



**Au/Carmine/n-Si/Ag
DİYODUNUN FOTOVOLTAİK ve
FOTODİYOT ÖZELLİKLERİ**

Muhammed Canhakan BODUR

**Yüksek Lisans Tezi
Fotonik Ana Bilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Songül DUMAN**

2023

Her hakkı saklıdır.



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Au/Carmine/n-Si/Ag DİYODUNUN FOTOVOLTAİK ve
FOTODİYOT ÖZELLİKLERİ**

Muhammed Canhakan BODUR

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Songül DUMAN

Ana Bilim Dalı: Fotonik

Erzurum

2023

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

05 / 06 / 2023

Muhammed Canhakan BODUR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Au/Carmine/n-Si/Ag DİYODUNUN FOTOVOLTAİK ve FOTODİYOT ÖZELLİKLERİ

Muhammed Canhakan BODUR

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fotonik Ana Bilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Songül DUMAN

Bu çalışmada, spin kaplayıcı (spin coater) kullanılarak cam ve n-Si alttaşlar üzerine Carmine ince filmi kaplanmıştır. Kaplanan Carmine filmlerin taramalı elektron mikroskop (SEM) ve absorbands analizleri gerçekleştirilmiştir. Referans Au/n-Si/Ag diyonu ile 24 adet üst kontak noktasına sahip Au/Carmine/n-Si/Ag yapısı aynı şartlarda üretilmiş ve hem karanlık hem de gün ışığı altında akım-gerilim (I - V) karakteristikleri ölçülmüştür. Her bir diyonun idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), doğrultma oranı (RR) ve seri direnci (R_s) termoionik emisyon (TE) teorisine ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonlarına göre belirlenmiştir. Karanlıkta, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri 24 diyon için sırasıyla 1,52-2,72 ve 0,76-0,85 eV aralığında bulunmuştur. Ayrıca, 11 diyon için karanlıkta 10^4 mertebesinde akım doğrultma oranı elde edilmiştir. Au/Carmine/n-Si/Ag diyonlarından birinin (D18 kodlu) oda sıcaklığındaki fotovoltaik ve fotodiyot özellikleri 30 - 100 mW/cm² arasında uygulanan farklı ışık şiddetleri altında ve kapasitans-gerilim (C - V) karakteristikleri sadece karanlıkta incelenmiştir. D18 diyonu tipik fotodiyot davranışı sergilemiş olup, 30 mW/cm² ışık şiddeti altında dolum faktörü (FF) %36,2 ve deneysel verimliliği (η) %2,45 olarak hesaplanmıştır. On/off akım oranı da (I_{on}/I_{off}) $7,45 \times 10^3$ gibi yüksek bir değer olarak bulunmuştur. Au/Carmine/n-Si/Ag fotodiyodunun 12 adet on/off çevrimi sonrası maksimum akım değerinin değişmediği ve kararlı (stabil) olduğu görülmüştür. Bu deneysel bulgulara göre, yüksek performanslı Au/Carmine/n-Si/Ag diyonunun iyi bir fotodiyot davranışı sergilediği ve Carmine ince film tabanlı fotodiyotların modern optoelektronik cihazların geliştirilmesinde kullanılabileceği söylenebilir.

2023, 66 sayfa

Anahtar Kelimeler: Metal-yarı iletken kontaklar, Carmine, Schottky kontak, Fotodiyot, Engel yüksekliği

ABSTRACT

MS. Thesis

THE PHOTOVOLTAIC AND PHOTODIODE PROPERTIES OF Au/Carmine/n-Si/Ag DIODE

Muhammed Canhakan BODUR

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Photonics

Supervisor: Prof. Dr. Songül DUMAN

In this study, carmine thin films were deposited on glass slides and n-Si substrates using a spin coater. The deposited carmine film on glass was analyzed using SEM and absorbance measurements. Both in the dark and under daylight, the current-voltage (I - V) characteristics of the reference Au/n-Si/Ag diode and 24 Au/Carmine/n-Si/Ag dots (upper contact points) were measured at room temperature. All diodes exhibited rectifying behavior. The ideality factor (n), barrier height (Φ_b), rectification ratio (RR), and series resistance (R_s) of each dot were determined using the thermionic emission (TE) theory and modified Norde's functions. The n and Φ_b values of the 24 dots were found in the range of 1.52-2.72 and 0.76-0.85 eV in the dark, respectively. Furthermore, a high current rectification ratio of 10^4 was achieved for the 11 dots in the dark. The photovoltaic and photodiode properties of one (D18 coded) of the Au/Carmine/n-Si/Ag dots under the different light intensities varied from 30 to 100 mW/cm² at room temperature, and its capacitance-voltage (C - V) characteristics were investigated only in the dark. D18 exhibited typical photodiode behavior with a fill factor (FF) value of 36.2% and an experimental efficiency (η) of 2.45% under 30 mW/cm² light intensity. It also has a high on/off current (I_{on}/I_{off}) ratio of 7.45×10^3 . The Au/Carmine/n-Si/Ag photodiode demonstrated good stability for 12 on/off cycles without significant changes in its maximum current value. Based on these experimental findings, the high-performance Au/Carmine/n-Si/Ag diode exhibits excellent photodiode behavior, suggesting the potential of carmine thin films for future optoelectronic devices.

2023, 66 page

Keywords: Metal-semiconductor contacts, Carmine, Schottky contacts, Photodiode, Barrier height

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans sürecim boyunca yapmış olduğum çalışmalarda bilgi birikimini ve deneyimini bana aktaran, her türlü problemimde yardımcı olan ve asla yalnız bırakmayan kıymetli ve çok değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Songül DUMAN'a göstermiş olduğu sabır ve anlayışından dolayı sonsuz teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım esnasında, diyetlerin hazırlanmasında ve ölçümlerin alınmasında desteklerini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevda SARITAŞ'a, Sayın Doç. Dr. İkrım Sayın ORAK'a ve Sayın Prof. Dr. Özlem BARIŞ'a teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim hayatıma başladığımdan bu yana beni bu günlere getiren, teşviklerini ve desteklerini her zaman hissettiğim fedakâr babam Ali Fuat BODUR ve canım annem Nurşen Büşra BODUR'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Muhammed Canhakan BODUR
Mayıs 2023

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	10
2.1. Giriş.....	10
2.2. Yarı iletkenler	10
2.3. n-Tipi Yarı iletkenler.....	12
2.4. Organik Yarı iletkenler.....	13
2.5. Silisyum Elementinin Özellikleri.....	14
2.6. Metal-Yarı iletken Kontaklar.....	16
2.6.1. Metal n-tipi yarı iletken omik kontaklar.....	17
2.6.2. Metal/n-tipi yarı iletken doğrultucu (schottky) kontaklar	18
2.6.3. Metal yarı iletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları.....	20
2.7. Termiyonik Emisyon Teorisi	21
2.8. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi.....	23
2.9. Carmine Boyar Maddesi.....	23
3. MATERYAL ve YÖNTEM	25
3.1. Giriş	25
3.2. Numunelerin Temizlenmesi	25
3.3. Diyodun Üretilmesi	26
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	28
4.1. Carmine Boyar Maddesinin İncelenmesi ve Diyot Üzerinde Etkisi	28
4.2. Termiyonik Emisyon Teorisi ve Norde Fonksiyonları ile Karakteristik Parametrelerin Hesaplanması	30
4.3. Doluluk Faktörü ve Verimliliğin Hesaplanması	42

4.4. Diyodun C-V / C^2 -V ve G-V Karakteristikleri.....	51
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	57
KAYNAKLAR.....	59



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A^*	Etkin Richardson sabiti
A	Diyot Alanı
Au	Altın
$C_{22}H_{20}O_{13}$	Karminik Asit
CRT	Katot Işını Tüpü
$C-V$	Sığa-Gerilim
D	Spesifik Detektivite
e	Elektronik Yükü
E_f	Fermi Enerji Seviyesi
eV	Elektronvolt
FF	Doluluk Faktörü
FV	Fotovoltaik
H_2O	Su
HCL	Hidroklorik Asit
HF	Hid Acid
I	Akım
$I_{forward}$	İleri Akım
I_{max}	Maksimum Akım
I_o	Doyma Akımı
I_{pc}	Fotoakım
$I_{reverse}$	Ters Akım
I_{sc}	Kısa Devre Akımı
$I-V$	Akım-Gerilim
J_0	Ters Beslem Doyma Akım Yoğunluğu
J_{sc}	Kısa Devre Akım Yoğunluğu
J_{sm}	Yarı iletken den metale doğru termoiyonik emisyon akım yoğunluğu
k	Boltzmann Sabiti
K	Kelvin
$k\Omega$	Kilo Ohm

MHz	Megahertz
MIS	Metal/Yalıtkan/Yarı iletken
ml	Mililitre
mm	Milimetre
M-S	Metal/Yarı iletken
mW	MiliWatt
n	İadealite Faktörü
N ₂	Azot
N _A	Alıcı Atom Yoğunluğu
N_C	Efektif Durum Yoğunluğu
N_d	İyonize Donor Yoğunluğu
NH ₄	Amonyum
nm	Nanometre
N _{ss}	Enerji Yoğunluğu Dağılım Profili/Arayüzey Durum Yoğunluğu
PMI	Perilen Monoimid
q	Elektronik Yüğü
R _i	Bağılantı Direnci
RR	Doğrultma Oranı
R _S	Seri Direnç
R _{sh}	Şönt Direnç
S	Photosensitivity
s	Saniye
SD	Schottky Diyot
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silisyum
T	Mutlak Sıcaklık
t _d	Düşüş Süresi
TE	Termoiyonik Emisyon Teorisi
t _r	Artış Süresi
V	Volt
V _d	Difüzyon Potansiyeli
V _{max}	Maksimum Voltaj
V _{oc}	Açık Devre Voltajı

XPS	X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
η	Deneysel Verimlilik
Φ_b	Engel yüksekliği
Φ_{bo}	Sıfır Beslem Potansiyel Engel Yüksekliği
Φ_e	Etkin Potansiyel Engel Yüksekliği
Φ_m	Metalin İş Fonksiyonu
Φ_s	Yarı iletkenin İş Fonksiyonu
ϵ_s	Dielektrik Sabiti

Kısaltmalar

HOMO	En Yüksek İşgal Edilen Moleküler Orbital Seviyesi
LUMO	En Düşük İşgal Edilmemiş Moleküler Orbital Seviyesi
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
TAE	Kuantum Mekanik Tünelleme
TED	Termoiyonik Difüzyon-Emisyon Teorisi

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Yarı iletkenlerde enerji-bant diyagramı	11
Şekil 2.2.	n-tipi yarı iletkende antimon katkısı	13
Şekil 2.3.	Silisyumun atomik yapısı	16
Şekil 2.4.	Silisyumun kovalent bağ yapısı	16
Şekil 2.5.	$\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarı iletken omik kontağa ait enerji bant diyagramı a) Kontakten önce b) Kontakten sonra c) Düz beslem altında d) Ters beslem altında.	18
Şekil 2.6.	Metal ve n-tipi yarı iletken için enerji-bant diyagramları (Kontaktan önce)	18
Şekil 2.7.	Kontaktan sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagramı ...	20
Şekil 2.8.	Metal/n-tipi yarı iletken için doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) Potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) kuantum mekaniksel tünelleme, (c) uzay yük bölgesinde oluşan yeniden birleşim olayı, (d) doğal bölgede deşik enjeksiyonu	21
Şekil 2.9.	Seri direncin, I-V karakteristiğine etkisi	23
Şekil 3.1.	VAKSIS Pvd termal buharlaştırma cihazı	26
Şekil 3.2.	Tavlama fırını	26
Şekil 3.3.	a) Carmine molekül yapısı b) üretilen diyotların şematik gösterimi ve c) deneysel düzenek	27
Şekil 4.1.	Carmine/n-Si/Ag yapısının a) yüzey ve b) yan kesit SEM görüntüleri	28
Şekil 4.2.	Cam üzerine kaplanan Carmine ince filminin 295-900 nm aralığındaki soğurma spektrumu (400-900 nm aralığı şekil içinde gösterilmiştir.)	29
Şekil 4.3.	a) Carmine üzerindeki üst yüzey için iki kontak arasında ölçülen I-V karakteristiği. Aynı şartlarda hazırlanan b) 1-8, c) 9-16 ve d) 17-24 numaralı Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının karanlıkta ve gün ışığı altındaki I-V karakteristikleri	30
Şekil 4.4.	24 Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu için Φ_b - n grafiği	34
Şekil 4.5.	D18 diyodunun karanlıkta ve gün ışığı altında F(V)-V grafiği	38
Şekil 4.6.	D18 diyodu için farklı ışık şiddetleri altında R_i -V grafiği	39
Şekil 4.7.	a) Au/n-Si/Ag diyodunun b) D18 diyodu için karanlıkta ve ışık altında $\ln(J)$ -V grafiği	40

Şekil 4.8. a) Au/n-Si/Ag diyodunun b) D18 diyodunun farklı ışık şiddetleri altında maksimum güç bölgesindeki J-V eğrileri (Küçük figür gün ışığı altındaki eğriyi göstermektedir.).....	41
Şekil 4.9. V_{oc}/I_{sc} - P grafiği	43
Şekil 4.10. D18 diyodunun -2 V'de $\ln(I_{sc})/\ln(I_{pc})$ - P grafikleri.....	45
Şekil 4.11. D18 diyodunun -2 V'de R - P grafikleri.....	46
Şekil 4.12. D18 diyodunun -2 V'de D^* - P grafiği.....	47
Şekil 4.13. D18 diyodunun -2 V'de S_{ph} - P grafiği.....	48
Şekil 4.14. D18 diyodunun -2 V'deki S - P grafiği.....	49
Şekil 4.15. D18 diyodunun on/off ölçümlerinin a) tam ölçekte ve b) yakınlaştırılmış (zoom) ölçekte gösterimi	50
Şekil 4.16. D18 diyodunun a) 40-300 kHz ve b) 400 kHz-4 MHz frekans aralıklarındaki C-V karakteristikleri	51
Şekil 4.17. D18 diyodunun a) 40-300 kHz b) 400 kHz-4 MHz frekans aralıklarındaki $1/C^2$ -V karakteristikleri	53
Şekil 4.18. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki G-V karakteristikleri	55
Şekil 4.19. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki Z-V karakteristikleri.	56
Şekil 4.20. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki R_s -V karakteristikleri	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Elektronikte yararlanılan yarı iletkenler ve kullanım yerleri.....	12
Çizelge 2.2. Silisyuma ait temel özellikler.....	15
Çizelge 4.1. 24 Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu için TE teorisi ve Norde fonksiyonları ile hesaplanan karakteristik parametreler	35
Çizelge 4.2. Au/n-Si/Carmine ve diğer Au/n-Si fotodiyotların Φ_b ve n değerlerinin karşılaştırması	37
Çizelge 4.3. D18 diyodu için farklı ışık şiddetlerinde güç dönüşüm parametreleri	42
Çizelge 4.4. D18 diyodu için $C^{-2}-V$ grafiklerinden hesaplanan V_d , E_f , Φ_b ve N_d değerleri	54

1. GİRİŞ

Mevcut enerji üretim kaynaklarının hızla tükenmesi, artan hammadde fiyatları, çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkileri ve bunların kullanımındaki bazı zorluklar nedeniyle son yıllarda yeni yenilenebilir enerji kaynakları üzerine araştırmalar artmıştır.

Silisyum (Si), yeryüzünde en çok bulunan elementlerden birisidir. Silisyumun yarı iletken özelliklere sahip olması, doğada çok yaygın olması, transistör, diyot ve belleklerde kullanılabilmesi, Si teknolojisi ile entegre devreler yapmayı mümkün kılan bir etken haline getirmiştir.

Metal-yarı iletken (M-S) kontaklar, yarı iletken teknolojisinde çok önemli bir yere sahiptir. M-S temaslarının fiziği günümüzde iyi bilinmektedir ve çeşitli M-S kontaklar uzun yıllardan beri süredir incelenmektedir. M-S kontakları, düşük maliyetleri ve üretim kolaylığı nedeniyle çeşitli elektronik cihazlarda kullanılmaktadır (Kaya et al. 2021).

Braun (1874) elektriği ileten elektrolitlerin ve kristallerin özelliklerini incelemiştir. İnce, metal bir uçla galen (kurşun sülfür) kristalini incelemiş ve akımın yalnızca bir yönde serbestçe aktığını bulmuştur. Metaller ve belirli kristal maddeler arasındaki kontak noktalarının yönlü olduğunu keşfetmiştir. 1897’de Katot Işını Tüpü (CRT) geliştirmiştir. Metal-yarı iletken doğrultuculardaki bağlantıların uygulanan voltaj polarizasyonuna ve yüzey koşullarına bağlı olduğunu açıklamıştır.

Bose (1904) 1900’lü yılların başlarında nokta-kontak doğrultucuların pratik uygulamalarını yapmıştır.

Pickard (1906) nokta kontak dedektörü için patent almıştır. Pierce (1907), çeşitli yarı iletkenler üzerine metal püskürtülerek yapılan diyotların doğrultma özelliği gösterdiğini belirtmiştir.

1. GİRİŞ

Czochralski (1917), geniş tek kristal yapıları, erimiş germanyum (Ge) içindeki küçük yüzen kristaller yardımıyla potadaki eriyiğin yavaşça döndürülmesiyle elde etmiştir.

Schottky (1938), M-S yapısındaki potansiyel engelin kimyasal katmanlardan ziyade yarı iletkenin kararlı uzay yükünden kaynaklandığını öne sürmüştür. Bu fikirden doğan modele Schottky bariyeri denmektedir. Mott (1938), Mott engeli olarak bilinen teorik bir yarı iletken kontak modeli geliştirmiştir. Organik moleküllere ve polimerlere dayalı güneş pilleri inşa etmek için çok çaba harcanmıştır.

Wilson (1931), katıların bant teorisine dayanarak, yarı iletkenlerin mevcut iletim teorisini formüle etmiştir. Bu teori daha sonra M-S iletken kontaklara uygulanmıştır.

İkinci Dünya Savaşı sırasında nokta doğrultucularda ve mikrodalga radarlarda Si kullanılarak M-S kontaklarının geliştirilmesinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu gelişmeler sayesinde yarı iletken teknolojisinde ilerlemeler sağlanmıştır. Bethe'nin termiyonik emisyon (TE) teorisi ile bu gelişmelere önemli ölçüde katkıda bulunmuştur. Bu teoriye göre akım, Schottky ve Mott desteği olarak yarı iletkenlerde sürüklenme ve difüzyonun aksine elektronların metale emisyon süreci ile belirlenmektedir (Rhoderick and Williams 1988).

1950'lerde ve 1960'larda, yüksek vakumlu sistemler kullanılarak metal filmlerin biriktirilmesi, nokta kontaklardan daha kararlı ve tekrarlanabilir kontak oluşumu sağlanmıştır. Bu çalışmalar, bu konudaki temel bilgileri oluşturmak için iki temel oluşturmuştur. Böylece yarı iletken teknolojisinde kontakların önemi ortaya çıkmıştır. Geppert et al. (1966), çeşitli metallerin çeşitli yarı iletkenler üzerine buharlaştırılmasıyla oluşturulan kontakların özelliklerini incelemiştir. Bu çalışmaların sonucunda Schottky diyot engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonu, yarı iletkenin elektron ilgisi ve yüzey durumu gibi parametrelere bağlı olduğunu bulmuştur. Daha sonraki çalışmalarda, safsızlıkların Schottky engeli üzerindeki etkisi önem kazanmaya başlamıştır. Engel yüksekliğini değiştirmek için az miktarda safsızlığın değiştirilmesinin yeterli olduğu bulunmuştur. 1971'de Card ve Rodherick, arayüzey koşullarının diyotların gerçek akım-voltaj (I - V) özellikleri ve idealite faktörü üzerindeki etkisini incelemiştir (Wilmsen 1985).

Card and Rhoderick (1973) tarafından Au-Si kontaklarında azınlık taşıyıcı enjeksiyonunun kapsamının, metal-yarı iletken ara yüzeyine ince bir katman dahil edildiğinde önemli ölçüde artırılabilceği gösterilmiştir. Eklem aşırı yüklendiğinde, yükün bir kısmının yüzey boyunca hareket ettiğini bulmuşlardır.

Vyas et al. (1979) alüminyumun n-GaAs ve Ni-AuGe kontakları üzerindeki özellikleri üzerine araştırmasının sonuçlarını bildirmişlerdir. Bu kontakların elektriksel performansı (I - V , kapasitans-voltaj (C - V)), bir iyon probu kullanılarak fizikokimyasal analizden elde edilen sonuçlar ışığında analiz edilmiştir. Engel yüksekliği, idealite faktörü ve kontak direncinin metal-GaAs ara yüzeyine bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Daw (1980), metal ve yarı iletken arasındaki ara yüzeyde yüksek oranda katkılı ince bir yarı iletken malzeme veya bir yalıtkan filmin varlığının, M-S kontaklarının elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini tartışmıştır. Düzgün katkılı bir ara yüzey tabakasının kullanımı ile engel yüksekliğindeki artış, katkılı ara yüzey katmandaki farklı kirlilik dağılımları için hesaplanan artışla karşılaştırılmıştır. Ancak ince ara yüzey tabakasının varlığından kaynaklanan engel yüksekliğindeki değişimden dolayı idealite faktörü (n , IF) değerindeki artışın istenmeyen bir durum olduğu gözlemlenmiştir. Metal ve yarı iletken arasındaki ara yüzeyde ince bir yalıtkan tabaka varlığında, engel engel yüksekliğindeki değişimin (artış veya azalış) büyüklüğünün esas olarak ara yüzey tabakasının özelliklerine ve yüzey durumlarına bağlı olduğunu belirtmiştir.

Wu (1980) n-tipi yarı iletken alttaşlar üzerinde üretilen Schottky diyotları için eklem boyunca sabit yüzey yükünü ve voltaj düşüşünü tanımlayan bir eklem teorisi geliştirilmişlerdir. Pozitif bir sabit yüzey yükünün engel yüksekliğini azalttığını ve ters akımı arttırdığını belirtmişlerdir. Farklı üretim koşulları altında üretilen Schottky engel diyotlarından elde edilen deneysel verilerdeki varyasyonların temel olarak ara yüzey tabaka kalınlığı, ara yüzey durumu ve sabit yüzey yükü gibi ara yüzey tabaka özelliklerindeki değişikliklerden kaynaklandığını bulmuşlardır.

Türüt and Saglam (1992), mekanik temizlemenin ardından 3 dakika boyunca etch edilmiş n-tipi Si yüzeyi üzerine Al buharlaştırarak Schottky diyotları üretmiş ve ara yüzey

seviyelerinin ve ara yüzey tabakasının ideal olmayan I - V ve C - V karakteristiklerine neden olduğu belirtilmiştir.

Nathan et al. (1996), Ni/n-GaAs diyotlarının I - V özelliklerini 298-473 K sıcaklık aralığında araştırmışlardır. Artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin arttığını ve idealite faktörünün azaldığını bulmuşlardır. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak engel yüksekliğindeki ve idealite faktöründeki bu değişimi, engelin inhomojenliğine (düzgün olmamasına) bağlamışlardır.

Chand and Kumar (2000), uzaysal inhomojenliğe sahip Schottky diyotların I - V karakteristikleri, termoiyonik emisyon-difüzyon (TED) mekanizması kullanılarak ve engel yükseklikleri Gauss dağılımı varsayılarak simüle edilmiştir. Kontak ara yüzeyinde, her biri dağılım sınırları içinde farklı engel yüksekliklerine sahip, etkileşmeyen paralel diyotlar olduğu varsayılarak, dağılımın hem ortalama hem de standart sapması için Schottky diyot I - V karakteristiklerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. 60-300 K sıcaklık aralığında engel yüksekliği, aktivasyon enerjisi diyagramı ve idealite faktörü üzerindeki dağılım parametresinin etkisi için elde edilen veriler analiz edilmiştir. Simülasyon sonuçları, Schottky kontakın engel yüksekliklerinin Gauss dağılımına sahip olduğunu göstermiştir. Ortalamanın ve standart sapmanın lineer beslem (bias) bağımlılığı dikkate alınarak gerçekleştirilen simülasyonlar, düşük engel yüksekliklerine ve yüksek idealite faktörlerine sahip $\log(I)$ - V eğrileri üretmiştir. Bu etkiler standart sapma değerleri arttıkça artmıştır.

