

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

**ÇİNKO FTALOSİYANİN TABANLI HETEROEKLEMİN
ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Mustafa Yıldız

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Fizik Anabilim Dalı**

**DİYARBAKIR
Haziran-2012**

T.C
DİCLE UNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ
DİYARBAKIR

Mustafa YILDIZ tarafından yapılan “Çinko Ftalosiyanin Tabanlı Heteroeklemin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi” konulu bu çalışma , jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir

Jüri Üyesinin

<u>Ünvanı</u>	<u>Adı Soyadı</u>
Başkan: Doç. Dr.	Kemal AKKILIÇ
Üye : Doç. Dr.	Mehmet DOĞRU
Üye : Yrd. Doç. Dr.	Yusuf Selim OCAK

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 27/06/2012

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../...../2012

Prof. Dr. Hamdi TEMEL

ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

(MÜHÜR)

TEŐEKKÖRLER

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu alışma Sayın Yrd. Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK danışmanlığında yrtlmştir.

Tezimi hazırlama aşamasında, gerek teorik gerekse uygulama konusunda verdiği destek ve katkılarından dolayı kendilerine çok teşekkür ederim.

Engin bilgi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan fikirleriyle bana yol gösteren Sayın Prof. Dr. Tahsin KILIçOğLU hocama çok teşekkür ederim. Ayrıca fikirleriyle ufkumun açılmasını sağlayan Sayın Doç. Dr. Kemal AKKILIÇ hocama çok teşekkür ederim.

Metal buharlaştırma işleminde yardımını esirgemeyen, Batman Üniversitesi araştırma görevlilerinden Ahmet Tombak beye teşekkür ederim.

Bu alışma 10-FF-115 numaralı DÜBAP projesi ile desteklenmiştir. Teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans arkadaşlarım ve aileme de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
ÇİZELGE LİSTESİ.....	VII
ŞEKİL LİSTESİ.....	VIII
KISALTMA VE SİMGELER.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	5
3. MATERYAL ve METOT.....	11
3.1. Metal Yarıiletken Kontaklar.....	11
3.1.1 Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar	12
3.1.2 Metal p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar.....	14
3.1.3 Metal p-tipi Yarıiletken-Metal Yapısı.....	16
3.1.4 Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler.....	17
3.1.5 Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi.....	18
3.1.6 Norde Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Karakterizasyonu.....	21
3.1.7 Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky Kapasitesi	25
3.2. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri	27
3.2.1 Yarıiletkende Soğurma Olayları	28
3.2.2 Doğrudan Bant Geçişi	33
3.2.3 Dolaylı Bant Geçişi	34
3.3. Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi	35
3.3.1 Hava Kütlesi.....	35
3.3.2 Güneş pillerinin Karakterizasyonu	37
3.4. Deneysel İşlemler	41

3.4.1.	Giriş	41
3.4.2.	Çinko Ftalosiyanin Molekülü	41
3.4.3.	Yarıiletkenin Temizlenmesi	43
3.4.4.	Diyotların Hazırlanması	43
3.4.5.	Akım-Gerilim ve Kapasite-Gerilim Ölçümlerinin Alınması.....	46
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	49
4.1.	Giriş	49
4.2.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al Akım-Gerilim karakteristiği	49
4.3.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al Kapasite-Gerilim Karakteristiği.....	53
4.4.	Fotoelektriksel Özelliklerin İncelenmesi.....	55
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	57
6.	KAYNAKLAR	59
	ÖZGEÇMİŞ.....	63

ÖZET

ÇİNKO FTALOSİYANİN TABANLI HETEROEKLEMİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mustafa YILDIZ

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

2012

Bu çalışmada (100) yönelimine sahip ve öz direnci 1-10 Ωcm olan p-Si kristalleri kullanıldı. Bir Çinko Ftalosiyanın türevi olan $\text{C}_{96}\text{H}_{146}\text{N}_8\text{O}_8$ zinc (2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine), (oc-ZnPc) bileşiğinin $1,36 \times 10^{-4}$ molarlık bir çözeltisi hazırlandı. Çözelti metanol kullanılarak hazırlandı. Dönel kaplama metodu kullanılarak oc-ZnPc nin p-Si üzerinde ince filmi hazırlandı. Alüminyum yüksek vakum ortamında, termal olarak buharlaştırıldı. Böylece Al/oc-ZnPc/p-Si yapısı oluşturuldu.

Al/oc-ZnPc/p-Si yapısının oda sıcaklığında ve karanlık ortamda akım gerilim ($I-V$) ve kapasite gerilim ($C-V$) ölçümleri yapıldı. $I-V$ grafiğinden bu yapının doğrultucu özellik gösterdiği görüldü. İdealite faktörü ve engel yüksekliği gibi diyot parametreleri, $\ln I-V$ grafiği kullanılarak belirlendi. İdealite faktörü 1,44 ve engel yüksekliği 0,78 eV olarak hesaplandı. Norde fonksiyonları kullanılarak $F(V)-V$ grafikleri çizildi. Bu grafikten seri direnç 5,46 k Ω olarak hesaplandı. $C-V$ ölçümleri 0,2-5 MHz frekans aralığında yapıldı. Bu ölçümlerden frekans değeri artarken kapasite değerinin azaldığı gözlemlendi.

Ayrıca Al/oc-ZnPc/p-Si diyotunun 40-100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında $I-V$ ölçümleri yapıldı. Işık şiddeti arttıkça ters beslem akımının da arttığı gözlemlendi. Yapının fotodiyot özelliği gösterdiği anlaşıldı ve diyotun optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiş oldu.

Anahtar Kelimeler : Schottky Diyot, Çinko ftalosiyanın, Norde Fonksiyonları

ABSTRACT

DETERMINATION of ELECTRICAL PROPERTIES of ZINC PHTHALOCYANINE BASED HETEROJUNCTION

MSc. Thesis

Mustafa YILDIZ

DEPARTMENT OF PHYSICS
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2012

In this study, a p-Si wafer with (100) orientation and 1-10 Ωcm resistivity was used. $1,36 \times 10^{-4}$ M solution of Zinc (2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine) (oc-ZnPc) which is one of the derivative of Zinc Phthalocyanine was prepared. Solution was prepared in methanol. A thin film of oc-ZnPc was spin coated on p-Si substrate. Aluminum was thermally evaporated on the oc-ZnPc thin film under high vacuum. Finally the Al/oc-ZnPc/p-Si structure was succeeded.

The current-voltage (I - V) and capacitance-voltage (C - V) measurements of Al/oc-ZnPc/p-Si structure were taken under dark at room temperature. The I - V measurements proved that the structure showed rectification property. Some basic diode properties like ideality factor and barrier height were calculated from $\ln I$ - V graph. Ideality factor and barrier height were found as 1.44 and 0.78 eV respectively. $F(V)$ - V graph was plotted by using Norde functions. From the graph, the series resistance was calculated as 5.46 k Ω . C - V measurements were taken in the range of 0,2-5 MHz and it has been seen that the capacitance value decreased with increasing frequency.

In addition I - V measurements of the Al/oc-ZnPc/p-Si were repeated under light which had intensity of 40-100 mW/cm². It was observed that reverse bias current of the diode increased with the light intensity. Therefore, the structure showed photodiode characteristic and it can be used in optoelectronic applications.

Key Words: Schottky Diodes, Zinc Phthalocyanine, Norde Function

ÇİZELGE LİSTESİ

<u>Çizelge No</u>		<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1.	Oluşturulan Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotlarının $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri	49
Çizelge 4.2.	$40 \text{ mW/cm}^2 - 100 \text{ mW/cm}^2$ ışık altındaki ışığa duyarlılık ve V_{oc} , I_{sc} değerleri	54

ŞEKİL LİSTESİ

<u>Şekil No</u>		<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1.	Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu diyotun enerji bant diyagramları. a) kontakdan önceki enerji bant yapısı. b) kontak yapıldıktan sonraki enerji bant yapısı. c) düz beslem uygulanan kontağın enerji bant yapısı ($V>0$). d) ters beslem uygulanan kontağın enerji bant yapısı ($V<0$)	11
Şekil 3.2.	Metal /p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar. a)- Kontakdan önceki enerji bantları b)- Kontakdan sonraki sıfır beslem ($V=0$) durumundaki enerji bantları. c)- Kontakdan sonraki düz beslem ($V>0$) durumundaki enerji bantları. d)-kontakdan sonraki ters beslem ($V<0$) durumundaki enerji bantları	13
Şekil 3.3.	P^+PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji bant diyagramı	14
Şekil 3.4.	Düz Beslemde Metal Yarıiletken Schottky Kontaklarda İmaj Azalma Etkisine Ait Enerji-Bant Diyagramı	17
Şekil 3.5.	Metal p-tipi yapılarda doğrultucu kontağın potansiyel dağılımı ve yük dağılımı	23
Şekil 3.6.	a) Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması. b) Uyarılmış elektronun valans banda geçerken bir foton yayınlanması	27
Şekil 3.7.	Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu (Akyüz, 2000)	28
Şekil 3.8.	Safsızlıklar ve bantlar arasındaki geçişler. (a) donör-iletim bandı (b) valans bandı-akseptör (c) valans bandı-donör (d) akseptör-iletim bandı	29
Şekil 3.9.	Doğrudan ve dolaylı band aralığı	33
Şekil 3.10.	Hava kitle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi	34
Şekil 3.11.	Kara cisim ışıması, AM0 ve AM1.5 spektrumları	35
Şekil 3.12.	a) Bir güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi b) Bir güneş piline ait(güneş pili+ diyot) akım gerilim grafiği	36
Şekil 3.13.	Güneş pillerinde denklem 3.69'a karşılık gelen akım-gerilim grafiği	37
Şekil 3.14.	Güneş pilinde pilde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi	38
Şekil 3.15.	Güneş pili üzerine paralel direnç etkisi ($R_s=0$ durumunda)	38
Şekil 3.16.	Güneş pili üzerine seri direnç etkisi ($R_p=\infty$ durumunda)	39
Şekil 3.17.	zinc 2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine molekülünün yapısı.	40
Şekil 3.18.	Termal Buharlaştırma Cihazı	41

Şekil 3.19.	Tavlama işleminin gerçekleştirildiği Fırını	42
Şekil 3.20.	İnce filmin oluşturulduğu dönel kaplama cihazı	43
Şekil 3.21.	oc-ZnPc ince filminin kalınlığını ölçüldüğü PHE102 Elipsometre cihazı	43
Şekil 3.22.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun şematik gösterimi	44
Şekil 3.23.	Keitley 2400 Sourcemeter ve güneş similatörü	45
Şekil 3.24.	C-V Ölçümü Yapılan HP 4294A (40 Hz-110 MHz) İmpedans Analizörü	46
Şekil 4.1.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısının I-V grafiği	48
Şekil 4.2.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun $F(V)$ -V grafiği	50
Şekil 4.3.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotuna ait C-V grafiği	52
Şekil 4.4.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotuna ait $C^{-2} - V$ grafiği	53
Şekil 4.5.	Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun similatör altında ve karanlıkta $\ln I - V$ grafikleri	54

KISALTMA VE SİMGELER

θ	: Işığın geliş açısı
TE	: Termoyonik emisyon
UV	: Mor ötesi
V_{b0}	: Difüzyon potansiyeli
V_m	: Güneş pili için maksimum gerilim
V_n	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark
V_{oc}	: Açık devre gerilimi
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
A	: Diyotun etkin alanı
A^*	: Richardson sabiti
AC	: Alternatif akım
AM 1.5	: Hava kütlesi 1.5
C	: Kapasite
C-V	: Kapasite-gerilim
DC	: Doğru akım
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_{ph}	: Foton enerjisi
E_v	: Değerlik bandının tavanı
eV	: Elektron volt
ϵ_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	: Schottky engel yüksekliği
Φ_b (C-V)	: Kapasite gerilim ile ölçülen Schottky engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
h	: Planck sabiti
I-V	: Akım-gerilim

I_m	: Güneş pili için maksimum akım
I_0	: Ters beslem akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
IR	: Kızıl ötesi
ITO	: İndiyum kalay oksit
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
LED	: Işık yayan diyot
m_h^*	: Boşluğun etkin kütlesi
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
MS	: Metal yarıiletken kontak
MIS	: Metal-Yalıtkan-Yarıiletken kontak
n	: İdealite faktörü
n-Si	: n-tipi silisyum kristali
N_a	: Alıcı konsantrasyonu
N_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_d	: Verici konsantrasyonu
NiPc	: Nikel Ftalosiyanın
η	: Güneş pilinin verimi
p-Si	: p-tipi silisyum kristali
p++	: Aşırı katkılanmış p-tipi yarıiletken
Pc	: Ftalosiyanın
RF	: Radyo Frekansı
R_p	: Paralel direnç
R_s	: Seri direnç
S	: Güneş pilinin etkin alanı
T	: Mutlak sıcaklık
V_{diff}	: Difüzyon potansiyeli
ZnPc	: Çinko Ftalosiyanın

1. GİRİŞ

Metal-yarıiletken (MS=Metal-Semiconductor) kontaklar, bütün yarıiletken tabanlı devre elemanlarının oluşumunda yer aldıkları için büyük bir öneme sahiptirler. MS kontakların elektriksel özelliklerinden yeterince faydalanmak, uygun kontaklar hazırlayarak elektronik devre elemanlarının üretiminde kullanabilmek için karakteristiklerinin (elektronik, termal ve optik özelliklerinin) iyi bilinmesi gerekir (Rhoderick 1988). Üretilen bir devre elemanın istenilen performansta çalışabilmesi, devre yapısına ait bütün özelliklerinin bilinmesi ve doğabilecek olumsuzlukların giderilmesine bağlıdır. Bu nedenlerden dolayı, yarıiletken teknolojisinde, temel elektronik yapı elemanlarının (özellikle diyotların) fiziksel ve elektronik özelliklerini araştırmak büyük önem taşımaktadır (Rhoderick 1988, Sze 1981, Kılıçoğlu 1988, Bozkurt ve ark. 1997, Kaneto ve ark. 2001, Nozu ve ark. 1999).

Uzun zamandır, çeşitli yarıiletken elemanlarından üretilen metal-yarıiletken (MS) yapıların araştırılmasıyla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bazı araştırmalar, yeni yarıiletken malzemelerin hazırlanması yönünde yapılırken, bazı araştırmalar da, bu yarıiletkenlerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden faydalanılarak yeni metal-yarıiletken devre elemanları geliştirmesini amaçlar(Ocak 2010). Bu devre elemanları kullanılarak, lazer yazıcılar, fotokopi makineleri, gaz sensörleri, optik bilgi sistemleri (CD-ROM, DVD), güneş pilleri, LED uygulamaları ve nükleer santrallerde kontrol sistemleri gibi pek çok teknolojik aygıtlar geliştirilmiştir (El-Nahass ve ark. 2005).

