



T.C.

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**KOBALT KATKILI BAKIR OKSİT İNCE FİLM TABANLI YAPILARIN
ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yusuf YILDIZ

**Danışman
Doç. Dr. Şerif RÜZGAR**

**Nisan 2022
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır**

TEZ KABUL VE ONAYI

Yusuf YILDIZ tarafından hazırlanan “KOBALT KATKILI BAKIR OKSİT İNCE FİLM TABANLI YAPILARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU” adlı tez çalışması .../ .../2022 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. Üyesi Şerif RÜZGAR

.....

Üye

Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü 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 material and results that are not original to this work.

Yusuf YILDIZ

.../04/2022

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KOBALT KATKILI BAKIR OKSİT İNCE FİLM TABANLI YAPILARIN ELEKTRİKSEL KARAKTERİZASYONU

Yusuf YILDIZ

BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

Danışman: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 43 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Osman PAKMA

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Doç. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

Sol jel döndürme kaplama yöntemi ile katkısız ve kobalt katkılı bakır oksit ince filmleri n tipi silisyum alttaşlar üzerine kaplanarak heteroeklem yapılar üretildi. Elde edilen bu heteroeklem yapıların fotoelektriksel özellikleri incelendi. Yapılan ölçümler sonucunda kobalt katkılıdırmanın üretilen ince filmler üzerindeki etkisi araştırıldı. Üretilen bu yapıların I-V grafikleri karanlıkta ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında çizilerek incelendi. I-V grafiklerini kullanarak bu diyotların idealite faktörü (η), bariyer yüksekliği (Φ_B), doğrultma oranı (RR), Norde fonksiyonu yardımı ile seri dirençleri karanlık ve ışık altında hesaplandı. Bununla birlikte, 10 kHz – 1 MHz frekans aralığında C-V, R_s -V, G-V ile Dit grafikleri çizilip incelendi. Elde edilen diyotların ters beslem (C^{-2}) grafiğini 1 MHz frekans altında çizerek $N_d(\text{cm}^{-3})$, V_{bi} (eV), N_c (cm^{-3}), E_f (eV), $\Phi_{b(C-V)}$ (eV), W_d (nm), $\Delta\Phi_b$ (eV) ve E_{max} (V/cm) parametreleri hesapladı. Elde edilen hesaplamalar sonucunda tüm elektriksel parametrelerin katkı miktarına kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu gözlemlendi.

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

ABSTRACT
MASTER'S THESIS
ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF COBALT DOPED COPPER OXIDE
THIN FILM BASED STRUCTURES

Yusuf YILDIZ

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS

Advisor: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2022, 43 Pages

Jury
Prof. Dr. Osman PAKMA
Asos. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR
Asos. Prof. Dr. Fatih Ahmet ÇELİK

In order to fabricate heterojunction structures, undoped and cobalt-doped copper oxide thin films were deposited on n-type silicon substrates by sol-gel spin coating method. The optoelectrical properties of these heterojunction structures were investigated. As a result of the measurements, the effect of cobalt doping on the produced thin films based structures were studied. The I-V measurement of these structures were examined in the dark and under 100 mW/cm² light intensity. The ideality factor (n), barrier height (Φ_B), rectification ratio (RR), series resistance of these diodes were calculated by using the conventional Thermoionic Emission and Norde methods. In addition, C-V, Rs-V, G-V and Dit graphs were plotted and analyzed in the frequency range of 10 kHz – 1 MHz. The electrical parameters of these structures such as N_d (cm⁻³), V_{bi} (eV), N_c (cm⁻³), E_f (eV), $\Phi_{b(C-V)}$ (eV), W_d (nm), $\Delta\Phi_b$ (eV) and E_{max} (V/cm) were calculated by using capacitance data, which was measured under 1 MHz frequency. As a result of the electrical measurement of heterostructures, it was observed that all electrical parameters were strongly dependent on the doping concentration.

Keywords: Copper Oxide, Cobalt Oxide, Heterojunctions, Thin Film

ÖNSÖZ

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsüne Yüksek Lisans tezi olarak sunulan bu çalışmanın her safhasında yardımcı olan kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şerif RÜZGAR’a teşekkürlerimi sunarım.

Yazım aşamasında yanımda olan eşime ve çocuklarıma sevgilerimi sunuyorum.

Yusuf YILDIZ
BATMAN-2022

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
ŞEKİLLER	xii
ÇİZELGELER	xiii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	4
3.1. Yarıiletkenler	4
3.1.1. p-tipi yarıiletkenler	5
3.1.2. n-tipi yarıiletkenler	5
3.2. Enerji Bant Modeli.....	6
3.3. Yarıiletkenlerde Eklem Türleri	7
3.3.1. Homoeklemler	7
3.3.2. Heteroeklemler.....	8
3.4. Heteroeklem Yapıların Akım-Gerilim (I-V) Hesaplamaları	8
3.4.1. Kontaklardaki akım mekanizmaları.....	8
3.4.2. Termiyonik emisyon mekanizması	9
3.4.3. Diyotlarının ideal olmayan özellikleri	11
3.4.4. İdealite faktörü.....	12
3.4.5. Bariyer yüksekliği.....	13
3.4.6. Seri direnç	13
3.4.7. Norde yöntemi	14
3.4.8. Fotoiletkenlik	16
3.4.8.1. Saf fotoeksitasyon.....	17
3.4.8.2. Tek merkezli rekombinasyon modeli	17
3.4.8.3. İki merkezli rekombinasyon modeli	19
3.5. Heteroeklem Yapıların Kapasite Gerilim (C-V) Hesaplamaları.....	20
3.6. İnce Film Teknolojisi.....	22
3.7. Sol Jel.....	23
3.8. Döndürme Kaplama Yöntemi	24
3.9. Bakır Oksit (CuO).....	24
3.10. KobaltOksit (CoO).....	25
3.11. Deneysel İşlemler	26
3.11.1. Alt Tabakanın Temizlenmesi.....	26
3.11.2. Çözeltilerin Hazırlanması	26

3.11.3. Filmlerin Kaplanması	27
3.11.4. Numunelerin Elektriksel Ölçümlerinin Alınması	29
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	30
4.1. Elde Edilen Diyotların I-V Grafikleri ve Elektriksel Parametreleri	30
4.2. Elde Edilen Diyotların C-V Karakteristikleri	35
4.3. Elde Edilen Diyotların C^{-2} -V Karakteristikleri	36
4.4. Elde Edilen Diyotların G-V Karakteristikleri	38
4.5. Elde Edilen Diyotların R_s -V Karakteristikleri	39
4.6. Üretilen Diyotların Ara Yüzey Durum Yoğunluğunu Hesaplama	40
4.7. Üretilen Diyotların Işığa Duyarlılık Karakteristikleri	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	42
5.1. Sonuçlar	42
5.2. Öneriler	43
KAYNAKLAR	44
ÖZGEÇMİŞ	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

A	: Diyotun etkin alanı,
A^*	: Richardson sabiti,
Ag	: Gümüş,
C	: Kapasite,
C_m	: Ölçülen kapasite
C_{ox}	: İzolasyon tabakasının kapasitesi,
d	: mesafe,
E	: Elektrik alanı,
e	: Elektron yük,
E	: Fermi Seviyesi,
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti,
E_0	: Vakum seviyesi,
E_C	: İletkenlik bandının tabanı,
E_f	: Fermi enerji seviyesi,
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı,
E_{max}	: Eklem bölgesinde oluşan maksimum elektrik alanı,
ϵ_s	: Dielektrik sabiti,
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti,
eV	: Elektron volt,
E_v	: Valans bandı,
E_c	: İletkenlik bandının tabanı,
E_o	: Vakum seviyesi,
G	: Fotouyarılma oranı,
γ	: Norde yönteminde bir sabit,
G_m	: Ölçülen iletkenlik,
h	: Planck sabitidir,
Hz	: Frekans,
I	: Akım,
I_0	: Ters beslem akımı,
I_d	: Karanlık akım,
I_p	: Foto akım,
k	: Boltzmann sabiti,
m	: Kütle,
M	: Molar,
m^*	: Taşıyıcının etkin kütlesidir,
m_0	: Durgun elektron kütlesi,
m_n	: Elektron etkin kütlesi,
n	: Mol,
N_a	: Alıcı yoğunluğu,
N_A	: Yarıiletken akseptörü,
N_c	: Yarıiletkenin iletim bandındaki durum yoğunluğu (n-Si için $2,8 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$),
N_D	: Döner konsantrasyonu,
N_d	: Verici yoğunluğu,
n_t	: Dolu tuzak seviye yoğunluğu,
$\phi_B(cv)$	: Bariyer yüksekliği,
q	: Elektrik yükü,

R_s	: Seri direnç,
T	: Kelvin derecesi cinsinden sıcaklık,
V	: Gerilim,
V	: Uygulanan potansiyel,
V_{bi}	: İçyapı potansiyeli,
V_{bi}	: Yapı potansiyeli,
V_d	: Difüzyon gerilimi,
V_F	: Built-in gerilimi,
V_F	: İleri besleme gerilimi,
V_R	: Geri beslem gerilimi,
W	: Deplasyon bölgesi,
β_n	: Elektron yakalama katsayısı,
β_p	: Hol yakalama katsayısı,
δ	: Arayüzey kalınlığı,
λ	: X-ışınlarının dalga boyu,
$\rho(x)$	: Mesafeye bağlı yük dağılımı,
$\Psi(x)$	: Mesafeye bağlı potansiyel fonksiyon,
Ω	: Direnç birimi,
η	: İdealite faktörü,

Kısaltmalar

$C^{-2}-V$	: Ters beslem-gerilim
CC1	: CoO/n-Si
CC2	: Co _{0.75} Cu _{0.25} O/n-Si
CC3	: Co _{0.50} Cu _{0.50} O/n-Si
CC4	: Co _{0.25} Cu _{0.75} O/n-Si
CC5	: CuO/nSi
C-F	: Kapasite-frekans
CoO	: Kobalt oksit
CuO	: Bakır oksit
C-V	: Kapasite-gerilim
D_{it}	: Diyot Arayüzey durum yoğunluğu
G-F	: Kondüktans-frekans
G-V	: Kondüktans-gerilim
I-V	: Akım-gerilim
LED	: Light emitting diode
MIS	: Metal yalıtkan-yarıiletken kontak
MS	: Metal yarıiletken kontak
PV	: Fotovoltaikler
RR	: Doğrultma oranı
TE	: Termiyonik Emisyon
TMO	: Geçiş meteli oksit
VLS	: Buhar-sıvı-katı

ŞEKİLLER

Şekil 3.1. (a) İletken madde, (b) Yarıiletken madde ve (c) Yalıtkan maddelerin band diyagramları	4
Şekil 3.2. p-tipi yarıiletken	5
Şekil 3.3. n-tipi yarıiletken	6
Şekil 3.4. a) Birleşme olmadan önce p tipi ve n tipi maddelerin enerji bant yapısı, b) Birleşme olduktan sonra p tipi ve n tipi maddelerin enerji bant yapısı	7
Şekil 3.5. İleri sapmada diyotlar arasında akım taşıma mekanizmaları; (a) termiyonik emisyon, (b) tünelleme, (c) tükenme bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu, (d) metalden delik enjeksiyonu	9
Şekil 3.6. Termiyonik emisyon modeline dayalı olarak oluşturulmuş ideal bir akım-voltaj karakteristiği	10
Şekil 3.7. (a) Yarı-log ölçeğinde ve (b) Normal ölçekte idealite faktörünün farklı değerlerinde ileri beslemde simüle edilmiş I-V özellikleri..	11
Şekil 3.8. Diyotun ters I-V karakteristikleri üzerindeki bariyer indirme ve kuantum mekanik tünellemenin etkileri.	12
Şekil 3.9. İçsel foto-uyarma için enerji bant diyagramı	18
Şekil 3.10. Tek merkez rekombinasyon modeli için enerji bandı yapısı.....	19
Şekil 3.11. İki merkezli bir rekombinasyon modeli için enerji bant diyagramı	19
Şekil 3.12. Heteroeklem yapılarında mesafeye bağlı; a) Potansiyel dağılım grafiği, b) Yük dağılım grafiği	21
Şekil 3.13. Heteroeklem yapı	23
Şekil 3.14. Sol-jel kaplama yöntemi.....	24
Şekil 3.15. İnce filmi döndürme ile kaplama.....	24
Şekil 3.16. Kobalt oksit yarıiletkeninin band yapısı.....	26
Şekil 3.17. Hazırlanan çözeltilerin manyetik karıştırıcıda karıştırılması.....	27
Şekil 3.18. a) Spin Coating cihazı b) Damlatma işlemi.....	28
Şekil 3.19. Fotodiyotların üretimi ve şematik diyagramı	28
Şekil 3.20. a) Batman Üniversitesi Elektriksel ölçüm laboratuvarı b) Elektriksel ölçüm prob kutusu	29
Şekil 4.1. Elde edilen diyotların karanlık ve ışık altındaki I-V değerlerini gösteren grafikler.....	31
Şekil 4.2. Elde edilen diyotların karanlıkta ölçülen F-V grafikleri	33
Şekil 4.3. Elde edilen diyotların ışık altında (100mWatt/cm^2) F-V grafikleri	34
Şekil 4.4. Elde edilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralıklarındaki C-V değerlerini gösteren grafikler	35
Şekil 4.5. Elde edilen diyotların C^{-2} -V grafikleri	37
Şekil 4.6. Elde edilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralıklarındaki G-V değerlerini gösteren grafikler	38
Şekil 4.7. Elde edilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralıklarındaki R_s -V değerlerini gösteren grafikler	39
Şekil 4.8. Elde edilen diyotların karanlık ortamda D_{it} -F grafikleri	40
Şekil 4.9. Elde edilen diyotların a) Fototepki (A/W) b) Fotohassasiyet grafiği	41

ÇİZELGELER

Çizelge 4.1. Elde edilen diyotların karanlıkta hesaplanan elektriksel parametreleri.....	32
Çizelge 4.2. Elde edilen diyotların ışık şiddeti altında hesaplanan elektriksel parametreleri.....	34
Çizelge 4.3. Elde edilen diyotların hesaplanan C^{-2} -V değerleri.....	37
Çizelge 4.4. Elde edilen diyotların elektriksel parametreleri.....	41

1. GİRİŞ

İnce film teknolojisi; katı malzemenin iki boyutlu formuna dayanan, gelişmekte olan bir bilim ve teknoloji dalıdır. İdeal bir ince film, iki paralel düzlemle sınırlanmış ve iki yönde (x ve y) sonsuza kadar uzanan, ancak üçüncü yön (z) boyunca sınırlandırılmış homojen bir katı malzeme olarak tanımlanabilir. İnce bir film, substrat adı verilen katı bir yüzey üzerinde molekül yoğunlaştırma işlemiyle oluşur. Film kalınlığı olarak adlandırılan z yönü boyunca boyut, yaklaşık bir mikrondan (10^{-4} cm) daha incedir. Üretilen bu filmin kalınlığı, belirli bir elektronik taşıma işleminin ortalama serbest yolunun büyüklüğüne göre sınırlanmalıdır. Kalınlık sınırı bir nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişebilir (Chopra, 1969).

1931'de Schottky, Stormer ve Waibel'in bir akım akarsa bir potansiyelin var olacağını ortaya attılar. Metal-yarı iletken kontakları düşüncesindeki ilerleme, radarlarda silikon ve germanyum doğrultucuların kullanılmasının bir sonucu olarak İkinci Dünya Savaşı sırasında oluştu. Bu ilerleme, yarı iletken fiziğinin gelişmesine önemli ölçüde yardımcı oldu. Kontaklar, Schottky diyotun keşfinden sonra Schottky bariyeri olarak adlandırılmıştır. İlk zamanlarda, çeşitli alanlardaki uygulamaları ile çeşitli metal yarı iletken bağlantılar incelenmiştir. Daha sonra bakır oksit levha doğrultucuları, silikon ve germanyum nokta kontak ve selenyum doğrultucular geliştirildi. O dönemlerde ince film teknolojisine en çok katkıda bulunan bilim adamları, Bethe, Mott, Rhoderick, Wilson, Bardeen, Sze, Goodman, Mead, Cowley ve Henisch'dir (Rhoderich, 1978).

1951'de Shockley, bipolar transistörde verimli bir emitör tabanlı bağlantı olarak kullanılacak heteroeklemi ilk kez denedi (Shockley, 1951). Aynı yıl, Gubanov heteroeklemler üzerine teorik makaleler yayınladı (Gubanov, 1951). Geniş aralıklı bir emitör olarak benzer bir hetero-bağlantıyı analiz eden Kroemer'di (Kroemer, 1957).

Bu çalışmada, katkısız ve kobalt katkılı bakır oksit ince filmler n-Si alttaşlar üzerine sol-jel döndürme kaplama yöntemi ile kaplandı. Üretilen bu heteroeklem yapılar oda sıcaklığında optoelektriksel özellikleri karanlık ve ışık altında geleneksel I-V ölçümleri yardımı ile incelenmiştir. Bununla birlikte diyotların kapasite/gerilim (C-V), kondüktans/gerilim (G-V) ve seri direnç/gerilim (Rs-V) karakteristikleri 10 KHz-1 MHz frekans aralığında incelendi. Ayrıca heteroeklem yapıların ters beslem (C^{-2} -V) karakteristiği 1 MHz'deki grafikleri yardımı ile 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) parametreleri hesaplandı.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Rüzgar ve ark. (2020), CuO ince filmler n-Si alttaşlar üzerinde La katkılanması yapılarak ince film üretmişlerdir. Daha sonra, üretilen ince filmler heteroeklem yapılarına dönüştürülerek, bu yapıların elektriksel özellikleri karanlık ve aydınlık koşullar altında ölçülerek, analiz edilmiştir. Üretilen heteroeklem yapıları diyotların ışığa karşı tepki ve duyarlılık gösterdikleri rapor edilmiştir. Diyotların temel parametreleri arasında yer alan seri direnç ve idealite faktörü gibi değerlerin, La içeriği ile geliştirildiği rapor edilmiştir. Detaylı inceleme sonucunda fotodetektörlerin fotoelektrik özelliklerinin La katkısı ile iyileştirildiği görülmüştür. Sonuçlar tüm yapısal ve elektriksel parametrelerin lantan konsantrasyonuna güçlü bir şekilde bağlı olduğunu göstermiştir.

Bhuvaneshwari ve ark. (2016), bakır oksit (CuO) ince filmlerini hidrotermal metodu kullanarak katkısız, %2 ve %6 Cr katkılı olmak üzere 3 farklı film üretmişlerdir. Cr katkısına bağlı olarak NH₃ algılama oranının 100-600 ppm aralığında arttığını hesapladılar. %6 Cr katkılı CuO yapısının 75 °C sıcaklıkta 600 ppm NH₃ konsantrasyonunda %180'lik bir algılama ortaya koyduğunu rapor ettiler.

Aydın (2016), sol jel yöntemi ile Zn ve Li katkılı CuO ince filmler üretti. Bu filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini inceledi. Yaptığı çalışmada; katkısız CuO ile farklı oranda katkılı Li filmlerin başarılı bir şekilde üretildiğini rapor etti.

