

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Au/BOD-Z-EN/n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN FARKLI
AYDINLATMA ŞİDDETLERİ ALTINDA ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Osman TEZCAN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU

Şubat 2019

**T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Au/BOD-Z-EN/n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN FARKLI
AYDINLATMA ŞİDDETLERİ ALTINDA ELEKTRİKSEL
PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ali Osman TEZCAN

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Bu tez .././20.. tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği / oyçokluğu ile kabul edilmiştir.

**..... Dr.
.....
Jüri Başkanı**

**..... Dr.
.....
Üye**

**.... Dr.
.....
Üye**

**..... Dr.
.....
Enstitü Müdürü**

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Ali Osman TEZCAN

04/02/2019

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın tüm aşamalarında her türlü bilimsel desteği sağlayan değerli hocam Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU ve Doç. Dr. Serkan EYMUR hocalarıma, bilgi birikimi ve değerli görüşleri ile katkı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL'e, Doç. Dr. Osman PAKMA'ya ve Arş. Gör. Dr. Ümmühan Akın'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bütün destekleri için değerli arkadaşlarım Edanur HELLAÇ'a, Nazmiye BÖREKÇİ'ye ve Onur ONGUN'a da teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tez çalışmam sırasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen ailem de sonsuz sevgilerimi sunar, teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ÖZET.....	IX
SUMMARY	X
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER	4
2.1. Malzemelerin Sınıflandırılması.....	4
2.1.1. İletkenler	4
2.1.2. Yarıiletkenler.....	5
2.1.3. Yalıtkanlar.....	6
2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar	6
2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	7
2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	9
2.3. Metal/Organik Malzeme/Yarıiletken/Metal Schottky Diyotların Yapısı.....	11
2.4. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletimi.....	12
2.4.1. Termiyonik emisyon teorisi	13
2.5. Arayüzey Durum Yoğunluğu	15
2.6. Metal/Yarıiletken Fotodiyotlar	16
2.6.1 Fotodiyotların akım voltaj karakteristiği.....	18
2.7. Fotovoltaik Parametreler	20
2.7.1. Açık devre voltajı.....	20

2.7.2. Kısa devre akımı	21
2.7.3. Maksimum akım	21
2.7.4. Maksimum voltaj	21
2.7.5. Doldurma faktörü	22
2.7.6. Seri direnç	22
 BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	24
3.1. BOD-Z-EN Organik Malzemesinin Hazırlanması ve Sentezi	24
3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi	25
3.3. Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken/Metal Diyot Yapısının Hazırlanması.....	26
3.4. BOD-Z-EN Molekülünün Enerji Band Aralığı (E_g) Hesaplaması.....	30
3.5. Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi	31
 BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	33
4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri	33
4.2. Cheung Metodu Yardımı ile Seri Direnç Hesaplanması	37
4.3. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlığının Hesaplanması	39
4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması	40
4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri	42
 BÖLÜM 5. SONUÇLAR.....	47
 KAYNAKLAR	50
ÖZGEÇMİŞ	57

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge

Φ_s : Yarıiletkenin iş fonksiyonu

Φ_m : Metalin iş fonksiyonu

E_c : İletim bandı minimum enerji seviyesi

E_v : Valans bandı maksimum enerji seviyesi

E_F : Fermi enerji seviyesi

p : Boşluk konsantrasyonu

n : Elektron konsantrasyonu

V : Voltaj

I : Akım

J : Akım yoğunluğu

I_0 : Ters doyma akımı

A : Alan

A^* : Richardson sabiti

T : Mutlak sıcaklık

n : İdealite faktörü

Φ_b : Engel yüksekliği

R : Direnç

R_s : Seri direnç

δ : Arayüzey tabakası kalınlığı

ϵ_i : Arayüzey katmanı geçirgenliği

ϵ_s : Yarıiletken geçirgenliği

P : Güç

V_{oc} : Açık devre voltajı

I_{sc} : Kısa devre akımı
 FF : Doldurma faktörü
 I_m : Maksimum akım
 V_m : Maksimum voltaj
 P_m : Maksimum güç

Kısaltmalar

BOD-Z-EN : BODIPY Z-ENYNOLS
MS : Metal/Yarıiletken
MOS : Metal/Organik/Yarıiletken
OLED : Organik ışık yayan diyot
OFET : Organik Alan etkili transistör

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. İletkenlere ait enerji bant diyagramı	4
Şekil 2.2. Yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı	5
Şekil 2.3. Yalıtkanlara ait enerji bant diyagramı.....	6
Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan önceki enerji bant diyagramı.....	8
Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan sonraki enerji bant diyagramı	8
Şekil 2.6. İdeal bir metal/yarıiletken kontağın doğrultucu kontak davranışı	9
Şekil 2.7. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan önceki enerji bant diyagramı.....	10
Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın kontakdan sonra ki enerji bant diyagramı	11
Şekil 2.9. İdeal bir metal/yarıiletken kontağın omik kontak davranışı	11
Şekil 2.10. Metal/organik/yarıiletken yapısının şematik gösterimi	12
Şekil 2.11. Düz beslemde ki metal/yarıiletken kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı	13
Şekil 2.12. Bir metal/yarıiletken kontağın aydınlatma şiddeti altındaki şematik görüntüsü	16
Şekil 2.13. Bir fotodiyodun şematik görüntüsü	17
Şekil 2.14. Bir fotodiyodun eş değer devresi	17
Şekil 2.15. Bir fotodiyot ve doğrultucu diyodun akım-voltaj eğrisi	18
Şekil 2.16. Bir fotodiyotun karanlık ve aydınlatma şiddeti altındaki akım-voltaj karakteristiği.....	20
Şekil 2.17. Bir fotodiyota ait akım-voltaj grafiği	21
Şekil 2.18. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge	23
Şekil 3.1. BOD-Z-EN organik malzemesinin açık molekül yapısı	24

Şekil 3.2. Termal buharlaştırma cihazı	27
Şekil 3.3. Vakum ortamında tavlama yapılan fırın	27
Şekil 3.4. Spin kaplama cihazı	28
Şekil 3.5. Doğrultucu kontakların yapımı için kullanılan maske.....	28
Şekil 3.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In yapısının şematik gösterimi	29
Şekil 3.7. Elde edilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotu	29
Şekil 3.8. BOD-Z-EN bileşiğinin molekül şekli	30
Şekil 3.9. BOD-Z-EN molekülüne ait HOMO LUMO seviyeleri	31
Şekil 3.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si diyotuna ait enerji band diyagramı.....	31
Şekil 3.11. Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan deney düzenekleri: a) Güneş similatörü b) I-V ölçüm sistemi	32
Şekil 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği	34
Şekil 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin ışık şiddeti ile değişimleri	36
Şekil 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $dV/d(\ln I)$ -I grafiği	38
Şekil 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $H(I)$ -I grafiği.....	38
Şekil 4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 1 MHz'de Kapasite-Voltaj grafiği	40
Şekil 4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği	41
Şekil 4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği	42
Şekil 4.8. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği	43
Şekil 4.9. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun bütün aydınlatma şiddetlerine karşılık V_{oc} ve J_{sc} grafiği	43
Şekil 4.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine karşılık FF ve P_{max} grafiği.....	45

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan n , I_0 , ϕ_b değerleri	35
Tablo 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan R_s değerleri	39
Tablo 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan V_{oc} ve J_{sc} değerleri	44
Tablo 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan V_m , I_m , P_m ve FF değerleri.....	45

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN FARKLI AYDINLATMA ŞİDDETLERİ ALTINDA ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, BOD-Z-EN organik bileşiği spin kaplama yöntemi ile n tipi Si altlık üzerine ince film olarak büyütülmüştür. Sonuç olarak Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotu üretilmiş ve diyotun ana elektriksel karakteristikleri oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altında I-V ölçümleri kullanılarak incelenmiştir. İdealite faktörü (n) değerleri karanlık ve 100 mW/cm² için sırasıyla 2,33 ve 1,55 bulunmuştur. Engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri karanlık ve 100 mW/cm² için sırasıyla 0,864 eV ve 0,90 eV bulunmuştur. Artan aydınlatma şiddeti ile birlikte idealite faktörü değerinin azaldığı, engel yüksekliği değerinin arttığı görülmüştür. Ek olarak, seri direnç (R_s) değerleri Cheung ve Cheung metodu kullanılarak belirlenmiştir. Seri direnç değerleri karanlık ve 100 mW/cm² için sırasıyla 5850 Ω ve 2375 Ω olarak bulunmuştur. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun açık devre voltajı (V_{oc}) ve kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) değerleri 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti için sırasıyla 0,15 V ve 10,71 mA bulunmuştur. Sonuçlar incelendikten sonra elde etmiş olduğumuz Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun ışığa karşı duyarlı olduğu ve fotovoltaiik özellik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Schottky Diyot, İdealite Faktörü, Aydınlatma Şiddeti, Organik Bileşik.

THE INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS UNDER THE DIFFERENT ILLUMINATIONS INTENSITY OF Au/BOD-Z-EN/n-Si/In SCHOTTKY DIODE

SUMMARY

In this study, BOD-Z-EN organic compound thin films on n type Si wafer have been deposited by spin coating method. As a result, Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diode was fabricated and main electrical characteristics of the diode were investigated using I-V measurements in dark and under various illumination intensity at room temperature. The ideality factor (n) values have been found to be 2,33, 1,55 for dark and 100 mW/cm², respectively. The barrier height (ϕ_b) values have been found to be 0,864 eV, 0,90 eV for dark and 100 mW/cm², respectively. With increasing lighting intensity, it was seen that the value of ideality factor decreased and the barrier height value increased. In addition to, the series resistance (R_s) values from Cheung&Cheung method have been determined. The series resistance values have been found to be 5850 Ω and 2375 Ω at dark and 100 mW/cm², respectively. The open circuit voltage (V_{oc}) and the short circuit current density (J_{sc}) values of the Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diode were 0,15 V and 10,71 mA for 100 mW/cm² illumination intensity, respectively. After investigating the results, it was observed that the Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diode was sensitive to light and showed photovoltaic properties.

Keywords: Schottky Diode, Ideality Factor, Illumination intensity, Organic Compound

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Metal/yarıiletken (MS) kontaklar yarıiletken teknolojisinin en temel cihazlarından [1,2]. Bu metal yarıiletken kontaklar genel olarak Schottky engel diyotları (SBD) olarak da bilinirler [3]. Metal/yarıiletken kontakların elektriksel özelliklerinden faydalanmak ve uygun kontaklar hazırlayabilmek için elektriksel, termal, optik karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [4]. Metal/yarıiletken kontaklarının arayüzey özelliklerinin cihazın performansı, güvenilirliği ve kararlılığı üzerinde baskın bir etkisi olduğu bilinmektedir [2]. Metal/yarıiletken arayüzeyinde bir potansiyel engeli olduğu fikri ilk kez Schottky tarafından ortaya konulduğu için bu kontaklara Schottky diyotlar denilmektedir [2,5].

Metal/yarıiletken kontaklar ile ilgili doğrultma davranışını anlamak için ilk çalışma Schottky ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [2]. Metal/yarıiletken kontaklar, çeşitli optoelektronik ve elektronik cihaz teknolojilerinde önemli bir role sahiptir. Schottky diyotlar, teknolojik alanda, anahtarlama devreleri, güneş pilleri, LED uygulamaları, yarıiletken dedektör uygulamaları, kontrol sistemleri, elektronik devre elemanları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar [4,5]. Schottky diyotlar, çok yüksek frekanslarda anahtarlama hızlarına sahiptirler, bu da Schottky engel diyotların optoelektronikte, telekomünikasyon alanında, elektronik cihazlarda kullanılmalarını sağlamıştır [6].

Schottky kontakların, istenilen şekilde çalışabilmesi, elektriksel özelliklerinden faydalanabilmek ve uygun kontakları elde edebilmek için elektriksel karakteristiklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir [6,7]. Schottky diyotların bilimsel önemlerinden dolayı elektriksel karakteristiklerini anlamak için yapılan çalışmalar uzun süredir devam etmektedir [6].

Schottky kontakların elektriksel özellikleri genel olarak arayüzey özellikleri ile belirlenir. Özel olarak üretilmedikleri sürece metal ile yarıiletken arasında bir oksit tabaka meydana gelir. Oluşan bu oksit tabaka metal/yarıiletken kontakları metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapıya dönüştürür. MIS yapısı ile ilgili ilk başarılı çalışma Ligenza ve Spitter tarafından Si altlık üzerine SiO₂ ince filmin büyütülmesiyle yapılmıştır [3]. Metal/yarıiletken yapıların elektriksel karakteristikleri, metal ve yarıiletken arasındaki kullanılacak olan arayüzey malzemelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir [8,9]. Metal ile yarıiletken arasında bulunan arayüzey malzemesi, metal yarıiletken yapısının idealite faktörü, engel yüksekliği gibi çeşitli parametrelerini değiştireceği için, cihazın performansını ve verimini etkiler [8,9]. Metal/yarıiletken kontakların, elektriksel özelliklerinin metal ve yarıiletken kontak arasına bir organik katmanın eklenmesiyle kontrol edilebileceği değerlendirilmektedir. Schottky kontaklarının performans ve verimleri, uygun bir organik yarıiletken seçimi yoluyla artırılabilir.

Organik yarıiletken malzemeler, maliyetlerinin düşük olması, çeşitli kaplama metodları ile birlikte kolay bir şekilde kaplanıp fazlaca üretim yapılabilimleri, düşük enerji tüketimleri ve düşük sıcaklıklarından dolayı metal yarıiletken kontaklarda arayüzey malzemesi olarak kullanılması cazip gelmiştir [8,10]. Metal/yarıiletken kontaklar ve heteroeklemler, farklı organik yarıiletken bileşikler kullanılarak üretilmekte ve karakteristikleri analiz edilmektedir [8,11]. Organik yarıiletken malzemeler, kolay üretilibilmeleri ve elektronik karakteristiklerinden dolayı büyük ilgi çekmektedirler. Bu tür özellikleri nedeniyle, organik yarıiletkenler elektronik ve optoelektronik alanda bir çok teknolojik uygulamada kullanılmaktadır. Bunlar, organik ışık yayan diyot (Organic Light Emitting Diode-OLED), organik alan etkili transistörler (Organic Field Effect Transistor-OFET), organik Schottky engel diyotları, fotovoltaiik ve güneş pilleri, boyaya duyarlı güneş pilleri gibi uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır [12,13,14].

Organik yarıiletken malzemeler, bilimsel ve ticari önemleri nedeniyle büyük ilgi çekmektedirler. Umut verici organik yarıiletkenler arasında gösterilen BODIPY (Bordipirometen), görünür bölgedeki emisyonları ve yüksek kuantum verimlerinden dolayı en umut verici organik malzemelerden bir tanesidir. BODIPY bileşiklerleri ışığa karşı duyarlı floresans maddelerdendir. BODIPY, akıllı devre anahtarları, ışık

toplama sistemleri, enerji transfer kasetleri, boyar madde ile duyarlaştırılmış güneş pilleri, polimerler, lazer boyları ve OLED uygulamalarında ki geniş uygulama yelpazesinden dolayı son yıllarda büyük ilgi görmektedir [15,16].

Fotodiyot, ışığa duyarlı bir yarıiletken diyet olarak tanımlanabilir veya elektriksel işlemler sırasında optik sinyaller oluşturan bir sensör olarak da adlandırılır [10]. Diyodun yapısı ya bir p-n eklemi ya da bir metal/yarıiletken kontağıyla oluşturulmaktadır [4,5,17]. Bir fotodiyot, anot ve katot olmak üzere iki elektriksel kontak ile bir yarıiletkenden oluşmaktadır. Fotodiyotlar, üzerlerine gelen ışık şiddetini elektriksel işarete çevirmek için kullanılırlar. Bu çevirme işleminin verimliliği fotodiyodun karakteristiğine bağlıdır [18].

Bu çalışmada altlık olarak n tipi Si kristali kullanılmıştır. Doğrultucu kontak olarak Altın (Au), omik kontak olarak da İndium (In) kullanılarak Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyetu yapılmıştır. Oluşturulan diyetun, karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-voltaj (I-V) ölçümleri alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre diyetun doğrultucu özelliği sahip olduğu görülmüştür. Daha sonra ölçüm sonuçları kullanılarak termiyonik emisyon teorisine göre diyetun, idealite faktörü, engel yükseliği ve seri direnç parametreleri hesaplanmıştır. Diyotun çeşitli aydınlatma şiddetleri altındaki akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden ışığa karşı duyarlı olduğu görülmüş ve çeşitli fotodiyot parametreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan parametrelerin literatürle karşılaştırmaları yapıp gerekli öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİLER

Çalışmalarda kullanılan malzemeler iletkenlik durumlarına göre; iletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üçe ayrılır. Malzemelerin bu sınıflandırmaları enerji bant diyagramlarındaki iletim ve valans bantlarının durumlarına göre belirlenir.