Acar et al. (2004) 125–300 K sıcaklık aralığında Ag/p-Si Schottky engel diyotlarının I - V ölçümlerini yapmışlardır. TE teorisine dayanan I - V analizi, düşük sıcaklıklarda görünür engel yüksekliğinde anormal bir azalma ve idealite faktöründe bir artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu anormalliklerin, M-S ara yüzeylerinde yaygın olan engel yüksekliği inhomojenliğinden kaynaklandığı göstermişlerdir. Ayrıca ortalama engel yüksekliği için 0,773 eV ve Richardson sabiti için $15,53 \text{ AK}^{-2}\text{cm}^{-2}$ değerleri elde edilmiştir. I - V 'nin sıcaklığa bağlı olduğu sonucuna varmışlardır.

Hussain et al. (2010) tarafından, organik bir ara tabaka ile bir alüminyum/çinko ftalosiyanın/n-Si metal-yarı iletken kontaklı gerçekleştirilmiş ve kontak ve yük taşıyıcı

1. GİRİŞ

özelliklerini araştırmak için I - V -sıcaklık (T) ölçümleriyle karakterize edilmiştir. Diyot idealite faktörü (n), bariyer yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) gibi eklem parametrelerinin cihaz sıcaklığı ile değiştiğini bulmuşlardır.

Aydoğan et al. (2010), Au/Carmin/n-Si/ Al diyodunu üretmiş ve kontak parametrelerini sadece karanlık koşullar altında belirlemişlerdir.

Tuğluoğlu and Karadeniz (2012) spin kaplama yöntemini kullanarak Au/ perilen-monoimid (PMI) /n -Si Schottky diyotlarını üretmiş ve oda sıcaklığında $I - V$ ve $C - V$ ölçümlerini gerçekleştirmişlerdir. Au/ PMI/n -Si Schottky diyodun elektriksel özellikleri ve ara yüzey durumlarını incelemişlerdir. $I - V$ özelliklerinden iyi bir doğrultma görüldüğünü raporlamışlardır. Au/PMI/n-Si Schottky diyodu için I - V karakteristiğinden engel yüksekliğini 0,694 eV, idealite faktörü değerini 4,27 ve C - V karakteristiğinden engel yüksekliğini 0,826 eV olarak hesaplamıştır. I - V karakteristiklerinden elde ettikleri sonuçlar doğrultusunda PMI organik tabakasının Au/n-Si Schottky diyodunun elektronik parametrelerini değiştirdiğini tespit etmişlerdir.

Oral (2012), p-Si ve n-Si alttaşlar üzerine organik CuPc, C₆₀ ve inorganik ZnO, CdO yarı iletken filmlerini oluşturmuş ve elde ettiği yapıların yapısal, morfolojik ve elektriksel özelliklerini incelemiştir. Diyotlar için hesaplanan idealite faktörü değerleri 1'den büyük çıkmıştır. Bu durumun, arayüzey durumlarının varlığından ve üretim koşullarından kaynaklandığını belirtmiştir. Tüm diyotların sıcaklığa bağlı I - V karakterizasyonunu gerçekleştirmiş ve idealite faktörü değerinin artan sıcaklıkla azaldığını rapor etmiştir.

Tataroğlu (2013), Au/n-Si (M-S) ve Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) Schottky diyotlarının elektriksel parametrelerini oda sıcaklığında, I - V ve C - V ölçümlerini kullanarak elde etmiştir. Deneysel sonuçlardan, M-S ve MIS diyotlarının ± 5 V'de doğrultma oranlarını sırasıyla $1,25 \times 10^3$ ve $1,27 \times 10^4$ olarak elde etmiştir. Sıfır beslem bariyer yüksekliği (Φ_{B0}) ve idealite faktörü gibi başlıca elektriksel parametreleri M-S yapısı için 0,51 eV (I - V), 0,53 eV (C - V), 4,43 ve MIS diyotları için 0,65 eV (I - V), 0,70 eV (C - V) ve 3,44 olarak hesaplamıştır. Ayrıca, ara yüzey durumlarının enerji yoğunluğu dağılım

profilini (N_{ss}) I - V 'den elde etmiş ve iki diyot için seri direnç (R_s) değerleri Cheung yönteminden ve Ohm kanunundan hesaplamıştır.

Özerden (2014) tarafından organik-inorganik Ag/9,10-H₂BaP/n-Si/Au-Sb yapısı üretilmiş, yapının elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri oda sıcaklığında I - V ve C - V ölçümleri kullanılarak araştırılmıştır. Organik ince filmin, yasak enerji bant aralığı optik soğurma spektrumundan 3,73 eV olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan yapının doğrultucu davranış ve fotodiyot özellik sergilediği gözlemlenmiştir. Ag/9,10-H₂BaP/n-Si yapısı için idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri, oda sıcaklığında düz beslem I - V karakteristiklerinden sırasıyla 1,30 ve 0,67 eV olarak hesaplanmıştır. Ayrıca karanlıkta ve 40-100 mW/cm² arasında farklı ışık şiddeti altında I - V ölçümleri alınmış ve yapının fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir. Güçlü bir ışık hassasiyetine sahip diyotta artan ışık şiddeti ile ters beslem akımının arttığı gözlemlenmiştir.

Pakma et al. (2017), Si dilim üzerine Coronene ince filmleri spin kaplama yöntemi ile kaplamış ve Al/Coronene/n-Si/In Schottky diodunu üretmişlerdir. Schottky diyotlarda ışık şiddetinin etkisini belirlemek için I - V ölçümlerini kullanmışlardır. Artan ışık şiddeti ile idealite faktörü (n) değerleri azalmış ve engel yüksekliği (Φ_b) değerlerinin arttığını gözlemlenmişlerdir. Karanlıkta Φ_b değerleri sırasıyla 0,697 ve 100 mW/cm² ışık altında 0,755 eV olarak bulunmuştur. Karanlıkta n değerleri sırasıyla 2,81 ve 100 mW/cm² ışık altında 2,07 olarak bulunmuştur. Ayrıca modifiye Norde yönteminden seri direnç (R_s) değerleri ve akım-gerilim ölçümleri kullanılarak arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}) değerleri belirlemişlerdir. R_s değeri karanlıkta sırasıyla 1.924 Ω ve 100 mW/cm² ışık altında 5.094 Ω olarak bulunmuştur. N_{ss} değeri karanlıkta sırasıyla $4,76 \times 10^{12}$ eV⁻¹ cm⁻² ve 100 mW/cm² ışık altında $3,15 \times 10^{12}$ eV⁻¹ cm⁻² olarak bulunmuştur.

Lapa et al. (2019) Yb/p-Si Schottky diyotlarını yüksek engel yüksekliğine ve düşük sızıntı akımına sahip ideal diyotlarını imal etmek amacıyla üretmişlerdir. Yb/p-Si Schottky diyotlarını Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) kaplama teknikleri arasında en basit olan termal buharlaştırma yöntemini kullanarak imal etmişlerdir. Bu diyotların I - V ve C - V ölçümlerini oda sıcaklığında ve karanlıkta almışlardır. I - V verileri kullanılarak idealite faktörü (n), sıfır-beslem engel yüksekliği (Φ_{bo}) ve seri direnç (R_s) parametrelerini

hesaplamışlardır. C^{-2} - V karakteristiğinden de Fermi enerji seviyesi (E_F), donör atomların yoğunluğu (N_A) ve engel yüksekliği ($\Phi_{b(C-V)}$) gibi elektriksel parametreleri hesaplamışlardır. Yb/p-Si Schottky diyotları için düşük sızıntı akımı elde etmişlerdir. İyi bir doğrultma oranı ve yüksek engel yüksekliği değeri elde ettikleri bulguların arasında yer almaktadır. Bu bulgular doğrultusunda, Yb'un kaliteli Schottky kontak elde etmek için kullanılmasında etkin bir element olduğunu belirtmişlerdir. n değerinin ideal durumdan yüksek olmasını, Si yüzeyinin iyi temizlenememesinden kaynaklı kirliliğe, ara yüzeyde oluşabilecek olan ince yalıtkan oksit tabakanın varlığına ve engel yüksekliğinin beslem voltajına bağlılığından kaynaklandığını belirtmişlerdir. Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak elde edilen yüksek R_s değerleri, omik kontakın kaliteli olmamasına ve organik kirliliğe bağlamışlardır. Sonuç olarak, yüksek engel yüksekliğine ve düşük sızıntı akımına sahip olan ideal Yb/p-Si Schottky diyotlarının elde edilebilir olduğunu ispatlamışlardır. Ancak, omik kontakın kaliteli yapılmasına, yarı iletkenin organik kirlerden dikkatli bir şekilde arındırılmasına özen gösterilmesi gerektiğini vurgulamışlardır.

Kaplan et al. (2021) α -stiril katkılı BODIPY bileşiği (BDP-Sty) sentezlemiş ve karakterize etmişlerdir. Au/BDP-Sty/n-Si/In diyodunun düz beslem ve ters I - V özellikleri Schottky diyot benzeri özellikler gösterdiğini açıklamışlardır. Karanlıkta, diyodun idealite faktörü (n) ve engel yüksekliği değerlerini sırasıyla 2,32 ve 0,828 eV olarak ve R_s değeri Cheung fonksiyonlarından 4,95 k Ω and 4,59 k Ω olarak hesaplanmıştır Au/BDP-Sty/n-Si/In diyodunun $\ln(I)$ - $\ln(V)$ ve $\ln(I_R)$ - $V_R^{(1/2)}$ özellikleri, düşük voltajda iletim mekanizmasının omik olduğunu belirtmişlerdir. Hazırlanan diyodun açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}), ışığa duyarlılık (S) gibi karakteristik fotodiyot parametrelerini de araştırmışlardır. Tüm bu sonuçlar doğrultusunda Au/BDP-Sty/n-Si/In diyodunun optoelektronik cihaz uygulamalarında kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Yılmaz et al. (2021) Muğla/Türkiye'de yetişen kızılçam (*Pinus brutia*) ağacının kabuğundan elde edilen organik bir boyanın Au/n-Si Schottky diyot yapısında ara katman olarak performansını değerlendirmişlerdir. Bu amaçla, öncelikle organik boyanın optimize edilmiş moleküler yapısı, en yüksek dolu moleküler orbital (HOMO) ve en düşük boş moleküler orbital (LUMO) simülasyonları Gauss programı ile hesaplamış ve

boyanın teorik olarak yarı iletken özellikler sergilediğini kanıtlamışlardır. Daha sonra, karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında I - V ölçümleri kullanılarak idealite faktörü, etkin engel yüksekliği, seri direnç, arayüzey durumları yoğunluk dağılımı, ışığa duyarlılık ve foto yanıt gibi elektriksel ve fotodiyot değişkenlerini değerlendirmişlerdir. Bunlara ek olarak, üretilen diyodun kapasitif özelliklere sahip olduğunu ve bu yeteneğin frekansın bir fonksiyonu olarak değiştiğini göstermek için C - V ölçümlerini kullanmışlardır. Organik boya bazlı Au/n-Si diyodu için olası iletim mekanizması araştırılmış ve sonuçlar Au/Pinus brutia/n-Si'nin optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Das et al. (2022) Al/Beetroot/Cu diyodunun elektronik özelliklerini, I - V ölçümü ile 293-323 K sıcaklık aralığında araştırmışlardır. Düz beslem I - V karakteristiklerinden ortalama idealite faktörünü, seri direnci ve engel yüksekliğini, sırasıyla 4,5, 1,10 k Ω ve 0,73 eV olarak hesaplamışlardır. Artan sıcaklıkla seri direnç azaldığını ve engel yüksekliğinin arttığını rapor etmişlerdir. 140 K'da, boya bir yalıtkan gibi davranır ve kuantum tünelleme etkisinin termoiyonik emisyon üzerinde baskın olduğunu açıklamışlardır. Öte yandan, oda sıcaklığında boyanın yarı iletken gibi davrandığını ve termoiyonik emisyonun kuantum tünellemeye baskın olduğunu belirtmişlerdir.

Bu tez çalışmanın ilk amacı, Au ve n-Si yarı iletken arasına carmine organik boya tabakası yerleştirilerek Au/n-Si diyot için engel yüksekliği değerinin değişimini sağlamaktır. İkinci amacı, ince bir carmine boya tabakasının Schottky diyotlarında bir fotovoltajik malzeme olarak etkilerini incelemektir. Au/Carmine/n-Si/Ag diyodu için bu tür bilgilere ilişkin daha önce sunulmuş herhangi bir rapor bulunmamaktadır.

Bu çalışmanın birinci bölümünde, tez konusu ile ilgili literatür çalışmalarının özetini içeren 'Giriş' kısmı; ikinci bölümde 'Kuramsal Temeller' kısmı; üçüncü bölümü, numunelerin temizlenmesi, Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının hazırlanma prosesi ve ölçümlerin alındığı deney düzeneği hakkında bilgilerin bulunduğu 'Materyal ve Yöntem' kısmı; dördüncü bölüm Au/n-Si/Ag ve Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının farklı ışık şiddetleri altında fotovoltajik özelliklerinin incelendiği ve açık/kapalı akım oranı (I_{on}/I_{off}), duyarlılık (R), fotohassasiyet (S), doluluk faktörü (FF), açık devre voltajı (V_{oc}), kısa devre akım yoğunluğu (J_{sc}) ve C - V ölçümlerinden elde edilen karakteristik parametrelerinin

1. GİRİŞ

hesaplandığı ‘Araştırma Bulguları’ kısmı ve beşinci bölüm içerisinde ise ölçümlerin değerlendirilmesi sonucunda elde edilen parametrelerin yorumlandığı ve karşılaştırıldığı ‘Tartışma ve Sonuç’ kısmından oluşmaktadır.



2. KURAMSAL TEMELLER

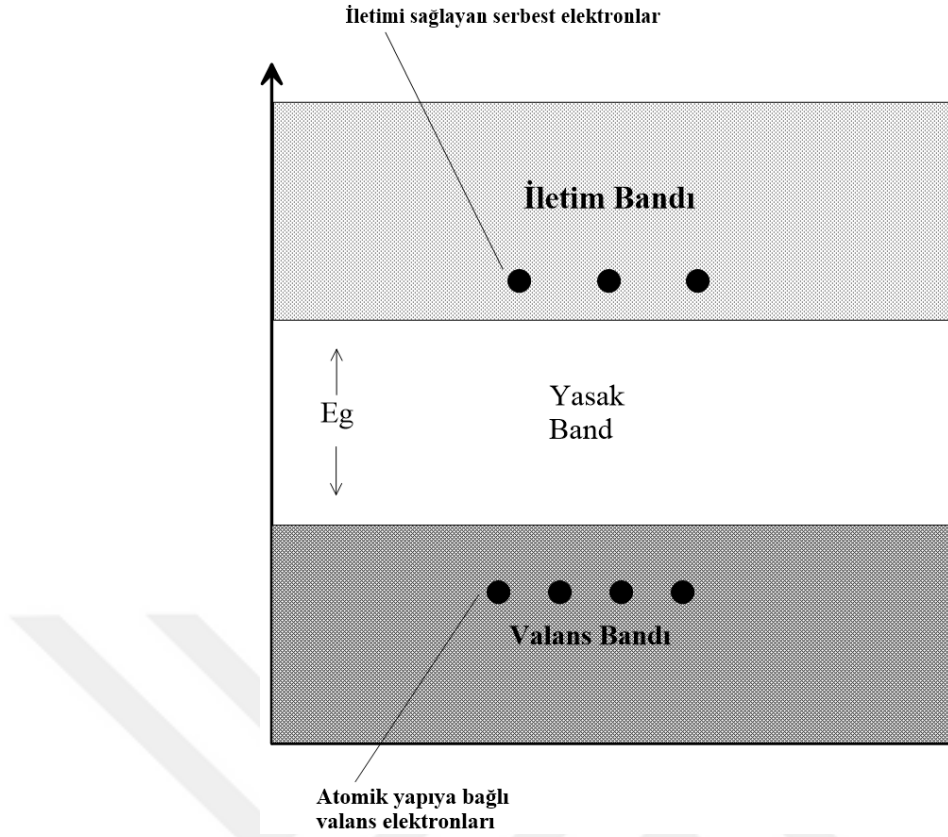
2.1. Giriş

1940'ların sonlarında yarı iletken transistörlerin ortaya çıkmasıyla elektronik endüstrisi hızla gelişmiştir. Minyatürleştirme sayesinde tüm sistem, önceki devrelerde kullanılan tekli elemanların boyutlarından çok daha küçük bir alana sığabilir hale gelmiş bulunmaktadır. Daha önceki yılların vakum tüplü devreleri ile mukayese edildiği zaman, yarı iletken sistemlerin birçok avantajı fark edilebilir. Örneğin daha küçük ve daha hafif olmaları, çok daha verimli olmaları, fiziksel olarak daha kuvvetli ve sağlam olmaları gibi avantajları vardır.

2.2. Yarı İletkenler

Adından da anlaşılacağı gibi yarı iletkenler, iletkenler ve yalıtkanlar arasında elektriksel iletkenliğe sahip malzemelerdir. Yarı iletkenlerin direnci iletkenlerin direncinden daha yüksek, yalıtkanların direncinden daha düşüktür.

İletkenlerdeki ve yalıtkanlardaki serbest elektronların yoğunluğu pek değiştirilemez, ancak yarı iletkenlere katkı atomlarının eklenmesi serbest elektronların yoğunluğunu değiştirebilir. Bunu mümkün kılan faktör, yarı iletkenlerin enerji bant yapısıdır. Genel olarak, katıların enerji bantları, atomların enerji seviyelerine benzer. Tıpkı atomlardaki elektronların yalnızca belirli enerji seviyelerinde bulunması gibi, katılardaki elektronlar yalnızca belirli enerji bantlarında (iletkenlik ve değerlik bantları gibi) bulunur.



Şekil 2.1. Yarı iletkenlerde enerji-bant diyagramı

Şekil 2.1’den anlaşılacağı üzere yarı iletkenlerin iletkenlik bandı ile valans bandı arasında elektron bulunmayan ve valans bandındaki elektronların iletkenlik bandına geçmesini zorlaştıran bir yasak enerji bandı yer almaktadır. Valans elektronlarına boşluk bandı kadar ilave enerji kazandırıldığında valans bandında bulunan elektronlar iletkenlik bandına geçiş yapabilirler.

İletkenlik bandı: Valans banttıan kopan ve akım taşıyabilecek durumda olan elektronların bulunduğu banttır. Maddeler, elektronlarının bu banda geçmesiyle iletken hale gelirler.

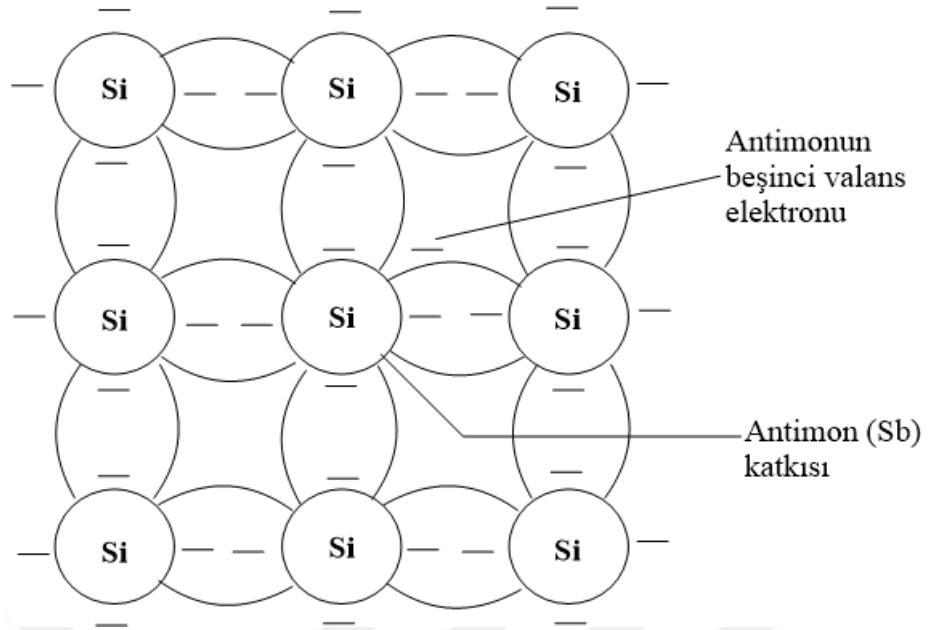
Yarı iletken maddeler adına tarihsel açıdan ilk önce germanyum (Ge) daha sonra da Si gelmektedir. Atomlar arasındaki kovalent bağlar, Ge elementine kristal karakterini verir. Doğada bol miktarda bulunması, diyot ve transistör üretiminde Ge’ye göre daha yüksek sıcaklıklara daha dayanıklı olması nedeniyle Si, elektronik endüstrisinde sıklıkla tercih edilmektedir. Çizelge 2.1’de elektronik endüstrisinde kullanılan bazı yarı iletkenler ve kullanım alanları verilmektedir.

Çizelge 2.1. Elektronikte yararlanılan yarı iletkenler ve kullanım yerleri (Anonymous 2014).

Yarı iletken	Kullanım alanı
Germanyum (Ge)	Diyot, transistör, entegre devre
Silisyum (Si)	Diyot, transistör, entegre devre
Selenyum (Se)	Diyot
Bakır oksit (kuproksit) (Cu O)	Diyot
Galyum Arsenid (Ga As)	Tünel Diyot, laser, fotodiyot, LED
Indiyum Fosfor (In P)	Diyot, transistör
Kurşun Sülfür (Pb S)	Güneş pili (Fotosel)

2.3. n-Tipi Yarı İletkenler

Hem n-tipi hem de p-tipi yarı iletkenler, saf Ge veya Si malzemelere katkı atomu eklenerek elde edilmektedir. n-tipi yarı iletkenler, son yörüngesinde beş değerlik elektronu bulunan antimon (Sb), arsenik (As) ve fosfor (P) gibi katkı maddelerinin Ge ve Si gibi saf kristallere eklenmesiyle oluşturulur. Si yarı iletkenine, son yörüngesinde 5 elektron ihtiva eden Sb katkılандığında n tipi Si elde edilir (Şekil 2.2). Katkı atomları, kristal örgüdeki Si atomlarının yerini alır. Bunların 5 valans elektronundan dördü, kendisine komşu olan Si atomlarının birer elektronuyla kovalent bağ oluşturmaktadır. Beşinci elektron açıkta kalmaktadır ve bir bağ oluşturamaz. Bu elektron çekirdeğe çok zayıf bir şekilde bağlı bulunmaktadır. Bu elektronun atomdan uzaklaşması için gereken enerji, Ge için 0,01 eV ve Si için 0,05 eV'dir. Çoğunluk taşıyıcıları elektron olan yarı iletkenler n-tipi yarı iletkenler olarak adlandırılır.



Şekil 2.2. n-tipi yarı iletkende antimon katkısı

2.4. Organik Yarı İletkenler

Poliasetilen $[(CH_2)_n]$ ve polidiasetilen gibi birçok organik bileşik yarı iletkenlerdir. Organik yarı iletkenler yaygın olmasa da elektronik cihazlar ve gelecekteki uygulamalar için büyük umut vaat etmektedir. Organik yarı iletkenlerin inorganik yarı iletkenlere göre avantajı, uygulamalara kolayca uyarlanabilmeleridir. Bu bileşiklerin bant aralıkları kimyasal formüllerini değiştirerek uygulamaya uyacak şekilde inorganik yarı iletkenlerinkinden daha kolay değiştirilebilmektedir.

