



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

SOL JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN
Cr:CuO/n-Si FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ VE
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

Şeyhmus TOPRAK

Danışman
Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Nisan-2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Şeyhmus TOPRAK tarafından hazırlanan “SOL JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN Cr:CuO/n-Si FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu 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 Enstitüsü Müdürü 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 material and results that are not original to this work.

Şeyhmus TOPRAK

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS

SOL JEL YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN Cr:CuO/n-Si FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ VE ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Şeymus TOPRAK

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 50 Jüri

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Prof. Dr. Osman PAKMA

Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

Bu çalışmada, sol jel döndürerek kaplama yöntemi ile katkısız ve Cr katkılı CuO ince filmler n-Si alttaşların üzerine kaplandı. Hazırlanan bu ince filmlerle heteroeklem yapıları CuO/n-Si (CC1), Cu_{0,75}Cr_{0,25}O/n-Si (CC2), Cu_{0,50}Cr_{0,50}O/n-Si (CC3), Cu_{0,25}Cr_{0,75}O/n-Si (CC4), CrO/n-Si (CC5) diyotlar elde ederek, bu diyotların optoelektriksel özellikleri incelendi. Üretilen diyotların I-V karakteristikleri karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında incelendi. I-V ölçümleri kullanılarak bu diyotların idealite faktörleri (n), bariyer yükseklikleri (Φ_B) ve doğrultma oranları (RR) hesaplandı. Norde fonksiyonunu ile diyotların hem karanlıkta hemde ışık altında bariyer yükseklikleri ve seri dirençleri (R_s) hesaplandı. Üretilen diyotların kapasitans-voltaj (C-V), kondüktans-voltaj (G-V) ve seri direnç-voltaj (R_s-V), karakteristikleri 10kHz-1MHz frekans aralığında incelendi. Ayrıca ürettiğimiz diyotların ters beslem (C⁻²-V) grafiğini 1 MHz frekans altında çizerek Nd (cm³), V_{bi} (eV), N_c(cm⁻³), E_f (eV), Φ_{b(C-V)}Ev, W_d (nm), ΔΦ_b (eV), E_{max} (V/cm) gibi parametreleri hesapladı.

Anahtar Kelimeler: CuO, CrO, Elektriksel Özellikler, Heteroeklem Yapılar, İnce Filmler

ABSTRACT

MS THESIS

FABRICATION AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF Cr:CuO/n-Si PHOTODIODES

Şeyhmus TOPRAK

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

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 50 Pages

Jury

Assos. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR

Prof. Dr. Osman PAKMA

Assos. Prof. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

In this study, undoped and Cr-doped CuO thin films were deposited on n-Si substrates by sol-gel spin coating method. The CuO/n-Si (CC1), Cu_{0,75}Cr_{0,25}O/n-Si (CC2), Cu_{0,50}Cr_{0,50}O/n-Si (CC3), Cu_{0,25}Cr_{0,75}O/n-Si (CC4), CrO/n-Si (CC5) diodes were fabricated by using these thin films. The I-V characteristics of the fabricated diodes were investigated in the dark and under a light intensity of 100 mW/cm² conditions. The ideality factors (n), barrier heights (ΦB) and rectification ratios (RR) of these diodes were computed and tabulated. The Norde function was used to calculate the series resistances of the fabricated heterojunctions. Capacitance-voltage (C-V), conductance-voltage (G-V) and series resistance-voltage (Rs-V) characteristics of the produced diodes were examined in the frequency range of 10kHz-1MHz. In addition, the electrical parameters of these structures such as Nd (cm³), Vbi (eV), Nc (cm⁻³), Ef (eV), Φb(CV)Ev, Wd (nm), ΔΦb (eV) and Emax (V/cm) were obtained by using C⁻²-V graph at 1 MHz frequency.

Keywords: CuO, CrO, Electrical Properties, Heterojunction Structures, Thin Films

ÖNSÖZ

Bu çalışmamda deneylerin yapılmasında ve elektriksel ölçümlerin alınmasında; bilgi ve tecrübesinden yararlandığım çok kıymetli danışman hocam Doç. Dr. Şerif RÜZGAR' a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan eşime ve bu süreçte ihmal ettiğim çocuklarıma sevgilerimi sunuyorum.

Şeyhmus TOPRAK
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
1. GİRİŞ	2
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	5
2.1. Yarıiletkenler	6
2.1.1. Katkısız yarıiletken	7
2.1.2. Katkılı yarıiletken	7
2.1.2.1. n-tipi yarıiletken.....	7
2.1.2.2. p-tipi yarıiletken.....	8
2.1.2.3. n-p eklemler	9
2.1.2.4.1. Homo-eklemler	10
2.1.2.4.2. Hetero-eklemler	11
2.2. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	12
2.2.1. Termiyonik Emisyon Teorisi	12
2.2.2. İdealite Faktörü	14
2.2.3. Bariyer Yüksekliği.....	14
2.2.4. Seri Direnç Hesabı	15
2.2.4.1. Norde Yöntemi	15
2.2.4.2. Cheung Yöntemi	17
2.2.4.3. Missous Yöntemi	19
2.3. İnce Film Üretim Metotları.....	20
2.3.1. Sol-Jel Metodu.....	20
2.3.1.1. Döndürme Metodu.....	21
2.3.1.2. Daldırma Metodu.....	22
2.4. Bakır Oksit.....	23
2.4.1. Bakır (I) oksit (Cu ₂ O)	23
2.4.2. Bakır (II) oksit (CuO)	24
2.5. Krom Oksit	25
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	27
3.1. Çözeltilerin Hazırlanması	27
3.2. Kaplama Öncesi Hazırlıklar.....	29
3.3. Kaplama işlem basamakları:	30
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	32
4.1. I-V Karakteristikleri Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	32
4.2. Üretilen Diyotun Işığa Duyarlılık karakteristikleri.....	36

4.3. Norde Modeli Yardımı ile Engel Yüksekliği ve Seri Direncin Hesaplanması	37
4.4. Üretilen Diyotun Kapasite-Gerilim Karakteristikleri	40
4.5. Üretilen Diyotun Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri	41
4.6. Üretilen Diyotların Direnç-Gerilim Karakteristikleri	43
4.7. Üretilen Diyotların Ara Yüzey Durum Yoğunluğunu Karakteristikleri	43
4.8. Üretilen Diyotların C^{-2} -V Karakteristikleri.....	45
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	48
5.1. Sonuçlar	48
5.2 Öneriler	50
KAYNAKLAR	51
ÖZGEÇMİŞ	56

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	:Diyot kontak alanı
A^*	:Richardson sabiti
C	:Kapasitans
C_m	:Ölçülen kapasitans
C_{ox}	:İzolasyon tabakasının kapasitesi
d	:Uzay yükünün bölge genişliği
e	:Elektron yükü
E_f	:Fermi enerji seviyesi
E_{max}	:Eklem bölgesinde oluşan maksimum elektrik alanı
ϵ_s	:Yarıiletkenin dielektrik sabiti
E_v	:Valans bandı
ϵ_o	:Boşluğun dielektrik sabiti
E_c	:İletkenlik bandının tabanı
E_g	:Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_o	:Vakum seviyesi
G_m	:Ölçülen iletkenlik
h	:Planck sabiti
I_0	:Ters besleme akımı
I_d	:Karanlık akımı
I_p	:Fotoakımı
I_r	:Asal taşıyıcı konsantrasyonunun
k	:Boltzmann sabiti
m	:Kütle
M	:Molarite
MA	:Molekül kütlesi
n	:Mol
N_c	:Yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu
N_d	:Alıcı konsantrasyonu
q	:Elektrik yükü
R	:Fototepki
RR	:Doğrultma oranı
R_s	:Seri direnç
S	:Foto duyarlılık
T	:Kelvin derecesi cinsinden sıcaklık
V_0	:Doğru beslem değerindeki minimum akıma karşılık gelen voltaj ölçüsü
V_{bi}	:Built-in potansiyeli
V_F	:İleri besleme gerilimi
V_R	:Geri besleme gerilimi
W	:Açısal frekans
X	:Yarıiletkenin elektron ilgisi
λ	:X-ışınlarının dalga boyu
Ω	:Direnç birimi
Φ_B	:Engel yüksekliği
m^*	:Taşıyıcının etkin kütesidir
γ	:Norde yönteminde bir sabit
δ	:Arayüzey kalınlığı

Kısaltmalar

AFM	:Atomik kuvvet mikroskobu
C_2H_7NO	:Monoetanolamine
$C_3H_8O_2$:2- Methoxethanol
CC1	:CuO/n-Si
CC2	: $Cu_{0,75}Cr_{0,25}O/n-Si$
CC3	: $Cu_{0,50}Cr_{0,50}O/n-Si$
CC4	: $Cu_{0,25}Cr_{0,75}O/n-Si$
CC5	:CrO/n-Si
C-F	:Kapasite frekans
$Cr(C_2H_3O_2)_3$:Krom asetat
CrO	:Krom Oksit
$Cu(CH_3COO)_2$:Bakır asetat
CuO	:Bakır Oksit
C-V	:Kapasite gerilim
G-F	:Kondüktans frekans
G-V	:Kondüktans gerilim
I-V	:Akım-gerilim
MIS	:Metal yalıtkan-yarıiletken kontak
MOS	:Metal oksit yarı iletkenler
MS	:Metal yarıiletken kontak
PVD	:Fiziksel buhar biriktirme
RR	:Doğrultma oranı
TCO	:Şeffaf iletken oksit
TE	:Termiyonik Emisyon

ŞEKİLLER

Şekil 2.1. n-Tipi yarıiletken maddenin oluşması	8
Şekil 2.2. p-Tipi yarıiletken maddenin oluşması	8
Şekil 2.3. n-p Eklemi ile oluşan bir diyotun Akım-Gerilim karakteristikleri (Fiore, 2008)	10
Şekil 2.4. p-n tipi yarıiletkeni birleştirmeden önceki diyagram (Brennan, 2005)	11
Şekil 2.5. p-n tipi yarıiletken birleştirmeden sonraki diyagramı (Brennan, 2005)	11
Şekil 2.6. Hetero-eklemede enerji diyagramı (Brennan, 2005)	12
Şekil 2.7. Sol-Jel yöntemini kullanarak ince film kaplama teknikleri	20
Şekil 2.8. Sol-Jel döndürme yöntemini kullanarak ince film kaplama	21
Şekil 2.9. Cu ₂ O'nun kristal yapısı (Siddiqui, 2012)	24
Şekil 2.10. CuO bileşiğinin kristal yapısının bir bölümü (Bayansal, 2009)	25
Şekil 3.1. Toz halde bulunan; a)Krom asetat (Cr(C ₂ H ₃ O ₂) ₃), b) Bakır asetat (Cu(CH ₃ COO) ₂)	27
Şekil 3.2. Elde edilen krom oksit ve bakır oksit karışımlar	28
Şekil 3.3. Katkılı ve katkısız ince filmler elde etmek için kullanılan solüsyonlar	28
Şekil 3.4. n-tipi alttaşların kimyasal temizleme basamakları	29
Şekil 3.5. Kaplama işlem basamakları	30
Şekil 3.6. a) Döndürme yöntemiyle kaplama b) n-tipi silisyuma damlatma c) Spin Coater cihazının ayarlanması d) 2 Saat boyunca fırında tavlanan ince film	30
Şekil 4.1. Üretilen diyotların I-V grafikleri	33
Şekil 4.2. Üretilen diyotların a) Fototepki b) Fotohassasiyet grafiği	36
Şekil 4.3. Üretilen diyotların karanlık ortamdaki F(V)-V grafikleri	38
Şekil 4.4. Üretilen diyotların 100 mWatt/cm ² ortamdaki F(V)-V grafikleri	39
Şekil 4.5. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kapasitans-Gerilim (C-V) grafikleri	41
Şekil 4.6. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kondüktans-Gerilim (G-V) grafikleri	42
Şekil 4.7. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Direnç-Gerilim (Rs-V) grafikleri	43
Şekil 4.8. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki D _{it} grafikleri	45
Şekil 4.9. Üretilen diyotların, 1 MHz frekanstaki C ⁻² -V grafikleri	46

ÇİZELGELER

Çizelge 2.1. Bakır (I) Oksit (Cu_2O) özellikleri	24
Çizelge 2.2. Bakır (II) Oksit (CuO) özellikleri.....	25
Çizelge 2.3. Krom Oksit (CrO) özellikleri	26
Çizelge 3.1. Kullanılan kimyasal miktarları	27
Çizelge 3.2. Kullanılan kimyasal miktarlarının oranı CuO , $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,50}\text{Cr}_{0,50}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,25}\text{Cr}_{0,75}\text{O}$, CrO	29
Çizelge 4.1. Karanlıkta Termiyonik Emisyon Teorisi kullanılarak hesaplanan parametreler	34
Çizelge 4.2. 100 mWatt/cm^2 ışık altında Termiyonik Emisyon Teorisi kullanılarak hesaplanan parametreler.....	35
Çizelge 4.3. Karanlıkta Norde Yöntemi kullanılarak hesaplanan parametreler	37
Çizelge 4.4. 100 mWatt/cm^2 ışık altında Norde Yöntemi kullanılarak hesaplanan parametreler	40
Çizelge 4.5. Üretilen diyotların ters beslem parametrelerinin hesaplanması	47

1. GİRİŞ

Son yıllarda, metal oksit yarıiletkenler (MOS), mükemmel elektriksel ve optik özellikleri, kimyasal ve mekanik kararlılıkları, düşük sıcaklıkta işlenebilmeleri ve mükemmel cihaz performansları nedeniyle bilim insanlarının ilgisini yoğun bir şekilde çekmiştir (Qiang, 2017). MOS malzemelerinin bu mükemmel özellikleri, onları transistörler, heteroeklem fotodetektörler ve güneş pilleri gibi çeşitli elektronik ve optoelektronik cihazlar için potansiyel aday haline getirmektedir (Rüzgar, 2020). Şeffaf iletken oksit (TCO) olarak da bilinen, iyi elektriksel iletkenliğe ve görünür bölgede nispeten düşük elektromanyetik dalga soğurmasına sahip olan bu tür malzeme grubu, 90'lı yılların sonundan itibaren yoğun bir şekilde çalışılmaktadır. TCO'lar, iletkenlik ve görünür şeffaflık açısından oldukça esnekler. Bundan dolayı görünür ve yakın kızılötesi (NIR) bölgeleri arasında ayarlanan şeffaflıkları ile birlikte elektriksel iletkenlikleri de iletkenlikten yalıtkanlığa kadar ayarlanabilmektedir. TCO'lar, heteroeklem yapıların üretilmesi için de kullanılmaktadır. Farklı optik bant aralıklarına sahip yarıiletkenlerden oluşması, düşük kaçak akımı, yüksek doğrultma oranı ve yüksek ışığa duyarlılık gibi özellikleri sayesinde, fotodetektör uygulamalarında kullanılması için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır (Nandy, 2013).

Optoelektronik cihaz uygulamalarında en çok kullanılan ZnO, CdO, SnO₂ ve TiO₂ gibi metal oksitler, n-tipi yarıiletken elektriksel özelliğe sahiptir (Bera, 2016). Çünkü bu n-tipi metal oksitlerin minimum iletkenlik bandı yüksek hareketlilik sağlarken, donör kusurlarının kolay oluşumu yüksek taşıyıcı konsantrasyonuna yol açar (Zhang, 2020). Bununla birlikte, n-tipi metal oksitlerin karşılığı olarak p-tipi metal oksitlerin üretimi, güçlü lokalizasyonları, zayıf kararlılıkları ve yüksek delik etkili kütleleri nedeniyle optoelektronik cihaz uygulamaları için ele alınması gereken bir konudur (Yin, 2020). Bu nedenle, p-tipi yarıiletkenlerin performanslarını iyileştirme optoelektronik uygulamalar için hayati önem taşımaktadır. Bunun için optoelektronik uygulamalarda uygun p tipi metal oksit yarıiletkenlerin araştırılmasına yönelik yoğun çalışmalar yürütülmektedir. Optoelektronik uygulamalar için kullanılan p-tipi metal oksit yarıiletkenlerin sayısı azdır. p-tipi metal oksitlerin arasında bakır oksit; bakır boşlukları nedeniyle doğal bir p-tipi yarıiletken olması, doğada bol olması, toksik olmaması ve düşük üretim maliyetine sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir (Min, 2020).

Bakır, monoklinik bakır oksit (CuO) ve kübik bakır oksit (Cu₂O) olmak üzere iki ana fazı bulunmaktadır. Bu fazlar arasında, CuO, daha düşük optik bant aralığı nedeniyle

daha fazla ışık emer, Cu_2O fazına kıyasla daha kararlı ve hazırlanması daha kolaydır (Prabhu, 2017). Ayrıca, CuO 'nun yüksek doğal yük konsantrasyonu, onu yüksek performanslı fotodetektör uygulamaları için umut verici bir malzeme yapar (Hong, 2014; Yin, 2020).

Yukarıda belirtilen üstünlüklere rağmen CuO 'nun bazı dezavantajları vardır. Bunlar O 2p durumlarında p-orbitallerinin güçlü lokalizasyonu nedeniyle p tipi inorganik yarıiletkenin düşük hareketliliği, fotodetektör uygulamaları için düşük foto-duyarlılık ve düşük kuantum verimliliği ile sonuçlanması olarak gösterilebilir (Bera, 2017).

CuO 'nun güçlü lokalizasyon davranışının bir sonucu olarak düşük delik hareketliliği probleminin üstesinden gelmek için Kawazoe ve ark. 1997 yılında CuAlO_2 numunesi ile CuO 'nun enerji bant yapısını değiştirmek amacıyla delafossit tipi metal oksit yapıları araştırmıştır (Kawazoe, 1997). Bu öncü çalışmanın ardından CuCrO , CuGaO_2 , CuFeO_2 ve CuBO_2 gibi birçok delafossite tipi metal oksit üretilmiş ve rapor edilmiştir (Bera, 2016; Zhang, 2019). Literatür incelendiğinde bu delafossitlerden CuCrO , diğer delafossitelere kıyasla fotodetektör uygulamalarında çokça çalışılmadığı görülmektedir. Bu durum CuCrO 'nin heteroeklem yapısında p-tipi yarıiletken olarak kullanılması ve Cr katkılamanın fotodetektörlerin elektriksel ve optoelektriksel performansına etkisinin araştırılması fikrini akla getirdi. Bu oksit yarıiletkeninin üretilmesi, geleneksel vakum tabanlı yöntemlerde yüksek elektriksel performans elde edilmesine rağmen, yüksek maliyet ve geniş alanda üretilmemesi gibi dezavantajları bu yöntemleri ekonomik olmaktan uzaklaştırmaktadır (Lee, 2018).

İnce filmlerin üretilmesi için günümüzde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden biride sol-jel yöntemidir. Bu yöntem sıvı olan solün katı olan jele geçiş ana esasına dayanmaktadır. Sol fazda gözenekli yapılar tozlar ve fiberler, kullanıldığından sol fazı çözeltide dibe çökmez. Sol faz jel haline gelir. Jelin elastiklik özelliğinden dolayı, ince filmlerin üretilmesinde bu metodu kullanmak çok avantajlıdır. Ayrıca Sol-jel metoduyla üretilen filmlerin mikro yapıda kaplanabilmesi, kullanılacak ekipmanların temininin kolay olması, üretilen numunenin kalınlığının ayarlanabilmesi, saf kaplamaların yapılabilmesi, kaplamanın düşük bir ıssıda yapılabilmesi ve bu yöntemin sonucunda gözenekli yapılar oluşturulabilmesi bu yöntemin ne kadar avantajlı olduğunu gösterir.

Döndürerek kaplama tekniği oldukça avantajlı bir yöntemdir. Bunun nedeni olarak düşük maliyet, geniş alan potansiyeli, yüksek saflıkta, istenilen kalınlıkta ince film üretimi; homojenlik ve özellikle kolay doping işlemi olarak gösterilebilir (Lee, 2018).

Bu çalışmada katkısız ve Cr katkılı CuO ince filmlerin sol jel döndürerek kaplama yöntemiyle n-Si altaşların üzerine kaplanarak heteroeklem yapıların fabrikasyonu amaçlanmıştır. Daha sonra üretilen bu heteroeklem yapıların karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında elektriksel ve optoelektriksel karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Gao ve ark. (2011), bakır oksit ile üretilen ince filmlerin genellikle p-tipi yarıiletken özellik gösterdiğini, ayrıca n-tipi yarıiletken özellik sergilediği durumlarında olduğunu rapor etmişlerdir. Bakır oksitin iki ana fazı (CuO ve Cu₂O) birde ara fazı (Cu₄O₃) bulunduğunu, CuO'nun bant aralığı 1,2 - 1,9 eV arasında iken Cu₂O'nun bant aralığı 1,8 - 2,5 eV arasında olduğunu belirtmişlerdir.