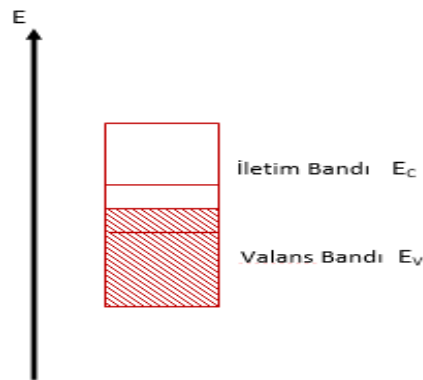
2.1. Malzemelerin Sınıflandırılması

2.1.1. İletkenler

İletkenlerde akım iletimi iki şekilde sağlanmaktadır; elektronik geçişli ve iyonik geçişli. Akım iletimi, elektronik geçişli iletkenlerde elektronlar tarafından sağlanırken, iyonik geçişli malzemelerde malzemenin iyonları tarafından sağlanmaktadır [1].

Malzemeler son yörüngelerindeki elektron sayılarına göre iyi veya kötü iletken olarak adlandırılmaktadır. Son yörüngelerinde bir elektron bulunan malzemeler iyi iletken, iki veya üç elektron bulunan malzemeler kötü iletken olarak adlandırılmaktadır [4].

İletken malzemelere ait enerji bant diyagramı Şekil 2.1’de görülmektedir.



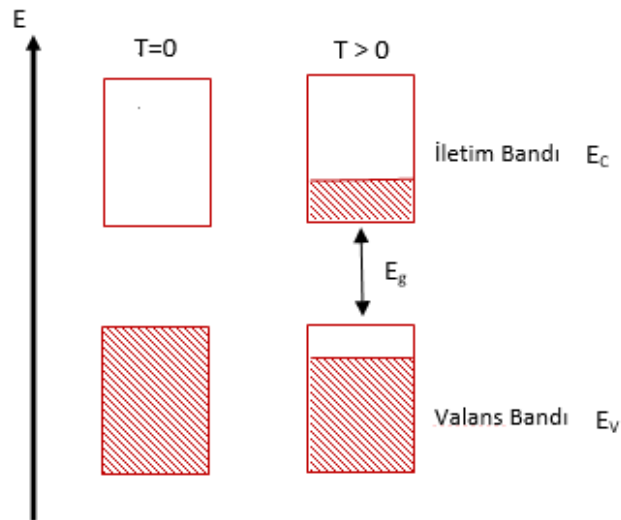
Şekil 2.1. İletkenlere ait enerji bant diyagramı [4]

Şekilde görüldüğü üzere iletken malzemelerde iletim bandı ile valans bandı iç içe durumdadır ve dışardan ısı, ışık, gerilim vb. etki gerekmeden valans bandındaki elektronlar iletim bandına geçerler.

2.1.2. Yarıiletkenler

Yarıiletken malzemelerin iletkenlikleri, iletken malzemelere göre daha da düşüktür. Yarıiletken malzemeler, dış etkiler (ışık, gerilim uygulanması, ısı vb.) yardımıyla valans elektronları serbest duruma geçerek iletkenlik özelliği gösterirler [5].

Yarıiletken malzemelere ait enerji bant diyagramı Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Şekile göre E_v valans bandı, E_c iletkenlik bandı, E_g ise yasak enerji bant aralığı olarak isimlendirilmektedir.



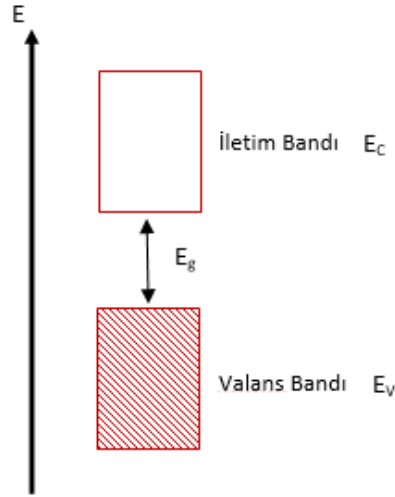
Şekil 2.2. Yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı [4]

Yarıiletkenlerde bant aralığı 2eV’den küçük olduğu için, oda sıcaklığındaki ısı ve görünür bölge fotonları valans bandında ki elektronları harekete geçirerek iletim bandına geçmesini sağlar [4]. Yarıiletkenlerde ki bant aralıklarına, Silisyum (1,12 eV) ve Germanyum (0,67 eV) kristalleri örnek olarak verilebilir.

2.1.3. Yalıtkanlar

Yalıtkanlarda elektronlar birbirlerine sıkıca bağlı oldukları için elektron verme eğilimleri yoktur. Bu yüzden yalıtkanlarda akım iletimi yoktur. Yalıtkan malzemeler için oda sıcaklığındaki ısı valans bandında ki elektronu harekete geçirip iletim bandına geçiremez. Yalıtkan malzemelerde de yasak enerji band aralığı bulunmaktadır. Yalıtkan malzemelerde ki yasak enerji band aralığı 5 eV-9 eV arasındadır [5].

Yalıtkan malzemelere ait enerji bant diyagramı Şekil 2.3’de verilmiştir. Yalıtkan malzemelerde yasak band aralığı çok yüksek olduğundan dolayı, valans bandındaki elektronlar dışardan etki dahi gelse iletim bandına geçiş yapamazlar.



Şekil 2.3. Yalıtkanlara ait enerji bant diyagramı [4]

2.2. Metal/Yarıiletken Kontaklar

Metal/yarıiletken kontaklar, yarıiletkenin devre elemanlarının temelini oluşturduklarından dolayı oldukça önemlidirler. Yarıiletken kristallerinin iletkenlik özelliklerini araştırabilmenin bir yolu da kristallere uygun kontakların yapılabilmesidir [4]. Bir metal ile bir yarıiletkenin kontak haline getirilmesi ile oluşturulan yapıya metal/yarıiletken kontak denilmektedir. İyi bir kontak elde edebilmek için kristal ile kontak malzemesi en az direnç ile temas ettirilmelidir. Elde edilen kontakın ideale yakın olması, kontak yapılacak malzemelerin yüzeylerin

pürüzsüz ve temiz olmasıyla ilgilidir. Kontak haline getirilen metal ve yarıiletken malzemeleri arasında fermi enerji seviyeleri aynı noktaya gelinceye kadar yani ısı denge durumuna ulaşınca kadar metalden yarıiletkene ya da yarıiletken metale bir yük alışverişi olur. Bu durum her iki malzemenin de enerji bant diyagramları ile alakalıdır. Metal ve yarıiletken kontak haline getirildiğinde, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının (ϕ_m ; metalin iş fonksiyonu, ϕ_s ; yarıiletkenin iş fonksiyonu) durumlarına göre doğrultucu ve omik kontak oluşur.

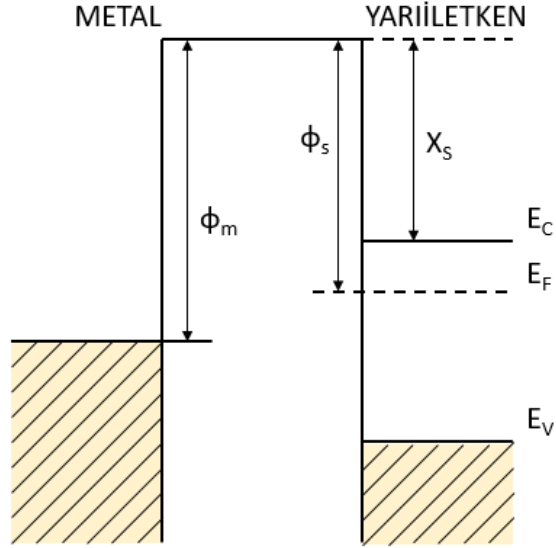
Metal ve yarıiletken kontak türünün doğrultucu veya omik olması, hem metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına hem de yarıiletkenin tipine (n veya p tipi) bağlıdır. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda doğrultucu kontak, $\phi_m < \phi_s$ olması durumunda ise omik kontak oluşmaktadır. Metal/p-tipi yarıiletken kontak için $\phi_m < \phi_s$ olması durumunda doğrultucu kontak, $\phi_m > \phi_s$ olması durumunda ise omik kontak oluşmaktadır.

2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

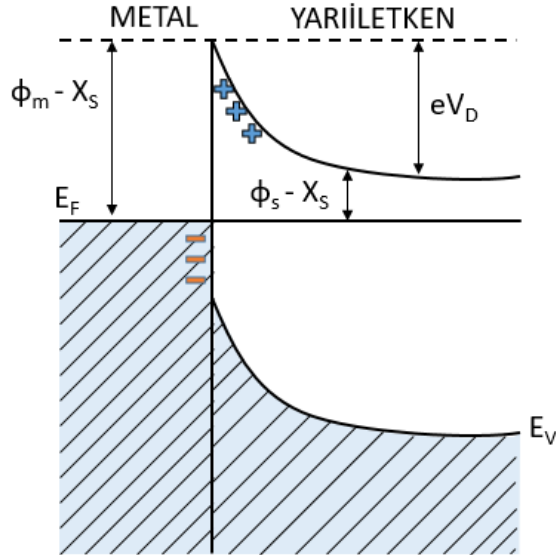
Metal/yarıiletken kontaklarda iletimi sağlayan akım taşıyıcıları (elektron ve boşluklar) akımı sadece bir yönde kolayca iletilebiliyorsa ve potansiyel engelinden dolayı diğer yönde iletimi zorlaşıyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontak denilmektedir. Metalin ve n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre, $\phi_m > \phi_s$ olduğu durumda metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontak oluşur. Oda sıcaklığında bir metal ile bir yarıiletken ele alındığında, yarıiletkende ki bütün vericiler iyonize olmuşlardır.

Metal ile yarıiletkenin kontak yapılmadan önce ki enerji bant diyagramı Şekil 2.4'de verilmiştir. İş fonksiyonu, bir elektronu fermi enerjisi seviyesinden (E_F) vakum seviyesine çıkarabilmek için gerekli olan enerjiye denilmektedir, χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir ve iletim bandı (E_C) ile vakum seviyesi arasındaki farka eşittir [4,5]. Kontak öncesi yarıiletkenin fermi seviyesi, metalin fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontak yapıldıktan sonra yarıiletkenin yüzeyindeki elektronlar metale doğru geçerler ve gerilerinde iyonize olmuş vericiler bırakırlar. Yük alışverişi bittikten sonra metal ile yarıiletkenin fermi seviyeleri aynı hizaya gelir, yarıiletkenin

fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar alçalmış olur. Kontakta sonra ki metal ile yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 2.5’de verilmiştir.



Şekil 2.4. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakta önceki enerji bant diyagramı [5]



Şekil 2.5. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakta sonraki enerji bant diyagramı [5]

Yarıiletken tarafındaki potansiyel engelin yüksekliği;

$$eV_D = \phi_m - \phi_s \quad (2.1)$$

Metal tarafında ki potansiyel engelin yüksekliği ise;

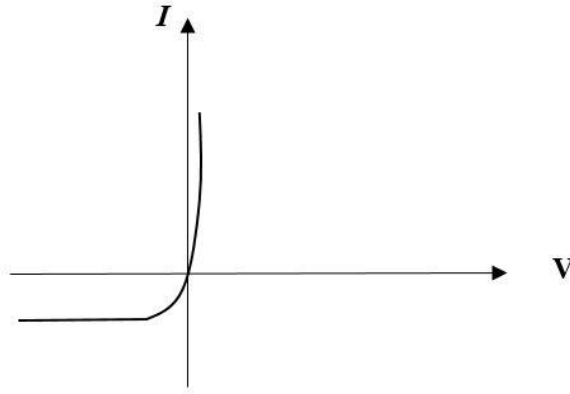
$$e\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad (2.2)$$

Eğer yarıiletkene bir $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçecek elektronlar için engel yüksekliği değişmez ve bundan dolayı yarıiletken metale doğru olan akım değeride değişmez. Fakat yarıiletken tarafındaki iletkenlik bandında ki enerji seviyeleri eV kadar yükseleceği için yarıiletken metale doğru geçecek elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalacaktır [7]. Bu durumda oluşacak net akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'e göre I net akım, I_0 doyma akımı, k Boltzman sabiti, T Kelvin cinsinden sıcaklık değeridir. Metal n-tipi doğrultucu kontakta, $V > 0$ için doğru beslemde, $V < 0$ için kontak ters beslemde.

İdeal bir metal/yarıiletken kontak için doğrultucu kontak davranışı Şekil 2.6'da gösterilmiştir. İdeal doğrultucu kontak davranışında, doğru beslemde akım sonsuza gitmeli, ters beslemde ise küçük bir sızıntı akımı geçmelidir.

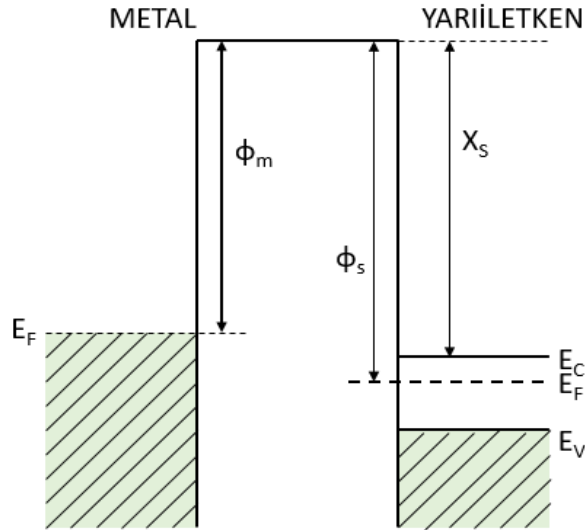


Şekil 2.6. İdeal bir metal/yarıiletken kontakın doğrultucu kontak davranışı

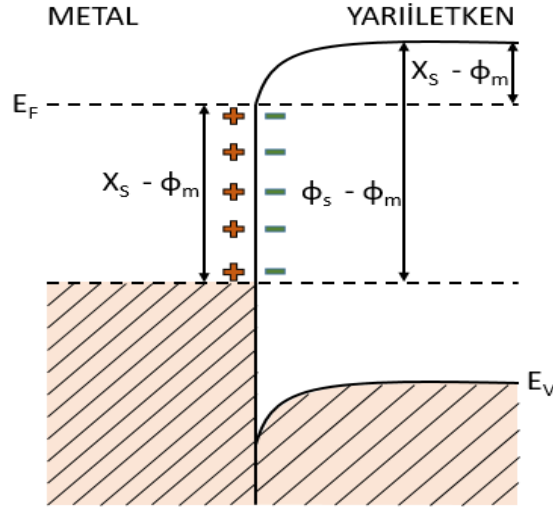
2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal/yarıiletken kontaklarda iletimi sağlayan akım taşıyıcıları (elektron ve boşluklar) akımı her iki yönde de kolayca iletebiliyorlarsa bu tür kontaklara omik kontak denilmektedir. Metalin ve n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonlarına göre, $\phi_m < \phi_s$

olduğu durumda omik kontak oluşur. Metal ile yarıiletkenin kontak yapılmadan önce ki enerji bant diyagramı Şekil 2.7’de verilmiştir. Kontakta önce yarıiletkenin fermi seviyesi, metalin fermi seviyesinden $\phi_s - \phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontak yapıldıktan sonra metalden yarıiletkene doğru arkalarında pozitif yüzey yükü bırakarak bir elektron akışı olur ve yarıiletkenin yüzeyinde negatif yüzey yükleri oluşur. Yük alışverişi bittikten sonra metal ile yarıiletkenin fermi seviyeleri aynı hizaya gelir, yarıiletkenin fermi seviyesi $\phi_s - \phi_m$ kadar alçalmış olur. Kontakta sonraki metal ile yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 2.8’de verilmiştir. Yarıiletken yüzeyindeki fazla elektronlar yüzey yükü tabakası meydana getirirler, yine metalden ayrılan elektronlar da geride yüzey yükü tabakası meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur [8].

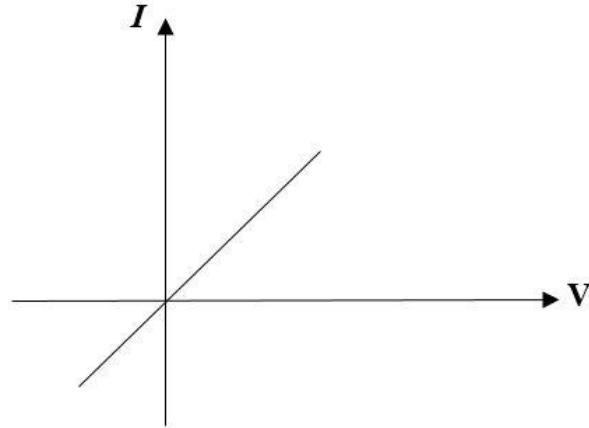


Şekil 2.7. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın kontakta önceki enerji bant diyagramı [5]



Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın kontakta sonra ki enerji bant diyagramı [5]

İdeal bir metal/yarıiletken kontak için omik kontak davranışı Şekil 2.9’da gösterilmiştir. İdeal omik kontak davranışında hem doğru beslemde hem de ters beslemde akım geçişi olduğu görülmektedir.

