

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ
VE OPTO-ELEKTRONİK UYGULAMALAR İÇİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Öğrencinin Adı SOYADI : Ayten MENTEŞE

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih :

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Serdar KARADENİZ

**Temmuz 2023
GİRESUN**

T.C.
GİRESUN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ
VE OPTO-ELEKTRONİK UYGULAMALAR İÇİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ayten MENTEŞE

Enstitü Anabilim Dalı : Enerji Sistemleri Mühendisliği

Bu tez 07/07/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Prof. Dr.
Behzad BARIŞ
Jüri Başkanı**

**Prof. Dr.
Serdar KARADENİZ
Üye**

**Doç. Dr.
Murat YILDIRIM
Üye**

**Prof. Dr.
Bahadır KOZ
Enstitü Müdürü**

BEYAN

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

Ayten MENTEŞE

07/08/2023

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca bana güvenerek desteğini esirgemeyen, hedefime ulaşabilmem için yardımcı olan, bu çalışmamı yürütürken karşılaştığım zorlukların üstesinden gelebilmem için kıymetli bilgi birikiminden faydalandığım değerli hocam Prof. Dr. Serdar KARADENİZ'e teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Hayatımın her döneminde maddi manevi beni destekleyen ve tez sürecimde daima yanımda olup beni yalnız bırakmayan kıymetli babam, annem ve kardeşime sonsuz minnetlerimi sunarım.

Yoğun çalışmalarım sırasında benimle birlikte sabır gösteren arkadaşım İ. Zeynep FİDAN'a teşekkür ederim.

Çalışmaların sonuca varabilmesi için destek veren değerli hocam Doç. Dr. Murat YILDIRIM'a teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	I
İÇİNDEKİLER	II
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	IV
ŞEKİLLER LİSTESİ	VIII
TABLolar LİSTESİ	X
ÖZET.....	XI
SUMMARY.....	XII
	1
BÖLÜM 1. GİRİŞ.....	3
BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	
2.1. Yarıiletkenler.....	3
2.2. Deşik Kavramı.....	4
2.3. Gerçek Yarıiletkenler.....	5
2.4. Katkılı Yarıiletkenler.....	7
2.5. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar.....	8
2.5.1. P-tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontak.....	9
2.5.2. P tipi metal/yarıiletken omik kontak.....	11
2.5.3. N-tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontak.....	12
2.5.4. N-tipi metal/yarıiletken omik kontak.....	14
2.6. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken Yapıların (MIS) Fiziği.....	15
2.7. Metal/Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	16
2.7.1. Termoyonik emisyon teorisi (TE)	17
2.7.2. Difüzyon teorisi.....	20
2.7.3. Termoyonik emisyon-difüzyon teorisi.....	21
2.7.4. Engel boyunca tünelleme.....	23
2.8. Engel Yüksekliği Tayini.....	25

2.8.1. Akım-gerilim (I-V) belirtkenleri.....	26
2.9. Seri Direnç.....	28
2.9.1. Norde yöntemi.....	29
2.9.2. Cheung yöntemi.....	32
2.10. İdealite Faktörü.....	33
2.11. Fotodiyot.....	34
2.12. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği.....	37
2.13. Fotovoltaik Parametreler.....	39
	40
BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM	
3.1. Fotodiyot Üretim Aşamaları.....	40
3.1.1. Silisyum kristalinin temizliği ve tabakaların hazırlanması.....	40
3.1.2. Omik kontakların oluşturulması.....	42
3.1.3. Organik ince filmlerin üretilmesi.....	42
3.1.4. Doğrultucu kontakların oluşturulması.....	42
3.2. Aygıt Karakterizasyonu.....	43
	44
BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI	
	55
BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ	
KAYNAKLAR	56
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

Al	: Alüminyum
A	: Diyot kontakt alanı
A^*	: Richardson sabiti
A^{**}	: Modifiye Richardson sabiti
B	: İndüksiyon alanı
D_{it}	: Arayüzey tuzak yoğunluğu
D	: Yer değiştirme vektörü
dn	: Küçük bir enerji aralığındaki elektron yoğunluğu
$\Delta\Phi_B$	: Schottky alçalması
δ	: Arayüzey tabakasının kalınlığı
E_c	: İletkenlik bantının enerji seviyesi
E_v	: Değerlik bantının enerji seviyesi
E_{ss}	: Arayüzey durumlarının enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_c	: İletkenli bant enerjisi
E_{Fn}	: n-tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi
E_{Fp}	: p-tipi yarıiletkenin Fermi enerjisi
E_m	: Maksimum elektrik alan
E	: Elektrik alan
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun elektriksel geçirgenliği
ϵ_i	: Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti
$E(x)$	: Schottky bölgesindeki elektrik alanı
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
Φ_B	: Engel yüksekliği

Φ_{Bn}	: n tipi yarıiletkenin engel yüksekliği
Φ_{ms}	: Metal ve yarıiletken arasındaki iş fonksiyonlarının farkı
Φ_F	: Gerçek Fermi enerji seviyesi ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
Φ_o	: Etkin engel yüksekliği
Φ_{Bo}	: Sıfır beslem engel yüksekliği
Φ_{wf}	: Metalle yarıiletken arasındaki iş fonksiyonu farkı
$G_{m,maks}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen maksimum iletkenlik
$G_{m,acc}$	: Biriktirme bölgesinde ölçülen iletkenlik
Γ	: Engel yüksekliğinin gerilim katsayısı
H	: Hidrojen
H_2O_2	: Hidrojen peroksit
h	: Planck sabiti
HF	: Hidroflorik asit
I	: Diyot akımı
I_o	: Doyma akımı
J	: İletim akımı yoğunluğu
J_n	: Elektronların oluşturduğu akım
J_p	: Deşiklerin oluşturduğu akım
J_{sm}	: Yarıiletkenden metale doğru geçen elektronların akımı
J_{ms}	: Metalden yarıiletkene doğru geçen elektron akımı
J_o	: Doyma akımı yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
m^*	: Deşiklerin etkin kütlesi
m_o	: Serbest elektron kütlesi
μ_p	: Deşik mobilitesi
μ	: Geçirgenlik tensörü
n	: İletkenlik bandındaki elektron sayısı
$n(x)$	: Elektron yoğunluğu
n_i	: Gerçek taşıyıcı yoğunluğu
N_{ss}	: Arayüzey durum yoğunluğu
N_v	: Değerlik bandındaki etkin durum yoğunluğu

N_a	: Alıcı atomlarının yoğunluğu
N_m	: Metal ile dengede olan arayüzey durumlarının yoğunluğu
N_y	: Yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğu
N_D	: Verici yoğunluğu
N_c	: İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_D^+	: İyonize verici konsantrasyonu
N_A^-	: İyonize alıcı konsantrasyonu
NH_4OH	: Amonyum hidroksit
P	: Değerlik bandındaki deşik sayısı
Q	: Yarıiletkende oluşan yük yoğunluğu
q	: Elektronik yük
$q\Psi_{(x)}$	: Elektron potansiyel enerjisi
$q\Phi_{B(x)}$	: Yarı Fermi seviyesi
R_s	: Seri direnç
ρ	: Öz direnç
Si	: Silisyum
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık
V_o	: Kesme voltajı
V_{bi}	: Difüzyon potansiyeli
V	: Uygulanan harici beslem
V_x	: Elektron hızı
V_d	: Difüzyon potansiyeli
V_i	: Arayüzey tabaka üzerinde düşen gerilim
w	: Açısal frekans
W_D	: Tüketme bölgesinin genişliği
X	: Yarıiletken elektron yatkınlığı
MS	: Metal/yarıiletken
$n-Si$	: N-tipi silisyum
$p-Si$	: P-tipi silisyum
AE	: Alan Emisyonu
RCA	: Amonyum hidroksit ve hidrojen peroksitten oluşan çözelti
TAE	: Termiyonik Alan Emisyonu

TE : Termiyonik Emisyon
TED : Termiyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji band diyagramı.....	3
Şekil 2.2. Metal (iletken), yarıiletken ve yalıtkan bir malzemenin enerji band aralıklıkları.....	4
Şekil 2.3. Deşik hareketi (pozitif yük hareketi).....	5
Şekil 2.4. Silisyum kristali içerisine yerleştirilmiş alıcı (acceptor) atom (B).....	7
Şekil 2.5. Metal/p-tipi yarıiletken kontak için enerji band diyagramı (a) kontak öncesi (b) Kontak sonrası (denge durumu).....	9
Şekil 2.6. Metal/p-tipi yarıiletken kontak için enerji band diyagramı (a) Kontak öncesi (b) Kontak sonrası (denge durumu).....	11
Şekil 2.7. (a) $V>0$ (düz beslem) durumundaki enerji-band diyagramı, (b) $V<0$ (ters beslem) durumundaki enerji-band diyagramı.....	12
Şekil 2.8. Metal/n-tipi yarıiletken kontak için ($\Phi_S < \Phi_M$) elektron enerji-bant diyagramı (a) Kontak yapılmadan önceki durumu (b) Kontak yapıldıktan sonra termal denge durumu	13
Şekil 2.9. Metal/n-tipi omik kontak için enerji bant diyagramları: a) kontakdan önce b) kontakdan sonra	14
Şekil 2.10. Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) Schottky Diyot	15
Şekil 2.11. Düz beslem altında metal/yarıiletkende (MS) oluşan akım iletim mekanizmaları.....	17
Şekil 2.12. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta akım iletim mekanizmasının katkı konsantrasyon durumuna bağımlılığı. (a) Düşük seviye ND, TE (b) Orta seviye ND, TAE (c) Yüksek seviye ND, AE (elektronların akımı şekilde de gösterildiği gibi oklar yönündedir.).....	23
Şekil 2.13. Arayüzey tabaksı ile bir n-tipi metal/yarıiletken kontak için enerji-band diyagramı.....	26
Şekil 2.14. Seri direncin (R_S) I-V grafiği üzerindeki etkisi.....	28
Şekil 2.15. Aydınlatma altındaki metal/yarıiletken (Schottky) kontak	35

Şekil 2.16. Fotonlarla uyarak (a) bandlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki foto uyarma.....	36
Şekil 2.17. Schottky fotodiyotun yapısı.....	37
Şekil 2.18. Fotodiyotun karanlık ve aydınlık altındaki akım-voltaj eğrileri.....	38
Şekil 3.1. (111) düzleminde kesilmiş n-tipi altta.....	40
Şekil 3.2. Isıtıcılı manyetik karıştırıcı cihazı.....	41
Şekil 3.3. Üretilen Au/ Fluoresceinamine/n-Si/Al fotodiyotunun şematik temsili.....	43
Şekil 4.1. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı aydınlatma seviyeleri altındaki I-V eğrileri.....	45
Şekil 4.2. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı RR değerleri.....	46
Şekil 4.3 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı ideallik faktörü ve engel yüksekliği değerleri.....	47
Şekil 4.4. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının F(V)-V çizimleri.....	48
Şekil 4.5. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının Cheung çizimleri.....	49
Şekil 4.6. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapılarının aydınlatma yoğunluğuna bağlı a) foto-tepki (R) ve b) foto-duyarlılık (S) eğrileri.....	50
Şekil 4.7 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı aydınlatma yoğunlukları altında dedeksiyon eğrisi	51
Şekil 4.8. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısı için aydınlatma yoğunluğuna bağlı geçici foto-akım ölçümleri.....	53
Şekil 4.9 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı geçici fotoakım ölçümleri.	54

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1. Doğrultucu kontak ve omik kontak oluşturmak üzere kullanılan yarıiletken tipleri ve iş fonksiyonları.....	9
Tablo 4.1. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyotu için elde edilen diyot parametreleri.....	47
Tablo 4.2 Çeşitli aydınlatma yoğunlukları altında Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısı için fotodedektör parametreleri.....	53

ORGANİK TABANLI FOTODİYOTLARIN ÜRETİMİ VE OPTO-ELEKTRONİK UYGULAMALAR İÇİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN TAYİNİ

ÖZET

Bu tez çalışmasında organik arayüzeyli metal/yarıiletken yapılar üretilmiş ve bu aygıtların elektriksel özellikleri, karanlık ve farklı aydınlatma yoğunlukları altında (20 - 100 mW/cm²) sistematik olarak incelenmiştir. Arayüzey tabakası olarak Fluoresceinamine kullanılmış ve bu malzeme döndürmeyle kaplama tekniği ile silisyum alttabakalar üzerine büyütülmüştür. Elde edilen Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapılarının akım-gerilim (I-V) özellikleri oda sıcaklığında analiz edilmiş, bariyer yüksekliği (Φ_B), idealite faktörü (n) ve seri direnç (R_s) gibi bazı performans parametreleri incelenmiş, foto-duyarlık, foto-tepki ve dedeksiyon gibi fotodiyot özellikleri incelenmiştir. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapılarının farklı aydınlatma yoğunluklarına ve geçici akım geçişlere karşı güçlü bir foto-akım tepkisine sahip olduğu görülmüştür. Tüm deneysel sonuçlar, aydınlatma yoğunluğundaki değişikliklerle birlikte aydınlatmaya değerli bir yanıt veren Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapılarının optoelektronik uygulamalar için bir fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

Anahtar kelimeler: Fotodiyot, Fluoresceinamine, akım-gerilim, opto-elektronik

PRODUCTION OF ORGANIC BASED PHOTODIODES AND DETERMINATION OF ELECTRICAL PROPERTIES FOR OPTO-ELECTRONIC APPLICATIONS

SUMMARY

In this thesis, metal/semiconductor structures with organic interfaces were produced and the electrical properties of these devices were systematically investigated under dark and different lighting intensities (20 - 100 mW/cm²). Fluoresceinamine was used as interface layer and this material was grown on silicon substrates by spin coating technique. The current-voltage (I–V) properties of obtained Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al structures were analyzed at room temperature, and some performance parameters such as barrier height (Φ_B), ideality factor (n) and series resistance (R_s) were determined, and photodiode properties such as photosensitivity, photoresponse and detection are also studied. It has been observed that Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al structures have a strong photocurrent response to different illumination intensities and transient current transients. All experimental results show that Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al structures, which give a valuable response to illumination with the change in illumination intensity, can be used as a photodiode for optoelectronic applications.

Keywords: Photodiode, Fluoresceinamine, current-voltage, opto-electronic

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Güneş enerjisi bir diğer adıyla yeşil enerji son zamanlarda büyük bir ilgi odağıdır. [1] Fosil yakıtlar son yıllarda önemli bir yere sahip olsalar da yeşil enerjinin daha ucuz ve insan sağlığını tehdit etmemesinden kaynaklı ön plana çıkmıştır [1,2]. Bu bağlamda fotodiyot bazlı organik malzemeler, güneş enerjisini temiz enerjiye dönüştürmede rol oynamaktadır [2]. Organik malzemeler, son zamanlarda üretilen elektrikli ve optik cihazların üretiminde geleneksel inorganik malzemelere alternatif olarak düşünülmektedir [3].

Organik yarıiletken malzemeler, düşük alt yapı maliyetine sahip, geniş ve esnek yüzeylere uygulanabilir olmasından kaynaklı son yıllarda büyük ilgi çekmektedirler. Bu nedenle, organikten inorganiğe kadar birçok malzemede bu cihazların foto duyarlılığı geliştirilmeye çalışılmaktadır [4,5]. Bu malzemeler, iki gruba ayrılmaktadır. Bunlardan ilki düşük molekül ağırlıklı küçük moleküller ve daha yüksek molekül ağırlıklı polimerlerdir. Bunlar, organik olmak üzere yarıiletkenler, fotodiyotlar, ışık yayıcı diyotlar, güneş pilleri ve ince film transistörler gibi devre elmanlarının üretimlerinde kullanılan materyallerdir.

Organik arayüzeyin kullanıldığı Schottky diyotları yakın zamana kadar oldukça ilgi görmektedir. Bu diyotlar üzerine konu alan çalışmalar yoğunlaşmıştır. Shottky diyotların, Pn eklemlere göre daha hızlı anahtarlama yapabilmesi, düşük gerilimli ve kayıplı olması, düşük maliyetli ve kolay üretimli olmaları bu diyotları ön plana çıkartmıştır. Ayrıca Shottky diyotlarının elektrikselsel nitelikleri büyük ölçüde arayüzey tabakasının mevcut olmasına bağlıdır. Yapıda bulunan arayüzey tabakalar cihazın elektronik özelliklerini etkileyip performansları üzerinde etkin ölçüde rol oynar. Bu bağlamda Shottky diyotlar, malzeme uygulamalarında önem arz etmektedir [6,7].

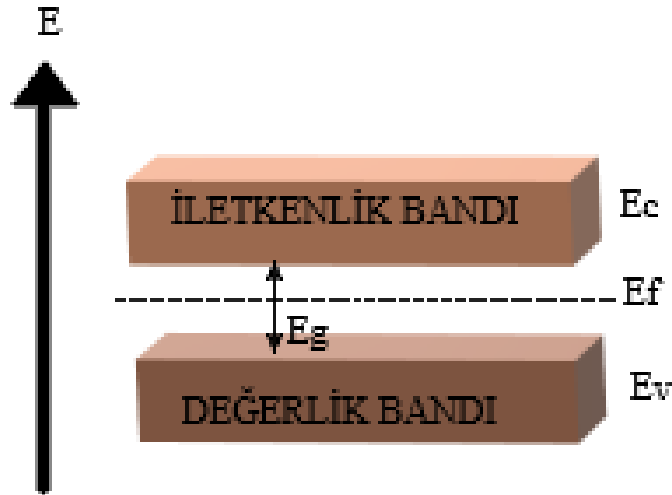
Bu tez çalışmasında organik arayüzeyli metal/yarıiletken yapıları üretilmiştir. Bunun için arayüzey malzemesi olarak daha önce bu tip yapılarda kullanılmamış Fluoresceinamine malzemesi seçilmiş ve silisyum alttabakalar üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Elde edilen yapıların farklı ışık yoğunluklarına bağlı fotodiyot özellikleri incelenmiştir.



