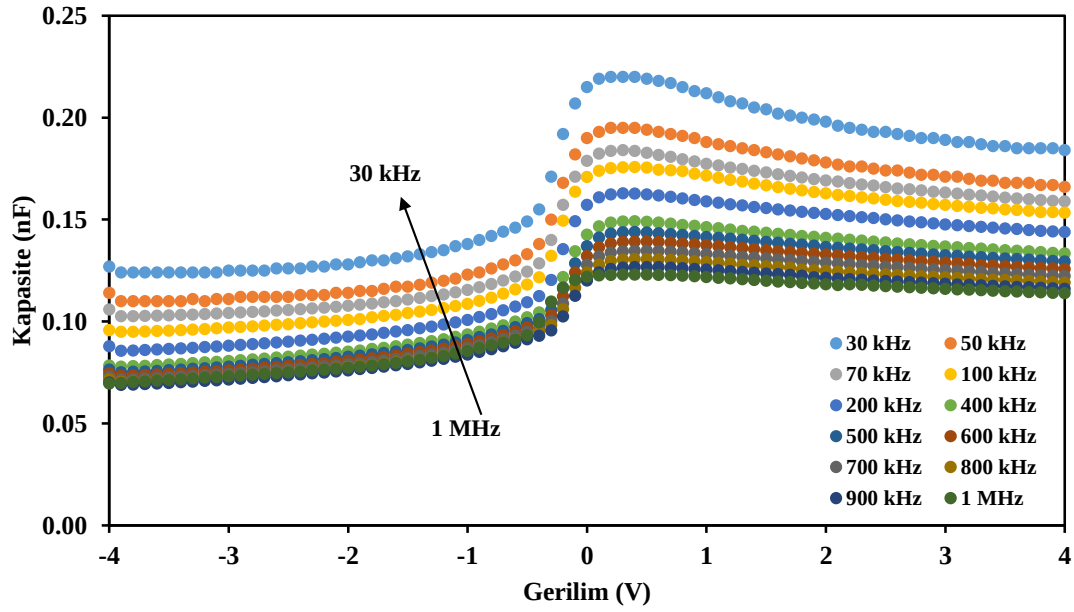
Çizelge 4.36 Al/SnO₂/n-Si yapılarının oda sıcaklığındaki I-V belirtkenleri

Numune	Katkısız	% 3 Co	% 5 Co	% 3 In	% 5 In
n (dV/dlnI)	3.53	2.78	3.30	5.64	3.55
n (F(V))	3.72	2.66	3.98	5.47	3.79
n (I-V)	3.73	2.59	3.95	5.47	3.79
R_s (dV/dlnI) (Ω)	9.14x10 ⁴	1.49x10 ⁴	6.97x10 ⁷	1.64x10 ⁶	2.72x10 ⁴
R_s (F(V)) (Ω)	2.49x10 ⁴	4.21x10 ⁵	2.99x10 ⁷	7.20x10 ⁵	4.01x10 ³
R_s (H(I)) (Ω)	8.04x10 ⁴	1.22x10 ⁴	6.16x10 ⁷	1.15x10 ⁶	2.43x10 ⁴
φ_{bo} (I-V) (eV)	0.715	0.787	0.869	0.759	0.759
φ_{bo} (F(V)) (eV)	0.715	0.781	0.863	0.759	0.764
φ_{bo} (H(I)) (eV)	0.692	0.817	0.872	0.766	0.761
I₀ (I-V) (A)	8.63x10 ⁻⁸	5.35x10 ⁻⁹	2.23x10 ⁻¹⁰	1.55x10 ⁻⁸	1.53x10 ⁻⁸
I₀ (F(V)) (A)	4.95x10 ⁻⁷	3.32x10 ⁻⁸	1.23x10 ⁻⁹	2.62x10 ⁻⁸	2.66x10 ⁻⁶
I₀ (H(I)) (A)	2.06x10 ⁻⁷	1.62x10 ⁻⁹	1.99x10 ⁻¹⁰	1.16x10 ⁻⁸	1.41x10 ⁻⁸
r (4 V)	5.756	6999.900	2.302	2659.190	14226.900

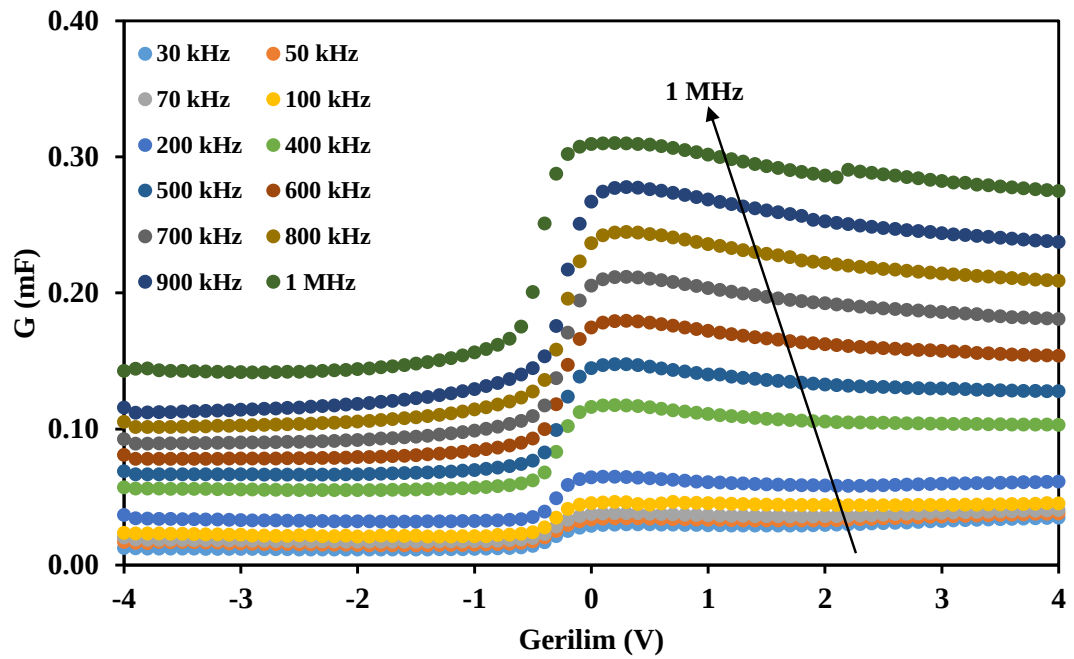
Çizelge 4.37 Al/SnO₂/p-Si yapılarının oda sıcaklığındaki I-V belirtkenleri

Numune	Katkısız	% 3 Co	% 5 Co	% 3 In	% 5 In
n (dV/dlnI)	2.93	3.27	2.77	1.48	3.20
n (F(V))	2.44	3.08	2.86	1.32	3.22
n (I-V)	2.09	3.28	2.94	2.19	3.11
R_s (dV/dlnI) (Ω)	803.33	723.32	1140.10	2.28x10 ⁶	2.47x10 ⁵
R_s (F(V)) (Ω)	720.84	702.26	1051.10	3.56x10 ⁵	1.70x10 ⁵
R_s (H(I)) (Ω)	683.20	608.80	1036.00	1.94x10 ⁶	2.13x10 ⁵
φ_{bo} (I-V) (eV)	0.643	0.589	0.591	0.766	0.760
φ_{bo} (F(V)) (eV)	0.623	0.592	0.589	0.765	0.756
φ_{bo} (H(I)) (eV)	0.612	0.580	0.584	0.746	0.754
I₀ (I-V) (A)	3.71x10 ⁻⁷	2.96x10 ⁻⁶	2.73x10 ⁻⁶	3.17x10 ⁻⁹	3.91x10 ⁻⁹
I₀ (F(V)) (A)	1.31x10 ⁻⁵	1.20x10 ⁻⁵	8.49x10 ⁻⁶	3.47x10 ⁻⁸	2.73x10 ⁻⁸
I₀ (H(I)) (A)	1.20x10 ⁻⁶	4.23x10 ⁻⁶	3.51x10 ⁻⁶	6.82x10 ⁻⁹	4.92x10 ⁻⁹
r (4 V)	388.791	83.341	229.878	23.730	1564.380

Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) ölçümleri oda sıcaklığında, ± 4 V gerilim aralığında ve 30 kHz ile 1 MHz arasında farklı frekanslarda alınmıştır. Ölçümler için şekil 3.3-3.4'te verilen düzenekler kullanılmıştır. Bu numuneye ait C-V ve G-V belirtkenleri sırasıyla şekil 4.66-4.67'de verilmiştir.

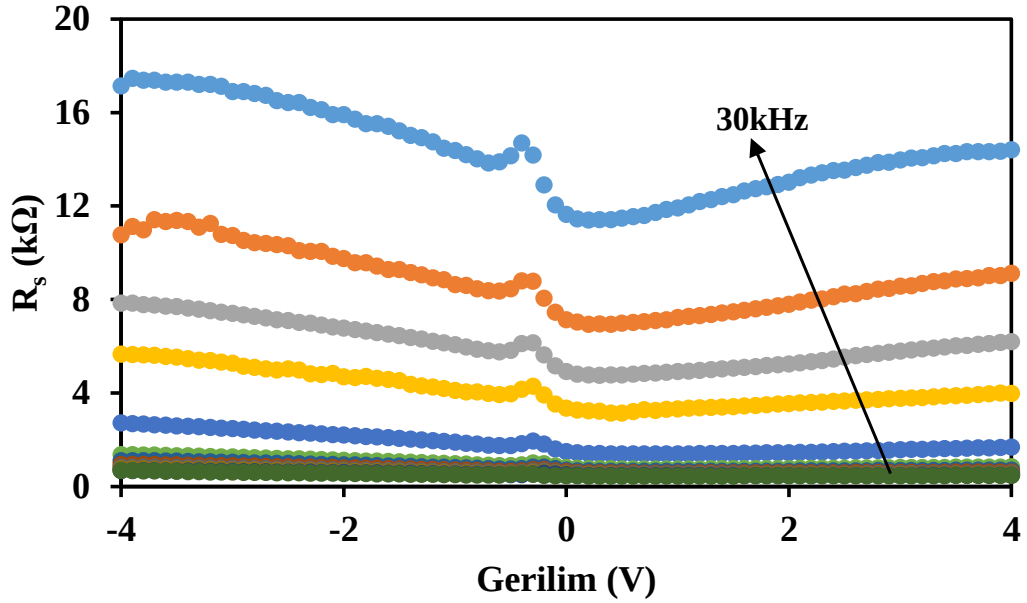


Şekil 4.66 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki C-V grafikleri

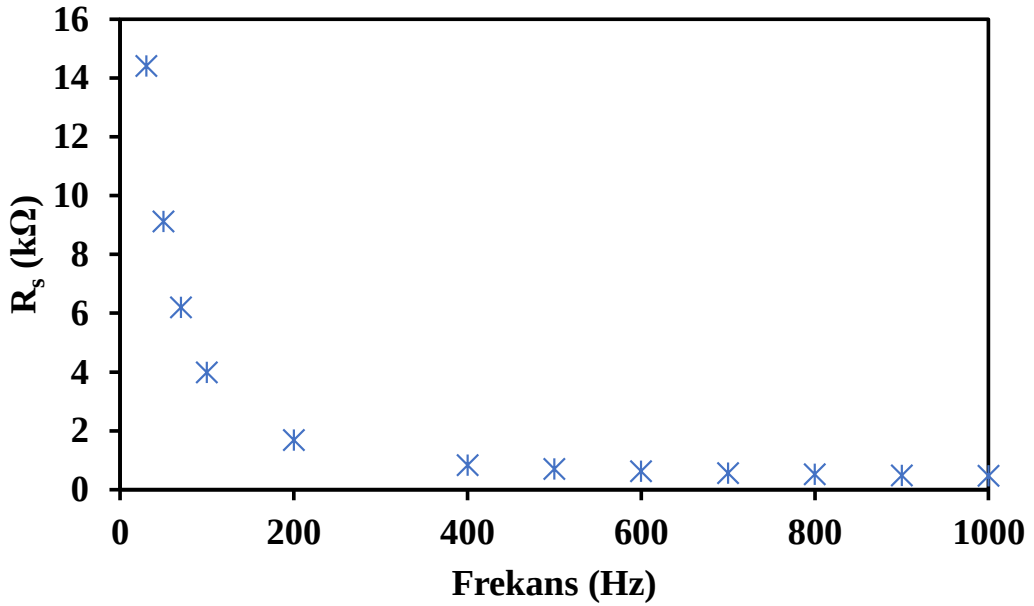


Şekil 4.67 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki G-V grafikleri

C-V ve G-V eğrilerinden faydalanarak yapının frekansa bağlı seri direnç değerleri, (2.86) denklemi (Nicollian ve Brews 1982) yardımıyla elde edilmiştir. Seri direnç-gerilim eğrileri şekil 4.68’de verilmiştir. Ayrıca tüm frekanslarda kuvvetli yığılma bölgesinde hesaplanan seri direnç değerlerinin frekansa bağlı değişimi şekil 4.69’da gösterilmektedir.



Şekil 4.68 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki R_s -V grafikleri



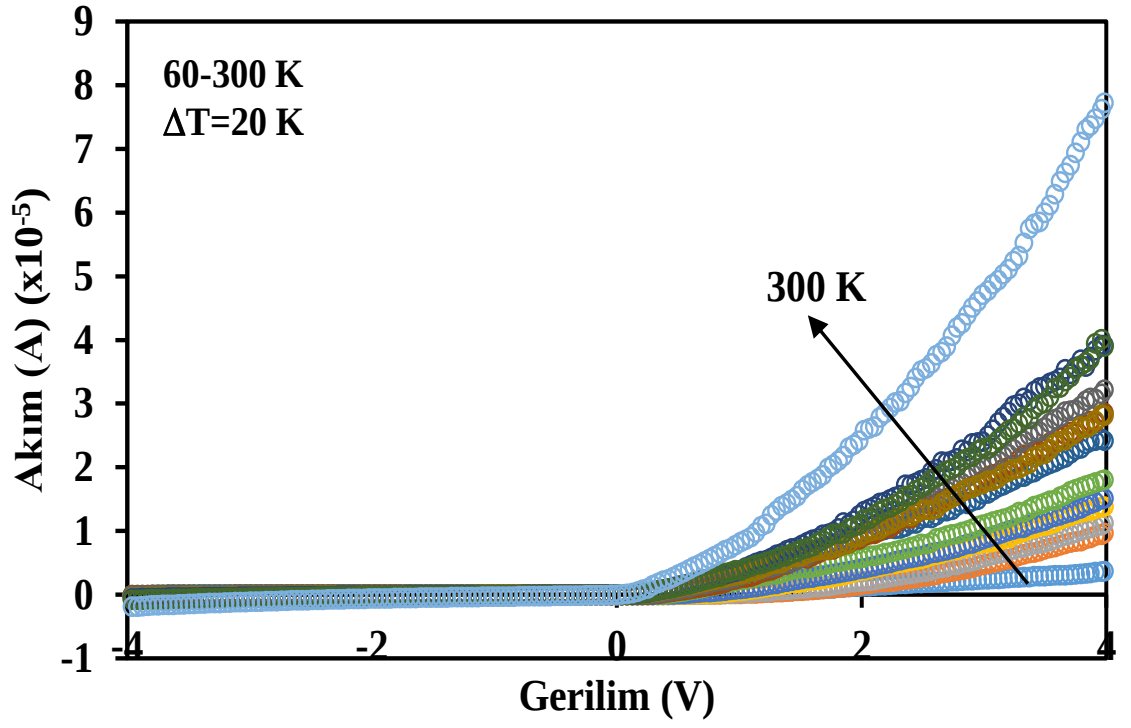
Şekil 4.69 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının oda sıcaklığındaki R_s -f grafikleri

4.6 Düşük Sıcaklıklarda SnO₂/Si Yapısının Elektriksel Belirtkenlerinin Belirlenmesi

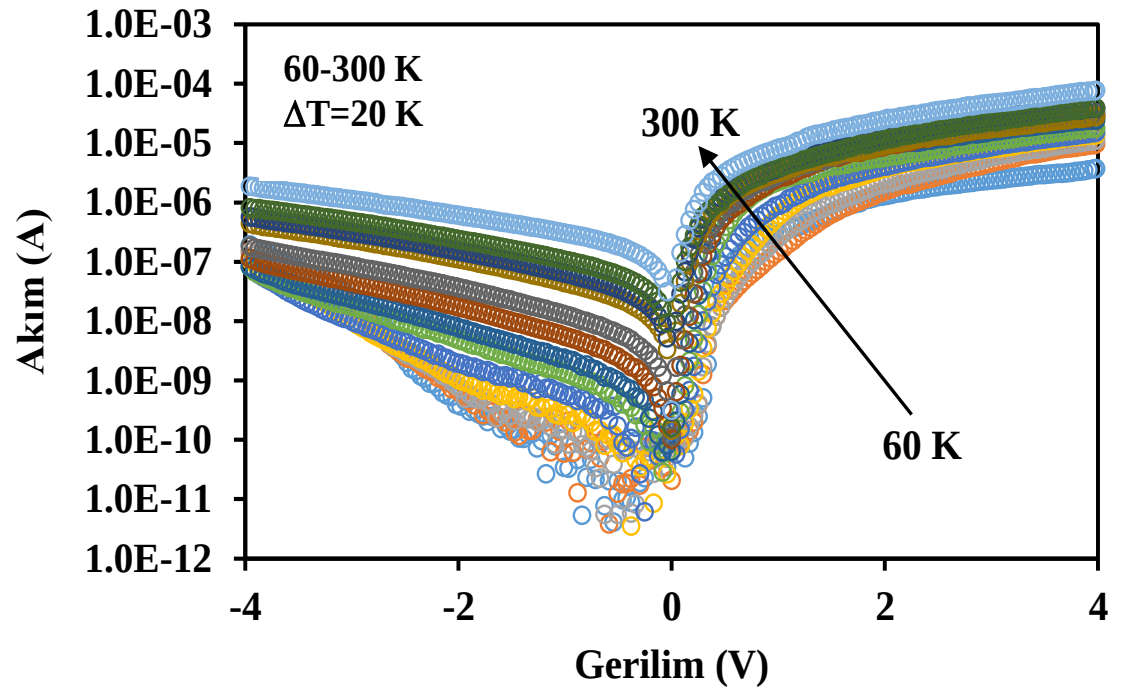
n-tipi Si üzerinde katkısız, % 3 ve 5 oranında In ve Co katkılı SnO₂ ince filmler büyütüldükten sonra ön ve arka kontaklar Al buharlaştırılarak yapılar elde edilmiştir. Bu yapıların karanlıkta ve 60-300 K düşük sıcaklık aralığında I-V ölçümleri şekil 3.3'te verilen düzenek kullanılarak alınmıştır. Al/SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.70'te verilmiştir.

Şekil 4.70'te verilen lnI-V belirtkenlerinin çizgisel bölgesinin eğiminden B değerleri belirlenmiştir. Belirlenen bu eğimlerden denklem (2.69) yardımıyla idealite faktörleri, grafiklerin lnI eksenini kestiği noktalardan doyma akım değerleri ve (2.70) denkleminde sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu hesaplar 60-300 K aralığında alınan tüm ölçümler için yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.38'de verilmiştir.