Rüzgar ve ark. (2020), Sn katkılı ZnO ince filmleri döndürerek kaplama yöntemi ile üretilebileceğini, Sn katkılı ZnO ince filmleri kullanılarak üretilen diyotların yüksek bir doğrultma oranına (RR) sahip olabileceğini rapor ettiler. Ayrıca maksimum RR değerini $4,38 \times 10^4$ olarak hesapladılar. Üretilen bu diyotların fotodiyot özelliği gösterebileceğini belirttiler.

Bhuvaneshwari (2016), bakır oksit (CuO) kullanarak katkısız, %2 ve %6 Cr katkılı olmak üzere 3 farklı şekilde filmler üretmiştir. Cr katkısına bağlı olarak NH₃ algılama oranının 100-600 ppm aralığında arttığını hesaplandı. %6 Cr katkılı CuO yapısının 75 °C sıcaklıkta 600 ppm NH₃ konsantrasyonunda %180'lik bir algılama ortaya koyduğunu tespit ettiler.

Rüzgar ve ark. (2013), bir bakır(II) organik kompleksinin elektrik karakterizasyonunun kontrol edilebildiğini rapor ettiler. Cu(II) kompleks/n-Si heterojonksiyon diyotun elektronik ve fotovoltajik özellikler gösterdiğini, diyotun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği sırasıyla 2,22 ve 0,736 eV olarak hesaplanmıştır. İdealite faktörünün yüksek çıktığı görülmüş, bunun nedenini seri direncin etkisi ve bir arayüzey tabakasının varlığından dolayı olabileceğini belirtmişlerdir. Norde yöntemi kullanılarak seri direnci ve bariyer yüksekliğini sırasıyla 6,7 kΩ ve 0,77 eV olarak hesaplanmıştır.

Doğan (2011), ince filmlerin kimyasal buhar biriktirme ve fiziksel buhar biriktirme yöntemleri ile üretilebileceğini belirtmişlerdir. Kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile vakumlu ortamında kimyasal tepkime sonucu gaz faza geçen malzemenin alttaş üzerine biriktirilmesi sağlayarak, bu yöntemde dışarıdan ısı verilmeden, ısı kimyasal tepkime sonucu açığa çıktığını rapor etmişlerdir. Fiziksel buhar biriktirme yönteminde kaplanacak malzemenin vakum ortamında iyon bombardımanıya ya da ısıtılarak buharlaştırılıp alttaş üzerine taşınmasını sağladılar.

Sönmezoğlu (2012), bu çalışmada ince filmlerin kalitesine, kalınlığına ve üretim maliyetine etkileri araştırılmıştır. Sıcaklık, reaksiyon süresi ve katalizörlerin yapıları

filmlerin kalitesine, kalınlığına ve üretim maliyetini etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, her bir tekniğin diğer tekniklere göre farklı avantaj ve dezavantajları olduğu görülmüştür.

Aydın (2016), bu çalışmada sol jel yöntemi ile Zn ve Li katkılı CuO ince filmler üreterek, bu filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini inceledi. Daha sonra katkısız CuO, farklı oranda katkılı Li ve Li-ZnCuO filmleri cam altlıklar üzerine sırlar yöntemiyle başarılı bir şekilde büyütüldüğünü göstermiştir.

Hasançebi (2006), sol-jel yöntemini kullanılarak CuO ince filmler üretilip bu filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerini incelemiştir. İnce filmlerin sıcaklık, katkılama ve kalınlık parametrelerinden etkilendiği tespit edilmiştir. Aktivasyon enerjilerinin artmasıyla elektriksel özelliklerin değiştiği, bu değişimin sebebinin kalınlığın artmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir. Optik özellikleri incelendiğinde ise enerji bant aralığının ön ısıtma sıcaklığı arttıkça azaldığı ve kalınlığın yani daldırma sayısı arttıkça arttığı göstermiştir.

Rüzgar ve ark. (2020), n-Si altaşlar üzerine katkısız ve La katkılı CuO ince filmleri kaplayarak heteroeklem yapılar üretmişlerdir. Üretilen bu yapıların elektriksel özellikleri karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında incelemiştir. Yapılan incelemeler sonucunda heteroeklem yapıları diyotlar ışığa karşı tepki ve duyarlılık gösterdiği görülmüştür. Seri direnç ve idealite faktörü değerlerinin, diyotların temel parametreleri arasında yer alan parametreler La içeriği ile gelişebileceği rapor edilmiştir.

Balamurugan (2001), bakır oksit ince film üretiminde çokça kullanıldığını ve bunun nedeni ham maddenin çok yaygın olması, üretiminin kolay olması, üretim maliyetinin düşük olması, toksik olmaması ve bant aralığının güneş ışığını soğurmak için ideal aralıkta olması, n-tipi ve p-tipi yarıiletken özellik göstermesinden kaynaklandığını belirtmiştir.

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenler iletkenlik bakımından iletken ve yalıtkan maddeler arasında yer alan ve elektrik iletkenliği; sıcaklığa, ışığa, safsızlığa ve manyetik alana bağlı olan maddelerdir. Yarıiletken maddeler içinde buldukları ortamın; ışık, ısı ya da manyetik alan değerlerinden etkilenir. Yeterli enerjiyi alan elektronlar valans bandından iletim bandına geçerek elektriksel iletimin gerçekleşmesini sağlarlar. Yarıiletkenlerin bu özeliği elektroniğin ana elemanları olan, entegre, diyot ve transistör devre elemanlarının

üretiminde kullanılmaktadır. Yarıiletkenleri katkılı ve katkısız yarıiletkenler olarak iki grupta inceleyebiliriz.

2.1.1. Katkısız yarıiletken

Saf olan katkısız yarıiletken malzemeler mutlak 0 K sıcaklığında yalıtkan madde gibi davranır. Elektronların iletim bandına geçmesi için yarıiletken maddelere gerilim uygulanarak veya ısı, ışık ve manyetik alanın etkisinde bırakılarak iletken olması sağlanabilir. İletkenlik bandına geçen elektronlar boşluklar oluşturur. Oluşan bu boşluklar artı yüklerle yüklenir. Daha sonra boşluklar tarafından elektronlar çekilerek elektriksel iletkenliği sağlanmış olur (Kasapoğlu, 2014).

Katkısız yarıiletkenler elektronik devre elemanlarında çok kullanılmaz. Çünkü elektronlar ve boşlukların sayısı aynı olduğu için valans bandındaki elektronları iletenlik bandına taşımak için yeterli enerjiyi sağlamak zordur. Eğer serbest taşıyıcı varsa elektronlar ve boşlukların hareketi daha kolay olur ve bundan dolayı katkılı yarıiletken üretme düşüncesi meydana gelmiştir (Yacobi, 2003).

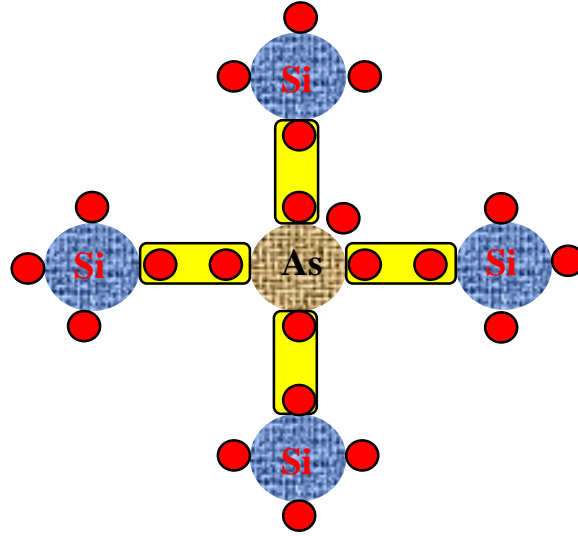
2.1.2. Katkılı yarıiletken

Katkısız yarıiletkenlerde elektronların ve boşlukların sayısı aynı olduğu için elektronların veya boşlukların konsantrasyonunu değiştirme düşüncesi ortaya çıkmıştır. Elektronların veya boşlukların sayısının değiştirilerek yasak bant enerjisinin değeri değiştirilebilir. Bunu için katkılı yarıiletkenler içine istenilen özelliklere göre bir takım katkı atomları eklenerek elektronların veya boşlukların sayısı artırılır ve böylece elektrik iletkenliği de artırılmış olur. Katkılandırılmış yarıiletken malzemeler iki gruba ayrılmaktadır (Yacobi, 2003).

2.1.2.1. n-tipi yarıiletken

Son yörüngesinde 4 elektronu olan Silisyum veya Germanyumun içine katkılama için son yörüngesinde 5 elektron bulunan arsenik (As), fosfor (P) veya antimon (Sb) maddesi eklenerek katkılandırma işlemi yapılır. Eğer As, 4 elektrona sahip olan Silisyum ile katkılandırılırsa aralarında kovalent bağ oluşur. Bunun sonucunda bir elektron bağ yapmaz. Boşta kalan As'nin beşinci elektronu, kristal yapıdaki maddenin içinde dolaşır. Şekil 2.1'deki gibi oluşan bu maddeye n-tipi yarıiletken madde denir. n-tipi kristalin içinde dolaşan elektron

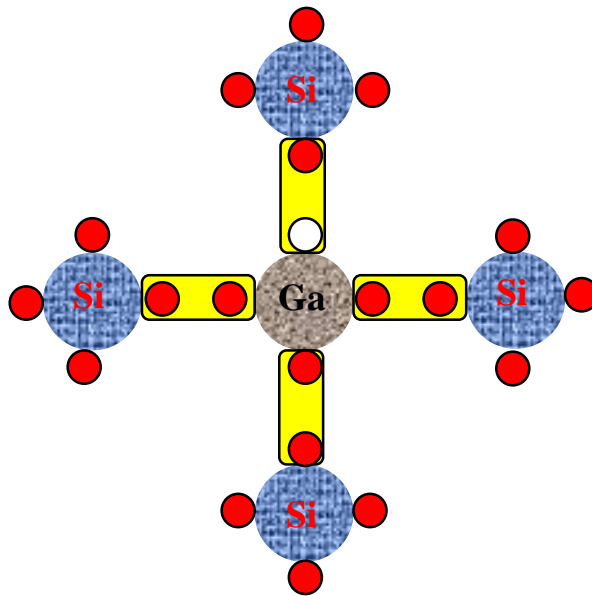
eksi yüklü iyon olarak ifade edilir. n-tipi yarıiletken maddede eksi iyonlar çoğunlukta olduğu için bunlara çoğunluk taşıyıcı denir. Çoğunluk taşıyıcılar elektrik akımının iletiminde görev yapar (Yacobi, 2003).



Şekil 2.1. n-Tipi yarıiletken maddenin oluşması

2.1.2.2. p-tipi yarıiletken

Son yörüngesinde 4 elektronu olan silisyum (Si) veya germanyum (Ge) içine katkılama için son yörüngesinde 3 elektron bulunan alüminyum (Al) veya galyum (Ga) maddesi eklenerek aralarında kovalent bağ oluşur. Şekil 2.2’de görüldüğü gibi oluşan bu bağ sonucunda eksik bir elektron meydana gelir.



Şekil 2.2. p-Tipi yarıiletken maddenin oluşması

Bu boşluk, madde içinde elektronların hareket etmesini sağlar. Bu tip yarıiletkenler elektron sayısı boşluk sayısından az olduğu için p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. p-tipi kristalin içinde oluşan boşluklar artı yüklü iyon olarak ifade edilir. Artı yüklü iyonlar elektrik akımının iletiminde görev yapar (Kasapoğlu, 2014).

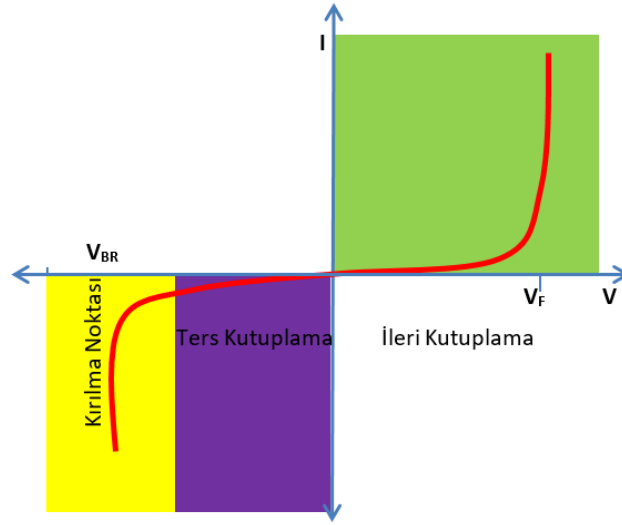
2.1.2.3. n-p eklemler

p-tipi ve n-tipi maddeler bir kristalde birleştirildiğinde iki madde arasında bir arakesit bölge oluşturur ve bu bölgeye n-p eklemi denir. n-tipi yarıiletken maddede çoğunluk yük taşıyıcıları eksi yüklü elektronlardır. p-tipi yarıiletken madde ise artı yüklü boşluklar çoğunluk yük taşıyıcıdır. n-p eklemi yapılıncaya, eksi yüklü elektronlar ve artı yüklü boşluklar yüksek konsantrasyonlu yüzeyden düşük konsantrasyonlu yüzeye taşınmak isteyecektir. Böylece boşluklar ve elektronlar hareket ederek eksi yüklü ve artı yüklü iyonlar oluşturur. n-tipi yarıiletken madde bölgesinde elektron verici atomlara donör denir. p-tipi yarıiletken madde bölgesindeki elektron alıcı atomlara akseptör denir. p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddelerin birleştirilmesiyle eklem bölgesinde bir deplasyon bölgesi oluşur. Bu deplasyon bölgesine bağlı olarak bir gerilim oluşur, bu gerilim bir süre sonra denge durumuna ulaşır (Fiore, 2008).

Deplasyon bölgesinde oluşan geriliminin değeri yarıiletken maddenin katkı oranına, yarı iletkenin türüne, ısı ve sıcaklığa bağlıdır. Silisyum yarıiletken madde kullanılarak n-p eklemi yapılmış ise deplasyon bölgesinde oluşan gerilimin değeri normal sıcaklıkta 0,6-0,7 V kadardır. n-p eklemi germanyum yarıiletken madde kullanılarak yapılmış ise deplasyon bölgesinde oluşan gerilimin değeri normal sıcaklıkta 0,7 V kadardır. Gerilim değeri Silisyum ve Germanyumun yarıiletken maddelerin gerilim değerlerine ulaşırsa elektronlar hareket etmeye başlar ve bunun sonucunda da bir akım akışı meydana gelir. n-p eklemi, ters polarma durumunda akımı ters yönde engellemeye çalışır ve akım sadece doğru polarma durumunda akar. Bundan dolayı diyotlar zamana göre yönü ve şiddeti değişen alternatif akımı zamana göre yönü ve şiddeti değişmeyen doğru akıma dönüştürmek için kullanılır (Fiore, 2008).

Denge durumu oluşunca n-p ekleminin uçlarına dışardan gerilim uygulanmadan, tüketim bölgesinde oluşan elektrik alanı tarafından oluşturulan bariyer n-p tarafındaki elektronların p-n tarafındaki boşluklara ulaşmasını engeller. Bu yüzden Şekil 2.3'te de görüldüğü gibi n-p eklemler yapılarak gerilim uygulanmadığı sürece bir akım geçişi olmaz. İleri yönde bariyer yüksekliğini geçen bir gerilim uygulandığında akım akmaya başlar,

fakat gerilim ters yönde uygulandığında, n-p eklemli yapı akıma karşı büyük bir direnç göstererek akımın akmasını engeller.



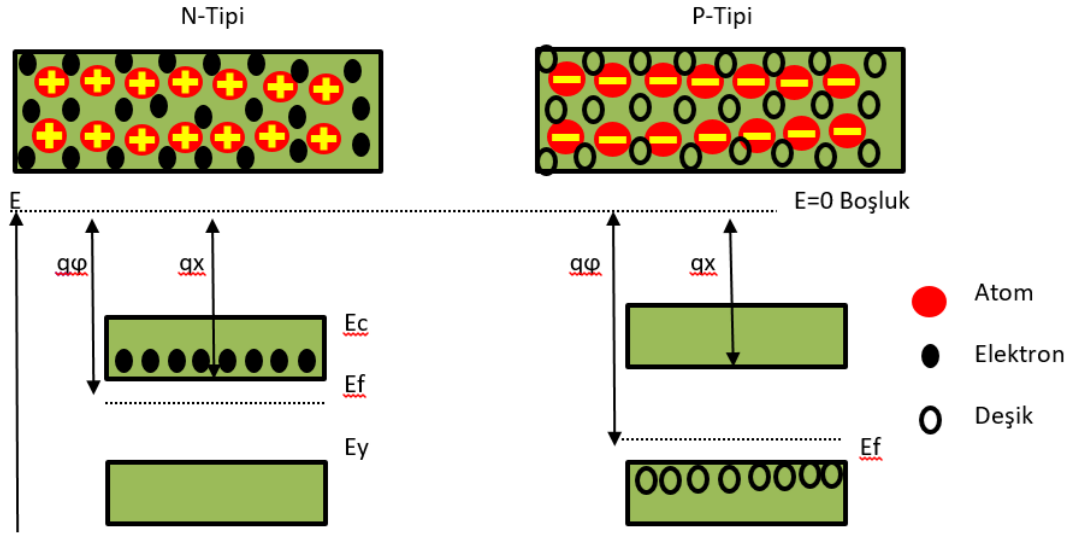
Şekil 2.3. n-p Eklemi ile oluşan bir diyotun Akım-Gerilim karakteristikleri (Fiore, 2008)

2.1.2.4. Yarıiletkenlerde eklem türleri

2.1.2.4.1. Homo-eklemler

Yarıiletken eklemler, n-tipi ve p-tipi yarıiletken maddeler Şekil 2.4'teki gibi birleştirilerek yapılmaktadır. p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddeler sadece Silisyum ya da Germanyumdan oluşursa ve oluşan bu yarıiletken maddeler birbirine eklenirse bu eklemlere Homoeklem denir. Homo-eklem, aynı bant aralıklarına sahip iki farklı yarıiletken maddenin birleşmesiyle oluşur. Bundan dolayı Homo-eklemlerde n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerde yasak bant aralığı aynıdır. n-tipi maddede iletim bandında elektronlar serbest hareket eder, p-tipi maddede ise iletim bandında boşluklar serbest hareket eder. Bu tür eklemleri yapmak kolaydır ama verimi yüksek devre elemanları oluşmaz.

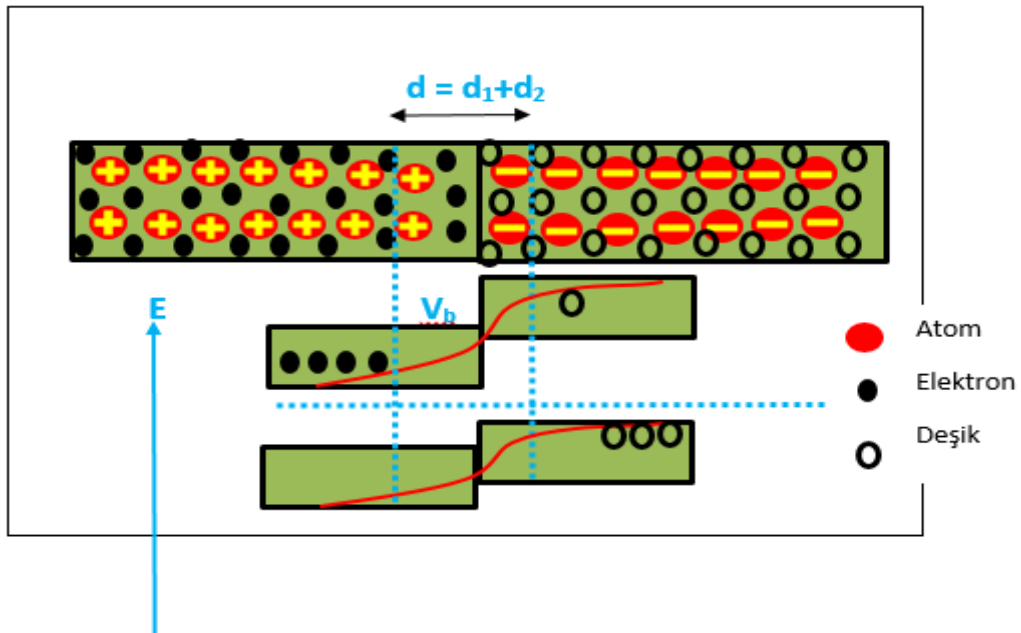
Aynı yarıiletken maddeden oluşan n-p homoeklemlerin yük yoğunlukları birbirinden farklı olduğu için yük dağılımının fermi seviyesi eşitleninceye kadar n-tipi maddenin iletim bandındaki serbest elektronlar p-tipi maddenin tarafına geçerek buradaki boşluklarla birleşir. Oluşan n-p homoeklem yapıda elektronlar boşluklarla birleşerek pozitif ve negatif hareketsiz iyonlar meydana getirir. Böylece tükenim bölgesinde hareketli yükler kalmayacağı için denge durumu oluşur (Brennan, 2005).