Teknolojik önemlerinden dolayı, Schottky diyotların, elektriksel karakteristiklerinin doğasını anlamaya dair yapılan çalışmalar, her geçen gün artmaktadır. Schottky engel diyotlarda elektriksel iletkenlik, çoğunluk taşıyıcıları ile sağlandığından yüksek frekanslarda ve düşük düz beslemde çalışabilen diyotlardır. Bu yüzden p-n eklemli diyotlara göre daha avantajlıdır. Çünkü p-n eklemlerinde hem çoğunluk hem de azınlık taşıyıcılar akımı oluşturur. Schottky diyotlar, GHz mertebesinde anahtarlama hızına sahiptirler. Bu da Schottky engel diyotların optoelektronikte, telekomünikasyon alanında kullanılmasına sebep olmuştur. Ayrıca, bu yapılar birçok tümeleşik devre (integrated circuits) elemanının oluşturulmasında da kendilerine yer bulmaktadırlar (Aydın 2003).

Schottky diyotların elektriksel özellikleri çoğunlukla onların ara yüzey özellikleri ile belirlenir. Özel üretilmedikleri müddetçe metal-yarıiletken (MS) ara yüzeyinde oksit tabaka oluşur. Bu tabaka Schottky kontakları metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) yapıya çevirir ve diyot karakteristiğine kuvvetli etkisi vardır.

1977 yılında, ünlü fizikçiler Alan Heeger, Alan G. MacDiarmid ve Hideki Shirakawa'nın, polimerlerin elektriksel özellikleri üzerine yaptığı çalışmalar bilim camiası için devrim niteliğinde gelişmelere yol açmıştır. Bu çalışmalarından dolayı, 2000 yılında Nobel Kimya ödülüyle onurlandırılmışlardır (Heeger 1977). Bu çalışmalar, organik malzemelerin inorganik malzemeler yerine elektriksel ve optoelektronik aygıt yapımında kullanılabileceği fikrinin gelişmesine sebep olmuştur. Organik malzemelerin, düşük maliyetleri ve kolayca üretilebilir olmaları gibi avantajlarının yanı sıra, farklı amaçlar için farklı özelliklere sahip bileşiklerin sentezlenebilme ihtimali ve geniş alanlara uygulanabilirliği organik tabanlı elektronik ve optoelektronik aletlerin üretiminde, organik maddelere olan ilgiyi arttırmıştır (Ocak 2010). Ayrıca organik malzemelerin esnek yapıları, dokunmatik ekranlı bilgisayar ve cep telefonu teknolojisinin doğmasına neden olmuştur.

Metal kompleksler, koordinasyon bileşiği yapmış metaller ile etrafındaki ligantlardan oluşan organik bileşiklerdir. Barındırdıkları π - bağları sayesinde elektriksel iletkenlikleri oldukça yüksektir. Bunların kullanılması sonucu oluşturulan devre elemanları, pek çok bilim insanı tarafından araştırılmıştır. Özellikle ftalosiyanın türevlerinin ince filmlerinin elektrik ve optik özellikleri dikkat çekmektedir (Yakuphanoglu ve ark. 2007).

Metal katkılı ftalosiyanimler, 1930'lu yıllarda keşfedilmelerinden beri, plastik malzemelerin ve metal yüzeylerin renklendirilmesinde ve özellikle giyim sanayinde boyar madde, olarak yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Liu ve ark. 2004). Metal ftalosiyanimler sahip oldukları kimyasal ve termal özellikler sayesinde modern optoelektronik uygulamaların en önemli parçası olmaya adaydırlar (Tian ve ark. 2010). Son zamanlarda metal ftalosiyanimler fotokopi makinelerinde, fotodedektörlerde, organik transistörlerde, hassas gaz sensörlerinin yapımında ve esnek gaz sensörlerinde kullanılmalarıyla dikkatleri üzerlerine çekmeyi başarmışlardır (Haisch ve ark. 1997).

Bu tezde, π -bağları açısından zengin bir çinko fitalosiyanin türeviden olan ve oc-ZnPc olarak kısaca adlandırılan 2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine molekülü kullanılmıştır. Öncelikle laboratuvar ortamında hazırladığımız p-Si yarıiletkeni klasik metotlarla temizleyip mat yüzeyine saçtırma yöntemi kullanılarak, 200 nm kalınlığında Al ince filmi oluşturuldu. Daha sonra, 450 °C sıcaklığındaki fırında azot gazı ortamında 15 dakika süreyle tavlandı. Böylece aygıtın omik kontağı hazırlanmış oldu. Daha sonra steril bir ortamda p-Si nin parlak yüzeyine dönel kaplama cihazı kullanılarak 37 nm kalınlığında oc-ZnPc ince filmi oluşturuldu. Sonra da tekrar vakum cihazına yerleştirilen yapının üstüne Al buharlaştırılarak Al/oc-ZnPc/p-Si/Al aygıtı hazırlandı. Aygıtın karanlık ortamdaki akım-gerilim ($I-V$) grafiği çizilerek incelendi ve aygıtın doğrultucu özelliğe sahip olduğu gözlemlendi. $I-V$ dataları kullanılarak diyotun, idealite faktörü, engel yüksekliği, paralel direnci ve seri direnci hesaplandı. Bunun dışında Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun kapasite gerilim ($C-V$) ölçümleri yardımıyla elektriksel özellikleri incelendi ve elde edilen engel yüksekliği, $I-V$ datalarından elde edilen engel yüksekliğiyle karşılaştırıldı. Ayrıca, güneş similatörü altında yapılan $I-V$ ölçümleri incelendi.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Elektronik günümüzde telefon, bilgisayar, yazıcı, dvd, tv, radyo, telsiz, uydular, navigasyon, klima ve otomotiv sanayi gibi en temel ihtiyaçlarımızın karşılandığı bir bilim alanı olmuştur. Braun'un (1874), sülfat kristallerinde elektriksel iletkenliğinin asimetric olduğunu keşfetmesi, tüm bu teknolojik gelişmelerin temelini teşkil etmiştir. Braun'un bu keşfi MS kontaklarının başlangıcı sayılır. Daha sonra Pickard (1906), silisyum kullanarak metal-yarıiletken kantağına dayalı bir detektör patentini almıştır. Pierce (1907), metal teli yarıiletken yüzeye nokta kontak oluşturarak elde ettiği MS eklemının doğrultucu özelliklerini incelemiştir (Neamen 2003).

MS kontakların doğrultma özellikleriyle ilgili ilk çalışmayı, 1931 yılında başta Schottky olmak üzere, Störmer ve Waibel yapmıştır (Schottky 1931). Kuantum mekaniğini ilk olarak MS diyotlara uygulayan kişi Wilson olmuştur (Wilson 1932). Wilson yaptığı çalışmalarla kuantum mekaniksel tünellemeyi ve doğrultma için ters polariteyi bulmuştur.

1938 yılında Schottky ve Mott birbirlerinden bağımsız bir şekilde yaptıkları çalışmalarla doğrultma mekanizmasının elektronların potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişi ile açıklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Bu teoriye göre, oluşan potansiyel engelin nedeni metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki nicelik farkıdır. Bu modele göre potansiyel engelin büyüklüğü ise, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisinin farkı alınarak elde edilir (Rhoderic ve Ark. 1988).

Fakat, daha sonra yapılan çalışmalarda, Schottky engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonundan ziyade, metal ile yarıiletken kantağın hazırlanma yöntemlerine bağılı olduğu sonucuna varılmıştır. Çünkü, Schottky-Mott teorisi, ideal diyotlar için hazırlanmış bir teoriydi. Oysaki laboratuvar ortamında yapılan MS kontaklarda bir ara yüzey oluşması kaçınılmazdır. Bu ara yüzeyin elektronik özellikleri, diyotun karakteristiğini çok etkiler. Bu yüzden yeni açıklamalara ihtiyaç duyulmuş ve Bardeen yeni bir model geliştirerek, bu ihtiyacı karşılamıştır. Bardeen'e göre 'MS yüzeylerde yeterli sayıda yerel elektronik hallerin olması durumunda, potansiyel engel yüksekliği metalin iş fonksiyonundan bağımsız olur' (Bardeen 1947).

Bardeen'i destekleyen çalışmaların başında Rhoderick ve Card'ın yaptığı çalışmalar gelir. Bu bilim insanları, MS kontağın ara yüzey hal yoğunluğunu belirleyip, ara yüzey hal yoğunluğu ve arayüzey tabakasının *I-V* karakteristiklerinin, idealite faktörü üzerine etkilerini açıklamışlardır (Rhoderic ve Card 1971).

Mönch engel yüksekliğinin homojensizliğinden dolayı idealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin diyottan diyota, farklılık gösterebileceğini göstermiştir (Mönch 1987).

Daha sonra ideal ve ideal olmayan diyotlar için, Cheung ve Cheung tarafından, doğru beslem *I-V* grafikleri kullanılarak, Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç hesaplamak için farklı bir hesaplama yöntemi ileri sürüldü. Daha sonraları ise seri direncin yanı sıra, paralel direncin hesaplanması ile ilgili çalışmalar yapılmıştır (Cheung ve Cheung 1986).

Her ne kadar hassas deneyler yapılsa da, MS diyotlarında çok ince bir tabakanın oluşması kaçınılmazdır. Bu ara yüzey (yalıtkan) tabaka, diyot özelliklerine çok etkiler. Ve artık, diyotumuz MS değil MIS (Metal-insulator-semiconductor) diyotuna dönüşmüş olur. Bu ara tabakanın elektroniksel özellikleri, diyot karakteristiğine çok önemli etki eder. Ara yüzeylerin, Schottky diyotlarına etkilerini ilk olarak, Cowley ve Sze incelemişlerdir. Yaptıkları çalışmalarda ara yüzeyin kalınlığının, idealite faktörüne ve engel yüksekliğine nasıl etki ettiğini, doğru beslem *I-V* grafiğini inceleyerek açıklamaya çalışmışlardır (Cowley ve Sze 1965).

Tseng ve Wu (1987) ara yüzey durumlarının, Schottky kontaklarının elektriksel davranışlarını nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Tseng ve Wu yaptıkları çalışmalarda, ara yüzey hallerinin Schottky kontaklarının *I-V* ve *C-V* davranışı üzerine etkilerini inceleyip, bu karakteristiklerden, ara yüzey hallerinin enerji dağılımını ve ara yüzey hallerinin sığasını hesaplamışlardır. Onlardan bağımsız olarak, Rhoderick, Horvarth ve Card'da ara yüzey hallerinin diyot karakteristiğine etkilerini incelemişlerdir. Bunların dışında Rhoderick, Horvarth ve Card'ın yaptığı çalışmalar 'ara yüzey durum dağılımı ve ara yüzey tabaka kalınlığının' düz ve ters beslem *I-V* karakteristiğinden elde edilebileceğini göstermişlerdir (Crowell 1966).

Chattopadyay ve Daw MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) diyotlarının, *I-V* ve *C-V* karakteristiklerini, diyotların engel yüksekliğinin oksit kalınlığına bağlılığının,

Cowley ve Sze'nin engel yüksekliği modeline uyduğunu bulmuşlar. Ayrıca, ara yüzeyde oluşan oksit tabakasının kalınlığa göre, engel yüksekliğinin değişimini incelemişler (Chattopadyay 1995).

Türüt ve Sağlam Au-Sb /Al Schottky diyotlarının $I-V$ ve $C-V$ grafiklerindeki doğrusallıktan sapmaları, ara yüzey hallerinin artık sığası ile açıklanabileceğini, göstermişlerdir. Ayrıca, yine Türüt ve arkadaşları, Al/n-Si Schottky diyotlarında ideal olmayan, doğru beslem ve ters beslem $C-V$ karakteristiklerine ara yüzey hallerinin yük davranışının etkisini inceleyip, ters beslem karakteristikleri üzerine ara yüzey tabakası ve yükleriyle beraber inversiyon tabakası ve yüklerinin de etkisinin olduğunu göstermişlerdir (Türüt ve Sağlam 1992).

Kılıçoğlu ve Asubay Au/n-Si/AuSb ile oluşturdukları Schottky diyotlarda oksit tabakasının idealite faktörü, engel yüksekliği, ara yüzey durumları üzerine etkisini incelemişlerdir. Karataş ve Türüt Au/n-GaAs ile oluşturdukları Schottky diyotlarda ara yüzey dağılımlarını incelemişlerdir. Aydın ve arkadaşları, Pb/p-Si Schottky kontaklarda nötral bölgenin direncinin ara yüzey durumları hesabı üzerindeki önemini belirtmişlerdir. Çetinkara ve arkadaşları, Au/n-Si Schottky diyotlarında, kontakta önce yüzeyde oluşan doğal oksidin diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır (Kılıçoğlu ve Asubay 2005).

1977 yılında aralarında Heeger, Shirakawa ve MacDiarmid'in bulunduğu bir grup bilim adamının yaptığı çalışmalar polimerlerin iyot ile katkılanmasının polimerlerin iletkenliğini arttırdığı göstermesi ile, organik bileşiklerin iletkenlikleri üzerine olan ilgi artmıştır (Shirakawa ve ark. 1977). Daha sonra yapılan çalışmalar ile π (π) bağları açısından zengin ve konjugasyona sahip bileşiklerin, doğal yarıiletken olduğunun görülmesinin ardından, bu bileşiklerle elektriksel ve optik aygıtların üretimi üzerine yapılan çalışmalar hız kazanmıştır. Organik bileşikler kullanılarak, doğrultucu kontaklar, güneş pilleri, ışık yayan diyotlar (LED), Organik Işık Yayan Diyotlar (OLED) ve transistörler gibi bir çok elektriksel ve optik aygıt üretilmiştir. Yapılan bu çalışmalar, Heeger, Shirakawa ve MacDiarmid'a 2000 yılında Nobel ödülü kazandırmıştır.

El-Nahass ve arkadaşları NiPc/p-Si organik-inorganik heteroeklem elde etmiş ve bu yapının elektriksel ve fotoelektriksel özelliklerini incelemişlerdir. Elde edilen

NiPc/p-Si yapının doğrultucu özelliğe sahip olduğunu ve bu yapının doğrultma oranının 1750, seri direncinin 750Ω ve paralel direncinin $1,7 M\Omega$ olduğunu rapor etmişlerdir. Bu yapıya ait fotoelektriksel özellikler $6 mWcm^{-2}$ gücünde beyaz bir ışık altında ve oda sıcaklığında incelenmiş ve bu yapının açık devre geriliminin $0,32 V$, kısa devre akımının $186 \mu A$ ve veriminin % 1,11 olduğu görülmüştür (El-Nahass ve ark. 2005).

