

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

**Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN AYDINLATMA
ŞİDDETİNE BAĞLI ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nazmiye BÖREKÇİ

Enstitü Anabilim Dalı : Fen Bilimleri Enstitüsü

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Serkan EYMUR

Ocak 2020

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

**Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN
ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN AYDINLATMA
ŞİDDETİNE BAĞLI ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Nazmiye BÖREKÇİ

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.

Nazmiye BÖREKÇİ

28/01/2020

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca, bilgi ve tecrübeleriyle bana her zaman yol gösteren, desteklerini hiç esirgemeyen çok değerli hocalarım Doç. Dr. Serkan EYMUR'a ve Prof. Dr. Nihat TUĞLUOĞLU'na sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bilgi birikimi ve değerli görüşleriyle katkı sağlayan değerli hocalarım Doç. Dr. Ömer Faruk YÜKSEL'e, Doç. Dr. Osman PAKMA'ya ve Arş. Gör. Dr. Ümmühan AKIN'a teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen çok değerli annem ve babama sonsuz sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

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 BİLGİ.....	4
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.1.1. N-tipi yarıiletkenler.....	5
2.1.2. P-tipi yarıiletkenler.....	5
2.2. Metal Yarıiletken Kontaklar	5
2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar	5
2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar	8
2.2.3. Metal/organik tabaka/yarıiletken/metal yapısı.....	10
2.3. Metal/Yarıiletken Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları	10
2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE).....	11
2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu.....	12
2.5. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar.....	13
2.6. Fotodiyotların Akım-Gerilim Karakteristiği	14
2.7. Fotovoltaik Parametreler	16
2.7.1. Açık devre voltajı.....	16
2.7.2. Kısa devre akımı	16
2.7.3. Maksimum akım-maksimum voltaj	17
2.7.4. Maksimum güç.....	17

2.7.5. Doldurma faktörü	17
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. BODIPY-Ph-OH Organik Malzemesinin Hazırlanması ve Sentezi	18
3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi.....	19
3.3. Metal/Organik Tabaka/Yarıiletken/Metal Diyot Yapısının Hazırlanması.....	19
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	23
4.1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri	23
4.2. Cheung Metodu ile Seri Direncin Hesaplanması	28
4.3. Organik Arayüzey Tabaka Kalınlığının Hesaplanması.....	30
4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması	31
4.5. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri	33
BÖLÜM 5. SONUÇLAR.....	38
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	45

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Simge

Φ_b	: Engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ε_i	: Aarayüzey katmanı geçirgenliği
ε_s	: Yarıiletken geçirgenliği
ε_0	: Boşluğun geçirgenlik sabiti
δ	: Ara yüzey tabakası kalınlığı
A	: Alan
A^*	: Richardson sabiti
E_c	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yasak Enerji Aralığı
E_v	: Valans bandı maksimum enerji seviyesi
FF	: Doldurma faktörü
I	: Akım
I_m	: Maksimum akım
I_{sc}	: Kısa devre akımı
I_0	: Ters doyma akımı
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzman sabiti
N_{ss}	: Ara yüzey durum yoğunluğu
n	: Elektron konsantrasyonu
n	: İdealite faktörü
R	: Direnç
R_s	: Seri direnç

p : Boşluk konsantrasyonu
P : Güç
P_m : Maksimum güç
V : Voltaj
V_m : Maksimum voltaj
V_{oc} : Açık devre voltajı
W_D : Tükenim Tabakası
T : Mutlak sıcaklık

Kısaltmalar

BODIPY-Ph-OH : 4,4 difloro-8-fenil-3[(E)-3-(4-hydroxystyryl)]-1,5,7-trimetil-4-bor-3a, 4a-diaza-s-indesen
BODIPY : 4,4' -difloro-4-bora-3a,4a-diaza-s-indasen
MS : Metal-Yarıiletken
MOS : Metal Organik Yarıiletken

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı	4
Şekil 2. 2. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontakdan önce enerji bant diyagramı.....	7
Şekil 2. 3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontak yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı.....	8
Şekil 2. 4. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı.....	9
Şekil 2. 5. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın kontak yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı.....	9
Şekil 2. 6. Bir MOS yapısının şematik gösterimi.....	10
Şekil 2. 7. Bir metal yarıiletken kontağın aydınlatma şiddeti altındaki şematik diyagramı.....	13
Şekil 2. 8. Bir fotodiyotun şematik gösterimi	14
Şekil 2. 9. Bir fotodiyodun karanlık ve aydınlatılmış ortamdaki akım-gerilim karakteristikleri	15
Şekil 3. 1. BODIPY-Ph-OH bileşiğinin sentezi.....	18
Şekil 3.2. Termal buharlaştırma cihazı	20
Şekil 3.3. OTF-1200X tavlama yapılan fırın	20
Şekil 3.4. 2 mm çaplı gölge maske	21
Şekil 3.5. Elde edilen Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotu	21
Şekil 3.6. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun şematik gösterimi	22
Şekil 4.1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği.....	24
Şekil 4.2. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin farklı ışık şiddeti altındaki değişimleri	26

Şekil 4.3. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $dV/d(\ln I)$ -I grafiği.....	28
Şekil 4.4. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $H(I)$ -I grafiği.....	29
Şekil 4.5. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun 1 MHz'de kapasite-voltaj grafiği	31
Şekil 4.6. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği	32
Şekil 4.7. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı ışık şiddetleri altındaki akım yoğunluğu grafiği	34
Şekil 4.8. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği.....	35
Şekil 4.9. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{oc} ve J_{sc} grafiği.....	35
Şekil 4.10. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetlerindeki FF ve P_{max} grafiği	37

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4. 1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun n, I_0, ϕ_b değerleri	25
Tablo 4.2.Literatürdeki BODIPY tabanlı Schottky diyotların n ve ϕ_b değerleri.....	27
Tablo 4. 3. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun R_s değerleri.....	29
Tablo 4. 4. Literatürdeki bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların R_s değerleri	30
Tablo 4.5.Literatürde yapılan bazı BODIPY organik arayüzey tabanlı Schottky diyotların N_{ss} değerleri	33
Tablo 4. 6.Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{oc} ve J_{sc}	36
Tablo 4. 7.Literatürde yapılan bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların V_{oc} ve I_{sc} değerleri.....	36
Tablo 4. 8.Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotuna ait V_m, I_m, P_m ve FF değerleri.....	37

Au/BODIPY-Ph-OH//n-Si/In SCHOTTKY DİYOTUNUN ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN AYDINLATMA ŞİDDETİNE BAĞLI ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, spin kaplama tekniği kullanılarak n-tipi silisyum altlık üzerine BODIPY-Ph-OH organik bileşiği ince film olarak büyütülmüştür. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotu üretilerek, bu diyota ait diyot parametreleri oda sıcaklığında, karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında I-V ölçümleri alınarak incelenmiştir. Bu incelemelere bağlı olarak diyotun engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri karanlık için sırasıyla 0.828 eV ve 2.32, 100 mW/cm² için sırasıyla 0.873 eV ve 1.56 olarak bulunmuştur. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla engel yüksekliği değeri artarken idealite faktörünün azaldığı görülmektedir. Üretilen diyotun seri direnç değerleri karanlık ve 100 mW/cm² için sırasıyla 2660 Ω ve 1200 Ω olarak bulunmuştur. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotuna ait açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri 100 mW/cm² için sırasıyla 0.18 V ve 0.033 mA olarak bulunmuştur. Bulunan sonuçlar incelendiğinde Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun ışığa karşı duyarlı olduğu ve fotovoltatik davranış gösterdiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Schottky Diyot, Seri Direnç, Fotodiyot, BODIPY.

THE INVESTIGATION OF THE ELECTRICAL PARAMETERS OF Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In SCHOTTKY DIODES DEPENDING ON ILLUMINATION INTENSITY

SUMMARY

In this study, BODIPY-Ph-OH organic compound was grown as thin film on the n-type silicon substrate by using the spin coating method. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diode was produced and diode parameters of this diode were examined by taking I-V measurement at room temperature under dark and different illumination intensities. Based on these investigations, the barrier height and ideality factor values of the diode were found to be 0,828 eV and 2,32 for darkness, respectively, 0,873 eV and 1,56 for 100 mW/cm², respectively. It is seen that ideality factor decreases while the barrier height value increases with the increase in illumination intensity. The series resistance values of the produced diode were found to be 2660 Ω and 1200 Ω for darkness and 100 mW/cm², respectively. Open circuit voltage and short circuit values of Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diode were found to be 0,18 V and 0,033 mA for 100 mW/cm², respectively. When the results examined, Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diode was found to be sensitive to light and showed photovoltaic behavior.

Keywords: Schottky Diode, Series Resistance, Photodiode, BODIPY.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Günümüzde metal-yarıiletken kontaklar (MS) büyük öneme sahiptir. Özellikle yeni üretilen metal-yarıiletken yapılarının ve elektriksel özelliklerinin araştırılması, bu cihazların kullanım alanlarının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Elektronik endüstrisinin temel parçası olan metal-yarıiletken kontaklar günlük yaşamda da iyi bir yer edinmiştir ve son yıllarda adım adım önemi artmıştır[1].

Metal-yarıiletken diyotun elektronik özellikleri, idealite faktörü ve engel yüksekliği gibi parametrelere bakılarak karakterize edilmektedir [2]. Ara yüzeyde oluşan potansiyel engeli ilk defa Schottky ortaya koyduğundan dolayı bu metal-yarıiletken kontaklara Schottky diyotlarda denilmektedir [3]. Bir metal ve bir yarıiletkenin kontaklanması ile oluşturulan Schottky diyotlar, güneş pilleri, anahtarlama devreleri, kontrol sistemleri, yarıiletken dedektör uygulamaları gibi önemli alanlarda kullanılmaktadırlar [1].

Schottky diyotların kontak yapılarının açıklanmasında büyük öneme sahip olan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri termiyonik emisyon teorisine göre belirlenmektedir. Farklı yapılar ile üretilen Schottky diyotların analizlerinde termiyonik emisyon teorisine göre ideallikten sapmalar görülmektedir. Bu ideallikten sapmalar yarıiletken yüzeyinin kimyasal temizliği, biriktirilen metal kontağın yapısı, arayüzey durumlarının yapısı ve diğer istenmeyen durumlardan dolayı görülmektedir [2].

Literatürde farklı kontaklar ve yapılar kullanılarak Schottky diyotların elektriksel özellikleri hakkında çeşitli deneysel ve teorik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda Schottky diyotların arayüzey durumları akım-gerilim ve kapasite, iletkenlik ölçümleri ilişkileri kullanılarak belirlenmiştir [4].

Son yıllarda, Schottky diyotlarda organik malzemelerin kullanımı artmıştır. Bunun nedeni ise organik malzemelerin üretiminin kolay olması ve maliyetinin düşük olmasıdır. Farklı aydınlatma şiddetinde organik/inorganik yarıiletken cihazların elektriksel ve fotovoltatik davranışları üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır [5]. Bu araştırmalar sonucunda organik madde kullanımının engel yüksekliğinde bir değişiklik sağladığı saptanmıştır [5].

Elektronğin temel malzeme taşı olan Silisyuma, bilgi ve teknolojinin artmasıyla yeni alternatif malzeme arayışları olmaktadır. Bu da dikkatleri organik yarıiletken malzemeler üzerine toplamaktadır. İnce film elektronğinde geniş uygulama alanına sahip olan organik yarıiletken malzemelerden Schottky diyotlar hazırlanmakta ve elektriksel karakterizasyonu yapılmaktadır [6].

BODIPY, dipirometan bileşiklerinden sentezlenen moleküllerdir. Bu bileşikler geniş absorpsiyon katsayısı, iyi çözünürlük ve yüksek kuantum verimlerine sahiptir. Ayrıca fotokararlılıkları yüksek olduğundan son yıllarda üzerinde çok çalışılan moleküller olmuşlardır. Ayrıca bu bileşikler pH değişikliğine ve oksijen içeren ortamlara karşı oldukça dayanıklıdır. BODIPY moleküllerinin yapısında küçük değişiklikler yapılarak kullanım alanlarına göre ayarlanabilmektedir.

BODIPY floresan moleküller olduğundan, pH sensörleri, lazer boyalar, anyon/katyon sensörleri ve fotodiyot uygulamaları gibi birçok farklı alanlarda kullanılmaktadırlar [7].

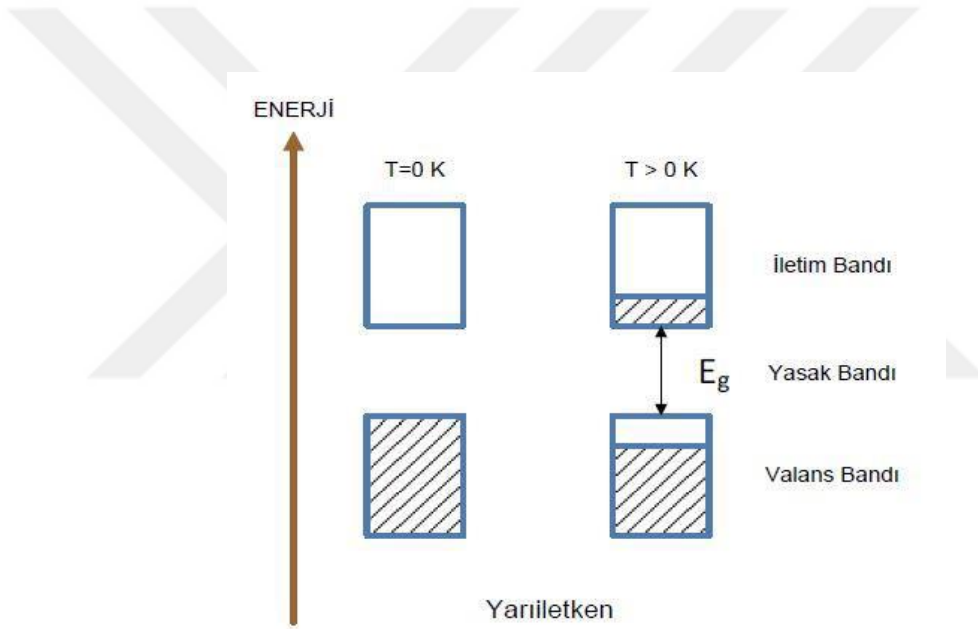
Fotodiyotlar, ışığa duyarlı yarıiletken devre elemanlarıdır. Fotodiyotlar, ters yönde kutuplanabilir ve ters yönde kutuplandıklarında ters akımın artışı üzerlerine düşen ışık miktarına bağlıdır. Üzerlerine düşen ışık miktarı arttıkça ters akımları da artar. Fotodiyotlar doğru kutuplandıklarında ise normal diyot gibi davranış sergilemektedirler [8].