Şekil 2.4. p-n tipi yarıiletkeni birleştirmeden önceki diyagram (Brennan, 2005)

2.1.2.4.2. Hetero-ekelemler

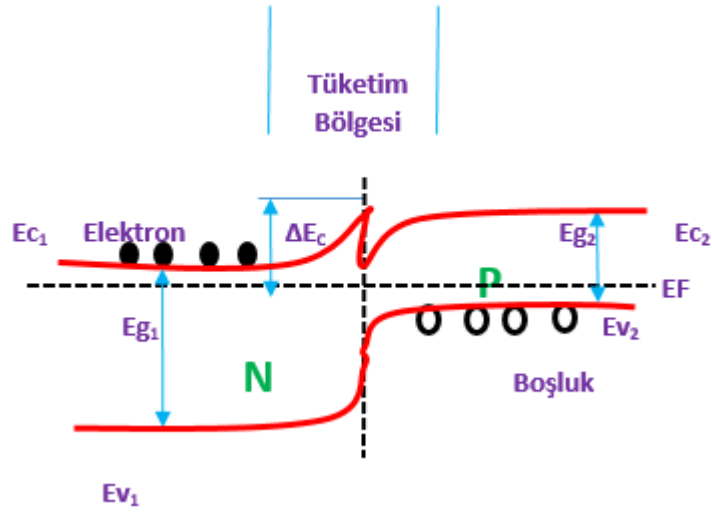
Farklı yarıiletken maddelerden oluşturulan n-tipi ve p-tipi yarıiletken maddelerle Şekil 2.5'teki gibi oluşturulan ekelemlere heteroeklem denir.



Şekil 2.5. p-n tipi yarıiletken birleştirmeden sonraki diyagramı (Brennan, 2005)

Heteroeklemler, farklı bant aralıklarına sahip p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddelerin birleşmesiyle oluşur. Oluşan bu heteroeklemlili yapıların Şekil 2.6'te de görüldüğü gibi enerji bant aralıkları birbirinden farklı olduğu için birleşim bölgesinde

kuantum kuyuları oluşturur. Bu kuantum kuyularının etkilerini kontrol ederek verimli ve hızlı devre elemanları heteroeklemlı yapılarla üretilebilir.



Şekil 2.6. Hetero-eklemlı enerji diyagramı (Brennan, 2005)

2.2. Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

2.2.1. Termiyonik Emisyon Teorisi

Termiyonik Emisyon, elektronun veya boşluğun sıcak bir yüzeyden serbest bırakılması olarak tanımlanır (Shkar, 2021). Metal yarıiletken diyotların termiyonik emisyon teorisi, taşıyıcıların (elektronlar ve boşluklar) termal enerjisinden dolayı metalden yarıiletkene veya yarıiletkenden metale geçmek ve potansiyel engelleri aşmak üzerine kuruludur. Bu olay, metal oksit n-tipi yarıiletken yapılarda, elektronlar, metal oksit p-tipi yarıiletken yapılarda ise, boşluklarla sağlanmaktadır (Hameed, 2021).

Bu teoriye göre;

- Termal olarak indüklenen, çoğu taşıyıcı tarafından sağlanan akım.
- Potansiyel bariyer yüksekliği kT/q enerjisinden çok daha fazladır ($q\Phi_B \gg kT$).
- Serbest boşlukların yarıiletkenden metale taşınmasının tüketim bölgesindeki etkisi ihmal edilebilir.
- Görüntü (hayal gücü) kuvvetleri etkisi ihmal edilir ve mevcut engel yüksekliğine zayıf bir şekilde bağlıdır.

Bu varsayımlarla, yarıiletkenden metale J_{sm} akım yoğunluğu, potansiyel engeli aşmak için yeterli enerjiye sahip elektronların konsantrasyonu ve hızları ile ifade edilir (Hameed, 2021):

$$J_{sm} = \int_{E_f + q\Phi_B}^{\infty} qV_x dn \quad (2.1)$$

Denklem 2.1' de $E_f + q\Phi_B$ Termiyonik Emisyon için gerekli minimum enerjidir, V_x Metalden iletim hızı oranıdır, dn Küçük bir enerji aralığındaki enerji yoğunluğudur. Bu ifadeden hareketle metal n-tipi yarıiletken kontak denkleminde metalden yarıiletken kontaklara geçen elektronların akım yoğunluğu denkleminde

$$J_{ms} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp(-q(\Phi_B) k_B T) \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (2.2)$$

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp\left[-\frac{q(\Phi_B)}{k_B T}\right] \exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) \quad (2.3)$$

Denklem 2.2 ve 2.3'de A^* Termiyonik Emisyon Richardson sabiti, k_B Boltzmann sabiti, m^* Taşıyıcının etkin kütlesi, h Planck sabitidir.

Metalden yarıiletkene hareket eden elektronlar akımın akmasını sağlar. Bu akım aşağıdaki denklem 2. 4'te gösterilmiştir.

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp\left[-\frac{q\Phi_B}{k_B T}\right] \quad (2.4)$$

Toplam akım yoğunluğu aşağıdaki denklemlerin toplamı olarak tasarlanırsa ve akım metalden yarıiletkene doğru pozitif olarak seçilirse şu şekilde yazılır:

$$J_n = J_{sm} + J_{ms} \quad (2.5)$$

$$J_n = \left(A^* T^2 \exp\left[\frac{-q(\Phi_B)}{k_B T}\right] \right) \left(\exp\left(\frac{qV}{k_B T}\right) - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q(\Phi_B)}{k_B T}\right) \quad (2.7)$$

Denklem 2.7’de verildiği gibi kaçak akım olarak da adlandırılan doyma akım yoğunluğudur hesaplanır.

2.2.2. İdealite Faktörü

İdealite faktörü, idealden sapmayı gösteren boyutsuz bir değişkendir. Diyotun ideal özelliklerinin hesaplanması için $n=1$ olarak verilir. İdealite faktörü hesaplanırken $eV \gg 3kT$ ileri sapmada, bu denklemdeki 1 terimi ihmal edilebilir. Bu durumda aşağıdaki 2. 8 denklemi elde edilir (Sze, 2007).

$$I = I_0 \left[\exp \left(- \frac{(eV)}{(nkT)} \right) - 1 \right] \quad \rightarrow \quad I = I_0 \exp \left(\frac{(eV)}{(nkT)} \right) \quad (2.8)$$

Yukarıda yazdığımız 2. 8 denkleminin her iki tarafının \ln ’ni alındıktan sonra V ’ye göre türev alınarak aşağıdaki denklem 2.9 ile idealite faktörü denklemi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \left(\frac{dV}{d(\ln I)} \right) \quad (2.9)$$

2.2.3. Bariyer Yüksekliği

Metal yarıiletken diyotlarda eklem bölgesinde bir potansiyel oluşur. Bunun sonucunda da akımın geçişine karşı bir bariyer oluşur. Bu bariyerle elektron geçişi kontrol edilir. Bundan dolayı bariyer yüksekliği diyotlar için önemli bir parametredir.

Diyotlardan geçen akım aşağıdaki 2.10 denklemiyle hesaplanabilir (Sze, 2007).

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{eV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (2.10)$$

I-V grafiği I-V verileri kullanılarak çizilir. Bu grafikte 2. Bölge gerçeğe uyacak şekilde çizilmiştir. $V=0$ ’da bu çizginin dikey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akımı denklemi 2.11’te verildiği gibi hesaplanır.

$$I_0 = AA^* T^2 \exp \left(- \frac{e\Phi_B}{kT} \right) \quad (2.11)$$

Denklem 2.11'den yararlanarak diyotların engel yüksekliği her iki tarafın "ln"ni alınır ve düzenlenirse aşağıdaki 2.12 denklemiyle hesaplanabilir.

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.12)$$

Denklem 2.12'de A diyot kontak alanı, A* Richardson sabiti, T Kelvin derecesi cinsinden sıcaklık, k Boltzmann sabitidir.

2.2.4. Seri Direnç Hesabı

Diyotlarda seri direnç, yarıiletken kristal tabakanın ve metal kontağın, tükenim bölgesi dışında kalan bölgenin akıma karşı gösterdiği dirençtir. Diyotlarda seri direnç; yarıiletken tabakada oluşan gövde direnci, temas ettirilen omik kontak, elektriksel ölçümler yapılmak için kullanılan teller, metal-yarıiletken arasına yerleştirilmiş oksit tabaka ve yarı iletken-metal kontak arayüzeyinde oluşan tüketme tabakası gibi nedenler seri direnç oluşmasına sebep olur. Seri direncin hesaplanmasında I-V grafiğinden ve ölçüm değerlerinden yararlanılarak hesaplamalar yapılır. Bunlar Norde yöntemi, Cheung yöntemi ve Missous yöntemidir.

2.2.4.1. Norde Yöntemi

Metal yarıiletkenlerin seri dirençleri Norde yöntemi ile hesaplanır. Norde fonksiyonunu kullanarak $n = 1$ durumu için seri direnci ve engel yüksekliğini tanımlar. Norde yönteminde seri direnç ve engel yüksekliği parametreleri hesaplanırken sıcaklık sabit ise bir I-V eğrisine ihtiyaç duyulur. Sıcaklık sabit olmadığı durumlarda en az iki akım-gerilim karakteristiği kullanılarak aşağıdaki fonksiyonla hesaplanabileceğini göstermiştir (Norde, 1979);

$$F(V) = \frac{V}{2} - (\beta - 1) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.13)$$

Diyotların I-V karakteristiklerinden Φ_B değerlerinin hesaplanması için denklem 2.14'teki yaklaşım Rhedorick tarafından geliştirilmiştir.

$$I = I_s e^{\frac{\beta V}{n}} \quad (2.14)$$

Seri direnç eğer çok büyükse ve bir doğrusal bölgesi yoksa $F(V)$ eğrisi aşağıdaki 2.15 denkleminle ifade edilir:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (2.15)$$

Böylece engel yüksekliği ve seri direnç değerleri denklem 2.16'daki gibi hesaplanabilir:

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta}, \quad R_s = (\beta I_0)^{-1} \quad (2.16)$$

Akım-Gerilim karakteristikleri aşağıdaki verilen denklem 2.17'deki gibi hesaplanabilir:

$$I = I_s(e^{\beta(V-IR)} - 1) + I_r \left(\frac{e^{\beta(V-IR)}}{2}\right) \quad (2.17)$$

Denklem 2.16 ve 2.17' deki denklemlerde I_0 doğru besleme değerindeki minimum akım, V_0 doğru besleme minimum voltajı, I_r asal taşıyıcı konsantrasyonu ifade eder.

$F(V) = \Phi_B - \Delta\Phi$ eşit olduğunu kabul edersek $F(V)$ ifadesi denklem 2,18'deki gibi yazılabilir.

$$F(V) = \Phi_B - \Delta\Phi + I_R - \frac{V}{2} (1 - 2\alpha) \quad (2.18)$$

Daha sonra yukarıdaki ifade denklem 2.19'daki gibi ifade edilebilir:

$$\Phi_B - \Phi\Delta\Phi = F(V) + (1 - 2\alpha)\left(\frac{V}{2} - \frac{1}{\beta}\right) \quad (2.19)$$

Norde yöntemiyle seri direnç ve engel yüksekliği (Φ_B) değerlerinin yaklaşık olarak bir tahminle bulunur. Diyotun elektriksel grafiğinin bir bölümü fit edilerek elektriksel özellikler bulunur. Bu duruma göre Norde fonksiyonu aşağıdaki gibi olur:

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2}\right) \quad (2.20)$$

Denklem 2.20'de iki tarafın ln'i alınır, aşağıdaki 2.21 denklemi elde edilir.

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right)V + \Phi_B + \frac{IR}{n} \quad (2.21)$$

Denklem 2.21'de seri direnç sıfır olursa $F(V)$ - V grafiğinin, eğimi $(n - \gamma) / n\gamma$ olur. Seri direnç sıfır değilse akım ifadesi denklem 2.22'deki gibi yazılır.

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{RAA^*T^2}\right) \quad (2.22)$$

Denklem 2.22'de V 'ye göre türevi alınır, aşağıdaki 2.23 ve 2.24 denklemleri elde edilir.

$$\Phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right)V_0 - \frac{(\gamma-n)}{(\beta n)} \quad (2.23)$$

$$R_s = \frac{(\gamma-n)}{(\beta I_0)} \quad (2.24)$$

2.2.4.2. Cheung Yöntemi

Diyotların parametrelerini; doğru besleme yaparak, çizdiği I - V karakteristiğini kullanarak hesaplamıştır. Diyottan geçen toplam akım değerini veren ifadeyi aşağıdaki gibi hesaplamıştır (Cheung, 1986);

$$I = A_j = AA^*T^2 \exp\left[-\frac{(e\Phi_B)}{kT}\right] \exp\left[\frac{(eV)}{kT} - 1\right] \quad (2.25)$$

Denklem 2.25'te $eV \gg kT$ olduğu için, 1 değeri göz ardı edilebilir. İdeal bir durumdan sapmalar olacağı ve sabit bir idealite faktörü düşünülerek aşağıdaki 2.26'daki ifade yazılabilir:

$$I = A_j = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{(e\Phi_B)}{kT} \right] \exp \left[\frac{(eV)}{nkT} - 1 \right] \quad (2.26)$$

Uygulanan gerilim V değeri ile IR_s değerinin çarpımı olarak ifade edilebilir. Böylece V yerine VIR_s ifadesi yazıldığında aşağıdaki 2.27'deki denklem elde edilmektedir:

$$I = A_j = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{(e\Phi_B)}{kT} \right] \exp \left[\frac{e(V-IR_s)}{nkT} - 1 \right] \quad (2.27)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) + n\Phi_B + IR_s \quad (2.28)$$

Denklem 2.28'deki $\ln I$ 'ya göre türevi alınarak aşağıdaki 2.29'daki denklem elde edilir:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.29)$$

Φ_B , potansiyel engel yüksekliği ise, aşağıdaki şekilde formül ize edilebilir:

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e} \right) \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.30)$$

Denklem 2.30'daki ifadeye göre, denklem 2.31'deki ifade yazılabilir:

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (2.31)$$

2.2.4.3. Missous Yöntemi

Missous & Rhoderick tarafından Schottky diyotlara düz besleme ve ters besleme uygulanarak I –V karakteristiği çizilerek elektriksel parametreleri hesaplanmıştır. Böylece Missous yöntemi ile yeni bir hesaplama yöntemi ortaya çıkmıştır. Bir diyottan geçen toplam akım, aşağıdaki 2.32’deki ifade şeklinde yazılır (Missous and Rhoderick, 1985):

$$I = A_J = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT} - 1\right) \quad (2.32)$$

Uygulanan gerilimin tamamı arınma bölgesinde düşmemesinden dolayı idealden sapmalar olacaktır. Böylece idealite faktörü denklemin 2.33’teki gibi formüle edilebilir:

$$I = A_J = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right) \quad (2.33)$$

Denklemin 2.33 denklemin 2.34’teki gibi düzenlenirse;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.34)$$

Daha sonra 2.34’teki denklemden 2.35 denklemini elde edilir;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \left(1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)\right) \quad (2.35)$$

Denklemin 2.35’ten yola çıkarak 2.36’deki denklemini elde ederiz;

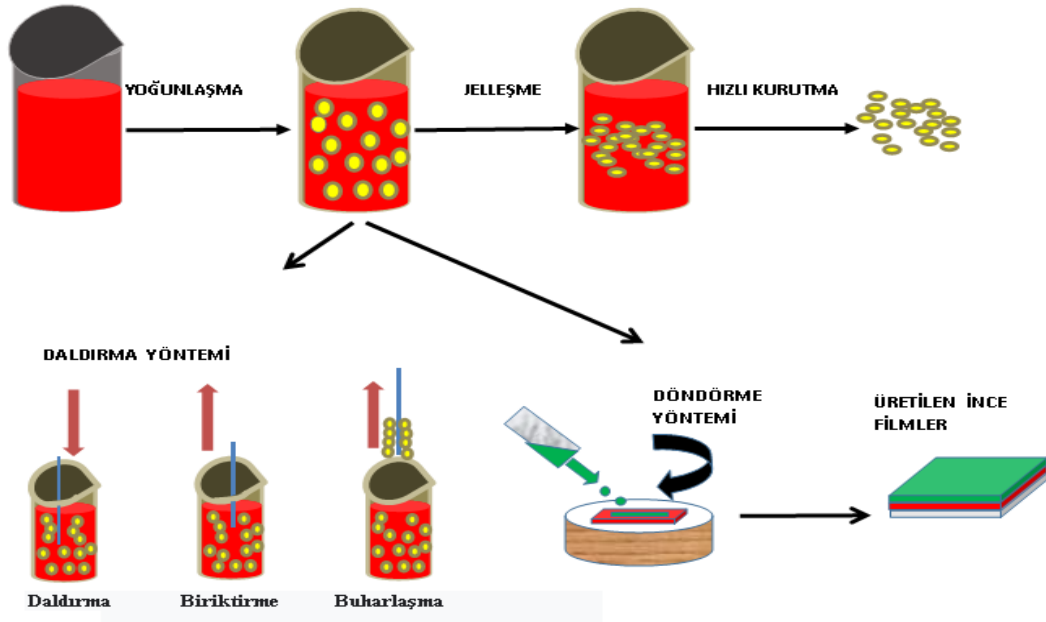
$$I_0 \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) = \left(\frac{1}{1 - \exp\left(-\frac{eV}{kT}\right)}\right) \quad (2.36)$$

Denklemin 2.35’in logaritması alınarak doğrunun eğimi belirlenir. Daha sonra doğrusal kısım fit edilerek V=0 değerine karşılık gelen I₀ değeri belirlenir. Böylece idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanır.

2.3. İnce Film Üretim Metotları

2.3.1. Sol-Jel Metodu

Sol-jel metodu Şekil 2.7’de görüldüğü gibi ince film üretiminde en çok kullanılan yöntemlerden biri olup, sıvı olan solün katı olan jele geçiş ana esasına dayanmaktadır. Sol fazda tozlar, fiberler, gözenekli yapılar kullanılmasından dolayı sol fazı çözeltilde dibe çökmez. Sol fazı çözeltilde genişleyip büyüyerek jel haline gelir. Bu yapının sürekliliği jele elastiklik kazandırmaktadır. Bu metodun birçok avantajı vardır ve uygulama sırasında kullanılan ekipmanlar oldukça basittir (Sönmezoğlu 2012; Jeffrey, 1990).



Şekil 2.7. Sol-Jel yöntemini kullanarak ince film kaplama teknikleri

Sol-Jel metodunun avantajları;

- Üretilen filmlerin çok küçük yapılarının kontrol edilebilmesi,
- Kullanılacak malzemelerin temin edilmesinin basit olması,
- Üretilen ince filmim kalınlığın her yerde eşit olması,
- Saf ince filmlerin yapılabilmesi,
- Düşük ısılarla ince filmlerin üretile bilmesi,
- Çevre kirliliği yaratmaması,
- Yeni ince filmler üretme açısından yöntemin uygun olması,
- Üretilen ince filmlerde gözenekli bir yapı oluşması,

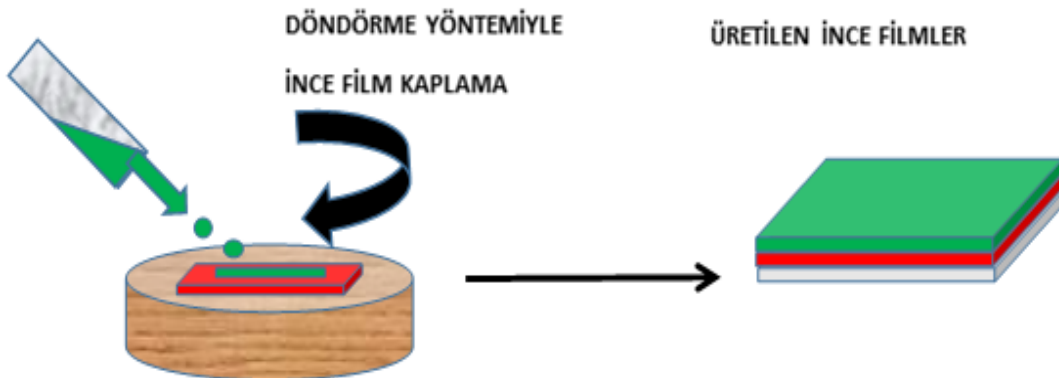
Sol-jel metodunun dezavantajları;

- Oluşan çökeltinin ince filmlerde kalması,
- Deneysel kullanımların kimyasalların sağlık açısından zararlı olması,
- Sol jel yöntemi uygulanması sırasında fazla malzeme kayıplarının yaşanması (Karteri, 2014).