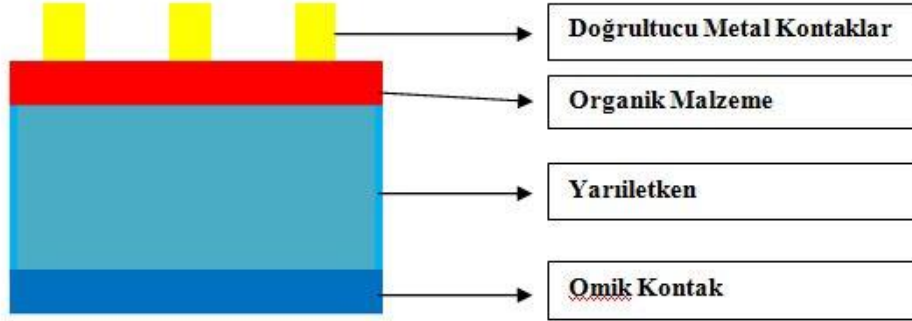


Şekil 2.9. İdeal bir metal/yarıiletken kontakın omik kontak davranışı

2.3. Metal/Organik Malzeme/Yarıiletken/Metal Schottky Diyotların Yapısı

Yarıiletken ile doğrultucu metal kontak arasına organik bir malzeme ile kapladığımız zaman metal/yarıiletken yapısı, metal/organik/yarıiletken bir (MOS) yapıya dönüşür. Bir organik ara yüzey tabakası, metal ile yarıiletkeni birbirinden izole ederken, metal ile yarıiletken arasında ki yük geçişlerini de düzenler. Bundan dolayı MOS yapısındaki diyotların akım iletimi metal/yarıiletken yapılarda ki

diyotlarınkinden farklı olacaktır. Bir MOS yapısının şematik gösterimi Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.10. Metal/organik/yarıiletken yapısının şematik gösterimi

2.4. Metal/Yarıiletken Kontaklarda Akım İletimi

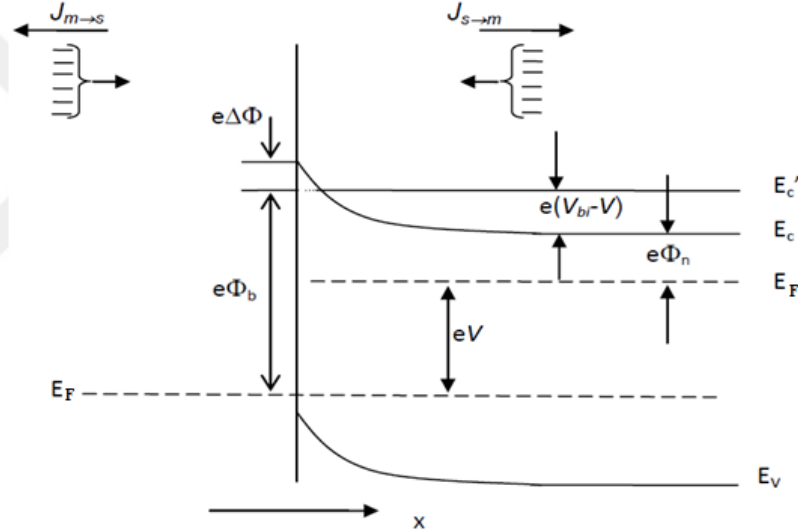
Metal/yarıiletken kontaklarda akım iletimi çoğunluk taşıyıcıları tarafından yapılır [19]. Metal/yarıiletken kontaklara akım iletim mekanizmalarını iyi tayin etmek gerekmektedir [20]. Metal/yarıiletken kontaklarda sıcaklık, yarıiletken tipi, arayüzey durumları vb. gibi faktörlerin etkisi göz önüne alınarak akım iletim mekanizması belirlenmelidir [20]. Başlıca akım iletim mekanizmaları aşağıda verilmiştir;

- Termiyonik Emisyon Teorisi
- Difüzyon Teorisi
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme
- Termiyonik Alan Emisyonu
- Alan Emisyonu
- Çok Katlı Tünelleme
- Uzay yük bölgesinde rekombinasyon
- Yüksüz bölgede rekombinasyon
- Deşik enjeksiyonu
- T_0 etkili akım iletimi

2.4.1. Termiyonik emisyon teorisi

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeni ile taşıyıcıların salınması olayı termiyonik emisyon olarak bilinir. Metal yarıiletken diyotlarda termiyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesi olayıdır.

Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzmann yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için Schottky kontağa ait potansiyel engelini, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir [21,22,23].



Şekil 2.11. Düz beslemdeki metal/yarıiletken kontaktaki imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı [9]

Şekil 2.4’de bir metal/yarıiletken kontağa düz beslem gerilimi uygulandığı görülmektedir. Şekilde $J_{m \rightarrow s}$, metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğunu, $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenenden metale doğru akan akım yoğunluğunu ifade etmektedir. $J_{s \rightarrow m}$, engel yüksekliğini aşabilecek büyüklükte ki hıza sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur [9].

$J_{s \rightarrow m}$ ve $J_{m \rightarrow s}$ ifadeleri aşağıdaki denklemlerle ifade edilir;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.4)$$

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \quad (2.5)$$

Bu akım değeri sızıntı akımı olarak da bilinen doyma akım yoğunluğuna karşılık gelir. Metal/yarıiletken kontağın net akım yoğunluğu J denklem 2.6'de ki gibi ifade edilir [9].

$$J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s} \quad (2.6)$$

Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu pozitif olarak tanımlanırsa bu durumda net elektron akım yoğunluğu denklem 2.7'de ki gibi ifade edilir.

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

A^* Richardson sabiti olup, denklem 2.8'de ki gibi ifade edilir.

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.8)$$

Genel net elektron akım yoğunluğu ifadesi denklem 2.9'de ki ifade edilir.

$$J = J_0 \exp \left(\frac{eV}{kT} - 1 \right) \quad (2.9)$$

J_0 ters doyma akım yoğunluğudur ve denklem 2.10'de ki gibi ifade edilir.

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) \quad (2.10)$$

ϕ_b , engel yüksekliği değerinin imaj kuvveti ile azalması ve $\phi_b = \phi_{b0} - \Delta\phi$ ifadesi dikkate alınırsa J_0 akım yoğunluğu ifadesi denklem 2.11’da ki gibi ifade edilir.

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\phi}{kT}\right) \quad (2.11)$$

2.5. Arayüzey Durum Yoğunluğu

Arayüzey durumları, arayüzeyde ki yasak bant aralığındaki girilebilir enerji seviyesidir. Arayüzey durumu verici veya alıcı tipinde olabilir. Alıcı, enerji seviyesi dolu ise negatif yüklü, boş ise yüksüzdür. Verici ise enerji seviyesi dolu ise yüksüz, boş ise pozitif yüklüdür. Bir gerilim uygulandığında fermi seviyesi geride sabit kalırken, arayüzey tuzak seviyeleri valans ve iletkenlik bantları ile birlikte aşağı ve yukarı doğru hareket ederler. Arayüzey durumları genelde arayüzeye çok yakın yerlerde bulunurlar [24]. Metal/yarıiletken kontaklarda arayüzey tuzakları genel olarak metal ile dengededir. Fakat, metal ile yarıiletkenin arasına kalınlığı 30µm’dan büyük olan bir arayüzey tabakası kaplanırsa yarıiletken ile dengede olur [4].

Metal/yarıiletken kontaklar için arayüzey durum yoğunluğunun değeri denklem 2.12’de ki eşitlik kullanılarak bulunur ;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\epsilon_s}{W_D} \frac{1}{(n(V)-1)} - \frac{\epsilon_i}{\delta} \right] \quad (2.12)$$

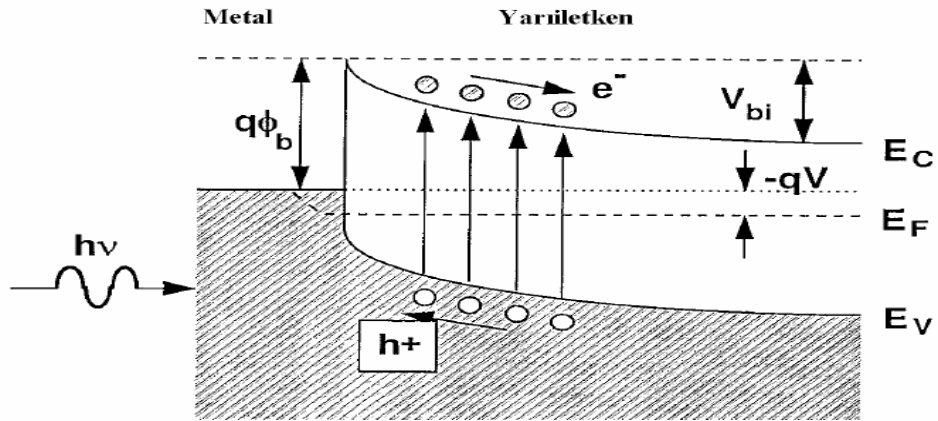
Metal/organik/yarıiletken kontaklar içinse arayüzey durum yoğunluğu değeri denklem 2.13’de ki eşitlik kullanılarak bulunur.

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{W_D} \right) \quad (2.13)$$

Denklem 2.12 ve 2.13’de verilen ifadelerde, q elektron yükü, δ arayüzey tabakası kalınlığı, W_D tükenim tabakası genişliği, ϵ_i arayüzey katmanı geçirgenliği (3 F/cm), ϵ_s yarıiletken geçirgenliği (11,8 F/cm) olarak ifade edilir.

2.6. Metal/Yarıiletken Fotodiyotlar

Fotodiyot, ışığa karşı duyarlı bir diyot olarak tanımlanabilir. Fotodiyotlar, yarıiletken bölgesinde serbest yük taşıyıcılarına sahip, elektriksel işlemler sırasında optik sinyaller üreten elektronik bir sensördür [10]. Bir aydınlatma yoğunluğu altındaki metal/yarıiletken kontak Şekil 2.12’de verilmiştir.



Şekil 2.12. Bir metal/yarıiletken kontakın aydınlatma şiddeti altındaki şematik görüntüsü [10]

Bir fotodiyotun temel çalışma prensibi metal/yarıiletken kontak içindeki foto akım taşıyıcılarının yer değiştirmesi şeklindedir. Doğrultucu kontak kısmına ışık geldiğinde, yeteri kadar enerjiye sahip fotonlar soğurulmaya başlar, fazlalık boşluklar ve elektronlar kontak alanına yayılarak metal/yarıiletken kontakın farklı yerlerinde toplanırlar [10].

Diyot yapısına ve kontakların tipine göre fotodiyotlar farklı şekilde sınıflandırılabilirler (p-i-n diyotlar, pn eklem diyotlar, metal/yarıiletken kontaklar).

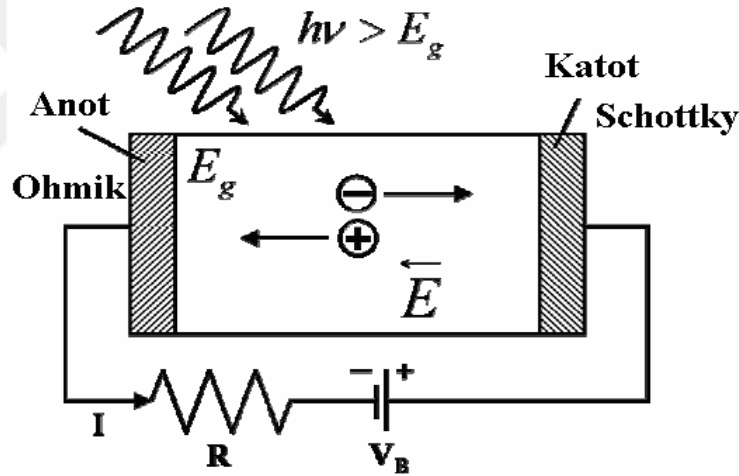
Metal/yarıiletken fotodiyotlar, görünür ışık olan UV’nin algılanmasında mükemmeldir ve yarıiletken foto dedektörler içerisinde en hızlısıdır. Ancak bu fotodiyotlar soğurma bölgesinin ince olmasından ve yüksek katkılı metal tabakalarından olayı düşük verimlidir [10].

Şekil 2.13’de bir fotodiyodun şematik görüntüsü gösterilmektedir. Şekile göre fotodiyotlar üç ana bölüme sahiptirler. Bunlar, iki elektriksel kontak (anot ve katot) ve bir yarıiletken bant aralığıdır. Yarıiletkenin bant aralığından daha da yüksek enerjiye sahip olarak gelen fotonlar, yarıiletkenin içerisinde soğurulurlar. Bu soğurulma işleminin nedeni ise serbest elektron-boşluk çiftinin oluşmasıdır. Kontaklara ters besleme

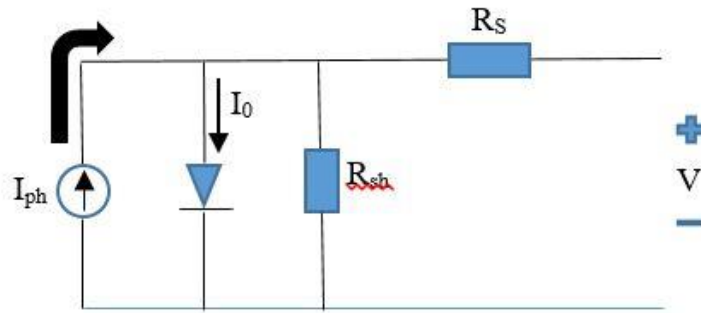
voltajı uygulandığı zaman, yani anot kısmının katot kısmına göre daha düşük potansiyele sahip olduğu durumda, yarıiletkenin karşısında bir elektrik alanı oluşacaktır.

Bir fotodiyot da, elektronlar katoda, boşluklar anoda doğru geçer ve bu geçiş sırasında bir elektrik akımı oluşur. Bu akıma da foto akım denilmektedir.

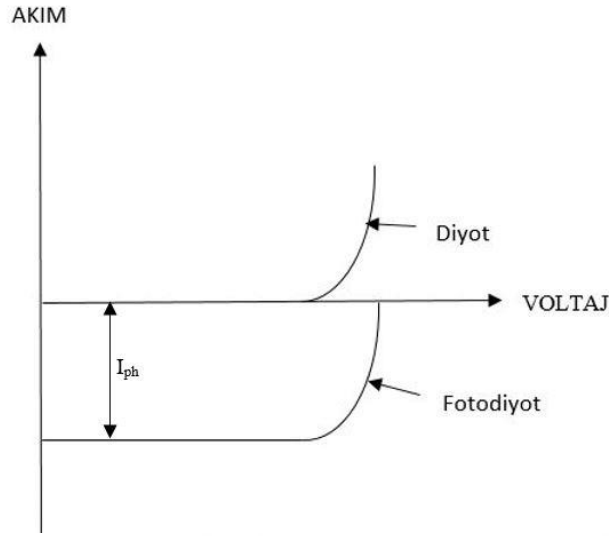
Bir fotodiyota ait eş değer devresi Şekil 2.14’de gösterilmiştir. Şekile bakıldığında diyot ile ters yönde bir foto akımın, diyota paralel bir şönt direncinin ver seri direncin olduğu görülmektedir. Ayrıca Şekil 2.15’de bir fotodiyotun ve doğrultucu bir diyotun akım voltaj eğrilerinin üst üste binmesi şematize edilmiştir. Şekile bakıldığında aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte ters beslemde akım değerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 2.13. Bir fotodiyodun şematik görüntüsü [10]



Şekil 2.14. Bir fotodiyodun eş değer devresi



Şekil 2.15. Bir fotodiyot ve doğrultucu diyodun akım-voltaj eğrisi

2.6.1. Fotodiyotların akım voltaj karakteristiği

Fotodiyota ait akım voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesinde bulunan akım iletim mekanizmaları sayesinde belirlenir. Fotodiyotun akım gerilim karakteristiği şekil olarak normal bir diyotun karakteristiği ile benzerlik göstermektedir. Bir fotodiyota ait, karanlık ve aydınlatma şiddetleri altındaki akım gerilim karakteristiği Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Fotodiyot karanlıktayken üzerinden akan akım, azınlık taşıyıcıları ile termal yoldan oluşan akımdır, bu oluşan akıma karanlık akımı denilmektedir [10]. Şekil 2.16'da A eğrisi fotodiyodun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri de fotodiyodun aydınlatma şiddeti altındaki akım-gerilim karakteristiklerini gösterir. Şekilden görüldüğü üzere, akım gerilim karakteristiği dört bölgeden oluşmaktadır. Birinci bölgede, akım ve voltaj değerleri pozitifdir. Bu bölgede fotodiyoda pozitif gerilim uygulanmıştır, bu bölge fotodiyodun doğru beslem bölgesidir. Ayrıca bu bölge, fotodiyot uygulamaları için uygun değildir, çünkü bu bölgede fotodiyot normal bir diyot davranışı göstermektedir. İkinci bölgede fotodiyotun cevabı yoktur. Üçüncü bölgede, küçük bir I_s akımı akar. Fotodiyodun aktif alanı üzerine gelen ışığın şiddeti artırıldığında zaman, bu bölgedeki eğriler tümüyle, negatif akım yönünde aşağıya doğru değişecektir [25,26]. $V=0$ ekseninde bu eğrilerin akım eksenini kestiği nokta kısa-devre akımı I_{sc} 'yi verir. Sıfır akım noktalarında eğrilerin voltaj eksenini kestiği nokta ise açık-devre voltajı V_{oc} 'yi verir [11]. Çok

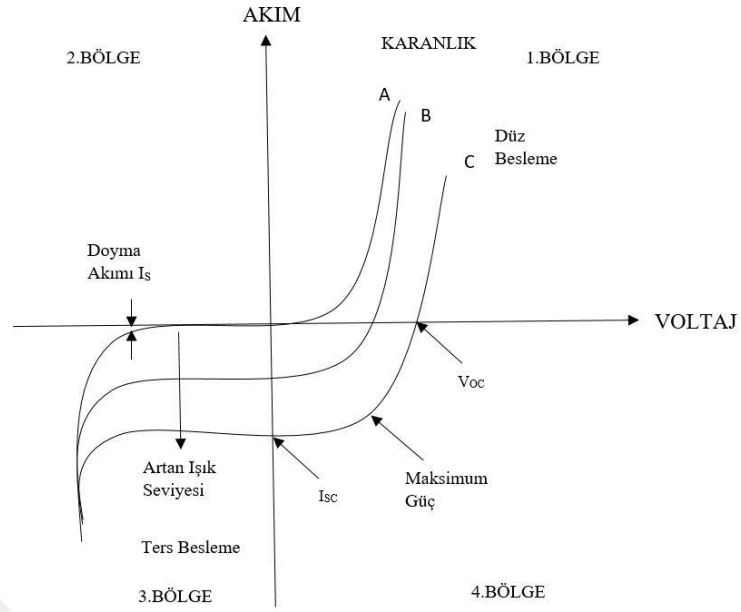
yüksek ters besleme voltajlarında, akım hızlıca artacağından diyotun bozulması söz konusu olabilir. Burası ters bozulma bölgesidir. Dolayısıyla, üçüncü bölge, negatif gerilimin uygulandığı bölge olup, ışığı algılamak için uygun olan bölgedir [27]. Dördüncü bölge ise, fotodiyodun fotovoltaiik bölgesidir.