Polimer güneş pilleri, MEH-PPV ve organik PCBM ile üretilebilir. Organik güneş pilleri, inorganik yarı iletken güneş pillerinden daha ucuzdur. Organik güneş pillerinin yaygın olarak benimsenmesinin önündeki başlıca engeller olarak düşük verimlilikleri ve kısa ömürleri gösterilmektedir (Frederik et al. 2005).

Fotovoltaik (PV) malzemelerin verimliliği ile ilgili olarak, bazı araştırmacılar, organik PV malzemelerin sınırlayıcı faktörlerinin, esas olarak organik malzemelerin iletim ve ışık üretiminin temel özellikleri ve ince film organik malzemelerin ışık absorpsiyonu olduğuna inanmaktadır. Bazı çalışmalar, çözümün organik filmler arasındaki arayüzey özellikleriyle ve bazıları da metal elektrotun iş fonksiyonuyla ilgili olduğunu göstermiştir. Organik PV diyotların PV performansını iyileştirmek için

malzeme seçimi ve malzeme üretim teknikleri çok önemli rol almaktadır (Wen et al. 2006).

KTU (Kaunas University of Technology) Kimya laboratuvarlarında ki araştırmacılar hibrit solar hücrelerde kullanılmak üzere daha düşük maliyetli malzeme geliştirmişlerdir. Gratia et al. (2015) belirttiklerine göre; bulunan yeni malzeme, şu anda kullanılmakta olan muadiline göre oldukça daha ucuz ve birleşim sürecinde de daha az karmaşıklık olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca geliştirdikleri yeni materyal, solar enerjiyi elektriğe dönüştürmede eski materyal ile takriben aynı verimliliğe sahip olduğunu keşfetmişlerdir. Demek oluyor ki, iki materyal de yarı iletkenlik bakımından benzer şekilde özelliklere sahiplerdir. Yeni geliştirilen materyal eskisine kıyasla daha maliyetsiz ve ucuzdur. KTU aracılığıyla geliştirilen organik yarı iletkenleri içerisinde bulunduran solar hücreler, Lausanne’de fizikçiler tarafından da test edilip incelenmiştir. Araştırma sonuçlarının verilerine göre, bu hücrelerin solar enerjiyi elektriğe çevirme verimliliği %16,9 oranında olduğunu vurgulamışlardır.

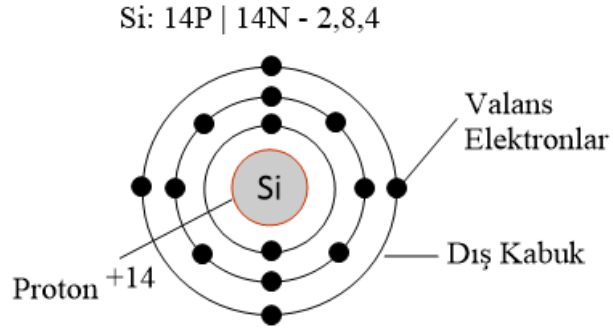
2.5 Silisyum Elementinin Özellikleri

Periyodik tabloda atom numarası 14, sembolü "Si" ve periyodik tablonun IV-A grubuna ait elementtir (Şekil 2.3). Metaller ve ametaller arasında yer alan metaloid bir elementtir. Si’nin en büyük özelliği yarı iletken olmasıdır. Elmas benzeri kristal yapıya sahip çok sert bir elementtir. Oda sıcaklığında inert ve kararlıdır. Isıtma reaktivitesini arttırmaktadır. Çinko, gümüş ve kurşun gibi metallerde çözünür. Halojenli halojen bileşikleri vardır (flor, iyot vb.). Magnezyum ve diğer metallerle silikatlar oluşturmaktadır. Si yarı iletkenine ait bazı temel özellikler Çizelge 2.2’de verilmiştir (Özçelik 2013).

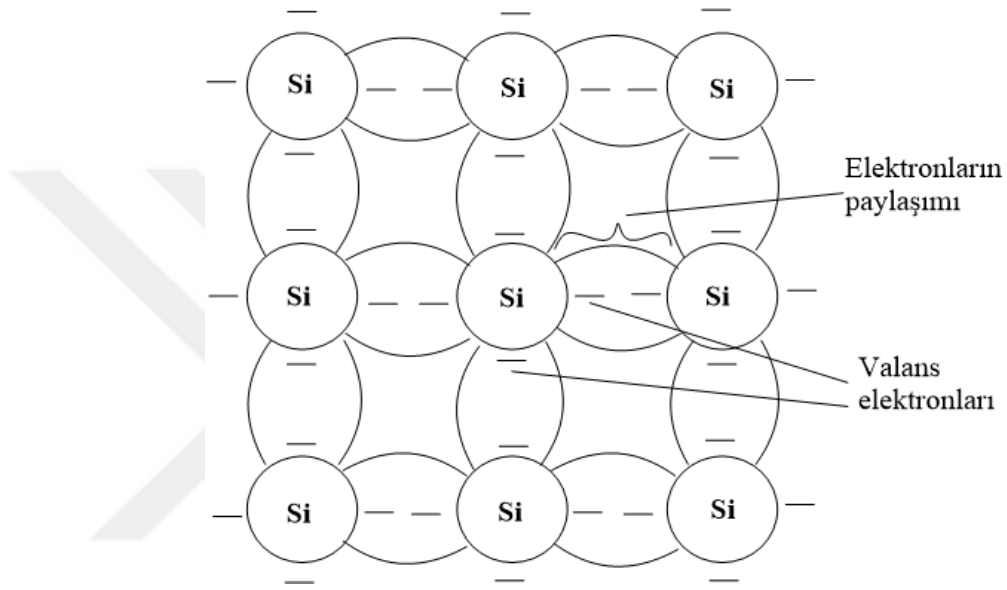
Çizelge 2.2. Silisyuma ait temel özellikler (Özçelik 2013)

Latince Adı	Silex
Sembolü	Si
Grubu	4A
Atom Numarası	14
Elektron Dizilimi	$3s^2 3p^2$
CAS numarası	7.440-21-3
Rengi	Kurşuni
Yoğunluk (g/cc)	2,33
Erime Noktası (K)	1.683
Kaynama Noktası (K)	2.628
Atom Hacmi (cc / mol)	12,1
Yasak band genişliği, 0 K(eV)	1,21
Yasak band genişliği, 300 K(eV)	1,12
Özdirenç, 300 K (Wcm)	$2,3 \times 10^{10}$
Elektronların alınganlığı (eV)	4,01
İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu (cm ⁻³)	$2,8 \times 10^{19}$
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu (cm ⁻³)	$1,02 \times 10^{19}$
Elektronların etkin kütlesi (m_n^*/m_o)	0,98; 0,19

Si atomunun dış kabuğunda dört elektron ($3s^2 3p^2$) bulunmaktadır. Bir Si kristali oluştuğunda, her Si atomunun dört değerlik elektronu ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçiş yapmaktadır. Bu yapıda, her bir Si atomunun dört değerlik elektronu, komşu atomlara kovalent olarak bağlanmıştır (Şekil 2.4). Si'de ki her kovalent bağın iki elektronu vardır. Si örgüsünde her atom, çevresinde dört komşu bulunan bir tetrahedronun merkezindedir.



Şekil 2.3. Silisyumun atomik yapısı



Şekil 2.4. Silisyumun kovalent bağ yapısı

2.6. Metal-Yarı İletken Kontaklar

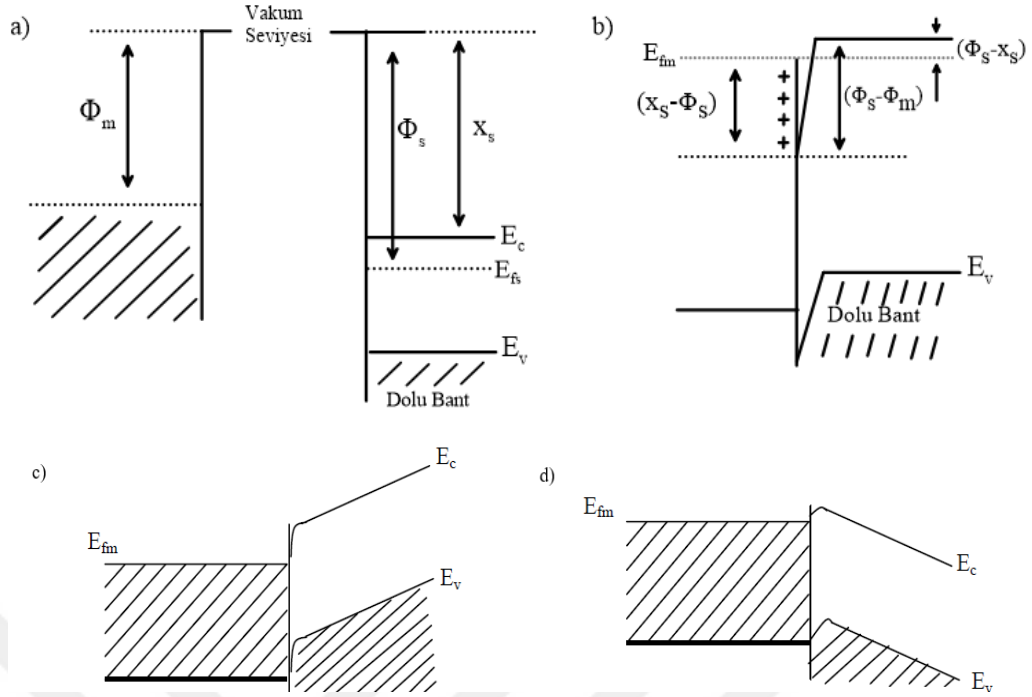
M-S kontaklar, tüm yarı iletken devre elemanlarında var oldukları için çok önemlidir. Çoğu mikro elektronik cihazın çalışma prensibi, M-S ve p-tipi yarı iletken/n-tipi yarı iletken (p-n eklemi) kontakların fiziksel özelliklerine dayanmaktadır. Kontak, bir kristal ile kristal üzerinde atomik olarak biriken ve en düşük dirence sahip olduğu kabul edilebilecek bir kontak malzemesi arasındaki temastır. Kontakın idealliği, kontak malzemesinin temiz, pürüzsüz yüzeyleri ile doğrudan ilişkilidir. Ara yüzeyin özelliklerine bağlı olarak kontak, Schottky engeli veya omik kontak görevi görebilir. Schottky diyotlarının karakteristik parametrelerini, yalıtkan ve yarı iletken kristallerin iletken özelliklerini anlamamanın bir yolu, kristallere uygun kontaklar kurmaktır. Diyotlar, transistörler, tünel diyotları, Schottky diyotları bu tür doğrultucu kontaklardan yapılmaktadır.

2.6.1. Metal n-tipi yarı iletken omik kontaklar

Omik kontak, metalin iş fonksiyonu yarı iletkeninkinden daha küçük olduğunda ($\Phi_m < \Phi_s$) oluşur. Bir metal n-tipi yarı iletkenin omik kontağı gerçekleşmeden önce, yarı iletkenin Fermi seviyesi, metalin Fermi seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) aşağıdadır (Şekil 2.5.a). Kontak sonrasında metalden yarı iletkene geçen elektronlar geride pozitif boşluk bırakırlar ve yarı iletken yüzeyindeki bu elektronlar bir negatif yüzey yükü tabakası oluşturur (Şekil 2.5.b). Metal tarafına $+V$ gerilim uygulandığında ise yarı iletken metale doğru akan elektronlar için engel yoktur ve elektronlar bu yönde kolaylıkla hareket edebilmektedir (Şekil 2.5.c). Yarı iletken tarafına $+V$ gerilim uygulandığında, elektronlar için engel yüksekliği çok düşüktür ve elektronlar kolaylıkla metalden yarı iletkene doğru hareket ederler (Şekil 2.5.d).

Başka bir deyişle, elektronların her iki doğrultuda da kolaylıkla hareket edebildiği kontak durumuna omik kontak denir.

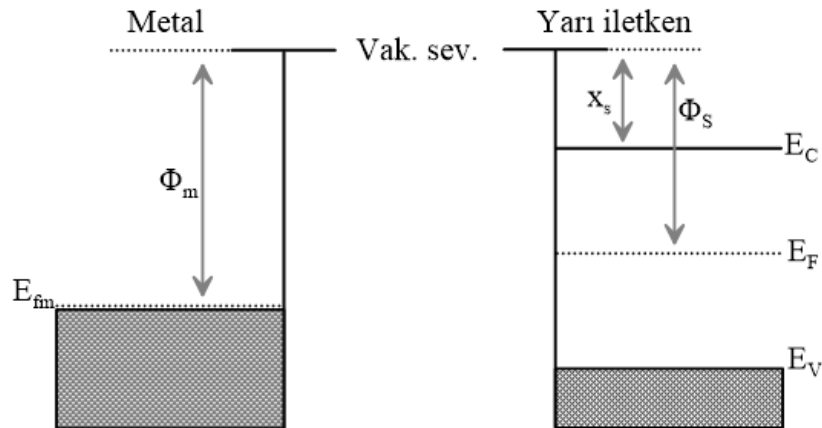
Kontaktan sonra termal denge durumunda, elektronlar metalden yarı iletkene doğru geride pozitif boşluklar bırakarak geçerler. Yarı iletken yüzeyindeki bu elektronlar bir negatif yüzey yükü tabakası meydana getirirler. Yine metalden ayrılan elektronlar geride bir yüzey yükü tabakası (pozitif yük dağılımı) meydana getirirler ve böylece kontak bölgesinde bir dipol tabakası oluşur. Bu durum Şekil 2.9 (b)'de görülmektedir. Yük mübadelesi bittikten sonra, yarı iletken gövdedeki Fermi seviyesi ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar yükselir (Ziel 1968).



Şekil 2.5. $\Phi_m < \Phi_s$ durumu için metal/n-tipi yarı iletken omik kontakta ait enerji bant diyagramı a) Kontak öncesi b) Kontak sonrası c) Düz beslem altında d) Ters beslem altında.

2.6.2. Metal/n-tipi yarı iletken schottky (doğrultucu) kontaklar

Metalin iş fonksiyonu Φ_m , yarı iletkenin iş fonksiyonu Φ_s ve yarı iletkenin elektron ilgisi χ_s olmak üzere, $\Phi_m > \Phi_s$ olsun (Şekil 2.6). Bir metal- n-tipi yarı iletken kontakta $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda oluşan bir kontak, Schottky (doğrultucu) kontak olarak tanımlanmaktadır. Schottky kontakta, elektronların potansiyel engel nedeniyle bir yönde hareket etme ve ters yönde hareket etme olasılığı daha düşüktür.



Şekil 2.6. Metal ve n-tipi yarı iletkenin enerji-bant diyagramları (Kontakt öncesi)

Metalin kontakta önce ki Fermi seviyesi, yarı iletkenin sahip olduğu Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağıdadır. Bir metal ile bir yarı iletken kontak yapıldığında, yarı iletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metalde bulunan elektronlardan daha yüksek enerjiye sahiptirler. Yarı iletkenden metale doğru yük geçişi gerçekleşir, yarı iletkenin enerji seviyesi ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar azalır (şekil 2.7) ve iki malzemenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Böylece termodinamik denge kurulur.

M-S ara yüzeyinde yüklerin ayrışmasıyla oluşan dipol tabakasından dolayı bir potansiyel engeli oluşur. Bu engelin metal tarafındaki yüksekliği ($\Phi_m - \chi_s$) olarak ve yarı iletken tarafındaki yüksekliği;

$$eV_{dif} = (\Phi_m - \Phi_s) \quad (2.1)$$

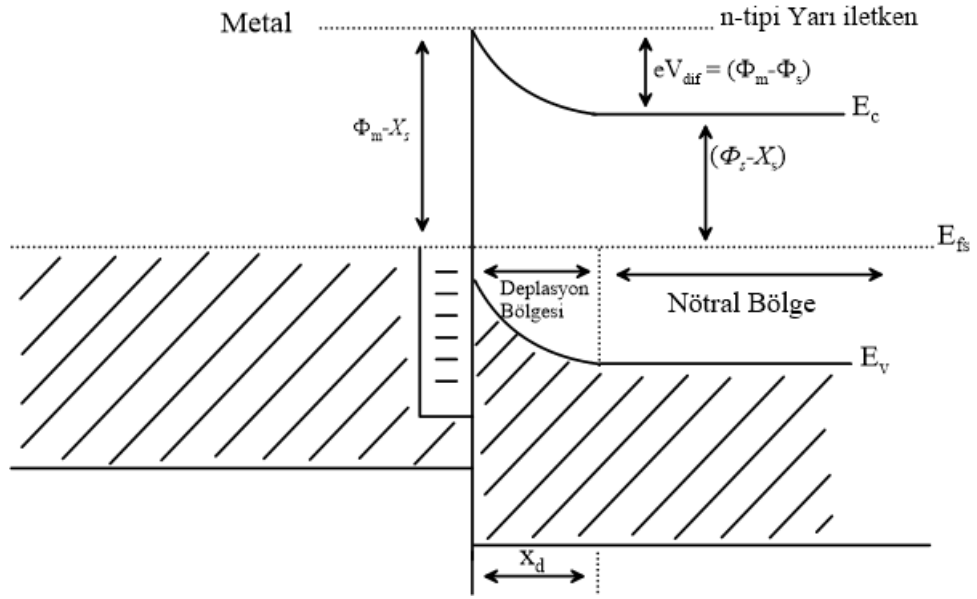
şeklinde ifade edilir.

İyonize donörlerin neden olduğu ve kontağın yarı iletken tarafındaki sabit pozitif yük katmanına uzay yükü katmanı denir. Bu tabakanın kalınlığı d 'dir ve difüzyon potansiyeline ve iyonize donör konsantrasyonuna bağlıdır. Termal olarak uyarılan bazı elektronlar potansiyel engeli geçmek için yeterli enerjiye sahip olur. Metalin bazı elektronları yarı iletkene ve yarı iletkenin bazı elektronları metale geçer. Bu geçişler, denge durumunda eşit ve zıt I_0 akımlarına sebep olacaktır.

Yarı iletken tarafına $+V$ gerilim uygulandığında metalden yarı iletkene geçen elektronlar için engel yüksekliği ve akımı değişmez. Ancak yarı iletkenden metale doğru geçen elektronlar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Bu nedenle metalden yarı iletkene doğru olan akım $\exp(eV_a/kT)$ artar ve net akım;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

olacaktır. ($V \gg kT/e$) durumuna düz beslem adı verilmektedir. Uygulanan voltaja bağlı olarak yarı iletkenin potansiyel engelinin yüksekliği değişmektedir ve metal tarafındaki engel yüksekliği uygulanmakta olan gerilimden bağımsızdır. $V > 0$ ise metal/n-tipi yarı iletken doğrultucunun kontağında kontak ters beslemde olmaktadır.



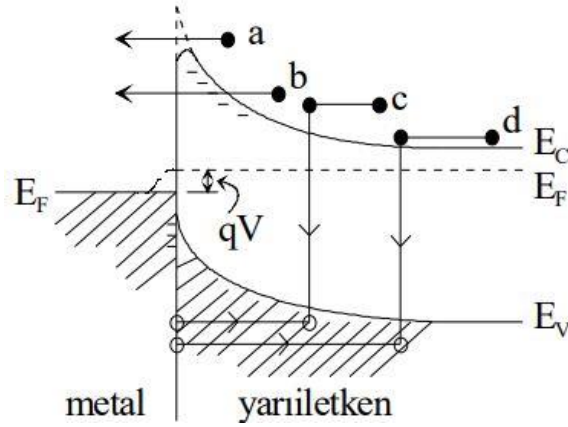
Şekil 2.7. Kontakta sonra termal denge durumunda oluşan enerji-bant diyagram

2.6.3. Metal yarı iletken kontaklarda akım iletim mekanizmaları

M-S kontaklarda akım iletimi genellikle çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanmaktadır. M-S kontaklarda, seri direnç (R_s), arayüzey oksit tabaka kalınlığı (d_{ox}), sıcaklık, arayüzey durum yoğunluğu (N_{ss}), besleme voltajı tipi vb. parametreler, yarı iletkenin türü ve tipi Schottky diyotlardaki akım iletim mekanizmasını etkilemektedir. Bu parametrelerin etkisi altında hangi aktarım mekanizmasının hangi koşullarda en doğru sonuçları vereceğini belirlemek çok fazla önem arz etmektedir (Sze 1981).

Düz beslem altında M-S kontaklarında kullanılan temel akım aktarım mekanizması aşağıda sıralanmıştır (Şekil 2.8);

- * Termoyonik Emisyon Teorisi (TE)
- * Difüzyon Teorisi
- * Termoyonik Difüzyon-Emisyon Teorisi (TED)
- * Uzay-yükü bölgesinde oluşan yeniden birleşim olayı
- * Kuantum Mekanik Tünelleme (TAE, AE)
- * Deşik enjeksiyonu
- * Yüksüz bölgede yeniden birleşim olayı



Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarı iletkende doğru beslem altında akım iletim mekanizması: (a) Potansiyel engelin tepesini aşan elektronların iletimi, (b) kuantum mekaniksel tünelleme, (c) uzay yük bölgesinde oluşan yeniden birleşim olayı, (d) doğal bölgede deşik enjeksiyonu.

2.7. Termioyonik Emisyon Teorisi

M-S kontakları, fazla mobiliteli yarı iletken malzemelerden oluşmaktadır. Yarı iletkenlerden metale veya metalden yarı iletkene Schottky bağlantısında yeterli termal enerji kazanılınca taşıyıcıların potansiyel bir bariyerden geçişi olarak bilinir. Metal-n-yarı iletken kontaklarda akım elektronlar aracılığıyla gerçekleştirilir. Metal-p-yarı iletken kontaklarda ise bu görev deşikler tarafından gerçekleştirilmektedir (Ziel 1968; Sze 1981).

Termioyonik Emisyon Teorisi hakkında ki varsayımlar:

- * Potansiyel engel yüksekliği kT/q enerjisinden çok daha yüksektir.
- * Schottky tarafında yük taşıyıcı çarpışması yoktur. Yük taşıyıcıların ortalama serbest yolu, Schottky tabakasının kalınlığından büyüktür.
- * Hayali kuvvet etkisi ihmal edilir. Akım, engel yüksekliğine zayıf bir şekilde bağlıdır.

Bu varsayımlara göre, ideal metal/n-yarı iletken Schottky diyotlarda yarı iletkenlerden metale doğru termioyonik emisyon akım yoğunluğu uygulanan gerilimden bağımsızdır. Çünkü metalden yarı iletkene hareket eden elektronlar için engel yüksekliği aynı kalır. J_{sm} eşitliği,

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-e(\phi_B)}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.3)$$

ile verilir. Buradan da;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_B}{kT} \right] \exp \left(\frac{eV}{kT} \right) \quad (2.4)$$

ifadesi yazılır.

Richardson sabiti;

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (2.5)$$

ifadesine eşittir. Metalden yarı iletken akım,

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp \left[\frac{-e\phi_B}{kT} \right] \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Toplam akım yoğunluğu denklem (2.5) ve (2.6) denklemlerinin toplamıdır.

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

şeklinde ifade edilmektedir.