Bohlin (1986) yönteminden (2.82), (2.81) ve (2.84) denklemlerinden sırasıyla R_s , ϕ_{b0} , n ve minimum gerilimde geçen akımdan, I_0 değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.39'da $F(V)$ yönteminden bulunduğu belirtilerek verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.70 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri

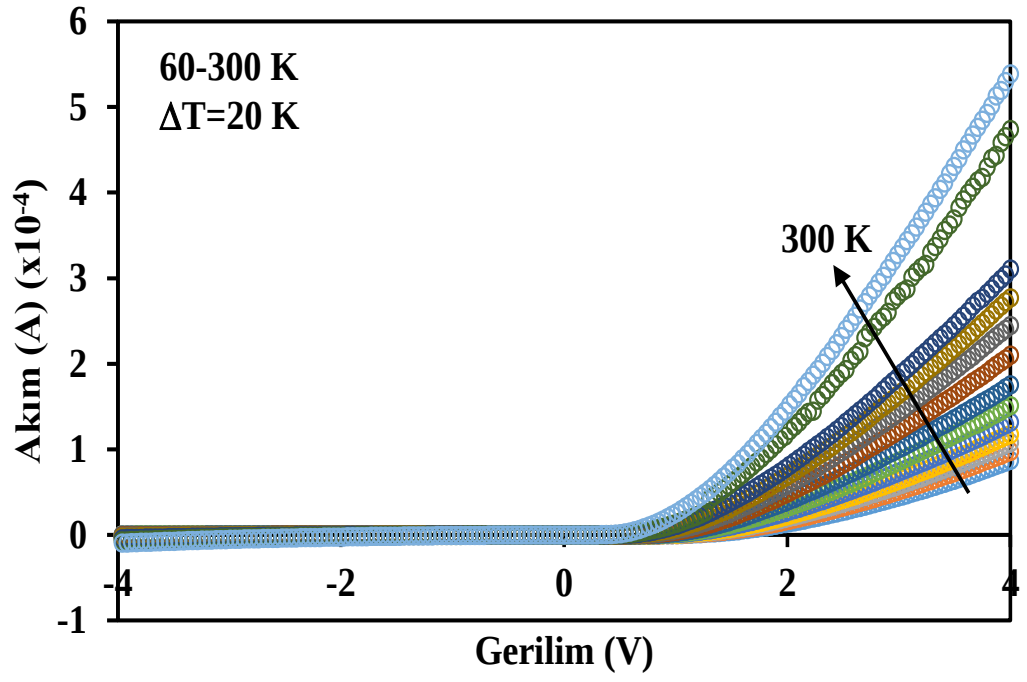
Çizelge 4.38 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	B (V ⁻¹)	n	I ₀ (A)	Φ _{b0} (I-V) (eV)
300	10.367	3.73	8.63x10 ⁻⁸	0.715
280	11.070	3.74	2.54x10 ⁻⁸	0.693
260	11.726	3.80	1.29x10 ⁻⁸	0.655
240	11.745	4.11	1.12x10 ⁻⁸	0.605
220	12.416	4.25	4.03x10 ⁻⁹	0.570
200	13.403	4.33	2.02x10 ⁻⁹	0.527
180	14.157	4.55	8.38x10 ⁻¹⁰	0.485
160	14.318	5.06	5.20x10 ⁻¹⁰	0.434
140	16.256	5.09	5.81x10 ⁻¹¹	0.403
120	14.489	6.67	3.58x10 ⁻¹¹	0.347
100	15.215	7.62	1.33x10 ⁻¹¹	0.295
80	15.775	9.19	1.29x10 ⁻¹¹	0.233
60	16.371	11.80	5.14x10 ⁻¹²	0.177

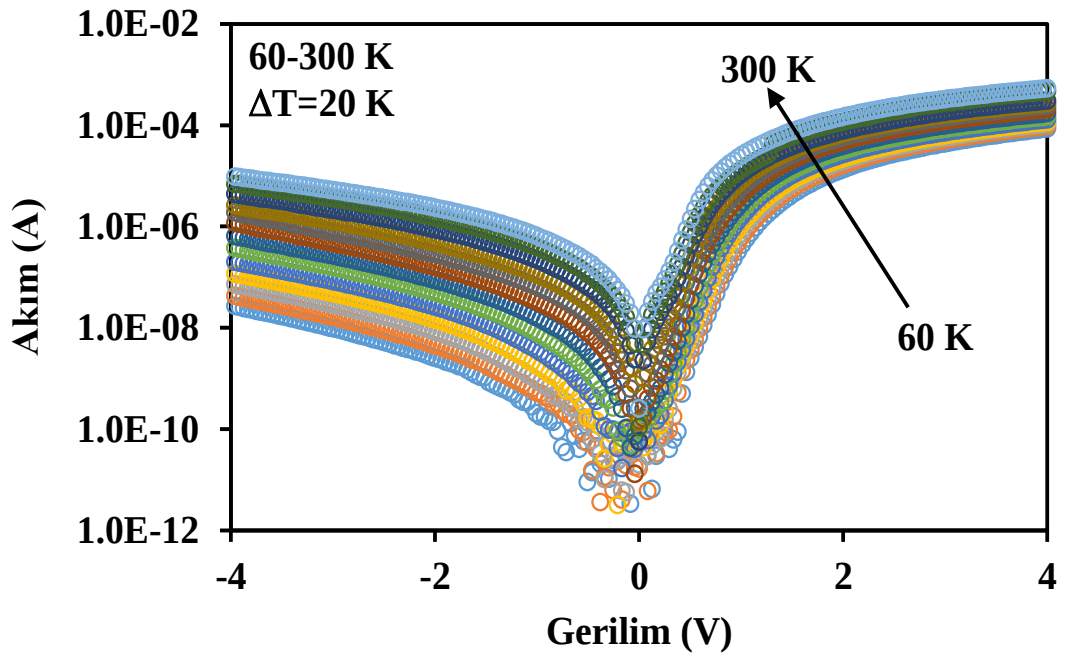
Çizelge 4.39 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	n	R _s (Ω)	I ₀ (A)	Φ _{b0} (F(V)) (eV)
300	3.72	2.49x10 ⁴	8.34x10 ⁻⁸	0.715
260	3.84	3.32x10 ⁴	2.31x10 ⁻⁸	0.642
220	4.15	5.07x10 ⁴	5.76x10 ⁻⁹	0.564
180	4.57	1.47x10 ⁴	1.24x10 ⁻⁹	0.479
140	5.09	2.25x10 ⁵	9.84x10 ⁻¹¹	0.397
100	7.57	4.66x10 ⁵	2.49x10 ⁻¹¹	0.289
60	11.79	2.84x10 ⁵	2.45x10 ⁻¹¹	0.168

Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.71’de verilmiştir. Aynı numunelerin söz konusu I-V grafiklerinden eğim değerleri, idealite faktörleri, doyma akım değerleri ve sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu hesaplar 60-300 K aralığında alınan tüm ölçümler için yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.40’da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.71 Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı: a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri

Çizelge 4.40 Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	B (V ⁻¹)	n	I ₀ (A)	φ _{b0} (I-V) (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)
300	14.905	2.59	5.35x10 ⁻⁹	0.787	4.20x10 ¹¹
280	13.377	3.09	3.08x10 ⁻⁹	0.744	5.50x10 ¹¹
260	14.360	3.11	1.48x10 ⁻⁹	0.704	5.45x10 ¹¹
240	15.476	3.12	5.44x10 ⁻¹⁰	0.667	5.41x10 ¹¹
220	15.446	3.41	2.92x10 ⁻¹⁰	0.620	6.10x10 ¹¹
200	16.557	3.50	8.74x10 ⁻¹¹	0.581	6.28x10 ¹¹
180	15.308	4.21	1.57x10 ⁻¹¹	0.547	8.02x10 ¹¹
160	16.681	4.34	8.50x10 ⁻¹²	0.491	8.32x10 ¹¹
140	15.830	5.23	6.86x10 ⁻¹²	0.429	1.05x10 ¹²
120	15.880	6.08	4.39x10 ⁻¹²	0.369	1.25x10 ¹²
100	16.279	7.12	2.24x10 ⁻¹²	0.310	1.49x10 ¹²
80	14.877	9.74	1.99x10 ⁻¹²	0.246	2.08x10 ¹²
60	15.852	12.19	5.52x10 ⁻¹³	0.188	2.63x10 ¹²

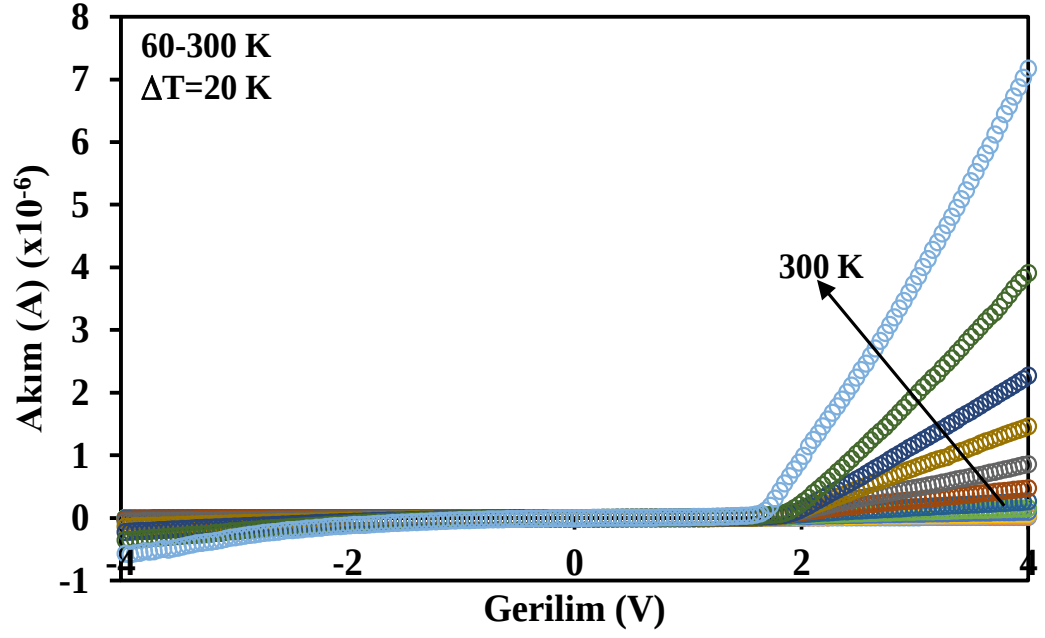
Bohlin (1986) yönteminden (2.82), (2.81) ve (2.84) denklemlerinden sırasıyla R_s, φ_{b0}, n ve minimum gerilimde geçen akımdan, I₀ değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.41’de F(V) yönteminden bulunduğu belirtilerek verilmiştir.

Çizelge 4.41 Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

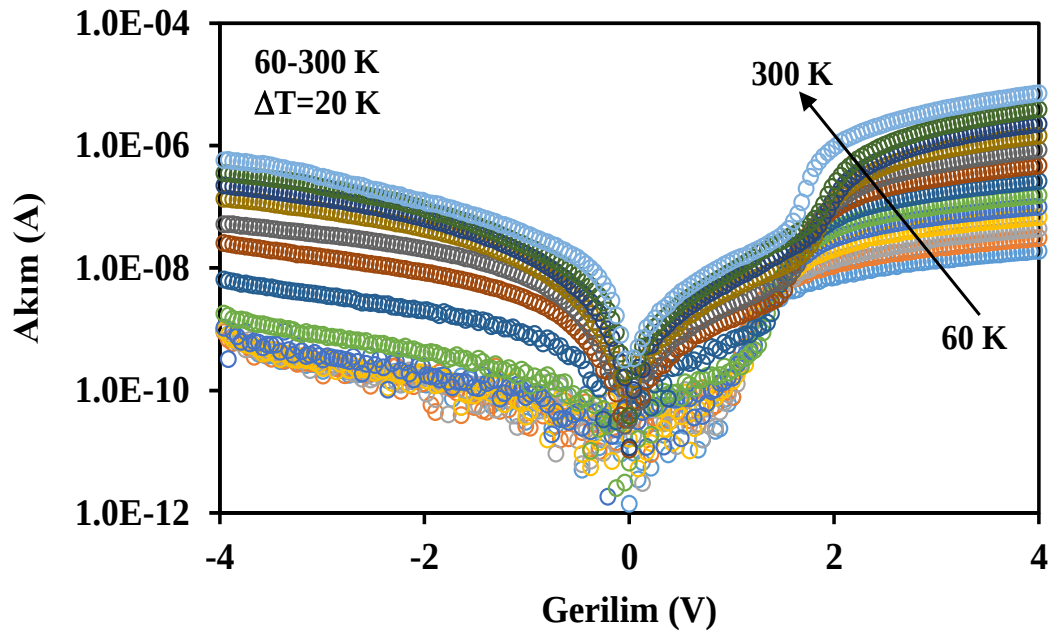
T (K)	n	R _s (Ω)	I ₀ (A)	φ _{b0} (F(V)) (eV)
300	2.66	4.21x10 ⁵	7.03x10 ⁻⁹	0.782
260	3.02	8.98x10 ⁵	1.66x10 ⁻⁹	0.704
220	3.20	6.03x10 ⁶	3.59x10 ⁻¹⁰	0.621
180	3.71	1.35x10 ⁶	1.03x10 ⁻¹¹	0.553
140	5.08	4.04x10 ⁶	5.66x10 ⁻¹²	0.431
100	7.02	2.49x10 ⁶	2.49x10 ⁻¹²	0.309
60	12.38	1.22x10 ⁶	7.07x10 ⁻¹³	0.187

Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.72’de verilmiştir. Aynı numunelerin söz konusu I-V grafiklerinden eğim değerleri, idealite faktörleri, doyma akım değerleri ve sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu

hesaplar 60-300 K aralığında alınan tüm ölçümler için yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.42’de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.72 Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı: a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri

Çizelge 4.42 Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	B (V ⁻¹)	n	I ₀ (A)	φ _{b0} (I-V) (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)
300	9.774	3.95	2.23x10 ⁻¹⁰	0.869	4.18x10 ¹¹
280	8.462	4.89	1.62x10 ⁻¹⁰	0.815	5.47x10 ¹¹
260	9.023	4.94	8.53x10 ⁻¹¹	0.768	5.51x10 ¹¹
240	9.314	5.19	4.37x10 ⁻¹¹	0.719	5.82x10 ¹¹
220	10.008	5.27	3.53x10 ⁻¹¹	0.660	5.86x10 ¹¹
200	9.324	6.22	2.76x10 ⁻¹¹	0.601	7.11x10 ¹¹
180	9.991	6.45	1.05x10 ⁻¹²	0.589	7.47x10 ¹¹
160	8.809	8.23	9.48x10 ⁻¹³	0.521	9.87x10 ¹¹
140	8.918	9.29	3.99x10 ⁻¹³	0.463	1.12x10 ¹²
120	9.985	9.68	2.36x10 ⁻¹³	0.399	1.17x10 ¹²
100	11.796	9.83	2.05x10 ⁻¹³	0.331	1.18x10 ¹²
80	12.572	11.53	2.99x10 ⁻¹⁴	0.275	1.39x10 ¹²
60	15.885	12.16	4.27x10 ⁻¹⁵	0.213	1.48x10 ¹²

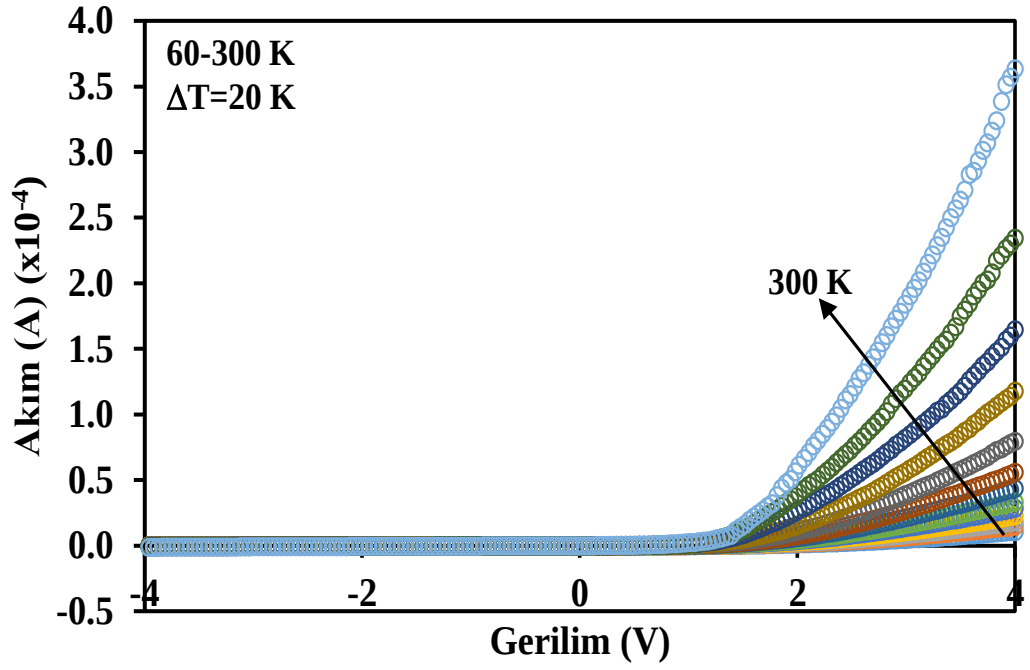
Bohlin (1986) yönteminden (2.82), (2.81) ve (2.84) denklemlerinden sırasıyla R_s, φ_{b0}, n ve minimum gerilimde geçen akımdan, I₀ değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.43'te F(V) yönteminden bulunduğu belirtilerek verilmiştir.

Çizelge 4.43 Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

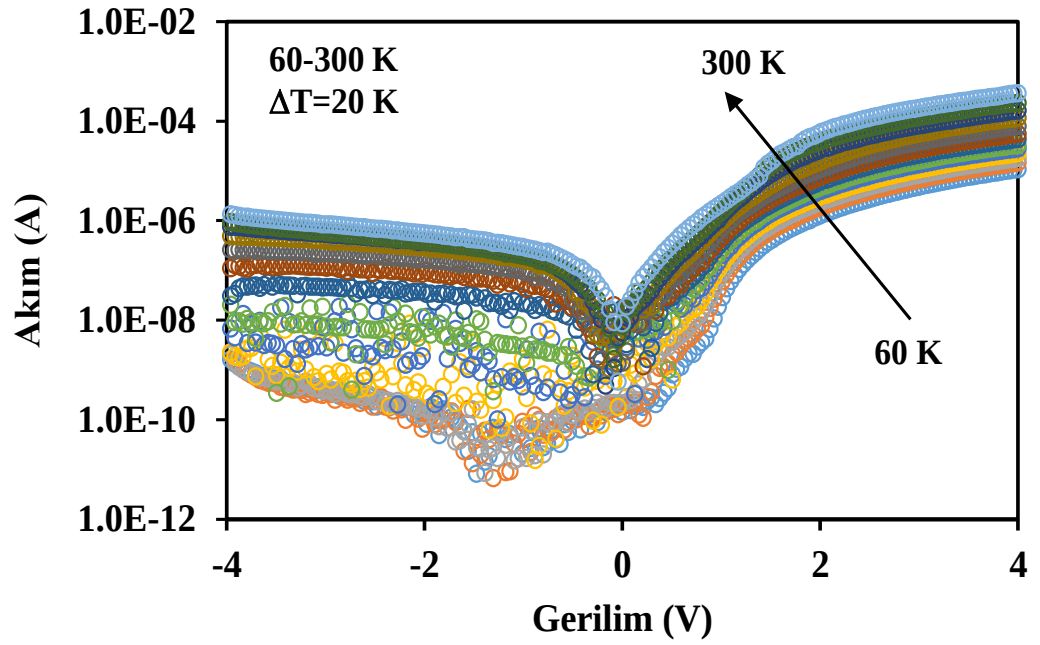
T (K)	n	R _s (Ω)	I ₀ (A)	φ _{b0} (F(V)) (eV)
300	3.98	2.99x10 ⁷	2.80x10 ⁻¹⁰	0.868
260	4.82	2.38x10 ⁷	8.81x10 ⁻¹¹	0.768
220	5.24	4.21x10 ⁷	3.41x10 ⁻¹¹	0.661
180	6.51	2.40x10 ⁷	1.06x10 ⁻¹¹	0.553
140	9.37	3.33x10 ⁷	6.22x10 ⁻¹³	0.458
100	9.83	1.09x10 ⁸	5.66x10 ⁻¹³	0.323
60	11.84	3.00x10 ⁷	1.43x10 ⁻¹⁴	0.207

Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.73'te verilmiştir. Aynı numunelerin söz konusu I-V grafiklerinden eğim değerleri, idealite faktörleri, doyma akım değerleri ve sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu

hesaplar 60-300 K aralığında alınan tüm ölçümler için yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.44’te verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.73 Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri

Çizelge 4.44 Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	B (V ⁻¹)	n	I ₀ (A)	φ _{bo} (I-V) (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)
300	7.061	5.47	1.55x10 ⁻⁸	0.759	1.93x10 ¹²
280	7.465	5.55	6.55x10 ⁻⁹	0.726	1.92x10 ¹²
260	7.710	5.78	4.09x10 ⁻⁹	0.681	1.96x10 ¹²
240	7.956	6.07	2.14x10 ⁻⁹	0.639	2.70x10 ¹²
220	8.156	6.46	1.76x10 ⁻⁹	0.586	2.83x10 ¹²
200	8.591	6.75	1.07x10 ⁻⁹	0.538	2.88x10 ¹²
180	9.428	6.83	2.61x10 ⁻¹⁰	0.503	2.81x10 ¹²
160	9.553	7.59	2.32x10 ⁻¹⁰	0.445	3.04x10 ¹²
140	10.210	8.11	2.22x10 ⁻¹⁰	0.387	3.02x10 ¹²
120	11.609	8.32	1.57x10 ⁻¹⁰	0.332	2.86x10 ¹²
100	13.478	8.60	9.87x10 ⁻¹¹	0.278	2.81x10 ¹²
80	10.604	13.67	1.51x10 ⁻¹²	0.248	4.44x10 ¹²
60	11.811	16.36	1.95x10 ⁻¹³	0.193	5.10x10 ¹²

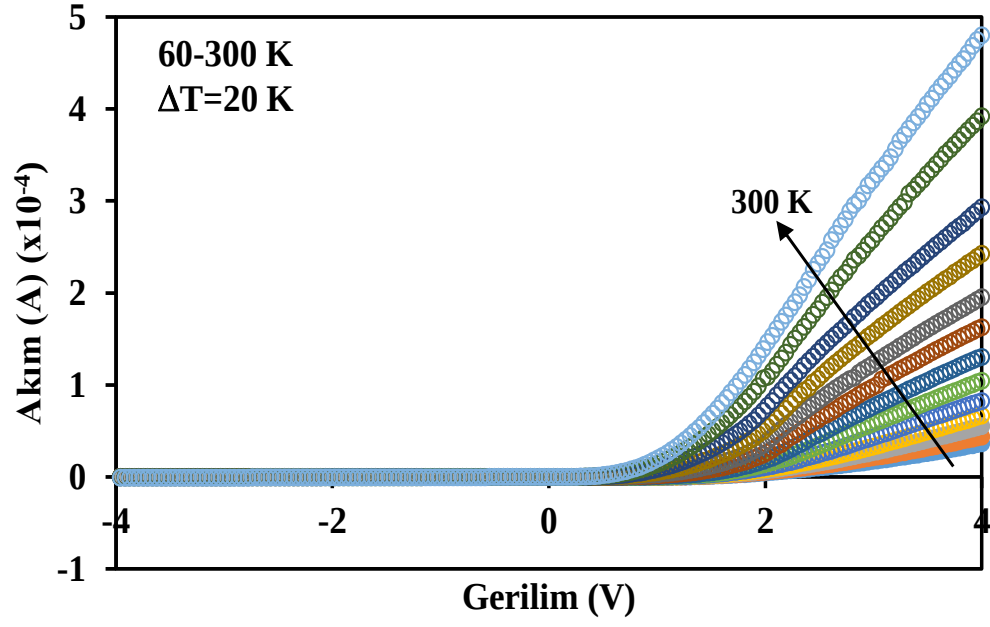
Bohlin (1986) yönteminden (2.82), (2.81) ve (2.84) denklemlerinden sırasıyla R_s, φ_{bo}, n ve minimum gerilimde geçen akımdan, I₀ değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.45'te F(V) yönteminden bulunduğu belirtilerek verilmiştir.

Çizelge 4.45 Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

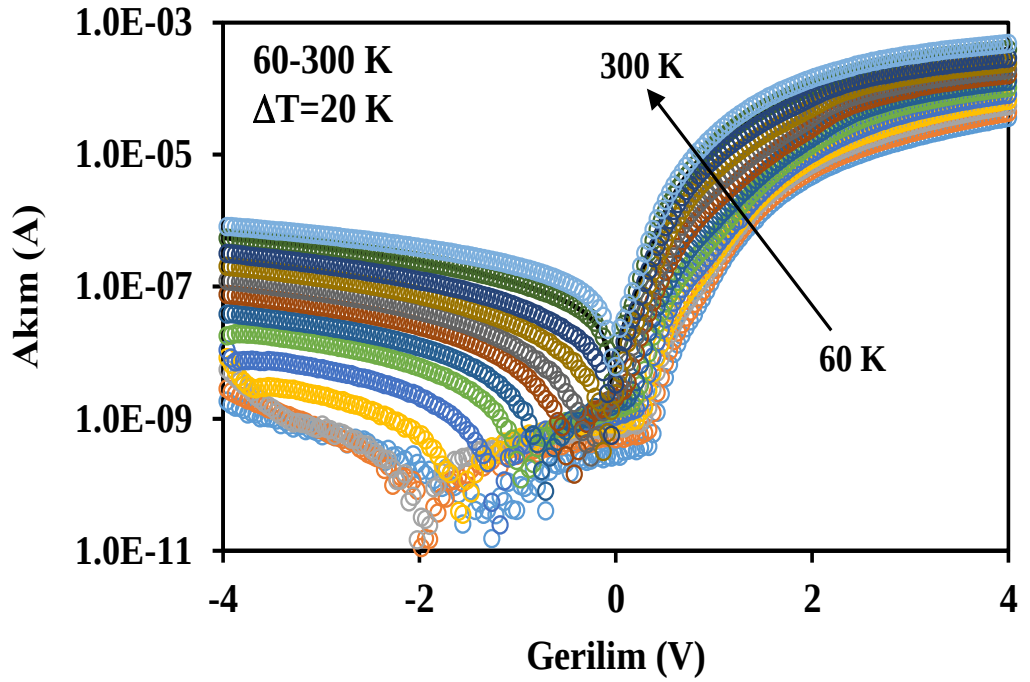
T (K)	n	R _s (Ω)	I ₀ (A)	φ _{bo} (F(V)) (eV)
300	5.47	7.20x10 ⁵	1.56x10 ⁻⁸	0.759
260	5.83	6.93x10 ⁵	6.65x10 ⁻⁹	0.670
220	6.37	5.18x10 ⁵	3.08x10 ⁻⁹	0.575
180	6.58	9.78x10 ⁵	5.57x10 ⁻¹⁰	0.495
140	7.93	9.42x10 ⁵	1.88x10 ⁻¹⁰	0.389
100	8.73	3.94x10 ⁶	4.66x10 ⁻¹¹	0.284
60	16.29	4.45x10 ⁶	2.13x10 ⁻¹²	0.182

Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.74'te verilmiştir. Aynı numunelerin söz konusu I-V grafiklerinden eğim değerleri, idealite faktörleri, doyma akım değerleri ve sıfır beslemdeki engel yükseklikleri bulunmuştur. Bu

hesaplar 60-300 K aralığında alınan tüm ölçümler için yapılmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.46'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.74 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı a. I-V, b. lnI-V belirtkenleri

Çizelge 4.46 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

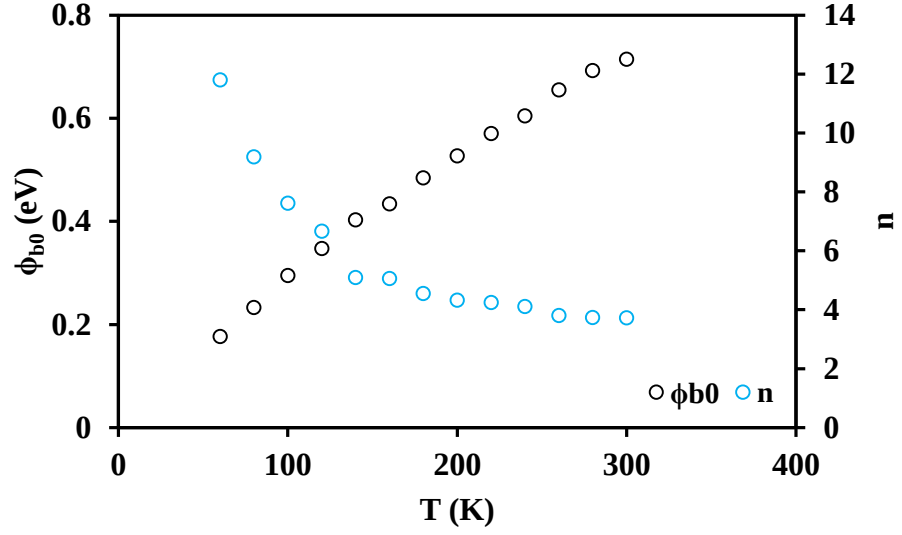
T (K)	B (V ⁻¹)	n	I ₀ (A)	φ _{b0} (I-V) (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)
300	10.203	3.79	1.53x10 ⁻⁸	0.759	1.21x10 ¹²
280	10.736	3.86	8.78x10 ⁻⁹	0.719	1.11x10 ¹²
260	11.457	3.89	3.97x10 ⁻⁹	0.682	1.01x10 ¹²
240	9.811	4.92	3.92x10 ⁻⁹	0.626	1.33x10 ¹²
220	9.504	5.54	2.31x10 ⁻⁹	0.581	1.48x10 ¹²
200	10.238	5.66	1.15x10 ⁻⁹	0.537	1.47x10 ¹²
180	11.058	5.82	4.29x10 ⁻¹⁰	0.495	1.45x10 ¹²
160	12.305	5.89	1.50x10 ⁻¹⁰	0.451	1.41x10 ¹²
140	12.457	6.65	8.74x10 ⁻¹¹	0.398	1.54x10 ¹²
120	11.997	8.05	5.05x10 ⁻¹¹	0.344	1.83x10 ¹²
100	12.975	8.94	4.30x10 ⁻¹¹	0.285	2.00x10 ¹²
80	13.288	10.91	8.31x10 ⁻¹²	0.236	2.44x10 ¹²
60	13.233	14.60	4.97x10 ⁻¹²	0.177	3.34x10 ¹²

Bohlin (1986) yönteminden (2.82), (2.81) ve (2.84) denklemlerinden sırasıyla R_s, φ_{b0}, n ve minimum gerilimde geçen akımdan, I₀ değerleri belirlenmiş ve çizelge 4.47’de F(V) yönteminden bulunduğu belirtilerek verilmiştir.

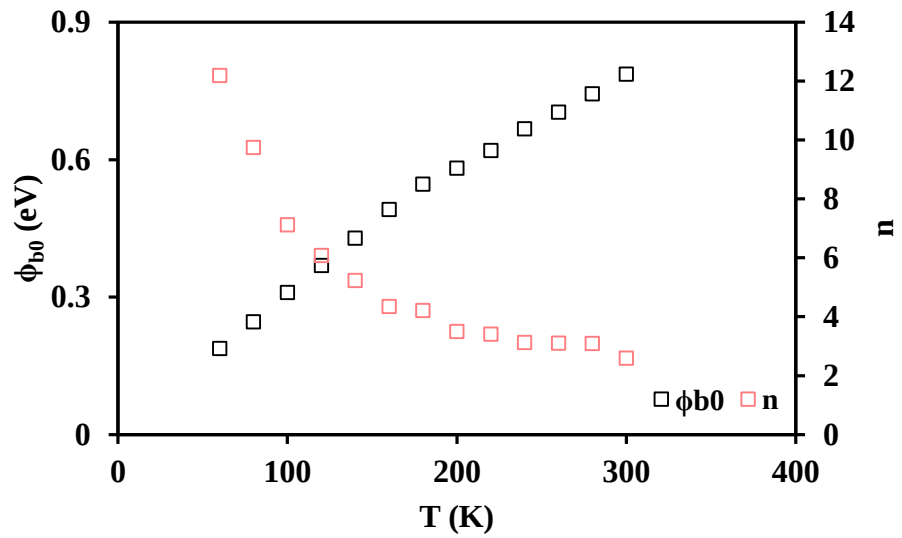
Çizelge 4.47 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının F(V) yönteminden belirlenen sıcaklığa bağlı I-V belirtkenleri

T (K)	n	R _s (Ω)	I ₀ (A)	φ _{b0} (F(V)) (eV)
300	3.79	4.01x10 ³	1.26x10 ⁻⁸	0.764
260	3.89	1.57x10 ⁵	4.26x10 ⁻⁹	0.680
220	5.52	6.48x10 ⁴	2.76x10 ⁻⁹	0.578
180	5.79	1.92x10 ⁵	5.28x10 ⁻¹⁰	0.493
140	6.63	3.13x10 ⁵	7.93x10 ⁻¹¹	0.399
100	8.95	5.76x10 ⁵	2.19x10 ⁻¹¹	0.291
60	14.93	2.15x10 ⁵	6.12x10 ⁻¹²	0.176

Şekil 4.75-4.77’de Al/SnO₂/n-Si/Al yapıları için n ve ϕ_{b0} ’ın sıcaklığa bağlı değişimleri verilmiştir.

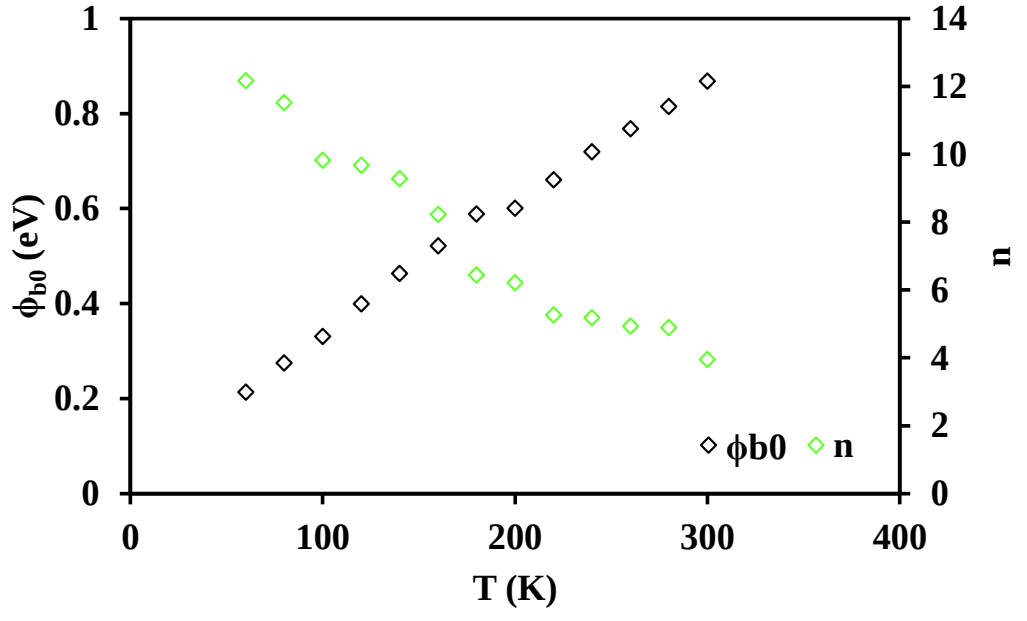


(a)

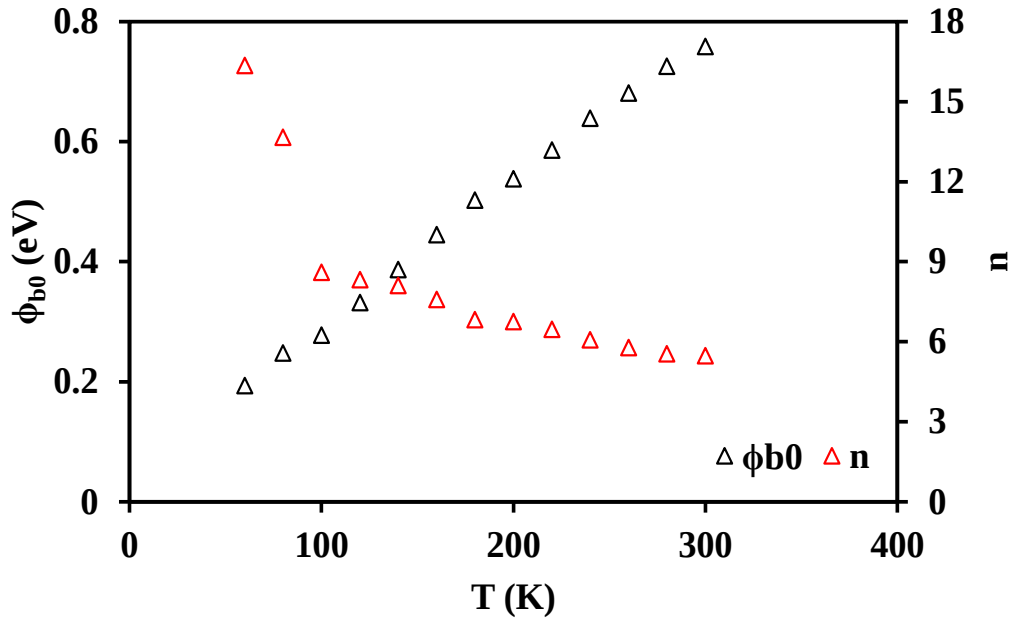


(b)

Şekil 4.75 a. Al/SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapıları için ϕ_{b0} ve n ’nin sıcaklıkla değişimleri

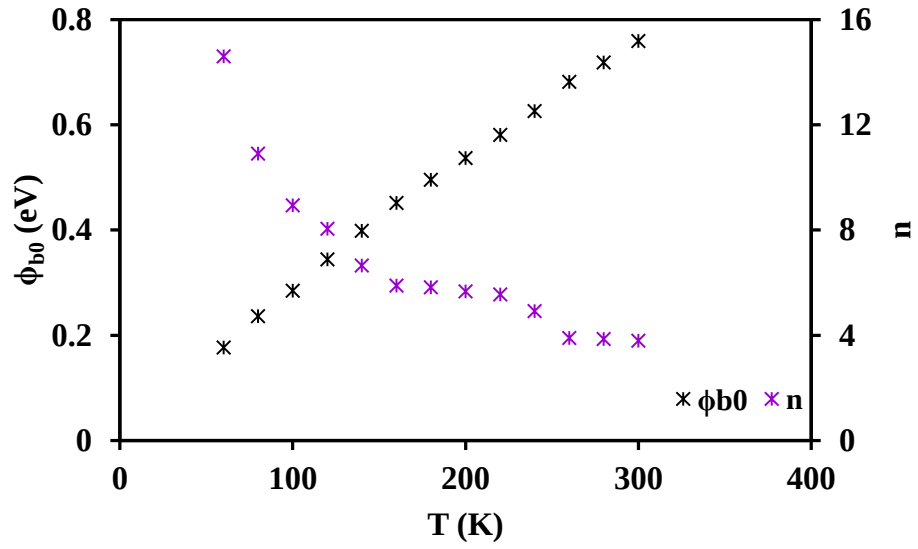


(a)

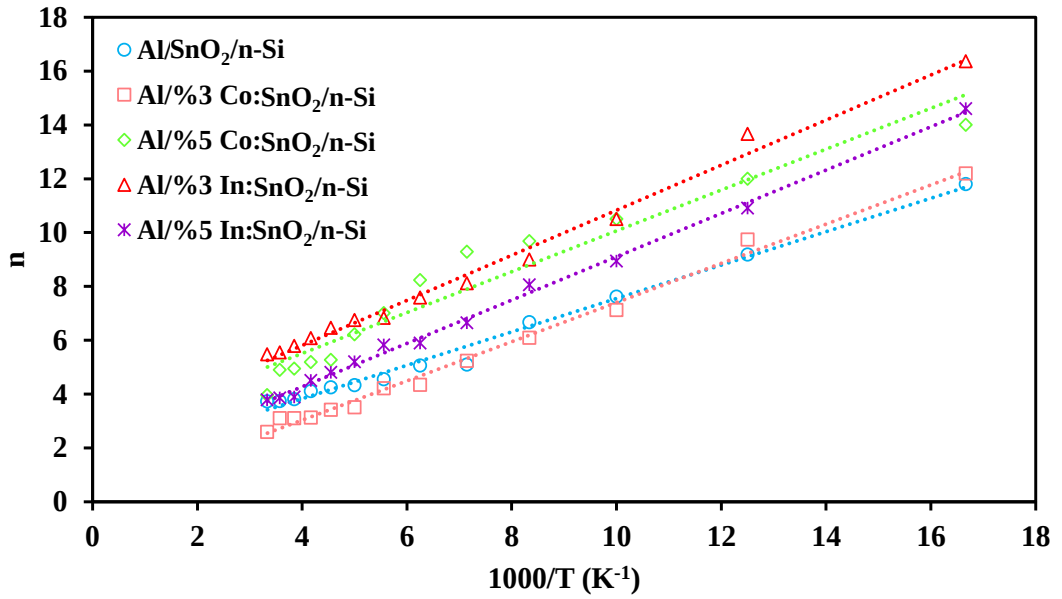


(b)