BÖLÜM 2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Yarıiletkenler

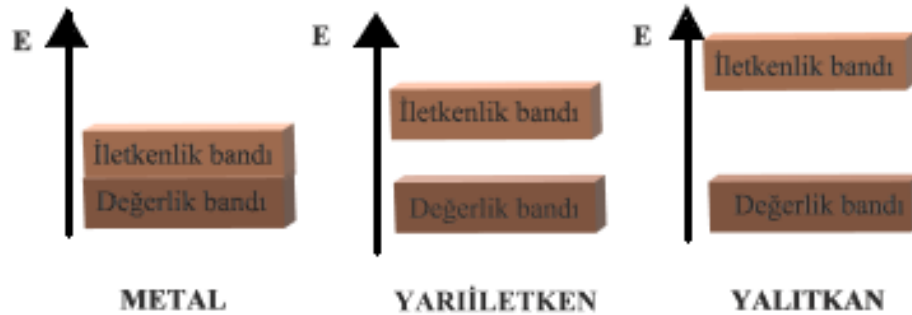
Malzemeler, elektriksel özelliklerine göre üç grupta incelenebilirler. Bunlar iletken, yarıiletken ve yalıtkan olarak ifade edilirler. Yarıiletkenler, elektrik akımının belirli bir değere kadar olmadığı ve bu değerden sonra sonsuza giden küçük direnç gösteren malzemelerdir. Üzerinde de oldukça yoğun çalışmaların sürmekte olduğu yarıiletken malzemelerle, detektör, anahtar, diyot vb. birçok elektronik devre elemanı yapılabilmektedir [8]. İletkenlik özelliği, yalıtkan ve iletken malzemelere kıyasla arada bir değerde olan yarıiletkenlerin yasak enerji band aralığı 2 eV'dan küçüktür. Yarıiletkenlerin öz direnci, oda sıcaklığında $10^{-2} \Omega\text{cm}$ ile $10^9 \Omega\text{cm}$ arasında bir değerdir. Isıl işlemler, katkılama ve optiksel uyarma gibi bir takım farklı yöntemlerle yarıiletkenlerin elektriksel özellikleri [9].



Şekil 2.1. Bir yarıiletkenin enerji band diyagramı

Yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda yalıtkan olarak davranırlar. Bunun nedeni, değerlik bandı düşük sıcaklıklarda tamamen elektronlar ile doludur fakat yeterli enerjiye sahip olmadıkları için iletkenlik bandına geçemezler. Yeterli enerjiye ulaşan elektronlar iletkenlik bandına geçmektedirler. Bu elektronlar, bir atomun çekirdeğine bağlı olmayıp serbest elektronlar haline gelmektedirler. Sonuç olarak ısı bir etkiyle veya farklı başka yöntemlerle elektronların enerji seviyeleri değiştirilip hareket sağlanır ve yarıiletken elektriği iletir.

Bu durumun iletkenler için pek bir geçerliliği yoktur. Çünkü değerlik bandı iletim bandıyla üst üste gelir ve elektronlar daha düşük enerjiye sahip olsalar dahi elektriği kolayca iletirler. Şekil 2.2.'de bir iletken, yarıiletken ve yalıtkan malzemenin enerji band aralıkları gösterilmektedir.

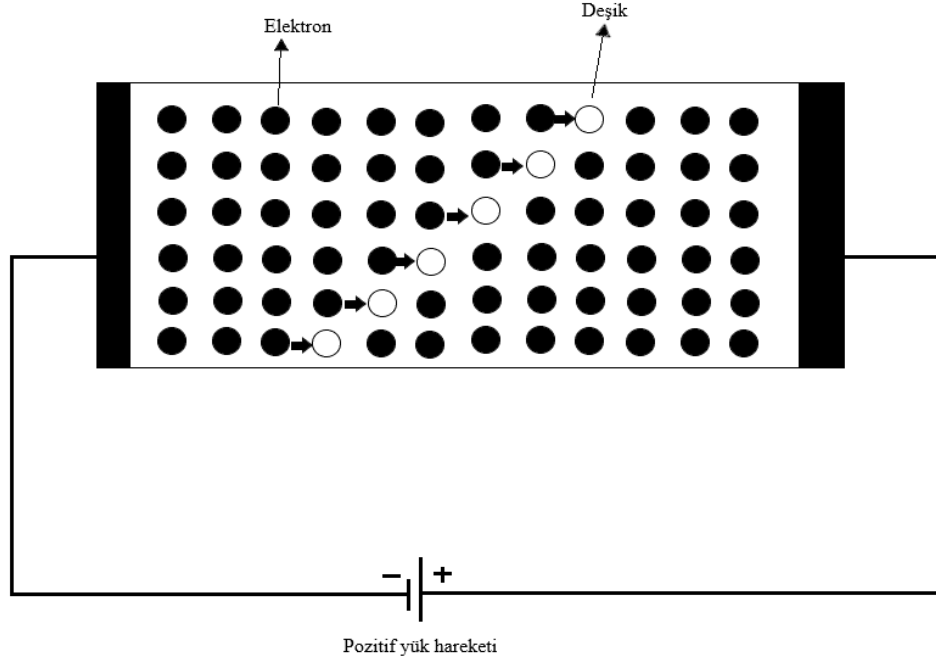


Şekil 2.2. Metal (iletken), yarıiletken ve yalıtkan bir malzemenin enerji band aralıkları

2.2. Deşik Kavramı

Elektrik akımı, elektronlar ve deşikler olmak üzere iki tür yük taşıyıcı ile taşınmaktadır. Yarıiletkenlerde, yasak enerji aralığı oldukça dardır. Oda sıcaklığında elektronlar bu dar yasak enerji aralığını aşarak iletkenlik bandına geçebilmektedirler. İletkenlik bandına geçen elektronlar elektrik iletimini sağlayıp serbest elektronlar haline geçmektedirler. İletkenlik bandına geçen elektronlar, valans bandında boşluklar (hole) bırakırlar. Bu boşluklar, deşik olarak ifade edilmektedirler. Deşikler birer parçacık değildir. Bu yüzden bir deşik tek başına var olamaz. Deşikler, elektronların

tam tersine pozitif yük ($q=1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb) taşırlar. Şekil 2.3.'de deşiklerin bir katı içerisindeki hareketleri gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Deşik hareketi (pozitif yük hareketi)

2.3. Gerçek Yarıiletkenler

Hiçbir örgü kusuru olmayan mükemmel yarıiletkenlere gerçek (saf) yarıiletkenler denir. Gerçek yarıiletkenlerde, çoğunluk taşıyıcılarının serbest elektronlar ve deşikler bulunmaktadır. Değerlik bandından iletkenlik bandına geçen her elektron geride kendisiyle eş sayıda holler bırakır. Yani değerlik bandında bulunan holler ile iletkenlik bandındaki elektronların sayıları eşit durumda olur. Bu durumu şöyle ifade edebiliriz;

$$p = n = n_i \quad (2.1)$$

p = değerlik bandındaki deşik sayısı, n =iletkenlik bandındaki elektron sayısı

n_i = gerçek taşıyıcı yoğunluğu

Termodinamik denge altındaki deşik ve elektronlar ile gerçek taşıyıcı sayısı arasında mevcut olan ilişki şu şekilde ifade edilir;

$$pn = n_i^2 \quad (2.2)$$

Gerçek bir yarıiletkende Fermi enerji seviyesi ise şöyle ifade edilir;

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right) = E_i \quad (2.3)$$

E_F = Fermi enerji seviyesi, m_h^* = boşluğun etkin kütlesi,
 m_e^* = elektronun etkin kütlesi

Eğer $m_e^* = m_h^*$ olarak alırsak;

$$E_i = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (2.4)$$

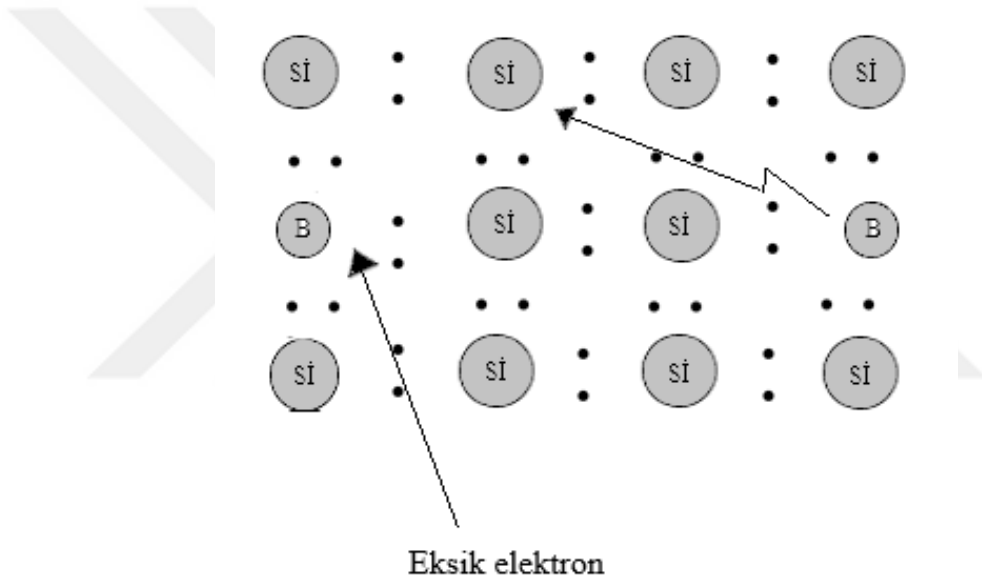
E_i = gerçek enerji seviyesi, E_c = iletkenlik band enerjisi, E_v = değerlik band enerjisi

Bu Fermi seviyesinin, enerji band aralığı ortasında olduğu kabul edilir. Oda sıcaklığındaki bir silisyum malzemesinin gerçek taşıyıcı yoğunluğu $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 'tür. Sıcaklık arttırıldıkça elektronlarda iletkenlik bandına geçecek seviyeye ulaşır ve iletkenlik bandında serbest elektronlar olarak hareket ederler. Kristal içerisinde yaptıkları bu hareket ile akım iletimine katkıda bulunurlar. Serbest elektronların değerlik bandında oluşturdukları holler de kristal içerisinde hareket ederler ve akım iletimine katkıda bulunurlar. Bir malzemenin iletkenliği, bu iki olguya dayanmaktadır. Yani taşıyıcıların sayısı ne kadar artarsa malzemenin iletkenliği de artar.

2.4. Katkılı Yarıiletkenler

Bir yarıiletken malzeme içerisindeki hollerin (boşlukların) sayısı elektronların sayısına eşit olmadığı duruma “katkılı yarıiletken” denir. Katkılama işlemi ile boşluklar ve

elektronların yoğunluğu artırılabilir. Böylece yarıiletken malzemenin elektriksel özelliği değiştirilebilir. Bir yarıiletken içerisinde yer alan elektron verme (donor) veya elektron alma (acceptor) gibi özelliklere sahip atomlara katkı atomlar (safsızlık atomları) adı verilir. Katkılama işlemi ile kristali oluşturan atomların bir bölümü yerine katkı atomları (safsızlık atomları) eklenir. Böylece yarıiletkenin iletkenlik kontrolü sağlanabilir [10]. Bu işlemin amacı elde edilmiş p-tipi ve n-tipi yarıiletken malzemeler ile modern elektronik malzemelerin gelişmesine katkı sağlamaktır. Modern elektroniğin vazgeçilmezi olan diyot ve transistörler, p-tipi ve n-tipi gibi yarıiletkenlerden üretilirler.



Şekil 2.4. Silisyum kristali içerisinde yerleştirilmiş alıcı (acceptor) atom (B).

Şekil 2.4.'de görüldüğü üzere periyodik tablonun III. kolonunda yer alan Bor atomu eklenmek suretiyle elde edilmiş bir p-tipi silisyum kristalinin şematik diyagramı gösterilmektedir. Yarıiletkene eklenmiş bu üç elektronlu Bor atomu silisyum atomuyla dördüncü bağı yapmak üzere elektron yakalar. Böylece bir elektron boşluğunu (hole) meydana getirir. Hole, kristal içerisinde hareket eder ve yarıiletkenin iletkenliğine katkıda bulunur. Katkılandığı yarıiletkende elektron alan katkı atomlarına alıcı (acceptor), bu yarıiletkenlere ise p-tipi yarıiletken adı verilir.

2.5. Metal/Yarıiletken (Schottky) Kontaklar

İlk defa 1874 yılında metal ile yarıiletken arasında bulunan doğrultucu etki F. Braun [11] tarafından keşfedilmiştir. Daha sonra bu etki 1938 yılında Schottky [7] ve Mott [6] tarafından da açıklanmıştır. Bu doğrultucu kontağa Schottky kontak ya da Schottky diyot adı verilir. Kullanılan Schottky diyotlarda ölçüm değerlerinde meydana gelebilecek hataları minimuma indirmek amacıyla kristal yapıya uygun bir kontak yapılır. Bu kontak yapılmadan önce malzemenin yüzeyi olabildiğince temiz ve pürüzsüz hale getirilmelidir ve yarıiletken kristaline atomik ölçülerde temas etmelidirler.

Metal ile yarıiletken arasında meydana gelen kontak yapılan maddelerin Fermi enerji seviyeleri eşit düzeye gelene kadar aralarında yük alışverişi gerçekleştirir. Bu yük alışverişi ile arayüzeyde bir potansiyel engel oluşur. Metal/yarıiletken kontaklar doğrultucu ve omik kontak olmak üzere iki şekilde oluşur. MS kontaklarda iletkenliği sağlayan yük taşıyıcıları, doğru beslemde akımı iyi şekilde iletir fakat ters beslemde akımın kötü ya da hiç iletilmemesi söz konusudur. Bu durum doğrultucu kontak olarak adlandırılmaktadır. Omik kontak ise metal ile yarıiletken arasında her iki yöne iletimi sağlayan küçük dirençli eklemlerdir.

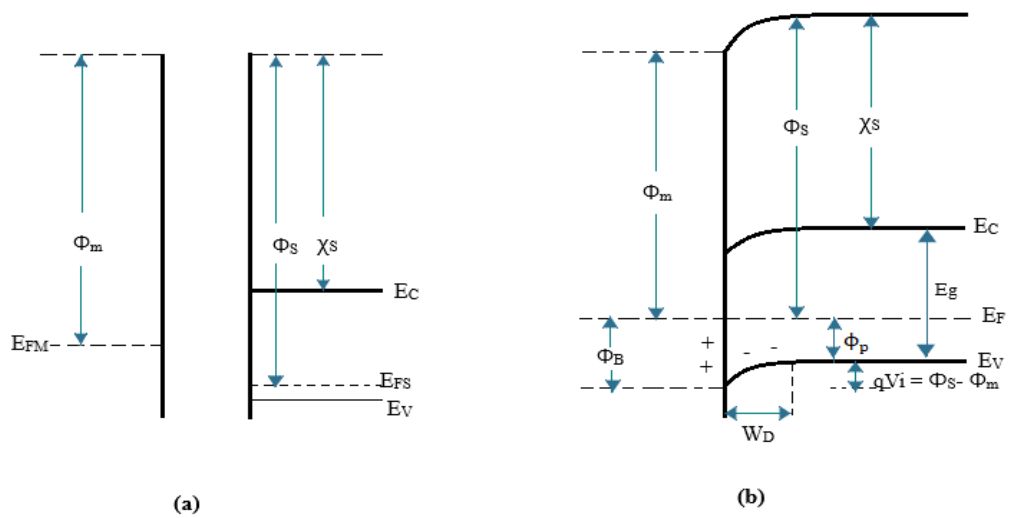
Bir metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonu oluşturacakları kontak tipini belirlerler. MS (metal/p-tipi yarıiletken) kontaklarda, metal malzemesinin iş fonksiyonu (Φ_m), yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu zaman omik kontak, küçük olduğu zaman ise doğrultucu kontak meydana getirirler. Metal/n-tipi yarıiletkenlerde ise bu durum tam tersidir [12,13].

Tablo 2.1. Doğrultucu kontak ve omik kontak oluşturmak üzere kullanılan yarıiletken tipleri ve iş fonksiyonları.

İş fonksiyonu	Yarıiletken cinsi	Kontak cinsi
$\Phi_m > \Phi_s$	P-tipi	omik
$\Phi_m < \Phi_s$	N-tipi	omik
$\Phi_m < \Phi_s$	P-tipi	doğrultucu
$\Phi_m > \Phi_s$	N-tipi	doğrultucu

2.5.1. P-tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontak

İş fonksiyonlarının durumu $\Phi_m < \Phi_s$ olduğunda, p-tipi yarıiletken kullanılırsa doğrultucu kontak oluşur. Bu durumda metalle p-tipi yarıiletken birbirine atomik boyutta temas ettirilmesiyle metalden yarıiletkene doğru elektron akışı meydana gelir. Bu elektronlar yarıiletkende azınlık taşıyıcılarıdır. Elektronlar, hollerle yeniden birleşerek, yük taşıyıcılarından arınmış bir uzay yük bölgesinin oluşmasını sağlar. Bu bölgede hollerin yoğunluğu, alıcı (acceptor) yoğunluğuna kıyasla önemsiz denecek düzeyde düşüktür.



Şekil 2.5. Metal/p-tipi yarıiletken kontak için enerji band diyagramı (a) kontak öncesi (b) Kontak sonrası (denge durumu) [14].