Burada J_0

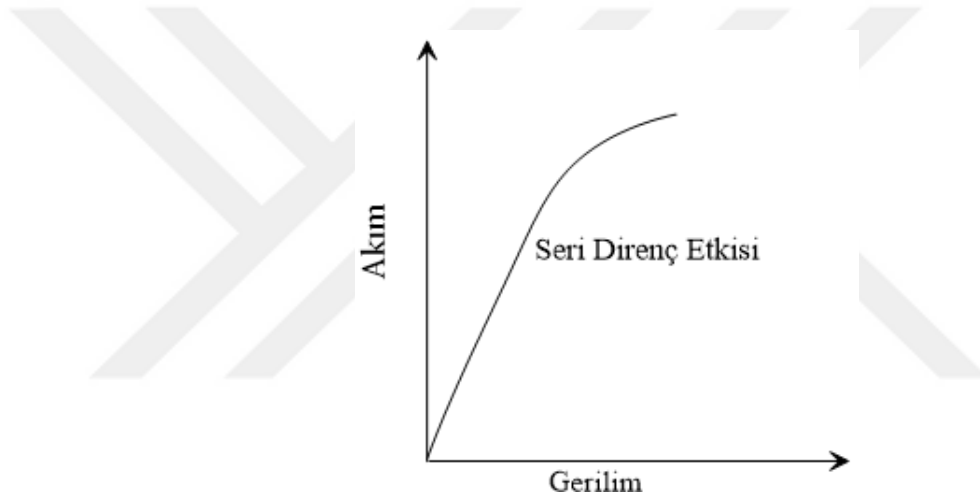
$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e(\phi_B)}{kT} \right) \quad (2.8)$$

doyma akım yoğunluğudur. $e = 1,6 \times 10^{-19}$ C elektronun yükü, $k = 8,625 \times 10^{-5}$ eV/K Boltzmann sabiti ve T, Kelvin cinsinden ortamın sıcaklığıdır.

2.8. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi

Metal-yarı iletken doğrultucu birleşimleri için yarı iletken tarafında oluşan tükenme bölgesi dışındaki nötr bölgenin direnci seri direnç olarak adlandırılır ve R_s ile gösterilir. Seri direnç diyotta güç kaybına neden olmaktadır.

Metal-yarı iletken Schottky diyotların düz beslemde I - V analizi, diyotların yüksek voltaj aralığında seri direncin etkisinden dolayı idealden saptığını göstermektedir (Şekil 2.9). Literatürde seri direnç etkisini matematiksel olarak hesaplamak için çeşitli seri direnç modelleri tanımlanmıştır (Norde 1979; Cheung and Cheung 1986).



Şekil 2.9. Seri direncin I - V karakteristiğine etkisi

2.9. Carmine Boyar Maddesi

Carmine, alüminyum ve kurutulmuş dişi *Dactylopius coccus* artropodlarından ekstrakte edilen doğal renklendirici kokineal maddesinin karışımından oluşan değerli bir "yarı-sentetik kırmızı" boyadır. Carmine ($\lambda_{\max} = 531\text{nm}, 563\text{nm}$) yoğun kırmızı veya doğal kırmızı renk için genel bir terim olarak da kullanılmaktadır. Isıya, ışığa ve oksidasyona karşı yüksek dirence sahip olması ve toksik, kanserojen veya mutajenik olmaması sebebiyle kozmetik, ilaç ve gıda sektörlerinde carmine rengi sıkça kullanılır. Carmine, normal ortam koşulları altında nispeten kararlıdır. Gıda ve tekstil sektörlerinde renklendirici, tıp alanında ise antiviral ve antikanser ajan olarak kullanılmaktadır (Dapson 2007; Kunkely and Vogler 2011).

Carmine, renklendirme materyallerinin açığa çıkmasından önce genellikle sulu boyalar için yaygın olarak kullanılmıştır. Carmine, antik çağlardan bu yana tekstillerin boyamasında ve boyama alanında oldukça kullanılmıştır. Carmine elde etmek amacıyla kullanılan böcekler hala Meksika ve Hindistan'da gıdalar, içecekler, kozmetik ve boya renkleri için kalıcı parlak carmine sağlamak için yetiştirilmektedir.

Carminenin hazırlanılabilmesi için, toz haline getirilmiş böcek gövdeleri amonyak veya kristal soda çözeltisi içerisinde kaynatılmaktadır. Çözünmeyenler süzülür ve kırmızı alüminyum tuzlarını çöktürmek için karminik asidin berrak tuz çözeltisine şap eklenir. Çökelti oluşumunu kontrol etmek için kalay klorür, sitrik asit, boraks veya jelatin eklenebilmektedir. Mor ve tonlarını elde etmek için şapın içerisine kireç eklenmektedir. Kimyasal olarak karminik asit, karmaşık bir antrakinon türevidir (Anonymous 2022).

Renk İndeksi (CI) doğal kırmızı 4'tür (75470). İletilen ışıktaki oldukça şeffaf görünmektedir. Çift kırılma veya polarizasyon renkleri sergilemez ve bu nedenle çapraz kutuplar altında matlaşır ve siyaha kararmaktadır (Fleming 1983).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Giriş

Bu çalışmada, carmine ince filmleri cam ve n-Si alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Filmler alttaşlar üzerine kaplanırken aynı prosedür izlenmiştir. Au/Carmin/n-Si/Ag diyotlarının üretiminde 400 µm, kalınlığa, 5–10 Ω.cm öz direnç değerine sahip n-Si (100) alttaşlar kullanılmıştır.

3.2. Numunelerin Temizlenmesi

Bu çalışmada öncelikle n-Si örneği iki parçaya bölünmüş ve parçalardan biri referans Au/n-Si/Ag diyodunu elde etmek için kullanılmıştır. Kontak oluşturulmadan önce, n-Si alttaşının yüzeyinde bulunan kontaminasyonlar geleneksel teknikler kullanılarak temizlenmiştir. Kimyasal temizleme işlemleri aşağıdaki adımların sırası ile uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir.

- 1) Temizlik işleminde kullanılan beherler saf su ile yıkanmıştır.
- 2) Ultrasonik banyoda temas metaller (Ag ve Au) aseton, etanol ve deiyonize su ile yıkanmıştır.
- 3) Si, ultrasonik banyoda aseton içerisinde 10 dakika yıkanmıştır.
- 4) Si, ultrasonik banyoda metanol içerisinde 10 dakika yıkanmıştır.
- 5) Si, ultrasonik banyoda deiyonize su ile 10 dakika bekletilip sonrasında tekrar deiyonize su ile yıkanmıştır.
- 6) RCA1 prosesi uygulanmıştır. (H_2O : H_2O_2 : NH_3 (5:1:1) çözeltisinde 15 dakika 60 °C’de kaynatılmıştır.)
- 7) Ultrasonik banyoda deiyonize su içerisinde ardından deiyonize su ile yıkanmıştır
- 8) RCA2 prosesi uygulanmıştır. (H_2O : H_2O_2 : HCl (6:1:1) solüsyonunda 15 dakika 60°C’de kaynatılmıştır.)
- 9) Ultrasonik banyoda deiyonize su içerisinde bekletilip ardından yıkanmıştır.
- 10) HF : H_2O (1:10) çözeltisi içerisinde 30 saniye yıkanmıştır.
- 11) Ultrasonik banyoda deiyonize su içerisinde bekletilip ardından yıkanmıştır.
- 12) Basınçlı azot (N_2) gazı ile kurutulmuştur.

3.3. Diyotların Üretilmesi

Temizlik işleminden sonra, omik kontak işlemine geçilmiştir. n-Si alttaşlarının parlatılmamış tarafına VAKSIS Pvd Termal buharlaştırma cihazı kullanılarak (Şekil 3.1) Ag metali $\sim 10^{-6}$ Torr'da buharlaştırılarak kaplanmıştır. Sonrasında, n-Si alttaşlar üzerinde düşük dirençli omik kontak sağlamak için N₂ ortamında 420 °C'de 3 dakika tavlama fırınında (Şekil 3.2) ısıtılma işlemine tabi tutulmuştur.



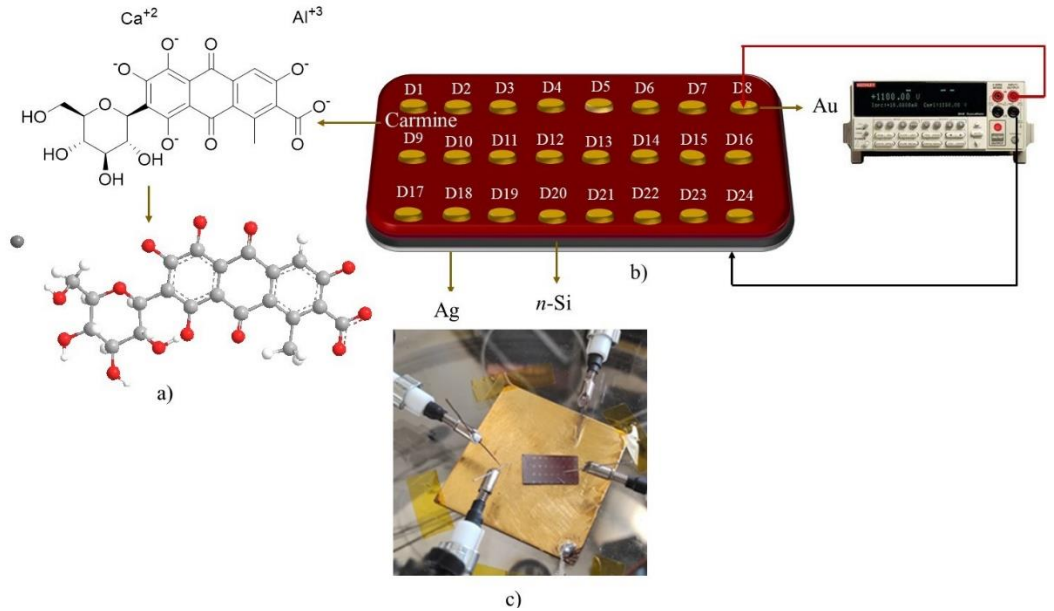
Şekil 3.1. VAKSIS Pvd termal buharlaştırma cihazı



Şekil 3.2. Tavlama fırını

Satın alınan 0,1 g Carmine, 10 ml metil alkol içinde çözündürülerek ışıksız bir ortamda saklanmıştır. Bu çözelti, temizlenmiş n-Si alttaşlardan birinin parlak yüzeyine

ve cam yüzeyine spin kaplayıcı kullanılarak 1500 rpm ile uygulanılmış olup ve kurumaya bırakılmıştır. Üretilen filmin morfolojik özelliklerini incelemek için Seg Quanta Feg 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Son olarak, elektriksel ölçümleri yapmak için kimyasal formülü $C_{22}H_{20}O_{13}$ olan ve molekül yapısı Şekil 3.3.a'da verilen Carmine ince tabakası (diyet alanı $A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$) üzerine ve referans olarak kullanılacak diyeti elde etmek için Au metali n-Si alttaşlar üzerine 10^{-6} Torr'da buharlaştırılmıştır Böylece referans Au/n-Si/Ag diyeti ile 24 üst kontak noktasına sahip Au/Carmine/n-Si/Ag yapısı elde edilmiştir. Bu kontak noktaları sırasıyla D1,..., D24 olarak (Şekil 3.3.b) olarak adlandırılmıştır. Cam üzerine kaplı bulunan carmine ince filminin absorpsiyon (soğurma) spektrumu, oda sıcaklığında Perkin Elmer Lambda 35 UV/Vis Spektrometresi kullanılarak alınmıştır. Ayrıca, diyetlerin karakteristik parametreleri üzerindeki ışığın etkisini belirlemek için, I - V ölçümleri COINC-16S-150-002 Güneş Simülatörü ve Keithley 2400 kullanılarak oda sıcaklığında görünür ışık altında alınmıştır. C - V ölçümleri, HP 4192A (50 Hz -13 MHz) LF impedans analizörü ile oda sıcaklığında ve karanlıkta alınmıştır. Üretilen diyetün şematik gösterimi ve deneysel düzenek kurulumu, sırasıyla Şekil 3.3 b ve c'de gösterilmiştir (Bodur et al. 2023).

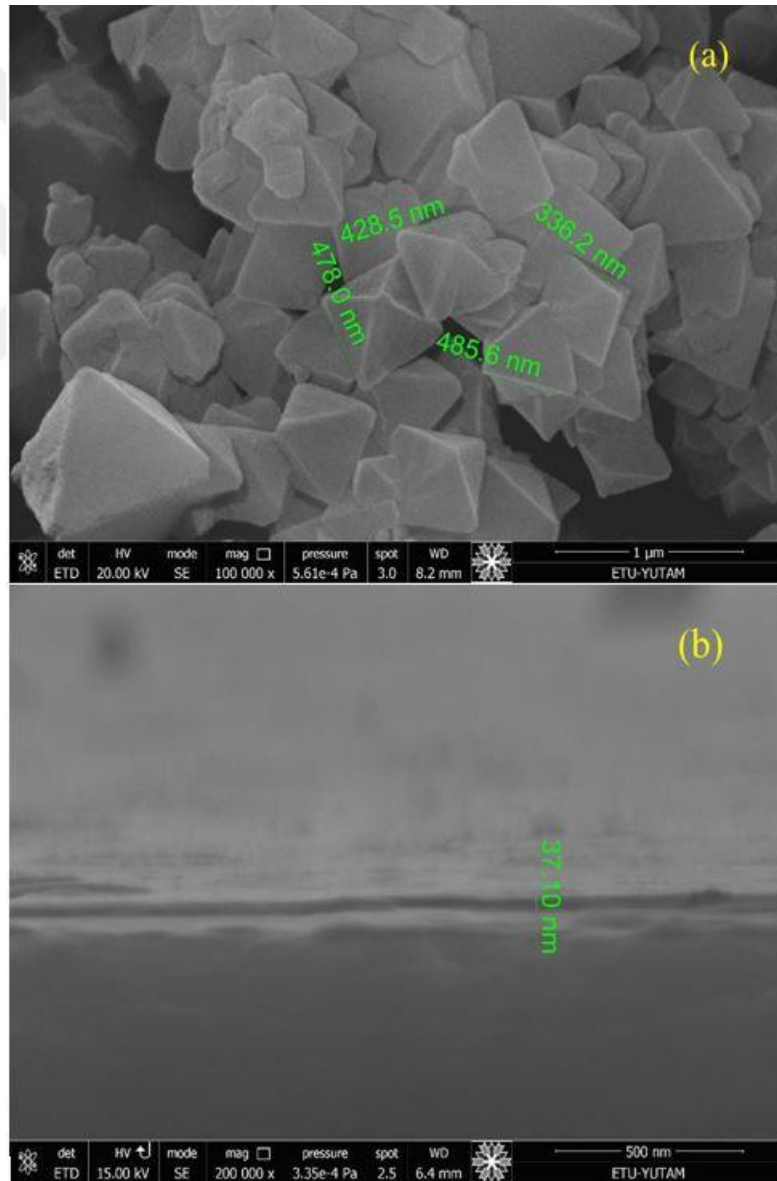


Şekil 3.3. a) Carmine molekül yapısı b) üretilen diyetlerin şematik gösterimi ve c) deneysel düzenek (Bodur et al. 2023).

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

4.1. Carmine Boyar Maddesinin İncelenmesi ve Diyot Üzerinde Etkisi

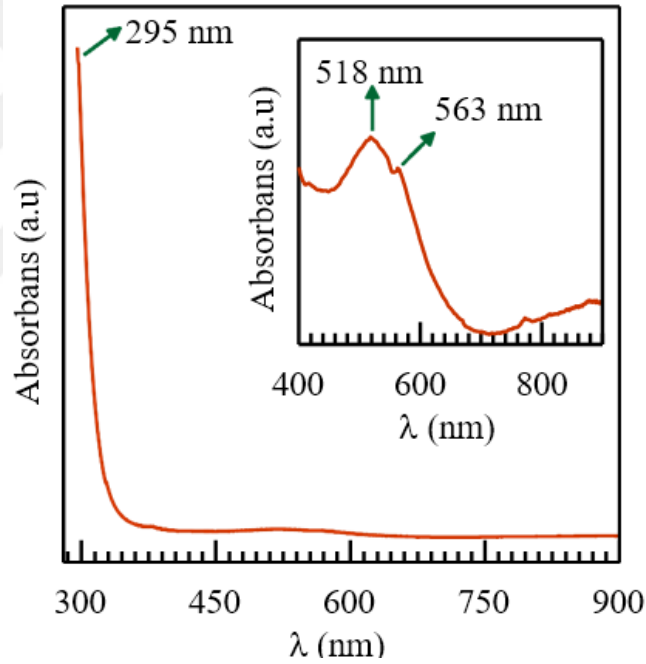
Carmine ince filmlerin morfolojisi SEM kullanılarak analiz edilmiştir ve Carmine/n-Si yapısının SEM görüntüleri Şekil 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.1(a) ince carmine katmanının birçok nanoparçacıktan oluştuğunu göstermektedir. Yanal kesit görüntüsünden (Şekil 4.1(b)) carmine ince filminin kalınlığı 37,1 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.1. Carmine/n-Si/Ag yapısının a) yüzey ve b) yanar kesit SEM görüntüleri (Bodur et al. 2023).

Şekil 4.2, cam üzerine kaplanan carmine ince filminin absorpsiyon spektrumunu göstermektedir. Rosu et al. (2013) tarafından carmine boya çözeltisinin tipik absorpsiyon piklerinin 281 nm, 332 nm, 515 nm ve 553 nm olmak üzere daha uzun dalga boyuna doğru kayma gösterdiği belirtilmiş ve konjüge çift bağ yapısındaki $\pi-\pi^*$ elektronik geçişlerinden kaynaklandığı açıklanmıştır (Bodur et al. 2023).

Akkaya et al. (2019) ise carmine ince filminin, görünür dalga boyu aralığında 522 nm ve 553 nm’de absorbans pik değerlerine sahip olduğunu belirtmiştir. Şekil 4.2’de gösterildiği gibi, carmine ince filminin görünür bölge içinde 518 nm ve 563 nm’de sergilediği absorbans pikleri, Rosu et al. (2013) ve Akkaya et al. (2019) tarafından elde edilen sonuçlarla uyumludur.



Şekil 4.2. Cam üzerine kaplanan Carmine ince filminin 295-900 nm aralığındaki soğurma spektrumu (400-900 nm aralığı şekil içinde gösterilmiştir.) (Bodur et al. 2023).

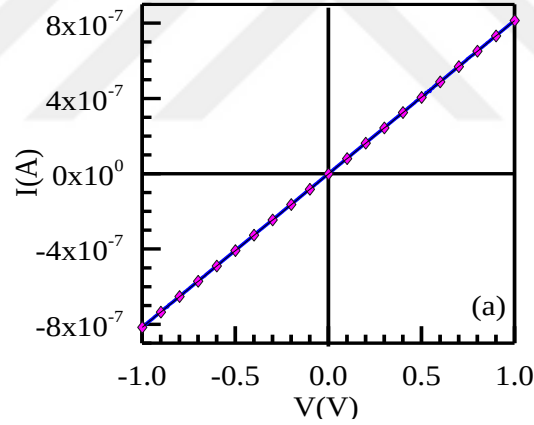
Elektriksel performansın tekrarlanabilirliğini doğrulamak için 24 adet üst kontak noktasına sahip Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu üretilmiştir. Au/n-Si/Carmine/Ag diyodunun fotovoltaiik ve fotodiyot performansını belirlemek için *I-V* ölçümleri karanlıkta ve gün ışığı altında alınmıştır (Şekil 4.3). Sonuçlar hem karanlıkta hem gün ışığı altında Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının benzer doğrusal olmayan ve asimetrik *I-V*

karakteristiğe sahip olduğunu göstermiştir. Buna göre, Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının üretim proseslerinin tekrarlanabilir olduğu söylenebilir.

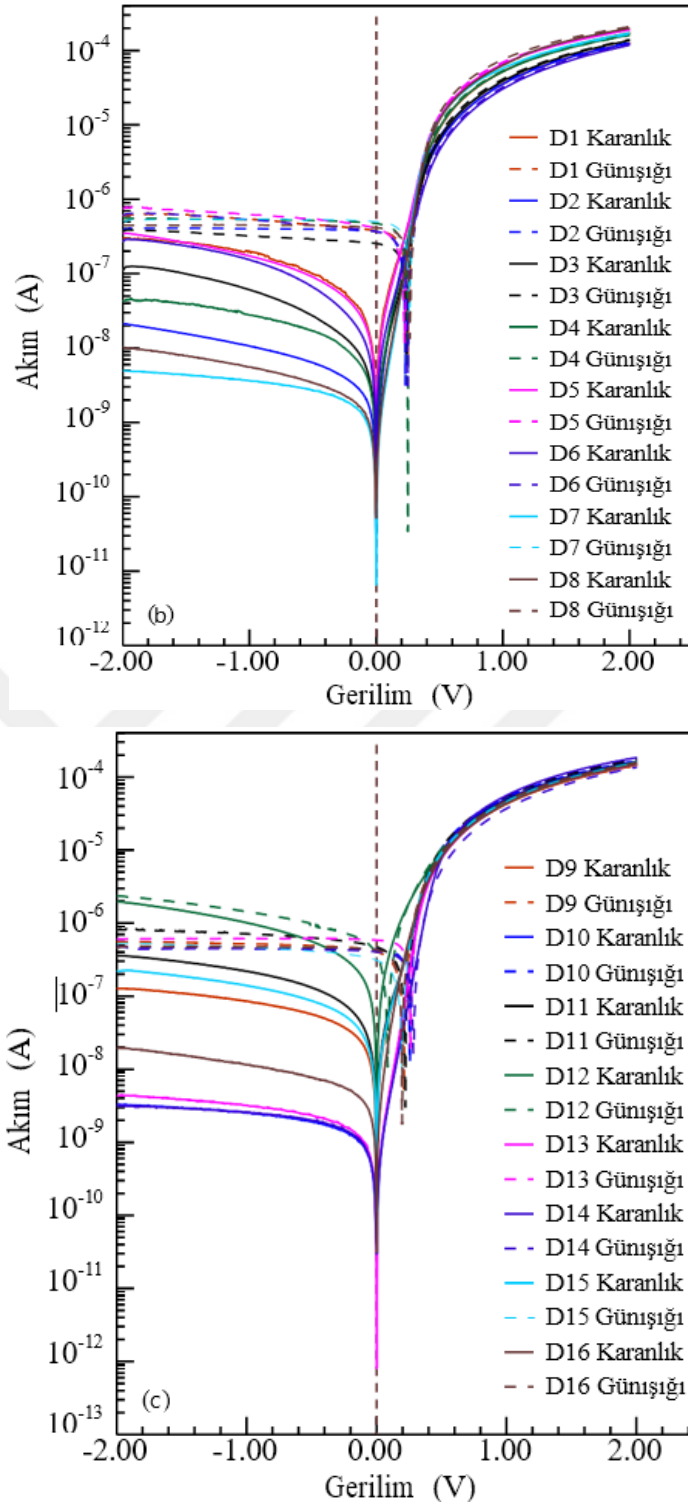
4.2. Termoiyonik Emisyon Teorisi ve Norde Fonksiyonları ile Karakteristik Parametrelerin Hesaplanması

Şekil 4.3.a’da gösterildiği gibi, carmine üzerindeki üst yüzey iki kontak arasında ölçülen I - V karakteristiği doğrusal olup, Ag tarafından oluşturulan omik kontakların varlığını göstermektedir. Şekil 4.3 (b), (c) ve (d) karanlıkta ve gün ışığı altında alınmış 24 adet I - V karakteristiği verilmiştir.

