



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

KATKISIZ VE KOBALT KATKILI NiO TABANLI
DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL
KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mehmet ÖZGÜR

Danışman
Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Nisan-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Mehmet ÖZGÜR tarafından hazırlanan “KATKISIZ VE KOBALT KATKILI NİO TABANLI DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Osman PAKMA

.....

Danışman

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

.....

Üye

Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA

Lisansüstü Eğitim Enstitü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Mehmet ÖZGÜR
Tarih: 29/04/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KATKISIZ VE KOBALT KATKILI NiO TABANLI DİYOTLARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Mehmet ÖZGÜR

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 50 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Prof. Dr. Osman PAKMA

Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

Bu çalışmada, sol jel spin kaplama yöntemi ile katkısız ve kobalt katkılı nikel oksit ince filmleri cam alttaşlar ve n-tipi silisyum alttaşlar üzerine kaplandı. İlk etapta cam alttaşlar üzerine kaplanan ince filmlerin elektriksel iletkenlikleri incelendi. Daha sonra n-Si alttaşlar üzerine yapılan kaplama ile heteroeklem yapıları üretildi. Elde edilen bu heteroeklem yapıların düz ve ters beslem akım-voltaj (I-V) karakteristikleri Termiyonik Emisyon (TE) teorisi kullanılarak incelendi. Üretilen tüm yapıların doğrultma davranışı sergiledikleri gözlemlendi. Diyotların idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_B) ve doğrultma oranı (RR) ile Norde fonksiyonu yardımı ile seri direnç gibi diyotunun temel elektriksel parametreleri hesaplandı. Yapılan ölçümler sonucunda kobalt katkılıdırmanın üretilen ince filmler üzerindeki etkisi araştırıldı. Bununla birlikte, 10 kHz – 1 MHz frekans aralığında kapasitans-voltaj (C-V) ve iletkenlik-voltaj (G/w-V), seri direnç-voltaj (R_s -V) ve arayüzey durumları (Dit) grafikleri çizilip incelendi. Diyotların 1 MHz frekansta (C^{-2} -V) grafikleri kullanılarak N_d (cm^{-3}), V_{bi} (eV), N_c (cm^{-3}), E_f (eV), Φ_b (C-V) E_v , W_d (nm), $\Delta\Phi_b$ (eV) ve E_{max} (V/cm) gibi elektriksel parametreleri hesapladı. Elde edilen hesaplamalar sonucunda tüm elektriksel parametrelerin katkı miktarına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu gözlemlendi. İlave olarak, elde edilen bulgular kobalt katkısı ile diyotların elektriksel parametrelerinin ayarlanabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Heteroeklem Yapılar, İnce Film, Kobalt Oksit, Nikel Oksit

ABSTRACT

MSTHESIS

FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF UNDOPED AND COBALT DOPED NiO-BASED DIODES

Mehmet ÖZGÜR

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS**

Advisor: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 50 Pages

Jury

Assoc. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR

Prof. Dr. Osman PAKMA

Assoc. Prof. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

In this study, undoped and cobalt-doped nickel oxide thin films were deposited on glass substrates and n-type silicon substrates by sol gel spin coating method. In the first step, the electrical conductivity of thin films, which was coated on glass substrates, was investigated. Then, heterojunction structures were produced by thin films coated on n-Si substrates. The forward and reverse current-voltage (I-V) characteristics of these heterojunction structures were investigated by using Thermionic Emission (TE) theory. It was observed that all fabricated structures exhibited rectification behavior. The basic electrical parameters of the diode such as ideality factor (n), barrier height (Φ_B), rectification ratio (RR) and series resistance were calculated and compared. As a result of the measurements, the effect of cobalt doping on the fabricated heterojunctions was investigated. In addition, capacitance-voltage (C-V) and conductivity-voltage (G/w-V), series resistance-voltage (R_s -V) and interface states (D_{it}) graphs were plotted and analyzed in the frequency range of 10 kHz – 1 MHz. Electrical parameters of diodes such as N_d (cm⁻³), V_{bi} (eV), N_c (cm⁻³), E_f (eV), Φ_b (eV), W_d (nm), $\Delta\Phi_b$ (eV) and E_{max} (V/cm) were calculated by using the capacitance values at 1 MHz. As a result of the calculations, it was observed that all electrical parameters were strongly dependent on the amount of dopant. In addition, this study shows that electrical parameters of diodes can be adjusted with cobalt doping.

Keywords: Cobalt Oxide, Heterojunction Structures, Nickel Oxide, Thin Film

ÖNSÖZ

Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmada Sol-Jel spin kaplama yöntemi ile oluşturulan NiO ve CoO ince filmlerin elektriksel ve optiksel karakterizasyonları incelendi.

Tez çalışmama başladığım ilk günden beri bana büyük destek olan, laboratuvar çalışmaları ve ölçümlerin değerlendirilmesine kadar her aşamada yardımlarını esirgemeyen, hiç bitmeyen desteği, sabrı ve sevgisi için çok kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şerif RÜZGAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma sırasındaki yardım ve yorumları için yakın dostum Yahya CENGİZ'e teşekkür ederim.

Tez çalışmalarım boyunca bana yardım eden dostlarıma da teşekkürlerimi ifade etmek isterim.

Son olarak, hayatım boyunca bana gösterdikleri sonsuz sevgi, destek ve sabır için aileme özellikle de EŞİME teşekkür ve sevgilerimi sunuyorum.

Mehmet ÖZGÜR
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
MSTHESIS	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	ix
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	5
3.1. Kuramsal Temeller.....	5
3.1.1. Şeffaf İletken ve Yarı İletken Oksitler.....	5
3.1.2. Kobalt Katkılı NiOx İnce Filmler.....	7
3.1.3. Yarı İletkenlerde Akım İletimi	9
3.1.4. Homoeklemler ve Heteroeklemeler	12
3.1.5. P-n Bağlantıları.....	14
3.1.6. p-NiO/n-Si Enerji Band Diyagramı	15
3.1.7. Diyotlarda Akım Taşıma Teorisi	16
3.1.8. Metal-Yarı İletken Bağlantı Kapasitesi	20
3.1.9. Diyotların Temel Elektriksel Parametreleri.....	22
3.1.10. C-V Ara Yüzey Durumları	24
3.1.11. İnce Film Üretim Yöntemi.....	26
3.2. Deneysel Aşamalar.....	27
3.2.1. Deney Çözeltisi Hazırlama	27
3.2.2. Çözelti Hazırlık Aşaması	28
3.2.3. İnce Film Kaplama Aşaması.....	31
3.2.4. Ni _x Co _{1-x} O / n-Si/ Ag Diyotların Fabrikasyonu ve Elektriksel Ölçümü	33
4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35
4.1.Elde Edilen İnce Filmlerin I-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	35
4.2.Elde Edilen Diyotların I-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri.....	35
4.3.Elde Edilen Diyotların F-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri.....	38
4.4.Elde Edilen Diyotların C-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	40
4.5.Elde Edilen Diyotların G-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	41
4.6.Elde Edilen Diyotların R _s -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	42
4.7.Elde Edilen Diyotların C ⁻² -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	44
4.8.Elde Edilen Diyotların D _{it} -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri.....	46

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48
5.1.Sonuçlar.....	48
5.2 Öneriler	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	58

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A^*	: Richardson sabiti
A	: Diyotun etkin alanı
C	: Kapasite
D	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
E	: Elektron yükü
E_a	: Düşük alıcı durumu
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi Seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_0	: Vakum seviyesi
eV	: Elektron volt
Ev	: Valans bandı
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
F	: Frekans
H	: Planc sabiti
I_0	: Ters beslem akımı
K	: Boltzmann sabiti
m	: Kütle
M	: Molarite
MA	: Molekül kütlesi
n	: Mol
N_d	: Alıcı konsantrasyonu
R_s	: Seri direnç
Q	: Elektron yükü
T	: Mutlak sıcaklık
V	: Uygulanan potansiyel
V_{bi}	: İçyapı potansiyeli
V_F	: İleri beslem gerilimi
V_R	: Geri beslem gerilimi
W	: Deplasyon bölgesi
X	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
λ	: X-ışınlarının dalga boyu
Ω	: Direnç birimi
Φ_B, Φ_b	: Schottky engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_n	: n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_p	: p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
γ	: Norde yönteminde bir sabit
δ	: Arayüzey kalınlığı

Kısaltmalar

AFM	: Atomik kuvvet mikroskobu
AZO	: Alüminyum katkılı çinko oksit
BH	: Engel yüksekliği
C-F	: Kapasite-frekans
CTAB	: Setil trimetil amonyum bromür
C-V	: Kapasite-gerilim
EDS	: Dispersif spektroskopi
FTO	: Flor katkılı kalay oksit
HF	: Hidroflorik asit
HTM	: Delik taşıma malzemesi
ITO	: Kalay katkılı indium oksit
I-V	: Akım-Voltaj
MEA	: Monoethanolamin
MOS	: Metal oksit yarıiletken
TCO	: Şeffaf iletken oksitler
TSO	: Şeffaf yarıiletken oksitler

1.GİRİŞ

Nanomalzemeler çok küçük ölçekte üretilir ve kullanılır. Nanomalzemeler, makro kıyasla benzersiz fiziksel, kimyasal ve yapısal özelliklerinden dolayı, biyolojik araştırma, tıbbi tedavi, nükleer, fotokataliz, yarıiletken ve yalıtkan gibi birçok uygulamada kullanılmaktadırlar. (Shao, 2013; Buzea, 2007; Narayan, 2004). Nano malzemelerin dökme malzemelere göre birçok avantajı olmasına rağmen, nanomalzemelerin uygulamalarında birçok zorluk vardır. Mikron ölçeğinde problemlili olmayan fiziksel sorunlar, malzemelere kuantum ve yüzey etkilerinin ortaya çıkması ve bu etkilerin tam anlaşılabilmesi nedeniyle nano ölçekler için sorun olmaktadır. Ayrıca, nanomalzemelerin yüksek yüzey/hacim oranı, çeşitli uygulamalarda yüzey/arayüz etkilerinin baskın olmasına neden olur. Bu durum uygulama tasarımını ve modellemeyi dökme malzemelere göre çok daha karmaşık hale getirir (Shao, 2013).

Düşük boyutlu metal oksit malzemeler, dökme malzemelere kıyasla birçok avantaja sahiptir. Bunlar aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Yüksek yüzey/hacim oranı ışığın daha iyi emilmesine katkıda bulunur,
- Nanoparçacıkların boyutunun küçülmesi, kuantum hapsetme etkileri sayesinde algılama dalga boylarının ayarlanmasını sağlar,
- Yüksek kuantum verimliliği optik sinyallerin elektrik sinyaline dönüştürmeyi sağlar,
- Malzemelerin performansını iyileştirmek için ek yüzey kaplama işlemleriyle uyumlu ve alt tabakanın malzeme üzerindeki bağımsızlığı.

Düşük boyutlu metal oksit malzemelerin bu avantajları, onları gaz sensörleri, fotokatalitikler, fotodedektörler, güneş pilleri ve ışık yayan diyotlar (LED'ler) dâhil olmak üzere çeşitli uygulamalar için umut verici aday malzeme haline getirir.

Gelişen elektronik komponentler, elektroniğin geleceğini şekillendirmede önemli rol oynar. Yarıiletkenler ve iletkenler saydam elektroniğin uygulanmasında gerekli olan temel malzemelerdir. İlk geliştirilen saydam elektronik aygıtların temelinde oksit malzemeler bulunmaktadır.

Yıllarca süren çalışma ve geliştirmeden sonra, n-tipi şeffaf yarı iletken oksitler (TSO'lar) piyasaya tanıtıldı (Fortunato, 2012). N-tipi TSO'ların ticari başarısına baktığımızda performansı hala geride kalmaktadır. Bununla birlikte, uygulama alanlarını genişletmek ve şeffaf elektroniklerin daha yüksek verim verebilmesini sağlamak için p-

tipi TSO malzemelerinin araştırılması ve incelenmesi gereklidir (Robinson, 1984; Klauk, 2007). Görünür aralık şeffaflığı ve elektriksel iletkenliği birleştiren TCO'lar ve TSO'lar prensipte güneş pilleri, katı hal sensörleri, düz panel ekranlar, akıllı pencereler, elektrokromik, şeffaf ve esnek elektronik cihazlar dahil olmak üzere çeşitli uygulamalarda büyük potansiyele sahiptir. (Wang, 2012; Shokouh, 2015; Heo, 2013; Xue, 2016). Örneğin, yüksek performanslı TSO'lar kullanılarak, daha yüksek piksel yoğunluğuna (daha yüksek çözünürlük) ve daha yüksek yenileme frekansına sahip şeffaf ekranlar üretilebilir (Pu, 2012).

P-tipi yarıiletken oksidin keşfedilmesi çok büyük bir dönüm noktasıdır. Bu alandaki her bir başarı hem oksit malzemelerinin teorik anlayışında hem de malzeme büyümesi için deneysel zorluklarda önemli gelişmeler içerir (Wang, 2016; Kawazoe, 1997; Yanagi, 2000). Yıllar boyunca süren çabalardan sonra hem fizik hem malzeme alanında temel cihaz uygulamalarında çeşitli p-tipi yarı iletken oksitler keşfedildi. Malzeme ve cihaz işlemede sistematik optimizasyon ile, bu umut verici p-tipi TSO'lardan bazıları, n-tipi TSO'larla bile karşılaştırılabilir bir performans göstermektedir. Aynı zamanda p-tipi TSO'ların geliştirilmesiyle birlikte, p ve n-tipi TSO'ların ilk entegrasyonları p-n bağlantı cihazlarında kullanılmaktadır (Zou, 2011; Caraveo, 2013; Schein, 2014).

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yüksek işlevselliğe sahip yarıiletkenler, yarıiletken bilimi ve teknolojisindeki son gelişmelerden dolayı yoğun ilgi görmektedir (Saha, 2017). Yüksek çevresel ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle ağırlıklı olarak metal oksit yarı iletkenler, araştırmacıların özel ilgisini çekmektedir (Wang ve Sun, 2015). Metal oksitlerde oluşturulan delikler oldukça lokalize olduğundan, bu tip p-tipi yarı iletkenlerde sorunlar ortaya çıkar (Luo, 2016). Bu nedenle, iyi bir heteroeklem üretmeye aday bu tür p-tipi metal oksit yarı iletkenler üretmek için önemli çabalar gösterilmektedir (Lin, 2016). CuO ve NiO bu tür iki yarıiletken oksittir. CuO'da valans bandında O 2p orbitallerinin güçlü lokalizasyonu nedeniyle taşıyıcılar güçlü bir şekilde lokalizedir ve enerji bandındaki boşluk da nispeten düşüktür (Saha, 2017). Bu nedenle uygun p-tipi yarıiletken bulmada, valans bandının nispeten delokalize delik durumlarıyla değiştirilmesi gerekir (Isseroff, 2013; Devizis, 2015).

Shimbori ve ark. (2020), p-tipi NiO yarıiletkenini iyon destekli e-ışın buharlaştırma yöntemi ile n-tipi β -Ga₂O₃ üzerine büyütürken NiO/ β -Ga₂O₃ diyotunu ürettir. Üretilen diyotlar, $\pm 4V$ 'de 10^6 'dan büyük doğrultma oranı ile yüksek doğrultucu akım-voltaj özelliklerini sergilediklerini rapor ettiler.

R.K. Gupta ve ark. (2014), katkısız ve Cu katkılı NiO filmleri sol-jel spin kaplama yöntemi ile ürettir. Cu katkılamanın NiO filmlerinin optik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırdılar. NiO filmlerinin optik bant aralığı değeri Cu katkılama seviyesinin artmasıyla azaldığını ifade ettiler. Bu filmleri kullanarak Al/Cu-NiO/p Si/Al diyotlarını üreterek I-V ve C-V karakteristiklerini incelediler.

Titas Dutta ve ark. (2010), Li katkılı NiO Li_xNi_{1-x}O ince filmleri darbeli lazer biriktirme ile c-safir üzerinde epitaksiyel olarak büyüttüler. Filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerini sırasıyla x-ışını kırınımı, dört prob tekniği ve UV-görünür spektrumları yöntemlerini kullanarak araştırdılar. Li katkılı NiO'nun safir üzerindeki epitaksiyel büyümesini, yüksek çözünürlüklü x-ray Q taramasını kullanarak gözlemlediler. Biriktirme koşulunun ve Li katkılı konsantrasyon değişimlerinin, Li katkılı Li_xNi_{1-x}O filmlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerindeki etkilerini de araştırdılar. Direnç verilerinin analizi, katkılı Li iyonlarının filmlerdeki ikame bölgelerini işgal ettiğini ve p-tipi iletkenliği artırdığını gözlemlediler. Ayrıca n-ZnO ile optimize edilmiş p-Li katkılı NiO için bir p-n heteroeklem ürettir. i-MgZnO'nun p ve n katmanları arasında eklenmesi, azaltılmış sızıntı akımı nedeniyle akım-voltaj özelliklerinin iyileştirilmesine neden olduğunu gözlemlediler. Diyot yapısında NiO, MgZnO, ZnO, GZO ve Al₂O₃ tabakaları arasındaki heteroepitaksiyel ilişkiyi gözlemlediler. p-i-n heteroeklem yapılarının 2,8 V'luk açma voltajı ve 8,0 V'luk arıza voltajı ile iyi bir düzeltme davranışı gösterdiğini ortaya koydular.

R.O. Ocaya ve ark. (2016), Al/p-Si/Zn_{1-x}Al_xO-NiO/Al Schottky diyotun $x=0,005$ değeri için cihaz parametreleri, doğru akım-voltaj (I-V) ve empedans spektroskopisi kullanılarak 50 K - 400 K sıcaklık aralığında incelediler. Filmleri sol-jel yöntemi ve ardından p-Si alttaş üzerine spin kaplama yöntemi kullanarak hazırladılar. Diyotun idealite faktörü, engel yüksekliği, direncin ve kapasitansının sıcaklığa bağlı olduğunu gözlemlediler. Kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleri sonucunda, artan frekansla kapasitansın azaldığını, bu durum 100 kHz ile 1MHz frekans aralığında incelenen arayüz durumlarının sürekli bir dağılım gösterdiğini ifade ettiler. Diyotun ara yüzey durum yoğunlukları (N_{ss}) hesaplandı ve 50K-300K ve 300K-400K'lık iki sıcaklık bölgesinde

yanlılık ve sıcaklık fonksiyonları olarak pik noktasına ulaştı. Yaklaşık $10^{12}/\text{eV cm}^2$ 'lik bir tepe değeri 350 K için 0.7 V civarında ve $3 \times 10^{12}/\text{eV cm}^2$ 'de 300 K için yaklaşık 2,2V sapmada gözlemlendi. Diyotun arayüz durumlarının sıcaklık tarafından kontrol edildiğini gözlemlediler. Bu durum, Al/p-Si/Zn_{1-x}Al_xO-NiO/Al diyotun düşük sıcaklık uygulamaları için termal sensörler olarak kullanılabileceğini ortaya koydular.

B. Saha ve ark. (2017), bu çalışmada, iyi bir metal oksit deliği taşıma tabakası elde etmek için NiO'da doğal kusurların oluşumu yoluyla yük taşıyıcılarının yer değiştirmesi denenmiş. Bu nedenle, flor katkılı kalay oksit (FTO) kaplamalı cam alttaş üzerinde sol-jel işlemi ile p-tipi NiO ve n-tipi FTO'nun bir hetero-bağlantısı hazırladılar. Tavlama yoluyla oksidasyon sırasında Ni boşlukların ortaya çıktığını gözlemlediler. X-ışını kırınım ölçümünden yapısal özellikler, iyi kristalli NiO nano parçacıklarının oluşumunu ve taramalı elektron mikroskopundan elde edilen görüntülerde NiO nano parçacıklarının homojen dağılımını gözlemlediler.

NiO filminde p-tipi iletkenliğin oluşumu, kafesteki boşluklar veya ara boşluklar gibi kristal kusurlarından kaynaklanan delokalize kusur taşıyıcılarının oluşumu olduğunu ortaya koydular.