Şekil 2.5.'de de görüldüğü üzere bu tip kontaklarda yarıiletken tarafında Fermi seviyesi bu iki malzemenin iş fonksiyonlarının farkı ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağı doğru bükülür. Metal kısmında Fermi seviyesi sabit kalmaktadır. Kontakın yarıiletken tarafındaki boşluklarla elektronlar tekrardan birleşir, böylece oluşan uzay yük bölgesi alıcı atomlarının konsantrasyonu ile orantılı bir şekilde W_D genişliğinde bir tüketim tabakası meydana getirir. Bir p-tipi yarıiletkendeki akım, holler tarafından taşındığından Şekil 2.5.b'de bulunan band diyagramında holler için bariyer aranır. Boşluklar için bariyer yüksekliği (Φ_p) şu şekilde ifade edilir;

$$\Phi_B = \chi_s + E_g - \phi_m \quad (2.5)$$

Φ_B = bariyer yüksekliği, Φ_m = metalin iş fonksiyonu,
 E_g = yarıiletkenin yasak enerji bandaralığı, χ_s = elektron yakınlığı

$$\chi_s = \phi_m - \phi_B \quad (2.6)$$

Yarıiletken malzeme içerisinde negatif yüklerin hakim olduğu belirli kalınlıkta bir bölge meydana gelir. Bu bölgeye tüketim tabakası adı verilir. Bu tabakada bulunan yükler ise “uzay yükleri” adını alır. Metal kısmındaki pozitif yüklerle negatif yükler bir kapasite oluşturur. Bu meydana gelen kapasiteye de “Schottky kapasitesi” denir. W_D olan tüketim tabakasının oluşması ile bu uzay yük bölgesini iyonize olmuş alıcı atomları doldurur. Yarıiletken içerisindeki holler için difüzyon potansiyeli ise;

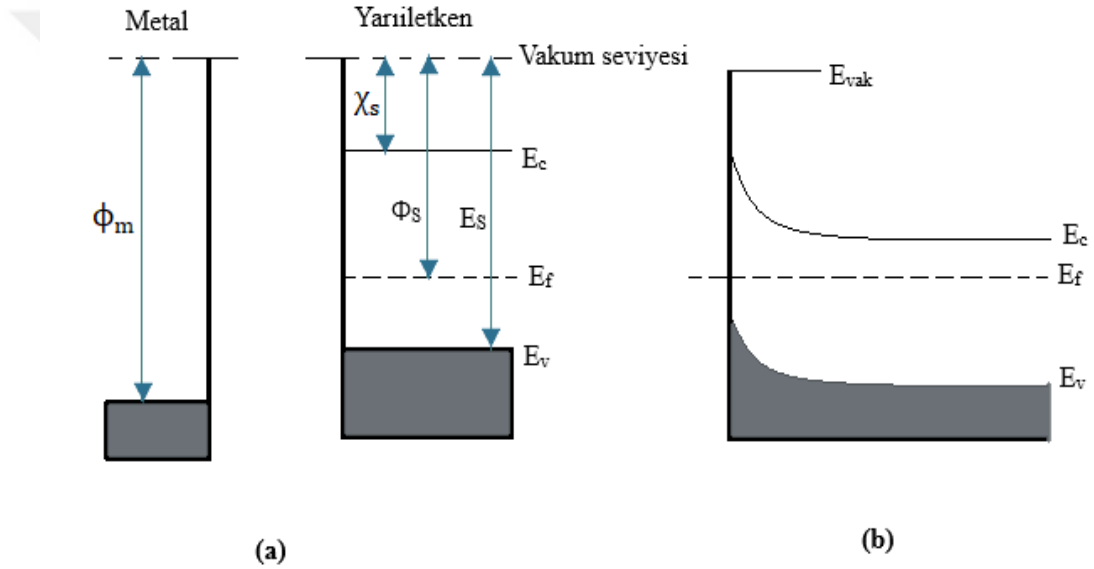
$$V_d = \frac{1}{q}(\Phi_s - \Phi_m) \quad (2.7)$$

V_d = difüzyon potansiyeli, q = elektronik yük, Φ_s = yarıiletkenin iş fonksiyonu

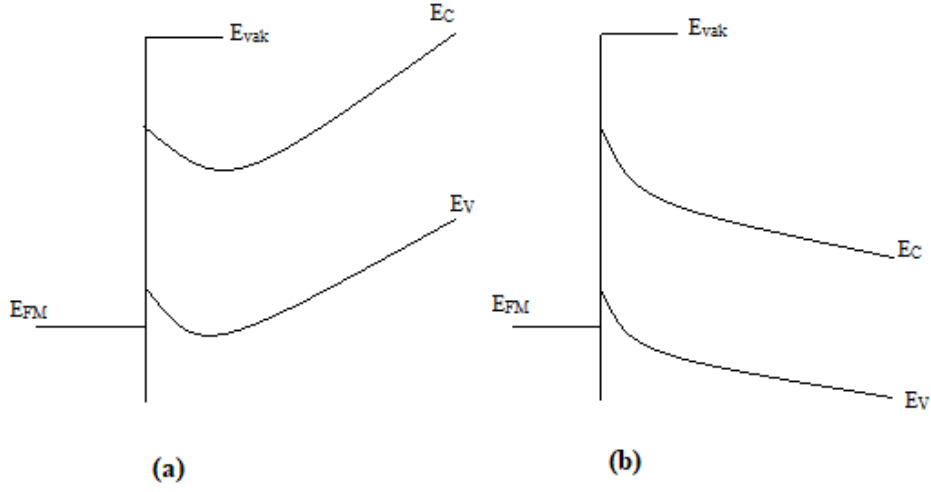
olarak ifade edilir. Burada V_d , difüzyon potansiyelidir.

2.5.2. P-tipi metal/yarıiletken omik kontak

İş fonksiyonlarının durumu $\Phi_m > \Phi_s$ olduğunda, p-tipi yarıiletken kullanıldığı zaman omik kontak meydana gelir. Metale yarıiletken bölgesinden elektronlar geçiş yapar. Böylece yarıiletken bölgesinde pozitif yük, metal bölgesinde ise negatif yük oluşur. Bu geçişler Fermi enerjileri eşitlene kadar devam eder. Her iki beslemde de geçiş olmaktadır.



Şekil 2.6. Metal/p-tipi yarıiletken kontakın enerji band diyagramı (a) Kontak öncesi (b) Kontak sonrası (denge durumu)



Şekil 2.7. (a) $V > 0$ (düz beslem) durumunda enerji band diyagramı, (b) $V < 0$ (ters beslem) durumunda enerji-band diyagramı

2.5.3. N-tipi metal/yarıiletken doğrultucu kontak

Daha önce belirtildiği üzere, bir metal yarıiletkene temas ettirildiğinde potansiyel bariyer meydana gelir. Meydana gelen potansiyel engel yüksekliği, MS kontaklar arayüzündeki yüklerin birbirinden ayrılması sonucu oluşur. Bu bağlamda, yarıiletken bölgede taşıyıcı yüklerden arınmış yüksek bir direnci olan bir alan meydana gelir. Oluşan bu engel yüksekliğini açıklamak üzere ortaya atılan en eski model, Schottky ve Mott tarafından sunulmuştur. Bu sunulan modelde potansiyel engelin meydana gelişindeki sebebin, iki malzemenin iş fonksiyonları arasındaki farklılıktan kaynaklanması olarak öne sürülmüştür [14].

Metal tarafındaki bariyer yüksekliği, yarıiletken kısmındaki bariyer yüksekliğinden farklıdır ve ;

$$\Phi_B = (\Phi_M - \chi_S) \quad (2.9)$$

olarak ifade edilir.

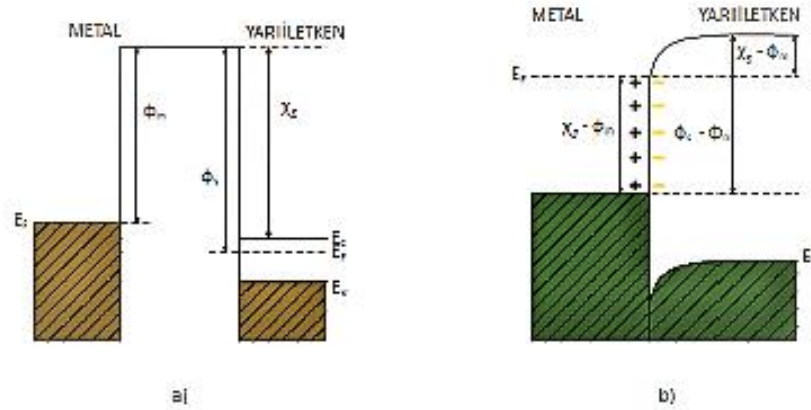
$$\Phi_S = (\chi_S + \Phi_n) \quad (2.10)$$

$$\Phi_M = (qV_i + \Phi_S) \quad (2.11)$$

Φ_n = Yarıiletkenin fermi seviyesi q = elektron yükü

2.5.4. N-tipi metal/yarıiletken omik kontak

Metal malzemenin iş fonksiyonu yarıiletken malzemenin iş fonksiyonundan küçük olduğu zaman ($\Phi_m < \Phi_s$) metal/n-tipi yarıiletken omik kontak meydana gelir. Şekil 2.9'da yarıiletken ile metalin kontak yaptıktan önceki ve sonraki durumu gösterilmiştir.



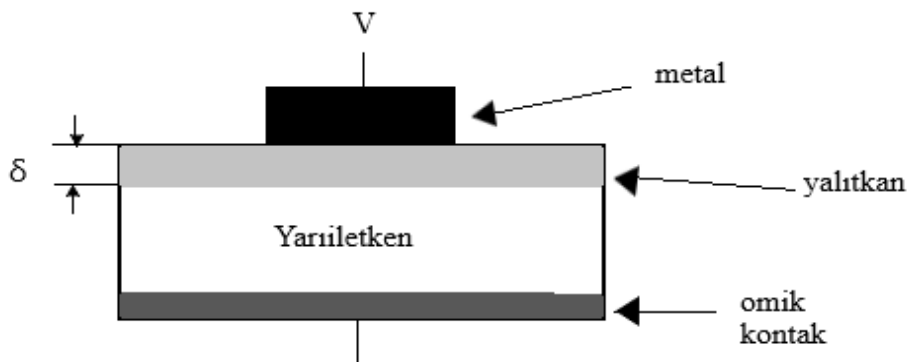
Şekil 2.9. Metal/n-tipi omik kontakın enerji bant diyagramları: a) kontak öncesi b) kontak sonrası [17]

Şekil 2.9’da görebildiğimiz üzere kontak yapılmadan önce yarıiletken tarafındaki fermi enerji seviyesi ile metal tarafındaki fermi enerji seviyesi arasında $\Phi_s - \Phi_m$ kadarlık bir fark vardır. Metalde bulunan elektronlar yarıiletkene doğru fermi seviyeleri eşitlene kadar akar. Bu elektronlar geride pozitif yükü olandeşikler bırakır. Yarıiletken yüzeyi üzerinde negatif yüklü alan oluşturur. Sonuçta E_v ve E_c vakum seviyesi ile birlikte yukarı doğru bükülür [18].

2.6. Metal/Yalıtkan/Yarıiletken Yapıların (MIS) Fiziği

Metali yarıiletkenden yalıtırmak için yalıtkan bir tabaka kullanılır. Bu durum sonucu bir metal/yarıiletken (MS) yapı, metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) yapıya dönüşür. Bir metal/yalıtkan/yarıiletken diyot silikon tabaka, burada bulunan alt tabakada oluşturulmuş bir omik kontak ile oksit tabakası ve doğrultucu kontakta oluşur. Bu malzeme kombinasyonunda iki arayüzey mevcuttur ve bunlar; metal/yalıtkan arayüzeyi ve yalıtkan/yarıiletken arayüzeyidir. Bu arayüzeylerin oluşturulması durumunda diyotun karakteristiği değiştirilmiş olur. İdeal bir durumda, yükler yarıiletkende ve yalıtkan malzemenin yakınında ki metal yüzeyde bulunur. DC gerilim uygulandığında ise yalıtkindan akım geçmez [19, 20].

Gerçek durumda MIS yapılarda bulunan arayüzey durumları yarıiletken/yalıtkan arayüzeyinde bulunur. Bu nedenle diyot ideal durumdan farklı davranış sergiler. Bazı diyot aygıtlarında ise yalıtkan tabaka içerisinden akım geçebilir [15,20].

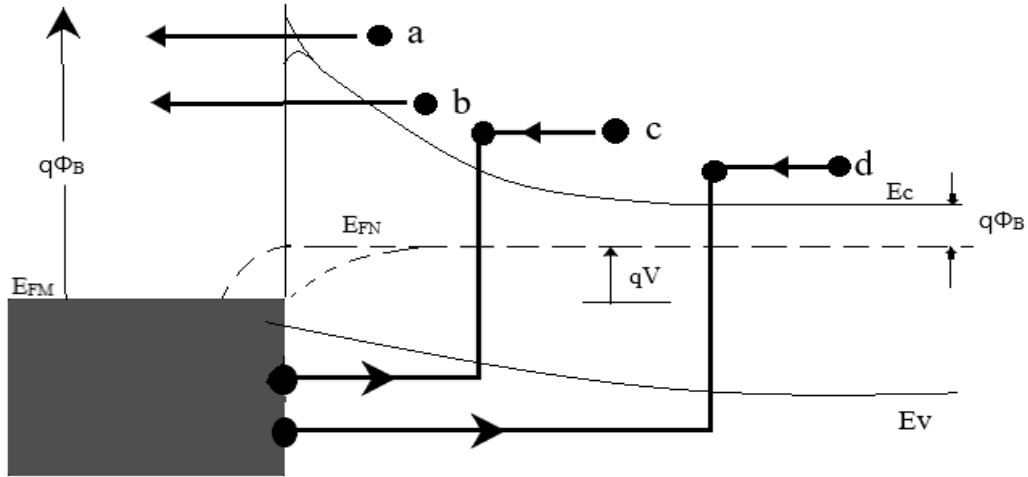


Şekil 2.10. Metal/yalıtkan/yarıiletken (MIS) Schottky Diyot [19].

2.7. Metal/Yarıiletken (MS) Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları

MS yapıların kontaklarında akım iletimleri elektronlar ya da deşikler ile sağlanmaktadır [15]. Kontaklarda gerçekleşen bu iletim mekanizmaları Rhoderick [21] tarafından incelenmiştir. MS yapı kontağa dışarıdan bir gerilim uygulandığı zaman, iki kontağın arasındaki alanda meydana gelen oksit tabakası, uygulanan harici gerilim yönü, seri direnç, ortam sıcaklığı, yarıiletken malzemenin cinsi ve arayüzey durumları oluşan eklem elektriksel özellikleri üzerinde etkisi vardır [19,15]. Schotky diyotlarda, akım mekanizmalarından hangisinin oluştuğunu bilmek, diyotun işlevsel kalitesini belirlemekte oldukça faydalıdır. MS kontaklarda oluşan başlıca akım iletim mekanizmaları aşağıdaki gibi sıralanır [19,15].

- Termoyonik Emisyon Teorisi (TE)
- Difüzyon Teorisi
- Termoyonik Emisyon-Difüzyon Teorisi (TED)
- Engel Boyunca Tünelleme (Termoyonik Alan Emisyonu (TAE), Alan Emisyonu (AE))
- Uzay Yük Bölgesinde Tekrardan Kombinasyon
- Yüksüz Bölgede Tekrardan Kombinasyon
- Deşik (Boşluk) Enjeksiyonu
- T_0 Etkili Akım İletimi



Şekil 2.11. Düz beslemde metal/yarıiletkende (MS) oluşan akım iletim mekanizmaları.

Şekil 2.11.'de gösterilen akım iletim mekanizmalarının şematik gösterimi kısaca şöyle açıklanabilir; (a), bariyer yüksekliğini aşarak yarıiletkenden metale doğru olan bir elektron iletimi söz konusudur (TE). Bu olay Schottky diyotları için uygundur. (b), elektronların engel boyunca tünellemesi, (c), uzay yük bölgesinde rekombinasyon ve (d) ise metal tarafından yarıiletken tarafına olan boşluk (deşik) enjeksiyonunun oluşturduğu akımı ifade eder.

2.7.1. Termioyonik emisyon teorisi (TE)

Metal, içerisinde bulunan serbest elektronların metalin ısıtılması ile metalin yüzeyini terk etmesi olayına termioyonik emisyon adı verilir. Bir diğer deyişle metal/yarıiletken kontaklarda, yeterli miktara ulaşmış ve termal enerji kazanmış taşıyıcıların metalden yarıiletkene ve yarıiletkenden metal tarafına doğru hareket ederek meydana getirdiği akıma denilmektedir [15]. Termioyonik emisyon teorisinde metal/p-tipi yarıiletkende boşluklar (deşikler) tarafından oluşturulurken, metal/n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar tarafından meydana getirilir. TE'ye göre elektronlara en az metalin iş fonksiyonu (Φ_m) kadar enerji verilir ise elektronlar metali terk ederler. Birim zaman içerisinde sıcaklık ile metali terk eden elektronların sayısı atar. Φ_m ' dan daha büyük enerji verilir ise elektronlar belirli bir kinetik enerjiye sahip olurlar. Bu kinetik enerji;

$$E_k = \frac{1}{2} mV^2 \quad (2.12)$$

şeklinde ifade edilir. İlk kez J.C. Maxwell tarafından bulunmuş olan moleküllerin hız dağılım fonksiyonu $F(v)$;

$$F(v) = Av^2 e^{-\frac{1/2mv^2}{k_B T}} \quad (2.13)$$

$F(v)$ = moleküllerin hız dağılım fonksiyonu, A = diyot kontak alanı

şeklinde ifade edilip denklem (2.13) ifadesi kullanılarak elektronların enerji yoğunluğu $f(E)$, enerji cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$f(E) = Ae^{-\frac{E}{k_B T}} \sqrt{E} \quad (2.14)$$

Termoiyonik emisyon teorisi (TE) hipotezi aşağıda belirtildiği üzere bölgesel alan ve yoğunluk farkına bağlı olarak nitelendirilmiştir:

- kT enerjisi, engel yüksekliğinden (potansiyel bariyer yüksekliği) çok küçüktür.
- Hayali kuvvetlerinin (image force) etkisi ihmal edilebilir.
- Bariyer eğiliminin şekli önemsizdir, bu nedenle akım yalnızca engel yüksekliğine bağlıdır.
- Isısal denge var olup, net akımın geçmesi bu dengeye etki etmez.
- Akım, sıcaklıkla uyarılmış çoğunluk taşıyıcılarla sağlanır.
- Safsızlık yoğunluğu dejenere değildir, yarıiletken aşırı katkılanmamıştır.

Kontakt bölgesinin metal kısmını uygulanan harici gerilim etkilemez. Termal enerjiden kaynaklı engeli aşan elektronlar bir akım meydana getirir. Bu akıma termoiyonik akım adı verilir. Oluşan bu akım yalnızca engel büyüklüğüne bağlıdır.

Potansiyel engel yüksekliğini aşmaya yetecek kadar enerji seviyesine sahip olan ve aynı zamanda yarıiletken metale doğru akan elektronların oluşturduğu tüketim bölgesindeki akım yoğunluğu (2.15) denklemi ile verilir.

$$J_{sm} = \int_{E_F + q\phi_B}^{\infty} qV_x dn \quad (2.15)$$

V_x = Elektron hızı, dn = Elektron yoğunluğu,
 $E_F + q\phi_B$ = Termiyonik emisyon için gerekli min. enerji

(2.15) denklemin yardımı ile yarıiletken tarafından metale doğru hareket eden elektronların akım ifadesi ise;

$$J_{sm} = \left(\frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left[\frac{-q(\phi_B)}{kT} \right] \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.16)$$

J_{sm} = Yarıiletkenden metale doğru hareket eden elektronların akımı,
 m^* = Taşıyıcıların etkin kütlesi, k = Boltzman sabiti, h = Planck sabiti,
 q = Elektron yükü, T = Kelvin cinsinden sıcaklık, ϕ_B = Engel yüksekliği

Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra (2.16) denklemi şu şekilde yazılır;

$$J_{sm} = A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_B}{kT} \right) \exp \left(\frac{qV}{kT} \right) \quad (2.17)$$

A^* = Richardson

Burada A^* , (2.16) denklemindeki ilk terime karşılık gelen $(4\pi q m^* k^2/h^3)$ Richardson sabitidir. Diğer taraftan yarıiletken bölgesine geçen elektronlar tarafından oluşturulan akım yoğunluğu, metalde mevcut bulunan potansiyel bariyer yüksekliği sabit olduğundan gerilime bağlı olmayıp (2.18) denklemini ile ifade edilir;

$$J_{sm} = -A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.18)$$

Son olarak net akımın yoğunluğu (2.17) denklemi ve (2.18) denkleminin toplamaları olup şu şekilde ifade edilir;

$$J = \left[A^* T^2 \exp \left(\frac{-q\phi_B}{kT} \right) \right] \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

Buradaki ifadenin ilk parantezindeki ifadeler bütünlüğü doyma akımı yoğunluğudur.