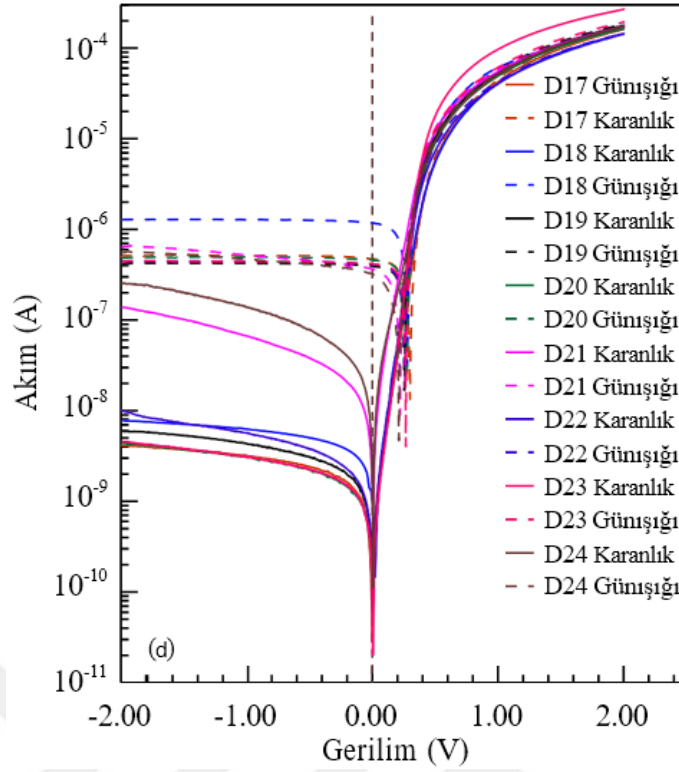
Diyotlar, özellikle ters beslem bölgesinde gün ışığına duyarlılık göstermişlerdir. Ancak, düz beslem akım değerinde gün ışığı altında önemli derecede değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil 4.3. a) Carmine üzerindeki üst yüzey iki kontak arasında ölçülen I - V karakteristiği. Aynı şartlarda hazırlanan b) 1-8, c) 9-16 ve d) 17-24 numaralı Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının karanlıkta ve gün ışığı altındaki I - V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).



Şekil 4.3. (Devam)



Şekil 4.3. (Devam)

Üretilen diyotların kalitesi düz beslem akımının (I_{forward}) ters beslem akıma (I_{reverse}) oranı olan akım doğrultma oranı (RR) ile belirlenir. Şekil 4.3'te verilen grafiklere göre tüm Au/n-Si/Carmine/Ag diyotları doğrultucu davranış sergilemiştir. +2 ile -2 V aralığında diyotların RR değerleri 10^2 ile 6×10^4 aralığındadır. 11 diyot 10^4 mertebesinde yüksek akım doğrultma oranına sahip olduğu (Çizelge 4.1), bu değerlerin gün ışığı altında azaldığı görülmüştür.

Orta derecede katkılı yarı iletkenlerden yapılan M-S doğrultucu kontaklarında baskın olan akım mekanizması Termoyonik Emisyon (TE) teorisi ile açıklanır. TE teorisine göre, yalnızca potansiyel engelden daha büyük enerjiye sahip yük taşıyıcıları engelden geçebilir ve bir akım üretebilir. Aşağıda verilen denklemler bir doğrultucu diyotta akım ve voltaj arasındaki ilişkiyi tanımlar (Rhoderick and Williams 1988).

$$I = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{ev}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Satürasyon akımı I_0 ;

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right) \quad (4.2)$$

denklemleri ile verilir.

Engel yüksekliği (Φ_b , BH) ve idealite faktörü (n , IF) değerleri, düz beslem I - V ölçümlerinin lineer kısmına uygulanan fit yardımıyla hesaplanır. I_0 , fit çizgisinin $V = 0$ 'da düşey eksenini kestiği noktadan belirlenir. Denklem (4.1) ve (4.2)'de kullanılan e , elektronik yük, T Kelvin cinsinden numune sıcaklığı, A^* Richardson sabiti (n-tipi Si için $A^*=112 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$), k Boltzmann sabiti ve A etkin diyot alanıdır ($A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$). Fit çizgisinin eğimi, Denklem (4.3)'te n değerini belirlemek için kullanılır.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I - 1)} \quad (4.3)$$

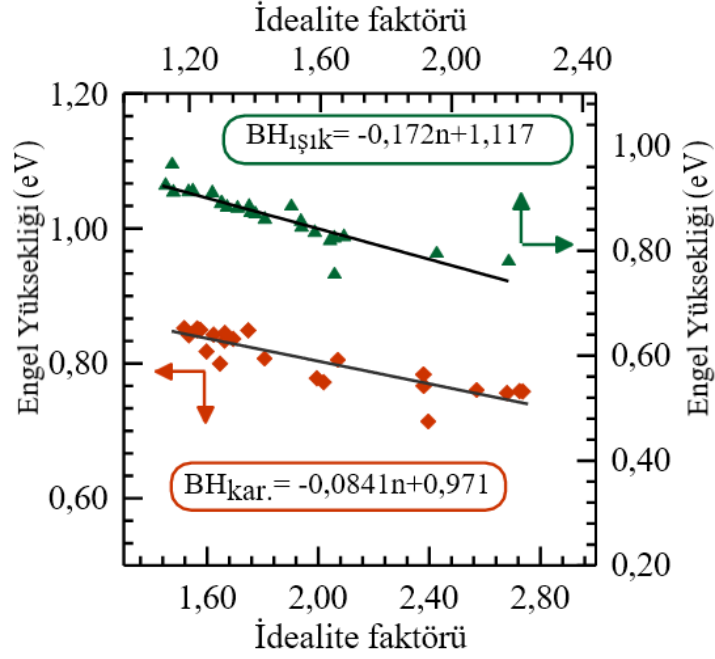
Yalnızca TE'nin geçerli olduğu ideal bir M-S doğrultucu için n değeri 1'dir. Bununla birlikte, görüntü kuvveti etkisi, arayüzey durumları, tünelleme ve jenerasyon-rekombinasyon akımları, engel inhomojenliği, arayüzey yüklerinin homojen olmayan dağılımı, homojen olmayan film kalınlığı ve seri direnç R_s etkisi dahil olmak üzere çeşitli nedenlerden dolayı n değeri 1'den büyük olabilir (Cetin and Ayyildiz 2005; Rhoderick and Williams 1988).

Tüm diyotlarda Φ_b değerini bulmak için Denklem (4.4) kullanılmıştır.

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

Hesaplanan n ve Φ_b değerleri Çizelge 4.1'de sunulmuştur. Bu değerler Au/n-Si/Ag referans diyodu için karanlıkta 1,53 ve 0,77 eV olarak hesaplanmıştır. 24 adet Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu aynı alttaş üzerinde hazırlanmış olsada diyotların n ve Φ_b değerleri sırasıyla karanlıkta 1,52 ile 2,74 ve 0,72 ile 0,85 eV arasında, gün ışığı altında sırasıyla 1,13 ile 2,17 ve 0,76 ile 0,96 eV arasında değişmektedir. Diyotlar karanlıkta yüksek Φ_b ve düşük sızıntı akım (10^{-8} - 10^{-10} A) değerlerine sahiptir. Gün ışığında 24 diyot için hesaplanan n değeri karanlıkta hesaplanan değerlere göre daha düşüktür.

Şekil 4.4, Φ_b değeri azaldıkça n değerinin arttığını göstermektedir. $n=1$ 'e göre ekstrapolasyon yapılarak hesaplanan Φ_b değeri, karanlıkta 0,89 eV ve gün ışığında 0,94 eV'dir. Şekil 4.4'te verilen 24 adet Au/n-Si/Carmine/Ag diyodundaki Φ_b ve n arasındaki doğrusal (lineer) ilişki, Φ_b 'nin yanal inhomojenliği (homojen olmaması) ile açıklanabilir (Tung 1992; Cetin and Ayyildiz 2005).



Şekil 4.4. 24 Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu için Φ_b - n grafiği (Bodur et al. 2023)

Organik carmine ile inorganik n-Si yarı iletkeni arasındaki arayüzeyde potansiyel engel oluşur. Bu potansiyel engel, Au/Carmine kontağından inorganik n-Si yarı iletkenine yük enjeksiyonunu kontrol etmektedir. Ters beslem durumunda, Ag arka omik kontağı, Au üst kontağa göre pozitif bir potansiyele sahip olduğunda, taşıyıcıların potansiyel engeli aşmaları gerekmektedir. Düz beslem durumunda ise, taşıyıcılar n-Si yarı iletkeninden organik carmine tabakasına enjekte edilmektedir (Kaya et al. 2021, Temirci et al. 2004).

Çizelge 4.1. 24 Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu için TE teorisi ve Norde fonksiyonları ile hesaplanan karakteristik parametreler (Bodur et al. 2023).

Diyot kodu	TE teorisi					Norde fonksiyonları			
	Karanlık			Günüşiği		Karanlık		Günüşiği	
	RR	n	Φ_b (eV)	n	Φ_b (eV)	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)	Φ_b (eV)	R_s (k Ω)
D1	565	2,72	0,76	1,38	0,88	0,76	2,63	0,88	14,8
D2	5.940	1,60	0,82	1,15	0,91	0,82	125	0,90	19,1
D3	1.246	2,07	0,80	1,20	0,91	0,80	9,88	0,90	15,4
D4	3.859	1,80	0,81	1,30	0,89	0,82	6,28	0,88	10,5
D5	557	2,38	0,77	1,54	0,84	0,77	3,26	0,84	5,82
D6	447	2,38	0,78	1,27	0,91	0,79	12,4	0,90	22,4
D7	35.195	1,52	0,85	1,30	0,89	0,85	5,64	0,88	7,22
D8	19.691	1,66	0,83	1,21	0,91	0,84	3,86	0,91	6,05
D9	1.157	2,02	0,77	1,64	0,82	0,79	11,6	0,82	7,96
D10	49.946	1,56	0,85	1,31	0,88	0,84	7,39	0,87	9,37
D11	450	2,68	0,76	1,58	0,83	0,75	3,73	0,83	6,82
D12	81	2,39	0,72	1,64	0,76	0,71	26,9	0,75	19,2
D13	34.995	1,56	0,85	1,13	0,92	0,84	10,2	0,91	14,7
D14	58.669	1,75	0,85	1,51	0,89	0,85	5,00	0,88	11,5
D15	720	2,74	0,76	2,17	0,78	0,75	2,73	0,77	8,45
D16	334	1,65	0,80	1,63	0,82	0,80	4,55	0,81	11,5
D17	39.091	1,66	0,84	1,14	0,96	0,86	13,5	0,96	14,6
D18	18.315	1,69	0,84	1,40	0,87	0,84	43,0	0,86	7,72
D19	30.121	1,62	0,84	1,43	0,86	0,83	5,86	0,85	6,45
D20	37.846	1,57	0,85	1,54	0,86	0,85	6,50	0,85	5,76
D21	1.273	1,99	0,78	1,95	0,79	0,78	2,84	0,79	0,678
D22	14.092	1,53	0,84	1,35	0,88	0,85	11,4	0,87	10,3
D23	59.117	1,57	0,85	1,39	0,87	0,84	3,06	0,86	6,65
D24	696	2,57	0,76	1,67	0,83	0,76	3,70	0,82	5,18

İnce carmine tabakası ışığa maruz kaldığında, Carmine/n-Si arayüzeyinde elektrik alanın etkisi altında yük ayrımı nedeniyle çok sayıda serbest taşıyıcı üretilir. Böylece, ışık altında ters beslem akım değeri, karanlıkta alınan ters beslem akım değerine göre bir artış sergiler (El-Nahass et al. 2007).

Ortalama $n/(\Phi_b)$ değeri karanlıkta 1,94/(0,81 eV) ve gün ışığında 1,45/(0,87 eV) olarak hesaplanmıştır. Gün ışığı altında diyot parametreleri iyileşmiş ve diyotlar daha ideal davranış sergilemiştir. Aydınlatma ile n ve Φ_b değişimine benzer bir eğilim, Pakma et al. (2017) tarafından Al/Coronene/n-Si diyodu için de bulunmuştur.

Au/n-Si/Carmine ve çeşitli Au/n-Si diyotları için literatürde hesaplanmış Φ_b ve n değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Au/n-Si/Carmine/Ag diyotları için 0,81 eV olarak hesaplanan ortalama Φ_b değeri, bu çalışmada referans olarak üretilmiş Au/n-Si/Ag diyodu, Au/Carmine/n-Si/Al diyodu (Aydoğan et al. 2010), literatürde sunulmuş Au/n-Si diyotları (Tataroğlu 2013; Özaydın et al. 2016; Sharma 2016; Mahato and Puigdollers 2018; Budak et al. 2020; Oeba et al. 2021) ve Grafen/Si-pillar (Luongo et al. 2019) eklemi için hesaplanmış Φ_b değerinden daha yüksektir.

Zahn et al. (2003) tarafından organik bir ara tabakanın arayüzey seviyelerini önemli ölçüde değiştirdiği ve bunun Φ_b değerinde bir artış veya azalmaya neden olabileceği belirtilmiştir.

Dokuz adet Au/n-Si/Carmine/Ag diyodu için Φ_b değeri 0,84-0,85 eV olduğundan, Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarının Çizelge 4.2’de verilen diğer Au/n-Si diyotlarından farkı açıkça görülebilir. Bu nedenle bu çalışmada, Φ_b değeri 0,84 eV olan D18 diyodunun elektriksel karakterizasyonu detaylı olarak gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 4.2. Literatürde Au/n-Si/Carmine ve çeşitli Au/n-Si diyotları için hesaplanmış Φ_b ve n değerlerinin değerleri (Bodur et al. 2023).

Diyot	Φ_b (eV) (I - V grafîğinden)	n	Ref.
Au/n-Si/Carmine/Ag	0,81 (24 diyodun ortalaması); (En yüksek değer 0,85)	1,94 (24 diyodun ortalaması); (En düşük değer 1,52)	Bu çalışma
Au/n-Si/Ag	0,77	1,53	Bu çalışma
Au/Carmine/n-Si/Al	0,69	2,89	Aydoğan et al. (2010)
Au/n-Si/Au-Sb	0,70	-	Özaydın et al. (2016)
Au/n-Si	0,51	4,43	Tataroğlu (2013)
Au/n-Si/Ag	0,791	1,33	Budak et al. (2020)
Au/n-Si/Al	0,803	1,10	Mahato and Puigdollers (2018)
Au/n-Si/Al	0,790	1,25	Sharma (2016)
Au/n-Si/Al	0,70	1,67	Oeba et al. (2021)
Grafen/Si-pillar eklemi	0,110	2,60	Luongo et al. (2019)

Au/n-Si/ Carmine/Ag diyotlarında, R_s 'nin etkisiyle yüksek gerilimlerde güç kaybı meydana gelir (Şekil 4.3) (Mönch, 1995). Bohlin (1986) tarafından tarafından modifiye edilen Norde fonksiyonu ($F(V)$) (Norde 1979), Φ_b ve R_s 'yi hesaplamak için kullanılır. $F(V)$ fonksiyonu;

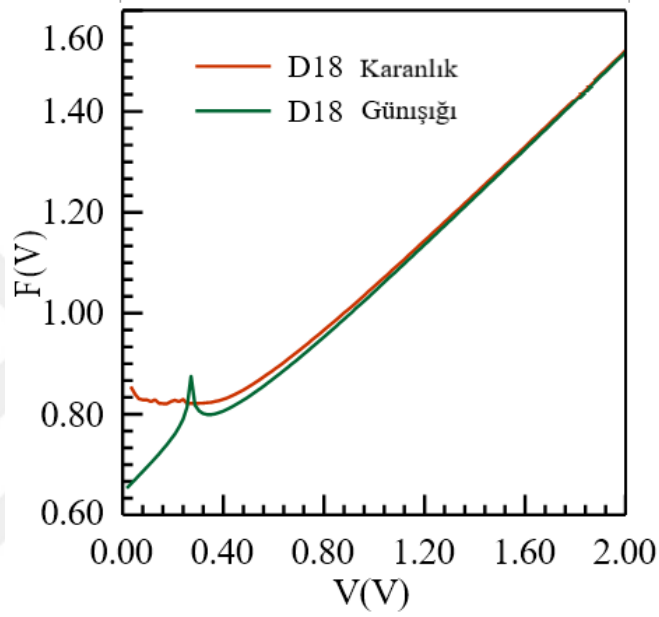
$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{A A^* T^2} \right) \quad (4.5)$$

denklemleri ile verilir. Burada γ , n değerinden büyük bir tamsayıdır. Burada $I(V)$, I - V karakteristiğinden elde edilen akım ve q ise elektronik yüküdür. Şekil 4.5, D18 diyodunun $F(V)$ - V grafiğini göstermektedir. Φ_b değeri Denklem (4.6) kullanılarak hesaplanır.

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \left[\left(\frac{\gamma-n}{n} \right) \right] \left[\frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \right] \quad (4.6)$$

Burada $F(V_{min})$ ve V_{min} , $F(V)$ 'nin minimum olduğu noktadaki $F(V)$ ve V değerleridir. R_s değeri Denklem (4.7) ile belirlenir.

$$R_s = \frac{(\gamma-n)kT}{qI_{min}} \quad (4.7)$$



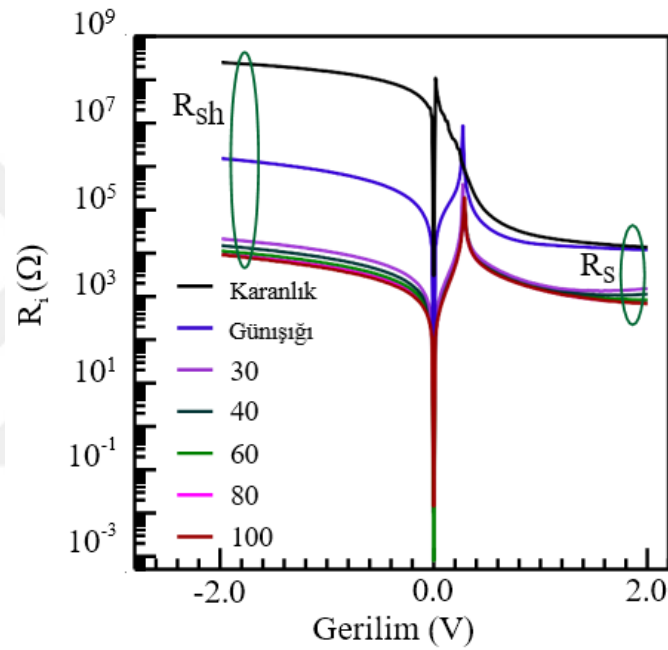
Şekil 4.5. D18 diyodunun karanlıkta ve gün ışığı altında $F(V)$ - V grafiği (Bodur et al. 2023).

Gün ışığı altında hesaplanmış R_s değerleri karanlıkta hesaplanan değerlere göre, 17 diyot için artmış ve 7 diyot için azalmıştır (Çizelge 4.1). F - V grafiğinden, ortalama Φ_b değeri karanlıkta ve gün ışığında sırasıyla 0,81 ve 0,86 eV olarak hesaplanmıştır (Çizelge 4.1). Norde fonksiyonlarından ve $\ln(I)$ - V karakteristiklerinden hesaplanmış Φ_b değerleri yaklaşık olarak aynıdır.

Ayrıca, D18 diyodunun eklem direnci (R_i), farklı aydınlatma şiddetleri altında Ohm kanunundan ($R_i = dV/dI$) hesaplanmıştır (Şekil 4.6). R_i değeri, R_s ve şönt (R_{sh}) dirençlerinden oluşur. Yeterli büyüklükte düz ve ters beslem gerilim değerlerinde R_i sabittir ve bu bölgelerde sırasıyla direnç, R_s ve R_{sh} olarak tanımlanır. Görüldüğü üzere karanlıkta ve aydınlatma altında hesaplanmış R_s değeri, R_{sh} değerinden daha düşüktür. Ayrıca ışık altında R_s ve R_{sh} değerlerinin her ikisi karanlıktaki değerlere göre daha

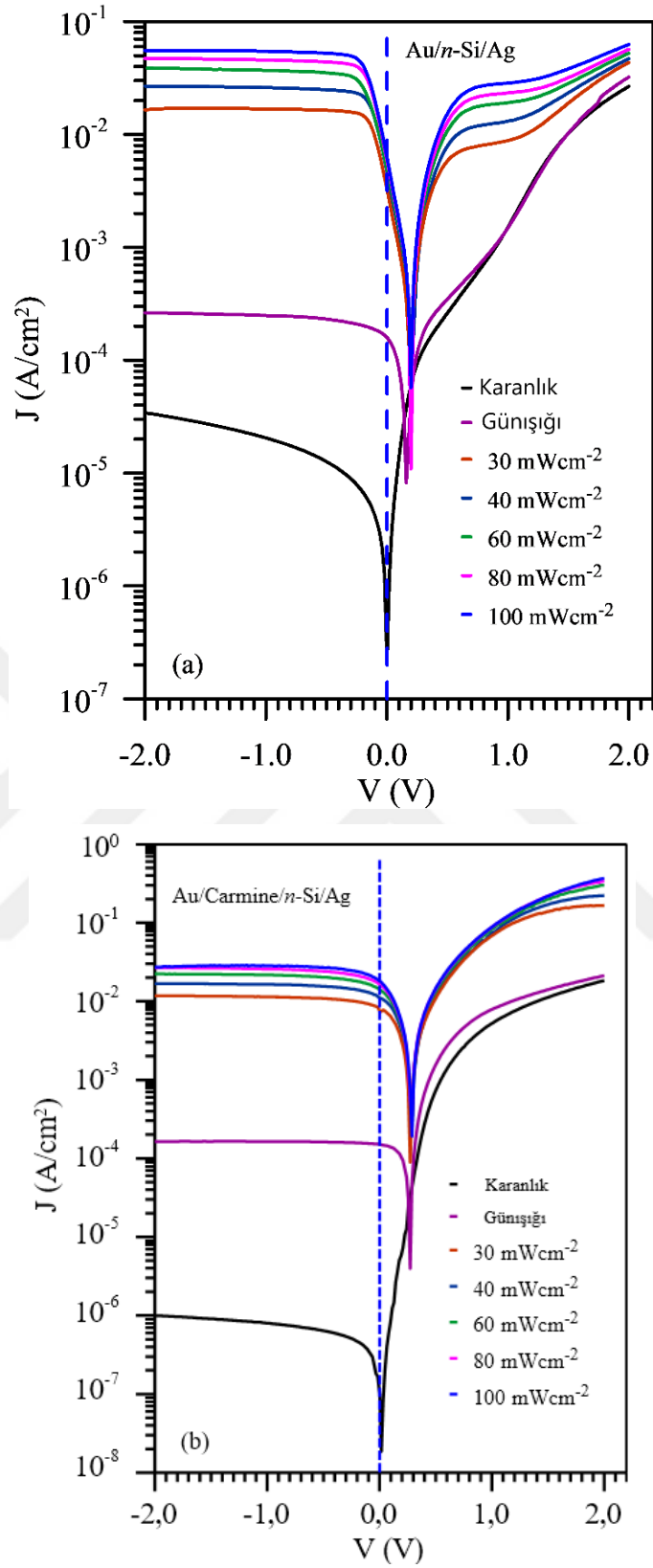
düşüktür. Kaplan et al. (2021) Au/poli(propilen glikol)-bpolistiren/n-Si yapısı için benzer bir eğilim bulmuşlardır.

Yüksek performanslı bir fotodiyot, düşük R_s 'ye ve yüksek R_{sh} 'ye sahiptir. R_s değeri karanlıkta 14 k Ω , gün ışığında 12 k Ω olarak belirlenmiş olup D18 numaralı diyot için Norde fonksiyonlarından elde edilen değerler ile uyumludur. Ek olarak, her iki yöntem ile yüksek R_s değerlerinin hesaplanması, arayüzey durumlarından dolayı R_s 'nin bir akım sınırlayıcı mekanizma olduğunu göstermektedir.