Bu Çalışmada [100] yönelimine sahip, 20 Ω -cm öz dirençli , tek yüzeyi parlatılmış, 500 μm kalınlıklı ve fosfor katkılı n-tipi silisyum kristali kullanılmıştır. Doğrultucu kontak oluşturmak için Altın (Au) , omik kontak oluşturmak için ise İndium (In) kullanılarak Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotu hazırlanmıştır. Hazırlanan Au/BODIPY-Ph-OH/ n-Si/In Schottky diyotunun doğrultucu özelliklerini incelemek için oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık yoğunluğu altında akım-gerilim (I-V) ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlere bağlı olarak Schottky diyotun aydınlatma şiddetine bağlı Cheung metodu kullanılarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi parametreleri belirlenmiştir. Ayrıca farklı aydınlatma şiddetleri altında alınan ölçümlerden Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun ışığa duyarlı olduğu görülmüştür ve fotodiyot parametreleri hesaplanmıştır.

BÖLÜM 2. TEORİK BİLGİ

2.1. Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerde yasak yasak bant aralığı bulunur. Ancak dışarıdan bir uyarılma olursa valans bandı elektronları yasak bandı aşarak iletim bandına geçebilirler. Elektronlar iletim bandına geçtikten sonra malzeme iletken özelliği gösterir. Yarıiletkenlerin enerji bant diyagramı Şekil 2.1’de gösterilmektedir.



Şekil 2. 1. Yarıiletkenlere ait enerji bant diyagramı

Sıcaklık arttıkça yarıiletken malzemelerin özdirenci azalmaktadır ve yasak bant aralıkları 2 eV’den küçüktür. En çok bilinen ve teknolojik olarak kullanılan yarıiletkenler IV. Grupta yer alan Silisyum ve Germanyumdur. Silisyum ve Germanyumun oda sıcaklığında yasak bant enerjileri sırasıyla 1.1 eV ve 0.7 eV’tur [9].

2.1.1. N-tipi yarıiletkenler

Akım taşıyıcılarının çoğunluğu elektron olan Silisyum ve Germanyum elementine n-tipi yarıiletken malzeme denir. Bu n-tipi yarıiletkenler verici atomlarla katkılanmıştır. N negatif anlamındadır. Bu tip yarıiletkenlerde, elektronlara çoğunluk yük taşıyıcıları denir ve deşikler (boşluklar) azınlık yük taşıyıcılarını ifade etmektedir.

N-tipi yarıiletkenler Arsenik, Bizmut, Fosfor gibi son yörüngesinde 5 elektron bulunan elementlerin Silisyuma katılmasıyla elde edilmektedirler. Bunun sonucunda kovalent bağ oluşur ve 1 elektron açıkta kalmaktadır. Bundan dolayı birleşimde milyonlarca elektron açıkta kalmış olur ve buda maddeye negatif özelliği kazandırmaktadır [9].

2.1.2. P-tipi yarıiletkenler

P-tipi yarıiletkenler verici atomlarla katkılanmış yarıiletkenleri ifade etmektedir. P pozitif anlamındadır. P-tipi yarıiletkenlerde deşikler çoğunluk yük taşıyıcılarını, elektronlar ise azınlık yük taşıyıcılarını ifade etmektedir [9].

2.2. Metal Yarıiletken Kontaklar

Metal yarıiletken kontaklar bir metal ve bir yarıiletkenin kontaklanmasıyla oluşan yapılardır. Kontak yapılan malzemelerin Fermi enerji seviyeleri eşitlenene kadar aralarında bir yük alışverişi olur. Bu durum metal ve yarıiletken malzemenin enerji-bant diyagramıyla ilgilidir. Oluşacak kontağın doğrultucu veya omik kontak olduğunu metalin iş fonksiyonu (Φ_m) belirlemektedir [10].

2.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Bir metal-yarıiletken kontağın doğrultucu özellikte olup olmadığı metal ve yarıiletken arasındaki elektrostatik bir engelin varlığından kaynaklanmaktadır. Bu engel metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarındaki farklılıklardan kaynaklanmaktadır. Metal/ n-tipi doğrultucu kontaklar metalin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan (Φ_s) büyük olduğunda oluşmaktadır [11].

Şekil 2.2'deki metal ve yarıiletkenin kontak yapılmadan önce enerji-bant diyagramından görüldüğü üzere metalin iş fonksiyonunun (ϕ_m), n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan (ϕ_s) büyük olmasından dolayı metaldeki serbest elektronların sayısı yarıiletkendeki serbest elektronların sayısından daha az olduğunu göstermektedir [12]. Yani metalin Fermi enerji seviyesi (E_F) yarıiletkeninkinden daha aşağıdadır. Metal ve yarıiletken birbirlerine temas ettiğinde yarıiletkendeki elektronlar metale geçerler ve yarıiletkendeki elektron sayısı azalır, metalin elektron sayısı artar. Metalin elektron sayısının artması Fermi enerji seviyesini etkilemez ancak yarıiletkenin elektron sayısının azalmasıyla Fermi enerji seviyesinin yarıiletken tarafından aşağıya doğru kaymasına sebep olmaktadır. Bunun neticesinde Şekil 2.3'te görülen yarıiletken içerisine doğru bir potansiyel engel oluşur [13-14]. Oluşan bu potansiyel engelin yarıiletken tarafındaki yüksekliği;

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

Metal tarafındaki potansiyel engel yüksekliği ise;

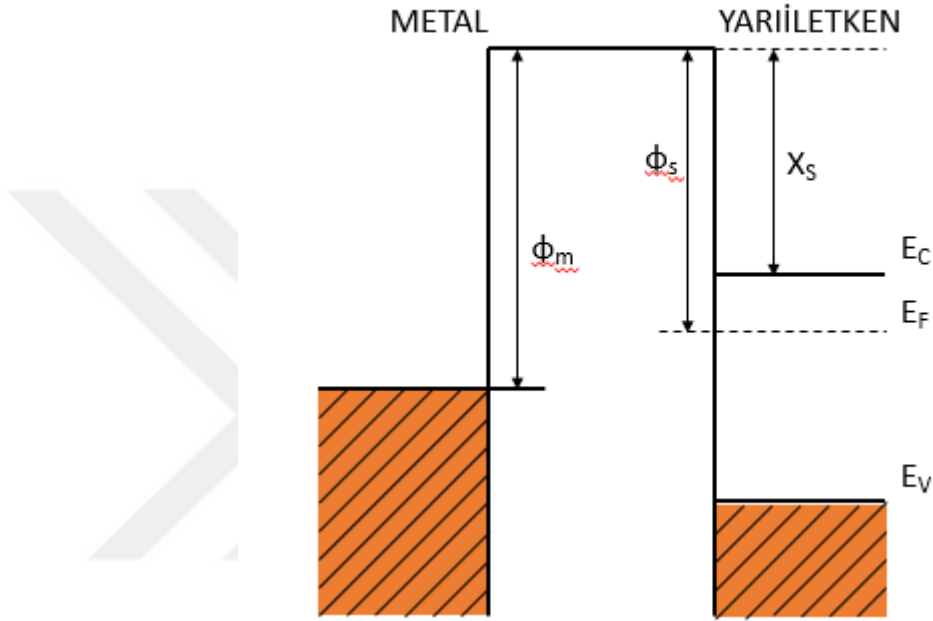
$$e\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad (2.2)$$

Burada χ_s yarıiletkenin elektron ilgisi olup iletkenlik bandı (E_c) ile vakum seviyesi arasındaki enerjiyi göstermektedir.

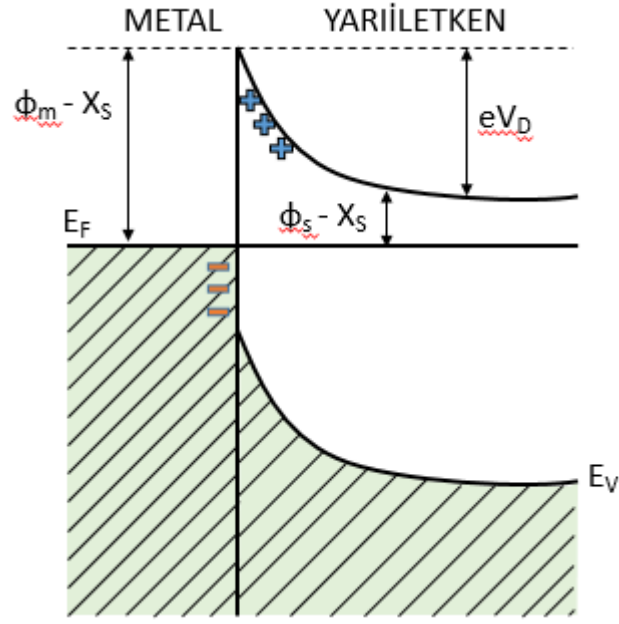
Yeteri kadar enerjiye sahip olan elektronlar, ısısal olarak uyarıldıklarında potansiyel engelini aşarak bazıları yarıiletkenden metale, bazıları ise metalden yarıiletkene geçer ve bu durumun sonucunda eşit ve zıt yönlü bir I_0 akımı oluşturur. Yarıiletkene $-V$ gerilimi uygulanırsa metalden yarıiletkene geçen elektronlar için engel değişmeyeceğinden dolayı akımda da değişme meydana gelmez. Ancak yarıiletken tarafından olan iletkenlik bandındaki enerji düzeyleri eV kadar yükselir ve yarıiletkenden metale elektron geçişi olarak engel yüksekliğini eV kadar azaltır. Bu durumun sonucunda oluşacak net akım;

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

Burada I net akım, I_0 doyma akımı, T kelvin cinsinden sıcaklık değeri ve k Boltzman sabitidir. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklarda yarıiletken tarafına uygulanan gerilim sıfırdan büyük ise kontak ters, sıfırdan küçük ise kontak doğru beslemededir [15-16].



Şekil 2. 2. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın kontakdan önce enerji bant diyagramı

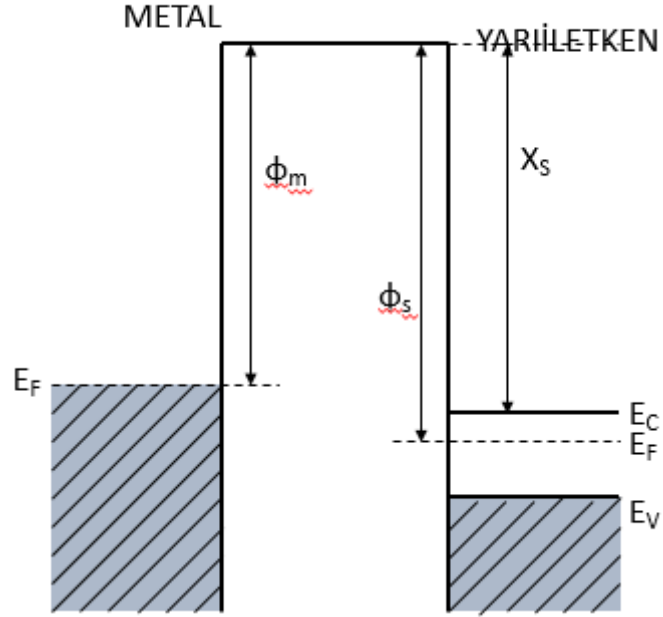


Şekil 2. 3. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın kontak yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı

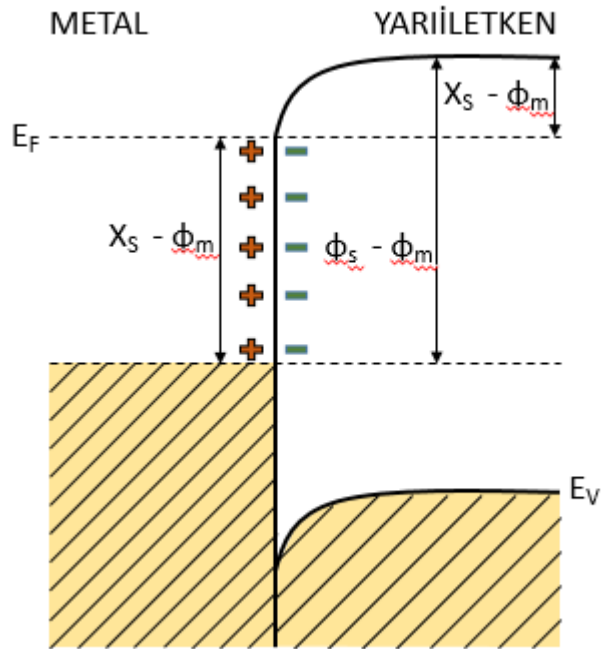
2.2.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak yapısı metalin iş fonksiyonunun (ϕ_m) yarıiletken iş fonksiyonundan (ϕ_s) küçük olması durumudur. Metal n-tipi yarıiletkenin kontak yapılmadan önceki enerji-bant diyagramı Şekil 2.4, kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı Şekil 2.5’te verilmiştir.