Ni boşluğu, değerlik bandı maksimumuna göre sığ seviyeler oluşturur ve bunlar kolayca delikler oluşturur. Bu nedenle, NiO'nun doğal bir p-tipi iletkenliği, Ni boşluklarından kaynaklanır. Böylece NiO, FTO ile arayüzde uygun bir heteroeklem oluşturan bir delik taşıma ortamı olarak elde edildi.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kuramsal Temeller

3.1.1. Şeffaf İletken ve Yarı İletken Oksitler

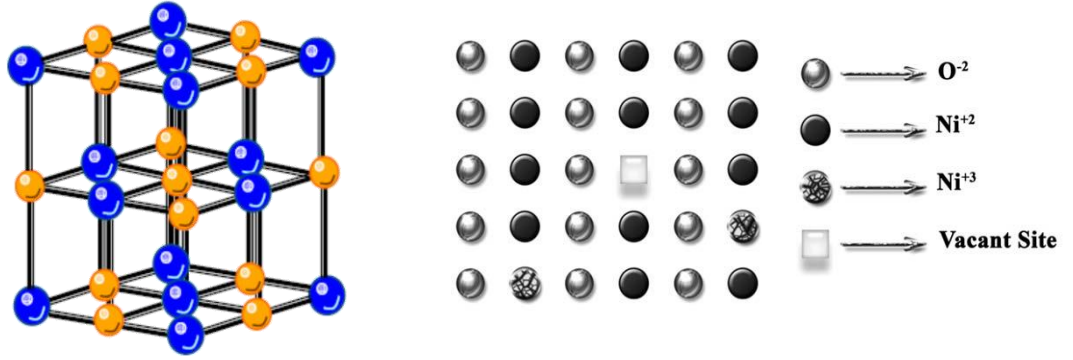
Şeffaf iletken oksitler (TCO'lar), optik şeffaflık ve elektriksel iletkenlik özelliklerine sahip metal oksit malzemelerdir (Ginley, 2010). Optik şeffaflık, ana oksit malzemelerinin geniş bant aralığından kaynaklanır. Katkılanmamış konak oksit malzemeleri büyük bant boşluğu nedeniyle yalıtıktır. TCO'lardaki elektriksel iletkenlik, Fermi seviyesini Burstein-Moss geçişi ile minimum iletim bandının (CB) ötesine kaydıran dejenere doping tarafından yapay olarak indüklenir (Facchetti, 2010). Elektronların kütleleri ihmal edilebilecek seviyede olması nedeniyle yüksek hareketliliğe sahiptir. Bu durum elektronların iletim bandındaki boşluklara kolaylıkla geçebilmesini sağlar. İletim bandındaki boşlukların düşük yoğunluğu nedeniyle optik soğurmadaki artış oldukça sınırlı olduğundan optik şeffaflık hala korunabilir (Facchetti, 2010). En yaygın olarak kullanılan şeffaf iletken oksitler arasında kalay katkılı indiyum oksit (ITO), flor katkılı kalay oksit (FTO) ve alüminyum katkılı çinko oksit (AZO) bulunur. TCO'lar için tipik taşıyıcı konsantrasyonu $1-100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ arasında olup hareketlilik ise $10^{20}-10^{21} \text{ cm}^{-3}$ aralığındadır (Fortunato, 2012; Chen, 2000).

Şeffaf yarıiletken oksitteki şeffaflık ve elektriksel iletkenlik malzemesi şeffaf iletken oksit ile benzerlik gösterir. Bununla birlikte, doping konsantrasyonu daha düşüktür. Böylece Fermi seviyesi iletim bandının altında (n-tipi TSO için) veya değerlik bandının üzerinde (p-tipi TSO'lar için) bulunur. Bu durum yarı iletken bir elektriksel davranışa neden olur (Adenle, 2017). TSO'lar için tipik taşıyıcı konsantrasyonu $10^{17}-10^{19} \text{ cm}^{-3}$ iken hareketlilik $100 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ kadar yüksek olabilir (Fortunato, Barquinha ve Martins, 2012).

Nikel oksit (NiO), iyi bilinen bir p-tipi yarı iletken ve ikili geçiş metal oksit olarak sınıflandırılır. NiO, 3,6 – 4,0 eV aralığında geniş bir bant aralığına sahiptir (Hsu, 2022). NiO, 250°C neel sıcaklığının altında antiferromanyetik özellikler gösterir. NiO'nun erime noktası 1955°C ve yoğunluğu $6,67 \text{ g/cm}^3$ 'tür (Khan, 2016). NiO, mükemmel termal ve kimyasal kararlılık, iyi bir optik şeffaflık vb. gibi üstün özelliklere sahiptir. NiO, çözelti oluşturma ve buhar bazlı teknikler gibi basit ve çeşitli üretim

yöntemlerine sahiptir (Etgar, 2016). Ayrıca NiO, nikel boşlukları (Ni^{2+}), ara yer oksijen (O^{2-}) bölgeleri ve NaCl tipi kübik yapı olarak da adlandırılan ve Şekil 3.1’de gösterildiği gibi bir kaya tuzu kristal yapısına (uzay grubu: $\text{Fm}\bar{3}\text{m}$) sahiptir. Bu mikroyapısal kusurlar, farklı üretim yöntemleri sırasında ortaya çıkabilir ve kristal yapının stokiyometrik olmamasına neden olabilir (Dirksen, 2001).

Yüksek sıcaklıkta üretimde, nikel oksit genellikle fazla oksijen alır. Bu da aynı anda Ni^{2+} ’nın Ni^{3+} ’ya oksidasyonuna neden olur. Böylece kristalde nikel boşlukları ve ara oksijenler oluşur. Nikel oksit, oksidasyon sonucu oluşan oksijen fazlalığı nedeniyle p-tipi yarı iletken özelliği gösterir (Nandy, 2007).



Şekil 3.1. NiO'nun birim hücre olarak kristal yapısı (a) NiO'nun birim hücre olarak kristal yapısı (mavi renk Ni atomlarını, turuncu renk O atomlarını temsil eder (Diao, 2020), (b) stokiyometrik olmayan NiO'da pozitif delikleri (p) yakalayan katyon boşluklarını gösteren şematik diyagram (Nandy, 2007)

NiO yapısındaki nikel katyon bölgelerinde oksijen atomlarının fazlalığı nedeniyle nikel boşlukları oluşur ve iyonize edilerek Ni^{3+} iyonları oluşturulabilir. Bu reaksiyon, aşağıdaki gibi Kröger-Vink notasyonu ile gösterilir;



Denklem (3.1)’de iki Ni^{2+} iyonu ($\text{Ni}_{\text{Ni}}^{\text{X}}$) oksijen ile reaksiyona girerek NiO kristalinde iyonize bir nikel boşluğu ($\text{V}_{\text{Ni}}^{\prime}$) ve iki Ni^{3+} iyonu ($\text{Ni}_{\text{Ni}}^{\bullet}$) üretir.

Oluşturulan Ni^{3+} iyonları, bir delik oluşturan ve aynı zamanda NiO_x filminin iletkenliğini etkileyen alıcılar olarak işlev görür (Ofiaz, 2019). Bu tür elektriksel ve optiksel NiO özellikleri, stokiyometrik olup olmamasına bağlı olarak farklılık gösterir. Örneğin Ni_{1-x}O yapısında x, 0 ile 0,005 arasında bir değer aldığı anda, üst sınıra yakın x

noktasında NiO'nun rengi siyah/kahverengi olurken, daha küçük bir x değerinde renk yeşildir. İdeal bir stokiyometrik NiO, yapısında herhangi bir kusur olmadığında ve ideal NiO'nun iletkenliği ve öz direnci sırasıyla 10^{-4} S/cm ve 10^6 - 10^{13} Ω .cm olduğunda yalıtkan görevi görür (Khan, 2016). Literatürde yapılan çalışmalarda nikel oksidin elektriksel iletkenliğinin bu kusurlarla doğrudan ilişkili olduğu görülmektedir (Antoini, 1992).

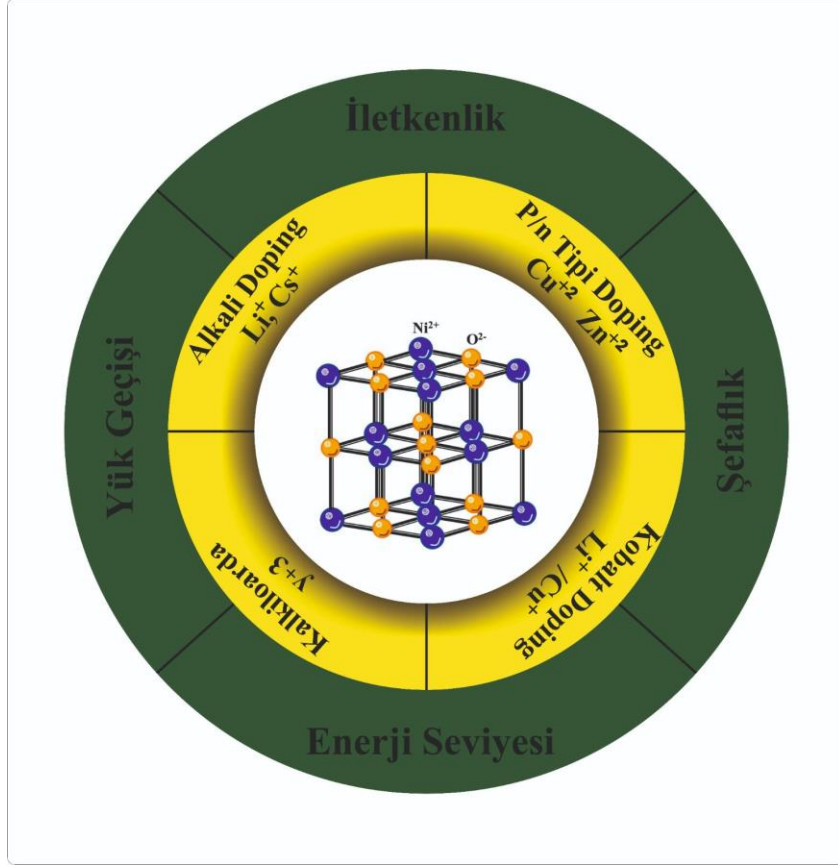
NiO_x filmleri ilk olarak p-i-n yapılı güneş pillerinde PEDOT:PSS'ye alternatif olarak HTM kullanıldı ve daha iyi kararlılık ve azaltılmış histerezis sağladı (Irwin, 2008).

2014 yılında yapılan bir çalışmada, cam/ITO/NiO_x/CH₃NH₃PbI₃/PCBM/BCP/Al konfigürasyonlu p-i-n yapısında PSC cihazında HTM olarak NiO_x kullanılmış ve %7,8'e varan verim elde edilmiştir (Jeng, 2014). Daha sonraları diğer inorganiklere göre delik oluşturma ve uzun süreli stabilite üzerinde daha iyi etkileri olduğu için güneş pillerinde HTM olarak kullanılmıştır. p-i-n yapısında spin kaplama, serigrafi gibi birçok çözüm tekniği ile üretilen NiO_x, HTM güneş pillerinde kullanılmış ve etkileri araştırılmıştır. NiO_x'u doğrudan perovskit tabakası üzerinde biriktirmek çok zordur. Çünkü NiO_x çözünür için öncü çözeltide kullanılan çözücü kuvvetli polar organik veya sudur. Bir perovskit güneş pilinin normal yapısında HTM/kontak çifti olarak püskürtme biriktirme NiO_x/Ni çift katmanının kullanıldığı bir çalışmada; güneş pilinin veriminin 6 gün içinde %1,3'ten %7,28'e yükseldiği ve bunun sonucunda 60 günden fazla dayanıklı perovskit güneş pilleri elde edildiği belirtildi (Hsu, 2022). Bu tabakanın dc reaktif magnetron püskürtme ile biriktirilmesi, perovskit tabakasının neme ve oksijene karşı yüzey korumasına ve perovskit yapıya herhangi bir olumsuz etkisi olmaksızın pürüzsüz ve çatlaksız bir filme sahip olmasını sağlamıştır (Abdollahi, 2015).

3.1.2. Kobalt Katkılı NiO_x İnce Filmler

NiO_x filmlerde iletim mekanizması deliklerle sağlanmaktadır. Bu delikler Ni⁺² boşluklarından, oksijen ara yerlerden ve katkı maddelerinden (dopantlar) üretilir. NiO_x'un metalik iyonlarla katkılanması, elektriksel özelliklerin yanı sıra geçirgenliği, morfolojiyi, yük çıkarmayı ve enerji seviyesi hizalamasını değiştirir. Buna göre, NiO_x kristal kafesindeki iyonik katkı, kristal kafes bükülmesi ve taşıyıcı hareketliliğinin ve rekombinasyonun bozulmasına yol açabilecek kusurlar oluşturabilir. Bununla birlikte, NiO_x alttaşına çeşitli metallerin dahil edilmesiyle değişik özellikleri göz önüne alındığında, bu alanda çok çaba sarf edilmiş ve NiO_x bazlı güneş pillerinin

performansında umut verici gelişmeler sağlanmıştır. Daha genel olarak, inorganik HTM'lerin güneş pilleri verimlilikleri üzerindeki etkisinin araştırılması, performans optimizasyonunun önemli bir yönü olarak kabul edilir. Şekil 3.2'de farklı katkılama stratejilerinin NiO_x HTM'lerin özellikleri üzerindeki etkilerini özetleyen bir diyagram verilmiştir.



Şekil 3. 2. Bu çalışmada farklı katkılama türlerini ve bunların NiO_x HTM'lerin özellikleri üzerindeki etkilerini özetleyen şematik diyagram (Xu, Chen ve Jin, 2019)

Doping etkisinin önemli olması için, kafes stabilitesini artıran ve uyumsuzluğu azaltan Ni^{2+} iyon yarıçapına benzer bir katkı elemanı kullanılmalıdır. Ayrıca katkı elemanı Ni^{3+} alıcılarının nispi içeriğini artırmalıdır. Bu koşullar göz önüne alındığında Cu, Li, Mg, Cs, Au ve Co gibi elementler bu özelliklere sahip oldukları için katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

Soy metallerin yanı sıra, Kobalt (Co^{2+}), p-tipi bir katkı maddesi olarak görev yapan NiO_x HTL'lere de dahil edildi (Huang, 2016; Purushothaman, 2012; Yang, 2021). Hu ve arkadaşları (2019), invert güneş pillerinde HTL olarak kullanılan ortak katkılı NiO_x

filmleri ürettir. Optimize edilmiş katkılama koşulları altında (%6 mol), performans optimizasyonunun saf NiO_x ile karşılaştırıldığında %12'den %18,2'ye kadar arttığı gözlemlendi. Özellikle, tüm cihaz parametreleri (J_{SC} , V_{OC} ve FF), Co katkılama ile geliştirildi. Bu durum esas olarak, $4,4 \times 10^{-5}$ 'ten $2,5 \times 10^{-3} \text{ Scm}^{-1}$ 'e etkili bir şekilde arttırılan gelişmiş elektriksel iletkenlikten kaynaklanmaktadır. Bu da yük taşıyıcılarının arayüzey birikiminin azalmasına yol açmaktadır. P-tipi katkılamanın neden olduğu ışık geçirgenliği azalmasının olumsuz etkisini azaltmak için Lei ve arkadaşları (Huang, 2016), güneş pillerinde kullanıldığında elektronik yapılarını ve fotovoltaiik özelliklerini incelemek için daha ince ortak katkılama NiO_x HTL'leri araştırdılar. Film kalınlığını 20 nm kadar düşük değerlerde kontrol edilirken ve katkı konsantrasyonu %1,6'da sabitlenirken, 300 ile 1000 nm arasındaki incelenen tüm aralıkta geçirgenlik 600 nm'nin altında sadece hafifçe etkilendi. Geliştirilmiş iletkenlik ile birlikte, ortak katkılama NiO_x bazlı güneş pilleri, katkısız muadillerine göre %25 daha yüksek verimlilik gösterdi (%9,46'dan %12,61'e) (Xu, Chen ve Jin, 2019).

3.1.3. Yarı İletkenlerde Akım İletimi

3.1.3.1. Gerçek Yük Taşıyıcıları

Kovalent bağlar kırıldığında, serbest elektronlar kristal içinde hareket eder veya pozitif silisyum iyonlarıyla yeniden birleşir. Termal dengede, rekombinasyon hızı ve iyonlaşma oranları birbirine eşittir. Akım, silikon kafesin periyodik potansiyeli boyunca, kafesin atom çekirdeği içinde hareketsiz olan pozitif yüklerin tam tersine hareket ederler (Moraro, 2016).

3.1.3.2. Katkılı Yük Taşıyıcıları

Silisyumun içsel iletkenliği katkılama ile arttırılır. Yarı iletken katkılamada kullanılan elementler, bant aralığına daha çok enerji seviyeleri getirir. Yüzeysel basit bir donör, en düşük iletim bandı enerjisine (E_c) daha yakın olan bant aralığı enerji seviyesine sahip olacaktır ve düşük alıcı durumu (E_a), aynı şekilde en yüksek değerlik bant enerjisine (E_v) yakın bant boşluğunda bulunur.

Fosfor ve bor, silikonda basit bir alıcı durumu oluşturdıklarından, fosfor ve bor silikonda basit yüzeysel katkı maddeleridir (Moraro, 2016).

Tüm verici veya alıcı safsızlıklar oda sıcaklığında iyonize edildiğinde, sırasıyla iletim bandında ve değerlik bandında eşit sayıda elektron ve delik oluşur. Denklem (3.2) ve (3.3), tam iyonizasyonu şu şekilde açıklar;

$$n=N_d \quad (3.2)$$

$$p=N_a \quad (3.3)$$

Denklem (3.2) ve (3.3)'te N_d verici konsantrasyonu, n elektron yoğunluğu, p boşluk yoğunluğu ve N_a alıcı konsantrasyonudur. n -katkılı bir maddenin 25°C'de tamamen iyonlaşması durumunda, Fermi seviyesi Denklem (3.4)'te şu şekilde hesaplanır (Oeba, 2018);

$$E_C - E_F = kT \ln \left(\frac{N_c}{N_{cd}} \right) \quad (3.4)$$

Aynı şekilde p katkılı bir malzeme Denklem (3.5) ile kolayca ortaya çıkar;

$$E_F - E_V = kT \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right) \quad (3.5)$$

Yüksek donör konsantrasyonları için varyasyonun ($E_C - E_F$) azaldığı, bu nedenle fermi seviyesinin iletim bandının altına daha yakın hareket edeceği gözlemlenir. Benzer şekilde, kabul edilebilir yüksek bir konsantrasyonda, fermi seviyesini değerlik bandına yaklaştıracaktır (Omar, 1975; Abdullah, 2007). Bu durum katkılı yarı iletkenler için, fermi seviyesinin katkısız fermi seviyesinden farklı olduğu anlamına gelir.

3.1.3.3. Sürüklenme Akımı (Hareketlilik)

Hareket halindeki elektronlar denklem (3.6)'da gösterildiği gibi belli bir kinetik enerjiye sahiptir (Johansen, 2004);

$$\frac{1}{2}m_n V^2 = \frac{3}{2}kT \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da, m_n etkin elektron kütlesi, V ortalama termal hız, k Boltzmann sabiti ve T mutlak sıcaklıktır. Oda sıcaklığında, denklem (3.6)'daki termal hız, Si ve GaAs için yaklaşık 10^7 cm/s'dir. İletim elektronlarının, kinetik teori yöntemi kullanılarak belirlenmiş bir iletim elektronları oluşturarak statik bir pozitif iyon kafesi içinde serbestçe hareket eder (Theiss, 2002). Elektrik alanı uygulandığında, hızı tekrar normalize edildikten sonra her elektron alan yönünde hızlandırılır. Bir elektrona uygulanan momentum $-q\epsilon\tau_c$ 'dir ve kazanılan momentum $m_n V_n$ 'dir. Burada V_n sürüklenme hızı olarak adlandırılır (Johansen, 2004).

$$-q\epsilon\tau_c = V_n \quad (3.7)$$

$$V_n = -\left(\frac{q\tau_c}{m_n}\right)\epsilon \quad (3.8)$$

Uygulanan elektrik alana sürüklenme hızının oran denklemi (elektron hareketliliği/cm²/Vs) şu şekilde ifade edilir (Johansen, 2004);

$$\mu_n = \frac{q\tau_c}{m_n} \rightarrow V_n = \mu_n \epsilon \quad (3.9)$$

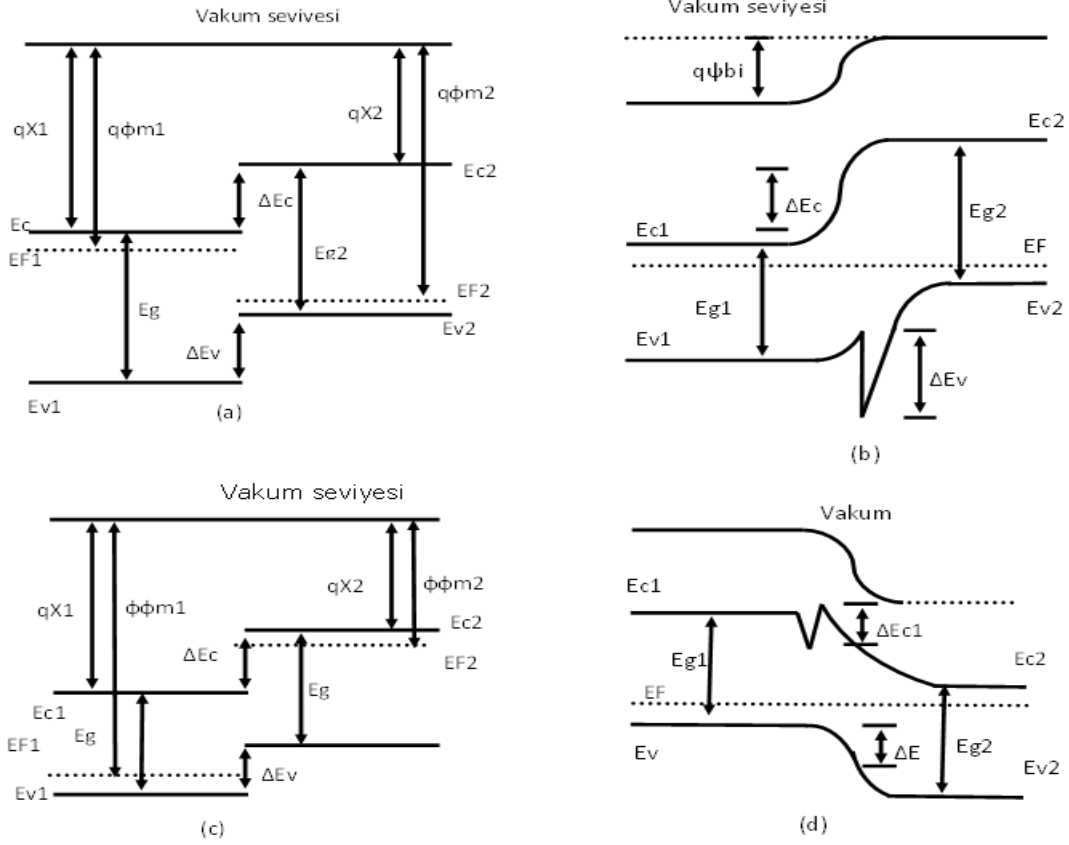
Valans banttaki delikler için benzer ifade yazılabilir;

$$v_p = \mu_p \epsilon \quad (3.10)$$

Denklem (3.8) ve (3.9) için çeşitli saçılma süreçlerine bağlı olan hareketlilik ve ortalama boş zaman arasındaki ilişki denklem (3.10)'da ifade edilmiştir. İki önemli saçılma mekanizması; kafes saçılımı ve safsızlık saçılımıdır. Kafes saçılması, 273 K'in üzerindeki sıcaklık artışının neden olduğu kafes atomlarının termal titreşimlerinden kaynaklanır.