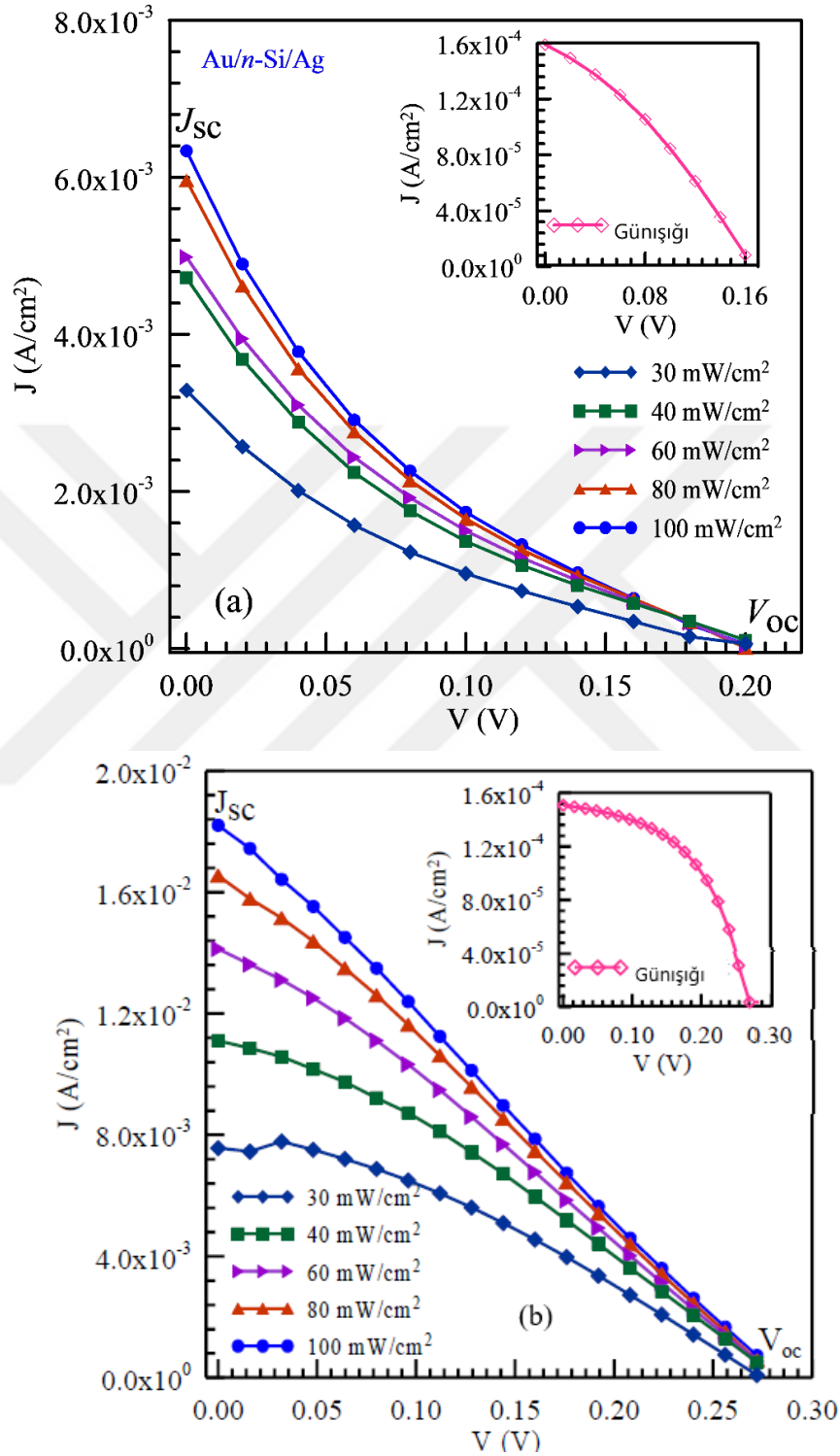
Şekil 4.6. D18 diyonu için farklı ışık şiddetleri altında R_d - V grafiği (Bodur et al. 2023)

Şekil 4.7 (a) ve (b)'de Au/n-Si/Ag diyodunun ve D18 diyonu için karanlıkta ve farklı ışık şiddetleri altında $\ln(J=I/A) - V$ grafiği gösterilmiştir. Işık absorpsiyonu nedeniyle fotoakıma katkıda bulunan elektron boşluğu çiftlerinin sayısı arttıkça, ters beslem ve düz beslem akım değerleri artmaktadır. Işık altındaki ters beslem akımının karanlıktaki akım değerinden yaklaşık dört kat daha büyük olması, uyarılmış carmine tabakasının fotoakım oluşumuna katkıda bulunduğunu belirtmektedir.



Şekil 4.7. a) Au/n-Si/Ag diyodunun b) D18 diyodu için karanlıkta ve ışık altında $\ln(J)$ - V grafiği (Bodur et al. 2023).

Şekil 4.8 (a) ve (b), Au/n-Si/Ag referans diyonu ve D18 diyonunun ve farklı ışık şiddetlerindeki maksimum güç bölgesinin karakteristik J - V eğrisini göstermektedir.



Şekil 4.8. a) Au/n-Si/Ag diyonunun b) D18 diyonunun farklı ışık şiddetleri altında maksimum güç bölgesindeki J - V eğrileri (Küçük figür gün ışığı altındaki eğriyi göstermektedir.) (Bodur et al. 2023).

4.3. Doluluk Faktörü ve Verimliliğin Hesaplanması

Dolum faktörü (FF) ve deneysel verimlilik (η) gibi diyot parametrelerine ait ifadeler sırasıyla Denklem (4.8) ve (4.9)'da verilmiştir (Ashok and Pande 1985; El-Nahass et al. 2011).

$$FF = \frac{J_{max}V_{max}}{J_{sc}V_{oc}} \quad (4.8)$$

$$\eta = \frac{J_{sc}V_{oc}FF}{P} \times 100\% \quad (4.9)$$

Burada J_{max} ve V_{max} , diyodun maksimum güç çıkışındaki ($P_{max} = J_{max}V_{max}$) akım ve gerilim değerleridir. P , gelen ışığın şiddetidir. V_{oc} sırasıyla akım minimum olduğunda açık devre gerilimini ve J_{sc} ($J_{sc}=I_{sc}/A$) gerilim sıfır olduğunda kısa devre akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Birincil fotovoltaiik parametreler olan V_{oc} , I_{sc} , J_{sc} , P_{max} , FF and η değerleri Au/n-Si/Ag diyodu ve D18 diyodu için farklı ışık şiddetlerinde hesaplanan değerler Çizelge 4.3'te verilmiştir. Au/n-Si/Ag diyoduna göre D18 diyodu için hesaplanan bu değerler daha büyüktür.

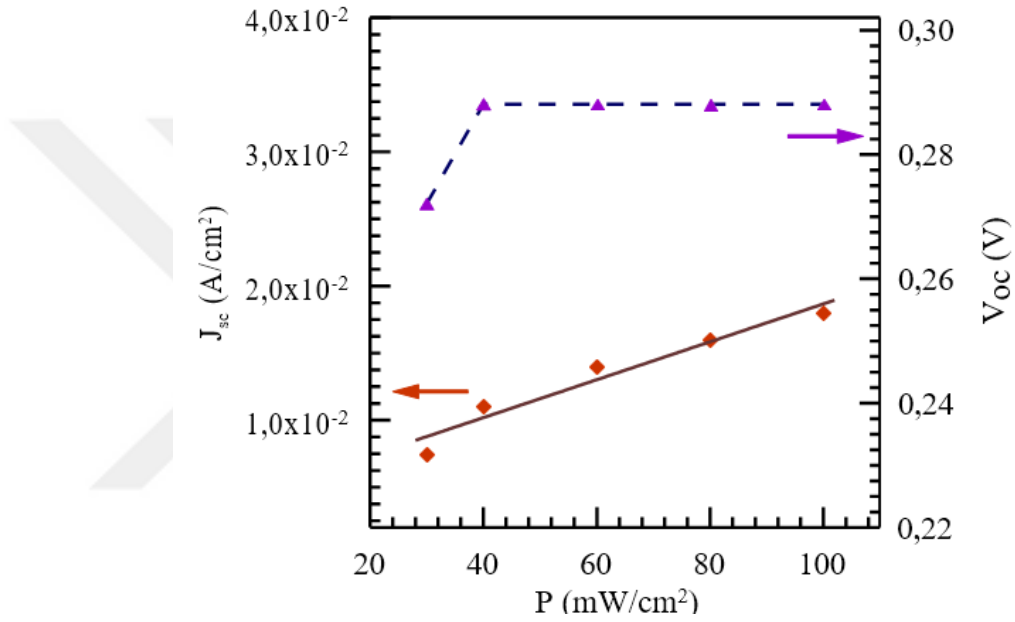
Şekil 4.9'da $V_{oc}/J_{sc}-P$ grafikleri verilmiştir. Işık şiddetiyle birlikte V_{oc} değeri önce bir miktar artış göstermekte, sonrasında doyum seviyesine ulaşp 40 mW/cm² üzerindeki ışık şiddetleri için neredeyse sabit kalmaktadır.

Çizelge 4.3. Au/n-Si/Ag ve D18 diyodu için farklı ışık şiddetlerinde güç dönüşüm parametreleri (Bodur et al. 2023).

Au/n-Si/Ag						
P_0 (mW/cm ²)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	P_{max} (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
30	200	2,58x10 ⁻²	3,29	9,83 x10 ⁻²	15,0	0,328
40	200	3,71x10 ⁻²	4,72	0,14	14,9	0,350
60	200	3,91 x10 ⁻²	4,98	0,15	15,4	0,256
80	200	4,68 x10 ⁻²	5,96	0,17	14,4	0,214
100	200	4.97 x10 ⁻²	6,33	0,18	14,3	0,181

Çizelge 4.3. (Devam)

D18						
P_0 (mW/cm ²)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (mA)	J_{sc} (mA/cm ²)	P_{max} (mW/cm ²)	FF (%)	η (%)
30	272	$5,85 \times 10^{-2}$	7,45	0,734	36,2	2,45
40	288	$8,53 \times 10^{-2}$	11,0	0,969	31,0	2,42
60	288	$1,11 \times 10^{-1}$	14,0	1,11	27,2	1,85
80	288	$1,24 \times 10^{-1}$	16,0	1,23	27,0	1,54
100	288	$1,43 \times 10^{-1}$	18,0	1,30	24,7	1,30

Şekil 4.9. V_{oc}/I_{sc} - P grafiği (Bodur et al. 2023)

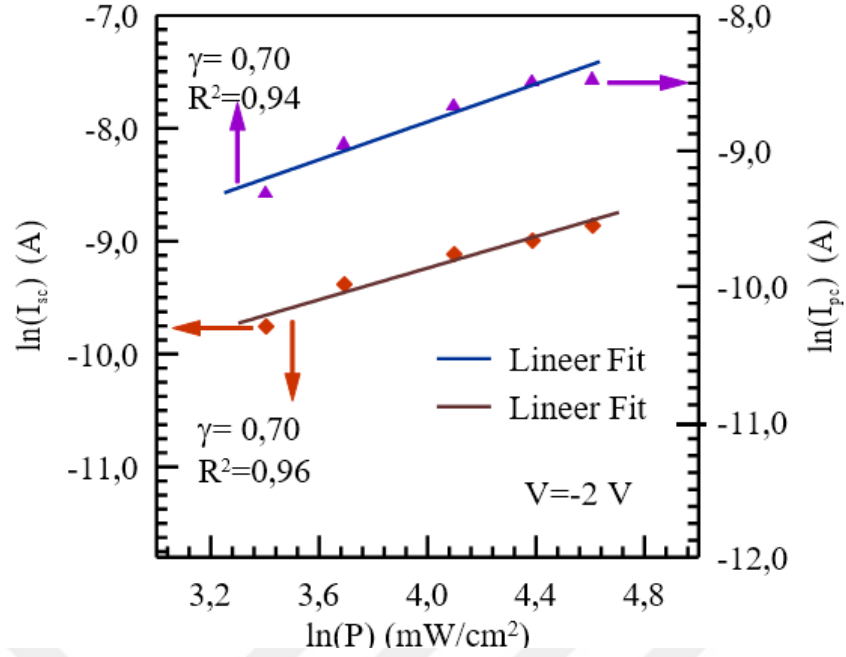
Maksimum güç değeri 0,734'ten 1,30 mW/cm²'ye yükselirken, J_{sc} değerleri 7,45'ten 18,0 mA/cm²'ye artmıştır. FF ve η değerleri artan ışık şiddeti ile azalmaktadır. Au/n-Si/Carmin/Ag diyodu için elde edilen değerler bazı literatür verileriyle benzer seviyededir. 100 mW/cm² aydınlatma şiddetinde D18 diyodunun I_{sc} değeri ($1,43 \times 10^{-1}$ mA), Au/metal kompleksi/n-Si için hesaplanmış 45 nA değerinden (Atlan et al. 2015) ve Au/rodyum(I) kompleksi/n-Si için hesaplanmış 64 nA değerinden daha yüksektir (Aydemir et al. 2014). J_{sc} , V_{oc} ve η (%) değerleri sırasıyla Au/ Dicyclopropyl fulgide/n-Si/Al için 9,13 mA/cm², 297 mV ve 1,27 (El-Nahass et al. 2004); Au/TPP/n-Si/Al için 2,76 mA/cm², 250 mV ve 2,45 (El-Nahass et al. 2005) ve Perovskite/p-Si için $5,23 \times 10^{-2}$ mA/cm², 6 mV ve $7,44 \times 10^{-3}$ (Cifci et al. 2018) olarak hesaplanmıştır. Açıkça görüldüğü gibi D18 diyodu için hesaplanan η (%) değeri Au/ Dicyclopropyl fulgide /n-

Si/Al ve Perovskite/p-Si için hesaplanmış değerlerden daha yüksektir. Bu, D18 diyodunun çeşitli ışık şiddetlerinde çalışan optik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir (Bodur et al. 2023).

Ancak, Au/n-Si/Carmine/Ag diyodunun uzay yük bölgesindeki rekombinasyon akımları ve yüksek R_s değerlerinden kaynaklı olarak 2,45 olan η (%) değeri etkin bir fotovoltaiik cihaz için düşüktür. Bu nedenle Au/n-Si/Carmine/Ag, fotovoltaiik cihaz yerine fotoiletken diyet olarak kullanım için daha uygundur. D18 diyodunun fotoiletkenlik özelliğini değerlendirmek için -2 V ters gerilimde $\ln(\text{fotoakım})$ (I_{pc}) – $\ln(P)$ ve $\ln(I_{sc})$ – $\ln(P)$ grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 4.10’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, $\ln(I_{pc})$ ve $\ln(I_{sc})$ değerleri $\ln(P)$ ile lineer bir değişim sergilemiştir. Denklem (4.10) I_{sc} ve P arasındaki bu ilişkiyi tanımlamaktadır (Kazim et al. 2007).

$$I_{pc} = \alpha P^\gamma \quad (4.10)$$

Burada α bir sabit olup, Şekil 4.10’da verilen $\ln(I_{sc})$ - $\ln(P)$ eğrisinin eğiminden hesaplanır. γ değeri monomoleküler ve bimoleküler rekombinasyon süreçlerine bağlıdır. Elektron-boşluk çiftlerinin jenerasyon-rekombinasyon ve tuzaklanma olayları, birimsiz γ ile ifade edilir. Monomoleküler rekombinasyon için γ değeri 1 iken, bimoleküler rekombinasyon için 0,5’tir. D18 diyetu için γ değeri, $\ln(I_{sc})/\ln(I_{pc})$ - $\ln(P)$ grafiklerinden 0,70 olarak bulunmuştur. γ değerinin 0,5 ile 1 arasında olması, sürekli bir dağılıma sahip lokalize tuzak seviyelerinin varlığına işaret etmektedir (Kazim et al. 2007).

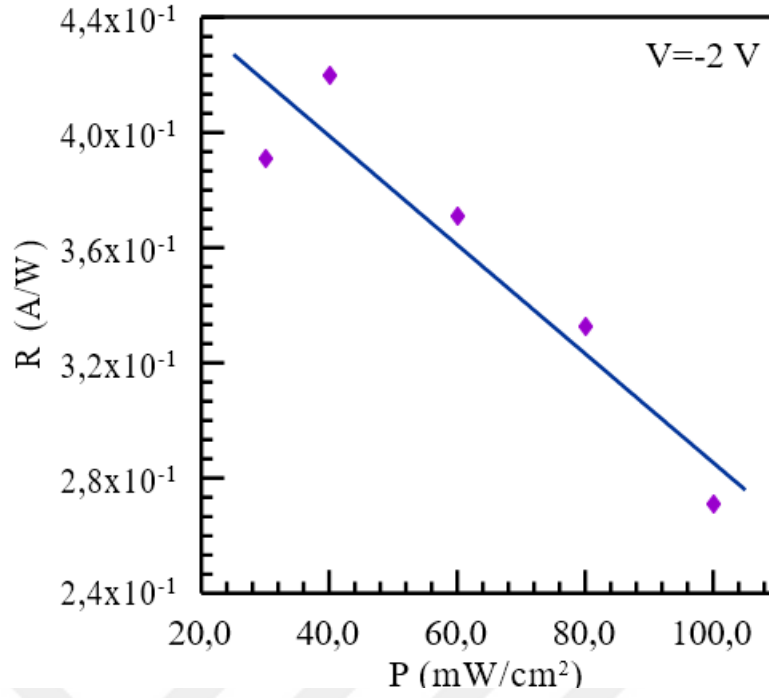


Şekil 4.10. D18 diyodunun -2 V’de $\ln(I_{sc})/\ln(I_{pc})$ - P grafikleri (Bodur et al. 2023)

Fotodiyotlar değerlendirilirken duyarlılık (R), hassasiyet (S) ve spesifik dedektivite (D^*) parametreleri öneme sahiptir. İyi bir fotodiyot veya hassas optoelektronik cihazların ışık altında yüksek R ve S değerlerine sahip olması gerekir. R değeri, fotoakım yoğunluğunun gelen ışığın şiddetine oranıdır ve Denklem (4.11) ile verilir (Dou et al. 2014).

$$R = J_{pc} / P \quad (4.11)$$

Carmine katmanı ve n-Si altaş arasında arayüzeyindeki tuzak seviyeleri nedeniyle, R değeri artan ışık şiddetiyle azalmaktadır (Şekil 4.11). Benzer bir durum Au/Indigo-Carmine/n-Si/Al ve Au/Gr-doped PVA/n-GaAs fotodiyotlarında da gözlemlenmiştir (Çiçek et al. 2017; Ganesh et al. 2018).



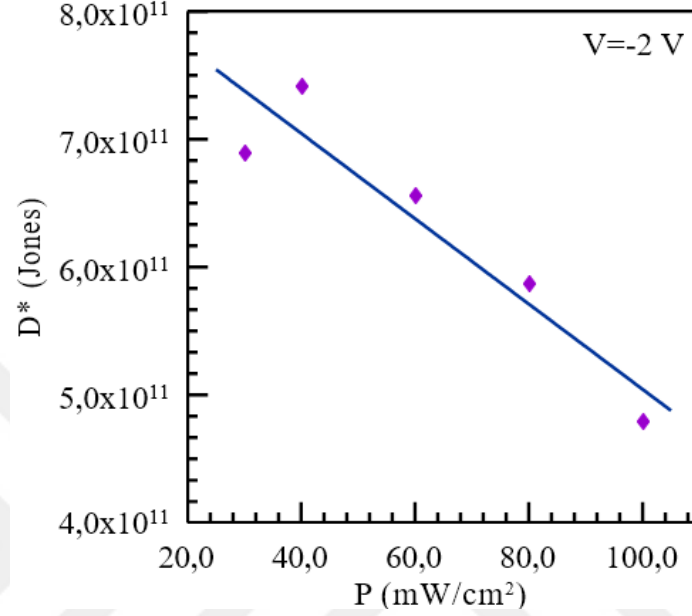
Şekil 4.11. D18 diyodunun -2 V’de R – P grafiği (Bodur et al. 2023)

D18 diyodu için en yüksek R değeri, 30 W/cm² ışık şiddeti altında ve -2V gerilimde 3,91 x 10⁻¹ A/W olarak bulunmuştur. Bu değer, 100 mW/cm² aydınlatma altında ve -5 V gerilimde, Au/0,5 mg Mn kompleksi/n-Si diyodu için hesaplanan değerden 3,49 kat daha yüksek (Barış et al. 2022), 30 mW/cm² aydınlatma altında ve -3 V gerilimde Au/indigo/n-Si/Al diyodu için hesaplanmış değerden 313 kat daha yüksek (Ganesh et al. 2018), 100 mW/cm² aydınlatma altında ve -3 V gerilimde Al/Cu (II) complex/p-Si için hesaplanmış değerden 144 kat daha yüksek (Dayan et al. 2020) ve 80 mW/cm² aydınlatma altında ve -3 V gerilimde Cu(acac)₂/n-Si için hesaplanmış değerden 83 kat daha yüksek (Abdel-Khalek et al. 2018) çıkmıştır. Bu sonuçlar, D18 için hesaplanan R değerinin kabul edilebilir seviyede olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, D18, fotodiyotlarda aranan bir durum olan çok küçük ters gerilimlerde ışığa karşı yüksek duyarlılık (R) gösterme özelliği sergilemektedir (Bodur et al. 2023).

Spesifik detektivite (D^*), fotodiyodun zayıf ışık sinyallerini algılama yeteneğidir ve Denklem (4.12)’de verilmiştir.

$$D^* = \frac{R}{\sqrt{2eJ_{dark}}} \quad (4.12)$$

D18 diyodunun D^* değeri, -2 V ve 30 mW/cm² ışık şiddeti altında $6,90 \times 10^{11}$ Jones olarak hesaplanmıştır. Bu değer, indirgenmiş Grafen Oxide/Si Schottky diyotları (Zhu et al. 2014) ve polikristal α -FAPbI₃ bazlı fotodiyot tipi fotodetektörler için hesaplanmış (Zhang et al. 2018) D^* değerlerine yakındır (Bodur et al. 2023).



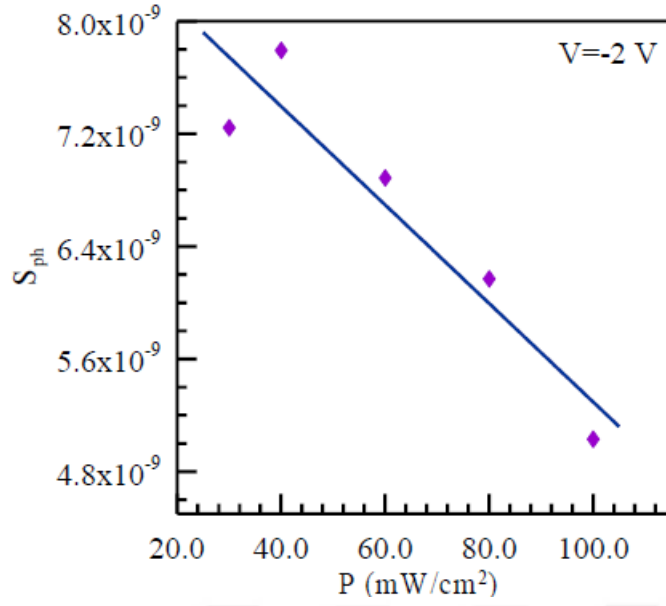
Şekil 4.12. D18 diyodunun -2 V'de D^* -P grafiği (Bodur et al. 2023)

Hassasiyet (sensitivity) (S) için iki ifade Denklem (4.13) ve (4.14) ile verilmiştir: Spesifik hassasiyet veya fotoiletkenlik hassasiyeti (S_{ph}) ve fotodiyotlar için esas olan ışık hassasiyeti (photosensitivity) (S).

$$S_{ph} = R \frac{d}{V} \quad (4.13)$$

$$S = \frac{I_{ph}}{I_{dark}} = \frac{I_{light} - I_{dark}}{I_{dark}} \quad (4.14)$$

Burada d , ara katmanın kalınlığıdır. Şekil 4.13, D18 diyodunun -2 V'de S_{ph} -P grafiğini göstermektedir.