Metal ile n-tipi yarıiletken omik kontak oluşturduktan sonra metalden yarıiletkenin içine doğru bir elektron akışı olur ve geride pozitif bir yüzey yükü bırakırlar. Bunun sonucunda kontağın yarıiletken tarafında negatif bir yüzey yüküne sebebiyet verirler [17]. Yük alışverişi bittikten sonra yarıiletken tarafındaki Fermi enerji düzeyi $\phi_s - \phi_m$ kadar yer değiştirir. Isıl denge bittikten sonra kontağın her iki tarafında yüzey yükleri meydana geleceğinden dolayı bir dipol tabakası oluşur. Böyle bir kontakta, taşıyıcılar yarıiletkenden metale, metalden yarıiletkene serbest bir şekilde geçebilirler [15-16].



Şekil 2. 4.Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın kontak yapılmadan önceki enerji bant diyagramı

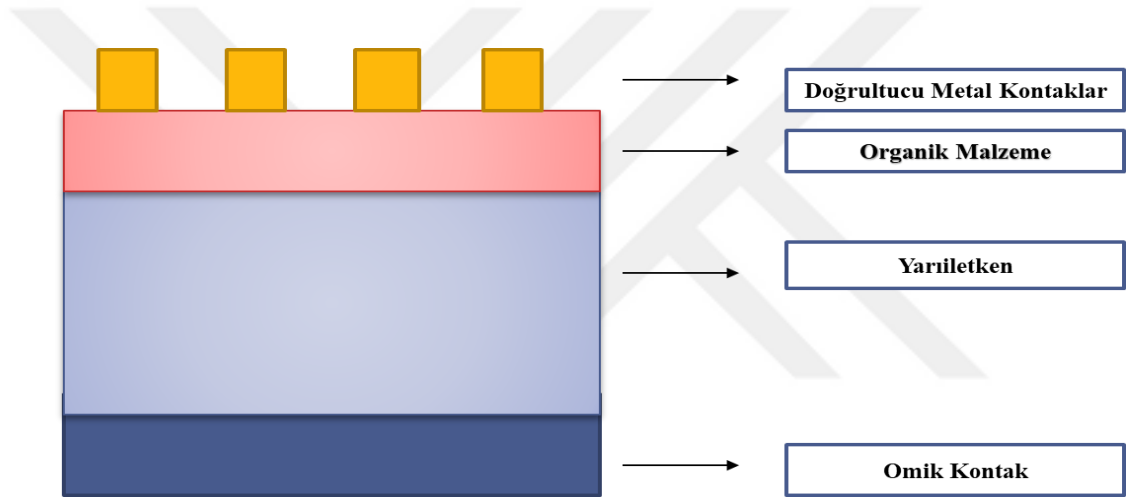


Şekil 2. 5.Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın kontak yapıldıktan sonraki enerji bant diyagramı

İdeal bir yarıiletken omik kontak hem doğru beslemede hem de ters beslemede akım geçirmektedir.

2.2.3. Metal/organik tabaka/yarıiletken/metal yapısı

Bir yarıiletken ve doğrultucu metal kontağın arasına organik bir malzeme kaplandığı zaman metal/organik/yarıiletken (MOS) bir yapı oluşur. Schottky diyotlarının üretiminde farklı yarıiletkenler ve arayüzey tabakası olarak farklı organik malzemeler kullanılabilir. Kullanılan bu organik malzemeler Schottky bariyer diyotlarının elektriksel özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedirler. Bu cihazların elektrik ve dielektrik özellikleri kullanılan malzemenin arayüzey durumlarına bağlıdır [18]. Metal yarıiletken yapısının arayüzey özellikleri, malzemenin verimliliğini önemli ölçüde etkilemektedir [19]. Bir MOS yapısının şematik gösterimi Şekil 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2. 6.Bir MOS yapısının şematik gösterimi

2.3. Metal/Yarıiletken Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları

Metal yarıiletken Schottky yapılarında metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabaka, polarlama yönü, yarıiletken çeşidi, sıcaklık ve seri direnç gibi parametreler performansı etkilediğinden dolayı, bu yapılarda hangi akım iletim mekanizmasının kullanılacağını belirlemek önem teşkil etmektedir [20].

Metal yarıiletken ve arayüzey tabakalı metal yarıiletken yapıdaki kontaklarda kullanılan başlıca akım iletim mekanizmaları şunlardır;

- Termiyonik Emisyon Teorisi (TE)

- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon Difüzyon Teorisi (TED)
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme
- Alan Emisyonu (AE)
- Çok katlı tünelleme
- Uzak yük bölgesinde rekombinasyon

2.3.1. Termiyonik emisyon teorisi (TE)

Sıcak bir yüzeyden termal enerji nedeniyle taşıyıcıların salınmasına termiyonik emisyon teorisi denilmektedir. Termiyonik emisyon teorisi metal yarıiletken diyotlarda taşıyıcıların kazanacağı termal enerji nedeni ile potansiyel engeli aşarak yarıiletkenden metale, metalden yarıiletkene geçmesi olayıdır. Bu olay metal/n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar aracılığıyla sağlanır [21].

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky bölgesinde taşıyıcılar çarpışmazlar. kT/q enerji değeri potansiyel engel yüksekliğinden çok küçüktür. Engel eğiliminin biçimi önemsiz olduğundan akım sadece engel yüksekliğine bağlıdır [2,11].

Bu varsayımlara göre yarıiletkenden metale akan akı yoğunluğu $J_{S \rightarrow M}$,

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

denklemleri ile ifade edilir.

Metalden yarıiletkene doğru akan akı yoğunluğu ise $J_{M \rightarrow S}$,

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

denklemleri ile ifade edilir. Burada m^* , taşıyıcıların etkin kütlesi, h , Planck sabiti, k ise Boltzmann sabitidir.

Metalden yarıiletkene olan akım yoğunluğu pozitif olarak tanımlandığında, net elektron akım yoğunluğu,

$$J = \left[A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A^* Richardson sabiti olup,

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) \quad (2.7)$$

şeklde tanımlanır. Böylece toplam akım yoğunluğu ifadesi ,

$$J = J_0 \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \quad (2.8)$$

olarak ifade edilir. Burada J_0 , ters doyma akım yoğunluğudur ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (2.9)$$

şeklinde tanımlanır.

2.4. Arayüzey Durum Yoğunluğu

Metal yarıiletken arayüzeyinde yasak bant aralığındaki girilebilir enerji seviyesi arayüzey durumları olarak ifade edilir. Arayüzey durumlarının engel yüksekliğini ve önemli diğer diyot parametrelerini etkilediği bilinmektedir. Yarıiletkenlerde arayüzey durumları Fermi enerji seviyesi ile belirlenmektedir [22].

Arayüzey durum yoğunluğu metal yarıiletken kontaklar için;

$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left[\frac{\varepsilon_s}{W_D} \frac{1}{(n(V)-1)} - \frac{\varepsilon_i}{\delta} \right] \quad (2.10)$$

şeklinde ifade edilir. Ayrıca metal/organik tabaka/yarıiletken kontaklara ait arayüzey durum yoğunluğu,

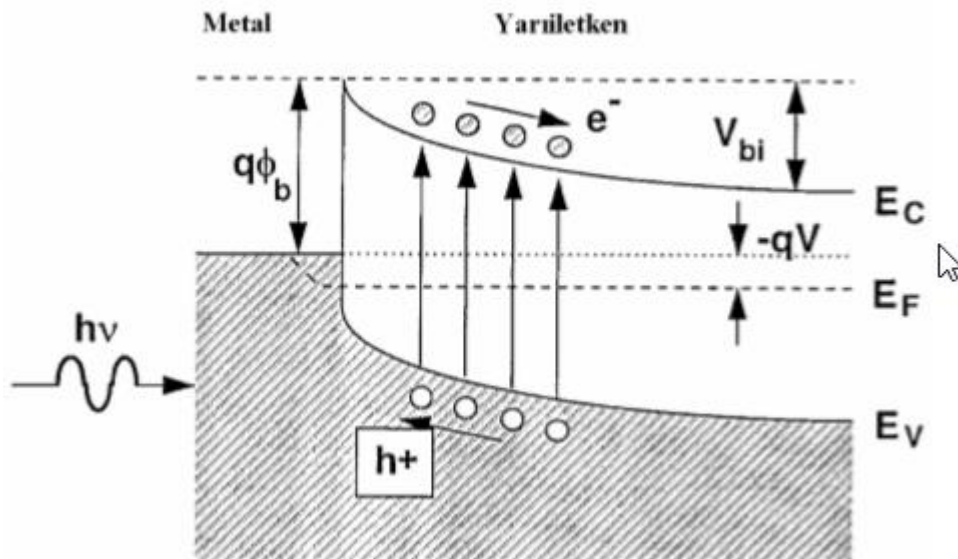
$$N_{ss} = \frac{1}{q} \left(\frac{\varepsilon_i}{\delta} (n(V) - 1) - \frac{\varepsilon_s}{W_D} \right) \quad (2.11)$$

eşitliği kullanılarak bulunur. Denklem 2.10 ve 2.11’de verilen q , elektron yükü, W_D tükenim tabakası genişliği, δ , arayüzey tabakası kalınlığı, ϵ_i arayüzey katmanı geçirgenliği, ϵ_s ise yarıiletken geçirgenliğini ifade etmektedir [23].

2.5. Metal Yarıiletken Fotodiyotlar

Fotodiyotlar, ışığa karşı duyarlı ve ters beslem altında çalışan devre elemanlarıdır. Doğru beslem uygulandığında normal diyot gibi davranırlar. Fotodiyotlar anot ve katotdan oluşan iki elektriksel kontağa sahiptirler. Fotodiyotların yarıiletken bölgesinde yüksek bir elektrik alanı ile boşaltılmış serbest yük taşıyıcıları vardır [6].

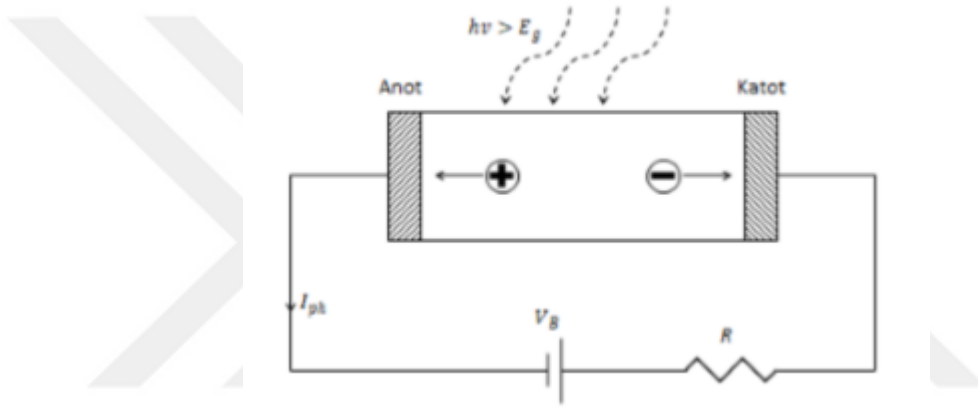
Bir metal yarıiletken kontağın aydınlatma şiddeti altındaki şematik görüntüsü Şekil 2.7’de görülmektedir.



Şekil 2. 7. Bir metal yarıiletken kontağın aydınlatma şiddeti altındaki şematik diyagramı

Bir fotodiyotun çalışması, diyot eklemi içindeki foto taşıyıcılarının yer değiştirmesi prensibine dayanır. Yeterli enerjiye sahip olan fotonlar, doğrultucu ekleme ışık geldiğinde soğrulurlar. Oluşan fazlalık elektronlar ile boşluklar difüzyon eklem alanıyla yayılır ve diyotun farklı bölgelerine toplanırlar.

Şekil 2.8’de bir fotodiyotun şematik diyagramı görülmektedir [8]. İki elektriksel kontak (anot ve katot) ve bir yarıiletkenin oluşan fotodiyotlar, yarıiletkenin bant aralığından daha yüksek enerji ile gelen fotonların serbest elektron-boşluk çiftinin oluşumundan dolayı soğrulurlar. Bu durumda kontaklara ters besleme voltajı uygulandığında yarıiletkenin karşısında elektrik alanı oluşur. Bunun sonucunda elektronlar ve boşluklar zıt yönde hareket ederek dış devrede bir fotoakım meydana getirir [6].