Aydın ve ark. (2012), yaptıkları çalışmada bir bakır(II) organik kompleksinin diyotun elektriksel parametrelerini kontrol edebileceğini rapor etmişlerdir. Bu çalışmada Cu(II) kompleks/n-Si diyotun fotovoltajik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Diyotun idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnci sırasıyla 2,22, 0,736 eV ve 6,7 k Ω olarak hesaplamışlardır. İdealite faktörünün yüksek çıkmasının nedeni de seri direncin etkisine ve bir ara yüzey tabakasının varlığına atfetmişlerdir.

Sönmezoğlu (2012), yaptığı çalışmada nanoteknoloji ile üretilen ince filmlerin performansının önemli olduğunu ve bu performansın ince filmin üretim yöntemden etkilendiğini belirtmiştir. Bu yöntemin farklılık göstermesi, ince film üretimine üstün özellikler kazandırdığını ve yeni çalışmaların önünü açtığını rapor etmişlerdir.

Gao (2011), bakır oksitler ile üretilen ince filmler genellikle p-tipi yarıiletken özeliğine sahiptir. Bakır oksitin iki ana fazı (CuO ve Cu₂O) ve birde ara fazı (Cu₄O₃) bulunmaktadır. CuO'nun bant aralığı 1,2 eV ile 1,9 eV arasında iken Cu₂O'nun bant aralığı 1,8 eV ile 2,5 eV arasındadır.

Mutlu (2010), yarıiletken malzemeler, küçük boyutlu olması, kolay üretilmesi ve cihaz uygulamalarındaki verimlerinin yüksek olmasından dolayı çokça tercih edilmektedirler. Farklı yapıda iki yarıiletken (p-tipi ve n-tipi) birbirine eklenerek fotovoltaiik piller, transistörler, diyotlar ve detektörler üretilmektedir. Bu eklemler yarıiletken-yarıiletken, metal-yarıiletken ya da metal-metal ile oluşturularak elektronik cihaz uygulamalarında kullanılmaktadır.

Gürmen (2006), teknolojinin gelişmesiyle elektronik cihazların boyutunun küçülmesi, nanoteknolojinin gelişmesini ve devre elemanlarının nano boyutunda imal edilmesini sağlamaktadır. Ölçüm sistemlerinde nano milyarda biri ifade eder. Elektronik devre elemanlarının temelini oluşturan nanoteknoloji ile üretilen ince filmler günümüzde yapılan çalışmalarda çokça kullanılmaktadır. Buda nano ölçekli yapıların kimyasal ve fiziksel olarak analizini yapmayı, daha üstün ürünleri üretmeyi ve daha önce üretilmiş ürünleri geliştirmeyi önemli kılmıştır. Nanoteknoloji kullanarak üretilen yarıiletken ince film devre elemanları daha dayanıklı ve hafif ürünler üretilerek enerji tasarrufu sağlanmaktadır.

Hasançebi (2006), sol-jel yöntemi kullanılarak CuO ince filmler üretilip bu filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özelliklerini inceledi. İnce filmlerin sıcaklık, katkılandırma ve kalınlık parametrelerinden etkilendiğini gördü. Aktivasyon enerjilerinin artmasıyla elektriksel özelliklerin değiştiği, bu değişimin sebebinin kalınlığın artmasından kaynaklandığı tespit etti. Optik özellikleri incelendiğinde ise enerji bant aralığının ön ısıtma sıcaklığı arttıkça azaldığı ve kalınlığın arttıkça da enerji bant aralığının arttığını rapor etti.

Sze (2002), yarıiletkenlerde elektrik iletimi; sıcaklığa, ışığa, safsızlığa ve manyetik alana bağlıdır. Yarıiletkenlerin bu etkenlerden etkilenmesi, onları elektronik uygulamalarda önemli kılar.

Balamurugan (2001), bakır oksit yarıiletkeni ince film üretiminde çokça kullanılmaktadır. Ham maddesinin yaygın olması, üretiminin kolay olması, maliyetinin düşük olması, toksik olmaması ve bant aralığının ideal aralıkta olması, p-tipi ve n-tipi yarıiletken özellik göstermesinden dolayı çokça tercih edilmesini sağlamaktadır.

Kittel (1996), geçmişten günümüze CuO birçok alanda kullanılmıştır. CuO ince filmleri, seramiklerde renklendirmeler için, hayvanlarda bakır eksikliğinde, optik aletlerinin parlatılmasında, güneş pillerinde, elektronik araçlarda ve sensör uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. İnce film teknolojisi kullanılarak yapılan yarıiletkenlerin üretiminde CuO kullanımı oldukça yaygındır.

3. MATERYAL VE TÖNTEM

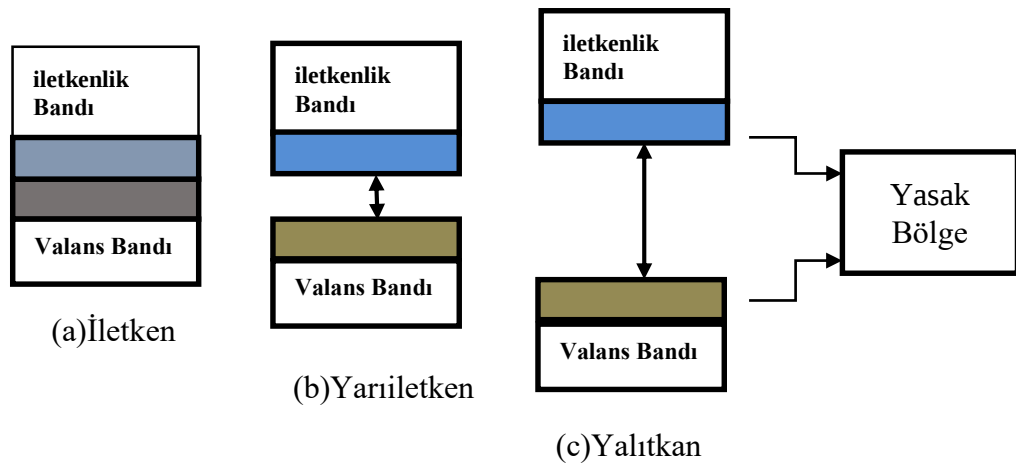
3.1. Yarıiletkenler

Yarı iletken malzemeler; iletken ve yalıtkan malzeme arasında oldukları için elektrik akımını iyi iletmezler. İletkenliği ayarlanabilen yarıiletken malzemeler elektronik devre elemanlarının yapımında kullanılır.

Yarıiletkenlere katkılandırma yaparak n-tipi ve p-tipi yarıiletkenler elde edilebilir (Simon, 1981).

Yarıiletken maddeler yasak enerji aralığına sahip olup iki temel banda sahiptirler. Bu bantlar, iletkenlik ve valans bandıdır. Yörüngelerdeki elektronlar belirli bir enerjiye sahiptir. Valans bandındaki elektronlara belli bir enerji uygulanırsa elektron valans yörüngesinden ayrılarak atomu terk eder. Böylece valans elektronun serbest hale geçmesi maddeyi iletken hale getirir.

Yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri bant yapısı ile ilgilidir. Yarıiletkenler, iletkenlik özelliği kazanabilmeleri için valans bandından iletkenlik bandına elektron geçişinin gerçekleşmesi gerekir. Elektron geçişi için gereken enerjiye yasak band aralığındaki enerjiye (E_g) eşittir. Bu yasak bölge enerjisi, iletken için $E_g < 0,05$ eV, yarıiletken için $0,7 \text{ eV} < E_g < 1,4 \text{ eV}$ ve yalıtkan enerji bandı için $E_g > 8 \text{ eV}$ değerlerinde olmalıdır (Aydın, 2019). Şekil 3.1 (a)'da görüldüğü gibi iletkenlerde yasak enerji aralığı yoktur. Ancak yarıiletken maddelerde yasak enerji aralığı değeri 0.7 eV ile 1.4 eV arasındadır. Işık, ısı gibi etkilerle yarıiletkenlerdeki elektronlar enerji kazanarak valans bandından iletkenlik bandına geçebilirler.

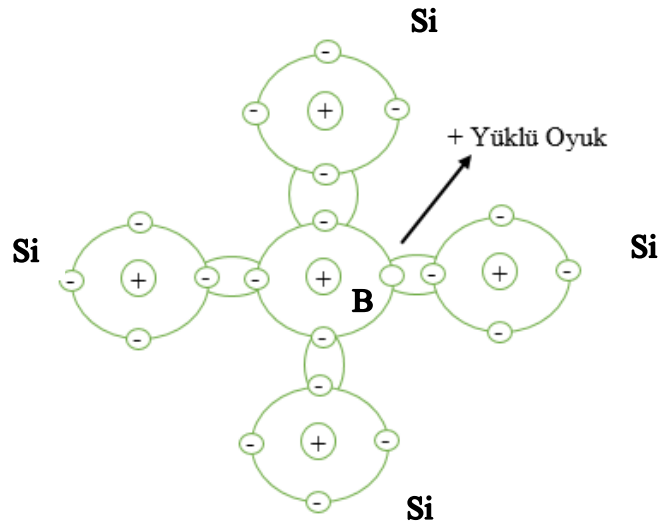


Şekil 3.1. (a) İletken madde, (b) Yarıiletken madde ve (c) Yalıtkan maddelerin band diyagramları

Yarıiletkenler doğal veya dışardan etkiler ile p veya n tipi özellik gösterebilirler. Bu özellikleri sayesinde teknolojide ihtiyaç duyulan p-n yapıların üretimi de mümkün olabilmektedir.

3.1.1. p-tipi yarıiletkenler

Şekil 3.2’de görüldüğü gibi silisyum elementi içerisine belli bir oranda bor elementi eklenirse; bor atomunun üç valans elektronu, silisyumun atomunun üç valans elektronu ile bağ oluşturur. Fakat silisyum atomunun bir valans elektronu bağ oluşturmayıp boşta kalır ve bir elektron eksikliği oluşur. Buna boşluk (hol) denir. Elde edilen malzemeye de p-tipi malzeme denir. p-tipi malzemedeki çoğunluk akım taşıyıcıları boşluklardır. Elektronlarda azınlık akım taşıyıcılarıdır.

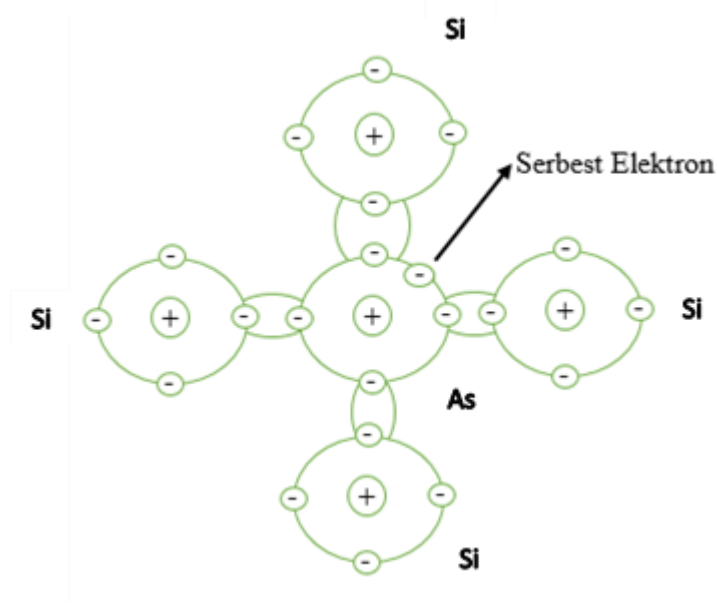


Şekil 3.2. p-tipi yarıiletken

3.1.2. n-tipi yarıiletkenler

Şekil 3.3’te görüldüğü gibi silisyum elementi içerisine belli bir oranda arsenik elementi eklenirse; arsenik elementinin beş valans elektronu, silisyum elementinin dört valans elektronu ile bağ oluşturur. Ama arsenik atomunun bir valans elektronu bağ oluşturmayıp boşta kalır ve bir elektron fazlalığı oluşur. Elde edilen malzemeye de n-tipi

malzeme denir. n-tipi malzemede çoğunluk akım taşıyıcıları elektronlardır. Azınlık akım taşıyıcıları ise boşluklardır.

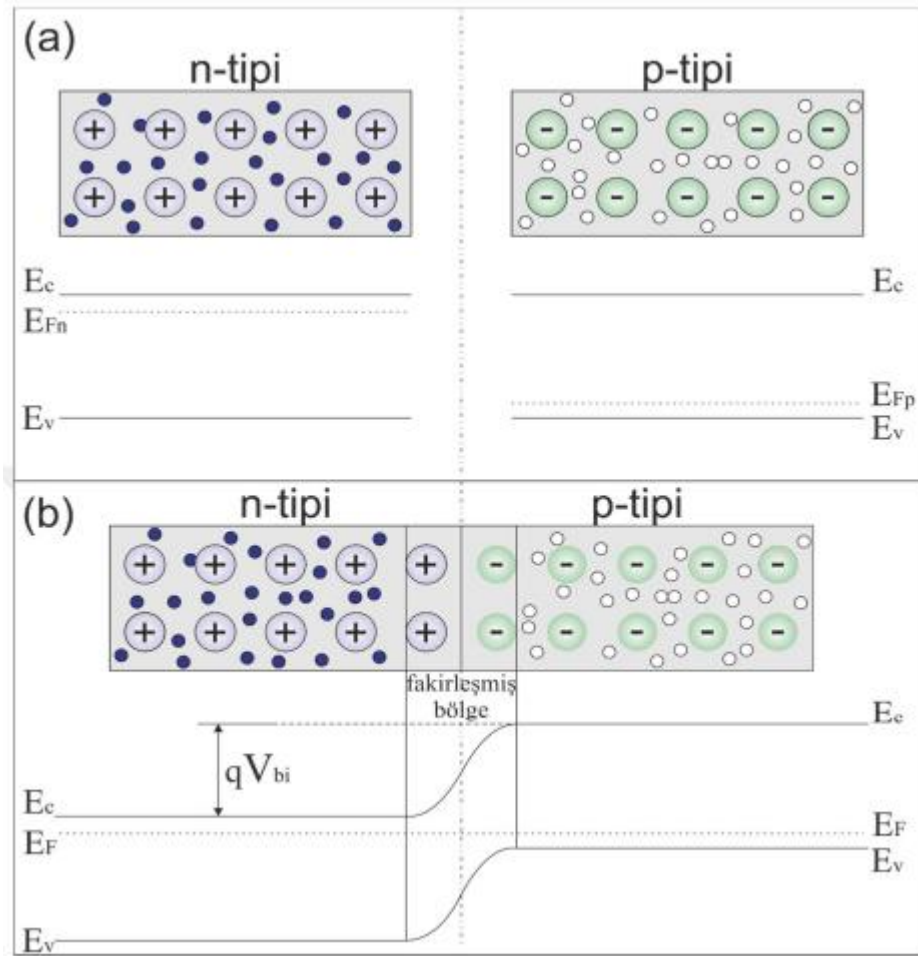


Şekil 3.3. n-tipi yarıiletken

3.2. Enerji Bant Modeli

Yarıiletkenleri tanımlamada ve anlamada en kullanışlı yöntem enerji bantları modelidir. İzole halde bulunan bir atomda elektronlar ayrı enerji seviyelerinde bulunabilir. Birebir özdeş iki atom bir araya getirildiği zaman; bir elektron sisteminde aynı enerji seviyesinde birden fazla elektronun bulunamayacağını söyleyen Pauli dışarlama prensibine göre her bir enerji seviyesi birbirinden biraz farklı iki enerji seviyesine bölünür. Buna göre bir kristal oluşturmak için N tane atom bir araya getirildiği zaman farklı atomların dış yörüngelerindeki elektronlar üst üste biner, aynı iki özdeş atomun bir araya getirildiği zaman olduğu gibi bu kez N tane ayrı ancak birbirine çok yakın enerji seviyeleri oluşur. Bu N sayısı çok büyük ise ayrı enerji seviyeleri sürekli bir enerji bandı halini alır. N tane seviyeden oluşan bu bant kristaldeki atomlar arası mesafeye bağlı olarak birkaç eV'e kadar genişleyebilir (Sze, 2002).

Yarıiletken eklemler, n-tipi ve p-tipi yarıiletken maddeler Şekil 3.4'teki gibi birleştirilerek yapılmaktadır.



Şekil 3.4. a) Birleşme olmadan önce p tipi ve n tipi maddelerin enerji bant yapısı, b) Birleşme olduktan sonra p tipi ve n tipi maddelerin enerji bant yapısı (Kaan, 2017)

3.3. Yarıiletkenlerde Eklem Türleri

3.3.1. Homoeklemler

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 Homoeklemlerde 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 madde tarafına geçerek buradaki boşluklarla birleşir. Oluşan n-p homoelektron yapıda elektronlar boşluklarla birleşerek pozitif ve negatif hareketsiz iyonlar meydana getirir. Böylece tükenim bölgesinde hareketli yükler kalmayacağı için denge durumu oluşur (Brennan, 2005).

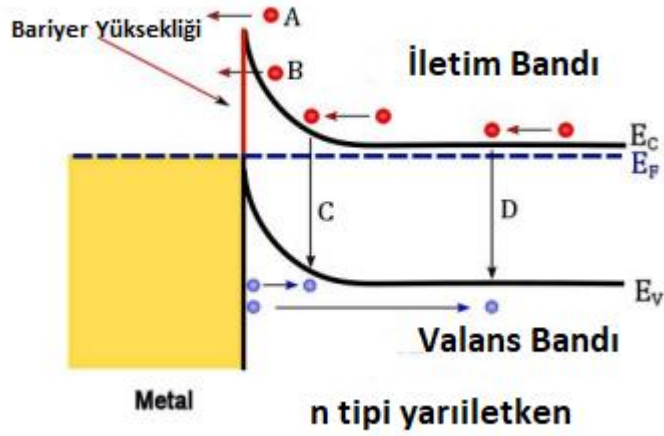
3.3.2. Heteroelektronlar

Farklı yarıiletken maddelerden oluşturulan n-tipi ve p-tipi yarıiletken maddelerle oluşturulan eklemlere heteroelektron denir. Heteroelektronlar, farklı bant aralıklarına sahip p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddelerin birleşmesiyle oluşur. Bir p-n bağlantısı, akımı doğrultma özelliğine sahiptir. Bu yapılar doğrultucu olarak adlandırılırlar. p-n eklemi güneş pili, ışık yayan diyot ve diyot lazerin temel yapısı olup günlük hayatta kullanılan teknolojik aygıtların üretimini mümkün kılmaktadır.

3.4. Heteroelektron Yapıların Akım-Gerilim (I-V) Hesaplamaları

3.4.1. Kontaklardaki akım mekanizmaları

Bir diyot bariyeri boyunca akım akışı, yarıiletkenenden metale doğru hareket eden taşıyıcılardan kaynaklanır. İleri beslemde akım akışı Şekil 3.5'te gösterilen dört temel mekanizmada gerçekleşebilir: (A) bariyer üzerinden elektronların termiyonik emisyonu (B) bariyerden kuantum-mekanik tünelleme; (C) tükenme bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu; ve (D) yarı iletkenin nör tür kısmında taşıyıcı rekombinasyonu. İdeal bir diyotun durumu tamamen termiyonik emisyon akımına bağlıdır. Diğer mekanizmaların katkısı ideal davranıştan uzaklaşmaya yol açar (Rhoderick, 1988).