2.7.2. Difüzyon teorisi

Bu akım mekanizması yoğunlukları farkı olan iki ayrı bölgenin aralarında yoğunluğu fazla olan alandan daha az olan alana doğru taşıyıcıların geçişini tanımlar. Düşük mobilite değerine sahip yarıiletkenlerde, bu akım iletim mekanizmaları ile açıklanabilir [15,22]. Difüzyon teorisi tarafından kabul edilen hipotezler şunlardır:

- Potansiyel engel yüksekliği değeri, kT değerinden çok büyüktür.
- Yarıiletkenlerde ki safsızlık yoğunluğu ($n_i < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) dejenere (yozlaşmış) değildir. Yani katkı atomları yoğunluğu değişmez.
- $x=0$ ve $x=W_D$ bölgesinde (fakirleşmiş bölge), yük taşıyıcı yoğunluğu akımdan etkilenmez, ısıl denge değerlerine sahiptirler ve bu bölgede elektronların çarpışma etkisi de hesaba katılır.

Difüzyon teorisi için bölgesel alan ve konsantrasyon farkına bağlı olacak şekilde denklem (2.20) yardımıyla bir akım konsantrasyonu (yoğunluğu) tanımlanmıştır.

$$J = q \left[n(x) E(x) \mu + D_n \frac{\partial n}{\partial x} \right] = q D_n \left[\left(\frac{-qn(x)}{kT} \right) \left(\frac{\partial V(x)}{\partial x} \right) + \frac{\partial n}{\partial x} \right] \quad (2.20)$$

$n(x)$ = Elektron yoğunluğu, μ = Elektron mobilitesi, D_n = Elektron difüzyon sabiti,
 $E(x)$ = Metal/yarıiletken bölgesindeki elektrik alanı

Düzenlemeler sonucunda (2.21) denklemi;

$$= J_n \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.21)$$

şeklini alır. Burada ki J_n doyma akımı yoğunluğudur. Doyma akımı yoğunluğunu şu şekilde ifade edilir;

$$J_n = \left(\frac{q^2 N_C D_n}{kT} \right) \left[\frac{q(V_d - V) 2N_D}{\epsilon_s} \right]^{1/2} \exp \left(\frac{-q\phi_B}{kT} \right) \quad (2.22)$$

N_C = İletkenlik bandındaki etkin taşıyıcı yoğunluğu, N_D = Verici yoğunluğu,
 ϵ_s = Yarıiletkenin elektrik geçirgenliği, V_d = Difüzyon potansiyeli (voltajı)

TE ve difüzyon teorisi sonucu elde edilen akım konsantrasyonu ifadeleri birbirine benzerlik gösterir. Fakat difüzyon teorisinde meydana gelen doyma akımı yoğunluğu, termoiyonik emisyon teorisinde elde edilmiş doyma akımı yoğunluğuna nispeten sıcaklık şartlarına daha az duyarlıdır. Ayrıca difüzyon teorisi sonucu oluşturulan doyma akımı yoğunluğu voltaja bağlıdır [19,15].

2.7.3. Termoiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Bu akım mekanizması teorisi Crowell ve Sze tarafından sentezlenmiş olup termoiyonik emisyon teorisi ve difüzyon teorisinin birleştirilmiş halidir [23]. Termoiyonik emisyon-difüzyon teorisi metal/yarıiletken kontaklarda ara yüzey kenarındaki re-kombinasyon hızı (v_r) üzerine tanımlanmıştır. Metal/yarıiletken gövdeye uygulanan bir voltaj sebebiyle metale bir elektron akışı gözlemlenir. Akış esnasında bir kısmı kuantum mekaniksel yansımalarla uğrayarak, diğer kısmın ise optik fonon geri saçılmalarla uğrayarak akımın değeri azalır [15]. Elektron akımı aşağıdaki denklem (2.23) ile ifade edilir;

$$J = -qn\mu \left(\frac{d\phi_B}{dx} \right) \quad (2.23)$$

Burada n , bir x noktasındaki elektron yoğunluğu olup şöyle ifade edilir;

$$n_m = N_c \exp\left(\frac{-q(\Phi_B - \Psi)}{kT}\right) \quad (2.24)$$

$q\Psi(x)$ = Elektron potansiyel enerjisi, $q\Phi_B(x)$ = Yarıml/Fermi seviyesi

Sze, bu durumu re-kombinasyon hızında meydana gelen azalma ile belirtmiştir. Buna göre elektronlar metal/yarıiletken kontaklarda, ara yüzeyde oluşan optik fononlardan etkilenmeyerek ortalama iletim katsayısı ve bariyer yüksekliği üzerinden geçme ihtimalleri göz önünde bulundurulduğunda Richardson sabit değeri (A^*), etkin Richardson sabiti (A^{**}) olacak şekilde değişime uğrar [22,24]. Buna göre akım gerilim (I-V) denklemi şu şekilde ifade edilir;

$$J = J_0 \left(\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right) \quad (2.25)$$

J_0 = Doyma akımının yoğunluğu,

Denklem (2.25) yer alan J_0 ifadesi doyma akımı yoğunluğudur ve etkin Richardson sabiti kullanılarak şu şekilde gösterilir;

$$J_0 = A^{**} T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \quad (2.26)$$

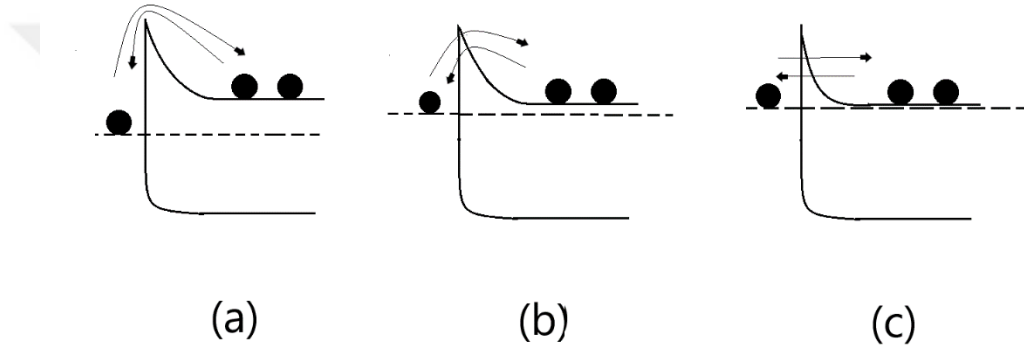
Denklem (2.26) de gösterilen (A^{**}) etkin Richardson sabitinin denklemi ise denklem (2.27) şöyle ifade edilmiştir;

$$A^{**} = A^* \exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \quad (2.27)$$

β = Bariyer yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişim katsayısı

2.7.4. Engel boyunca tünelleme

Bu teori, aşırı katkılı lakin dejenere (yozlaşmış) durumu oluşmamış yarıiletken malzemelerde elektronların kuantum mekaniksel olarak eklem bölgesi boyunca tünelleme yapmak suretiyle eklem bölgesi boyundaki alana geçme işlemini tanımlar. Bir diğer deyişle, fakirleşmiş alanın genişliği yarıiletkende bulunan katkı konsantrasyonu arttığında azalır. Bu durumda metal/yarıiletken eklemlerde yük taşıyıcıları yarıiletken tarafından metale doğru ve metal tarafından da yarıiletken tarafına doğru tünelleme yaparlar. Bu durum üç farklı şekilde gösterilir (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Metal/n-tipi yarıiletken kontakta akım iletim mekanizmasının katkı konsantrasyonuna bağlılığı. (a) Düşük seviye N_D , TE (b) Orta seviye N_D , TAE (c) Yüksek seviye N_D , AE (elektronların akımı şekilde de gösterildiği gibi oklar yönündedir.) [25].

Yarıiletken aşırı katkılı olduğu zaman tüketme tabakası inceler. Bu nedenle sıcaklığın az olduğu durumlarda Fermi seviyesine oldukça yakın olan elektronlar yarıiletken bölgesinden metal bölgesine doğru tünelleme yapar. Bu işlem alan emisyonu olarak ifade edilir. Sıcaklığın artması durumunda, elektronların büyük bir kısmı Fermi seviyesi üstüne doğru yükselme eğilimindedirler. Bu durumda engel bölgesine ulaşmadan tünelleme yapmak suretiyle metal tarafa doğru geçiş yapabilirler. Isı olarak uyarılmış bu elektronların oluşturmuş olduğu tünelleme işlemi ise termoiyonik alan emisyonu olarak ifade edilir. Bu durumda Fermi seviyesindeki elektronların sayısı giderek azalacak ve bir enerji açığı çıkacaktır. Isının yükselmesi ile beraber elektronların karşılaşmış olduğu engel oldukça küçük ve ince olacak ve tünelleme ihtimali artacaktır. Isı daha da arttığında ise elektronların tamamı engelin üst bölgesine

ulaşacaktır. Engeli aşan elektronlar diğer alana geçecek ve böylece termoiyonik emisyon mekanizması etkin duruma ulaşacaktır. MS kontakları tünelleme işlemini teorik olarak Crowell ve Rideout (1969) [26] ile Padovani ve Stratton (1966) [27] incelemiştir. Tünelleme olayı, katkılanması az olan yarıiletkenlerde ters beslem bölgesinde, katkılanması yüksek olan yarıiletkenlerde ise düz beslem bölgesinde meydana gelir [27].

- Az katkılanmış yarıiletkenler, ($N_D \leq 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) termoiyonik emisyonla sahip elektronlar ısı ile uyarıldıklarında endeli aşabilirler.
- Orta seviye katkılanmış yarıiletkenler, ($10^{17} < N_D < 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) termoiyonik alan emisyonu baskındır. Elektronlar ısı olarak uyarılırlar. Engel genişliği, tünellemenin olabilmesi için oldukça sıgıdır.
- Katkılanması aşırı olan yarıiletkenlerde ($N_D > 10^{19} \text{ cm}^{-3}$) termoiyonik emisyon baskındır. Engel genişliği, iletkenlik bandındaki elektronların metal tarafına doğru tünelleme yapabilmesi için oldukça sıgıdır [28].

Tünellemenin mevcut olduğu durumlarda taşıyıcıların oluşturduğu akım şu şekilde ifade edilir;

$$I = I_s \exp\left(\frac{qV}{E_0}\right) \quad (2.28)$$

Denklem (2.28) de bulunan E_0 ifadesi ise;

$$E_0 = E_\infty \coth\left(\frac{E_\infty}{kT}\right) \quad (2.29)$$

$$E_\infty = \frac{qh}{4\pi} \left(\frac{N_A}{m^* \epsilon_s}\right)^{1/2} \quad (2.30)$$

dır.

N_A = Alıcı yoğunluğu, h = Planck sabiti

Denklem (2.28) doyma akımı engel yüksekliğinin, yarıiletken parametresi ve ısıнын bir fonksiyonudur. Uygulanan potansiyele (gerilime) zayıf bir şekilde bağılıdır. Denklem (2.29)'de bulunan E_∞ enerjisi, kT/E_∞ olarak ifade edilir [29]. Alan emisyonu etkin olduğu zaman $E_o \approx E_\infty$ 'dir. Yüksek ısılarda yarı logaritmik I-V eğrisinin eğimi q/kT olup $E_o = kT$ 'dir.

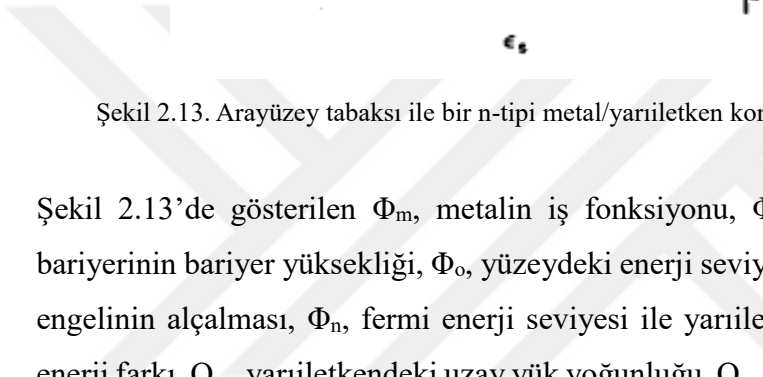
2.8. Engel Yüksekliği Tayini

Şekil 2.13'de engel yüksekliğinin n-tipi bir metal/yarıiletken eklemnin enerji bant diyagramı gösterilmektedir [30]. Metal/yarıiletken cihazların engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonuna bağılılığı aşağıdaki varsayımlara dayalı olarak türetilmektedir.

Bunlar;

1. Metal/yarıiletken arasındaki kontak atomik boyutlarda bir arayüzey katmanına sahiptir. Bu katmanın, potansiyel bariyer yüksekliğinden daha büyük enerjiye sahip elektronlara karşı şeffaf olduğu (geçirgen olduğu) varsayılmaktadır.
2. Arayüzeyedeki, yüzey durum yoğunluğu yalnızca yarıiletken yüzeyinin bir özelliğı olup metalden bağımsızdır. Engel yüksekliği Φ_b , yarıiletkenin iletim bandına girmek için metaldeki Fermi seviyesindeki bir elektronun ihtiyaç duyduğu enerji olarak tanımlanmaktadır [30].

Engel yüksekliğini tayin etmek için dört yöntem geliştirilmiştir. Bunlar, akım/gerilim (I-V), aktivasyon enerjisi, kapasite/gerilim (C-V) ve fotoelektrik yöntemidir.



Şekil 2.13. Arayüzey tabaksı ile bir n-tipi metal/yarıiletken kontağın enerji-band diyagramı.

Şekil 2.13’de gösterilen Φ_m , metalin iş fonksiyonu, Φ_{Bn} , metal/yarıiletken yüzey bariyerinin bariyer yüksekliği, Φ_o , yüzeydeki enerji seviyesi, $\Delta\Phi_n$, görüntü kuvvetinin engelinin alçalması, Φ_n , fermi enerji seviyesi ile yarıiletken iletim bandı arasındaki enerji farkı, Q_{sc} , yarıiletkendeki uzay yük yoğunluğu, Q_{ss} , yarıiletken üzerindeki yüzey durum yoğunluğu, Q_m , metal üzerindeki yüzey yük yoğunluğu, Δ_0 , arayüzey katmanı boyunca potansiyel, χ , yarıiletkenin elektron yatkınlığı, V_{B0} , difüzyon potansiyeli, ϵ_s , yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_i , arayüzey tabakasının dielektrik sabiti ve δ , arayüzey tabakasının kalınlığıdır.

2.8.1. Akım-gerilim (I-V) belirtkenleri

Aşırı (yüksek mobiliteli) yarıiletkenlerden yapılan Schottky diyotlarında düz beslem fazla yüksek olmadığı takdirde akım iletim mekanizması olan termoiyonik teoremine uyar. Diyotların idealite faktörleri ve engel yüksekliği değerleri I-V grafiği kullanılarak TE ile bulunabilmektedir [31]. Bu kurama göre, I-V ilişkisi şu şekilde ifade edilir;

$$I = I_o \left[\exp \left(\frac{qV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.31)$$

Burada I_o , doyma akımıdır ve şu şekilde ifade edilir;

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q(\Phi_{Bo}-\Delta\Phi_B)}{kT}\right) \quad (2.32)$$

$\Phi_{Bo}-\Delta\Phi_B$ = Etkin engel yüksekliği, A^* = Richardson sabiti

A^* , yarıiletkende bulunan elektronlar için etkin kütle, engel bölgesini aşan elektronların kuantum mekaniksel yansımaları ve metal malzemenin yüzeyi ile engel tepesi arasında bulunan elektronların fonon saçılması göz önünde bulundurularak düzenlenmiş Richardson sabitidir (p-tipi Si için $32 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$), A ise kontak alanı olup,

$$A^* = \frac{m_n e k^2}{2\pi^2 h^3} \quad (2.33)$$

ifadesi ile verilir [32].

Gerçek Schottky diyot için akım ifadesi şu şekildedir;

$$I = I_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(\frac{-qV}{kT}\right)\right] \quad (2.34)$$

Burada n, TE'ne göre n=1 olan ideal durumdur. Teoride 1 ideal olarak kabul edilirken pratikte elde edilmesi literatürde nadiren görülmektedir. Bunun nedeni, engel yüksekliğinin uygulanan voltaj ile değişime uğramasından ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan, metal/yarıiletken arasındaki ideal duruma çok yakın olan Schottky aygıtlarında bile yaklaşık 5 ila 20 Å kalınlıkta ince bir doğal oksit tabakası oluşmaktadır [33]. Bu nedenle gerçek diyotlar denklem (2.31)'deki ideal durumu sağlayamaz. Denklem (2.34)'ün $V > 3kT/q$ için ifadesi şu şekildedir;

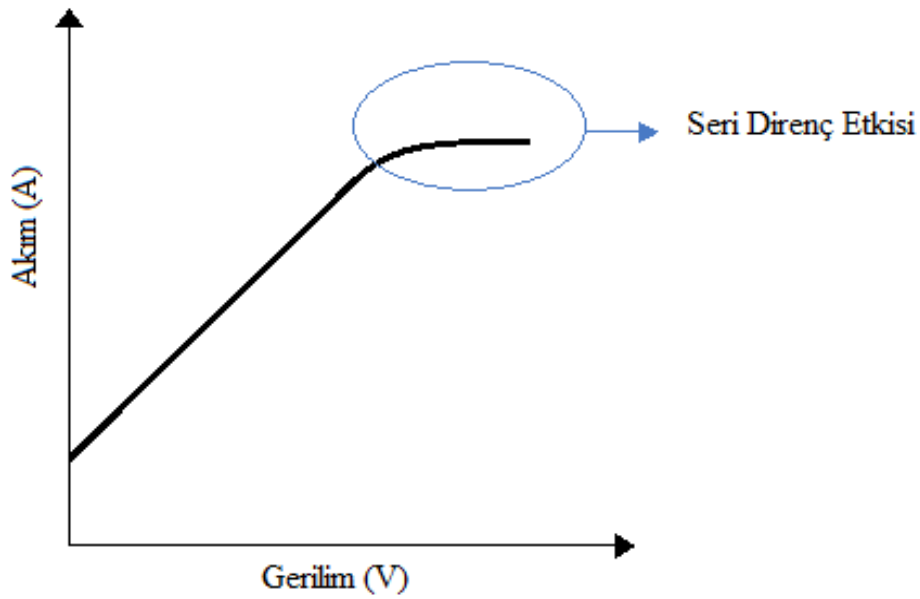
$$I = I_o \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \quad (2.35)$$

Bir Schottky diyotu için engel yüksekliği şu şekildedir;

$$\Phi_b = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (2.36)$$

2.9. Seri Direnç

Seri direnç (R_s) faktörü, metal/yarıiletken yapılarda yarıiletken kristal tabakanın ve metal kontağın tüketim bölgesinin dışında mevcut olan bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirençtir [34]. Özellikle ters beslem durumunda, ideal bir diyot sonsuz direnç gösterir. Düz beslem bölgesinde ise, seri direnç uygulanan voltaj arttırıldıkça düşer. Seri direnç hesabı yapılmasında I-V grafiğinden yararlanılır. Bir Schottky diyot I-V grafiği eğrisine bakıldığında, yüksek beslem bölgesine doğru gidildikçe seri direncin etkisi sonucu diyot akımında azalma meydana geldiği görülecektir [15]. Seri direnç diyotun I-V eğrilerinde, istenmeyen bükülmelere (ideallikten sapmalar) neden olur (Şekil 2.14.).