Şekil 4.76 a. Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapıları için ϕ_{b0} ve n'nin sıcaklıkla değişimleri



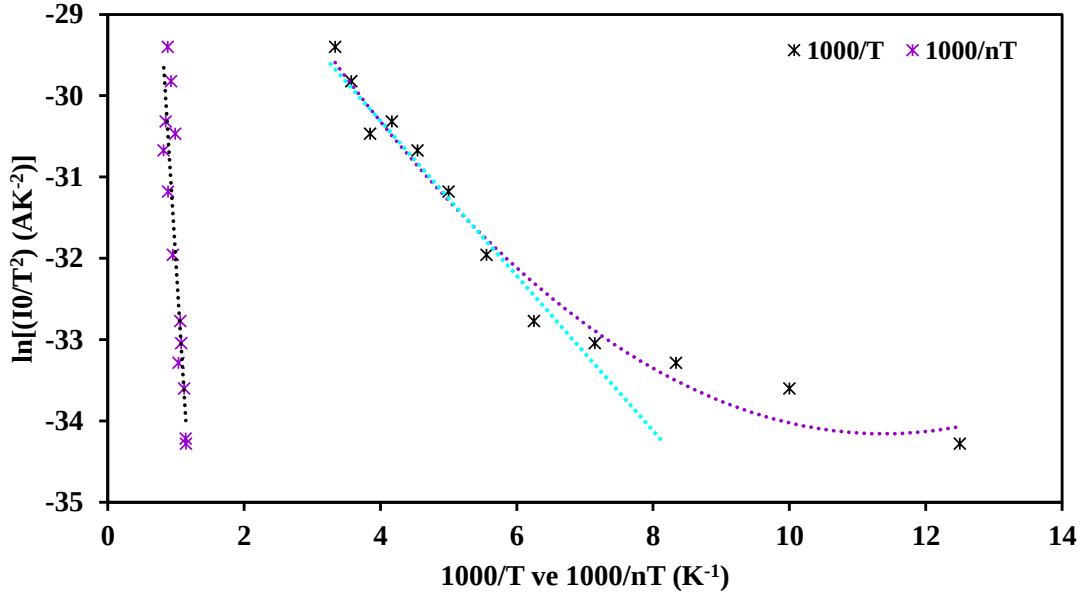
Şekil 4.77 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısı için ϕ_{b0} ve n 'nin sıcaklıkla değişimleri



Şekil 4.78 Al/SnO₂/n-Si/Al yapıları için n - $1000/T$ grafikleri

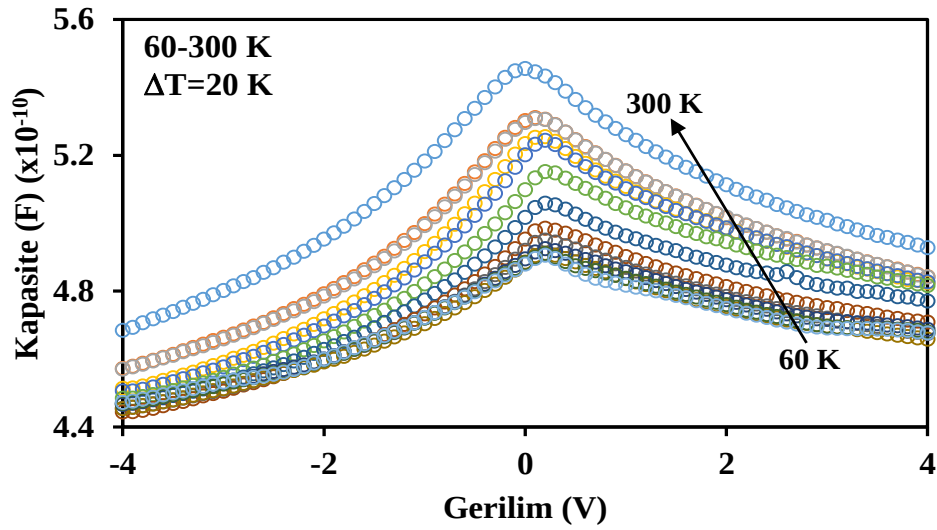
Şekil 4.78'de katkısız ve farklı atomlarla katkılı SnO₂ ince filmlerin bulunduğu Al/SnO₂/n-Si/Al yapıları için idealite faktörünün sıcaklığın tersiyle ($1/T$) değişimi görülmektedir. Grafiklerden (2.85) denklemine uyan doğruların eğimlerinden T_0 ve n -eksenini kestiği noktalardan n_0 değerleri farklı atomlarla katkılı yapılar için şu şekilde bulunmuştur: Katkısız için; 1.33 ve 784 K, % 3 Co için; 1.12 ve 728 K, % 5 Co için; 2.99 ve 646 K, % 3 In için; 2.51 ve 802 K ve % 5 In için; 1.33 ve 784 K.

Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen $\ln(I_0/T^2)$ -1000/T ve 1000/nT grafikleri bir arada şekil 4.79’da verilmiştir.

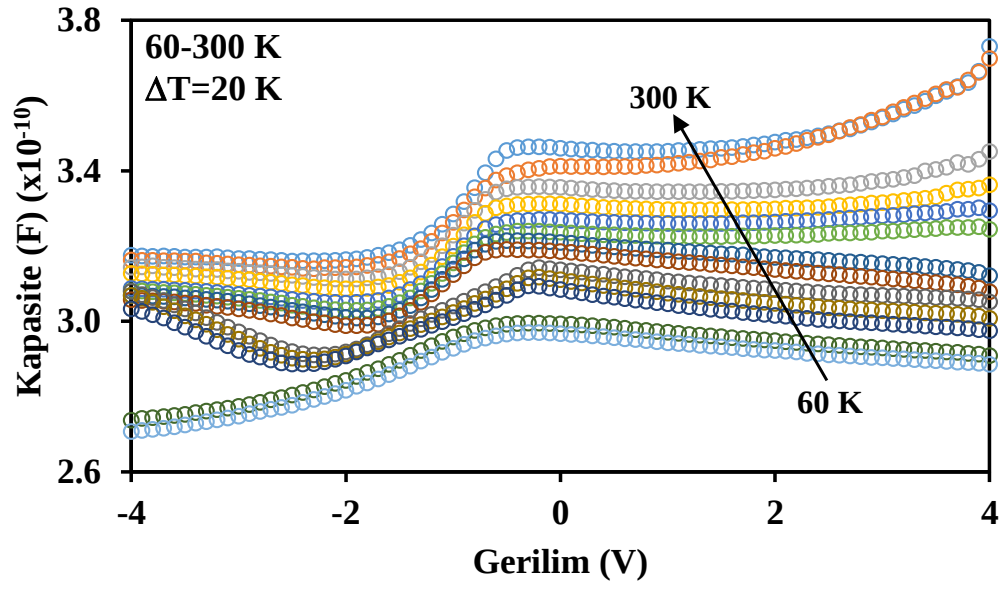


Şekil 4.79 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısı için $\ln(I_0/T^2)$ -1000/T ve 1000/nT grafikleri

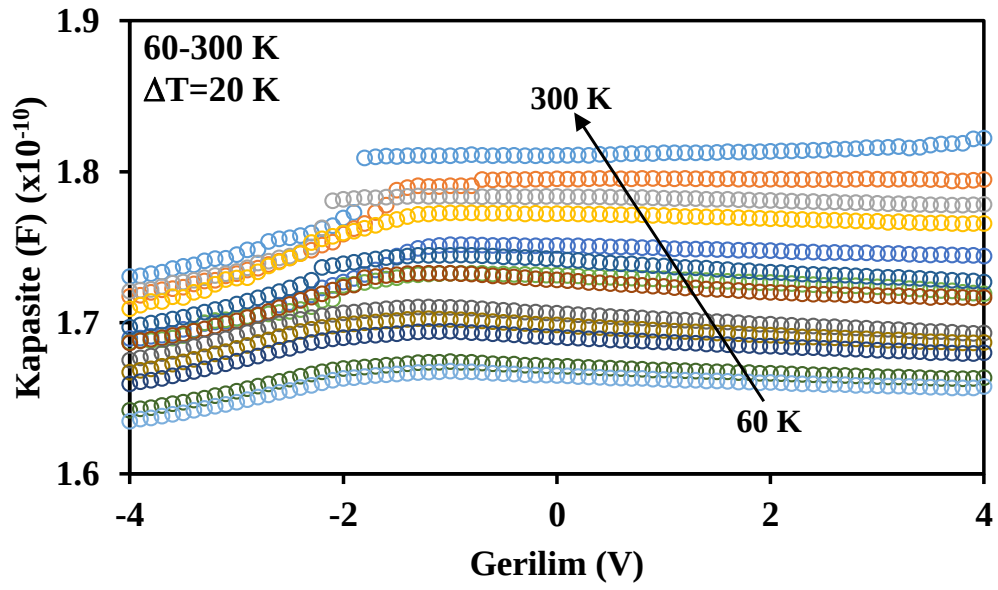
Elde edilen Al/SnO₂/n-Si/Al yapılarının 60-300 K sıcaklık aralığında ve 1MHz frekansta kapasite-gerilim ölçümleri yapılmıştır. Farklı heteroeklem yapılar için ölçümlerden bulunan frekansa bağlı C-V eğrileri şekil 4.80-4.82’de verilmiştir.



Şekil 4.80 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri

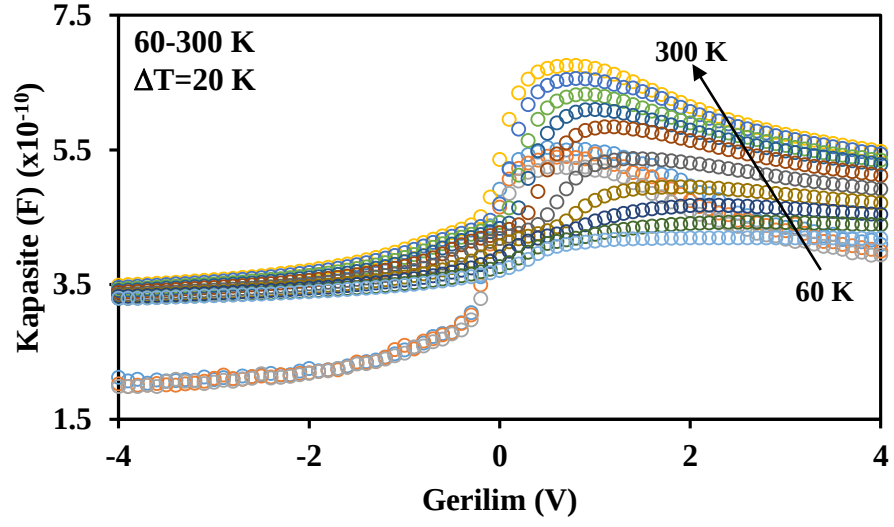


(a)

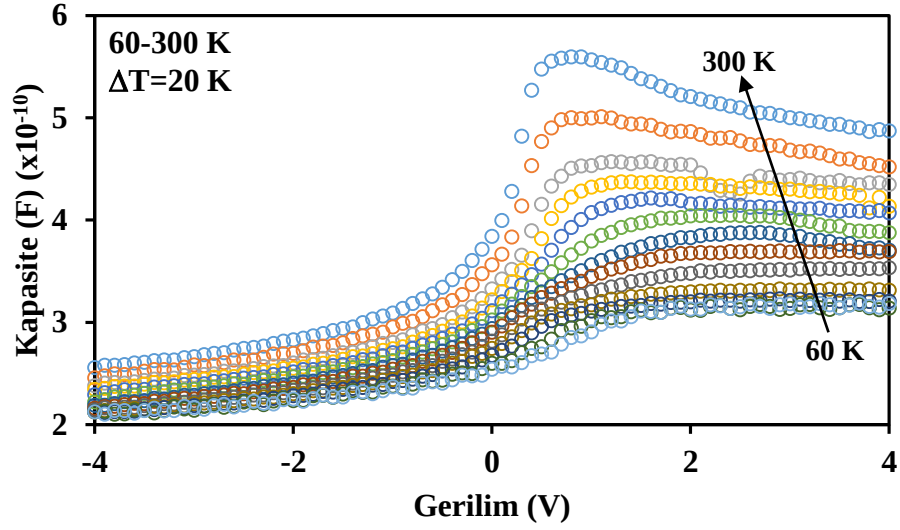


(b)

Şekil 4.81 a. Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri



(a)

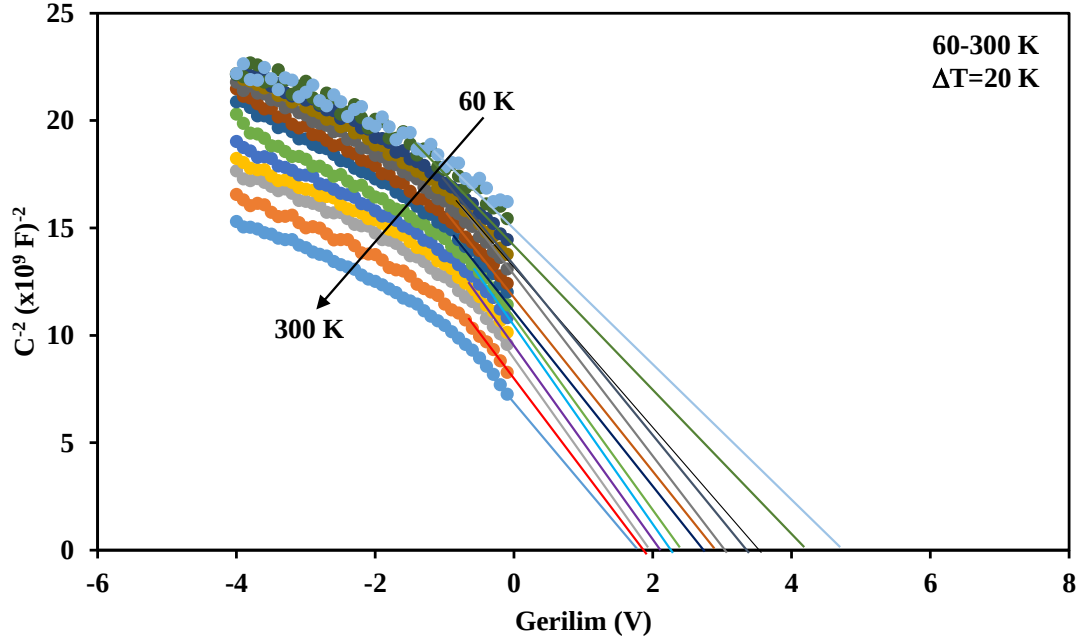


(b)

Şekil 4.82 a. Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-V eğrileri

V_d difüzyon potansiyelini ve N_D verici yoğunluğunu hesaplayabilmek için C-V eğrilerinin verilerinden C^{-2} -V eğrileri çizilmiştir. Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının 60-300 K arasındaki C^{-2} -V eğrileri örnek olarak şekil 4.83'te verilmiştir. Söz konusu çizim tüm heteroeklem yapılar için yapılmıştır. Bu eğrilerin lineer kısımlarının gerilim eksenine ekstrapole edilmesiyle V_0 kesme gerilimleri ve bu doğruların eğimlerinden de N_D verici

yoğunlukları hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar tüm yapılar için çizelge 4.48-4.51’de verilmiştir.



Şekil 4.83 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C⁻²-V grafikleri

Kuramsal (Oda sıcaklığında ve 1 T manyetik alan altında yapılan Hall etkisi ölçümlerinden elde edilen) ve deneysel olarak C⁻²-V grafiklerinin eğimlerinden bulunan verici yoğunluklarının denklem (2.93)’e göre oranından c_2 bulunur. c_2 değerlerinin (2.92) denkleminde kullanılmasıyla α ve (2.90) denkleminde de C-V yönteminden bulunan N_{ss} değerleri elde edilir. (2.92) denkleminde bulunan α değerlerinin (2.89) denkleminde kullanılmasıyla V_d ve (2.101) denkleminde de W_D belirlenir. N_C , iletim bandındaki etkin durumların yoğunluğu (2.95) denkleminde hesaplandıktan sonra (2.94) denkleminde de fermi enerjisi bulunabilir. (2.98) denkleminde elde edilen E_m sonuçlarının (2.97) denkleminde kullanılmasıyla $\Delta\phi_b$ saptanır. Tüm bu sonuçların (2.96) denkleminde yerine yazılmasıyla da C-V grafiklerinden yararlanarak $\phi_{b(C-V)}$ değerleri hesaplanmış olur. Elde edilen sonuçlar tüm yapılar için çizelge 4.48-4.51’de verilmiştir. C-V ölçümlerinden bulunan δ ve W_D ile I-V ölçümlerinden belirlenen idealite faktörü değerlerinin (2.100) denkleminde kullanılmasıyla, ara yüzey durum yoğunlukları ayrıca I-V ölçümlerinden de belirlenmiş olur ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.40, çizelge 4.42, çizelge 4.44 ve çizelge 4.46’da verilmiştir.