Şekil 3.5. İleri sapmada diyotlar arasında akım taşıma mekanizmaları; (A)Termiyonik emisyon, (B) tünelleme, (C)Tükenme bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu, (D)Metalden delik enjeksiyonu (Alshaeer, 2018)

Katkılı yarıiletkenler için termiyonik emisyon oda sıcaklığında baskın akım mekanizması iken, kuantum mekanik tünelleme düşük sıcaklıklarda ve ayrıca yoğun katkılı yarıiletkenlerde baskındır. Belirli bir eklemden, dört mekanizmanın hepsinin bir kombinasyonu mevcut olabilir, ancak tipik olarak yalnızca bir akım mekanizması baskındır.

3.4.2. Termiyonik emisyon mekanizması

Katkılı yarı iletkenler için termiyonik emisyon, diyot kontakları boyunca baskın akım akış mekanizması olduğu varsayılır. Termiyonik emisyon teorisine göre, yalnızca potansiyel bariyerden daha yüksek enerjiye sahip yük taşıyıcıları bariyeri aşabilir ve diyot akımını üretebilir. Bir diyotunun ideal I-V özellikleri denklem (3.1) ile tanımlanabilir (Rhoderick, 1988).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de; I_0 :doyma akımıdır.

$$I_0 = AA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-\phi_B}{kT}\right) \quad (3.2)$$

Denklem (3.2)'de A^{**} : Richardson sabiti olarak adlandırılır.

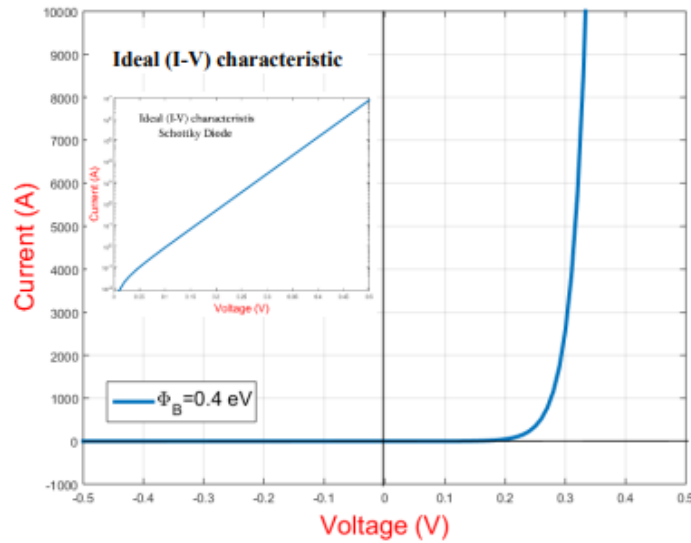
$$A^{**} = \frac{4\pi q k^2}{h^3} \frac{m_n^*}{m_0} \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)'te her bir sabitin değerini değiştirilerek

$$A^{**} = 120m^* \frac{A}{cm^2 k^2} \quad (3.4)$$

denklem (3.4) elde edilir.

Richardson sabiti, elektron etkin kütlelerinin (m_n^*) vakumdaki gerçek durgun elektron kütlelerine (m_0) oranına bağlı olan yarı iletken malzemenin bir fonksiyonudur. Termiyonik emisyon modeline göre ideal akım gerilim eğrisi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. İleri beslemede diyot akımının üstel olarak arttığı, geri beslemede ise akımın termal enerjiden (V_R) yaklaşık dört kat daha büyük olduğu, $V > 4q/kT$ olduğu zaman doygun olduğu açıktır. İdeal bir diyot için, akım-voltaj grafiği içindeki çizimde gösterildiği gibi, birlik eğimli düz bir çizgi ile sonuçlanmalıdır.



Şekil 3.6. Termiyonik emisyon modeline dayalı olarak oluşturulmuş ideal bir akım-voltaj karakteristiği (Alshaeer, 2018)

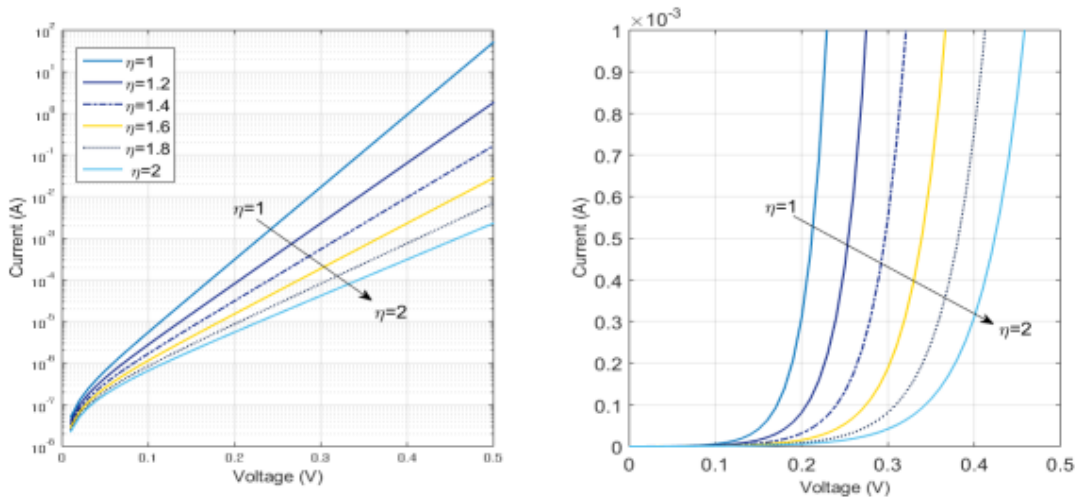
3.4.3. Diyotlarının ideal olmayan özellikleri

Heteroeklem yapıların I-V özellikleri, hem ileri hem de ters beslem koşullarında termiyonik emisyon modeline göre ideal durumundan sapmalar yapar. Termiyonik I-V modeli, deneysel verilere uyacak şekilde değiştirilmelidir. İdeal diyot denkleminin üstel terimine 'idealite faktörü' olarak bilinen bir faktör (η) eklenmiştir (Rhoderick,1988).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{\eta kT}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

Saf bir termiyonik akımı varsayan ideal bir MS kontağı için, idealite faktörü bir değeri alır ($\eta = 1$). Birçok faktör, idealite faktörünü artırabilir. Bu faktörlerin bazıları, tünelleme ve üretim rekombinasyonu gibi diğer akım mekanizmalarının diyot toplam akımına katkısından kaynaklanmaktadır. Diğer faktörler, bariyer yüksekliğinin ön beslem gerilimine bağımlılığına ve imaj-kuvvet etkisine atfedilir (Rhoderick,1988).

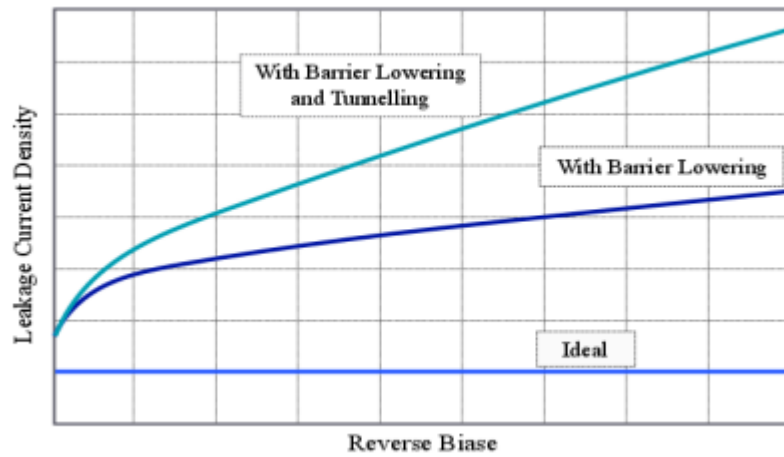
Homojen olmayan bariyer teorisine göre, yüksek η değerini, uzaysal olarak homojen olmayan bir MS arayüzünde oluşan düşük bariyer yüksekliği bölgelerini varlığına atfetmiştir (Tung,1991). İleri beslemde artan idealite faktörü ile I-V özelliklerinin değişimi Şekil 3.7'de gösterilmektedir. İdealite faktörü arttıkça akım yoğunluğunun azaldığı görülmektedir.



Şekil 3.7. (a) Yarı-log ölçeğinde ve (b) Normal ölçekte idealite faktörünün farklı değerlerinde ileri beslemde simüle edilmiş I-V özellikleri. ($\Phi B = 0,3 \text{ eV}$ ve $A^{**} = 1,68 \text{ A cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$) (Alshaeer, 2018)

Başka bir ideal olmayan durum ise ters beslemdeki akımın artmaya devam ettiği ve I_0 'da doyuma ulaşmaması olabilir. Ters beslemde doymamış akım genellikle iki ana

etkiyle açıklanır. Birinci etki, ister görüntü kuvveti etkisinden, isterse metal ve yarı iletken arasında ince bir ara yüzey tabakasının varlığından kaynaklansın, bariyerin yüksekliğinin azalmasından kaynaklanır. İkinci etki ise, uygulanan voltaj ile kaçak akımın aşırı artmasına atfedilir. Ters beslemede, potansiyel bariyer yeterince ince hale gelir, böylece elektronlar bariyerin tepesine ulaşmadan önce yarı iletken tarafına tünellenir. Bariyer düşüşü ve tünelleme akımının ters besleme akımına katkısı, Şekil 3.8'de gösterildiği gibi bazı yarı iletkenlerde son derece yüksek olabilir.



Şekil 3.8. Diyotun ters I-V karakteristikleri üzerindeki bariyer indirme ve kuantum mekanik tünellemenin etkileri (Alshaeer, 2018)

3.4.4. İdealite faktörü

İdealite faktörü, diyotun istenen özelliklerden sapmasını gösteren birimsiz bir parametredir. Termiyonik emisyon modeli kullanılarak grafiklerden elde edilen doğrunun eğiminden idealite faktörü elde edilir.

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{eV}{\eta kT} \right) - 1 \right) \quad (3.6)$$

Denklem (3.6)'da eşitliğin iki tarafının $\ln$ 'i alındıktan sonra V 'ye göre diferansiyeli alınıp düzenlenirse; denklem (3.7)'de idealite faktörü formülü bulunur (Şahin, 2014).

$$\eta = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.7)$$

İdeal bir diyot için idealite faktörü 1'e eşit olmalıdır. İdealite faktörünün bire yakın olması diyotun kalitesini belirler. Fakat uygulamada böyle çıkmamaktadır. Çünkü arayüzey tabakasının kalınlığı, tüketim bölgesi kalınlığı, arayüzey durumları, arayüzeydeki engel dengesizliği, katkılama oranı ve arayüzey kusurlarından dolayı idealite faktörü 1'den büyük çıkmaktadır (Azizian-Kalandaragh, 2020).

3.4.5. Bariyer yüksekliği

Heteroeklemlerin arayüzeyinde bir potansiyel engel oluşur. Buna bariyer yüksekliği denir. Bariyer yüksekliği, arayüzeyde elektron geçişini kontrol eder. Arayüzey tabakası; idealite faktörüne, engel yüksekliğine, akım-gerilim parametrelerine etki eder (Özerden, 2014).

Denklem (3.6)'dan I_0 'ı çekersek;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_B}{kT}\right) \quad (3.7)$$

denklem (3.7) elde edilir. Bu ifadeden eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak Φ_B çekilirse; denklem (3.8) diyot bariyer yüksekliği ifadesine ulaşılır.

$$\Phi_B = \frac{kT}{e} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (3.8)$$

Denklem (3.8)'de A:Diodyot alanı, A*:Richardson sabiti, T:Sıcaklık, k:Boltzmann sabiti, e:Elektronun yükü olarak tanımlanmıştır (Yakuphanoglu, 2010).

3.4.6. Seri direnç

İdeal diyot, üstel bir I-V karakteristiğine sahiptir. Ancak gerçek diodyotlarda akıma karşı bir miktar direnç gösterilir. Bu dirence seri direnç (R_s) denir. Seri direncin oluşma nedeni, kontaklardan, kirliliklerden, arayüzey durumlarından, diodyotun uçlarından veya yarıiletkenin kendi direncinden kaynaklanabilir. Yüksek gerilim değerlerinde seri direnç etkisi daha fazla görülür. Bu nedenle heteroeklem yapıda diodyot akımı azalır ve yüksek gerilim değerlerinde I-V grafiklerinde düşüşlere sebep olmaktadır. Seri direnç nedeniyle

I-V grafiği lineerlikten sapma gösterir (Sze, 1981). Heteroeklem yapılarında seri direnci etkisi, düzgün I-V ölçümleri almamızı zorlaştırmaktadır. Seri direncin yüksek olması güvenilir değerler vermeyecektir. Seri direncin oluşturduğu bu durum için denklem (3.6);

$$I = I_0 \exp \left(\left(\frac{e(V - IR_s)}{\eta kT} \right) - 1 \right) \quad (3.9)$$

şeklinde yazılabilir. Diyotlarda meydana gelen seri direnci hesaplamak için farklı metotlar öne sürölmüştür. Metotlardan biri de Norde yöntemi.

3.4.7. Norde yöntemi

Bariyer yüksekliği ve seri direnç değerlerinin hesaplanması için kullanılacak formöller Norde tarafından geliştirilmiştir. Norde fonksiyonu $F(V)$ (Norde, 1979);

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{A A^* T^2} \right) \quad (3.10)$$

şeklinde yazılır. Denklem (3.9)'dan $V_d > kT/e$ kabul edilirse formöl;

$$F(V) = \Phi_B + IR_s - \frac{1}{2} V \dots \quad (3.11)$$

halini alır. İdeal heteroeklem yapılarında $R_s=0$ olması istenir. Böylece Norde fonksiyonu;

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R A A^* T^2} \right) \quad (3.12)$$

Denklem (3.12) gibi olur.

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (3.13)$$

Denklem (3.13)'ün diferansiyeli alındığında;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left(1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_d} \right)^{-1} \right) \quad (3.14)$$

denklemini ortaya çıkar. Bu ifadeden;

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} (I_S \exp(\beta V_d)) = \beta I \quad (3.15)$$

denklem (3.15) elde edilir.

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.16)$$

Denklem (3.16)'da $dF/dV=0$ yazıldığında ve I_0 çekilirse,

$$I_0 = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{eR} \quad (3.17)$$

denklemini elde edilir. Denklem (3.17) ifadesi kullanılarak;

$$V_0 = I_0 R_S + V_d(I_0) = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_0}{A A^* T^2}\right) \quad (3.18)$$

eşitliği ortaya çıkar. $F(V)$ fonksiyonunun en küçük değeri olan,

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_0}{A A^* T^2} \right) \quad (3.19)$$

I_0 , V_0 ve $F(V_0)$ değerleri yerine yazılarak seri direnç değeri;

$$R_S = \frac{kT}{e I_0} \quad (3.20)$$

denklemini ortaya çıkar. Bariyer yüksekliğide denklem (3.21) şeklinde olur (Norde, 1979).

$$\Phi_B = F(V_d) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{e} \quad (3.21)$$

3.4.8. Fotoiletkenlik

Bir yarıiletken malzemedeki fotoiletkenlik olgusu, üç temel nicelik ile karakterize edilebilir; ışığa karşı duyarlılık, spektral tepki ve tepki hızıdır (Bube, 1992). Bir malzemenin ışığa karşı duyarlılığı, fotoakımın miktarı veya fotoakımın karanlık akıma oranı ile tanımlanır. Öte yandan tepki hızı, bir malzemenin kararlı durumu karanlık ve fotoakım arasında ne kadar hızlı geçiş yaptığıdır. Geçiş sürecinin gözlemlenmesi, tuzak yoğunluğunu incelemek için önemli bir veri sağlar. Fotoiletkenliğin uyarma dalga boyuna bağımlılığına spektral tepki denir (Huş, 2006).

Fotoiletkenlik, foton absorpsiyonunun bir sonucu olarak meydana geldiğinden, optik absorpsiyon spektrumu $\alpha - h\nu$ ve fotoiletkenlik spektrumu $\Delta\sigma - h\nu$ arasında yakın bir korelasyon beklenir. Fotoiletkenlik, yüksek absorpsiyon bölgesinde yüzey ömrü ile kontrol edilirken, fotonların malzemeye nüfuz edebildiği düşük absorpsiyon bölgesinde yığın ömrü baskındır.

Bir yarıiletken malzemenin hem taşıyıcı yoğunluğu hem de taşıyıcı hareketliliği aydınlatma altında değişebilir. Yani bir yarıiletkenin karanlık iletkenliği Denk.3.22 ile verilir.

$$R_H = \frac{I}{nq} = \frac{tV_H}{BI} \quad (3.22)$$

$$\sigma_0 + \Delta\sigma = q(n_0 + \Delta n)(\mu_0 + \Delta\mu) \quad (3.23)$$

Burada basitlik için sadece bir tür taşıyıcı düşünülmüştür.

$$\Delta n = G\tau_n \quad (3.24)$$

Denklem (3.24)'te; G:Fotouyarılma oranı ve τ_n :Serbest elektron ömrüdür.

Birkaç mekanizma taşıyıcı hareketliliğinde değişikliğe yol açabilir. Bu mekanizmalar şunlardır:

-Taşıyıcıların saçıldığı yüklü safsızlıkların yoğunluğu ve kesiti aydınlatma altında değişebilir.

-Foto uyarım polikristal malzemelerde bariyerlerin yüksekliğini ve tükenme bölgelerinin genişliğini azaltabilir.

-Taşıyıcılar, farklı bir hareketliliğe sahip bir grup için uyarılmış olabilir.

Ayrıca, ömrün uyarılma hızının bir fonksiyonu olabileceği gerçeğinden ek bir karmaşıklık ortaya çıkar. τ_n , $G^{-\gamma}$ olarak değişirse, $\Delta\sigma$, $G^{-\gamma}$ olarak değişir. $\gamma > 1$ artan uyarılma oranı ile kullanım ömründe bir artışa karşılık gelir. Bu fenomene süperlineer fotoiletkenlik denir. Aksi takdirde, $\gamma < 1$ ise, buna altlineer fotoiletkenlik denir.

γ değeri, fotoiletkenlik hızının bir fonksiyonu olarak fotoiletkenliğin ölçülmesiyle belirlenebilir ve fotoiletkenlik süreci için uygun modeli belirtmek için kullanılır. Farklı γ değerlerine neden olan üç temel model aşağıda tartışılacaktır (Huş, 2006).