Yakuphanoglu, p-Si üzerine CuPc ince filmi oluşturmuş ve vakum ortamında p-Si/CuPc yapı üzerine Au buharlaştırarak, p-Si/CuPc yapının elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonunu yapmıştır. Aldığı ölçümler sonunda p-Si/CuPc yapının 2,38 idealite faktörü ve $0,71 eV$ engel yüksekliğine sahip olduğunu görmüştür. 3500 lüks ışık altında aldığı $I-V$ ölçümleri sonucunda, yapının $0,16 V$ açık devre potansiyeline ve $0,45 \mu A$ kısa devre akımına sahip olduğunu hesaplamış ve böylece yapının bir fotodiyot karakterizasyonuna sahip olduğunu göstermiştir (Yakuphanoglu ve ark. 2007).

Yakuphanoglu ve ark. p-Si/CoPc/Al yapılar elde etmiş ve bu yapıların elektriksel özellikleri ile, p-Si/Al MS diyotunun elektriksel özelliklerini karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada CoPc organik ara yüzeyin, Al/p-Si kontağın elektriksel özelliklerini önemli oranda modifiye ettiği ve bu yapının idealite faktörünün 1,33 engel yüksekliğinin $0,90 eV$ ve seri direncinin $314,5 k\Omega$ olduğunu hesaplamışlardır (Yakuphanoglu ve ark. 2008).

Ocak ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmada, metilen mavisini MS diyotunda ara yüzey tabakası olarak kullanmış ve bu diyotun $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerini almıştır. Sn/p-Si MS diyotunun yaptıkları hesaplamalarında, metilen mavisinin engel yüksekliğini ciddi oranda değiştirdiğini ve dolayısıyla diyot karakteristiğine çok etki ettiğini göstermişlerdir (Ocak ve ark. 2009).

Chen ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, CuPc (Bakır Fitalosiyenin) bileşiği kullanılarak hazırlanan diyotlar incelenmiştir. Morötesi ışık altında yapılan $I-V$ ölçümlerinde bu diyotların morötesi bölgede fotovoltaik karakter gösterdiğini rapor etmişlerdir. Bu diyotların $1,03\%$ verimliliğe sahip olduğunu hesaplamışlardır (Chen 2006).

Bu çalışmada kullanılan çinko ftalosiyenin farklı bileşenleride bulunmaktadır. Bu yüzden kullanılan bileşik kısaca oc-ZnPc şeklinde kodlandı. Bu çalışmanın amacı, π

bağları açısında zengin, $C_{96}H_{146}N_8O_8$ formülüyle gösterilen ve açık formülü 2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine olan çinko ftalosiyanın (oc-ZnPc) türevini kullanarak, Al/oc-ZnPc/p-Si yapısını hazırlamak ve bu yapının elektronik ve optik özelliklerini araştırmaktır. Bu amaçla, oc-ZnPc molekülünün ince filmi, dönel kaplama yöntemi kullanılarak, p-Si yarıiletkeni üzerine oluşturulmuş ve bu yapı üzerine Al buharlaştırılarak, Al/oc-ZnPc/p-Si yapısı elde edilmiştir. Yapılan *I-V* ölçümlerinde yapının doğrultma özelliğine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu diyotun, elektriksel özellikleri karanlıkta *I-V* ve *C-V* ölçümleri ile belirlenmiştir. Fotoelektriksel özellikleri ise AM1.5 filtre ile filtrelenmiş güneş similatörü kullanılarak 40-100 mW/cm^{-2} ışık altındaki *I-V* ölçümleri ile belirlenmiştir.

3. MATERİYAL ve YÖNTEM

Bu çalışmada organik inorganik hibrit bir yapı oluşturulup elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri incelendi. Bunun için π bağları açısından zengin ve konjugasyona sahip oc-ZnPc (Çinko ftalosiyanın) bileşiği Sigma-Aldrich firmasından temin edildi. Öncelikle , bu molekülün ince filmi, p-Si yarıiletkeni üzerinde oluşturuldu. Daha sonra, uygun şartlarda Al metali buharlaştırılarak metal-yalıtkan-yarıiletken (MIS) Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısı oluşturuldu. Elde edilen diyotun, elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri, akım-gerilim ($I-V$) ve kapasite-gerilim ($C-V$) grafikleri çizilerek incelendi.

Bu bölümde, metal-yarıiletken kontakların fiziksel özelliklerinden bahsedilecektir. Ayrıca, kontak noktasında meydana gelen elektriksel olaylar termiyonik emisyon teorisi kullanılarak anlatılmaya çalışılacaktır. Ayrıca oluşan MIS yapısının kapasite özellikleri ve ara yüzey durumları açıklanmaya çalışılacaktır. Ayrıca, diyotların optik bant aralığından bahsedilerek, bir diyotun fotovoltaik karakterizasyonunun, nasıl yapıldığı açıklanmaya çalışılacaktır.

Bu bölümün sonunda ise, yapılan deneyin tüm basamakları, hesaplanma metodları ve çizilen grafikler açıklanmaya çalışılacaktır.

3.1.Metal-Yarıiletken Kontaklar

Schottky diyotların, karakteristik parametrelerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan ve yarıiletken kristallerin iletkenlik özelliklerinin araştırılabilmesinin bir yolu da, kristale uygun kontakların uygulanabilmesidir. İyi bir kontak demek, kristal ile kristale uygulanacak olan kontak malzemesinin, en az dirençle temas ettirmektir. Kontakın ideal olması, kontak malzemelerinin yüzeylerinin temiz ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Kontak haline getirilen maddeler arasında, elektrokimyasal potansiyelleri aynı düzeye gelinceye kadar bir yük alışverişi olur. Metal-yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına (Φ_m ; metalin iş fonksiyonu, Φ_s ; yarıiletkenin iş fonksiyonu) bağlı olarak, omik ve doğrultucu kontak (Schottky kontak) olmak üzere iki kısımda incelenir. p-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m < \Phi_s$ ise, doğrultucu kontak, eğer $\Phi_m > \Phi_s$ ise, omik kontak oluşur.

n- tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda ise omik kontak oluşur.

3.1.1. Metal p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Bir metal, bir yarıiletken ile kontak haline getirildiğinde, bu iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı söz konusu olur. Yük dağılımı, her iki maddenin Fermi seviyeleri (elektrokimyasal enerji) aynı düzeye gelinceye kadar devam eder. Böylece denge durumuna ulaşılmış olur. Bir metal yarıiletken kontakta, yük taşıyıcıları (boşluk ve elektronlar) bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa, bu bir doğrultucu kontakta. Dolayısıyla doğrultucu kontakta, bir doğrultudaki akım diğer doğrultuya göre daha kolay geçer.

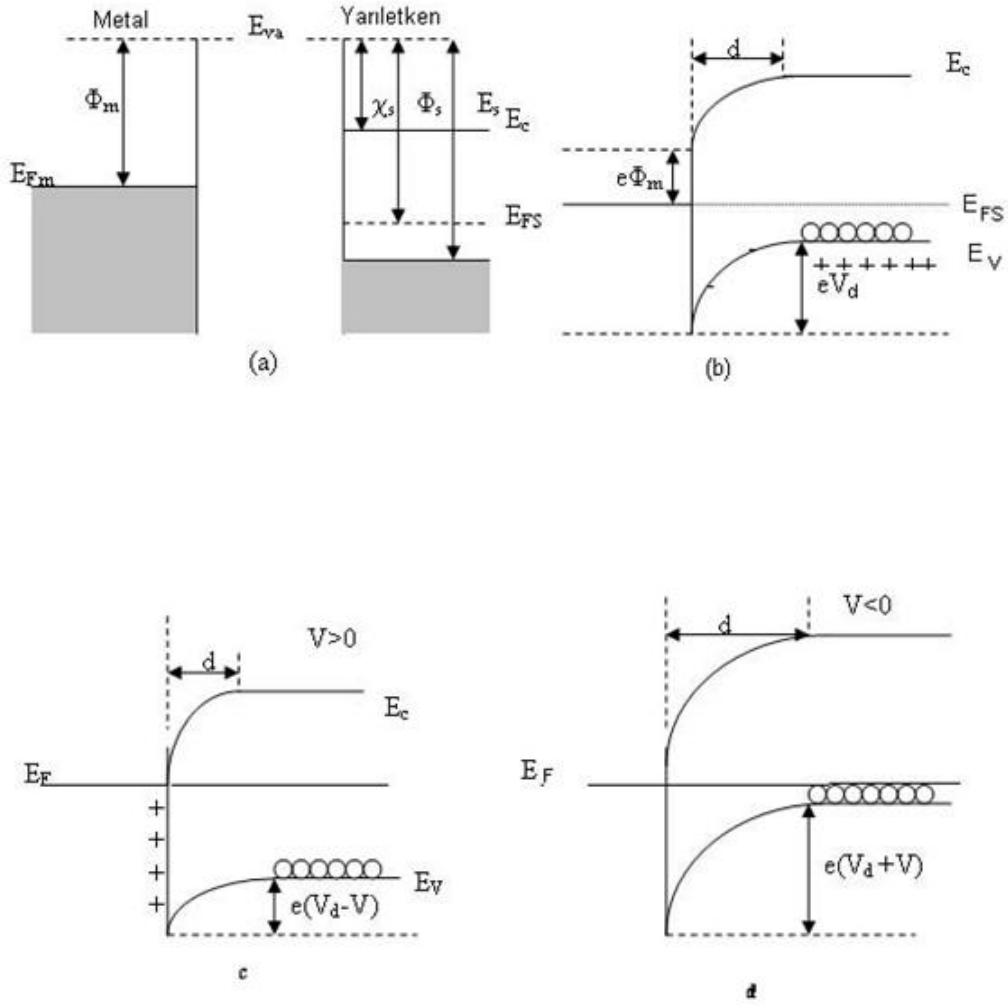
Kontaktan önce (Şekil 3.1a), metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramı verilmiştir. Kontak yapıldıktan sonra, voltaj uygulanmamışsa enerji bant diyagramı şekildeki (Şekil 3.1b) gibi olur. Kontak yapıp düz beslem uygulanırsa ($V > 0$) enerji bant yapısı şekildeki (Şekil 3.1c) gibi olur. Kontak yapıp ters beslem uygulanırsa ($V < 0$) enerji bant yapısı şekildeki (Şekil 3.1d) gibi olur.

Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontaktan sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar, metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir. Bunun neticesinde, yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler, d kalınlığındaki bir uzay yük tabakası içerisinde dağılır. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeler $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli:

$$eV_{diff} = \phi_s - \phi_m \quad (3.1)$$

olur. Burada V_{diff} , difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği:

$$e\phi_b = E_s - \Phi_m \quad (3.2)$$



Şekil 3.1 Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu diyotun enerji bant diyagramları. **a)** kontak öncesi enerji bant yapıları. **b)** kontak yapıldıktan sonraki enerji bant yapısı. **c)** düz belsem uygulanan kontakın enerji bant yapısı ($V > 0$). **d)** ters belsem uygulanan kontakın enerji bant yapısı ($V < 0$).

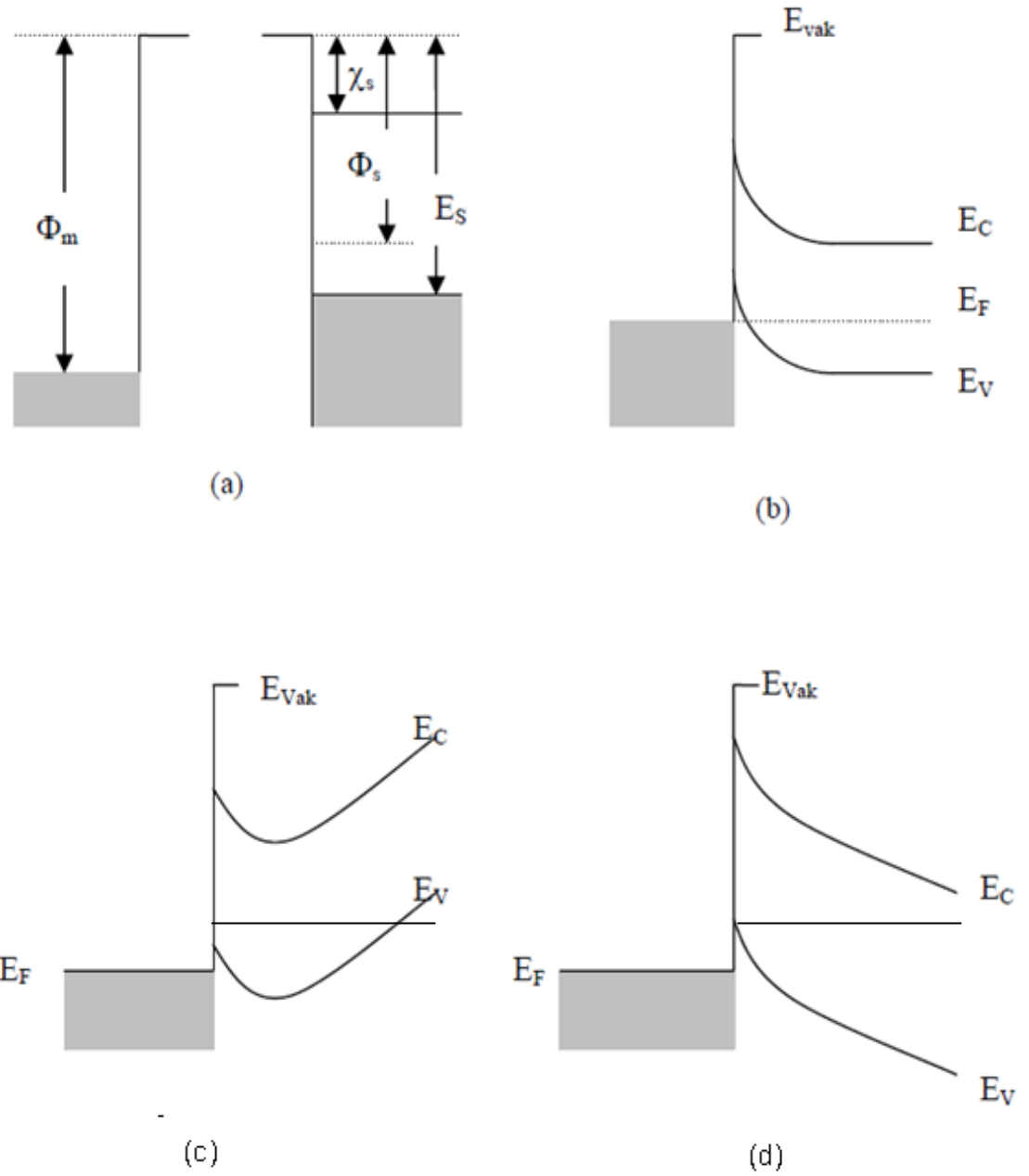
Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı boşluklar potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp, metalin içine geçebilir. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı boşluklar da, engeli aşacak kadar enerji kazanıp, yarıiletken içine geçebilirler. Böylece, kontakta engelden geçen zıt yönlü iki I_0 akım oluşur. Eğer yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.1b), soldan sağa akan boşluk akımı değişmez, fakat sağdan sola akan boşluk akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola (yarıiletkenden metale) geçen boşluklar için engel yüksekliği eV kadar azalır. Sonuç olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale doğru geçen boşlukların oluşturduğu akım) pozitif kabul edilse, karakteristik akım;

$$I = I_0 \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{kT} \right] - 1 \quad (3.3)$$

ifadesiyle bulunur. Bu ifadede $eV \gg 3kT$ olursa 1 sayısı ihmal edilebilir. Bu ifade doğrultucu kontağın akım denklemdir. Bu denklemde I_0 doyma akımı, V uygulanan potansiyel, k Boltzmann sabiti, R_s seri direnç ve T Kelvin cinsinden sıcaklık ifadesidir.