3.1.4. Homoeklemler ve Heteroeklemler

Bir homoeklem, aynı yarı iletkenin iki farklı katkılı bölgesi arasındaki arayüzdür. Homoeklemler p-n yapıda olabilir veya farklı katkılama seviyelerine sahip iki n veya p tipi yarı iletkenin bağlanması ile de meydana gelebilir (Kasap, 2012). Bir heteroeklem ise genellikle farklı bant boşluklarının yanı sıra diğer farklı malzeme parametrelerine sahip olan iki farklı malzeme arasındaki bir bağlantıdır (Sze ve Ng, 2006). Eğer ikisi aynı tip taşıyıcıya sahipse izotip heteroeklem, farklı tip taşıyıcıya sahipse anizotip heteroeklem olarak adlandırılır. İkincisi daha çok tercih edilen bir yapıdır. Şekil 3.3; (a) ve (c), heteroeklem oluşumundan önce zıt tipte iki izole edilmiş yarıiletkenin enerji bant diyagramını göstermektedir. Şekil 3.3; (b) ve (d), dar bant aralıklı malzemenin n-tipi (b) ve p-tipi (d) olduğu bu yarı iletkenler arasında oluşan ideal bir heteroeklemin denge bant diyagramını göstermektedir. Bu durum, iki farklı malzemenin ara yüzünde çok az tuzak ve diğer kusurların (yani rekombinasyon merkezlerinin) olduğu ideal bir durumu ifade eder. Sadece aynı kafes sabitine sahip yarı iletkenlerin heteroeklemleri için geçerlidir.



Şekil 3. 3. (a) E_g , zıt tip ve farklı bant aralığı olan iki izole yarı iletkenin enerji bant diyagramı (burada b ve boşluk n-tipi malzeme, p-tipi malzemedan daha küçüktür); (b) Termal dengede idealleştirilmiş anizotip heteroeklemler, (c) ve (d): İki farklı yapıdaki malzemenin bant aralığı (p-tipi malzemenin bant aralığı n- ipinden daha küçüktür) (Khan, 2016)

İki farklı yarı iletkenin iki farklı bant aralığı E_g , farklı dielektrik geçirgenlikleri ϵ_r , farklı iş fonksiyonları ϕ_m ve farklı elektron ilgileri χ olarak isimlendirilmiş. İki yarıiletken ΔE_c 'deki iletim bant kenarlarının enerjilerindeki fark ve değerlik bant kenarlarının enerjilerindeki fark ΔE_v ile temsil edilir. Enerji bant diyagramı farkı ΔE_g (Sze ve Ng, 2006) ile gösterilir. İdeal durumda, bu miktarlar ve yarı iletken parametreleri şu şekilde ifade edilebilir;

$$\Delta E_c = q(\chi_2 - \chi_1) \quad (3.11)$$

$$\Delta E_v = E_{g1} + q\chi_1 - (E_{g2} + q\chi_2) = \Delta E_g - \Delta E_c \quad (3.12)$$

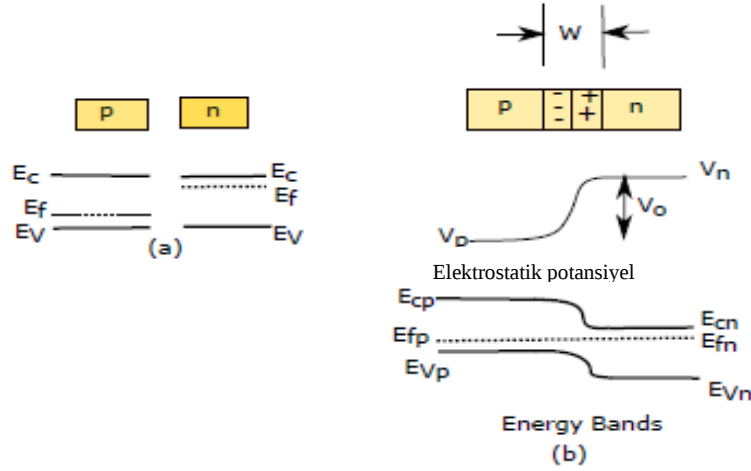
$$E_g = E_{g1} - E_{g2} \quad (3.13)$$

Heteroeklem enerji bant diyagramının iki temel gereksinimi:

- Malzemenin her iki yüzü için Fermi seviyesi aynı olmalıdır.
- Vakum seviyesi sürekli ve bant kenarlarına paralel olmalıdır (Sze ve Ng, 2006).

3.1.5. P-n Bağlantıları

İki p-tipi ve n-tipi yarı iletken bağlantı oluşturmak için bir araya getirilirse, bağlantıdaki büyük konsantrasyon gradyanı nedeniyle taşıyıcının difüzyonu gerçekleşir. Şekil 3.4 (a), izole edilmiş p-tipi ve n-tipi malzemenin bant diyagramını göstermektedir.



Şekil 3. 4. Denge durumundaki p-n eklemine özellikleri: (a) İzole edilmiş bölge için p-tipi ve n-tipi malzeme ve enerji bantları; (b) Geçiş bölgesindeki uzay yükünü, ortaya çıkan elektrik alanı ve temas potansiyelini ve enerji bantlarının ayrılmasını gösteren bağlantı (Streetman ve Banerjee, 2009)

P-tipi malzemede büyük bir delik konsantrasyonu ve birkaç elektron vardır. Oysa n-tipi malzemeler için durum tamamen tersidir. Delikler p-tipinden n tarafına yayılır ve n-tipi malzemenin elektronları n'den p'ye gider. Difüzyon akımı, zıt elektrik alanının oluşması nedeniyle sınırlayıcı bir değere sahiptir. Bu elektrik alanı, denge koşulları altında net akımın sıfır olduğu bir değere ulaşır. Elektrik alanı W büyüklüğünde bir bölgede görünür ve W boyunca denge potansiyel farkı V_0 bulunur. Elektrik alanının sıfır olmadığı bölgeye geçiş (tükenme) bölgesi denir. Potansiyel farka kontak potansiyeli de denir. Uzay yükü bölgesi veya tükenme bölgesi boyunca temas potansiyeli (W), yerleşik

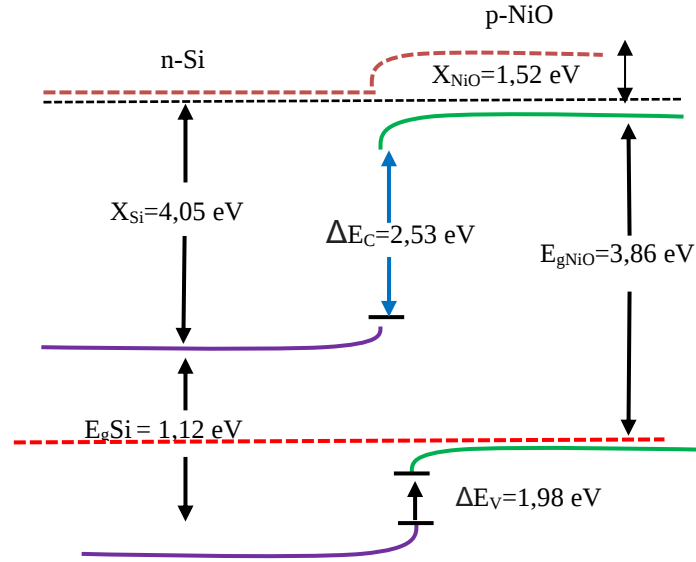
potansiyel engeli olarak adlandırılır (Streetman ve Banerjee, 2009). Yerleşik potansiyel V_0 ;

$$V_0 = \frac{KT}{q} \ln \frac{N_a N_d}{n i^2} \quad (3.14)$$

$$P_p n_p = P_n n_n = n i^2 \quad (3.15)$$

3.1.6. p-NiO/n-Si Enerji Band Diyagramı

Şekil 2.5, Anderson modeli p-NiO/n-Si heteroekleminde idealize edilmiş enerji bandı diyagramını göstermektedir.



Şekil 3. 5. Sıfır sapma altında p-NiO/n-Si heteroeklem için enerji-bant diyagramı

NiO özünde p-tipi iletkenidir. p-n eklemi oluşturmak için, NiO için n-tipi katkı maddesine ihtiyaç vardır (Tsukazaki, 2005; Pan, 2008).

NiO'nun n-tipi katkılanması için metal-oksit-yarıiletken yapıların üretimi veya n-tipi NiO'nun kolay bulunabilen başka bir n-tipi malzeme ile değiştirilmesi düşünülebilir (Baltakesmez, 2003).

Nikel oksiti inceleyecek olursak; kolayca üretilebilen ve özünde p-tipi olan bir malzeme örneğidir. NiO'nun bant aralığı ise 3,86 eV'dir. Direnci de yüksektir. Taşıyıcı konsantrasyonuna bağlı olarak p-NiO/n-Si, p-n (yüksek Na) veya MIS (düşük Na) bağlantısı olabilir. Her ikisi de p-NiO'de bir tükenme bölgesine sahip olacaktır. Ayrıca

Si, GaN, AlGaN, SiC, ZnTe, CuO, CdTe, CuAlO₂, ZnMgO gibi diğer alternatifler de kullanılmıştır (Janotti ve Walle, 2009).

NiO ve n-Si'nin elektron yoğunluğu sırasıyla 1.52 eV ve 4.05eV, bant aralığı sırasıyla 3.86 ve 1.12 eV'dir. Elektronlar için enerji bariyeri $\Delta E_c = X_{Si} - X_{NiO} = 4,05 - 1,52 = 2,53$ eV ve delikler için enerji bariyeri $\Delta E_v = E_g(NiO) - E_g(Si) + \Delta E_c = 3,86 - 1,12 + 2,53 = 4,34$ eV'dir (Yang ve Zhu, 2011). NiO/n-Si bant yapısının daha iyi anlaşılması için, fermi seviyesi ile değerlik bandı ϕ_p (p-tipi) veya iletim bandı ϕ_n (n-tipi) arasındaki enerji farkı p-NiO taşıyıcı konsantrasyonu ile belirlenebilir (Kamruzzaman, 2017).

NiO/n-Si kombinasyonu fazla ilgi görmemiştir. Ancak bir fotodedektör, bir diyot, bellek aygıtları, ışık yayan diyot veya fotokatalitik uygulamalarda kullanılan heteroeklem hakkında çok fazla çalışmalar mevcuttur (Zhang, 2010).

3.1.7. Diyotlarda Akım Taşıma Teorisi

Schottky bariyerlerindeki akım taşınması, p-n eklemlerindeki azınlık taşıyıcılarının aksine, esas olarak çoğunluk taşıyıcılarından kaynaklanmaktadır. Schottky bariyerlerinde çoğunluk taşıyıcı akım akışını etkileyen faktörler; termiyonik emisyon, difüzyon, tünelleme, uzay yükü etkileri ve bariyerin imaj kuvvetini düşürmesi olarak sıralanabilir.

Metal-yarıiletken bağlantılarındaki akım taşıma mekanizmaları hakkında iki ana teori vardır. Bunlar Termiyonik emisyon ve difüzyon teorisidir. Bethe (1942) tarafından önerilen termiyonik emisyon teorisi ve Schottky (W. Schottky, 1938) tarafından öne sürülen difüzyon teorisidir. İkisini tek bir teoride birleştiren daha genel teori Crowell ve Sze (1966) tarafından geliştirilmiştir.

Termiyonik emisyon özellikleri, bariyer yüksekliğinin kT 'den çok daha büyük olduğu varsayımları kullanılarak elde edilir. Tükenme bölgesindeki elektron çarpışmaları ve imaj kuvvetinin etkisi ihmal edilir. Böylece akım akışı yalnızca bariyer yüksekliğine bağlıdır.

Bağlantı ileriye doğru eğimli olduğunda, bariyer $q(V_{bi} - V_a)$ değerine indirilir ve bariyerden daha büyük enerjiye sahip holler metale akar. Bununla birlikte, metalden yarı iletken akım akışı, kontağa uygulanan voltajdan etkilenmez. Böylece metalden akan

akım denge değeri ile aynıdır. Yarı iletken den metale doğru akım yoğunluğu I_{sm} , termiyonik emisyon teorisi (Sze, 1969) için şu şekilde verilir;

$$I_{sm} = qp \left(\frac{kT}{2\pi m^*} \right) \exp \left(-\frac{m^* v^*}{2kT} \right) \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da, p , delik konsantrasyonu, m^* serbest bir delik için etkin kütledir, v engeli aşmak için gereken minimum hızdır. Bariyerin üzerinden sızıntı akımı oluşması için aşağıdaki bağıntı sağlanmalıdır;

$$\frac{1}{2} m v^2 = q(V_{bi} - V_a) \quad (3.17)$$

Yarı iletkenin delik konsantrasyonu aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$p = p_0 \exp \left(\frac{V_{bi} V_a}{kT} \right) \quad (3.18)$$

Denklem (3.18)'de, p_0 , yarı iletkenin nötr bölgesindeki delik konsantrasyonudur ve etkin yoğunluğu cinsinden şu şekilde tanımlanır;

$$p_0 = N_v \exp \left(-\frac{(E_f - E_v)}{kT} \right) \quad (3.19)$$

Böylece, bariyer yüksekliği cinsinden delik konsantrasyonu denklemi

$$p = N_v \exp \left(-q \frac{(\phi_B - V_v)}{kT} \right) \quad (3.20)$$

Yarı iletken den metale akan akımın son ilişkisi Denklem (3.16)'ya göre;

$$I_{sm} = A^* T^2 \exp \left(-\frac{\phi_B}{kT} \right) \exp \left(-\frac{qV_v}{kT} \right) \quad (3.21)$$

Denklem (3.21)'de, $A^*=(4\pi qm^*k^2/h^3)$ metale yayılan delikler için Richardson sabitidir. Metalden yarı iletkenine geçen akımın engel yüksekliği uygulanan voltajdan etkilenmediğinden, $V_a=0$ olduğunda denge değerine eşit olmalıdır.

$$I_{sm} = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \quad (3.22)$$

Toplam akım yoğunluğu (I), bu iki akım yoğunluğunun toplamıdır ve şu şekilde bulunur;

$$I_{sm} = A^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.23)$$

Denklem (3.23)'te, parantez dışındaki terimleri doyma akımı yoğunluğu (I_0) olarak tanımlayarak, termiyonik emisyon teorisine göre metal-yarıiletken birleşimdeki delik akımı taşınmasına ilişkin bağıntı aşağıdaki gibi elde edilir;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.24)$$

Metale yayılmadan önce tükenme bölgesinden bir delik geçmelidir. Tükenme bölgesindeki çarpışmaların etkisi difüzyon teorisine dahil edilmiştir. Teoriye göre, bariyer yüksekliğinin kT 'den çok daha büyük olduğu, taşıyıcı yoğunluğunun akım akışından etkilenmediği ve yarı iletkenin katkılama konsantrasyonunun dejenere olmadığı varsayılır. Bu teoriye göre akım, tükenme bölgesindeki taşıyıcıların difüzyonu ve sürüklenmesi ile sınırlıdır. Aygıtı uygulanan bir elektrik alanı, iletkenlik ve valans bantlarında mevcut enerji durumları olması koşuluyla, elektronlar ve delikler üzerinde net bir ivme ve hareketin oluşması için bir kuvvet oluşturacaktır. Bu elektrik alan nedeniyle yükün net hareketine sürüklenme denir. Böylece sürüklenme akımı, uygulanan bu elektrik alanın sonucudur. Sürüklenmeye ek olarak, difüzyon, yükün yüksek konsantrasyonlu bir bölgeden düşük konsantrasyonlu bir bölgeye doğru aktığı süreçtir. Net yük akışı, bir difüzyon akımına neden olur (Yılmaz, 2004).

Ayrıca Schottky bariyerinde meydana gelen diğer iki önemli taşıyıcı mekanizması; bariyer boyunca tünel açma ve tükenme ile nötr bölgelerde taşıyıcı

rekombinasyonudur. Bariyer boyunca tünel açma ve tükenme bölgesindeki rekombinasyon, ideal diyot davranışından ayrılmanın ana nedenleridir.

Tünelleme olayı çoğunluk taşıyıcı etkisidir. Taşıyıcıların potansiyel enerji bariyerinden tünelleme süresi, birim zaman başına kuantum geçiş olasılığı ile belirlenir. Metal-yarıiletken etkileşimini doğrultmada uzay yükü genişliği, yarıiletken katkılamanın kareköküyle ters orantılıdır. Yarı iletkendeki katkılama konsantrasyonu arttıkça yarı iletken tükenme bölgesinin genişliği azalır. Böylece bariyerden tünel açma olasılığı artar. Tünel açma akımı, yarı iletken katkılama ile artar. Bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı olması nedeniyle tünel akımı da sıcaklıkla değişebilir. Tünel açma, alan emisyonu veya termiyonik alan emisyonu olarak gerçekleşir.

Hafif katkılı yarı iletkenler için ($N_d < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) akım, bariyer üzerinde termal olarak uyarılan deliklerle termiyonik emisyonun bir sonucu olarak akar. Orta düzey katkılama aralığında ($10^{17} < N_d < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) termiyonik alan emisyonu, taşıyıcıların termal olarak bir enerjiye uyarıldığı, bariyerin tünel açma için yeterince dar olduğu yerlerde baskındır. Bununla birlikte, yüksek katkılı yarı iletkenler için ($N_d > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) düşük sıcaklıklarda; deliklerin metal taraftan geçmesi için değerlik bandında bariyer çok dar olduğundan, deliklerin doğrudan bariyerden tünel açabileceği alan emisyonu olarak bilinir. Bu nedenle, yüksek safsızlık katkılama konsantrasyonuna sahip bir metal yarı iletken bağlantı için tünelleme işlemi baskın taşıma mekanizması olacaktır (Chopra, 1983; Neamen, 1997).

Kavşak tükenme bölgesindeki taşıyıcı üretimi veya rekombinasyonu da diyotun ideallikinden sapmalarını ($n > 1$) açıklayan önemli bir faktördür. Daha kesin sonuçlar elde etmek için üretim veya rekombinasyon akımı termiyonik emisyon akımına eklenmelidir.

Elektron-boşluk çifti üretimi, termal dengede bariyerin tükenme bölgesindeki rekombinasyon oranı ile dengelenir (herhangi bir sapma yok). Bağlantıya bir öngerilim uygulandığında, uygulanan öngerilimin polaritesine bağlı olarak net bir taşıyıcı üretimi veya rekombinasyonu meydana gelir. Eğer n-tipi yarıiletken üzerinde yapılan bağlantıya bir ters voltaj uygulanırsa, tükenme bölgesinde denge değerlerini aşan sayıda elektron-boşluk çifti oluşacaktır. Böylece bariyerin elektrik alanı tarafından hareket etmeye zorlanan bu elektron-boşluk çifti nedeniyle bir ters akım oluşur. Bununla birlikte, bağlantı ileri yönlüyse, nötür bölgede yığılmış elektronlar yarı iletkenden tükenme bölgesine hareket edecek ve metalden delikler enjekte edilecektir. Bu nedenle, bu fazla elektron-delik çiftleri, ileri bir rekombinasyon akımı oluşturmak için tükenme bölgesinde yeniden

birleşecektir. Tükenme bölgesindeki taşıyıcı üretimi ve rekombinasyon akımı aşağıdaki bağlantı ile ifade edilir (Grove, 1967);

$$I_{RG} = I_0 \left[\exp \left(\frac{qV_a}{2kT} \right) - 1 \right] \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'te, $I_0 = (qdp_i/2\tau_0)$ ile burada d , tükenme bölgesinin genişliği ve τ_0 tükenme bölgesindeki azınlık taşıyıcı ömrüdür. Akım, bağlantı ters yönlü olduğunda bir üretim akımıdır ve bağlantı ileri yönlü olduğunda bir rekombinasyon akımıdır. Denklem (3.25)'e göre rekombinasyon akımı sadece ileri gerilimin düşük değerlerinde önemlidir.

