



T.C.

Ardahan Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

**SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN SADE VE METİL
KIRMIZISI ORGANİK ARAYÜZEYLİ Pd/n-Si SCHOTTKY GÜNEŞ
PİLLERİNİN ELEKTRİKSEL VE FOTOVOLTAİK
KARAKTERİZASYONU**

Muhammet Bıra ŞAHİN

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇOBAN

Yüksek Lisans Tezi

Ardahan, 2024

SAÇTIRMA YÖNTEMİYLE ELDE EDİLEN SADE VE METİL KIRMIZISI
ORGANİK ARAYÜZEYLİ Pd/n-Si SCHOTTKY GÜNEŞ PİLLERİNİN
ELEKTRİKSEL VE FOTOVOLTAİK KARAKTERİZASYONU

Muhammet Bıra ŞAHİN

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇOBAN

Ardahan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Ardahan, 2024

KABUL VE ONAY

Muhammet Bıra ŞAHİN tarafından hazırlanan “ Saçtırma Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Metil Kırmızısı Organik Arayüzeyli Pd/n-Si Schottky Güneş Pillerinin Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonu ” başlıklı bu çalışma, 02.05.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Kadir EJDERHA (Başkan)

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇOBAN (Danışman)

Dr. Öğr. Üyesi Arif Cem TOPUZ (Üye)

Bu tez, Enstitü Yönetim Kurulunca belirlenen ve yukarıda adları yazılı jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Mustafa ŞENEL
Enstitü Müdürü

YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma iznini Ardahan Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları bana ait olacaktır.

Tezin kendi orijinal çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinleri yazılı izin alınarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan **“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”** kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricince YÖK Ulusal Tez Merkezi / Ardahan Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü / Fakülte yönetim kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir. ⁽¹⁾
- Enstitü / Fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ay ertelenmiştir. ⁽²⁾
- Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir. ⁽³⁾

09/05/2024

Muhammet Bira ŞAHİN

“Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge”

- (1) Madde 6. 1. Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu** iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.
- (2) Madde 6. 2. Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulunun** gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.
- (3) Madde 7. 1. Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, **tezin yapıldığı kurum** tarafından verilir *. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, **ilgili kurum ve kuruluşun önerisi** ile **enstitü** veya **fakültenin** uygun görüşü üzerine **üniversite yönetim kurulu** tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

Madde 7.2. Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

* Tez **danışmanının** önerisi ve **enstitü anabilim dalının** uygun görüşü üzerine **enstitü** veya **fakülte yönetim kurulu tarafından karar verilir.**

ETİK BEYAN

Bu çalışmadaki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, kullandığım verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı, yararlandığım kaynaklara bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu, tezimin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu, Tez Danışmanının **Dr. Öğr. Üyesi, Hasan Hüseyin ÇOBAN** danışmanlığında tarafımdan üretildiğini ve Ardahan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Yönergesine göre yazıldığını beyan ederim.

Muhammet Bıra ŞAHİN

ÖN SÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmamda bilgi ve birikimlerini aktararak yol gösteren ve tecrübesiyle çalışmalarımın daha verimli ve kolay yürütülmesinde sabırla desteğini sürdüren çok kıymetli tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin ÇOBAN hocama teşekkürü borç bilir, saygılarımı sunarım.

Bu tez çalışmasında numunelerin üretilmesi, ölçülmesi ve laboratuvar çalışmalarında rehberlik eden, bilgi ve birikimini esirgemeyen, baştan sona değin emek sarf edip çalışmaları sabırla takip eden çok değerli Doç. Dr. Kadir EJDERHA hocama teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarımı yürüttüğüm Bingöl Üniversitesi Merkezi Laboratuvar Uygulama ve Araştırma Merkezi personellerinin hepsine gösterdikleri hoşgörü ve ilgiden dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans başta olmak üzere bütün eğitim hayatım boyunca hiçbir zaman beni yalnız bırakmayan, destek ve dualarını eksik etmeyen ve bana ümitsizlik duygusu yaşatmayan başta çok kıymetli annem Zabide ŞAHİN, abim Yıldırım ŞAHİN ve kardeşim Mahmut ŞAHİN ile birlikte aileme ve dostlarıma teşekkür ederim.

Muhammet Bıra ŞAHİN

Ardahan, 2024

ÖZET

ŞAHİN, Muhammet Bıra. *Saçtırma Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Metil Kırmızısı Organik Arayüzeyli Pd/n-Si Schottky Güneş Pillerinin Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Ardahan, 2024.

Bu çalışmada, kloroform çözücüsüne metil kırmızısı organik kristal malzemesi ilave edilerek hazırlanan çözeltiden n-Si yarıiletkenin parlak yüzeyine damlatma yoluyla ve KOH, HF, HCl ve H₂O₂ kimyasal çözücülerle aşındırma suretiyle pürüzsüz hale getirilen n-Si yarıiletkenin yüzeyine Spin Coating yöntemiyle organik ince bir film tabaka kaplandı. n-Si yarıiletkenin mat yüzeyine termal buharlaştırma tekniği ile Ag ve Al malzemeleriyle omik kontak yapıldıktan sonra daha iyi sonuç verebilmeleri için tavlama fırınında 585 °C sıcaklıkta 3 dakika boyunca tavlandı. 5 mm ve 1 mm çaplı maskeler kullanılarak sırasıyla Pd ve Au metalleri, sputter (saçtırma) yöntemiyle Schottky kontaklar oluşturularak aygıtların fabrikasyon işlemleri tamamlandı. 298 K sıcaklıkta karanlık ortamda ölçümü yapıldı. Elde edilen ln I-V grafiklerinin eğimlerinden karakteristik Schottky diyot parametreleri olan idealite faktörü (n) ile engel yüksekliği (Φ_b); referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numune için 1.70, 0.70 eV, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numune için 1.37, 0.68 eV ve Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numune için 1.82, 0.76 eV olarak sırasıyla hesaplandı. Fabrikasyonu yapılan aygıtların fotovoltaik performansını inceleyebilmek için güneş simülatörü ile farklı ışık şiddetleri (30-100 mW/cm²) altında güneş enerji verimi (η), doluluk faktörü (FF), kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}), maksimum güç (P_m) gibi güneş pili temel parametreleri hesaplandı. Yarı logaritmik I-V grafiklerden ters beslem bölgesinde ışık şiddetinin artmasıyla akım değerlerinin arttığı bu da Schottky diyotun güneş pili özelliği taşıdığı gözlemlendi. Işık altında fotodiyot aygıtların gerilimi pozitif tarafta kesmesi aygıtın fotovoltaik özellik sergilediği anlamına gelmektedir. Schottky güneş pillerinin yüzey morfolojisi SEM cihazında incelendi ve numunelerin arayüzeyleri belirli kalınlıklarda organik malzeme ile homojene yakın dağılımla kaplandığı ve net bir şekilde arayüzeyinde organik bir malzeme varlığı tespit edildi.

Anahtar Sözcükler:

Schottky güneş pilleri, diyot, termal buharlaştırma, metal-yarıiletken kontaklar, organik arayüzey.

ABSTRACT

ŞAHİN, Muhammet Bira. *Electrical and Photovoltaic Characterization of Pd/n-Si Schottky Solar Cells with Plain and Methyl Red Organic Interface Obtained by Sputtering Method*, Master's Thesis, Ardahan, 2024.

In this thesis, a thin organic film layer was applied to the surface of the n-Si semiconductor, which was smoothened by dropping the solution prepared by adding methyl red organic crystal material to the chloroform solvent, onto the shiny surface of the n-Si semiconductor and by etching with KOH, HF, HCl and H₂O₂ chemical solvents, using the Spin Coating method. covered. After ohmic contact was made with Ag and Al materials by thermal evaporation technique on the matte surface of the n-Si semiconductor, it was annealed in the annealing oven at 585 °C for 3 minutes to provide better results. The fabrication of the devices was completed by creating Schottky contacts using Pd and Au metals, sputtering method, using 5 mm and 1 mm diameter masks, respectively. Measurement was made in a dark environment at a temperature of 298 K. From the slopes of the ln I-V graphs obtained, the characteristic Schottky diode parameters, ideality factor (n) and barrier height (Φ_b); 1.70, 0.70 eV for the reference Au/Pd/n-Si/Al/Ag sample, 1.37, 0.68 eV for the Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag sample and 1.37, 0.68 eV for the Au/Pd/MK/n-Si ay /Al/Ag was calculated as 1.82, 0.76 eV for the sample, respectively. In order to examine the photovoltaic performance of the fabricated devices, solar energy efficiency (η), load factor (FF), short circuit current (Isc), open circuit voltage (Voc), maximum voltage under different light intensities (30-100 mW/cm²) were used with the solar simulator. Solar cell basic parameters such as power (Pm) were calculated. From the semi-logarithmic I-V graphs, it was observed that the current values increased as the light intensity increased in the reverse feed region, which meant that the Schottky diode had solar cell properties. The fact that photodiode devices cut the voltage on the positive side under light means that the device exhibits photovoltaic properties. The surface morphology of Schottky solar cells was examined with the SEM device and it was determined that the interfaces of the samples were covered with organic material in certain thicknesses in a near-homogeneous distribution and the presence of an organic material at the interface was clearly detected.

Keywords:

Schottky solar cells, diode, thermal evaporation, metal-semiconductor contacts, organic interface.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI.....	ii
ETİK BEYAN.....	iv
ÖN SÖZ.....	v
ÖZET	vi
ABSTRACT	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
TABLolar DİZİNİ	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xv
GİRİŞ	1
1. BÖLÜM.....	3
GÜNEŞ PİLİ TARİHÇESİ VE PİL ÇEŞİTLERİ	3
1.1. GÜNEŞ PİLİ TARİHÇESİ	3
1.2. BİRİNCİ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ.....	4
1.2.1. Mono Kristal Si Güneş Pilleri	4
1.2.2. Polikristal Si Güneş Pilleri	4
1.3. İKİNCİ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ	5
1.3.1. İnce Film Si Güneş Pilleri	5
1.3.2. Amorf Si (a-Si) Güneş Pilleri	5
1.4. ÜÇÜNCÜ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ.....	5
1.4.1. Organik Güneş Pilleri.....	6
1.4.2. Boya Sentezli Güneş Pilleri.....	6
2. BÖLÜM.....	7
LİTERATÜR ÖZETİ	7
3. BÖLÜM.....	12
KURAMSAL TEMELLER.....	12
3.1. YARIİLETKENLER.....	12
3.2. KATILARIN BANT TEORİSİ	13
3.3. KATKISIZ YARIİLETKEN.....	14

3.4. KATKILI YARIİLETKEN.....	14
3.4.1. n-Tipi Yarıiletken.....	15
3.4.2. p-Tipi Yarıiletken.....	16
3.5. P-N EKLEMİ.....	17
3.6. METAL/YARIİLETKEN KONTAKLAR	18
3.6.1. Schottky (Doğrultucu) Kontaklar	21
3.6.2. Omik Kontaklar	26
3.7. METAL (OMİK)/n-TİPİ YARIİLETKEN/METAL (SCHOTTKY) DİYOT YAPISI	30
3.8. METAL-YARIİLETKEN SCHOTTKY DİYOTLARDA AKIM İLETİMİ	31
3.8.1. Termoyonik Emisyon Teorisi.....	31
3.8.2. Difüzyon Teorisi	36
3.8.3. Termoyonik Emisyon – Difüzyon Teorisi	37
3.8.4. Engel Boyunca Tünelleme	38
3.8.5. T_0 etkili akım iletimi	40
3.9. METAL/YARIİLETKEN KONTAK YAPILARINDA SICAKLIĞIN ETKİSİ.....	41
3.10. GÜNEŞ PİLİ VE FOTODİYOT UYGULAMALARI	42
3.11. GÜNEŞ PİLİNİN TEMEL ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ.....	44
4. BÖLÜM.....	50
MATERYAL VE YÖNTEM	50
4.1. METİL KIRMIZISI	50
4.2. n-Sİ KRİSTAL MALZEMELERİN TEMİZLENMESİ.....	51
4.3. TERMAL BUHARLAŞTIRMA YÖNTEMİ.....	52
4.4. n-Sİ NUMUNE ARAYÜZEYİNE MALZEME KAPLANMASI.....	54
4.4.1. Spin Coating Tekniği ile Numune Arayüzeyine Malzeme Büyütülmesi	54
4.4.2. Damlatma Yoluyla ile Numune Arayüzeyine Malzeme Büyütülmesi....	55
4.5. SPUTTERİN (MANYETİK ALANDA DC SAÇTIRMA) YÖNTEMİ	56
4.5.1. Sputterin Tekniği Kullanılarak Schottky Kontak Oluşturulması.....	59
4.6. IŞIK ŞİDDETİNE BAĞLI ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER.....	59
5. BÖLÜM.....	61

BULGULAR VE TARTIŞMA	61
5.1. SCHOTTKY DİYOT KARAKTERİSTİK DEĞERLERİ.....	61
5.2. FOTOVOLTAİK ÖLÇÜMLER	63
5.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) GÖRÜNTÜLERİ...	72
SONUÇ.....	76
KAYNAKÇA.....	78
EKLER.....	83
EK 1. ORİJİNALLİK RAPORU FORMU	83
EK 2. ETİK KURUL MUAFİYET FORMU	84
ÖZ GEÇMİŞ	85

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Å	Angström
Si	Silisyum
Ge	Germanyum
P	Fosfor
B	Bor
Al	Alüminyum
Ag	Gümüş
Au	Altın
Ar	Argon
Pd	Paladyum
PV	Fotovoltaik
C	Karbon
µm	mikrometre
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
Ψs –V	Yüzey potansiyeli –gerilim
HCl	Hidroklorik asit
HF	Hidrojen florür
H₂O₂	Hidrojen peroksit
KOH	Potasyum hidroksit
N₂	Azot gazı
MM	Metil mavisi
UV	Ultraviyole
MK	Metil kırmızısı
I-V	Akım-gerilim
C-V	Kapasite-gerilim
E_g	Yasak enerji aralığı
e⁻	Elektron iyonu
E_f	Fermi enerji seviyesi
E	Elektrik alan

Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
E_c	İletkenlik bandı
E_v	Valans bandı
χ_s	Elektron yakınlığı/ilgisi
Φ_b	Bariyer/engel yüksekliği
E_{fm}	Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
V_D	Difüzyon potansiyeli
I	Akım
I_0	Akım doyma akımı
eV	Elektron volt
J	Akım yoğunluğu (A/cm^2)
J_0	Ters-doyma akım yoğunluğu
TE	Termoiyonik emisyon
$J_{m \rightarrow s}$	Metalden yarıiletkene akan akım yoğunluğu
$J_{s \rightarrow m}$	Yarıiletkenden metale akan akım yoğunluğu
v_x	Sürüklenme hızı
dn	Artan elektron konsantrasyonu
$g_c(E)$	İletim bandındaki hal yoğunluğu
$f_F(E)$	Fermi-Dirac ihtimaliyet (olasılık) fonksiyonu
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
V_r	Rekombinasyon hızı
T	Sıcaklık
K	Kelvin
MOS	Metal-Oksit-Yarıiletken
MS	Metal-Yarıiletken
MIS	Metal-Yalıtkan-Yarıiletken
h	Plank sabiti
m^*/m_0	Etkin kütle
δ	Oksit tabaka kalınlığı

N_{ss}	Arayüzey durumları
AE	Alan emisyonu
TAE	Termoiyonik alan emisyonu
w	Deplasyon bölgesi
V_d	Düz beslem gerilimi
e	Elektronik yük
k	Boltzmann sabiti
I_F / I_d	Diyot üzerinden geçen akım
I_L	Işık tarafından üretilen akım/fotoakım
I_{kd} / I_{sc}	Kısa devre akımı
V_{ad} / V_{oc}	Açık devre gerilimi
I_m	Maksimum akım
V_m	Maksimum gerilim
P_m	Maksimum güç
P_{in}	Işık giriş gücü
FF	Doldurma faktörü
n	İdealite faktörü
η	Güç dönüşüm verimi
V_t	Termal potansiyel
DC	Doğru akım
RF	Radyo frekansı
MF	Manyetik alan
a_y	Aşındırılmış yüzey
p_y	Parlak yüzey
ϵ_0	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. İş fonksiyon işlevlerine bağlı olarak doğrultucu ve omik kontaklar	19
Tablo 2. Üç numuneye ait engel yüksekliği, idealite faktörü ve akım yoğunluğu	62
Tablo 3. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin güneş pili parametrelerin karakteristik değerleri.....	65
Tablo 4. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin temel güneş pili parametre değerleri	67
Tablo 5. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin güneş pili parametrelerin karakteristik değerleri.....	69
Tablo 6. Schottky aygıt yapısına ait temel güneş pili parametre değerleri	75
Tablo 7. Schottky aygıt yapısına ait temel diyot parametre değerleri	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Üç farklı kristal malzeme için enerji bant diyagramı.....	14
Şekil 2. n-tipi yarıiletken kristal malzemenin oluşturulması	15
Şekil 3. p-tipi yarıiletken kristal malzemenin oluşturulması	16
Şekil 4. P-N eklem yapısının a) tüketim alanı b) şematik görünümü.....	17
Şekil 5. Tüketim bölgesinde pozitif ve negatif iyon oluşumu.....	18
Şekil 6. Metal-yarıiletken kontağın şematik görünümü.....	19
Şekil 7. Metal/n-tipi yarıiletken malzemesine ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı	22
Şekil 8. Kontak işlemi ile termodinamik denge durumunda oluşan metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağa ait enerji bant diyagramı.....	23
Şekil 9. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın düz beslem durumundaki enerji bant diyagramı.....	25
Şekil 10. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın ters beslem durumundaki enerji bant diyagramı	26
Şekil 11. Kontak öncesi metal/n-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji-bant diyagramı	28
Şekil 12. Kontak sonrası metal/n-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji-bant diyagramı	28
Şekil 13. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın düz (doğru) beslem durumundaki enerji- bant diyagramı	29
Şekil 14. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontağın ters beslem durumundaki enerji-bant diyagramı.....	29
Şekil 15. Omik ve Schottky kontaklara ait akım-gerilim karakteristik grafiği	30
Şekil 16. Termal denge halinde n^+nM yarıiletken Schottky diyot yapısının enerji-bant grafiği.....	31
Şekil 17. Metal/yarıiletken Shottky ya da Doğrultucu kontak yapısındaki imaj azalma etkisinin düz beslem altındaki enerji-bant diyagramı	32
Şekil 18. Düz beslem altında AE ve TAE ait enerji bant diyagramı.	40
Şekil 19. Değişik akım-iletim mekanizmalarına ait $nkT/q - kT/q$ diyagramı (Akgül 2015).	41
Şekil 20. Güneş pilinin şematik görünümü	43

Şekil 21. Güneş pilinde elektron-delik çifti hareketi	44
Şekil 22. pn eklemli güneş piline ait elektriksel görünüm (Sajjad 2013).	45
Şekil 23. Dirençli yüke sahip güneş pilleri (Ejderha 2012).	46
Şekil 24. Bir güneş pili I-V grafiğinin a) aydınlık ve karanlık ortamlardaki durumu ve b) düz beslem durumu (Sajjad 2013).	48
Şekil 25. Metil kırmızısı pH göstergesi (Anon 2024c).	50
Şekil 26. Metil Kırmızısı ($C_{15}H_{15}N_3O_2$) malzemesinin moleküler yapısı (Ranjan, Negi, and Tiwary 2023).	50
Şekil 27. Termal buharlaştırma ile ince film kaplama ve manyetik alanda DC saçırma ünitesi, NANOVAK NVTs-400	53
Şekil 28. Termal tavlama fırınının şematik görünümü (Ejderha 2012).	54
Şekil 29. Çözelti eklenmesi (a), döndürme eylemi (b), döndürmenin tamamlanması (c), buharlaştırma (d).	55
Şekil 30. Damlatma yöntemi temsili resmi	56
Şekil 31. Manyetik alanda DC saçırma (Sputtering) sisteminin şematik görünümü	57
Şekil 32. Metil Kırmızısı organik arayüzeyli güneş pili aygıtının kesit şematik görünümü	58
Şekil 33. Nokta kontak ölçümlerin alındığı akım-gerilim (I-V) solar simülatörü sistemi	60
Şekil 34. Oda sıcaklığında karanlıkta ölçümü yapılan üç numunenin I-V karakteristik grafiği	61
Şekil 35. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm ² değerlerindeki ölçümü	63
Şekil 36. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm ² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (P _m) değeri görünümü.	64
Şekil 37. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm ² değerlerindeki ölçümü	66
Şekil 38. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm ² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (P _m) değeri görünümü.	67
Şekil 39. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm ² değerlerindeki ölçümü	68

Şekil 40. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm ² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (P _m) değeri görünümü.....	69
Şekil 41. Üç güneş pili numunesinin karanlık ortamda ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altındaki I-V değerlerini karşılaştırılması görünümü	70
Şekil 42. Karanlık ortamda (a) ve 30-60-100 mW/cm ² ışık şiddeti altında (b), (c), (d) ölçümü alınan Schottky aygıtların karşılaştırmaların lineer I-V grafik gösterimleri	71
Şekil 43. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky güneş pilinin (a) kesilmeyen ve (b) kesilen kenar SEM görüntüleri.....	73
Şekil 44. (a) ve (b) Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş piline ait SEM görüntüleri	74

GİRİŞ

Geçmişten günümüze enerji talebinin karşılanmasında güneş enerjisi oldukça önemli bir rol üstlenmiştir. Yenilenebilir enerji kaynakları arasındaki payı nazara alındığında güneş enerjisine olan ilgi her geçen gün artmaktadır (Yağci 2011). Bu da tüm okları, güneş enerjisi teknolojisine çevirmektedir. Güneş teknolojisinin temel taşı güneş pili'dir. Güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren aygıtlar hakkında yapılan araştırma ve çalışmalar gündemdeki popülerliğini uzun yıllardır korumakta ve en çok üstünde durulan konulardan biri olmuştur. İklim değişiklikleri, ekonomik şartlar, fosil yakıt rezervlerin giderek tükenmesi ve yenilikçi rekabetler gibi birçok nedenden ötürü güneş enerjisine dolayısıyla bu alandaki aygıtlara olan ilgi her geçen gün artmaktadır. Günümüzde güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtların elde edilmesinde %95 oranında silisyum (Si) kristal malzemesi kullanılmaktadır (Bereznev et al. 2007). Bunun nedeni saf silisyum kristal malzemesinin sıcaklık ve nem gibi çevresel etkilere karşı dayanıklılığı yanı sıra yük iletim özelliğinin mükemmel yakın olmasıdır (Fujishima et al. 2009). Silisyum yarıiletken tabanlı güneş pili çalışmalarında elde edilmiş en yüksek verim %25 dolaylarıdır (Yağci 2011). Bu verim, hiç de göz ardı edilecek bir verim değildir. Verimi çok yüksek silisyum fotovoltaiik (PV) aygıtların üretimi de mümkün fakat kullanılan tekniklere ait maliyet çok yüksektir. Yüksek saflıkta silisyum yarıiletken kristal malzemesinin elde edilmesi için özel şartlara gereksinim duyulmakta bu da üretim maliyetine yansımaktadır (Sajjad 2013).

Güneş enerjisi alanında yapılan yoğun araştırma ve çalışmalar neticesinde endüstri sektöründe çeşitli güneş pilleri yer almaktadır. Fakat çevresine toksit madde yayması ve maliyetten kaynaklanan bazı olumsuz durumlardan dolayı araştırmacılar farklı malzeme arayışına yönelmiştir. Son yıllarda başta güneş pili çalışmaları olmak üzere birçok alanda organik malzeme kullanılmaya başlanmıştır. Organik malzeme kullanılmasındaki amaç maksimum optik geçirgenlik ve minimum direnç gibi elektriksel ve optik karakterizasyonların iyileştirilmesidir (Yiğit 2022).

Organik malzemeler, elektroniğin en dikkat çekici malzeme sınıfıdır. Maliyetlerinin düşük olması, üretim işlemlerinin rahatlıkla yapılması, moleküler yapılarında meydana gelebilecek küçük değişiklikler neticesinde fiziksel özellikleri çok

farklı malzemelere dönüşmeleri, esnek altlık yüzeylerine uygulanabilir olmaları gibi sebepler bu malzemeleri cazip kılmıştır (Sajjad 2013).

Bir güneş pili en sade bir tanımla, bir p-n ekleminden oluşur. Yarıiletken güneş pili, Schottky ve p-n eklemi güneş pili olarak iki ana gruba ayrılır. Tek-kristal, poli-kristal, amorf kristal ve heteroeklem güneş pilleri, bu iki grup yapısında da bulunur (Bekil 2019). Bu yapılar yalnızca bir tarafı veya tamamı veyahut da arayüzeyleri organik yapılardan oluşmuş olabilir. Yapılan birçok çalışmada, organik arayüzeyin bilhassa Schottky (doğrultucu) yapılar için doğrultma özelliklerini değiştirdiği belirlenmiştir. Ayrıca bir güneş pili, iyi bir doğrultucu yani Schottky kontak oluşturmaya bağlı olarak onun iyi bir elektrik üretici olarak işlev görmesini sağlar (M et al. 2021).

Bu tez çalışmasında, fabrikasyonu yapılan sade ve metil kırmızısı organik arayüzeyli Schottky güneş pillerinin elektriksel ve fotovoltaiik karakterizasyonlarını literatüre kazandırmaktır. Elde edilen aygıtlar 298 K sıcaklıkta karanlık ve yapay güneş ışığı olan güneş simülatörü altında farklı ışık şiddetlerinde ölçümleri alınıp elektriksel ve fotovoltaiik parametre değerleri hesaplandı. Son olarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) cihazında organik arayüzeyli aygıtların yüzey morfolojisi görüntülenerek analiz edildi.

1. BÖLÜM

GÜNEŞ PİLİ TARİHÇESİ VE PİL ÇEŞİTLERİ

En yaygın olarak kullanılan güneş pilleri üç temel başlık altında toplanabilir. Bu bölümde güneş pili tarihçesi ve pil çeşitleri hakkında bilgi verilmiştir.

1.1. GÜNEŞ PİLİ TARİHÇESİ

Schottky ve arkadaşları tarafından geliştirilen güneş pili, selenyum ve bakır oksit malzemelerinden elde edilen ilk güneş pili olarak bilinmektedir. 1954 senesinde, ilk silisyum (Si) güneş pili %6 verim ile Bell Telephone laboratuvarında üretilmiştir (Korun 2016). İlk Si güneş pili çalışmasından yaklaşık 4 yıl sonra p-n eklem Si güneş pili çalışması yapılmış ve ulaşılan verim %15 oranındadır. 1958 sene sonlarında yapay uydu sistemlerine elektrik enerjisi sağlamak adına bu güneş piller kullanılmıştır. 1973 yıllarında küresel petrol sorunu neticesinde güneş pillerine olan ilgi artmış ve güneş enerjisi alanında yapılan araştırma ve çalışmalar ivme kazanmıştır.

1982 yılında Amerika'nın Kaliforniya Eyaleti'nde Alarko Solar Inc. tarafından kurulan ve 1MW gücü ile dünyadaki ilk güneş pili santrali olarak kayıtlara geçmiştir (Korun 2016). Ulusal elektrik şebekesine bağlanan bu güneş pili santrali sayesinde elektrik fiyatlarında bir düşüş uygulandığı gözlemlenmiştir. Daha sonraki yıllarda yeni üretim teknikleri geliştirilerek güneş pili alanında, küçük çapta enerji üretim çalışmaları başlamış ve giderek ivme kazanmıştır (Engin 1995).

Dünya genelinde güneş pili alanında birçok araştırma (Ardağ 2012; Arkan I 20012; Burgelman, Nollet, and Degrave 2000; Chamberlain 1983; McConnell 2002) ve çalışma (Bekil 2019; Sajjad 2013; Tahseen 2017; Yağci 2011) yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmaların temel gayesi, güneş pili verimlerinin yükseltilmesi, üretim maliyetlerinin düşürülmesi ve çevreye olan duyarlılıktır. Bu amaç doğrultusunda, çeşitli yarıiletken ve farklı tekniklerden yararlanılarak güneş pilleri üretilmektedir. Güneş pilleri üç ana grupta sınıflandırılabilir.

1.2. BİRİNCİ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ

Bu piller, tek eklemli p-n eklem diyot yapısından oluşmaktadır ve tek (mono) ya da çok (poly) kristal Si yapılı olmaktadır. Bu pillerin üretim maliyetleri yüksektir fakat kararlı olmaları ve sağladıkları verimlilik değerlerin yüksek olma avantajına da sahiptir (Görmez 2021).

1.2.1. Mono Kristal Si Güneş Pilleri

Chapin, 1954 yılında mono kristal alt yapılı ilk Si güneş pilini Bell laboratuvarında geliştirdi. Si malzemesinin karakteristik özelliklerinin uzun süre boyunca değişmemesi, kolay fabrikasyonu ve üretim maliyetinin düşük olması, diğer tüm malzemeler arasında en çok ilgi görmesini sağlamıştır. Verim değeri, modül konumunda %15 seviyesine, hücre konumunda ise %24 seviyesine ulaşmıştır (Korun 2016). Yüksek verim için mono kristal Si malzemelerden yararlanılsa da maliyetlerinin yüksek olmasından ötürü geniş çaplı olarak polikristal malzemenin kullanılmasına yol açmıştır. Bugün dünya geneline bakıldığında PV panellerin yaklaşık 9/10'u kristal silisyum malzemedir (Yılmaz 2024).

1.2.2. Polikristal Si Güneş Pilleri

Polikristal Si hücrelerin üretimi, güneş pillerinde üretim maliyetlerini düşürmek için mono kristal büyütme yerine, eritilmiş yüksek saflıktaki Si'yi geniş dikdörtgen kalıplara döktükten sonra soğuyup katılaşma sürecini denetleme yoluyla başlamıştır. 1970'li senelerin başında geliştirilen “dökme” tekniği, bu güneş pili üretiminde en çok başvurulan yöntem olmuştur. Dökme silisyum tekniği yalnızca güneş pillerinin elde edilmesinde uygulanmaktadır. Dökme Si kullanım sebeplerinden bir tanesi, kare parçalar biçiminde dilimlere bölünmesi ve güneş pili modül bölümün hemen hepsini kaplamasıdır. Bu da güneş pili uygulamaların modül endeksli veriminde bir iyileşme görüldüğü belirtilmektedir. Laboratuvar ortamlarında hücre bazında ulaşılan verim değeri yaklaşık olarak %20,5 civarındadır (Öztürk 2012).

1.3. İKİNCİ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ

Bu güneş pili üretimi için genelde ince film teknolojisi tekniği uygulanmaktadır. Birinci nesil pillerin verim değeri ikinci nesil pillerin verim değerinden daha yüksektir fakat ikinci nesil pillerde istimal edilen malzeme miktarı ve üretim maliyeti birinci nesil pillere nazaran daha düşüktür.

1.3.1. İnce Film Si Güneş Pilleri

Bu yöntemde, daha iyi emici özelliğine sahip malzemelerin uygulanmasıyla kalitesi düşük bir plak yüzeyine, 50 μm kadar çok ince bir Silisyum tabakası elde edilmiştir. 1980 yılında Wolf M. ve J. Lofersky tarafından ilk kez, güneş pili uygulamalarında daha ince tabaka üretme fikri ortaya atılmıştır. Bu pillere ait film kalınlık miktarı ince olması büyük bir avantajdır. Film kalınlığı azaldıkça, açık devre gerilim değerinin arttığı ve saturasyon akım değerinin azaldığı görülmüştür. Verim değeri ise modül bazında % 7 ila %9 dolaylarındadır (Korun 2016).