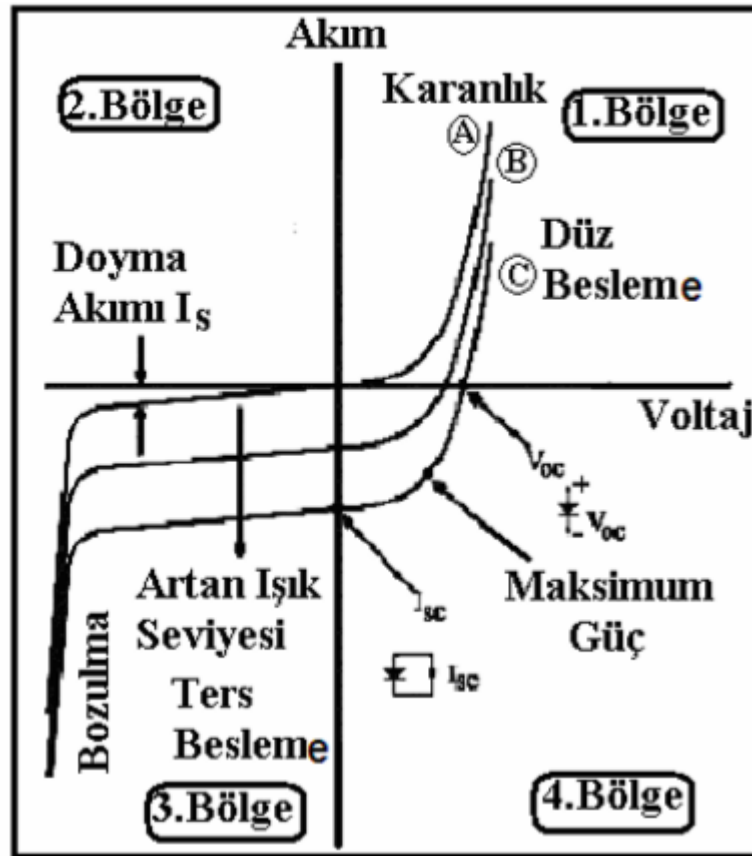


Şekil 2. 8. Bir fotodiyotun şematik gösterimi

2.6. Fotodiyotların Akım-Gerilim Karakteristiği

Fotodiyotlarda akım-voltaj (I-V) karakteristiği diyot eklemesindeki akım taşıma mekanizmaları ile belirlenmektedir. Bir fotodiyotun akım-gerilim karakteristiği şekil olarak normal bir diyot gibidir. Karanlık ve aydınlatılmış ortamdaki bir fotodiyotun akım-gerilim karakteristiği Şekil 2.9’da verilmiştir. Bir fotodiyotun duyarlı yüzeyine ışık düşmüyorsa fotodiyot üzerinden termal yoldan azınlık taşıyıcılarıyla oluşan akım geçer. Oluşan bu akım karanlık akım olarak bilinir. Şekil 2.9’da A,B ve C ile gösterilen üç eğri verilmiştir. Burada A eğrisi fotodiyodun karanlık durumdaki, B ve C eğrileri ise fotodiyodun ışık altındaki akım-voltaj eğrilerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere fotodiyodun akım-voltaj karakteristikleri dört bölgeden oluşmaktadır. Akım ve voltaj değerleri birinci bölgede pozitifdir. Bu bölgede fotodiyoda doğru

polaritede gerilim uygulandığından dolayı bu bölge doğru besleme bölgesidir. Bu bölgede fotodiyot normal bir diyot özelliği gösterdiğinden bu bölge fotodiyot uygulamaları için uygun değildir. İkinci bölgeye baktığımızda fotodiyodun cevabı yoktur. Üçüncü bölgede çok küçük bir I_s akımı akar. Fotodiyodun aktif alanı üzerine gelen ışık şiddeti artırıldığı zaman, bu bölgedeki eğrilerin tümü negatif akım yönünde aşağıya değişir. Eğrilerin $V=0$ ekseninde akım eksenini kestiği nokta kısa devre akımını (I_{sc}), sıfır akım noktalarında eğrilerin voltaj eksenini kestiği noktalar ise açık-devre voltajını (V_{oc}) verir. Ters besleme voltajı çok yüksek olduğu için akım hızlı bir şekilde artacağından dolayı diyotun bozulmasına sebep olur. Bu bölgeye ters bozulma bölgesi denilmektedir. Bundan dolayı üçüncü bölge ters polariteli gerilimin uygulandığı ve ışığın algılandığı uygun olan bir bölgedir. Son bölge olan dördüncü bölge ise fotovoltaik bölgedir.



Şekil 2. 9. Bir fotodiyodun karanlık ve aydınlatılmış ortamdaki akım-gerilim karakteristikleri

Fotodiyotlar; akım-voltaj, kuantum verimi ve bant genişliği olmak üzere üç karakteristiğe sahiptirler. Fotodiyodun performansı bu üç parametre ile ölçülmektedir.

Bir fotodiyot yeterli ışık aldığı zaman çalışmaya başlamaktadır. Işık fotodiyodun içerisinde zayıf bir akım oluşturur. Fotodiyoda bir gerilim uygulandığında ve devrede bir yük direncinin bulunmasından dolayı fotoakım meydana gelir. Dolayısıyla fotodiyotlar akım ve voltaj kaynağı olarak kullanılabilirler [6,24].

Bir Schottky fotodiyodunun akım-voltaj (I-V) karakteristikleri kullanılarak, ters doyma akımı, engel yüksekliği, seri direnci ve idealite faktörü gibi diyot parametreleri bulunabilir [25].

2.7. Fotovoltaik Parametreler

Fotodiyotların yük karakteristikleri, fotovoltaik parametrelerinin analiz edilmesiyle bulunur. Bu parametreler; açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum çıkış gücü (P_m), ve doldurma faktörü (FF) dir.

2.7.1. Açık devre voltajı

Açık devre voltajı, ışık şiddeti altında olan diyotun akım-voltaj karakteristiğinde eğrinin voltaj eksenini kestiği noktadaki değer olarak bilinmektedir ve akım değeri sıfır olduğunda belirlenmektedir. Açık devre voltajı denklem 2.12 ile ifade edilmektedir.

$$V_{oc} = \left(\frac{n k T}{q} \right) \ln \left[\left(\frac{I_{sc}}{I_s} \right) + 1 \right] \quad (2.12)$$

Bu denkleme göre idealite faktörünün yüksek olması açık devre voltajının da yüksek çıkmasına neden olmaktadır ancak bu durum her zaman geçerli değildir. Çünkü yüksek idealite faktörü değerleri, yüksek I_s ile mümkün olmaktadır [26].

2.7.2. Kısa devre akımı

Kısa devre akımı çıkış akımıdır ve ideal durumda (R_s ve R_{sh} etkisi yok) uygulanan voltajda aydınlatma altında oluşmaktadır. Kısa devre akımı, aydınlatma şiddeti ve gelen foton sayısı ile orantılıdır [26].

2.7.3. Maksimum akım-maksimum voltaj

Akım-voltaj grafiğinin, maksimum güç noktasının akım eksenine denk gelen noktasına maksimum akım denir. Bu ifade I_{max} ile sembolize edilmektedir.

Maksimum voltaj değeri ise akım-voltaj grafiğinin maksimum güç noktasının voltaj eksenine denk gelen noktası olup V_{max} ile gösterilmektedir [26].

2.7.4. Maksimum güç

Maksimum güç değeri maksimum akım ve maksimum voltaj değerleriyle hesaplanmaktadır. Maksimum güç değeri;

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (2.13)$$

denklemleriyle ifade edilmektedir [26].

2.7.5. Doldurma faktörü

Doldurma faktörü FF ile ifade edilmektedir ve denklem 2.14'teki eşitlik kullanılarak bulunmaktadır [27].

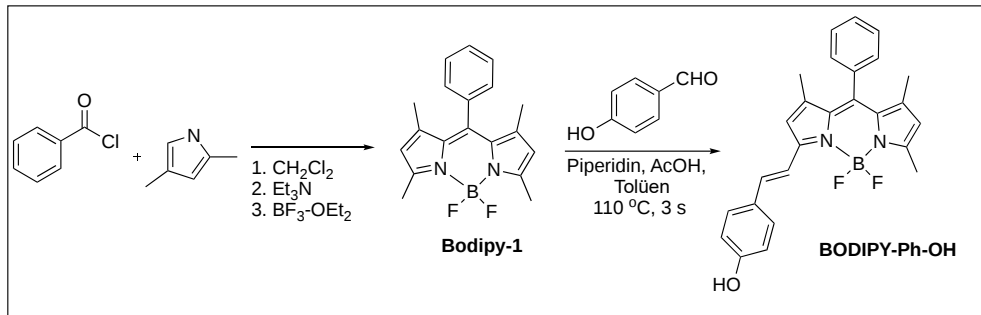
$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.14)$$

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada çapı 2” olan [100] yönelimine sahip, 20 Ω -cm öz dirençli, tek yüzeyi parlatılmış, 500 μ m kalınlığı olan ve fosfor katkılı n-tipi Silisyum kristali yarıiletken altlık olarak kullanılmıştır. Silisyum kristali kullanılmadan önce kimyasal temizleme yöntemiyle temizlenmiştir. Temizleme işleminden sonra Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotu oluşturulmuştur. Diyot hazırlandıktan sonra karanlık ve farklı ışık şiddetleri altındaki elektriksel özelliklerini incelemek ve diyota ait parametreleri hesaplamak için akım-voltaj ölçümleri alınmıştır.

3.1. BODIPY-Ph-OH Organik Malzemesinin Hazırlanması ve Sentezi

BODIPY-1 bileşiği (400 mg, 1.23 mmol), 4-hidroksibenzaldehit (165 mg, 1.35 mmol), 0.9 ml piperidin ve 0.6 ml glasiye asetik asit karışımı, 3 saat boyunca bir Dean-Stark cihazında 30 ml tolüen içerisinde kaynatıldı. Daha sonra içine su ilave edildi ve diklorometan ile ekstrakte edildi. Organik kısım toplandı ve susuz sodyum sülfat üzerinde kurutuldu ve çözücü, düşük basınç altında döner buharlaştırıcı yardımı ile uzaklaştırıldı. Daha sonra sabit hekzan-etil asetat (90:10) çözücü karışımı kullanarak kolon kromatografisi yöntemi ile saf BODIPY-Ph-OH maddesi elde edildi. Verim: %45. ¹H-NMR spektroskopisi ile elde edilen NMR verilerinin literatürde yer alan verilerle uyumlu olduğu gözlenmiştir [28].



Şekil 3. 1.BODIPY-Ph-OH bileşiğinin sentezi

3.2. Silisyum Kristalinin Temizlenmesi

Bu çalışmada kullandığımız Si kristalinin üzerindeki oksit tabakayı ve kirlilikleri temizlemek amacıyla kimyasal olarak temizleme işlemi yapılmıştır. Silisyum kristalinin temizlenmesi;

- 1) İlk aşama olarak trikloretilen ile 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- 2) 5 dakika deiyonize suyla yıkanmıştır.
- 3) Alkolle 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- 4) 5 dakika deiyonize suyla yıkanmıştır.
- 5) Asetonla 5 dakika ultrasonik olarak yıkanmıştır.
- 6) 5 dakika deiyonize suyla yıkanmıştır.
- 7) 1:10 oranındaki HF çözeltisinde 5 dakika temizlenmiştir.
- 8) 5 dakika deiyonize suyla yıkanmıştır.
- 9) Kuru azot ile kurutulmuştur.

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

N-Si kristalinin temizliğinden sonra kristalin mat yüzeyine Indiyum metali Novanak marka termal buharlaştırma cihazı (Şekil 3.2) ile 100 nm kalınlığında %99,99 saflıkta buharlaştırılmıştır. Ardından OTF-1200X markalı fırında (Şekil 3.3) vakum ortamında 350 °C'ye kadar ısıtılarak 30 saniye tavlama işlemi yapılmıştır. Daha sonra termal buharlaştırma yöntemiyle Silisyum kristali üzerine 100 nm daha Indiyum metali buharlaştırılarak omik kontak oluşturulmuştur.

BODIPY-Ph-OH organik malzemesi kloroform çözücüsünde çözülerek (10 mg organik malzeme 1 ml kloroformda çözülmüştür) Silisyum kristalinin parlak yüzeyine ilk 30 saniye 500 rpm, sonraki 30 saniye 1200 rpm hızında spin kaplama cihazı ile 3×10^{-6} cm büyütülerek kurumaya bırakılmıştır. Yüksek frekanslardaki kapasite-voltaj ölçümlerinden BODIPY-Ph-OH ince filminin kalınlığı hesaplanmıştır.

BODIPY-Ph-OH kaplanmış yüzey üzerine 2 mm çaplı metal gölge maske (Şekil 3.4) yerleştirilerek 1 mm yarıçaplı Altın metali 150 nm kalınlığında kaplanıp doğrultucu

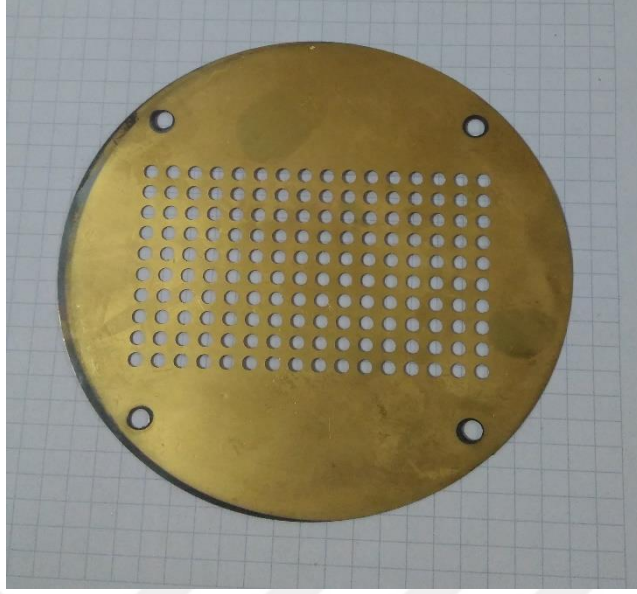
kontakt oluşturulmuştur. Yapılan tüm bu işlemlerden sonra Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotu (şekil 3.5) oluşturulmuştur. Oluşturulan diyotun yapısı şekil 3.6’da verilmiştir.