Ayrıca, düşük sıcaklıklarda bariyer yüksekliği büyük olduğunda ve yarı iletken hafif katkılı olduğunda, tükenme bölgesindeki birleşme-rekombinasyon akımı dikkate alınmalıdır. Bir rekombinasyon merkezi, enerji seviyesi bant aralığının merkezinde, yani yarı iletkenin hafif katkılı veya saf olduğu anlamına gelen $E_g/2$ 'de bulunduğu en etkilidir.

3.1.8. Metal-Yarı İletken Bağlantı Kapasitesi

Bir metal yarı iletken bağlantısının tükenme bölgesindeki elektrik alanı ve potansiyel dağılımı, uygulanan voltaja, bariyer yüksekliğine ve safsızlık konsantrasyonuna bağlıdır.

Yarıiletkenin dejenere olmadığı ve düzgün katkılı olduğu varsayıldığında, tükenme bölgesinin genişliği, Poisson denkleminin çözümünden elde edilebilir.

Tükenme bölgesindeki yük yoğunluğu yalnızca düzgün dağılmış iyonize akseptörlerden kaynaklanıyorsa, tükenme bölgesi genişliği aşağıdaki bağıntı ile verilir (Sharma, 1984);

$$w = \left(\frac{2\epsilon_s}{qN_A} |V_{bi} - V_a| \right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.26)$$

Denklem (3.26)'da, V_{bi} , sıfır sapmada yerleşik potansiyeldir. Tükenme bölgesinin genişliği, Schottky bariyer eklem bölgesi boyunca voltajdaki bir değişiklik ile

değiştirilebilir. Tükenme bölgesi genişliği, artan ileri gerilim ile denge değerinin altına düşer ve geri gerilim ile artar. Tükenme bölgesi genişliğindeki bu değişimin nedeni, yük taşıyıcıların uzay yükü katmanına veya bu bölgenin dışına hareketidir.

Eklem bölgesinin engel yüksekliği ve yarı iletkenin alıcı konsantrasyonu, kapasitans-voltaj özellikleri aracılığıyla belirlenebilir. Bu yöntem, birim başına diyot kapasitansı, uygulanan ters öngerilimin bir fonksiyonu olarak ölçülür. Küçük bir A-C voltajı bir ters D-C öngerilimi ile birleştirildiğinde, metal yüzeyde aynı işaretli yükler ve yarı iletkeninde zıt işaretli yükler indüklenir.

Birim alan başına tükenme bölgesi yükü şu şekilde ifade edilir;

$$Q_d = \left[2q\epsilon_s N_A \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} \right) \right]^2 \quad (3.27)$$

Böylece imaj kuvveti bariyerinin düşürülmesi hariç tükenme bölgesi kapasitansı şu denklemlerle ifade edilir;

$$C = \left[\frac{q\epsilon_s N_A}{\left(V_{bi} + V_R - \frac{kT}{q} \right)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.28)$$

Denklem (3.28)'de, A diyot kesit alanıdır, ϵ_s yarı iletkenin geçirgenliğidir, V_R uygulanan ters voltajdır.

Bu bağıntının elde edilmesinde, p-tipi yarıiletkenin tek tip alıcı konsantrasyonuna sahip olduğu ve bağlantı noktasında ara yüzey oksit tabakasının oluşmadığı varsayılmıştır.

$$C^{-2} - V_R \text{ grafiğinin, alıcı konsantrasyonunun belirlenmesine yol açan } \frac{2}{A^2 \epsilon_s q N_A}$$

eğimli düz bir çizgiyle sonuçlandığı açıktır.

Gerilim eksenindeki kesişme,

$$V_0 = \left(V_{bi} - \frac{kT}{q} \right) \quad (3.29)$$

Ve bariyer yüksekliği şu şekilde hesaplanabilir;

$$\phi_B = (qV_0 + kT + \phi_n) \quad (3.30)$$

Denklem (3.30)'da, ϕ_B , yarı iletkenin bant aralığındaki Fermi seviyesinin içine işlenmiş halidir. kT faktörü, çoğunluk taşıyıcılarının uzay yüküne katkısından gelir. C-V ölçümlerinden bariyer yüksekliğinin belirlenmesine ilişkin kapsamlı bir araştırma ve yöntemin sınırlamalarıyla da ilgilenen Goodman (1963) tarafından verilmiştir.

3.1.9. Diyotların Temel Elektriksel Parametreleri

3.1.9.1. Geleneksel I-V yöntemi

Baskın mekanizma termiyonik emisyon diyotlar için akım ve gerilim arasındaki ilişki şu şekilde verilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988);

$$I = A A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b^{eff}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V - IR_s)}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.31)$$

Denklem (3.31)'de, A temas alanıdır, A^* etkin Richardson sabitidir. k , Boltzmann sabitidir, T , mutlak sıcaklıktır, q temel yük, Φ_b^{eff} etkin engel yüksekliğidir (BH) ve R_s seri dirençtir. Bias bağımlı bir Schottky bariyer yüksekliği ve termiyonik emisyonla sapmaya neden olan diğer etkiler, Denklem (3.31.)'e bir idealite faktörü (n) eklenerek dahil edilir.

Φ_b^{eff} ve n arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (Rhoderick E., Williams, 1988; Korkut, 2007);

$$\Phi_b^{eff} = \Phi_{b0} + \left(1 - \frac{1}{n}\right) V \quad (3.32)$$

Denklem (3.32)'de, Φ_{b0} , sıfır sapma altında engel yüksekliğidir ve $V - IR_s > 3kT/q$ için denklem (3.31) ve (3.32) birleştirilerek aşağıdaki denklem yazılabilir;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (3.33)$$

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (3.34)$$

Alçak ve orta gerilim bölgesinde, $\ln I$ - V grafiği lineerdir. Bu grafiğin $\ln I$ eksenine uyarlanması ters doyma akımını (I_0) verir.

İdealite faktörü, aşağıdaki denkleme göre $\ln I$ - V grafiğinin eğiminden belirlenebilir.

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d \ln I} \quad (3.35)$$

3.1.9.2. Norde ve Genelleştirilmiş Norde İşlevi

Genelleştirilmiş Norde fonksiyonu, sabit bir sıcaklıkta sadece bir I - V ölçümünden Φ_b ve R_s değerlerini hesaplamak için Bohlin tarafından önerilmiştir. Genelleştirilmiş Norde işlevi (Bohlin, 1986) aşağıdaki denklem ile ifade edilir;

$$F(V, \alpha) = \frac{V}{\alpha} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (3.36)$$

Denklem (3.36)'da, α , n 'den büyük sabit ilk tamsayı olarak tanımlanır. β , q/kT 'ye eşittir. $I(V)$, ölçülen I - V eğrisinden çıkarılır. Φ_b ve R_s değerleri, aşağıdaki denklemlere göre $F(V, \alpha)$ V çizim minimumuna göre belirlenerek elde edilebilir (Bohlin, 1986);

$$\Phi_b = F_{\min}(V, \alpha) + \left(\frac{\alpha-n}{n}\right) \left(\frac{V_{\min}}{\alpha} - \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.37)$$

$$R_s = \frac{(\alpha-n)}{\beta I_{\min}} \quad (3.38)$$

Denklem (3.38)'de, n değeri, $\ln I$ - V grafiğinden elde edilir. $F_{\min}(V, \alpha)$, $F(V, \alpha)$ - V grafiğinin minimum noktasıdır. $V_{\min}$ ve $I_{\min}$ sırasıyla voltaj ve akımdır. $n=1$ ve $\alpha=2$ için (3.36), (3.37.) ve (3.38.) denklemler normal Norde yöntemi için aynıdır (Norde, 1979).

3.1.10. C-V Ara Yüzey Durumları

3.1.10.1. Arayüz Durumlarının Analizi

Arayüz durumlarının varlığı, ideal kapasitans-gerilim eğrisinin şeklini değiştirir. Bu çalışmada, yüksek-düşük frekanslı (C_{HF} - C_{LF}) kapasitans, Hill-Coleman ve iletkenlik yöntemleri kullanılarak arayüzey durumları karakterize edilmiştir. Kabul ölçümleri, MOS cihazının performansını değerlendirmek için kullanılan bir tekniktir. C_{HF} - C_{LF} kapasitans yöntemine göre, arayüz durum yoğunluğu (N_{ss}), kapasitans katkısından C-V eğrisi çıkarılarak bulunur (Nicollian, 1967) C_{HF} - C_{LF} yönteminden, N_{ss} değeri aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır;

$$qAN_{ss} = \left[\left(\frac{1}{C_{LF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} - \left(\frac{1}{C_{HF}} - \frac{1}{C_{ox}} \right)^{-1} \right] \quad (3.39)$$

Denklem (3.39)'da, C_{LF} ve C_{HF} düşük ve yüksek frekanslarda ölçülen kapasitans, C_{ox} yüzey alanı bölgesinde biriken oksit tabakasının kapasitansı, q elektronik yük ve A yüzey alanıdır.

Hill-Coleman; Arayüz durumlarının yoğunluğu alternatif bir yöntem ile aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Hill, 1980);

$$N_{ss} = \frac{2}{qA} \frac{(G_m/\omega)_{max}}{[(G_m/\omega)_{max}/C_{ox}]^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2} \quad (3.40)$$

Denklem (3.40)'ta, (G_m/ω) ölçülen iletkenliğin maksimum tepe değeri, C_m ölçülen kapasitans değeridir.

3.1.10.2. C-V Hesaplama

Engel yüksekliği, tükenme bölgesi genişliği (WD) ve katkılama konsantrasyon atomları (N_a veya N_d) gibi ana elektriksel parametrelerin frekansın fonksiyonu olarak araştırılması, iletim mekanizmaları üzerinde daha doğru ve güvenilir sonuçlar elde etmek için çok önemlidir. Fakat bu parametreler sadece dar frekans ve voltaj aralığında bu bilgiyi sağlayamaz. Yeterli yüksek frekanslarda ($f \geq 100$ kHz) ölçümler yapıldığında,

metal-yarıiletken veya metal oksit-yarıiletken tipi yapılardaki tükenme katmanı kapasitansı (Szatkowski, 1992; Cova, 1997) olarak elde edilebilir.

$$C^{-2} = \frac{2(\Phi_B - c_2 V - E_F)}{q c_2^2 \epsilon_0 A^2 N_A} \quad (3.41)$$

ve c_2 , C^{-2} -V eğrilerinin eğiminden şu şekilde çıkarılabilir;

$$c_2 = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + q^2 \delta N_{ss}} \cong \frac{N_A(\text{deneysel})}{N_A(\text{teori})} \quad (3.42)$$

Doping alıcı atomların teorik değeri ($N_A = 1/q\mu_h\rho h = 1.39 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$), n-Si levhanın direnç değeri ($1 \text{ } \Omega \text{ cm}$) ve delik mobilitesi ($\mu_{h=450} \text{ cm}^2/(V,s)$) kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun deneysel değeri, her bir frekans için kaplanan kısmın C^{-2} -V grafiğinin eğiminden ($\tan \theta = \frac{\Delta C^{-2}}{\Delta V} = 2/q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_A$) hesaplanmıştır.

Denklem (3.41) ve (3.42)'de; ara katmanın dielektrik sabiti, elektronik yükü, ara katman kalınlığı, diyot alanı arayüz durumu yoğunluğu, taşıyıcı (alıcı) konsantrasyonu sırasıyla ϵ_i , q , δ , A , N_{ss} ve N_A ile gösterilir. Denklem (3.42)'de gösterildiği gibi, c_2 'nin değeri 1'e giderken N_{ss} sıfıra gider (ideal durum). Fakat c_2 sıfıra gittiğinde $N_{ss} \propto$ a gider.

C^{-2} 'nin ters öngerilim eksenine kesişimi V_0 'dır ve şu şekilde gösterilir;

$$V_0 = V_D - \frac{kT}{q} \quad (3.43)$$

Denklem (3.43)'te, sıfır sapmada difüzyon potansiyeli V_D 'dir ve $\Phi_B(C-V)$, orta ve yüksek frekanslar için aşağıdaki şekilde ifade edilir;

$$\phi_B(C - V) = V^D + E_F - \Delta\phi_B \quad (3.44)$$

Enerji aralığı, değerlik bandı ve toplu Fermi seviyesi E_F arasındadır. Si'nin değerlik bandındaki durumların etkin yoğunluğu N_V 'dir ve aşağıdaki denklemlerle ifade edilmiştir:

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln(N_V/N_A) \quad (3.45)$$

$$N_V = 4.82 \times 10^{15} T^{3/2} (m_h^*/m_0)^{3/2} \quad (3.46)$$

Denklem (3.46)'da etkin delikler ve elektronların durgun kütleleri sırasıyla m_h ve m_0 olarak ifade edilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988). $\Delta\phi_B$, imaj kuvveti alt bariyeridir ve E_m , sırasıyla aşağıda verilen maksimum elektrik alanıdır.

$$\Delta\Phi_B = \left[\frac{qE_m}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (3.47)$$

$$E_m = \left[\frac{2qN_A V_0}{\epsilon_s\epsilon_0} \right]^{1/2} \quad (3.48)$$

Tükenme katmanı genişliğinin (WD) değeri, kesişme voltajından da hesaplanabilir ($V_0 = V_D - kT/q$) ve her frekans için kaplama kısmı için;

$$C^{-2}-V \text{ grafiğinin eğimi} = 2/q\epsilon_s\epsilon_0 A^2 N_A \quad (3.49)$$

Böylece, yukarıdaki denklemlerden V_d , E_F ve $\Delta\Phi_B$ değerleri hesaplandıktan sonra Denklem (3.47)'den $\Phi_B(C-V)$ değerleri elde edilebilir.

3.1.11. İnce Film Üretim Yöntemi

3.1.11.1. Sol Jel Yöntemi

Sol-jel işlemi, küçük moleküllerden katı malzemeler üretmek için kullanılan ıslak kimyasal bir tekniktir. Bu işlem genellikle metal oksitlerin üretimi için kullanılır. Bu işlemde, sol (veya solüsyon) kademeli olarak hem sıvı faz hem de katı faz içeren jel benzeri bir ağa dönüştürülür. İnce film biriktirmenin sol-jel işlemi, diğer tekniklere göre birçok avantaja sahiptir. Öncü çözeltinin kimyasal bileşimi üzerinde kolay kontrol sağlar. Aynı zamanda düşük sıcaklıkta bir işlemdir ve çeşitli organik ve inorganik ince filmlerin

yüksek verimli, hızlı çıktılı bir üretim sunar. NiO ve CoO katkılı ince filmlerinin üretiminin sol-jel işlemi üç temel adım gerektirir:

- (i) Solüsyon üretimi,
- (ii) Kaplama
- (iii) Isıl işlem.

Öncü çözelti, daldırma kaplama, spin kaplama veya püskürtme tekniği gibi farklı yöntemler kullanılarak alttaşlar üzerine kaplanabilir.

3.1.11.2. Sol Jel Spin Kaplama Yöntemi

Spin kaplama, düz alt tabaka üzerine düzgün ince film biriktirmek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Döndürme kaplayıcı veya döndürücü olarak bilinen bu işlemde numuneyi döndürmek için bir makine kullanılır. Bu yöntemde, dönen veya duran alttaşın merkezine çözelti damlatılarak işe başlanır. Daha sonra, numunenin dönmesinden kaynaklanan merkezkaç kuvveti ile kaplama malzemesini alttaş üzerine düzgün bir şekilde yaymak için numune daha yüksek hızda döndürülür. Kaplanmış alttaşın döndürülmesi sırasında çözücü buharlaşır ve alttaş üzerinde düzgün ve ince bir kaplama malzemesi tabakası oluşur. Tek tip kalınlıktaki NiO filmi, spin kaplama işlemi kullanılarak biriktirilebilir. Bu işlemde, alttaşlar üzerine NiO öncü çözeltisi damlatılır ve alt tabaka genellikle 10-40 saniye boyunca dakikada 2000-4000 devirde döndürülür. Daha yüksek döndürme hızı ve daha uzun döndürme süresi, daha ince film ile sonuçlanır. Filmin kalınlığı ayrıca çözelti viskozitesine de bağlıdır.

3.2. Deneysel Aşamalar

3.2.1. Deney Çözeltisi Hazırlama

0,05 Molar çözeltilerin hazırlanması için başlangıç malzemeleri olarak yüksek saflıkta Sigma-Aldrich markalı nikel (II) asetat tetrahidrat ($C_4H_6NiO_4 \cdot 4H_2O$) ve kobalt (II) klorid hekza hidrat ($Cl_2Co \cdot 6H_2O$) tuzları kullanılmıştır. Nikel(II) asetat tetra hidrat tuzun molekül ağırlığı (M_A): 248,84 g/mol ve kobalt(II) klorit hekza hidrat tuzun molekül

ağırlığı (M_A): 237,93 g/mol. Bu metal tuzların çözücüsü ve stabilizatörü olarak sırasıyla etanol glikol monometil eter ve monoetanolamin (MEA) kullanıldı.

3.2.2. Çözelti Hazırlık Aşaması

Tuzların matematiksel hesaplamaları aşağıda verilmiştir.

Nikel(II) asetat tetra hidrat ($C_4H_6NiO_4 \cdot 4H_2O$) için;

$$n=m/M_A$$

n: mol sayısı

m: madde miktarı(kütlesi)

M_A : molekül ağırlığı (248,84 g/mol)

$$M=n/V$$

M=molarite

V=hacim(lt)

0,05 molar 30 ml çözelti hazırlamak için ;

$$0,005=n/0,03$$

$$n= 0,0015 \text{ mol}$$

$$n=m/M_A$$

$$0,0015=m/248,84$$

m= **0,37326** gr nikel asetat tetra hidrat tuzu çözeltiye eklendi.

2.çözücüye ise kobalt(II) hekza hidrat ($Cl_2Co \cdot 6H_2O$) tuzu eklendi.

$$n=m/M_A$$

n: mol sayısı

m: madde miktarı(kütlesi)

M_A : molekül ağırlığı (237,93 g/mol)

$$M=n/V$$

M=molarite

V=hacim(lt)

0,05 molar 30 ml çözelti hazırlamak için;

$$0,005=n/0,03$$

$$n= 0,0015 \text{ mol}$$

$$n=m/M_A$$

$$0,0015=m/237,93$$

$m= 0,35689$ gr kobalt klorit hekza hidrat tuzu eklendi.

Her iki çözeltiye çözücü stabilizatörü olarak ethanol amin ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$) eklendi.

$$M_A: 61,08 \text{ g/mol}$$

$$d=1,012 \text{ g/ml}$$

0,05 molar ve hacmi 30 ml ($0,03 \mu\ell$) olacak şekilde hesaplamalar aşağıda yapılmıştır;

$$M=n/V$$

$$0,05=n/0,03$$

$$n=0,0015 \text{ mol}$$

$$n=m/M_A$$

$$0,0015=m/61,08$$

$$m=0,9162 \text{ gr}$$

$$d=m/V$$

$$1,012=0,9162/V$$

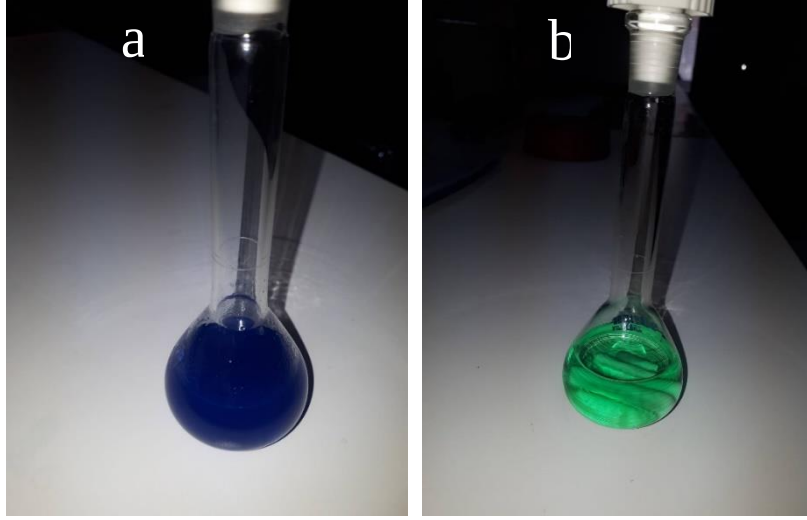
$V=0,09053= 90,53$ ml ethanol amin alınıp iki çözeltiye de eklendi.

Tartma işlemleri hassas terazide gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede, manyetik karıştırıcıda 0,05 molarlık çözelti için; 0,37326 gr nikel asetat ve 0,35689 gr kobalt asetat tuzlarına ayrı ayrı eşit miktarda 90,264 ml metoksietanol içerisinde çözünmesi sağlanmıştır.

Ardından içine çözünürlüğü artırmak için 90,266 ml monoetanolamin (MEA) ilavesi yapılarak homojenliğin sağlanması için 60 °C’de 2 saat manyetik karıştırıcıda karıştırıldıktan sonra çözeltinin oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir.