1.3.2. Amorf Si (a-Si) Güneş Pilleri

Bu güneş pillerine ait ürünler piyasadaki yerlerini ilk kez 1981’de almıştır. Amorf Si geçmişi hatalı yapılmış ve ölçülmüş deneylere dair birçok veri bulunmaktadır. Günümüzde amorf Si üzerine çalışmalar sürmekte ve piyasadaki konumunu belirlemiştir. Bu güneş pillerine ait verim, modül bazında %5-%7 değerleri aralığında iken hücre bazında yaklaşık %10 değerindedir (Baba 2014).

1.4. ÜÇÜNCÜ NESİL GÜNEŞ PİLLERİ

Birinci ve ikinci güneş pillerinde p-n eklem yapısı bulunurken bu güneş pilinde bu yapı bulunmuyor. Bu güneş pillerinin avantajı fabrikasyon adımlarının kolaylaştırılması ya da daha ekonomik malzeme kullanılmasıyla üretim maliyetinin düşürülmesidir. Bu güneş pilleri, p-n eklem güneş pilleri ile karşılaştırıldığında verim değeri daha düşük olması bu güneş pilinin bir dezavantajıdır. Ancak verim değerinin artırılması adına birçok çalışma devam etmektedir (Kabaçelik 2015).

1.4.1. Organik Güneş Pilleri

Organik madde karakterlerinin değiştirilebilmesi, kullanılan tekniklerin basit olması, ucuz maliyette olması gibi avantajlarından dolayı hemen her alanda yaygın bir şekilde kullanıma sunulmaktadır. Bu güneş pili, karbon (C) yapılı polimerlerden oluşmaktadır. Bu güneş piline ait özellikler de, güneş pili yapımı için uygulanan teknik ve yönteme göre değişiklikler gösterebilir. Rulodan ruloya işleme yöntemi sayesinde yüksek hızda güneş pili elde edilmesi mümkün olmaktadır. Düşük sıcaklıkta uygulanan bu teknik diğer tekniklerden daha etkili olmaktadır. Bu işlem için kullanılan bir diğer isim “basit baskı kaplama tekniği” dir. Aktif kristal maddeler bir çözücü yardımıyla çözündükten sonra kaplama cihazı kullanılarak plastik bir tabaka üzerine uygulanmaktadır (Polat 2020).

1980’li yıllarda, güneş pili teknolojisi sektöründe polimer malzemelerin uygulanabilmesine dair ilk incelemeler yapılmıştır. Ve bu incelemeler sonucunda elde edilen verim değerinin %1’den küçük olduğu görülmüştür. Daha sonraki yıllarda kayda değer gelişmeler olmuş ve ulaştıkları verim değeri %1 olarak kayıtlara geçmiştir (Korun 2016). Geline nokta yapılan çalışma ve araştırmalar sonucunda elde edilen verim değeri, mini modül bazında %9 iken hücre bazında ise %11 dolayındadır. Organik güneş pillerinin en temel üstünlüğü, maliyetinin ucuz olması, fabrikasyon kolaylığı ve geniş yüzeylere kaplanabilmesidir.

1.4.2. Boya Sentezli Güneş Pilleri

Michael Grätzel tarafından 1991’de keşfedilen bu güneş pillerinin çalışma sistemi fotosentez olayına benzemektedir. Bu güneş pillerinin çalışma şekli, bilinen yarıiletken teknoloji sistemine ait çalışma prensibinden farklıdır. Bunun nedeni yükün taşınması ve ışığın soğurulması işlevleri birbirinden farklıdır. Bu güneş pili teknolojisi gelecek yıllarda kristal Si teknolojisinin yerine kullanılması tahmin edilmektedir. Mini modül bazında ulaşılan verim %10 iken hücre bazında bu değer %11,9 civarındadır (Korun 2016). Bu güneş pilleri, özellikle ucuz maliyeti nedeniyle endüstriyel üretim için oldukça değerli olmakta ve yüksek bir potansiyel taşımaktadır (Alpaslan 2009).

2. BÖLÜM

LİTERATÜR ÖZETİ

Hazır halde tedarik edilmiş monokristal ve polikristal silisyum güneş pili hücre malzemelerinin karakterizasyonlarını elde etmek adına karanlık ortamda ve farklı ışık şiddetlerinde ($50-300 \text{ W/m}^2$) ölçümü yapılmış, önemli bazı parametreler hesaplanarak diyot ve güneş pili karakteristik değerleri incelenmiştir. Her iki güneş pilinde de ışık şiddeti arttırıldıkça V_{ad} değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Söz konusu bu artışın sebebi olarak azalan yüzey rekombinasyona atfedilmiş. Yani artan I_{sc} ve azalan I_0 akımlardan kaynaklandığı tespit edilmiştir. Her iki güneş pilinin FF değerlerinde ışık şiddetine bağlı olarak küçük miktarda düşüş gözlemlenmiş ve bu da I-V ölçümlerde ideallikten sapma olduğu neticesine ulaşılmıştır. Bu güneş pilleri karanlık ortamda yaklaşık 2,7 dolaylarında bulunan idealite faktörü (n) değerleri aydınlatma şiddetinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Hesaplanan bu değerler güneş pili için kabul görülen değerler arasında yer alır. Işık şiddetine bağlı yapılan ölçümlerde hesaplanan güç dönüşüm verim (η) değerleri ise poli-kristal güneş pili hücreleri, mono-kristal güneş pili hücrelerinkinden daha düşük çıkmıştır (Görmez 2021).

Farklı iki organik fotokromik maddeden yararlanılarak fotodiyot aygıtların üretimi ve karakterizasyonu yapılmıştır. Termal buharlaştırma tekniği kullanılarak p-Si yarıiletken kristalin parlak yüzeyine organik maddeler büyütülerek ince film biçiminde kaplanmıştır. AFM cihazı sayesinde bu numunelerin yüzey morfolojisi daha detaylı incelenmesi sağlanmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri 0,98 nm ve 0,25 nm olarak bulunmuştur. Fabrikasyonu tamamlanan aygıtların fotovoltaiik karakteristiklerini incelemek adına karanlık ortamda ve $30-100 \text{ mW/cm}^2$ değerleri aralığındaki yapay ışık şiddetleri (güneş simülatörü cihazı) altında I-V ölçümleri alınmış ve en önemli diyot parametreleri olan engel yüksekliği (Φ_b) ve idealite faktörü (n) hesaplanmıştır. Karalıktaki termoiyonik emisyon teorisi baz alınarak yapılan ölçümlerde aygıtlara ait n değerleri 1,86 ve 1,88 iken Φ_b değerlerin ikisi de 0,73 eV olarak bulunmuştur. Arayüzeyi organik maddeler ile kaplanan fotodiyot aygıtların negatif beslem alanındaki akım değerinin aydınlatma şiddetinin arttırılmasıyla arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca ışık gibi başka bir fiziksel uyarıcı parametre olan sıcaklığın Schottky diyot üzerindeki etkisini gözlemlemek

için kademeli olarak 20 Kelvin'lik sıcaklık artışı uygulayarak numune karakteristik yapısında ortaya çıkan değişiklikler incelenmiştir. Ölçüm sonucunda elde edilen yarı logaritmik akım-gerilim (I-V) grafikleri ile engel yüksekliği ve idealite faktörü başta olmak üzere birçok önemli parametre hesaplanmıştır (Bekil 2019).

Bir diğer çalışmada (Ocak 2006) metil kırmızısı kristal malzemesi ve kloroform kimyasal çözücü sıvısı karışımından elde edilen 1×10^{-4} M ve $2,5 \times 10^{-3}$ M yoğunluktaki bir çözelti hazırlanmış ve p-Si parlak yüzeyine buharlaştırma ve damlatma tekniği uygulanarak farklı iki adet Al/Metil Kırmızısı/p-Si yapıdaki Schottky engel diyotları elde edilmiştir. Bu iki Schottky aygıtın oda sıcaklığında I-V ve C-V ölçümleri ile elektronik ve arayüzey durum konsantrasyon dağılım karakteristikleri elde edilmiştir. Diyot yapıların doğrultucu (Schottky) özellik taşıdığı gözlemlenmiştir. Seyreltik ve derişik çözeltilerle kaplanan diyot numunelerin engel yüksekliği ve idealite faktörü değerleri akım-gerilim ölçümlerinden elde edilen yarı logaritmik $\ln I$ -V diyagramları kullanılarak hesaplanmış ve bu değerler sırasıyla 1.45, 0.83 eV ve 1.21, 0.82 olarak bulunmuştur. Yüzey potansiyeli –gerilim (Ψ_s -V) diyagramı kullanılarak da Φ_b ve n değerleri elde edilmiş ve bu değerler sırasıyla 2.02, 0.79 eV ve 1.21, 0.82 eV şeklinde bulunmuştur. Derişik metil kırmızısı çözeltisi ile arayüzeyi kaplanan diyot yapının doğrultuculuğu yani Schottky özelliğinin daha fazla (veya daha iyi) olduğu ve ideale daha yakın olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu diyot malzemesi için iki farklı yöntemle de yapılan hesaplamalar ile ulaşılan değerler birbirlerini doğrular nitelikte olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar analiz edilmiş ve metil kırmızısı derişik çözeltisi ile elde edilen diyot numunesinin oksit kalınlığının daha küçük olmasına atfedilmiştir (Ocak 2006).

Sentezi ilk kez yapılan mono flatosyaninlerin malzemelerinin kullanıldığı inorganik-organik katmanlardan meydana gelen heteroeklem yapıların fotovoltaiik karakteristikleri incelenmiştir. İnorganik katman olarak CdS, SnO₂, TiO₂ ve ZnO₂ ince filmlerden yararlanılmış ve bu katmanların üzerine organik malzemelerden flatosyanin, C60, P3HT ve PEDOT malzemeleri kullanılarak sandviç şeklinde birbirinden farklı ITO/inorganik/organik/Al katmanlarından elde edilen aygıtın fabrikasyonu yapılmıştır. Elde edilen numunelerin oda şartlarında, karanlık ve ışık ortamları altında I-V ölçümleri yapılmış ve güneş pilinin temel parametreleri olan kısa devre akımı, açık devre voltajı, maksimum güç verimi ve dolgu (fil) faktörü değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler incelenmiş ve güneş piline ait temel parametrelerin, elde edilen aygıtların

yapımında kullanılan inorganik maddenin cinsi ve kalınlığıyla önemli derecede ilişkili olduğu gözlenmiştir (Yağci 2011).

Bariyer yüksekliği (Φ_b) ve idealite faktörü (n) gibi bazı elektriksel karakteristiklerinin diyottan diyota değişik sonuçlar vermesi bariyer yüksekliğinin safsızlığından kaynaklandığına atfedilmiştir (Mönch 1987).

Bir diğer çalışmada ise (Tahseen 2017) n-Si yarıiletken kristali kullanılarak elde edilen güneş pili hücrelerin yüzeyi üzerine metil mavisi (MM) organik malzemesi büyütülerek kaplanmış ve bu organik malzemenin diyot yapıların elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Mo/MM/n-Si/Al/Au güneş pili aygıtının fabrikasyonu çalışmalarında Sputterin (saçtırma) tekniği ile doğrultucu (Schottky) kontaklar, termal buharlaştırma tekniği ile de omik kontaklar oluşturulmuştur. Damlatma ve Spin Coating teknikleriyle malzeme yüzeyine organik malzeme büyütülerek kaplama yapılmıştır. Asitlerin yüzeye olan farklı etkilerini incelemek adına, numuneler organik malzeme ile kaplanmadan önce n-Si kristal numunelerden birinin yüzeyi %10 seyreltilmiş HCl asit çözeltisinde diğeri %10 seyreltilmiş HF asit çözeltisinde yüzdürülmüştür. Mo metal Schottky kontağı 3 farklı kalınlıkta (10, 20, 30 nm) kaplanmış ve akabinde bu numuneler 5 dakika boyunca 400 °C sıcaklıkta ve saf Azot gazı (N_2) altında tavllanmış numuneler oda şartlarında güneş simülatörü altında I-V ölçümleri yapılmıştır. Güneş piline ait temel parametre değerleri hesaplanmış ve organik malzeme ile kaplanan tabakanın kalınlığı, tavlama sıcaklığı ve süresi, ışık şiddeti gibi etkenler, bu değerlere direk etki etmiştir (Tahseen 2017).

Yapılan bir başka çalışmada (Canlı 2018) Alq3 organik malzemenin diyot malzeme üzerindeki fotovoltaiik etkisi analiz etmek amacıyla numunelerden biri referans, diğerrinin p-Si kristalin parlak yüzeyine organik malzeme biriktirilmiş Al/p-Si/Al (referans) ve Al/Alq3/p-Si/Al iki diyot numunenin üretimi termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Bu iki aygıt güneş simülatörü ile karanlık ortamda ve farklı aydınlatma (30-100 mW/cm²) şiddetleri altında fotovoltaiik parametreler olan kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{ad}), güneş dönüşüm verimi (η) ve fil faktörü (FF) değerleri hesaplanmış ve ışık altında yapılan ölçümler neticesinde aygıtların fotodiyot karakter sergiledikleri gözlenmiştir. Bununla birlikte ışık şiddeti arttırıldıkça negatif beslem alanındaki Alq3 organik arayüzeyli numuneye ait akım değerinin referans numuneye ait akım değerine oranla çok daha fazla attığı görülmüştür. Bu iki diyot

malzemenin idealite faktörü (n) ile engel yüksekliği (Φ_b) değerlerin hesaplanması için oda sıcaklığında ve karanlık ortamda akım-gerilim ölçümü yapılmıştır. Referans ve organik arayüzeyli numuneler için bu değerler sırasıyla 0.79 eV, 1.61 ve 0.81 eV, 1.44 bulunmuştur. Ayrıca arayüzeyi organik kaplı diyot için 80-320 K aralığında sıcaklığa bağlı diyot parametre değerleri hesaplanmış artan sıcaklıkla n değerinin azaldığı ve Φ_b değerinin arttığı görülmüştür. Arayüzey maddenin yüzey morfolojisi ve optik karakteristiklerini analiz etmek için SEM, AFM ve UV spektrum cihazlarına başvurulmuştur (Canlı 2018).

Başka bir çalışmada (Yakuphanoglu 2007) p-Si kristalin parlak yüzeyine CuPc ince film yapısını biriktirilerek termal buharlaştırma metoduyla Au/CuPc/p-Si malzeme yapısı elde edilmiştir. Karanlık ve oda ortamında ölçümleri alınmış engel yüksekliği 0,71 eV ve idealite faktörü 2,38 şeklinde bulunmuştur. Akım-gerilim ölçümleri 3500 lüks ışık şiddeti altında yapılmış ve elde edilen diyot aygıtın fotodiyot özellik sergilediği neticesine ulaşılmıştır (Yakuphanoglu 2007).

Bir diğer çalışmada (Yakuphanoglu et al. 2010) CdO/p-Si diyot malzemesi 100 mW/cm² ışık şiddeti altında ölçümü yapılmış kısa devre akımı 0,53x10⁻⁶ A ve açık devre gerilimi 0,12 V olarak hesaplanmış. Açık devre gerilim değerinin çok küçük bulunması aygıtın güneş pili olarak değil diyot olarak kullanılmasının çok daha doğru olacağını ifade etmiştir (Yakuphanoglu et al. 2010).

Türüt ve Sağlam tarafından fabrikasyonu yapılan Au/Orcein/p-Si/Al diyot malzemesinin oda sıcaklığında I-V ve C-V ölçümleri alınmış ve temel diyot karakteristik parametreleri hesaplanmıştır. Engel yüksekliği(Φ_b) ve idealite faktörü (n) değerleri sırasıyla 0,70 eV ve 2,48 olarak bulunmuştur. Orcein katmanının, Au ve Si yapılar arasında fiziksel bir engel/bariyer meydana getirdiği için Orcein malzemesi yapının efektif engel yüksekliğini arttırdığını gözlemlemişlerdir (Türüt and Sağlam 1992).

Diğer bir çalışmada (Gözen 2017) 1,4-m-diamin kristal malzemesi etil alkol (etanol) kimyasal çözücü kullanılarak manyetik karıştırıcı içerisinde yaklaşık bir saat karıştırılmasıyla elde edilen çözeltiden n-Si numune yüzeyine kaplanması sağlanmış ve Al/1,4-m-diamin /n-Si Schottky diyotu oluşturulmuştur. Oda ortamında bu Schottky diyot malzemenin engel yüksekliği (Φ_b) 0,82 eV ve idealite faktörü (n) 1,13 olarak bulunmuş. Güneş simülatörü kullanılarak yapılan I-V ölçümleriyle Schottky diyota ait fotovoltaiik

temel parametre değerleri hesaplanmış ve fotodiyot özellik taşıdığı sonucuna varılmıştır (Gözen 2017).

Bu tez çalışmasında ise, organik malzeme kullanarak yüksek verimli, düşük maliyetli, yeniliklere ve gelişime açık organik arayüzeyli bir Schottky güneş pili aygıtın üretilmesi hedeflenmektedir. Moleküler yapısı $C_{15}H_{15}N_3O_2$ şeklinde olan metil kırmızısı tipik bir aromatik azo bileşigidir. Asit- baz indikatörü olan metil kırmızısı pH ile net bir biçimde değişen renk yapısından dolayı tercih edilmiştir. Elektron açısından zengin ve konjuge yapıya sahip olmasından ötürü metal ile yarıiletken katmanlar arasında organik bir tabaka olarak metil kırmızısını tercih ettik. Kloroform çözücüsünde çözelti haline getirilen metil kırmızısı, kimyasal temizlik işlemlerine tabi tutulan n-tipi yarıiletken malzemenin parlak yüzeyine 250µl çözelti damlatma yoluyla ve çeşitli kimyasal çözücüler kullanılarak aşındırma suretiyle pürüzsüz hale getirilen yüzeye 176µl çözelti Spin Coating tekniğiyle kaplandı. Termal buharlaştırma yöntemiyle gümüş ve alüminyum metalleri ile omik kontak elde edilip daha iyi sonuç verebilmesi adına 585 °C sıcaklıkta tavlama fırınında 3 dk saf N_2 (azot) gazında bekleme suretiyle tavlandı. Sputter (saçtırma) tekniği ile de paladyum ve altın metalleri sırasıyla 5 mm ve 1 mm maskeler yardımıyla Schotkky kontak elde edilip fabrikasyon işlemleri tamamlandı. Elde edilen sade ve arayüzeyli güneş pilleri oda sıcaklığında karanlık ortamda I-V ölçümleri alınıp diyot karakteristikleri hesapları ile güneş simülatörü altında farklı ışık şiddetlerinde I-V ölçümleri alınarak güneş pili parametre hesapları yapıldı. Elde edilen arayüzeyli güneş pili aygıtların arayüzeyindeki organik tabaka varlığı ve kalınlığına dair kesin ve detaylı bilgi için SEM cihazı ile kesit görüntüleri alındı.

3. BÖLÜM

KURAMSAL TEMELLER

Bu bölümde yarıiletkenler, bant teorileri, kontaklar, Schottky diyot yapıları ve bu yapılardaki akım iletimlerinin yanı sıra güneş pili uygulamaları ve temel elektriksel karakterizasyonlarına dair bilgiler verilmiştir.

3.1. YARIİLETKENLER

Hayatımızın bir parçası olan teknoloji gün geçtikçe gelişmekte ve dolayısıyla teknolojinin temel taşı olan yarıiletkenlerin araştırılıp geliştirilmesi de tetiklenmektedir. Yarıiletken konusu, yalnızca inorganik malzemeye endeksli olmayıp organik malzeme bazlı araştırma ve çalışmaların odak noktası haline gelmektedir. Buda organik yarıiletken malzemelere ciddi bir ilgi olup üretimleri de giderek yaygın bir hal almıştır. Organik malzemeler ve bu malzeme yapıların farklı fiziksel uyarıcılar etkisi altında incelenmesi konusu ayrı bir araştırma konusu olmuştur.

Katılar, elektrik akımı iletmeye durumuna göre yalıtkan, yarıiletken ve iletken şeklinde sınıflandırılmaktadır. Katılarda bulunan elektronların serbest bir şekilde hareket edip etmemesine göre elektrik iletkenliği belirlenmektedir. Metal malzemelerin serbest hareket eden çok fazla sayıda elektronları bulunur. Bu serbest elektronlardan ötürü iletkenlik seviyesi iyidir. Yalıtkan malzemelerde serbest biçimde dolaşan elektronlar olmadığından iletkenlikleri yoktur. Sadece çok yüksek değerlerde gerilim uygulanması halinde elektronlar hareket edebilir. Yarıiletken malzemeler normal şartlarda elektriği iletmezler ancak farklı fiziksel uyarıcılar (ısı, ışık, gerilim vb.) sayesinde iletme geçebilirler.

Bir malzemenin iletkenliğini tayin eden en önemli etken, atomların son yörüngesinde yer alan elektron sayısıdır. “Valans Yörünge” diye adlandırılan bu son yörüngede yer alan elektronlara da “Valans Elektron” ismi verilmektedir. Bir metal malzemede valans (değerlik) elektronlar atom çekirdeğine olan bağlılıkları oldukça zayıftır. Son yörüngesinde genelde 1, 2 veya 3 elektron bulunduran malzemeler iletken,

5'ten fazla veya tamamen dolu olanlar yalıtkan, 4 ya da 5 elektron bulunduranlar ise yarıiletken olarak bilinmektedir.

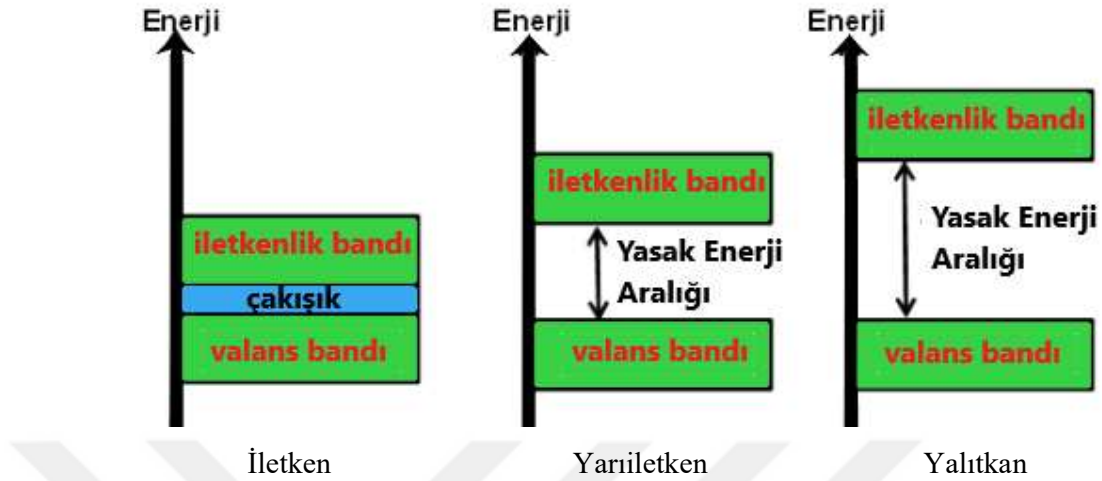
Yalıtkan malzemelerin son yörüngesi kararlı bir yapıya sahip olduğundan elektron alış-verişini rahat bir şekilde yapamazlar. Dolayısıyla malzeme içinde serbest hareket eden elektron bulunmaz. Bundan ötürü yalıtkanların, elektrik akımını iletmedikleri varsayılmıştır. Yarıiletkenler ise çeşitli katkı maddeleri, farklı fiziksel uyarıcılar ya da diğer dış faktörler aracılığıyla iletkenliği sağlayabilirler. Yarıiletkenler, iletken ve yalıtkan malzemeler arasında bulunurlar.

3.2. KATILARIN BANT TEORİSİ

Bu teori, bir katı malzemesindeki elektronların davranışlarını anlatan enerji-bant durumunu ifade eder. Her bir kristal malzemenin kendine has bir enerji-bant diyagramı vardır. Bu teori ile katılar (iletken, yarıiletken, yalıtkan) arasındaki fark daha iyi anlaşılmaktadır. Bir malzemenin, iletim bandı tamamen boş ve valans (değerlik) bandı tamamen dolu olması bu katı malzemenin yalıtkan (izolatör) olduğunu gösterir. Bir yalıtkan malzemenin iletkenliği çok küçük olup ve özdirenç değeri de oldukça büyüktür. Yalıtkanlarda sürüklenme akımına katılacak hiçbir serbest elektron bulunmamaktadır. Yasak enerji aralığı (E_g) yani iletim bandı ile valans bandı arasındaki mesafenin en geniş olan malzeme grubuna yalıtkan denilir. Bu aralık 3.5-6 eV veya daha büyük olmaktadır. Bu aralığın büyük olması elektronların hareket imkanını kısıtladığından oda sıcaklığında iletim olayı gerçekleşmemektedir.

İletken malzemelerde (metaller) her iki bant üst üste/çakışık olmaktadır. Başka bir ifade ile iki bant arasında mesafe yani enerji aralığı bulunmamaktadır. Elektron ve boşluklar (delikler), bu iki bant arasında kolaylıkla hareket edebilirler.

Yarıiletken malzemeler ise yasak enerji aralığı (E_g) küçük olup 1eV genişliğindedir. Bir malzemenin sıcaklığı arttırılarak valans bandındaki elektronlar termal uyarılma ile yüksek enerji seviyelerine (iletim bandı) geçebilir. Elektronlar burada hareket edebilir ve yükler net bir akım oluşturarak yarıiletkende elektrik akımını sağlarlar. Benzer şekilde ısısal (termal) uyarımayla boşluklar da hareket edebilir ve iletme neden olabilir.



Şekil 1. Üç farklı kristal malzeme için enerji bant diyagramı

Yarıiletkenler katkısız ve katkılı olmak üzere ekle iki ana grupta incelenebilir. Bir sonraki bölümde bu yarıiletken çeşitlerinden bahsedilmiştir.

3.3. KATKISIZ YARIİLETKEN

Yarıiletken malzemelerde akım iletimi, elektronlar ve serbest yükler (delikler/boşluklar/holler) tarafından sağlanır. Yarıiletkende akım iletimini yerine getiren taşıyıcılar (elektron ve boşluklar) elementi kendi atomundan karşılamlarına katkısız yarıiletken olarak tanımlanmaktadır. Yarıiletken malzemelerde değerlik bandında bulunan elektronlara yeterli enerji verilirse, iletim bandına geçer. Ve buraya geçen her elektron, geride bir boşluk bırakır. Bundan dolayı katkısız yarıiletken malzemelerde elektron ve boşluk sayısı birbirine eşittir. Taşıyıcıların birbirine eşit olması durumu, elektriksel özelliklerinden faydalanma adına çok önemlidir. Katkısız yarıiletken malzemeleri iletim işlemlerinde kullanabilmek için yarıiletken malzemeye enerji vermek yani uyarmak gerekir. Yarıiletken malzemelerde serbest halde taşıyıcıların bulunması, elektron ve boşlukların rahat hareket imkanı sağladığından katkılı yarıiletken fikri gündeme getirmiştir (Yacobi 2003).

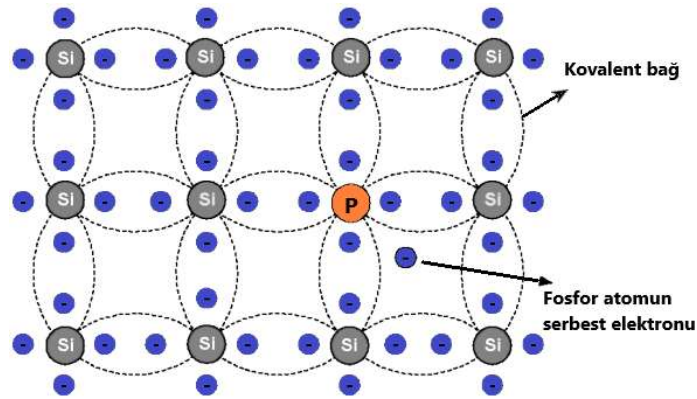
3.4. KATKILI YARIİLETKEN

Yarıiletken katkılama ile eşit sayılarda taşıyıcıları bulunan katkısız yarıiletkende, elektron ve boşluk sayıları değiştirilebilir. Buda yarıiletken malzemede safsızlık oluşturur. Yarıiletken malzemenin elektrik iletimi, bu safsızlık ile önemli derecede

değişecektir. Yarıiletken malzemedeki taşıyıcı yoğunluklarının değiştirilmesiyle E_g değeri değişecektir. Yarıiletken malzemeye istenilen niteliğe göre katkılama (doping) yapılarak iletkenlik derecesi yükseltilmektedir. Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) malzemelerin iletkenlikleri kontrollü bir şekilde artırılabilir. Bunun için saf yarıiletkene katkı maddesi ilave edilir. Bu işlem doping, katkı veya uyarıcı olarak bilinir. Akım taşıyıcıların sayısının azaltılması durumunda kristal malzemenin direnci, artırılması durumunda ise malzemenin iletkenliği arttırmaktadır. Bu her iki olay neticesinde n-tipi ya da p-tipi malzeme oluşur. Dolayısıyla katkılanmış yarıiletkenler, n-tipi ve p-tipi olmak üzere iki grupta incelenmektedir (Dikici 2012).

3.4.1. n-Tipi Yarıiletken

Saf Si malzemesinin iletim bandında bulunan boşlukların artırılması için atomlara doping maddesi ilave edilmesi gerekmektedir. Bu atomlar son yörüngesinde 5 elektron (e^-) bulunduran Arsenik, Antimon, Fosfor veya Bizmut'tur. Örnek olarak Şekil 2' deki gibi, Si malzemesine doping maddesi olarak 5 değerlik elektronu olan Fosfor (P) atomu belli bir miktarda ilave edildiğinde, diğer Si atomlarıyla yapılan kovalent bağ görülmektedir. P ile Si atomlarının son yörüngesindeki 4 değerlik elektronu birbirleriyle kovalent bağ yaparlar. P atomunun 1 değerlik elektronu boşta kalır ve ayrılır. Bu boşta kalan elektron serbest kaldığından iletkenliği artırır. Çünkü hiçbir atoma bağlı değildir. Dolayısıyla elektron sayıları ile iletkenlik kontrol edilebilir. Bu da Si malzemesine ilave edilen atom sayısı ile olmaktadır. Katkı işlemi neticesinde ortaya çıkan iletkenlik elektronu, değerlik bandında bir boşluk oluşturmaz.

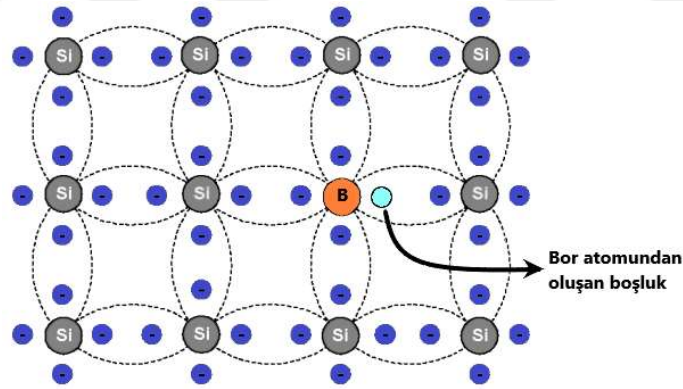


Şekil 2. n-tipi yarıiletken kristal malzemenin oluşturulması

Çoğunluk akım taşıyıcıları elektron olan Si ve Ge malzemesine n-tipi yarıiletken malzeme ismi verilmektedir. n-tipi yarıiletkende çoğunluk akım taşıyıcıları elektronlardır. Bunun dışında ısısal olarak oluşturulan az sayıda elektron delik çiftleri de bulunur. n-tipi yarıiletkende azınlık taşıyıcıları ise deliklerdir.