Çizelge 4.48 Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri

T (K)	N _D (cm ⁻³)	c ₂	qV ₀ (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)	qV _d (eV)	W _D (cm)	E _F (eV)	qφ _{b0} (eV)
300	1.12x10 ¹⁴	0.241	4.101	8.66x10 ¹¹	1.015	3.44x10 ⁻⁴	0.276	1.282
280	1.06x10 ¹⁴	0.228	4.478	9.19x10 ¹¹	1.045	3.60x10 ⁻⁴	0.256	1.293
260	1.08x10 ¹⁴	0.233	4.472	8.80x10 ¹¹	1.065	3.59x10 ⁻⁴	0.235	1.291
240	1.07x10 ¹⁴	0.232	4.611	8.74x10 ¹¹	1.089	3.64x10 ⁻⁴	0.215	1.295
220	1.04x10 ¹⁴	0.225	4.877	8.95x10 ¹¹	1.118	3.74x10 ⁻⁴	0.195	1.304
200	1.04x10 ¹⁴	0.225	4.948	8.87x10 ¹¹	1.132	3.76x10 ⁻⁴	0.175	1.298
180	1.06x10 ¹⁴	0.229	4.915	8.61x10 ¹¹	1.140	3.75x10 ⁻⁴	0.154	1.286
160	1.02x10 ¹⁴	0.220	5.223	9.02x10 ¹¹	1.161	3.86x10 ⁻⁴	0.135	1.287
140	5.52x10 ¹³	0.119	11.074	1.85x10 ¹²	1.333	5.61x10 ⁻⁴	0.123	1.449
120	5.47x10 ¹³	0.118	11.329	1.85x10 ¹²	1.350	5.67x10 ⁻⁴	0.103	1.446
100	5.48x10 ¹³	0.118	11.441	1.83x10 ¹²	1.364	5.70x10 ⁻⁴	0.084	1.440
80	5.28x10 ¹³	0.114	12.423	1.85x10 ¹²	1.424	5.93x10 ⁻⁴	0.065	1.481
60	5.68x10 ¹³	0.123	11.692	1.69x10 ¹²	1.439	5.75x10 ⁻⁴	0.046	1.477

Çizelge 4.49 Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri

T (K)	N _D (cm ⁻³)	c ₂	qV ₀ (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)	qV _d (eV)	W _D (cm)	E _F (eV)	qφ _{b0} (eV)
300	6.30x10 ¹³	0.136	29.297	9.14x10 ¹¹	4.013	9.12x10 ⁻⁴	0.291	4.293
280	7.29x10 ¹³	0.157	25.376	7.62x10 ¹¹	4.020	8.48x10 ⁻⁴	0.265	4.274
260	7.03x10 ¹³	0.152	26.255	7.91x10 ¹¹	4.009	8.63x10 ⁻⁴	0.245	4.243
240	6.87x10 ¹³	0.148	27.009	8.08x10 ¹¹	4.029	8.75x10 ⁻⁴	0.224	4.242
220	7.69x10 ¹³	0.166	24.930	6.99x10 ¹¹	4.160	8.40x10 ⁻⁴	0.200	4.349
200	7.67x10 ¹³	0.166	25.438	6.93x10 ¹¹	4.232	8.49x10 ⁻⁴	0.180	4.400
180	7.32x10 ¹³	0.158	25.861	7.37x10 ¹¹	4.104	8.56x10 ⁻⁴	0.160	4.254
160	7.16x10 ¹³	0.155	27.267	7.52x10 ¹¹	4.231	8.78x10 ⁻⁴	0.140	4.360
140	7.30x10 ¹³	0.158	28.571	7.27x10 ¹¹	4.517	8.99x10 ⁻⁴	0.120	4.626
120	7.14x10 ¹³	0.154	28.720	7.42x10 ¹¹	4.440	9.01x10 ⁻⁴	0.101	4.529
100	7.24x10 ¹³	0.156	28.598	7.25x10 ¹¹	4.481	8.99x10 ⁻⁴	0.081	4.551
80	7.13x10 ¹³	0.154	29.757	7.30x10 ¹¹	4.590	9.17x10 ⁻⁴	0.063	4.642
60	7.31x10 ¹³	0.158	29.320	7.09x10 ¹¹	4.635	9.10x10 ⁻⁴	0.045	4.668

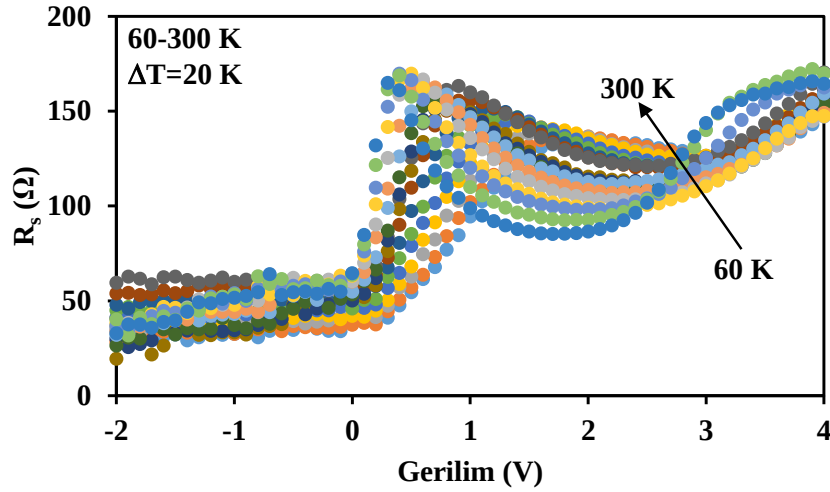
Çizelge 4.50 Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri

T (K)	N _D (cm ⁻³)	c ₂	qV ₀ (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)	qV _d (eV)	W _D (cm)	E _F (eV)	qφ _{b0} (eV)
300	3.99x10 ¹⁴	0.861	1.433	7.05x10 ¹⁰	1.260	2.03x10 ⁻⁴	0.243	1.491
280	3.99x10 ¹⁴	0.862	1.413	6.85x10 ¹⁰	1.242	2.02x10 ⁻⁴	0.224	1.454
260	3.92x10 ¹⁴	0.848	1.535	7.49x10 ¹⁰	1.324	2.10x10 ⁻⁴	0.206	1.518
240	8.96x10 ¹³	0.194	3.251	2.24x10 ¹²	0.650	3.08x10 ⁻⁴	0.218	0.861
220	8.52x10 ¹³	0.184	3.576	2.32x10 ¹²	0.677	3.22x10 ⁻⁴	0.199	0.868
200	8.76x10 ¹³	0.189	3.601	2.16x10 ¹²	0.699	3.23x10 ⁻⁴	0.178	0.869
180	8.95x10 ¹³	0.193	3.633	2.03x10 ¹²	0.718	3.24x10 ⁻⁴	0.157	0.867
160	9.15x10 ¹³	0.198	3.678	1.89x10 ¹²	0.741	3.25x10 ⁻⁴	0.137	0.870
140	9.38x10 ¹³	0.203	3.865	1.68x10 ¹²	0.795	3.33x10 ⁻⁴	0.117	0.904
120	7.21x10 ¹³	0.156	5.556	2.13x10 ¹²	0.875	3.98x10 ⁻⁴	0.101	0.969
100	7.31x10 ¹³	0.158	5.682	1.98x10 ¹²	0.906	4.02x10 ⁻⁴	0.081	0.980
80	6.08x10 ¹³	0.131	7.273	2.33x10 ¹²	0.962	4.54x10 ⁻⁴	0.064	1.019
60	9.56x10 ¹³	0.206	7.691	1.28x10 ¹²	1.593	4.66x10 ⁻⁴	0.043	1.628

Çizelge 4.51 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı C-V belirtkenleri

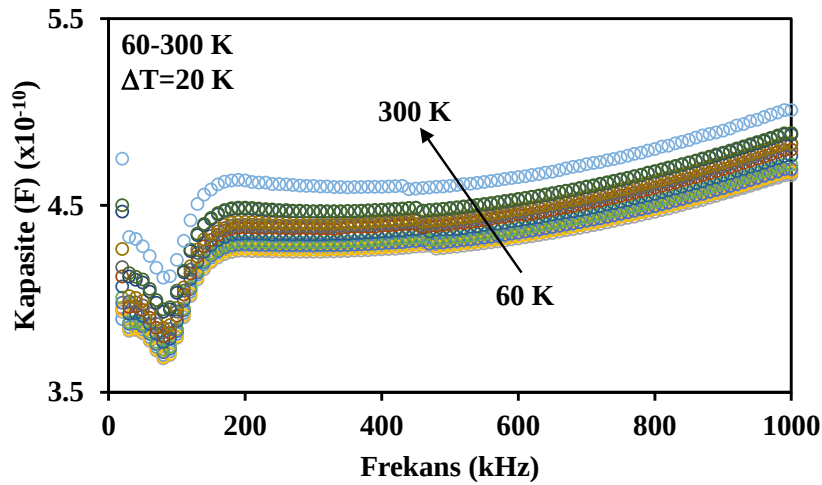
T (K)	N _D (cm ⁻³)	c ₂	qV ₀ (eV)	N _{ss} (cm ⁻² eV ⁻¹)	qV _d (eV)	W _D (cm)	E _F (eV)	qφ _{b0} (eV)
300	2.47x10 ¹⁴	0.533	1.687	3.90x10 ¹¹	0.925	2.21x10 ⁻⁴	0.255	1.170
280	2.54x10 ¹⁴	0.548	1.867	3.27x10 ¹¹	1.048	2.32x10 ⁻⁴	0.235	1.272
260	2.82x10 ¹⁴	0.608	1.929	2.32x10 ¹¹	1.196	2.35x10 ⁻⁴	0.213	1.398
240	2.78x10 ¹⁴	0.601	2.093	2.30x10 ¹¹	1.278	2.45x10 ⁻⁴	0.195	1.461
220	2.62x10 ¹⁴	0.566	2.374	2.55x10 ¹¹	1.361	2.61x10 ⁻⁴	0.177	1.527
200	2.52x10 ¹⁴	0.544	2.632	2.68x10 ¹¹	1.449	2.74x10 ⁻⁴	0.159	1.597
180	2.50x10 ¹⁴	0.541	2.802	2.59x10 ¹¹	1.530	2.82x10 ⁻⁴	0.141	1.660
160	2.55x10 ¹⁴	0.550	2.844	2.39x10 ¹¹	1.579	2.84x10 ⁻⁴	0.123	1.690
140	2.62x10 ¹⁴	0.566	2.927	2.13x10 ¹¹	1.667	2.88x10 ⁻⁴	0.105	1.760
120	2.53x10 ¹⁴	0.547	3.186	2.17x10 ¹¹	1.753	3.01x10 ⁻⁴	0.088	1.828
100	2.53x10 ¹⁴	0.547	3.339	2.11x10 ¹¹	1.837	3.08x10 ⁻⁴	0.071	1.895
80	2.22x10 ¹⁴	0.481	4.088	2.68x10 ¹¹	1.971	3.40x10 ⁻⁴	0.055	2.014
60	2.04x10 ¹⁴	0.442	4.620	3.12x10 ¹¹	2.046	3.61x10 ⁻⁴	0.040	2.074

Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının 60-300 K sıcaklık aralığındaki C-V ölçümlerinden elde edilen C-V ve G-V eğrilerinden faydalanarak yapının frekansa bağlı seri direnç değerleri, (2.86) denklemi (Nicollian ve Brews 1982) yardımıyla elde edilmiştir. Seri direnç-gerilim eğrileri şekil 4.84’te verilmiştir.

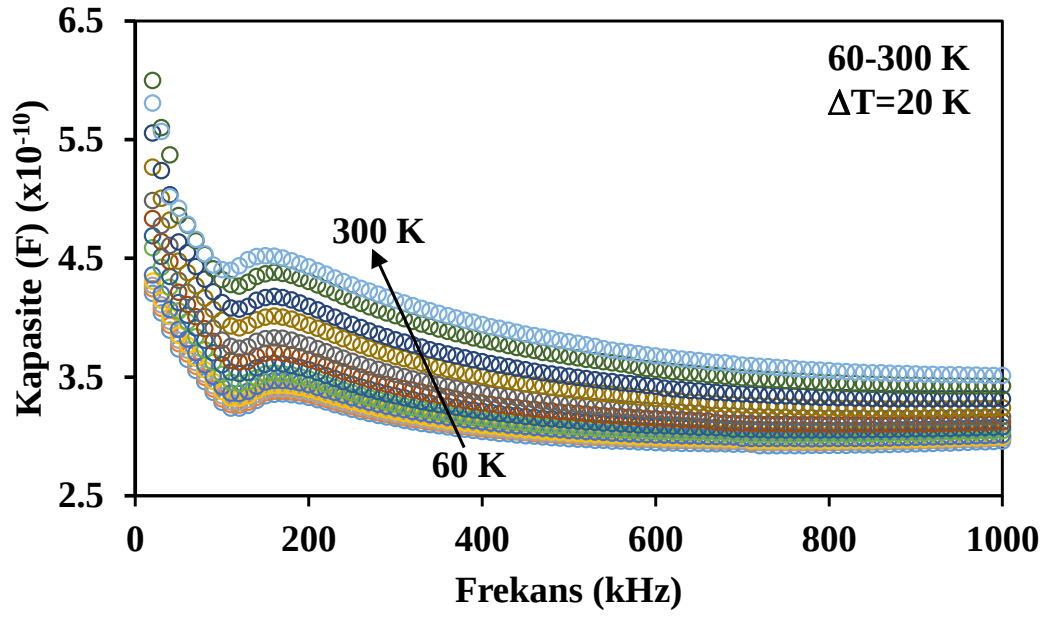


Şekil 4.84 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki R_s-V grafikleri

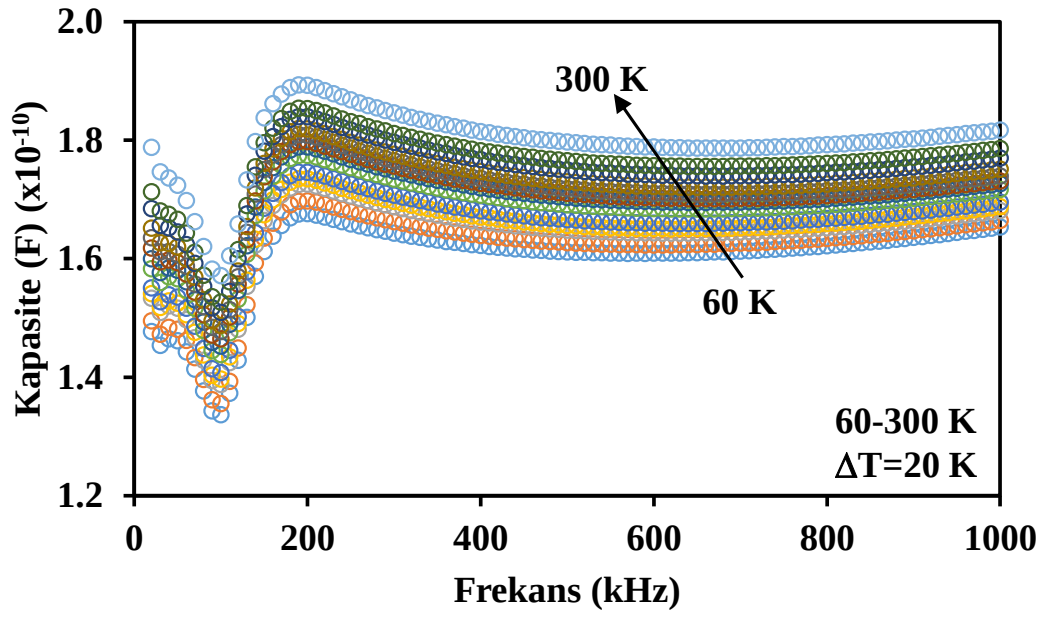
Ara yüzey durum yoğunluğunu hesaplamak için kapasite-frekans belirtkenlerinden yararlanılmıştır. Kapasite frekans belirtkenlerini ölçmek için kullanılan sistem C-V belirtkenlerini ölçmek için kullanılan sistemle aynı olup şekil 3.3 ve şekil 3.4’te gösterilmiştir. Heteroeklem yapıların sıfır beslemde 60-300 K sıcaklık aralığındaki C-f grafikleri şekil 4.85-4.87’de verilmiştir.



Şekil 4.85 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri

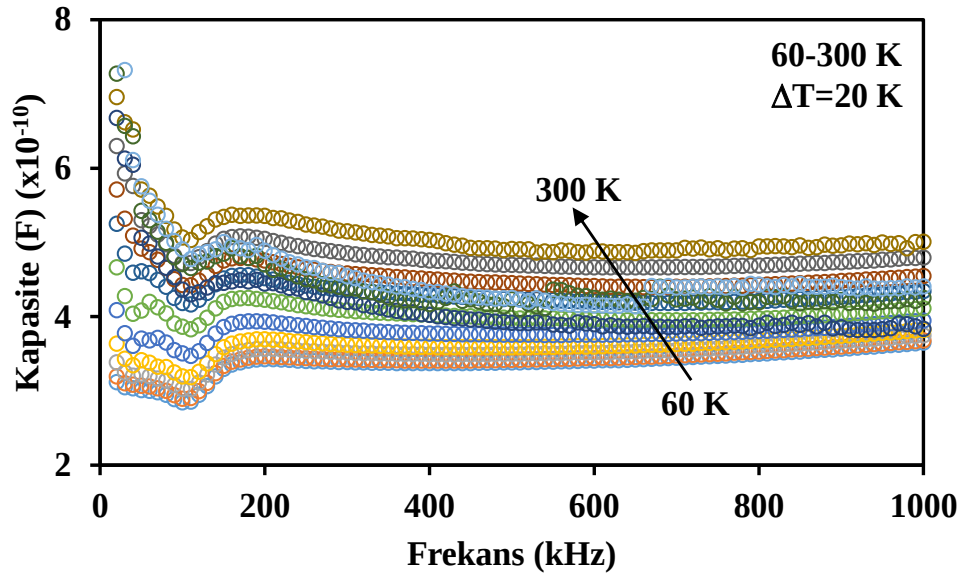


(a)

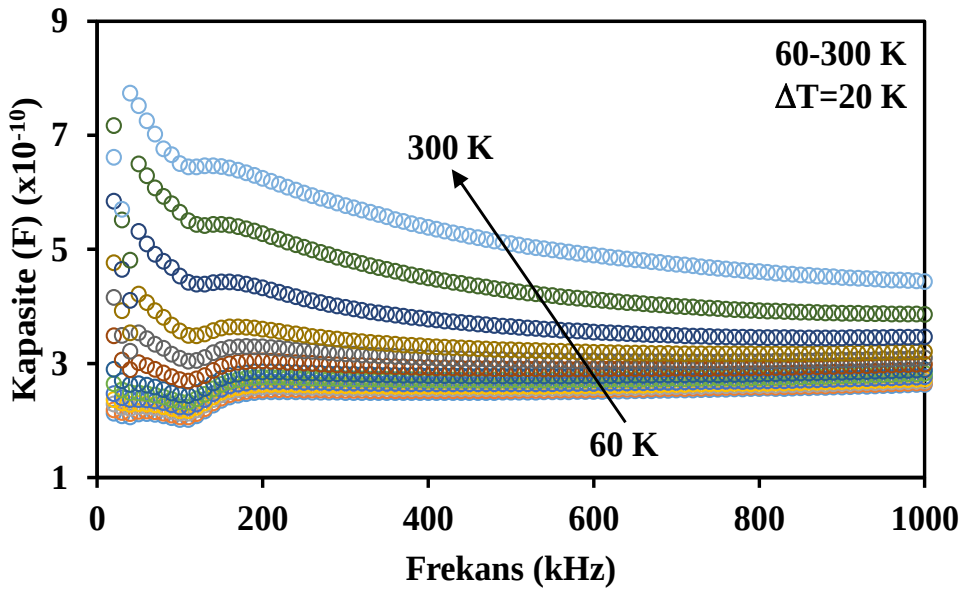


(b)

Şekil 4.86 a. Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri



(a)



(b)

Şekil 4.87 a. Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al, b. Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapılarının farklı sıcaklıklardaki C-f grafikleri

En küçük ve en büyük frekansta ölçülen kapasite değerleri ve (2.102) denklemi kullanılarak ara yüzey durum yoğunluğu N_{IS} bulunmuştur. Tüm diyotlar için bulunan N_{IS} değerleri çizelge 4.52’de verilmiştir. Burada ilgili sonuçlar, yapıda kullanılan katkı atomunun adıyla belirtilmiştir.

Çizelge 4.52 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının sıcaklığa bağlı N_{IS} değerleri

T (K)	Katkısız	% 3 Co	% 5 Co	% 3 In	% 5 In
300	4.69x10 ¹⁰	7.98x10 ¹⁰	6.00x10 ⁹	3.82x10 ¹⁰	1.35x10 ¹¹
280	4.97x10 ¹⁰	7.62x10 ¹⁰	5.37x10 ⁹	3.58x10 ¹⁰	1.05x10 ¹¹
260	4.97x10 ¹⁰	6.85x10 ¹⁰	5.57x10 ⁹	4.89x10 ¹⁰	6.22 x10 ¹⁰
240	5.24x10 ¹⁰	6.15x10 ¹⁰	5.37x10 ⁹	2.79x10 ¹⁰	2.83 x10 ¹⁰
220	5.32x10 ¹⁰	5.29x10 ¹⁰	5.48x10 ⁹	1.97x10 ¹⁰	1.35 x10 ¹⁰
200	5.27x10 ¹⁰	4.70x10 ¹⁰	5.27x10 ⁹	1.64x10 ¹⁰	3.26 x10 ⁹
180	5.25x10 ¹⁰	4.26x10 ¹⁰	4.96x10 ⁹	1.39x10 ¹⁰	2.94 x10 ⁹
160	5.20x10 ¹⁰	3.88x10 ¹⁰	4.58x10 ⁹	9.07x10 ⁹	4.77 x10 ⁹
140	5.11x10 ¹⁰	3.66x10 ¹⁰	4.03x10 ⁹	1.27x10 ⁹	6.60 x10 ⁹
120	5.18x10 ¹⁰	3.46x10 ¹⁰	3.76x10 ⁹	1.00x10 ¹⁰	7.64 x10 ⁹
100	5.14x10 ¹⁰	3.29x10 ¹⁰	3.54x10 ⁹	1.42x10 ¹⁰	8.12 x10 ⁹
80	5.04x10 ¹⁰	3.14x10 ¹⁰	2.65x10 ⁹	1.70x10 ¹⁰	9.47 x10 ⁹
60	5.04x10 ¹⁰	3.16x10 ¹⁰	1.79x10 ⁹	1.76x10 ¹⁰	1.03 x10 ¹⁰

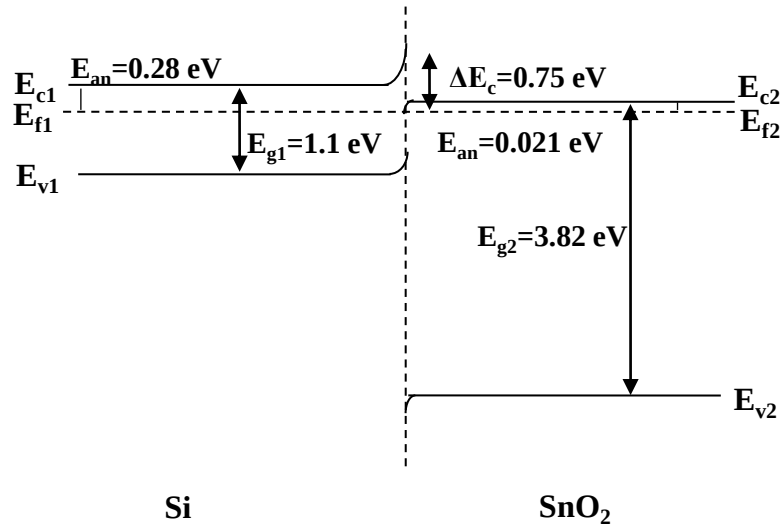
4.7 SnO₂/n-Si Yapısının Bant Diyagramı

SnO₂ için elektron ilgisi ($\chi=4.80$ eV) değeri literatürden (Mangamma ve Gnanasekaran 2000) alınmıştır. n-Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmlerin çizelge 4.35'te verilen V_{etk} değerleri burada aktivasyon enerjisi (E_a) olarak alınmıştır. (2.104) denkleminde yararlanılarak SnO₂ için iş fonksiyonu değeri, SnO₂/n-Si için 4.821 eV, % 3 In:SnO₂/n-Si için 4.82 eV, % 5 In:SnO₂/n-Si için 4.906 eV, % 3 Co:SnO₂/n-Si için 5.105 eV ve % 5 Co:SnO₂/n-Si için 5.096 eV olarak bulunmuştur.