Şekil 2.14. Seri direncin (R_s) I-V grafiği üzerindeki etkisi

Bir Schottky diyotta, seri direnç birden farklı nedenlerden oluşabilir. Bunlar;

- Yarıiletken tabakada ve omik kontak arasında meydana gelen gövde direnci

- Yarıiletken tabakasına temas ettirilmiş arka (omik) kontakten dolayı meydana gelen
- Elektriksel hesaplamalar için kontaklardan alınmış tellerden meydana gelen
- Yarıiletken gövde ile kontak arasına konumlandırılmış bir oksit tabakadan meydana gelen
- MS kontak arayüzey tabakasında meydana gelen tüketme tabakası

gibi nedenler R_s (seri direnç) oluşumuna yol açar [35].

Seri direncin etkisini bazı yöntemlerle azaltmak mümkündür. Bu yöntemlerden bazıları şöyle açıklanabilir; omik kontağa ısı bir işlem uygulayarak çökeltmesi ve ya ölçüm sırasında, seri direnç değerinin düşürülmesi gibi işlemler uygulanabilir.

2.9.1. Norde yöntemi

Bu yöntem bir Schottky diyotun potansiyel bariyer yüksekliği ve seri direncini (R_s), $F(V)$ fonksiyonu ile bulmayı amaçlar. Burada ki Norde fonksiyonu $F(V)$ şöyle ifade edilir [36];

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{1}{AA^*T^2} \right) \quad (2.37)$$

Diyotun potansiyel bariyer yüksekliği ve seri direncini bulmak için tek bir sıcaklıktaki I-V grafiğini ele alarak hesap yapmak yeterli olmaktadır. Bunun nedeni, potansiyel bariyer yüksekliği ve seri direnç hesabı ısıya bağlı değişken değerler değildir. TE teorisinden elde edilen akım yoğunluğu denklemi, diyotun etkin alanı ile çarpıldığında elde edilen akım değeri şu şekilde ifade edilir;

$$I = AA^*T^2 \exp \left(\frac{-q\Phi_B}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{qV}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2.38)$$

I = Diyot akımını, Φ_B = Engel yüksekliğini (potansiyel bariyer yüksekliği),
 k = Boltzmann sabitini, q = Elektronik yükü, T = Kelvin cinsinden sıcaklığı,
 A = Diyotun kontak alanı, n = İdealite faktörü

Cihaza dışarıdan uygulanan beslemin bir bölümü, diyotun seri direncinin üzerine düşer. Bundan dolayı denklem (2.38), denklem (2.39) şeklini alır.

$$I = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_B}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR)}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.39)$$

$(V-IR)$ = Diyotun üzerine düşen gerilim,

Yüksek seri dirençli cihazlarda I-V grafiği lineer bölgesi sınırlanır. Bu durum eğrinin değerlendirilmesini oldukça zorlaştırır. Denklem (2.38)'ün her iki kısmının $\ln$ 'i alınıp denklem (2.37) ifadesinde yerine konulursa;

$$F(V) = \left(\frac{n-2}{2n}\right)V + \frac{IR}{n} + \Phi_B \quad (2.40)$$

olur. Burada ideal durum ($R=0$) oluşturulduğunda, $F(V)$ - V eğrisinin eğimi $(n-2)/2n$ 'i verir. $F(V)$ eğrisinin lineer kısmının voltaj eksenini sıfırda kesen noktası potansiyel bariyer yüksekliği değerini (Φ_B) verir. Ancak sıfırdan farklı bir seri direnç varsa $F(V)$ grafiği bir minimumdan geçer. Bu durum denklem (2.41) ile şöyle ifade edilir;

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{V}{AA^*T^2R}\right) \quad (2.41)$$

Denklem (2.41)'de V 'ye göre türev alınıp denklem (2.37)'de yerine konulursa denklem (2.42) şöyle ifade edilir;

$$\frac{\partial F(V)}{\partial V} = \frac{n-2+\beta IR}{2(n+\beta IR)} \quad (2.42)$$

Burada, $\beta=kT/q$ 'dur. $\partial F(V)/\partial(V)=0$ olduğunda ise;

$$n - 2 + \beta IR = 0 \quad (2.43)$$

ifadesini elde ederiz. Böylece denklem (2.43)'den seri direnç ve potansiyel bariyer yüksekliği;

$$R_S = \frac{(2-n)kT}{I_q} \quad (2.44)$$

ve

$$\Phi_B = F(V)_{\min} + \left(\frac{2-n}{2n}\right) \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{q} \quad (2.45)$$

$V_0 = F(V)$ fonksiyonunun minimumdaki değeri

Bohlin 1986'da, idealite faktörü 1'den büyük olduğu zaman Norde fonksiyonunu tekrardan düzenlemiştir [37]. İdealite faktörü büyük olan Scottky diyotların I-V eğrilerinden elde edilen seri direnç, potansiyel bariyer yüksekliği ve idealite faktörünün daha doğru olarak hesaplanması için Norde fonksiyonu şöyle modifiye edilir;

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{1}{A A^* T^2} \right) \quad (2.46)$$

Burada Norde fonksiyonunun ilk terimi olan $V/2$ ifadesinin yerine V/γ ifadesi kullanılmıştır. Burada ki γ , idealite faktöründen küçük olmamak üzere ($1 < n < \gamma$) ilk büyük tam sayıyı ifade eder. Denklem (2.39)'ün her iki tarafının ln'i alınıp denklem (2.46)'da yerine yazılır ise;

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right) V + \Phi_B + \frac{IR}{n} \quad (2.47)$$

elde edilir. $R_S=0$ ise $F(V)$ - V eğrisi, eğimi $(n-\gamma)/n\gamma$ olan bir doğru olur. R_S sıfırdan farklıysa ve denklem (2.46)'da akım ifadesi açık bir şekilde yazılır ise;

$$F(V, \gamma) = F_R(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{V}{R_{AA} A^* T^2} \right) \quad (2.48)$$

denklemleri elde edilir. Denklem (2.47) ifadesinin V 'ye göre türevi alınıp düzenlenirse;

$$\phi_B = F(V_0, \gamma) - \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{n}\right) V_0 - \frac{(\gamma-n)}{(\beta n)} \quad (2.49)$$

ve

$$R_S = \left(\frac{\gamma-n}{\beta I_0}\right) \quad (2.50)$$

ifadeleri elde edilir.

2.9.2. Cheung yöntemi

1986 senesinde Cheung, MIS eklemlerin seri direncinin engel yüksekliğinin ve idealite faktörünün bulunabilmesi için bir yöntem geliştirmiştir. Bir diyotun akım-gerilim grafiğinde, diyot üzerine uygulanan yüksek düz beslem bölgesinde enerji bantlarında meydana gelen bükülmeye sebebiyet veren unsur seri dirençtir. Cheung yöntemi ile metal/yarıiletken yapılarda seri direnç, I-V eğrilerinin yüksek voltaj bölgesi kullanılarak belirlenmesi mümkündür [34]. Bunun için denklem (2.37)'nin her iki tarafının $\ln$ 'i alınarak düzenlenir ve denklem (2.51) elde edilir;

$$V = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{A A^* T^2}\right) + n\phi_B + IR_S \quad (2.51)$$

Denklem (2.51)'in her iki tarafının $\ln I$ 'ya göre türevi alındığında denklem (2.52) elde edilir.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{q} + IR_S \quad (2.52)$$

Denklem (2.52), akıma karşı grafiği çizildiği zaman bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi seri direnç değerini, eğimin düşey kestiği nokta ise diyotun idealite

faktör değerini verecektir [34]. Cheung yöntemi ile engel yükseklik değerini elde etmek için denklem (2.53) şöyle ifade edilir;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (2.53)$$

$H(I)$ = Cheung fonksiyonu, V = Uygulanan voltaj

Denklem (2.51) ve denklem (2.52) ifadeleri kullanılarak potansiyel bariyer yüksekliği için denklem (2.54) şöyle ifade edilir;

$$H(I) = n\phi_B + IR_s \quad (2.54)$$

Burada da görüldüğü üzere $H(I)$ 'nın I 'ya göre eğimi çizildiğinde bir doğru elde edilir. Bu doğrunun eğimi R_s 'i, $H(I)$ eksenini kestiği nokta ise potansiyel bariyer yüksekliğini verir.

2.10. İdealite Faktörü

Cihazın yapım aşamasında zaman zaman çeşitli nedenlerden dolayı ideal olmayan durumlar meydana gelir. İdeallik faktörü tam olarak bu durumun boyutunu belirlemek amacıyla tanımlanmış bir parametredir. Bu parametrenin arayüzey durum yoğunluğuna (N_{ss}) ve kalınlığına bağlı olarak ifade şekli şöyledir;

$$n = 1 + \frac{\left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right) \left(\frac{\epsilon_s}{W_D + qN_y} \right)}{1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i} \right) qN_m} \quad (2.55)$$

N_m = Metal ile dengede olan arayüzey durumları,

N_y = Yarıiletken ile dengede olan durumların yoğunluğu,

ϵ_i = Arayüzey tabakasının dielektrik sabiti, ϵ_s = Yarıiletkenin dielektrik sabiti,

δ = Arayüzey tabakasının kalınlığı, W_D = Tüketme bölgesinin genişliği

Arayüzey durumlarının yoğunluğu az ise denklem (2.55), denklem (2.56) şeklinde ifade edilir.

$$n = 1 + \frac{\delta\epsilon_s}{w_D\epsilon_i} \quad (2.56)$$

Arayüzey durumları, metal ile dengede ise denklem (2.55) ifadesi denklem (2.57) şeklini alır.

$$n = 1 + \frac{\delta\epsilon_s}{w_D(\epsilon_i + \delta q N_m)} \quad (2.57)$$

Denklem (2.56) ve denklem (2.57) durumunda arayüzey durumlarının ve oksit tabakasının ideallik faktörüne katkısı oldukça azdır. Bu nedenle, metal/yarıiletken (MS) yapı ideal davranır. Yarıiletken ile arayüzey durumları dengede ise bu durum denklem (2.58) ile şöyle ifade edilir;

$$n = 1 + \left(\frac{\delta}{\epsilon_i}\right) \left(\frac{\epsilon_s}{w_D + q N_y}\right) \quad (2.58)$$

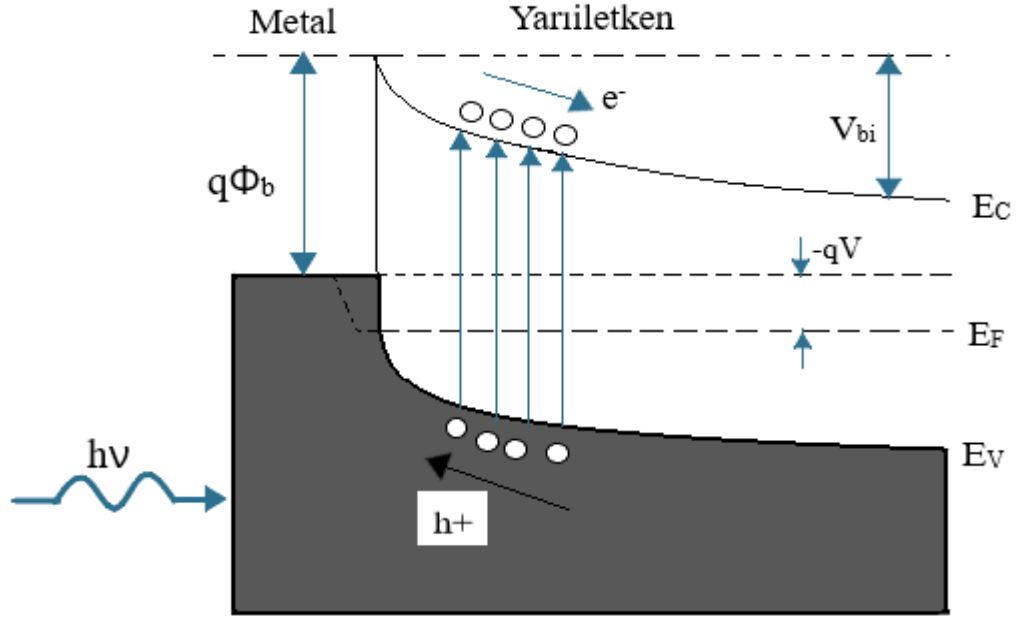
n = İdealite faktörü

Bu durumda ise arayüzey tabaka kalınlığının ve arayüzey durumunun artması ile n (idealite faktörü) artar [16].

2.11. Fotodiyot

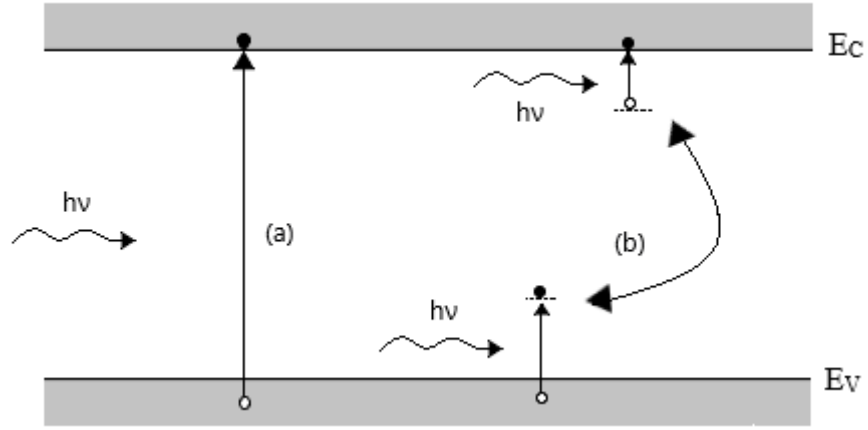
Fotodiyotlar, tüketim bölgesinde serbest yük taşıyıcıları ve yüksek elektrik alan sahip cihazlardır. Bu tüketim bölgesinde oluşan fototaşıyıcılar, yüksek elektrik alanının var olmasından kaynaklı malzemenin en uç bölgesinde oluşur. Metal/yarıiletken kontağın aydınlatma altındaki genel gösterimi Şekil 2.15'deki gibidir. Bir başka deyişle fotodiyotlar, üzerine ışık ışını düştüğünde ilettime geçen cihazlardır. Yani üzerine bir ışık enerjisi düştüğünde iletken olarak katottan anota doğru akım geçiren devre elemanlarıdır. Fotodiyotlar doğrultucu diyotlara benzemektedirler. Işık tarafından

uyarılan değerlik bandındaki elektronlar, iletim bandına doğru zıplar ve diyot üzerinden akım geçmesini sağlarlar [40,41].



Şekil 2.15. Aydınlık altındaki metal/yarıiletken (Schottky) kontağı [15].

Bir fotodiyot devreye ters bağlanarak çalıştırılır. Işığın yardımıyla ters tarafta bulunan ve sızan artan akımların kontrolünü sağlarlar. Bu kontrol, ışık enerjisi ile yarıiletkenin kristal yapısında bulunan bağların koparak meydana gelen elektron-deşik çiftlerinin hareket etmesi sonucu sağlanmaktadır. Yarıiletken bir malzemenin foto-iletken davranış göstermesi için serbest elektronlara ve deşik çiftlerine sahip olması gerekir. Yarıiletken tarafınca soğurulan ışınlar sonucu serbest elektron dağılımını değiştirir ve malzeme iletkenliği artar. Bir fotodiyot incefilm malzemesi ve kontakt noktalarının birbiriyle temas etmesiyle elde edilmektedir [15]. Şekil 2.16'da ise bir fotoiletkenin üzerine ışık düşürüldüğünde yüksek yasak enerji bandının üzerine geçerek ya da bandlar arasında geçiş yaparak iletkenliğin arttırılmasını sağlamaktadır [15].



Şekil 2.16. Fotonlarla uyararak (a) bandlar arası geçiş (b) safsızlık seviyesi ile iletim bandı arasındaki foto uyarma [15].