3.4.2. p-Tipi Yarıiletken

Saf Si malzemesine, son yörüngesinde 3 elektron bulunduran atomların belli bir ölçüde ilave edilmesiyle yeni bir kristal yapı meydana gelir. Oluşan bu kristal yapı içerisinde delik sayısında bir artış görülür. Son orbitalinde 3 elektron bulunduran Alümiyum, Galyum ve Bor atomları p-tipi yarıiletken malzeme katkılama için örnek olarak gösterilebilir. Bu malzemelerden Bor (B) elementi belli bir ölçüde, saf Si maddesine eklenmesi sonucu iki atomun son yörüngesindeki 3 elektron yani valans elektron dediğimiz 3'er elektron birbirleriyle kovalent bağ kurar. Ancak Si atomunun 4 elektronundan 1'i bağ kuramaz ve boşta kalır. Bu durumda elektron eksikliği ortaya çıkar. Buna “delik”, “deşik”, “hole” veya “boşluk” gibi isimler verilmektedir.

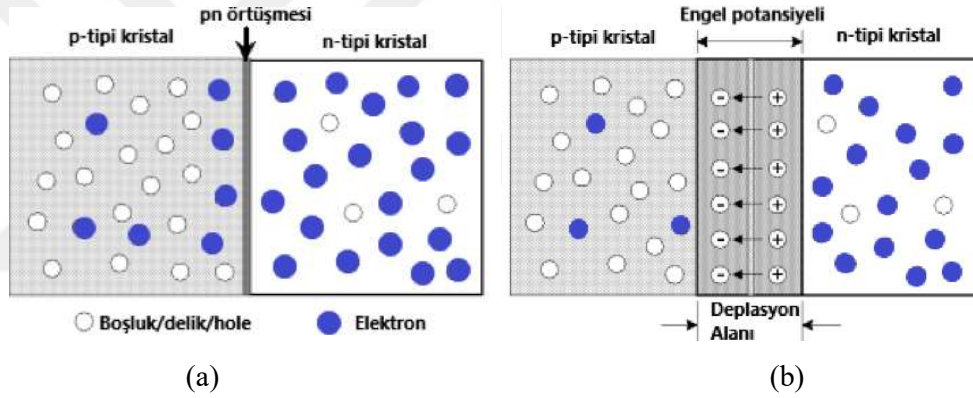


Şekil 3. p-tipi yarıiletken kristal malzemenin oluşturulması

Deliklerin sayısı, Si atomuna ilave edilen katkı oranıyla kontrol edilebilir. p-tipi yarıiletken malzeme, bu katkı tekniği ile meydana gelmektedir. Çünkü delikler pozitif(+) yüklüdür. Sonuç olarak p-tipi yarıiletken malzeme için delikler, çoğunluk akım taşıyıcıları; elektronlar ise azınlık akım taşıyıcıları olarak ifade edilir. p-tipi yarıiletkenlerde çok az sayıda serbest halde elektronda oluşmuştur. Bu elektronlar ısı ile oluşan delik çifti sırasında ortaya çıkmıştır. Serbest durumdaki bu elektronlar, Si malzemesine yapılan katkı sırasında oluşturulamazlar.

3.5. P-N EKLEMİ

Yarıiletken malzemelerine farklı şekillerde katkı maddeleri ekleyerek elde edilen p-tipi ve n-tipi yarıiletken yapıları birleştirilerek temas(kontak) etmeleri sağlanır. Bu yapıya PN eklemi denir. PN eklemi; diyot, transistör gibi elektronik endüstrisinin olmazsa olmazları olan devre elemanlarının yapımında kullanılmaktadır. PN eklemının, n kısmında bulunan elektronların ve p kısmında bulunan deliklerin yük yoğunlukları aynı seviyede değiller. n-tipi malzemede elektron yoğunluğu, p-tipi malzemede delik yoğunluğu daha fazladır. Fermi enerji seviyeleri (E_f) farklı olan bu iki malzeme kontak edilmesiyle yük dağılımı denge durumuna yani E_f değeri aynı düzeye gelinceye dek aralarında elektron akışı meydana gelir.

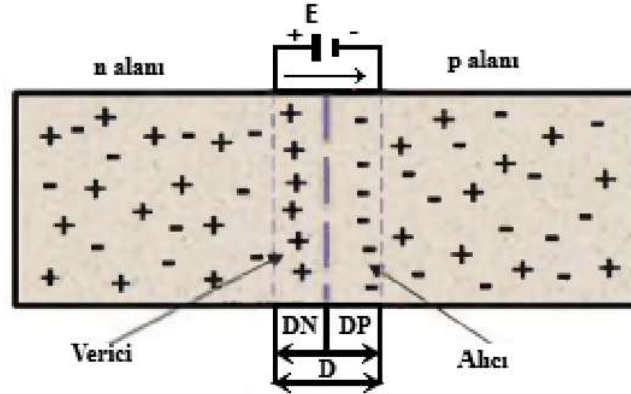


Şekil 4. P-N eklem yapısının a) tüketim alanı b) şematik görünümü

Yük taşıyıcıları, kontak sırasında n-tipi yarıiletken tarafındaki elektronların bir kısmı p-tipi yarıiletken tarafına ve bir kısım elektronlar da (delikler), n-tipi yarıiletken tarafa doğru sızar. Bu esnada n kısmından ayrılarak p kısmına geçen elektronlar (delikler) geride hareketsiz ve pozitif yüklü safsızlık iyonları bırakır. Pozitif yükle yüklü ve hareketsiz iyonların olduğu bu bölge tüketim (deplasyon) bölgesi olarak isimlendirilir. Bu yük geçişleri neticesinde yük dengesi bozulur. P tarafa geçen elektronlar bu alanda bulunan deliklerle birleşerek burada nötr atomları oluştururlar. Böylelikle farklı yük yoğunlukları nedeniyle, n-tipi yarıiletken kısmında pozitif (+), p-tipi yarıiletken kısmında ise negatif (-) yüklü iyonlar kalmaktadır.

p ve n tipi yarıiletken malzemeleri tek bir kristal yapıda bir araya geldiğinde p ve n tipi iki taraf arasında bir arayüzey/arakesit alan oluşur. Şekil 5'te belirtildiği üzere eklemelerin kontak kurmasıyla yük taşıyıcıların difüzyonu neticesinde deplasyon alanı

oluşur. Denge halinde bir iç elektrik alan meydana gelir ve yük taşıyıcıların geçişlerine mani olur (Erdem 2021).



Şekil 5. Tüketim bölgesinde pozitif ve negatif iyon oluşumu

p ve n tipi malzemeleri kontak kurduğunda, elektron ve delikler yüksek yoğunluktan düşük yoğunluğa doğru bir difüzyon akışı olmaktadır. Çoğunluk taşıyıcılar, karşı alana difüzyon yoluyla geçerken azınlık taşıyıcıları ise alan etkisiyle geçerler. PN eklem kristaline bir dış uyaran ile voltaj verilmediği sürece denge halindedir ve akan herhangi bir akım yoktur. Yani eklem boyunca elektron ve boşlukların net akım akışı sıfır olmasına rağmen bu kristal eklemden bir elektrik alanı ortaya çıkarmıştır. Bu elektrik alan; güneş pilinin, diyotun ve transistörün çalışma temelidir.

PN birleşim alanında bir gerilim seddi bulunur. Bu seddin oluşmasına pozitif ve negatif iyonlar neden olmaktadır. Bu gerilim seddi, oda sıcaklığında Ge malzemesi için 0,3 V iken Si malzemesi için bu engel 0,7 V değerindedir. “Diyot öngerilimi” olarak tanımlanan bu gerilim, ısıdan etkilenmekte ve her 1°C’lik artış değerinde diyot öngerilimin değerinde yaklaşık 2,3mV kadar bir düşüşe sebep olmaktadır.

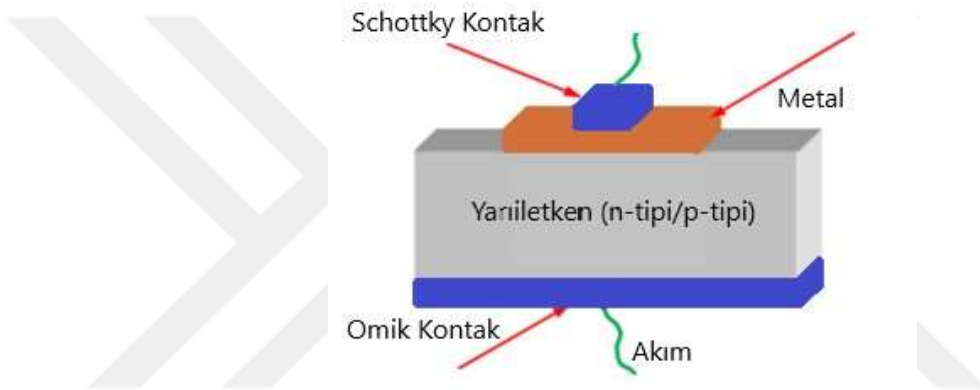
3.6. METAL/YARIİLETKEN KONTAKLAR

Schottky diyotların karakteristik değişkenlerinin anlaşılabilmesi için yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik kimliklerinin araştırılması gerekmektedir. Bunun için kullanılan metotlardan biri de uygun kontakların kristale uygulanmasıdır.

Kontak basit bir ifade ile iki malzemenin (kristal ve kristale uygulanan kontak malzemesi), minimum dirençle atomik düzeyde temaslarıdır. Temas direnci sıfır olan ideal bir kontak oluşturmak, temas eden kontak yüzeylerin oldukça parlak, temiz ve pürüzsüz olmasıyla mümkündür (Cowley and Sze 1965).

Metal-yarıiletken kontaklar, atomik boyutta bir metal ile yarıiletkenin birleştirilmesi sonucu elde edilir. Kontak işlemlerinde yarıiletken malzeme olarak p veya n tipi kullanılırken metal malzeme olarak da Al, Ag, Au, Sn ve In gibi metaller kullanılmaktadır. Metal-yarıiletken kontaklar, metal p-tipi ve metal n-tipi yarıiletken kontak olarak iki başlıkta sınıflandırılır.

Metal-yarıiletken kontaklar akım iletim mekanizmalarına göre omik (alt) kontak ve doğrultucu (üst) kontak (schottky kontak) olarak ikiye ayrılır (Şekil 6).



Şekil 6. Metal-yarıiletken kontakın şematik görünümü

Doğrultucu ve omik kontak türünün belirlenmesi Tablo 1’de özetlendiği gibi, metal ve yarıiletken iş fonksiyonları yanı sıra yarıiletken malzemenin n veya p tipi olmasıyla alakalıdır. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s de yarıiletkenin iş fonksiyonu olmak üzere, metal/p-tipi yarıiletken kontak işlemlerinde $\Phi_m > \Phi_s$ ise omik kontak, $\Phi_s > \Phi_m$ halinde ise doğrultucu (Schottky) kontak olarak isimlendirilir. Metal/n-tipi yarıiletken kontak işlemlerinde ise tam tersi durum söz konusudur.

Tablo 1. İş fonksiyon işlevlerine bağlı olarak doğrultucu ve omik kontaklar

Kontak Çeşidi	İş Fonksiyonları	Yarıiletken Çeşidi
n-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Doğrultucu
n-tipi	$\Phi_s > \Phi_m$	Omik
p-tipi	$\Phi_m > \Phi_s$	Omik
p-tipi	$\Phi_s > \Phi_m$	Doğrultucu

Kontak işlemlerinde sıkça karşılaşılan önemli kavramlara başvurulmaktadır. Bu kavramlara ait tanımlarının iyi bilinmesi gerektiği düşünüldüğünden aşağıda kısaca bahsedilmiştir.

Fermi Enerji Seviyesi (E_F): Valans ve iletkenlik bandında bulunan taşıyıcı miktarına göre yasak enerji bölgesinde bulunan izafi seviyeye verilen isimdir.

İletken malzemelerde mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0^\circ\text{K}$), elektronlarca işgal edilen en alt ve en üstteki dolu seviyenin enerjisidir. E_F , yalıtkan maddelerde valans ve iletkenlik bantlarında bulunan taşıyıcı sayısına ve sıcaklıkla ilişkili olup yasak enerji alanında bulunan izafi seviyedir.

Fermi enerji seviyesi (E_F) ölçümleri, p-tipi yarıiletkenlerde valans bandından, n-tipi yarıiletkenlerde ise iletim bandından başlanarak hesaplanır.

Fermi enerji seviyesindeki elektronlar, sıcaklığın artmasıyla uyarılır ve iletkenlik bandına (E_c) doğru geçerler. Fermi enerji seviyesi (E_F); p-tipi yarıiletkenler için valans bandının (E_v) hemen üzerinde, n-tipi yarıiletkenler için ise iletkenlik bandının (E_c) hemen altında yer alır.

Vakum Seviyesi: Metalin tam dış konumunda hareketsiz duran yani sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji düzeyine vakum seviyesi denir. Başka bir ifade ile elektronu metal yüzeyinden koparıp serbest duruma getirmek için gereken minimum enerji miktarıdır.

Metalin İş Fonksiyonu (Φ_m): Fermi enerji seviyesindeki (E_F) bir elektronu uyararak vakum seviyesine çıkarmak için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin İş Fonksiyonu (Φ_s): Φ_s tanım olarak Φ_m ile aynı olmasına rağmen katkılama dolay yarıiletkenin fermi seviyesinin değişkenlik sergilemesine bu da Φ_s 'in değişken bir nicelik olarak tanımlanmasına neden olmaktadır.

Elektron Yakınlığı/İlgisi (χ_s): Yarıiletkende katkılama bağımsız bir yüzey parametresi olan χ_s , iletkenlik bandının en üst düzeyinde bulunan bir elektronu vakum düzeyine uyarmak için gereken enerji miktarıdır. Başka bir ifade ile vakum seviyesi ile iletkenlik bandının en alt sınırı arasındaki enerji farkına elektron ilgisi denir.

Fermi enerjisi (E_F), iş fonksiyonları (Φ_m/Φ_s) ve elektron ilgisi (χ_s) parametrelerinin birimleri elektron volt (eV) olarak karşımıza çıkmaktadır.

Yüzey Yükü: Metal-yarıiletken kontak işleminde, kontak anında birbirlerine doğru yük geçişleri gerçekleşir. Metalin kontak tarafındaki elektronlar ayrılarak yarıiletken

bölgesine geçerler. Böylece yüzey yükü, metalin kontak yüzeyinde meydana gelen pozitif (+) yük tabakası şeklinde tanımlanır.

Uzay Yükü (Geçiş Bölgesi, Deplasyon Alanı): Metal-yarıiletken kontak anında metal bölgesinden yarıiletken bölgesine geçen ve yarıiletken gövdesinde yığılan (toplanan) negatif yük tabakasına verilen isme denir.

3.6.1. Schottky (Doğrultucu) Kontaklar

Bir iletken malzemesindeki elektronların enerjisi, başka bir iletken malzemesindeki elektronların enerjisinden daha yüksek olması sonucu iki malzemenin fermi enerji düzeylerinin farklı olmasına neden olmaktadır. Bu iletken iki madde arasında kontak işlemi gerçekleştiğinde termodinamik denge durumu kuruluncaya dek yük alışverişi devam eder yani her iki iletken maddenin fermi enerji düzeyleri aynı hizaya gelinceye dek bantlarda kısmi bükülmeler meydana gelir. Bu durum iki iletken madde arasında gerçekleştiği gibi bir metal ile p-tipi ya da bir metal ile n-tipi yarıiletken maddenin kontakları halinde de ortaya çıkmaktadır (Yalçın 2011).

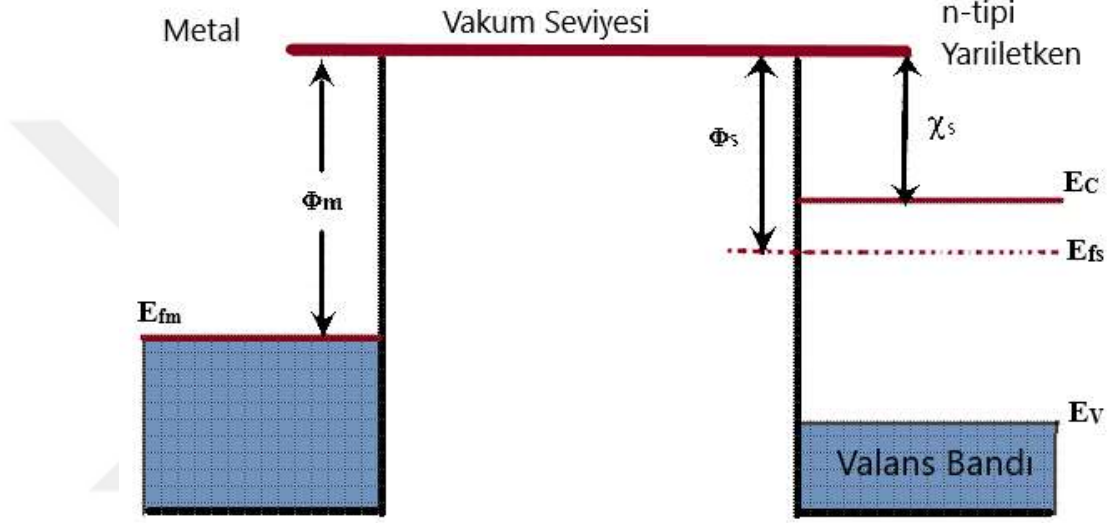
Ortaya çıkan yeni yük dağılım sebebiyle iki metal malzemenin kontak alanında bir dipol tabakası oluşur. Kontakın her iki tarafında bulunan yüzey yükleri bu dipol tabakasını oluşturur.

Metal ile yarıiletkenin karşılıklı yük transferleriyle yüklerin metal ve yarıiletken ara yüzeyinde birbirlerinden ayrılmasıyla bir potansiyel bariyer/engel yüksekliliği (Φ_b) meydana gelir. Bu alanda hareketli yükler bulunmadığından dolayı bölge, yüksek dirençli yalıtkan tabaka olarak adlandırılmaktadır. Schottky bu bölge hakkında ilk defa çalışma yapan bir bilim adamıdır. Bundan dolayı bu yüksek dirençli bölgeye Schottky tabakası ismi verilmiştir. Potansiyel engel, Schottky-Mot modeline göre iki maddenin (metal/yarıiletken) iş fonksiyonları arasındaki farktan dolayı meydana gelmektedir. Metal ve yarıiletken malzemenin iş fonksiyonları, bu iki malzemeye ait kontak türünü (omik veya doğrultucu) belirler.

3.6.1.1. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

Bir metal ile yarıiletkenin kontak oluşturması sonucu, bu iki iletken malzeme ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasıyla bir potansiyel bariyer (engel) meydana gelir. Bu kontak işlemlerinde iletim işini akım taşıyıcıları (boşluklar ve elektronlar) yerine getirmektedir.

Doğrultucu kontak durumunda akım taşıyıcıları, bir yönde iletimi kolaylıkla yapabilirken diğer yönde iletim, potansiyel bariyer sebebiyle zorlaşmaktadır. Bu durum her iki malzemenin enerji bant diyagramına bağlıdır. Metal ile n- tipi yarıiletken kontak işlemlerinde $\Phi_m > \Phi_s$ olması halinde doğrultucu kontak elde edilmiş olur. Şekil 7’ de metal/n-tipi yarıiletken malzemesine ait kontak oluşturmada evvel enerji-bant diyagramı gösterilmektedir.

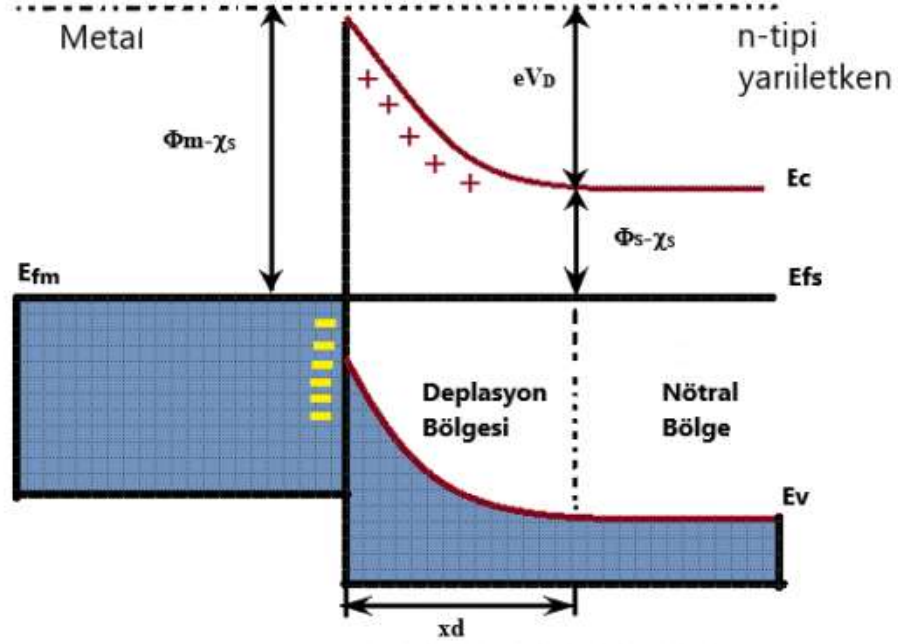


Şekil 7. Metal/n-tipi yarıiletken malzemesine ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı

Kontak yapılmadan evvel metal ile yarıiletkenin fermi enerji seviyeleri birbirlerinden farklıdır. Yarıiletkene ait E_{fs} seviyesi, metale ait E_{fm} seviyesinin $\Phi_m - \Phi_s$ farkı kadar üzerindedir. Kontak işleminin akabinde termal (termodinamik) denge kuruluncaya dek yarıiletken yüzeyinde bulunan elektronlar metale geçer ve geride iyonize olmuş donörler (pozitif yüklü verici) bırakırlar. Termodinamik denge durumunda yük geçişi durur ve iki malzemenin fermi enerji seviyeleri Şekil 8’deki gibi aynı hizaya gelir (Yıldırım 2009). Böylelikle yarıiletkene ait enerji seviyeleri $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı iner ve kontakta ortaya çıkan dipol tabakası kaynaklı bir potansiyel bariyer oluşur. Dolayısıyla yarıiletken alanındaki bantların yukarı yönde bükülmesine sebep olmaktadır. Bu bariyerin metal tarafındaki $\Phi_m - \chi_s$, yarıiletken tarafındaki yükseklik değeri ise $\Phi_m - \Phi_s$ kadardır.

Potansiyel bariyerin yarıiletken tarafındaki yükseklik değerinin difüzyon türünden karşılığı $eV_D = \Phi_m - \Phi_s$ kadardır. V_D , değişkenine difüzyon potansiyeli denir ve metal

yüzeyine göre ölçülür. Potansiyel bariyerin metal tarafındaki yükseklik değerinin difüzyon türünden karşılığı ise $e\Phi_b = \Phi_m - \chi_s$ kadardır.



Şekil 8. Kontak işlemi ile termodinamik denge durumunda oluşan metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kondağa ait enerji bant diyagramı

Metalde bulunan elektronların enerjisi, yarıiletkenin iletkenlik bandında (E_c) bulunan elektronların enerjisinde daha düşüktür. Metal ile yarıiletkenin kontak işlemi gerçekleşmesi durumunda iki iletken malzemeye ait farklı fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye dek, elektronlar yarıiletkenden metale doğru akarlar. Yarıiletkenin E_c bandındaki elektronları metale geçişlerinde bir bariyer (potansiyel engel) ile karşılaşırlar. Yarıiletken tarafında bulunan elektronlar metale geçtiklerinde geride iyonize olmuş donörleri (vericileri) bırakırlar.

Yarıiletken tarafındaki bu yüklerin kinetik enerjileri sıfır (yani hareketsiz) olduğundan uzay yükü olarak bilinir. Kontakta görülen yüzey tabakası potansiyel bariyerden dolayı “engel tabakası” olarak isimlendirilir. Bu engel tabakanın kalınlığı (d), difüzyon potansiyel değeri (V_D) ile iyonize olmuş donörlerin (verici) konsantrasyonuna bağlı olarak değişir. Engel tabakası, geçiş bölgesi, uzay yükü bölgesi veya arınmış bölge adlarıyla bilinen bu bölgenin kenarlarında pozitif ve negatif yükler olduğundan bölge kapasite özelliklerine sahip olup bir kondansatör (sığa) gibi davranır. Bu kapasiteye

kontak kapasitesi veya Schottky kapasitesi denilmektedir. Schottky kapasitesi ayrıca bu tabakanın kalınlığına (d) bağlıdır.

Termodinamik denge halinde metal içindeki yeterli enerjiye sahip bazı elektronlar termal uyarılma ile potansiyel bariyeri aşarak yarıiletkenin içine geçerler aynı şekilde uyarılma ile yarıiletkenin içinde yeterli enerjisi olan bazı elektronlar potansiyel bariyeri aşarak metalin içine geçer ve bu denge neticesinde eşit ve zıt yönlerde sızıntı akımının (I_0) oluşmasına sebebiyet verecektir.

Yarıiletkene ($-V$) kadar bir gerilim uygulanması halinde metalden yarıiletkene geçen (soldan sağa doğru) elektronlar için engel yüksekliğinde bir değişim olmadığından yarıiletkenden metale doğru (sağdan sola doğru) olan akımda da değişim olmayacaktır.

Ancak yarıiletken alanda bulunan iletkenlik bandına ait enerji seviyesinde eV kadar yükselme olduğundan yarıiletkenden metale geçen (sağdan sola doğru) elektronlar için engel yüksekliğinde eV kadar düşüşe sebep olup metalden yarıiletkene doğru (soldan sağa) akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar bir değişim (artış) gözlemlenecektir. Bu durum neticesinde meydana gelen net akım;

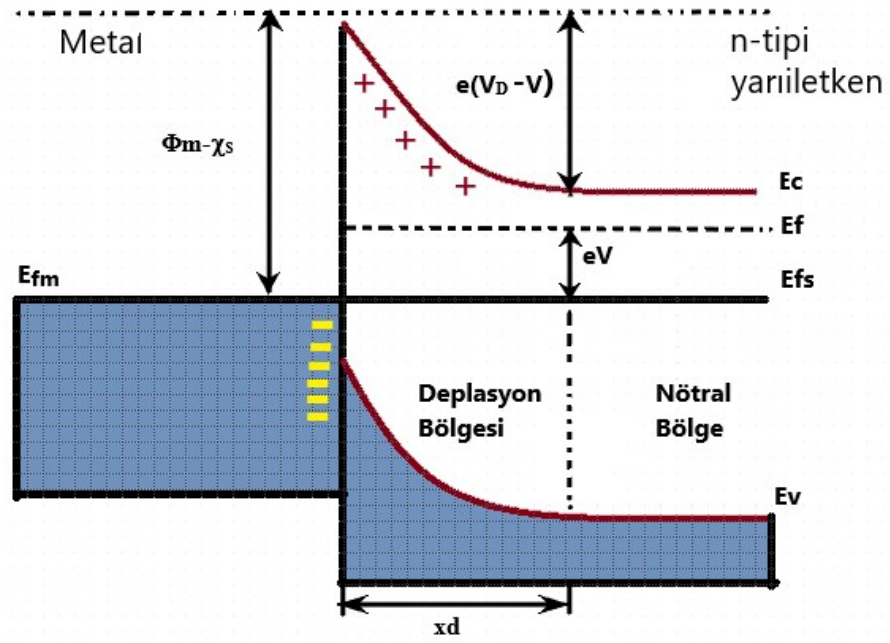
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Eşitlikte yer alan eV/kT ifadesi için $eV \gg kT$ olması halinde 1 değeri diğer ifadeye nazaran çok çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Bu durumda elde edilen yeni denklem;

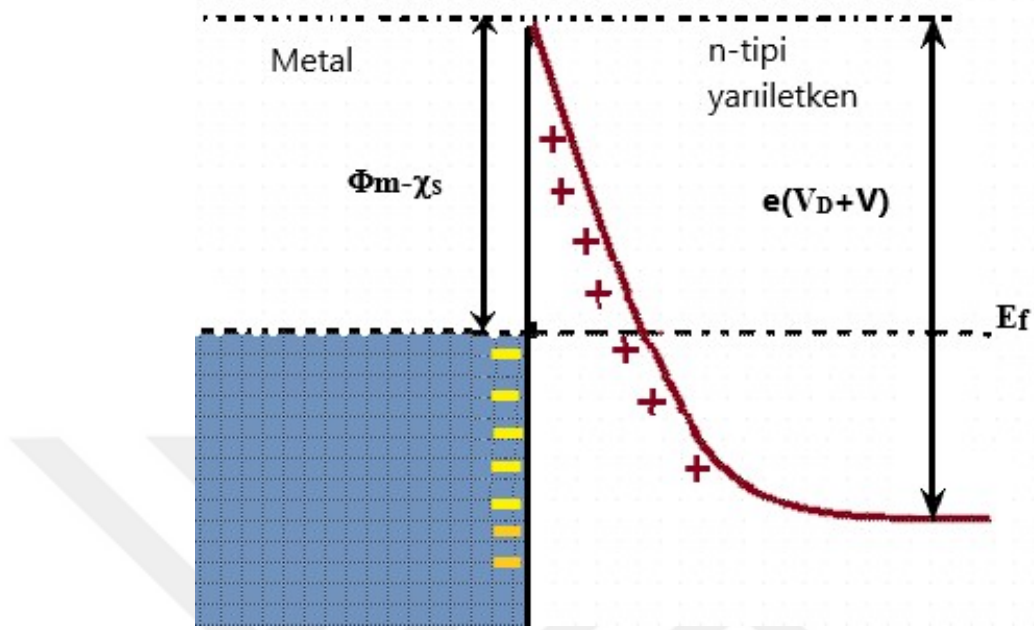
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \right] \quad (3.2)$$

şeklindedir. $eV \gg kT$ durumunda I net akımı, büyük ve pozitif bir değerdir. Beslem durumu olarak da “düz beslem” ifadesi kullanılmaktadır. Şekil 9’da metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın düz beslem durumundaki enerji bant diyagramı verilmiştir.



Şekil 9. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın düz beslem durumundaki enerji bant diyagramı

Yarıiletkene (+V) kadar bir gerilim uygulanması halinde Şekil 10'daki gibi iletkenlik bandında eV değeri kadar bir alçalma meydana gelecektir. Yarıiletken tarafındaki engel yüksekliğinde eV kadar artış gözlemlenmektedir. $eV \ll kT$ durumunda elde edilen net akım küçük ve negatif bir değer olup yaklaşık olarak $(-I_0)$ değerine eşit olur. Bu beslem durumu olarak da “ters beslem” ifadesi kullanılmaktadır (Çaldıran 2013).



Şekil 10. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın ters beslem durumundaki enerji bant diyagramı

Yarıiletken tarafındaki potansiyel bariyer yüksekliği, uygulanan gerilim ile değişirken, metal tarafındaki potansiyel bariyer uygulanan gerilimden bağımsızdır.

3.6.2. Omik Kontaklar

Metal/yarıiletken kontak durumlarında iletim görevini üstlenen akım taşıyıcılarının (boşluklar ve elektronlar) her iki yönde de serbest hareket edebildiği kontak türüne omik kontak denilir. Veya uygulanan gerilimin polaritesinden (+V/-V) bağımsız bir şekilde her iki yönde de akım iletimine minimum direnç sergileyen metal/yarıiletken ekleme doğrultucu olmayan kontak yani omik kontak denir (Şirin 2021).