3.4.8.1. Saf fotoeksitasyon

Foto-uyarılma oranı G ve termal uyarım oranı g , karanlıkta yeniden birleşme oranı R ile bant aralığı boyunca yeniden birleşme ile dengelenir.

$$g = n_0 p_0 R = n_0^2 R \quad (3.25)$$

Saf malzeme için $n_0 = p_0$ ve $\Delta n = \Delta p$ olduğundan, aydınlatma altında yukarıdaki denklem şu şekilde yazılabilir:

$$G + g = (n_0 + \Delta n)R(p_0 + \Delta p) = (n_0 + \Delta n)^2 R \quad (3.26)$$

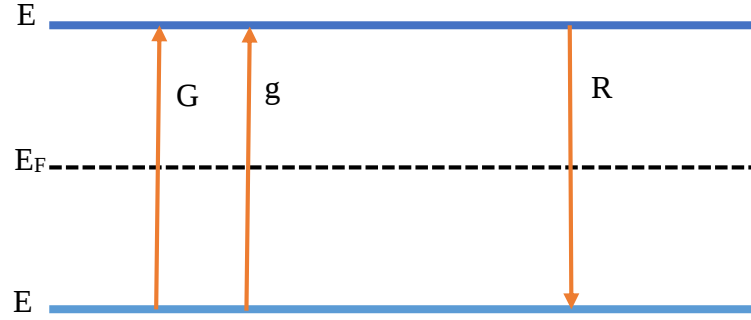
Saf malzeme için, $g \ll G$ ve $n_0 \ll \Delta n$ olduğu genellikle doğrudur. Bu nedenle

$$G \propto (\Delta n)^2 \quad (3.27)$$

elde edilir. $\gamma = 0,5$ olduğundan, bir alt çizgisel fotoiletkenlik durumu gözlenir. Artan foto-uyarılma oranı ile serbest taşıyıcı ömrü azalır (Huş, 2006).

3.4.8.2. Tek merkezli rekombinasyon modeli

Valans ve iletim bantları arasına tek bir tuzak seviyesinin eklenmesi, fotoiletkenlik davranışını kökten değiştirir. Şekil 3.9'da bu durum için enerji bant diyagramını göstermektedir. Bu modelde sadece şekilde verilen geçişler dikkate alınmıştır. Termal uyarı ihmal edilir ve yalnızca N_t yoğunluğuna sahip bir tuzak seviyesi dahil edilir. Daha sonra, dengedeki üretim oranı şu şekilde yazılabilir:



Şekil 3.9. İçsel foto-uyarma için enerji bant diyagramı

$$G = n\beta_n(N_t - n_t) \quad (3.28)$$

$$n\beta_n(N_t - n_t) = n_t p \beta_p \quad (3.29)$$

$$G = n_t p \beta_p \quad (3.30)$$

Burada n_t dolu tuzak seviyelerinin yoğunluğudur. β_n ve β_p sırasıyla elektron ve hol yakalama katsayılarıdır. Bu denklemlerden sadece ikisinin bağımsız olduğu açıktır. Ancak, üretim hızının belirlenmesi için üç denklem gerekir, eksik denklem yük nötrlüğünden gelir,

$$n = p + (N_t - n_t) \quad (3.31)$$

n ve p 'nin G 'ye bağımlılığı denklemlerden belirlenebilir.

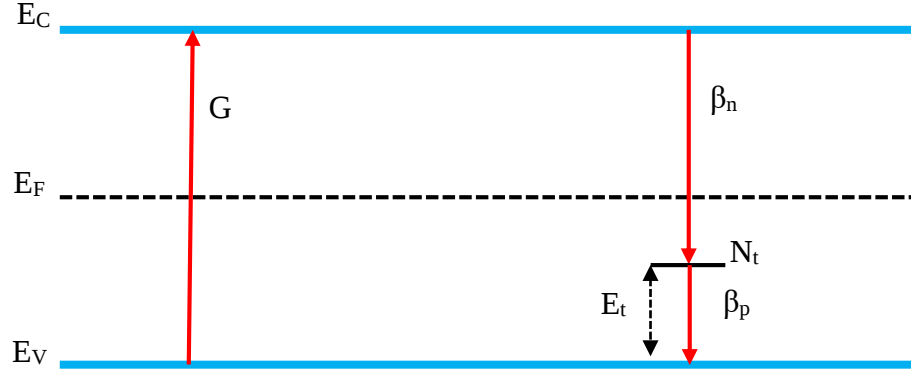
$$G = (N_t - \frac{G}{n\beta_n})(n - \frac{G}{n\beta_n}) \beta_p \quad (3.32)$$

$$G = (N_t - \frac{G}{p\beta_p})(p + N_t - \frac{G}{p\beta_p}) \beta_p \quad (3.33)$$

Küçük n değerleri veya düşük yoğunluklu foto-uyarma için, iletim bandındaki her elektron için rekombinasyon merkezinde bir boşluk vardır ve rekombinasyon merkezlerinin neredeyse tamamı doludur. Böylece,

$$n \approx (N_t - n_t) \approx 0 \quad (3.34)$$

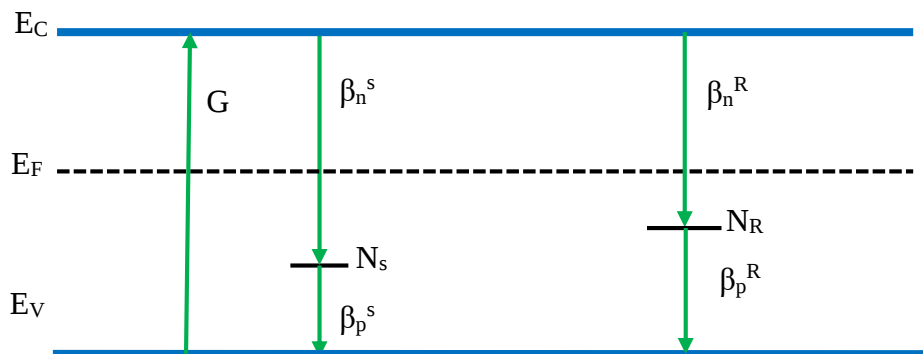
elde edilir. Bu nedenle, $G = n^2 \beta_n$ ve $G = p N_t \beta_p$, diğer sınır durum, büyük n değerleri veya yüksek yoğunluklu foto-uyarımdır. $\beta_p \gg \beta_n$ ise hemen hemen tüm rekombinasyon merkezleri boştur ve $n = p \propto G$ 'dir (Huş, 2006). Şekil 3.10'da Tek merkez rekombinasyon modeli için enerji bandı yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.10. Tek merkez rekombinasyon modeli için enerji bandı yapısı

3.4.8.3. İki merkezli rekombinasyon modeli

Fotoiletkenlik modellerinin tartışılmasındaki bir sonraki adım, iki merkezli rekombinasyon modelidir. İki tuzak seviyeli n tipi bir malzeme için tipik enerji bant diyagramı Şekil 3.11'de verilmiştir. Şekildeki tuzak seviyelerinden biri, R ile çift negatif alıcı olan hassaslaştırıcı bir merkezdir $\beta_p^S \approx \beta_p^R$ ve $\beta_p^S \ll \beta_p^R$. S ve R endekslerinin sırasıyla hassaslaştırıcı merkezleri ve rekombinasyon merkezlerini temsil ettiği yerlerdir.



Şekil 3.11. İki merkezli bir rekombinasyon modeli için enerji bant diyagramı

Yukarıda ilk rekombinasyon merkezinin eklenmesi gibi, yeni rekombinasyon merkezlerinin yapıda meydana gelmesi farklı fiziksel sonuçlara yol açar. Bunlardan bazıları; kusur duyarlılığı, süperlineer fotoiletkenlik, fotoiletkenliğin termal olarak

söndürülmesi, fotoiletkenliğin optik olarak söndürülmesi, negatif fotoiletkenlik, fotoiletkenlik doygunluğudur.

Numunenin sıcaklığı kritik bir değerin üzerine çıkarıldığında, fotoakımda ani bir düşüş gözlemlenir. Artan foto-uyarılma yoğunluğu ile kritik sıcaklığın değeri artar. Buna termal söndürme denir ve yukarıda açıklanan süperlineer fotoiletkenlik fenomenine bakmanın başka bir yoludur (Bube, 1992). $\Delta\sigma$ - G'yi sabit sıcaklıkta çizersek, doğrusal üstü fotoiletkenliği görürüz, $\Delta\sigma$ - T'yi sabit foto-uyarılma yoğunluğunda çizersek, termal söndürmeyi görürüz (Huş, 2006).

3.5. Heteroeklem Yapıların Kapasite Gerilim (C-V) Hesaplamaları

Heteroeklem yapıların deplasyon bölgesi negatif ve pozitif olarak kutuplanır. Gerilim değeri arttıkça deplasyon bölgesi daha da büyüyecektir. Bu yüzden deplasyon bölgesinin kapasitesi de artacaktır. Deplasyon bölgesinin kapasitesini hesaplamak için, heteroeklem yapının deplasyon bölgesindeki gerilimi ifade eden aşağıdaki Poission eşitliği; (Ziel, 1968) tarafından denklem (3.35)'te verilmiştir.

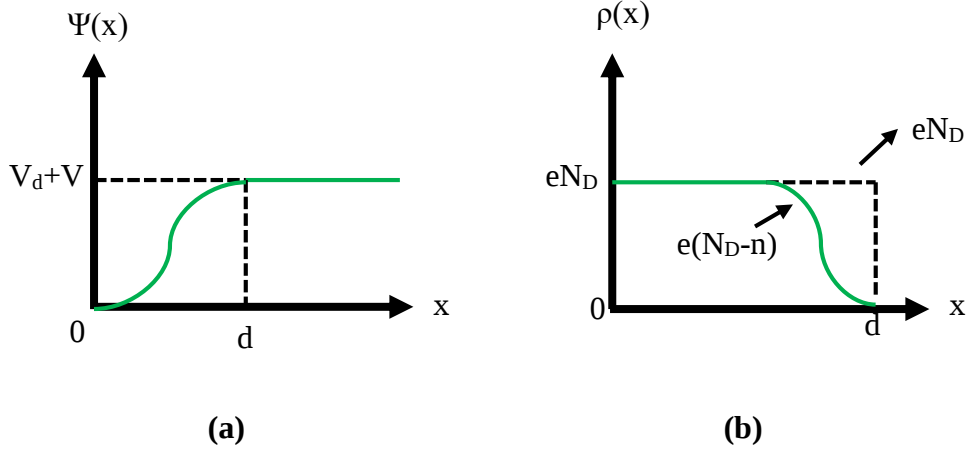
$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi(x)}{dx^2} = - \frac{\rho x}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.35)$$

Denklem (3.35)'te; ϵ_s :Yarıiletkenin yalıtkanlık katsayısını, ϵ_0 :Referans boş uzay bölgesinin yalıtkanlık katsayısını, $\rho(x)$:Uzay-yük yoğunluğunu gösterirse; Denklem (3.36) ifadesi elde edilir (Rhoderick, 1988).

$$\rho x = e(N_a - N_d) \quad (3.36)$$

Denklem(3.36)'da N_d :Yarıiletken tabakanın iyonize durumdaki verici yoğunluğu, N_a :Yarıiletken tabakanın iyonize durumdaki alıcı yoğunluğunu anlamındadır.

Şekil 3.12'de mesafeye bağlı olarak potansiyel fonksiyonu ($\Psi(x)$) ve mesafeye bağlı olarak yük dağılımı ($\rho(x)$) grafiği görülmektedir.



Şekil 3.12. Heteroeklem yapılarında mesafeye bağlı; a) Potansiyel dağılım grafiği, b) Yük dağılım grafiği

$$-\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{dE}{dx} = \frac{\rho_s}{\epsilon_s} \quad (3.37)$$

Denklem (3.37)'de E:Elektriksel alan, V: X konumundaki elektrostatik gerilimi, ϵ_s : Yarıiletkenin geçirgenliği, N_d :Arınma bölgesinde donör konsantrasyonu, d:Deplasyon bölgesi kalınlığı, dE:Elektron yükü ile gösterilir. Deplasyon bölgesindeki elektrik alanı;

$$E = eN_d d \quad (3.38)$$

ifadesi ile gösterilir. Denklem (3.39)'da; V:Uygulanan gerilim, V_F :Built-in gerilimi olmak üzere arınma bölgesinin genişliği;

$$d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{eN_d} (V_F - V)} \quad (3.39)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Deplasyon bölgesinde dQ:Birim alana düşen yük miktarı olmak üzere heteroeklem yapının kapasitesi;

$$C = \frac{dQ}{dV} \left[\frac{e\epsilon_s\epsilon_0 N_d}{2(V_d \pm V)} \right] = \frac{\epsilon_s\epsilon_0}{d} \quad (3.40)$$

şeklinde ifade edilir. Burada; difüzyon konsantrasyonunu (N_d), diffüzyon gerilimi (V_d), bölgenin kalınlığını (d) ile gösterilmektedir.

Denklem (3.40)'a göre, heteroeklem yapıya uygulanan gerilim arttırılarak kapasite azaltılır. Ayrıca deplasyon bölge kalınlığı da artmaktadır. N_d arttıkça kapasite de artar. Denklem (3.40) eşitliğinden;

$$\frac{1}{C^{-2}} = \frac{2(V_d \pm V)}{e\epsilon_s\epsilon_0 N_d A^2} \quad (3.41)$$

ifadesi yazılabilir. Denklem (3.41) ifadesinden C^{-2} - V grafiği doğrusal çıkacaktır. Elde edilen doğrunun eğimi ile;

$$N_d = \frac{2}{A^2 e \epsilon_s \epsilon_0} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.42)$$

denklem (3.42) taşıyıcı konsantrasyonu ifadesi elde edilir. n-tipi heteroeklem yapılar için sıcaklıklığa bağlı kapasite (C);

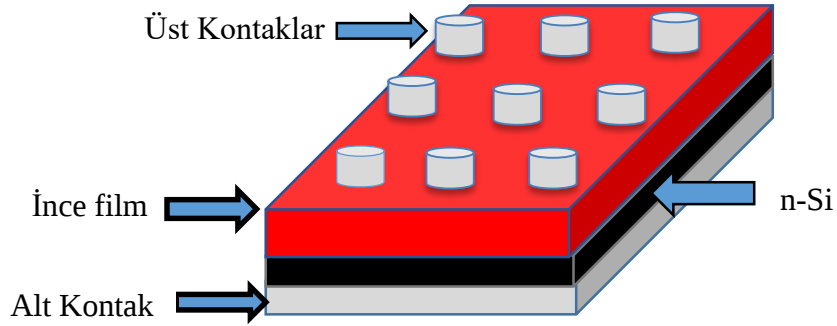
$$C = A \sqrt{\frac{e\epsilon_s\epsilon_0 N_d}{2(V_d \pm V)}} \sqrt{\left(V_d - \frac{kT}{e}\right)} \quad (3.43)$$

şeklinde gösterilir. Denklem (3.43)'te e =Elektron yükünü, ϵ_s =Yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 =Boş uzayın dielektrik sabiti, k =Boltzman sabiti, N_d =Yarıiletkendeki iyonize olmuş donör konsantrasyonunu gösterir. Böylece arayüzey durumlarının kontak yapısında önemi görülmektedir (Wilmsen, 1985).

3.6. İnce Film Teknolojisi

İnce film; kalınlıkları nanometreden birkaç mikrometreye kadar değişen çok ince bir malzeme tabakasıdır. Yani bir alttaş üzerine kaplama yapma işlemidir. Bu kaplamalar, metallerden oksitlere ve bileşiklere kadar birçok farklı malzemeden yapılabilir. Kaplama sayesinde elektriğin iletkenliği arttırılır veya azaltılır. İnce filmler; fiber lazerler, LED ekranlar, optik filtreler, optik cihazlar, optoelektronik, tıbbi cihaz üretimi gibi birçok alanda kullanılır. İnce filmi oluşturmak için çok ince ve düzgün bir malzeme tabakası

gerekir. Kaplamadaki aksaklıklar performans ve kalitede düşüğe neden olacaktır. Şekil 3.13'te ince film ile kaplanmış heteroeklem yapı şematik olarak gösterilmiştir.

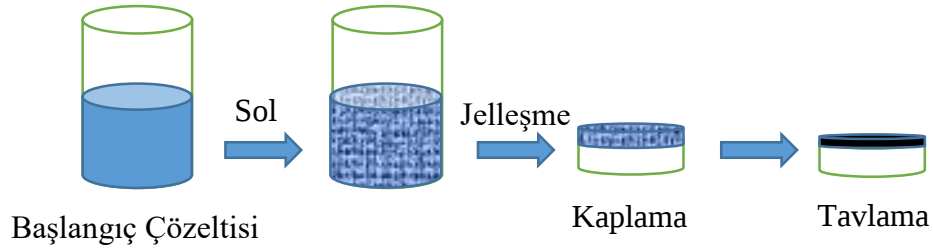


Şekil 3.13. Heteroeklem yapı

Literatürde ince film üretimi için birçok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemlerden bazıları sol-jel, buhar-sıvı-katı (VLS), püskürtme, hidroliz yöntemi ve darbeli lazer biriktirmedir. Farklı biriktirme yöntemleri arasında sol jel, düşük sıcaklıklarda uygulanabilirlik, yüksek saflıkta ürün elde edilmesi, homojenlik, kolay katkılama işlemi ve nihai ürünün yüzey kimyasının kontrolü gibi avantajları nedeniyle tercih edilen bir yöntemdir. En önemli diğer bir avantajı ise atmosfer şartlarında uygulanabildiği için pahalı vakum sistemine ihtiyaç duyulmamasıdır. Alttaş üzerine konulan çözelti fırınlanıp katı hale getirilir.

3.7. Sol Jel

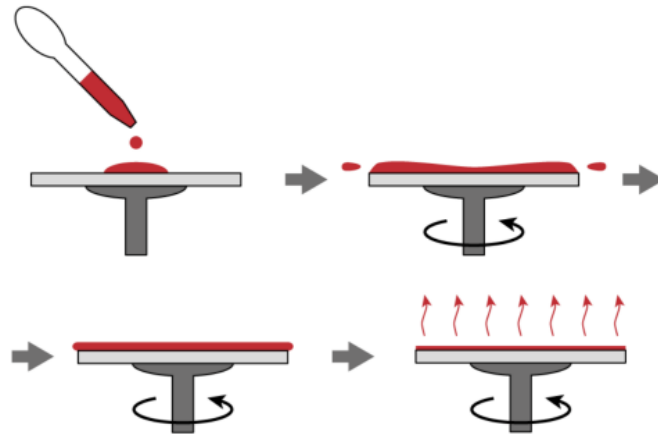
İnce film üretmek için en çok kullanılan yöntemlerden bir tanesi sol jel yöntemidir. Sıvı haldeki çözelti alttaş üzerine; püskürtme (spray), döndürme (spin-coating) ve daldırma (dip-coating) metotları ile kaplanır. Alttaş üzerine kaplanan çözelti sıvı jel halinde olup daha sonra sıcaklık ile katı halini alarak ince film elde edilir (Yıldırım, 2009). Şekil 3.14'te sol-jel kaplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Sol-jel kaplama yöntemi

3.8. Döndürme Kaplama Yöntemi

Bu çalışmamızda ince filmlerimiz sol-jel döndürme kaplama yöntemiyle kaplanacaktır. Bu metot ile çözelti alttaş üzerine damlatılır ve döndürme kaplama cihazı yardımı ile alttaş 3000d/dk ile döndürülür. Döndürme ile fazla çözelti yüzeyden uzaklaştırılır. Yüzeyde kalan çözelti alttaş üzerine homojen bir şekilde yayılır. Sonra da alttaş fırında ısıtılarak çözeltinin buharlaştırması sağlanır. Böylece sol çözelti, jelleştirilerek kaplanmış bir ince film elde edilmiş olur (Karadeniz, 2007). Şekil 3.15'te ince filmin döndürme ile kaplama aşamaları gösterilmiştir.