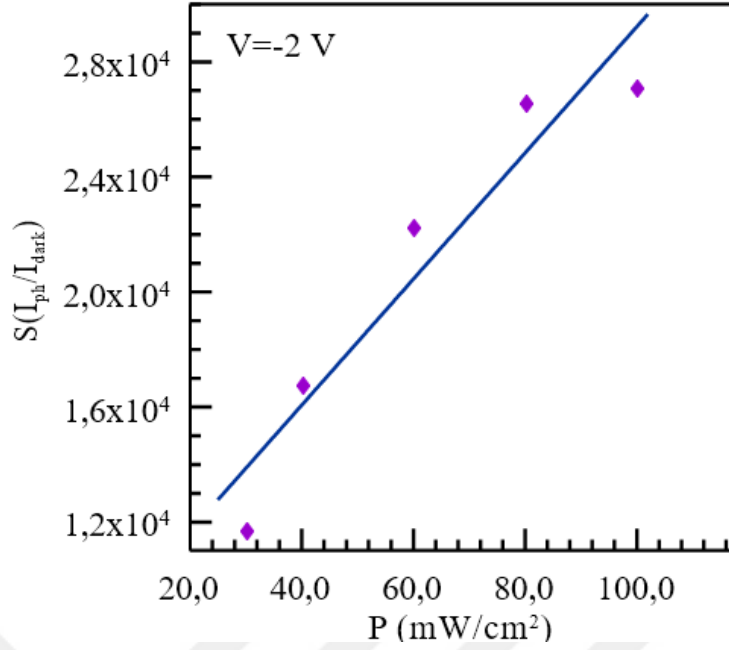


Şekil 4.13. D18 diyodunun -2 V’de S_{ph} – P grafiği (Bodur et al. 2023)

-2 V’de elde edilen S_{ph} değerleri Erdogan et al. (2021), Çiçek et al. (2017) tarafından verilen /metal/organik/yarı iletken/metal yapılar için hesaplanmış sonuçlara yakındır.

Şekil 4.12 ve Şekil 4.13’de görüldüğü üzere, artan ışık şiddetiyle D^* and S_{ph} değerlerindeki azalma, D18 diyodunun ışık şiddetine hassas olduğunu ve fotoiletken etki sergilediğini göstermektedir (Sahan 2020).

Ayrıca, D18 diyodunun -2 V’deki S değeri Denklem (4.14) kullanılarak hesaplanmış ve S - P grafiği Şekil 4.14’te verilmiştir. -2 V ters beslem gerilimde artan P ile S değerinin artmasının sebebi, Carmine ince film ve n-Si yarı iletken ara yüzeyindeki elektron-boşluk çiftlerinin artması ve bunu takiben diyodun içindeki elektrik alana ters yönde sürüklenmeleridir. Şekil 4.14’te gösterildiği gibi, D18 diyodunun -2 V ve 100 mW/cm² ışık altındaki S değeri $2,7 \times 10^4$ olarak bulunmuştur.

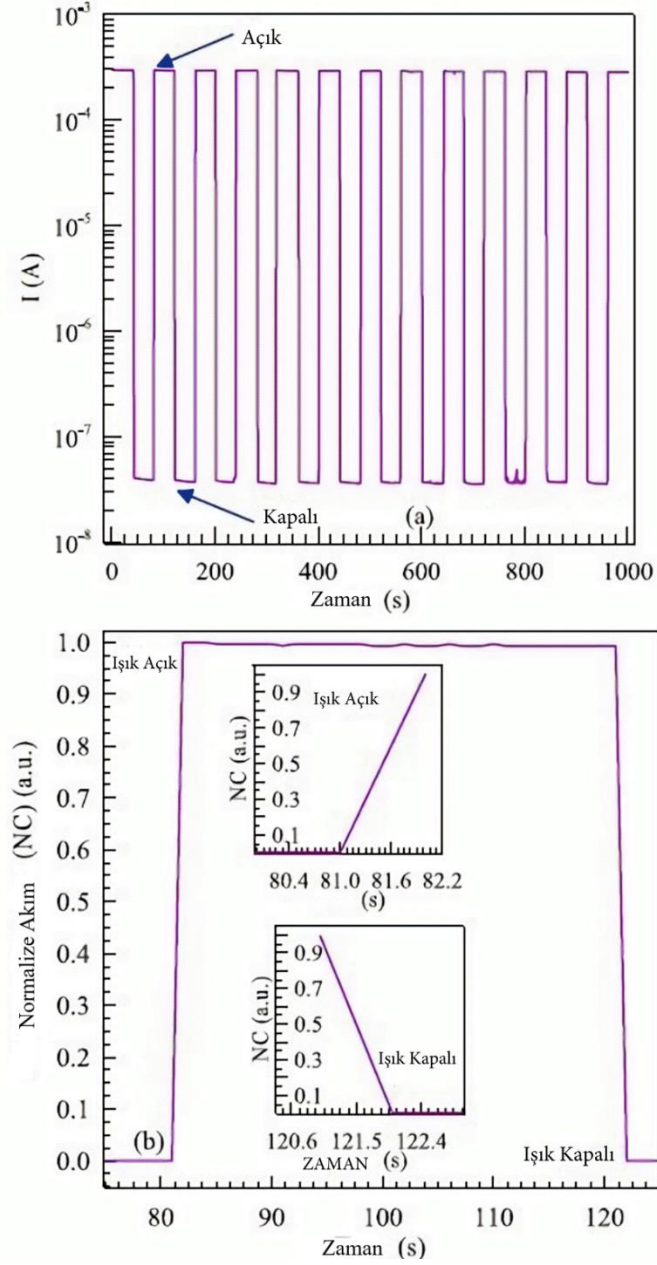


Şekil 4.14. D18 diyodunun -2 V'deki S-P grafiği (Bodur et al. 2023)

D18 diyodunun fototepki analizini yapmak için fotoakım (I_{pc}) ölçümleri alınmıştır. I_{pc} ölçümleri ışık varlığında ve yokluğunda fotoakımın zamansal varyasyonunu göstermektedir (Sahan 2020). D18 diyodunun akım-zaman ($I-t$) karakteristiği 100 mW/cm²'de ölçülmüştür. Şekil 4.15 (a) ve (b), sırasıyla maksimum değere göre normalize edilmiş ve tam ölçekte ve yakınlaştırılmış (zoom) ölçekte $I-t$ grafiğini göstermektedir. Işığın on/off durumlarındaki akım değerleri 10⁻⁴ ve 10⁻⁸ A arasındadır. Işık varlığında fototaşıyıcıların jenerasyonu, fotoakımda yükselmeye yol açar. Işık açıldığında akım doyum seviyesine ulaşana kadar yükselir ve sonra sabit kalır (Bodur et al. 2023).

Işık kapatıldığında ise fotoakım azalır ve başlangıç seviyesine geri gelir. Bu azalmaya yük taşıyıcıların derin tuzak seviyelerinde tutulmasının sebep olduğu düşünülmektedir (Barış et al. 2022). D18 diyodunun I_{on}/I_{off} oranı 7,45 x 10³ olarak bulunmuştur ve diyodun yüksek fototepki davranışı gösterdiğini doğrulamaktadır. Akımın maksimum değeri 12 on/off çevriminden sonra değişmemiştir. Akımın yükselme (rise) süresi (t_r) ve düşme süresi (t_d) akım pik değerinin sırasıyla %10'dan %90'a ve %90'dan %10'a değişme süresi olarak tanımlanır. Fotodiyodun t_r ve t_d değerleri Şekil 4.15(b)'den hesaplanmıştır. D18 diyodu için t_r ve t_d değerleri sırasıyla 0,7 ve 0,42 sn olarak belirlenmiştir. Nomaan et al. (2020) p-NiO/n-Si fotodiyodu için bu değerleri sırasıyla 1,7 ve 0,85 s olarak hesaplamışlardır. Bu bulgular, üstün fotoaktivite özelliği

sayesinde fotodiyot ve optik sensörler için ve gelecekteki diğer potansiyel optoelektronik cihaz uygulamaları için carmine ince filminin kullanılabileceğini göstermektedir (Bodur et al. 2023).

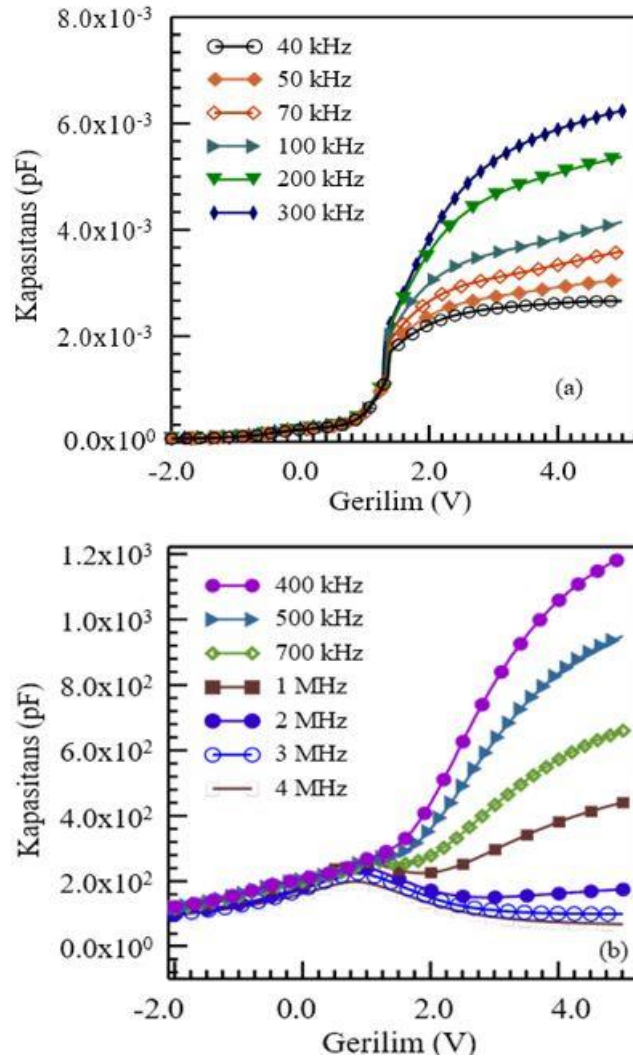


Şekil 4.15. D18 fotodiyodunun on/off ölçümlerinin a) tam ölçekte ve b) yakınlaştırılmış (zoom) ölçekte gösterimi (Bodur et al. 2023).

4.4. Diyodun C-V / C^2 -V ve G-V Karakteristikleri

D18 diyodunun farklı frekanslar için ölçülen C-V grafikleri Şekil 4.16'da verilmiştir. Ölçümlere göre C değeri artan frekansla azalmaktadır (Luongo et al. 2017, Bartolomeo et al. 2017)

Ters beslem gerilimi ve frekans, D18 diyodunun C değerini etkilemektedir. C değerinin voltaj ve frekansa olan bağımlılığı, bulk direnci, yüksek R_s , arayüzey durumları ve Au ile n-Si arasındaki ince carmine filminden kaynaklanmaktadır (Nicollian and Brews 1982).



Şekil 4.16. D18 diyodunun a) 40-300 kHz ve b) 400 kHz-4 MHz frekans aralıklarındaki C-V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).

C ve V arasındaki ilişki;

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{9\epsilon_s\epsilon_o AN_d} \quad (4.15)$$

ile verilir. Burada ϵ_s , n-Si'ye ait dielektrik sabitini; N_d , iyonize donör yoğunluğunu; V_d , C^2-V grafiğinde lineer bölgenin V eksenine göre ekstrapolasyonu ile belirlenen difüzyon potansiyelini temsil eder. Ayrıca, N_d 'yi hesaplamak için de bu lineer bölgenin eğimi kullanılır. $C^{-2}-V$ eğrileri kullanılarak Φ_b değerleri Denklem (4.16) ile belirlenmiştir.

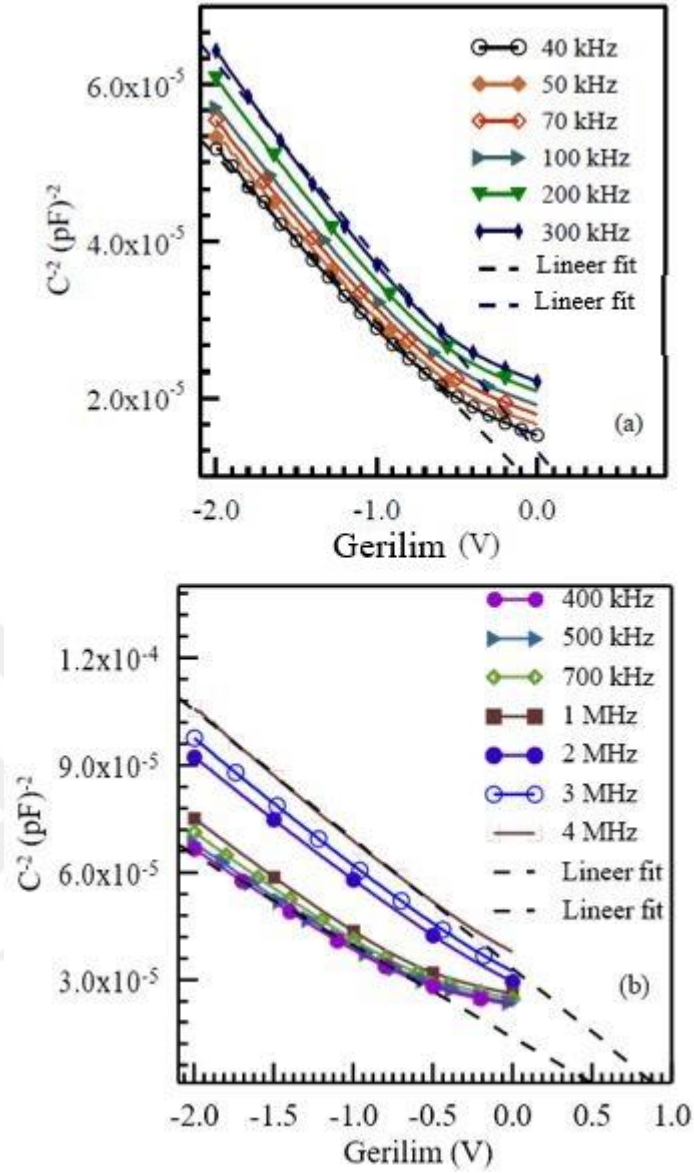
$$\Phi = V_d + E_f \quad (4.16)$$

Burada E_f Fermi enerjisi seviyesine eşittir ve Denklem (4.17) ile bulunur.

$$E_f = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \quad (4.17)$$

Burada N_c oda sıcaklığında n-Si'nin iletim bandındaki etkin durum yoğunluğudur ($N_c = 2,82 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) (Neamen, 2003).

D18 diyodunun ters beslem $C^{-2} - V$ karakteristiği Şekil 4.17'de sunulmuştur. Φ_b , V_d , N_d ve E_f değerleri $C^{-2}-V$ grafiklerinden hesaplanarak Çizelge 4.4'te listelenmiştir. D18 için 500 kHz'de Φ_b değeri 0,76 eV bulunurken, bu değer Au/Carmine/n-Si/Al için 0,73 eV hesaplanmıştır (Aydoğan et al. 2010). İki değer arasında yalnızca çok küçük bir fark olduğu aşikardır. Çizelge 4.4'te ayrıca N_d değerinin artan frekansla azaldığı görülmektedir. $C^{-2}-V$ verilerine göre de artan frekansla V_d değeri artarken E_f sabit kalmakta ve N_d biraz azalmaktadır. Dahası, D18 diyodu için 100 kHz'deki N_d değeri $8,72 \times 10^{15}$, Au/Methylene Blue /n-Si diyot için bulunan $8,48 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ değerine oldukça yakındır (Yakuphanoglu et al. 2011).

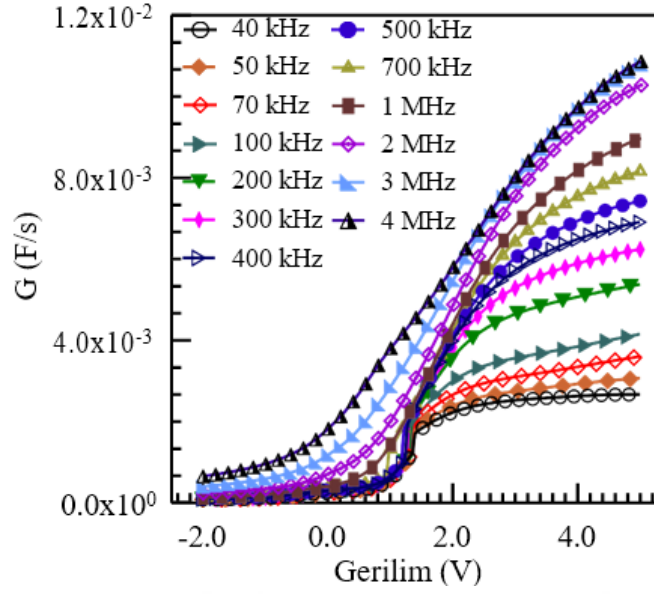


Şekil 4.17. D18 diyodunun a) 40-300 kHz b) 400 kHz-4 MHz frekans aralıklarındaki $1/C^2$ -V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).

Çizelge 4.4. D18 diyodu için C^{-2} - V grafiklerinden hesaplanan V_d , E_f , Φ_b ve N_d değerleri

f (kHz)	V_d (eV)	E_f (eV)	Φ_b (eV)	N_d (cm ⁻³)
40	0,40	0,21	0,61	$9,33 \times 10^{15}$
50	0,44	0,21	0,65	$8,99 \times 10^{15}$
70	0,48	0,21	0,69	$8,88 \times 10^{15}$
100	0,51	0,21	0,72	$8,72 \times 10^{15}$
200	0,53	0,21	0,74	$8,28 \times 10^{15}$
300	0,54	0,21	0,75	$7,83 \times 10^{15}$
400	0,54	0,21	0,75	$7,56 \times 10^{15}$
500	0,55	0,21	0,76	$7,40 \times 10^{15}$
700	0,55	0,21	0,76	$7,09 \times 10^{15}$
1.000	0,56	0,22	0,78	$6,74 \times 10^{15}$
2.000	0,76	0,22	0,98	$5,85 \times 10^{15}$
3.000	0,82	0,22	1,04	$5,64 \times 10^{15}$
4.000	0,92	0,22	1,14	$5,37 \times 10^{15}$

Karanlıkta düz beslem ve ters beslem kondüktans (G)- V ve impedans (Z)- V ölçümleri sırasıyla Şekil 4.18 ve Şekil 4.19’da verilmiştir. D18 diyodunun kondüktans değeri artan düz beslem gerilimi ve frekansla artış göstermiştir. Ters beslem gerilimi uygulandığında deplasyon bölgesi genişler ve artan düz beslem gerilimi ile daralır. D18 diyodu ters yönlü gerilimde iletken değildir.

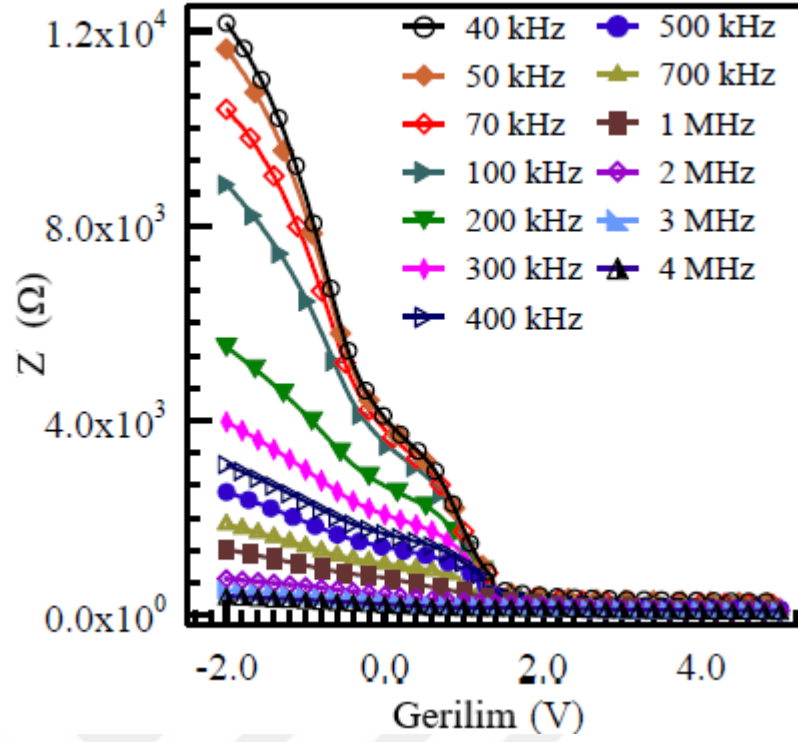


Şekil 4.18. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki G - V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).

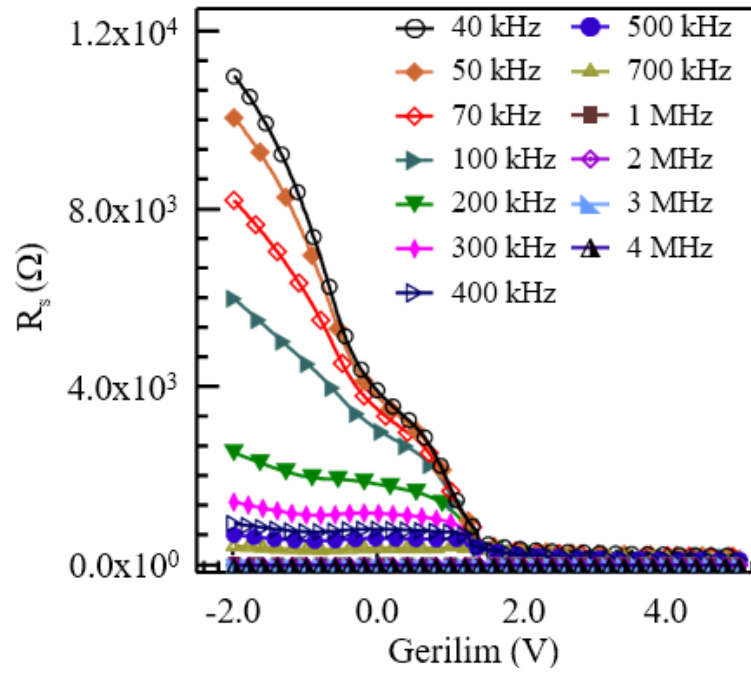
D18 diyodunun R_s değeri, gerilime bağlı olarak, C ve G değerleri ile Denklem (4.18)'deki gibi hesaplanmıştır:

$$R_s = \frac{G}{G^2 + (wC)^2} \quad (4.18)$$

Burada w açısal frekanstır ($w = 2\pi f$). D18 diyodunun R_s - V grafikleri Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Denklem (4.18)'den hesaplanan R_s ve deneysel Z değerleri birbiriyle karşılaştırılabilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.19. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki Z-V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).



Şekil 4.20. D18 diyodunun 40 kHz-4 MHz frekans aralığındaki R_s -V karakteristikleri (Bodur et al. 2023).

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Bu çalışmada amaç, Au/n-Si (metal/yarı iletken) arasında organik ince carmine boya tabakasını kullanarak, Au/n-Si doğrultucu diyotların çeşitli parametrelerini değiştirmektir. Bu amaç doğrultusunda carmine ince filmi n-Si alttaşlar üzerine kaplanmıştır. Au/n-Si/Ag ve Au/Carmine/n-Si/Ag diyotlarının üretiminde 400 µm kalınlığa, 5–10 Ω.cm özdirenç değerine sahip n-Si (100) numunesi kullanılmıştır. Termioyonik emisyon modeli ve modifiye edilmiş Norde fonksiyonu kullanılarak diyotlara ait çeşitli parametreler hesaplanmıştır.

Üretilen referans Au/n-Si/Ag ile Au/Carmine/n-Si/Ag diyotlarının fotovoltaiik parametrelerine carmine tabakasının etkisi araştırılmıştır.