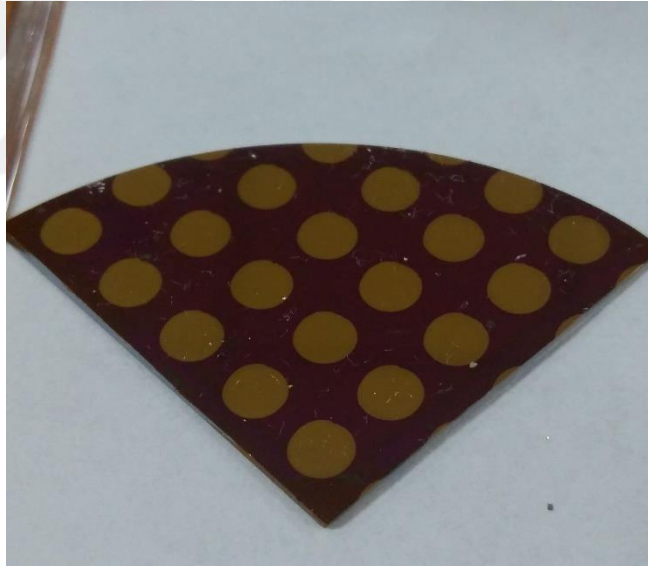
şekil 3.2. Termal buharlaştırma cihazı



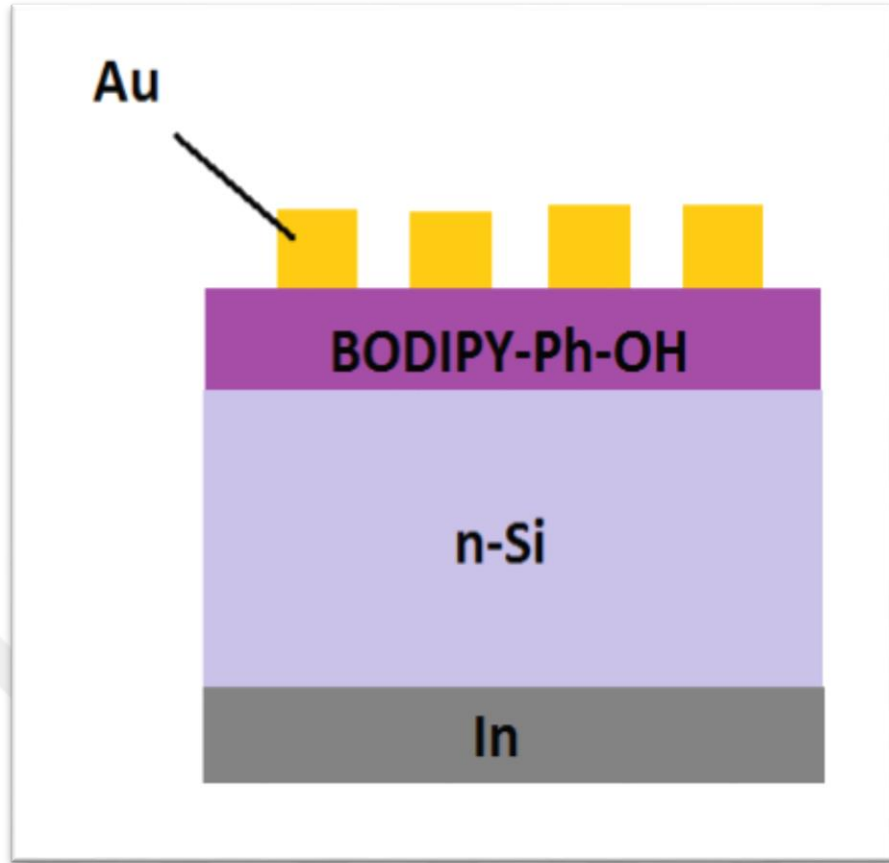
şekil 3.3. OTF-1200X tavlama yapılan fırın



Şekil 3.4. 2 mm çaplı gölge maske



Şekil 3.5. Elde edilen Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotu



Şekil 3.6. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun şematik gösterimi

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky Diyotunun Akım Voltaj Karakteristikleri

Bu çalışma için hazırlanan Schottky diyotu için “Keitley 4200 SCS” cihazı kullanılarak oda sıcaklığında akım-voltaj ölçümleri alınmıştır. Diyotun engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi ana parametreleri yapılan bu ölçümler sonucunda bulunmuştur.

Schottky diyotların termiyonik emisyon teorisine göre I-V ilişkisi, engel yüksekliği ve idealite faktörü aşağıdaki denklemde verilmiştir.

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

Düz beslemede termiyonik emisyon teorisine göre $V > 3kT/q$ bölgesinde hesap yapıldığı için denklemin ikinci kısmı ihmal edilir ve denklem aşağıdaki şekli alır.

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

Denklem 4.2’de belirtilen I_0 ters doyma akımını gösteriyor olup, eşitliği denklem 4.3’te gösterilmiştir.

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

A: Diyotun doğrultucu kontak alanı

A^* : Richardson sabiti ($A^* = 120 \text{ A/k}^2\text{cm}^2$ n-tipi Silisyum için)

T: Kelvin cinsinden ortam sıcaklığının değeri ($T=300\text{K}$ alınmıştır)

k: Boltzman Sabiti ($k=8.625 \times 10^{-5}$ eV/K)

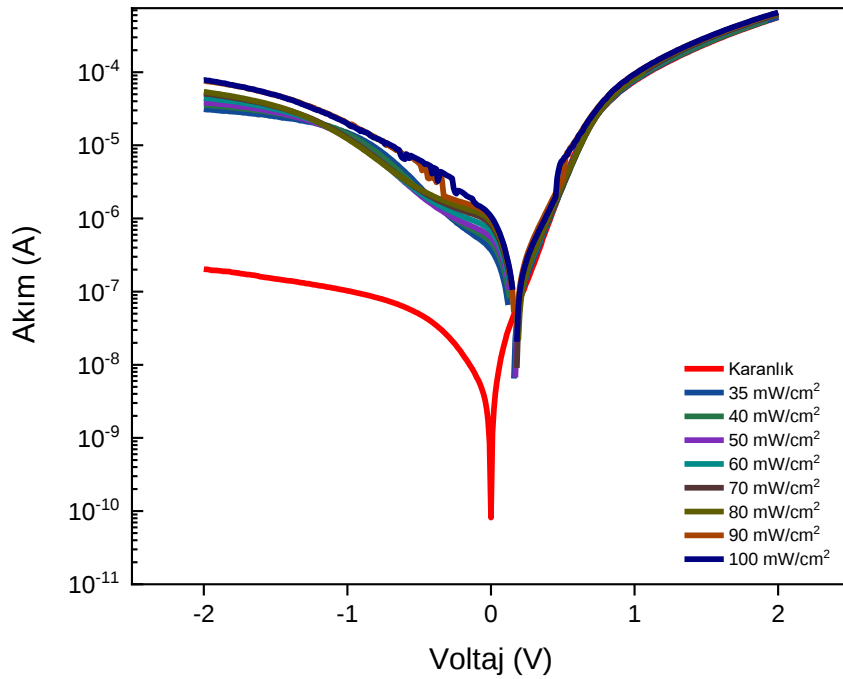
Denklem 4.2'nin her iki tarafının logaritması alınır ve V'ye göre türevi alınır ve idealite faktörü hesaplanabilir.

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

Engel yüksekliği ϕ_b değeri ise denklem 4.3'teki eşitliğin her iki tarafının logaritması alınarak ve alınıp ϕ_b 'ye göre çözülerek elde edilir.

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

Bu çalışma için hazırlanmış olduğumuz Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki yarı logaritmik akım-voltaj grafiği Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun yarı logaritmik akım-voltaj grafiği

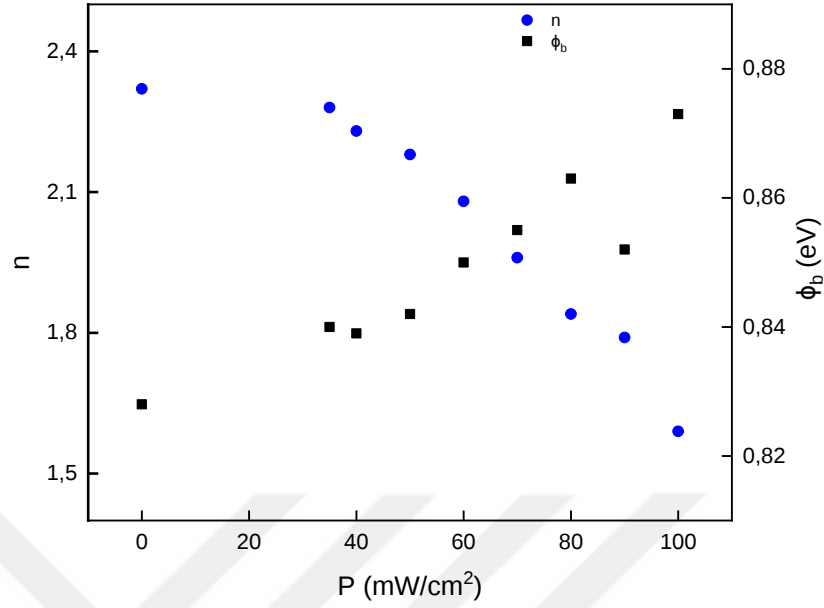
Şekil 4.1’deki grafiğin eğiminden hazırlanan Schottky diyotunun idealite faktörü (n) hesaplanmıştır. Doyma akımı olan I_0 değeri, akım-voltaj grafiğinin lineer bölgesinin sıfır voltajda akım eksenini kestiği noktadan bulunmuştur. Diyotun kontak alanı (A) ve Richardson sabiti (A^*) değerleri kullanılarak denklem 4.5’deki eşitlikten ise diyotun engel yüksekliği değeri hesaplanmıştır.

Hesaplanan idealite faktörü (n), doyma akımı (I_0) ve engel yüksekliği (ϕ_b) değerleri tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun n, I_0 , ϕ_b değerleri

Aydınlatma Şiddeti	n	I_0 (A)	ϕ_b (eV)
0	2.32	4.07×10^{-9}	0.828
35	2.28	2.5×10^{-9}	0.840
40	2.23	2.64×10^{-9}	0.839
50	2.18	2.30×10^{-9}	0.842
60	2.08	1.74×10^{-9}	0.850
70	1.96	1.40×10^{-9}	0.855
80	1.84	1.03×10^{-9}	0.863
90	1.79	1.58×10^{-9}	0.852
100	1.59	7.04×10^{-10}	0.873

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı ışık şiddetlerinde idealite faktörü (n) ve engel yüksekliğinin (ϕ_b) değişimi Şekil 4.2’de gösterilmiştir. Şekilde açıkça görüldüğü üzere aydınlatma şiddetinin artmasıyla idealite faktörü (n) azalırken, engel yüksekliği (ϕ_b) artmaktadır.



Şekil 4.2. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun n ve ϕ_b değerlerinin farklı ışık şiddeti altındaki değişimleri

İdeal bir Schottky diyotta idealite faktörü $n=1$ olması gerekmektedir. Bazı durumlarda bu değer 1'den büyük çıkar ve bu durumda diyotta ideallikten sapmalar olur. Bu ideallikten sapmalara genel olarak, arayüz durumları, metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakanın varlığı ve seri direnç etkisi sebep olmaktadır [29,30]. Literatürde daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçların çıktığı görülmüştür. Pakma ve arkadaşları, Koronen organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Koronen/n-Si diyotuna ait idealite faktörünü (n) karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında sırasıyla 2.81 ve 2.07, engel yüksekliğini (ϕ_b) ise karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti için sırasıyla 0.697 ve 0.755 eV bulmuşlardır [5]. Gündüz ve arkadaşlarının oluşturduğu p-Si/Fe(II)-polimerikkompleks/Au diyotunda idealite faktörü (n) karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında sırasıyla 3.33 ve 2.84 olarak bulunmuştur [31].

Literatürde BODIPY tabanlı organik malzemeler kullanılarak Schottky diyotlar oluşturulmuştur. Oluşturulan Schottky diyotlarına ve bu tez için oluşturulan

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si diyotuna ait idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri karanlık ve 100 mW/cm² ışık yoğunluğu için Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2.Literatürdeki BODIPY tabanlı Schottky diyotların n ve ϕ_b değerleri

Schottky Diyotlar	Karanlık		100 mW/cm ²	
	n	ϕ_b (eV)	n	ϕ_b (eV)
Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si	2.32	0.828	1.56	0.873
Au/BOD-Pyr/n-Si	2.84	0.751	1.55	0.871
Au/BODIPY-MF/n-Si	2.66	0.906	1.21	0.967
Au/Phenyl-BODIPY/n-Si	2.43	0.84	-	-

Onur Ongun’un BOD-Pyr organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturduğu Au/BOD-Pyr/n-Si Schottky diyotuna ait idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini karanlık için sırasıyla 2.84 ve 0.751 eV, 100 mW/cm² için sırasıyla 1.55 ve 0.871 eV olarak bulmuştur [8]. Muhammet Ferit Şahin’in BODIPY-MF organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturduğu Au/BODIPY-MF/n-Si Schottky diyotuna ait idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini sırasıyla karanlık için 2.66 ve 0.906 eV, 100 mW/cm² için 1.21 ve 0.967 eV olarak bulmuştur [32]. Kılıçoğlu ve arkadaşlarının Phenyl-BODIPY organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturduğu Au/Phenyl_BODIPY/n-Si Schotky diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini karanlık için sırasıyla 2.43 ve 0.84 eV bulmuşlardır [33]. Bulunan bu sonuçlar Tablo 4.2’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Metal/yarıiletken kontaklarda yük taşıyıcılarının bir yönden diğer yöne daha kolay iletilmesi doğrultma davranışı olarak bilinmektedir. Doğrultma oranı, doğru beslem akımının ters beslem akımına oranıdır. İdeal davranış sergileyen diyotlarda bu oran genellikle 10⁸-10¹⁰ arasında olmaktadır [34].

Doğrultma oranı RR;

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

şeklinde ifade edilmektedir. I_F doğru beslem akımı, I_R ters beslem akımıdır. Bu denkleme göre hazırlanmış olduğumuz Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun doğrultma oranı 361 bulunmuştur.