Kontağa ait akım-gerilim karakteristikleri (I-V), Ohm kanununa ($V=I \cdot R$) uyar ve kontak direnci olabildiğince küçük olmalıdır (Orak 2013). Omik kontağın kalitesini, kontağın direnç değeri tayin eder. Özet olarak bu kontak türünde $\Phi_s - \chi_s$ değeri düşük olduğundan elektronlar bariyer boyunca herhangi bir zorlukla karşılaşmadan kolaylıkla hareket edebilirler. Omik kontak üç farklı şekilde elde edilebilir. Bunlar;

1. Schottky engel yükseklik seviyesi düşük bir eklem oluşturularak her iki yönde de elektronların serbest bir şekilde geçiş yapabileceği bir kontak elde etmek (non-rectifying barrier)

2. Schottky engel yükseklik değeri büyük olsa bile elektronların tünelleme yapabileceği, kontağa ait dar bir potansiyel engel oluşturmaktır (tunelling barrier). Bu tunelleme engeli, yarıiletken yüzeyini aşırı tiplilik (p^{++} veya n^{++}) gösterecek şekilde katkılanmak suretiyle elde edilir.
3. Termal difüzyonla dar bant aralıklı ve taban ile aynı özellikte bir tabaka oluşturmak suretiyle omik kontak oluşturmaktır.

3.6.2.1. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontaklar

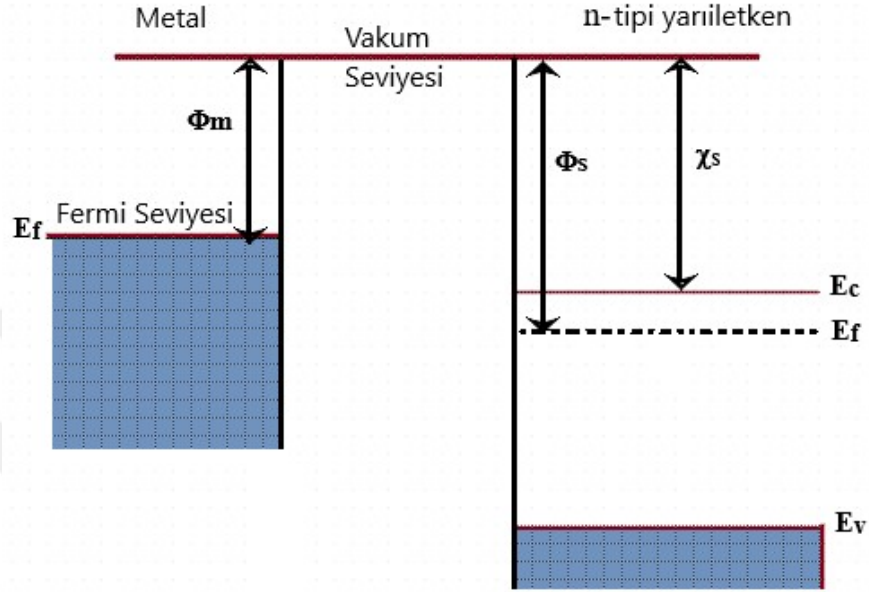
Metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki ilişkinin $\Phi_s > \Phi_m$ olduğu durumlarda, yarıiletken malzeme olarak da n-tipi kullanılmışsa, elde edilen kontağa metal/n-tipi yarıiletken kontak ismi verilir. Bu malzemeler arasında kontak işlemi gerçekleşmeden önce enerji-bant diyagramı Şekil 11’de gösterilmiştir. Bu diyagramı incelediğimizde kontak işleminden evvel metale ait fermi seviyesinin, yarıiletkene ait fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ farkı kadar üzerindedir.

Kontak olayından sonra ısıl denge halinde metalin içindeki elektronlar arkalarında pozitif yükleri (boşluk) bırakarak yarıiletkenin içine geçmesi ile yarıiletken yüzeyin n-tipliliği artar. Böylelikle yarıiletken yüzeydeki bu fazla elektronlardan kaynaklı bir negatif yüzey yükü tabakası ortaya çıkmaktadır. Metalden ayrılan elektronlardan kaynaklı geride bir yüzey yükü tabakasının ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Yani kısaca metal kısmında pozitif (+) yüzey yükü, yarıiletken kısmında ise negatif (-) yüzey yükü tabakası ortaya çıkmaktadır. Böylelikle kontak alanında bir dipol tabakası elde edilmektedir. Bu durum Şekil 12’de gösterilmektedir. Karşılıklı yük transferinin akabinde (termal denge durumunda) yarıiletkene ait fermi enerji seviyesinde $\Phi_s - \Phi_m$ fark kadar yükselme olur.

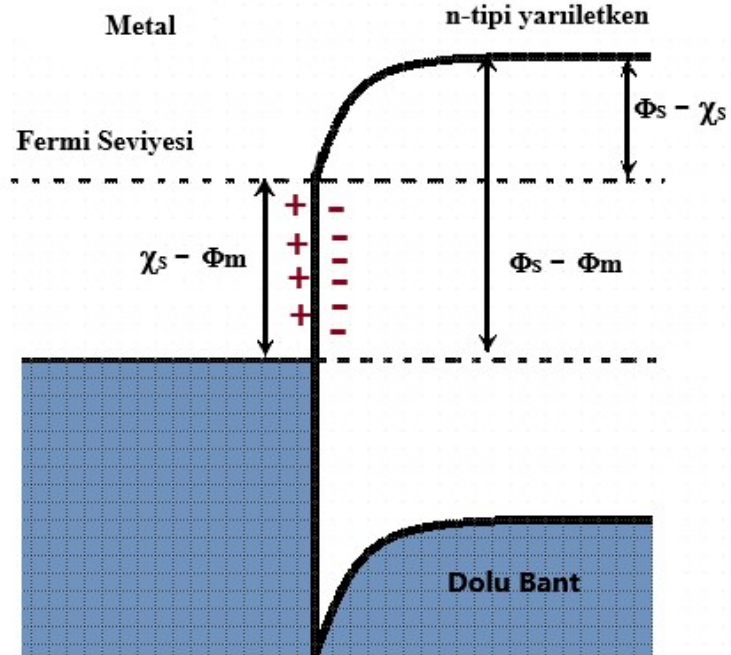
Isıl denge sağlanmış metal/n-tipi yarıiletken omik kontakta, akım taşıyıcıları metal tarafından yarıiletkene ve yarıiletken tarafından metale doğru her iki yönde de serbest bir şekilde geçebilirler.

Yarıiletken kısma negatif, metal kısma pozitif bir V gerilim (düz beslem) uygulanması halinde yarıiletken taraftan metale doğru akan elektronlar için bariyer bulunmadığından elektronlar bu yönde serbest bir şekilde hareket ederler (Şekil 13). Yarıiletken kısmına pozitif, metal kısmına negatif bir V gerilimi (ters beslem) uygulanması halinde ise metalde bulunan elektronlar yarıiletken alanına geçerler. Bu elektronların hareket sırasında karşılaşacakları bariyer yüksekliği çok küçük olduğundan

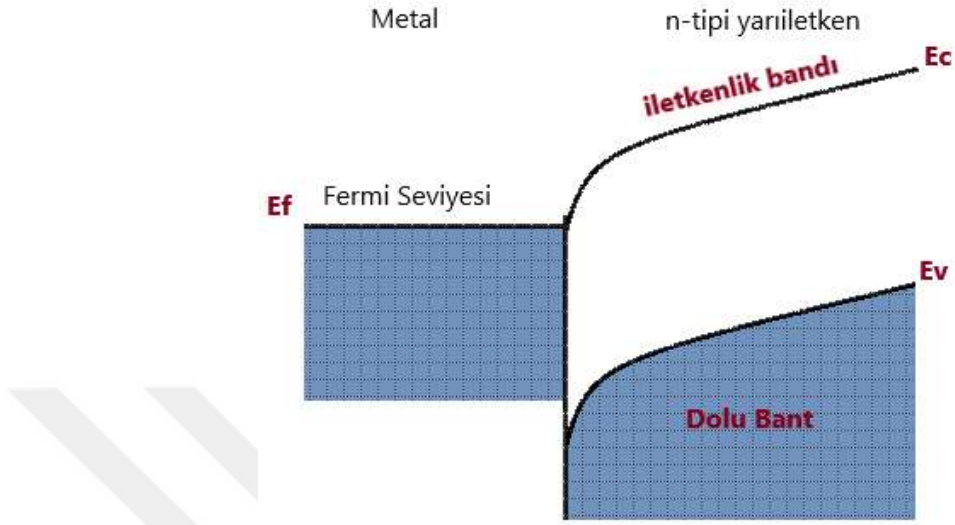
elektronlar için bir engel teşkil etmeyecektir ve elektronlar serbest bir şekilde hareketlerini tamamlayabileceklerdir (Şekil 14).



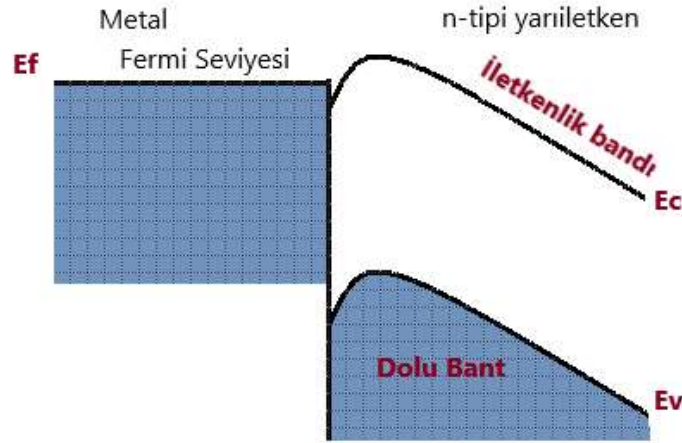
Şekil 11. Kontak öncesi metal/n-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji-bant diyagramı



Şekil 12. Kontak sonrası metal/n-tipi yarıiletken omik kontağa ait enerji-bant diyagramı



Şekil 13. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın düz (doğru) beslem durumundaki enerji-bant diyagramı

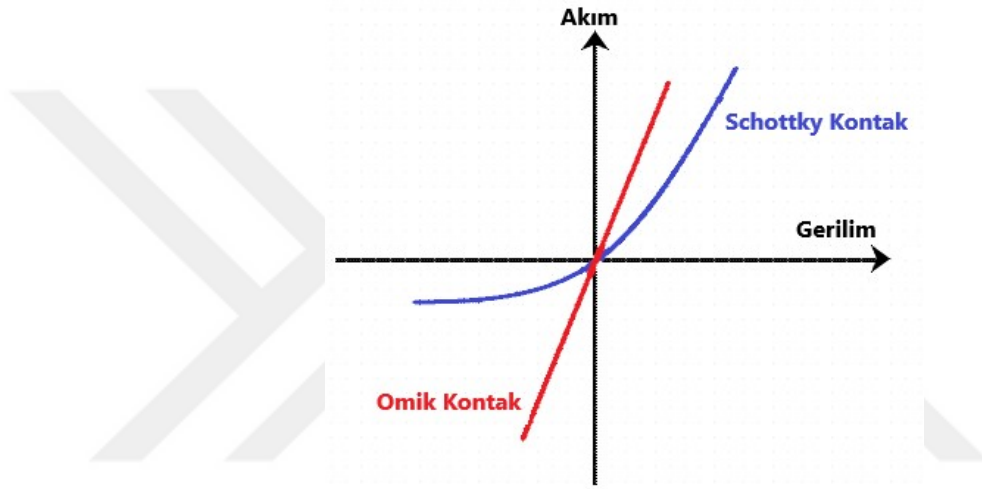


Şekil 14. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontakın ters beslem durumundaki enerji-bant diyagramı

Netice olarak elektronların her iki yönde serbest bir şekilde hareket etmelerini sağlayan kontak türüne omik kontak denir. Bu kontakta bir V gerilimi uygulanması halinde bu potansiyel fark, doğrultucu (Schottky) kontakta olduğu gibi yalnızca kontak bölgesinde değil tüm yarıiletken gövde boyunca dağılacaktır. Yarıiletken kısma pozitif metal kısma negatif bir voltaj uygulanması durumunda, elektron geçişinin metalden

yarıiletkenin iletkenlik bandına doğru kolay bir şekilde gerçekleşir. Bundan sebep bu omik kontaklara enjeksiyon kontak ismi de verilmektedir (Özerden 2014).

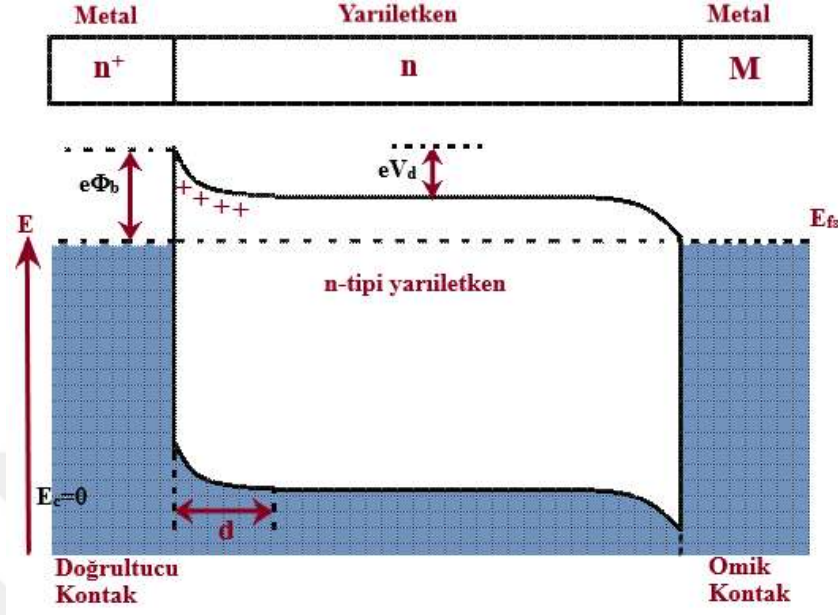
Schottky ve omik kantağa ait akım-gerilim karakteristiği Şekil 15'te gösterilmiştir. Buna göre Schottky kontaklarda akım taşıyıcılarının (elektron ve boşluk) bir yöndeki akışı diğer yöne nazaran çok daha kolay olmaktadır. Omik kontak durumlarında ise akım taşıyıcıları her iki yönde de aynı hızda olmaktadır.



Şekil 15. Omik ve Schottky kontaklara ait akım-gerilim karakteristik grafiği

3.7. METAL (OMİK)/n-TİPİ YARIİLETKEN/METAL (SCHOTTKY) DİYOT YAPISI

Bu yapı (n^+nM); n-tipi yarıiletkenine ait bir yüzeyinin aşırı (yüksek miktarda) katkılanması neticesinde elektron açısından bol olan n^+n omik kantağı ve n-tipi yarıiletkenine ait diğer bir yüzeyine ise nM doğrultucu kantağı uygulanarak elde edilir. Bu yapının termal denge halindeki enerji-bant diyagramı Şekil 16'daki gibidir. Bu yapı; n^+ omik tarafına negatif bir voltaj ($V < 0$) uygulanması halinde düz (doğru) beslem, pozitif bir voltaj ($V > 0$) uygulanması halinde ise ters beslem altında olmaktadır. n^+nM yapısı, diyot karakteristiği sergilediği için yani diyot gibi davrandığı ve diyot özelliklerini taşıdığından böyle bir yapı özetle yarıiletken diyot olarak isimlendirilir. Enerji-bant grafiğinde olduğu üzere elektronlar için engel yüksekliği $e\Phi_b = (eV_d + E_{fs})$ şeklinde ifade edilir (Akgül 2015).



Şekil 16. Termal denge halinde n^+nM yarıiletken Schottky diyot yapısının enerji-bant grafiği

3.8. METAL-YARIİLETKEN SCHOTTKY DİYOTLARDA AKIM İLETİMİ

Akım iletim görevini p-n eklemlerinde azımlık taşıyıcıları üstlenirken, metal-yarıiletken schottky diyotlarda bu görevi çoğunluk taşıyıcıları (boşluklar ve elektronlar) üstlenir (Sze, Li, and Ng 2021). Schottky diyotlardaki akım iletimini biraz daha açacak olursak metal/p-tipi yarıiletken yapılarında boşluklar (holler), metal/n-tipi yarıiletken yapılarında ise elektronlar akım iletim görevini yerine getirirler. Metal ve yarıiletken schottky diyot yapılarında akım iletimi, Spenke ve Schottky iki bilim adamının ileri sürdükleri termiyonik emisyon ve difüzyon teorileri yardımıyla açıklanmaktadır (Bethe 1991). Bu teoriler ile birlikte başlıca akım iletim ifadelerine bir sonraki bölümde kısaca değinilecektir.

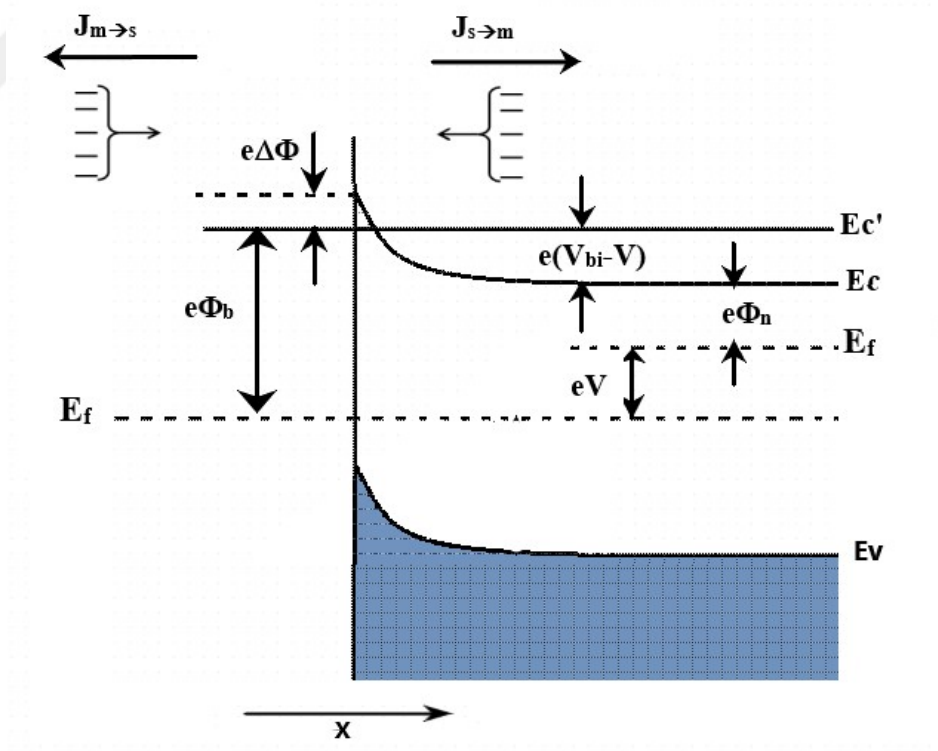
3.8.1. Termiyonik Emisyon Teorisi

Schottky kontak yapılarında bir potansiyel bariyer üzerinden elektron taşıması olayı termiyonik emisyon teorisi ile izah edilmektedir. Termiyonik emisyon (TE), taşıyıcıların (boşluklar ve elektronlar) yeterli termal enerji kazanmasıyla sıcak bir yüzeyden salınması (bırakılması) olayına denir. Bu durum Schottky engel diyotlarda (schottky kontak) veya bir diğer adıyla metal/yarıiletken kontaklarda, taşıyıcıların yeteri

miktarda termal enerji kazanarak potansiyel engel tepesi üzerinden yarıiletken metal yüzeye ya da metalden yarıiletken yüzeye geçiş esasına dayanır.

Metal/yarıiletken kontağa bir voltaj uygulanması halinde metal ve yarıiletken malzemelerine ait fermi enerji seviyeleri farklı olacak ve termal yolla uyarılmış elektronlar bariyerin diğer kısmına geçeceklerdir. Uygulanan voltaj değerine göre yarıiletkendeki elektronlar için bariyer yüksekliği değişir. Doğru(düz) beslem durumunda elektronlar için bariyer yüksekliği azalacak ve böylelikle metal yarıiletken tarafına doğru akan akım artacaktır. Ters beslem altında ise bariyer yüksekliğindeki artış, metalden yarıiletkeneye akan akımın azalmasına neden olacaktır.

TE teorisi oluşumu sağlanırken, Maxwell-Boltzmann metodunun kullanılabilmesi ve termodinamik denge halinin olaydan etkilenmemesi için, Schottky kontakın sahip olduğu potansiyel bariyerin, kT enerji değerinden büyük olduğu ve arınma bölgesinde meydana gelen taşıyıcı çarpışma boyutları oldukça küçük kabul edilmektedir (Tezcan 2019).



Şekil 17. Metal/yarıiletken Shottky ya da Doğrultucu kontak yapısındaki imaj azalma etkisinin düz beslem altındaki enerji-bant diyagramı

Bir metal/yarıiletken schottky diyotta, metal kısmı pozitif ve yarıiletken kısmı negatif olacak şekilde büyüklüğü V kadar olan bir potansiyel fark oluşturulduğunda, diyot yapısına bir düz beslem voltajı uygulanmış olur. Şekil 17'deki gibi bu Schottky kontağa V büyüklüğünde bir düz beslem gerilimi uygulanmaktadır. Metal alandan yarıiletken ve yarıiletken alandan metale doğru akan akım yoğunlukları sırasıyla $J_{m \rightarrow s}$ ve $J_{s \rightarrow m}$ ile ifade edilmektedirler. $J_{s \rightarrow m}$, $+x$ doğrultusunda ve bariyer yüksekliğini aşabilecek (geçebilecek) büyüklükte hızlara sahip elektron yoğunluğunun (konsantrasyonun) bir fonksiyonudur. Bundan dolayı,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Denklemdaki E_c , metal içindeki TE için gerekli olan minimum enerji, v_x değişkeni ise taşıma (iletim) yönündeki sürüklenme hızıdır. Böylelikle artan elektron konsantrasyonu,

$$dn = g_c(E) f_F(E) d(E) \quad (3.4)$$

ile verilir. Bu denklemdaki $g_c(E)$ ifadesi iletim bandındaki hal yoğunluğu, $f_F(E)$ ifadesi Fermi-Dirac ihtimaliyet (olasılık) fonksiyonudur.

Elektron konsantrasyonu ifadesi, Maxwell-Boltzmann yaklaşımından yararlanarak,

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[\frac{-(E - E_F)}{kT}\right] dE \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilebilir. Bu denklemden yer alan $(E - E_c)$ enerji ifadesi serbest elektronun hareket (kinetik) enerjisi olarak düşünülürse,

$$\frac{1}{2} m_n^* v^2 = E - E_c \quad (3.6)$$

$$dE = m_n^* v dv \quad (3.7)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = v \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (3.8)$$

olur. Bu denklemlerden faydalanarak (3.5) denklemi yeniden düzenlenirse,

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\Phi_n}{kT}\right) \exp\left(\frac{-m_n^* v^2}{2kT}\right) 4\pi v^2 dv \quad (3.9)$$

bulunur. Bu ifade, hızları (v) ve ($v + dv$) aralığında değişen elektronların sayısını bildirir.

Hız, bileşenlerine ayrılırsa;

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2 \quad (3.10)$$

biçiminde olur. Buradan (3.3) deki $J_{S \rightarrow m}$ ifadesi

$$J_{S \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \exp\left(\frac{-e\Phi_n}{kT}\right) \int_{v_{ox}}^{\infty} v_x \exp\left(\frac{m_n^* v_x^2}{2kT}\right) dv_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT}\right) dv_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left(\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT}\right) dv_z \quad (3.11)$$

şeklinde düzenlenebilir. v_{ox} hız ifadesi, elektronun x doğrultusunda potansiyel bariyeri geçmesi için gereken minimum hız olarak tanımlanır. Minimum v_{ox} hızı için;

$$\frac{1}{2} m_n^* v_{ox}^2 = e(V_{bi} - V_a) \quad (3.12)$$

eşitliği yazılabilir. Böylelikle $v_x \rightarrow v_{ox}$ için $a = 0$ olur ve $v_x dv_x = \left(\frac{2kT}{m_n^*}\right) da$ şeklinde yazılabilir. Denklem (3.11)'in daha sade gösterimi için denklem (3.13), (3.14) ve (3.15) gibi bazı parametre atamaları yapılabilir.

$$\frac{-m_n^* v_x^2}{2kT} \equiv a^2 + \frac{e(V_{bi} - V_a)}{kT} \quad (3.13)$$

$$\frac{-m_n^* v_y^2}{2kT} \equiv \beta^2 \quad (3.14)$$

$$\frac{-m_n^* v_z^2}{2kT} \equiv \gamma^2 \quad (3.15)$$

Bu denklemler (3.11) eşitliğinde yeniden yazılırsa;

$$J_{S \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right)^3 \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left[\frac{-e(V_{bi} - V_a)}{kT} \right] \\ x \int_0^\infty a \exp(-a)^2 da \int_{-\infty}^\infty (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^\infty (-\gamma^2) d\gamma \quad (3.16)$$

şeklinde olur. Bu son denklemin integrali alınır;

$$J_{S \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\Phi_n + V_{bi})}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (3.17)$$

ya da

$$J_{S \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (3.18)$$

şeklinde olur. Uygulama gerilim değeri sıfır (0) olduğunda $J_{S \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow S}$ tamamen eşit olurlar. Yani $J_{m \rightarrow S}$ ifadesi de aşağıdaki gibi olur.

$$J_{m \rightarrow S} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e\Phi_b}{kT} \right] \quad (3.19)$$

Eklemdeki (kontakta) net akım yoğunluğu $J = J_{S \rightarrow m} - J_{m \rightarrow S}$ ifadesine eşittir. Net akım yoğunluk ifadesini daha ayrıntılı gösterecek olursak,

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_b}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

Bir üstteki denklemde yer alan A^* değişkeni TE için Richardson sabiti olup,

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (3.21)$$

değerine eşittir. Genel olarak J ifadesi;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.22)$$

ile verilir. J_0 değişkeni ters-doyma akım yoğunluğu olup,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.23)$$

ifadesiyle gösterilir. Φ_b Schottky engel (bariyer) yükseklik değerinin imaj kuvveti sebebiyle azaldığı ve $\Phi_b = \Phi_{bo} - \Delta\Phi$ şeklinde ifade edildiği nazara alınarak elde edilecek yeni eşitlik;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\Phi}{kT}\right) \quad (3.24)$$

şeklinde olur.

Bariyer yüksekliğindeki $\Delta\Phi$ değişimi, artan ters beslem gerilimiyle veya artan elektrik alanla artacaktır. Ters-doyma akım yoğunluk değeri, engel düşmesi etkisi nedeniyle ters beslem gerilimi ile artar. Bu durum aynı zamanda Schottky bariyeri diyotun “breakdown” a gittiğini bildirir.

3.8.2. Difüzyon Teorisi

İki bölgenin sahip olduğu yoğunluklar birbirinden farklı olması durumunda yük geçişleri meydana gelir. Bu yük geçişleri, yoğunluğu fazla olan bölgeden daha az yoğunluğa sahip bölgeye doğru gerçekleşme işlemine difüzyon denir. Metal-yarıiletken kontak yapılarındaki yük geçişleri, gaz ve sıvı maddelerinde olduğu gibi taşıyıcıların (elektron/boşluk) yüksek konsantrasyonlu bölgeden daha düşük yoğunluklu bölgeye doğru geçişleri difüzyon ile olur. Tanımı Schottky tarafından yapılan difüzyon teorisi, aşağıdaki kabuller nazara alınarak açıklanır (Cova and Singh 1990; Keleş 2008; Padovani 1971).

- i- Potansiyel bariyerin yükseklik değeri kT/q enerjisi değerinden çok daha büyüktür.
- ii- Tüketim bölgesinde bulunan elektronların çarpışma etkisi ihmal edilir.
- iii- $x=0$ ve $x=w$ 'deki taşıyıcı yoğunlukları, termal denge durumundaki değerindedirler, taşıyıcı yoğunlukları, akım akışından etkilenmemiştir.

iv- Yarıiletken yapısındaki safsızlık yoğunluğu dejenere değildir, katkı atomu konsantrasyonu değiştirmez.

3.8.3. Termoionik Emisyon – Difüzyon Teorisi

Crowell ve Sze (1966), termoionik emisyon ve difüzyon teorisini birleştirmeleri neticesinde termoionik emisyon-difüzyon teorisini elde ederek bu teoriyi geliştirdiler. Tanımlanması Metal-yarıiletken yapısındaki arayüzey kenarında tanımlanmış bir parametre olan rekombinasyon hızı (V_r) üzerine bu teori kurulmuştur.

Metal ve yarıiletken gövde arasına gerilim uygulanması halinde, metal tarafa doğru bir elektron akışı gerçekleşir. Taşıyıcıların (elektron ve boşluk) bir kısmı kuantum mekaniksel yansımalarla bir kısmı da optik fonon geri saçılmalarına uğradıklarından dolayı akım değerinde bir azalma meydana gelir. Sze bunun rekombinasyon hızındaki (V_r) azalmadan kaynaklandığına yormuştur. Bu teoriye göre elektronlar metal-yarıiletken yapı arayüzeyinde optik fononlar ile etkileşmeden potansiyel bariyer üzerinden salınma olasılığı ve ortalama iletim katsayısı nazara alınarak A^* olan Richardson sabiti değiştirilerek A^{**} etkin Richardson sabiti olur. Böylelikle akım-gerilime (I-V) ait en genel ifade;

$$J = J_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right) \quad (3.25)$$

şeklinde olur. Eşitlikteki n diyota ait idealite faktörü, T sıcaklık ve J_0 ise doyma akım yoğunluğu temsil edecek olup,

$$J_0 = -A^{**}T^2 \exp \left[\frac{-q\Phi_B}{kT} \right] \quad (3.26)$$

ifadesi ile verilir. β , bariyer yüksekliğinin sıcaklıkla değişim katsayısıdır. A^{**} parametresi ise düzenlenmiş etkin Richardson sabiti (RS) olmak üzere,

$$A^{**} = A^* \exp \left(\frac{\beta}{kT} \right) \quad (3.27)$$

şeklinde yazılır. Metal ile yarıiletken malzemeler arasında eğer yalıtkan bir oksit tabakası (MIS/MOS) bulunuyorsa RS parametresi oksit tabakasına bağlı etkin değer alır ve A^{**} ifadesi yerine yalıtkan oksit tabakası sebebiyle A_{etk} ifadesi yer alır.

$$A_{etk} = A^* \exp \left[\frac{-4\pi\delta}{h(2m^*\chi)^{1/2}} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

Denklemden δ , metal ile yarıiletken malzeme arasında yer alan yalıtkan bir oksit tabaka kalınlığı, h plank sabiti, $m^*=m_0$ etkin kütle, χ ifadesi ise yarıiletkenin elektron yakınlığı olarak ifade edilir. İdeal diyottan sapmaları tespit etmek için idealite faktörü, “n” ifadesiyle tanımlanır. TE teorisine göre idealite faktörü (n) ideal bir Schottky diyotta 1 değerine eşittir (n=1). Dolayısıyla akım yoğunluğu;

$$J = J_0 \exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) \quad (3.29)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlikte bulunan idealite faktörü (n), 1 değerinden uzaklaştıkça bariyer yüksekliğinin voltaja bağlılığı artmaktadır. Metal-yarıiletken arasında yer alan yalıtkan oksit tabaka kalınlığı (δ) ve yarıiletken ile denge halinde arayüzey durumları (N_{ss}) cinsinden idealite faktörü (n) yazılmasıyla,

$$n = 1 + \frac{\delta}{\varepsilon_i} \left[\frac{\varepsilon_s}{w} + qN_{ss} \right] \quad (3.30)$$

şeklini alır.

Denklem (3.30)'daki ikinci terimin artmasıyla ideallikten uzaklaşılır. Dolayısıyla idealite faktörü, hem arayüzey durumlarının artmasıyla hem de yalıtkan tabaka kalınlığının artmasıyla doğru orantılı olacak biçimde artmaktadır. Engel (bariyer) alçalması ve A^{**} 'nın alana bağlı olması sebebiyle idealite faktörü (n) gerçek Schottky diyotlarında $1 < n < 1,2$ aralığında bir değer alır.