Fotodiyotlar üç ana karakteristiğe sahiptirler. Bunlar akım-voltaj, kuantum verimi ve bant genişliği (çalışma hızı)'dır. Bir fotodiyodun performansı bu üç karakterizasyon ile ölçülür. Düşük karanlık akımı ve yüksek bozulma voltajı, diyot eklem niteliğinin iki göstergesidir. Düşük karanlık akımı, daha yüksek duyarlılık anlamına gelmektedir, aydınlatma olmadan ve ters besleme altında diyot içinde akan akımdır [10].

Bir fotodiyoda, yeterince yüksek ters besleme uygulandığı zaman, bozulma bölgesinde çalışır. Bu ters besleme voltaj değeri, bozulma voltajına karşılık gelmektedir ve fotodiyodun çalışması için uygulanacak ters besleme voltaj sınırını belirler [28].

Fotodiyot bir akım kaynağıdır ve yeterli miktarda ışık aldığı zaman çalışmaya başlar. Işık, fotodiyodun içinde zayıf bir akımın oluşmasına neden olur. Fotodiyota, bir gerilimin uygulanması sonucunda ve devrede bir yük direncinin bulunması nedeniyle, fotoakım meydana gelir. Bu yük, dış devre direncinin toplamıdır. Fotoakımın, küçük bir kısmı iç direnci üzerinde oluşurken, büyük bir kısmı da dış devre direnci üzerinde oluşmaktadır. Dolayısıyla, fotodiyot, bir gerilim kaynağı veya bir akım kaynağı olarak kullanılabilir [29].

Bir fotodiyotunun doğru akımı analiz edilerek, idealite faktörü, engel yüksekliği, seri direnci ve ters doyma akımı gibi diyot parametreleri belirlenebilir. Doyma akımı ve engel yüksekliği parametreleri $V=0$ 'da düz besleme akımı kesme noktasından elde edilir. İdealite faktörü ise I-V eğrisinin lineer kısmının eğimi ile belirlenir.



Şekil 2.16. Bir fotodiyotun karanlık ve aydınlatma şiddeti altındaki akım-voltaj karakteristiği

2.7. Fotovoltaik Parametreler

Güneş pillerinin ve fotodiyotların yük karakteristikleri çeşitli fotovoltaik parametreler ile analiz edilmektedir. Bu parametreler açık-devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum çıkış gücü (P_m), seri direnç (R_s), doldurma faktörü (FF), arayüz durumları (N_{ss})'dır.

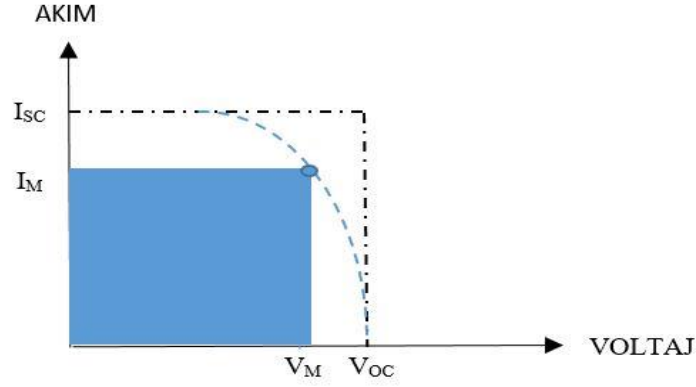
2.7.1. Açık devre voltajı

Işık şiddeti altında bulunan diyotun akım voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj eksenini kestiği noktada ki değere açık devre voltajı denilmektedir. Akım değerinin sıfıra eşit olduğu durumda belirlenmektedir. Denklem 2.14 ile ifade edilmektedir [30];

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (2.14)$$

Denklemden de görüleceği üzere yüksek idealite faktörü değerlerinde yüksek açık devre voltajı değerleri elde edilebilir. Ancak bu durum her zaman geçerli

değildir. Çünkü idealite faktörü'nün yüksek değeri genellikle I_s 'nin yüksek değeri ile mümkündür. Denklem 2.14'e karşılık gelen fotodiyota ait akım voltaj grafiği Şekil 2.17'de verilmiştir. Şekile bakıldığında eğrinin altında kalan maksimum alana göre fotodiyot parametrelerinin hesabı yapılmaktadır.



Şekil 2.17. Bir fotodiyota ait akım voltaj grafiği

2.7.2. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı I_{sc} çıkış akımıdır ve ideal durumda (R_s 'ın olmadığı durumda) uygulanan voltajda aydınlatma şiddeti altında oluşmaktadır. Kısa devre akımı aydınlatma şiddeti ve gelen foton sayısı ile doğru orantılıdır [31].

2.7.3. Maksimum akım

Maksimum akım ifadesi I_{max} ile belirtilmektedir. Maksimum akım değeri, akım yoğunluğu-voltaj grafiğinin altında kalan alanın maksimum olduğu yerin akım ekseninde ki denk geldiği noktadan bulunur.

2.7.4. Maksimum voltaj

Maksimum voltaj ifadesi V_{max} ile belirtilmektedir. Maksimum voltaj değeri, akım yoğunluğu-voltaj grafiğinin altında kalan alanın maksimum olduğu yerin voltaj ekseninde ki denk geldiği noktadan bulunur.

Maksimum voltaj ifadesi V_{max} ile belirtilmektedir. Bulunan maksimum akım ve maksimum voltaj değerleri ile bulunur. Denklem 2.15'de ki gibi ifade edilmektedir.

$$P_{max} = I_{max}V_{max} \quad (2.15)$$

2.7.5. Doldurma faktörü

Doldurma Faktörü, Denklem 2.16’da verilen eşitlik ile ifade edilir ;

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.16)$$

Yüksek band aralıklı malzemelerin ve onların daha yüksek açık devre voltajlarından kaynaklı olarak daha yüksek doldurma faktörleri oluşabilir [10].

2.7.6. Seri direnç

Bir fotodiyot da seri direnç, metal kontakların ve altlık olarak kullanılan yarıiletkenin hacminin direncidir. Fotodiyotda seri direnç metal kontakların ve yarı iletkenin direncinden kaynaklanır [32]. Seri Direnç, fotovoltaiik durumdaki fotodiyodun doğrusallığını tanımlamak için kullanılır. Seri direnç oluşmasına neden olan etkenler;

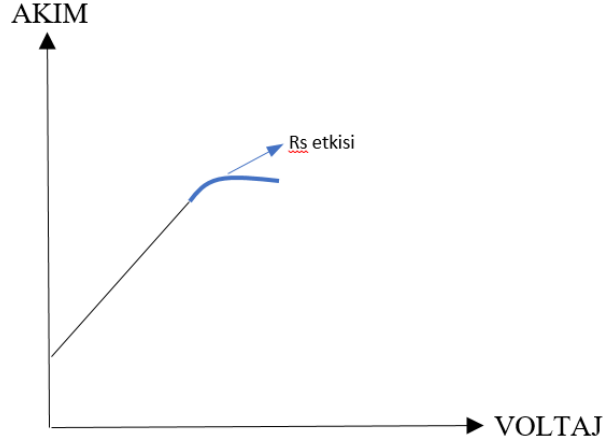
- Doğrultucu kontak üzerinden ölçüm almak için kullanılan tel,
- Kristalin arka yüzeyi üzerine yapılmış olan omik kontak,
- Kristal ile omik kontak arasındaki gövde direnci
- Ara yüzeydeki oluşmuş oksit tabaka ve yüzey kirlilikleri
- Kristalin doğrultucu kontak tarafında bulunan tüketme tabakası

Seri direnç denklem 2.17’de ki eşitlik ile ifade edilmektedir;

$$R_s = \frac{(W_0 - W_d)\rho}{A_j} + R_c \quad (2.17)$$

Denklemde verilen, W_0 yarıiletken altlık kalınlığı, W_d tüketim tabakası genişliği, A_j eklem yayıldığı alan, ρ altlığın öz direnci ve R_c ise kontak direncidir. Normal şartlarda ideal fotodiyotların seri dirence sahip olmaması gerekmektedir. Ancak 10-1000 ohm arasında bir seri dirence sahip oldukları görülmektedir [33,34].

Şekil 2.18’de seri direncin, metal/yarıiletken kontaklarda ki eğrisi grafik üzerinden gösterilmiştir. Şekile bakıldığında seri direncin yüksek voltajlarda etki ettiği ve diyotun ideal davranışından sapmaya neden olduğu görülmektedir.



Şekil 2.18. Metal/yarıiletken kontaklarda seri direncin etkili olduğu bölge

Metal/yarıiletken kontaklarda seri direnci hesaplamak için farklı yöntemler kullanılmaktadır;

- Cheung&Cheung
- Norde
- Lien, So ve Nicolet
- Cibils ve Buitrago
- Bohlin
- Lee, Fung, Beling ve Au

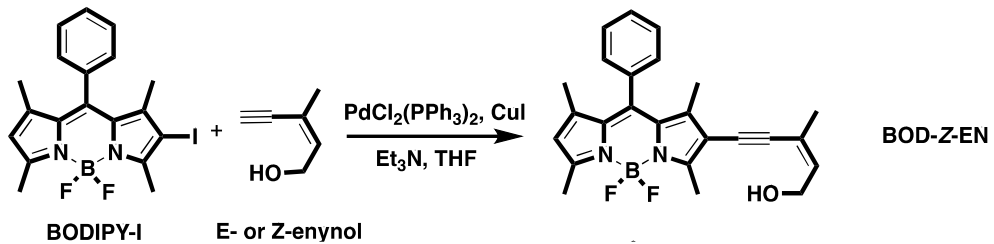
Biz bu çalışmamızda seri direnci hesaplamak için bu yöntemlerden Cheung ve Cheung metodunu kullandık [32].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tez çalışmasında 2'' çaplı, 500 µm kalınlıklı, (100) yönelimli ve 20 Ω-cm öz dirence sahip, fosfor katkılı n tipi bir silisyum kristali, yarıiletken bir alt tabaka olarak kullanılmıştır. Si kristali üzerinde oluşması muhtemel oksit tabakayı kaldırmak için kimyasal temizleme yöntemi uygulanmıştır. Temizleme işleminden sonra, diyotun hazırlanma işlemine geçilmiştir. Diyot hazırlandıktan sonra elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi ve gerekli parametrelerin hesaplanması için karanlık ve farklı aydınlatma şiddeti altında akım-voltaj ölçümleri yapılmıştır.

3.1. BOD-Z-EN Organik Malzemesinin Hazırlanması ve Sentezi

Şekil 3.1'de açık molekül yapısı gözükten BODIPY-Z-ENYNOL maddesinin sentezi literatüre uygun bir metod ile sentezlenmiştir [35]. Kimyasal formülü $C_{25}H_{25}BF_2N_2O$, asıl ismi '4,4-difloro-8-fenil-1,3,5,7-tetrametil-6-[(Z)-3-(5-hydroxy-3-ethylpent 3-en-1-yn-1-yl)]-4-bor-3a,4a-diaza-s-indesen' olan organik malzeme 'BOD-Z-EN' olarak adlandırılmıştır.



Şekil 3.1. BOD-Z-EN organik malzemesinin açık molekül yapısı

Sentez sırasında kullanılan bütün kimyasal reaktifler ticari tedarikçilerden satın alınmış ve bir daha saflaştırma işlemi uygulanmadan kullanılmıştır.

$\text{PdCl}_2(\text{PPh}_3)_2$ (7,02 mg) ve CuI (3,8 mg) içeren THF (10 mL) içine BOD-I (45 mg, 0,1 mmol) ve Z-3-metillpent-2-en-4-yn-1-ol (19 mg, 0,02 mmol) karışımı eklenmiştir. Daha sonra 3,9 mL DIPA eklenmiştir. Reaksiyon karışımı gece boyunca 50 °C’de karıştırılmıştır. Reaksiyonun tamamlanmasından sonra, çözücü, vakum altında uzaklaştırılmış ve kalıntı, üç kez DCM (3x30 mL) ile ekstrakte edilmiştir. Organik kısım, MgSO_4 üzerinde kurutulmuş, süzölmüş ve konsantre edilmiştir. BOD-Z-EN maddesi kolon kromatografisi tekniği ile saflaştırılmıştır.

BOD-Z-EN (31.5 mg, %75 verim, kırmızı katı). ^1H NMR (400 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 7.51-7.48 (çoklu, 3H), 7.29-7.26 (çoklu, 2H), 6.03 (tekli, 1H), 5.84 (üçlünün dörtlüsü, $J = 9.2, 6.8, 1.6$ Hz, 1H), 4.34 (ikilinin ikilisi, $J = 6.4, 1.6$ Hz, 2H), 2.64 (tekli, 3H), 2.57 (tekli, 3H), 1.94 (dörtlü, $J = 1.2$ Hz, 3H), 1.44 (tekli, 3H), 1.40 (s, 3H). ^{13}C NMR (100 MHz, CDCl_3) δ (ppm): 157.8, 156.1, 144.8, 142.4, 142.1, 134.6, 134.3 (2C), 132.5, 130.2, 129.2 (2C), 127.8, 122.2, 121.1, 114.9, 94.0, 87.2, 61.5, 23.3, 14.7, 14.5, 13.4, 13.1. MS HRMS (TOF-APCI): m/z $\text{C}_{25}\text{H}_{25}\text{BF}_2\text{N}_2\text{O}$ için hesaplanan değer : 417.19498 $[\text{M}-\text{H}]^+$, Bulunan değer: 417.20825 $[\text{M}-\text{H}]^+$.

3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada kullanılan n tipi Si kristalin üzerinde bulunan kirlilikleri temizlemek ve mevcut oksit tabakasını yok etmek için kimyasal temizleme işlemi yapılmıştır. Kristalin temizleme işlemi;

- İlk olarak trikloretilen ile 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- Ardından 5 dakika deiyonize su ile temizlenmiştir.
- Daha sonra 5 dakika alkol ile ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- Ardından tekrar deiyonize su ile 5 dakika temizlenmiştir.
- Sonrasında, aseton ile 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- Deiyonize su ile tekrardan 5 dakika temizlenmiştir.
- Sonra, 1:10 HF çözeltisinde 5 dakika temizlenmiştir.
- Ardından da 5 dakika deiyonize su ile yıkanıp, kuru azot ile kurutulmuştur.