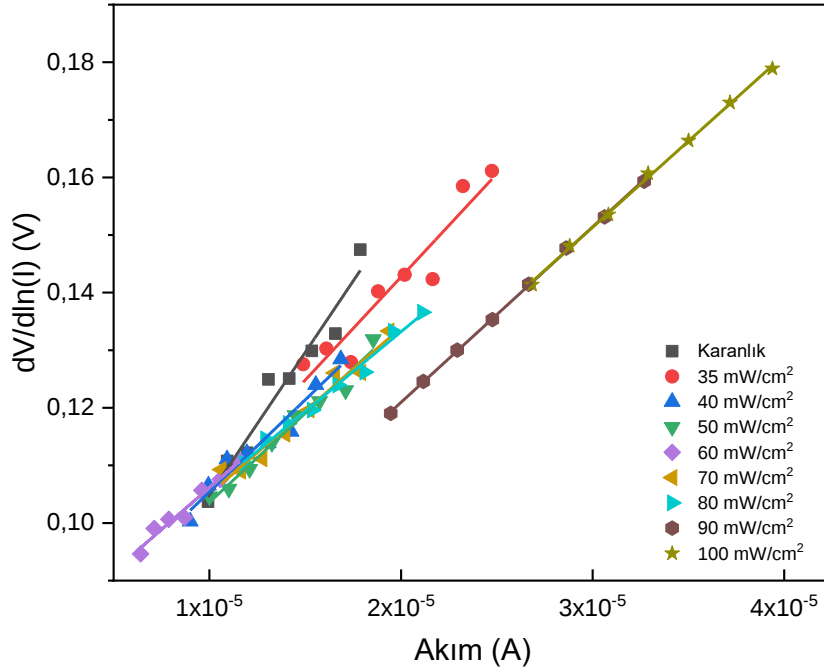
4.2. Cheung Metodu ile Seri Direncin Hesaplanması

Hazırlanan Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun seri direnç değerleri karanlıkta ve farklı aydınlatma şiddetleri altında Cheung Fonksiyonu kullanılarak hesaplanmıştır. Cheung metoduna göre seri direnç değeri (R_s), akım-voltaj (I-V) eğrisinin doğru beslemde lineerlikten sapmaya başladığı bölgede etkili olmaktadır. İlgili Cheung fonksiyonları denklem 4.7 ve denklem 4.8’de verilmiştir [35].

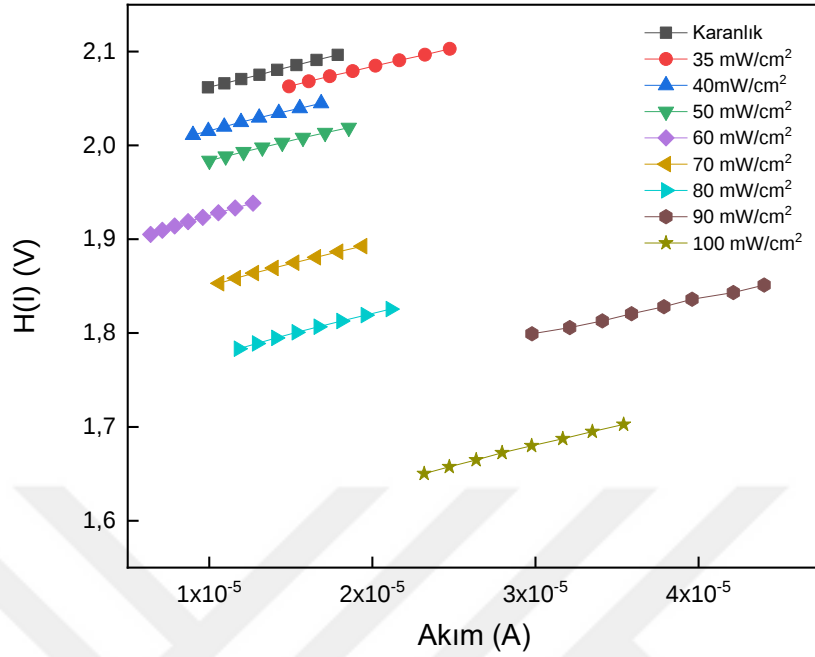
$$\frac{dV}{d(\ln I)} = n \frac{kT}{q} + IR_s \quad (4.7)$$

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

Üretilen Au/BODIPY-OH-Ph/n-Si/In diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetlerine ait $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’te gösterilmiştir. Elde edilen R_s değerleri ise Tablo 4.3’te verilmiştir.



Şekil 4.3. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri



Şekil 4.4. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki H(I)-I grafiği

Tablo 4. 3. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun R_s değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm^2)	$dV/d\ln(I)-I$	$H(I)-I$
	R_s ($\text{k}\Omega$)	R_s ($\text{k}\Omega$)
Karanlık	2.660	2.776
35	2.044	2.428
40	1.906	2.350
50	1.693	2.383
60	1.476	2.328
70	1.441	2.300
80	1.355	2.290
90	1.236	2.200
100	1.200	2.185

Cheung fonksiyonları ile bulunan R_s değerlerine bakıldığında ışık şiddeti arttıkça seri direnç değeri düşmektedir. Literatürde bazı araştırmacıların benzer sonuçlar bulduğu gözlemlenmektedir. Tataroğlu ve arkadaşlarının Ru(II) kompleks organik arayüzey malzemesini kullanarak oluşturduğu fotodiyotun seri direnç değerleri; $dV/d(\ln I)$ için

karanlıkta 2.62 k Ω , 100 mW/cm² ışık şiddeti altında 2,57 k Ω , H(I) için ise karanlıkta 2.63 k Ω , 100 mW/cm² ışık şiddetinde 2.59 k Ω bulunmuştur [35]. Tan ve arkadaşlarının oluşturmuş olduğu Au/ZnO/n-GaAs Schottky diyotunun R_s değerleri dV/d(lnI) için karanlıkta 1.100 Ω , 100 W ışık şiddeti altında 1.066 Ω bulunmuştur [37].

Literatürde yapılan bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların ve bu tez için hazırlanmış Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotunun seri direnç değerleri karanlık ve 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında karşılaştırmalı olarak Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4. 4. Literatürdeki bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların R_s değerleri

	Karanlık	100 mW/cm ²
Schottky Diyotlar	R_s (k Ω)	R_s (k Ω)
Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si	2.660	1.200
Au/BOD-Pyr/n-Si	5.019	2.671
Au/BODIPY-MF/n-Si	0.264	0.082
Au/Phenyl-BODIPY/n-Si	1.300	-

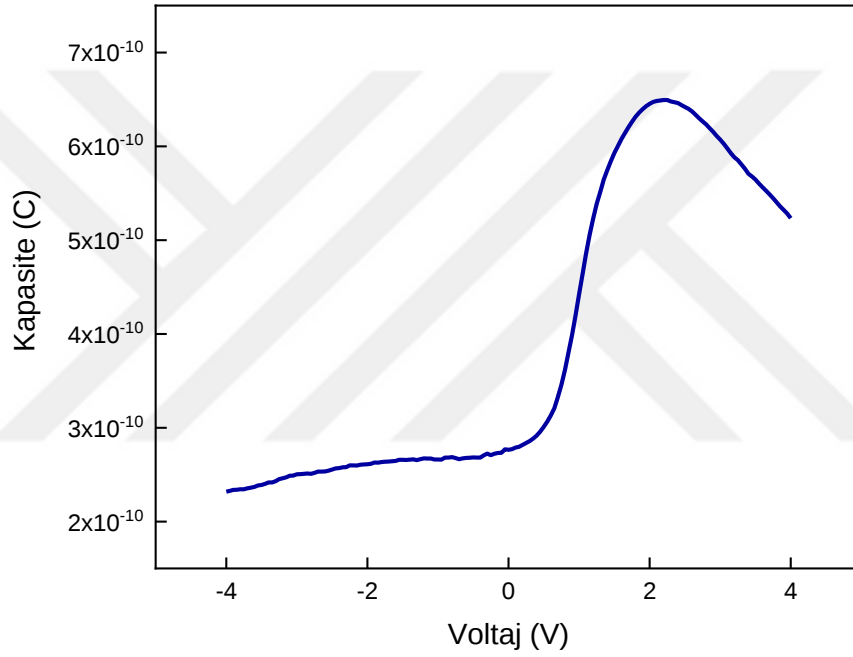
Onur Ongun BODIPY tabanlı organik arayüzey malzemesi olarak BOD-Pyr [8], Muhammet Ferit Şahin BODIPY-MF [32], Kılıçoğlu ve arkadaşları ise Phenyl_BODIPY [33] kullanarak oluşturdukları Schottky diyotların seri direnç değerlerini Tablo 4.4'ten de görüleceği üzere k Ω mertebelerinde bulmuşlardır. Hazırlanan tüm diyotlar için karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki seri direnç değerlerine bakıldığında artan ışık şiddetinin seri direnç değerlerini önemli ölçüde düşürdüğü görülmektedir. Tabloya bakıldığında bu tez için hazırlanan Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotunun seri direnç değerleri literatürle uyumlu olduğu görülmektedir.

4.3. Organik Arayüzey Tabaka Kalınlığının Hesaplanması

Doğrultucu kontak ile yarıiletken arasına büyütülen organik arayüzey tabakasının kalınlığı, 1MHz frekanstaki C-V ölçümlerinden yararlanılarak ve Denklem 4.9'daki eşitlik kullanılarak bulunmuştur [38]. 1 MHz frekanstaki kapasite-voltaj grafiği Şekil 4.5'te verilmiştir.

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

Denklemde yer alan ϵ_i arayüzey tabakası geçirgenlik sabiti, ϵ_0 boşluğun geçirgenlik sabiti, δ organik arayüzey tabakası kalınlığı ve A etkin yüzey alanını ifade etmektedir. Şekil 4.5'teki grafikten $C_{org} = 6.49 \times 10^{-10}$ alınarak, arayüzey tabakasının kalınlığı 1.28×10^{-5} (128nm) hesaplanmıştır.



Şekil 4.5. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun 1 MHz'de kapasite-voltaj grafiği

4.4. Arayüzey Durum Yoğunluğunun Hesaplanması

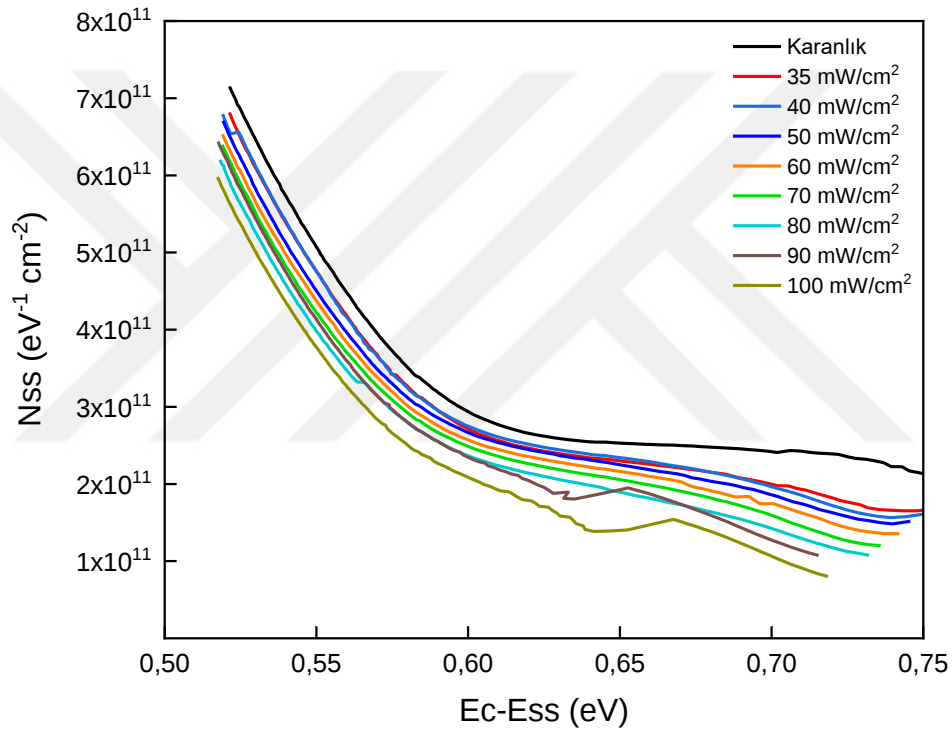
Arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), doğru beslem altındaki akım-voltaj (I-V) ölçümlerinden, engel yüksekliği değeri göz önüne alınarak, enerjinin ($E_{CC}-E_{ss}$) bir fonksiyonu olarak elde edilir [39].

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotun arayüzey durumlarının yoğunluğu ve arayüzey durumlarının enerji değerleri sırasıyla Denklem 4.10 ve Denklem 4.11 ile hesaplanmıştır.

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

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

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotuna ait $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği Şekil 4.6’da verilmiştir.



Şekil 4.6. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altındaki $N_{ss}-(E_c-E_{ss})$ grafiği

Şekil 4.5’te görülen grafiğe göre yapılan hesaplamalar sonucu diyotun arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlık için $1.83 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ – $7.15 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında $8 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ – $5.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ değerleri arasında değişmektedir. Bu hesaplamalara göre aydınlatma şiddeti arttığında arayüzey durumlarında azalma görülmektedir. Pakma ve arkadaşları Koronen organik arayüzey tabakası kullanarak A/Koronen/n-Si Schottky diyotunu

oluşturmuşlar ve bu diyotun N_{ss} değerlerini karanlık için $4.76 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ – $1.32 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde $3.15 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ – $5.04 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değiştiğini hesaplamışlardır [5].

Literatürde yapılan bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların ve bu tez için hazırlanmış olan Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotunun arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlık ve 100 mW/cm^2 için karşılaştırmalı olarak Tablo 4.5'te verilmiştir.