3.1.2. Metal p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

$\Phi_m > \Phi_s$ durumunu dikkate alalım. Şekil 3.2a' da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra bir yük alışverişi olacaktır. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (boşluklardan dolayı) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yükünü oluşturarak metal tarafına akarlar. Buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.2b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer. Boşluk konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi, boşlukların yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen boşluklar, (yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı) hemen nötralize olurlar. Ters belsem ($V < 0$) durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan boşluklar da kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Böyle her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinirler.



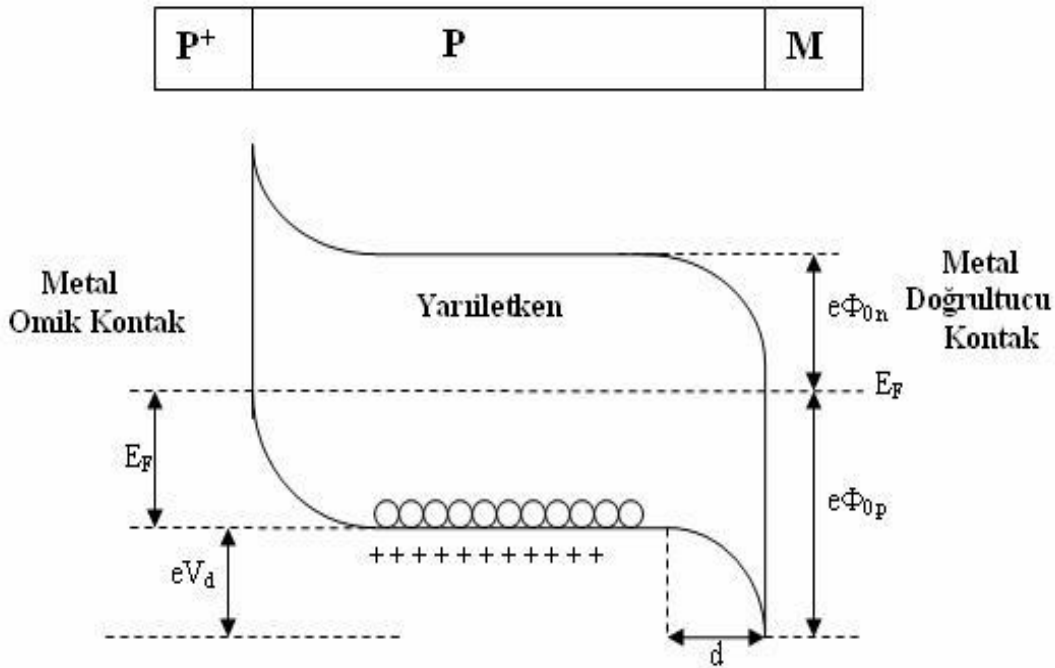
Şekil 3.2. Metal /p-tipi Yarıiletken Omik Kontaklar. **a)**Kontaktan önceki enerji bantları. **b)**Kontaktan sonraki sıfır beslem ($V=0$) durumundaki enerji bantları. **c)**Kontaktan sonraki düz beslem ($V>0$) durumundaki enerji bantları. **d)**Kontaktan sonraki ters beslem ($V<0$) durumundaki enerji bantları.

3.1.3. Metal / p-Tipi Yarıiletken / Metal Yapısı

Metal p-tipi yarıiletken metal (P^+PM) yapısı, p-tipi yarıiletkenin bir yüzeyine boşluk bakımından çok zengin P^+P omik kontağı ile, diğer yüzeyine uygulanan PM doğrultucu kontağından meydana gelir. Termal dengede, böyle bir yapının enerji bant diyagramı Şekil-3.3 de görülmektedir. P^+ omik kontak tarafına, $V>0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. P^+ tarafına $V<0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı ters beslemde olur. P^+PM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı kısaca yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 3.3' de görüldüğü gibi boşluklar için engel yüksekliği (Φ_{po}):

$$e\Phi_{po} = eV_d + E_F \quad (3.4)$$

ifadesinden bulunur.



Şekil 3.3 P^+PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji bant diyagramı

3.1.4. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler

İdeal bir metal yarıiletken kontakta engel yüksekliği ile verilir.

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \quad (3.5)$$

Bu ifadede

Φ_m =kontak metalin iş fonksiyonu,

χ_s = yarıiletkenin elektron yatkınlığıdır. (iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı).

Bazı etkiler, (3.5) eşitliği ile verilen Schottky engel yüksekliğinde, sapma meydana getirebilir. Bunlardan birisi, katotta emisyon akımının, artan alan kuvvetiyle artmasıdır. Bu etki, Schottky etkisi olarak bilinir ve katodun iş fonksiyonunun, yüzey alan kuvvetine bağlı olduğunu ifade eder. Metalden x uzaklığında, dielektrikteki bir elektron, elektrik alanı oluşturacaktır. Alan çizgileri, metal yüzeyine dik ve metal yüzeyinden içeriye doğru x mesafede lokalize olan $+e$ imaj yükü ile aynı olacaktır. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen kuvvete de imaj kuvveti denir ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi(2x)^2\epsilon_s} = -eE \quad (3.6)$$

denklemleri ifade edilir. Bu denklemlerden yola çıkarak potansiyel için aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$-\Phi(x) = + \int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi(2x)^2\epsilon_s} dx = \frac{-e}{16\pi x \epsilon_s} \quad (3.7)$$

olarak bulunabilir. Burada x , integral değişkeni ve $x = \infty$ için potansiyeli sıfır kabul ettik. Dış elektrik alan sıfır iken, potansiyel (3.7) ifadesiyle verilmiştir. Eğer dış alan sıfırdan farklı ise, o zaman ilave bir terim gelir ve (3.7) ifadesi şöyle olur:

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi x \epsilon_s} - E \cdot x \quad (3.8)$$

(3.8) eşitliği x ' in küçük değerleri için geçerliliğini kaybeder ve x sıfıra giderken $\Phi(x) \rightarrow \infty$ 'a yaklaşır. Eşitlikteki ikinci terim dış alandan dolayı potansiyel engelindeki düşme miktarını ifade eder. Potansiyel engelinin bu düşmesi, Schottky

etkisi ya da imaj kuvvet etkisiyle düşmesidir. Schottky engel düşmesini $\Delta\Phi$,

$$\frac{d[e\phi(x)]}{dx} = 0 \quad (3.9)$$

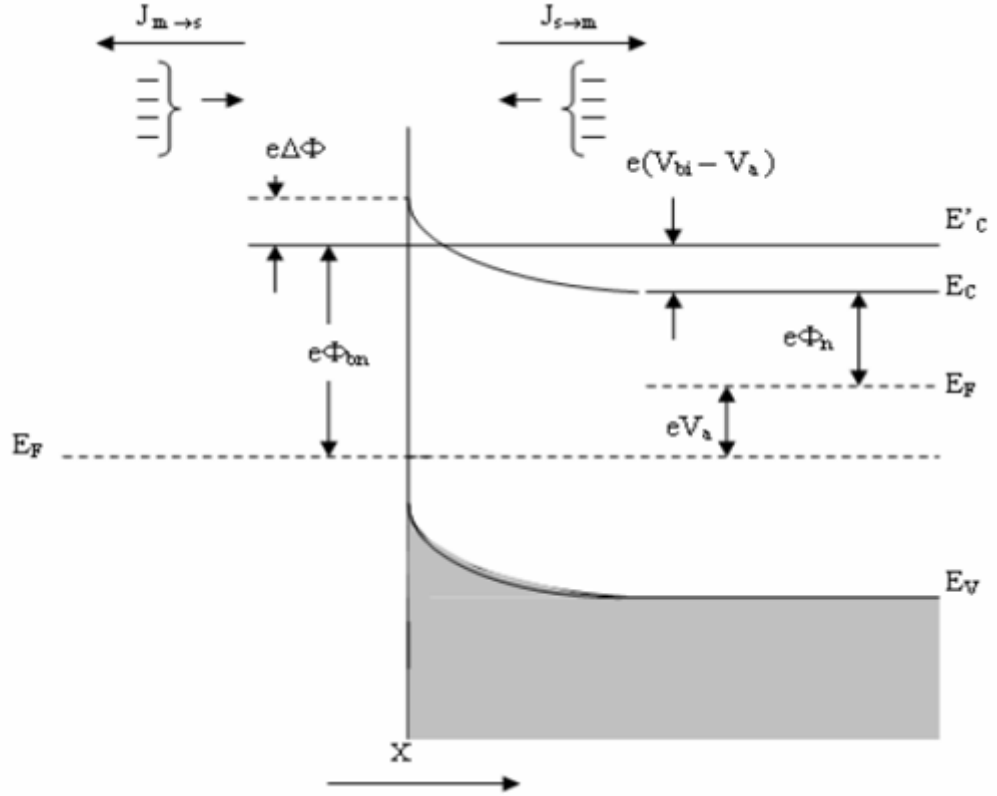
şartından maksimum engelin konumu, X_m ' i şu şekilde elde ederiz.

$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi\epsilon_0\epsilon_s}} \quad (3.10)$$

3.1.5.Schottky Diyotlarda Termoyonik Emisyonla Akım İletimi

Schottky kontaklarda, bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi, termoyonik alan emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı, termoyonik emisyon olarak bilinir. Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda termoyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir.

Schottky diyotlarda akım, çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise, boşluklar akımı sağlar. Termoyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell-Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve arınma bölgesindeki taşıyıcı çarpışmaların çok küçük olduğu kabul edilmektedir.



Şekil 3.4. Düz beslemde Metal Yarıiletken Schottky kontaklarda imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı

Şekil 3.4 'de V_a büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Bu nedenle,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} v_x dn \quad (3.11)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerji, v_x sürüklenme yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyonu,

$$J = [A^* T^2 \exp(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT})] \exp(\frac{eV_a}{kT} - 1) \quad (3.12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada A^* ifadesi termiyonik emisyonda etkin Richardson sabiti olup

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (3.13)$$

ile verilir. Genel durum için (3.13) ifadesi

$$J = J_0[\exp(\frac{eV_a}{kT}) - 1] \quad (3.14)$$

olarak yazılabilir. Burada, J_0 ters doyma akım yoğunluğu olarak bilinir ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT}) \quad (3.15)$$

şeklinde ifade edilir. Φ_{bn} Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\Phi_{bn} = \Phi_{bo} - \Delta\Phi$ şekline verildiği dikkate alınarak (3.15) ifadesi yeniden

$$J_0 = A^* T^2 \exp(\frac{-e(\Phi_{bo})}{kT}) \exp[\frac{e(\Delta\Phi)}{kT}] \quad (3.16)$$

şeklinde yazılır. Engel yüksekliğindeki $\Delta\Phi$ değişimi, artan elektrik alanla ya da artan ters beslem gerilimi ile artacaktır. Denklem 3.14 ü I akım ifadesi olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$I = I_0[\exp(\frac{eV}{kT}) - 1] \quad (3.17)$$

Bu denklem, ideal diyotlar için geçerlidir. İdeal faktörü n olmak üzere, bu denklemi şöyle yazarak genelleştirebiliriz.

$$I = I_0[\exp(\frac{eV}{nkT}) - 1] \quad (3.18)$$

Bir diyotun seri direncine R_s dersek, denklemi nihayet olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$I = I_0[\exp(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}) - 1] \quad (3.19)$$

3.1.6. Norde Fonksiyonları Yardımı ile Schottky Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

İdeal Schottky bariyer diyonu için akım gerilim karakteristiği, denklem 3.17'de ve doyma akımı ifadesi de denklem 3.15 ile daha önce verilmişti. Eğer diyotun seri direnci esas alınırsa farklılıklar ortaya çıkar. Grafiğin doğru kısmı, $kT/e \ll V \ll IR$ aralığını verecektir. Direnç çok büyük olduğunda, doyma akımının güvenilir değeri çok küçük olacaktır. Ayrıca gerilimin büyük olduğu yerde, bu aralık kullanılırsa, diyotun rekombinasyon akımı, total akımın, önemli bir parçası olabilir. Extrapole etmek I_s değerini daha az güvenilir yapar.

Seri direnç ile bu problem birçok durumda $F(V)$ fonksiyonunun grafiği kullanılarak çözümlenebilir.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{A_d A^* T^2}\right) \quad (3.20)$$

Bu denklemde A_d ifadesi diyodun etkin alanıdır. Diyot için seri direnç R_s , akım denklemi (3.19) ile verilmiştir. Bu denklemde $V_d > kT/e$ kabul edip gerekli işlemleri yaparsak (3.20) ifadesi,

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{1}{2}V \dots \quad (3.21)$$

yazılabilir. İdeal durum için $R_s=0$, $F(V)$ düz bir çizgiyi verir ve eğimi 0,5'dir. $F(V)$

eksenini kestiği nokta Φ_b 'yi verir. Diğer bir deyişle sadece bir direnç için elde edersek

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{R A_d A^* T^2}\right) \quad (3.22)$$

denklemi ile ifade edilebilir.

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \quad (3.23)$$

Yüksek gerilimler için eğim = +0,5 ile düz bir çizgiye yaklaşacaktır. İdeal durum için $F(V)$ düşük akım değerleri ve yaklaşık $F(V)$ büyük akım değerleri arasındadır. Bazı yerlerde iki $F(V)$ doğrusu minimuma sahip olur. Denklem 3.19'un diferansiyeli alınırsa

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_d}\right)\right]^{-1} \quad (3.24)$$

Buradan da

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d} [I_s \exp(\beta V_d)] = \beta I \quad (3.25)$$

ve

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.26)$$

$dF/dV=0$ yerine yazılırsa $F(V)$ 'nin minimum değerinde, I_0 akımı elde edilecektir.

Buradan da,

$$I_0 = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{eR} \quad (3.27)$$

elde edilir.

$$V_0 = I_0 R_s + V_d(I_0) = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_0}{A_d A^* T^2}\right) \quad (3.28)$$

yazılır ve $F(V)$ ' nin minimum değerinden

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I_0}{A_d A^* T^2}\right) \quad (3.29)$$

I_0 , V_0 ve $F(V_0)$ ' in ölçülen değerleri kullanılarak,

$$R_s = \frac{kT}{eI_0} \quad (3.30)$$

ve

$$\Phi_b = F(V_d) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{e} \quad (3.31)$$

elde edilir.