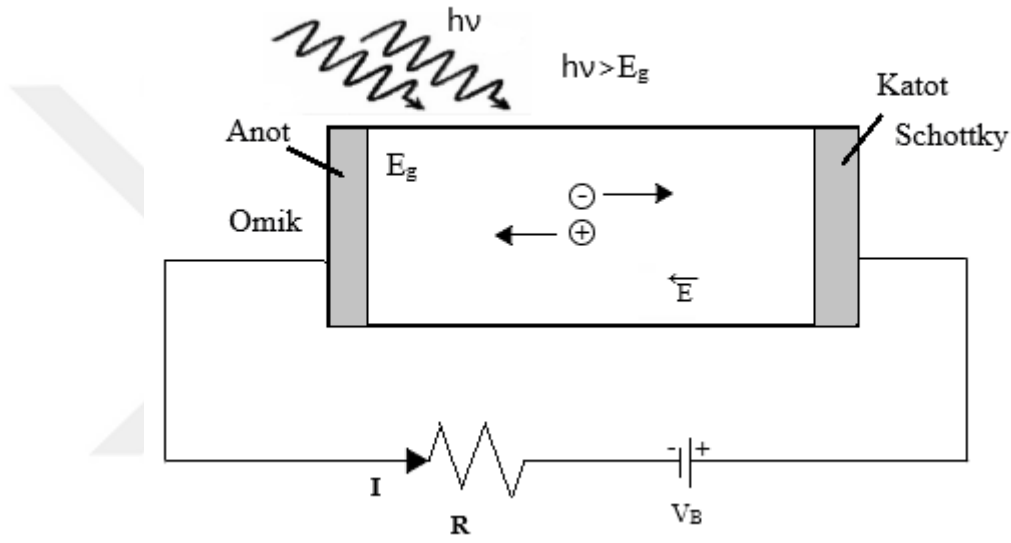
Diyotun üç çalışma modu vardır ve bunlar;

- 1) $E_g > h\nu > q\Phi_b$ ve $V > V_B$ olduğu zaman metal içerisinde bulunan ve fotonlar tarafından uyarılmış elektronlar (V_B = engeli aşmak için gereken gerilim) potansiyel engeli aşarak yarıiletkende toplanır. Böylece, metal/yarıiletken aygıtlarda engel yüksekliğini belirlemek için sıcak-elektron geçişleri adı verilen yöntem kullanılmış olur.
- 2) $h\nu > E_g$ ve $V < V_B$ olduğu zaman aygıta gelen fotonlar yarıiletken içerisinde elektron-deşik çiftlerini üretecek ve diyot bir p-i-n türü fotodiyoda benzecektir.
- 3) $h\nu > E_g$ ve $V > V_B$ olduğu zaman ise aygıt olarak çığ bozulma bölgesi adı verilen bir bölgede çalışmış olur [15,42-44].

Yasak enerji band aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar ($h\nu > E_g$), ekleme ışık düşürüldüğü anda soğurulur. Daha sonra elektronlar katoda, deşikler ise anoda doğru hareket ederler. Diyotun farklı bölgelerinde toplanmaları ile fotoakımı meydana getirirler [45]. Yani bu akım, yarıiletken içerisinde fotonların absorbe edilmesi, taşıyıcı oluşumu ve elektrik alan altında sürüklenmesi olarak özetlenmektedir. Burada bahsedilen fotonların yarıiletken içinde hareket etmesi, fotodiyotun üzerine düşen ışığın dalga boyutuna bağlıdır [15].

Fotodiyotların diiyotun yapısına ve kontak tiplerine bağlı olmak üzere, Schottky, metal/yarıiletken/metal, p-i-n, çığ ve foto-transistör gibi eřitleri bulunmaktadır [46].

Schottky tipindeki fotodiyotlar, çoğunluk taşıyıcılı devre elemanları olarak bilinmektedir. Bu özellikleri ile yüksek hız dedeksiyonlarında ihtiyaç duyulan aygıtlar haline gelirler. Foto-cevap bakımından Schottky diiyotlarda, yarıiletken yüzeyinde birden fazla kontak mevcuttur. Şekil 2.17.'de Schottky fotodiyot yapısı verilmiştir.



Şekil 2.17. Schottky fotodiyotun yapısı [42].

2.12. Fotodiyotların Akım-Voltaj Karakteristiği

Fotodiyotların üç adet önemli karakteristiği vardır. Bu karakteristikler akım-voltaj, kuantum verimi ve bant genişliği şeklindedir. Bir aygıttaki düşük karanlık akımı, daha yüksek duyarlık demektir. Ayrıca bu akım, fotodiyot üzerine ışığın gönderilmediği ters polarlanma altında aygıt içerisinde meydana gelen akımdır [38,42,43].

Şekil 2.18.'de bir fotodiyot aygıtının karanlığa ve aydınlığa bağlı akım-voltaj karakteristiği verilmiştir. Bir fotodiyottaki azınlık taşıyıcıları, karanlık altında diiyot içerisinde termal yolla oluşan akan akımı ifade etmektedir. Şekil 2.18.'de bir

ışığın algılandığı en uygun bölgedir. Bir diğer bölge olan dördüncü bölge de aygıtın fotovoltaiik bölgesidir.

Bir fotodiyot temelde akım kaynağı olup, ışık enerjisi altında aktif hale gelir. Fotodiyota bir gerilim uygulandığında devrede bir yük direnci bulunmasından kaynaklı fotoakım oluşur. Fotoakım etkisinin bir miktarı iç direnç üzerinde, daha büyük bir miktarı ise yük direnci (dış direnç) üzerinde oluşur. Bu nedenle fotodiyot, hem gerilim hem de akım kaynağı olmak üzere iki farklı amaçla kullanılabilir. Bir fotodiyodun seri direnci, ideallik faktörü (n), doyma akımı (I_0) ve engel yüksekliği gibi parametreleri doğru akım altında hesaplanabilir. Doyma akımı ve engel yükseliği (Φ_b) $V=0$ 'da düz besleme akımının fit edilmek suretiyle bulunması mümkündür. İdeallik faktörü, düz beslem akım-gerilim karakteristiğinin eğimi (dV/dI) kullanılarak belirlenebilir [38,42,49].

2.13. Fotovoltaiik Parametreler

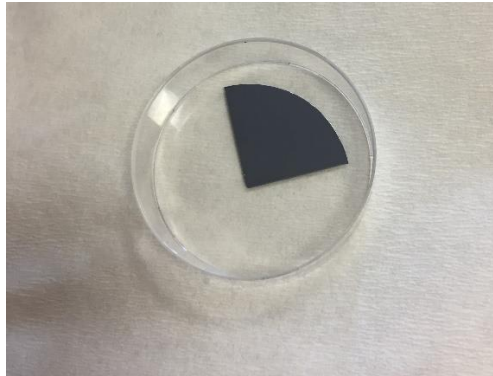
Güneş pilleri veya fotodiyotlar gibi aygıtların karakteristikleri çeşitli parametre analizleriyle yapılabilmektedir. Bunlar, açık devre voltajı (V_{oc}), kuantum verimi (η), kısa devre akımı (I_{sc}), doluluk faktörü (FF), maksimum güç noktasındaki voltaj (V_m), maksimum güç noktasındaki akım (I_m), maksimum çıkış gücü (P_m), seri direnç (R_s) ve şönt direnç (R_{sh}) değerleridir [51].

BÖLÜM 3. MATERYAL VE YÖNTEM

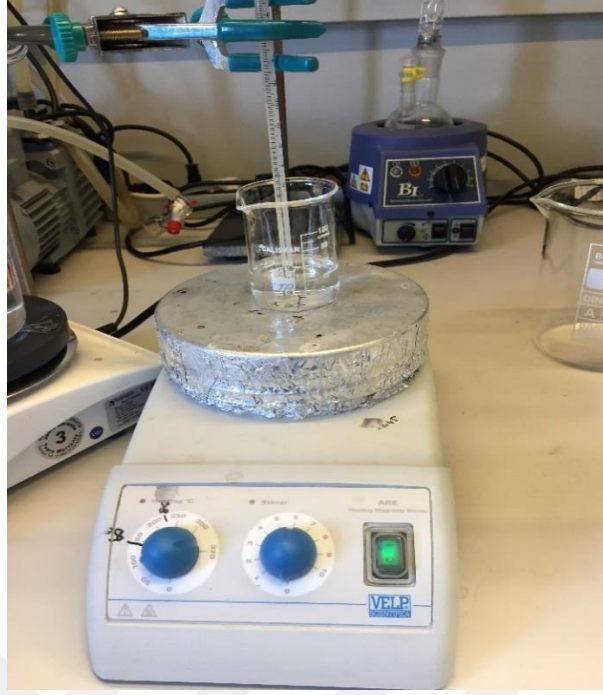
3.1. Fotodiyot Üretim Aşamaları

3.1.1. Silisyum kristalinin temizliği ve tabakaların hazırlanması

Bu tez çalışmasında 350 μ m kalınlığında 1-20 Ω cm öz dirençli, (111) düzleminde kesilmiş fosfor katlı n-tipi kristal kullanılmıştır (Şekil 3.1.). Kullanılan n-tipi silisyum kristali üç aşamadan oluşan kimyasal temizleme işlemlerinden geçirilmiştir. İlk aşamada kristal üzerinde bulunabilecek yağ tabaka temizliği işlemine başlanılmıştır. İlk aşamada cam behere aseton dökülmüştür ve ısıtıcı bir manyetik karıştırıcı yardımıyla 55°C sıcaklığı geçmeyecek şekilde ısıtılmıştır (Şekil 3.2). 55°C kadar ısınan asetonu ısıtıcı üzerinden alınarak içerisine kristaller atılmıştır ve içinde 10 dakika bekletilmiştir. Oradan çıkarılan kristal başka bir beherin içine dökülen metanolün içerisine atılmış ve metanol içinde 5 dakika bekletilmiştir. Metanol içinden çıkarılan kristal alttabakalar deiyonize su ile durulanmıştır ve ardından üzerinde damla kalmayacak şekilde azot gazı ile kurutulmuştur.



Şekil 3.1 (111) düzleminde kesilmiş n-tipi alttabaka



Şekil 3.2 Isıticılı manyetik karıştırıcı cihazı

Temizliğin ikinci aşamasında kristal üzerinde kalmış olabilecek organik tabakaların hemen hemen tamamının yok edilebilmesi için 30%’luk hidrojen peroksit (H_2O_2), 27%’luk amonyum hidroksit (NH_4OH) ve deiyonize sudan meydana gelen RCA temizlik işlemi yapılmıştır. Bu temizlik işlemi için 5 hacim deiyonize su dolu beher içerisine 1 hacim NH_4OH eklenmiş ve 70°C sıcaklığa kadar ısıtılmıştır. Isıtılan karışım plateden indirilmiş ve 1 hacim H_2O_2 eklenmiştir. Daha sonra çözeltinin 1-2 dakika tepkimeye girmesi beklenilmiştir. Hazır olan bu çözelti içerisine silisyum kristalleri atılmış ve 15 dakika bekletilmiştir. Bekletilen kristaller deiyonize dolu başka bir beher içerisine atılarak bolca durulanmıştır.

Üçüncü aşamada kristaller üzerinde meydana gelebilecek herhangi bir oksit tabakasının yok edilebilmesi için HF (hidroflorik asit) çözeltisi kullanılmıştır. Bunun için 50 ml H_2O ve 2 ml 49%’luk HF solüsyonu hazırlanmıştır. Hazırlanan bu solüsyon içerisine kristal alttabakalar atılmış ve 2 dakika bekletilmiştir. Daha sonra alttabaka kristaller bol miktarda deiyonize su ile durulanmıştır. Oksit tabakanın uzaklaştırıldığını anlamak için kristaller yüzeyinde su damlasının damlacık halinde kalıp kalmadığı gözlemlenmiştir. Üzerinde damlacık halinde kalmayan (oksidasyonu tamamen ortadan kaldırılan) kristaller azot gazı (N_2) kullanılarak kurutulmuştur.

Kristal temizleme aşamalarında ultrasonik temizleme cihazı ve 18,3 MΩ'luk deiyonize su kullanılmıştır.

3.1.2. Omik kontakların oluşturulması

Kimyasal temizleme işlemi bittikten sonra silikon alttabakalar vakum odasına alınarak termal buharlaştırma tekniği ile omik kontakt oluşturmak işlemine geçilmiştir. Bunun için silisyum kristalinin arka yüzeyi 1000 Å kalınlığında yüksek saflıkta (%99,999) alüminyum (Al) metali ile kaplanmıştır. Daha sonra inert gaz ortamında 500 C'de 5 dakika süresince tavlama yöntemi kullanılarak düşük öz dirençli omik kontak oluşturulmuştur.

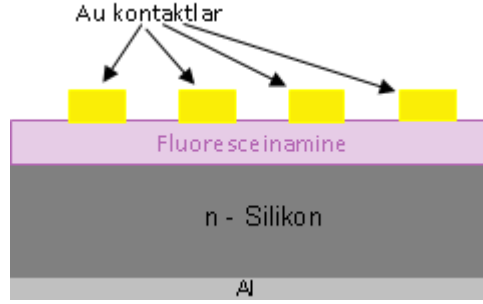
3.1.3. Organik ince filmlerin üretilmesi

Omik kontakt oluşturma aşamasından sonra kristalin ön yüzeyine ince film oluşturma işlemine geçilmiştir. Bunun için Fluoresceinamine uygun miktarda metanol içerisinde çözülerek ince filmler oluşturmak üzere bir çözelti hazırlanmıştır. Bu solüsyon manyetik karıştırıcı ile 6 saat iyice karıştırılmıştır. Çözelti daha sonra 5 saat dinlendirilmiş ve berrak bir çözelti elde etmek için bir filtre kağıdı kullanılarak süzölmüştür. Elde edilen çözelti, kimyasal olarak temizlenmiş silikon yüzey üzerine döndürerek kaplama yöntemi ile kaplanmıştır. Bu yöntemde 60 saniye boyunca dakikada 2300 devirlik bir dönme hızında dönen spin kaplama cihazı kullanılmıştır. Ortaya çıkan ince film tabakası oda sıcaklığında metanolün uçması için 30 dakika süresince kurutulmuştur.

3.1.4. Doğrultucu kontakların oluşturulması

Elde edilen Fluoresceinamine ince filmi üzerinde doğrultucu kontakt noktaları oluşturmak için vakum altında 1000 Å kalınlığında yüksek saflıkta (%99,999) altın (Au) metali kaplanmıştır. Tüm buharlaştırma işlemleri $1,2 \times 10^{-6}$ Torr'luk basınç altında gerçekleştirilmiştir. Böylece Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısında fotodiyot aygıt

elde edilmiştir. Şekil 3.3’de yapımı tamamlanan fotodiyot aygıtının şematik temsili görülmektedir.



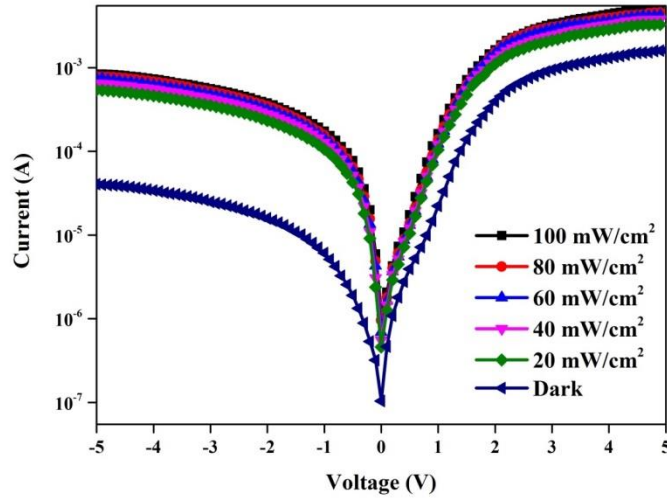
Şekil 3.3 Üretilen Au/ Fluoresceinamine/n-Si/Al fotodiyotunun şematik temsili.

3.2. Aygıt Karakterizasyonu

Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al fotodiyotunun akım-gerilim (IV) ölçümleri, karanlık ve farklı aydınlatma yoğunlukları ($20 - 100 \text{ mW/cm}^2$) altında, geniş bir voltaj aralığında (-5V 'dan $+5\text{V}$ 'a) ve oda sıcaklığında 1,5AM güneş simülatörü kullanarak gerçekleştirilmiştir. Zamana bağlı fotoakım ve fotoiletkenlik ölçümleri -3 V altında gerçekleştirilmiştir.

BÖLÜM 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

Üretilen Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı aydınlatma seviyeleri altında I-V ölçümleri ile karakterizasyonları yapılmıştır. Şekil 4.1’de fotodiyotun aydınlanma şiddetine bağlı I-V karakteristikleri verilmiştir. Şekil 4.1’den görüldüğü üzere, ters beslem altında iyi bir fotodiyot davranışı sergilemiş olup, foto-akımları artan ışık yoğunluğu ile artmıştır. Ters beslem bölgesinde ışık yoğunluğuna bağlı olarak akım şiddetinde artış gözlenmiş, diğer ışık yoğunluğu şiddetlerinde ise yavaş bir şekilde artmıştır. Düz beslem bölgesinde ise artan ışık gücü yoğunluğuna bağlı bir miktar akım artışı gözlenmiştir. Farklı akım profiline sahip bu tür bir davranış metal ve yarıiletken arasındaki arayüzey tabakasının malzeme tipine veya oluşum sırasındaki bazı etkilere atfedilebilir [52-54]. Elde edilen I-V ölçümlerinden, organik arayüzeyli fotodiyodun ters beslem bölgesindeki karanlık durumundaki akımının artan ışık gücü şiddeti ile artması sebebiyle akım nedeniyle fotodedektör uygulamalarında açıkça kullanılabileceği görülmektedir.



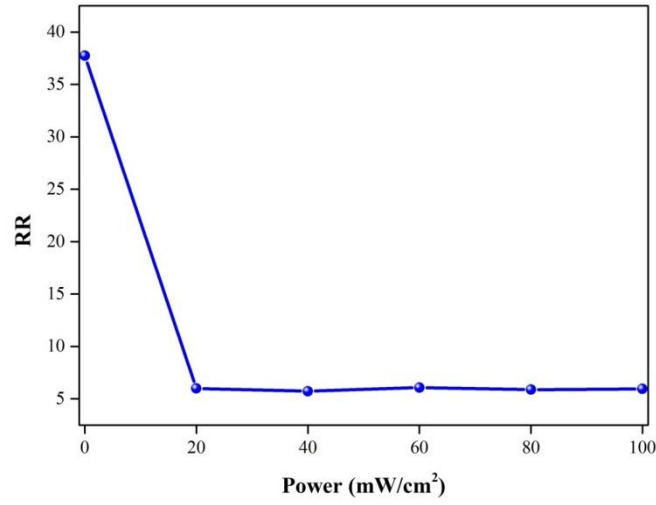
Şekil 4.1 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı aydınlatma seviyeleri altındaki I-V eğrileri.