3.3. Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken/Metal Diyot Yapısının Hazırlanması

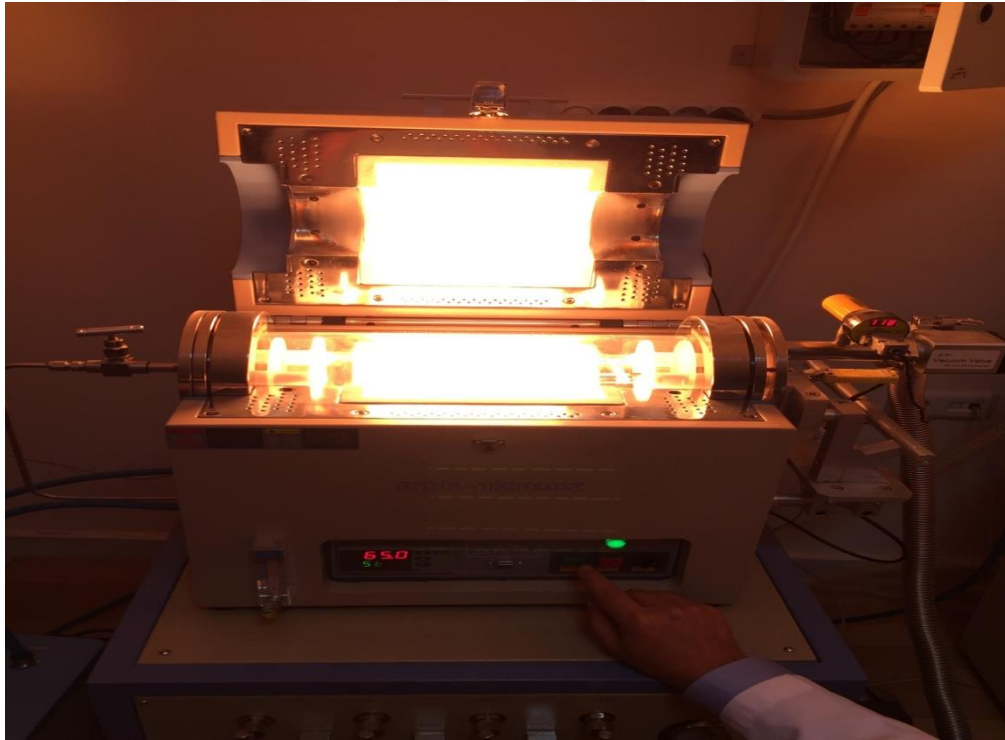
Kimyasal temizleme işlemleri yapıldıktan sonra silisyum kristalinin mat yüzeyi üzerine Nanovak marka termal buharlaştırma cihazı (Şekil 3.2) yardımı ile 100 nm kalınlığında Indium metali (In, %99,999) buharlaştırılmıştır. Ardından OTF-1200X marka fırında (Şekil 3.3), vakum ortamında, 350 °C’de, 30 saniye tavlansmıştır. Daha sonra tekrardan termal buharlaştırma cihazı ile Indium metali 100 nm daha buharlaştırılarak diyotun omik kontak kısmı oluşturulmuştur.

Omik kontak oluşturulduktan sonra, BOD-Z-EN organik malzemesi kloroform çözücüsünde çözülüp (10 mg organik malzeme 1 ml kloroform çözücüsünde çözüldü), spin kaplama cihazı (Şekil 3.4) ile silisyum kristalinin parlak yüzeyine BOD-Z-EN ince filmi 3×10^{-6} cm büyütülerek kurutulmaya bırakılmıştır. BOD-Z-EN ince filminin kalınlığı yüksek frekanslarda ki kapasite-voltaj ölçümünden hesaplanmıştır. Spin kaplama işlemi ilk 30 saniye 500 rpm hızda, daha sonra ki 30 saniye ise 1200 rpm hızda gerçekleştirilmiştir.

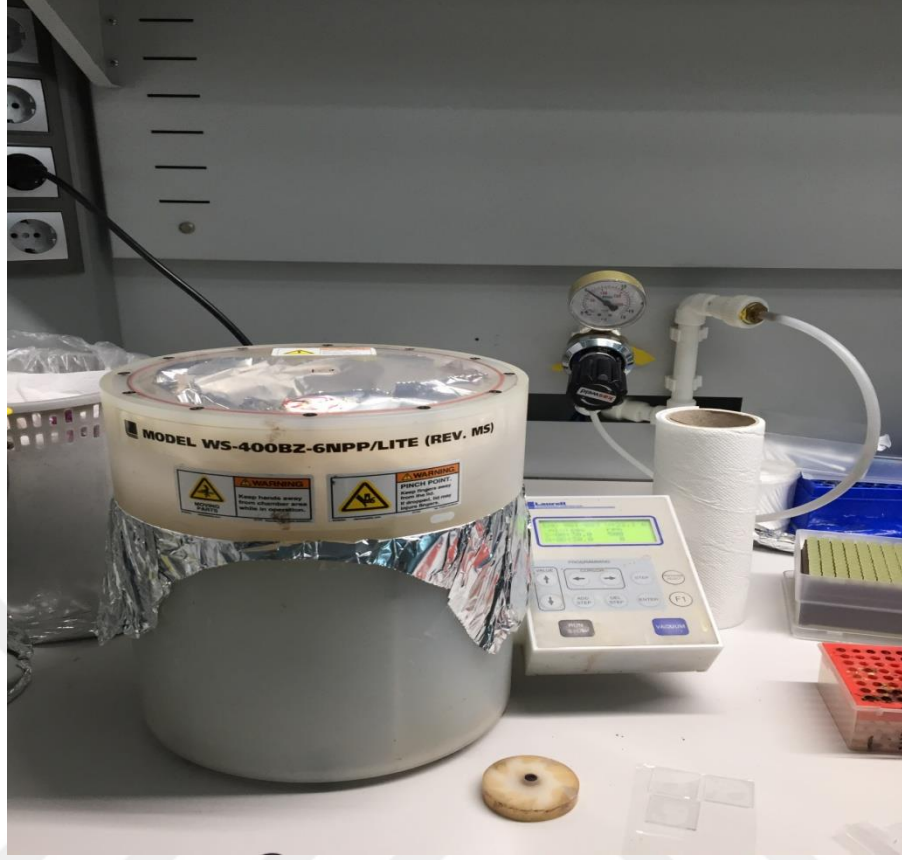
Organik malzemenin spin kaplama yöntemi ile kaplanmasının ardından, BOD-Z-EN kaplanmış yüzeyin üzerine 1mm yarıçaplı metal maske (Şekil 3.5) yerleştirilmiştir. Termal buharlaştırma cihazı (Şekil 3.2) kullanılarak organik ince film yüzeyi üzerine 1 mm yarıçaplı Altın metali 150 nm kaplanarak doğrultucu kontak oluşturulmuştur. Bütün yapılan buharlaştırma işlemleri yaklaşık olarak 10^{-6} Torr basınçta yapılmıştır. Doğrultucu kontağında oluşturulmasıyla birlikte Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyot (Şekil 3.6) yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan yapı Şekil 3.7’de verilmiştir.



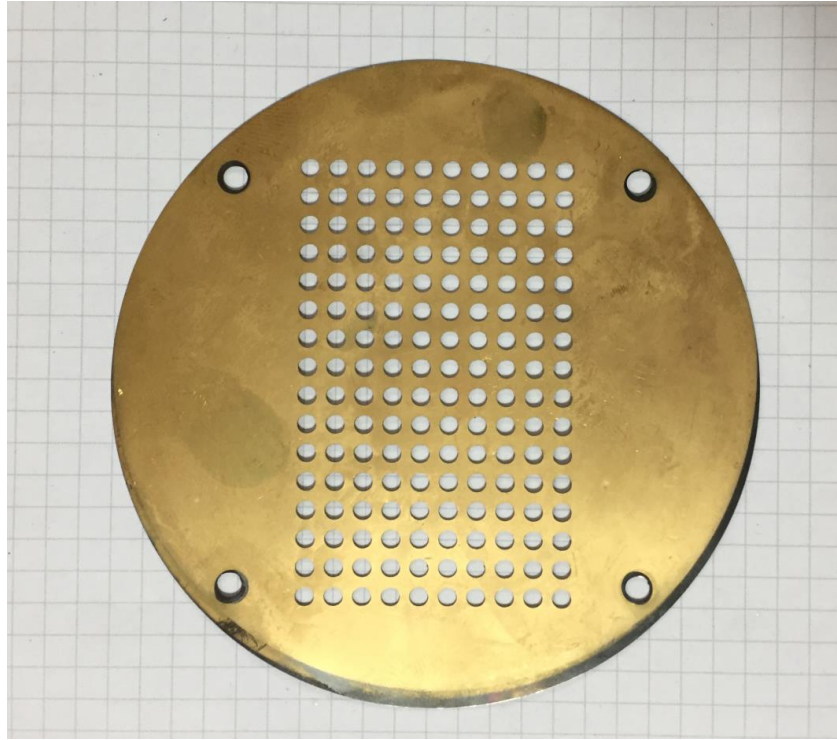
Şekil 3.2. Termal buharlaştırma cihazı



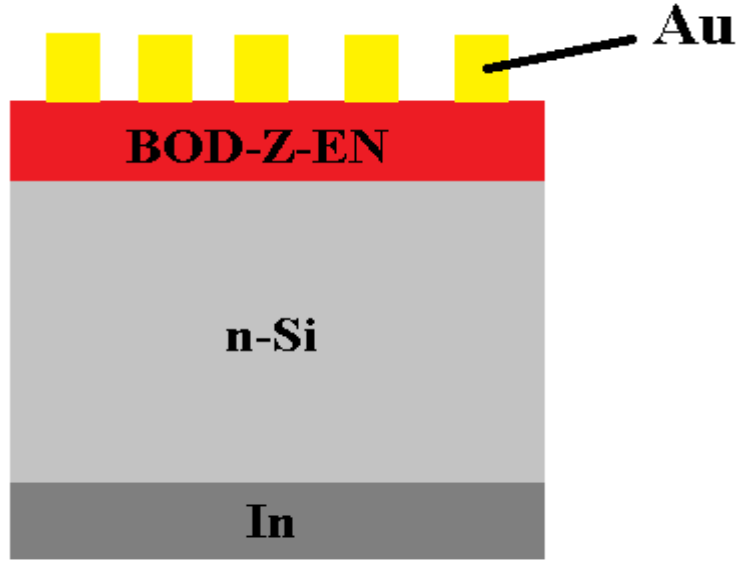
Şekil 3.3. Vakum ortamında tavlama yapılan fırın



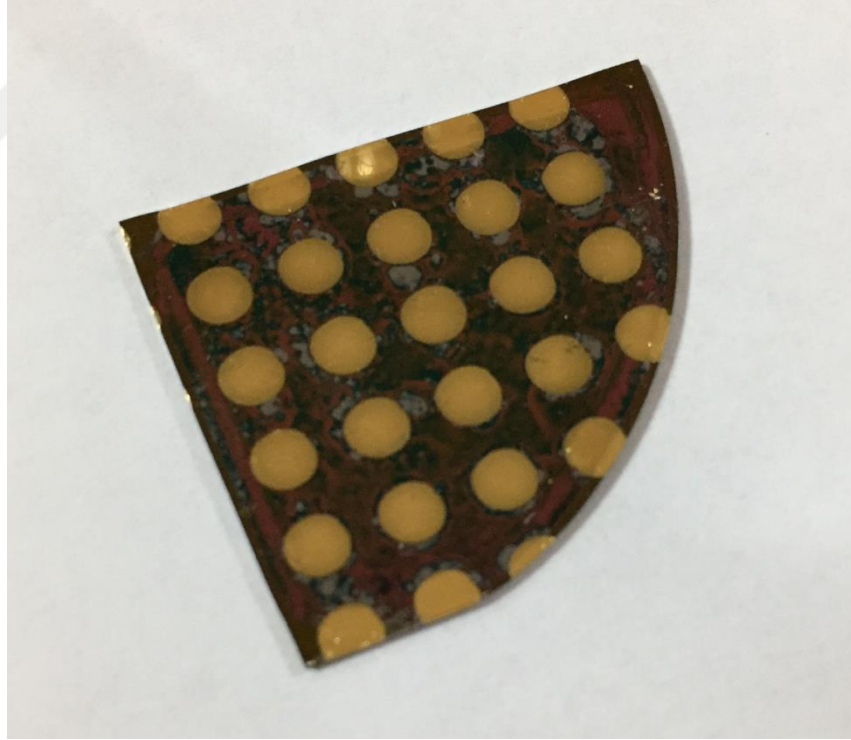
Şekil 3.4. Spin kaplama cihazı



Şekil 3.5. Doğrultucu kontakların yapımı için kullanılan maske



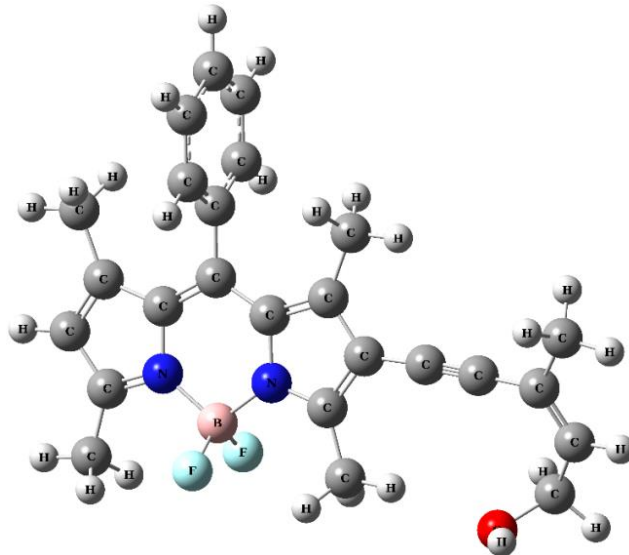
Şekil 3.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In yapısının şematik gösterimi



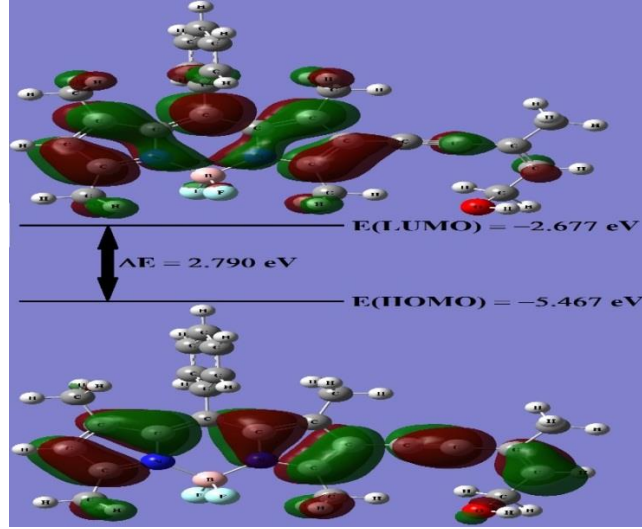
Şekil 3.7. Elde edilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotu

3.4. BOD-Z-EN Molekülünün Enerji Band Aralığı (E_g) Hesaplaması

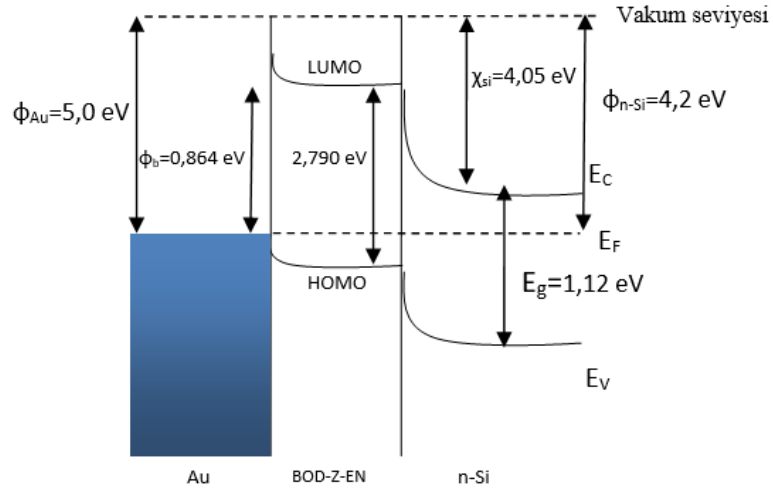
BOD-Z-EN molekülünün yapısı Gaussian 09W program paketi kullanılarak molekülün taban durumundaki gaz fazı içinde optimize edildi [36]. Gaz fazında optimize edilmiş bu moleküler yapı için HOMO ve LUMO şekilleri GaussView5 moleküler göresel görüntüleme arayüz program kullanılarak oluşturuldu [37]. Moleküler yapının optimize geometrisi 6-311G(d,p) temel seti kullanılarak yoğunluk fonksiyon teorisi (DFT) içindeki B3LYP (Becke 3 parametrelili Lee-Yang-Parr korelasyon enerjili karma metodu) fonksiyoneliyle yapıldı [38,39]. Organik malzemenin uzay düzleminde varsayılan yapısı Şekil 3.8’de gösterilmiştir, π bağlarının çokluğu ve konjugasyonundan da elektronca yoğun olduğu söylenmiştir. Şekil 3.9’da HOMO-LUMO seviyeleri gösterilmiş, hesaplamalara göre HOMO seviyesi 5,467 eV, LUMO seviyesi 2,677 eV olarak bulunmuş ve arasındaki enerji band aralığı 2,790 eV olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.10’da Au/BOD-Z-EN/n-Si yapısına ait enerji band diyagramı verilmiştir, şekile baktığımız zaman yarıiletken kristalin enerji band aralığı 1,12 eV, organik malzemenin enerji band aralığı 2,790 eV olduğu görülmektedir. Kontaktan sonraki durumda organik malzeme n tipi özellik gösterdiği için band yapıları aşağıya doğru bükülmektedir.