Norde'nin kullandığı bu metot, ideal durumlar ve seri direncin küçük olduğu durumlar için geçerli olup; Bohlin ideal olmayan durumlar için genelleştirilmiş Norde metodunu kullanarak seri direnç ve n değerlerinin hesaplanabileceğini göstermiştir (Bohlin 1986).

Denklem 3.19 ile daha önce verilen akım gerilim karakteristiğini göz önüne alarak, seri bir $F(V)$ fonksiyonu yazılabilir.

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{I}{A_d A^* T^2}\right) \quad (3.32)$$

Burada γ , n ' den büyük keyfi bir sabittir. Denklem (3.29) ile (3.30) birleştirilirse

$$F(V, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\eta}\right)V + \Phi_b + \frac{IR_s}{\eta} \quad (3.33)$$

elde edilir. İdeal bir diyot için seri direnç sıfır $F(V, \gamma)$ fonksiyonu düz bir doğru, eğimi $(n-\gamma)/\gamma n$ olacaktır. Diğer bir deyişle sadece bir direnç varsa fonksiyon

$$F(V, \gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{V}{R_s A_d A^* T^2}\right) \quad (3.34)$$

olacaktır.

Bu fonksiyon gerilimin büyük değerleri için I/γ eğimi ile düz çizgiye yaklaşacaktır. γ sabiti n ' den büyük olduğu sürece fonksiyon minimuma sahip olacaktır. Denklem 3.33'ün gerilime bağlı diferansiyeli alınırsa,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\eta} + \frac{R_s}{\eta} \left(\frac{dI}{dV} \right) \quad (3.35)$$

ve denklem 3.35' den

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta I}{\eta} - \frac{\beta R_s I}{\eta} \left[\frac{dI}{dV} \right] \quad (3.36)$$

Denklem 3.35 ve 3.36 birleştirilirse

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\beta I}{\eta}}{1 + \frac{\beta R_s I}{\eta}} \quad (3.37)$$

Denklem 3.35 ve 3.37 birleştirilse,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\eta - \gamma + \beta R_s I}{\gamma(\eta + \beta R_s I)} \quad (3.38)$$

$dF/dV=0$ minimum değerinde

$$I_0 = \frac{\gamma - \eta}{\beta R_s} \quad (3.39)$$

Denklem 3.34 ve 3.39 kullanılarak

$$F(V_0, \gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\eta} \right) V_0 + \Phi_b + \frac{\gamma - \eta}{\beta \eta} \quad (3.40)$$

Burada I_0 ve V_0 değerleri minimumda benzeşirler. Sonuç olarak;

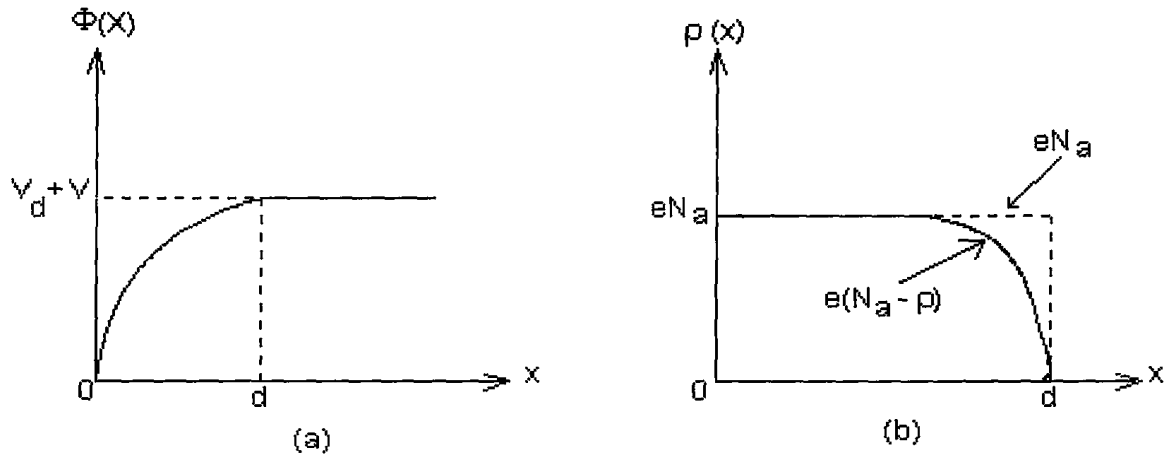
$$\Phi_b = F(V_0, \gamma) + \left(\frac{1}{\eta} - \frac{1}{\gamma} \right) V_0 - \left(\frac{\gamma - \eta}{\beta \eta} \right) \quad (3.41)$$

$$R = \frac{\gamma - \eta}{\beta I_0} \quad (3.42)$$

elde edilir.

3.1.7. Metal-Yarıiletken Schottky Diyotlarda Schottky kapasitesi

Metal-yarıiletken kontak yapılarında, arınma bölgesi (dipol tabakası), yarıiletken tarafındaki uzay yükleri ve metal tarafındaki yüzey yükleriyle bir kondansatör gibi davranır. Ters belsem durumunda, gerilim arttırıldığında arınma bölgesinin genişliği artar. Yarıiletkende, metale yakın bölümde, bir boşluk yoğunluğu varsa, yeni Fermi seviyesi metaldeki Fermi seviyesi ile çakışacağından boşluk yoğunluğu düşecektir.



Şekil.3.5 Metal p-tipi yapılarda doğrultucu kontağın (a) potansiyel dağılımı ve (b) yük dağılımı

Schottky bölgesinin kapasitesi, bu yük değişiminden dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılabilirler. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyotun engel tabakasındaki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi}{dx^2} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.43)$$

şeklinde ifade edilebilir (Ziel, 1968). Burada ϵ_s yarıiletkenin, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, $\rho(x)$ konuma bağlı uzay yükü yoğunluğudur. Uzay yükü yoğunluğu,

$$\rho(x) = e(N_a + N_d) \quad (3.44)$$

olarak yazılabilir (Rhoderick and Williams 1988). Burada N_d , yarıiletkenin donör yoğunluğu, N_a , yarıiletkenin akseptör yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu, $\rho(x)$ nun konumuna göre değişimleri yukarıdaki şekil.3.5'te gösterilmiştir.

Engel tabakasının difüzyon potansiyelini V_D ve kontağa uygulanan potansiyeli V temsil etsin. $e(V_D - V) \gg kT$ olduğundan $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda, Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmi olarak bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için $N_a \gg N_d$ olduğundan uzay yük yoğunluğu için

$$\rho(x) \cong eN_a \quad (3.45)$$

olarak yazılabilir. (3.43) ve (3.45) eşitliklerinden,

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = -\frac{qN_a}{\varepsilon_s\varepsilon_o} \quad (3.46)$$

elde edilebilir. Bu son denklemin çözümü şu sınır değerleri için yapılmalıdır.

- 1) $x=0$ için $\Psi(x)=0$
- 2) $x \geq d$ için $\Psi(x)=V_d+V$
- 3) $x=d$ için $\frac{d\Psi(x)}{dx}=0$

denklem 3.46 için, üçüncü sınır şartı göz önünde bulundurularak, integral alınır

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{dx} = -\frac{eN_a}{\varepsilon_s\varepsilon_o}(x-d) \quad (3.47)$$

bu eşitlikte birinci sınır şartı dikkate alınarak integral alınır,

$$\Psi(x) = -\frac{eN_a}{\varepsilon_s\varepsilon_o}\left(\frac{1}{2}x^2 - xd\right) \quad (3.48)$$

elde edilir. Bu son denklemin ikinci sınır şartı için çözümü yapılır,

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_o}{eN_a}(V_d + v)\right]^{1/2} \quad (3.49)$$

bulunur. Bu bulunan ifade Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V>0$ için, kontak doğru ve $V<0$ için kontak ters belsemedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu

$$Q = -eN_a \cdot d \quad (3.50)$$

ile verilir. (3.49) ve (3.50) denklemlerinden,

$$Q = -[2\varepsilon_s\varepsilon_o eN_a(V_d + v)]^{1/2} \quad (3.51)$$

eşitliği elde edilir. Schottky kapasitesi, (3.51) eşitliğine sahip Q yükünün, uygulanan voltaja göre değişimi olarak tanımlanır. Dolayısı ile kapasite,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial v} \quad (3.52)$$

olarak yazılıp, (3.51) ve (3.52) eşitliklerinden

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s\varepsilon_o eN_a}{2(V_d+V)}\right]^{1/2} \quad (3.53)$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_o}{d} \quad (3.54)$$

olarak bulunabilir. Görülüyor ki arınma bölgesi kapasitesi, uygulama voltajı ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır.

3.2. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

Işık düşürülen kristal bir katıda yansıma, soğurma, kırılma ve geçme gibi optik olaylar gerçekleşir (Soylu, 2006). Yarıiletkenlerin optik özelliklerinin incelenmesi ile bant yapıları ve malzeme içerisindeki elektronların ve hollerin davranışları ile ilgili bilgiler elde edilebilir.

Herhangi bir ortam üzerine, değişik frekanslardan oluşan bir ışın demeti gönderildiğinde, ortamı meydana getiren atomlar, bu frekanslar arasında uygun enerjili Olan fotonları soğurarak, daha yüksek enerji seviyelerine geçiş yaparlar. Soğurma, elektromanyetik dalga ile malzemedeki yüklerin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji kaybı olarak bilinir. Gelen ışığın dalga boyuna göre optik soğurma değişmektedir. Gelen fotonun enerjisi enerji bant aralığından daha büyük ya da eşit ise fotonlar soğurulurken, enerji bant aralığından daha küçük ise fotonlar soğurulmadan direk geçerler. Bu soğurma özelliklerinden yapılan ölçümler, soğurma spektrometresinin temelini oluşturur. Soğurma ölçümleri geniş bir dalga boyu aralığında yapılırsa, ortamdaki geçen ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasındaki bağıntı soğurma spektrumunu verir (Ketenci 2010).

Her bir malzemenin yayınladığı ışınların dalga boyları birbirinden farklıdır. Benzer bir şekilde, her malzemenin soğuracağı dalga boyları da diğer malzemelerinkinden farklı olacaktır. Buradan yola çıkılarak soğurma spektrumları çizilen bir yarıiletkenin bant yapısı incelenip, yasak enerji aralığı belirlenebilir. Ayrıca elde edilen soğurma spektrumu yardımı ile bir takım teorik hesaplamalar ile geçirgenlik, kırılma indisi, soğurma katsayısı, yansıtırlık, dielektrik sabiti gibi bazı optik parametrelere de ulaşılabilir.

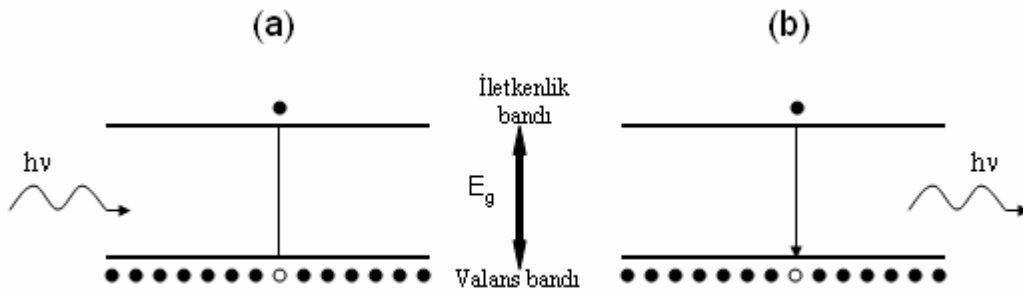
Bir yarıiletken malzemenin bant yapısını araştırmak için kullanılacak en uygun yöntem, o malzemenin optiksel soğurma spektrumunu incelemektir. Soğurma işleminde, bilinen enerjili bir foton yarıiletken içerisindeki bir elektrona düşük enerji seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. Dolayısıyla gelen bir ışık önüne yerleştirilen yarıiletken malzemedeki geçen ışığın şiddeti, dalga boyunun bir fonksiyonu olarak incelenebilir. Bu sayede malzemedeki elektron geçişleri ve izinli elektronik

enerji seviyelerinin dağılımları hakkında bilgi edinilebilir. Bir yarıiletkenin optiksel soğurma katsayısı, direkt olarak optiksel geçirgenlik bilgilerinden hesaplanabilir (Ketenci 2010).

3.2.1. Yarıiletkenlerde Soğurma Olayları

Bir yarıiletkende, valans bandındaki bir elektron optik yolla uyarılarak yasak enerji aralığını geçebilir. Bu işlem şekil 3.6 (a)'da şematik olarak gösterilmiştir. Bu olayda gelen fotonun enerjisi tamamen elektrona aktarılır. Yeterli enerjiyi alan elektron iletim bandına çıkar ve valans bandında bir boşluk oluşur. Bu olay meydana geldiğinde, fotonun malzeme tarafından tamamen soğurulduğu söylenir. Buradaki ana şart olaya sebebiyet veren fotonun enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerjisine eşit ya da daha büyük olmasıdır. Tersine olan süreçte ise, bir iletim elektronu bir boşlukla birleşerek enerjisi $h\nu$ olan bir foton üretir. Bu durum şekil 3.6 (b)'de gösterilmektedir. Bu işlem de ışık yayan diyotların (LED) ve yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur (Turton, 2005).

Bir yarıiletken üzerine ışık düştüğünde farklı etkiler meydana gelebilir. Bu durumda bir elektron farklı geçiş mekanizmaları sergileyebilir. Meydana gelebilecek mümkün geçişler; bantlar arasında, safsızlıklarla bantlar arasında ve bir banttaki serbest taşıyıcılarla olabilir.



Şekil 3.6. (a) Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması.

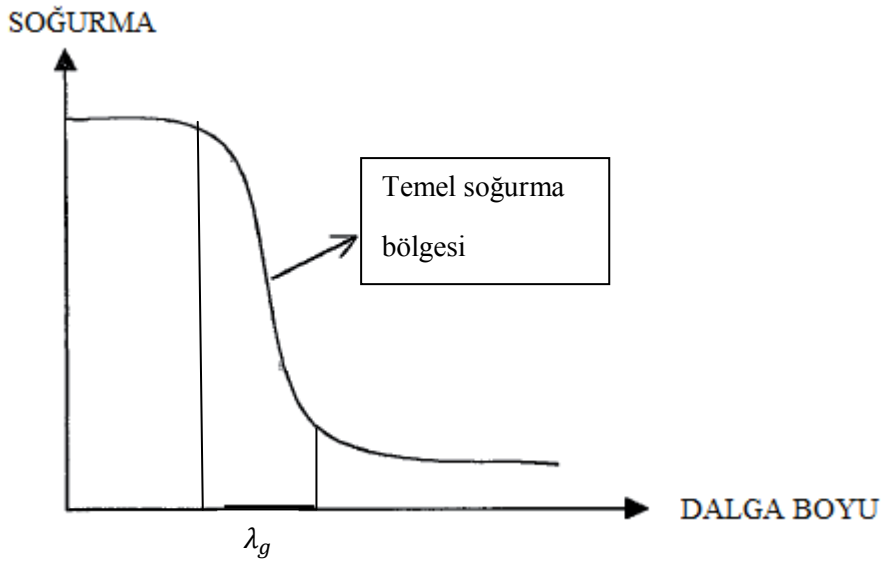
(b) Uyarılmış elektronun valans bantta geçerken bir foton yayınlanması.