İnce filmler üretilirken hazırlanan sol belirlenen yüzeyin üzerine döndürme ve daldırma yöntemlerinden biriyle kaplanabilir.

2.3.1.1. Döndürme Metodu

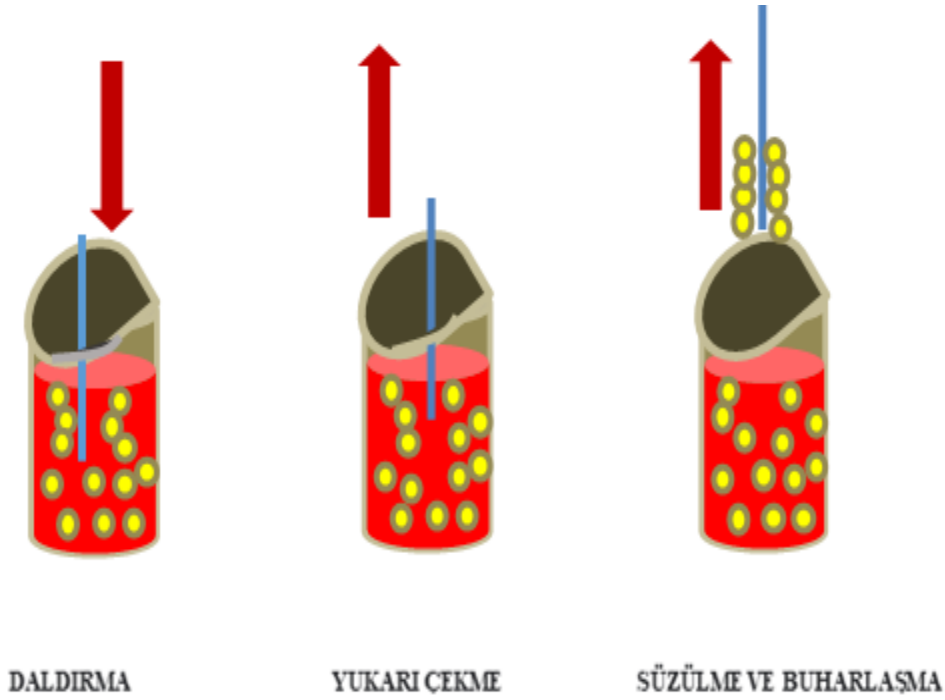
Bu metot Şekil 2.8’de görüldüğü gibi hazırlanan solun alttaşların üzerine damlatılarak, alttaşların belli bir hızda döndürülmesiyle ince filmler kaplanır. Döndürme metodu sert veya eğimi az olan numunelerin üzerinin kaplanmasında kullanılır. Bu yöntem, dört aşamadan oluşmaktadır; damlatma, döndürme, döndürme sonlandırma ve buharlaştırma olmak üzere. Hazırlanan sol yüzey üzerine damlatılarak döndürme işlemine tabi tutulur. Döndürme işleminde sol eşit olarak yüzey üzerine yayılır ve fazla çözelti yüzeyden taşar. Yüzeyde kalan çözelti ince filmin kalınlığını belirler. En son aşama buharlaştırma aşamasıdır. Bu aşamada buharlaşma işlemi gerçekleşerek çözeltilerin alttaşın üzerine yapışmasını sağlar. Bu metodun en büyük avantajı oluşan ince film yüzeyde düzgün bir şekilde dağılarak homojenlik göstermektedir. Merkezci kuvvet ve sürtünme kuvveti bu yöntemde film kalınlığını etkileyen en önemli iki faktördür (Sönmezoglu 2012; Jeffrey, 1990).



Şekil 2.8. Sol-Jel döndürme yöntemini kullanarak ince film kaplama

2.3.1.2. Daldırma Metodu

Daldırma Metodu ince filmlerin üretiminde kullanılıp, Şekil 2.9' da görüldüğü gibi hazırlanmış solun içerisine alttaşın belirlenen hız parametresiyle daldırılması ve aynı hız parametresiyle çıkarılması esasına dayanır. Daldırma Metodu; daldırma aşaması, Yukarı çekme aşaması, süzülme ve buharlaşma aşaması olmak üzere 3 temel aşamadan oluşmaktadır. Bu işlemlerin tamamlanması ile ince film üretilmiş olur (Sönmezoğlu 2012; Jeffrey, 1990).



Şekil 2.9. Sol-Jel daldırma yöntemini kullanarak ince film kaplama

Daldırma metodu ilk olarak hazırlanan alttaş belirlenen sabit hız ile sol içerisine daldırılarak ve yine aynı sabit hızla yukarı çekilerek alttaşın üzerinde solun birikmesi sağlanır. Alttaş üzerine biriken fazla sol yüzey üzerinden süzülme sonucu terk ederken yüzeyde kalan sol ise yüzeyden buharlaşır. Yapılan işlem sonucunda yüzeyde kalan sol bir fırın yardımıyla tavlama işlemine tabi tutulduktan sonra ince film üretilmiş olur. Daldırma metodunun en önemli avantajı; istenilen şekilde kaplama işlemi yapılarak homojen ince filmler üretilip, üretilen bu ince filmlerin istenilen kalınlıkta elde edilebilmesidir.

2.4. Bakır Oksit

Bakır oksit yarıiletken madde gibi davrandığı için, bakır oksit ile ilgili çalışmalar 19. yüzyılın başlarında başlamıştır. Bakır oksitin fotovoltaiik etkisi 1917 yılında Kennard ve Dieterich tarafından keşfedilmiştir.

- Bakır oksitin çeşitli yöntemlerle üretilmesi,
- Üretimnin düşük maliyete olması,
- Fotovoltaiik uygulamalar için yeterli bant boşluğunun olması,
- n-tipi madde ve p-tipi madde özelliğine sahip olması (Chopra1, 2004),
- Elektronik cihaz üretiminde çokça kullanılabilmesi,
- Yüksek emme kapasitesine görünür bölgede sahip olması bakır oksitti ilgi odağı haline getirmiştir (Lu, 2005).

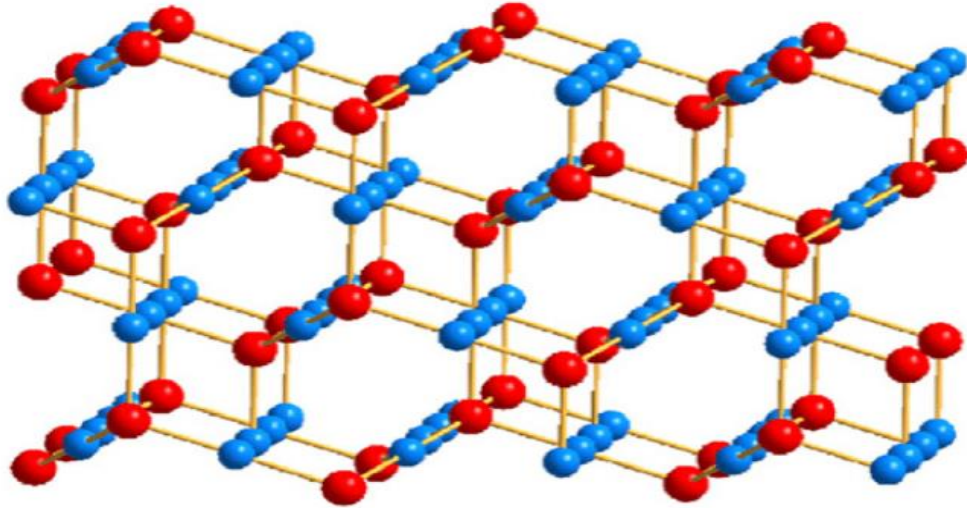
Bakır oksitin, monoklinik CuO ve kübik Cu₂O olmak üzere iki ana faza sahiptir (Wang, 2004). Yapısındaki boşluklardan dolayı p-tipi yarıiletken özeliği göstermektedir (Johan, 2011). Bakır oksitin tüm fazları arasında (CuO, Cu₂O) oksitlenme çok hızlı bir şekilde meydana gelir. Buda istenmeyen bir durumdur. Bakır oksitin iki fazının elektriksel özellikleri, kristal yapıları ve fiziksel özellikleri birbirinden farklıdır. Aşağıda belirtildiği gibi:

- CuO, Cu₂O'ya göre bant aralığını, güneş ışınlarının görünür bölgedeki fotonlarını soğurmada daha iyidir (Gao, 2011)
- CuO'nun iletkenliği, Cu₂O'ya göre daha iyidir (Yoon, 2000)
- Cu₂O daha hızlı oksitlendiği için CuO üretimi daha kolaydır.
- CuO, Cu₂O'ye göre daha kararlıdır.
- Yukarda saydığımız özelliklerden dolayı CuO'nun, güneş pili üretimi için daha iyi durumda olduğunu göstermektedir.

2.4.1. Bakır (I) oksit (Cu₂O)

Cu₂O, kuproz oksit olarak bilinir ve kübik yapıdadır (Wang, 2004). Daha çok p-tipi madde özeliği göstererek, bant boşluğu 1,8 - 2,5 eV aralığında olup, (Özmenteş, 2018) ve yarıiletken madde özeliği göstermektedir. Cu₂O, oksitlenerek CuO 'ya dönüşür. Aynı zamanda organik çözücülerde çözünmez ve amonyak içinde çözünür (Bayansal, 2009). Şekil 2.10' da görüldüğü gibi Cu₂O da her Cu atomu iki O atomuna bağlanmış ve her O

atomu dört Cu atomu tarafından çevrilmiştir. Dört Cu atomu ve iki O atomu birim hücreyi oluşturur.



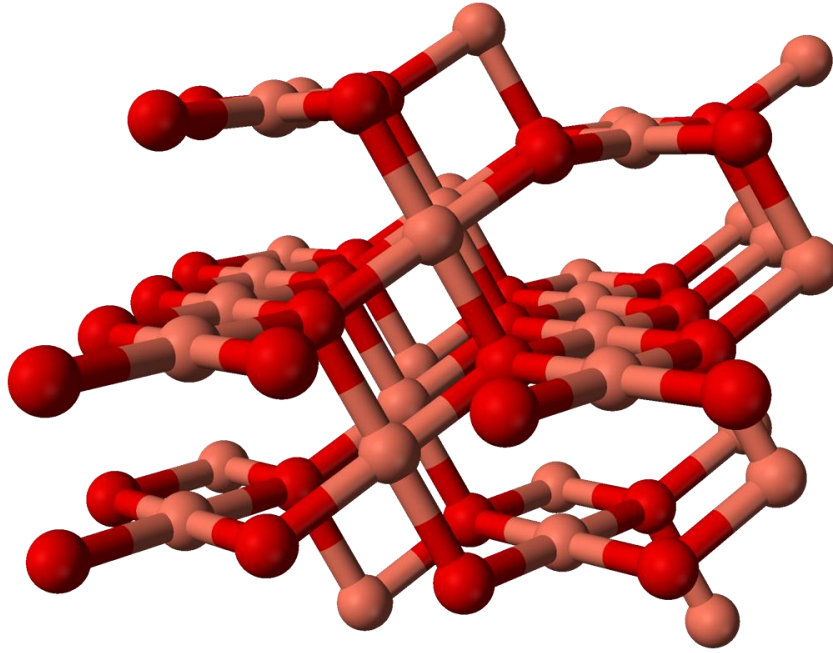
Şekil 2.9. Cu₂O'nun kristal yapısı (Siddiqui, 2012)

Çizelge 2.1. Bakır (I) oksit (Cu₂O) özellikleri (Bayansal, 2009; Ishizuka, 2000)

Bakır (I) oksit (Cu₂O) Özellikleri	
Yoğunluğu	6,0 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	1235 °C
Kaynama Sıcaklığı	1800 °C
Molekül Ağırlığı	143,09 g/mol
Aktivasyon Enerjisi 140 meV	140 meV

2.4.2. Bakır (II) oksit (CuO)

CuO, kuprik oksit olarak bilinir ve monoklinik yapıdadır (Kuş, 2010). Daha çok p-tipi madde özeliği göstererek, bant boşluğu 1,2 - 2,0 eV aralığında olup, (Filipi, 2012) ve yarıiletken madde özeliği göstermektedir. CuO ısısal direncinin düşük olması ve güneş ışığını iyi bir şekilde soğurmasından dolayı soğurma tabakası olarak kullanılır (Maruyama, 1998). Oksijenin fazla olduğu ortamlarda CuO kararlı yapı göstermektedir (Akgül, 2017). Şekil 2.11' de CuO'nun kristal yapısında görüldüğü gibi birim hücrede 2 atom bulunur ve her Cu atomu dört O atomuna bağlanmıştır (Siddiqui, 2012).



Şekil 2.10 CuO bileşiğinin kristal yapısının bir bölümü (Bayansal, 2009)

Çizelge 2.2. Bakır (II) oksit (CuO) özellikleri (Kuş, 2010)

Bakır (II) oksit (CuO) Özellikleri	
Yoğunluğu	6,3 g/cm ³
Erime Sıcaklığı	1336 °C
Molekül Ağırlığı	79,45 g/mol
Aktivasyon Enerjisi	4,07 eV

2.5. Krom Oksit

İnce filmlerin üretilmesinde krom ara katman olarak kullanılmaktadır. Özellikle Kromun tabakalar arasında yapışma özelliği kullanılmaktadır. Bu özellik cam alttaşlar ve altın filmler arasında ara katman olarak kromun sıklıkla kullanılmasını sağlamakla beraber, ara katman etkileşimleri ve oksidasyon süreçleri çok iyi bilinmediği için bilimsel araştırmalara konu olmuştur. 1973 yılında, dinamik soyma testi yöntemi kullanılarak krom filmlerin cam altlıklar üzerindeki yapışkanlığını ölçmek için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu deneyler sonucunda, Cr'nin oksitlendiğinde daha iyi yapıştığı görülmüştür.

Krom elementi periyodik tabloda 6. grupta yer alan, elektron dağılımı $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 2d^5 4s^1$ olan, kristal yapısı cisim merkezli kübik yapılı, atom ağırlığı 51,99 g/mol yoğunluğu $7,14 g/cm^3$ olan $1857 ^\circ C$ sıcaklıkta eriyen, +3 değeri bulunan iletken bir metaldir. Oda koşullarında katı ve gümüş renklidir. Korozyon direnci yüksek ve sert bir metaldir. Ayrıca siyah krom kaplamaların görünür ışık dalga boyu aralığında düşük yansıtma ve yüksek absorplama katsayısı gibi olağanüstü özelliklerinden dolayı Güneş enerji sistemlerinde yaygınca kullanılmaktadır (Survilienė, 2014; Abbas, 2000).

Çizelge 2.3. Krom oksit (CrO) özellikleri

Krom Oksit (CrO) Özellikleri	
Yoğunluğu	$7,14 g/cm^3$
Erime sıcaklığı	$1857 ^\circ C$
Kaynama sıcaklığı	$2677 ^\circ C$
Molekül ağırlığı	$51,9961 g/mol$
Elektron dağılımı	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 2d^5 4s^1$
Elektriksel iletkenlik	$7,74 \times 10^4 cm^{-1} \Omega$
Aktivasyon enerjisi	$4,5 eV$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Çözeltilerin Hazırlanması

Katkısız ve krom katkılı bakır oksit ince filmler hazırlamak için sol-gel yöntemi kullanıldı. İşlem basamakları aşağıdaki gibidir.

- İlk olarak Şekil 3.1’de görünen krom asetat ($\text{Cr}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$) ve bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) kompleks bileşikleri Çizelge 3.1’de belirtilen miktarlar kadar 2-Methoxethanol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) kimyasalında çözüldü. Monoethanolamin ($\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$) çözeltisinde stabilizer olarak kullanıldı.
- Kullanılan stabilizerin molar oranı 0,05 olarak belirlendi.
- Hazırlayacağımız solüsyonların miktarı 30 ml CuO ve 30 ml CrO olarak kararlaştırıldı.



a) Krom asetat ($\text{Cr}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$)

b) Bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$)

Şekil 3.1. Toz halde bulunan; a)Krom asetat ($\text{Cr}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$), b) Bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$)

Çizelge 3.1. Kullanılan kimyasal miktarları

Numune adı	Numune Ağırlığı (gr)	$\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$ miktarı (ml)
Bakır asetat ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$)	0,299475	30
Krom asetat ($\text{Cr}(\text{C}_2\text{H}_3\text{O}_2)_3$)	0,600225	30

- Elde edilen krom oksit ve bakır oksit karışımları 60°C ’ de 300 d/d hızda 2 saat boyunca Şekil 3.2’de görüldüğü gibi karıştırıldı. Bunun sonucunda homojen ve berrak bir çözelti meydana geldi.



Şekil 3.2. Elde edilen krom oksit ve bakır oksit karışımlar

- Elde edilen krom oksit ve bakır oksit solüsyon 24 saat dinlendirildi.
- Katkılandırma işlemi Şekil 3.3' te görüldüğü gibi; CuO , $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,50}\text{Cr}_{0,50}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,25}\text{Cr}_{0,75}\text{O}$, CrO olarak yapıldı.



Şekil 3.3. Katkılı ve katkısız ince filmler elde etmek için kullanılan solüsyonlar

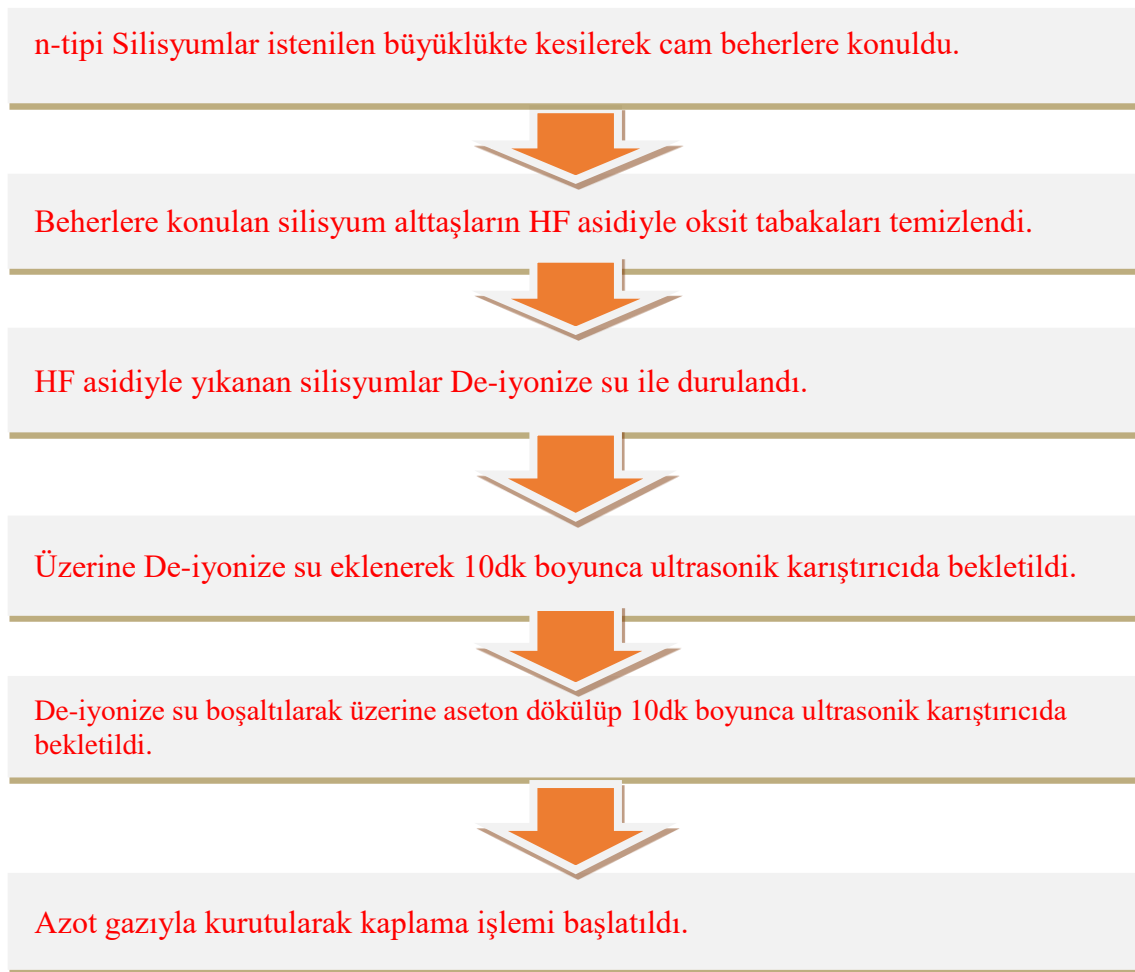
- Katkılı ve katkısız ince filmler elde etmek için kullanılan kimyasal miktarları aşağıdaki Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Kullanılan kimyasal miktarlarının Oranı CuO, Cu_{0,75}Cr_{0,25}O, Cu_{0,50}Cr_{0,50}O, Cu_{0,25}Cr_{0,75}O, CrO

Numune adı	CuO	CrO
CuO	10 ml	0 ml
Cu _{0,75} Cr _{0,25} O	7,5 ml	2,5 ml
Cu _{0,50} Cr _{0,50} O	5 ml	5 ml
Cu _{0,25} Cr _{0,75} O	2,5 ml	7,5 ml
CrO	0 ml	10 ml

3.2. Kaplama Öncesi Hazırlıklar

Üzerine krom katkılı bakır oksit ince filmler oluşturmak için kullanılacak n-tipi alttaşların kimyasal temizleme basamakları aşağıda Şekil 3.4'te aşama aşama gösterilmiştir.