Şekil 3.15. İnce filmi döndürme ile kaplama (Norrman, 2005)

3.9. Bakır Oksit (CuO)

Son yıllarda modern teknoloji, doğal kaynaklardan enerji üreten, çevre dostu ve düşük maliyetli yenilenebilir enerji kaynakları üzerine yoğunlaştı. Aktif bir güneş enerjisi teknolojisi olan fotovoltaikler (PV), bu talebi karşılayan en umut verici yenilenebilir

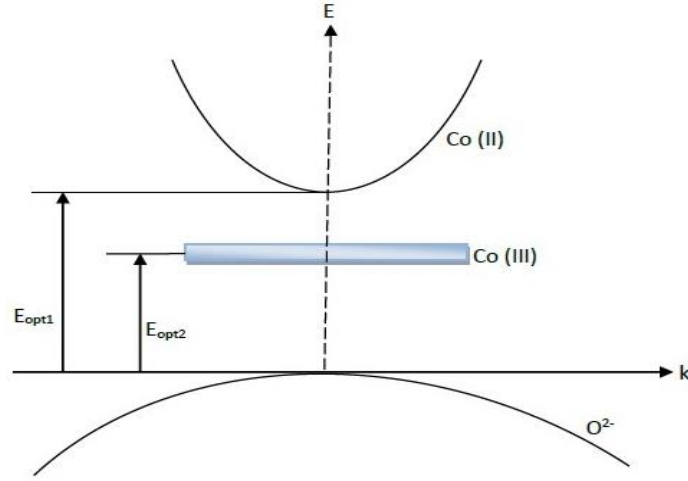
teknolojilerden biridir. Öte yandan, güneş enerjisi veriminde toksik olmayan ve bol bulunan malzemelerin kullanılması, yeşil çevre ve düşük maliyetli PV üretim amacı için giderek daha fazla aranan bir hedef haline geldi (Masudy, 2015). Bu bağlamda, ekonomik PV imalatında veya gelişmiş optoelektronik cihazlarda kullanılmak üzere geçiş metali oksit (TMO) malzemeleri üzerinde yoğun araştırmalar yürütülmektedir. ZnO, TiO₂, ITO gibi optoelektronik cihazlarda kullanılan TMO'ların çoğu n-tipi iletkenliğe sahiptir. Ancak güneş pilleri, tamamlayıcı devreler veya çeşitli bağlantı cihazı uygulamalarını gerçekleştirebilmek için p-tipi yarıiletken aktif malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Neyse ki, bu TMO'lar arasında p-tipi iletkenliğe sahip birkaç metal oksitten biri, bakır oksit yarıiletkenidir (Lee, 2018).

Bakır oksit yarıiletkeninin düşük maliyet, doğal olarak bol bulunması, düşük toksisiteye sahip olması, görünür ışıktaki yüksek verim, çevre dostu ve kolay sentez gibi birçok avantajı vardır. Bakır oksidin bu avantajlarının yanı sıra, iyi elektriksel ve optik özellikleri onu fotovoltajik enerji dönüşümünde, lityum iyon pillerde, gaz sensörlerinde, iletken oksitlerde ve kataliz için nano cihazlarda uygun bir malzeme yapar. Bakır oksitlendiğinde, genellikle en kararlı iki oksit fazı sergiler: CuO ve Cu₂O. Bu kararlı fazların Eg'sinin CuO ve Cu₂O'nun sırasıyla 1,3 – 2,1 eV ve 2,0 eV–2,6 eV arasında değiştiği bildirilmektedir (Polat, 2013).

3.10. KobaltOksit (CoO)

Kobalt oksit; son zamanlarda birçok bildiriye konu olan bir geçiş metal oksittir. Pillerde elektrot, yakıtların hidrokarbon işlemlerinde katalizör olarak kullanılmasının yanında elektronik uygulamalar kullanılan Co₃O₄ filmi teknolojiye önemli katkılar sunmuştur. Şekil 3.16'da Kobalt oksit yarıiletkeninin bant yapısı gösterilmiştir.

Kobalt elementi oda sıcaklığında oksijenle bağ yapabilir. Bu yüzden CoO bileşiğini elde etmek için düşük sıcaklıklara gerek duyulmaktadır (Loeb, 1961).



Şekil 3.16. Kobalt oksit yarıiletkeninin bant yapısı (Barreca, 2001)

Kobalt oksit, elektriksel iletkenlik gösteren bir malzemedir. Normal sıcaklıklarda elektriksel öz direnç değeri 101-105 Ω arasında olmaktadır (Patil, 2001).

3.11. Deneysel İşlemler

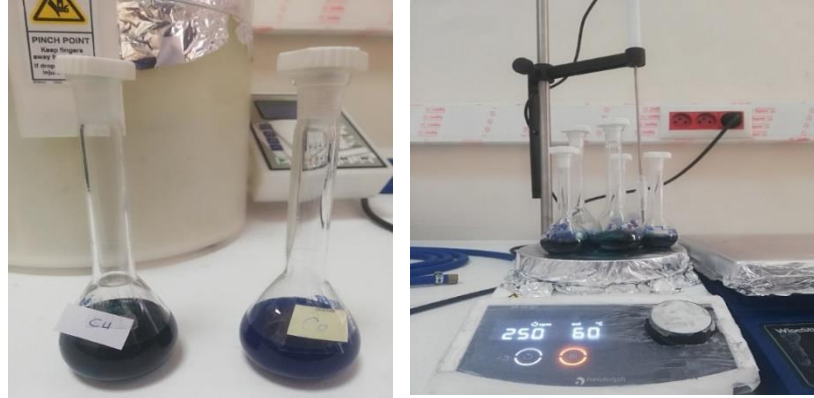
3.11.1. Alt Tabakanın Temizlenmesi

Bu çalışmada alttaş olarak n-Silisyum kullanıldı. İnce filmlerden güvenilir sonuç alabilmek için alttaşın kirlerden temizlenmesi gerekir. Bu nedenle malzemelerin temizliğinde büyük bir titizlik gösterilmelidir. İlk etapta n-Si üzerindeki doğal oksit tabakasının alınması için alttaşlar 5 dakika hidroflorik asit içerisinde tutuldu. Daha sonra kimyasal temizlik için alttaşlar onar dakika süreyle, sırasıyla aseton, etanol ve saf su içinde ultrasonik banyoda temizlendi ve azot gazı ile kurutuldu. Beş adet numune alttaş kaplanmaya hazır hale getirildi.

3.11.2. Çözeltilerin Hazırlanması

Fotodiyotları üretmek için, n-Si alttaşlar üzerinde katkısız CuO ve Co katkılı CuO ince filmlerini büyütmek için çözelti bazlı döndürme kaplama yöntemi uygulandı. Üretim için gerekli malzemeler, Sigma Aldrich firmasından alınmış olup yüksek saflıkta bakır (II) asetat ve kobalt (III) asetat tuzları kullanılmıştır. 0.1M Bakır (II) asetat tuzu 2-metoksietanol içinde 60°C'de çözündürülerek monoetanolamin ile stabilize edildi. Aynı

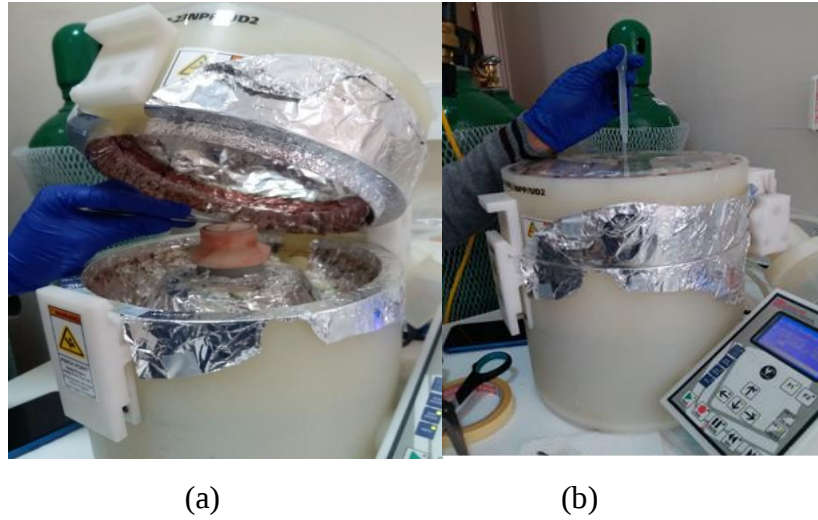
işlemler, kobalt asetat tuzu için tekrar edildi ve iki farklı çözelti hacmi elde edildi. 5 farklı ve eşit çözelti hazırlandı. Her çözelti hacminde de kobalt miktarı, hacmin %0'ı, %25'i, %50'si, %75'i ve %100 olacak şekilde ayarlandı. Hazırlanan solüsyonlar 120 dakika manyetik karıştırıcıda iyice karıştırılmıştır. Şekil 3.17'deki manyetik karıştırıcıda karıştırılan çözeltiler oda sıcaklığında 24 saat dinlendirildi. Daha sonra kaplama aşamasına geçildi.



Şekil 3. 17. Hazırlanan çözeltilerin manyetik karıştırıcıda karıştırılması

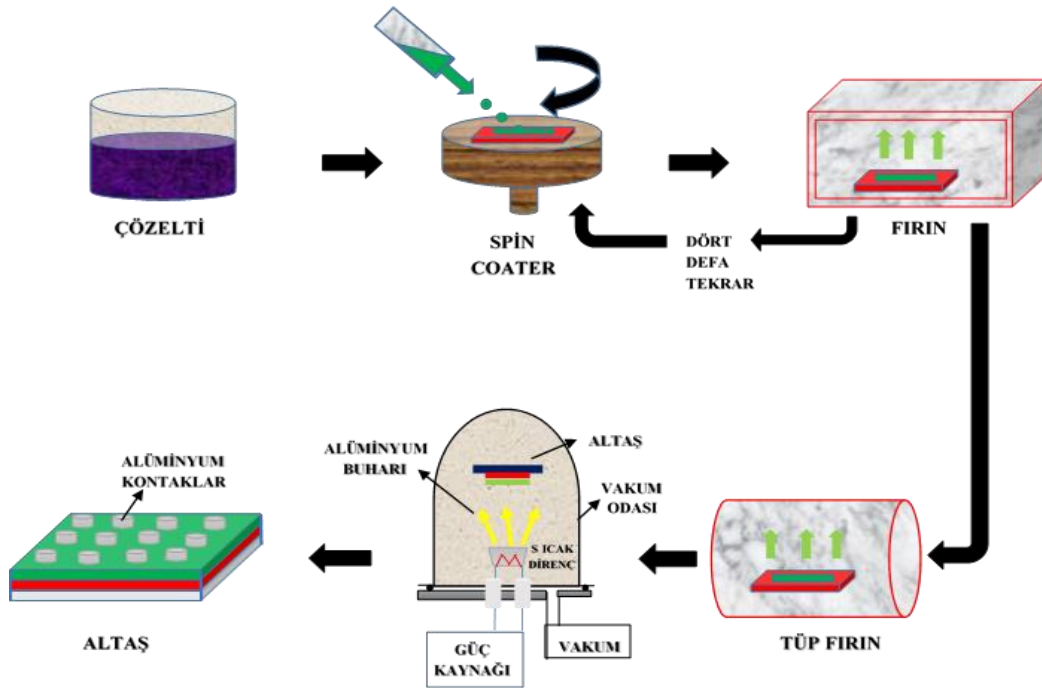
3.11.3. Filmlerin Kaplanması

n tipi silisyum alttaşlar teker teker Şekil 3.18 (a)'daki gibi döndürme kaplama cihazına çift tarafı yapışkanlı bant yardımı ile yerleştirildi. Hazırlanmış olan çözeltilerden, Şekil 3.18 (b)'de görüldüğü gibi bir pipet ile altlıkların üst yüzeyine damlatıldı. Damlatma işleminden sonra Şekil 3.18 (a)'da görülen Döndürme kaplama cihazı ile altlıklar 3000 devir/dakika hız ile 30 saniye döndürüldü. Daha sonra alttaşlar fırında 300 °C'de 15 dakika kurutuldu. Böylece 5 tane numunenin üzerine 5 katman atıldı. Son olarak bu numuneler tüp fırında 350 °C'de 2 saat tavlandı.



Şekil 3. 18. a) Spin Coating cihazı b) Damlatma işlemi

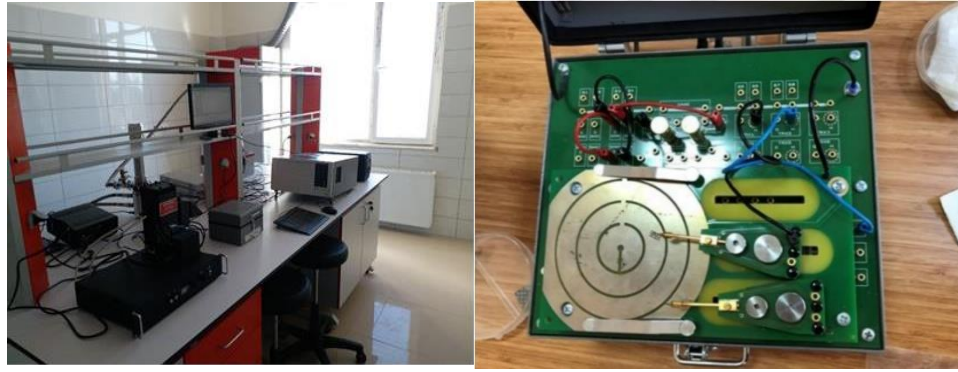
Fotodiyotların üretimini tamamlamak için, gümüş (Ag) metali üst omik kontak olarak kullanıldı ve bir vakum odasında $\sim 10^{-6}$ mbar altında geleneksel gölge maskeleri aracılığıyla filmlerin üzerine buharlaştırıldı. Buna uygun olarak n-tipi Si alttaşın arka tarafı Ag iletken boya ile kaplandı. Üretilen $\text{Ag}/(\text{Co}_x\text{Cu}_{1-x}\text{O})/\text{n-Si}/\text{Ag}$ diyotun şematik diyagramı Şekil 3.19’da gösterilmiş olup, $\text{CoO}/\text{n-Si}$, $\text{Co}_{0.75}\text{Cu}_{0.25}\text{O}/\text{n-Si}$, $\text{Co}_{0.50}\text{Cu}_{0.50}\text{O}/\text{n-Si}$, $\text{Co}_{0.25}\text{Cu}_{0.75}\text{O}/\text{n-Si}$ ve CuO/nSi diyotları sırası ile CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 olarak kodlanmıştır.



Şekil 3. 19. Fotodiyotların üretimi ve şematik diyagramı

3.11.4. Numunelerin Elektriksel Ölçümlerinin Alınması

Diyotların I-V ve C-V karakteristikleri Keithley 4200 yarıiletken karakterizasyon sistemi ile gerçekleştirilmiştir. Heteroeklemlerin fotoelektrik performansını incelemek için, dahili AM 1.5 G filtreli 300 W Xe lambası ile donatılmış bir güneş simülatörü kullanılmıştır. Şekil 3.20 a) Batman Üniversitesi Elektriksel ölçüm laboratuvarını ve b) Elektriksel ölçüm prob kutusunu göstermektedir.



Şekil 3. 20. a) Batman Üniversitesi Elektriksel ölçüm laboratuvarı b) Elektriksel ölçüm prob kutusu

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

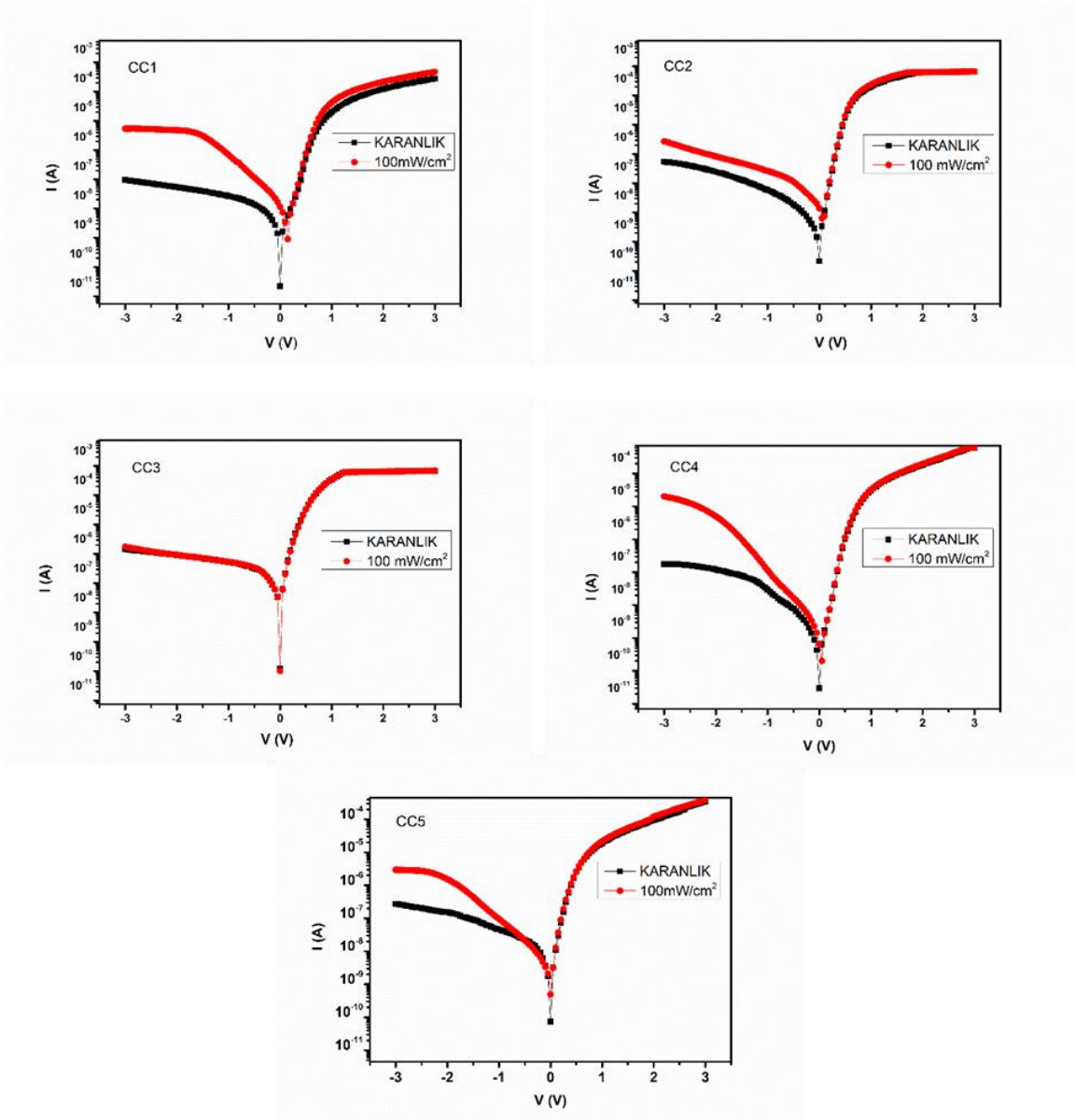
Üretilen diyotların; I-V, C-V, R_s -V, G-V ile Dit grafikleri çizilip incelendi. I-V ve C-V değerleri heteroeklemlerin elektriksel parametrelerini belirleyen önemli verilerdir. Bu değerler vasıtası ile yapının idealite faktörü, difüzyon potansiyeli, taşıyıcı yoğunlukları gibi değerleri bulunur. Aynı zamanda bu değerler numunelerin kalitesini de belirler.