3.8.4. Engel Boyunca Tünelleme

Metal/yarıiletken ve metal/yalıtkan/yarıiletken Schottky engel diyot yapılarındaki akım-iletim mekanizmalarından önemli bir tanesi de tünellemedir. Bu diyot yapılarında TE teorisi haricinde taşıyıcıların sahip olduğu enerji, engel yüksekliğini aşacak düzeyde olmadığından, elektronlar bariyer yüksekliğini aşmak yerine kuantum mekaniksel tünelleme yoluyla daralan engel genişliği sayesinde engelin içinden geçiş yapabilirler.

Başka bir şekilde ifade edilecek olursa, yasak enerji aralığı geniş olan yarıiletken malzemeler üzerinde omik kontak yapmak oldukça zor bir işlemdir. Çünkü bu malzemeler üzerinde alçak engel yüksekliği elde etmek suretiyle her iki yönde de taşıyıcıların geçiş yapabilmeleri pratik bakımdan büyük zorluklar beraberinde getirir. Böyle malzemeler için, yarıiletkenin yüzey kısmını aşırı tiplilik (p^{++} yada n^{++}) olacak şekilde katkılanmak suretiyle, taşıyıcıların engel boyunca her iki yönde de tünelleme ile geçişlerine izin verecek kadar büyük engel yüksekliğinde dar-ince potansiyel bariyer oluşturmak mümkündür.

Doğru beslem altında tünelleme olayı, yeterince yüksek yada aşırı katkılanmış dejenere ($N_d > 10^{18} \text{ cm}^{-3}$) yarıiletken yapılarında ve çok düşük sıcaklıklarda olurken, ters beslem altında düşük katkılı yarıiletkenlerde ve düşük sıcaklıklarda meydana gelir (Singh 1985).

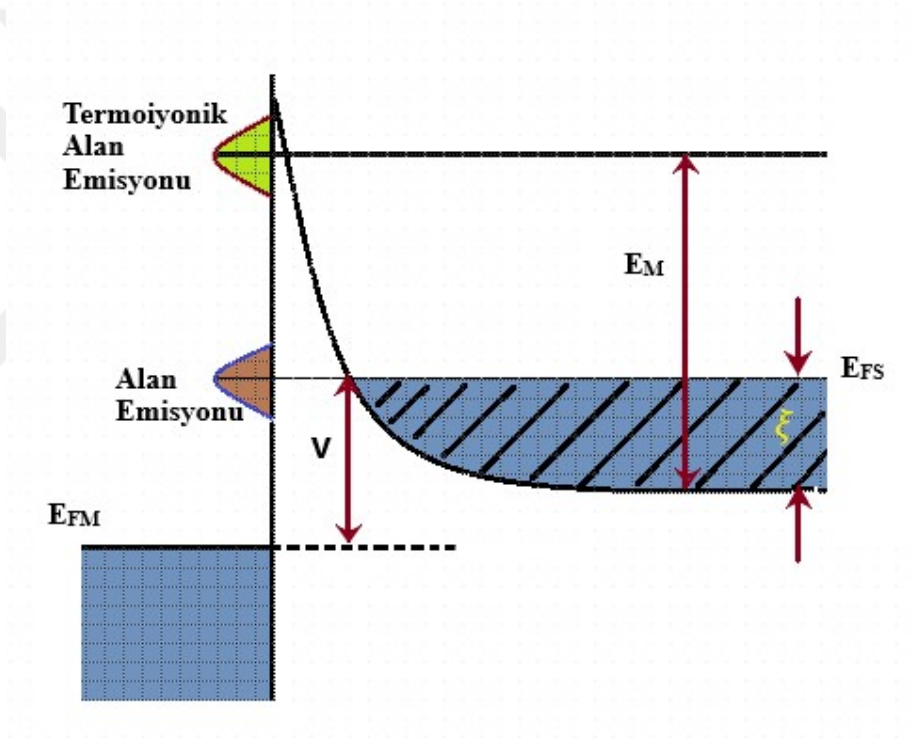
Yarıiletkenin tüketim tabakası, aşırı katkılanmadan dolayı oldukça incedir. Bu yüzden taşıyıcılar bir miktar termal enerji kazanarak engelin bu ince bölgesinden tünellenebilirler. Yani düşük sıcaklıklarda, fermi enerji düzeyine çok yakın olan elektronlar, yarıiletken kısmından metale doğru engel boyunca tünelleme yapabilirler. Böylece, yarıiletken fermi enerji seviyesine yakın elektronların tünellemesiyle düz beslem yönündeki akım değerinde artış olur. Bu duruma Alan Emisyonu (AE) denir. Sıcaklığın artmasıyla elektronların önemli bir kısmı fermi enerji seviyesinin üzerine çıkar. Yani elektronlar ısı nedeniyle daha yüksek enerji düzeylerine uyarılmış olurlar. Bu elektronlar, iletkenlik bant seviyesinin Em kadar üzerindedir ve bu seviyede daha ince-küçük bir engelle karşılaşmaları tünelleme ihtimalini daha da artırır. Dolayısıyla düz beslem (ileri öngerilim) yönündeki akımı da artırır. Bu olay Termoionik Alan Emisyonudur (TAE). Bu mekanizmalar Şekil 18’de gösterilmiştir. Eğer sıcaklık değeri daha da artırılırsa, bariyer yüksekliğini aşabilecek kadar enerji elde eden taşıyıcılar, tünelleme olmaksızın bariyer üzerinden karşı tarafa kolaylıkla geçerler. Bu olay Termoionik Emisyonudur (TE).

Katkılama işlemi epitaksiyel büyütme, termal difüzyon ya da iyon ekme tekniklerinden biri istimal edilerek başarılabilir (Çaldıran 2013).

Bir Schottky kontağa ait deplasyon bölgesi (uzay yükü bölgesinin genişliği), yarıiletken malzemesine katkılanan kirlilik atom yoğunluğunun karakökünün tersiyle orantılıdır (Aydoğan 2004; Coskun, Biber, and Efeoglu 2003).

$$w = \sqrt{\left(\frac{2\varepsilon_s}{qN_d}\right) \left(\phi_b - (E_c - E_f) - V - \frac{kT}{q}\right)} \quad (3.31)$$

Dolayısıyla deplasyon bölgesi, katkı atomlarına ait konsantrasyonun artmasıyla azalır. Böylelikle taşıyıcılar, potansiyel engel genişliğinin azalmasıyla (veya engel daralması/incelmesi) birlikte her iki doğrultuda da tünelleme yapma olasılığı artacaktır. Bu nedenle tünelleme ile kontak eldesinde yarıiletkenin yüzeyin aşırı tiplilik sergileyecek düzeyde katkılaması gerekmektedir.



Şekil 18. Düz beslem altında AE ve TAE ait enerji bant diyagramı.

3.8.5. T_0 etkili akım iletimi

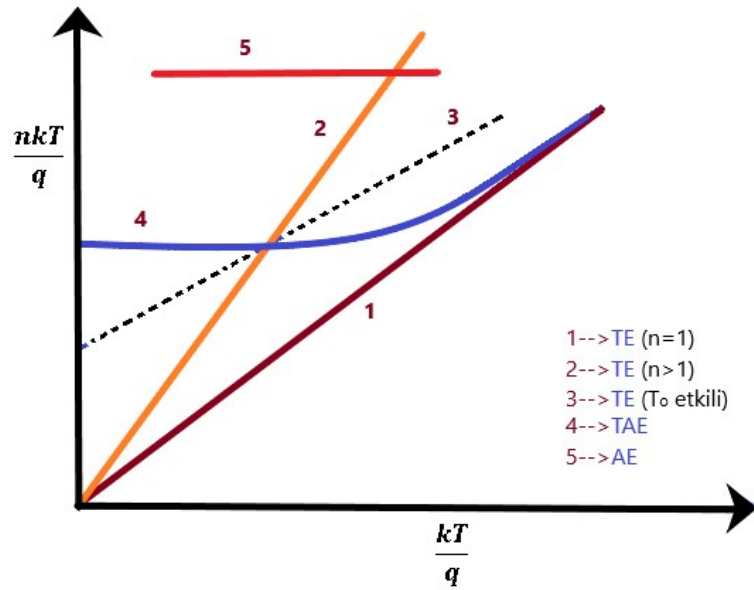
İdealite faktörü (n) 1'den büyük olması ($n>1$) hayali kuvvet veya arayüzey durumlarından dolayı ortaya çıkıyorsa idealite faktörü sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Ancak $n>1$ durumu eğer tüketim bölgesindeki rekombinasyon akımlarından veya termoiyonik alan emisyonundan kaynaklanıyorsa, n sıcaklığa bağlıdır. İdealite faktörü, Schottky diyotların büyük çoğunluğunda sıcaklığa bağlı bir parametredir. T_0 etkili J-V karakteristik ifadesi,

$$J = A^{**}T^2 \exp \left[-\frac{q\phi_B}{k(T + T_o)} \right] \left\{ \exp \left[\frac{qV}{k(T + T_o)} \right] - 1 \right\} \quad (3.32)$$

biçiminde yazılır. Denklemdaki T_o parametresi geniş sıcaklık aralığında voltaj ve sıcaklık değerlerinden bağımsız olan bir sabittir. İdealite faktörünün sıcaklığa bağlılığı deneysel olarak,

$$n = 1 + \frac{T_o}{T} \quad (3.33)$$

şeklinde ifade edilir. Gerilimim fonksiyonu olarak Şekil 19' da görüldüğü üzere değişik akım-iletim mekanizmaları olabilir. TE teorisinin baskın(etkin) olduğu mekanizmalar 1, 2 ve 3 numaralı eğriler ile gösterilmiş. Bunlar $n>1$, $n=1$ ve T_o etkili durumların karşılığı olurken 4 numaralı eğri TAE ve 5 numaralı eğri ise AE iletim mekanizmalarına ait etkin durumları göstermektedir (Şahinkaya 2020).



3.9. METAL/YARIİLETKEN KONTAK YAPILARINDA SICAKLIĞIN ETKİSİ

Yarıiletken devre elemanlarındaki kontakların birçoğu değişik şekillerde ısıya maruz kalmaktadır (Aydoğan 2004). Dolayısıyla metalin yarıiletkenle adhezyonunu yükseltmek adına bu durum kaçınılmaz olabilir. Metalin kaplanma işleminden sonra

ortaya çıkan diğer işlem adımları için yüksek sıcaklığa (ısıya) gereksinim duyulabilir. Gerçekleşen bu işlem ateşleme ya da ısı sinterleme olarak bilinir. İdeale yakın doğrultucu kontak oluştururken kontağın eriyebileceği sıcaklıktan kesinlikle kaçınmak gerekir. Çünkü arayüzey yarıiletken yapının içerisinde düzlemsel olmayan keskin metalik bir sivri uzantının (çıkıntı) olduğu bir yapıya sahip olmaya başlar. Dolayısıyla bu durum ortaya çıktığında, çıkıntının uç kısmındaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten küçültebilir yani bozabilir (Andrews 1974).

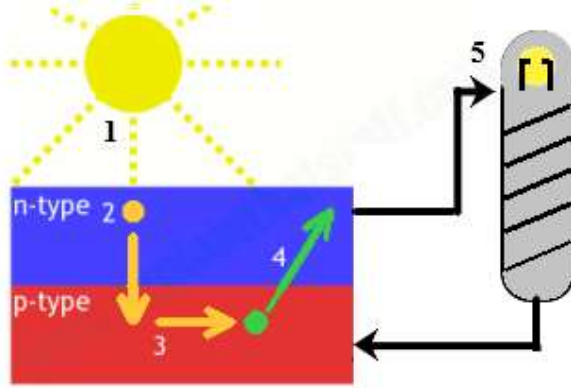
Devre elemanı uygulamalarında diyot yapısında akım akışı ile ortaya çıkan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik meydana gelebilir. Gözlemlenen metalürjik değişimler için akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin bozulmasını ifade etmek pek kolay değil. Akım-gerilim karakteristiklerinde meydana gelen değişimin basit bir şekilde engel yüksekliğindeki bir değişimden kaynaklı olduğunu açıklamak her zaman mümkün olmayabilir. Bazen karakteristikler akseptör (alıcı) veya donör (verici) olarak davranış sergileyen atomların yarıiletken difüze oldukları varsayılarak yorumlanabilir ya da yarıiletkende katkı atomlarının etkin konsantrasyonun değiştirilmesi amacıyla elektriksel olarak aktif merkezlerin oluşumu sağlanır. Katkı konsantrasyonu arttıkça engel daralır ve TAE meydana gelebilir. Yarıiletken içerisine giren kusurlar veya atomlar asıl katkı atomlarıyla ters (zıt) polaritedeyse etkin hal konsantrasyonu (yoğunluğu) azalır ve p-n eklemının oluşabileceği durum bazen elde edilir. Teknolojik önemi bakımından yaygın bir şekilde kullanılan Al/Si kontakları bunun en iyi örneğidir.

3.10. GÜNEŞ PİLİ VE FOTODİYOT UYGULAMALARI

Fotodiyotlar veya güneş pilleri, ters (negatif) beslem altında çalışacak biçimde tasarlanırlar. Güneş pilleri ekseriyetle pn eklemli olup yalnızca ışığı emecek biçimde tasarlanmış büyük diyotlardır. Fotodiyot aygıtlar ışığa duyarlı olup yeterli ışık üzerlerine düştüğünde çalışmaya başlar. PV sistemler fotodiyotların bir türüdür. Basit bir tanımla güneş ışığını (enerjisini) elektrik enerjisine çevirerek hem gerilimi hem de akım üretimini sağlar. Bu işlem, eklem alanına Eg değerine eşit veya bu aralıktan daha büyük enerjili bir foton düştükten sonra yarıiletken tarafından bu fotonun soğurulmasıyla başlar. Soğurulan bu fotonun enerjisi değerlik bandından bulunan bir elektron tarafından tutulur. Bu elektron, absorbe ettiği bu enerji ile arkasında delik bırakarak iletkenlik bant tarafına doğru çıkar. Böylelikle bir elektron-boşluk çifti ortaya çıkmış olur. Eklem bölgesinde oluşan

elektrik alan(E) tarafından pn eklem yapılı bir güneş pilinde meydana gelen bu elektron-boşluk çiftlerinin elektronları n-tipi bölgesine, boşlukları ise p-tipi bölgesine doğru itilmesiyle bu çiftler birbirinden ayrılır. Ayrılan bu çiftler pn kristal yapısının çıkış uçlarında bir fotovoltaj gerilim oluştururlar. Eklem alanına başka fotonlar düştükçe bu döngü böyle sürecektir.

Güneş pilinin çıkış uçlarından çıkan elektron daha sonra harici devrede sahip olduğu enerjisini dağıtır ve güneş pilene geri gelir. Uygulamalarda fotovoltajik enerji dönüşümlerinin hemen hemen hepsinde pn bağlantılı yarıiletken materyaller kullanılmaktadır. Şekil 20’de yük altında pn eklem yapılı bir güneş pilinin çalışma yöntemine dair şematik bir görüntü verilmiştir (Honsberg and Bowden 2024).

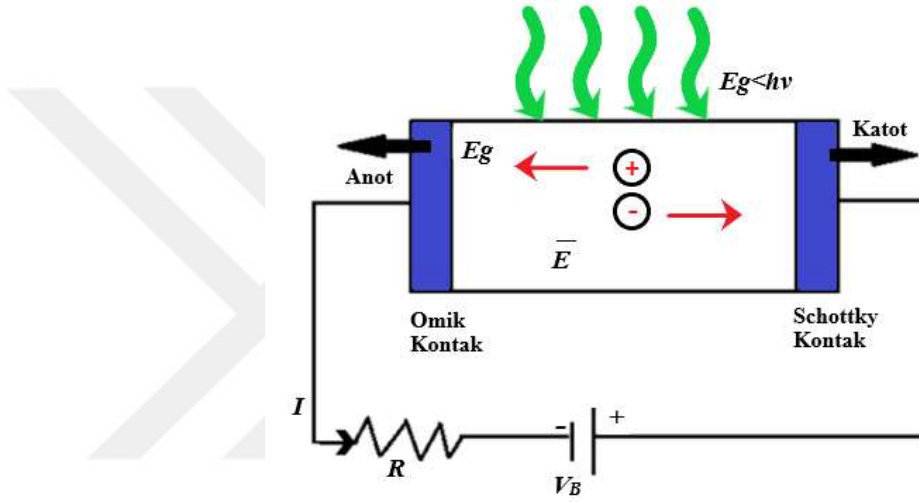


Şekil 20. Güneş pilinin şematik görünümü

1. Güneş ışığı kristal hücre yüzeyi üzerinde parladığında, fotonlar 1 numaradaki gibi üst yüzeye çarpar.
2. Sarı lekeler şeklindeki fotonlar, sahip oldukları enerjilerini hücre içinden aşağıya doğru taşırlar.
3. Fotonlar daha sonra enerjilerini alt kısımda bulunan p-tipi tabakasındaki yeşil lekeler ile gösterilen elektronlara devrederler.
4. Elektronlar aldıkları bu enerjiyi engel (bariyer) boyunca üst kısımda bulunan n-tipi tabakaya fırlamak ve devreye ulaşmak için sarf ederler.
5. Son olarak devre etrafından akan elektronlar devreyi tamamlayıp lambayı yakar.

Dışardan fotodiyot aygıtlara bir enerji verildiğinde valans bandında bulunan elektronların enerjisi artar. Verilen bu enerji değeri, malzemenin sahip olduğu yasak

enerji aralığı (E_g) değerinden büyük olması durumunda elektronlar, iletim bandına doğru geçerler. Dolayısıyla bu elektronlar iletim bandına geçişlerinde valans bandında deşik/hole bırakırlar. Dışardan enerji verilmeye devam edilmesi durumunda bu delikler başka elektronlar ile birleşip dolar, delik ile birleşen elektron kendi alanında yine bir delik bırakmış olur. Enerjisi artan her bir elektron yüksek enerjili iletim bandına geçmesi halinde gerisinde delikler bırakarak bir elektrik alan (E) oluşumuna neden olur (Şekil 21).



Şekil 21. Güneş pilinde elektron-delik çifti hareketi

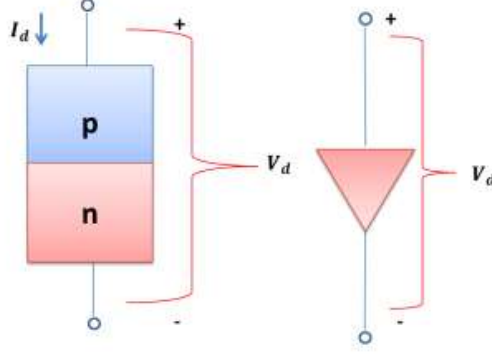
Yeterli seviyede ışık aldığında çalışmaya başlayan fotodiyot aygıtlar, temelde foton taşıyıcıların diyot eklem yapıları içinde yer değiştirmesi prensibine dayanır. Fotodiyot aygıtlar, üzerlerine gelen ışık miktarındaki artışın ters akım değerinde de artışa neden olacak şekilde yapılmışlardır. Bu aygıtlar en etkili biçimde ışık şiddetini elektriksel işarete dönüştürmektedirler. Bu dönüşüm işleminin etkinliği fotodiyot aygıtın I-V özelliğine bağlıdır.

3.11. GÜNEŞ PİLİNİN TEMEL ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİ

Güneş pili karakterizasyon işlemlerinde en çok kullanılan teknik akım-voltaj (I-V) ölçüm tekniğidir. Bu teknik, güneş pili hücrelerinin temel elektriksel karakteristiklerini gösterir. Böylelikle güneş ışığı altında verimliliği artırma adına hücre parametrelerinde ne tür değişiklikler yapılması gerektiğine dair fikir verir.

Şekil 22’de de belirtildiği üzere pratikte diyot olarak bilinen güneş pillerinde, ışık altında çıkış terminallerinde potansiyel bir fark meydana gelir. Güneş pili hücresinin

terminallerine yani elektrotlarına bir direnç bağlanması durumunda bir akım akar. Düz beslem (Vd) durumunda akım diyotun p-tipi alandan n-tipi alana doğru rahat bir şekilde akacaktır.



Şekil 22. pn eklemli güneş piline ait elektriksel görünüm (Sajjad 2013).

Ters beslem durumunda aygıtta akım akmaz. Ancak nano veya piko gibi oldukça küçük seviyelerde ters doyma akımların (I_o) çıkmasına neden olacaktır. “Karanlık doyma akımı” olarak da bilinen bu akım, termal(ısısal) yolla oluşan taşıyıcılardan elektronlar n-tipi kısmına, boşluklar ise p-tipi kısmına akması sonucu oluşur. PV güneş pilleri temel olarak bir pn eklemidir. Dolayısıyla ideal bir diyot için akım-voltaj (I-V) ilişkisi denklem 3.34’deki formül ile gösterilmiştir.

$$I_F = I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (3.34)$$

I_F/I_d : Diyot üzerinden geçen akım

e : Elektronik yük

I_o : Ters doyma akımı

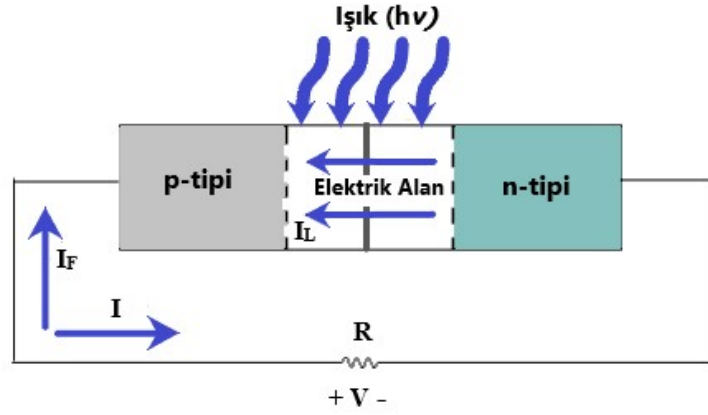
T : Sıcaklık (Kelvin)

V : Kontaklar arası uygulanan gerilim

k : Boltzmann sabiti

Hücre yüzeyine ışık çarptığında hücre güç üretmeye başlar ve akım-gerilim eğrisi şeklinde y-ekseni yönünde kayar. Bundan dolayı güneş pilleri ideal diyot olmaktan çıkar. Işık tarafından üretilen I_L akımı denkleme dahil edilir.

$$I_F = I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (3.35)$$



Şekil 23. Dirençli yüke sahip güneş pilleri (Ejderha 2012).

Bu I_L akımı, yük direncinde bir potansiyel oluşturur. Bu potansiyel de diyot üzerinde ileri yönde (düz) beslem olarak etki eder ve elde edilen akımın bir kısmı diyot üzerinden boşalır. Böylelikle net güneş pili akımı, zıt yönde;

$$I_{net} = I_L - I_F = I_L - I_o \left(e^{\frac{eV}{kT}} - 1 \right) \quad (3.36)$$

Denklemdaki I_{net} net akım, I_F ileri yönde beslem akımı ve I_L ise fotoakımı ifade etmektedir.

$$I_o = A \cdot A^* T^2 e^{\left(\frac{-e \Phi_{Bn}}{kT} \right)} \quad (3.37)$$

Yukardaki ideal diyot denklemi (3.37) verilmektedir. Diyot ileri yönde beslenirse yani kutuplanırsa, uzay yükü bölgesinde ortaya çıkan elektrik alan (E) büyüklüğü azalır. Ancak hiçbir zaman bu değer sıfır olmaz ve yön değiştirmez. Bundan ötürü net akım, fotoakım ile aynı yönde olup her ikisi de her zaman zıt yöndedir (Çaldıran 2013). İki sınır durumu olan kısa devre durumu ve açık devre durumu baz alınarak birtakım değerler hesaplanabilir. Kısa devre durumu için direnç değeri sıfır olursa ($R=0$) gerilim değeri de sıfır ($V=0$) olur. Buradan geçen net akım bu durumda kısa devre akımı olarak tanımlanır.

$$I_{net} = I_{kd} = I_L \quad (3.38)$$

Açık devre durumu için ise $R \rightarrow \infty$ olduğu durumda meydana gelir. Bu durumda akım geçmediğinden akım değeri sıfır olur ve V_{ad} açık devre voltajı aşağıdaki gibi bulunur.

$$I_{net} = 0 = I_L - I_o \left(e^{\frac{eV_{ad}}{kT}} - 1 \right) \quad (3.39)$$

V_{ad} 'yi denklemden çekip yalnız bırakırsak,

$$\frac{I_L}{I_0} = \left[e^{\left(\frac{eV_{ad}}{kT} \right)} - 1 \right] \quad (3.40)$$

$$\ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) = \frac{eV_{ad}}{kT} \quad (3.41)$$

$$V_{ad} = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (3.42)$$

kT/e ifadesi aynı zamanda termal potansiyel (V_t) ifadesi ile aynı olduğundan denklem yeniden düzenlenirse,

$$V_{ad} = V_t \ln \left(1 + \frac{I_L}{I_0} \right) \quad (3.43)$$

şeklinde yazılabilir. Güneş pili uygulamalarında elde edilebilecek gerilim değerini, yarıiletken malzemenin bant aralığı belirleyebilmektedir. Geniş bant aralığı demek daha büyük gerilim değeri demektir.

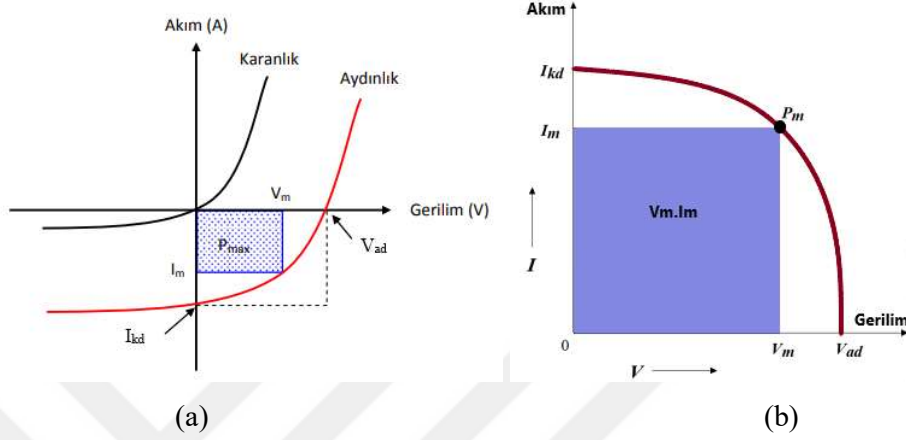
Öte taraftan, küçük bant aralığına sahip bir malzeme, çok daha fazla foton absorbe eder. Buda fotonların oluşturduğu yük taşıyıcıların sayıca artması sonucu fotoakımın artması demektir. Sonuç olarak bir güneş pilinin performans analizindeki en önemli faktör olan verimlilik (η) değeri, kullanılan yarıiletken malzemenin bant aralığına bağlıdır.

Bir güneş piline ait güç dönüşüm verimi (η),

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% = \frac{I_m V_m}{P_{in}} \times 100\% \quad (3.44)$$

denklemini ile verilir. Burada P_m , güneş pilinden elde edilen yani hücrenin ürettiği maksimum düzeydeki elektrik gücü, P_{in} ifadesi de ışık giriş gücü şeklinde tanımlanır. Bir Si pn eklemli güneş pili aygıtında elde edilen maksimum verim %28 civarındadır (Bekil 2019).

Şekil 24’de aydınlık ve karanlık altında tipik bir güneş pilinin akım-gerilim (I-V) grafiği verilmiştir. Çıkış gücünün maksimum değeri, akım-gerilim grafiğinin IV. alanda, aydınlık ortamda ölçülen en büyük alan (dikdörtgen alan) ile belirlenir.



Şekil 24. Bir güneş pili I-V grafiğinin **a)** aydınlık ve karanlık ortamlardaki durumu ve **b)** düz beslem durumu (Sajjad 2013).

Buna göre, $P_m = I_m \cdot V_m$ formülü ile verilir.

Maksimum güç değerindeki I_m ve V_m değerlerinin oluşturduğu alanın, açık devre voltajı (V_{ad} ya da V_{oc}) ile kısa devre akım (I_{kd} ya da I_{sc}) değerlerinin oluşturduğu alana oranı doldurma, dolgu ya da fil faktörü (FF) denir.

$$FF = \frac{I_m V_m}{I_{kd} V_{ad}} = \frac{P_m}{I_{kd} V_{ad}} \quad (3.45)$$

Fil faktörü başka bir ifade ile tanımlanacak olursa, güneş piline ait akım-gerilim grafiğinin ideal bir diyot grafiğinden ne kadar saptığının göstergesidir. Bu oran değerinin küçüklüğü Schottky kontağın bariyer yüksekliğinin homojenliği ile ilgilidir. Tipik bir FF 0,7 ile 0,8 değerleri aralığındadır.

Metal-yarıiletken malzemesi arasında 5-20 Angstrom($\text{\AA}$) kalınlık değerinde doğal ince bir oksit tabaka meydana geldiğinden denklem yeniden düzenlenmelidir (Ejderha 2012).

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{eV}{nkT} \right)} - 1 \right] \quad (3.46)$$

Denklemdaki n , idealite faktörüdür. Eşitliğin logaritması alınıp V değişkenine göre türev alınmasıyla elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (3.47)$$



4. BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölüm, numunelerin hazırlama ve temizleme aşamaları yanı sıra numunelerin elde edilmesinde ve ölçümlerin alınmasında kullanılan cihazlara dair bilgiler içermektedir. Ayrıca elde edilen Schottky güneş pillerinde organik arayüzey olarak kullanılan metil kırmızısı malzemesine dair bilgi verilmektedir.

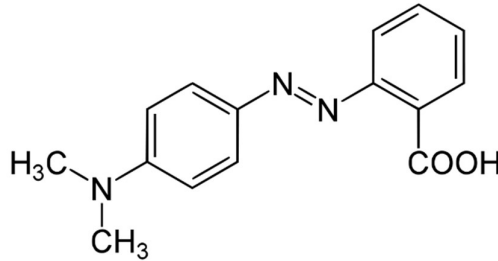
4.1. METİL KIRMIZISI

Metil kırmızısı asit-baz indikatörü veya bir başka ifade ile pH indikatörü olarak bilinmektedir. Bu organik malzeme asit çözeltilerine eklendiğinde kırmızı renk alır ve kristal toz halinde bulunan kırmızı bir maddedir. Bu organik malzeme Şekil 25'te görüldüğü gibi 6,2 pH değerinin üzerinde sarı, 4,4 pH değerinin altında ise kırmızı renk almaktadır. Yapılan testler neticesinde kırmızı renk pozitif, sarı renk ise negatif anlamı taşımaktadır (Group 2024).



Şekil 25. Metil kırmızısı pH göstergesi (Bionity 2024).

Bu organik malzemenin kaynama noktası 179 °-182 °C aralığında olup molekül formülü ise $C_{15}H_{15}N_3O_2$ şeklindedir (Şekil 26).



Şekil 26. Metil kırmızısı ($C_{15}H_{15}N_3O_2$) malzemesinin moleküler yapısı (Ranjan, Negi, and Tiwary 2023).

Uluslararası Kanser Araştırmaları Teşkilatı (IARC) bu organik malzemenin sağlığı tehdit eden risklerin olduğunu fakat kanser riski taşıyacak kadar riskli bir potansiyele

sahip olmadığını belirtmiştir. IARC, soluma ve yutulma durumunda zarar verici olduğunu; göz, deri ve solunum sistemin maruz kalması sonucu tahriş edici özelliğinin olduğunu tespit etse de, kanserojen etki gösterdiğine dair herhangi bir bulguya rastlamamıştır (Group 2024).

4.2. n-Sİ KRİSTAL MALZEMELERİN TEMİZLENMESİ

Bu çalışmada elde edilecek aygıtın iyi sonuçlar vermesini sağlamak adına kullanılacak numune yüzeyinin fiziksel ve kimyasal kirliliklerden arındırılması ve mevcut oksit tabakasının minimuma indirgeyecek şekilde temizlik işlemlerine tabi tutuldu. Bu kimyasal temizlik işlemlerinde aygıtın karakteristiğini etkileyecek durumlardan kaçınıldı.