Au/Carmine/n-Si/Ag diyotları için ortalama $n/(\Phi_b)$ değeri karanlıkta 1,94/(0,81 eV) ve gün ışığında 1,45/(0,87 eV) olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde verilmiş bazı sonuçlarla karşılaştırıldığında, Au/Carmine/n-Si/Ag diyotları için ortalama idealite faktörü değeri Çizelge 4.2’de verilen bazı değerlerden daha düşük ve ortalama engel yüksekliği değeri ise daha büyüktür. Au/n-Si/Carmine/Ag diyotlarındaki Φ_b ve n arasındaki doğrusal ilişki, Φ_b ’nin yanal inhomojenliği ile açıklanmıştır. 24 diyot için hesaplanan 0,81 eV ortalama Φ_b değeri, karanlıkta Au/n-Si/Ag diyonu için hesaplanan Φ_b değerinden daha yüksektir. 11 diyot için 10^4 mertebesinde yüksek akım doğrultma katsayısı (± 2 V) elde edilmiştir. Referans Au/n-Si/Ag diyonu için bu değer 781’dir.

Üretilen Au/Carmine/n-Si/Ag (D18) diyonunun fotovoltaiik özellikleri, farklı ışık şiddetleri için incelenmiştir. Au/Carmine/n-Si/Ag diyonu, 272 mV açık devre voltajı, $7,45 \times 10^{-3}$ A/cm² kısa devre akım yoğunluğu, %36,2 doluluk faktörü, %2,45 deneysel verimlilik, $3,91 \times 10^{-1}$ A/W duyarlılık, $2,7 \times 10^4$ hassasiyet, -2 V ve 30 mW/cm² ışık şiddetinde $6,90 \times 10^{11}$ Jones spesifik detektivite ve $7,45 \times 10^3$ kadar yüksek I_{on}/I_{off} oranı ile bir fotovoltaiik davranış sergilemiştir. D18 diyonu için hesaplanan bu V_{oc} , I_{sc} , J_{sc} , P_{max} , FF(%) ve η (%) değerleri referans Au/n-Si/Ag diyonu için hesaplanan değerlerden daha yüksek çıkmıştır. D18 diyonu için t_r ve t_d değerleri sırasıyla 0,70 ve 0,42 s olarak hesaplanmıştır. Au/Carmine/n-Si/Ag diyonu, maksimum akım değeri değişmediği için 12

on/off çevrimi için iyi bir kararlılık sergilemiştir. Bu bulgular, iyi performansa sahip, düşük maliyetli bir Au/Carmine/n-Si/Ag fotodiyodun üretilebileceğini göstermiştir. Ayrıca çalışmanın amacına ulaştığı ve carmine ince film tabakasının optoelektronik ve fotosensör uygulamalarda kullanım için potansiyel bir aday olabileceği sonucuna varılmıştır (Bodur et al. 2023).

Bu ölçümler esnasında kullanılan prob istasyonlarında, diyotların merkezi noktaları araştırmacılar tarafından belirlenmekte ve gerekli ölçümler alınmaktadır. Bu ölçümler esnasında bazen diyotlarda hasar oluşabilmektedir. Bu hasarları minimuma indirmek günümüz teknolojisiyle mümkün olabilmektedir. Görüntü işleme teknolojisiyle ölçümler otonom bir prob istasyonu ile gerçekleştirilirdiğinde diyotların merkezi noktaları tespit edilebilecek ve daha hassas sonuçlar elde etmek mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR

- Abdel-Khalek, H., Shalaan, E., Abd-El Salam, M. and El-Mahalawy, A. M. 2018. Effect of illumination intensity on the characteristics of Cu (acac) 2/n-Si photodiode. *Synthetic Metals*, 245, 223-236.
- Acar, S., Karadeniz, S., Tuğluoğlu, N., Selçuk, A.B. and Kasap, M. 2004. Gaussian distribution of inhomogeneous barrier height in Ag/p-Si (1 0 0) schottky barrier diodes. *Applied Surface Science*, 233(1-4), 373-381.
- Akkaya, A., Kantar, B. B. and Ayyildiz, E. 2019. Fabrication and characterization of Au /Carmin / N-Gaas schottky diode by spin coating technique. *Institute of Science and Technology*, 11(3), 49–55.
- Anonymous, 2022. Web Sitesi <https://www.britannica.com>, Erişim Tarihi: 05.09.2022.
- Anonymous, 2014. Web Sitesi: <http://www.katihil.sakarya.edu.tr>, Erişim Tarihi: 15.12.2022.
- Ashok, S. and Pande, K. P. 1985. Photovoltaic measurements. *Solar Cells*, 14(1), 61-81.
- Ateş, H. 2015. Nano parçacıklar ve nano teller. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 437-442.
- Atlan, M., Ocak, Y. S., Pasa, S., Temel, H., Tombak, A., Kilicoğlu, T. and Aydemir, M. 2015. Electrical and photoelectrical behaviour of heterojunctions based on novel oligomeric metal complexes. *Applied Organometallic Chemistry*, 29(12), 798-804.
- Aydemir, M., Ocak, Y. S., Rafikova, K., Kystaubayeva, N., Kayan, C., Zazybin, A. and Temel, H. 2014. Rhodium-catalyzed transfer hydrogenation with aminophosphines and analysis of electrical characteristics of rhodium (I) complex/n-Si heterojunctions. *Applied Organometallic Chemistry*, 28(6), 396-404.
- Aydoğan Ş., Sağlam M. and Türüt A. 2005. On the Barrier inhomogeneities of polyaniline/p-Si/Al structure at low temperature. *Applied Surface Science*, 250(1), 43-49.
- Aydoğan, Ş., İncekara, Ü. and Türüt, A. 2010. Determination of contact parameters of Au/Carmin/n-Si schottky device. *Thin Solid Films*, 518(23), 7156-7160.
- Barış, B., Yıldırım, M., Karadeniz, S., Karabulut, A., Kose, A. and Yıldız, D. E. 2022. Effect of illumination on electrical characteristics of Au/Mn-complex/n-Si photodiode structures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(5), 2631-2642.
- Bartolomeo, A., Luongo, G., Giubileo, F., Funicello, N., Niu, G., Schroeder, T., Lisker, M. and Lupina, G. 2017. Hybrid graphene/silicon schottky photodiode with intrinsic gating effect, *2D Mater*, 4(2), 025075.

- Bedeloğlu, D. G. 2019. Fotovoltaik modüllerin güç ölçümü belirsizliklerinin analizi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Güneş Enerjisi Anabilim Dalı, 96, İzmir.
- Bodur, M. C., Duman, S., Orak, I., Saritas S. and Baris, O. 2023. The photovoltaic and photodiode properties of Au/Carmine/n-Si/Ag diode. Optics & Laser Technology, 162, 109251.
- Bohlin K. E. 1986. Generalized norde plot including determination of the ideality factor. Journal of Applied Physics, 60(3), 1223.
- Bose, J. C. 1904. Dedector for electrical disturbances. US Patent 755-840.
- Braun, K.F. 1874. Ueber die stromleitung durch schwefelmetalle. Physical Chemistry, 153(4), 556–563.
- Budak, H., Duman, S., Kaya, F.S., Ashkhasi, A. and Gürbulak, B. 2020. Effect of temperature and illumination on the current-voltage characteristics of a Al/p-GaSe/In diode, Journal of Electronic Materials. 49(10), 5698–5704.
- Card, H. C. and Rhoderick, E. H. 1973. The effect on interfacial layer on minority carrier injection in forward biased silicon schottky diodes. Solid-State Electron, 16(3), 365-374.
- Cetin, H. and Ayyildiz, E. 2005. Temperature dependence of electrical parameters of the au/n-inp schottky barrier diodes. Semiconductor Science and Technology, 20(6), 625.
- Chand, S. and Kumar, J. 2000. Origin of non-ideal current-voltage characteristics of metal-semiconductor contact: a numerical study. Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 7(5-6), 268-273.
- Cheung, S. K. and Cheung, N.W. 1986. Extraction of schotky diode parameters from *I-V* characteristics. Applied Physics Letters, 49(2), 85-87.
- Czochralski, J. (1917). Ein neues verfahren zur messung der kristallisationsgeschwindigkeit der metalle. Zeitschrift für Physikalische Chemie, 92(1), 219-221.
- Cifci, O. S., Kocyigit, A. and Sun, P. 2018. Perovskite/p-Si photodiode with ultra-thin metal cathode. Superlattices and Microstructures, 120, 492-500.
- Çalışkan, F. 2015. Al/rubrene/n-gaas schottky diyodların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 79, Konya.
- Çiçek, O., Tecimer, H. U., Tan, S. O., Tecimer, H., Orak, İ. and Altındal, Ş. 2017. Synthesis and characterization of pure and graphene (Gr)-doped organic/polymer nanocomposites to investigate the electrical and photoconductivity properties of Au/n-GaAs structures. Composites Part B: Engineering, 113, 14-23.

- Dapson, R. W. 2007. The history, chemistry and modes of action of carmine and related dyes. *Biotechnic & Histochemistry*, 82(4-5), 173-187.
- Das, K., Mandal, R. and Mandal D. K. 2022. The current transport mechanism of al/beetroot/cu used as an organic semiconductor schottky diode is superior than natural dye-based thin film devices. *Microelectronic Engineering*, 26.
- Daw, A. N. 1980. Metal-semiconductor contacts with thin interfacial films. *IETE Journal of Research*, 26(2), 118-122.
- Dayan, O., Imer, A. G., Al-Sehemi, A. G., Özdemir, N., Dere, A., Şerbetçi, Z. and Yakuphanoglu, F. 2020. Photoresponsivity and photodetectivity properties of copper complex-based photodiode. *Journal of Molecular Structure*, 1200, 127062.
- Doğan, S., Duman. S., Gürbulak, B., Tüzemen, S. and Morkoç, H. 2009. Temperature variation of current–voltage characteristics of Au/Ni/N-Gan schottky diodes. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 41(4), 646-651.
- Dou, L., Yang, Y. M., You, J., Hong, Z., Chang, W. H., Li, G. and Yang, Y. 2014. Solution-processed hybrid perovskite photodetectors with high detectivity. *Nature Communications*, 5(1), 1-6.
- El-Nahass, M. M., Zeyada, H. M. and Hendi, A. A. 2004. Electrical transport properties of thermally deposited thin films of (E)[α (2, 5 dimethyl furyl) ethylidene] (dicyclopentyl methylene) 2, 5 furadione. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 25(2), 85-91.
- El-Nahass, M. M., Zeyada, H. M., Aziz, M. S. and Makhoulf, M. M. 2005. Current transport mechanisms and photovoltaic properties of tetraphenylporphyrin/n-type silicon heterojunction solar cell. *Thin Solid Films*, 492(1-2), 290-297.
- El-Nahass, M. M., Metwally, H. S., El-Sayed, H. E. A. and Hassanien, A. M. 2011. Electrical and photovoltaic properties of FeTPPCL/p-Si heterojunction. *Synthetic Metals*, 161(21-22), 2253-2258.
- El-Nahass, M.M., Zeyada, H.M. Abd-El-Rahman, K.F. and Darwish, A. 2007. Fabrication and characterization of 4-tricyanovinyl-N, N-diethylaniline/p-silicon hybrid organic-inorganic solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 91(12), 1120–1126.
- Enise, Ö., Ocak, Y., Tombak, A., Kılıçoğlu, T. and Turut, A. 2015. Electrical and photoelectrical properties of Ag/N-Type Si Metal/Semiconductor contact with organic interlayer. *Thin Solid Films*, 597, 14-18.
- Erdogan, E., Yilmaz, M., Aydogan, S., Incekara, U. and Sahin, Y. 2021. Dependence of electrical parameters of co/gold-chloride/p-Si diode on frequency and illumination. *Optical Materials*, 121, 111613.
- Feller, R. F. 1986. *Artists Pigments: A handbook of their history and characteristics*. Cambridge University Press. National Gallery of Art, Cambridge, 300, England.

- Fleming, S. 1983. The tale of the cochineal: insect farming in the new world. *Archaeology*, 36(5), 68-69.
- Ganesh, V., Manthrammel, M. A., Shkir, M., Yahia, I. S., Zahran, H. Y., Yakuphanoglu, F. and AlFaify, S. 2018. Organic semiconductor photodiode based on indigo carmine/n-si for optoelectronic applications. *Applied Physics A*, 124(6), 1-7.
- Geppert, D. V., Cowley, A. M. and Dore, A. M. 1966. Correlation of metal-semiconductor barrier height and metal work function; effects of surface states, *Journal of Applied Physics*, 37(6), 2458–2467.
- Gratia, P., Magomedov, A., Malinauskas, T., Daskeviciene, M. and Abate, A. 2015. A methoxydiphenylamine-substituted carbazole twin derivative: an efficient hole-transporting material for perovskite solar cells. *Angewandte*, 54(39), 11409-11413.
- Gullu O. and Turut A. 2008. Photovoltaic and electronic properties of quercetin/p-mp solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 92(10), 1205–1210.
- Hussain, A., Akhter, P., Bhatti, A., Shah, A. and Bilal, S. 2010. Dominant conduction mechanism and the effects of device temperature on electrical characteristics Of Al/Znpc/n-Si Structures. *Vacuum*, 84(7), 975-979.
- Kaplan, N., Taşcı, E., Emrullahoğlu, M., Gökce, H., Tuğluoğlu, N. and Eymur, S. 2021. Analysis of illumination dependent electrical characteristics of a- styryl substituted bodipy dyebased hybrid heterojunction. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 32, 16738–16747.
- Karabulut, A., Efeoğlu H., Güzeldir, B. and Türüt, A. 2014. Electrical characteristics of Au/Ti/N-Gaas contacts over a wide measurement temperature range. *Physica Scripta* 89(9),095804.
- Kaya, F. S., Duman, S., Baris, O. and Gurbulak, B. 2021. Calculation of characteristics parameters of Au/methyl green/n-Si/Ag diodes from the current-voltage measurements. *Materials Science in Semiconductor Processing*, (121), 105325.
- Kazim, S., Ali, V., Zulfequar, M., Haq, M. M. and Husain, M. 2007. Electrical transport properties of poly (2-methoxy-5-(2'-ethyl hexyloxy)-1, 4-phenylene vinylene) thin films doped with acridine orange dye. *Physica B: Condensed Matter*, 393(1-2), 310-315.
- Kıymaz, A. 2010. n-GaP yarı iletkeni ile hazırlanan metal yarı iletken kontakların diyot ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 112, Ankara.
- Krebs, F. C., Carlé, J. E., Cruys-Bagger, N., Andersen, M., Lilliedal, M. R., Hammond, M. A. and Hvidt, S. 2005. Lifetimes of organic photovoltaics: photochemistry, atmosphere effects and barrier layers in ITO-MEHPPV: PCBM-aluminium devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 86(4), 499-516.

- Kunkely, H. and Vogler, A. 2011. Absorption and luminescence spectra of cochineal. *Inorganic Chemistry Communications*, 14(7), 1153–1155
- Lapa, H., Kökce, A. and Özdemir, A. 2019. Yb/p-Si schottky diotlarının elektriksel karakteristiklerinin incelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 9(3), 1385-1394.
- Luongo, G., Giubileo, F., Genovese, L., Iemmo, L., Martucciello, N. and Di Bartolomeo, A. 2017. *I-V* and *C-V* characterization of a high-responsivity graphene/silicon photodiode with embedded mos capacitor. *Nanomaterials*, 7(7) 158.
- Luongo, G., Grillo, A., Giubileo, F., Iemmo, L., Lukosius, M., Alvarado Chavarin, C. and Di Bartolomeo, A. 2019. Graphene schottky junction on pillar patterned silicon substrate. *Nanomaterials*, 9(5), 659.
- Mahato, S. and Puigdollers, J. 2018. Temperature dependent current-voltage characteristics of Au/n-Si schottky barrier diodes and the effect of transition metal oxides as an interface layer. *Physica B: Condensed Matter*, 530, 327-335.
- McLean, A. B. 1986. Limitations to the Norde IV plot. *Semiconductor Science and Technology*, 1(3), 177.
- Monch, W. 1995. *No semiconductor surfaces and interfaces*. Springer, 483, Berlin.
- Monch, W. 1990. *Electronic structure of metal-semiconductor contacts*. Kluwer Academic Publishers, 45, Milano.
- Mott, N. F. 1938. Note on the contact between a metal and an insulator or semi-conductor. In *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 34(4), 568-572).
- Nathan, M., Shoshani Z., Ashkinazi G., Meyler B. and Zolotareveski O. 1996. On the temperature dependence of the barrier height and the ideality factor in high voltage ni /ngaas schottky diodes. *Solid State Electronics*, 39(10), 1457-1462.
- Neamen, D. 2003. *Semiconductor physics and devices*. McGraw-Hill Education, 746, USA.
- Nicollian, E. H. and Brews, J. R. 1982. *MOS (Metal Oxide Semiconductors) physics and technology*. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 21, 1048–1049, New York.
- Nomaan, A. T., Ahmed, N. M., Al-Hardan, N. H., Shiong, N. S. and Aziz, A. A. 2020. Uv photodetector based on p-nio film/n-Si heterojunction prepared by thermal oxidation. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1535(1), 012001.
- Norde, H. 1979. A modified forward I-V plot for schottky diodes with high series resistance. *Journal of Applied Physics*, 50(7), 5052-5053.

- Oeba, D. A., Bodunrin, J. O. and Moloi, S. J. 2021. Electrical properties of 3 MeV proton irradiated silicon schottky diodes. *Physica B: Condensed Matter*, 610, 412786.
- Oral, D.D. 2012. Silisyum tabanlı organik-inorganik diyotların elektriksel karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 128, Eskişehir.
- Özaydın, C., Güllü, Ö., Pakma, O., İlhan, S. and Akkılıç, K. 2016. The optical characterization of organometallic complex thin films by spectroscopic ellipsometry and photovoltaic diode application. *Materials Research Bulletin*, 77, 115-121.
- Özçelik, F. 2013. Akım-voltaj ölçümlerinden Ag/n-Si/Methyl-Green/Au diyotlarının karakteristik parametrelerinin hesaplanması. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 68, Erzurum.
- Özçelik, F. 2018. Au/n-GaP/Al ve Au/Klorofil-a/n-GaP/Al yapılarının karakteristik parametrelerinin akım-gerilim, kapasite-gerilim ve fotovoltaj ölçümlerinden hesaplanması. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 113, Erzurum.
- Özerden E. 2014. Metal/Organik/İnorganik yarı iletken yapıların sıcaklığa bağlı olarak elektriksel ve optik parametrelerinin belirlenmesi. Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, 230, Diyarbakır.
- Pakma, O. Çavdar, Ş. Koralay, H. Tuğluoğlu, N. and Yüksel, Ö. 2017. Improvement of diode parameters in al/n-Si schottky diodes with coronene interlayer using variation of the illumination intensity. *Physica B*, 527, 1-6.
- Pickard, G. W. 1906. Means for receiwing intelligence communicated by electric wawes. US Patent. No: 836,531.
- Poowakanjana, S. and Park, J. W. 2009. Controlling the bleeding of carmine colorant in crabstick. *Journal of Food Science*, 74(9), 707-712.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H. 1988. Metal-semiconductor contacts. Clarendon Pres, 252, Oxford.
- Rosu, M. C., Suci, R. C., Mihet, M. and Bratu, I. 2013. Physical–chemical characterization of titanium dioxide layers sensitized with the natural dyes carmine and morin. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16(6), 1551-1557.
- Sahan, N. 2020. Adsorbatların Grafen/Silisyum bazlı schottky bariyer fotodiyotlarının optoelektronik özellikleri üzerindeki etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 78, İzmir.
- Schottky, W. 1938. Halbleitertheorie der sperrschicht. *Naturwissenschaften* 26, 843.

- Sharma, R. 2010. Temperature dependence of IV characteristics of Au/n-Si schottky barrier diode. *Journal of Electron Devices*, 8, 286-292.
- Sze, S.M. 1981. *Physics of semiconductor devices* 2nd ed., Willey, New York, 245-300.
- Tataroğlu, A. 2013. Comparative study of the electrical properties of Au/n-Si (MS) and Au/Si₃N₄/n-Si (MIS) schottky diodes. *Chinese Physics*, 22(6), 068402.
- Temirci, C., Çakar, M., Türüt, A. and Onganer, Y. 2004. Low- And high-frequency C-V characteristics of the contacts formed by sublimation of the nonpolymeric organic compound on p-type Si substrate, *Physica Status Solidi a Applied Research*, 201(14), 3077–3086.
- Tuğluoğlu, N. and Karadeniz, S. 2012. Analysis of current–voltage and capacitance–voltage characteristics of Perylene-Monoimide/n-Si schottky contacts. *Current Applied Physics*, 12(6), 1529-1535.
- Tung, R. T. 1992. Electron transport at metal-semiconductor interfaces: General theory. *Physical Review B*, 45(23), 13509.
- Turgut, G., Duman, S. and Özcelik, F. Ş. 2017. An evaluation of structural, topographic, optical, and temperature-dependent electrical features of Sol–Gel Spin-Coated p-NiO/n-Si heterojunction. *Metallurgical and Materials Transactions*, 48(6), 3137-3142.
- Turmuş, M. 2014. N tipi silisyum tabanlı altlık üzerine pyrene maddesinin kaplanarak elde edilen yapıların akım iletim mekanizmaları. Yüksek Lisans Tezi. Bingöl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Ana Bilim Dalı, 67, Bingöl.
- Türüt, A. and Sağlam, M. 1992. Determination of the density of Si-metal interface states and excess capacitance caused by them. *Physica B*, 179(4), 285-294.
- Uğurlu, H. 2022. Ti/ p-GaN schottky diyodunun elektriksel parametrelerinin incelenmesi. *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 752-760.
- Wen, F. S., Li, W. L., Liu, Z. and Wei, H. Z. 2006, Effect of electrode modification on organic photovoltaic devices, *Materials Chemistry and Physics*, 95, 94-98
- Wilmsen, C. W. 1985. *Physics and chemistry of III-V compound semiconductor interfaces*. Plenum Press, 465, New York.
- Wilson, A. H. 1931. The theory of electronic semi-conductors. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 133(822), 458-491.
- Wu, C. Y. 1980. Interfacial layer theory of the schottky barrier diodes. *Journal of Applied Physics*, 51(7), 3786-3789.

- Vyas, P.D., Esteve, D. and Martinez, A. 1979. Investigation of metal-semiconductor contacts on GaAs using aluminum & Ni-Au system. *Indian Journal of Pure and Applied Physics*, 17(6), 362-366.
- Yakuphanoglu, F., Ocak, Y. S., Kılıçoğlu, T. and Farooq, W. A. 2011. Interface control and photovoltaic properties of n-type silicon/metal junction by organic dye. *Microelectronic Engineering*, 88(9), 2951-2954.
- Yıldırım, N. ve Durumlu, E. 2017. Ag/Azure A /n-Si schottky diodeun elektriksel ve fotovoltajik özelliklerinin araştırılması. *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 6(1), 6.
- Yılmaz, M., Yasar, D., Aydoğan, Ş. and Grilli, M. 2021. Density functional theory calculations of pinus brutia derivatives and its response to light in a Au/n-Si Device. *Energies*, 14(23), 79-83.
- Zahn, D.R.T., Kampen, T.U. and M'endez, H. 2003. Transport gap of organic semiconductors in organic modified schottky contacts. *Applied Surface Science*, 212-213, 423-427.
- Zhang, M., Zhang, F., Wang, Y., Zhu, L., Hu, Y., Lou, Z. and Teng, F. 2018. High-performance photodiode-type photodetectors based on polycrystalline formamidinium lead iodide perovskite thin films. *Scientific Reports*, 8(1), 1-9.
- Zhu, M., Li, X., Guo, Y., Li, X., Sun, P., Zang, X. and Zhu, H. 2014. Vertical junction photodetectors based on reduced graphene oxide/silicon schottky diodes. *Nanoscale*, 6(9), 4909-4914.
- Ziel, A. 1968. *Solid-state physical. Electronics*, Prentice-Hall, 604, New Jersey.