Doğrultma oranı (RR), önemli bir parametredir ve diyotun akan akıma karşı gösterdikleri yetenek olup, düz beslemdeki akımın ters beslemdeki akıma olan oranıdır. Bu ifade denklem 4.1’de verilmiştir [55].

$$RR = \frac{I_{\text{düz beslem}}}{I_{\text{ters beslem}}} \quad (4.1)$$

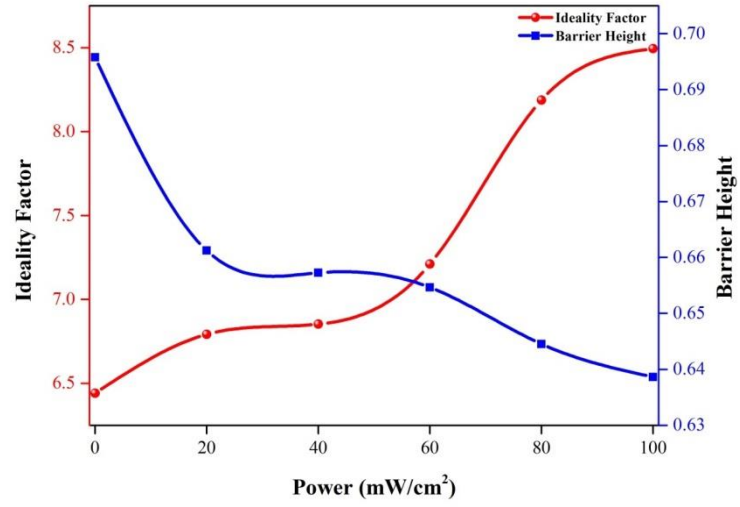
$I_{\text{düz beslem}}$ = düz beslem akımı, $I_{\text{ters beslem}}$ = ters beslem akımı

Şekil 4.2’de Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının karanlık ve farklı aydınlatma seviyelerine bağlı RR oranlarını gösterilmektedir. Şekillerden görüldüğü üzere RR değerleri artan aydınlatma yoğunluğuyla ve artan ters akımla hızlı bir şekilde düşmüş ve ardından hemen hemen sabit kalmıştır. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının $\pm 5V$ ’taki RR değeri 5,99 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı RR değerleri.

Şekil 4.3 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının idealite faktörünün (n) ve bariyer yüksekliğinin (Φ_B) elde edilen değerleri aydınlatma yoğunluğuna bağlı çizilmiştir. Diyotların n ve Φ_B değerleri, denklem 2,31 ve 2,32 yardımıyla ve düz beslem I-V grafiğinin doğrusal bölgesinin kullanılmasıyla hesaplanmış ve tablo 4.1’de verilmiştir. Şekil 4.3’den görüldüğü üzere, Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının engel yüksekliği artan ışık yoğunluğu ile azalırken idealite faktörü artmaktadır. İdealite faktörünün 1’den sapması, tüketme bölgesindeki elektronların ve deşiklerin yeniden birleşmesi veya uygulanan voltajın artması sonucunda difüzyon akımının artmasına atfedilebilir [56,57]. Diğer taraftan, yüksek n değeri, inorganik yarı iletkenle dengede yüksek yoğunluklu arayüzey durumlarının varlığını doğrular [58].



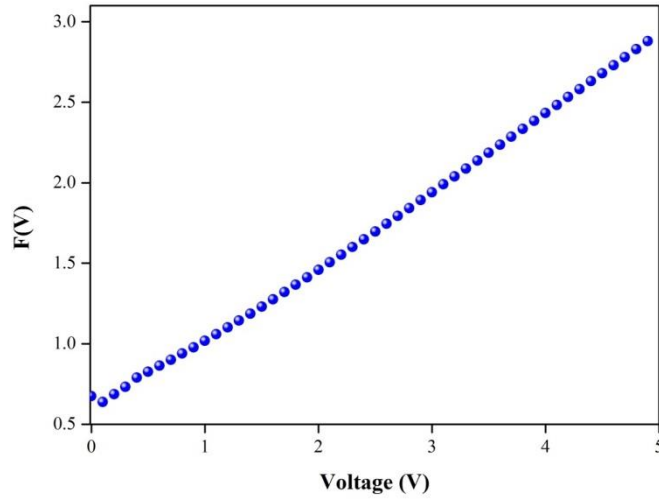
Şekil 4.3 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı ideallik faktörü ve engel yüksekliği değerleri.

Tablo 4.1. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyotu için elde edilen diyot parametreleri.

Fotodiyot	Doyma akımı (I_0)	n (I-V) -	n (Cheung)	Φ_b (I-V) (eV)	Φ_B (eV) (Cheung)	Φ_B (eV) (Norde)	R_s Cheung ($k\Omega$ (H(I)))	R_s Cheung ($(k\Omega$ (dln(I)))	R_s Norde ($k\Omega$)
Fluoresceina mine/n-Si	$1,62 \times 10^{-6}$	8,49	8,39	0,639	0,631	0,615	0,35	0,37	6,30

Bariyer yüksekliği ve seri direnç değerleri Norde ve Cheung tekniği kullanılarak hesaplanmıştır. Norde tekniği ile aygıt parametrelerini elde etmek için Norde fonksiyonu kullanılır (denklem 2.33). Denklem 2.33 ideallik faktörü 1 ile 2 değerleri arasında olan diyotlar için kullanıldığından üretilen diyotların ideallik faktörleri I-V analizlerinden elde edilen sonuçlara göre 2 değerinden yüksek çıktığı için modifiye Norde yöntemi (denklem 2.44) kullanılmıştır. Şekil 4.4’de Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyotunun Norde tekniği ile elde edilen F(V)-V çizimi verilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere diyot normal Norde grafiği davranışı gösterdiğinden dolayı engel

yüksekliği (Φ_B) ve seri direnç (R_s) değerleri Norde grafiği [60] kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen Φ_B ve R_s değerleri tablo 1’de listelenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, elde edilen R_s değerleri, üretilen diyotun düşük seri dirence sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan Norde tekniğinden elde edilen Φ_B değerleri, termiyonik emisyon değerleri ile oldukça uyumludur. Değerlerdeki görülen küçük farklılıklar teknikler arasındaki yaklaşım farklılıklarına atfedilebilir [60].

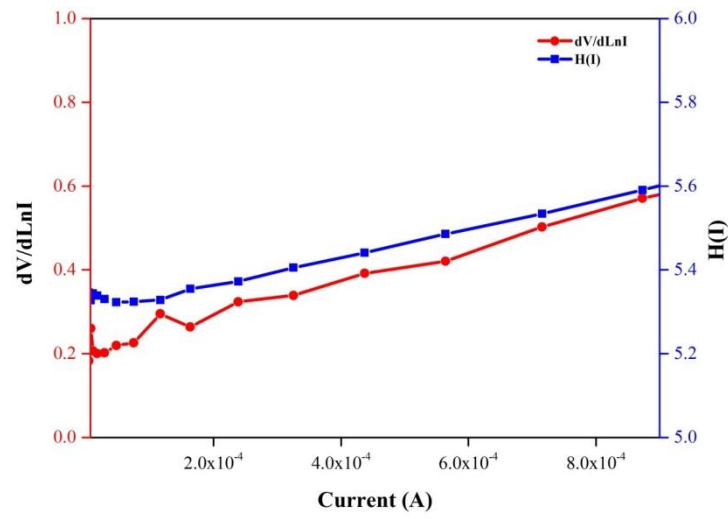


Şekil 4.4 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının $F(V)$ - V çizimleri.

Seri direnç ve diğer diyot parametrelerini tayin etmede en sık kullanılan tekniklerden biri de Cheung tekniğidir. Bu teknikte iki tür Cheung fonksiyonu vardır (denklem 2.48 ve 2.49) ve düz beslem I - V eğrisinin doğrusal olmayan bölgesini kullanır [34]. Şekil 4.5’de Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyotunun Cheung tekniği ile elde edilen $dV/d(\ln I)$ ve $H(I)$ fonksiyonlarının akıma bağlı çizimleri görülmektedir. Şekilden görüldüğü üzere grafiklerdeki her iki eğri, $dV/d(\ln I)$ ve $H(I)$ fonksiyonları için lineer bölgeleri açıkça göstermektedir. Kesişmeler $dV/d(\ln I)$ ’den n ’yi ve $H(I)$ fonksiyonlarından Φ_B ’yi ortaya koyarken, bu lineer çizimlerin eğimleri iki fonksiyon için R_s değerlerini verir [61,62].

Cheung grafiklerindeki doğrusallıktan bazı sapmalar, arayüzey tabakası etkisi nedeniyle görülebilir. Cheung tekniği kullanılarak elde edilen n , Φ_B ve R_s değerleri

tablo 1’de listelenmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, iki Cheung fonksiyonu ile elde edilen seri direnç değerleri birbiriyle oldukça uyumludur ve bu sonuç Cheung yönteminin tutarlılığını doğrulamaktadır. Diyot parametrelerinin diğer tekniklerle karşılaştırılması, elde edilen diyot parameter değerlerinin birbirine yakın karşılaştırma için kabul edilebilir olduğunu ortaya koymaktadır. Teknikler arasındaki küçük farklılıklar, ideal olmayan diyot yapısı veya arayüzey organik katmanlarının yanı sıra yaklaşım tipine bağlı olabilir [63].



Şekil 4.5 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının Cheung çizimleri.

Foto-tepki (R) ve foto-duyarlılık (S), fotodiyotlar için karakteristik parametrelerdir ve aşağıdaki 4.2 ve 4.3 denklemleriyle verilir:

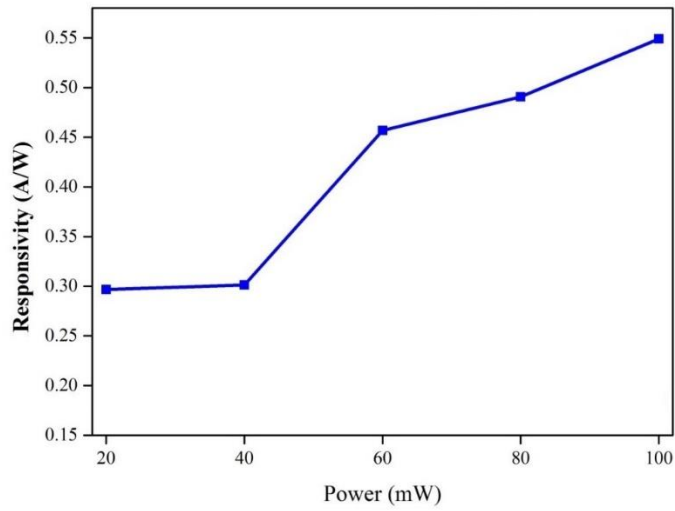
$$R = \frac{I_{\text{foto}} - I_{\text{karanlık}}}{P_{\text{gelen}}} \quad (4.2)$$

I_{foto} = aydınlatma altındaki foto-akım, $I_{\text{karanlık}}$ = karanlık akımı

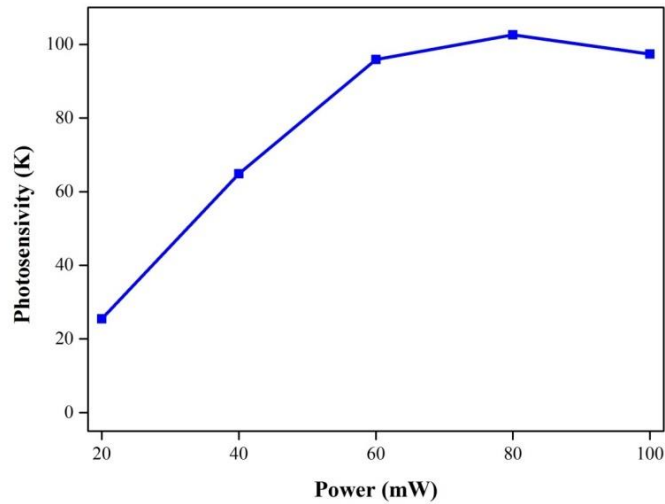
P_{gelen} = gelen ışık gücü

$$S = \frac{I_{\text{foto}} - I_{\text{karanlık}}}{I_{\text{karanlık}}} \quad (4.3)$$

Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyonu için aydınlatma yoğunluğuna bağı R ve S eğrileri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6a ve b'de elde edilen eğriler üretilen Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyonunun iyi bir ışık algılama özelliği sahip olduğunu göstermektedir. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyonu için R değeri 0,549 A/W (100 mW/cm² aydınlatma altında ve - 5 V'ta) olarak bulunmuştur. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyonu için S değeri 100 mW/cm² aydınlatma altında 4,48 A/cm² bulunmuştur. Tüm aydınlanma değerleri için elde edilen R ve S değerleri tablo 4.2'de verilmiştir.



(a)



(b)

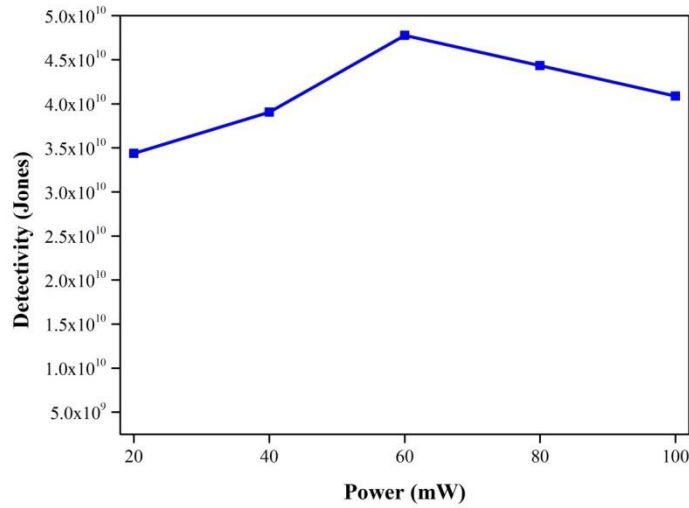
Şekil 4.6 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapılarının aydınlatma yoğunluğuna bağlı a) foto-tepki (R) ve b) foto-duyarlılık (S) eğrileri.

Fotodetektörün dedeksiyonu (D) aşağıdaki 4.4 denklemini kullanılarak hesaplanmıştır [64,65]:

$$D = \frac{R}{\sqrt{2q}J_{\text{karanlık}}} \quad (4.4)$$

R = Foto-tepki, q = elektronik yük, $J_{\text{karanlık}}$ = karanlık akım yoğunluğu

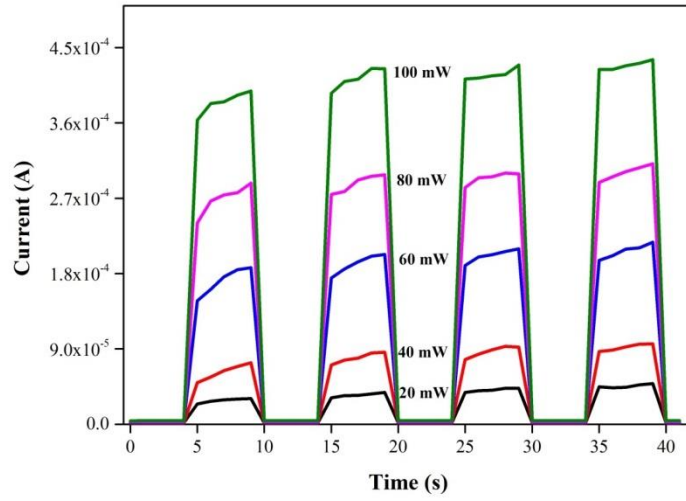
Şekil 4.7’de Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyodu için farklı aydınlatma yoğunlukları altında dedeksiyon eğrisi görülmektedir. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al diyodu için 100mW/cm^2 ışık yoğunluğunda D değeri $4,10 \times 10^{10}$ Jones olarak bulunmuştur.



Şekil 4.7 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı aydınlatma yoğunlukları altında dedeksiyon eğrisi.

Fotoiletkenlik mekanizmasını daha ayrıntılı olarak tartışmak için zamana bağlı geçici foto-akım ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.8’de Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının 20, 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 ’lik ışık yoğunluğuna bağlı (- 3 V’da) olarak geçici fotoakım grafikleri verilmiştir. Fotoakım geçici ölçümleri, fotoiletkenlik mekanizmasını anlamak ve cihazın açık ve kapalı konumları sırasında çeşitli güç yoğunlukları için fototepki özelliklerini göstermek için iyi bilinen bir tekniktir [66,67].

Aydınlatma açıldığında serbest yük taşıyıcıların sayısı artarak akıma katkıda bulunur ve fotoakım değerleri hızla doygunluk düzeyine ulaşır. Aydınlatma kapatıldığında, yük taşıyıcıları daha düşük seviyelere iner ve fotoakım hızla başlangıç seviyesine düşer [68,69]. Bu durum aygıtın [70] tersine çevrilebilir bir anahtarlama davranışını temsil eder. Şekil 4.8'den görülebileceği gibi, aydınlatma şiddeti altında hızlı bir fotoakım tepkisi gözlenmiş ve fotoakım değerleri yaklaşık 1 saniye içinde doygunluk değerine ulaşmıştır. Aydınlatma yoğunluğundaki değişiklik, diyotun tepki süresini önemli ölçüde değiştirmiştir. Ayrıca, maksimum foto-akım seviyelerinin aydınlatma yoğunluğu ile ilişkili olduğu gözlenmiştir. Şekilden de görülebileceği gibi maksimum akım değeri artan ışık şiddeti ile artmıştır. Aydınlatma şiddetinin değişmesi ile serbest yük taşıyıcı konsantrasyonundaki artıştan dolayı yüksek foto-akım değerleri elde edilmiştir. Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısı için fotoakım 100 mW/cm^2 aydınlatma altında $4,09 \times 10^{-6} \text{ A}$ 'den $3,64 \times 10^{-4} \text{ A}$ 'ya yükselmiş ve ardından aydınlatma kapatıldıktan sonra başlangıç değerine dönmüştür. Sürekli aydınlatma altında gözlemlenen eğrilerdeki belirli foto-akım değerleri, yük taşıyıcıların hafifçe dağılmasına veya çökmesine bağlanabilir. Bu yük taşıyıcıları, tuzaklar tarafından tutulabilir veya diğer enerji seviyelerinden iletim bandına doğru yeniden uyarılabilir [71,72]. Bu sonuç, üretilen yapının fotoiletken bir davranış sergilediğini açıkça göstermektedir. Akımın başlangıçta yükselmesi, serbest yük taşıyıcılarının üretim mekanizmasını gösterir. Aydınlatma kapatıldıktan sonra akımın azalması ise, yük taşıyıcıların derin seviyelerde tuzaklanma mekanizmasını gösterir.