Damlatma ve Spin Coating olmak üzere iki farklı yöntem kullanılarak numunelerin üzeri organik malzeme büyütülerek kaplanılacaktır. Spin Coating yöntemi ile organik kaplanılacak numunenin parlak yüzeyi pürüzsüz hale getirmek adına kimyasal birtakım işlemlere tabi tutuldu. Sağlığa oldukça zararlı olan bu işlemler çeker ocakta yapıldı.

160 ml HCl, 4,5 ml HF, 7,5 ml H₂O₂ ve 45 ml KOH karışımı hazırlandı (Pakma et al. 2017; Wang 2016).

Belirtilen oranlardan alınarak hazırlanan bu çözeltinin, cam beheri erittiği tespit edildikten sonra bir petri şişede karışımı sağlandı. Numunenin parlak yüzeyi temas edecek şekilde plastik ince petri kabında yüzdürüldü. Kimyasal karışım n-Si numunenin parlak yüzeyini aşındırarak pürüzsüz hale getirildi. n-Si yarıiletken kristal numunenin temizlik aşamaları Ultrasonik Cleaner cihazında sırasıyla;

- Ultrasonikte Triklor Etilen ile 15dk yıkama işlemi yapıldı.
- Ultrasonikte Aseton ile 15dk yıkama işlemi yapıldı.
- Ultrasonikte Metanol ile 15 dk yıkama işlemi yapıldı.
- Deiyonize su (18MΩ) yani Saf su ile durulandı.
- %10 Seyreltik HCl çözeltisinde 1 dk bekletildi.
- Deiyonize su ile durulandı.
- Ultrasonikte Saf suda 10'ar dk ile ikişer defa yıkama işlemi yapıldı.
- Yüksek saflıktaki N₂ (Azot) gazı ile kurutma işlemi yapıldı.

Ayrıca numunenin konulduğu kaplar, maskeler, numune tutucular, cam kesitler ve cımbızlar gibi çalışmada kullanılan aparatlar izopropil alkol (izopropanal) ve metil alkol (metanol) ile yıkanıp N₂ (Azot) veya Ar (Argon) gazı ile kurutuldu.

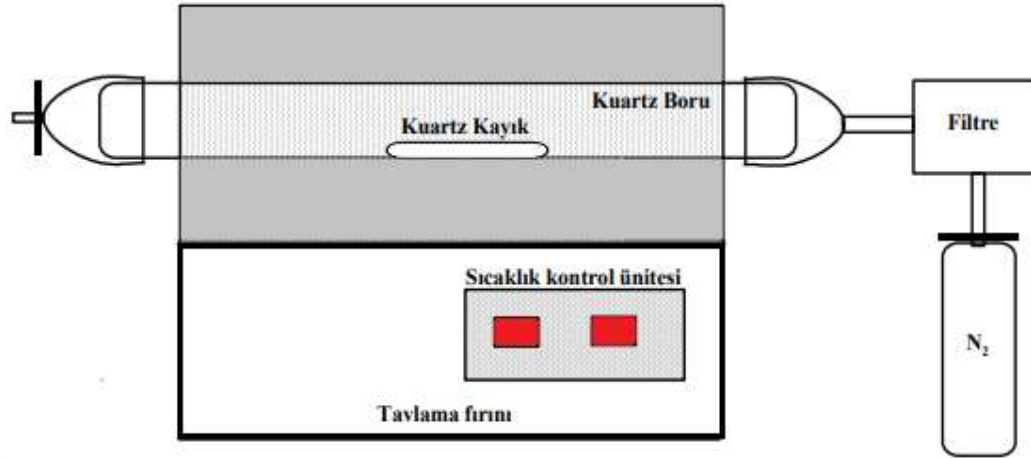
4.3. TERMAL BUHARLAŞTIRMA YÖNTEMİ

İlk olarak buharlaştırma işleminin yapıldığı vakum cihazında bulunan ve numunenin yerleşiminde kullanılan kuartz pota ile birlikte kristalin mat yüzeyine kaplanacak gümüş (Ag) metali, ultrasonik karıştırıcıda aseton ve metanol ile 10'ar dakika boyunca temizlik işlemine tabi tutuldu. Kaynama noktasının oldukça yüksek olan ve molibden adı verilen potaya termal buharlaştırmak için gümüş metali konuldu. Silisyum kristalinin mat tarafı molibdene yerleştirilen gümüş malzemesine bakacak şekilde kuartz potaya yerleştirildikten sonra Şekil 27'de görülen Nanovak cihazı vakuma alınıp 10⁻⁶ torr basınç seviyesine düşmesi beklendi. Termal buharlaştırma sistemi vakum altına alındıktan yaklaşık 40-45 dakika sonra basınç değeri 6.10⁻⁶ torr'a düşünce ısıtıcı potaya akım verip termal buharlaştırma işlemi başlatılmış oldu. Ve potada bulunan gümüş metalinin buharlaşması sağlanarak, kristalin altlık kısmına yani mat yüzeyine Ag metalinin biriktirilmesiyle kaplandı. Akabinde vakum cihazına hava verilerek yani tersi işlemler uygulanarak vakum hali ortadan kaldırılıp, kaplanan aygıtlar vakum cihazından çıkarıldı.



Şekil 27. Termal buharlaştırma ile ince film kaplama ve manyetik alanda DC saçırma ünitesi, NANOVAK NVTS-400

Kaplanan numunelerin daha güvenilir sonuç verebilmeleri için Şekil 28’de şematik görünümü verilen MSE Annealing Furnace (Tavlama Fırını) cihazında tavlama yapıldı. 585°C sıcaklığa ayarlanan sistem stabil duruma gelmesi beklendi. Numuneler kayık şeklindeki kuartz potanın içerisine konulduktan sonra kuartz çubuk yardımıyla fırının tam orta kısmına itilerek pota tavlama fırınında bırakılarak fırının kapağı kapatıldı ve 3 dakika boyunca kaplanan kristal numuneler tavlandı. Daha sonra kuartz çubuk yardımıyla numuneler fırının orta kısmından alınıp fırının ağzında soğuması için bir süre bekletilerek ani değişikliklerin önüne geçilmiştir. Soğuyan numuneler çıkarılarak omik kontak işlemleri başarılı bir şekilde tamamlanmıştır.



Şekil 28. Termal tavlama fırınının şematik görünümü (Ejderha 2012).

4.4. n-Sİ NUMUNE ARAYÜZEYİNE MALZEME KAPLANMASI

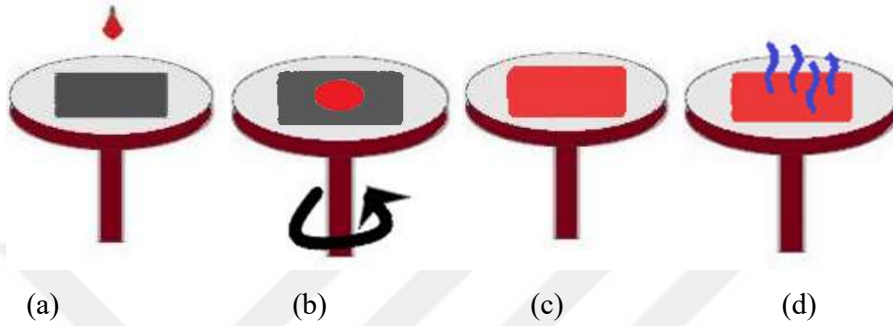
Arayüzey kaplanması için metil kırmızısı organik malzemesi kullanıldı. Metil kırmızısı kristal toz halinde olup kullanılabilmesi için kloroform sıvısında çözülmesi gerekmektedir. 0,02 gr metil kırmızı organik malzemesini 100 ml kloroform çözücüsüne ekledikten sonra yaklaşık 2 saat boyunca cam beherde manyetik karıştırıcı yardımıyla karışımı gerçekleştirilerek homojen hale getirildi.

Elde edilen çözeltiden mikro şırıngalar kullanılarak belirlenen miktar alınıp kaplama için kullanıldı. Referans (sade) numune hariç numunelerden birine damlatma, diğerine Spin Coating yöntemiyle arayüzeyleri, metil kırmızısı çözeltisi biriktirilerek büyütüldü. n-Si kristal numunenin bir tanesinin parlak yüzeyine toplamda 10 damla ve her damlasında 25µl organik çözeltiden damlatılarak kaplanması sağlandı. Her bir damlatma sonrasında belli bir süre beklenilip kuruması sağlandı. n-Si kristalinin diğer numunesinin parlak yüzeyi kimyasal çözücüler kullanılarak pürüzsüz hale getirilmişti. Bu numunenin omik tarafı Spin Coating cihazının vakum kısmına gelecek şekilde vakumlanması sağlandı ve pürüzsüz yüzeyine şırıngalar yardımıyla toplamda 11 damla ve her damlasında 16µl damlatılarak kaplanması sağlandı.

4.4.1. Spin Coating Tekniği ile Numune Arayüzeyine Malzeme Büyütülmesi

Döndürme tekniği ile ince film kaplanması temelde dört adımda gerçekleşir. Bu adımlar; (Gördün 2011)

- 1- Çözeltiden alınan bir miktar sıvının numune yüzeyine eklenmesi.
- 2- Hızlı bir şekilde döndürme işlemi.
- 3- Döndürme eyleminin sonlandırılması.
- 4- Buharlaştırma.



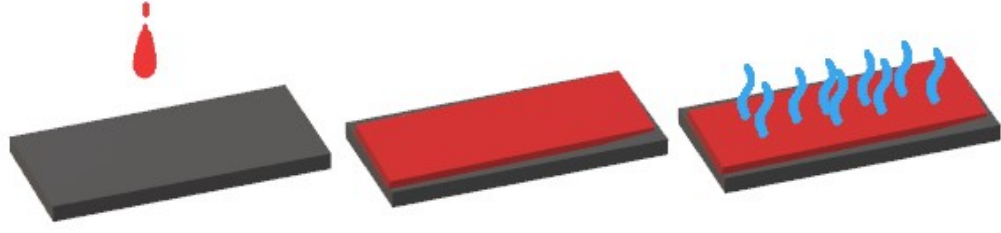
Şekil 29. Çözelti eklenmesi (a), döndürme işlemi (b), döndürmenin tamamlanması (c), buharlaştırma (d).

Spin Coating tekniği ile kaplama işleminin birinci adımında hazırlanmış çözelti, kristal yüzeyine eklendiğinde film kalınlığına göre yüksek miktardadır. İkinci adımda lamel üzerinde vakumlanan kristalin hızlı bir şekilde döndürülmesiyle bir miktar çözelti, dönme hızı ve çözelti viskozitesi gibi etkiler de göz önüne alındığında merkezden dışarıya doğru dağılarak ince film üzerindeki çözelti kalınlığı inceler. Üçüncü adımda belirlenen süre içinde sabit açısal dönüş gerçekleşir ve böylece yüzeyde homojen ince film birikimi sağlanır. Son adım olan buharlaştırma ile de, hazırlanan çözeltide kaplanması istenilen malzemenin buharlaşma seviyesinden daha düşük buharlaşma seviyesine sahip olan diğer malzemenin buharlaştırılmasıyla ortamdan uzaklaştırılarak istenilen malzemenin kaplanması sağlanmıştır.

Bu işlemler neticesinde kristal malzemenin pürüzsüz hale getirilen parlak yüzeyinde yalnızca istenilen madde ile kaplanmış bir ince film oluşturulmuştur.

4.4.2. Damlatma Yoluyla ile Numune Arayüzeyine Malzeme Büyütülmesi

0,02gr metil kırmızısı organik malzemesi ve 100ml kloroform sıvısından elde edilen karışımından mikro şırıngalar vasıtasıyla n-Si kristal numunenin parlak yüzeyine 10 damla ve her damlası 25µl olacak şekilde damlatıldı ve buharlaştırılarak istenilen malzeme numunenin parlak yüzeyinde kaplanması sağlandı.



Şekil 30. Damlatma yöntemi temsili resmi

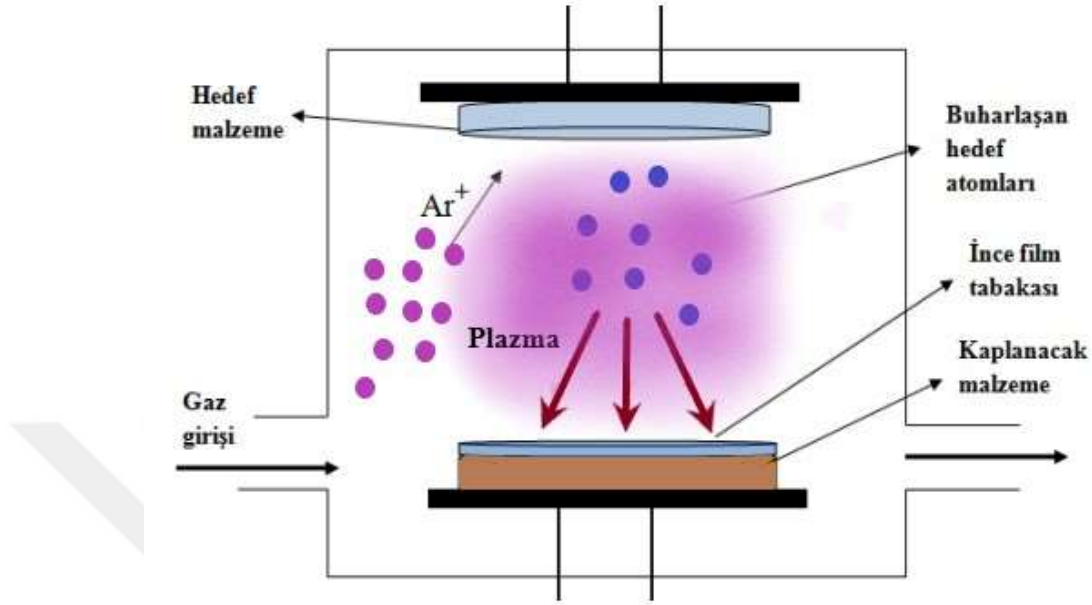
4.5. SPUTTERİN (MANYETİK ALANDA DC SAÇTIRMA) YÖNTEMİ

Kontak oluşturma işlemlerinde, yarıiletken malzemenin yüzeyine metal kaplamak için birçok yöntem mevcuttur. Bunlardan birisi de yaygın olarak kullanılan saçtırma yöntemidir. Schottky kontak veya başka işlemler için tasarlanan maskeler kullanılarak malzeme yüzeyine küçük kontaklar elde etmek için de saçtırma yöntemi kullanılır. Saçtırma tekniği, ağır pozitif iyonların bombardımanı (yüzeye nüfuz etmesi) neticesinde ekseriyetle katot olarak işlev gören bir elektrotta bulunan atomların bir kısmının koparılıp bir altlık yüzey üzerine yapışıp birikmesiyle ince bir tabaka oluşması esasına dayanır.

Saçtırma tekniği; manyetik alanda saçtırma, DC (Doğru akım) ve RF (Radyo frekansı) olmak üzere üç farklı yolla yapılabilir. Kullandığımız yöntem olan manyetik alanda (MF) saçtırma yöntemi, hem radyo frekansı ile hem de doğru akımla yapılabilir.

Manyetik alanda DC saçtırma metodu; hedef metalin alt kısmına Magnetron yerleştirilerek elektrik alan aracılığıyla bu metale yönlendirilen iyonların MF aracılığıyla sarmal yay (solenoidal) şeklindeki bir hareketle metal yüzeyine çarpması ve bu yüzeyden söküp kopardığı atomların bir kısmının taban malzeme yüzeyi üzerine büyümesi olayıdır.

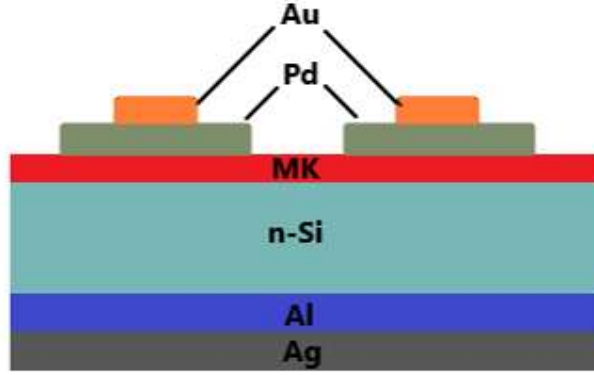
İyi derecede mekanik adhezyona sahip metal filmler çok yüksek vakum ortamına ihtiyaç duyulmadan rahatlıkla oluşturduğundan dolayı, metal yarıiletken kontak fabrikasyonu için Sputterin tekniği çok yaygın olarak kullanılmaktadır (Ejderha 2012).



Şekil 31. Manyetik alanda DC saçırma (Sputtering) sisteminin şematik görünümü

Aygıtların fabrikasyon çalışması için yaptığımız 5mm ve 1mm çapındaki deliklerden oluşan maskeler kullanıldı. Bakır plakların boş gözüne maskeler yerleştirildikten sonra aygıtların omik kontak yüzeyleri üste gelecek biçimde 5mm delikli maskeler üzerine, delikler tam çıkacak şekilde konuldu. Daha sonra numuneler ortada kalacak biçimde maske boyutunda cam malzeme konularak kaplama ünitesi kapatıldı ve saçırma tekniği uygulanmak için cihaz vakuma alınmaya başlandı.

Sputter ünitesinin içindeki basınç değerleri (10^{-3} - 10^{-2} torr), turbo moleküler pompa cihazı aracılığıyla ayarlandı. Saçırma gazı olarak %99,999 saflıktaki Argon (Ar) gazı kullanılarak plazma oluşumu sağlandı. Hedeften saçtırılan Paladyum (Pd) metali, maske deliklerine denk gelen yarıiletken yüzeyinde daire şeklinde birikerek Schottky kontaktlar elde edilmiş oldu.



Şekil 32. Metil kırmızısı organik arayüzeyli güneş pili aygıtının kesit şematik görünümü

Saçtırma yöntemi, hedef (kaplanmak istenen) malzemeye 500-700 aralığında negatif bir potansiyel gerilim uygulanarak plazmada pozitif iyonlar oluşturulur. Oluşturulan bu iyonlar, hedefe hızlı bir şekilde çarparak hedef atomlarını, momentum değişim mekanizması sayesinde yerlerinden çıkarırlar. Bu çalışma yöntemi ile hedef malzemesine ait atom parçacıklarının malzemeden uzaklaştırılması sputter (saçtırma) olarak ifade edilir.

Saçtırılan iyonların bir kısmı metalin alt yüzeyine gider ve yapışır. Böylece bu yüzeyde birikme sonucu bir film oluşur. Ayrıca pozitif yüklü iyonların sputter sırasında hedef yüzeyine çarpması sonucu başka ara etkileşimlerin ortaya çıkması da söz konusu olabilir.

Saçtırma tekniği kullanılarak birçok malzeme yüzeyi başarılı bir biçimde büyütülmüştür. Bu teknik uygulanarak oluşturulan Schottky kontakların fazla kalın olmamasına özen gösterildi. Schottky kontaklara ait kalınlık değerlerinin, kalınlık monitörü yardımıyla 200 nm'den düşük çıkmasına özen gösterildi. Schottky kontak elde oluşumu sırasında basınç değerleri sabit tutuldu ve sputter prosedürünün başlaması için güç değeri belirli bir seviyede tutuldu.

Son zamanlarda saçtırma teknolojisindeki gelişmelerin büyük çoğunluğu manyetik alanda olmuştur. Bunu sebebi, manyetik alanda saçtırma tekniği ile yapılan kaplamaların; optik, optik ve manyetik diskler, mikro elektronik, türbin bıçakları, solar kontrol endüstrisi vb. geniş alanlarda kullanılıyor olmasıdır (Yıldırım 2009).

4.5.1. Sputterin Tekniği Kullanılarak Schottky Kontak Oluşturulması

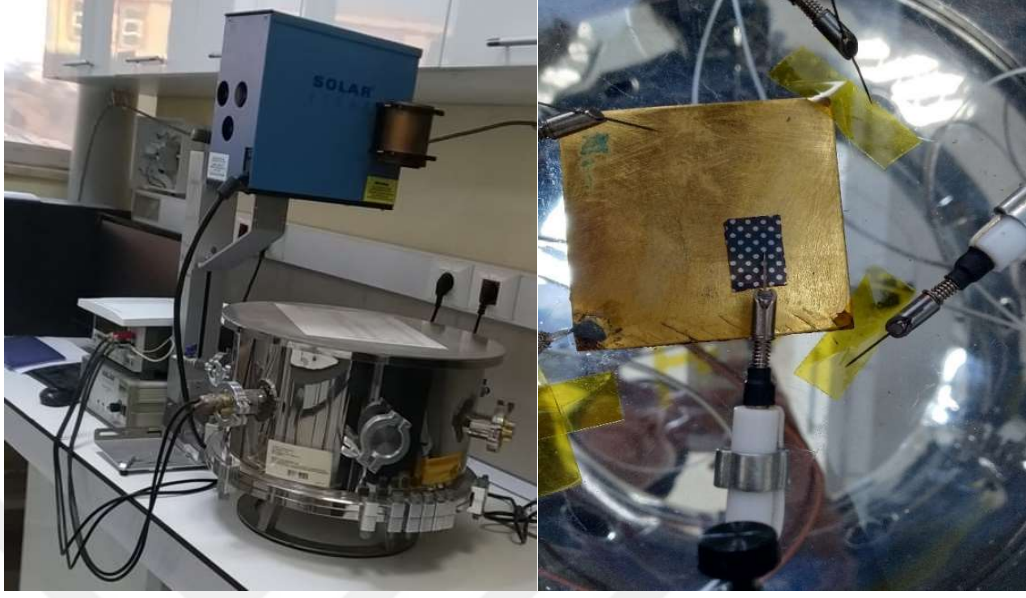
Metil kırmızısı organik malzemesini, damlatma ve Spin Coating yöntemleriyle arayüzeylerine kapladıktan sonra kaplanan bu numuneler Şekil 27’de görölen cihazda saçırma yöntemiyle Schottky kontak oluşturması sağlandı.

Öncelikle kaplanmak istenen metalin kalınlığını ölçmek adına bir deneme çalışması yapıldı. Bu çalışmada bakır lameller üzerine cam malzeme konularak Sputterin tekniği uygulanarak akım ve voltaj miktarı tespit edilip bu metallerin istenilen kalınlıkta kaplanması sağlandı.

Schottky kontak için 5mm ve 1mm çapında iki farklı maske tasarlayıp yaptıktan sonra bu maskelerden 5mm çapındaki maske, paladyum metali ile kaplanması için ve 1mm çapındaki maskeyi de altın metali ile kaplanması için gözenekli bakır lamel üzerine konuldu. n-Si kristal numunelerin arayüzeyleri maskelerin üzerine gelecek şekilde ve bu maskelerde alt yan tarafında bulunan Magnetron cihazına bakacak şekilde vakum cihazına yerleştirilip cihaz vakumlandı ve Sputterin tekniği uygulanarak farklı çaplara sahip Schottky güneş pilleri elde edilmiş oldu.

4.6. IşIK şİDDETİNE BAğLI ELEKTRİKSEL ÖLÇÜMLER

Bu çalışmada oda sıcaklığındaki karanlık ortamda ve güneş simülatörü altında akım-gerilim (I-V) ölçüm değerleri alınıp hesapları yapılmıştır. Bu çalışmada elde ettiğimiz Schottky aygıtların, farklı aydınlatma ($30-60-100 \text{ mW/cm}^2$) şiddetleri altında ve karanlık ortamda güneş pili ve diyot karakteristiklerini incelemek için akım-gerilim (I-V) ölçümleri alınmıştır. Oda sıcaklığında yapılan bu ölçümler için güç kaynağı olarak Keithley 2400 cihazı ve güneş simülatörü (yapay güneş ışığı) kullanıldı. Tasarlanan numunelerin Schottky (nokta) kontaklarına (-2V) ile (+2V) aralığında gerilim uygulanarak akım değerleri ölçüldü. Keithley güç kaynağı kullanılarak yapılan ölçümler Labview yazılım programıyla aracılığıyla kontrol edilmiştir.



Şekil 33. Nokta kontak ölçümlerin alındığı akım-gerilim (I-V) solar simülatörü sistemi

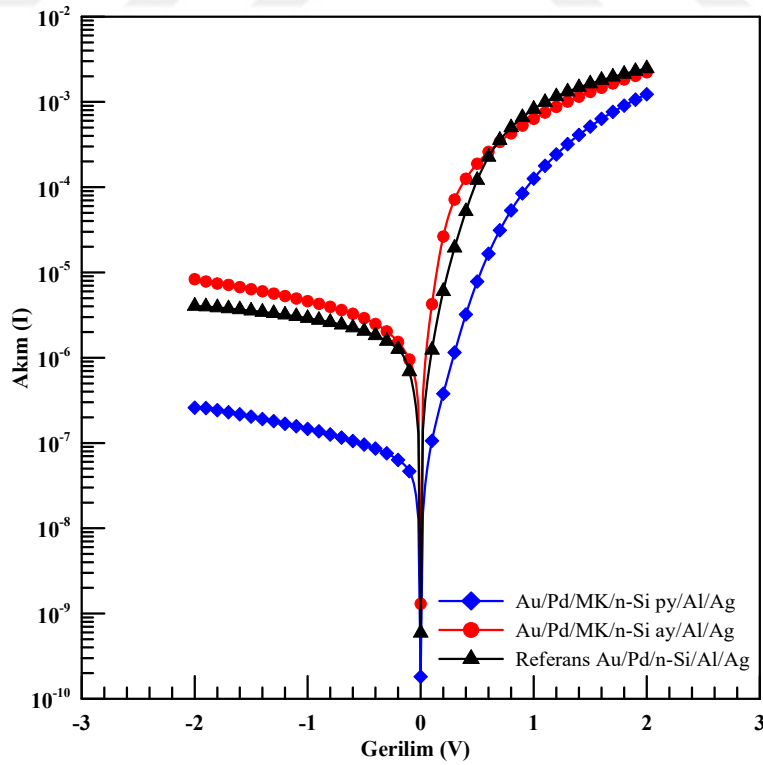
5. BÖLÜM

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde fabrikasyonu yapılan Schottky aygıtların ölçümleri oda sıcaklığında karanlık ortamda ve farklı ışık şiddetleri altında ölçümleri alınıp diyot ve güneş pili karakterizasyonları yapılmıştır.

5.1. SCHOTTKY DİYOT KARAKTERİSTİK DEĞERLERİ

Şekil 34'te referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag ve Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky diyot numunelerin oda sıcaklığında (298 K) ve karanlık ortamda ölçümü yapılmış ve yarı logaritmik akım-gerilim (I-V) diyagramı gösterilmiştir. Fabrikasyonları yapılan bu üç numuneye ait grafik incelendiğinde klasik Schottky diyot grafiği gibi gerilim değerinin sıfır olduğu noktada yön değiştirdiği görülmektedir.



Şekil 34. Oda sıcaklığında karanlıkta ölçümü yapılan üç numunenin I-V karakteristik grafiği

Tablo 2’de referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag ve Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky diyot numunelerin engel yüksekliği, idealite faktörü ve akım yoğunluğuna ait değerler hesaplanmıştır. Oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülen üç numuneden referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin engel yüksekliği, idealite faktörü ve akım yoğunluğu değerleri sırasıyla (0,70), (1,70), ($1,16 \times 10^{-7}$); Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesi için bu değerler (0,68), (1,37) ($1,80 \times 10^{-7}$); Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesi için ise bu değerler sırasıyla (0,76), (1,82), ($9,47 \times 10^{-9}$) olarak bulunmuştur.

İdealite faktörü (n), ideal diyotlarda 1 değerine eşittir (Sze et al. 2021). İdealite faktörü 1 değerine yakın olan diyotlar daha ideal olmaktadır. n değerinin 1’den büyük olması diyotun ideallikten saptığını gösterir. Engel (bariyer) yüksekliğinin inhomojenliği, bariyer yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinde farklılık göstermesine neden olmaktadır (Tekle 2012).

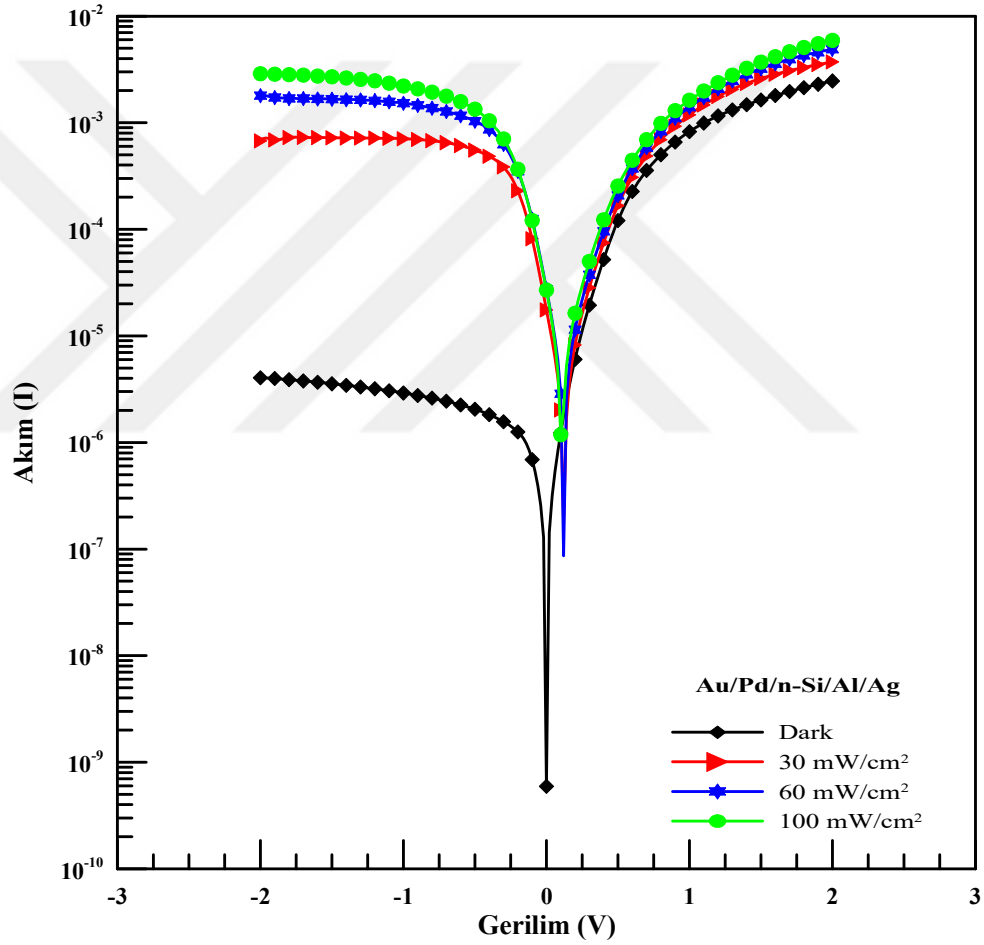
Tablo 2. Üç numuneye ait engel yüksekliği, idealite faktörü ve akım yoğunluğu

Dark	Engel Yüksekliği	İdealite Faktörü	Akım Yoğunluğu
Referans	0,70	1,70	$1,16 \times 10^{-7}$
Au/Pd/n-Si/Al/Ag			
Au/Pd/MK/n-Si	0,68	1,37	$1,80 \times 10^{-7}$
py/Al/Ag			
Au/Pd/MK/n-Si	0,76	1,82	$9,47 \times 10^{-9}$
ay/Al/Ag			

Yapılan ölçümler sonucunda hesaplanan değerlere bakıldığında, metil kırmızısı (MK) organik arayüzey malzemesi ile kaplanan diyot yapıların n ve Φ_b değerleri, referans diyota ait n ve Φ_b değerlerinden farklı çıkmaktadır. Tablo 2’de görüldüğü üzere engel yüksekliği değerinin artmasıyla idealite faktörü değerinin arttığı, engel yüksekliği değerinin azalmasıyla da idealite faktörü değerinin düştüğü ve 1’e yaklaşarak daha ideal bir diyot olma özelliği kazandığı söylenilebilir. Referans diyot ve farklı yöntemlerle organik arayüzey büyütülen diyot malzemelerine ait n ve Φ_b değerlerinin farklı çıkmasında en önemli etken bariyer yüksekliğinin inhomojenliğidir (Canlı 2018).