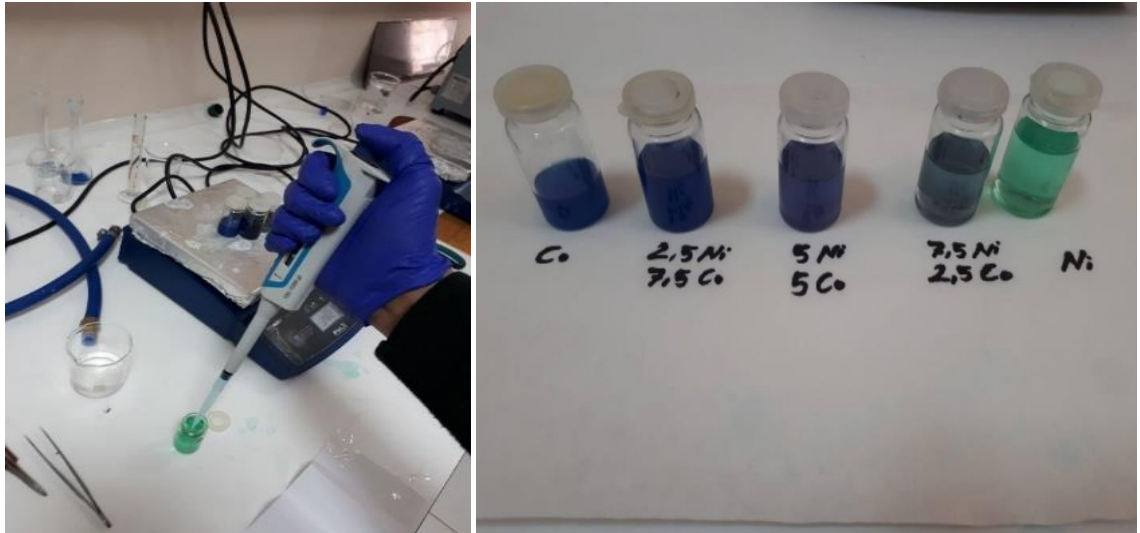
Elde edilen iki çözeltinin içindeki tuzların tam çözünmesi ve aynı sıcaklığa gelmesi için 60 °C sıcaklıkta ve manyetik karıştırıcı yardımıyla 2 saat boyunca karıştırıldı.

Böylece çözeltiler Şekil 3.6’da lacivert renkli kobalt ve yeşil renkli nikel çözeltileri gerçek görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3. 6. a-) Lacivert renkli kobalt çözeltisi ve b-) Yeşil renkli nikel çözeltisi

Kaplama süresi boyunca sıcaklık sabit tutuldu. Hazırlanan NiO çözeltisine hacimsel olarak %25, %50, %75 kobalt oksit çözeltisi eklenerek 5 farklı $Ni_xCo_{1-x}O$ çözeltisi hazırlandı. Şekil 3.7’de diyot için hazırlanan çözeltilerin gerçek görüntüleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7. $Ni_xCo_{1-x}O$ çözelti hazırlama süreci

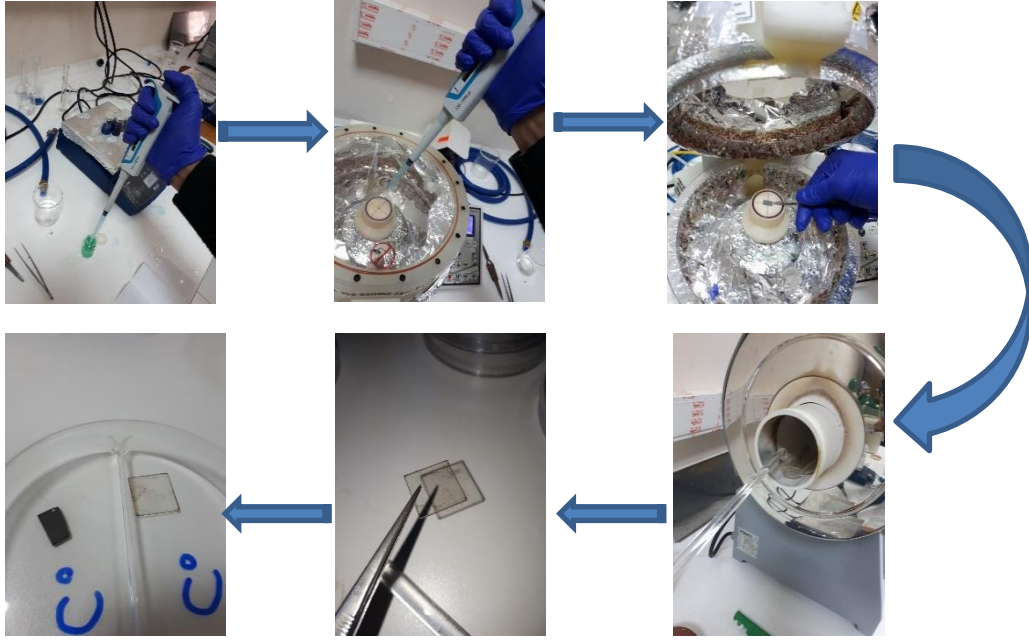
3.2.3. İnce Film Kaplama Aşaması

Kaplama işlemi cam ve n-Si alttaşlar üzerine olmak üzere 2 aşamada gerçekleştirildi.

1. Cam alttaşlar üzerine ince filmlerin üretimi
2. n-Si alttaşlar üzerine ince filmlerin üretimi

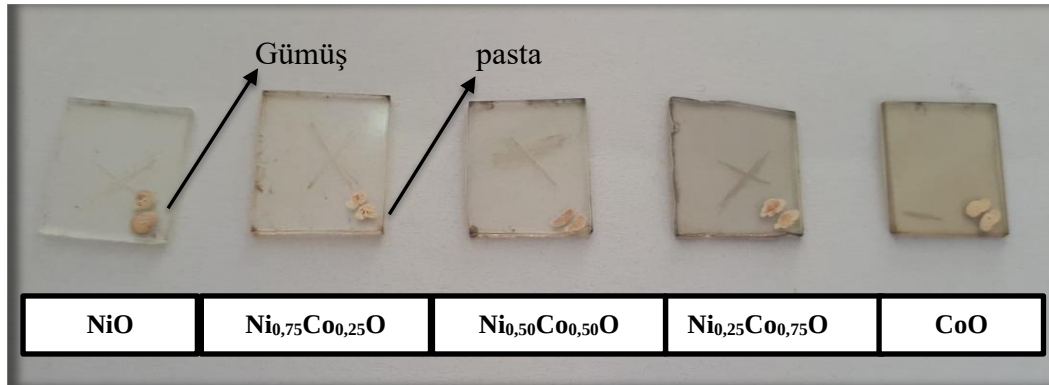
3.2.3.1. Cam Alttaşlar Üzerine İnce Filmlerin Üretimi

Ayrı ayrı beş behere konulan farklı oranlardaki çözeltiler sırayla yan yana bırakıldı. Cam alttaşların organik ve toz partiküllerden temizlenmesi için cam köpüklü suyla yüzey temizliği yapıldı. Biriktirmeden önce alttaşlar, sırasıyla 5 dakika boyunca ultrasonik banyoda saf su, aseton ve etanol ile temizlendi. Daha sonra, yüzeydeki doğal kirleri çıkarmak için, alttaşlar 1 dakika boyunca HF:H₂O (1:10) çözeltisi içinde bekletilmiştir. Her temizleme adımında, 18 MΩ cm dirençli deiyonize su içinde durulandı ve azot gazı altında kurutma işlemi yapılarak cam alttaşlar kaplama işlemine hazır hale getirildi. Daha sonra bu çözeltiler 60 ° C'de 2 saat boyunca manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığına geldikten sonra 30 saniye boyunca 3000 rpm'lik dönme hızında cam alttaşlar üzerine kaplandı. Her kaplama aşamasından sonra filmler bir fırında 10 dakika boyunca 300 ° C'de kurutuldu. Bu işlem her diyet için beş kez tekrarlandı. Daha sonra biriktirilen filmler 2 saat boyunca bir fırında 550 ° C'de tavlandı. Fotoğraflanan Ni_xCo_{1-x}O ince filmlerinin üretim aşamaları Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 8. NixCox-1O ince filmleri üretim aşamaları

Bu işlemler her bir katkı yüzdesi için tekrarlanmıştır. Tüm filmler tavlandıktan sonra sırasıyla NiO , $\text{Ni}_{0,75}\text{Co}_{0,25}\text{O}$, $\text{Ni}_{0,50}\text{Co}_{0,50}\text{O}$, $\text{Ni}_{0,25}\text{Co}_{0,75}\text{O}$ ve CoO olarak etiketlenmiştir. Etiketlenen bu diyetlerin gerçek görüntüleri Şekil 3.9’da fotoğraflanarak gösterilmiştir.



Şekil 3. 9. Cam alttaş üzerine üretilen NixCox-1O İnce filmler

3.2.3.2. N-Si Altaşlar Üzerine İnce Filmlerin Üretimi

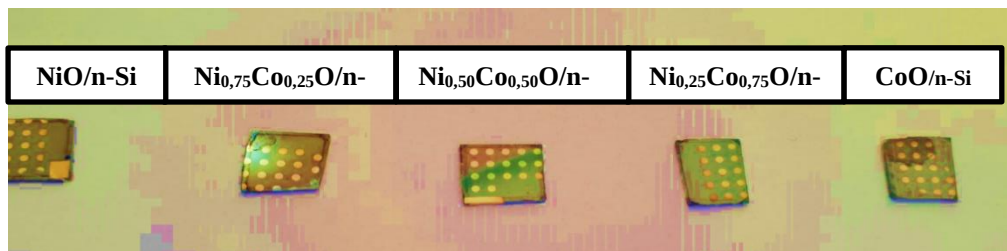
İkinci aşamada ise Şekil 3.7’de anlatılan aynı süreçler n-Si altaşlar üzerine de kaplanmıştır.

0,05 Molar çözeltilerin hazırlanması için başlangıç malzemeleri olarak Nikel asetat dihidrat ($\text{C}_4\text{H}_6\text{NiO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ve kobalt klorit hekza hidrat ($\text{Cl}_2\text{Co} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) asetat

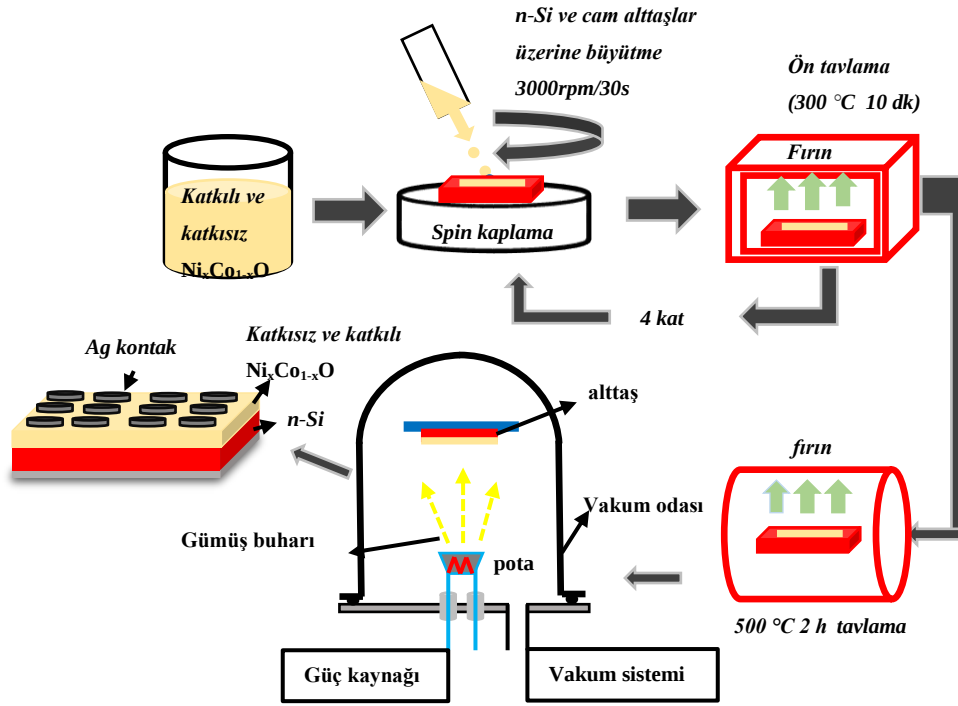
tuzları kullanıldı. Bu metal tuzların çözücüsü ve stabilizatörü olarak sırasıyla 2-metoksietanol ve monoetanolamin (MEA) kullanıldı. Hazırlanan NiO çözeltisine hacimsel olarak %25, %50 ve %75 oranında kobalt oksit çözeltisi eklenerek Co-NiO çözeltileri elde edildi. Daha sonra bu çözeltiler 60 ° C'de 2 saat karıştırıldı. n-Si alttaşlar yüzeyindeki organik ve ağır metal kirlerini temizlemek amacıyla, ultasonik banyoda %10'luk HF ile seyreltilmiş deiyonize su içerisinde 10 dakika bekletilerek temizliği sağlandı. Bu işlem üç defa tekrarlandı. Daha sonra ultrasonik temizleyicide aseton içerisinde 10 dk süre ile temizliği sağlanmış olan n-Si alttaşlar spin kaplama cihazına yerleştirildi. Hazırlanan çözeltiler oda sıcaklığına geldikten sonra 30 saniye boyunca 3000 rpm'lik dönme hızında n-Si alttaşlar üzerine kaplandı. Her kaplama sonrası filmler bir fırında 10 dakika boyunca 300 ° C'de kurutuldu. Bu işlem her n-Si alttaşlar için beş kez tekrarlandı. Daha sonra biriktirilen filmler 2 saat bir fırında 550 °C'de tavlandı. Daha sonra heteroeklem kontak üretim aşamasına geçilmiştir.

3.2.4. $Ni_xCo_{1-x}O$ / n-Si/ Ag Diyotların Fabrikasyonu ve Elektriksel Ölçümü

Heteroeklem diyotların son aşaması olarak $Ni_xCo_{1-x}O$ / n-Si yapıların alt kontak ve üst kontak işlemleri gerçekleştirildi. Bu amaçla Ag metali 5×10^{-6} torr basınç altında buharlaştırılarak gölge maskeler yardımıyla $Ni_xCo_{1-x}O$ ince filmleri tarafında 1 mm çapında dairesel kontaklar oluşturuldu. Daha sonra yüksek saflıkta gümüş pasta kullanılarak n-Si tarafı kaplandı ve omik kontak oluşturuldu. Üretilen $Ni_xCo_{1-x}O$ /Si-n diyotların gerçek görüntüleri Şekil 3.10'da, üretim akış şeması ise Şekil 3.11'de gösterilmiştir.

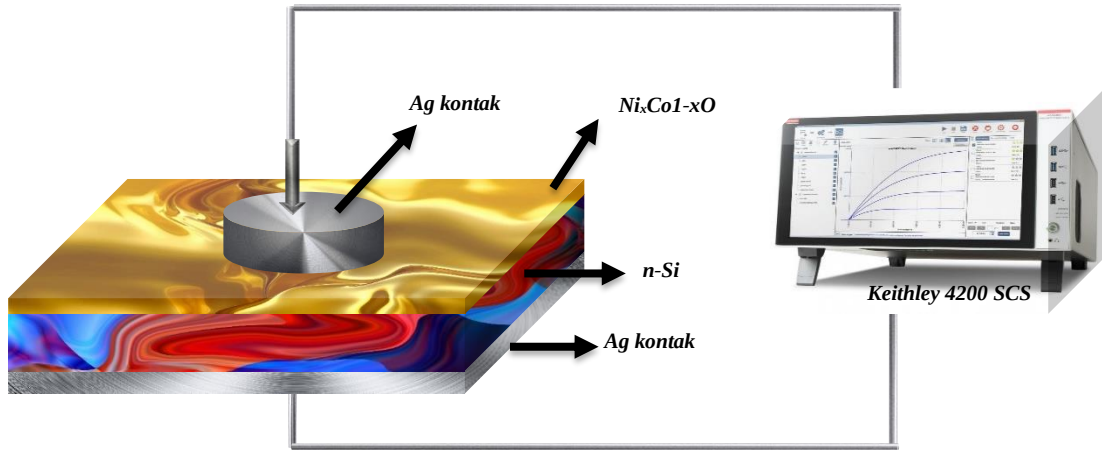


Şekil 3.10. Üretilen $Ni_xCo_{1-x}O$ /n-Si heteroeklem yapılar



Şekil 3. 11. Diyot üretim akış şeması yapısı ($\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}$)

Üretilen diyotların I-V ve C-V karakteristikleri Batman Üniversitesi Merkezi araştırma Laboratuvarında Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Keithley 4200 cihazı ile oluşturulan diyotların şematik yapısı Şekil 3.12’de gösterilmiştir.

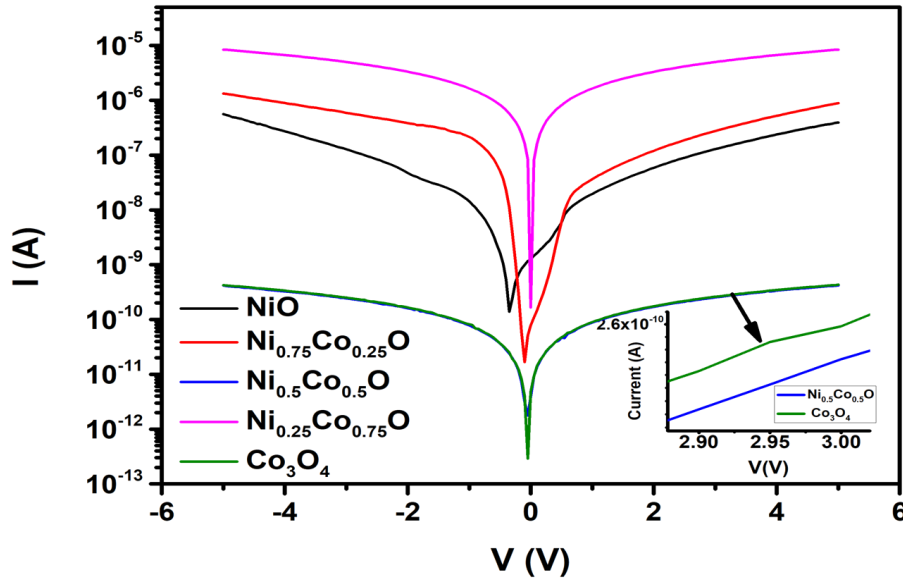


Şekil 3. 12. $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}$ tabanlı diyotların şematik yapısı

4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1.Elde Edilen İnce Filmlerin I-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

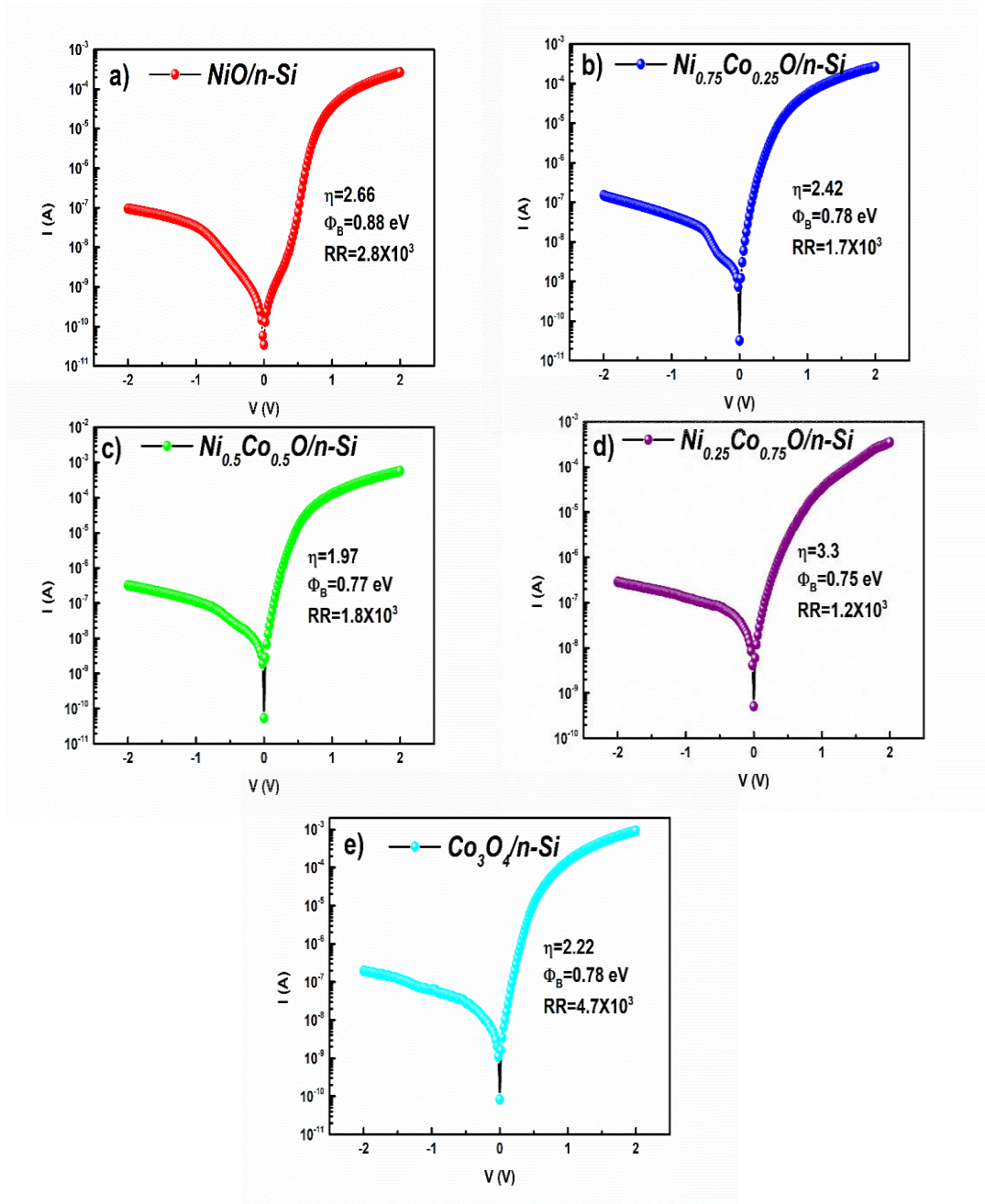
Cam üzerine kaplanan $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}$ metal oksit ince filmlerin elektriksel özellikleri Şekil 3. 4'teki numunelerin sağ alt köşesinde görüldüğü gibi gümüş pasta kontak kullanılarak karanlık ortamda $\pm 4\text{V}$ aralığında geleneksel I-V ölçümleri Şekil 4.1 kullanılarak incelendi. İnce filmlerden gerilime bağlı akım değişiminin katkı oranına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu şekillerde açıkça görüldü. En yüksek elektriksel akım $\text{Ni}_{0,25}\text{Co}_{0,75}\text{O}$ ince filminden, en düşük akım ise $\text{Ni}_{0,5}\text{Co}_{0,5}\text{O}$ ince filminden elde edildiği gözlemlendi.