Temel soğurma olayı bir elektronun valans bandından iletim bandına uyarılması halindeki geçişi ifade eder. Şekil 3.7'de görüldüğü gibi, bu soğurma olayı kendisini soğurma spektrumunda hızlı bir artış ile gösterir ve bu bölge temel soğurma bölgesi olarak bilinir. Bu durumda temel soğurma bölgesi yarıiletken bir malzemenin enerji aralığını belirlemek için kullanılabilir. Temel soğurma; yarıiletken üzerine gelen bir

fotonun valans bandında bulunan bir elektron tarafından soğurulmasıyla elektronun iletim bandına geçmesi olayıdır. Bu olay valans ve iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığının büyüklüğünü hesaplamamıza yardımcı eder. İletim bandı ile valans bandı aralığı E_g olan bir yarıiletkende, foton enerjisi $h\nu$ en az E_g 'ye eşit olduğunda gerçekleşir ve;

$$h\nu = E_g \text{ veya } \lambda_g = hc/E_g \quad (3.55)$$

ile verilir. Burada ν ve λ_g sırası ile enerjisi E_g olan fotonun frekansı ve dalga boyu, h Planck sabiti ve c de ışık hızıdır. Bir yarıiletkenin soğurma spektrumunda λ_g değeri temel soğurma bölgesine düşer. Yarıiletken malzeme kısa dalga boylarında kuvvetli bir soğurucu ve uzun dalga boylarında ise geçirgen olur. Bu iki bölgeyi ayıran sınır ise temel soğurma bölgesidir (Akyüz, 2000).



Şekil 3.7. Yarıiletkenlerde temel soğurma spektrumu (Akyüz, 2000).

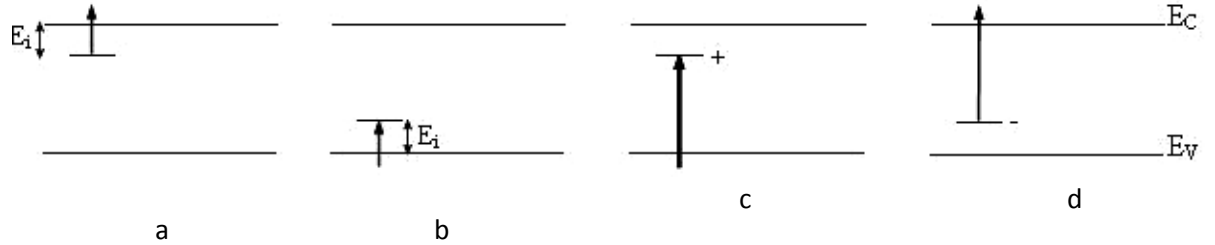
Temel soğurma bölgesinde direkt ve dolaylı olmak üzere iki çeşit geçiş olabilir. Her iki geçişte de elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler, ancak geçişte kullanılan yollar farklıdır. Bir yarıiletken malzemede foton soğurulması işlemi elektronun momentum korunumu sağlanmalıdır. Direkt geçişlerde, elektron valans bandından iletim bandına momentumunda bir değişiklik olmadan geçer. Bu tip geçişler için α ile foton enerjisi $h\nu$ ve enerji aralığı E_g arasındaki bağıntı;

$$n_0 \alpha h\nu = (h\nu - E_g)^m \quad (n_0 = 1) \quad (3.56)$$

ifadesi ile verilir (Omar, 1975).

Burada n_0 kırılma indisi, m izinli direkt geçişler için $1/2$ ve izinsiz direkt geçişler için $3/2$ değerini alan bir sabittir. Dolaylı geçişlerde ise elektronun hem enerjisinde hem de momentumunda bir değişim olur. Foton, momentumunda bir değişim sağlayamayacağı için iki adımlı bir işleme ihtiyaç duyulur.

Momentum korunumu bir fonon etkileşmesi ile sağlanır. Ayrıca Şekil 3.8’de görüldüğü gibi, yarıiletkenlerde safsızlıklar ve bantlar arasında da geçişler olabilir. Şekil 3.8 (a) ve (b)’de gösterilen geçişler, düşük enerjili bir fotonun soğurulması ile gerçekleşebilir. Bu tip bir soğurma işlemi için fotonun enerjisi en az safsızlığın iyonizasyon enerjisine (E_i) eşit olmalıdır. Bir safsızlık ile bant arasındaki geçiş kendisini soğurma kenarında, bant aralığından küçük bir enerjide bir omuz şeklinde gösterir. Bu tip geçişler için soğurma katsayısı temel soğurmada daha küçük bir aralığı kapsar. Çünkü safsızlık seviyelerinin yoğunluğu bantlardaki durum yoğunluğundan çok daha azdır. Pratikte sıg safsızlıklar soğurmada nadiren fark edilir. Bunun nedeni bant sarkmalarını içeren geçişlerin baskınlığıdır. Ancak derin seviyelerde safsızlık seviyesi soğurma kenarıyla kıyaslanabilecek kadar arttığında, safsızlıklar soğurma spektrumunda belirli bir omuz olarak görülebilir (Ketenci 2010).



Şekil 3.8. Safsızlıklar ve bantlar arasındaki geçişler. (a) donör-iletim bandı (b) valans bandı-akseptör (c) valans bandı-donör (d) akseptör-iletim bandı.

Başka bir tip soğurmada ise, elektron bir fotonu soğurarak aynı bant içinde daha yüksek bir enerji seviyesine geçiş yapar. Bu tip bir geçiş momentum korunumu için ek bir etkileşme gerektirir. Momentumdaki değişim fononlar yoluyla örgü ile etkileşerek veya iyonlaşmış safsızlıklardan saçılarak sağlanır. Yarıiletkenlerde bağlı bir elektron ile boşluk birbirlerini Coulomb kuvvetiyle çekerler ve birbirlerinin etrafında dönerler. Bu şekilde oluşan elektron-boşluk çiftine eksiton denir. Eksitonların yükü sıfırdır.

Eksitonlar tarafından soğrulma için; $h\nu \geq E_g - E_{eks}$ şartının sağlanması gerekir. Burada E_{eks} eksitonun bağlanma enerjisidir.

Bir diğer soğurma olayı katkı atomları tarafından soğurmadır ve katkılı yarıiletkenlerde meydana gelir. Yarıiletkenine gelen fotonun enerjisi yarıiletkenin yasak enerji aralığından küçük ise, valans bandındaki elektronlar iletim bandına çıkamaz. Bu durumda gelen foton yarıiletkenin tipine göre donör veya akseptör atomları tarafından soğrulur.

Bir yarıiletkenin bant aralığı soğurma katsayısı ve yarıiletken üzerine gelen fotonun enerjisinin bilinmesi ile belirlenebilir. Direkt bant aralıklı bir yarıiletken malzemede $(\alpha h\nu)^2$ 'nin enerjiye $(h\nu)$ karşılık çizilen grafiğinin lineer kısmının enerji eksenini $(\alpha h\nu)^2=0$ ' da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletken malzemenin bant aralığını verir. Bu yöntem "optik metot" olarak bilinir. Yarıiletken malzemede; katkı atomlarının yoğunluğunun artırılması sonucunda, enerji seviyelerinde yarılmalar meydana gelir ve donör veya akseptör seviyeleri "safsızlık bandı" olarak tanımlanan bir bant oluştururlar. Bunun yanında bir başka önemli etki ise, yasak enerji aralığı içine bantların genişlediğini gösteren bant sarkmalarının oluşumudur. İyonlaşmış donörler, iletim bandındaki elektronlar üzerine çekici bir kuvvet ve valans bandındaki holler üzerine ise itici bir kuvvet uygulayarak bant sarkmalarının oluşmasına sebep olur (Mott 1971).

Katkı atomları ve kristal arasındaki diğer bir etkileşim de deformasyon potansiyelidir. Çünkü katkı atomu genellikle bir örgü atomundan daha büyük veya daha küçük olacağı için, yerel bir mekanik gerilme meydana gelir ve bu tip bir etkileşim de bant kenarlarını bozar. Sonuç olarak katkılı yarıiletken bir malzemede; safsızlık bandının oluşumu, Coulomb etkileşimi ve deformasyon potansiyeli sebebiyle bant kenarları bozulur ve bant sarkmaları ortaya çıkar.

3.2.2. Doğrudan Bant Geçişi

Enerjisi $h\nu$ olan bir foton, doğrudan bant geçişli bir yarıiletkenine geldiğinde, bir elektronu değerlik bandından iletim bandına geçirir. E_i yarıiletkende ilk durum, E_s son durum enerjisi olmak üzere enerji farkı

$$h\nu = E_s - E_i - E \quad (3.57)$$

denklemleri ile verilmektedir (Pankove 1975). Parabolik bantlarda ise,

$$E_s - E_g = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad (3.58)$$

ifadeleri ile belirlenir. Burada m_e^* elektronun etkin kütlesidir.

$$E_i = \frac{p^2}{2m_p^*} \quad (3.59)$$

m_p^* holün etkin kütlesini göstermektedir. Denklem 3.57, 3.58 ve 3.59 düzenlendiğinde

$$hv - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_p^*} + \frac{1}{m_e^*} \right) \quad (3.60)$$

bağıntısı ile elde edilir. Doğrudan bant geçişinde α ile hv arasındaki bağıntı,

$$\alpha hv \approx B(hv - E_g)^m \quad (3.61)$$

denklemleri ile verilir. Burada B sabit sayı, m 1/2 izinli geçiş veya 3/2 yasaklı geçiş değerlerini alabilen bir sabittir. Ayrıca, denklem 3.74'te αhv değerini sıfır yapan değer yarıiletkenin yasak enerji aralığı değerini vermektedir (Mott 1971).

3.2.3. Dolaylı Bant Geçışı

Değerlik bandının maksimumu ile, iletkenlik bandının minimumunun, momentumlarının farklı olduğundan, elektron momentumunun korunması için, foton soğurma olayı ilave bir parçacık içermelidir. Bu durumda momentum korunumu için bir fononun emisyonu veya soğurulması gereklidir. Fonon soğurulmasında, soğurulma katsayısı

$$\alpha_s(hv) = \frac{B(hv - E_g - E_{ph})^m}{\exp(E_{ph}/kT) - 1} \quad (3.62)$$

ve

$$\alpha_e(hv) = \frac{B(hv - E_g - E_{ph})^m}{1 - \exp(-E_{ph}/kT)} \quad (3.63)$$

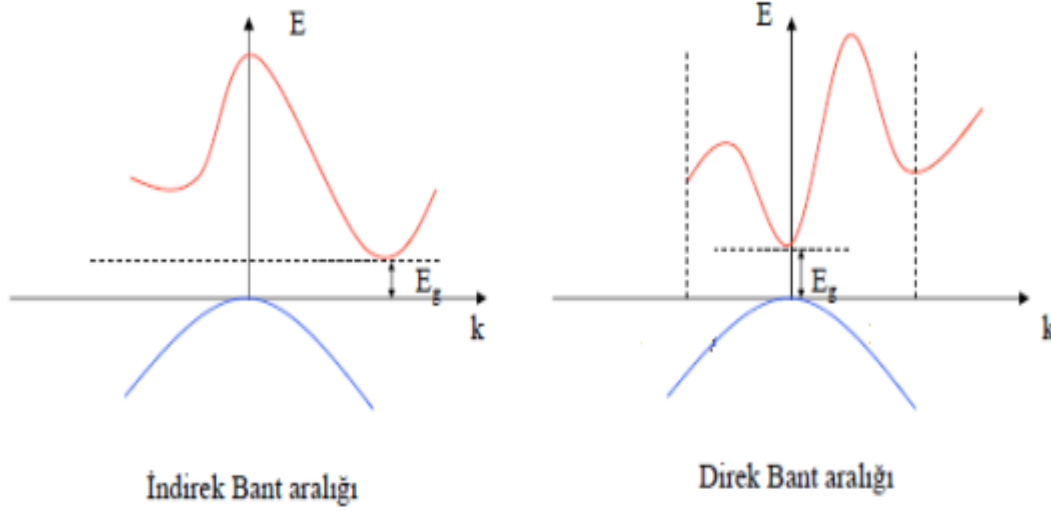
olarak yazılabilir. Burada α_s soğurma katsayısı ve α_e emisyon katsayısı, E_{ph} fonon enerjisidir. Her iki olasılıkta imkan dahilinde olduğu için

$$\alpha(hv) = \alpha_s(hv) + \alpha_e(hv) \quad (3.64)$$

olarak yazılabilir. Açık bir şekilde yazıldığında

$$\alpha(h\nu) = \left(\frac{B(h\nu - E_g - E_{ph})^m}{\exp(E_{ph}/kT) - 1} \right) + \left(\frac{B(h\nu - E_g - E_{ph})^m}{1 - \exp(-E_{ph}/kT)} \right) \quad (3.65)$$

halinde yazılır. Burada m, dolaylı bant geçişli bir yarıiletken için izinli geçiş 2 veya yasaklı geçiş 3 değerlerini alabilen bir sabiti göstermektedir (Gaffar ve ark. 2003).