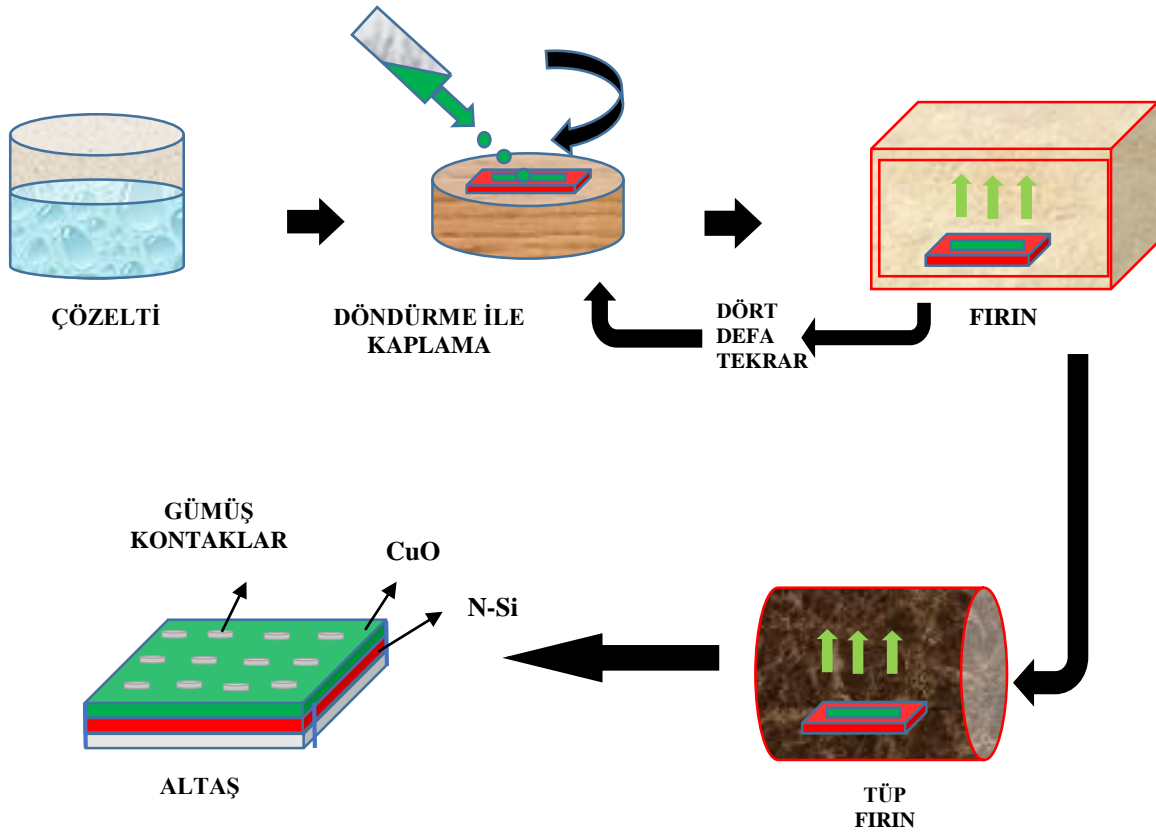


Şekil 3.4. n-tipi alttaşların kimyasal temizleme basamakları

n-tipi silisyum alttaşların kimyasal temizleme işlemi tamamlanarak CuO , $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,50}\text{Cr}_{0,50}\text{O}$, $\text{Cu}_{0,25}\text{Cr}_{0,75}\text{O}$, CrO olmak üzere 5 numune için hazır duruma getirildi.

3.3. Kaplama işlem basamakları:

Şekil 3.5’de ürettiğimiz heteroeklem diyotların üretim şeması gösterilmektedir.

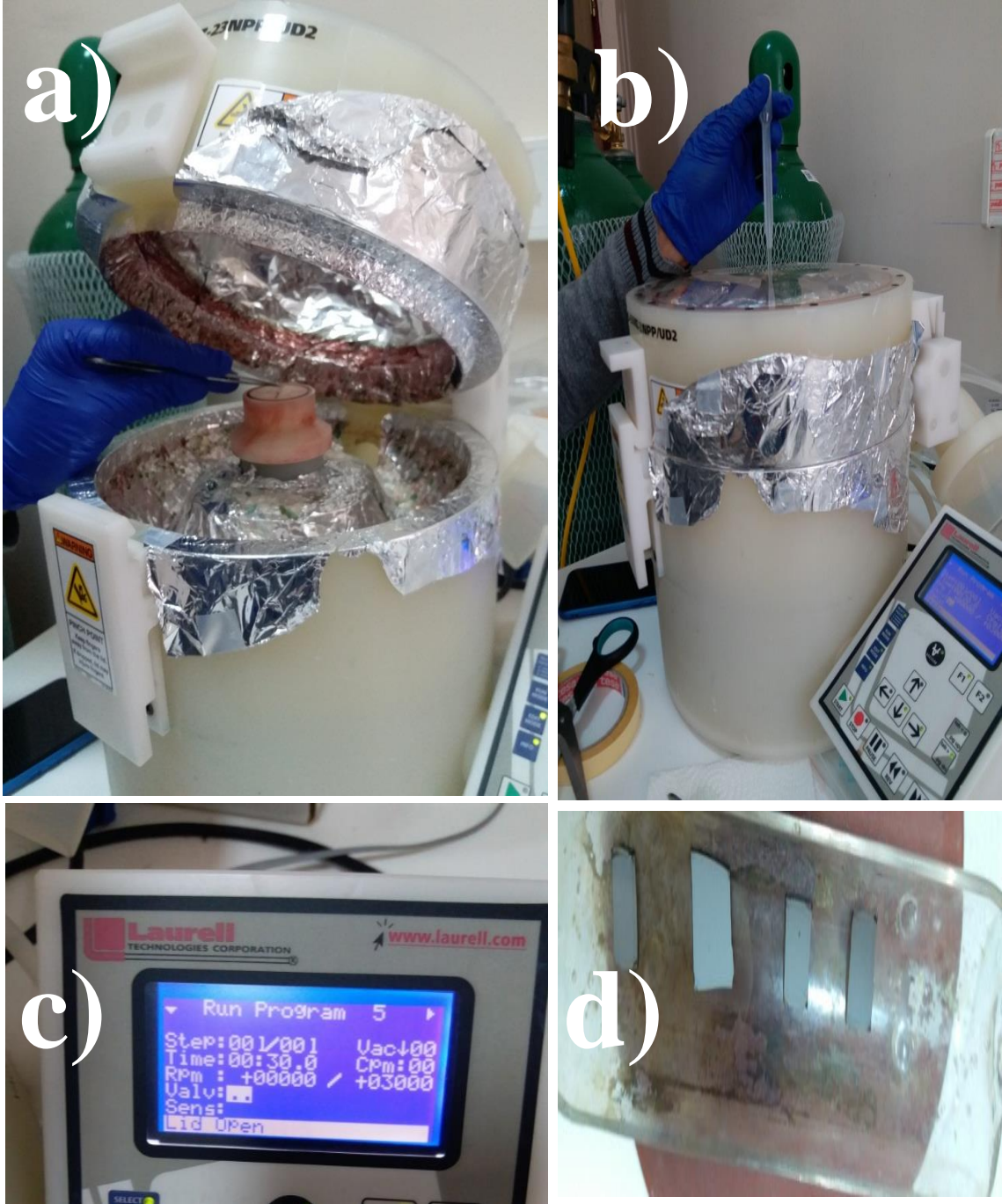


Şekil 3.5. Kaplama işlem basamakları

- n-tipi Silisyum spin coater üzerine yerleştirildi.
- Hazırlanan çözeltiden 2-3 damla (yaklaşık olarak) n-tipi Silisyuma damlatıldı.
- Şekil 3. 6’da görüldüğü gibi spin coater cihazında süre 30 sn, hız 3000 rpm’e olarak ayarlandı. Böylece n-tipi silisyum alttaş üzerine çözeltinin ince bir tabaka halinde ve homojen dağılması sağlandı.
- Her bir kaplamadan sonra filmler $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki fırında 10 dakika kadar bekletildi.

- Bu işlemler her bir numune için 4 kez tekrarlandı. Son olarak filmler, fırın içinde 2 saat boyunca $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de tavlansak oda sıcaklığında soğutuldu.
- Fırında yapılan tavlama işlemi ile ince filmlerin olabildiğince kusurlardan arındırılması hedeflendi.

Üretilen CuO/n-Si , $\text{Cu}_{0,75}\text{Cr}_{0,25}\text{O/n-Si}$, $\text{Cu}_{0,50}\text{Cr}_{0,50}\text{O/n-Si}$, $\text{Cu}_{0,25}\text{Cr}_{0,75}\text{O/n-Si}$, CrO/n-Si diyotları sırası ile CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 olarak kodlanmıştır.



Şekil 3.6. a) Döndürme yöntemiyle kaplama b) n-tipi silisyuma damlatma c) Spin Coater cihazının ayarlanması d) 2 Saat boyunca fırında tavlansak ince film

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. I-V Karakteristikleri Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

I-V grafikleri kullanılarak diyotların seri direnç, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi parametreleri hesaplanmaktadır. I-V grafiklerinin lineer kısmından idealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplanırken lineerliğin bozulduğu bölge yardımıyla da seri direnç hesaplanmaktadır. Bir diyotun doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak Termiyonik Emisyon yöntemi ile bulunur (Hameed, 2021).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de verilen ifadede $eV \gg nkT$ olması durumunda 1 ihmal edilebilir.

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (4.2)$$

Denklem 4.2’nin iki tarafının logaritması alınıp, sonra da V’ye göre türevi alınırsa idealite faktörünü denklem 4.3’teki gibi bulunmuş oluruz.

$$n = \frac{eV}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.3)$$

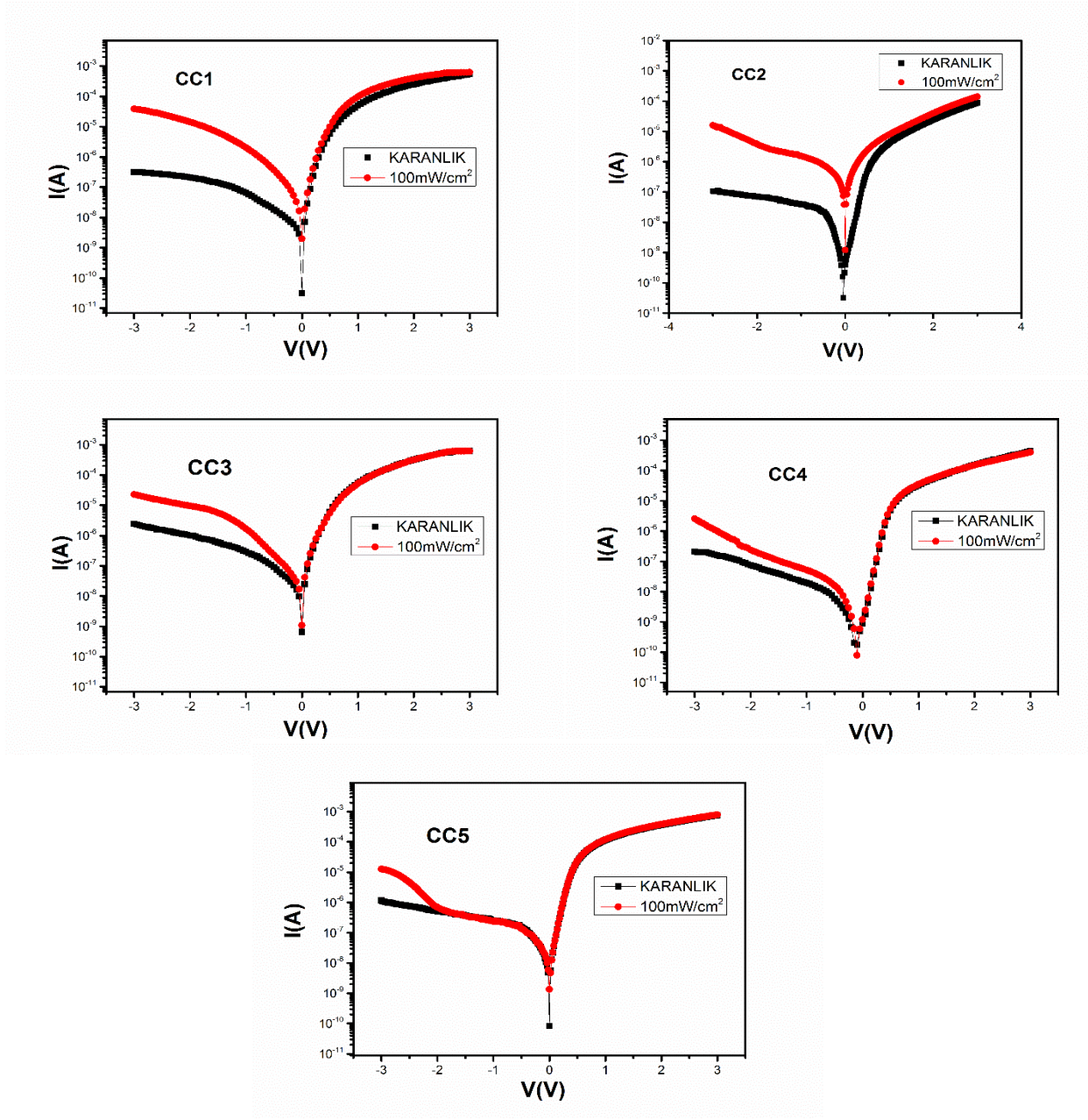
İdeal bir diyotta idealite faktörünün 1 olması gerekmektedir. 1’ den uzaklaştıkça diyotta ideallikten uzaklaşır. İdealite faktörünün birimi yoktur ve n simgesiyle gösterilir. (Yılmaz, 2018).

$$\Phi_B = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.4)$$

Metal yarıiletken diyotlarda eklem bölgesinde bir potansiyel oluşur. Bunun sonucunda da akımın geçişine karşı bir bariyer oluşur. Bu bariyerle elektron geçişi kontrol edilir. Bundan dolayı bariyer yüksekliği diyotlar için önemli bir parametredir.

Üretilen heteroeklem diyotlar I-V grafikleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Grafikleri incelediğimizde ± 3 V gerilim aralığında iyi bir doğrulma gösterdiği, ayrıca ileri beslemde

grafiklerde lineer bir artış olduğunu, 1 V' tan sonra arayüzey etkisi ve seri dirençten dolayı lineerlikten sapma olduğu görülmektedir.



Şekil 4.1. Üretilen diyotların I-V grafikleri

I-V grafiklerinin lineer kısmını kullanarak idealite faktörü hesaplandı. Buna göre; İdealite faktörü (n) karanlık ortamda Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Üretilen diyotlardan en düşük idealite faktörünün 2,16 ile CC5 diyotundan elde edildiği gözlemlendi.

100 mWatt/cm² ışık şiddeti altında alınan ölçümler yardımıyla doğrultma oranı idealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplanarak Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Işık altında da görüldüğü gibi minimum idealite faktörü değeri 2,14 ile CC5 diyotundan elde edilmiştir. Üretilen diyotların idealite faktörleri değerleri farklılık göstermekle beraber tamamının 1’den büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum tüm diyotların idealiteden saptığını göstermektedir. Genellikle bu sapma bu yapıların arayüzey tabakalarına (δ_i), arayüzey durumlarına (N_{ss}), tüketim bölgesinin varlığına (W_D) ve rekombinasyonlara atfedilmektedir (Badali, 2020).

Bariyer yüksekliği karanlık ortamda Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Üretilen diyotların karanlık ölçümleri sonucunda elde edilen en yüksek bariyer yüksekliğinin 0,84 eV ile CC2 diyotundan elde edilirken, ışık şiddeti 100 mWatt/cm² olan ortamda hesaplanan bariyer yükseklikleri Çizelge 4.2’ de verilmiş olup en yüksek bariyer yüksekliği 0,81 eV ile CC4 diyotundan elde edilmiştir.

Çizelge 4.1. Karanlıkta Termiyonik Emisyon Teorisi kullanılarak hesaplanan parametreler

Diyotlar	RR (karanlık,±3V)	n (I-V)	Φ_B (I-V) (eV)
CC1	$1,6 \times 10^3$	2,18	0,78
CC2	$2,52 \times 10^2$	2,78	0,84
CC3	$2,07 \times 10^3$	2,62	0,76
CC4	$6,53 \times 10^2$	2,27	0,81
CC5	$18,21 \times 10^2$	2,16	0,76

Doğrultma oranı diyotların anahtarlama kapasitesinin bir ölçüsü olup kalitesini belirleyen önemli bir parametredir. Üretilen heteroeklem diyotların ± 3 V gerilim altında doğrultma oranı karanlık ortamda Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi hesaplanmıştır. Doğrultma oranı en yüksek CC3 için $2,07 \times 10^3$ olarak hesaplanmıştır. ± 3 V gerilim altında doğrultma oranı ışık şiddeti 100 mWatt/cm² olan ortamda Çizelge 4.2’ de hesaplanıp verilmiş olup en yüksek doğrultma oranı $1,58 \times 10^2$ ile CC4diyotundan elde edilmiştir. Genel olarak ışık altında doğrultma oranlarının düştüğü görülmekte olup bu durum fotojenerasyon nedeniyle artan sızıntı akımından kaynaklanmaktadır.

Çizelge 4.2. 100 mWatt/cm² ışık altında Termiyonik Emisyon Teorisi kullanılarak hesaplanan parametreler

Diyotlar	RR (100mWatt/cm²,±3V)	n (I-V)	Φ_B (I-V) (eV)
CC1	1,59×10 ¹	2,57	0,75
CC2	8,84x10 ⁰	5,53	0,71
CC3	2,72×10 ¹	3,08	0,75
CC4	1,58×10 ²	2,21	0,81
CC5	16,27×10 ¹	2,14	0,76

İdealite faktörünün büyük değerleri, yanal olarak homojen olmayan bariyer yükseklikleri nedeniyle düşük Schottky bariyer yamalarının geniş dağılımı ile ilişkilendirilmektedir (Tung, 1992). Erdoğan ve Güllü (Erdoğan, 2010) basit kimyasal yöntemle inşa ettikleri Au/CuO/p-Si diyot için idealite faktörünü 2,39 ve engel yüksekliğini 0,64 eV olarak hesaplamışlardır. Benzer şekilde Rüzgar ve ark. (Rüzgar, 2020) Au/(CuO:La)/n-Si fotodiyotun katkısız CuO ve döndürerek kaplama yöntemiyle üretilen La katkılı CuO ince filmlerden oluşan elektriksel performansını bildirdi. En iyi ideallik değerini %2 La katkılı CuO ile 2.04 olarak hesapladılar. Schottky bariyer diyotlar için bir diğer önemli parametre bariyer yüksekliğidir. Diyotların idealite faktör değerlerinin iyileştirilmesine benzer şekilde, katkılama ile bariyer yüksekliği de optimum hale getirilebilir. İnce filmlerin ara tabakasını kullanan bariyerin modifikasyonu için deneysel olarak bazı araştırmalar yapılmıştır. Yakın zamanda Rüzgar ve ark. (Rüzgar, 2021) Fe'nin CuO'ya katkılanmasıyla yapılan Au/Fe:CuO/n-Si diyot hakkında bir makale yayınladılar. Bariyer yüksekliğinin Fe katkılanması ile CuO'ya değiştiğini ve Fe katkısı arttıkça bariyer yüksekliğinin azaldığını bildirmişlerdir. Benzer şekilde, Singh ve ark. (Singh, 2019) sol-jel döndürerek kaplama yöntemiyle oluşturdukları n-CuO/p-Si diyot için 2.8 idealite faktörü ve 0.82 eV bariyer yüksekliği elde etmişlerdir. Başka bir çalışmada Rüzgar ve ark (Rüzgar, 2020) Au/La:CuO/n-Si diyotlar için 2, 5 ve %10 La'nın CuO'ya katkılanmasıyla elde edilen La katkısı %2 olduğunda bariyer yüksekliğinin en yüksek ve optimum olduğunu belirtmiştir. Yaptığımız çalışmaya benzer bir çalışma Baturay ve ark. (Baturay, 2022) tarafından gerçekleştirilmiştir. Katkısız ve Cr katkılı CuO ince filmleri p-Si alttaşlar üzerine sol jel döndürerek kaplama yöntemi ile oluşturularak diyot karakteristiklerini incelediler. Bu çalışma sonucunda en düşük idealite faktörünü 2,17 değeri ile %3Cr:CuO/p-Si diyotundan elde ettiklerini rapor ettiler. Bu diyotun

bariyer yüksekliği, doğrultma oranı ve seri direnç değerlerini ise sırasıyla 0,77 eV, 557 ve 1,064 k Ω olarak hesapladıklarını bildirdiler.