Şekil 3.8. BOD-Z-EN bileşiğinin molekül şekli



Şekil 3.9. BOD-Z-EN molekülüne ait HOMO LUMO seviyeleri



Şekil 3.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si diyotuna ait enerji band diyagramı

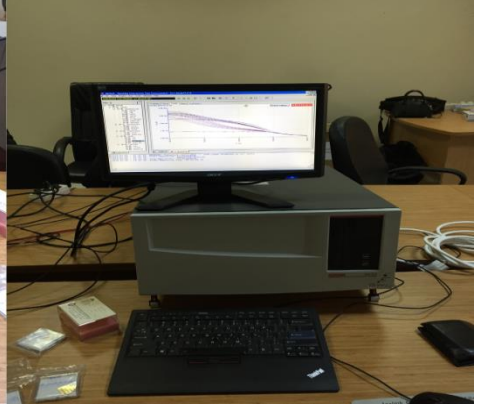
3.5. Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi

Bu çalışmada hazırlanmış olan Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla, akım-voltaj (I-V) karakteristikleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altında ölçülmüştür. Aydınlatma şiddeti uygulamaları ise Sciencetech güneş similatörü (Şekil 3.11a) ile yapılmıştır. Elektriksel karakteristiklerinin belirlenmesi için yapılan akım-voltaj ölçümleri Keitley 4200 SCS ölçüm sistemi (Şekil 3.11b) ile alınmıştır. Diyota -2V ile +2V arasında voltaj uygulanarak elektriksel ölçümler yapılmıştır. Organik tabaka BOD-Z-EN'in ince film kalınlığını bulabilmek için hazırlanan diyotun 1 MHz'de kapasite-voltaj ölçümü Keitley 4200 SCS ölçüm sistemi ile alınmıştır.

(a)



(b)



Şekil 3.11. Akım-voltaj ölçümleri için kullanılan deney düzenekleri:a) Güneş similatörü b) I-V ölçüm sistemi

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri

Bu çalışmada hazırlanan Schottky diyotun akım-voltaj ölçümleri oda sıcaklığında “ Keitley 4200 SCS “ cihazı kullanılarak alınmıştır. Yapılan I-V ölçümü ile diyotun ana parametreleri olan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri bulunmuştur. Schottky diyotlarda akım voltaj ilişkisi, idealite faktörü, engel yüksekliği termiyonik emisyon teorisine (Bölüm 2.4.1) göre aşağıdaki denklem ile verilmektedir ;

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

Düz beslemde, termiyonik emisyon teorisine göre $V > 3kT/q$ bölgesinde hesaplama yapılmaktadır eksponansiyel denklemin ikinci kısmı ihmal olur ve denklem aşağıdaki halini alır ;

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

Burada I diyottan geçen akım, I_0 ters doyma akımıdır ve denklem 4.3’de ki gibi ifade edilir ;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[\frac{-q\phi_b}{kT} \right] \quad (4.3)$$

Bu denklemde ki A diyotun doğrultucu kontak alanı, A^* Richardson sabiti olup değeri n tipi silisyum için $A^* = 120 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ ’dir. T, ortamın sıcaklığının Kelvin cinsinden değeridir ve $T=300 \text{ K}$ alınmıştır, k ise Boltzman sabitidir, değeri $k=8,625 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ ’dir.

Denklem 4.2’de her iki tarafın da logaritması alınıp daha sonra da V ’ye göre türevi alınırsa idealite faktörü değeri bulunur ;

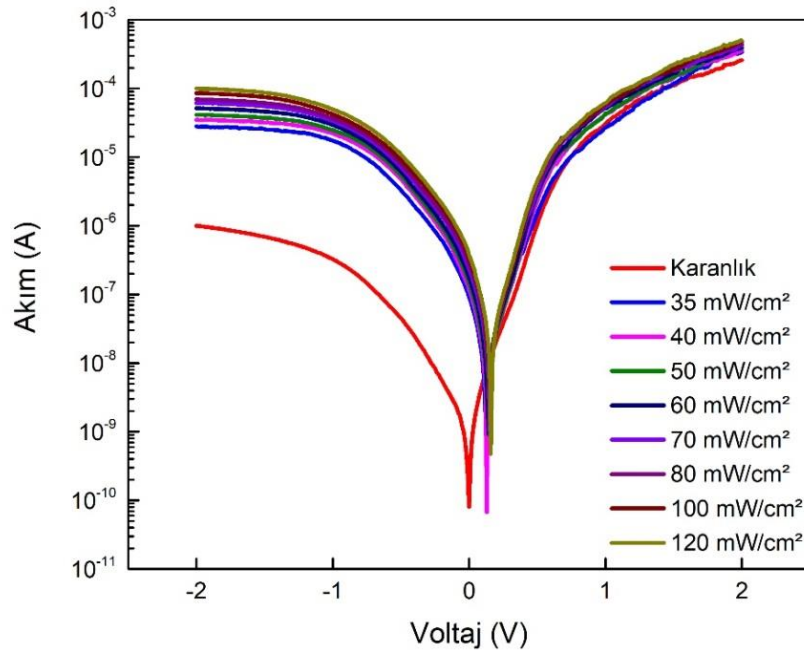
$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

Denklem 4.3 eşitliğinin her iki tarafının da logaritması alınıp ϕ_b ’ye göre çözülürse, engel yüksekliğinin denklemi ;

$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{A A^* T^2}{I_0} \right) \quad (4.5)$$

şeklinde bulunur.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun oda sıcaklığında karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerinde ki yarı logaritmik akım-voltaj grafiği Şekil 4.1’de verilmiştir.



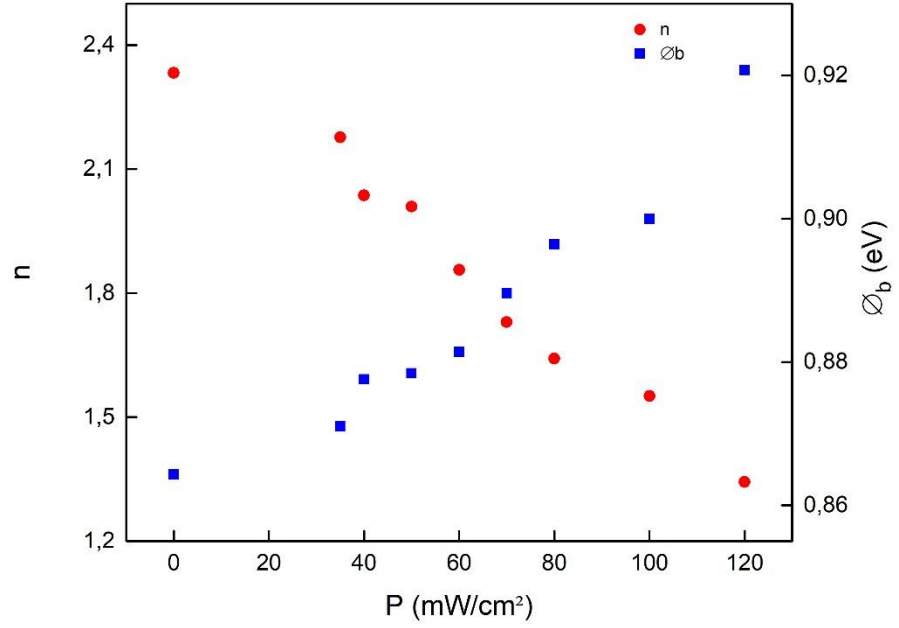
Şekil 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği

Şekil 4.1’de verilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotuna ait I-V grafiğinin eğiminden yararlanılarak idealite faktörü hesaplanmıştır. Doyma akımı (I_0) değeri, I-V grafiğinin lineer bölgesinin, sıfır voltajda I eksenini kestiği noktadan bulunmuştur. Engel yüksekliği değeri ise, diyotun kontak alanı ve Richardson sabiti kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplanan idealite faktörü , doyma akımı ve engel yüksekliği değerleri Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan n , I_0 , ϕ_b değerleri

Aydınlatma Şiddeti	n	I_0 (A)	ϕ_b (eV)
0	2,33	$9,84 \times 10^{-10}$	0,864
35	2,18	$7,59 \times 10^{-10}$	0,871
40	2,04	$5,90 \times 10^{-10}$	0,877
50	2,01	$5,71 \times 10^{-10}$	0,878
60	1,86	$5,09 \times 10^{-10}$	0,881
70	1,73	$3,71 \times 10^{-10}$	0,889
80	1,64	$2,85 \times 10^{-10}$	0,896
100	1,55	$2,48 \times 10^{-10}$	0,899
120	1,34	$1,11 \times 10^{-10}$	0,920

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerinin uygulanan farklı ışık şiddetlerindeki değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin ışık şiddeti ile değişimleri

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere artan aydınlatma şiddeti ile birlikte idealite faktörü değerleri artarken, engel yüksekliği değerleri azalmaktadır.

Metal/yarıiletken kontaklarda yük taşıyıcıları bir yönden diğerine daha kolay iletiliyorsa böyle bir davranışa doğrultma davranışı denilmektedir. Doğru beslem akımının, ters beslem akımına oranına ise doğrultma oranı denilmektedir. İdeal diyotların doğrultma oranı genel olarak 10^8 - 10^{10} civarında olmaktadır [40]. Doğrultma oranının eşitliği ise denklem 4.6’da verilmiştir.

$$RR = \frac{I_F}{I_R} \quad (4.6)$$

Eşitlikte verilenlere göre RR doğrultma oranı, I_F doğru beslem akımı, I_R ters beslem akımıdır. Denklem 4.6 eşitliği kullanılarak hesaplama yapılmış ve Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun doğrultma oranı 257 bulunmuştur.

İdeal diyotlarda idealite faktörü değeri 1’dir, idealite faktörü değerinin 1’den büyük olması diyotların ideallikten saptığını gösterir. Bu ideallikten sapmalar genel

olarak arayüzey durumlarına, arayüzey tabakasının varlığına ve seri direnç etkisine atfedilmektedir [41,42,43]. Bazı araştırmacıların daha önceki yaptığı çalışmalarda benzer sonuçlar görülmüştür. Pakma ve arkadaşları Coronene organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Coronene/n-Si diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini, karanlık için sırasıyla 2,81 ve 0,697 eV, 100 mW/cm² ışık şiddeti için ise sırasıyla 2,07 ve 0,755 eV bulmuşlardır [44]. Soylu ve arkadaşları da ara yüzey tabakası olarak Ru(II) bileşiğini kullanarak oluşturdukları Au/Ru(II)/n-Si diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini, karanlık için sırasıyla 3,51 ve 0,9 eV, 100 mW/cm² ışık şiddeti için 3,22 ve 0,91 eV bulmuşlardır [45]. Yakuphanoglu ve arkadaşları da ara yüzey tabakası olarak organik Novel Cyclotriphosphazene bileşiğini kullanarak oluşturdukları Al/NovelCyclotriphosphazene/p-Si diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini, karanlık için sırasıyla 4,29 ve 0,82 eV, 100 mW/cm² ışık şiddeti için ise sırasıyla 3,95 ve 0,83 eV bulmuşlardır [46]. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunu yukarıdaki literatürle karşılaştırdığımızda daha yüksek engel yükseklikleri ve daha düşük idealite faktörlerine sahip metal/organik malzeme/inorganik yarıiletken Schottky yapısı elde edilmiştir.

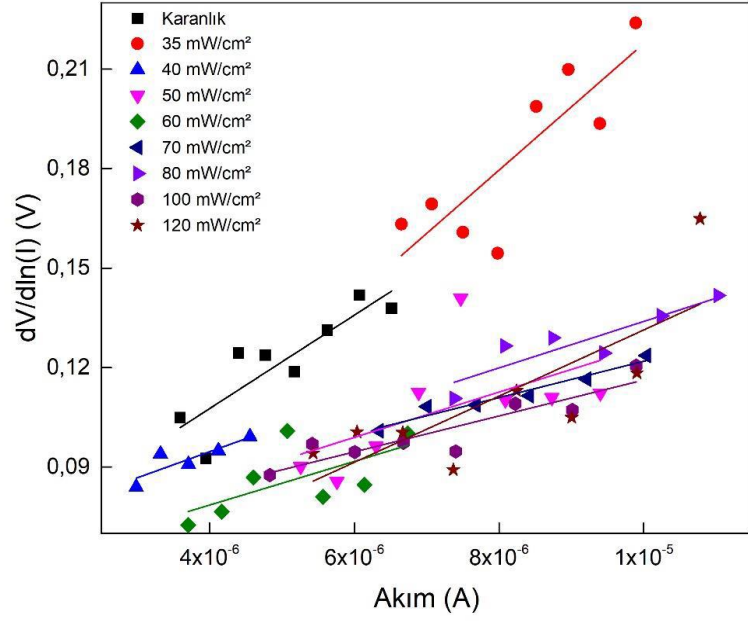
4.2. Cheung Metodu Yardımı ile Seri Direnç Hesaplanması

Üretilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun, karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında, Cheung fonksiyonları yardımıyla seri direnç değerleri hesaplanmıştır. Cheung metoduna göre seri direnç, I-V eğrisinin doğru beslemde lineerleşmeye başladığı bölgede etkilidir. İlgili Cheung fonksiyonları [33];

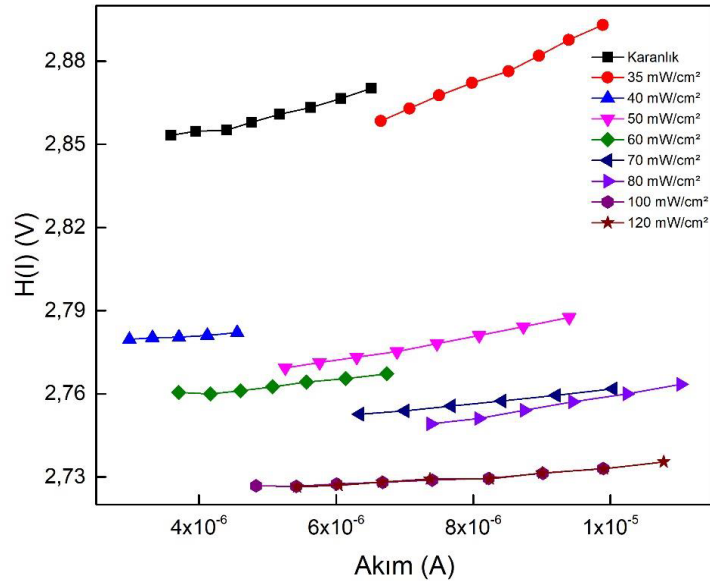
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.7)$$

$$H(I) = n\phi_b + IR_s \quad (4.8)$$

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotuna ait karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir. Bulunan sonuçlar Tablo 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $dV/d(\ln I)$ -I grafiği



Şekil 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $H(I)$ -I grafiği

Tablo 4.2. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan R_s değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	dV/dlnI-I	H(I)-I
	R_s (Ω)	R_s (Ω)
Karanlık	11.023	5.850
35	12.016	8.121
40	10.411	7.191
50	10.188	5.078
60	9.133	4.091
70	6.916	3.836
80	6.817	3.406
100	6.151	3.168
120	5.868	2.320

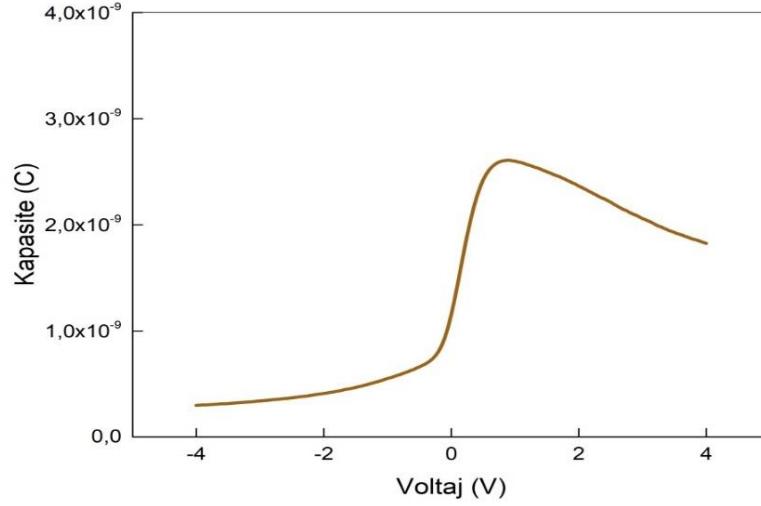
Hesaplamalar sonucunda bulunan seri direnç değerlerine bakıldığında, aydınlatma şiddeti arttıkça seri direnç değerlerinin azaldığı görülmüştür. Literatüre bakıldığında bazı araştırmacıların daha önceki yaptığı çalışmalarda benzer sonuçlar bulunduğu görülmüştür. Soylu ve arkadaşları da arayüzey tabakası olarak Ru(II) organik bileşiğini kullanarak oluşturdukları Au/Ru(II)/n-Si diyotunun seri direnç değerlerini, karanlık için 2620 Ω , 100 mW/cm² ışık şiddeti için 2570 Ω bulmuşlardır [41]. Yakuphanoglu ve arkadaşları da arayüzey tabakası olarak organik Novel Cyclotriphosphazene bileşiğini kullanarak oluşturdukları Al/NovelCyclotriphosphazene/p-Si diyotunun seri direnç değerlerini, karanlık için 59220 Ω , 100 mW/cm² ışık şiddeti için ise 33590 Ω bulmuşlardır [42]. Literatürdeki seri direnç değerlerine bakıldığında k Ω mertebesinde olduğu görülmüştür, bu bizim sonuçlarımızla da uyumludur.