Şekil 4. 1.Üretilen ince filmlerin elektriksel iletkenliği

4.2.Elde Edilen Diyotların I-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Diyotların elektriksel parametrelerini elde etmek için karanlıkta ve oda sıcaklığında üretilen diyotların deneysel $\pm 2\text{ V}$ aralığında yarı-logaritmik I-V karakteristikleri Şekil 4.2’de incelendi.



Şekil 4. 2. $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}/\text{n-Si}$ diyotlarının yarı logaritmik I-V grafikleri

Elde edilen grafiklerden açıkça görülmektedir ki, üretilen tüm diyotlar, doğrusal olmayan I-V ve $1,22 \times 10^3$ - $4,74 \times 10^3$ arasında değişen doğrultma oranı (RR) değerleri ile doğrultma davranışı sergilediği gözlemlendi. Ayrıca diyotların I-V özelliklerinin Co katkısının konsantrasyonundan açıkça etkilendiği görülmektedir. Düşük maliyetli bir sol-jel spin kaplama yöntemiyle üretilen heteroeklem diyotlarımız, iyi bir doğrultma davranışı gösterdiler ve en yüksek doğrultma (RR) oranı ($4,74 \times 10^3$) değeri ile $\text{CoO}/\text{n-Si}$ diyotundan elde edildi. Yüksek RR değerlerinin elde edilmesi için ters beslem akımlarının

düşürülmesi veya ileri beslem akımlarının arttırılması gerektiği ve üretilen $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}$ heteroeklem diyotların elektriksel özellikleri, Schottky davranışlarından dolayı geleneksel termiyonik emisyon (TE) teorisi ile incelenebilir olduğu gözlemlendi. Heteroeklem diyotları için TE teorisi genellikle aşağıdaki standart diyot denklemi ile ifade edilir (Sze, 2021);

$$I = I_0 = \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{\mu kT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de, η idealite faktörü, q elektronik yük ve k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık (kelvin cinsinden), V uygulanan voltaj, R_s seri direnç ve I_0 doyma akımıdır. Üretilen heteroeklem diyotlarının hesaplanan η değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. İdeal heteroeklem diyotları için η değeri 1 olmalıdır. Ancak tüm diyotların idealite faktörleri 1’den büyüktür ve 1’den büyük bu değerler diyotların ideal olmayan davranış sergilediklerini göstermektedir. Bu ideal olmayan durum genellikle engel yüksekliğinin homojen olmamasına, arayüzey kusurlarına, imaj kuvvet düşüşüne, seri direnç ve doğal oksit tabakasına atfedilmektedir (Kamruzzaman, 2017).

Tablo 4.1. $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}/\text{n-Si}$ diyotlarının yarı logaritmik I-V grafikleri

Diyotlar	RR (Karanlık $\pm 2V$)	n (I-V)	Φ_B (I-V) (eV)	Φ_B (Norde) (eV)	R_s (k Ω) (Norde)
NiO/n-Si	$2,80 \times 10^3$	2,66	0,88	1,04	3,1
Ni_{0.75}Co_{0.25}O/n-Si	$1,76 \times 10^3$	2,43	0,78	0,82	29,9
Ni_{0.50}Co_{0.50}O/n-Si	$1,78 \times 10^3$	1,97	0,78	0,83	3,7
Ni_{0.25}Co_{0.75}O/n-Si	$1,22 \times 10^3$	3,29	0,75	0,77	53,6
CoO/n-Si	$4,74 \times 10^3$	2,22	0,78	0,93	0,9

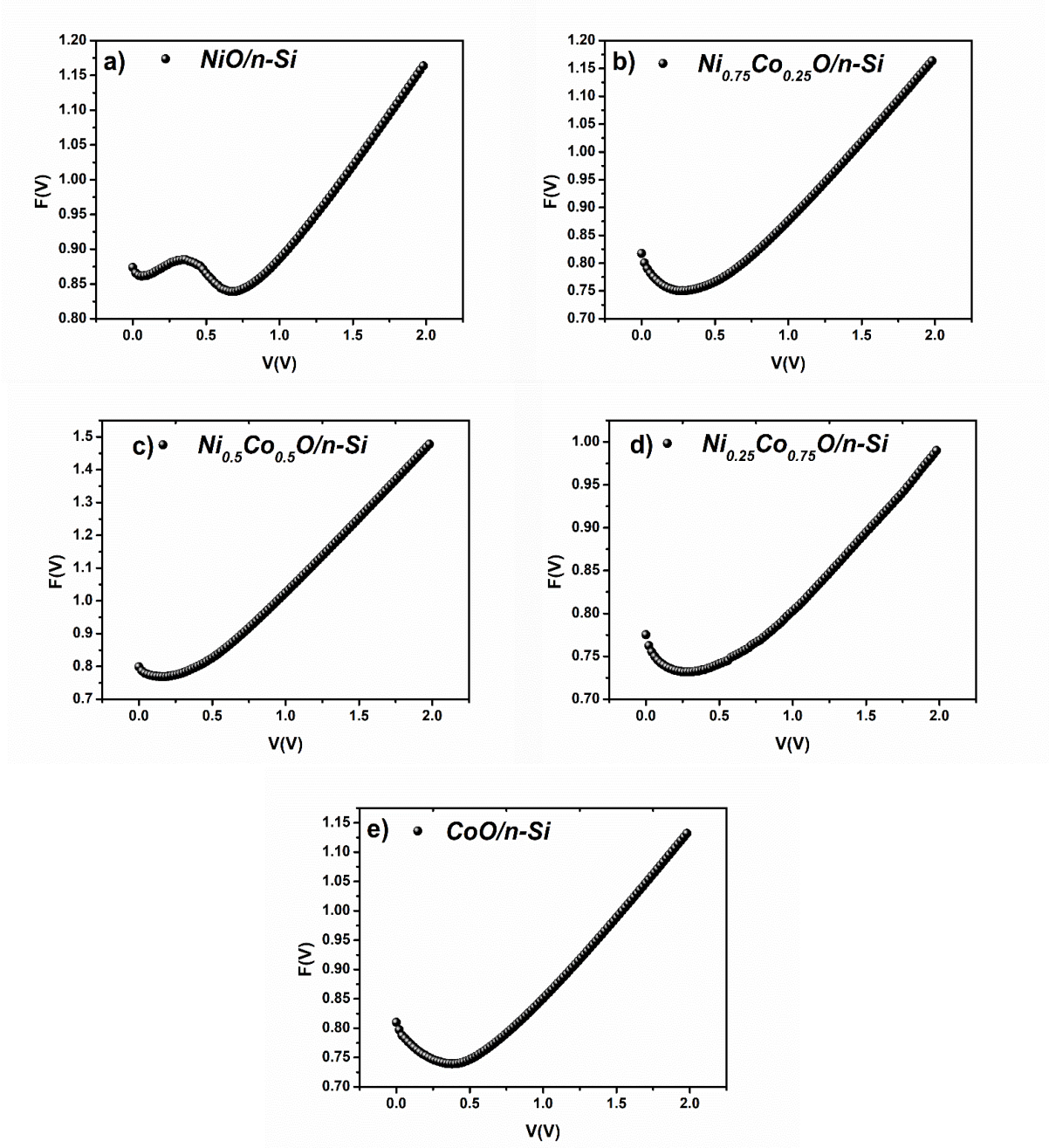
En düşük η değeri 1,97 ile $\text{Ni}_{0,50}\text{Co}_{0,50}\text{O}/\text{n-Si}$ diyotundan elde edildi. Bu durum katkının idealite faktörü değerini dolayısıyla diyotun kalitesini iyileştirdiğini göstermektedir. Bununla birlikte arayüzeyde oluşan homojen olmayan engel yükseklikleri sonucunda oluşabilecek potansiyel dalgalanmalar diyot değerlerinde sapmalara neden olabilmektedir (Pan, 2014).

4.3.Elde Edilen Diyotların F-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Seri direnç (R_s) heteroeklem diyotlarda akımı sınırlayıcı rolü nedeniyle önemli bir parametredir. Bu parametre Norde veya Cheung yöntemleri gibi çeşitli teknikler ile elde edilebilmektedir. Bu yöntemler sayesinde geleneksel I-V verilerinden diyotların R_s 'leri ile Φ_B ve η değerleri hesaplanabilir. Akım-voltaj verilerinden diyotların elde edilmesinde kullanılan yöntemlerden biri olan modifiye Norde yöntemi (Norde, 1979), aşağıdaki fonksiyon ile anlatılmaktadır;

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{A^* A T^2} \right) \quad (4.2)$$

Denklem (4.2)'de, q elektronik yüküdür, γ , η değerinden büyük ilk tam sayıdır (boyutsuz). $I(V)$, I-V karakteristiğinden verilen akımı temsil eder. Üretilen diyotların $F(V)$ -voltaj grafiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4. 3. NixCo1-xO/ n-Si diyotlarının F-V grafikleri

Norde fonksiyonu yeniden düzenlendiğinde, diyotların R_s ve Φ_B değerleri aşağıdaki fonksiyonlardan elde edilebilir;

$$\varphi_B = F(V_0) + \frac{V_0 - kT}{q} \quad (4.3)$$

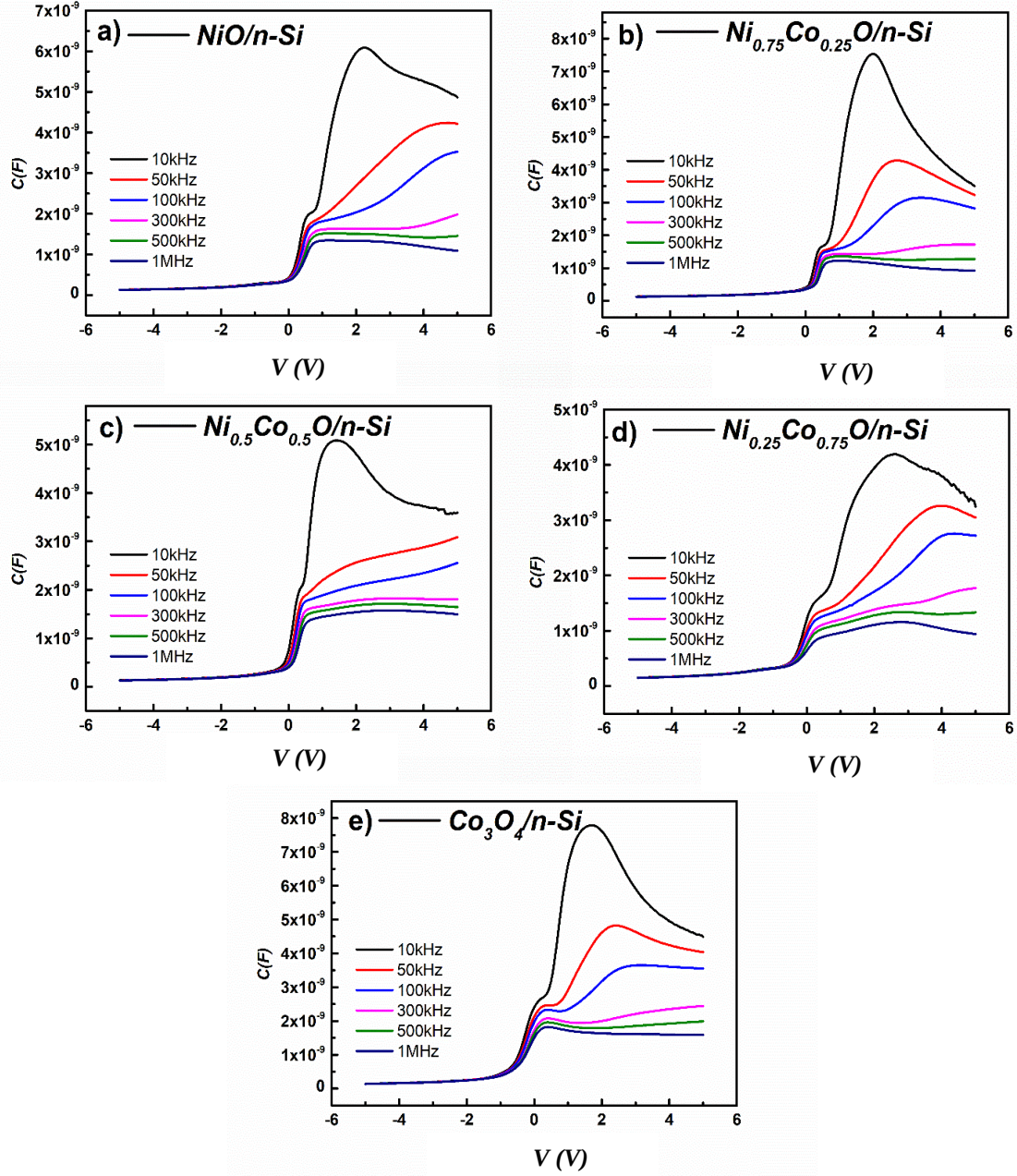
$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{I_0} \quad (4.4)$$

Denklem (4.3)'de, $F(V_0)$, $F(V)$ ile ilişkili minimum noktadır. Norde yönteminden elde edilen R_s ve Φ_B değerleri Tablo 4.1.'de verilmiştir. Elde edilen seri direnç değerleri incelendiğinde katkının bu parametreyi etkilediği gözlemlendi. En düşük R_s değeri ise 0,9 k Ω değeri ile CoO/n-Si diyotundan elde edildi. TE modeli ve Norde yöntemi ile elde edilen Φ_B değerleri benzer varyasyon eğilimine sahiptir, ancak değerler arasında bir tutarsızlık vardır. Bu tutarsızlık genellikle engel homojensizliğine ve diyotların ideal olmayan davranışına bağlanır (Kocyigit, 2018).

Literatür incelendiğinde, elektron ışın biriktirme yöntemi ile üretilen p-NiO/n-Si diyotunun idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direncinin sırasıyla 2,29, 0,82 eV ve 832 k Ω olarak hesaplandığını rapor ettiler (Kaya, 2020). Farklı üretim metodu ile üretilen NiO/n-Si yapılar incelendiğinde, örneğin spin kaplama yöntemi ile idealite faktörü 3,2 bariyer yüksekliği 0,76 eV (Parida, 2017), termal oksidasyon yöntemi ile sırasıyla 10 ve 0,65 eV (Florin, 2012), daldırma kaplama yöntemi ile idealite faktörü 2.58 (M'hammedi, 2019), reaktif püskürtme yöntemi ile üretilen diyotta 2,26 idealite faktörü ve 0,79 eV bariyer yüksekliği (Yilmaz, 2021), döner kaplama tekniği ile üretilen NiO/n-Si diyotundan ise 1,73 idealite ve 0,87 eV bariyer yüksekliğinin hesaplandığı (Turgut, 2017) rapor edilmiştir.

4.4.Elde Edilen Diyotların C-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Katkılı ve Co katkılı NiO/n-Si heteroeklem diyotlarının 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında ölçülen C-V karakteristikleri Şekil 4.4'te verilmiştir. Diyotların kapasitans değerleri artan frekans ile azaldığı görülmektedir. Bu, heteroyapıda arayüzey yüklerinin varlığını gösterir, ancak yüksek frekansta kapasitansa katkıda bulunmaz. Bu durum diyotların arayüzey durumlarının yüksek frekansta A-C sinyali takip edememesine atfedilir (Orak, 2017).

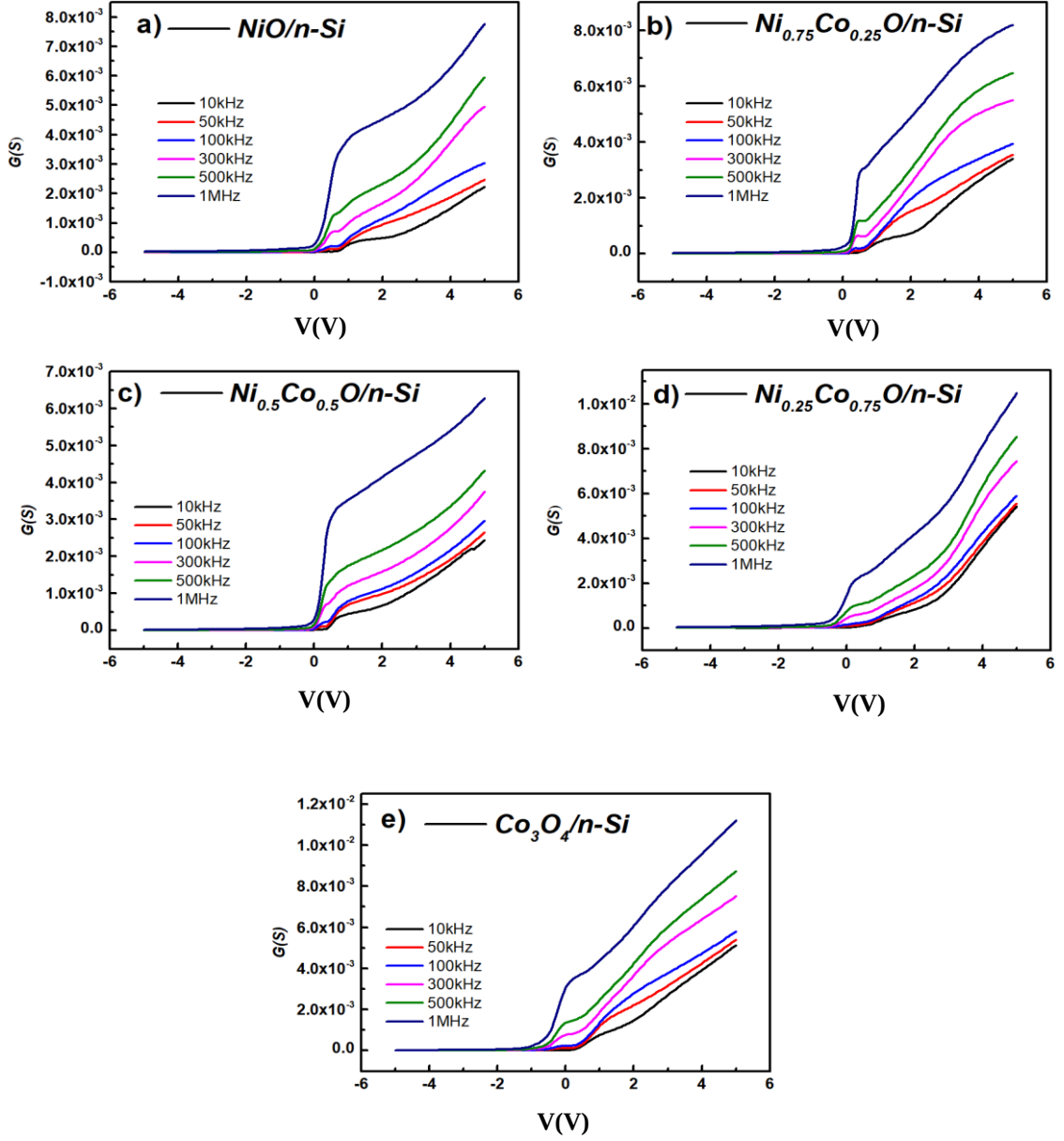


Şekil 4. 4. $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}/\text{n-Si}$ diyotlarının C-V grafikleri

4.5.Elde Edilen Diyotların G-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Katkılı ve Co katkılı $\text{NiO}/\text{n-Si}$ heteroeklem diyotlarının 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında ölçülen G-V karakteristikleri Şekil 4.5'te verilmiştir. Diyotların kondüktans

değerleri artan frekans ile artmaktadır. Frekans arttığında, seri direnç ve arayüz durumları nedeniyle diyotların iletkenliği artar (Gozeh, 2018).