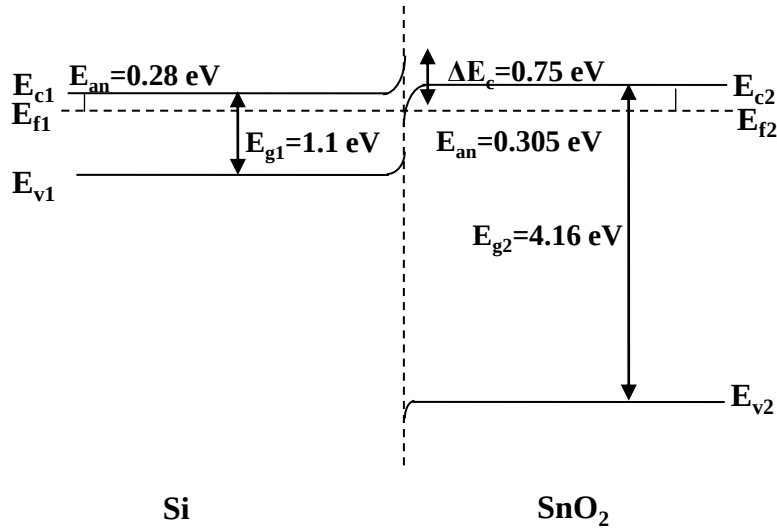
Deneyssel olarak belirlenen yasak enerji bant aralığı değerleri çizelge 4.30'da belirtildiği şekilde alınmıştır. (2.105) ve (2.106) ifadelerinden sırasıyla SnO₂/n-Si için $\Delta E_c=0.75$ eV ve $\Delta E_v=1.97$ eV, % 3 In:SnO₂/n-Si için $\Delta E_c=0.75$ eV ve $\Delta E_v=2.34$ eV, % 5 In:SnO₂/n-Si

için $\Delta E_c=0.75$ eV ve $\Delta E_v=2.25$ eV, % 3 Co:SnO₂/n-Si için $\Delta E_c=0.75$ eV ve $\Delta E_v=2.31$ eV, % 5 Co:SnO₂/n-Si için $\Delta E_c=0.75$ eV ve $\Delta E_v=2.05$ eV olarak bulunmuştur.

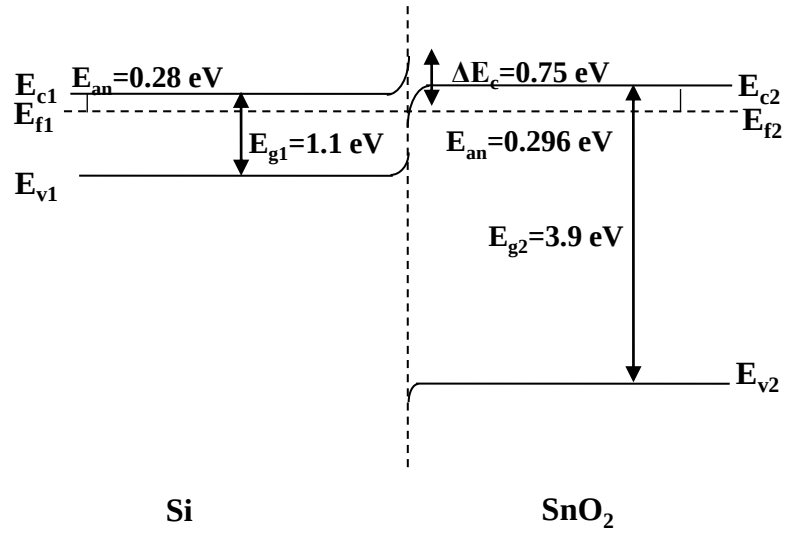
Al/SnO₂/n-Si/Al, Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al, Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al, Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al ve Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapılarının bant diyagramı sırasıyla şekil 4.88-4.92’de verilmiştir.



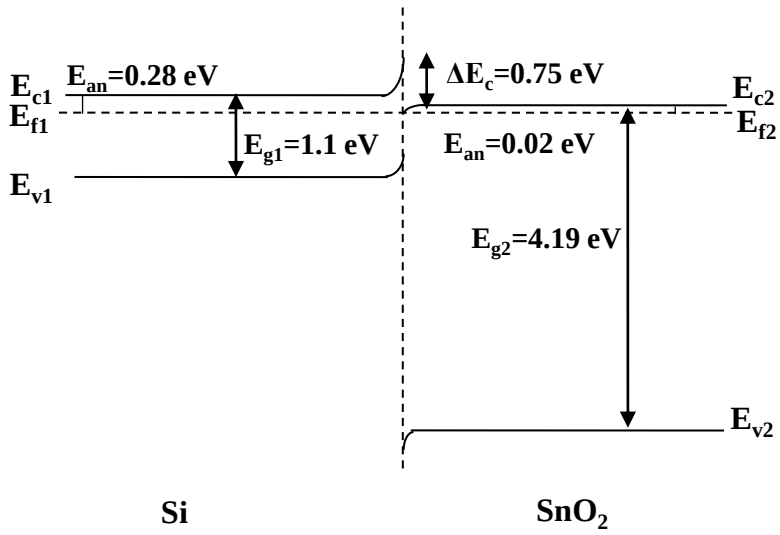
Şekil 4.88 Al/SnO₂/n-Si/Al yapısının bant diyagramı



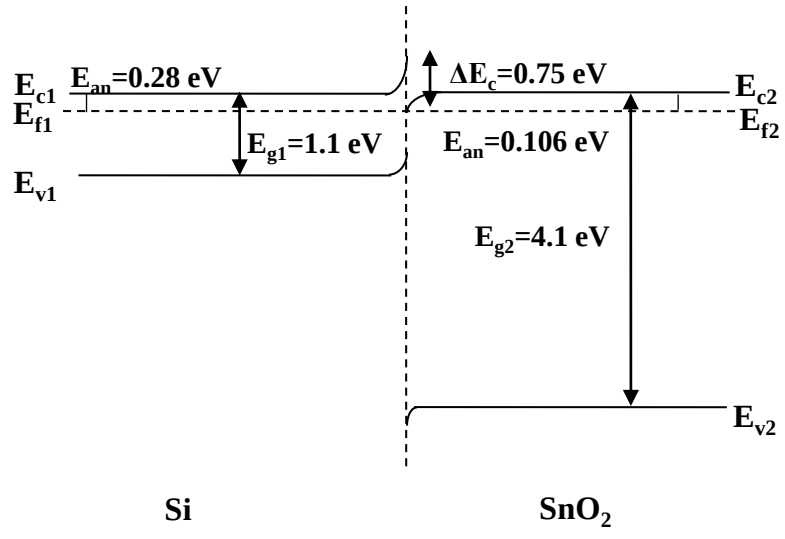
Şekil 4.89 Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının bant diyagramı



Şekil 4.90 Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapısının bant diyagramı



Şekil 4.91 Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının bant diyagramı



Şekil 4.92 Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının bant diyagramı

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.1’de verilmiştir. Spektrumda (110), (101), (200), (211) ve (220) düzlemlerinden gerçekleşen yansımalara ait beş ana kırınım piki bulunmaktadır. Bu piklerin SnO₂’ye ait olduğu ve yapının tetragonal fazda kristallendiği JCPDS kalay oksit, 41-1445 kartından görülmektedir (Ravichandran ve Philominathan 2008). Şekil 4.1’den katkılamanın ince filmlerin kristallenmesi üzerine çok önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir ve katkılamayla birlikte kırınım pikinin şiddeti değişmektedir. Ayrıca antimon katkı atomları, Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumunda ekstra pik oluşturmamaktadır. Çünkü antimon, kalay oksit matrisinin içine homojen bir şekilde yerleşmektedir ama yapıda antimonun bulunması durumunda Sb⁺³ veya Sb⁺⁵’in Sn⁺⁴ ile yer değiştirmesinden dolayı kristal yapısının doğal oluşumuna zarar vererek yapı kusurları oluşmakta ve kristallenmesi zayıflamaktadır (Gürakar vd. 2015). Spektrumdan katkısız SnO₂ filmin (110) düzlemi boyunca tercih edilen bir yönelim gösterdiği ve (200) ve (211) piklerinin şiddetlerinin artan katkılama oranı ile arttığı görülmektedir. % 4 oranında Sb katkılı filmler ise (211) düzlemi boyunca tercih edilen yönelim göstermektedirler. Benzer durum SnCl₄ kaynağından Sb katkılı SnO₂ ince film büyütüldüğünde Shanthi vd. (1999) tarafından elde edilmiştir.

5 ml HCl içeren katkısız SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı spektrumları şekil 4.2’de verilmiştir. Şekil 4.1 ile kıyaslandığında, çözelti hazırlanırken kullanılan HCl miktarının 2.5 ml’den 5 ml’ye artırılmasının, yapının polikristal olarak tetragonal fazda kristallenmesi üzerine bir etkisinin olmadığı fakat tercih edilen yönelimin (211) düzleminden (110) düzlemine değiştiği görülmektedir. % 1 ile % 5 arasında farklı oranlarda ve Cu, Al, Co ve In şeklinde farklı atomlarla katkılanarak büyütülen SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları şekil 4.2-4.4 arasında verilmiştir. Sb katkılı SnO₂ ince filmlerle aynı şekilde tüm filmler, ölçüm alınan 20-70° aralığındaki XRD spektrumunda beş temel kırınım pikine sahiptirler. Bu spektrumlardan hem farklı oranlarla hem de farklı atomlarla katlanıldığında SnO₂ ince filmlerin tetragonal fazda kristallenmesi ve (110) düzlemi boyunca tercih edilen yönelim göstermesinde bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Sadece % 1 oranında Co katkılı film (200) doğrultusunda yönelim

göstermektedir. Bu spektrumlardan ayrıca ince filme ait olmayan ekstra farklı bir pikin oluşmadığı ve yapının değişmediği anlaşılmaktadır. Literatürde Al, Zn ve Co gibi farklı atomlarla katkılanan SnO₂ ince filmlerin de benzer davranış gösterdiği Ahmed vd. (2006) ve Vijayalakshmi vd. (2008) tarafından belirtilmektedir.

n ve p-tipi Si kristali üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmlerin X-ışını toz kırınımı şekil 4.5-4.8’de verilmiştir. Bu spektrumlardan filmlerin polikristal olarak büyüdükleri görülmektedir. Tez çalışmasında kullanılan Si kristali, materyal ve yöntem bölümünde belirtildiği üzere (111) doğrultusunda yönelim göstermektedir. XRD spektrumlarından, ince filmler n-Si üzerinde büyütüldüğünde, katkısız ve Co katkılı olanların (200) düzlemi boyunca yönelim gösterirken, % 3 oranında In katkılı filmin (110) ve % 5 oranında In katkılı filmin (101) düzlemi boyunca yöneldiği anlaşılmaktadır. İnce filmler p-Si üzerinde büyütüldüğünde, katkısız ve Co katkılı olanların (200) düzlemi boyunca yönelim gösterirken, % 3 oranında In katkılı filmin (111) ve 5 oranında In katkılı filmin (101) düzlemi boyunca yöneldiği anlaşılmaktadır. Söz konusu atomlarla katkılı ince filmler cam alt tabaka üzerinde büyütüldüğünde, katkılamaıyla tercih edilen (110) yönelimi değişmemektedir. Cam, n-Si ve p-Si alt tabakalar üzerinde büyütülen ince filmlerin XRD spektrumları kıyaslandığında, katkısız ve % 3 ve % 5 oranında Co katkılı SnO₂ için cam yerine hem n-Si hem de p-Si alt tabaka olarak kullanıldığında yönelim değişmekte ve (110) yerine (200) düzleminde yönelim göstermektedir. % 5 In katkılı SnO₂ için de benzer şekilde alt tabaka olarak cam yerine hem n-Si hem de p-Si kullanıldığında yönelim değişmekte ve (110) yerine farklı olarak (101) düzleminde yönelim göstermektedir. Bununla birlikte % 3 In katkılı SnO₂ filmler hem cam hem de n-Si alt tabakalar üzerinde büyütüldüğünde (110) düzlemi tercih edilen yönelimken, p-Si için tercih edilen yönelim Si kristalinin kendi yönelimi olan (111) düzlemine değişmektedir.

Cam, n-Si ve p-Si alt tabakalar üzerinde büyütülen SnO₂ ince filmler için XRD spektrumlarından belirlenen örgü parametreleri olan a, c ve c/a oranları çizelge 4.3-4.4’te verilmiştir. JCPDS kalay oksit, 41-1445 kartında a, c ve c/a değerleri sırasıyla 4.738 Å, 3.189 Å ve 0.67 olarak verilmektedir (Ravichandran ve Philominathan 2008). Bu değerler birbirleriyle uyum içindedir.

XRD spektrumlarından elde edilen aç ı değeri ve pikin maksimum şiddetinin yarısındaki genişlik değeri (β) Debye-Scherrer bağıntısında kullanılarak her bir filmin kristalit boyutu (D) hesaplanmıştır. Bu değerler n-tipi ve p-tipi Si ve cam alt tabakalar üzerinde büyütölen SnO₂ ince filmler için sırasıyla çizelge 4.5-4.7’de verilmiştir.

2.5 ml HCl içeren katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin ve camın geçirgenlik spektrumları şekil 4.9’da verilmiştir. Spektrumlardan Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin yüksek optiksel geçirgenliğe sahip oldukları, artan katkılama oranı ile geçirgenliğin azaldığı görölmektedir. Bu durumun nedeni şu şekilde açıklanabilir: Kojima vd. (1993) yüksek oranda antimon katkılı SnO₂ ince filmlerin renklerinin artan katkılama oranı ile gittikçe siyaha daha çok yaklaşmasının nedenini araştırmış ve bu durumun filmin içinde ışığın soğurulmasından kaynaklandığını belirtmiştir. İki farklı oksitlenme durumuna veya karışık bir oksit durumuna sahip bir malzemenin (Sb:SnO₂ gibi) anormal denilebilecek kadar derin ve yoğun renklerini gösterir (Whitney ve Davidson 1949, Nassau 1978). Farklı oksitlenme durumları arasındaki elektron transferi, yoğun ışık soğurulmasına neden olmakta ve etkileşme rengi olarak isimlendirilmektedir. Katkılama konsantrasyonundaki artış ile Sb katkılı SnO₂ filmlerin geçirgenliğinin azalmasının, serbest elektronlar tarafından artan soğurulmaya bağılı olabileceğini göstermektedir. Antimonun yüksek oranda katkılanması, filmlerin dejenere doğasının artmasına neden olmakta ve ışığın soğurulması ile sonuçlanmaktadır. Böylece farklı oranlarda Sb katkılanması için elde edilen geçirgenlik spektrumu artan Sb katkılama konsantrasyonu ile birlikte tutarlı bir azalma göstermektedir. 5 ml HCl içeren katkısız ve Cu, Al, In ve Co katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirme spektrumları sırasıyla şekil 4.20, şekil 4.29 ve şekil 4.38’de verilmiştir. Söz konusu spektrumların hepsinde SnO₂ ince filmlerin yüksek bir geçirgenlik oranına sahip olduğu görölmektedir ve kızıl ötesine yakın bölgelerde filmlerin geçirgenliği azalmaktadır. Bu durum Sakhare vd. (2013) ve Zhukova vd. (2013) ile uyum içindedir.

Cam lameller üzerinde büyütölen Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin geçirgenlik spektrumları şekil 4.9’da verilmiştir. Şekilde verilen düz ve renkli çizgiler, ait oldukları numunenin optik parametrelerinin analizi için belirlenen en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiğı maksimum veya minimum konumunu göstermektedir. Cam lamel üzerinde

büyütülen ve 2.5 ml HCl içeren SnO₂ ince filminin geçirme spektrumu şekil 4.10'da verilmiştir. Şekilde Swanepoel'un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Bu çizim cam lameller üzerinde büyütülen tüm numuneler için benzer şekilde yapılmıştır. Zarf yöntemi yardımıyla kalınlığı her yerde aynı olan filmin T_{M0} ve T_{m0} değerleri belirlenmiştir. Swanepoel'un (1983) yönteminde olduğu gibi filmin kalınlığı ve kaçınıcı dereceden bir yansıma olduğunu gösteren m değerleri bulunmuştur. Tüm spektrum üzerinden kırılma indisinin dalga boyuna bağıllığını gösteren iki-terimli Cauchy dispersiyon bağıntısı elde edilmiştir. Grafiksel yöntemden yararlanarak analiz yapabilmek için Sb:SnO₂ ince filmlerin Cauchy dispersiyon bağıntılarından bulunan n değerleri kullanılarak $1/2-n/\lambda$ grafikleri çizilmiş ve grafikler beklenildiği şekilde, doğrusal formda elde edilmiştir. Bu grafikten yararlanarak, filmin kalınlığı ve m değerleri tekrar belirlenmiştir. Bu hesaplamalar cam lameller üzerinde büyütülen bütün SnO₂ ince filmler için yapılmıştır. Sb:SnO₂ ince filmlerin Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan film kalınlığı ve m değerleri ile geçirgenlik spektrumu üzerinde bulunan renkli çizgilerden belirlenen pik konumları çizelge 4.10'da verilmiştir. Söz konusu değerler 5 ml HCl içeren katkısız ve Cu, Al, In ve Co katkılı SnO₂ ince filmler için sırasıyla çizelge 4.15, çizelge 4.20 ve çizelge 4.25'te verilmiştir. Tüm numuneler için bulunan sonuçlara bakıldığında, geçirgenlik spektrumundaki bir pikin maksimum (veya minimum) noktasında Swanepoel ve grafik yönteminden bulunan m değerinin, maksimum için tamsayıya (veya minimum için yarı tamsayıya) karşılık gelmesi sonuçları aynıdır. Ayrıca Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan kalınlık değerleri birbirleriyle büyük bir uyum içindedir. Bu durum hem analizin başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir hem de kalınlık değerleri büyük bir doğrulukla elde edilmiştir.

Katkısız ve % 1-4 oranında Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin kırılma indislerinin ve sönüm katsayılarının dalga boyuna bağıllıkları sırasıyla şekil 4.11 ve şekil 4.14'te verilmiştir. Söz konusu grafikler cam lameller üzerinde büyütülen bütün SnO₂ ince filmler için gösterilmiştir. Bu grafiklerin değişimi, Ouni vd. (2010) ve Deng vd. (2009) ile uyumludur.