4.2. Üretilen Diyotun Işığa Duyarlılık karakteristikleri

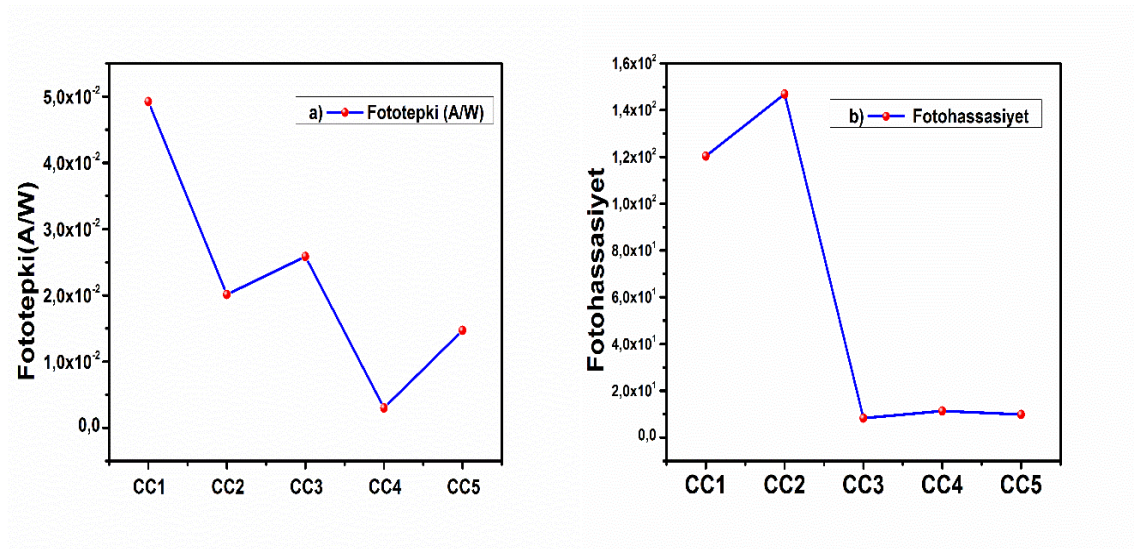
Üretilen diyotların ışığa karşı ftohassasiyet (S) ve fototepki (R) özellikleri, fotodiyotların performansını karakterize eden önemli parametrelerdir. Bu parametreler aşağıdaki denklemler yardımı ile hesaplanabilir (Rüzgar, 2020);

$$R = \frac{I_p - I_d}{P \times A} \quad (4.5)$$

$$S = \frac{(I_p - I_d)}{I_d} \quad (4.6)$$

Burada, I_p fotoakımı, I_d karanlık akımı ve A aktif alanı sembolize etmektedir.

Şekil 4.3' teki grafik incelendiğinde Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile fototepki ve ftohassasiyet değerinin değiştiği görülmektedir. CC2 diyotu, en yüksek ftohassasiyet değerine sahiptir. CC1 diyotu ise en yüksek fototepki özelliğine sahiptir. Bu durum uygun katkı miktarı ile diyotların optoelektriksel özelliklerinin geliştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.2. Üretilen diyotların a) Fototepki b) Fotohassasiyet grafiği

4.3. Norde Modeli Yardımı ile Engel Yüksekliği ve Seri Direncin Hesaplanması

Norde yöntemi kullanılarak diyotların bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri hesaplanmaktadır. Norde yöntemi aşağıda gösterildiği gibi ifade edilebilir (Norde, 1979);

$$F(V) = \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.7)$$

Bu fonksiyonda en düşük V_0 gerilimine karşılık gelen $F(V_0)$ değeri kullanılarak engel yüksekliği 4.8' da gösterilen ifade ile hesaplanabilir;

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.8)$$

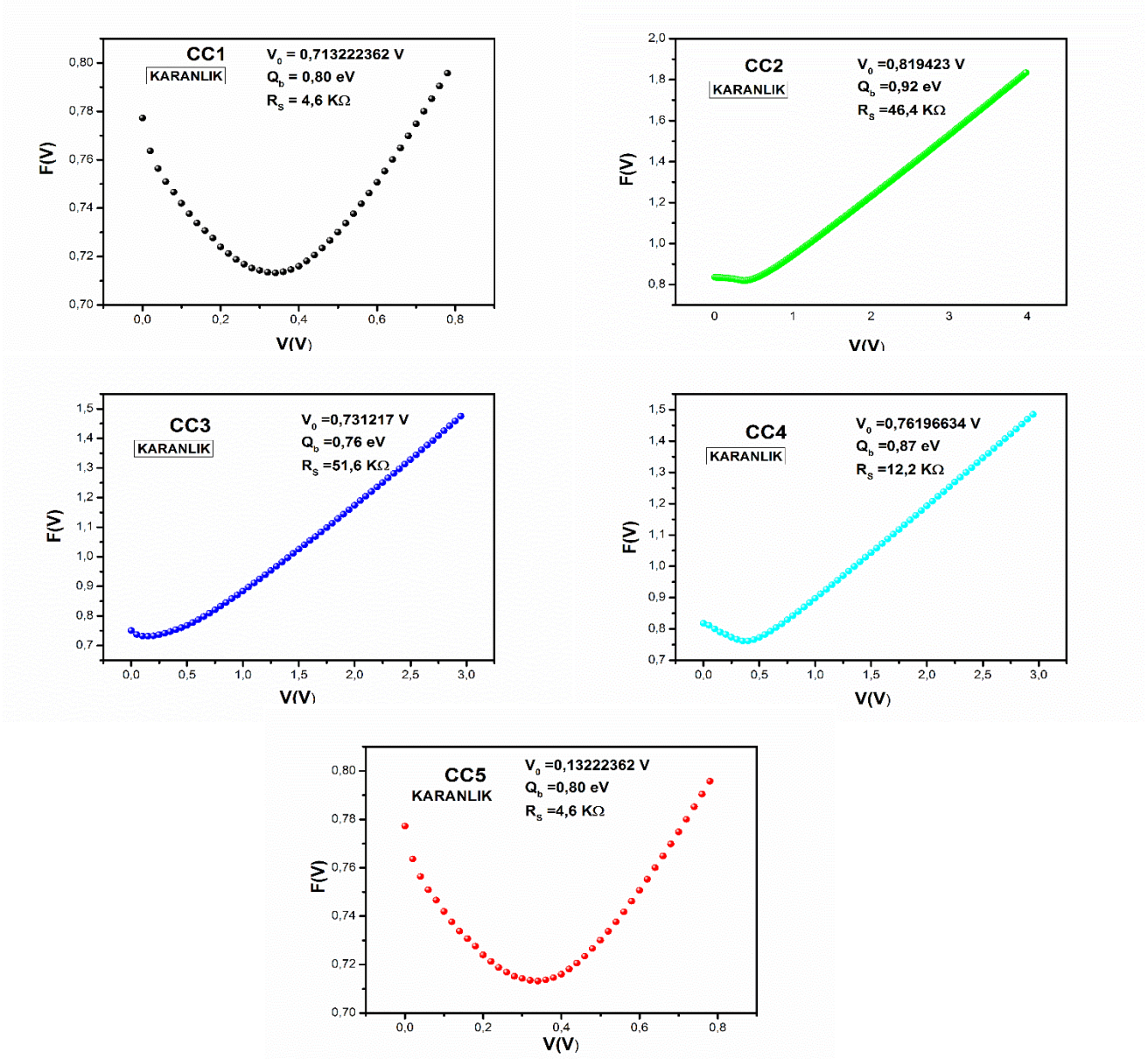
Seri direnç en düşük V_0 değerine karşılık gelen I_0 değeri kullanılarak 4.9'daki ifade ile hesaplanabilir;

$$R_s = \frac{kT}{q} \frac{(\gamma-n)}{I_0} \quad (4.9)$$

Metal yarıiletken diyotların seri dirençleri ne kadar düşük olursa üretilen diyotların kalitesi o oranda artar. Üretilen diyotların $F(V)$ - V grafikleri Şekil. 4.3'te gösterilmiş olup bu grafikler yardımıyla karanlık ortam için hesaplanan parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4. 3. Karanlıkta Norde Yöntemi kullanılarak hesaplanan parametreler

Diyotlar (Karanlık)	Φ_B (Norde)(eV)	R_s (Norde)(K Ω)
CC1	0,78	21,9
CC2	0,92	46,4
CC3	0,76	51,6
CC4	0,87	12,2
CC5	0,80	4,6

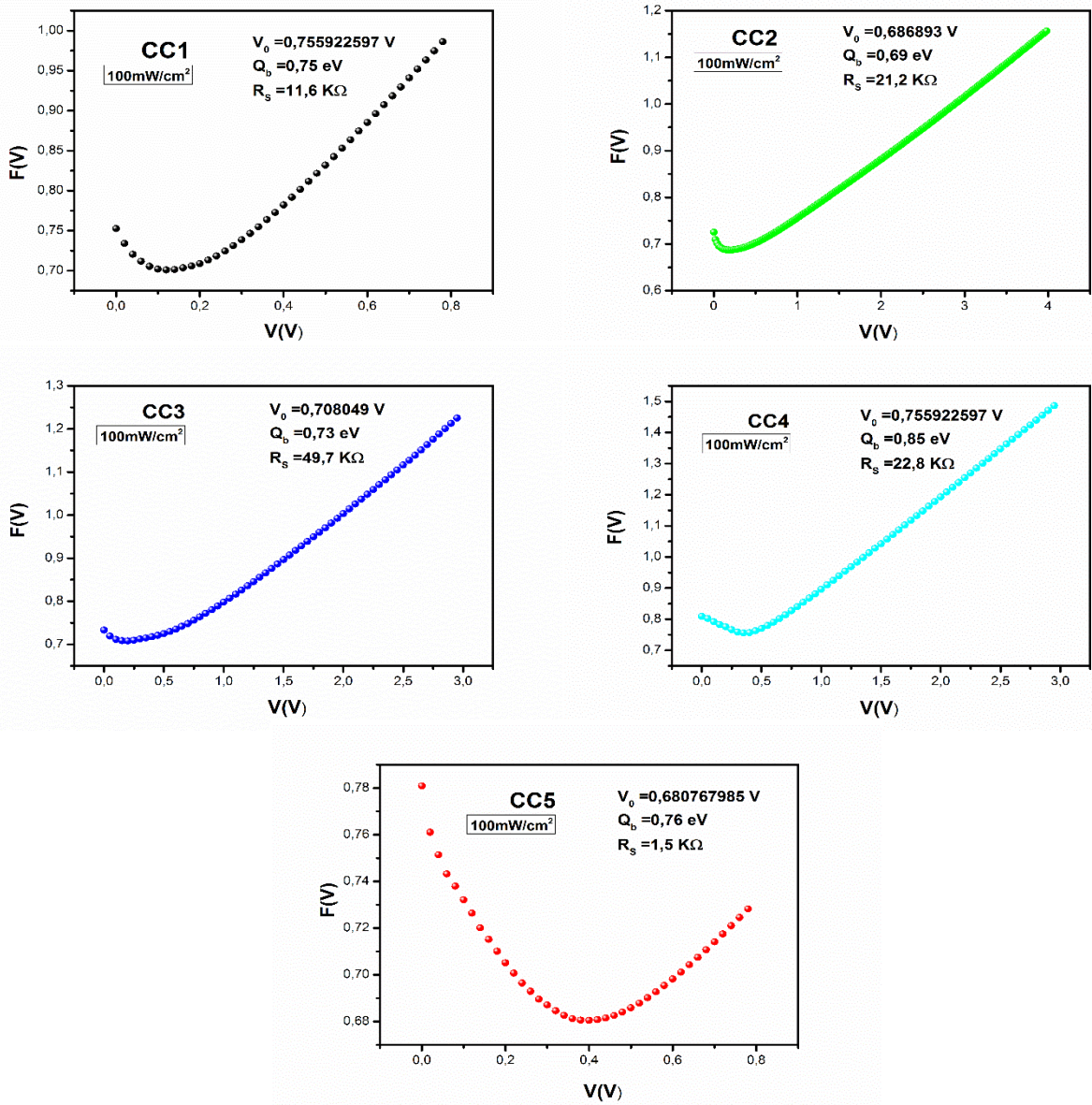


Şekil 4.3. Üretilen diyotların karanlık ortamdaki F(V)-V grafikleri

Karanlık ortamda ölçülen seri dirençler en düşük CC5 diyotu için $4,6 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek direnç ise $51,6 \text{ k}\Omega$ ile CC3 diyotu için hesaplanmıştır. Bu da Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile seri direncin değişebileceğini göstermektedir.

Norde yöntemi kullanılarak karanlık ortamda bariyer yüksekliği en çok CC2 diyotu için $0,92 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu da Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile bariyer yüksekliğinin artabileceğini görülmektedir. Termiyonik ve Norde metodu ile hesaplanan bariyer yükseklikleri karşılaştırıldığında değerlerin birbirine yakın olduğu fakat küçük bir farklılığın olduğu görülmektedir. Bu tutarsızlık, bariyerin homojen olmamasından ve I-V eğrilerinin ideal olmayan davranışlarına atfedilmektedir (Rüzgar, 2020).

Üretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında seri dirençleri ve engel yükseklikleri $F(V)$ - V grafikleri yardımıyla Çizelge 4.4'teki gibi hesaplanmıştır. 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ölçülen seri dirençler en düşük CC5 diyotu için $1,5 \text{ k}\Omega$ olarak hesaplanmıştır. En yüksek direnç ise $49,7 \text{ k}\Omega$ ile CC3 diyotu için hesaplanmıştır. Bu da Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile seri direncin kontrol edilebileceğini göstermektedir. Norde yöntemi kullanılarak 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında bariyer yüksekliği $0,85 \text{ eV}$ değeri ile $\text{Cu}_{0,25}\text{Cr}_{0,75}\text{O/n-Si}$ diyotundan elde edilmiştir. Bu da Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile bariyer yüksekliğinin değiştirilebileceğini göstermektedir.



Şekil 4.4. Üretilen diyotların 100 mWatt/cm^2 ortamdaki $F(V)$ - V grafikleri

Çizelge 4.4. 100 mWatt/cm² ışık altında Norde Yöntemi kullanılarak hesaplanan parametreler

Diyotlar (100 mW/cm² ışık)	Φ_B (Norde)(eV)	R_s (Norde)(Ω)
CC1	0,75	11,6
CC2	0,69	21,2
CC3	0,73	49,7
CC4	0,85	22,8
CC5	0,76	1,5

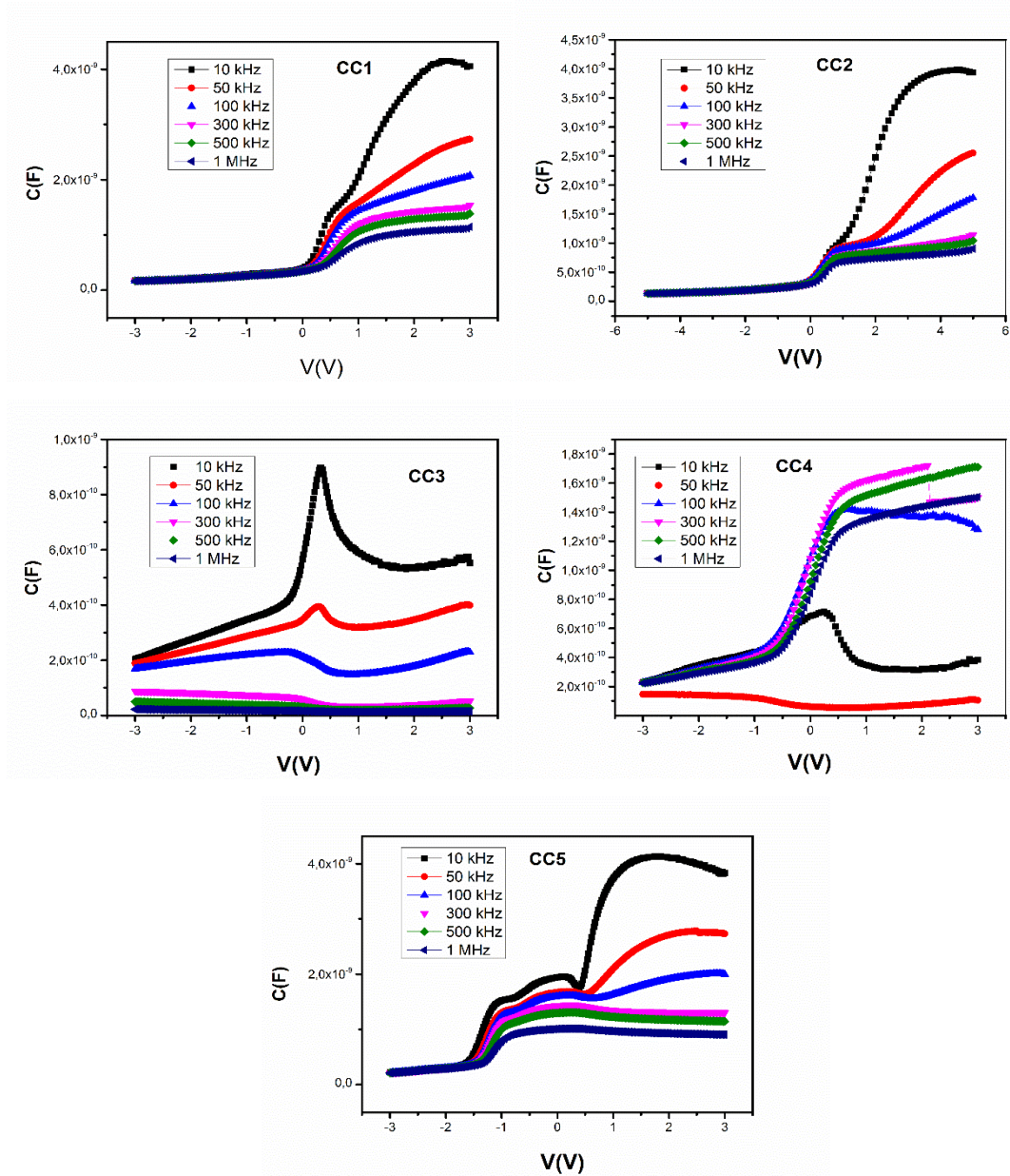
4.4. Üretilen Diyotun Kapasite-Gerilim Karakteristikleri

Diyotlarda bulunun deplasyon bölgesi kapasitif etki göstermektedir. Bunun için kapasite gerilim ölçümleri yapılarak C-V grafikleri Şekil 4.5'teki gibi çizilmiştir.

Daha sonra bu grafiklerden yararlanarak elektriksel karakterizasyonu yapılmaktadır. Ters beslem gerilimine bağlı olarak ölçülen kapasite ile doğrultucu kontakın bariyer yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanabilmektedir (Özaydın, 2012).

Üretilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralığında, karanlıkta ve oda sıcaklığında ölçülen C-V grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir. Üretilen diyotların -3V ile +3V aralığında C-V grafikleri incelendiğinde, diyotların kapasitans değeri hem frekanstan hem de uygulanan voltajdan güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir. Şekil 4. 6'da katkısız ve Cr katkılı diyotların 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında kapasitans değerlerinin artan frekansla azaldığı görülmektedir. Bu durum arayüzey durumlarının yüksek frekansta alternatif akımı takip edememesine yani kapasiteye ek katkı sağlayamamasına atfedilmektedir (Yıldırım, 2020).

Ayrıca C-V grafiklerinde doğrusal olmayan davranışların; eğriler ve gözlenen tepe noktaları da arayüzey durumlarının ve seri direnç etkisinin varlığına atfedilmektedir (Karabulut, 2018).



Şekil 4.5. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kapasitans-Gerilim (C-V) grafikleri

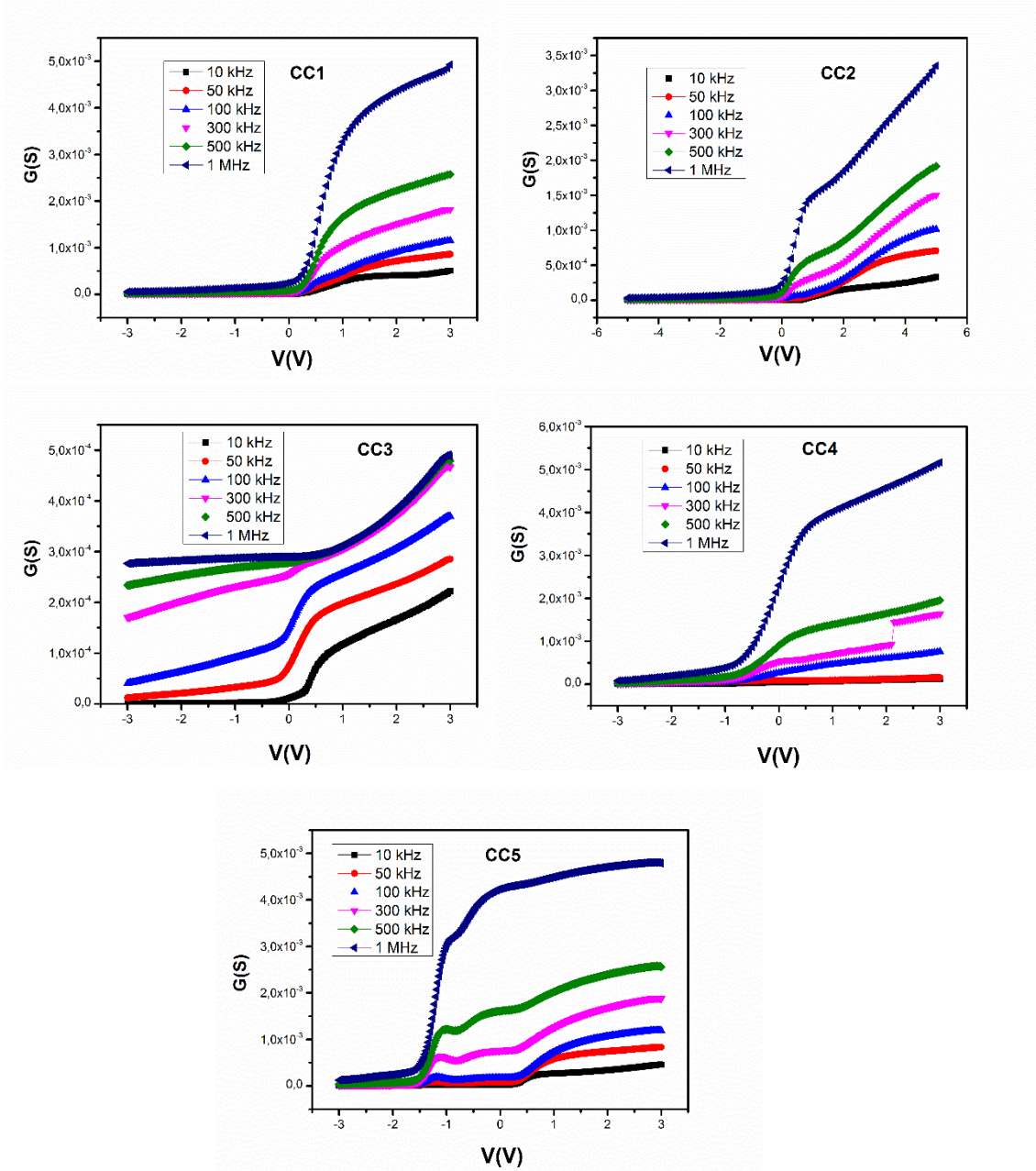
4. 5. Üretilen Diyotun Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri

Üretilen diyotların diğer bir karakterizasyon özelliği de kondüktans-voltaj ölçümleridir. Bunu için $G(S)-V$ grafikleri Şekil 4.6'daki gibi çizilerek elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır.

Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığında $G(S)-V$ grafikleri incelendiğinde frekans artıka artan voltajla beraber kondüktansın da artığı görüldü. Katkısız ve Cr katkılı diyotların $G(S)-V$ grafiklerinde kondüktans değerlerinin artan frekansla azaldığı, bunun nedeni arayüzey durumlarından dolayı AC sinyal değişimini

ancak yüksek frekansta takip edebildiğini, düşük frekansta takip edememesinden kaynaklandığı görülmektedir (Yıldırım, 2020).

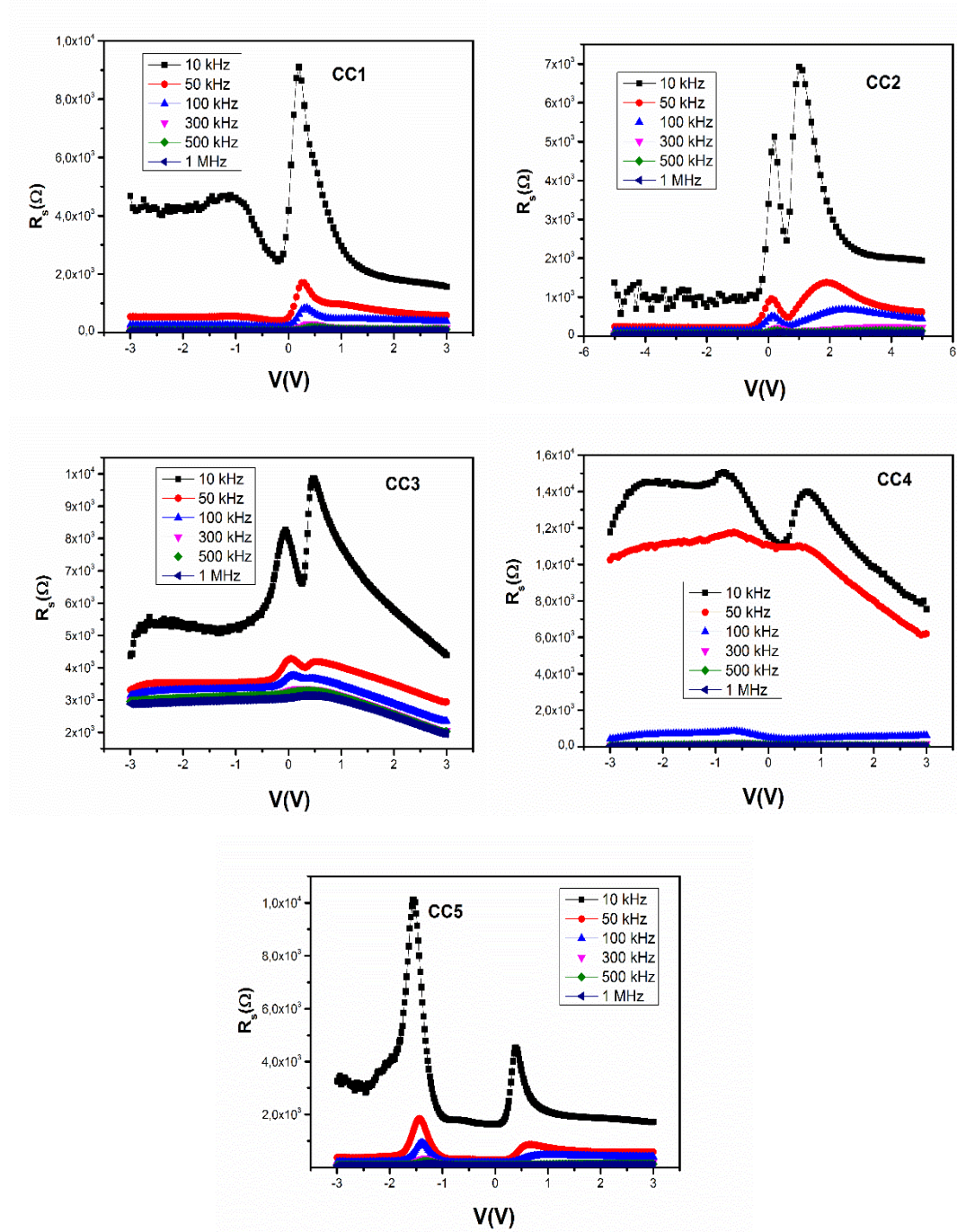
Ayrıca $G(S)$ - V grafiklerinde doğrusal olmayan davranışların; eğriler ve gözlenen tepe noktaları da arayüzey durumlarının ve seri direnç etkisinin varlığına atfedilir (Karabulut, 2018).



Şekil 4.6. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kondüktans-Gerilim (G-V) grafikleri

4.6. Üretilen Diyotların Direnç-Gerilim Karakteristikleri

Seri direncin voltaja bağlı değişimi diyotların karakteristiklerin anlaşılması bağlamında önemlidir. Diyotların seri direnci cihazın elektrik performansını etkiler (Goktas, 2019). Bunu için R_s - V grafikleri çizilerek elektriksel karakterizasyon yapılmaktadır. Üretilen diyotların seri dirençleri aşağıdaki yöntemlerle analiz edilmiştir. R_s - V fabrikasyon diyotların eğrileri Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Direnç-Gerilim (R_s - V) grafikleri

$$R_s = \frac{G_m}{G_m^2 + \omega^2 C_m^2} \quad (4.10)$$

Denklem 4.10'da C_m ölçülen kapasitans, G_m ölçülen iletkenlik, ω açısal frekans ifade eder.

Şekilde de görüldüğü gibi artan frekansla diyotların R_s değerlerinde bir azalma vardır. Frekansla R_s değerlerindeki bu değişim, sabit oksit yükleri, arayüzey yükleri, hareketli ve tuzaklanmış oksit yükler gibi lokalize arayüzey durumları ile frekansa bağlı yükler temelinde açıklanabilir (Coşkun, 2018).

Ayrıca diyotların R_s -V eğrileri 0 V ile -1 V arasında bir pik vermiş ve bu pik metal oksit tabaka ve n-Si tabakası arasındaki arayüzey durumlarının varlığını göstermektedir (Ojha, 2020).

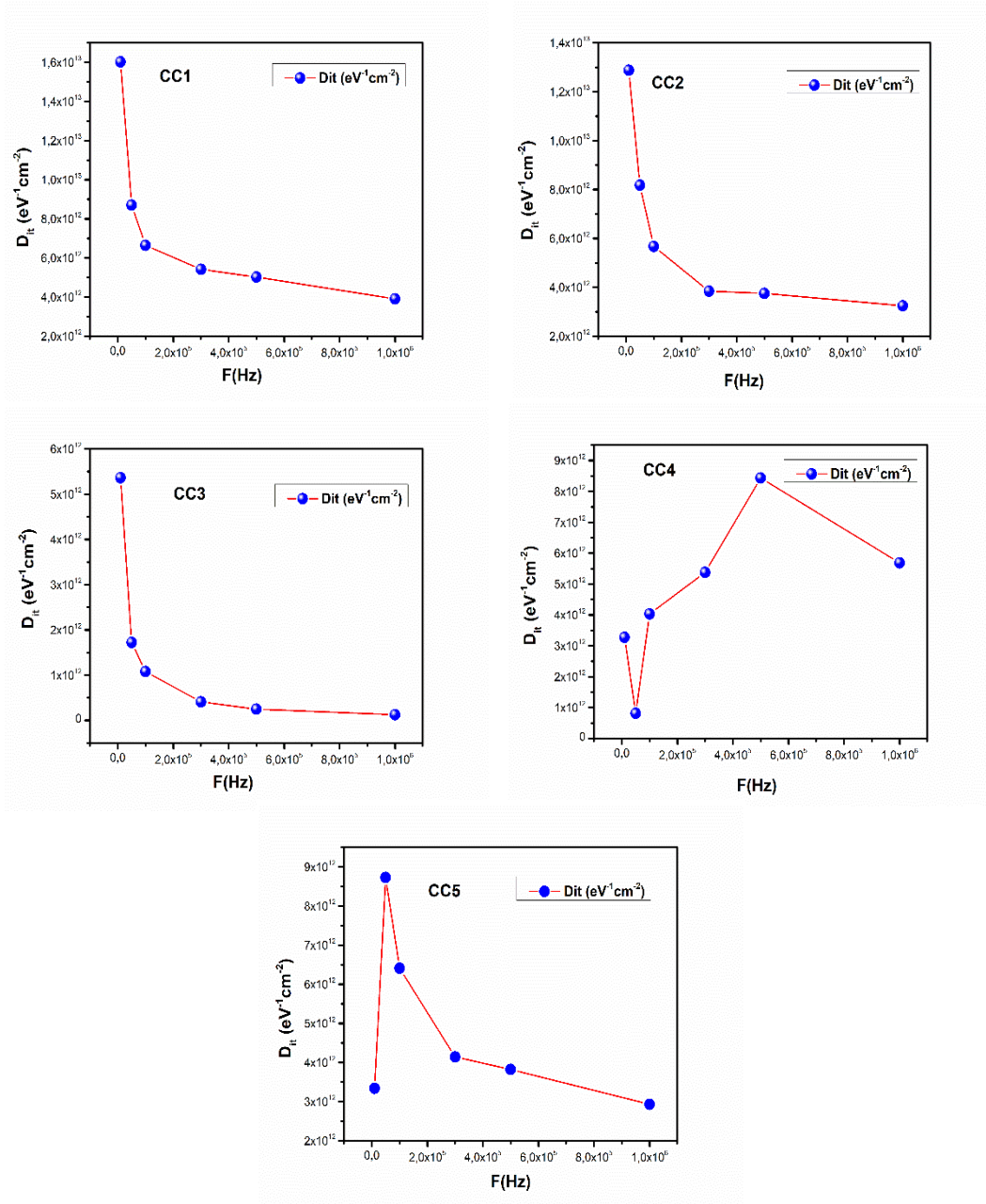
4.7. Üretilen Diyotların Ara Yüzey Durum Yoğunluğunu Karakteristikleri

Üretilen diyotların ara yüzey durum yoğunlukları aşağıdaki 4.11 denklemi ile ifade edilebilir (Yakuphanoglu, 2011).

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left[\frac{(G_{adj}/\omega)_{max}}{[G_{max}/\omega C_{ox}]^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2} \right] \quad (4.11)$$

Denklem 4.11'de C_m ölçülen kapasite, C_{ox} izolasyon tabakasının kapasitesi, ω açısal frekans, A foto diyotun kontak alanıdır.

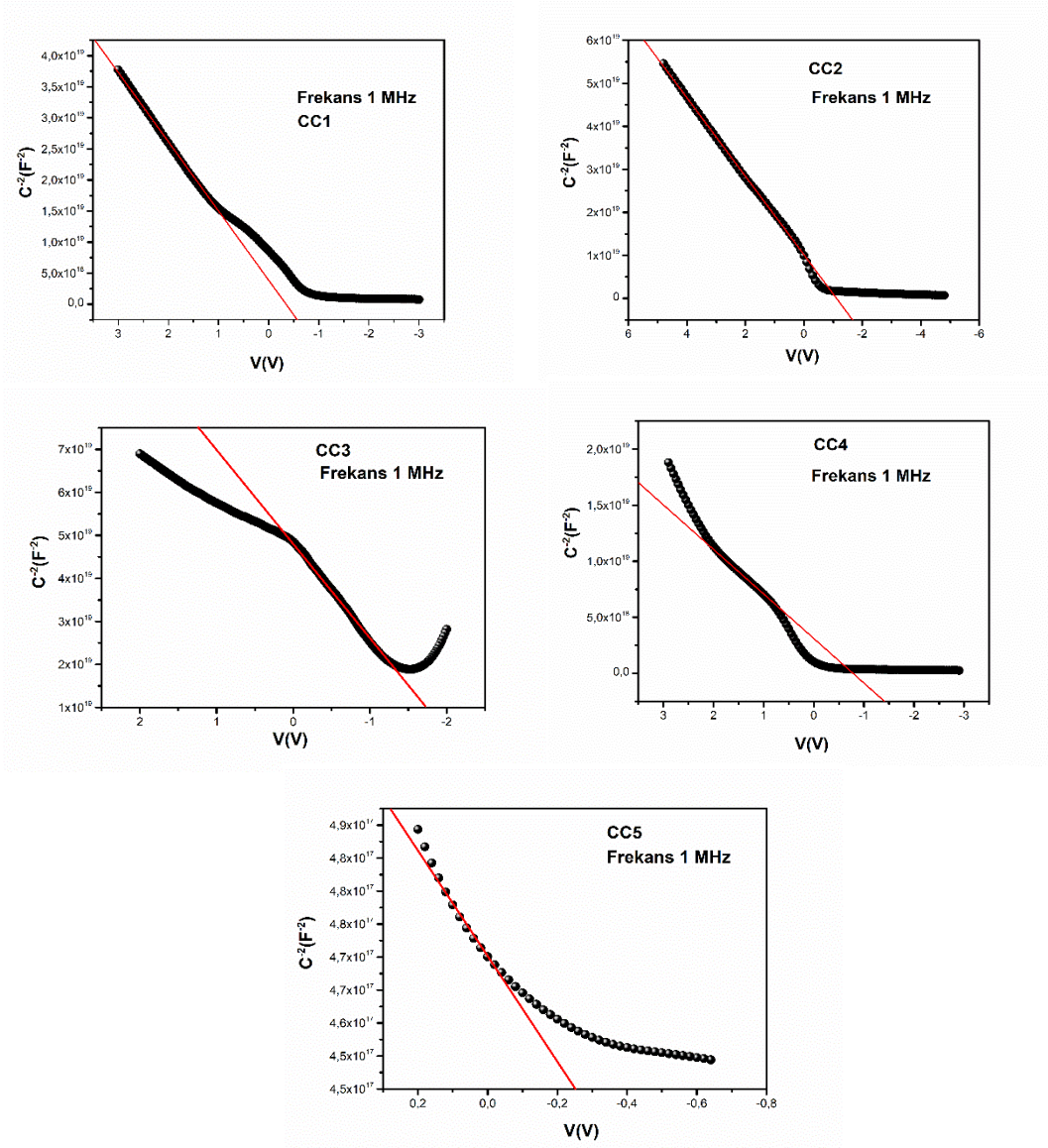
Üretilen diyotun arayüzey durum yoğunluğu D_{it} -V grafiği ve 4.11 denklemi kullanılarak hesaplandı ve arayüzey durum yoğunluğu grafikleri Şekil 4.8'deki gibi çizildi. Çizilen grafiklerde görüldüğü gibi frekans artıkça arayüzey durum yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Arayüzey durumların frekansla azalması, C-V, G-V ve R_s -V grafiklerindeki frekansla değişimi de açıklar niteliktedir.



Şekil 4.8. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki D_{it} grafikleri

4.8. Üretilen Diyotların C^{-2} -V Karakteristikleri

Üretilen diyotların C^{-2} -V grafiği 1 MHz frekansta ve oda sıcaklığında C-V ölçüm değerlerinden yararlanarak Şekil 4.9'daki gibi çizilmiştir. Çizilen grafikler görüldüğü gibi ters beslem bölgesi boyunca lineer bir davranış göstermiştir. Lineer davranış gösteren bölgelere doğrusal fit atılarak Çizelge 4.7'teki parametrelerin değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 4.9. Üretilen diyotların, 1 MHz frekandaki C^{-2} -V grafikleri

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi}+V)}{A^2 \epsilon_s q N_a} \quad (4.12)$$

$$\phi_{B(c-v)} = V_{bi} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_v}{N_a} \right) \quad (4.13)$$

Üretilen diyotların aşağıdaki değerleri Çizelge 4.7'teki gibi hesaplanmıştır. V_{bi} Built-in potansiyeli, N_d alıcı konsantrasyonu, E_f Fermi enerji seviyesi, N_c yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu (n-Si için $2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$), $\phi_{B(cv)}$ engel yüksekliği, E_{max} eklem bölgesinde oluşan maksimum elektrik alanıdır.