Şekil.3.9. Doğrudan ve dolaylı band aralığı

3.3 Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi

3.3.1 Hava Kütlesi

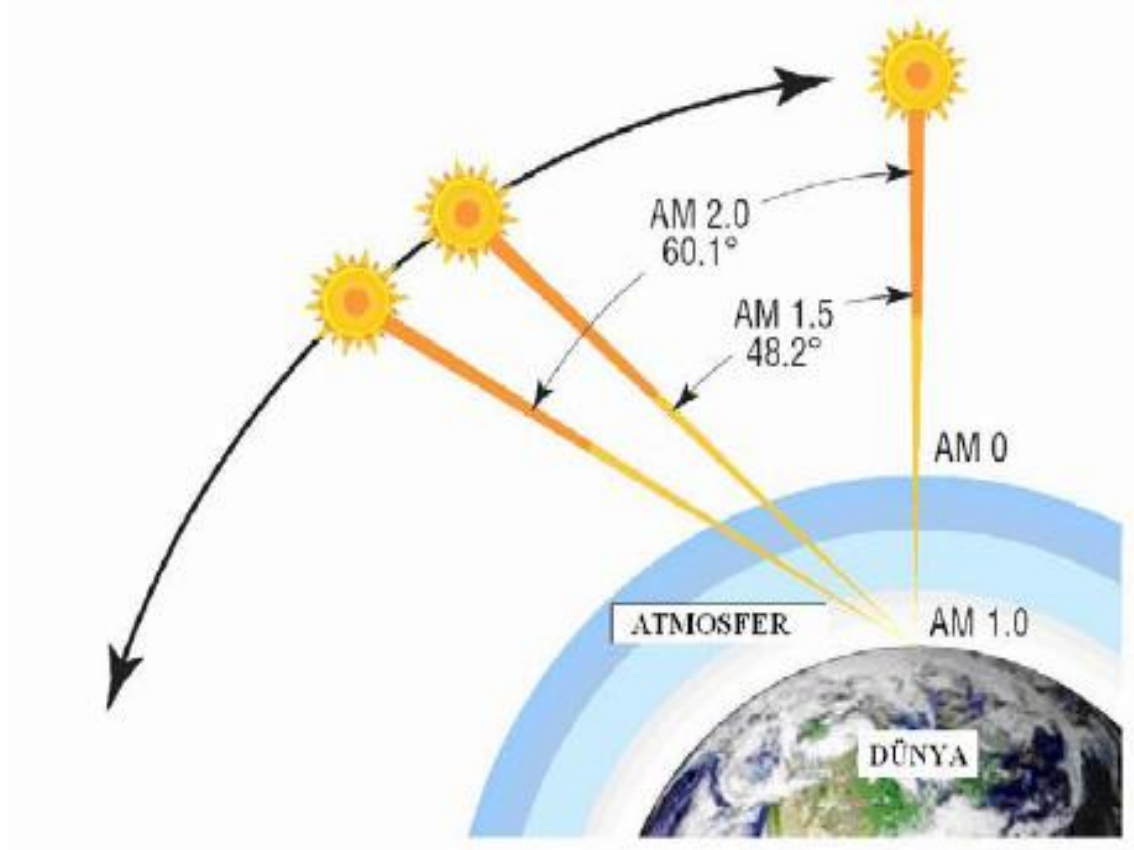
Güneş yüzeyi, 5762 K siyah cisim radyatörünün spektrumuna benzer. Güneş, dünyadan oldukça uzaktadır ve bundan dolayı dünya tarafından emilime uğrayan ışınların paralel geldiği kabul edilebilir. Atmosfer üzerinde, ışınım yoğunluğu yaklaşık 1353 W/m^2 dir ve bu ışınımın spektral dağılımı sıfır hava kütlesi (AM0) olarak nitelendirilir. Hava kütlesi, dünya yüzeyine ulaşan ışınların spektrumunun ve yoğunluğunun atmosfer tarafından ne kadar etkilendiğini gösteren bir ölçüdür. Hava kütlesi (Air Mass)

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.66)$$

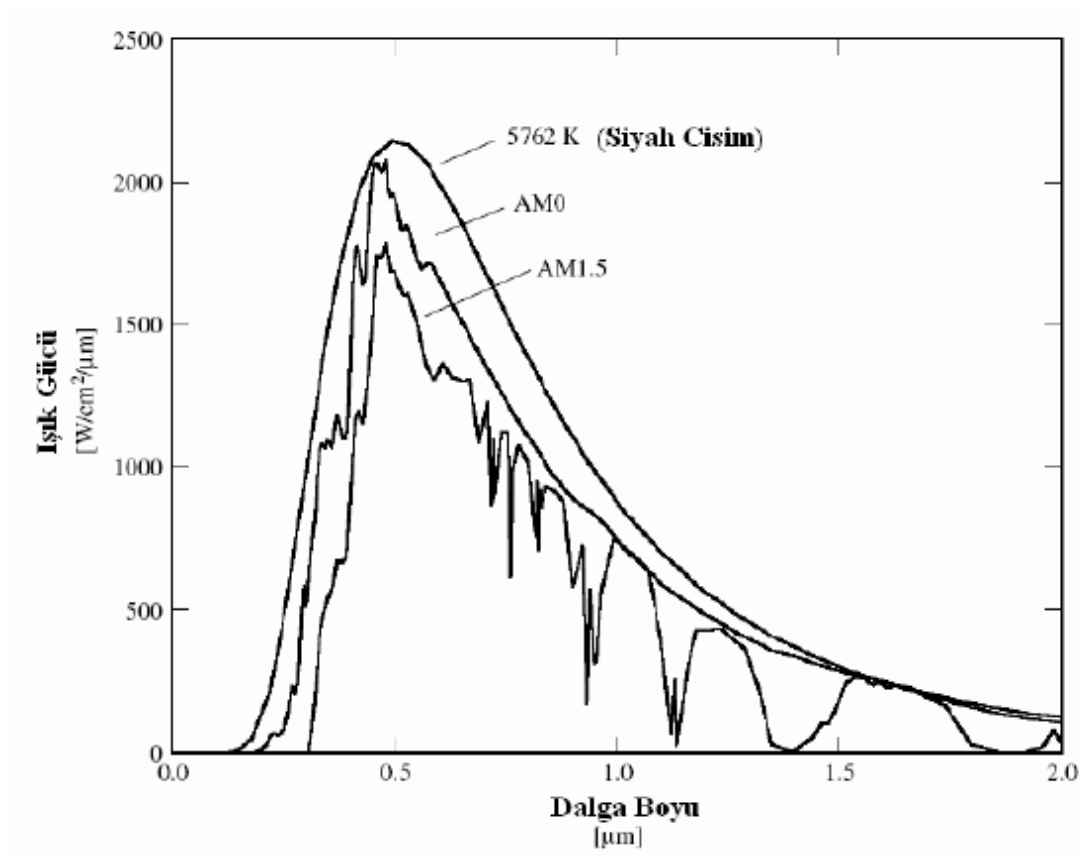
ile ifade edilir. Burada θ ışığın geliş açısıdır. Green, hava kütlesi kolay yoldan bulunması için aşağıdaki formülü geliştirmiştir (Green 1992).

$$\text{Air Mass} = \sqrt{1 + (L/H)^2} \quad (3.67)$$

burada H cismin boyu ve L gölge boyudur. Güneş pillerinin performanslarının karşılaştırılmasında standart olarak AM1.5 spektrumu ve toplam 1000 W/m^2 güce sahip ışık kullanılmaktadır. Şekil 3.10 hava kitesi numaralarına göre güneş ışınlarının dünyaya gelişini ve Şekil 3.11 kara cisim ışımasını, AM0 ve AM1.5 spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 3.10. Hava kitle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi (Ocak 2010)

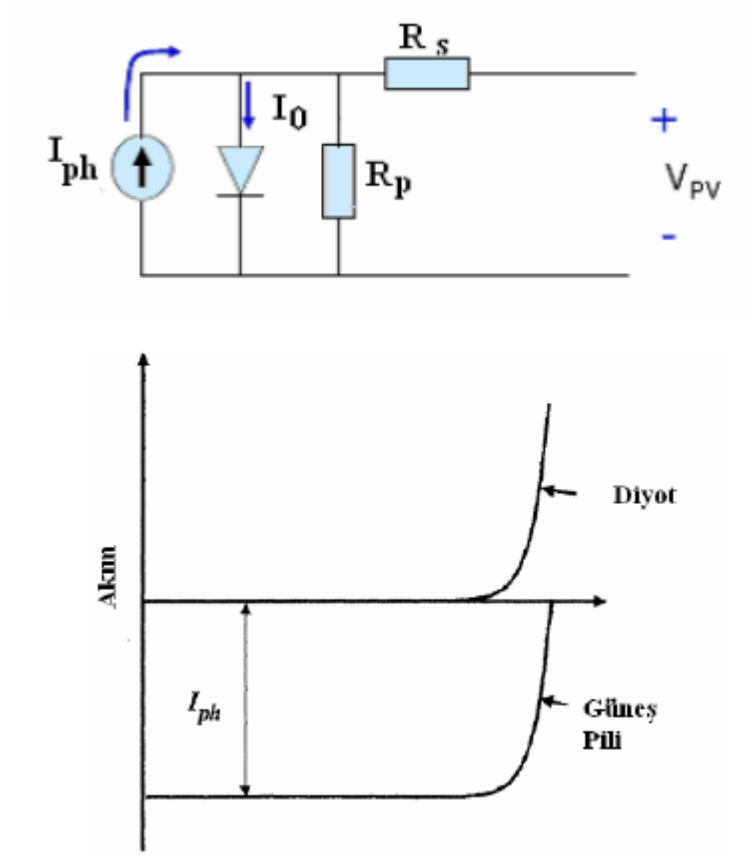


şekil 3.11. Kara cisim ışması, AM0 ve AM1.5 spektrumları

3.3.2. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Güneş pillerinde fotovoltaik enerji dönüşümünde iki basamak mevcuttur. Bunlar sırasıyla, soğurulan ışık tarafından elektron-boşluk çiftlerinin oluşması ve elektronların güneş pilinin negatif terminaline ve boşlukların pozitif terminale gitmeleridir. Böylece elektriksel güç elde edilir. Bir güneş pili şekil 3.13'te gösterildiği gibi doğrultucu bir diyota bağlanmış bir akım kaynağı ile tasvir edilebilir. şekil 3.13b'de ayrıca diyot ve güneş piline ait akım gerilim grafiklerinin üst üste binmesi şematize edilmiştir. Bir pilin akım gerilim karakteristiği Shockley tarafından

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.68)$$

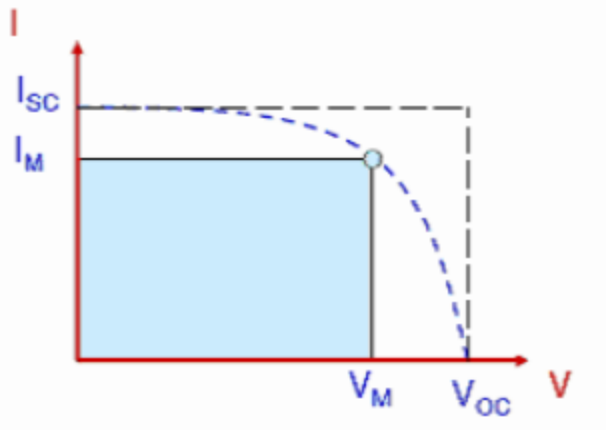


Şekil 3.12. a) Bir güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi

b) Bir güneş piline ait (güneş pili+ diyot) akım gerilim grafiği

olarak ifade edilmiştir (Shockley 1950). Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, q elektron yükü ve V pilin iki terminali arasında uygulanan gerilimidir. I_0 doyma akımıdır ve karanlık altında güneş pilinin klasik doğrultucu kontak gibi davrandığını ifade eder. I_{ph} ışık tarafından oluşturulan akımdır ve pil üzerine düşürülen foton akışı ile ilişkilidir. Şekil 3.13 denklem 3.69'a karşılık gelen akım-gerilim ifadesini temsil etmektedir. Burada, I_{sc} kısa devre akımıdır ve ışık tarafından oluşturulan I_{ph} değerine eşittir. V_{oc} ise açık devre gerilimidir ve

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (3.69)$$



Şekil 3.13. Güneş pillerinde denklem 3.69'a karşılık gelen akım-gerilim grafiği

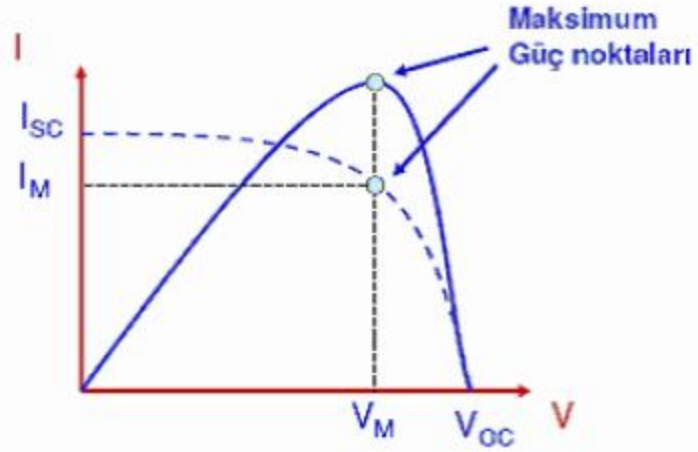
ile ifade edilir. Grafikte ifade edilen I_m ve V_m ifadeleri sırasıyla maksimum gücün elde edildiği akım ve gerilim değerleridir. Pil tarafından üretilen güç şekil 3.14'de gösterilmektedir. Pilden elde edilen maksimum güç

$$P_{max} = I_{max}V_{max} \quad (3.70)$$

olarak yazılır. Güneş pilinin enerji dönüşüm verimi (η), pil devreye bağlandığında soğurulan ışık enerjisinin, elektrik enerjisine çevrilme yüzdesidir. Bu ifade pilden elde edilen maksimum gücün pil üzerine düşürülen ışığın gücüne oranıdır. Güneş pilinin verimi

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}S} \quad (3.71)$$

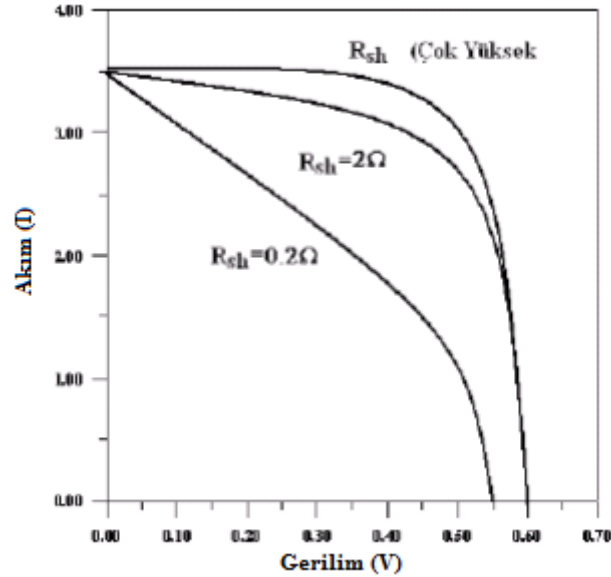
şeklinde yazılır. Burada P_{in} pil yüzeyine düşürülen ışığın güç ve S pilin etkin alanıdır. Bundan dolayı ölçümlerde kullanılan simülâtörün ışık gücü ile pilin etkin alanının çarpılması ile net güç bulunur. Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan diğer bir parametre, doluluk oranıdır. Bu terim, elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ile kısa devre akımlarının çarpımına oranıdır ve (3.70) formülü ifade edilir (Gray 2003).