Katkısız ve katkılı SnO₂ ince filmlerde direk bir bant geçişi için Tauc bağıntısında $n=0.5$ alınarak $(\alpha h\nu)^2-h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Bu grafikte doğrusal kısımların $h\nu$ eksenine

ekstrapole edilmesiyle, eksenini kestiği noktalardan filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuştur. SnO_2 ince filmlerin $(n^2-1)^{-1}-(h\nu)^2$ grafikleri çizilmiş ve WDD yönteminde beklenildiği şekilde doğrular elde edilmiştir. Elde edilen bu doğruların analizinden WDD parametreleri belirlenmiştir. WDD parametreleri ve E_g değerleri katkısız, Sb, Cu, Al, In ve Co katkılı SnO_2 ince filmler için sırasıyla çizelge 4.11, çizelge 4.16, çizelge 4.21 ve çizelge 4.26'da verilmiştir. Çizelgedeki sonuçlar, Caglar vd. (2007) ve Aly vd. (2008) ile uyum içindedir. Cam lameller üzerinde büyütülen tüm SnO_2 ince filmlerin yasak enerji bant aralığı çok fazla değişmemektedir ve yaklaşık 4 eV değerine sahiptir (Gürakar vd. 2015). Benzer sonuçlar, Shanthi vd. (1980), Dua vd. (2008) ve Mazloom vd. (2013) tarafından da bulunmuştur.

SnO_2 ince filmlerin $n^2-\lambda^2$ grafikleri çizilmiş ve doğrusal formda elde edilmiştir. Doğrulardan ε_L ve WDD yönteminden belirlenen ε_∞ değerleri karşılaştırıldığında, yakın olmaları beklenmektedir. Bazı numuneler için bu durum sağlanmakta fakat bazı numuneler içinse bu iki değer arasında farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılıklara serbest taşıyıcı konsantrasyonu sebep olarak gösterilebilir (Aziz vd. 2009).

SnO_2 ince filmlerin kompleks elektronik dielektrik sabitinin reel ve imajiner kısımları olan ε_1 ve ε_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığını gösteren grafikler çizilmiştir. Grafiklerden dielektrik sabitinin hem reel hem de imajiner kısımlarının artan dalga boyuyla azaldığı görülmektedir. Kırmızı altı bölge yakınında dielektrik sabitinin imajiner kısmı artmakta, reel kısmı ise azalmaya devam etmektedir (Gürakar vd. 2015). Kompleks optik iletkenliğinin reel ve imajiner kısımları olan σ_1 ve σ_2 değerlerinin dalga boyuna bağlılığını gösteren grafikler de çizilmiştir. Grafiklerden optiksel iletkenliğin azalan dalga boyuyla arttığı görülmektedir. Bu durum optiksel iletkenlikteki artışın, foton enerjisi tarafından uyarılan elektronlardan kaynaklandığını doğrulamaktadır. Filmlerin optiksel iletkenlikleri, film kalınlığı etkisine bağlı olarak değişmektedir. Bu sonuçlar, Mazloom vd. (2013), Ouni vd. (2010) ve Abdel Rafea vd. (2009) ile büyük uyum içerisindedir.

n-Si kristali üzerinde büyütülen katkısız ve hem farklı malzemelerle hem de farklı oranlarda katkılı SnO_2 ince filmlerin yansıma spektrumları şekil 4.47'de verilmiştir.

Şekilde verilen düz ve renkli çizgiler, ait oldukları numunenin optik parametrelerinin analizi için belirlenen en büyük dalga boyundaki ilk pikin karşılık geldiği maksimum veya minimum konumunu göstermektedir. $\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ numunesinin yansıma spektrumu şekil 4.48’de verilmiştir. Şekilde Swanepoel’un (1983) yönteminde olduğu gibi girişim deseni bir zarf içine alınmıştır. Bu çizim n-Si kristali üzerinde büyütülen tüm numuneler için benzer şekilde yapılmıştır. El-Naggar vd. (2009) tarafından geliştirilen yöntem yardımıyla filmlerin kalınlıkları, kırılma indislerinin değerleri ve yansımanın kaçınıcı dereceden olduğunu gösteren (m) değerleri belirlenmiştir. Kalınlık ve m değerleri grafiksel yöntem yardımıyla da bulunmuştur. Bu hesaplamalar n-Si kristali üzerinde büyütülen bütün SnO_2 ince filmler için yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.29’da verilmiştir. Tüm numuneler için bulunan sonuçlara bakıldığında, yansıma spektrumundaki bir pikin maksimum (veya minimum) noktasında El-Naggar vd. (2009) ve grafik yönteminden bulunan m değerinin, maksimum için tamsayıya (veya minimum için yarı tamsayıya) karşılık gelmesi sonuçları aynıdır. Ayrıca Swanepoel ve grafik yöntemden bulunan kalınlık değerleri birbirleriyle büyük bir uyum içindedir. Bu durum hem analizin başarılı bir şekilde yapıldığını göstermektedir hem de kalınlık değerleri büyük bir doğrulukla elde edilmiştir.

n-Si üzerinde büyütülen SnO_2 ince filmlerin kırılma indislerinin ve sönüm katsayılarının dalga boyuna bağılıkları sırasıyla şekil 4.49 ve şekil 4.52’de verilmiştir. Söz konusu grafikler cam lameller üzerinde büyütülen bütün SnO_2 ince filmler için gösterilmiştir. Bu grafiklerin değişimi, cam lameller üzerinde büyütülen SnO_2 ince filmleri için elde edilen belirtkenlerle uyumludur.

SnO_2 ince filmlerde direkt bir bant geçişi için Tauc bağıntısında $n=0.5$ alınarak $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$ grafikleri çizilmiştir. Filmlerin E_g bant aralıkları bulunmuş ve sonuçları çizelge 4.30’da verilmiştir. SnO_2 ince filmlerin yasak enerji bant aralığı çok fazla değişmemektedir ve yaklaşık 3.82 ile 4.19 eV arasında değere sahiptir. Bulunan sonuçlar, Shanthi vd. (1980) ve Dua vd. (2008) ile uyum göstermektedir.

Hem cam lameller hem de n-Si kristali üzerinde büyütülen katkısız, Sb, Cu, Al, In ve Co katkılı SnO₂ ince filmlerin σ -1000/T grafikleri şekil 4.54-4.58’de verilmiştir. Grafiklerden elektriksel iletkenliğin 120-300 K sıcaklık aralığında çok fazla değişmediği fakat 300-400 K sıcaklık aralığında sıcaklığa bağlı olarak bir miktar değiştiği gözlemlenmektedir. Sabit iletkenlik değerleri, sırt sırta vermiş Schottky engeli boyunca akım iletiminde tünelleme mekanizmasının etkin olduğunu göstermektedir (Seto 1975). İletkenlik değerlerinin belirgin bir şekilde katkı atomlarının türüne bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Sb katkılı SnO₂ ince filmlerin iletkenlik değerleri katkılama oranı ile artmakta % 3’te maksimum değere ulaştıktan sonra azalmaktadır. Benzer bir durum (Lee ve Park 2006) tarafından da elde edilmiştir. Aynı numune 5 ml HCl kullanılarak büyütüldüğünde, katkılama oranı % 2 olduğunda en büyük iletkenlik değerine sahip olmaktadır fakat benzer şekilde iletkenlik değerleri katkısız duruma göre daha fazladır (Gurakar vd. 2011). Katkı atomu olarak Cu, Al, In ve Co kullanıldığında ise katkılama ile birlikte iletkenlik değerleri katkısız numuneye göre tüm sıcaklık aralığında azalmaktadır. SnO₂ ince filmlerin söz konusu elektriksel iletkenlik karakteristikleri şu şekilde açıklanabilir: Vericiler (oksijen ve kalay boşlukları gibi saf nokta kusurları) ve akseptörler (Sn⁺⁴ yerine In⁺³, Cu⁺², Al⁺³ veya Co⁺²) filmlerde bir arada bulunmaktadır. In, Cu, Al ve Co atomları akseptörler gibi davranırlar (Gurakar vd. 2014).

İletkenlik ölçümlerinin analizinden elde edilen sonuçlar çizelge 4.31-4.35’te verilmiştir. Çizelgelerdeki değerlerde $L \geq 2L_D$ durumu sağlandığından, düz iletim bandının olduğu söylenebilir. Bütün filmlerin L ile kıyaslandığında çok küçük L_D değerine (birkaç Å) sahip olduğu görülmektedir. Ara yüzey tuzakları varken tanecik sınırı boyunca potansiyel engellerinin oluşabileceğine işaret eder. SnO₂ ince filmler püskürtme yöntemi ile büyütüldüğünde büyük düzensizliklere sahip olurlar. Bir başka deyişle SnO₂ ince filmler, L değerinde bir dağılıma, kusurlu tanecik sınırları, oksijen boşluğu ve safsızlıklar gibi doğal kusurlara sahiptirler. L_D ’nin küçük N’nin yüksek değerlere sahip olduğu durumda, tanecik sınırında oldukça dar ve küçük bir potansiyel engelinin olduğu söylenebilir. Çizelgelerdeki değerlerden, tüm filmler için $Q_t < NL$ ve $l_2 < L$ şartlarının sağlandığı görülmektedir. Bu durumlar da 120-300 K sıcaklık aralığında sırt sırta vermiş Schottky engeli boyunca akım iletiminde tünelleme mekanizmasının etkin olduğunu doğrulamaktadır. 300-400 K sıcaklık aralığında iletkenlikteki kademeli artış ve çizilen

$\ln(\sigma T^{1/2})-1000/T$ grafiklerinin uygun şekilde doğrusal olmasından dolayı, bu sıcaklık aralığında akım iletiminde etkin mekanizma termoiyonik alan emisyonu olarak belirlenmiştir (Gürakar vd. 2014).

Al/SnO₂/n-Si/Al ve Al/SnO₂/p-Si/Al yapılarının oda sıcaklığında yapılan I-V ölçümlerinin belirtkenleri şekil 4.59-4.60'da verilmiştir. I-V, $dV/d(\ln I)$ ve $F(V)$ yöntemlerinden bulunan değerler çizelge 4.36-4.37'de verilmiştir. Yapı parametreleri söz konusu üç yöntemden bulunmuş ve birbirleriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al yapısının kapasite-gerilim (C-V) ve iletkenlik-gerilim (G-V) belirtkenleri sırasıyla şekil 4.66-4.67'de verilmiştir. Tüm frekanslar için Şekil 4.66-4.67'ye göre, diyot eğrileri akümülayon, tüketim ve tersinim bölgelerine sahiptir. Gerilime ve frekansa bağlıdır. C-V eğrilerinin şekli her frekans için n-tipi davranışa uygun olduğunu göstermektedir (Sze 1981). Kapasite değerleri ölçüm frekansı azaldıkça artmakta, fakat gerilim azaldıkça azalmaktadır. Gerilim ve frekans bağımlılıkları Schottky engelinin, yüksek seri direncin ve safsızlık seviyesinin özelliğidir (Osiris vd. 2011). Şekil 4.66'da görüldüğü gibi yapının kapasitesi artan frekansla kuvvetli yığılma bölgesinden kuvvetli tersinim bölgesine doğru gittikçe azalmıştır. Ayrıca yığılma ve tüketim bölgesinde de yapının kapasitesi artan frekansla azalmıştır. G-V eğrileri ise şekil 4.67'de görüldüğü gibi tüketim bölgesinde bir tepe vermiş, bu tepenin şiddeti artan frekansla artmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır.

Seri direnç-gerilim eğrileri şekil 4.68'de verilmiştir. Tüketim bölgesinde G-V eğrilerinde olduğu gibi bir tepe görülmüştür. Frekans arttıkça tepe şiddeti azalmış ve yığılma bölgesine doğru kaymıştır. Şekil 4.68'de görüldüğü gibi R_s direnci, akümülayon bölgesi ve pozitif beslemde gerilimden bağımsızdır. Ayrıca tüm frekanslarda kuvvetli yığılma bölgesinde hesaplanan seri direnç değerlerinin frekansa bağlı değişimi şekil 4.69'da gösterilmektedir. Görüldüğü gibi seri direnç değeri artan frekansla üstel olarak azalmakta ve yüksek frekanslarda sabit hale gelmektedir.

Katkısız ve katkılı tüm SnO₂ filmlerinin olduğu Al/SnO₂/n-Si/Al yapıları için 60-300 K düşük sıcaklık aralığında elde edilen I-V ve lnI-V belirtkenleri şekil 4.70-4.74'te verilmiştir. Bu grafiklerden n, R_s ve ϕ_{b0} ; I-V ve F(V) yöntemlerinden hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar çizelge 4.38-4.47'de verilmiştir. Çizelgelere bakıldığında bu üç parametrenin de sıcaklığa bağlı olduğu belirlenmiştir. Buradan hesaplanan n ve ϕ_{b0} 'ın sıcaklığa bağlı değişimlerinin grafikleri ise şekil 4.75-4.77'de verilmiştir. Grafiklerden, azalan sıcaklıkla idealite faktörünün arttığı ve ϕ_{b0} değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. Burada elde edilen n değerlerinden akım iletim mekanizmasının hem tuzak destekli tünelleme hem de termoiyonik emisyonla oluştuğunu göstermektedir. 160 K'den büyük sıcaklıklarda heteroeklem engelindeki taşıyıcıların termoiyonik emisyonu diyot akım iletim mekanizmasında baskın hale gelmekte ve idealite faktörü 1'e yaklaşmaktadır (Nagatomo vd. 1979). Üzerinde oksit tabakası bulunan bir yarıiletken yüzeyin üzerine metal buharlaştırıldığında, ara yüzey tabakasından dolayı metal ve yarıiletken tam bir kontak oluşturmazlar. Ara yüzey tabakasından lokalize olan değişik tünelleme tuzak durumlarından dolayı ϕ_{b0} değerinde artışa neden olurlar. Benzer sonuçlar Varma vd. (1984) ve Ashok vd. (1979) tarafından elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklardaki yüksek n değerleri, ara yüzey tabakasındaki potansiyel atlama, düşük sıcaklık bölgesinde fazlalık akımının bulunması ve eklemin ara yüzey durumları boyunca meydana gelen rekombinasyon akımıdır (Quan ve Hbib 1993).

n değerlerinin artan sıcaklıkla azalması T₀ etkisi olarak bilinmektedir. Şekil 4.79'da verilen $\ln(I_0/T^2)-1000/T$ ve $1000/nT$ grafiklerinde, $\ln(I_0/T^2)-1000/T$ 'nin lineerlikten ayrılmasının nedeni de n ve ϕ_{b0} değerlerinin sıcaklığa bağımlılığıdır.

Katkısız ve katkılı tüm SnO₂ filmlerinin olduğu Al/SnO₂/n-Si/Al yapılarının 60-300 K sıcaklık aralığında ve 1 MHz frekansta yapılan ölçümlerinden elde edilen C-V eğrileri şekil 4.80-4.82'de verilmiştir. Al/SnO₂/n-Si/Al yapısı için elde edilen C-V eğrisinin, heteroeklem engel varaktörüne benzediği anlaşılmıştır (Champlain vd. 2008). Bu yapı dışındaki MOS tipi tüm yapılar için C-V ölçümlerinden yapıya etki eden parametreler hesaplanmış ve çizelge 4.48-4.51'de verilmiştir. N_{ss} değerleri sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu durumun nedeni sıcaklık etkisiyle MOS ara yüzeyinde meydana gelen değişikliktir. C⁻²-V grafiğinden 1 MHz'de elde edilen ϕ_{b0} değeri, I-V eğrilerinden elde

edilen ϕ_{b0} değerinden daha büyüktür. Bu iki değer arasındaki farklılık, n-Si ve SnO₂ arasındaki ince oksit tabakasından kaynaklanabilir. Bu farklılığın diğer bir nedeni olarak ϕ_{b0} 'daki homojenliğin bozulması olarak değerlendirilebilir (Güllü vd. 2010, Akkılıç vd. 2007). Genellikle düz beslem akım-gerilim karakteristikleri düşük gerilimlerde ve yarı-logaritmik ekseninde lineerdir. Fakat uygulanan gerilim yeterince yüksek olduğunda R_s ve N_{ss} gibi parametrelerin etkilerine bağlı olarak lineerlikten fark edilir şekilde saparlar (Altındal vd. 2003). R_s parametresi düz beslem I-V eğrisinin azalan bölgesinde etkindir. Fakat diğer parametreler bu karakteristiğin Schottky engel yüksekliğinde bir değişiklikte birlikte hem lineer hem de lineer olmayan bölgelerinde etkilidir (Chattopadhyay 1994, Cova ve Singh 1990). Özellikle seri direnç ve ara yüzeydeki oksit tabakası SnO₂ düz beslem I-V ve C-V karakteristikleri üzerinde güçlü etkilere sahiptir.

Heteroeklem yapıların sıfır beslemde 60-300 K sıcaklık aralığındaki C-f grafikleri şekil 4.85-4.87'de verilmiştir. Bu grafiklerden tüm diyotlar için bulunan N_{IS} değerleri çizelge 4.52'de verilmiştir ve Mauk vd. (1990) ile uyumludur. C-V ve C-f eğrilerinden bulunan ara yüzey durum yoğunluğu değerleri makul sınırlar içindedir.

Al/SnO₂/n-Si/Al, Al/% 3 In:SnO₂/n-Si/Al, Al/% 5 In:SnO₂/n-Si/Al, Al/% 3 Co:SnO₂/n-Si/Al ve Al/% 5 Co:SnO₂/n-Si/Al yapılarının bant diyagramları sırasıyla şekil 4.88-4.92'de verilmiştir. Bu diyagramlar Sharma ve Purohit (1974) ile uyumludur.

Sonuç olarak, cam ve Si kristalleri üzerinde büyütülen, farklı oranlarla ve farklı atomlarla katkılı SnO₂ ince filmlerin XRD spektrumları incelendiğinde yapının tetragonal fazda ve polikristal olarak kristallendiği, yapıya ait olmayan herhangi bir ekstra pik oluşmadığı ve tercih edilen yönelimin HCl miktarı ve alt tabaka ile değiştiği görülmektedir. Filmlerin yansıma ve geçirgenlik spektrumları yardımıyla bulunan E_g değerlerinden, yasak enerji bant aralığının tüm filmler için yaklaşık olarak 4 eV civarında değere sahip olduğu ve katkılama veya alt tabaka ile çok fazla değişmediği anlaşılmaktadır. Farklı sıcaklıklarda iki nokta yöntemiyle yapılan elektriksel iletkenlik ölçümlerinden, Sb dışındaki tüm katkı atomları (In, Co, Cu ve Al) ile SnO₂ ince filmin iletkenliğinin azaldığı görülmektedir. Söz konusu tüm ince filmler için akım iletim mekanizması, 140-300 K sıcaklık aralığında

bariyer boyunca tünel etkisi ve 300-400 K sıcaklık aralığında sırt sırt vermiş Schottky engeli boyunca termoiyonik alan etkisi olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde heteroeklem yapılar için yapılan elektriksel iletkenlik ölçümlerinden, akım iletim mekanizmasının hem tuzak destekli tünelleme hem de termoiyonik emisyonndan oluştuğu, 160 K'den büyük sıcaklıklarda heteroeklem engelindeki taşıyıcıların termoiyonik emisyonunun diyot akım iletim mekanizmasında baskın hale geldiği grlmektedir. Heteroeklem yapıların sıcaklığa karşı alınan I-V, C-V ve C-f ölçümlerinden bulunan yapıya ait parametrelerden, en iyi idealite faktörü değerine % 3 Co:SnO₂/n-Si yapısının, % 5 In:SnO₂/n-Si yapısının en büyük doğrultma arpanına ve en düşük seri dirence sahip olduğu belirlenmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdel Rafea, M., Farag, A.A.M. and Roushdy, N. 2009. Structural and optical characteristics of nano-sized structure of $\text{Zn}_{0.5}\text{Cd}_{0.5}\text{S}$ thin films prepared by dip-coating method. *J. Alloys Compd.* 485; 660–666.
- Ahmed, Sk.F., Khan, S., Ghosh, P.K., Mitra, M.K. and Chattopadhyay, K.K. 2006. Effect of Al doping on the conductivity type inversion and electro optical properties of SnO_2 thin films synthesized by sol-gel technique. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 39(3); 241-247.
- 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.
- Akkılıç, K., Uzun, İ. and Kılıçoğlu, T. 2007. The calculation of electronic properties of an Ag/chitosan/n-Si Schottky barrier diode. *Synth. Met.*, 157; 297-302.
- Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N. and Tataroğlu, A. 2003. The role of interface states and series resistance on the I-V and C-V characteristics in Al/ SnO_2 /p-Si Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 47; 1847-1854.
- Aly, K.A., Dahshan, A. and Abousehly, A.M. 2008. Compositional dependence of the optical properties of amorphous $\text{Se}_{100-x}\text{Te}_x$ thin films. *Philosophical Magazine*, 88(1); 47-60.
- Ashok, S., Borrego, J.M. and Gutmann, R.J. 1979. Electrical characteristics of GaAs MIS Schottky diodes. *Solid-State Electronics*, 22(7); 621-631.
- Azzam, R.M.A. and Bashara, N.M. 1977. *Ellipsometry and polarized light*. North-Holland Personal Library, 558 pages, Amsterdam.
- Aziz, M.S., El-Mallah, H.M. and Mansour, A.N. 2009. Optical properties of Azo Dye (1-Phenylazo-2-Naphthol) thin films. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 48(2); 20401.
- Bagheri Mohagheghi, M. M., Shahtahmasebi, N., Alinejad, M.R., Youssefi, A. and Shokooh Saremi, M. 2008. The effect of the post-annealing temperature on the nano-structure and energy band gap of SnO_2 semiconducting oxide nano-particles synthesized by polymerizing-complexing sol-gel method. *Physica B*, 403; 2431-2437.
- Barış, B. 2014. Analysis of device parameters for Au/tin oxide/n-Si(100) metal-oxide-semiconductor diodes. *Physica B*, 438; 65-69.
- Basu, S. and Dutta, A. 1993. Studies on ZnO/p-Si Heterojunctions Fabricated by a Modified CVD Method. *Physica Status Solidi (a)*, 136; 267-272.