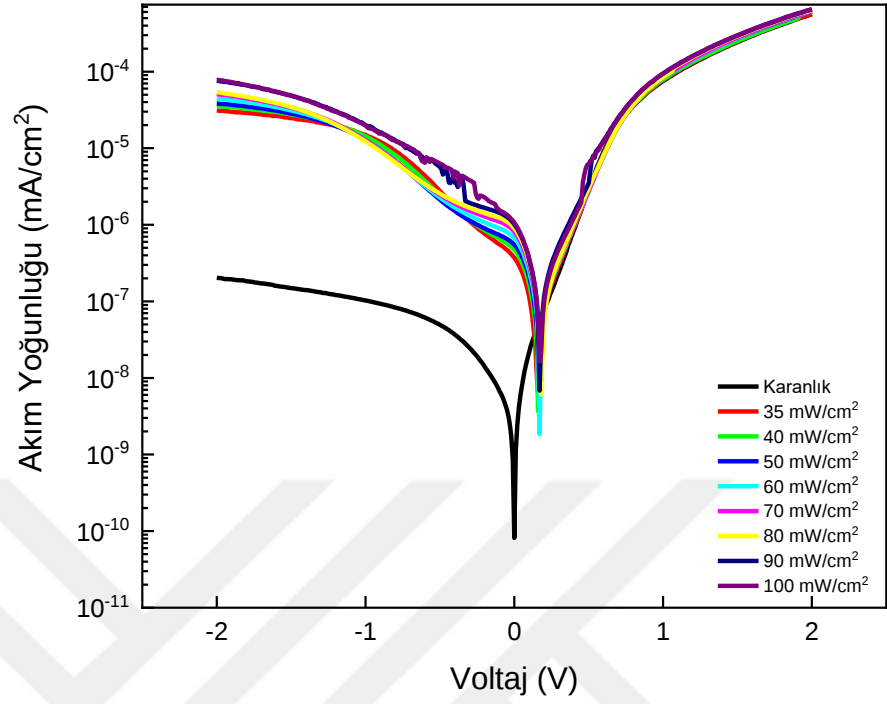
Tablo 4.5.Literatürde yapılan bazı BODIPY organik arayüzey tabanlı Schottky diyotların N_{ss} değerleri

Schottky Diyotlar	Karanlık	100 mW/cm ²
Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si	$1.83 \times 10^{11} - 7.15 \times 10^{11}$	$8 \times 10^{12} - 5.9 \times 10^{11}$
Au/BOD-Pyr/n-Si	$4.25 \times 10^{11} - 9.38 \times 10^{10}$	$2.36 \times 10^{11} - 2.81 \times 10^{10}$
Au/BODIPY-MF/n-Si	$4.05 \times 10^{11} - 1.81 \times 10^{11}$	$3.19 \times 10^{11} - 2.75 \times 10^{10}$

Literatürde yapılan bazı BODIPY organik arayüzey tabanlı Schottky diyotların ve bu tez için hazırlanan Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotunun arayüzey durum yoğunluğu değerleri karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında $10^{10} - 10^{12}$ mertebelerinde çıkmıştır. Sonuçlar Tablo 4.5'te görülmektedir. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotunun N_{ss} değerlerine bakıldığında literatüre yakın sonuçlar olduğu görülmektedir.

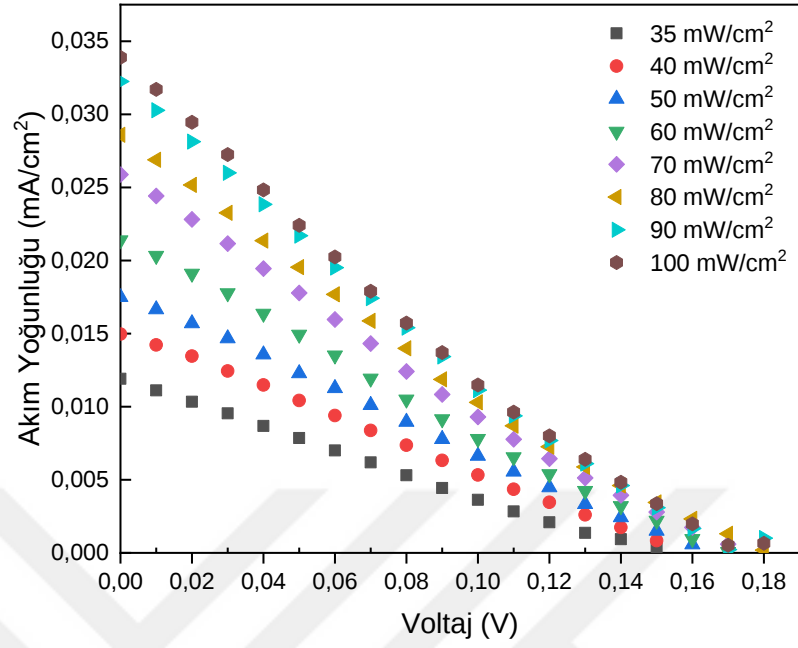
4.5. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Diyotunun Aydınlatmaya Bağlı Karakteristikleri

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun parametreleri oda sıcaklığında, karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında incelenerek, ölçülen akım değerleri doğrultucu kontağın alanına oranlanmıştır. Bunun sonucunda ölçülen akım değerleri akım yoğunluğuna (J) dönüştürülmüştür. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotuna ait akım yoğunluğu – voltaj (J-V) grafiği Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi diyot karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında iyi bir doğrultma davranışı göstermektedir. Şekil 4.7'ye bakıldığında ışık şiddetinin artmasıyla ters beslem akımı artmıştır ve bu durum diyotun bir fotodiyot davranışı sergilediğini göstermektedir.

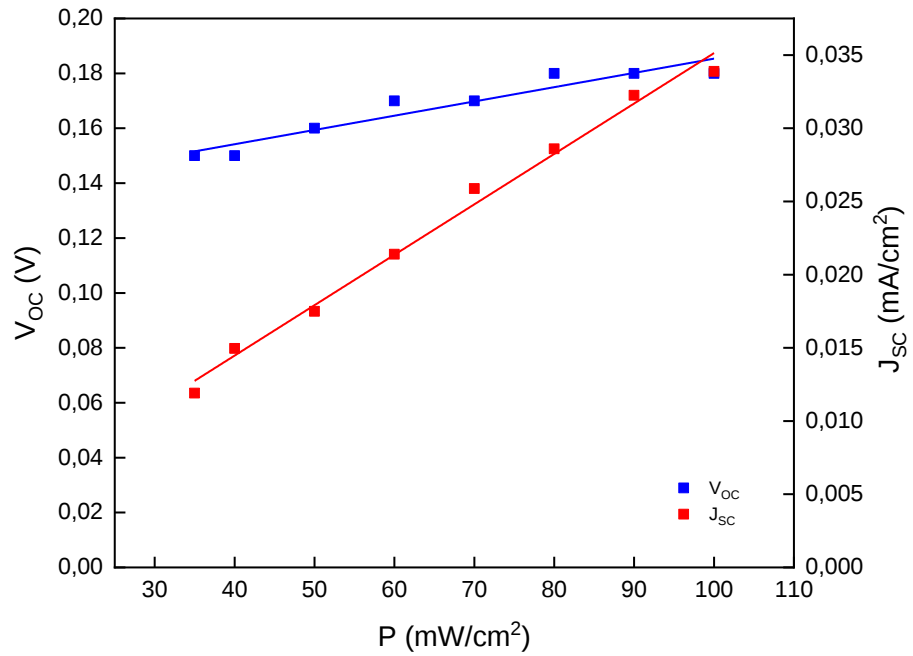


Şekil 4.7. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlık ve farklı ışık şiddetleri altındaki akım yoğunluğu grafiği

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altında kısa devre akımı (J_{sc}) ve açık devre voltajını (V_{oc}) belirlemek için akım yoğunluğu-voltaj grafiği Şekil 4.8’de verilmiştir. Bulunan J_{sc} ve V_{oc} değerleri tablo 4.6’da verilmiştir. Şekil 4.9 ve Tablo 4.6’daki değerlere bakıldığında aydınlatma şiddeti arttığında kısa devre akımı ve açık devre voltajı değerlerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 4.8. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği



Şekil 4.9. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki V_{oc} ve J_{sc} grafiği

Tablo 4. 6.Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki Voc ve Jsc değerleri

Aydınlatma Şiddeti (mW/cm ²)	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)
35	0.15	0.012
40	0.15	0.015
50	0.16	0.017
60	0.17	0.021
70	0.17	0.025
80	0.18	0.028
90	0.18	0.032
100	0.18	0.033

Akın ve arkadaşlarının Koronen organik arayüzey tabakasını kullanarak oluşturdukları Al/Koronen/n-Si diyotunun açık devre voltajını ve kısa devre akımını 30 mW/cm² için sırasıyla 0.14 V ve 0.287 mA/cm², 100 mW/cm² için ise sırasıyla 0.16 V ve 0.416 mA/cm² bulmuşlardır [40].

Literatürde yapılan bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların ve bu tez için hazırlanmış olan Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si Schottky diyotuna ait kısa devre akımı ve açık devre voltajı değerleri Tablo 4.7’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

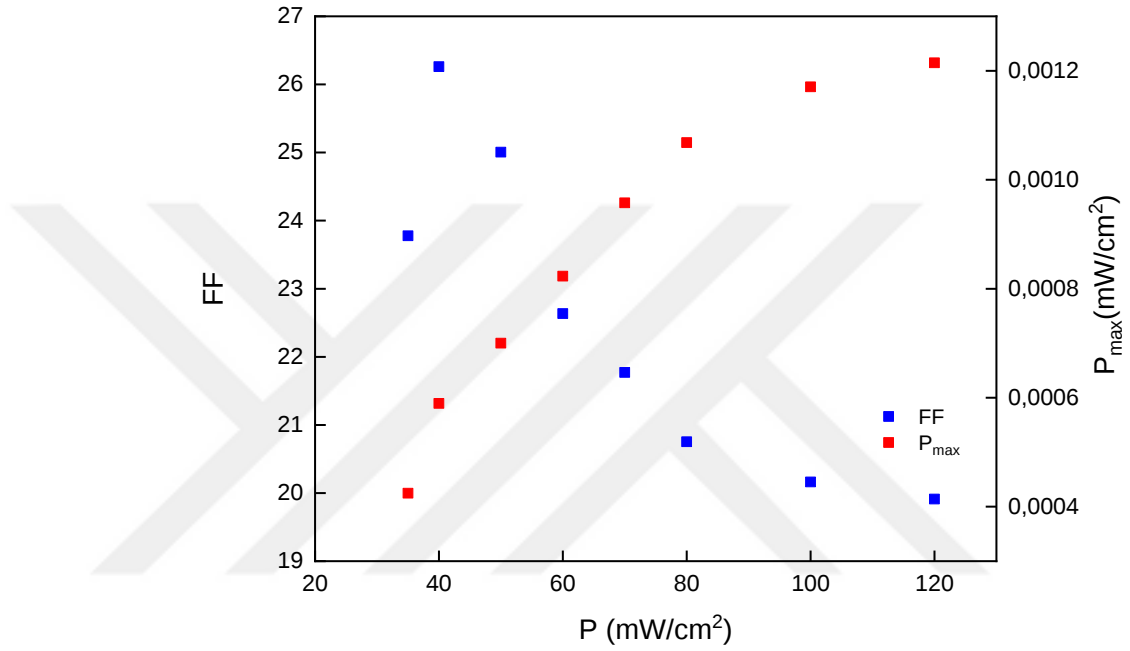
Tablo 4. 7.Literatürde yapılan bazı BODIPY tabanlı Schottky diyotların V_{OC} ve I_{SC} değerleri

Shottky Diyotlar	V _{oc} (V)	I _{sc} (mA/cm ²)
Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si	0.18	0.012
Au/BOD-pyr/n-Si	0.26	0.458
Au/BODIPY-MF/n-Si	0.14	0.000893
Au/Phenyl-BODIPY/n-Si	0.327	3.78

Şekil 4.8’den maksimum akım ve maksimum voltaj değerleri belirlenerek maksimum çıkış gücü değeri hesaplanmıştır. Maksimum çıkış gücü, açık devre voltajı ve kısa devre akımı değerleri yardımıyla doldurma faktörü hesaplanmıştır. Doldurma faktörüne ait eşitlik denklem 4.12’de verilmiştir.

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

Farklı aydınlatma yoğunlukları altında hesaplanan FF ve $P_{\max}$ değerlerine ait grafik Şekil 4.10'da gösterilmiştir. Grafiğe bakıldığında artan ışık şiddetiyle $P_{\max}$ değeri artarken FF değerinde azalma görülmektedir. Hesaplanan maksimum voltaj, maksimum akım, maksimum çıkış gücü ve doldurma faktörü değerleri Tablo 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.10. Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun farklı aydınlatma şiddetlerindeki FF ve $P_{\max}$ grafiği

Tablo 4. 8.Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotuna ait V_m , I_m , P_m ve FF değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm²)	V_m (V)	I_m (mA)	P_m (W)	FF
35	0.07	0.0061	4.33x10 ⁻⁴	24.27
40	0.08	0.0073	5.89x10 ⁻⁴	26.26
50	0.08	0.0089	7.17x10 ⁻⁴	25.60
60	0.08	0.0104	8.4x10 ⁻⁴	23.08
70	0.07	0.0143	10.02x10 ⁻⁴	22.77
80	0.08	0.0139	11.19x10 ⁻⁴	21.74
90	0.08	0.0153	12.32x10 ⁻⁴	21.22
100	0.08	0.0157	12.58x10 ⁻⁴	20.62

BÖLÜM 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada kullanılan n-tipi silisyum kristali 500 μm kalınlığa sahip, (100) yüzey yönelimli ve 20 $\Omega\text{-cm}$ öz direnç göstermektedir. BODIPY-Ph-OH organik bileşiği spin kaplama yöntemi kullanılarak, ince film olarak büyütülmüştür ve Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotu oluşturulmuştur. Üretilen diyotun elektriksel parametrelerini incelemek için oda sıcaklığında, karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında (35 mW/cm^2 , 40 mW/cm^2 , 50 mW/cm^2 , 60 mW/cm^2 , 70 mW/cm^2 , 80 mW/cm^2 , 90 mW/cm^2 , 100 mW/cm^2) -2V ve +2V voltaj aralığında I-V ölçümleri alınmıştır.