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

Heteroeklemin yapılış şekli ve yapıyı oluşturan yarıiletkenin katkılama miktarı kaliteyi etkileyen en önemli unsurlardır. Şekil 4.1'e göre karanlık ortamda elde edilen idealite faktörü değerlerimiz CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 diyotlarımız için sırasıyla; 3,19, 1,99, 3,25, 2,35 ve 2,19 olarak hesaplanmış olup Çizelge 4.1'de verilmiştir. Üretilen diyotlardan en düşük idealite faktörünün 1,99 ile CC2 diyotundan elde edildiği gözlemlendi. Bu durum uygun katkı miktarı ile diyotun idealite faktörü değerinin iyileştirebileceğini göstermektedir.

Şekil 4.1 'i incelediğimizde, I-V karakteristikleri ileri beslemde lineer bir artış göstermektedir. Her bir diyotun yarı logaritmik I-V grafikleri, ± 2 V gerilim aralığında iyi bir doğrultma davranışı göstermektedir. Aynı şekilde karanlık ortamda elde edilen en yüksek doğrultma oranı (RR) $3,49 \times 10^3$ değeri ile CC4 diyotundan elde edildi.

Bununla birlikte üretilen tüm diyotların 100 mWatt/cm^2 ışık şiddeti altında ölçülen I-V grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 4.2'de verilmiştir. Karanlık ve aydınlık ölçümleri karşılaştırıldığında genel olarak idealite faktörü değerlerinde iyileşme görülmekle beraber doğrultma oranlarında düşüş gözlemlenmiştir. Doğrultma oranındaki bu düşüş ışık şiddeti altında ters beslem akımlarında meydana gelen artıştan kaynaklanmaktadır. Metal yarıiletken diyotların seri dirençleri ne kadar düşük olursa üretilen diyotların kalitesi o oranda artar. Üretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak seri dirençleri ve engel yükseklikleri F-V grafikleri ile hesaplanmıştır.



Şekil 4. 1. Elde edilen diyotların karanlık ve ışık altındaki I-V değerlerini gösteren grafikler

Üretilen diyotların karanlık ölçümleri sonucunda elde edilen seri direnç ve bariyer yükseklikleri değerleri Şekil 4.1’den faydalanılarak hesaplanıp Çizelge 4.1’de verilmiştir. Üretilen diyotların karanlık ortam ölçümleri ile elde edilen seri direnç değerleri CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 diyotlarımız için sırasıyla; 20,6 k Ω , 2,6 k Ω , 2,2 k Ω , 63 k Ω , ve 133,3k Ω olarak elde edildi. En yüksek bariyer yüksekliğinin ise 0.88 eV değeri ile CC4 diyotundan elde edildiği görülmüştür.

Katkılı diyotların seri direnç değerlerinin, katkısız diyotlara göre daha düşük olması uygun katkı miktarının diyotlarımızın elektriksel özelliklerini geliştirdiğini göstermektedir. Norde yöntemi ile elde edilen Φ_B değerleri ve TE modeli ile elde edilen

Φ_B değerlerinin birbirine yakın olduğu fakat aynı olmadığı görüldü. Bu durum genellikle bariyer homojenliğine ve diyotların ideal olmayan davranışına atfedilmektedir (Koçyigit, 2018).

Çizelge 4. 1. Elde edilen diyotların karanlıkta hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyotlar	RR (Karanlık $\pm 2V$)	n (I-V)	Φ_B (I-V) (eV)	Φ_B (Norde) (eV)	Rs (k Ω) (Norde)
CC1	$2,92 \times 10^3$	3,19	0,78	0,81	20,6
CC2	$1,19 \times 10^3$	1,99	0,77	0,84	2,6
CC3	$2,72 \times 10^2$	3,25	0,67	0,70	2,2
CC4	$3,49 \times 10^3$	2,35	0,81	0,88	63
CC5	$1,29 \times 10^3$	2,19	0,78	0,81	133,3

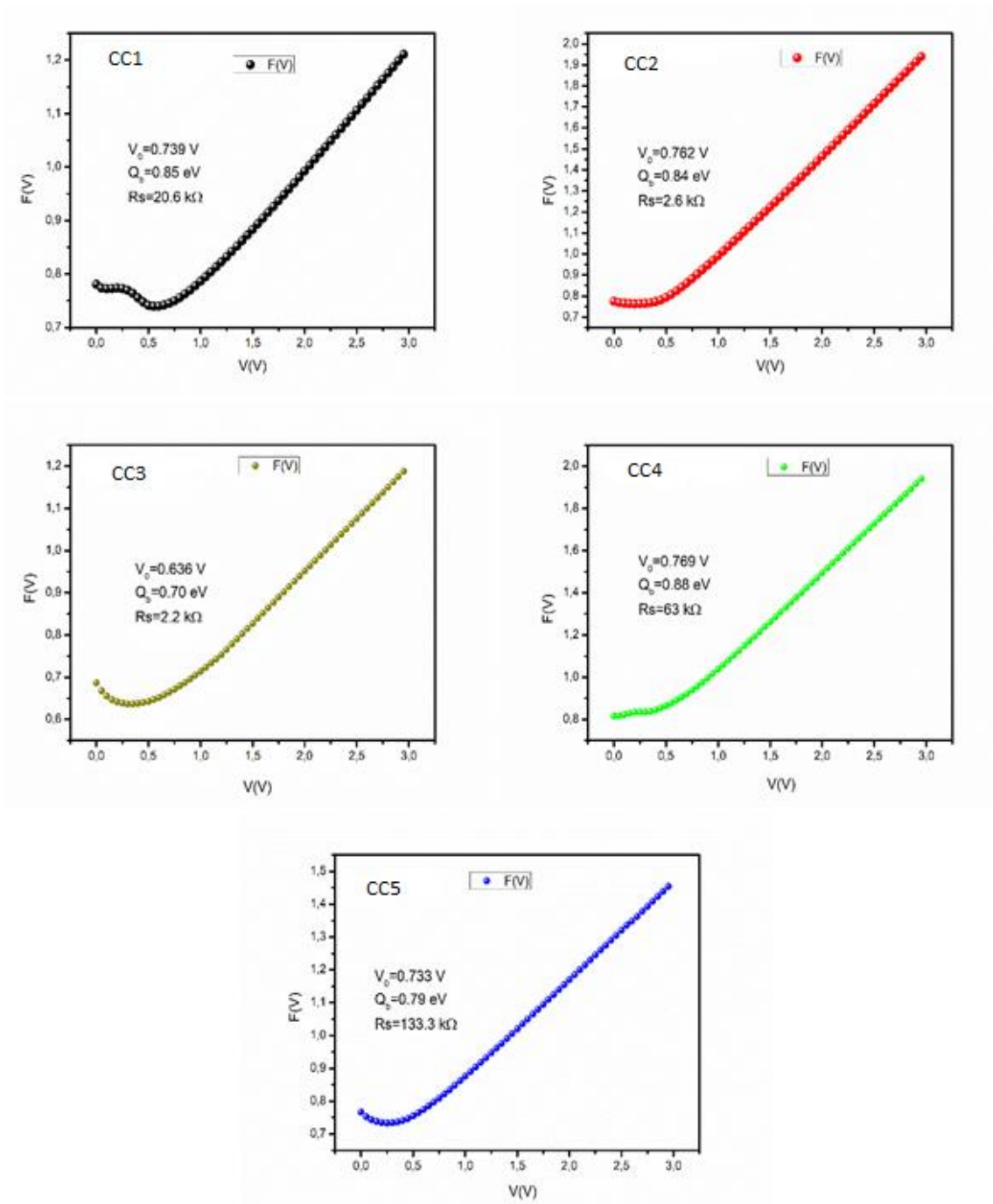
Literatür incelendiğinde, üretilen Al/n-Si/Eu: Cu_xO/Au yapısındaki diyotların idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç değerlerinin katkısız ve katkılı diyotlar için sırasıyla 2,86 ve 2,43, 0,73 eV ve 0,72 eV, 25 Ω ve 111 Ω olarak hesaplandığı rapor edilmiştir (Rüzgar, 2021).

Diğer bir çalışmada püskürtme yöntemi ile üretilen Zn-CuO/n-Si diyotunun idealite faktörü ve bariyer yüksekliği sırasıyla 4,25 ve 0,702 eV olarak hesaplandığı rapor edildi (Jagadeesan, 2021).

Hidrotermal yöntem ile üretilen Al/CuO–Grafen/p-Si/Al MIS yapısındaki diyotun elektriksel karakterizasyonu incelendiğinde ise idealite faktörü, bariyer yüksekliği ve seri direnç gibi değerlerin sırasıyla 1,75, 0,72 eV ve 82 Ω olarak ölçüldüğü rapor edilmiştir (Orhan, 2020).

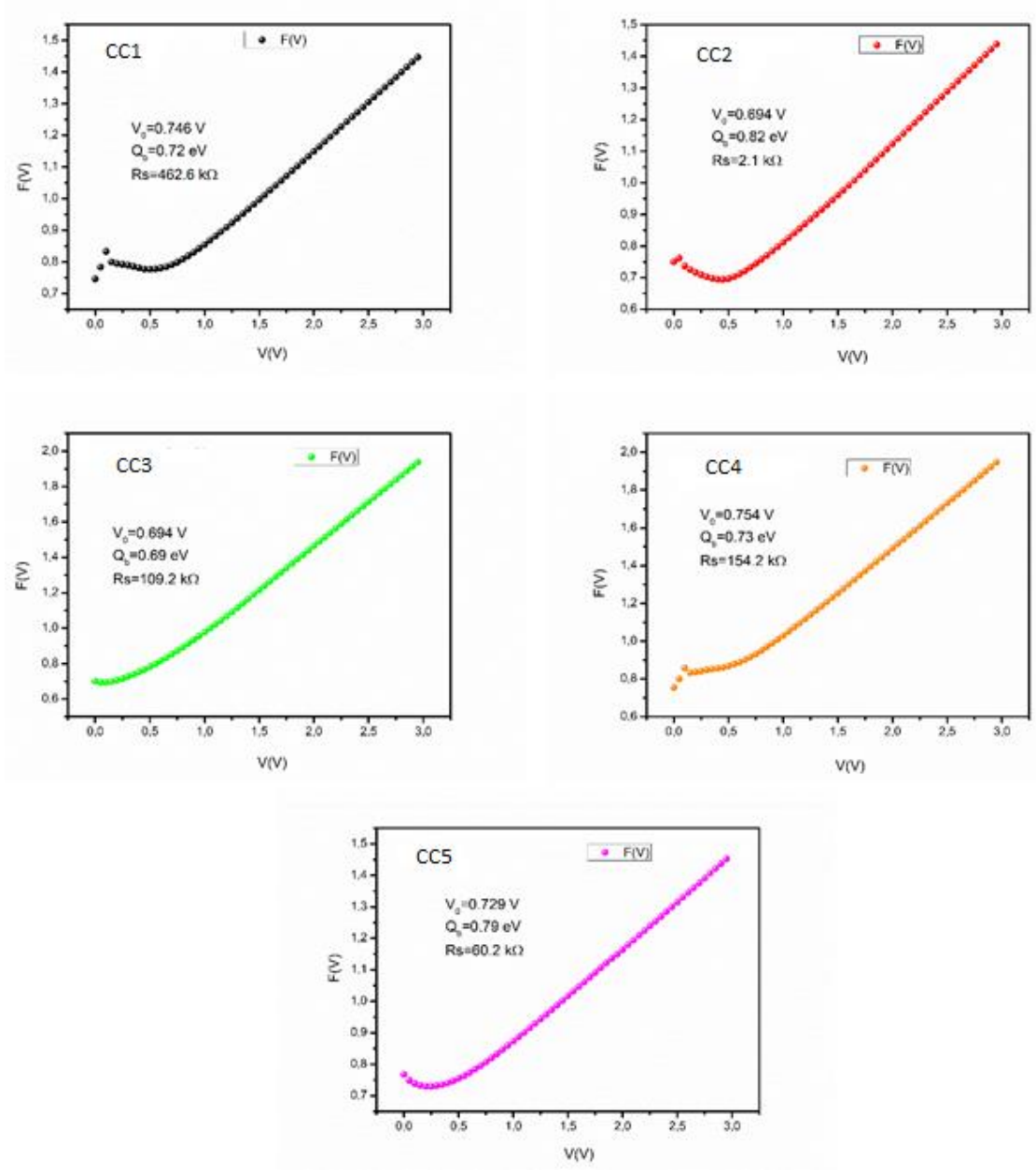
Aydın ve ark. yaptıkları çalışmada bir bakır(II) organik kompleksinin diyotun elektriksel parametrelerini kontrol edebileceğini rapor etmişlerdir. Çalışmalarında Cu(II) kompleks/n-Si diyotun fotovoltaiik özellik gösterdiğini belirtmişlerdir. Diyotun idealite faktörünü 2,22; bariyer yüksekliğini 0,736 eV ve seri direncini 6,7 k Ω olarak hesaplamışlardır (Aydın, 2012).

Bu çalışmadaki değerlerimiz ise idealite faktörümüzü 1,99; bariyer yüksekliğimizi 0,88 eV ve seri direnç değerimizi 2,6 k Ω olarak hesapladık. Değerleri karşılaştırdığımızda birbirine yakın sonuçlar çıktığını gördük. Şekil 4. 2’de elde edilen diyotların karanlıkta ölçülen F-V grafikleri görülmektedir.



Şekil 4. 2. Elde edilen diyotların karanlıkta ölçülen F-V grafikleri

Bununla birlikte diyotların 100 mw/cm^2 ışık şiddeti altında F-V grafikleri Şekil 4.3'te gösterilmiş olup Norde metodu yardımı ile hesaplanan değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir.



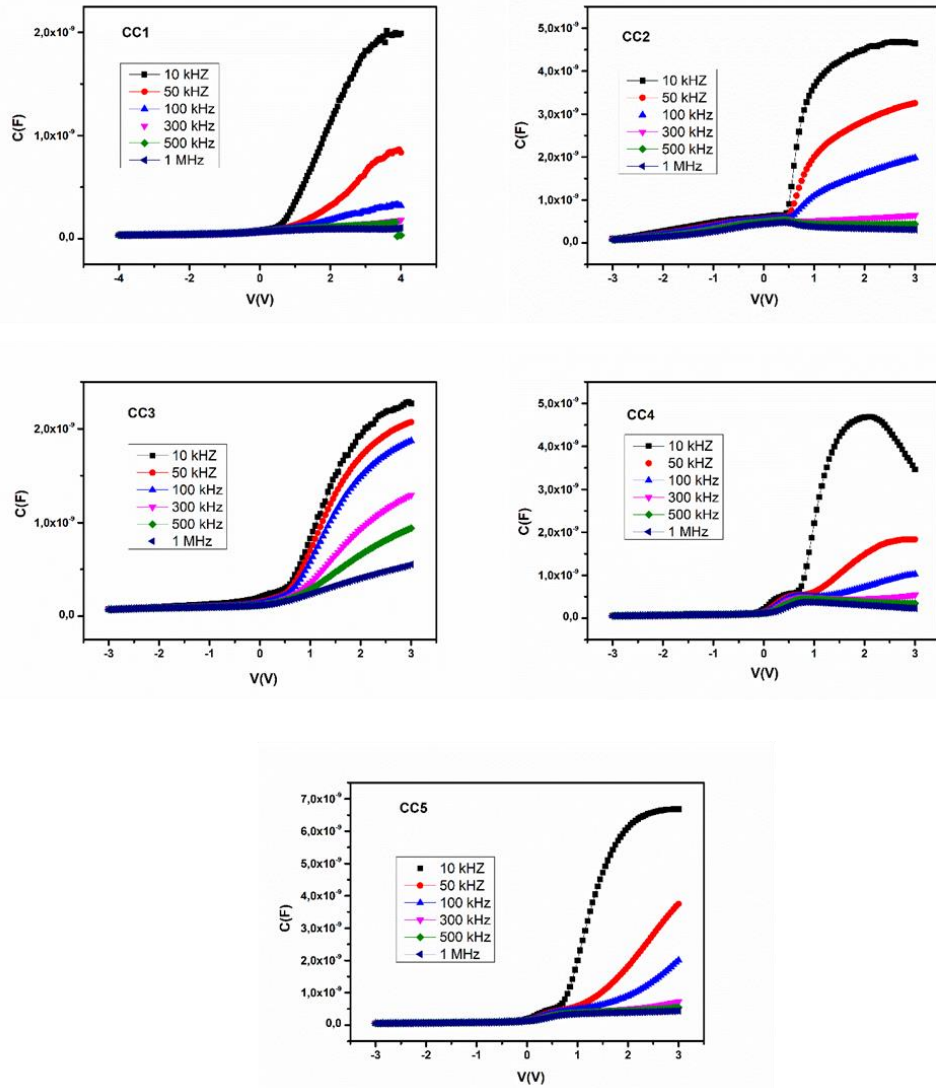
Şekil 4. 3. Elde edilen diyotların ışık altında (100 mWatt/cm^2) F-V grafikleri

Çizelge 4. 2. Elde edilen diyotların ışık şiddeti altında hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyotlar	RR ($\pm 2V$)	n (I-V)	Φ_B (I-V) (eV)	Φ_B (Norde) (eV)	R_s (Ω) (Norde)
CC1	$8,65 \times 10^1$	2,79	0,80	0,72	462,6
CC2	$2,45 \times 10^2$	2,15	0,76	0,82	2,1
CC3	$3,93 \times 10^2$	1,74	0,72	0,69	109,2
CC4	$3,04 \times 10^1$	1,93	0,83	0,73	154,2
CC5	$1,29 \times 10^2$	2,55	0,76	0,79	60,2

4.2. Elde Edilen Diyotların C-V Karakteristikleri

Heteroeklem yapıların elektriksel özellikleri arayüzey durumlarına bağlıdır. Arayüzey parametrelerini hesaplamak için kapasite-frekans (C-V) değerlerinden faydalanıldı. Numunelerin C-V grafiklerinden elde edilen parametrelerin frekans bağımlılığını göstermek için büyük bir frekans aralığı seçilmiştir. Şekil 4.4'te 10 kHz - 1 MHz frekans aralığında diyotların C-V grafiği gösterilmektedir. C-V grafiğinden açıkça görüldüğü gibi diyotların kapasitans değeri hem frekandan hem de uygulanan voltajdan güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir. İleri bölgede belirli bir pozitif voltajdan sonra arayüzey durumlarının varlığından dolayı diyotların kapasitans değeri artan frekansla azalır (Khusayfan, 2016; Çavdar ve ark. 2016).