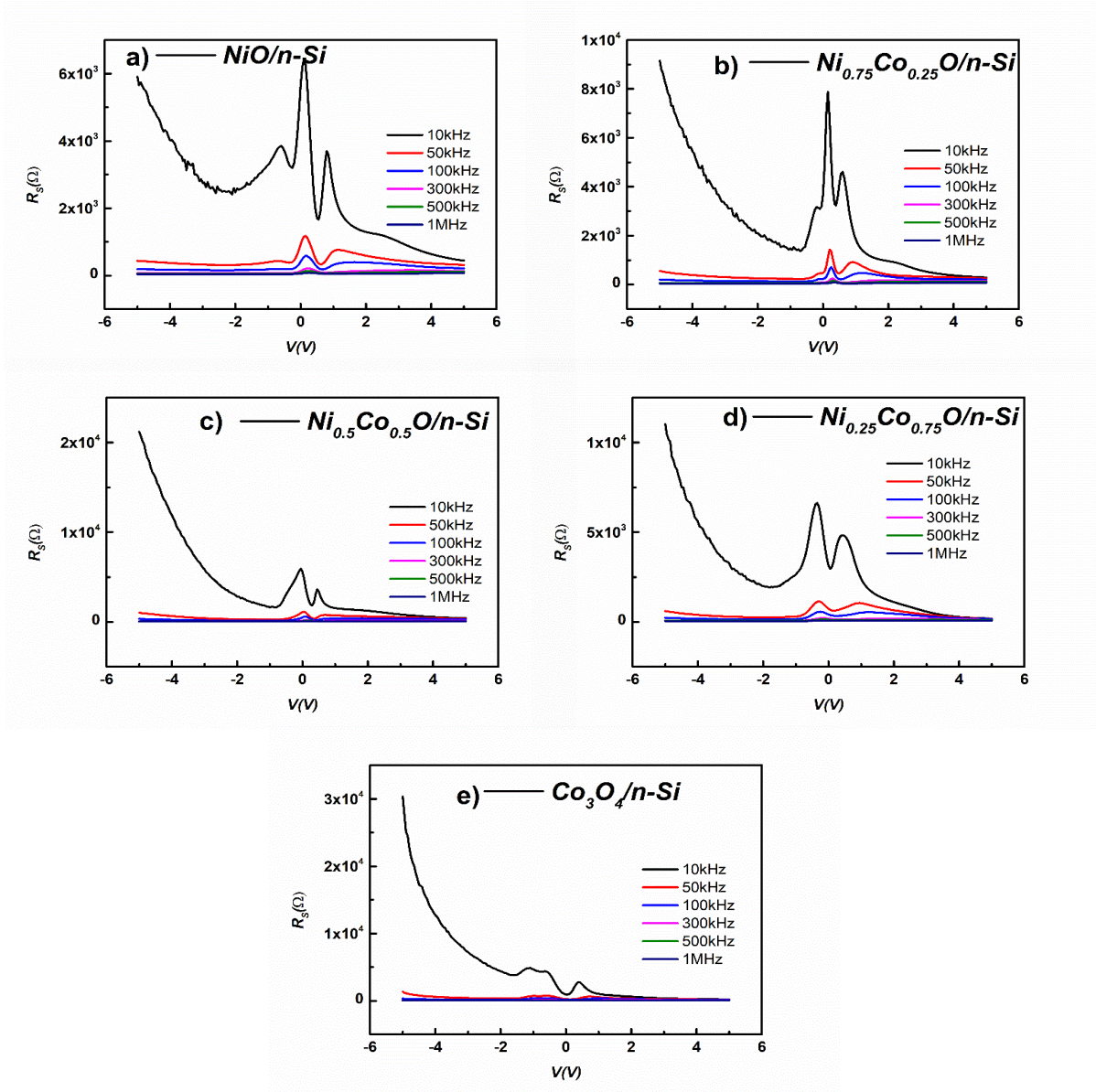
Şekil 4. 5. $Ni_xCo_{1-x}O/n-Si$ diyotlarının G-V grafikleri

4.6.Elde Edilen Diyotların R_s -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Bir diyotun seri direnci, diyotların kapasitansını ve iletkenliğini etkilediği için önemli bir parametredir. Şekil 4.6'da farklı Co katkısı için çeşitli frekanslarda R_s 'nin V'ye karşı değişimini göstermektedir. Diyotların R_s değerleri aşağıdaki denklem ile tanımlanabilir;

$$R_s = \frac{(G_m/\omega C_m)^2}{1+(G_m/\omega C_m)^2} G_m \quad (4.5)$$

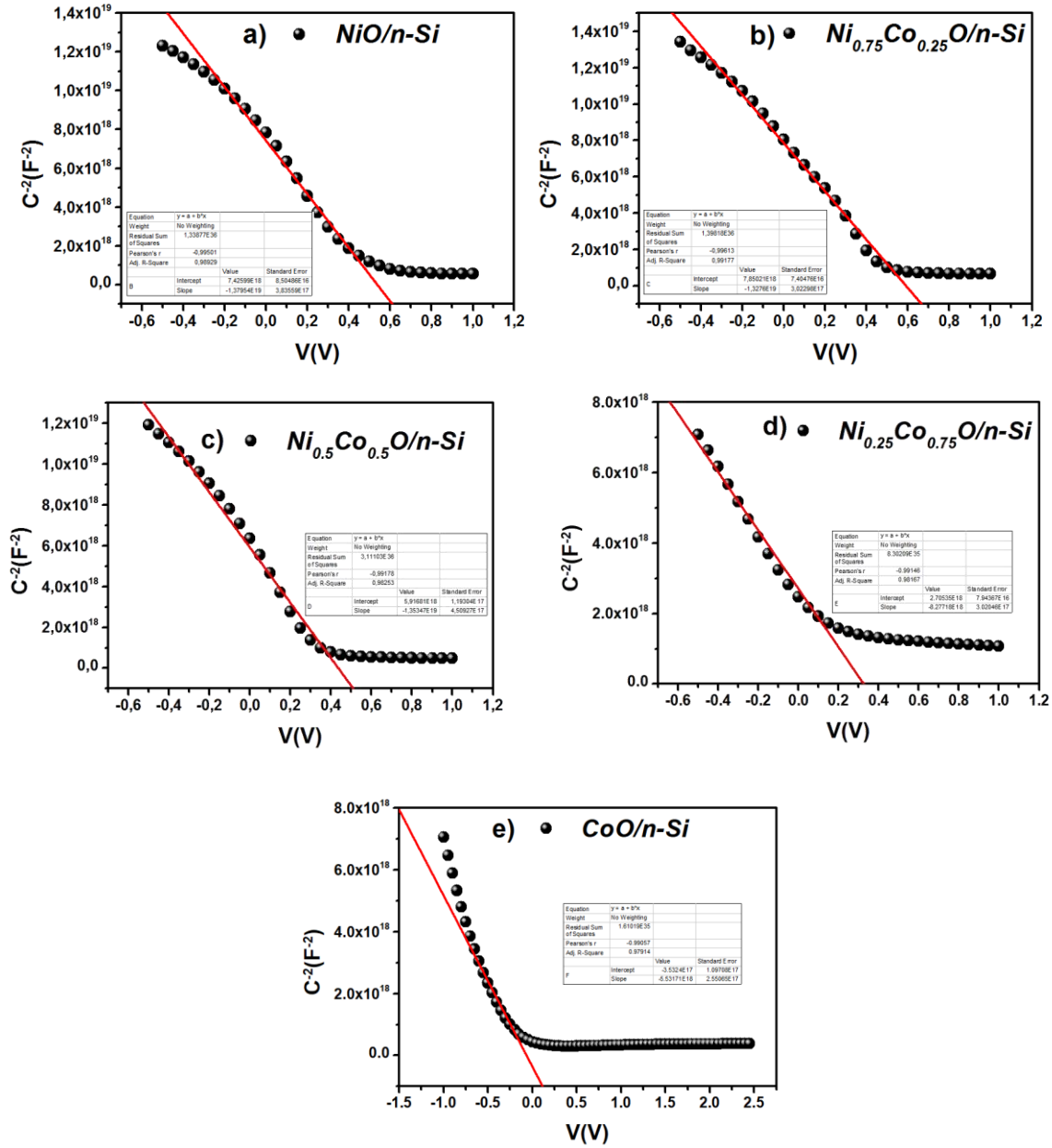
Denklem (4.5)'te, G_m , C_m ve ω sırasıyla ölçülen iletkenliği, ölçülen kapasitansı ve açısal frekansı ifade eder. Şekil 4.6'da gösterildiği gibi, frekans arttığında, sınırlandırılmış durumların varlığı ve bu durumların yüksek frekansta A-C sinyalinin takip edememesi nedeniyle R_s 'nin tepe noktaları azalmaktadır (Gozeh, 2018).



Şekil 4. 6. $Ni_xCo_{1-x}O/n-Si$ diyotlarının R_s -V grafikleri

4.7.Elde Edilen Diyotların C^{-2} -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Üretilen heteroeklem yapıların N_d (cm^{-3}), V_{bi} (eV), N_c (cm^{-3}), E_f (eV), $\Phi_b(C-V)$, E_v , W_d (nm), $\Delta\Phi_b$ (eV), E_{max} (V/cm) gibi elektriksel parametreleri karanlıkta alınan kapasitans verileri kullanılarak elde etmek için 1 Mhz de C^{-2} -V grafikleri çizildi ve Şekil 4.7’de gösterildi. C^{-2} -V grafiği doğrusaldır. Bu da bağlantının ani bir yapı sergilediğini doğrulamaktadır.



Şekil 4. 7. $Ni_xCo_{1-x}O/n-Si$ diyotlarının C^{-2} -V grafikleri

Bu yapılar için C -V arasındaki ilişki aşağıdaki gibi verilmiştir (Sze, 1981; Sharma, 1984);

$$C^{-2} = \frac{2(V_D - \frac{kT}{q} - V)}{q\epsilon_s\epsilon_0 N_d A^2} \quad (4.6)$$

Denklem (4.6)'da, ϵ_s yarı iletkenin dielektrik sabiti ($\text{Si} = 11,8 \epsilon_0$ için), N_d donör atomların katkılama konsantrasyonu, $V_D (= V_0 + KT/q)$ difüzyon potansiyeli ve V_0 , $C^{-2}-V$ grafiklerinin x eksenini kestiği noktadır. Böylece, Ag/n-Si/ $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}$ /Ag yapıları için V_0 , N_D , E_F , $E_{\max}$, W_d ve $\Phi_B(C-V)$ değerleri, tüm yapılar için $C^{-2}-V$ grafiklerinin kesişim ve eğimi kullanılarak elde edildi ve Tablo (4.2)'de gösterildi. Genellikle yüksek frekanslarda bu yapılarda C ve G değeri frekanstan bağımsızdır ve ideal durumda gerilim artışı ile artar. Ancak düşük ve orta frekanslarda durum büyük ölçüde farklıdır ve arayüzey durumlarına bağlı hale gelir. Bu nedenle arayüzey durumlarının frekansa bağlılığını incelemek önemlidir.

Tablo 4.2. Üretilen diyotların C-V ölçümlerinden elde edilen farklı elektriksel parametreler

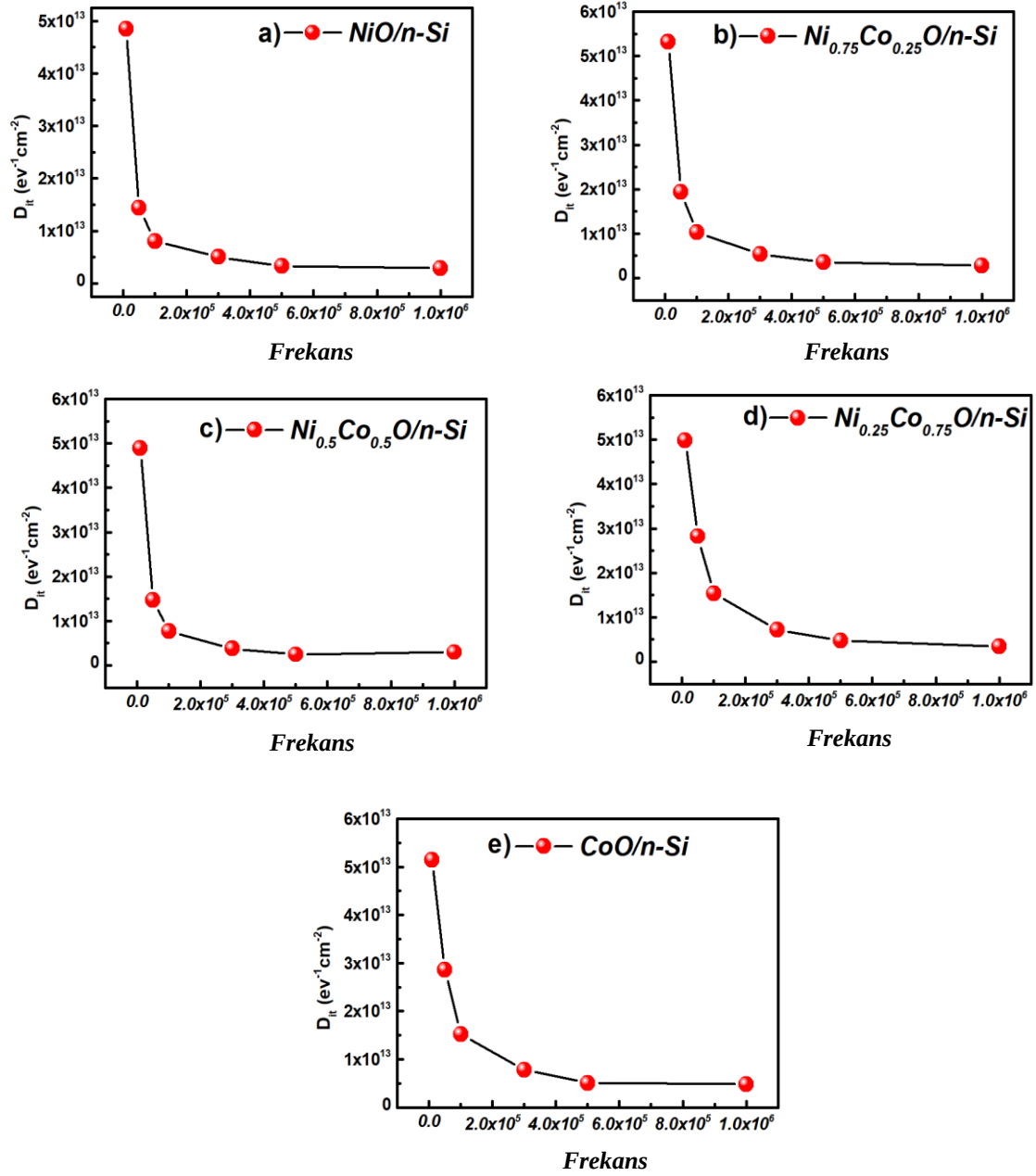
Diyotlar	Nd(n-Si) (cm^{-3})	Vbi (eV)	Nc(n-Si) (cm^{-3})	Ef (eV)	Φ_b (C-V) _{Ev}	Wd (nm)	$\Delta\Phi_b$ (meV)	E _{max} (V/cm)
NiO/n-Si	$1,42 \times 10^{16}$	0,54	$2,38 \times 10^{19}$	0,19	0,71	222	24	48581
Ni _{0,75} Co _{0,25} O/n-Si	$1,47 \times 10^{16}$	0,59	$2,38 \times 10^{19}$	0,19	0,76	228	25	51904
Ni _{0,50} Co _{0,50} O/n-Si	$1,45 \times 10^{16}$	0,44	$2,38 \times 10^{19}$	0,19	0,61	198	23	44347
Ni _{0,25} Co _{0,75} O/n-Si	$2,37 \times 10^{16}$	0,33	$2,38 \times 10^{19}$	0,18	0,48	134	25	48871
CoO/n-Si	$3,54 \times 10^{16}$	0,43	$2,38 \times 10^{19}$	0,17	0,57	125	29	68490

4.8.Elde Edilen Diyotların D_{it} -V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri

Yukarda bahsedildiği gibi arayüzey durumları bir heteroeklem yapının elektriksel karakteristikleri üzerinde çok etkilidir. Bu bağlamda, Hill-Coleman yöntemi, p-n arayüzey kafes uyumsuzluğu nedeniyle oluşan arayüzey tuzak durumlarının (D_{it}) yoğunluğunu incelemek için kullanılmaktadır (Yi, 2012). Aşağıdaki denklem bu yöntemi tanımlamaktadır (Hill, 1980);

$$D_{it} = \left(\frac{2}{qA} \right) \left[\frac{(G_{max}/\omega)}{(G_{max}/\omega Cox)^2 + (1 - C_m/Cox)^2} \right] \quad (4.7)$$

Denklemden dielektrik tabakanın maksimum kapasitansı, maksimum iletkenliği, aktif alanı, açısal frekansı ve kapasitansı sırasıyla C_m , (G_{max}/ω) , A , ω ve Cox olarak temsil edilmektedir. Şekil 4.8’de üretilen diyotlar için D_{it} -frekans grafiğini göstermektedir. Grafik incelendiğinde arayüzey durumlarının frekansla azaldığı görülmektedir. Bu durum C-V, G-V ve R_s -V ölçümlerini de teyit etmektedir.



Şekil 4. 8. $\text{Ni}_x\text{Co}_{1-x}\text{O}/n\text{-Si}$ diyotlarının arayüzey durumlarının frekansa bağlı grafikleri

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Bu çalışmada, sol-jel yöntemiyle döndürme kaplama yapılarak katkısız ve CoO katkılı NiO çözeltiler cam ve n-Si alttaşlar üzerine kaplanarak ince filmler üretildi. NiO/n-Si, Ni_{0,75}Co_{0,25}O/n-Si, Ni_{0,50}Co_{0,50}O/n-Si, Ni_{0,25}Co_{0,75}O/n-Si ve CoO/n-Si olmak üzere 5 adet heteroeklem diyot hazırlandı. Hazırlanan bu diyotların karanlıkta elektriksel ölçümleri yapıldı. Hesapladığımız bu değerleri birbiriyle karşılaştırarak en iyi katkılama oranı gözlemlendi. En yüksek elektriksel iletkenlik Ni_{0,25}Co_{0,75}O ince filminden elde edilirken en düşük iletkenlik Ni_{0,5}Co_{0,5}O ince filminden elde edildiği gözlemlendi.

Diyotların elektriksel parametrelerini elde etmek için karanlıkta ve oda sıcaklığında üretilen diyotların deneysel ± 2 V aralığında yarı-logaritmik I-V karakteristikleri incelendi. Elde edilen şekillerden açıkça görülmektedir ki, üretilen tüm diyotlar, doğrusal olmayan I-V ve $1,22 \times 10^{-3}$ - $4,74 \times 10^3$ arasında değişen doğrultma oranı (RR) değerleri ile doğrultma davranışı sergilediği gözlemlendi. Ayrıca diyotların I-V özelliklerinin Co katkısının konsantrasyonundan açıkça etkilendiği görüldü. Düşük maliyetli bir sol-jel spin kaplama yöntemiyle üretilen heteroeklem diyotlar iyi bir doğrultma davranışı gösterdiler ve en yüksek doğrultma oranı $4,74 \times 10^3$ değeri ile CoO/n-Si diyotundan elde edildiği gözlemlendi. Yüksek RR değerlerinin elde edilmesi için ters beslem akımlarının düşürülmesi veya ileri beslem akımlarının artırılması gerektiği ve üretilen Ni_xCo_{1-x}O heteroeklem diyotların elektriksel özellikleri, Schottky davranışlarından dolayı geleneksel termiyonik emisyon (TE) teorisi ile incelenebilir olduğuna atfedildi (Sze, 2021).

I-V eğrisi incelendiğinde lineerlikten sapmalar olduğu görüldü. I-V grafiği değerlerinden, diyotlar için önemli olan, engel yüksekliği, doyma akımı ve idealite faktörü gibi elektriksel parametreler Termiyonik Emisyon teorisi kullanılarak hesaplandı. Termiyonik Emisyon teorisine göre ideal diyotlarda idealite faktörünün değeri $n=1$ olması gerekmektedir. Hesaplanan idealite faktörü değerinin 1'den büyük olduğu gözlemlendi. Bu ideal olmayan durum genellikle engel yüksekliğinin homojen olmamasına, arayüzey kusurlarına, kontak atma sırasında oluşan sıcaklık ve bunun

sonuçlarına, imaj kuvvet düşüşüne, seri direnç ve doğal oksit tabakasına atfedilmektedir (Kamruzzaman, 2017).

Bu çalışmada diyotların seri direnç değerleri Norde yöntemi ile hesaplandı. Norde yöntemi kullanılarak karanlıkta bulunan seri direnç değerleri NiO/n-Si, Ni_{0,75}Co_{0,25}O/n-Si, Ni_{0,50}Co_{0,50}O/n-Si, Ni_{0,25}Co_{0,75}O/n-Si ve CoO/n-Si için sırasıyla 3,1 k Ω ; 29,9 k Ω ; 3,7 k Ω ; 53,6 k Ω ; 0,9 k Ω olarak hesaplandı.