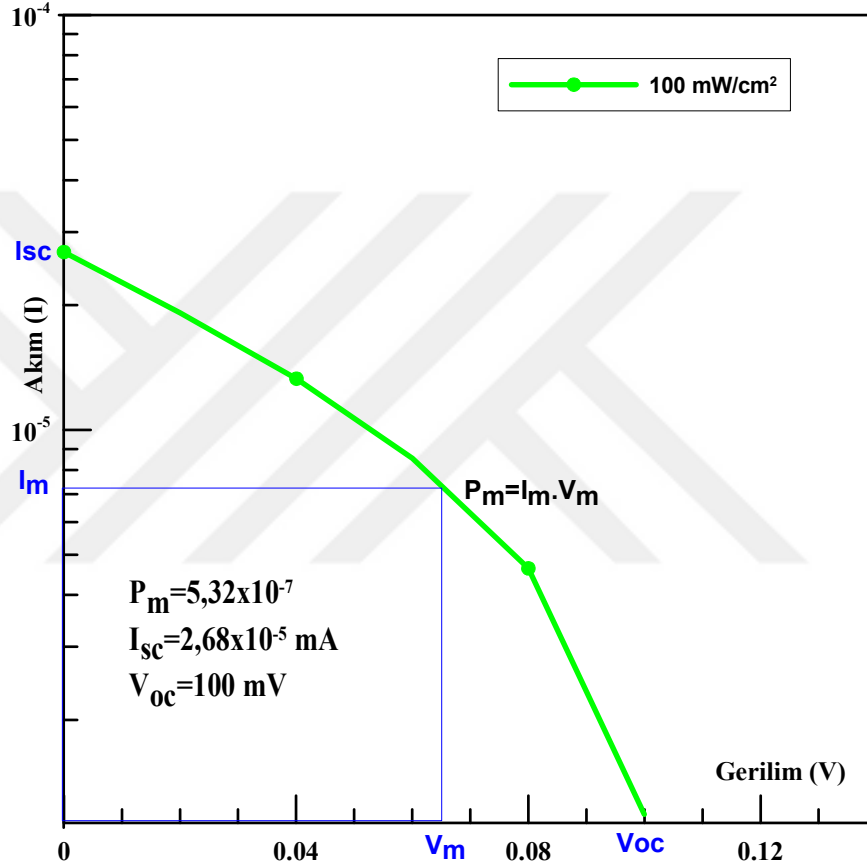
5.2. FOTOVOLTAİK ÖLÇÜMLER

Fotovoltaik aygıtlar, ışığa duyarlı olup yüzeylerine gelen ışık şiddeti arttırıldıkça ters beslem alanındaki akım değerlerini arttıran bir mekanizmaya sahip yapılardır (Canlı 2018). Şekil 35’de referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag malzemenin karanlık ortamda ve 30, 60, 100mW/cm² ışık şiddetleri altında ölçümü yapılmış ve yarı logaritmik I-V diyagramı verilmiştir. Işık şiddetinin arttırılmasıyla birlikte ters (negatif) beslem alanındaki akım değeri artmaktadır.



Şekil 35. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm² değerlerindeki ölçümü

100 mW/cm² ışık şiddeti altında referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag Schottky diyota ait $I_{sc}=2,68 \times 10^{-5}$, $V_{oc}=100$ mV, $FF=17.71$, ve $\eta=3 \times 10^{-3}$ parametrelerin hesaplanması yapılmış ve maksimum değeriyle birlikte Şekil 36'da gösterilmiştir. 30, 60 ve 100 mW/cm² ışık şiddetlerinde elde edilen güç dönüşüm verimi (η) sırasıyla 6×10^{-3} , 5×10^{-3} ve 3×10^{-3} olarak bulunmuş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te özetlenmiştir.



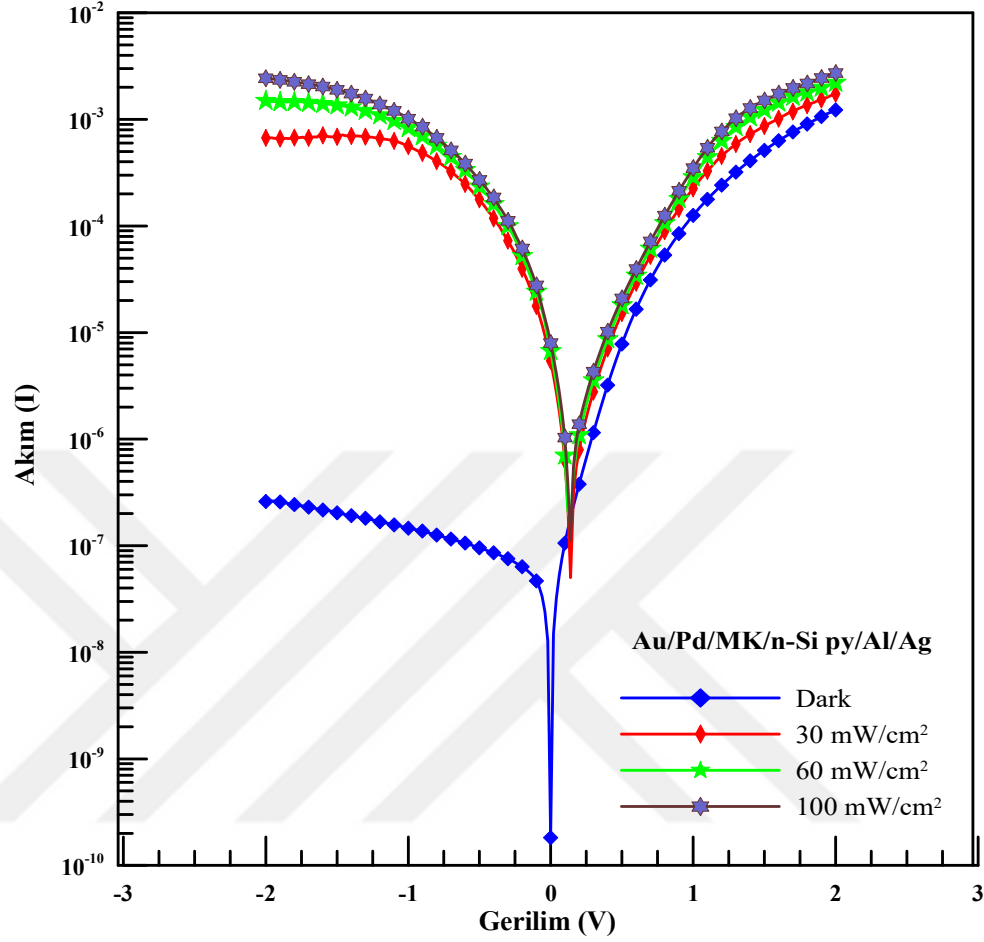
Şekil 36. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (P_m) değeri görünümü

Tablo 3'te referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag malzemesinin ışık şiddeti altında (30-100 mW/cm²) I-V ölçümleri yapılarak elde edilen kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum akım ve gerilim (I_m ve V_m), fil faktörü (FF), güneş enerji verimi ya da güç dönüşüm verimi (η) değerleri gösterilmiştir. Tablo 3'teki Schottky diyota ait temel parametrelere bakıldığında, artan ışık şiddetlerine göre diyot aygıtının ışığa karşı olan duyarlılığı incelenmiştir. Sonuç olarak ışık şiddeti arttırıldıkça verim değerinin düştüğü yani aygıtın ışığa karşı duyarlılığının azaldığı görülmektedir.

Tablo 3. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin güneş pili parametrelerin karakteristik değerleri

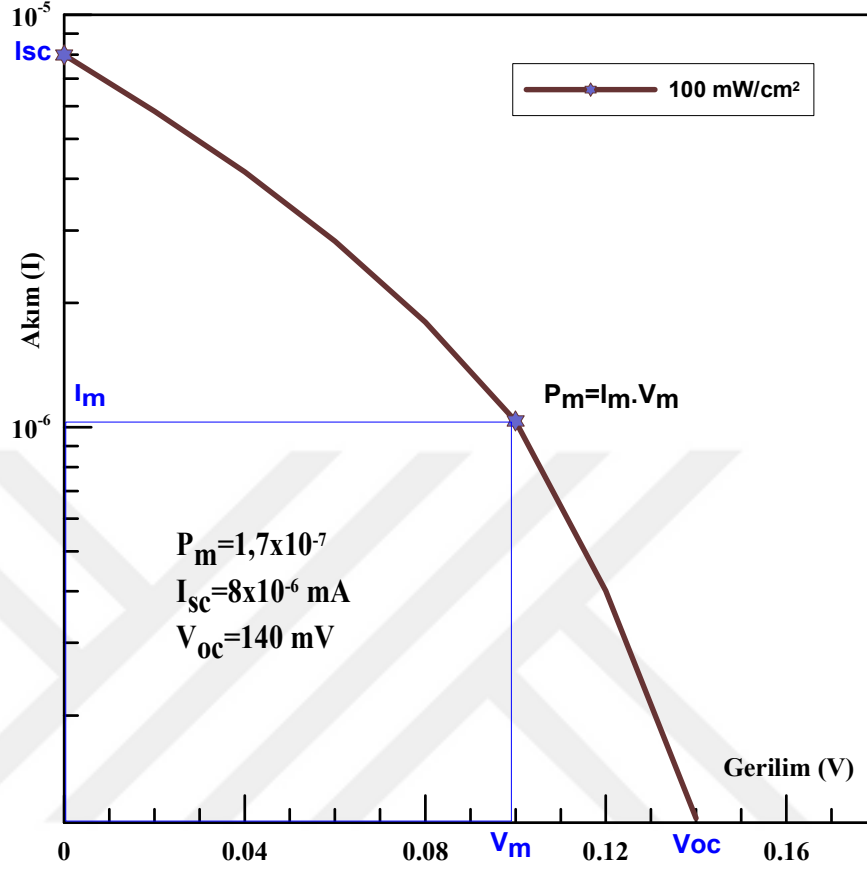
Işık Şiddeti (mW/cm²)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	I_m (mA)	V_m (mV)	Güneş Enerji Verimi (η)	Doluluk Oranı (FF)
30	$1,76 \times 10^{-5}$	120	$6,2 \times 10^{-6}$	60	6×10^{-3}	17,71
60	$2,75 \times 10^{-5}$	120	$9,5 \times 10^{-6}$	60	5×10^{-3}	17,25
100	$2,68 \times 10^{-5}$	100	$13,3 \times 10^{-6}$	40	3×10^{-3}	19,85

Şekil 37’de Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag malzemenin karanlık ortamda ve 30, 60, 100mW/cm² ışık şiddetleri altında ölçümü yapılmış ve yarı logaritmik I-V diyagramı verilmiştir. Işık şiddetinin arttırılmasıyla birlikte negatif beslem alanındaki akım değeri artmaktadır. Bu durumdan, damlatma tekniği kullanarak arayüzeyi organik malzeme ile kaplanmış ve fabrikasyonu yapılmış Schottky diyot yapısının fotodiyot karakter sergilediği anlaşılmaktadır.



Şekil 37. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm² değerlerindeki ölçümü

100 mW/cm² ışık şiddeti altında Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky güneş piline ait $I_{sc}=8 \times 10^{-6}$, $V_{oc}=140$ mV, FF=15,18 ve $\eta=9 \times 10^{-4}$ temel parametrelerin hesaplanması yapılmış ve maksimum değeriyle birlikte Şekil 38’de gösterilmiştir. 30, 60 ve 100 mW/cm² ışık şiddetlerinde elde edilen güç dönüşüm verimi (η) sırasıyla 2×10^{-3} , 1×10^{-3} ve 9×10^{-4} olarak bulunmuş ve elde edilen sonuçlar Tablo 4’te bir arada verilmiştir. Bu sonuçlardan ışık şiddeti arttırıldıkça verim değerinin düştüğü yani aygıtın ışığa karşı duyarlılığının azaldığı anlaşılmaktadır.



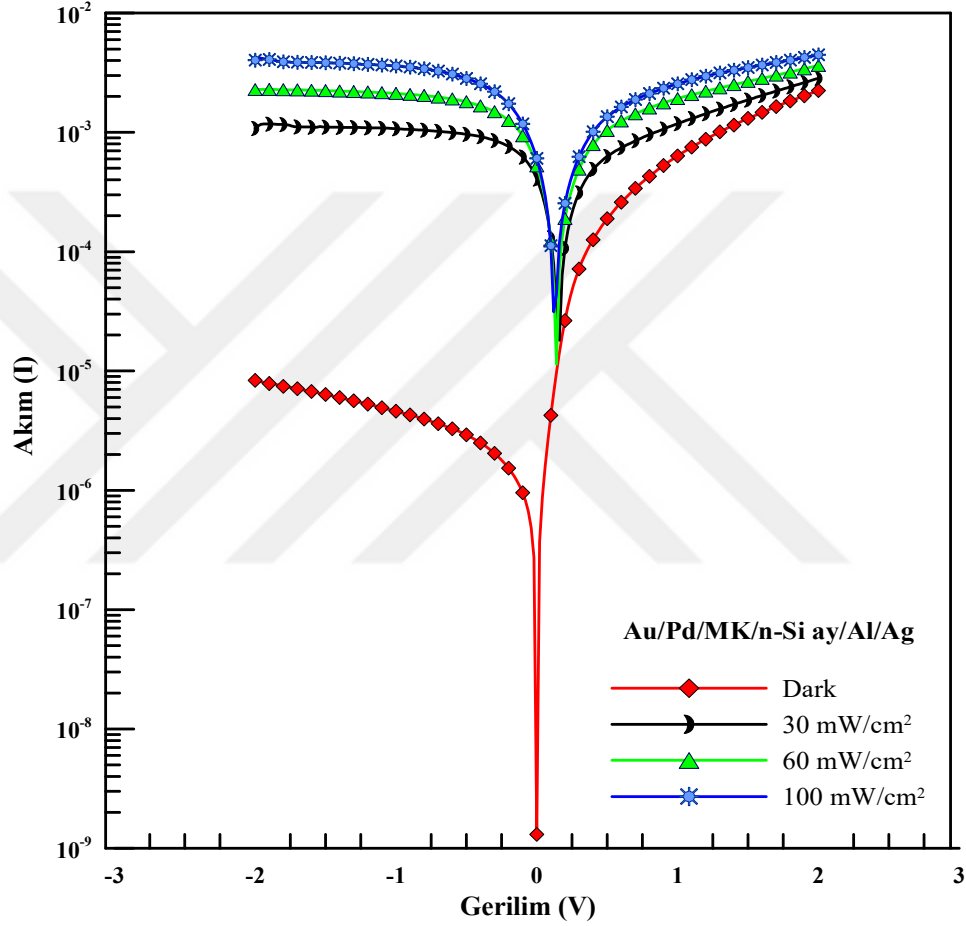
Şekil 38. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (P_m) değeri görünümü

Tablo 4'te Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky diyot yapısının ışık şiddeti altında (30-100 mW/ cm²) I-V ölçümleri yapılarak elde edilen I_{sc}, V_{oc}, I_m, V_m, FF ve η güneş pili temel parametreleri gösterilmiştir

Tablo 4. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesinin temel güneş pili parametre değerleri

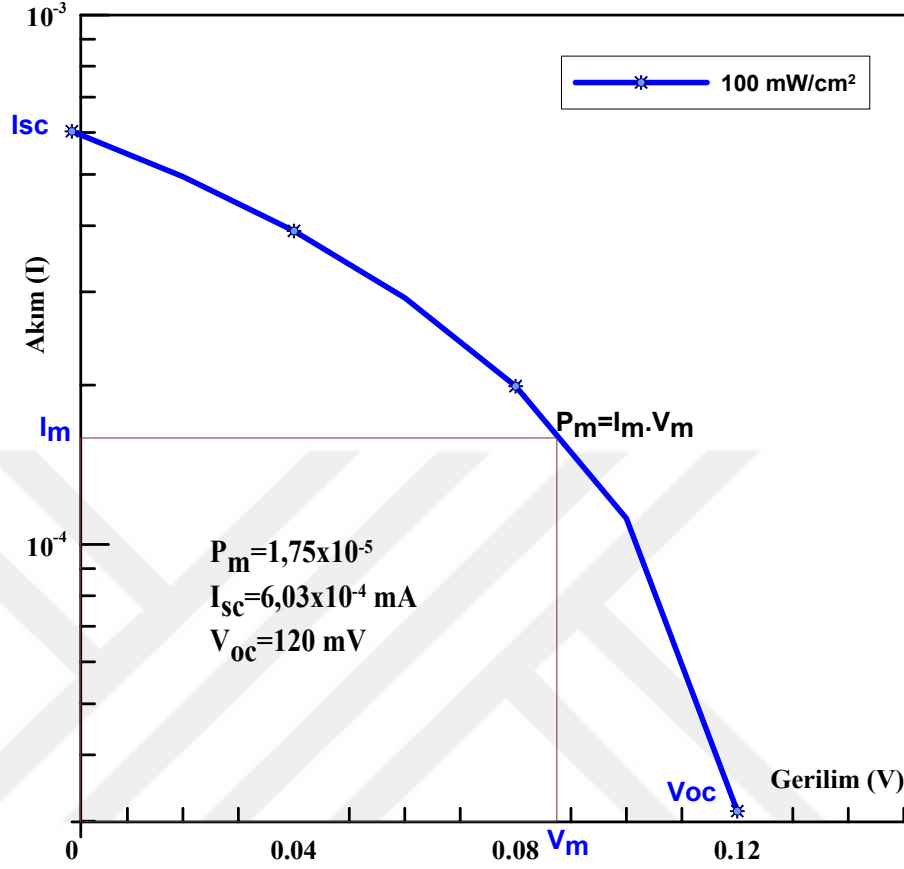
Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _m (mA)	V _m (mV)	Güneş Enerji Verimi (η)	Doluluk Oranı (FF)
30	5,4x 10 ⁻⁶	140	1,8 x 10 ⁻⁶	60	2 x 10 ⁻³	14,55
60	6,7 x 10 ⁻⁶	140	3,4 x 10 ⁻⁶	40	1 x 10 ⁻³	14,39
100	8,0 x 10 ⁻⁶	140	2,8 x 10 ⁻⁶	60	9 x 10 ⁻⁴	15,18

Şekil 39’da Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag malzemenin karanlık ortamda ve 30, 60, 100mW/cm² ışık şiddetleri altında ölçümü yapılmış ve yarı logaritmik I-V diyagramı verilmiştir. Işık şiddetinin artırılmasıyla birlikte negatif beslem alanındaki akım değeri artmaktadır. Bu durumdan, arayüzeyine organik malzeme büyütülmüş ve fabrikasyonu tamamlanmış Schottky diyet yapısının fotodiyot karakter sergilediği anlaşılmaktadır.



Şekil 39. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin karanlık ve 30-100 mW/cm² değerlerindeki ölçümü

Tablo 5’te Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky diyet yapısının ışık şiddeti altında (30-100 mW/ cm²) I-V ölçümleri yapılarak elde edilen I_{sc} , V_{oc} , I_m , V_m , FF ve η güneş piline ait temel parametre değerleri gösterilmiştir. 100 mW/cm² ışık şiddeti altında Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş piline ait $I_{sc}=6,03 \times 10^{-4}$, $V_{oc}=120$ mV, FF=24,19 ve $\eta=9 \times 10^{-2}$ temel parametrelerin hesaplanması yapılmış olup maksimum güç değeriyle birlikte Şekil 40’ta gösterilmiştir.



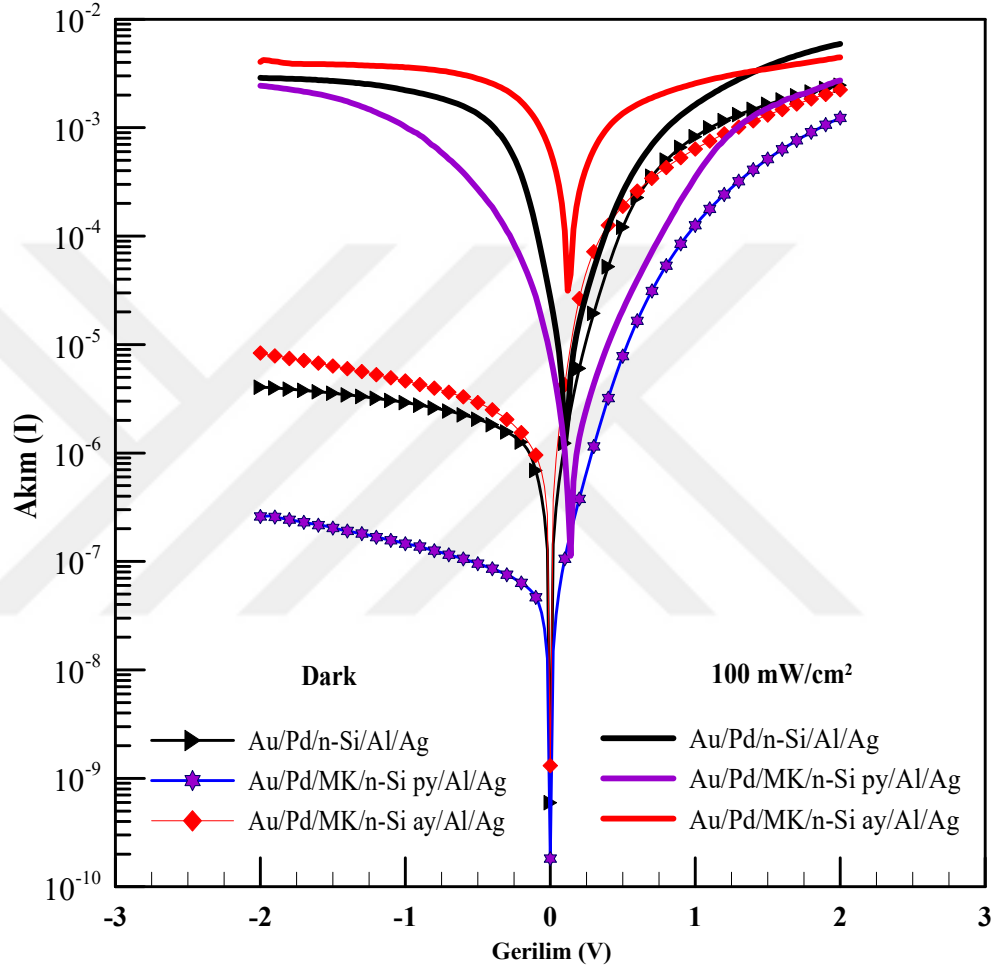
Şekil 40. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki maksimum güç (Pm) değeri görünümü

Tablo 5 incelendiğinde 30, 60 ve 100 mW/cm² ışık şiddetlerinde elde edilen güç dönüşüm verimi (η) sırasıyla 25×10^{-2} , 14×10^{-2} ve 9×10^{-2} olarak bulunmuştur. Bu sonuçlardan ışık şiddeti arttırıldıkça verim değerinin düştüğü yani aygıtın ışığa karşı duyarlılığının azaldığı anlaşılmaktadır.

Tablo 5. Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesinin güneş pili parametrelerin karakteristik değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _m (mA)	V _m (mV)	Güneş Enerji Verimi (η)	Doluluk Oranı (FF)
30	$4,07 \times 10^{-4}$	160	$1,85 \times 10^{-4}$	80	25×10^{-2}	22,73
60	$5,24 \times 10^{-4}$	140	$2,74 \times 10^{-4}$	60	14×10^{-2}	22,49
100	$6,03 \times 10^{-4}$	120	$2,92 \times 10^{-4}$	60	9×10^{-2}	24,19

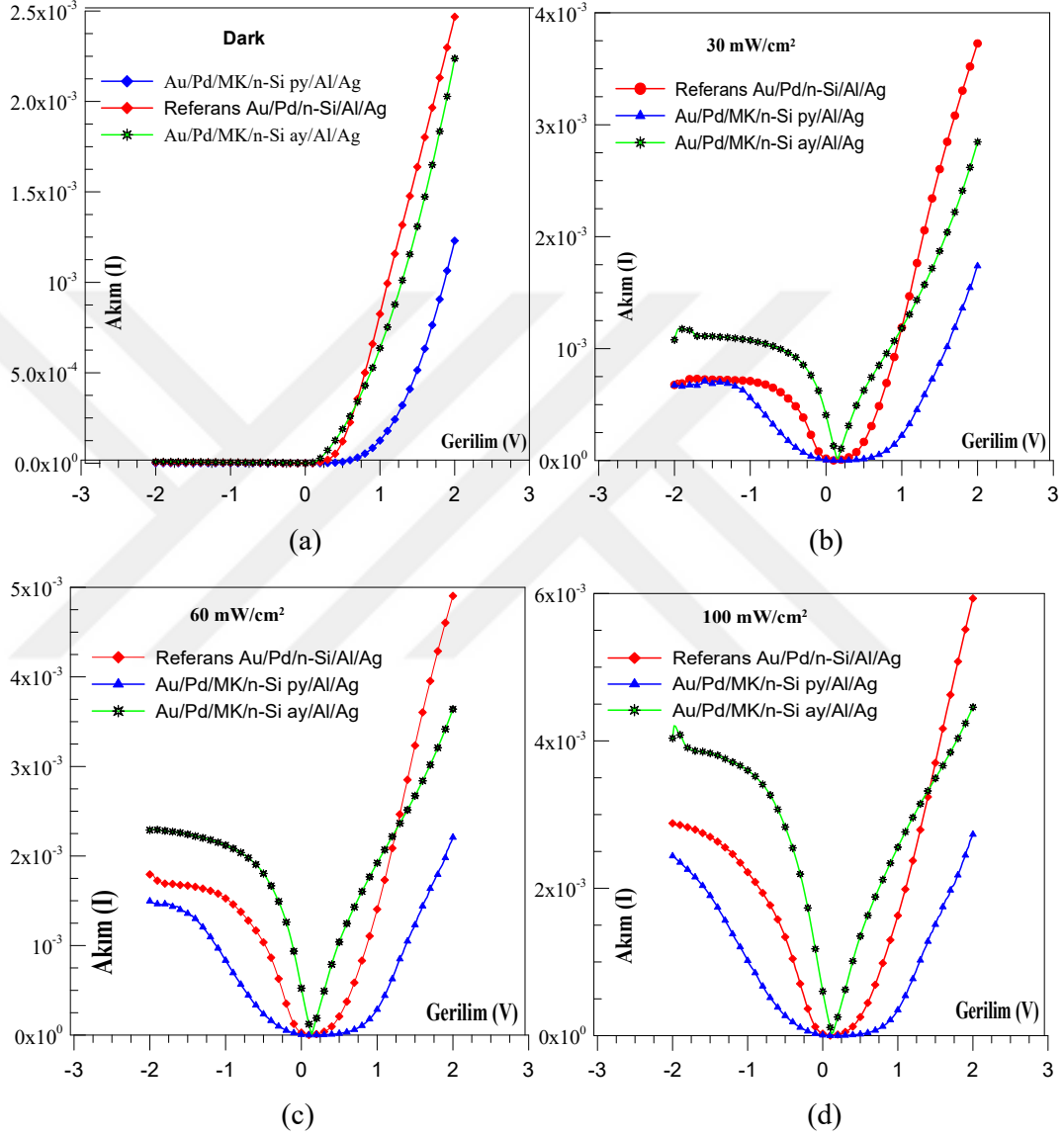
Şekil 41’de arayüzeyleri farklı yöntemler ile metil kırmızısı organik malzemesi ile kaplanan Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag ve Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky diyot yapıları ile referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag Schottky diyot yapıları karanlıkta ve 100 mW/ cm² ışık şiddeti altında kıyaslanması yapılmıştır.



Şekil 41. Üç güneş pili numunesinin karanlık ortamda ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altındaki I-V değerlerini karşılaştırılması görünümü

Tablo 6, Tablo 7 ve grafiklerden elde edilen sonuçlar incelendiğinde organik arayüzeyli Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag diyot malzemesinin referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag diyot malzemesine göre güneş enerji verimliliğinde (η) ve doluluk oranında (FF) düşüş olduğu görülmektedir. Diğer organik arayüzeyli Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag diyot malzemesinin referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag diyot malzemesine göre güneş enerji verimliliğinde (η) ve doluluk oranında (FF) bir artış olduğu gözlenmektedir. Buda arayüzey üzerinde büyütülen organik malzemenin, güneş pili yani fotodiyot aygıtlar

üzerinde etki ettiğini ve güneş pili çalışmalarında kullanılması için olumlu sonuçlar verdiği göstermiştir. Ancak bu çalışmada olduğu gibi arayüzey kaplama metotlarındaki farklılık sonuçlara etki ettiği anlaşılmaktadır.



Şekil 42. Karanlık ortamda (a) ve 30-60-100 mW/cm² ışık şiddeti altında (b), (c), (d) ölçümü alınan Schottky aygıtların karşılaştırmaların lineer I-V grafik gösterimleri

Fotodiyotların I-V karakteristik şekilleri incelendiğinde normal bir diyot gibidirler. Karanlıkta fotodiyot aygıttan akan akım değeri, termal yoldan azınlık taşıyıcıları ile elde edilmektedir. Ve karanlık akımı olarak isimlendirilir. Yarı-logaritmik I-V grafiği verilen Şekil 41 ve lineer I-V grafiği verilen Şekil 42 (a), karanlık ortamda üç malzeme normal diyot özelliği sergilerken 100 mW/cm² ışık altında fotodiyot özelliği sergilemektedir. Işık

altında fotodiyot aygıtın gerilimi pozitif tarafta kesmesi aygıtın fotovoltaiik özellik taşıdığı anlamına gelmektedir. Şekil 42’de gösterildiği gibi ışık şiddeti arttıkça ters beslem alanındaki akım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu da diyotun güneş pili özelliği sergilediği anlamına gelmektedir.

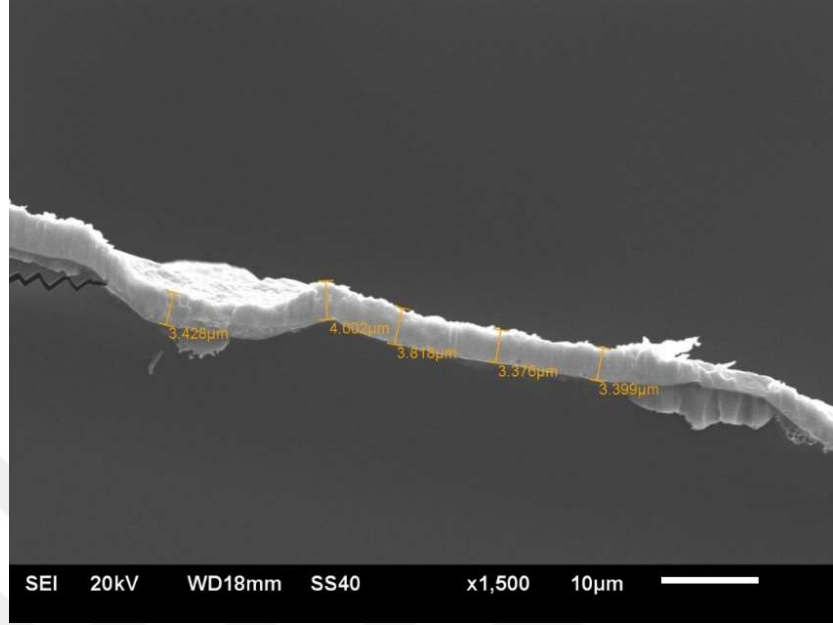
5.3. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) GÖRÜNTÜLERİ

Şekil 43 (a) ve (b)’de Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky güneş piline ait SEM görüntüleri verilmiştir. Parlak arayüzeyi damlatma yoluyla metil kırmızısı organik malzemesi kaplanan ve fabrikasyonu yapılan güneş pili aygıtının bir kenarı kesilmesi suretiyle iki kenarın kesit görüntüleri SEM tarafından görüntülendi.