4.3. Organik Arayüzey Tabakası Kalınlığının Hesaplanması

Doğrultucu kontak ile yarıiletken kristal arasına büyütülmüş olan organik arayüzey tabakasının kalınlığı, Şekil 4.5’de ki yüksek frekansta Kapasite-Voltaj (C-V) ölçümlerinden yararlanılarak denklem 4.9’da ki eşitlikten bulunmuştur [47].

$$C_{org} = \frac{\epsilon_t \epsilon_0 A}{\delta} \quad (4.9)$$

Denklemden verilen, ϵ_i arayüzey tabakası geçirgenliği sabiti, ϵ_0 boşluğun geçirgenlik sabiti, δ organik arayüzey tabakası kalınlığı ve A ise etkin yüzey alanıdır. Arayüzey tabakasının kalınlığı Şekil 4.5'deki $C_{org} = 2,6 \times 10^{-9}$ alınarak denklem 4.9'dan $3,21 \times 10^{-6}$ (32,1 nm) hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun 1 MHz'de Kapasite-Voltaj grafiği

4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması

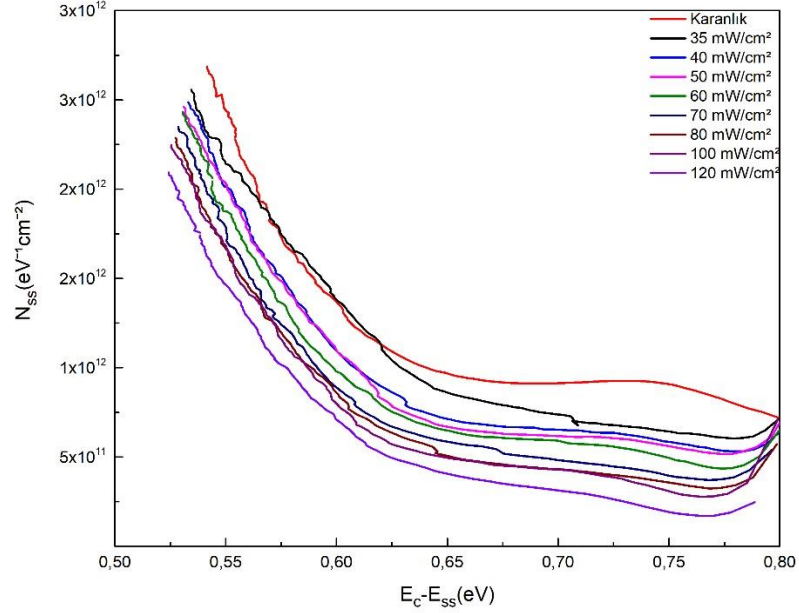
Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), doğru beslem I-V ölçümlerinden, ϕ_b 'nin değeri göz önüne alınarak, enerjinin ($E_c - E_{ss}$) bir fonksiyonu olarak elde edilir. Arayüzey tabakası, yarıiletken ile arayüzey tabakası arasında ortaya çıkmaktadır ve bu arayüzey durumları diyot parametrelerini etkilediklerinden dolayı idealite faktörünün esas değeri olan $n=1$ değerinden sapmalara neden olmaktadır. Arayüzey durum yoğunluğu eşitliği;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\epsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\epsilon_s}{w_D} \right) \quad (4.10)$$

Enerji farkı eşitliği ise;

$$E_c - E_{ss} = q(\phi_b - V) \quad (4.11)$$

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotuna ait karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.

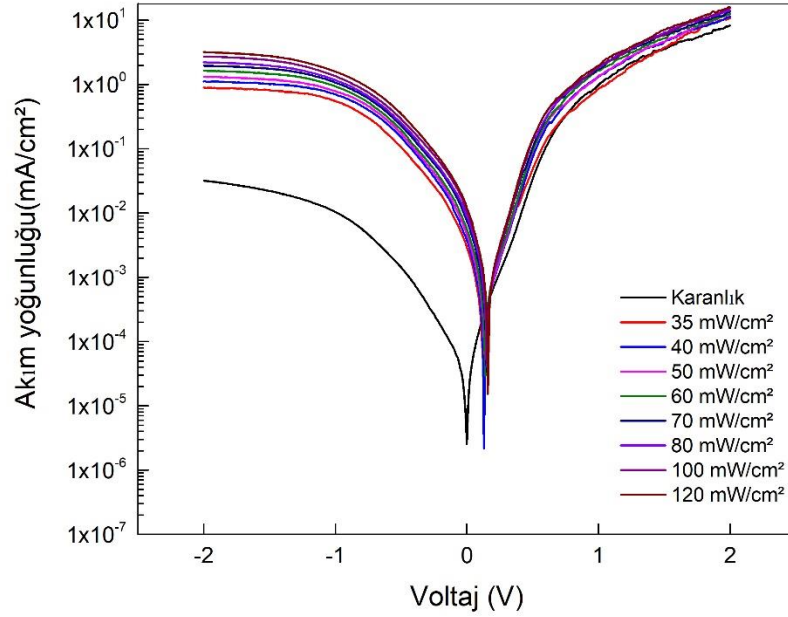


Şekil 4.6. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği

Şekil 4.6’da ki grafiğe göre yapılan hesaplamalarda diyotun arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlık için $2,69 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $7,87 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmekte, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için ise $2,25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $7,09 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmektedir. Şekil 4.6 incelendiğinde arayüzey durum yoğunluklarının enerji bant aralığının ortasından itibaren valans bandına doğru eksponansiyel olarak arttığı, iletim bandına doğru ise azaldığı görülmektedir. Hesaplamalar incelendiğinde arayüzey durum yoğunluğunun aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte azaldığı gözlemlenmiştir. Literatüre bakıldığında benzer sonuçlar görülmektedir. Pakma ve arkadaşları Coronene organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Coronene/n-Si diyotunun arayüzey durum yoğunluğu değerlerinin karanlık için $4,76 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $1,32 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için ise $3,15 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ ile $5,04 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmekte olduklarını bulmuşlardır [44].

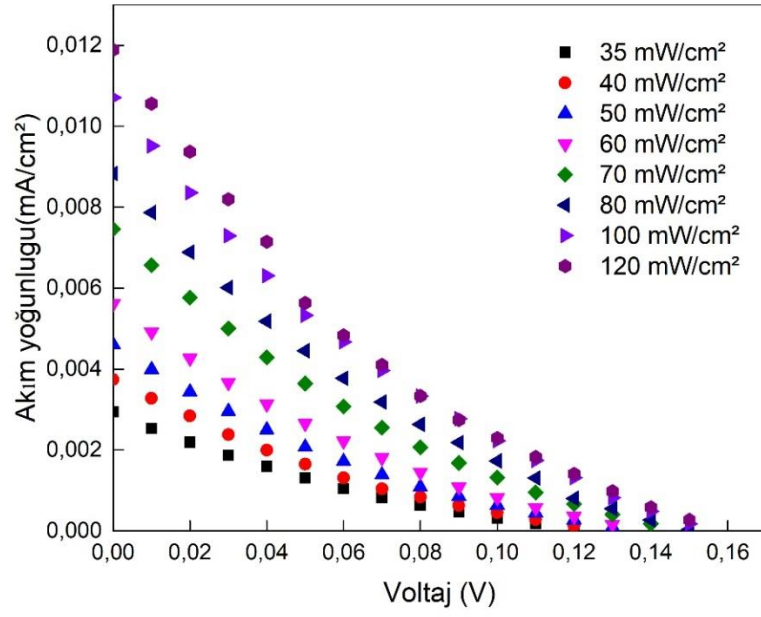
4.5. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotuna ait diyot parametrelerinin değişimleri oda sıcaklığında, karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında incelenmiştir. Ölçülen akım değerleri, doğrultucu kontak dairesinin alanına bölünerek akım yoğunluğuna (J) dönüştürüldü. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotuna ait akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafiği Şekil 4.7’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi diyot, karanlıkta ve çeşitli aydınlatma şiddeti altında iyi bir doğrultma davranışı göstermiştir. Ayrıca, yapının ışığa karşı duyarlılığı olduğu gözlenmiştir. Ayrıca diyotunun ters beslemde ki akımı ışık şiddeti ile birlikte artmaktadır. Diyotun bu davranışı literatüre uygun bir fotodiyot davranışdır.

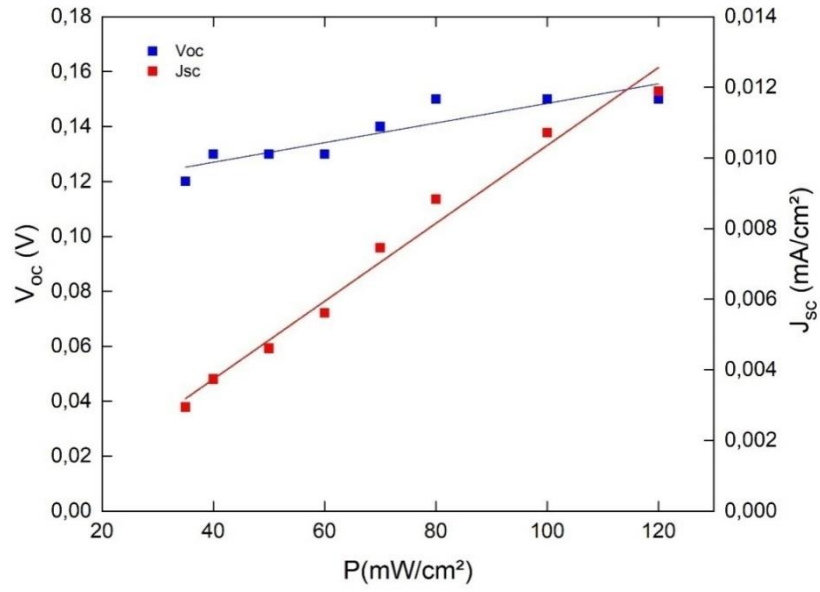


Şekil 4.7. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği

Çeşitli aydınlatma şiddetlerinde Au/BOD-Z-EN/n-Si/In diyotunun kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre voltajını belirlemek için akım yoğunluğu-voltaj (J-V) grafiği Şekil 4.8’de verilmiş ve değerleri Tablo 4.3’de gösterilmiştir. Tüm aydınlatma şiddetlerinde ki kısa devre akım yoğunluğu ve açık devre voltajı değerlerinin grafiği Şekil 4.9’de gösterilmiştir. Şekilden ve tablodan görüldüğü gibi aydınlatma şiddeti arttıkça açık devre voltajı ve kısa devre akım yoğunluğu değerleri artmaktadır.



Şekil 4.8. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu grafiği



Şekil 4.9. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun bütün aydınlatma şiddetlerine karşılık V_{oc} ve J_{sc} grafiği

Tablo 4.3. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan Voc ve Jsc değerleri

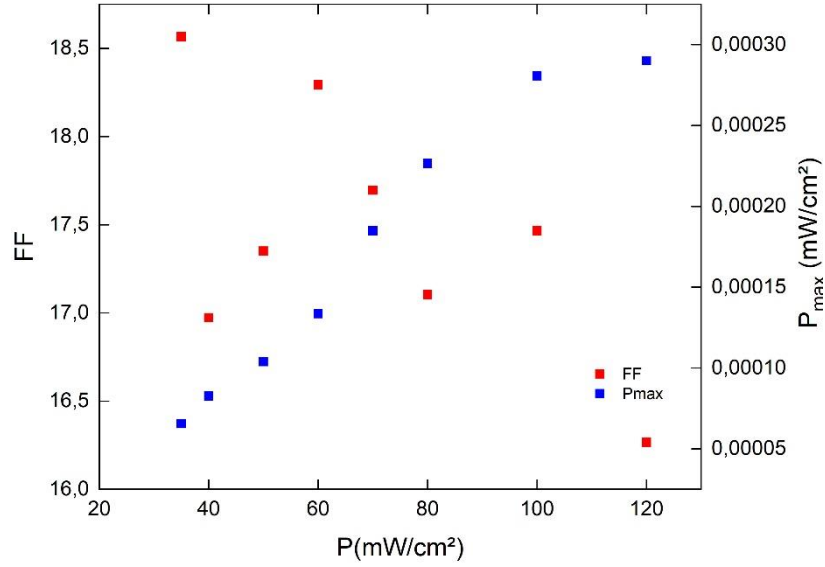
Işık Şiddeti	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)
35	0,12	0,003
40	0,13	0,0037
50	0,13	0,0046
60	0,13	0,0056
70	0,14	0,0074
80	0,15	0,0089
100	0,15	0,0107
120	0,15	0,0118

Karaduman ve arkadaşları Dimetil Sarısı (DMY) organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/DMY/p-Si diyotunun açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerlerini 30 mW/cm² için sırasıyla 0,2 V ve 2,46x10⁻⁸ A, 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti için ise sırasıyla 0,25 V ve 5,69x10⁻⁸ A bulmuşlardır [48]. Yıldız ve arkadaşları ise Çinko Ftalosiyanın (oc-ZnPc) organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/oc-ZnPc/p-Si diyotunun açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerlerini 40 mW/cm² için sırasıyla 0,34 V ve 10,3x10⁻⁶ A, 100 mW/cm² aydınlatma şiddeti için ise sırasıyla 0,4 V ve 72,7x10⁻⁶ A bulmuşlardır [49]. Zeyada ve arkadaşları Neutral Red organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Au/neutral red/p-Si/Al diyotunun açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerlerini 100 mW/cm² için sırasıyla 0,46 V ve 3,56 mA/cm² bulmuşlardır [50]. Kılıçoğlu ve arkadaşları phenyl-BODIPY organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Au/phenyl-BODIPY/n-Si diyotunun açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerlerini 100 mW/cm² için sırasıyla 0,32 V ve 3,78 mA/cm² bulmuşlardır [51].

Şekil 4.8'den belirlenen maksimum akım ve maksimum voltaj, maksimum çıkış gücüne neden olur. Doldurma faktörü eşitliği denklem 4.12'de açıklanmıştır [51];

$$FF = \frac{I_{max}V_{max}}{I_{sc}V_{oc}} \quad (4.12)$$

Çeşitli aydınlatma yoğunluklarına bağlı olarak $P_{\max}$ ve FF değerlerinin grafiği Şekil 4.10'da gösterilmiş ve Tablo 4.3'de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi aydınlatma şiddeti arttıkça, $P_{\max}$ değeri artarken FF değeri azalmaktadır.



Şekil 4.10. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun aydınlatma şiddetine karşılık FF ve Pmax grafiği

Tablo 4.4. Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun hesaplanan V_m , I_m , P_m ve FF değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	V_m (V)	I_m (mA)	P_m (W)	FF
35	0,05	0,0013	6,56x10 ⁻⁵	18,56
40	0,05	0,0016	8,25x10 ⁻⁵	16,97
50	0,05	0,0021	10,4x10 ⁻⁵	17,35
60	0,06	0,0022	13,3x10 ⁻⁵	18,29
70	0,06	0,0031	18,4x10 ⁻⁵	17,69
80	0,06	0,0037	22,6x10 ⁻⁵	17,10
100	0,06	0,0046	28x10 ⁻⁵	17,46
120	0,06	0,0048	29x10 ⁻⁵	16,26

Kılıçoğlu ve arkadaşları phenyl-BODIPY organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Au/phenyl-BODIPY/n-Si diyotunun doldurma faktörü değerini 100 mW/cm^2 için 48 bulmuşlardır [49]. Riad p-MgPc organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturduğu Au/p-MgPc/n-Si diyotunun doldurma faktörü değerini 50 mW/cm^2 için 48 bulmuştur [52].



BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, 500 μm kalınlıklı, (100) yüzey yönelimli, 20 $\Omega\text{-cm}$ öz dirence sahip n tipi Si kristali kullanılmıştır. BOD-Z-EN organik bileşiği spin kaplama (spin coating) yöntemi ile ince film olarak büyütülerek Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotu oluşturulmuştur. Ürettiğimiz diyotun elektriksel karakteristiğini incelemek için oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetlerinde I-V ölçümleri alınmıştır. Alınan ölçüm sonuçlarından diyot parametrelerinin hesabı yapılmıştır.