- Bohlin, K.E. 1986. Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. J. Appl. Phys., 60; 1223-1224.
- Caglar, Y., Ilican, S. and Caglar, M. 2007. Single-oscillator model and determination of optical constants of spray pyrolyzed amorphous SnO₂ thin films. Eur. Phys. J. B, 58; 251-256.
- 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.
- Champlain, J.G., Magno, R., Ancona, M., Newman, H.S. and Brad Boos, J. 2008. InAs-based heterostructure barrier varactor diodes with In_{0.3}Al_{0.7}As_{0.4}Sb_{0.6} as the barrier material. Solid-State Electronics, 52; 1829-1832.
- 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.
- Chattopadhyay, P. 1994. Effect of localized states on the current-voltage characteristics of metal-semiconductor contacts with thin interfacial layer. Solid-State Electronics, 37(10); 1759-1762.
- 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.
- Cova, P. and Singh, A. 1990. Metallic polythiophene/inorganic semiconductor Schottky diode. Solid-State Electronics, 33; 11.
- De Groot, A.W., McGonigal, G.C., Thomson, D.J. and Card, H.C. 1984. Thermionic-field emission from interface states at grain boundaries in silicon. J. Appl. Phys., 55; 312-317.
- Deng, H., Kong, J. and Yang, P. 2009. Optical and structural characteristics of Sb-doped SnO₂ thin films grown on Si (111) substrates by sol-gel technique. J. Mater. Sci: Mater Electron, 20; 1078-1082.
- Dua, L.K., De, A., Chakraborty, S. and Biswas, P.K. 2008. Study of spin coated high antimony content Sn-Sb oxide films on silica glass. Mater. Charact., 59; 578-586.
- Dua, L.K. and Biswas, P.K. 2013. Synthesis and photoluminescence property of nanostructured sol-gel antimony tin oxide film on silica glass. Chem. Phys. Lett., 572; 66-72.
- Elangovan, E., Ramesh, K. and Ramamurthi, K. 2004. Studies on the structural and electrical properties of spray deposited SnO₂:Sb thin films as a function of substrate temperature. Solid State Commun., 130(8); 523-527.

- El-Naggar, A.M., El-Zaiat, S.Y. and Hassan, S.M. 2009. Optical parameters of epitaxial GaN thin film on Si substrate from the reflection spectrum. *Optics&Laser Technology*, 41; 334-338.
- Gurakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2011. The Investigation of Undoped and Antimony Doped Tin Oxide Thin Films Grown by Spray Method. *Balkan Physics Letters*, 19; 77-84.
- Güllü, Ö., Asubay, S., Aydoğan, Ş. and Türüt, A. 2010. Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device. *Physica E*, 42(5); 1411-1416.
- Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2014. Electrical and microstructural properties of (Cu, Al, In)-doped SnO₂ films deposited by spray pyrolysis. *Advanced Materials Letters*, 5(6); 309-314.
- Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2015. Studies on optical properties of antimony doped SnO₂ films. *Applied Surface Science*, 352; 16-22.
- Haireche, S., Boumeddiene, A. Guittoum, A., El Hdiy, A. and Boufelfel, A. 2013. Structural, morphological and electronic study of CVD SnO₂:Sb films. *Mater. Chem. Phys.*, 139; 871–876.
- Holm, R. 1951. The Electric Tunnel Effect across Thin Insulator Films in Contacts. *J. Appl. Phys.*, 22; 1217.
- Huang, Y., Li, G., Feng, J. and Zhang, Q. 2009. Investigation on structural, electrical and optical properties of tungsten-doped tin oxide thin films. *Thin Solid Films*, 518(8); 1892-1896.
- Joseph, D.P., Renugambal, P., Saravanan, M., Raja, S.P. and Venkateswaran, C. 2009. Effect of Li doping on the structural, optical and electrical properties of spray deposited SnO₂ thin films. *Thin Solid Films*, 517(21); 6129-6136.
- Jousse, D. 1985. Transport properties of highly doped polycrystalline and amorphous SnO₂ films. *Phys. Rev. B.*, 31(8); 5335-5342.
- Juybari, H.A., Bagheri-Mohagheghi, M.-M., Ketabi, S.A. and Shokooh-Saremi, M. 2010. Fabrication and characterization of transparent p–n and p–i–n heterojunctions prepared by spray pyrolysis technique: Effect of post-annealing process and intrinsic middle layer. *Physica E*, 43; 93-96.
- Karunakaran, C., Sakthi, R.S. and Gomathisankar, P. 2013. Microstructures, optical, electrical and photocatalytic properties of sonochemically and hydrothermally synthesized SnO₂ nanoparticles. *J. Alloys Compd.*, 549; 269-275.
- Kern, W. 1993. *Handbook of Semiconductor Wafer Cleaning Technology: Science, Technology, and Applications*. Noyes Publishing, 623, New Jersey.

- Khan, A. F., Mehmood, M., Aslam, M. and Ashraf, M. 2010. Characteristics of electron beam evaporated nanocrystalline SnO₂ thin films annealed in air. *Applied Surface Science*, 256(7); 2252–2258.
- Khashan, M.A. and El-Naggar, A.M. 2000. A new method of finding the optical constants of a solid from the reflectance and transmittance spectrograms of its slab. *Optics Communications*, 174; 445–453.
- Khrypunov, G., Romeo, A., Kurdesau, F., Batzner, D.L., Zogg, H. and Tiwari, A.N. 2006. Recent developments in evaporated CdTe solar cells. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 90(6); 664–677.
- Kikuchi, N., Kusano, E., Kishio, E. and Kinbara, A. 2002. Electrical and mechanical properties of SnO₂:Nb films for touch screens. *Vacuum*, 66(3-4); 365–371.
- Kojima, M., Kato, H. and Gatto, M. 1993. Blackening of tin oxide thin films heavily doped with antimony. *Philos. Mag. B*, 68; 215–222.
- Kortüm, G. 1969. *Reflectance spectroscopy (principles, methods, applications)*. Springer-Verlag, 366, Berlin.
- Lee, S.-Y. and Park, B.-O. 2006. Structural, electrical and optical characteristics of SnO₂:Sb thin films by ultrasonic spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 510; 154–158.
- Ling, T.-R. and Tsai, C.-M. 2006. Influence of nano-scale dopants of Pt, CaO and SiO₂, on the alcohol sensing of SnO₂ thin films. *Actuators Sens.*, B, 119(2); 497–503.
- Maleki, M. and Rozati, Sayed M. 2013. Dependence of Si/SnO₂ Heterojunction Properties on Growth Temperature and Type of Silicon. *Chem. Vap. Deposition*, 19; 290–294.
- Mangamma, G. and Gnanasekaran, T. 2000. Modeling of atmosphere sensitive heterojunctions for device applications. *Technical Proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems*, 8; 408–411.
- 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 thin film. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 9; 1002–1004.
- Manifacier, J.C., De Murcia, M. and Fillard, J.P. 1977. Optical and electrical properties of SnO₂ thin films in relation to their stoichiometric deviation and their crystalline structure. *Thin Solid Films*, 41(2); 127–135.
- Martínez-Antón, J.C. 2000. Determination of optical parameters in general film-substrate systems: a reformulation based on the concepts of envelope extremes and local magnitudes. *Appl. Opt.*, 39(25); 4557–68.

- Mauk, P.T., Tavakolian, H. and Sites, J.R. 1990. Interpretation of Thin Film Polycrystalline solar cell capacitance. *IEEE Trans. Electron Devices*, 37; 422-427.
- Mazloom, J., Ghodsi, F.E. and Gholami, M. 2013. Fiber-like stripe ATO ($\text{SnO}_2\text{:Sb}$) nanostructured thin films grown by sol-gel method: optical, topographical and electrical properties. *J. Alloys Compd.*, 579; 384-393.
- Montero, J., Herrero, J. and Guillen, C. 2010. Preparation of reactively sputtered Sb-doped SnO_2 thin films: structural, electrical and optical properties, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 94(3); 612-616.
- Moss, T.S. 1959. *Optical Properties of Semiconductors*. Butterworths Scientific Publications, 279 p., London.
- Màrquez, E., Ramirez-Malo, J., Villares, P., Jimenez-Garay, R., Ewen, P.J.S. and Owen, A.E. 1992. Calculation of the thickness and optical constants of amorphous arsenic sulphide films from their transmission spectra. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 25(3); 535-541.
- Minkov, D.A. 1989. Calculation of the optical constants of a thin layer upon a transparent substrate from the reflection spectrum. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 22; 1157-1161.
- Mridha, S. and Basak, D. 2006. Investigation of a p-CuO/n-ZnO thin film heterojunction for H_2 gas-sensor applications. *Semiconductor Science and Technology*, 21; 928-932.
- Nagatomo, T., Endo, M. and Omoto, O. 1979. Fabrication and Characterization of $\text{SnO}_2/\text{n-Si}$ solar cells. *Jpn J Appl Phys*; 18(6); 1103-1109.
- Nash, T.R. and Anderson, R.L. 1977. Accelerated Life Tests of $\text{SnO}_2\text{-Si}$ Heterojunction Solar Cells. *IEEE Trans. Electron. Devices*, 24(4); 468-472.
- Nassau, K. 1978. The origins of color in minerals. *Am. Mineral*, 63; 219-229.
- 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.
- Orton, J.W. and Powell, M.J. 1980. The Hall effect in polycrystalline and powdered semiconductors. *Rep. Prog. Phys.*, 43; 1263-1307.
- Osiris, W.G., Farag, A.A.M. and Yahia, I.S. 2011. Extraction of the device parameters of Al/P₃OT/ITO organic Schottky diode using *J-V* and *C-V* characteristics. *Synth. Met.*, 161; 1079-1087.

- Ouni, B., Boukhachem, A., Dabbous, S., Amlouk, A., Boubaker, K. and Amlouk, M. 2010. Some transparent semi-conductor metal oxides: Comparative investigations in terms of Wemple –DiDomenico parameters, mechanical performance and Amlouk-Boubaker opto-thermal expansivity. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 13; 281-287.
- Quan, D.T. and Hbib, H. 1993. High barrier height Au/n-type InP Schottky contacts with a $\text{PO}_x\text{N}_y\text{H}_z$ interfacial layer. *Solid-State Electron*, 36(3); 339-344.
- Padovani, F.A. and Summer, G.G. 1965. Experimental Study of Gold-Gallium Arsenide Schottky Barriers. *J. Appl. Phys.*, 36; 3744-3747.
- Peršin, M., Vlahović, B. and Urli, N. 1990. Some electrical and photovoltaic properties of poly-Si/SnO₂ heterojunction. *Vacuum*, 40(1-2); 209-211.
- Potter, R.F. 1985. *Handbook of Optical Constants of Solids*. Academic Press, 465, Orlando.
- Ravichandran, K. and Philominathan, P. 2008. Fabrication of antimony doped tin oxide (ATO) films by an inexpensive, simplified spray technique using perfume atomizer. *Materials Letters*, 62; 2890-2893.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. 1988. *Metal-semiconductor Contacts*. Clarendon Press, 252, Oxford.
- Sakhare, R.D., Khuspe, G.D., Navale, S.T., Mulik, R.N., Chougule, M.A., Pawar, R.C. Lee, C.S., Sen, Shashwati and Patil, V.B. 2013. Nanocrystalline SnO₂ thin films: structural, morphological, electrical transport and optical studies. *J. Alloys Compd.*, 563; 300–306.
- Sato, K. and Yasamura, Y. 1985. Study of Forward I-V plot for Schottky Diodes With High Series Resistance. *J. Appl. Phys.*, 58; 3655-3657.
- Serin, T., Serin, N., Karadeniz, S., Sarı, H., Tuğluoğlu, N. and Pakma, O. 2006. Electrical, structural and optical properties of SnO₂ thin films prepared by spray pyrolysis. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 352; 209-215.
- Seto, J.Y.W. 1975. The electrical properties of polycrystalline silicon films. *J. Appl. Phys.*, 46; 5247-5254.
- Shanthi, E., Dutta, V., Banerjee, A. and Chopra, K.L. 1980. Electrical and optical properties of undoped and antimony-doped tin oxide films. *J. Appl. Phys.*, 51; 6243–6251.
- Shanthi, S., Subramanian, C. and Ramasamy, P. 1999. Growth and chracterization of antimony doped tin oxide thin films. *Journal of Crystal Growth*, 197; 858-864.

- Sharma, B.L. and Purohit, R.K. 1974. Semiconductor Heterojunctions. Pergamon Press Ltd., 224, Hungary.
- 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.
- Sokolov, A.V. 1967. Optical Properties of Metals. Elsevier, 472 pp., New York.
- Swanepoel, R. 1983. Determination of the thickness and optical constants of amorphous silicon. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 16; 1214-1222.
- Swanepoel, R. 1984. Determination of surface roughness and optical constants of inhomogeneous amorphous silicon films. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 17; 896-903.
- Sze, S.M. 1981. Physics of Semiconductor Devices. 2nd Ed. John Wiley&Sons Publ., 654, New York.
- Tavakolian, H. and Sites, J.R. 1988. Effect of interfacial states on open-circuit voltage. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twentieth IEEE, 2; 1608-1613.
- Tarnag, M.L. 1978. Carrier transport in oxygen-rich polycrystalline-silicon films. J. Appl. Phys., 49; 4069-4076.
- Tauc, J. 1972. Optical Properties of Solids. North-Holland Publ., 279, Amsterdam.
- Temple, P.A. 1985. Thin film absorbance measurements using laser calorimetry, Handbook of Optical Constants of Solids. Academic Press, 135, Orlando.
- Tuğluoğlu, N. 2007. ⁶⁰Co γ -ray irradiation effects on the interface traps density of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si (1 1 1) substrates. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. Sect. B; 254(1); 118-124.
- Varma, S., Rao, K.V. and Kar, S. 1984. Electrical characteristics of silicon-tin oxide heterojunctions prepared by chemical vapor deposition. J. Appl. Phys., 56; 2812-2822.
- Vijayalakshmi, S., Venkarataj, S., Subramanian, M. and Jayavel, R.J. 2008. Physical properties of zinc doped tin oxide films prepared by spray pyrolysis technique. Phys. D: Appl. Phys., 41(3); 035505 (7pp).
- Ward, L. 1994. The Optical Constants of Bulk Materials and Films. Institute of Physics Publishing, 293, Bristol.
- Wemple, S.H. and DiDomenico, W. 1971. Behavior of the Electronic Dielectric Constant in Covalent and Ionic Materials. Phys. Rev. B, 3(4); 1338-1351.

- Whitney, J.E. and Davidson, N. 1949. A Spectrophotometric Investigation of the Interaction between Antimony (III) and (V) in Hydrochloric Acid Solutions. *J. Am. Chem. Soc.*, 71(11); 3809-3816.
- Xiao, X., Dong, G., Shao, J., He, H. and Fan, Z. 2010. Optical and electrical properties of SnO₂:Sb thin films deposited by oblique angle deposition. *Appl. Surf. Sci.*, 256(6); 1636–1640.
- Yu, S., Ding, L., Xue, C., Chen, L. and Zhang, W.F. 2012. Transparent conducting Sb-doped SnO₂ thin films grown by pulsed laser deposition. *J. Non-Cryst. Solids*, 358(23); 3137–3140.
- Zhukova, A.A., Rumyantseva, M.N., Zaytsev, V.B., Zaytseva, A.V., Abaku-mov, A.M. and Gaskov, A.M. 2013. Pd nanoparticles on SnO₂(Sb) whiskers: aggregation and reactivity in CO detection, *J. Alloys Compd.*, 565; 6–10.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sibel GÜRAKAR

Doğum Yeri : Demirci

Doğum Tarihi : 27.03.1984

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ankara Atatürk Lisesi (2002)

Lisans : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
Fizik Mühendisliği Bölümü (2006)

Yüksek Lisans: Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik
Mühendisliği Anabilim Dalı (Temmuz 2009)

Çalıştığı Kurumlar ve Yılları

Kurum : Genelkurmay Başkanlığı (2008-2009)

Kurum : Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik
Mühendisliği Bölümü (2009---)

SCI Yayınlar

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2015. Studies on optical properties of antimony doped SnO₂ films. Applied Surface Science, 352;16-22.

Serin, T., **Gürakar, S.,** Ot, H., Yıldız, A. and Serin, N. 2015. Influence of oxygen flow rate in CuO. Applied Surface Science, 352; 155-157.

Serin, T., **Gürakar, S.,** Serin, N., Yıldırım, N. and Özyurt Kuş, F. 2009. Current flow mechanism in Cu₂O/p-Si heterojunction prepared by chemical method. J. Phys. D: Appl.Phys., 42; 225108.

Hakemli Dergiler

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2014. Electrical and microstructural properties of (Cu,Al,In)-doped SnO₂ films deposited by spray pyrolysis. Adv. Mat. Lett., 5(6); 309-314.

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. 2011. The Investigation of Undoped and Antimony Doped Tin Oxide Thin Films Grown by Spray Method. Balkan Physics Letters, 19; 77-84.

Uluslararası Kongreler

Yıldız, A., Uzun, Ş., **Gürakar, S.**, Kara, İ., Serin, N. and Serin, T. Effects of Co and Cu dopants on the structural, optical, and electrical properties of ZnO nanocrystals. Nanoscience & Nanotechnology for Next Generation (NANONG 15) International Conference, October 29-31 2015, Antalya, Turkey.

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. Studies on optical properties of antimony doped SnO₂ films. 10th International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM 10), 22-28 September 2014, Iași, Romania.

Serin, T., **Gürakar, S.**, Ot, H., Yıldız, A. and Serin, N. Influence of oxygen flow rate in CuO. 10th International Conference on Physics of Advanced Materials (ICPAM 10), 22-28 September 2014, Iași, Romania.

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. Optical Properties of Undoped and Antimony Doped SnO₂ Films. Humboldt Kolleg 2014, June 11-13, 2014, Ankara University, Ankara, Turkey.

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. Electrical and microstructural properties of (Cu, Al, In)-doped SnO₂ films deposited by spray pyrolysis. AMWC 2013: Advanced Materials World Congress, September 16-19, 2013, İzmir, Turkey.

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. The Investigation of Undoped and Antimony Doped Tin Oxide Thin Films Grown by Spray Method. Turkish Physical Society 27th International Physics Congress, 14-17/09/2010, İstanbul, Turkey.

Ulusal Kongreler

Gürakar, S., Serin, T. and Serin, N. Kimyasal Yöntemle Büyütülen Bakır Oksit İnce Filmlerin Yapısal, Optiksel ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. 17. Yoğun Madde Fiziği-Ankara Toplantısı, 5 Kasım 2010, Ankara Üniversitesi, Ankara.