Oluşturulan InI-V grafiği incelendiğinde ters beslem bölgesinde bir doyuma sahip olan diyotun, doğru beslem bölgesinde ideallikten sapmalar olduğu görülmüştür. InI-V grafiğinden diyotun iyi bir doğrultma özelliği gösterdiği görülmüştür ve bunun sonucunda termiyonik emisyon teorisi kullanılarak diyot parametreleri olan engel yüksekliği, idealite faktörü, seri direnç ve doyma akımı değerleri hesaplanmıştır. Karanlık ve farklı ışık şiddetleri altındaki idealite faktörü değerleri oda sıcaklığındaki yarı-logaritmik I-V grafiklerinin ileri beslem tarafındaki lineer bölgesinin eğiminden Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Diyotun engel yüksekliği değerleri, yarı-logaritmik doğru beslem altındaki I-V eğrilerinin lineer olduğu bölgenin akım eksenini kestiği noktadan hesaplanmıştır. Cheung fonksiyonları kullanılarak I-V karakteristiklerinden Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun $dV/d(\ln I) - I$ ve $H(I) - I$ grafikleri çizilmiştir. Bu iki grafikten yararlanılarak diyotun seri direnç değerleri hesaplanmıştır.

Yapılan hesaplamalarda diyotun engel yüksekliği değeri karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde sırasıyla 0,828 eV ve 0,873 eV olarak bulunmuştur. Artan ışık şiddetiyle birlikte engel yüksekliği değerinin de arttığı görülmüştür. Doyma akımı değerleri karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde sırasıyla $4,07 \times 10^{-9}$ mA ve $7,04 \times 10^{-10}$ mA olarak bulunmuştur. Diyotun idealite faktörü değeri karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık

şiddeti altında sırasıyla 2,32 ve 1,59 bulunmuştur. İdealite faktörünün 1'den büyük çıkması diyotun ideallikten saptığını göstermektedir. İdealite faktörü değeri arayüzey tabakasının varlığından, istemsiz oluşan oksit tabakadan ve seri direnç etkisinden dolayı 1'den büyük çıkmaktadır. Bu arayüzey tabakası yüzey hazırlarken veya metal buharlaştırırken oluşabilir. Ancak oluşturduğumuz diyotta ışık şiddeti arttıkça idealite faktörü 1'e yaklaşmaktadır. Bu durumda oluşturulan Schottky diyotun ışığa duyarlı diyot yani fotodiyot olarak kullanılabileceği görülmektedir.

Diyotun ideallikten sapmasına sebep olan etkenlerden olan seri direnç değerleri Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanmıştır. $dV/d(\ln I) - I$ grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde sırasıyla 2660Ω - 1200Ω , $H(I) - I$ grafiğinden elde edilen seri direnç değerleri ise karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında sırasıyla 2776Ω ve 2185Ω olarak bulunmuştur. Yapılan hesaplarda aydınlatma şiddeti artarken seri direncin azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi ise aydınlatma şiddeti arttıkça yarıiletkenin valans bandındaki yüklerin uyarılması ve iletkenliğin artmasına sebep olmasıdır.

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In diyotunun arayüzey durum yoğunluğu karanlıkta $1,83 \times 10^{11} - 7,15 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında, 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında ise $8 \times 10^{12} - 5,9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ arasında değişmektedir. Bu sonuçlara bakıldığında aydınlatma şiddetinin artması arayüzey durum yoğunluğunu azaltmaktadır.

Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun açık devre voltajı, kısa devre akımı, maksimum akımı, maksimum voltajı, maksimum çıkış gücü ve doldurma faktörü gibi diyot parametrelerinin hesaplanabilmesi için diyotun farklı aydınlatma şiddetleri altındaki akım yoğunluğu-voltaj grafiği çizdirilmiştir. Bu grafiğe göre 100 mW/cm^2 ışık şiddetinde açık devre voltajı 0,18 V, kısa devre akımı 0,0338 mA, maksimum voltaj 0,08V, maksimum akım 0.0157mA, maksimum güç 0,0012 mW ve doldurma faktörü %20 bulunmuştur. Aydınlatma şiddetinin artmasıyla maksimum akım, maksimum voltaj ve maksimum çıkış gücü değerleri artarken doldurma faktörü değerinin azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak hazırlamış olduğumuz Au/BODIPY-Ph-OH/n-Si/In Schottky diyotunun karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altındaki davranışı ve diyot parametreleri incenmiş olup, yapılan hesaplamalar sonucunda diyotun fotodiyot olarak kullanılabileceği öngörülmüştür.



KAYNAKLAR

- [1] Güzel, T., Bilgili, A.K., Özer, M. 2018. Investigation of Inhomogeneous Barrier Height For Au/n-type 6H-SiC Schottky Diodes in a Wide Temperature Range, Superlattices and Microstructures,124: 30-40.
- [2] Kirezli, H. 2019. nGaAs ve n-Si Yarıiletkenler üzerinde Yüzey Polimerizasyon yöntemiyle elde edilmiş Olan P[(EGDMA-VPCA)-SWCNT] Filmlerinin Oluşturduğu Fotodiyot Yapıların Elektrik ve Optik Özellikleri. Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- [3] Önal, B. 2019. GaP Yarıiletkenleri ile Hazırlanan Metal-Yarıiletken Kontakların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik ABD, Yüksek Lisans Tezi.
- [4] Erdoğan, E., Kundakçı, M. 2017. Room Temperature Current-Voltage (I-V) Characteristics of Ag/InGaN/n-Si Schottky Barrier Diode, Physica B, 506: 105-108.
- [5] Pakma, O., Çavdar, Ş., Koralay, H., Tuğluoğlu, N., Yüksel, Ö.F. 2017. Improvement of diode parameters in Al/n-Si Schottky diodes with Coronene interlayer using variation of the illumination intensity, Physica B, 527: 1-6.
- [6] Gündüz, B. 2007. Organik Yarıiletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- [7] Teknikel, E. 2013. Yeni Bodipy Bileşiklerinin Sentezi ve Spektral Özelliklerinin İncelenmesi, Hacettepe Üniversitesi, Kimya ABD, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- [8] Ongun, O. 2019. Organik Tabanlı Fotodiyotların Hazırlanması ve Aydınlatma Altında Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi, Giresun üniversitesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, Giresun.
- [9] Neamen, D.A., 2002. Semiconductors Physics and Devices. 3. Baskı, Palme Kitapevi, Ankara.
- [10] Okutan, M., Yakuphanoglu, F. 2008. Analysis of Interface States and Series Resistance of Ag/SiO₂/n-Si MIS Schottky Diode Using Current-Voltage and Impedance Spectroscopy Methods, M. Electronic Engineering, 85: 646-653.

- [11] Rhoderick, E.H., Williams, R.H. 1988. Metal Semiconductor Contacts. 2nd edition. Clarendon Pres, Oxford.
- [12] Rhoderick, E.H. 1978. Metal–Semiconductor Contacts (Electrical & Electronic Engineering Monographs), Oxford University Press, 4:1589-1601, Oxford.
- [13] Pakma, O. 2008. Metal/TiO₂/c-Si/Metal Yapılarında Yüzey Şartlarının Elektriksel Belirtiler Üzerindeki Etkisi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Ankara.
- [14] Card, H.C., & Rhoderick, E. 1971. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface Effects in Silicon Schottky Diodes, Journal of Physics D: Applied Physics, 4:1589 – 1601.
- [15] Ayhan, S. 2012. n-Si/Metal Kompleksi/Au Yapıların Aygıtsal Özellikleri ve Panaf Metal Kompleksinin Optiksel Özelliğinin Araştırılması, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Diyarbakır.
- [16] Shan, B., Miao, Q. 2017. Molecular Design of n-Type Semiconductors For High-Performance Thin Films Transistors, Tetrahedron Letters, 58: 1903-1911.
- [17] Batra, I.P., Tekman, E., Ciraci, S. 1991. Theory of Schottky Barrier and Metallization Progress in Surface Science, 36: 289-361.
- [18] Yağlıoğlu, E., Özmen, Ö.T. 2014. Au/P3HT:PCBM/n-Si (MPY) Schottky Bariyer Diyotun Bazı Elektriksel Parametrelerinin Frekansa Bağlı Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri ile İncelenmesi, Düzce Bilim ve Teknoloji Dergisi, 2: 227-234.
- [19] Aslan, F., Güllü, Ö., Ocak, Y.S., Rüzgar, Ş., Tombak, A., Özaydın, C., Pakma, O., Arsel, İ. 2015. Organik Arayüzey Tabakalı Al/CuPc/P-InP Kontakların Fabrikasyonu ve Elektriksel Parametrelerinin İncelenmesi, Batman Üniversitesi Yaşam Bilimleri Dergisi, 2 (5): 263-275.
- [20] Tan, S.O. 2018. Schottky Yapılar Üzerine İnceleme ve Analiz Çalışması, Politeknik Dergisi, 21: 977-989.

- [21] Sönmezoğlu, S., Akın, S. 2011. Antimon Katkılı $\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Diyotun Elektriksel Parametrelerinin Farklı Yöntemlerle Belirlenmesi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 26: 25-38.
- [22] Sönmezoğlu, S., Akın, S. 2011. Kapasitans-Voltaj (C-V) Yöntemiyle Sb Katkılı $\text{TiO}_2/\text{n-Si}$ MIS yapının Seri Direnç Parametresinin Hesaplanması, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 11: 1-8.
- [23] Naik, S.S., Reddy, V.R. 2012. Temperature Dependency and Current Transport Mechanisms of Pd/V/n-type InP Schottky Rectifiers, Advanced Materials Letters, 3: 188-196.
- [24] Çavaş, M. 2011. Nano Yapılı Metal Oksit Yarıiletkenler Kullanılarak Fotodiyotların Üretilmesi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Eğitimi ABD, Doktora Tezi, Elazığ.
- [25] Yakuphanoglu, F. 2007. Electronic and Photovoltaic Properties of Al/p-Si/Copper Phthalocyanine Photodiode Junction Barrier, Solar Energy Materials and Solar Cells, 91: 1182-1186.
- [26] Hovel, H.J. 1975. Semiconductors and Semimetals, Academic Press, Vol 11, Newyork.
- [27] Orak, İ. 2016. The Performances Photodiode and Diode of ZnO Thin Film by Atomic Layer Deposition Technique, Solid State Communications, 247: 17-22.
- [28] Ali, F., Anila, H.A., Taye, N., Gonnage, R., Chattopadhyay, S., Das, A. 2015. A Fluorescent Probe For Specific Dedection Of Cysteine in The Lipid Dense Region OF Cells, Chem. Commun., 51: 16932-16935.
- [29] Zeyada, H.M., Makhoulf, M.M., El-Shabaan, M.M., Zeyada, M.H. 2016. Electrical Transport Mechanisms and Photovoltaic Characteristics of Au/neutral red/p-Si/Al Heterojunction Solar Cell, Microelectronic Engineering, 157: 35-41.
- [30] Yahia, I.S., Farag, A.A.M., Yakuphanoglu, F., Farooq, W.A. 2011. Temperature Dependence of Electronic Parameters of Organic Schottky Diode Based on Fluorescein Sodium Salt, Synthetic Metals, 161: 881-887.
- [31] Gündüz, B., Turan, N., Kaya, E., Çolak, N. 2013. The Photo-Electrical Properties of the p-Si/Fe(II)-Polymeric Complex/Au Diode, Synthetic Metals, 184: 73-82.

- [32] Şahin, M.F. 2019. BODIPY Arayüzeyli Diyotların Elektriksel Parametrelerinin Aydınlatma Şiddetine Bağlı Araştırılması, Giresun Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Giresun.
- [33] Kılıçoğlu, T., Ocak, Y.S. 2011. Electrical and Photovoltaic Properties of an Organic-Inorganic Heterojunction Based On a BODIPY Dye, *Microelectronic Engineering*, 88: 150-154.
- [34] Farag, A.A.M., Yahia, I.S. 2011. Rectification and Barrier Height Inhomogeneous in Rhodamine B Based Organic Shottky Diode, *Synthetic Metals*, 161: 32-39.
- [35] Güllü, Ö., Kılıçoğlu, T., Türüt, A. 2010. Electronic Properties of the Metal/Organic Interlayer/Inorganic Semiconductor Sandwich Device, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 71: 351-356.
- [36] Tataroğlu, A., Ocaya, R., Dere, A., Dayan, O., Serbetci, Z., Al-Sehemi, A.G., Soylu, M., Al-Ghamdi, A.A., Yakuphanoglu, F. 2018. Ruthenium(II) Complex Based Photodiode For Organic Electronic Applications, *Journal of Electronics Materials*, 47: 1.
- [37] Tan, S.O., Uslu, Tecimer, H., Çiçek, O., Tecimer, H., Orak, İ., Altındal, Ş. 2016. Electrical Characterizations of Au/ZnO/n-GaAs Schottky Diodes Under Distinct Illumination Intensities, *J.Mater.Sci.,Mater Electron*, 27: 8340-8347.
- [38] Tuğluoğlu, N., Karadeniz, S., Selçuk, A.B., Ocak, S.B. 2007. Effect of Oxide Thickness On The Capacitance and Conductance Characteristics of MOS Structures, *Physica B*, 400: 168-174.
- [39] Tuğluoğlu, N., Koralay, H., Akgül, B.K., Çavdar, Ş. 2016. Detailed Analysis of Device Parameters by Means of Different Techniques in Shottky Devices, *Journal of Electronics Materials*, 45: 3859-3865.
- [40] Akın, Ü., Yüksel, Ö.F., Taşçı, E., Tuğluoğlu, N. 2019. Fabrication of a New Hybrit Coronene/n-Si Structure By Using Spin Coating Technique and Its Photoresponse and Admittance Spectroscopy Studies, *Silicon*, <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00233-2>.

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Balıkesir’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Balıklı İlköğretim okulunda, Lise öğrenimini Balıkesir Cumhuriyet Anadolu Lise’sinde 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.