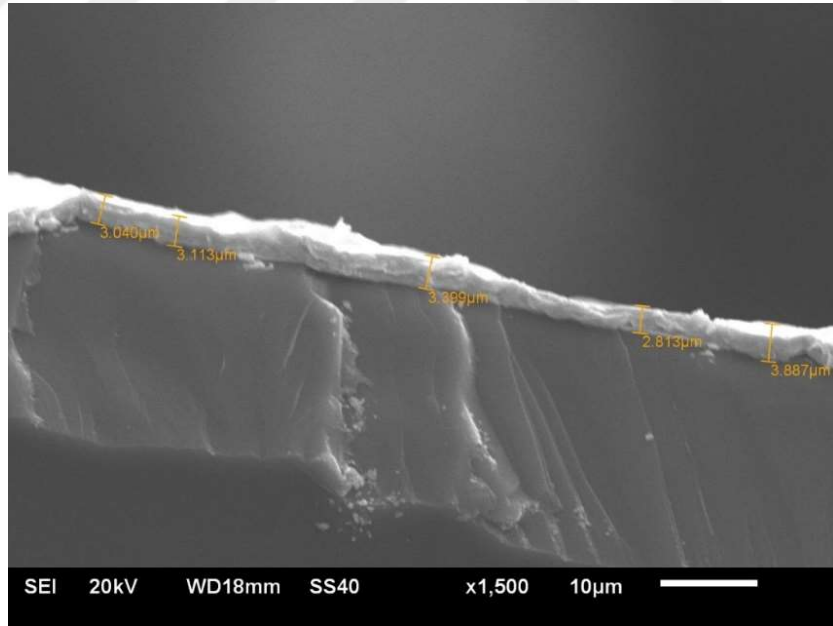
Şekil 43 (a)’da kesilmeyen kenardan arayüzey kesit görüntüsü görülmektedir. Burada organik malzeme homojene yakın ve 3.43-4.002 μm aralığındaki kalınlıklarda kaplandığı görülmektedir. Şekil 43 (b)’de ise kenarı kesilen numunenin kesit görüntüsü verilmiştir. Buradan Si malzemesinin parlak yüzeyindeki tahriş ve arayüzeyine kaplanan organik malzemenin homojene yakın ve 2.81-3.89 μm arası kalınlıklarda kaplandığı görülmektedir.

Şekil 44 (a) ve (b)’de Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş piline ait SEM görüntüleri verilmiştir. Aşındırılmış arayüzeyi Spin Coating yoluyla metil kırmızısı organik malzemesi kaplanan ve fabrikasyonu yapılan güneş pili aygıtının bir kenarı kesilmesi suretiyle iki kenarın kesit görüntüsü SEM tarafından görüntülendi.

Şekil 44 (a)’da kenarın arayüzey görüntüsü görülmektedir. Burada organik malzeme homojene yakın ve 2.54-3.34 μm kalınlığı aralığında kaplandığı görülmektedir. Şekil 44 (b)’de ise kenarın kesit görüntüsü verilmiştir. Buradan arayüzeyine kaplanan organik malzemenin homojene yakın ve 1.52-2.07 μm arası kalınlıklarda kaplandığı görülmektedir.

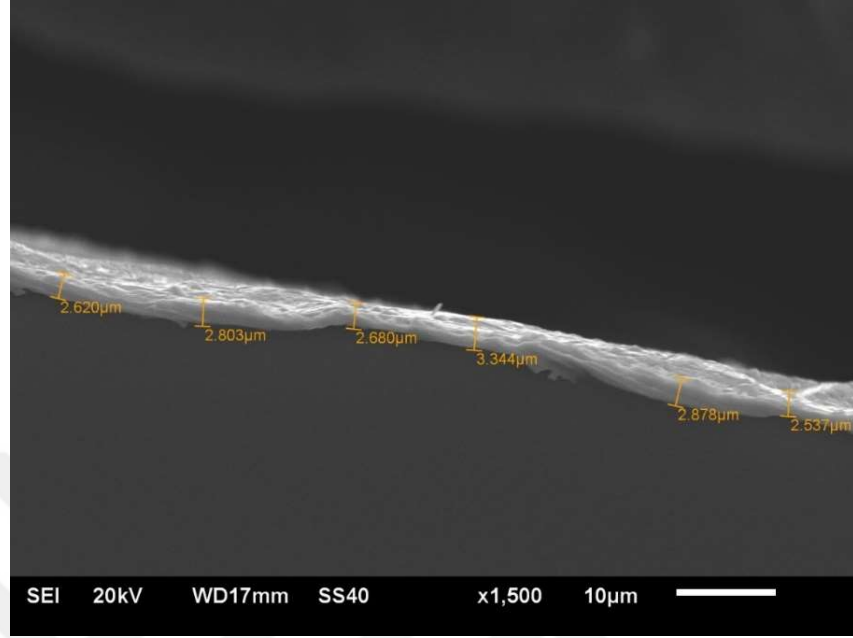


(a)

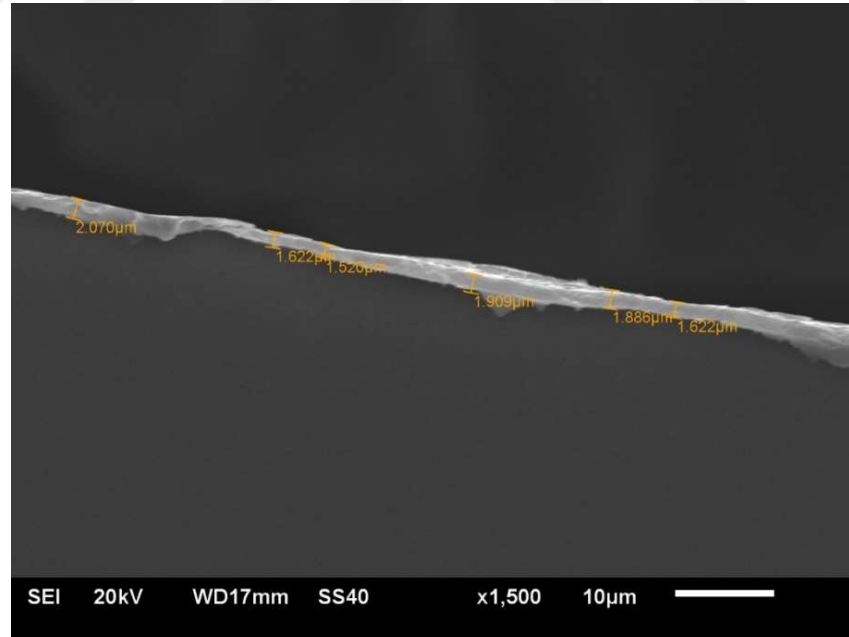


(b)

Şekil 43. Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky güneş pilinin (a) kesilmeyen ve (b) kesilen kenar SEM görüntüleri



(a)



(b)

Şekil 44. (a) ve (b) Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş piline ait SEM görüntüleri
 Arayüzey kaplanma kalınlığının Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş pili
 numunesinin Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag Schottky güneş pili numunesine göre daha düşük

olmasının nedeni Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky diyot malzemesinin Silisyum parlak yüzeyinde kimyasal çözücüler ile aşındırma yaptığımızdan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Sonuç olarak SEM görüntülerinden, kesitleri alınan numunelerin arayüzeylerinin belirli kalınlıklarda organik malzeme ile homojene yakın dağılımla kaplandığı ve net bir şekilde arayüzeyinde organik bir malzeme varlığından bahsedilebilir.

Tablo 6. Schottky aygıt yapısına ait temel güneş pili parametre değerleri

Işık Şiddeti (mW/cm²)	I_{sc} (mA)	V_{oc} (mV)	I_m (mA)	V_m (mV)	Güneş Enerji Verimi (η)	Doluluk Oranı (FF)
Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag						
30	1,76 x 10 ⁻⁵	120	6,2 x 10 ⁻⁶	60	6 x 10 ⁻³	17,71
60	2,75 x 10 ⁻⁵	120	9,5 x 10 ⁻⁶	60	5 x 10 ⁻³	17,25
100	2,68 x 10 ⁻⁵	100	13,3 x 10 ⁻⁶	40	3 x 10 ⁻³	19,85
Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag						
30	5,4x 10 ⁻⁶	140	1,8 x 10 ⁻⁶	60	2 x 10 ⁻³	14,55
60	6,7 x 10 ⁻⁶	140	3,4 x 10 ⁻⁶	40	1 x 10 ⁻³	14,39
100	8,0 x 10 ⁻⁶	140	2,8 x 10 ⁻⁶	60	9 x 10 ⁻⁴	15,18
Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag						
30	4,07x10 ⁻⁴	160	1,85x10 ⁻⁴	80	25x10 ⁻²	22,73
60	5,24 x10 ⁻⁴	140	2,74 x10 ⁻⁴	60	14x10 ⁻²	22,49
100	6,03 x10 ⁻⁴	120	2,92 x10 ⁻⁴	60	9x10 ⁻²	24,19

Tablo 7. Schottky aygıt yapısına ait temel diyot parametre değerleri

Dark	Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag	Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag	Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag
Engel Yüksekliği	0,70	0,68	0,76
İdealite Faktörü	1,70	1,37	1,82
Akım Yoğunluğu	1,16x10 ⁻⁷	1,80x10 ⁻⁷	9,47x10 ⁻⁹

SONUÇ

Bu tez çalışmasında n-Si yarıiletken kristal malzemesi kullanılmıştır. Aygıtlardan biri sade (referans) olmak üzere diğer ikisinin arayüzeyleri farklı teknikler kullanılarak metil kırmızısı organik malzemesi biriktirerek kaplandı. Üç aygıtın omik kontak işlemleri için termal buharlaştırma yöntemi, Schottky kontak işlemleri için ise sputter (saçtırma) yöntemi kullanılarak fabrikasyonları yapıldı. Oda sıcaklığında (298 K) karanlık ortamda ölçümü alınan Schottky aygıtların I-V grafik eğimlerinden engel yüksekliği ve idealite faktörü hesaplandı. Referans Au/Pd/n-Si/Al/Ag numunenin Φ_b ve n değerleri sırasıyla 0.70, 1.70 bulunurken bu değerler, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesi için sırasıyla 0.68, 1.37 ve Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesi için ise sırasıyla 0.76, 1.82 bulundu. Engel yüksekliği arttığında idealite faktörünün de arttığı, azaldığında da azaldığı görülmektedir. Fabrikasyonu yapılan tüm aygıtlar için $n > 1$ olarak bulunmuştur. Bu da Schottky aygıtın arayüzey durumuna yani metal-yarıiletken arayüzey yüklerin varlığı ve bu yüzeyde oluşan oksit tabakaya atfedilmektedir (Ejderha 2012). İdeal bir diyot için idealite faktörü ($n=1$) 1 değerine eşittir. n değerinin 1'den büyük olması ideallikten saptığı ve 1'e yakın olanın daha ideal olduğu anlamında gelmektedir.

Güneş simülatörü cihazı kullanılarak oda sıcaklığında karanlık ve farklı ışık şiddetleri (30-100 mW/cm²) altında I-V ölçümleri yapılan sade ve organik arayüzeyli Schottky güneş pillerinin temel parametre değerleri hesaplandı. Kimyasal aşındırma ile pürüzsüz hale getirilen Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag aygıtın güneş enerji verimliliği (η), aydınlık ortamda referans aygıtına göre arttığı, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag aygıtın η değeri ise referansa göre azaldığı görülmektedir. Tüm numuneler için doluluk oranı incelendiğinde güneş enerji verimi ile doğru orantılı olduğu görülmektedir.

Fotovoltaik aygıtlar, ışığa duyarlı olup yüzeylerine gelen ışık şiddeti arttırıldıkça ters beslem alanındaki akım değerlerini arttıran bir mekanizmaya sahip yapılardır (Canlı 2018). Fabrikasyonu yapılan sade ve metil kırmızısı organik arayüzeyli Schottky güneş pillerin, ışık şiddetini elektriksel sinyallere çevirdiği görülmektedir. Buda fotodiyot karakter taşıdığını gösterir. 30-100 mW/cm² aralığında ışık şiddeti arttırıldıkça aygıtların akım değerleri, düz beslem alanında az miktarda artış görülürken, ters beslem alanında bu değerlerin çok fazla arttığı görülmektedir.

Referans numunesinin ters beslem alanındaki akım değerinin Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag numunesine göre daha düşük, Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag numunesine göre ise daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan arayüzey durumun fotodiyot karakter üzerinde etki ettiği sonucuna varılabilir. Özellikle yüzeyi KOH, HF, HCl ve H₂O₂ gibi kimyasal çözücülerle przsz hale getirilen ve arayüzeyi Spin Coatin tekniğiyle metil kırmızı organik malzemesi ile kaplanan Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş pilinin fotodiyot özelliği arttırdığını ve organik malzeme büyütme sırasında kimyasal aşındırmanın güneş pili çalışmaları üzerinde olumlu katkı yaptığı görülmektedir. Bu da araştırma ve geliştirme çalışmalarında başvurulabileceği bir yöntem olabileceği gibi arayüzey malzemesinin homojenliğinin kontrollü bir şekilde kaplanması daha verimli sonuçlara ulaşılabileceği düşünülmektedir.

şekil 41 ve lineer I-V grafiği verilen şekil 42 (a), karanlık ortamda  malzeme normal diyot özelliği sergilerken 100 mW/cm² ışık şiddeti altında fotodiyot özelliği sergilemektedir. Işık altında fotodiyot aygıtın gerilimi pozitif tarafta kesmesi aygıtın fotovoltatik özellik taşıdığı anlamına gelmektedir. şekil 42'den de anlaşılacağı üzere ışık şiddeti arttıķa ters beslem alanındaki akım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Bu da diyotun güneş pili özelliği sergilediği anlamına gelmektedir.

Son olarak metil kırmızı organik arayüzeyli Au/Pd/MK/n-Si py/Al/Ag ile Au/Pd/MK/n-Si ay/Al/Ag Schottky güneş pillerinin yüzey morfolojisi SEM cihazında incelendi ve numunelerin arayüzeyleri belirli kalınlıklarda organik malzeme ile homojene yakın dağılımla kaplandığı ve net bir şekilde arayüzeyinde organik bir malzeme varlığı tespit edilmiştir.

KAYNAKÇA

- Akgül, K. B. 2015. “Aynı Şartlar Altında Üretilen Özdeş Au/N-Si (100) Schottky Diyotlarda Karakteristik Parametrelerin Belirlenmesi.” Gazi Üniversitesi.
- Alpaslan, Z. 2009. “Bazı İletken Polimerlerin Güneş Pili Uygulamaları.” Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.
- Andrews, J. M. 1974. “The Role of the Metal-Semiconductor Interface in Silicon Integrated Circuit Technology.” *Journal of Vacuum Science and Technology* 11(6):972–84. doi: 10.1116/1.1318716.
- Ardağ, Y. 2012. “Güneş Pili Karakteristiklerinin İncelenmesi.” Pamukkale Üniversitesi.
- Arkan I, I. 20012. “Monokristal Güneş Pili Sistemlerinde Elektrik Enerji Analizi.” Gazi Üniversitesi.
- Aydoğan, Ş. 2004. “Sn/PPy/n-Si/Au-Sb Yapının Bazı Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj, Kapasite-Voltaj ve Kapasite-Frekans Ölçümlerinden Tayin Edilmesi.” Atatürk Üniversitesi.
- Baba, B. A. 2014. “Modeling and Simulation of Thin-Film Solar Cells.” Meliksah University.
- Bekil, A. 2019. “Sputter Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Bor Katkılı Organik Arayüzeyli Metal/P-Si Güneş Pillerinin Karakterizasyonu.” Bingöl Üniversitesi.
- Bereznev, S., R. Koeppe, I. Kononov, J. Kois, S. Günes, A. Öpik, E. Mellikov, and N. S. Sarıci. 2007. “Hybrid Solar Cells Based on CuInS₂ and Organic Buffer-Sensitizer Layers.” *Thin Solid Films* 515(15):5759–62. doi: 10.1016/j.tsf.2006.12.074.
- Bethe, H. A. 1991. “Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers.” Pp. 387–99 in *Semiconductor Devices: Pioneering Papers*. WORLD SCIENTIFIC.
- Bionity. 2024. “Methyl Red.” *Bionity*. Retrieved (https://www.bionity.com/en/encyclopedia/Methyl_red.html).
- Burgelman, M., P. Nollet, and S. Degraeve. 2000. “Modelling Polycrystalline Semiconductor Solar Cells.” *Thin Solid Films* 361–362:527–32. doi: 10.1016/S0040-6090(99)00825-1.
- Çaldıran, Z. 2013. “Au/Antrakininon/P-Si/Al Schottky Diyodun Temel Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı I-V (Akım-Voltaj) Ve C-V (Kapasite-Voltaj)

- Ölçümlerinden Tayin Edilmesi.” Atatürk Üniversitesi.
- Canlı, S. 2018. “Silisyum Tabanlı Alq3 Arayüzeyli Fotodiyotların Elektriksel ve Optiksel Özelliklerinin İncelenmesi.” Bingöl Üniversitesi.
- Chamberlain, G. A. 1983. “Organic Solar Cells: A Review.” *Solar Cells* 8(1):47–83. doi: 10.1016/0379-6787(83)90039-X.
- Coskun, C., M. Biber, and H. Efeoglu. 2003. “Temperature Dependence of Current–Voltage Characteristics of Sn/p-GaTe Schottky Diodes.” *Applied Surface Science* 211(1–4):360–66. doi: 10.1016/S0169-4332(03)00267-8.
- Cova, P., and A. Singh. 1990. “Temperature Dependence of I-V and C-V Characteristics of Ni/n-CdF₂ Schottky Barrier Type Diodes.” *Solid-State Electronics* 33(1):11–19. doi: 10.1016/0038-1101(90)90003-W.
- Cowley, A. M., and S. M. Sze. 1965. “Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems.” *Journal of Applied Physics* 36(10):3212–20. doi: 10.1063/1.1702952.
- Dikici, M. 2012. *Katıhal Fiziği*. Ankara: Seçkin Yayıncılık.
- Ejderha, K. 2012. “Magnetron Saçırma Yöntemiyle Hazırlanan Metal/P-InP Schottky Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimlerinin İncelenmesi.” Atatürk Üniversitesi.
- Engin, R. 1995. *Güneş Pilleri*. Fen Biliml. Van: Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Erdem, E. 2021. “Sılar Yöntemi Kullanılarak Pbo İnce Filminin Üretimi Ve Pb/Pbo/P-Si MIS Kontaklarının Elektronik ve Arayüzey Özellikleri.” Batman Üniversitesi.
- Fujishima, D., H. Kanno, T. Kinoshita, E. Maruyama, M. Tanaka, M. Shirakawa, and K. Shibata. 2009. “Organic Thin-Film Solar Cell Employing a Novel Electron-Donor Material.” *Solar Energy Materials and Solar Cells* 93(6–7):1029–32. doi: 10.1016/j.solmat.2008.11.034.
- Gördün, K. 2011. “Nano Yapılı ZnO Filminin Sol-Jel Yöntemi İle Farklı Hazırlama Parametrelerine Bağlı Olarak Elde Edilmesi ve Fiziksel Karakterizasyonu.” Anadolu Üniversitesi.
- Görmez, S. 2021. “Silisyum Tabanlı Güneş Pilli Hücrelerinin Üretim Teknolojileri ve Bazı Ticari Silisyum Güneş Pillerinin Elektriksel Karakteristiklerinin Tayini.” Giresun Üniversitesi.
- Gözen, M. 2017. “Organik (1,4-M-Diamin) Arayüzeyli N-Si Schottky Diyodun Elektriksel

- Karakterizasyonu.*” Bingöl Üniversitesi.
- Group, Pcc. 2024. “Acid-Base Indicators.” *Chemical Academy Analytical Chemistry*. Retrieved (<https://www.products.pcc.eu/en/academy/acid-base-indicators/>).
- Honsberg, Christiana, and Stuart Bowden. 2024. “Conduction in Semiconductors.” Retrieved (<https://www.pveducation.org/pvcdrom/conduction-in-semiconductors>).
- Kabaçelik, İ. 2015. “*Fotovoltaik Uygulamalar İçin Germanyum Güneş Pillerinin ve Germanyum İnce Filmlerin Üretilmesi ve Karakterizasyonu.*” Akdeniz Üniversitesi.
- Keleş, İ. 2008. “*Al/P-Si Schottky Diyotlarında Ms Ve Mos Yapılarda Diyod Parametrelerinin Karşılaştırılması.*” Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Korun, M. 2016. “*Farklı Yarı İletken Malzemelerle Üretilmiş Güneş Pillerinde Verim Analizi.*” Gazi Üniversitesi.
- M, Simon, Sze, Yiming Li, and Kwok K. Ng. 2021. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
- McConnell, R. 2002. “Assessment of the Dye-Sensitized Solar Cell.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6(3):271–93. doi: 10.1016/S1364-0321(01)00012-0.
- Mönch, W. 1987. “Role of Virtual Gap States and Defects in Metal-Semiconductor Contacts.” *Physical Review Letters* 58(12):1260–63. doi: 10.1103/PhysRevLett.58.1260.
- Ocak, Y. S. 2006. “*Al/Metil Kırmızı/P-Si Schottky Diyotların Elektriksel Karakterizasyonu.*” Dicle Üniversitesi.
- Orak, İ. 2013. “*Saştırma Yöntemiyle Elde Edilen Co/N-Gap Schottky Diyotların Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Elektriksel Karakterizasyonu.*” Atatürk Üniversitesi.
- Özerden, E. 2014. “*Metal/Organik/İnorganik Yarıiletken Yapıların Sıcaklığa Bağlı Olarak Elektriksel ve Optik Parametrelerinin Belirlenmesi.*” Dicle Üniversitesi.
- Öztürk, A. 2012. “*Monokristal ve Polikristal Güneş Pili Modüllerinin Mevsimsel Performanslarının İncelenmesi.*” Tunceli Üniversitesi.
- Padovani, F. A. 1971. “Chapter 2 The Voltage–Current Characteristic of Metal–Semiconductor Contacts.” Pp. 75–146 in.
- Pakma, O., Ş. Çavdar, H. Koralay, N. Tuğluoğlu, and Ö. Faruk Yüksel. 2017. “Improvement of Diode Parameters in Al/n-Si Schottky Diodes with Coronene Interlayer Using Variation of the Illumination Intensity.” *Physica B: Condensed Matter* 527:1–6. doi: 10.1016/j.physb.2017.09.101.

- Polat, S. 2020. “Farklı P-Tipi Yarıiletkenlerin Tek Kristallerinin Büyütülmesi, Karakterizasyonu ve Organik Güneş Pillerinde Performans Üzerine Etkisinin İncelenmesi.” Konya Teknik Üniversitesi.
- Ranjan, R., C. M. S. Negi, and K. P. Tiwary. 2023. “Synthesis of Mn²⁺ Modified CdS Nanoparticles and Its Application as Catalyst in Photodegradation of Methyl Red Dye.” *Chalcogenide Letters* 20(4):251–59. doi: 10.15251/CL.2023.204.251.
- Şahinkaya, M. A. 2020. “Si Tabanlı Ru(II) Kompleks Yapısına Alq3 Organik Bileşiğinin Elektriksel ve Fotovoltaik Özelliklerini Arttırmadaki Etkisi.” Bingöl Üniversitesi.
- Sajjad, S. 2013. “Organik Tabanlı Güneş Pili Üretimi ve Karakterizasyonu.” Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Singh, A. 1985. “Characterization of Interface States at Ni/NCdF₂ Schottky Barrier Type Diodes and the Effect of CdF₂ Surface Preparation.” *Solid-State Electronics* 28(3):223–32. doi: 10.1016/0038-1101(85)90002-4.
- Şirin, D. Ş. 2021. “Au/4H n-SiC Schottky Diyotların Sıcaklığa Bağlı Akım İletim Mekanizmasının İncelenmesi.” Hitit Üniversitesi.
- Sze, S. M., Y. Li, and K. K. Ng. 2021. *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons.
- Tahseen, O. M. 2017. “The Photovoltaic Characterization Of Mo/Methylene Blue/N-Si/Al/Au Contacts.” Bingöl University.
- Tekle, T. 2012. “InSe ve InSe: Mn Yarı İletkenlerinin Yasak Enerji Aralığına Elektrik Alanın Etkisi ve Schottky Diyot Davranışları.” Atatürk Üniversitesi.
- Tezcan, A. O. 2019. “Au/Bod-Z-En/N-Si/In Schottky Diyotunun Farklı Aydınlatma Şiddetleri Altında Elektriksel Parametrelerinin Araştırılması.” Giresun Üniversitesi.
- Türüt, A., and M. Sağlam. 1992. “Determination of the Density of Si-Metal Interface States and Excess Capacitance Caused by Them.” *Physica B: Condensed Matter* 179(4):285–94. doi: 10.1016/0921-4526(92)90628-6.
- Wang, Ying. 2016. “Koh Etching of Silicon.” New Jersey Institute of Technology.
- Yacobi, B. 2003. *Semiconductor Materials: An Introduction to Basic Principles*. Springer Science & Business Media, 2003.
- Yağci, Ö. 2011. “Organik Tabanlı Güneş Pillerinin Üretimi ve Karakterizasyonu.” Marmara Üniversitesi.
- Yakuphanoglu, F., M. Caglar, Y. Caglar, and S. Ilcan. 2010. “Electrical Characterization

- of Nanocluster N-CdO/p-Si Heterojunction Diode.” *Journal of Alloys and Compounds* 506(1):188–93. doi: 10.1016/j.jallcom.2010.06.174.
- Yakuphanoglu, Fahrettin. 2007. “Electronic and Photovoltaic Properties of Al/p-Si/Copper Phthalocyanine Photodiode Junction Barrier.” *Solar Energy Materials and Solar Cells* 91(13):1182–86. doi: 10.1016/j.solmat.2007.03.027.
- Yalçın, E. K. 2011. “Ag/GaP Schottky Diyotların Elektriksel Özelliklerinin Sıcaklığa Bağlı İncelenmesi.” Fırat Üniversitesi.
- Yiğit, E. 2022. “Fotokromik Organik Ligandlar Kullanılarak Elde Edilen Fotodiyotların Fabrikasyonu ve Elektriksel Karakterizasyonu.” Bingöl Üniversitesi.
- Yıldırım, N. 2009. “Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan Ni/N-GaAs Schottky Engel Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimleri.” Atatürk Üniversitesi.
- Yılmaz, E. 2024. “Monokristal ve Polikristal Güneş Panelleri Arasındaki Fark Nedir?” *Aydınlatma Portalı*. Retrieved (<https://www.aydinlatma.org/monokristal-ve-polikristal-gunes-panelleri-arasindaki-fark-nedir.html>).

EKLER

EK 1. ORJİNALLİK RAPORU FORMU



ARDAHAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

ARDAHAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

Tarih: 09/05/2024

Tez Başlığı: Saçtırma Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Metil Kırmızısı Organik Arayüzeyli Pd/n-Si Schottky Güneş Pillerinin Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonu

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmamın a) Kapak sayfası, b) Giriş c) Ana bölümler ve d) Sonuç kısımlarından oluşan toplam 77 sayfalık kısmına ilişkin, 09/05/2024 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda işaretlenmiş filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezin benzerlik oranı % 9'dur.

Uygulanan filtrelemeler:

- 1- ☒ Kabul/Onay ve Bildirim sayfaları hariç
- 2- ☒ Kaynakça hariç
- 3- ☒ Alıntılar hariç/dâhil
- 4- ☒ 5 kelimeden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

Ardahan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nde belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

09/05/2024

Adı Soyadı:	Muhammet Bıra ŞAHİN
Öğrenci No:	21408800007
Ana Bilim Dalı:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD
Programı:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Statüsü:	☒ Yüksek Lisans ☐ Doktora

DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI

Dr. Öğretim Üyesi; Hasan Hüseyin ÇOBAN

Detaylı Bilgi: <https://www.ardahan.edu.tr/birim.aspx?id=1002003>

Telefon: 0-4782117522

Faks: 0-4782117523

E-posta: sbe@ardahan.edu.tr

EK 2. ETİK KURUL MUAFİYET FORMU

ARDAHAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
TEZ ÇALIŞMASI ETİK KOMİSYON MUAFİYETİ FORMU

ARDAHAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI BAŞKANLIĞINA

Tarih:02/05/2024

Tez Başlığı: Saçtırma Yöntemiyle Elde Edilen Sade ve Metil Kırmızısı Organik Arayüzeyli Pd/n-Si Schottky Güneş Pillerinin Elektriksel ve Fotovoltaik Karakterizasyonu

Yukarıda başlığı gösterilen tez çalışmam:

1. İnsan ve hayvan üzerinde deney niteliği taşımamaktadır,
2. Biyolojik materyal (kan, idrar vb. biyolojik sıvılar ve numuneler) kullanılmasını gerektirmemektedir.
3. Beden bütünlüğüne müdahale içermemektedir.
4. Gözlemsel ve betimsel araştırma (anket, mülakat, ölçek/skala çalışmaları, dosya taramaları, veri kaynakları taraması, sistem-model geliştirme çalışmaları) niteliğinde değildir.

Tez çalışmamın yürütülebilmesi için herhangi bir Etik Kurul/Komisyon'dan izin alınmasına gerek olmadığını; aksi durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini saygılarımla arz ederim.

02/05/2024

Adı Soyadı:	Muhammet Bıra ŞAHİN
Öğrenci No:	21408800007
Ana Bilim Dalı:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD
Programı:	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Statüsü:	☒ Yüksek Lisans ☐ Doktora

DANIŞMAN GÖRÜŞÜ VE ONAYI

Dr. Öğretim Üyesi; Hasan Hüseyin ÇOBAN

Detaylı Bilgi: <https://www.ardahan.edu.tr/birim.aspx?id=1002003>

Telefon: 0-4782117522

Faks: 0-4782117523

E-posta: sbe@ardahan.edu.tr

ÖZ GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Muhammet Bıra ŞAHİN

Doğum Yeri ve Tarihi :

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : Erciyes Üniversitesi/ Mühendislik Fakültesi/

Elektrik- Elektronik Mühendisliği

Yüksek Lisans Öğrenimi : Ardahan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü/

Elektrik-Elektronik Mühendisli Ana Bilim Dalı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri : M. B. Şahin ve H. H. Çoban, “Feasibility Analysis of Photovoltaic Power Generation Plant in Ardahan City by Retscreen Software,” presented at the International World Energy Conference, Kayseri, 2021.

M. B. Şahin ve H. H. Çoban, “Erzurum İlindeki Elektrikli Araç Şarjının Elektrik Şebekesi Üzerindeki Etkisine İlk Bakış” presented at the Anadolu 9th International Conference on Applied Sciences, 2022.

İş Deneyimi

Stajlar : Baykar İnş. Mim. Müh. Ltd. Şti (2018)

Mekosan Otomasyon Teknoloji ve Müh. (2019)

Projeler : Arduino Mikrodenetleyici ile Android Tabanlı Akıllı Sistem Tasarımı

Çalıştığı Kurumlar :

İletişim

E-Posta Adresi

Tarih

Jüri Tarihi : 02.05.2024