Üretilen Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun I-V ölçümleri karanlık ve sekiz farklı aydınlatma şiddeti (35-40-50-60-70-80-100-120 mW/cm^2) için -2V ile +2V aralığında alınmıştır. LnI-V eğrisi incelendiğinde ters beslem bölgesinde bir doyuma sahip olduğu, doğru beslem bölgesinde de ideallikten sapmalar olduğu görülmüştür. Diyotun LnI-V grafiğinden doğrultucu özelliğe sahip olduğu görülmüştür. LnI-V karakteristiklerinden, bir Schottky diyot için önemli olan, idealite faktörü, engel yüksekliği, doyma akımı, seri direnç gibi parametreler termiyonik emisyon teorisinden faydalanarak hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun idealite faktörü değeri karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için sırasıyla 2,33 ve 1,55 bulunmuştur. Engel yüksekliği değeri karanlık ve 100 mW/cm^2 için sırasıyla 0,864 eV ve 0,899 eV bulunmuştur. Doyma akımı değeri ise karanlık ve 100 mW/cm^2 için sırasıyla $9,84 \times 10^{-10}$ mA ve $2,48 \times 10^{-10}$ mA bulunmuştur. Literatürde Au/n-Si Schottky diyotu için engel yüksekliği değeri yaklaşık olarak 0,750 eV olarak rapor edilmiştir. BOD-Z-EN organik malzemesi Au/n-Si yapısına eklendiğinde engel yüksekliği 0,864 eV bulunmuştur. Bu durumda organik malzeme sayesinde engel yüksekliği yaklaşık olarak 0,11 eV yükseltilmiştir.

Termiyonik emisyon teorisine göre ideal diyotlar için idealite faktörü değeri 1'dir. Hesapladığımız idealite faktörü değerinin 1'den büyük olmasının nedeni arayüzey tabakasının varlığına, arayüzey durum dağılımlarına, istenmeden oluşan oksit tabakasına ve seri direnç etkisine atfedilmiştir. $\ln I-V$ eğrisinden hesaplanan değerlere göre idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri arasında lineer bir ilişki vardır. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte idealite faktörü değeri azalırken engel yüksekliği değeri artmaktadır. Bu durum yapmış olduğumuz Schottky diyotun ışığa karşı duyarlı olduğunu ve fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun, $\ln I-V$ grafiğinde yüksek voltaj bölgelerinde ideallikten sapmalar meydana gelerek aşağı doğru bükülmeler gözlenmiştir. Bu bükülmeler seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır. Bu çalışmada Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki seri direnç değerleri Cheung ve Cheung metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Seri direnç değeri karanlık ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için sırasıyla 5850Ω ve 2375Ω olarak hesaplanmıştır. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte seri direnç değerinin azaldığı görülmüştür. Bu durumun aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte yarıiletkenin valans bandındaki veya tuzaklardaki yüklerin iletim bandına uyarılmasına ve iletkenliği arttırmasına atfedilmiştir.

Yapmış olduğumuz diyotun Arayüzey durum yoğunluğu karakteristiği, doğru beslem $I-V$ ölçümlerinden, engel yüksekliği'nin değeri göz önüne alınarak, enerjinin (E_c-E_{ss}) bir fonksiyonu olarak hem karanlık hem de farklı aydınlatma şiddetleri altında elde edilmiştir. Arayüzey durum yoğunluklarının hem karanlık için hem de uygulanan tüm aydınlatma şiddetleri için iletim bandından yasak enerji aralığına doğru azalarak bir minumum noktasından geçtiği daha sonra da artmaya başladığı gözlenmiştir. Yapılan hesaplamalarda diyotun arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlık için $2,69 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ ile $7,87 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ arasında değişmekte, 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için ise $2,25 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ ile $7,09 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ arasında değişmektedir. Hesaplama sonuçlarına bakıldığında aydınlatma şiddetinin arayüzey durum yoğunluğunu azalttığı görülmektedir.

LnI-V grafiğinde ters beslemde ki eğrilere bakıldığında karanlıkta ki akım değeri 1×10^{-6} ve 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddetinde ki akım değeri ise $8,55 \times 10^{-5}$ bulunmuştur. Aydınlatma şiddeti arttıkça ters beslemde ki akım değerinin arttığı görülmüştür. Bu durum yapmış olduğumuz Schottky diyotun fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun ışığa karşı duyarlılığını belirlemek amacıyla farklı aydınlatma şiddetleri altında fotodiyot parametreleri incelenmiştir. Öncelikle diyotun çeşitli aydınlatma şiddetlerindeki akım yoğunluğu-voltaj grafiği çizdirilmiştir. Bu grafikten açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri bulunmuştur. 100 mW/cm^2 aydınlatma şiddeti için açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri sırasıyla 0,15 V ve 10,71 mA bulunmuştur. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte açık devre voltajı ve kısa devre akım yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Akım yoğunluğu-voltaj grafiğinden maksimum voltaj ve maksimum akım değerleri bulunup, maksimum voltaj ve maksimum akım değerlerinden de maksimum güç değeri hesaplanmıştır. Aydınlatma şiddetinin artırılmasıyla birlikte maksimum voltaj, maksimum akım ve maksimum güç değerlerinin arttığı görülmüştür. Daha sonra farklı aydınlatma şiddetleri için doldurma faktörü değerleri hesaplanmıştır. Doldurma faktörü değerlerinin aydınlatma şiddetinin artmasıyla birlikte azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak elde etmiş olduğumuz Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki davranışları incelenip parametreleri hesaplanmıştır. Diyotun aydınlatma şiddeti altındaki davranışları incelendiğinde yapmış olduğumuz Au/BOD-Z-EN/n-Si/In Schottky diyotunun fotodiyot olarak optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Sze, S.M., Physics of Semiconductor Devices, John Wiley&Sons, New York, 1982.
- [2] Schottky, W, Halbleitertheorie der Sperrschicht Naturwissenschaften, 843, 1938.
- [3] Ligenza, S., Mechanisms for Silicon Oxidation in Steam and Oxygen, J. Phys. Chem. Solids, 131-136, 1960.
- [4] Rhoderick, E.H., Williams, R.H. Metal-Semiconductor Contacts, Claredon Pres, Second Edition, Oxford, 1988.
- [5] Rhoderick, E.H., Metal–Semiconductor Contacts (Electrical & Electronic Engineering Monographs), Oxford University Press, Oxford, 1978.
- [6] Tung, T., Recent Advances in Schottky Barrier Concepts, Mater. Sci. Eng. R: Reports, Volume 35, 1-138, 2001.
- [7] Brillson, L.J, Contacts to Semiconductors, Fund. and Tech., New Jersey, 1993.
- [8] Tuğluoğlu, N., Koralay, H., Akgül, K. B., Çavdar, Ş., Detailed Analysis of Device Parameters by Means of Different Techniques in Schottky Devices, J. Electron. Mater., Vol 45, 3859-3865, 2016.

- [9] Bobby, A., Shiwakoti, N., Gupta, P.S., Antony, B.K., Barrier Modification of Au/n-GaAs Schottky Structure by Organic Interlayer, Indian J. Phys., Vol 90, 307-312, 2016.
- [10] Gündüz, B., Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Aaştırılması, Fıtar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2007.
- [11] Yüksel, Ö. F., Tuğluoğlu, N., Şafak, H., Karadeniz, S., The Double Gaussian Distribution of Inhomogeneous Barrier Heights in The Organic-Inorganic Schottky Devices, Phys. Status Solidi (a), 209, 2313-2316, 2012.
- [12] Yüksel, Ö. F., Şafak, H., Kuş, M., Investigation of Current-Voltage and Capacitance-Voltage Characteristics of Ag/perylene-monoimide/n-GaAs Schottky Diode, Curr. Appl. Phys., Vol 12, 1510-1514, 2012.
- [13] Lee, C.P., Li, C.T., Ho, K.C., Use of Organic Materials in dye-sensitized Solar Cells, Mater. Today, 20, 267-283, 2017.
- [14] Yahia, I.S., Farag, A.A.M., Yakuphanoglu, F., Farooq W.A., Temperature dependence of electronic parameters of organic Schottky diode based on fluorescein sodium salt, Synthetic Met., 161, 881-887, 2011.
- [15] Sevinç, G., Bordipirometen (BODIPY) Bileşiklerinin Sentezi ve Yapılarının Aydınlatılması, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 2013.
- [16] Lin, Y. C., Modified BODIPY Probes to explore peroxisome function, Durham theses, Durham University. Available at Durham E-Theses, 2010.
Online: <http://etheses.dur.ac.uk/647>.

- [17] Yakuphanoglu, F., Electrical Characterization and Interface State Density Properties of the ITO/C70/Au Schottky Diode, J. Phys. Chem., Vol 111, 1505-1507, 2007.
- [18] Crowel, C.R. Sze, S.M., Current Transport In Metal Semiconductor Barriers, Solid State Electron., Vol 9, 1035-1048, 1966.
- [19] Aldert, V.D.Z.. , Solid State Physical Electronics, Prentice Hall, New Jersey, 1968.
- [20] Boghdachi, S., Badali. Y., Azizian. K.Y., Current-Transport Mechanisms of The Al/(Bi₂S₃-PVA Nanocomposite)/p-Si Schottky Diodes in The Temperature Range Between 220 K and 380 K, J. of Electron. Mater., Vol 47, 6945-6953, 2018.
- [21] Evans, F.J.H., El Nahass. M.M., Farag. A.A.M., Elhaji. A., Current Transport Mechanisms and Deep Level Spectroscopy of Au/n-Si Schottky Barrier Diodes, Microelectron. Eng., Vol 88, 3353-3359, 2011.
- [22] Cowley, A.M., Sze, S.M., Surface State and Barrier Height of Metal Semiconductor Systems, J. Appl. Phys., Vol 36, 3212-3221, 1965.
- [23] Sharma, B.L., Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their Applications, Plenum Press, New York, 1984.
- [24] Altındal, Ş., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Tataroğlu, A., The Role of Interface States and Series Resistance on the I-V C-V characteristics in Al/SnO₂/p-Si Schottky Diodes, Solid State Electron., Vol 47, 1847-1854, 2003.

- [25] Yakuphanoglu, F., Mensah Darkwa K., Al Ghamdi A.A., Gupta R.K., Farooq W.A., Novel Organic Doped Inorganic Photosensors, *Microelectron. Eng.*, Vol 160, 27-33, 2016.
- [26] Sze, S.M., Gibbons, G., Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs and GaP, *Appl. Phys. Lett.*, Vol 8, 111-119, 1966.
- [27] Zeyeda, H.M., El Nahass, M.M., El Shabaan, M.M., Photovoltaic Properties of The 4H-pyrano [3.2-c] Quinoline Derivatives and Their Applications in Organic-Inorganic Photodiode Fabrication, *Synthetic Met.*, Vol 220, 102-113, 2016.
- [28] Makhoulf, M.M., El Nahass, M.M., Zeyeda, M.H., Fabrication Temperature Dependent Current-Voltage Characteristics and Photoresponse Properties of Au/ α -PbO₂/p-Si/Al Heterojunction Photodiode, *Mat. Sci. Semicon. Proc.*, Vol 58, 68-75, 2017.
- [29] Şafak, H., Şahin, M., Yüksel, Ö.F., Analysis of I-V Measurements on Ag/p-Sns and Ag/p-SnSe Schottky Barriers, *Solid State Electron.*, Vol 46, 49-52, 2002.
- [30] Hovel, H.J., Solar Cells, *Semiconduc. Semimet.*, Vol. 11, Academic Press, New York, 1975.
- [31] Çavaş, M., Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Foto Diyotların Üretilmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 2011,
- [32] Cheung, S.K., Cheung, N.W., Extraction of Schottky Diode Parameters From Forward Current-Voltage Characteristics, *Appl. Phys. Lett.*, Vol 49, 85-87, 1986.
- [33] Kallmann, H., Pope, M., Photovoltaic effect in organic crystals, *J. Chem. Phys.*, Vol 30, 585-591, 1959.

- [34] Yakuphanoglu, F., Electronic and Photovoltaic Properties of Al/p-Si/copper/phthalocyanine Photodiode Junction Barrier, Sol. Energ. Mat. Sol. C., Vol 91, 1182-1186, 2007.
- [35] Üçüncü, M., Karakuş, E., Emrullahoğlu, M., A BODIPY- based Fluorescent Probe for Ratiometric Detection of Gold Ions: Utilization of Z-Enynol as The Reactive Unit, T. Roy. Soc. Chem., Vol 52, 8247-8250, 2016.
- [36] Frisch, M.J., Trucks, G.W., Schlegel, H.B., Scuseria, G.E., Gaussian 09, Revision C.01, Gaussian Inc, Wallingford, CT, 2009.
- [37] Dennington, R., Keith, T., Millam, J., GaussView, Version 5, Shawnee Mission KS, Semichem Inc, 2009.
- [38] Becke, A.D., Density-Functional Thermochemistry 3 the Role of Exact Exchange, J. Chem. Phys., Vol 98, 5648-5652, 1993.
- [39] Lee, C., NMR Study of Li in Al-Li-Cu Icosahedral Alloys, Phys. Rev., Vol 37, 9053-9056, 1988.
- [40] Farag, A.A.M., Yahia, I.S., Rectification and Barrier Height Inhomogeneous in Rhodamine B Based Organic Schottky Diode, Synthetic Met., Vol 161, 32-39, 2011.
- [41] Deng, X.Y., Zheng, L.P., Yu, G., Cao, Y., Polymer heterojunction photodiodes with MEHPPV doped with organic acceptors, Synthetic Met., 135-136, 823-824, 2003.
- [42] Singh, A., Characterization of interface states at Ni/n CdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation, Solid State Electron., Vol 28, 223-232, 1985.

- [43] Cova, P., Singh, A., Temperature dependence of I-V and C-V characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky barrier type diodes, Solid State Electron., 33, 11-19, 1990.
- [44] Pakma, O., Cavdar, Ş., Koralay, H., Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö.F., Improvement of diode parameters in Al/n-Si Schottky diodes with Coronene interlayer using variation of the illumination intensity, Physica B, 527, 1-6, 2017.
- [45] Soylu, M., Tataroğlu, A., Ocaya, R., Dere, A., Dayan, O., Şerbetci, Z., Abdullah, G., Al-Sehemi, A., Al-Ghamdi, A., Yakuphanoglu, F., Ruthenium(II) Complex Based Photodiode for Organic Electronic Applications, J. Electron. Mater., Vol 47, 828-833, 2018.
- [46] Tataroğlu, A., Özen, F., Koran, K., Dere, A., Görgülü, A.O., Al-Senany, N., Al-Ghamdi, A., Farooq, W.A., Yakuphanoglu, F., Structural, Electrical and Photoresponse Properties of Si-based Diode with Organic Interfacial Layer Containinh Nove Cyclotriphosphazene Compound, Springer Sci., Vol 10, 683-691, 2016.
- [47] Özdemir, A.F., Lapa, H.E, Kökçe, A., Uslu, İ., Altındal, Ş., A Comparative Study on Dielectric Behaviours of Au/(Zn-doped PVA)/n-4H-SiC (MPS) Structures with Different Interlayer Thicknesses Using Impedance Spectroscopy Methods, B. Mater. Sci., 41, 1-6, 2018.
- [48] Karaduman, O., Dimetil Sarısı Arayüzey Kalınlığının Heteroeklem Aygıtların Elektriksel Parametreleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Van, 2017.
- [49] Yıldız, M., Çinko Ftalosiyenin Tabanlı Heteroeklemin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır, 2012.
- [50] Zeyada, H.M., Makhoulf, M.M, El Shabaan, M.M, Electrical Transport Mechanisms and Photovoltaic Characteristics of Au/neutral red/p-Si/Al Heterojunction Solar Cell, Microelectron. Eng., Vol 157, 35-41, 2016.

- [51] Kılıçoğlu T., Ocak Y.S., Electrical and Photovoltaic properties of an Organic-Inorganic Heterojunction Based on a BODIPY dye, *Microelectron. Eng.*, Vol 88, 150-154, 2011.
- [52] S. Riad, Dark and Photoelectric Conversion Properties of p-MgPc/n-Si (Organic/Inorganic) Heterojunction cells, *Thin Solid Films*, Vol 370, 253-257, 2000.



ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Giresun'da doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Giresun'da tamamladı. 2011 yılında girdiği Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümünden 2016 yılında mezun oldu. 2017 yılında Giresun Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans öğrenimine başlamış olup, iyi derecede ingilizce bilmektedir.

Bilimsel Çalışmalar:

- Ali Osman TEZCAN, Serkan EYMUR, Ömer Faruk YÜKSEL, Osman PAKMA, Mustafa EMRULLAHOĞLU, Nihat TUĞLUOĞLU, Electrical Characterization of Au/BOD-Z-EN/n-Si Diode Using Variation of The Illumination Intensity, International Technological Sciences And Design Symposium, 27-29 June, 2018, Giresun, 325.
- Ali Osman TEZCAN, Serkan EYMUR, Osman PAKMA, Ömer Faruk YÜKSEL, Mustafa EMRULLAHOĞLU, Nihat TUĞLUOĞLU, Frequency Dependent Of Capacitance-Voltage, Conductance-Voltage Characteristics And Interface State Properties Of Au/Bod-Z-En/N-Si Diode, International Technological Sciences And Design Symposium, 27-29 June, 2018, Giresun, 360.
- Ali Osman TEZCAN, Serkan EYMUR, Ömer Faruk YÜKSEL, Osman PAKMA, Serkan SAYIN, Onur ONGUN, Nazmiye BÖREKÇİ, Nihat TUĞLUOĞLU, Determination Of Main Parameters Of Au/n-Si Diodes With And Without Nitropyridine Conjugated Anthracene (Nama) Layer From Current-Voltage Characteristics, International Congress on Semiconductor Materials and Devices, 17-19 August, 2017, Konya, 164.