Şekil 4. 4. Elde edilen diyotların 10 kHz - 1 MHz frekans aralıklarındaki C-V değerlerini gösteren grafikleri

Diyotların arayüz durumları, uygulanan yüksek frekanslarda AC sinyalini takip edemez. Bu nedenle arayüz durumları diyotun kapasitansına katkıda bulunamaz ve diyotun kapasite değeri yüksek frekansta daha düşüktür (Aydın ve ark., 2015; Çağlar ve ark., 2016)

Diyotlarda bulunun deplasyon bölgesi kapasitif etki göstermektedir. Bunun için kapasite gerilim ölçümleri yapılarak C-V grafikleri çizilir. Daha sonra bu grafiklerden yararlanarak elektriksel karakterizasyon yapılmaktadır. Ters beslem gerilimine bağlı olarak ölçülen kapasite ile doğrultucu kontağın bariyer yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanmaktadır (Özaydın, 2012).

4.3. Elde Edilen Diyotların C^{-2} -V Karakteristikleri

C-V grafikleri kullanılarak diyotların C^{-2} -V grafikleri çizilmiştir. Çizilen bu grafiklerden de Çizelge 4.3'teki değerler hesaplandı.

İki farklı yarıiletken heteroeklem oluşturmak için birleştirildiğinde; Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar birbirlerine yük geçişleri olur. Bu yüzden arayüzeyin her iki tarafındaki tüketim tabakası oluşur.

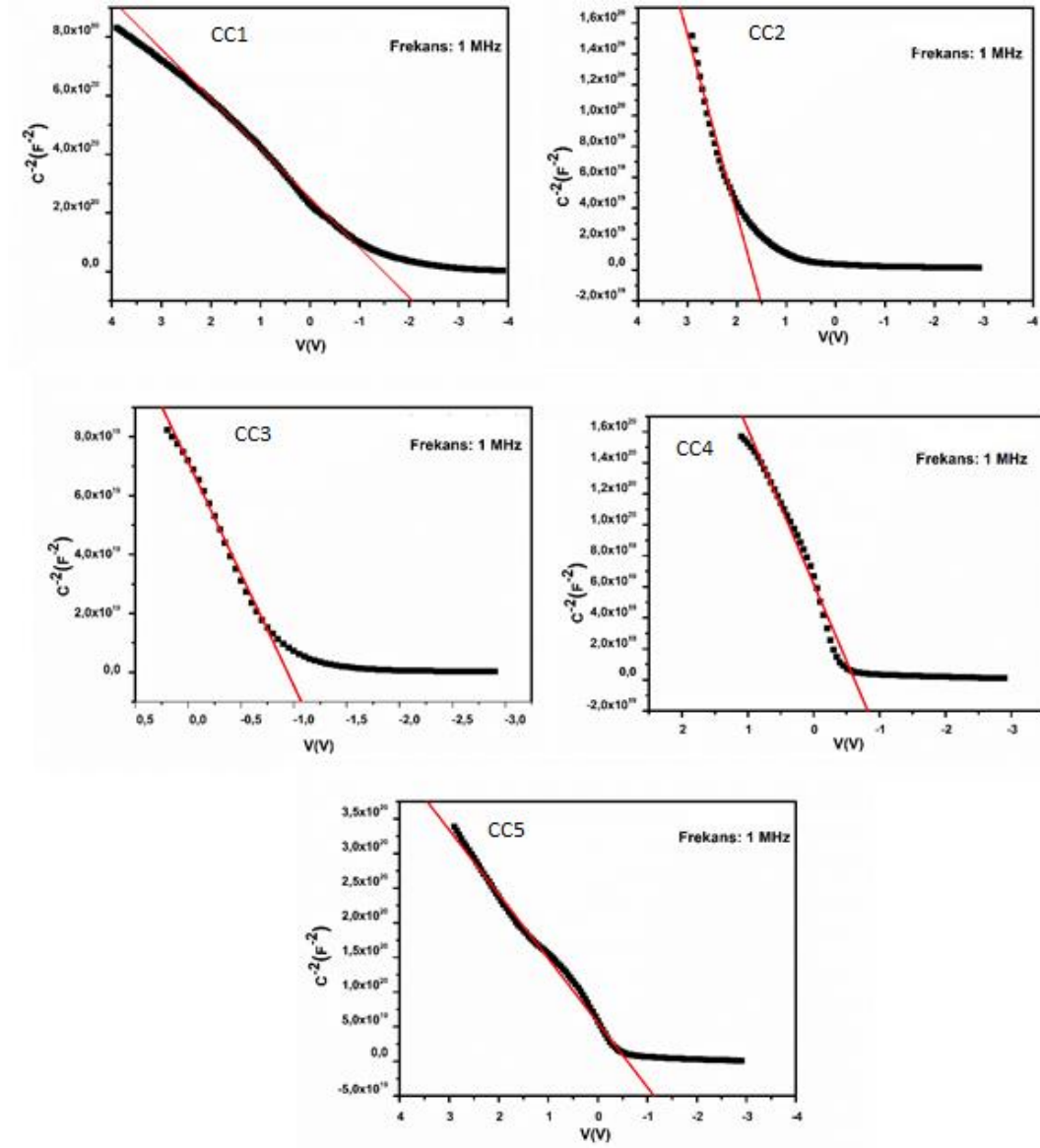
Heteroeklem bir diyotun, eklem bölgesinin kapasitansı; denklem (4.1) formülü ile ifade edilir (Sze, 2002).

$$C^2 = \left[\frac{q\epsilon_{S1}\epsilon_{S2}N_A N_D}{2(\epsilon_{S1}N_A + \epsilon_{S2}N_D)} \right] \frac{1}{(V_{bi} - V)} \quad (4.1)$$

Denklem (4.1)'de q :Elektron yükü, $\epsilon_{S1}, \epsilon_{S2}$:Dielektrik sabitleri, N_A :Yarıiletkenlerin akseptör, N_D :Donor konsantrasyonları, V_{bi} :Yapı potansiyeli ve V :Besleme voltajı anlamındadır. Denklem 4.1'i daha sade bir şekilde ifade edebiliriz;

$$\frac{1}{C^2} = \left[\frac{2(V_{bi} - V)}{A^2 q \epsilon_{S1} N_A} \right] \quad (4.2)$$

Şekil 4.5'ten faydalanılarak ve denklem (4.2) kullanılarak elde ettiğimiz değerler Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi C^{-2} -V grafikleri lineerdir.



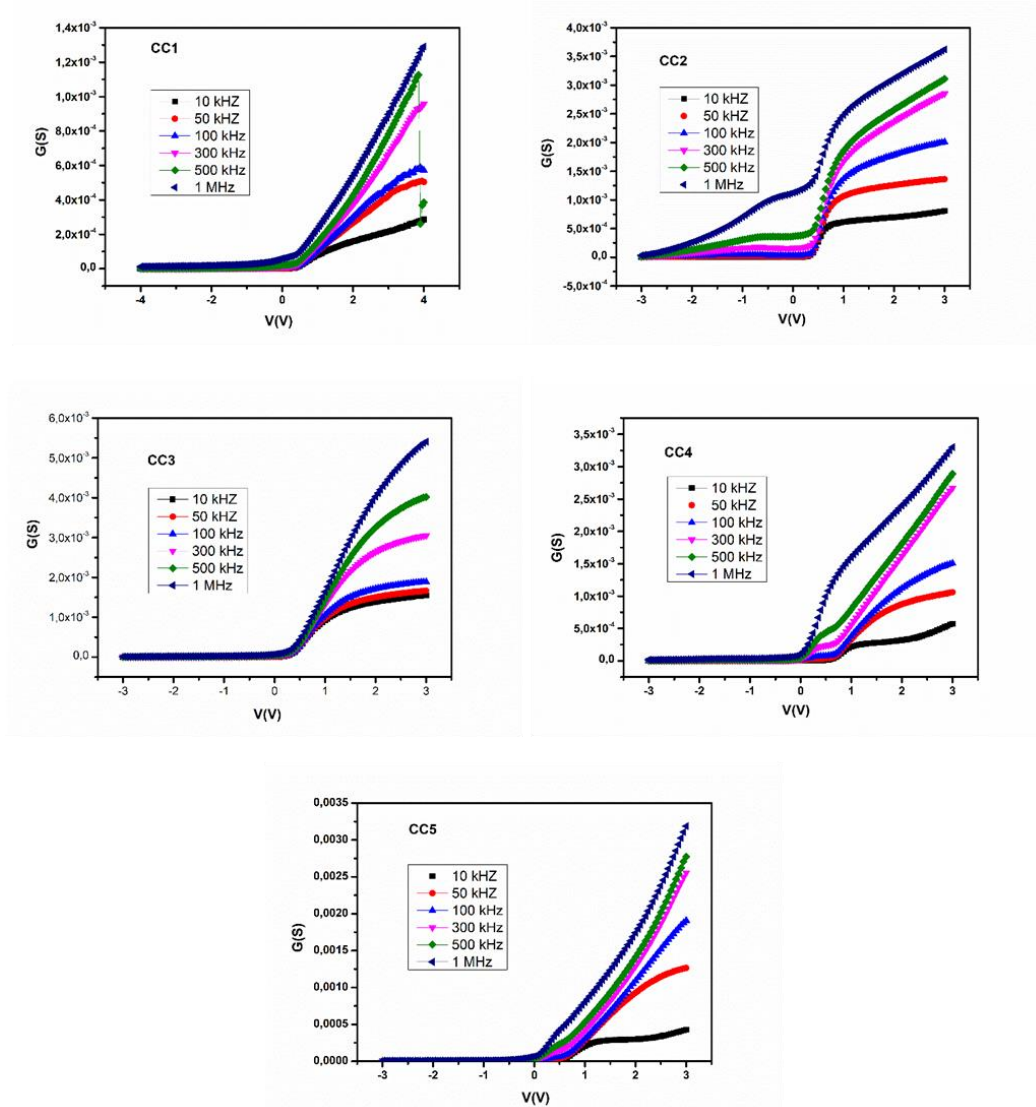
Şekil 4. 5. Elde edilen diyotların $C^{-2} - V$ grafikleri

Çizelge 4. 3. Elde edilen diyotların hesaplanan $C^{-2} - V$ değerleri

Diyotlar	Nd (cm^{-3})	Vbi (eV)	Nc(p-Si) (cm^{-3})	Ef (eV)	Φ_b (C-V) _{Ev}	Wd (nm)	$\Delta\Phi_b$ (eV)	E _{max} (V/cm)
CC1	$1,85 \times 10^{16}$	1,49	$2,39 \times 10^{19}$	0,18	1,69	322,20	0,033	92188,80
CC2	$2,69 \times 10^{16}$	1,69	$2,39 \times 10^{19}$	0,17	1,89	285,46	0,038	118493,24
CC3	$5,93 \times 10^{16}$	0,41	$2,39 \times 10^{19}$	0,15	1,13	94,44	0,032	86559,03
CC4	$3,13 \times 10^{16}$	0,22	$2,39 \times 10^{19}$	0,17	0,41	95,13	0,023	45990,85
CC5	$3,38 \times 10^{16}$	0,60	$2,39 \times 10^{19}$	0,17	0,79	151	0,031	79066,41

4.4. Elde Edilen Diyotların G-V Karakteristikleri

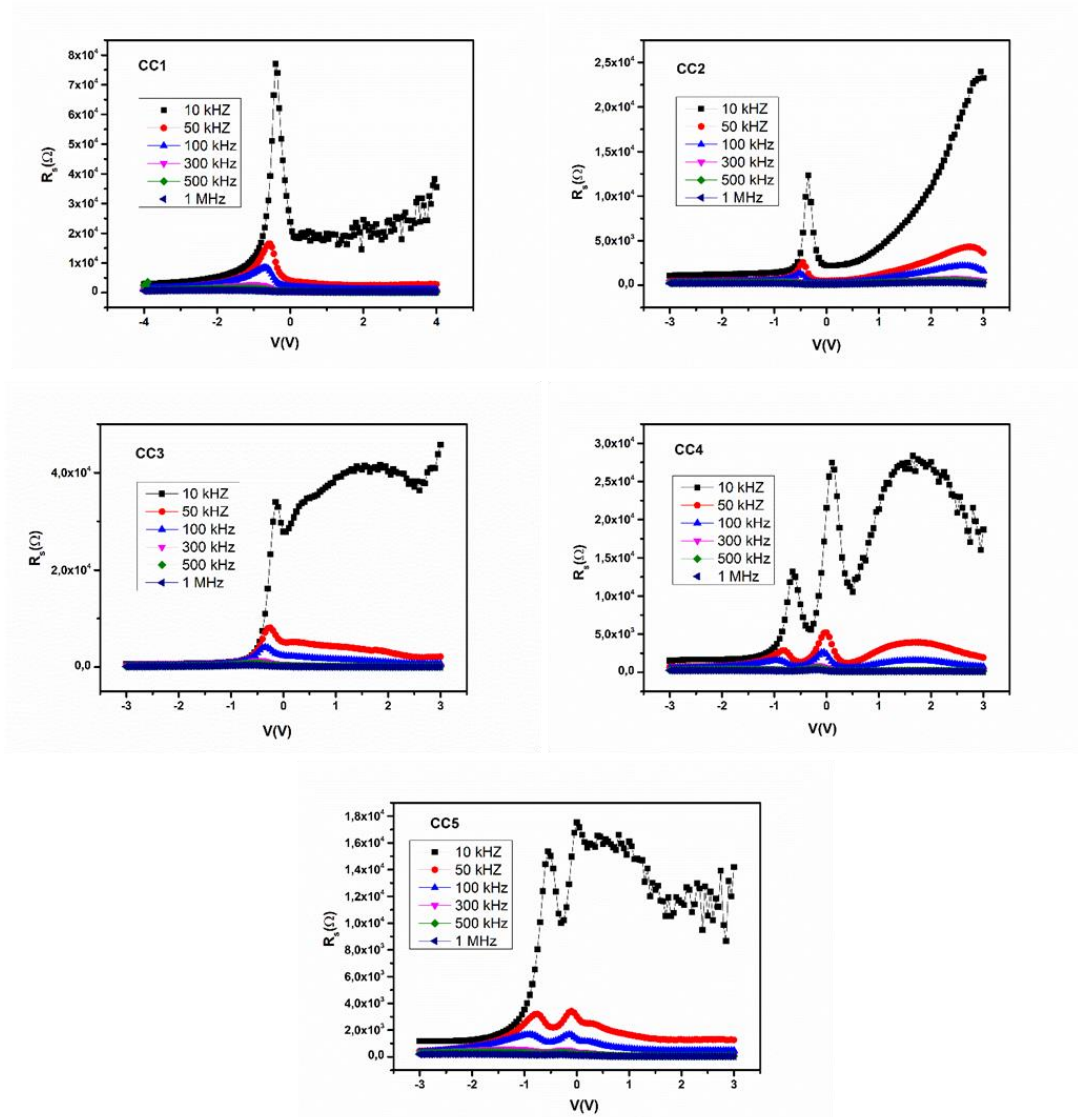
Numunelerin G-V grafiklerinden elde edilen parametrelerin frekans bağımlılığını göstermek için büyük bir frekans aralığı seçilmiştir. Şekil 4.6'da 10 kHz - 1 MHz frekans aralığında diyotların G-V grafiği gösterilmektedir. G-V grafiğinden açıkça görüldüğü gibi diyotların konduktans değeri hem frekanstan hem de uygulanan voltajdan güçlü bir şekilde etkilendiği görülmektedir. Ters bölgede belirli bir negatif voltajdan sonra arayüzey durumlarının varlığından dolayı diyotların konduktans değeri artan frekansla artmaktadır. Diyotların frekansa bağlı G-V grafikleri incelendiğinde frekans ile gerilim doğru orantılı olduğu görülmektedir. Konduktans değeri de N_{ss} ve R_s değerlerine bağlıdır. Frekans ile konduktans ters orantılıdır. Konduktans değeri ters öngerilim bölgesi altında neredeyse sabit kalır ve artan frekans ile artar.



Şekil 4. 6. Elde edilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralıklarındaki G-V değerlerini gösteren grafikler

4.5. Elde Edilen Diyotların R_s -V Karakteristikleri

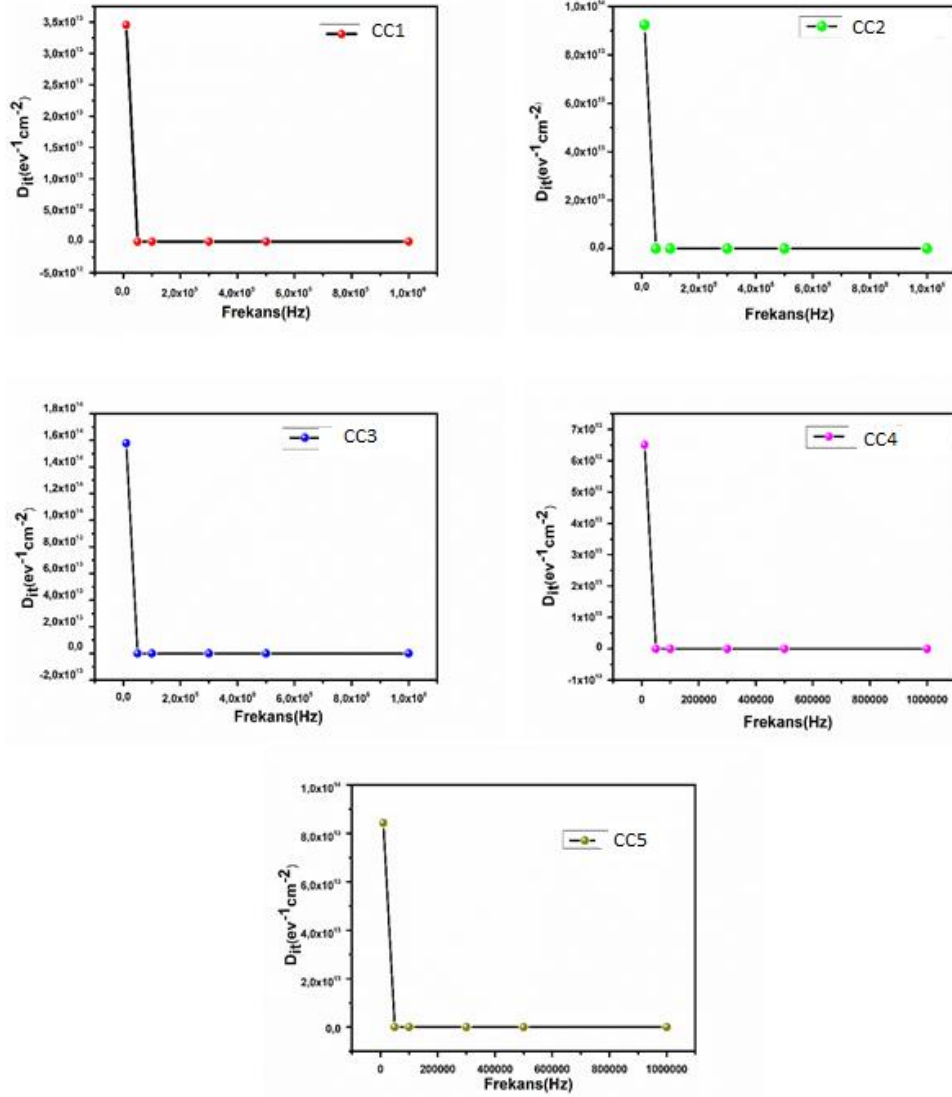
Üretilen diyotların seri direnç değerleri, diyotların analizde önemli bir parametredir. Bunu için R_s -V grafikleri çizilerek elektriksel karakterizasyon yapıldı. Üretilen diyotların R_s -V grafiği Şekil 4.7’de çizilerek farklı frekans değerlerinde seri direncin gerilimle değişimi incelendi. Yapılan incelemede frekans yükseldikçe seri direncin değerinin düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni uygulanan gerilime bağlı olan arayüzeydeki elektrik yüklerinin frekans değişiminden etkilenmesi olarak görülmektedir. R_s değerlerindeki frekansla değişim, oksit-tuzaklı yük, hareketli oksit yükleri ve sabit oksit yükleri gibi lokalize arayüz yüklerine atfedilir. Diyotların, seri dirençleri ne kadar düşük olursa kalitesi o oranda artar.