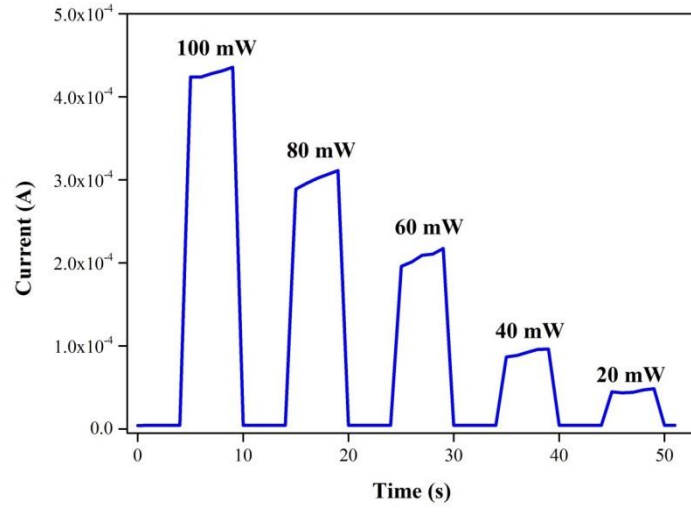


Şekil 4.8 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısı için aydınlatma yoğunluğuna bağlı geçici foto-akım ölçümleri.

Tablo 4.2 Çeşitli aydınlatma yoğunlukları altında Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısı için fotodedektör parametreleri.

Diyot	Işık Yoğunluğu (mW/cm ²)	Foto-akım (A)	Foto-duyarlılık (A/cm ²)	Foto-tepki (A/W)	Dedeksiyon (Jones)
Fluoresceinamine/n-Si	20	$4,66 \times 10^{-5}$	25,48	0,297	$3,44 \times 10^{10}$
	40	$9,46 \times 10^{-5}$	64,84	0,301	$3,91 \times 10^{10}$
	60	$2,15 \times 10^{-4}$	95,89	0,457	$4,78 \times 10^{10}$
	80	$3,08 \times 10^{-4}$	102,58	0,491	$4,43 \times 10^{10}$
	100	$4,31 \times 10^{-4}$	97,35	0,549	$4,09 \times 10^{10}$

Foto-akımın gelen ışık yoğunluğuna bağlı olarak doğrusal olması bir optoelektronik aygıt için önemli bir parametredir. Bu nedenle, üretilen diyotların foto-akımının ışık yoğunluğuna karşı değişimi incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.9’da verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al fotodiyodu tarafından üretilen foto-akım, ışık yoğunluğunun azalmasıyla neredeyse doğrusal olarak azalmıştır. Bu durum, emilen ışık akısı ne kadar fazlaysa, foto-üretilmiş taşıyıcıların sayısının o kadar fazla olduğu gerçeğini kanıtlamaktadır [73]. Şekil 4.9’dan elde edilen sonuçlara göre, ışık yoğunluğu 100’den 20mW/cm²’ye değiştiğinde $4,23 \times 10^{-4}$ A’lik maksimum akımdan $4,28 \times 10^{-5}$ A’lik minimum akıma doğru hemen hemen doğrusal bir biçimde inmiştir.



Şekil 4.9 Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının aydınlatma yoğunluğuna bağlı geçici fotoakım ölçümleri.

BÖLÜM 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında organik arayüzeyli metal/yarıiletken yapıların opto-elektronik özellikleri incelenmiştir. Bunun için arayüzey malzemesi olarak daha önce bu tip yapılarda hiç kullanılmamış Fluoresceinamine malzemesi seçilmiş ve silisyum alttabakalar üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Elde edilen Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının farklı ışık yoğunluklarına bağlı fotodiyot özellikleri incelenmiştir.

Üretilen aygıt karanlık altındaki doğrultma davranışı ile birlikte tüm aydınlatma şartlarında iyi bir doğrultma davranışı sergilemiştir. Diğer taraftan aydınlatma altında iyi bir foto-iletkenlik davranışı göstermiş olup, ters beslem altında artan ışık şiddeti ile bir foto-akımın meydana geldiği görülmüştür.

Geçici foto-iletkenlik sonuçları, diyot foto-akımının artan ışık şiddeti ile arttığını göstermiştir. Bu sonuçlardan görüldüğü üzere, üretilen diyot iyi bir kararlılık sergilemekte ve belirgin aydınlatma yoğunluğu altında hızlı foto-tepki vermektedir. Zamana bağlı fotoiletkenlik ölçümleri, aydınlatma yoğunluğunun fotodiyodun tepki süresini önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Ayrıca foto-akım seviyelerinin aydınlatma şiddeti ile ilişkili olduğu ve tüm aydınlatma şiddetleri altında maksimum foto-akım değerine yaklaşık bir saniye içinde ulaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak, üretilen Au/Fluoresceinamine/n-Si/Al yapısının iyi bir ışığa duyarlı davranış sergilemiş olduğu, fotodiyot ve fotosensör gibi opto-elektronik uygulamalarda kullanılabileceği görülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] Yakuphanoglu, F., Darkwa-Mensah, K., Al-Ghamdi, A. A., Gupta, R. K., Farooq, W. A., Novel organic doped inorganic photosensors, *Microelectron. Eng. J.* 160, 27-33, 2016.
- [2] Ocaya, R. O., Al-Ghamdi, A., Mensah-Darkwa, K., Gupta R. K., Farooq, W., Yakuphanoglu, F., Organic photodetector with coumarin-adjustable photocurrent, *Synth. Met.* 213, 65-72, 2016.
- [3] Tombak, A., Ocak, Y. S., Asubay, Kilicoglu, S., Ozkahraman T., F., Fabrication and electrical properties of an organic-inorganic device based on Coumarin 30 dye, *Mater. Sci. Semicond. Process.* 24, 187-192, 2014.
- [4] Wageh, S., Farooq, W. A., Tataroglu, A., Dere, A., Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A., Yakuphanoglu, F., A photodiode based on PbS nanocrystallites for FYTRONIX solar panel automatic tracking controller, *Phys. B Condens. Matter* 527, 44-51, 2017.
- [5] Mekki, A., Dere, A., Mensah-Darkwa, K., Al-Ghamdi, A., Gupta, R. K., Harrabi, K., Farooq, W. A., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu, F., Graphene controlled organic photodetectors, *Synth. Met.* 217, 43-56, 2016.
- [6] Mott, N. F., Note on the contact between a metal and an insulator or semiconductor, *Proceedings of the Cambridge hilosophical Society*, 34, 568-572, 1938.
- [7] Schottky, W., Halbleitertheorie der Sperrschicht, *Natur iss.*, 26, 843, 1938.
- [8] Wilson, J., Hawkes, J.F.B. *Optoelectronics an Introduction*, Prentice Hall Europe, Great Britain, 559, 1998.
- [9] Poplavko, Y. M., *Electronic Materials. Semiconductors*. Elsevier, USA, 2019.
- [10] Durlu, T. N. *Katıhal Fiziğine Giriş, Zirve Ofset*, Ankara, 1996.
- [11] Braun, F., Ukey die Streikleitung durch Schefelmetalle *Ann. Physik chem.*, 153, 556, 1874.
- [12] Okutan, M., Yakuphanoglu, F., Analysis of interface states and series resistance of Ag/SiO₂/n-Si MIS Schottky diode using current-voltage and impedance spectroscopy methods. *Microelectric Engineering*, 85, 646-653, 2008.
- [13] Tüzün, Ö., *Metal-Yalıtkan-Yarıiletken Yapıdaki Gözenekli Silisyum Günes Pillerinin Elektriksel Karakteristikleri*. Muğla Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2005.
- [14] Shrama, B. L. *MS Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Press: New York and London, 1984.
- [15] Sze, S. M. *Phys. of semiconductor devices*, Jhon Wiley and Sons Inc, NY, 868, 1981.
- [16] Card, H. C. and Rhoderick, E. H. Studies of Tunnel MOS Diodes I. Interface, Effects In Silicon Schottky Diodes *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 4, 1589-1601, 1971.

- [17] Ongun, O., Organik Tabanlı Fotodiyotların Hazırlanması Ve Aydınlatma Altında Optoelektronik Özelliklerinin İncelenmesi, Giresun Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 2019.
- [18] Brutting, W., Physics of Organic Semiconductors. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2005.
- [19] Rhoderick, E. H. and Williams, R. H., Surfaces, Interfaces, and Schottky Barriers, Metal-Semiconductor Contacts 2nd ed., Clarendon Press, Oxford, 1988.
- [20] Nicollian, E. H. and Brews, J. R., Metal Oxide Semiconductor (MOS) Physics and Technology, John Wiley, New York, 1982.
- [21] Rhoderick, E. H., The Physics of Schottky Barriers, Journal of Physics D, 1153, 1970.
- [22] Sze, S. M., and Kwok K. Ng, Metal-Semiconductor Contacts, Physics of Semiconductor Devices, 3rd ed., John Wiley & Sons, New York, 245-300, 2007.
- [23] Sze ve Kwok. Phys. of semiconductor devices, Jhon Wiley and Sons Inc., NY, 868, 2007.
- [24] Crowell, C. R., Sze, S. M., Current Transport in Metal-Semiconductor Barriers, Solid State Electron., 9, 1035, 1966.
- [25] Schroder, D. K. Semiconductor material and device characterization. 3rd ed., Jhon Wiley & Sons, Inc., New jersey, 779, 2006.
- [26] Crowell, C. R., Rideout, V. L. Normalized Thermionic-Field Emission In Metal-Semiconductor Barriers. Solid State Electron., 12, 89-105, 1969.
- [27] Padovani, F. A., Stratton, R. Field and Thermionic-Field Emission in Schottky Barriers. Solid-State Electron., 9, 695-707, 1966.
- [28] Schroder, D. K. Semiconductor material and device Characterization, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 599, 1990.
- [29] Padovani, F. A. The Voltage-Current Characteristic of Metal Semiconductor Contacts, in Semiconductors and Semimetals. Academic Press, New York, 7; 75-146, 1971.
- [30] Cowley. A. M. and Sze, S. M. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. J. Appl. Phys., 36, 3212-3220, 1965.
- [31] Dere, A. Tataroğlu, A., Al-Sehemi, A.G., Al-Ghamdi, A.A., El-Tantawy, F.F., Farooq, W.A., Yakuphanoglu, F., A functional material based photodiode for solar tracking systems, Phys. B Condens. Matter, 520, 76-81, 2017.
- [32] Cafer, T., Katıhal Elektroniği, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul, 2000.
- [33] Singh, A., Characterization of interface states at Ni/n CdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. Solid-State Electronics, 28, 223-232, 1985.
- [34] Cheung S. K., Cheung, N. W., Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. Appl. Phys. Lett. 49, 85-87, 1986.
- [35] Asubay, S. The Electrical Characteristics of Al/p-InP Schottky Contacts. Microelectronic Engineering, 88, 109-112, 2011.
- [36] Norde, H., A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance, J. Appl. Phys. 50, 5052, 1979.
- [37] Bohlin, K. E. Generalized Norde Plot Including Determination of the Ideality Factor. J. Appl. Phys., 60, 1223-1224, 1986.
- [38] Dere, A., Grafen esaslı fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2014.

- [39] Karataş, S., Yakuphanoglu, F., Amanullah, F. M., Capacitance-voltage and conductance-voltage characteristics of Ag/n-CdO/p-Si MIS structure prepared by sol-gel method, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 73, 46-51, 2012.
- [40] Sze, S. M., Ng, K. K., *Physics of semiconductor devices*. Wiley Interscience, New Jersey, 2007.
- [41] Bütün, S., The growth fabrication and characterization of high performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ metal-semiconductor-metal photodiodes, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniv. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2006.
- [42] Gündüz, B., Organik yarıiletken fotodiyotların hazırlanması ve optoelektronik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2007.
- [43] Çavaş, M., Nano yapıli metal oksit yarıiletkenler kullanılarak foto diyotların üretilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, 2011.
- [44] Erol, A., Balkan, N., *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları*, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, 2015.
- [45] Bıyıklı, N., Design, Fabrication and Characterization of High Performance Resonant Cavity Enhanced Photodetectors, Yüksek Lisans Tezi, Bilkent Üniversitesi, Ankara, 1998.
- [46] Bhattacharya, P., *Semiconductor Optoelectronic Devices*, Prentice Hall, New Jersey, 1994.
- [47] Bıyıklı, N., High-performance $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ -based uv photodetectors for visible/solar-blind applications, Doktora Tezi, Bilkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2004.
- [48] İdris, K., Metal-yarı iletken shottky diyotların elektriksel karakteristiklerin frekans ve sıcaklığa bağlı incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
- [49] Johnson, M., *Photodetection and Measurement*. Blacklick, OH, USA: McGraw-Hill Professiona Publishing, 14-15, 2003,
- [50] Roberts, R., Fox, J.J., Martin, A.M., Photo-Conductivity of diamonds, *Nature*, 129, 579, 1932.
- [51] Hovel, H., *Solar cells, Semiconductors and Semimetals*. 11th ed. New York: Academic Press. 1975.
- [52] Choi, Y. J., Woo, H. J., Kim, S., Sun, J., Kang, M. S., Song, Y. J. and Cho, J. H. Schottky junction photodiode based on grapheme-organic semiconductor heterostructure. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 89, 233-238, 2020.
- [53] Al-Ahmadi, N. A., Metal oxide semiconductor-based Schottky diodes: a review of recent advances. *Materials Research Express*. 7, 032001, 2020.
- [54] Pan, J., Deng, W., Xu, X., Jiang, T., Zhang, X. and Jie, J., Photodetectors based on small-molecule organic semiconductor crystals. *Chinese Phys. B* 28, 038102 2019.
- [55] Barkhordari, A., Ozcelik, S., Altindal, Ş., Pirgholi-Givi, G. Mashayekhi, H. and Azizian- Kalandaragh, Y., The effect of PVP: BaTiO_3 interlayer on the conduction mechanism and electrical properties at MPS structures. *Phys. Scr.* 96, 085805, 2021.
- [56] Forrest, S. R., Kaplan, M. L., Schmidt, P. H., Organic-on-inorganic semiconductor contact barrier diodes. II. Dependence on organic film and metal contact properties. *J. Appl. Phys.* 56, 543–551, (1984).

- [57] El-Nahass, M. M., El-Zaidia, E. F. M., Ali, M. H., Zedan, I. T., Current–voltage and photovoltaic characteristics of n-Ge₁₀Se₈₀In₁₀/p-Si heterojunction. *Materials Science in Semiconductor Processing*. 24, 254–259, 2014.
- [58] Antohe, S., Tomozeiu, N., Gogonea, S., Properties of the Organic-on-Inorganic Semiconductor Barrier Contact Diodes In/PTCDI/p-Si and Ag/CuPc/p-Si., *Phys. Status Solidi A*, 125, 397–408, 1991.
- [59] Sen S., Manik, N. B., Effects of two different solvents on Schottky barrier of organic device. *Journal of Physics Communications*, 5, 095010, 2021.
- [60] Yilmaz, M., Kocyigit, A., Cirak, B. B., Kacus, H., Incekara, U., Aydogan, S. The comparison of Co/hematoxylin/n-Si and Co/hematoxylin/p-Si devices as rectifier for a wide range temperature. *Materials Science in Semiconductor Processing*. Process. 113, 105039, 2020.
- [61] Kaymaz, A., Evcin Baydilli, E., Uslu Tecimer, H., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh, Y., Evaluation of gamma-irradiation effects on the electrical properties of Al/(ZnO-PVA)/p-Si type Schottky diodes using current-voltage measurements. *Radiat. Phys. Chem.* 183, 109430, 2021.
- [62] Kocyigit, A., Orak, İ. The electrical characterization effect of insulator layer between semiconductor and metal. *J. Inst. Sci. Technol.* 6, 57-67, 2016.
- [63] Tataroğlu, A., Altındal, Ş., Azizian-Kalandaragh Y., Comparison of electrical properties of MS and MPS type diode in respect of (In₂O₃-PVP) interlayer. *Phys. B Condens. Matter* 576, 411733, 2020.
- [64] Gong, X., Tong, M., Xia, Y., Cai, W., Moon, J. S., Cao, Y., Yu, G., Shieh, C.-L., Nilsson, B., Heeger, A. J., High-detectivity polymer photodetectors with spectral response from 300 nm to 1450 nm. *Science* 325, 1665–1667, 2009.
- [65] Wang, J. B., Li, W. L., Chu, B., Lee, C. S., Su, Z. S., Zhang, G., Wu, S. H., Yan, F., High speed responsive near infrared photodetector focusing on 808 nm radiation using hexadecafluoro-copper-phthalocyanine as the acceptor. *Org. Electron.* 12, 34–38, 2011.
- [66] Gozeh, B. A., Karabulut, A., Yildiz, A., Yakuphanoglu, F., Solar light responsive ZnO nanoparticles adjusted using Cd and La Co-dopant photodetector. *J. Alloys Compd.* 732, 16–24, 2018.
- [67] Dahlan, A. S., Tataroglu, A., Al-Ghamdi, A. A., Al- Ghamdi, A. A., Bin-Omran, S., Al-Turki, Y., El-Tantawy, F., Yakuphanoglu F., Photodiode and photocapacitor properties of Au/CdTe/p-Si/Al device. *J. Alloys Compds.* 646, 1151–1156, 2015.
- [68] Bube, R. H., *Photoconductivity of Solids*. Wiley, New York, 1960.
- [69] Aslan, F., Esen, H., Yakuphanoglu, F., The effect of coumarin addition on the electrical characteristics of Al/Coumarin: CdO/p-Si/Al photodiode prepared by drop casting technique. *Optik* 197, 163203, 2019.
- [70] Dugan, S., Koc, M. M., Coskun, B., Structural, electrical and optical characterization of Mn doped CdO photodiodes. *J. Mol. Struct.* 1202, 127235, 2020.
- [71] Gullu, H. H., Yildiz, D. E., Kocyigit, A., Yıldırım, M., Electrical properties of Al/PCBM:ZnO/p-Si heterojunction for photodiode application. *J. Alloy. Compd.* 827, 154279, 2020.
- [72] Zhang, Y., Ji, T., Zou, R., Ha, E., Hu, X., Cui, Z., Xu, C., He, S., Xu, K., Zhang, Y., Hu, J., An efficiently enhanced UV-visible light photodetector with a Zn: NiO/p-Si isotype heterojunction. *Journal of Materials Chemistry C.*, 10, 2020.

- [73] Zhang, Y., Ji, T., Zhang, W., Guan, G., Ren, Q., Xu, K., Huang, X., Zou, R. Hu, J., A self-powered broadband photodetector based on an n-Si(111)/p-NiO heterojunction with high photosensitivity and enhanced external quantum efficiency. *J. Mater. Chem. C*, 5, 12520, 2017.



ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise öğrenimini Malatya’da tamamladı. 2015 yılında girdiği Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği’ni 2019 yılında tamamladı. 2020 yılında Giresun Üniversitesi Enerji Sistemleri Mühendisliği alanında Yüksek Lisans eğitime başladı. 2022 yılında Necmettin Erbakan Üniversitesi Tesisat Teknolojileri ve İklimlendirme alanında pedagojik formasyon eğitime başladı.