Çizelge 4.5. Üretilen diyotların ters beslem parametrelerinin hesaplanması

Diyotlar	Nd (cm⁻³)	Vbi (eV)	Nc (cm⁻³)	Ef (eV)	Φ_B (C-V)_{Ev}	E_{max} (kV/cm)
CC1	2,23x10 ¹⁶	0,96	2,38x10 ¹⁹	0,18	1,17	81,48
CC2	2,15x10 ¹⁶	1,12	2,38x10 ¹⁹	0,18	1,33	86,14
CC3	2,85x10 ¹⁵	1,60	2,38x10 ¹⁹	0,23	1,85	37,50
CC4	4,93x10 ¹⁶	0,78	2,38x10 ¹⁹	0,16	0,97	109,34
CC5	1,11x10 ¹⁶	1,06	2,38x10 ¹⁹	0,20	1,28	60,31

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, sol jel döndürerek kaplama yöntemi ile katkısız ve Cr katkılı CuO ince filmleri n-Si alttaşlar üzerine kaplanarak CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 heteroeklem diyotlar hazırlandı. Hazırlanan bu diyotların akım voltaj karakteristikleri hem karanlık hem de ışık altında incelendi.

Akım voltaj karakteristikleri yardımıyla diyotların seri direnç, idealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplandı. I-V grafiklerinin düz beslem tarafındaki değişimden idealite faktörü ve bariyer yüksekliği hesaplanmaktadır. Linerliğin bozulduğu bölge yardımıyla da seri direnç hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu değerler birbiriyle karşılaştırılarak en iyi katkılandırma oranı belirlendi.

Ürettiğimiz diyotların I-V ölçümleri sonucunda; İdealite faktörü karanlık ortamda CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 diyotları için sırayla 2,18; 2,78; 2,62; 2,27; 2,16 olarak hesaplanmıştır. 100 mWatt/cm² ışık şiddeti altında idealite faktörü CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 diyotları için sırayla 2,18; 5,53; 3,08; 2,21; 2,14 olarak hesaplanmıştır. Üretilen diyotların idealite faktörleri farklılık göstermekle beraber tamamının 1'den büyük değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum tüm diyotların idealiteden saptığını göstermektedir. Genellikle bu sapma bu yapıların arayüzey tabakalarına (δ_i), arayüzey durumlarına (N_{ss}), tüketim bölgesinin varlığına (W_D) ve rekombinasyonlara atfedilmektedir

I-V ölçümleri kullanılarak üretilen diyotların karanlık ortamda yapılan ölçümler sonucunda elde edilen en yüksek bariyer yüksekliği 0,84 eV ile CC2 diyotu için hesaplanmıştır. Işık şiddeti 100 mWatt/cm² olan ortamda I-V ölçümleri sonucunda elde edilen en yüksek bariyer yüksekliğinin 0,81 eV ile CC4 diyotundan hesaplanmıştır.

Doğrultma oranı diyotların anahtarlama kapasitesinin bir ölçüsü olup, diyotların kalitesini belirleyen önemli bir parametredir. Üretilen heteroeklem diyotların ± 3 V gerilim altında doğrultma oranı karanlık ortamda en yüksek CC3 diyotu için $2,07 \times 10^3$ olarak hesaplanmıştır. ± 3 V gerilim altında doğrultma oranı ışık şiddeti 100 mWatt/cm² olan ortamda hesaplanıp, en yüksek doğrultma oranı $1,58 \times 10^2$ ile CC4 diyotu için hesaplanmıştır. Genel olarak ışık altında doğrultma oranlarının düştüğü görülmekte olup bu durum fotojenerasyon nedeniyle artan sızıntı akımından kaynaklanmaktadır.

Üretilen diyotların ışığa karşı fotohassasiyet ve fototepki özellikleri, fotodiyotların performansını karakterize eden önemli parametrelerdir. Bunun için yapılan

ölçümler sonucunda CC2 diyotu, en yüksek fotohassasiyet değerine sahiptir olduğu, CC1 diyotu ise en yüksek fototepki özelliğine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum uygun katkı miktarı ile diyotların optoelektriksel özelliklerinin geliştirilebileceğini göstermektedir.

Üretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak karanlık ortamda seri dirençleri ve engel yükseklikleri $F(V)$ - V grafikleri yardımıyla hesaplanmıştır. Karanlık ortamda ölçülen seri dirençler en düşük CC5 diyotu için $4,6 \text{ k}\Omega$, en yüksek direnç ise $51,6 \text{ k}\Omega$ ile CC3 diyotu için hesaplandı. 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ölçülen seri dirençler en düşük CC5 diyotu için $1,5 \text{ k}\Omega$, en yüksek direnç ise $49,7 \text{ k}\Omega$ ile CC3 diyotu için hesaplandı. 100 mWatt/cm^2 ışık altındaki ölçülen değerlerin karanlıktaki ölçülen akım değerlerinden farklılık olduğu görülmüştür. Bunun nedeni üretilen diyotların fotodiyot özelliğinin olduğunu göstermektedir. Ayrıca Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile seri direncin değişebileceği görülmektedir. Norde yöntemi kullanılarak karanlık ortamda bariyer yüksekliği en çok CC2 diyotu için $0,92 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında bariyer yüksekliği en çok CC5 diyotu için $0,76 \text{ eV}$ olarak hesaplanmıştır. Bu da Cr katkılı CuO konsantrasyonu ile bariyer yüksekliğinin düştüğünü göstermektedir.

Termoionik Teorisi ve Norde metodu ile hesaplanan bariyer yükseklikleri karşılaştırıldığında değerlerin birbirine yakın olduğu fakat küçük bir farklılığın olduğu görülmektedir. Bu tutarsızlık, bariyerin homojen olmamasından ve I - V eğrilerinin ideal olmayan davranışından kaynaklanmasına atfedilmektedir.

Üretilen diyotların 10kHz - 1MHz frekans, -3 V ile $+3 \text{ V}$ voltaj aralığında ve oda sıcaklığında çizilen C - V ve $G(S)$ - V grafikleri, incelendiğinde, diyotların kapasitans ve kondüktans değerleri hem frekandan hem de uygulanan voltajdan güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir. Katkısız ve Cr katkılı diyotların 10 kHz ile 1 MHz frekans aralığında kapasitans ve kondüktans değerlerinin artan frekansla azaldığı, bunun nedeni arayüzey durumlarının yüksek frekansta alternatif akımı takip edememesine yani kapasiteye ek katkı sağlayamamasına atfedilmektedir. Ayrıca C - V ve $G(S)$ - V grafiklerinde doğrusal olmayan davranışların; eğriler ve gözlenen tepe noktaları da arayüzey durumlarının ve seri direnç etkisinin varlığına atfedilir.

R_s - V grafiklerinde görüldüğü gibi artan frekansla diyotların R_s değerlerinde bir azalma vardır. Frekansla R_s değerlerindeki bu değişim, sabit oksit yükleri, arayüzey yükleri, hareketli ve tuzaklanmış oksit yükleri gibi lokalize arayüzey durumları ile frekansa bağlı yükler temelinde açıklanabilir. Ayrıca diyotların R_s - V eğrileri 0 V ile -1 V

arasında bir pik vermiş ve bu pik metal oksit tabaka ve n-Si tabaka arasındaki arayüzey durumlarının varlığı nedeniyle artan frekansla azaldı ve kaybolduğu görülmektedir.

Üretilen diyotun arayüzey durum yoğunluğu D_{it} -V grafiği yardımıyla incelendi. Yapılan inceleme sonucunda frekans artıkça arayüzey durum yoğunluğunun azaldığı görülmektedir. Arayüzey durumların frekansla azalması, C-V, G-V ve R_s -V grafiklerindeki frekansla değişimi ile açıklar niteliktedir.

Üretilen diyotların C^{-2} -V grafiği 1 MHz frekansta ve oda sıcaklığında C-V ölçüm değerlerinden yararlanarak çizilmiştir. Çizilen grafikler görüldüğü gibi ters beslem bölgesi boyunca lineer bir davranış göstermiştir. Lineer davranış gösteren bölgelere doğrusal fit atılarak V_{bi} (Built-in potansiyeli), N_d (Alıcı konsantrasyonu), E_f (Fermi enerji seviyesi), N_c (Yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu), $\phi_b(cv)$ (Engel yüksekliği), E_{max} (Eklem bölgesinde oluşan maksimum elektrik alanı) parametrelerin değerleri hesaplanmıştır.

5.2 Öneriler

Elde edilen sonuçlar ürettiğimiz ince filmlerin performanslarının Cr katkılılandırılması tarafından yönetilebileceğini göstererek, üretilen heteroeklem yapıların diyotlarda, güneş pillerinde ve sensör gibi elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılabileceğini göstermiştir.

Bu çalışmada sol-jel döndürme tekniği kullanılarak ince filmler elde edildi. Yapılacak çalışmalarda kaplama tur sayısı, tavlama sıcaklıkları ve idealite değerinin en düşük çıktığı konsantrasyon miktarının daha hassas katkı derişimleri ile elektriksel parametreleri değiştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abbas, 2000, Solchrome Solar Selective Coatings an Effective Way for Solar Water Heaters Globally. *Pergamon*, 19: 145-154.
- Akgül, F. 2017, Küprik Oksit/Silisyum Heteroeklemlı Nanodiyotların Fotovoltaik Özellikleri. *S.Ü. Müh. Bilim ve Tekn. Dergisi*, 5 (4), 460-471.
- Aydın, 2016, SILAR yöntemi ile üretilen CuO filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine ikili katkılamamanın (Zn, Li) etkisi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20.Cilt, 3.Sayı, s. 481-487.
- Badali, 2020, Investigation of the effect of different Bi₂O_{3-x}: PVA (x= Sm, Sn, Mo) thin insulator interface-layer materials on diode parameters. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, cilt.31, sa.10, ss.8033-8042,
- Balamurugan, 2001, Surface-modified CuO layer in size-stabilized single-phase Cu₂O nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 79 (19), 3176-3178.
- Bayansal, F. 2009, Katkılı-Katkısız Bakır Oksit İnce Filmlerin Gaz Algılama Özelliklerinin İncelenmesi. *Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat*, s. 14-15
- Bera, K. D. 2016, Mixed phase delafossite structured p type CuFeO₂/CuO thin film on FTO coated glass and its Schottky diode characteristics . *Microelectronic Engineering*, 162, 23.
- Bera, K. D. 2017, Effect of Mg substitution in delafossite structured CuFeO₂ thin film deposited on FTO coated glass substrate and its diode characteristics . *Thin Solid Films* 642, 316
- Bhuvaneshwari, 2016, Enhanced ammonia sensing characteristics of Cr doped CuO nanoboats . *Journal of Alloys and Compounds* 654 202-208. .
- Brennan, 2005, Introduction To Semiconductor Devices: For Computing and Telecommunications Applications, *Cambridge University Press. Georgia Institute of Technology, Cambridge, Britain*, 40-72, DOI: 9780521153614.
- Cheung, 1986, Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. *Applied Physics, Lett.*, 49: 85-87.
- Chopra, K. L. 2004, Thin-Film Solar Cells: An Overview. *Progress In Photovoltaics: Research and Applications*, 69 (92) 69–92.
- Coşkun, K. M.-D.-S.-G. 2018, Optoelectrical properties of Al/p-Si/Fe:N doped ZnO/Al diodes, *Thin Solid Films* 653 236–248.
- Erdoğan, İ. Y. 2010, Optical and structural properties of CuO nanofilm: . *its diode application. Journal of Alloys and Compounds*, , 492(1-2), 378-383.

- Filipi, G. C. 2012, Copper oxide nanowires: a review of growth. *Nanotechnology*, s.1-16.
- Fiore, J. 2008, This Semiconductor Devices: Theory and Application, *Mohawk Valley Community College 1101 Sherman Drive Utica, NO: 13501*, 407 s, 23-31.
- Gao, A. L. 2011, Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering. *Journal Of Applied Physics*, 084507 (2012) 29–45.
- Goktas, A. T. 2019, Mg doping levels and annealing temperature induced structural, optical and electrical properties of highly c-axis oriented ZnO:Mg thin films and Al/ZnO:Mg/p-Si/Al heterojunction diode, *Thin Solid Films 680* . Sayfa 20-30
- Hameed, S. D. 2021, h-sonlanmış yüzey ile cu/n-si schottky kontaklarının üretimi ve elektriksel karakterizasyonu . *Van yüzüncü Yıl Üniversitesi*, 21-23.
- Hasançebi, 2006, Electrical, Structural and Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Method, *Yüksek Lisans Tezi, Ankara University, Ankara*.
- Hong, 2002, A convenient alcohothermal approach for low temperature synthesis of CuO nanoparticles, *Materials Letters*, 52, 34–38.
- Hong, Y. C. 2014, Self-powered ultrafast broadband photodetector based on p–n heterojunctions of CuO/Si nanowire array . *ACS applied materials -ACS Publications*, 6, 20887.
- Ishizuka, S. M. 2000, Thin-film deposition of Cu₂O by reactive radio-frequency magnetron sputtering. *Jpn. J. Appl. Phys.* 39, L786–L788.
- Jeffrey B.C., G. W. 1990, Scherer Sol-gel Science: The Physics and Chemistry of Sol-gel Processing, *Gulf Professional Publishing*. s. 908,
- Johan, M. S. 2011, Annealing Effects on the Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Chemical Deposition. *International Journal of Electrochemical Science*, 6 (2011) 6094 - 6104.
- Karabulut, A. D.-S.-G. 2018, Cadmium Oxide: Titanium Dioxide Composite Based Photosensitive Diode, *Journal of electronic materials* vol. 47.
- Karteri, İ. K. 2014, Electrical Characterization Of Graphene Oxide And Organic Dielectric Layers Based On Thin Film Transistor, *Applied Surface Science*, Volume 318, Pages 74-78.
- Kasapoğlu, E. 2014, Sol-gel spin kaplama metodu ile büyütülen ZnO ve ZnO: Fe ince filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri. *Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, turkiye*, 69 s, 13-22.
- Kawazoe, M. Y.-N. 1997, P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂. *nature.com*, 389, 939.

- Kuş, F. 2010, Bakır Oksit/Çinko Oksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi*, Ankara. Sayfa 33.
- Lee, W. L. 2017, Sol-gel processed p-type CuO phototransistor for a near-infrared sensor. *IEEE Electron - ieeexplore.ieee.org*, 39, 47.
- Lu, Y. C. 2005, Effect of hydrogen plasma treatment on the electrical properties of sputtered N-doped cuprous oxide films. *Materials Science and Engineering B*, 118 (2005) 179–182.
- Maruyama, T. 1998, Copper oxide thin Films prepared by chemical vapor deposition from copper dipivaloymethanate. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 56 (1998) 85-92.
- Missous, M. R. 1985, Thermal Stability of Epitaxial Al/GaAs Schottky Barriers Prepared by Moleculer-Beam Epitaxy. *J. Appl. Phys*, 59(9), 3189-3195.
- Min, S. P. 2020, ParkSwitching enhancement via a back-channel phase-controlling layer for p-type copper oxide thin-film transistors . *Applied Materials - ACS Publication*, 12, 24929.
- Norde, H. 1979, A Modified Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance”, *J. Applied Physics*, 50: 5052-5053.
- Ojha, M. B. 2020, Investigation of electrochemical performance of a high surface area mesoporous Mn doped TiO₂ nanoparticle for a supercapacitor, *Mater. Lett.* 264.
- Özaydın, C. 2012, Makrosiklik Ligandları nGeçiş Metal Kompleksleri İle Oluşturulan Heteroeklemlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerin İncelenmesi, *Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 72-81.
- Özmenteş, R. T. 2018, Characterization of CuO/n-Si heterojunction solar cells produced by thermal evaporation. *Materials Science-Poland*, 36 (4), 668-674.
- Prabhu, A. S. 2017, Fabrication of p-CuO/n-ZnO heterojunction diode via sol-gel spin coating technique. *Science and Engineering – Elsevier*, 220, 82.
- Ruzgar, S. A. 2020, The effect of Fe dopant on structural, optical properties of TiO₂ thin films and electrical performance of TiO₂ based photodiode, *Superlattices and Microstructures*, 5-6.
- Ruzgar, S. C. 2021, The influence of Fe substitution into photovoltaic performance of p-CuO/n-Si heterojunctions. . *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, , 32(15), 20755-20766.
- Rüzgar, 2020, The tuning of electrical performance of Au/(CuO:La)/n-Si photodiode with. *Materials Science in Semiconductor Processing* 3-4.
- Rüzgar, C. Ö. 2013, Characterization of an Au/n-Si photovoltaic structure. *Materials Science in Semiconductor Processing* 6-7.

- Rüzgar, M. C. 2020, Fabrication and characterization of solution processed Al/Sn:ZnO/. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 5-6.
- Shkar, D. H., 2021, Electrical characterization of cu/n-si schottky contacts by creating h-terminated surface *Van yuzuncu yil university institute of natural and applied sciences department of physics fabrication*, Bethe, 1942.
- Siddiqui, H. P. 2012, A Review: Synthesis, Characterization and Cell Performance of Cu₂O Based Material for Solar Cells. *Oriental Journal Of Chemistry*, 28 (3), 1533–1545.
- Silan Baturay, I. C. 2022, Structural, optical, and electrical characterizations of Cr-doped CuO thin films . *Journal of Materials Science: Materials in Electronics volume*, 33, pages 7275–7287 .
- Singh, R. Y. 2019, Effect of annealing time on the structural and optical properties of n-CuO thin films deposited by sol-gel spin coating technique and its application in n-CuO/p-Si heterojunction diode. *Thin Solid Films*, , 685, 19.
- Sönmezoğlu. 2012, İnce Film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 389-401.
- Surviliene, S. C. 2014, The use of trivalent chromium bath to obtain a solar selective black chromium coating. *Applied and Surface Science* , 305.
- Sze M. S., K. K. 2007, *Physics of Semiconductor Devices*”, *John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey*, sayfa 5-8
- Sze. 2002, *Semiconductor Devices*, John Wiley&Sons, New York, p. 18, 60, 112, 235
- Tung, R. T. 1992, Electron transport at metal-semiconductor interfaces: . *General theory. Physical Review B*, 45(23), 13509.
- Wang, X. H. 2004, Time-resolved Studies for the Mechanism of Reduction of Copper Oxides with Carbon Monoxide: Complex Behavior of Lattice Oxygen and the Formation of Suboxides. *J. Phys. Chem. B*, 108 .
- Yacobi, G. 2003, *Semiconductor materials, an introduction to basic principles*, 59-105, DOI:10.1007/b105378.
- Yacobi. 2007, *Extended Defects In Semiconductors*, *Cambridge University Pres*, p.1.
- Yakuphanoglu F., F. A. 2011, Photoresponse and Electrical Characterization of Photo Diode based nanofibers ZnO and Si, *Material Science in Semiconductor Processing*, 14, 207-211.
- Yang, K. Z. 2020, High responsivity and external quantum efficiency photodetectors based on solution-processed Ni-doped CuO films W Yin., *Applied Materials - ACS Publications*, 12, 11797.

- Yıldırım. 2020, Characterization of the framework of Cu doped TiO₂ layers: an insight into optical, electrical and photodiode parameters, *J. Alloys Compd.* 773 (2019) 890–904.
- Yılmaz, 2018, Facile electrochemical-assisted synthesis of TiO₂ nanotubes and their role in Schottky barrier diode applications. *Superlattices and Microstructures*, 113:310- 318.
- Yin, J. Y. 2020, High responsivity and external quantum efficiency photodetectors based on solution processed Ni-doped CuO films. *Applied Materials - ACS Publications*, 12, 11797.
- Yoon, K. C. 2000, Photoelectrochemical properties of copper oxide thin films coated on an n-Si substrate. *Thin Solid Films*, 372, 250-256.
- Zhang, S. T.-S. 2019, Mg doped CuCrO₂ as efficient hole transport layers for organic and perovskite solar cells . *Nanomaterials-mdpi.com* 9, 1311.
- Zhang. 2020, A New Highly Conductive Direct Gap p-Type Semiconductor La_{1-x}Y_xCuOS for Dual Applications: *Transparent Electronics and Thermoelectricity*, 12, 6090.

ÖZGEÇMİŞ**KİŞİSEL BİLGİLER**

Adı Soyadı : Şeyhmus TOPRAK

Uyruğu : TC

EĞİTİM

Derece	Adı	Bitirme Yılı
Üniversite	: Dicle Üniversitesi Batman Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Öğretmenliği Alanı	2004
	Siirt Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	2019

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2007-2010	Beyoğlu Belediyesi	Elektrik Tenikkeri
2010-2022	Batman Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	Elektrik Öğretmeni

UZMANLIK ALANI

Elektrik Öğretmeni

YABANCI DİLLER

İngilizce