Şekil 4. 7. Elde edilen diyotların 10kHz-1MHz frekans aralıklarındaki R_s -V değerlerini gösteren grafikler

4.6. Üretilen Diyotların Ara Yüzey Durum Yoğunluğunu Hesaplama

Üretilen diyotların arayüzey durum yoğunluğu (D_{it}), denklem (4.3) kullanılarak hesaplandı. Böylece arayüzey durum yoğunluğu grafikleri Şekil 4.8'deki gibi çizildi. Çizilen grafiklerde görüldüğü gibi frekans arttıkça arayüzey durum yoğunluğunun azaldığı görülmektedir (Yakuphanoglu, 2011).



Şekil 4. 8. Elde edilen diyotların karanlık ortamda D_{it} -F grafikleri

$$D_{it} = \frac{2}{qA} \left[\frac{(G_{adj}/w)_{max}}{[(G_{max}/wC_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \right] \quad (4.3)$$

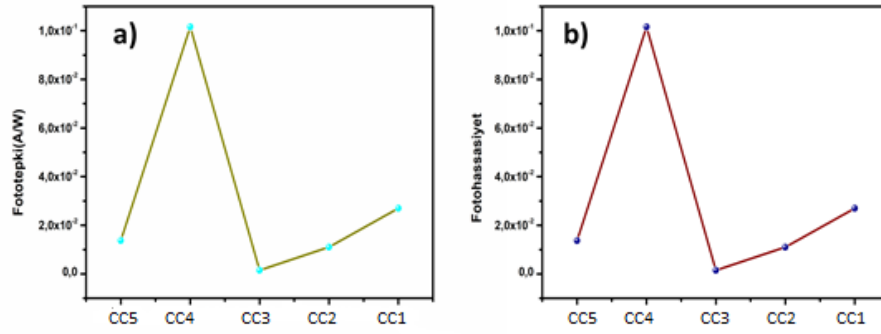
Denklem (4.3)'te C_m :Ölçülen kapasite, C_{ox} :İzolasyon tabakasının kapasitesi, W :Açısal frekans, A :Foto diyotun kontak alanıdır.

4.7. Üretilen Diyotların Işığa Duyarlılık Karakteristikleri

Cihazın ışığa duyarlılığı (Responsivity), diyot için önemli bir parametredir. Işığa duyarlılık, denklem (4.4) kullanılarak hesaplanabilir;

$$R = \frac{I_P - I_d}{P \times A} \quad (4.4)$$

Denklem (4.4)'te; I_P :Fotoakım, I_d :Karanlık akım, P ve A aydınlatmayı temsil eder. Ayrıca artan taşıyıcı iki serbest elektron sağlaması nedeniyle Co katkılı CuO konsantrasyonu fotodiyot uygulamalarının foto duyarlılığını iyileştirebilir (Rüzgar, 2020). Şekil 4.9'da elde edilen diyotların a) Fototepki (A/W) b) Fotohassasiyet grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Elde edilen diyotların a) Fototepki (A/W) b) Fotohassasiyet grafiği

Grafikler incelendiğinde en yüksek fototepki ve fotohassasiyet değerleri CC4 fotodiyodundan elde edilmiştir. Bu durum uygun katkının fotodiyot performansını iyileştirdiğini göstermektedir. Çizelge 4.4'te ise elde ettiğimiz diyotların elektriksel parametreleri gösterilmektedir.

Çizelge 4. 4. Elde edilen diyotların elektriksel parametreleri

Diyotlar	R (mA/W)	I _{aydınlık} /I _{karanlık} (100mW/cm ²)
CC1	2,70×10 ⁻²	5,59×10 ¹
CC2	1,10×10 ⁻²	3,95×10 ⁰
CC3	1,49×10 ⁻³	2,02×10 ⁻¹
CC4	1,02×10 ⁻¹	1,14×10 ⁻²
CC5	1,37×10 ⁻²	9,87×10 ⁰

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, sol-jel yöntemiyle döndürme kaplama yapılarak katkısız ve CoO katkılı CuO çözeltiler n-Si alttaşlar üzerine kaplanarak ince filmler üretildi. CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 olmak üzere 5 adet heteroeklem diyot hazırlandı. Hazırlanan bu diyotların karanlıkta ve ışık altında elektriksel ölçümleri yapıldı. Hesapladığımız bu değerleri birbiriyle karşılaştırarak en iyi katkılama oranını belirledik.

Üretilen katkılı ve katkısız diyotların I-V ölçümleri oda sıcaklığında +2V ve -2V aralığında alınmıştır. I-V eğrisi incelendiğinde lineerlikten sapmalar olduğu görülmüştür. I-V grafiği değerlerinden, diyotlar için önemli olan, bariyer yüksekliği, doyma akımı ve idealite faktörü gibi elektriksel parametreler termioyonik emisyon teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. Termioyonik emisyon teorisine göre ideal diyotlarda idealite faktörünün değerinin 1 olması gerekmektedir. Hesapladığımız idealite faktörü değerinin 1'den büyük olduğu gözlemlenmektedir. Üretilen diyotların ideallikten uzaklaşmasına; ara yüzeylerde oluşan kirlilikler, oksitlenmiş tabaka, kontak atma sırasında oluşan sıcaklık ve bunun sonuçları, kimyasal temizleme esnasında kimyasalların zarar vermesiyle oluşan olumsuzluklar vs. gibi faktörler sebep olabilir.

Bu çalışmada diyotların seri direnç değerleri Norde yöntemi ile hesaplanmıştır. Norde yöntemi kullanılarak karanlıkta bulunan seri direnç değerleri CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 diyotlarımız için sırasıyla; 20,6 k Ω ; 2,6 k Ω ; 2,2 k Ω ; 63 k Ω ; 133,3 k Ω olarak hesaplanmıştır. Norde yöntemi kullanılarak ışık altında bulunan seri direnç değerleri ise CC1, CC2, CC3, CC4 ve CC5 diyotlarımız için sırasıyla; 462,6 k Ω ; 2,1 k Ω ; 109,2 k Ω ; 154,2 k Ω ; 60,2 k Ω ; olarak hesaplanmıştır. I-V grafiklerinde, yüksek voltaj bölgelerinde ideallikten sapmalar olması sonucunda eğrilerde bükülmeler görülmüştür. Bu bükülmelerin sebebi seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır.

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 görülmektedir. Arayüzey durumlarının frekans ile diyotların kapasitans değerlerinde değişikliğe yol açtığı bildirilmektedir. Çünkü düşük frekanslarda arayüzey durumları AC sinyali takip edebilir ancak yüksek frekansta takip edememektedir. Eğrilerin doğrusal olmayan davranışı, C-V grafiklerinde gözlenen tepe noktaları da arayüzey durumlarının varlığına ve seri direnç etkisine atfedilir. Ayrıca katkısız diyotun kapasitans değerleri Co katkılı diyotlardan daha yüksek çıkmıştır.

Kapasitans deęerindeki bu dūřuř, Co katkısının safsızlıęı ile heteroeklem tūkenme bōlgesinin azalmasına baęlanabilir.

Diyotların frekansa baęlı G-V grafikleri incelendięinde frekans ile gerilim doęru orantılı olduęu gōrūlmektedir. Kondūktans deęeride N_{ss} ve R_s deęerlerine baęlıdır. Frekans ile kondūktans ters orantılıdır. Kondūktans deęeri ters ōngerilim bōlgesi altında neredeyse sabit kalır ve artan frekans ile artar.

Diyotların, seri dirençleri ne kadar dūřuk olursa kalitesi o oranda artar. Őretilen diyotların, Norde fonksiyonu kullanılarak seri dirençleri ve engel yūkseklilikleri F-V grafikleri ile hesaplanmıřtır. R_s -V ōlçūmleri alınmıř olup frekans arttıkça diyotların R_s deęerlerinde azalma olmaktadır. R_s deęerlerindeki frekansla deęiřim, oksit-tuzaklı yūk, hareketli oksit yūkleri ve sabit oksit yūkleri gibi lokalize arayūz yūklerine atfedilir.

5.2. Öneriler

Elde edilen sonuşlar, Őrettięimiz ince filmlerin performanslarının Co katkılılandırılması ile yōnetilebileceęini gōstererek, Őretilen diyotlar elektronik başta olmak ũzere birēok alanda kullanılabileceğini gōstermiřtir. Yapılacak ēalıřmalarda ēōzeltiyi oluşturan maddelerin oranlarını değiştirerek, tavlamadaki sıcaklık değiştirilerek, sūre değiştirilerek ve tur sayısı değiştirilerek elektriksel parametreler değiştirilebilir. Bōylece daha yūksek performanslı ũrūnler elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Alshaeer, F., 2018, A Study of Current Transport in Schottky Diodes Based on AlInSb/InSbQW Heterostructures, A thesis submitted to fulfill the requirement for the degree Doctor of Philosophy *Cardiff University Prifysgol Caerdydd*,19.
- Aydın, R., 2016, Sıkar yöntemi ile üretilen CuO filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine ikili katkılamanın (Zn, Li) etkisi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 20.Cilt, 3.Sayı, s. 481-487.
- Azizian, Y. and Badali, Y., 2020, Investigation of the effect of different Bi₂O₃-x: PVA (x= Sm, Sn, Mo) thin insulator interface-layer materials on diode parameters. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 31.
- Balamurugan, 2001, Surface-modified CuO layer in size-stabilized single-phase Cu₂O nanoparticles. *Applied Physics Letters*, 79 (19), 3176-3178.
- Barreca, D. M., 2001, Composition and Microstructure of Cobalt Oxide Thin Films Obtained from a Novel Cobalt(II) Precursor by Chemical Vapor, *American Chemical Society*, 588-593.
- Bhuvaneshwari, 2016, Enhanced ammonia sensing characteristics of Cr doped CuO nanoboats, *Journal of Alloys and Compounds*, 654 202-208.
- Bube, R.H., 1992, Photoelectronic Properties of Semiconductors, *Cambridge University Press*,294.
- Brennan, F., 2005, Introduction To Semiconductor Devices: For Computing and Telecommunications Applications, *Cambridge University Press. Georgia Institute of Technology, Cambridge, Britain*, 40-72.
- Chopra, K. L., 1969, Thin Film Phenomena, *Robert E. Krieger Publishing Company, Huntington, New York*, 107.
- Çağlar, Y., Gorgün, K., Ilican, S., Caglar, M. and Yakuphanoglu, F., 2016, Magnesium-doped zinc oxide nanorod–nanotube semiconductor/p-silicon heterojunction diodes, *Appl. Phys. Mater. Sci. Process*, 122.
- Çavdar, S., Tugluoglu, N., Akgül, K. and Koralay, B., 2016, H., Laterally inhomogeneous barrier analysis using capacitance–voltage characteristics of identically fabricated Schottky diodes, *J. Electron. Mater.* 45 3908–3913.
- Evcil, M. A., 2019, SnO₂/P-Si Heteroeklem Yapıların Termal Buharlaştırmayla Üretilmesi, Diyot ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, *Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Van*, 32-37.
- Gao, A. L., 2011, Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering, *Journal Of Applied Physics*, 29–45.

- Gürmen, S., 2006, Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis, *Materials Research Bulletin*, 1882-1890.
- Hasançebi, Ö., 2006, Electrical, Structural and Optical Properties of Copper Oxide Thin Films Prepared by Sol-Gel Method, Master Thesis, *Ankara University*, Ankara.
- Huş, M.Ş., 2006, Physical Properties Of Cdse Thin Films Produced By Thermal Evaporation And E-Beam Techniques, A Thesis Submitted To The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University, 17-21.
- Jagadeesan, V., 2021, Comparison studies of Zn-doped CuO thin films deposited by manual and automated nebulizer-spray pyrolysis systems and their application in heterojunction-diode fabrication, *Sol-Gel Science and Technology Journal*, 119-120.
- Karadeniz, S., 2007, 60Co γ -ray irradiation effects on dielectric characteristics of tin oxide films of different thicknesses on n-type Si(111) substrates. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 260, 571-578.
- Khusayfan, N.M., 2016, Electrical and photoresponse properties of Al/graphene oxide doped NiO nanocomposite/p-Si/Al photodiodes, *J. Alloys Compd.*, 666, 501–506.
- Kittel, C., 1996, Katılmal Fiziğine Giriş, *Güven Yayınları*, İstanbul ,434.
- Kocyigit, A., Karteri, İ., Orak, I., Uruş, S., and Çaylar, M., 2018, The structural and electrical characterization of Al/GO-SiO₂/p-Si photodiode. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 103, 452-458.
- Kroemer, H., 1957, Theory of a wide-gap emitter for transistors. *Proceedings of the IRE*, 45(11), 1535-1537.
- Lee, S., Lee, W. Y., Jang, B., Kim, T., Bae, J. H., Cho, K., and Jang, J., 2017, Sol-gel processed p-type CuO phototransistor for a near-infrared sensor, *IEEE Electron Device Letters*, 39(1), 47-50.
- Loeb, L. B., 1961, The kinetic theory of gases, p. 42. Dover, New York.
- Masudy-Panah, S., 2015, G K Dalapati, K Radhakrishnan, A Kumar and H R Tan Photovolt, *Res. Appl.* 23, 637.
- Mutlu, T., 2010, Au/pGaAs_{1-x}Px/n-GaAs Yapılı pn Eklemlenmiş Diyotun Tavlama Sıcaklıklarına Göre Elektriksel Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Balıkesir Üniversitesi*, Balıkesir, 10-16.
- Norde, H., 1979, A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50 (7). 5052.
- Norrman, K., 2005, 6 Studies of spincoated polymer films. *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, 101, 174.

- Orhan, Z., 2020, Synthesis of CuO–graphene nanocomposite material and the effect of gamma radiation on CuO–graphene/p-Si junction diode, *Journal of Materials Science*, 31.
- Özaydın, C., 2012, Makrosiklik Ligandların Geçiş Metal Kompleksleri İle Oluşturulan Heteroeklemlerin Elektriksel ve Optiksel Özelliklerin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 72-81.
- Özerden, E., 2014, Metal/Organik/İnorganik Yarıiletken Yapıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Elektriksel Ve Optik Parametrelerinin Belirlenmesi, Doktora tezi, *Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Diyarbakır, 26-57.
- Patil, P.S. and Kadam, L.D., 2001, Thickness-dependent properties of sprayed cobalt oxide thin films. *Mater. Chem. Phys.*, 68, 225–232.
- Polat, Ö., Sivaslıgil, M., Erol, C. B., and Sarı, H., 2013, Validation of refractive index structure parameter estimation for certain infrared bands. *Applied optics*, 52(14), 3127-3133.
- Rhoderich, E. H., 1978, Metal-semiconductor contacts, *Clarendon Press*, Oxford, 1-2.
- Rhoderick, E. H., 1988, Metal-Semiconductor Contacts. 2nd ed. *Clarendon*, Oxford, 1-225.
- Rüzgar, Ş., 2020, The tuning of electrical performance of Au/(CuO:La)/n-Si photodiode with, *elsevier*, 5-8.
- Rüzgar, Ş. and Çağlar, M., 2020, Fabrication and characterization of solution processed Al/Sn:ZnO/, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 5-6.
- Rüzgar, Ş., 2021, Comparison studies of Zn-doped CuO thin films deposited by manual and automated nebulizer-spray pyrolysis systems and their application in heterojunction-diode fabrication, *Chinese Journal of Science*, 18-23.
- Simon, M., 1981, Physics of Semiconductor Devices, *Wiley-Interscience*, New York.
- Sönmezoğlu, S., 2012, İnce Film Üretim Teknikleri, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 389-401.
- Sze, S.M., 1981, “Physics of Semiconductor Devices,” 2nd Edition, *John Wiley and Sons*, New York.
- Sze, S.M., 2002, Semiconductor Devices, *John Wiley&Sons*, New York, (2002), p. 18, 60, 112, 235.
- Şahin, Y., 2014, X-Işını Radyasyonunun Metal/Organik/Yarıiletken Doğrultucu Kontakların I-V (Akım-Gerilim) Karakteristikleri Üzerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Erzurum 18, 20.

- Tung, R.T., 1991, Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers, *Applied physics letters*, vol. 58, pp. 2821-2823.
- Wilmsen, C. W., 1985, Physics and Chemistry of III-V Compound Semiconductor Interfaces, *Plenum Press*, New York.
- Yakuphanoglu, F., 2010, Interface control and photovoltaic properties of n-type, *Microelectronic Engineering*, 2951-2954.
- Yıldırım, N., 2009, Bakır Oksit/Titanyum Dioksit Heteroeklem Yapıların Elektriksel Ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, *Ankara Üniversitesi*, Ankara, 23.
- Ziel, A. V., 1968, Solid State Physical Electronics, *Prentice-Hall New-Jersey*, p.245- 260.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Yusuf YILDIZ
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Endüstri Meslek Lisesi, Batman	1997
Üniversite	: Fırat Üniversitesi, Elazığ	2003
Üniversite	: Siirt Üniversitesi	2019
Yüksek Lisans	: Batman Üniversitesi	-

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2005	Şırnak Meslek Lisesi	Elektrik Öğretmeni
2009	Kurtalan Ç.P.L.	Elektrik Öğretmeni
2010	Batman Mesleki Ve Teknik Anadolu Lisesi	Elektrik Öğretmeni

UZMANLIK ALANI

Elektrik Öğretmeni

YABANCI DİLLER

İngilizce