Elde edilen seri direnç değerleri incelendiğinde katkının bu parametreyi etkilediği gözlemlendi. En düşük R_s değeri ise 0,9 k Ω değeri ile CoO/n-Si diyotundan elde edildi. TE modeli ve Norde yöntemi ile elde edilen Φ_B değerleri benzer varyasyon eğilimine sahiptir, ancak değerler arasında bir tutarsızlık vardır. Bu tutarsızlık genellikle engel homojensizliğine ve diyotların ideal olmayan davranışına bağlanır (Kocyigit, 2018).

Üretilen diyotların 10 kHz ile 1 MHz arasındaki artan frekans değerleri için katkısız ve Co katkılı diyotların ölçümleri alınmış olup üretilen diyotların kapasitansı artan frekansla azaldığı gözlemlendi. Arayüzey durumlarının frekans ile diyotların kapasitans ve iletkenlik değerlerinde değişikliğe yol açtığı gözlemlendi. Bu durum düşük frekanslarda arayüzey durumları A-C sinyalini takip edebilir ancak yüksek frekansta kapasitansa katkıda bulunamadığı ve bu durum diyotların arayüzey durumlarının yüksek frekansta A-C sinyalini takip edememesine atfedildi. (Orak, 2017). Eğrilerin doğrusal olmayan davranışı, C-V grafiklerinde gözlenen tepe noktaları da arayüzey durumlarının varlığına ve seri direnç etkisine atfedilir. Ayrıca katkısız diyotun iletkenlik ve kapasitans değerleri Co katkılı diyotlardan daha yüksek çıktığı belirlendi. Kapasitans değerindeki bu düşüş, Co katkısının safsızlığı ile heteroeklem tükenme bölgesinin azalmasına atfedildi. (Orak, 2017).

Diyotların frekansa bağlı G-V grafikleri incelendiğinde frekans ile gerilim doğru orantılı olduğu gözlemlendi. G değeri de N_{ss} ve R_s değerlerine bağlı olduğu ve frekans ile G ters orantılı olduğu gözlemlendi. İletkenlik değeri ters öngerilim bölgesi altında neredeyse sabit kaldığı ve frekans ile arttığı gözlemlendi. Bu durum frekans arttığında, seri direnç ve arayüz durumları nedeniyle diyotların iletkenliğinin artmasına atfedildi (Gozeh, 2018).

Bir diyotun seri direnci, diyotların kapasitansını ve iletkenliğini etkilediği için önemli bir parametre olduğu ve diyotların seri dirençleri ne kadar düşük olursa kalitesi o oranda arttığı gözlemlendi. Üretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak seri dirençleri ve engel yükseklikleri F(V)-V grafikleri ile hesaplandı. R_s-V ölçümleri alınmış olup frekans arttıkça diyotların R_s değerlerinde azalma olduğu ve R_s değerlerindeki

frekansla değişim, oksit-tuzaklı yük, hareketli oksit yükleri ve sabit oksit yükleri gibi lokalize arayüz yüklerine atfedilir (Norde,1979, Hill,1980).

5.2 Öneriler

Elde edilen sonuçlar, ürettiğimiz ince filmlerin performanslarının CoO katkılanırılması ile yönetilebileceğini göstererek, üretilen diyotlar elektronik başta olmak üzere birçok alanda kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılacak çalışmalarda çözeltiyi oluşturan maddelerin oranlarını değiştirerek, tavlamadaki süre, sıcaklık ve tur sayısı değiştirilerek elektriksel parametreler değiştirilebilir. Böylece daha yüksek performanslı ürünler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdollahi Nejand, B., 2015, Ahmadi, V., & Shahverdi, H. R. New physical deposition approach for low cost inorganic hole transport layer in normal architecture of durable perovskite solar cells. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 7(39), 21807–21818.
- Abdullah, S., 2007, Preparation and Characterisation of chlorine doped cadmium sulphide Thin Films and their Applications in Solar cells. M.Sc thesis, *Kings University*. Saudi Arabia.
- Adenle. 2017, Adenle, Y. A., & Alshuwaikhat, H. M. Spatial estimation and visualization of CO₂ emissions for campus sustainability: The case of King Abdullah University of Science and Technology (KAUST), *Saudi Arabia. Sustainability*, 9(11), 2124.
- Antoini. 1992, E. Sintering of $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ solid solutions at 1200°C. *Journal of Materials Science*, 27(12), 3335–3340.
- Ayyıldız, E. 1996, "Effect of series resistance on the forward current-voltage characteristics of Schottky diodes in the presence of interfacial layer," *Solid-State Electronics*, vol. 39, no. 1, pp. 83-87.
- Baltakesmez, A. 2003, S. Tekmen, P. K, S. Tzemen, K. Meral, and Y. Onganer, "UV-visible detector and LED based n-ZnO/p-Si heterojunction formed by electrodeposition.
- Bethe, H. 1942, H.A. Bethe, *MIT Radiation Lab. Report*, 43-12.
- Bohlin, K. 1986, K.E Bohlin, "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor," *Journal of Applied Physics*, vol. 60, no. 3, pp. 1223-1224.
- Buzea, C. 2007, K.R.- Biointerphases, undefined.
- Caraveo, J., and Frescas, H. 2013, N. Alshareef, Transparent p-type SnO nanowires with unprecedented hole mobility among oxide semiconductors, *Appl. Phys. Lett.*
- Chen, M. 2000, Intrinsic limit of electrical properties of transparent conductive oxide films, *J. Phys. D: Appl. Phys.*
- Cheung, S., and Cheung, N. 1986, "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics," *Solid-State Electronics*, vol. 49, no. 2, pp. 85-87.
- Chopra, K., and Das, S. 1983, Thin Film Solar Cells, Plenum Press, New York.
- Cova, P., and Singh, A. 1997, R.A. Masut, *J. Appl. Phys.* 82 5217–5227.

- Crowell, C., & Sze, S. 1966, *Solid State Electronics*, 9, 1035.
- Devizis, A. 2015, J.D.J. Risse, R. Hany, F. Nüesch, S. Jenatsch, V. Gulbinas, J.E. Moser, Dissociation of charge transfer states and carrier separation in bilayer organic solar cells: a time-resolved electroabsorption spectroscopy study, *J. Am. Chem. Soc.*
- Diao, C. C.-t. 2020, Morphological, optical, and electrical properties of p-type nickel oxide thin films by nonvacuum deposition. *Nanomaterials*, 10(4), 636.
- Dimitrakopoulou, C. 2002, Organic Thin Film Transistors for Large Area Electronics, *Adv. Mater.*, 14, 99.
- Dirksen, J. A. 2001, Dirksen, J. A., Duval, K., and Ring, T. A. NiO thin-film formaldehyde gas sensor. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 80(2), 106–115.
- Dutta, T. G. 2010, Effect of Li doping in NiO thin films on its transparent and conducting properties and its application in heteroepitaxial pn junctions. *Journal of Applied Physics*, 108(8), 083715.
- Etgar, L. 2. 2016, Etgar, L. Hole conductor free perovskite-based solar cells. *New York: Springer Publishing.*
- Facchetti, T. J. 2010, Transparent electronics: from synthesis to applications., *John Wiley & Sons.*
- Florin, C. 2012, M. Purica, F. Iacomi, E. Budianu, P. Schiopu, *Adv. Top. Optoelectron. Microelectron. Nanotechnol.* VI 8411, 84112C.
- Fortunato, E., P. Barquinha and R. Martins, 2012, Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances, *Adv. Mater.*
- Ginley, D., and Hosono, H. 2010, D. C. Paine, *Handbook of Transparent Conductors*, *Springer.*
- Goodman, A. 1963, *J. Appl. Phys.*, 34, 329.
- Gozeh, B. 2018, A. Karabulut, M. M. Ameen, A. Yildiz, F. Yakuphanoglu, *Surf. Rev. Lett.*
- Grove, A. 1967, Physics and Technology of semiconductor Devices, *John Wiley and Sons*, New York.
- Gupta, R. K.-G.-H.-S.-d. 2014, Hendi, A. A., Cavas, M., Al-Ghamdi, A. A., Al-Hartomy, O. A., Aloraini, R. H.,
- Heo, J. 2013, Graphene and Thin-Film Semiconductor Heterojunction Transistors Integrated on Wafer Scale for Low-Power Electronics, *Nano Lett*, 13, 5967.

- Hill, W. 1980, W.A. Hill, C.C. Coleman, A single-frequency approximation for interface-state density determination. *Solid-State Electron.* 23, 987–993 (1980).
- Hsu. 2022, C. C., Yu, S. M., Lee, K. M., Lin, C. J., Liou, B. Y., & Chen, F. R. Oxidized Nickel to Prepare an Inorganic Hole Transport Layer for High-Efficiency and Stability of CH₃NH₃PbI₃ Perovskite Solar Cells. *Energies*, 15(3), 919.
- Huang, A. 2016, A.B. Huang, J.T. Zhu, J.Y. Zheng, Y. Yu, Y. Liu, S.W. Yang, S.H. Bao, L. Lei, P. Jin, J. Mater. Chem. C 4 10839–10846.
- Huang, A. 2016, J.T. Zhu, J.Y. Zheng, Y. Yu, Y. Liu, S.W. Yang, S.H. Bao, L. Lei, P. Jin, J. Mater. Chem. C 4 (2016) 10839–10846.
- Irwin, M. D.-T.-e.-h. 2008, Irwin, M. D., Buchholz, D. B., Hains, A. W., Chang, R. P. H., & Marks, T. J. p-Type semiconducting nickel oxide as an efficiency-enhancing anode interfacial layer in polymer bulk-heterojunction solar cells. *Proceedings of the National Academy of S.*
- Isseroff, L., & Carter, E. 2013, L.Y. Isseroff, E.A. Carter, Electronic structure of pure and doped cuprous oxide with copper vacancies: suppression of trap states, *Chem. Mater.* 25.
- Janotti A. and Walle G., 2009, A. Janotti and C. G. V. de Walle, "Fundamentals of zinc oxide as a semiconductor," *Reports on Progress in Physics*, vol. 72, no. 12, p. 126501.
- Jeng, J. Y.-h.-4. 2014, Jeng, J. Y., Chen, K. C., Chiang, T. Y., Lin, P. Y., Tsai, T. Da, Chang, Y. C., & Hsu, Y. J. Nickel oxide electrode interlayer in CH₃NH₃PbI₃ perovskite/PCBM planar-heterojunction hybrid solar cells. *Advanced Materials*, 26(24), 4107–4113.
- Johansen, L. s.-n. 2004, Johansen, L.G.(2004). Basic semiconductor properties and the p-n junction. (Msc.Thesis). University of Bergen.
- K.K. Purushothaman, G. M.-C.-3. 2012, K.K. Purushothaman, G. Muralidharan, J. Non-Cryst. Solids 358 (2012) 354–359.
- Kamruzzaman, M. &.-5. 2017, Reduction of schottky barrier height, turn on voltage, leakage current and high responsivity of li doped ZnO nanorod arrays based schottky diode. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(7), 5061-5072.
- Kasap, S. 2012, *Optoelectronics & Photonics: Principles & Practices*, 2nd ed. Pearson,
- Kawazoe, H. 1997, P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂, *Nature*.

- Khan, K., 2016, NiOx based device structures. *Doctoral dissertation, University of Toledo, Ohio.*)
- Klauk, H., and Zschieschang, U., 2007, Ultralow-power organic complementary circuits, *Nature*, 445, 745.
- Kocyigit., 2018, Structural and electrical characterization of Al/GO-SiO₂/p-Si photodiode. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 103, 452-458.
- Korkut, H., Yildirim, H., and Turut, N. 2007, "Prediction of lateral barrier height in identically prepared Ni/n-type GaAs Schottky barrier diodes," *Applied Surface Science* , vol. 253, no. 18, pp. 7467-7470, 2007.
- Lei ve ark. 2016, A.B. Huang, J.T. Zhu, J.Y. Zheng, Y. Yu, Y. Liu, S.W. Yang, S.H. Bao, L. Lei, P. Jin, *J. Mater. Chem. C* 4 (2016) 10839–10846.
- Lin. T., 2016, X. Li, J. Jang, High performance p-type NiOx thin-film transistor by Sn doping, *Appl. Phys. Lett.* 108.
- Luo. K., 2016, M.R. Roberts, R. Hao, N. Guerrini, D.M. Pickup, Y.S. Liu, K. Edström, J. Guo, A.V. Chadwick, L.C. Duda, P.G. Bruce, Charge-compensation in 3d-transition-metal-oxide intercalation cathodes through the generation of localized electron holes on oxyg.
- M'hammedi, K. H., 2019, N., Bourenane, N., and Gabouze, N.
- Moraro. 2016, M. C. Optical And Electrical Characterization Of Cd_xSe_{1-x}S And Cu₂S thin Films For Solar Cell Application (Doctoral dissertation, *Kenyatta University*).
- Nandy, S. S., 2007, Suman, Saha, B., Mitra, M. K., and Chattopadhyay, K. K. Effect of oxygen partial pressure on the electrical and optical properties of highly (200) oriented p-type Ni_{1-x}O films by DC sputtering. *Journal of Materials Science*, 42(14), 5766–5772.
- Narayan, R. 2004, R.J. Narayan, P.N. Kumta, C. Sfeir, D.H. Lee, D. Olton, D. Choi, Nanostructured ceramics in medical devices: *Applications and prospects*, JOM. 56.
- Neamen, D. 1997, Semiconductor Physics and Devices, *The Mc -Graw Hill Inc.*, Chicago.
- Nicollian, E. H., 1967, The si-sio₂ interface—electrical properties as determined by the metal-insulator-silicon conductance technique. *The Bell System Technical Journal*, 46(6), 1055-1033.

- Norde, H. 1979, "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, pp. 5052-5053.
- Oeba, D. A.-K. 2018, Electrical and optical characterization of Cu₄SnS₄ and CdS: B thin films for photovoltaic applications. *Kenyatta university*, Nairobi-Kenya.
- Oflaz. 2019, M. D. Manganese doped solution processed nickel oxide hole transport layer for perovskite solar cells. M.Sc Thesis, *Middle East Technical University*, Ankara.
- Omar, M., 1975, Elementary solid state physics. *Wisleyand Sons*: New York.
- Orak, I. K.-S.-8., 2017, Kocyigit, A., Turut, A. The surface morphology properties and respond illumination impact of ZnO/n-Si photodiode by prepared atomic layer deposition technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 691,873-879.
- Pan, L. L.-s.-5., 2014, Meng, K. K., Li, G. Y., Sun, H. M., & Lian, J. S. (2014). Structural, optical and electrical characterization of gadolinium and indium doped cadmium oxide/p-silicon heterojunctions for solar cell applications. *RSC advances*, 4(94), 52451-52460.
- Pan, X. H.-d.-t., 2008, Jiang, J., Zeng, Y. J., He, H. P., Zhu, L. P., Ye, Z. Z., Electrical and optical properties of phosphorus-doped p-type ZnO films grown by metalorganic chemical vapor deposition. *Journal of Applied Physics*, 103(2), 0237.
- Parida, B. K.-N.-3., 2017, Kim, S., Oh, M., Jung, S., Baek, M., Ryou, J. H., and Kim, H. Pu, J., 2012, Highly Flexible MoS₂ Thin-Film Transistors with Ion Gel Dielectrics, *Nano Lett.*, 12, 4013.
- Purushothaman, K. K.-g.-c.-3. 2012, Electrochromic properties of nickel oxide and mixed Co/Ni oxide films prepared via sol-gel route. *Journal of non-crystalline solids*, 358(2), 354-359.
- Rhoderick, E., and Williams, R., 1988, *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford : Oxford University Press.
- Robinson A., 1984, CMOS Future for Microelectronic Circuits: Low power consumption of complementary metal-oxide-semiconductor integrated circuits drives next stage of ultraminiaturization, 224, 705.
- Saha. B., Sarkar, K., Bera, A., Deb, K., and Thapa, R. 2017, Schottky diode behaviour with excellent photoresponse in NiO/FTO heterostructure. *Applied Surface Science*, 418, 328-334.

- Schein, F., 2014, Highly rectifying p-ZnCo₂O₄/n-ZnO heterojunction diodes, *Appl. Phys. Lett.*
- Schottky., 1938, *Naturwiss.*, 26, 843, 1938.
- Shao, D., 2013, Development and Characterization of Novel Optoelectronic Devices Based on Composite Nanomaterials.
- Sharma, B., 1984, Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, *Plenum Press*, New York.
- Shimbori ve ark., 2020, Fabrication and Analysis of a Novel High Voltage Heterojunction.
- Shokouh, S. 2015, High-Gain Subnanowatt Power Consumption Hybrid Complementary Logic Inverter with WSe₂ Nanosheet and ZnO Nanowire Transistors on Glass, *Adv. Mater.*, 27, 150.
- Streetman, B., and Banerjee, S. 2009, Solid State Electronic Devices, 6th ed. Pearson Higher Ed.
- Sun, K., 2015, Brunschwig, N.S. Lewis, Stable solar-driven water oxidation to O₂(g) by Ni-oxide-coated silicon photoanodes, *J. Phys. Chem. Lett.* 6.
- Szatkowski, J., 1992, *Solid State Electron.* 35 (1992) 1013–1015.
- Sze, S., 1969, Physics of Semiconductor Devices, Wiley-Interscience, New York, 1969.
- Sze, S., 1981, Physics of Semiconductor Devices, Wiley, New York.
- Sze, S. M., Li, Y., and Ng, K. K., 2021, Physics of semiconductor devices. John wiley and sons.
- Sze, S., and Ng, K., 2006, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed. Wiley-Interscience.
- Theiss, W., 2002, Analysis of optical spectra by computer simulation-from basics to batch mode. Theiss Hard-Und Software for Optical Spectroscopy: Aachen, Germany. Retrieved from.
- Tsukazaki, A., 2005, A. Ohtomo, T. Onuma, M. Ohtani, T. Makino, M. Sumiya, K. Ohtani, S. F. Chichibu, S. Fuke, Y. Segawa, H. Ohno, H. Koinuma, and M. Kawasaki, "Repeated temperature modulation epitaxy for p-type doping and light-emitting diode based on ZnO," vol.
- Turgut, G., 2017, Turgut, G., Duman, S., ve Özcelik, F. Ş.
- Wang., 2012, Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides, *Nat. Nanotechnol.*, 7, 699.

- Wang, J., and Yang, P., 2015, High-performance room-temperature, and no-humidity-impact ammonia sensor based on heterogeneous nickel oxide and zinc oxide nanocrystals, *ACS Appl. Mater. Interfaces*.
- Wang, Z., and Nayak, P., 2016, Recent Developments in p-Type Oxide Semiconductor Materials and Devices, *Adv. Mater.*
- Xu, L., Chen, X., and Jin, J., 2019, Inverted perovskite solar cells employing doped NiO hole transport layers: *A review. Nano Energy*, 63, 103860.
- Xue, F., 2016, p-Type MoS₂ and n-Type ZnO Diode and Its Performance Enhancement by the Piezophototronic Effect, *Adv. Mater*, 28, 3391.
- Yanagi, H., 2000, Chemical Design and Thin Film Preparation of p-Type Conductive Transparent Oxides, *J. Electroceram.*
- Yang, Y. L.-p.-b.-5., 2021, In-plane anisotropic 2D Ge-based binary materials for optoelectronic applications. *Chemical Communications*, 57(5), 565-575.
- Yi, G., 2012, Semiconductor nanostructures for optoelectronic devices: Processing, characterization and applications. *Springer Science and Business Media*.
- Yılmaz, K., 2004, A thesis submitted to the graduate school of natural and applied science of middle east technical university.
- Zhang, Z., Shao, C., and Wang, C., 2010, Electrospun Nano bers of p-Type NiO/n-Type ZnO heterojunctions with enhanced photocatalytic activity," *ACS Applied Materials and Interfaces*, vol. 2, no. 10, pp. 2915{2923.
- Zhu, L., and Yang., 2011, Valence-band offset of p-NiO/n-ZnO heterojunction measured by X-ray photoelectron spectroscopy," *Physics Letters A*, vol. 375, no. 16, pp. 1760 1763.
- Zou, X., 2011, Improved Subthreshold Swing and Gate-Bias Stressing Stability of p-Type Cu₂O Thin-Film Transistors Using a HfO₂ High-k Gate Dielectric Grown on a SiO₂/Si Substrate by Pulsed Laser Ablation, *IEEE Trans. Electron Devices*.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet ÖZGÜR
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

<u>Derece Adı</u>	<u>İl</u>	<u>Okul</u>	<u>Fakülte/Yüksekokul</u>	<u>Bitirme Yılı</u>
Lise	Diyarbakır	Diyarbakır Birlik Lisesi		2005
Üniversite	Bayburt	Atatürk Üniversitesi	Eğitim Fakültesi / Fen Bilimleri Öğretmenliği Bölümü	2010
Yüksek Lisans	Batman	Batman Üniversitesi	Fen Bilimleri Enstitüsü/Fizik Ana Bilim Dalı	Devam ediyor

İŞ DENEYİMLERİ

<u>Yıl</u>	<u>Kurum</u>	<u>Görev</u>
2012-2017	Batman Merkez Reçep Tayyip Erdoğan Ortaokulu	Fen ve Teknoloji
2017-2020	Batman Merkez Aydıncık Ortaokulu	Öğretmeni Fen Bilimleri Öğretmeni
2020-	Batman-Beşiri Danalı Ortaokulu	Müdür Yardımcısı