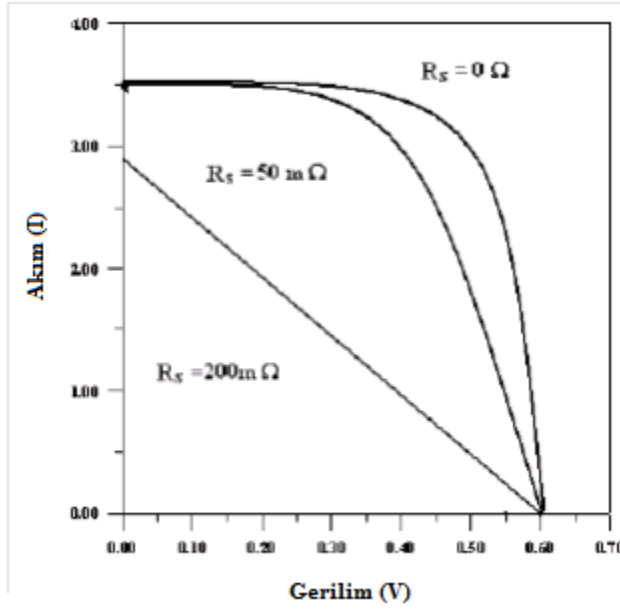
Şekil 3.14. Güneş pilinde pilde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{\eta P_{in}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.72)$$

Güneş pillerinde, maksimum gücün elde edildiği V_m ve I_m noktalarının gösterimi ile ifade edilir. Bir güneş pilinin doluluk oranı, bu pilin seri ve paralel direncinden doğrudan etkilenir. Paralel direncin artırılması ve seri direncin düşürülmesi doluluk oranını artırır ve dolayısıyla pilin verimini artırır. Şekil.3.14 ve 3.15 güneş pillerinde doluluk faktörüne ve dolayısıyla pil verimine seri direnç ve paralel direnç etkilerini göstermektedir.



Şekil 3.15. Güneş pili üzerine paralel direnç etkisi ($R_s=0$ durumunda)



Şekil 3.16. Güneş pili üzerine seri direnç etkisi ($R_p = \infty$ durumunda)

3.4 DENEYSEL İŞLEMLER

3.4.1. Giriş

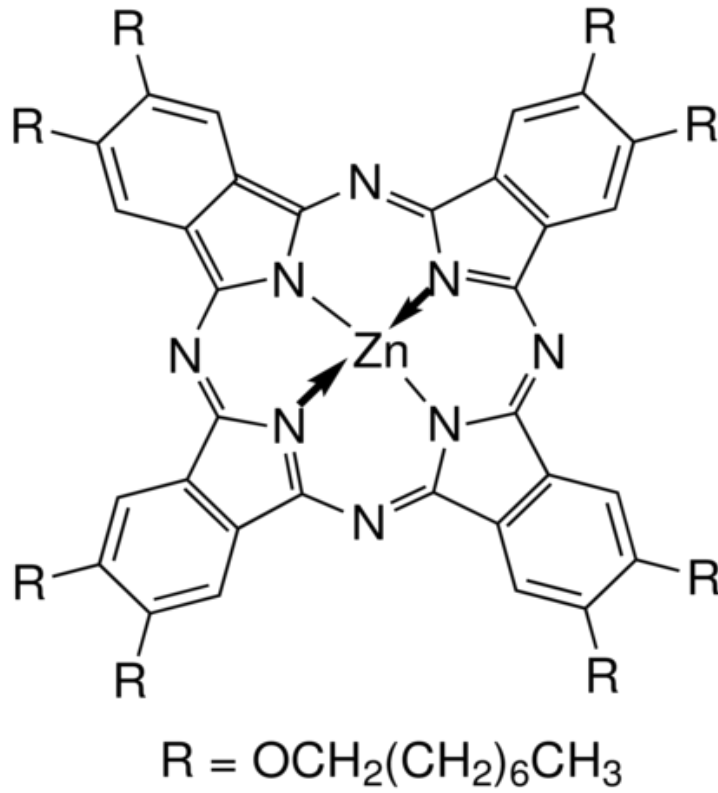
Bu bölümde, Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısını oluşturmada kullanılan oc-ZnPc molekülünün, molekül formülü, molekülün bağ yapısı ve kimyasal özelliklerinden bahsedilecek. Ayrıca molekülün, optik özelliklerinin nasıl belirlendiğinden bahsedilecek, diyotun oluşturulması için gerekli olan, yarıiletkenlerin temizlenmesi ve kontakların oluşturulması basamakları anlatılacaktır. Ayrıca, diyotun karakterizasyonu için gerekli olan ölçümlerin nasıl yapıldığından da bahsedilecektir.

3.4.2. Çinko Ftalosiyanın molekülü

Ftalosiyanın bileşikleri çok iyi mavi ve yeşil renkleri sayesinde, endüstride boyar madde olarak kullanılmıştır. Başta mürekkep yapımında, plastik ve metal ürünlerin yüzeylerinin renklendirilmesinde; ayrıca tekstil sektöründe boyar madde olarak kullanılmışlardır. Yeni uygulama alanları için farklı özellikler taşıyan ftalosiyaninler, özellikle, son yıllarda araştırılmış ve pratik uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Fotokopi makinelerinde fotoiletken eleman, tıpta, kanserin foto dinamik terapisi, ve diğer tıbbi uygulamalar, lazer boyaı, kükürtlü gaz atıklarını kontrol etmede, doymuş hidrokarbonları düşük sıcaklıkta yükseltgemedde ve benzinin oktan sayısını artırmada

katalizör olarak uygulamaları vardır. Ayrıca elektrokromik görüntü cihazlarında, bilgisayar optik okunan-yazılan diskler ve ilgili veri depolama sistemlerinde, sıvı kristal renkli ekran uygulamalarında ve fotovoltaik hücre elemanları gibi birçok kullanım alanı mevcuttur (Bekaroğlu, 1996).

Bu çalışmada Sigma-Aldrich firmasından alınan ve molekül formülü $C_{96}H_{146}N_8O_8Zn$ (Zinc 2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine) olan çinko ftalosiyanın bileşiği kullanılmıştır. Bileşiğin yapısı şekil 3.18'de gösterilmiştir.



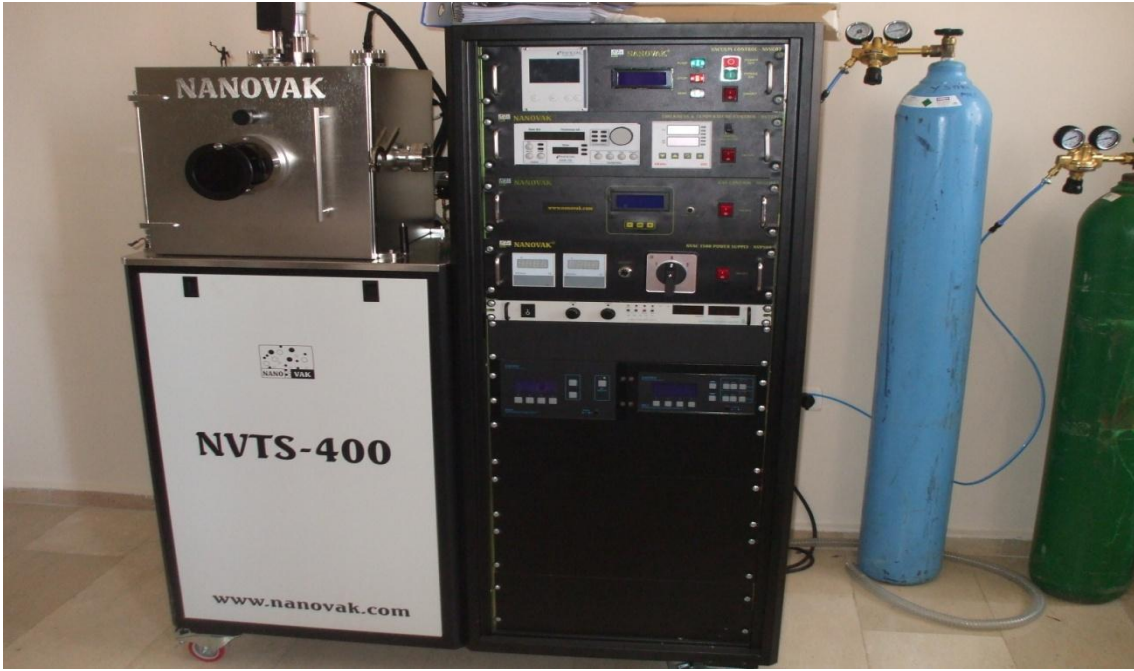
Şekil 3.17. Zinc 2,3,9,10,16,17,23,24-Octakis(octyloxy)-29H,31H-phthalocyanine molekülünün yapısı.

3.4.3. Yarıiletkenin temizlenmesi

Bu çalışmada, 1-10 Ωcm dirence sahip bor (B) katkılı, 1cm x 1cm ebatlarındaki, p-Si yarıiletkeni alttaş olarak kullanılmıştır. Yarıiletken, muhtemel yağlarından temizlenmesi için, trikloroetilen'de 10 dakika kaynatıldı. Daha sonra sırasıyla aseton ve metanolde ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı. Yüzeydeki oksit tabakalardan kurtulmak için, HF-H₂O (1:10) seyreltik çözeltisine, 30 saniye boyunca daldırıldı. Her aşamadan sonra, deiyonize suyla durulandı. Daha sonra, azot (N₂) ortamında kurutuldu.

3.4.4. Diyotların hazırlanması

Diyotların üretimine, omik kontak oluşturulması ile başlandı. Vakum cihazının katot bölümüne Al metali (%99,8 saflıkta) yerleştirildi. Anot kısmına ise p-Si yerleştirildi. Cihaz çalıştırılıp yüksek vakum ortamı oluşturuldu. Daha sonra ortama Argon gazı verildi. Yüksek gerilim uygulanarak Argon gazının iyonlaştırılıp Al metalini saçtırması sağlandı. Böylece p-Si üzerinde 200 nm kalınlığında Al tabaka oluşturuldu. Daha sonra vakum cihazına hava verilerek cihaz durduruldu.



Şekil 3.18. Termal Buharlaştırma Cihazı



Şekil 3.19. Tavlama İşleminin Gerçekleştirildiği Fırın

Yapımız, azot ortamında, 450 °C sıcaklığa ayarlanmış quartz fırında, 15 dakika tavlandı. Böylece, yapımızın omik kontak bölümü hazırlanmış oldu.

Omik kontak işleminden sonra, muhtemel oksitlenmeye karşı, yapımızın parlak yüzeyi seyreltik HF:H₂O (1:10) çözeltisiyle temizlendi. Deiyonize suda yıkanıp, azot gazıyla kurutuldu.

Organik filmin oluşturulması için, oc-ZnPc (Çinko ftalosiyanın) maddesinin, metanol sıvısı kullanılarak $1,36 \times 10^{-4}$ molarlık çözeltisi hazırlandı. Omik kontak yapıp temizlenen numune spin coater cihazına, parlak yüzey üstte kalacak şekilde, yerleştirilip cihaz dakikada 1000 tur atacak şekilde çalıştırıldı. Hazırlanan çözelti yavaşça damlatılarak numunenin üzerinde ince film oluşturuldu.

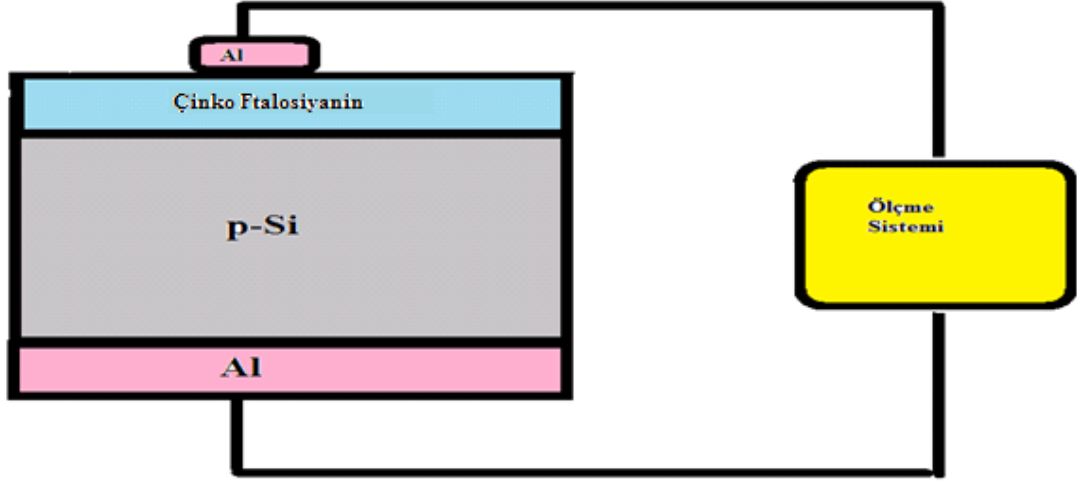


Şekil 3.20 İnce Filmin Oluşturulduğu Dönel Kaplama Cihazı

Daha sonra oc-ZnPc ince filminin kalınlığı PHE102 spektroskopik elipsometre cihazıyla ölçüldü. Cauchy-Urbach metodu kullanılarak yapılan hesaplamalarda film kalınlığı 37 nm olarak hesaplandı.



Şekil 3.21. oc- ZnPc ince filminin kalınlığının ölçüldüğü PHE102 Elipsometre cihazı



Şekil.3.22. Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun şematik gösterimi.

Elde edilen yapı, doğrultucu kontak yapılması için tekrar vakum cihazına yerleştirildi. Yapının üzerine gölge maske konuldu. Sonra, ısıtıcıya (tungsten potaya) Al metali bırakılıp, cihaz 10^{-5} Torr mertebesine kadar vakumlandı. DC akımı verilerek organik maddenin üzerine Al metali buharlaştırıldı. Elde edilen Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapımızın çizimi şekil 3-22’te gösterilmiştir.

3.4.5. Akım-Gerilim ve Kapasite Gerilim ölçümlerinin alınması

Elde edilen Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısının, elektriksel karakterizasyonunun belirlenmesi için, öncelikle bu yapının akım-gerilim ($I-V$) ölçümleri alındı. Keithley 2400 sourcemeter kullanılarak yapılan ölçümler ve elde edilen datalar bilgisayar ortamına aktarıldı. Bu ölçümler sonucunda, yapımızın doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü.

Işık altında yapılan $I-V$ ölçümlerinde, diyotun ışığa karşı duyarlı olduğu görüldü. Ters belsem bölgesinde ışık şiddetinin değişmesiyle akım değerinin belirgin bir şekilde arttığı gözlemlendi.



Şekil 3.23. Keitley 2400 Sourcemeter ve güneş similatörü.

Daha sonra, diyotun kapasite-gerilim ($C-V$), kapasite-frekans ($C-F$) ölçümleri Hewlett-Packard firmasından alınan HP 4294A (40 Hz-110 MHz) İmpedans Analizör kullanılarak gerçekleştirildi. Kullanılan aygıtın resmi şekil 3.24’te verilmiştir



Şekil 3.24. C-V Ölçümü Yapılan HP 4294A (40 Hz-110 MHz) İmpedans Analizörü

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1.Giriş

Bu bölümde, çinko ftalosiyanın bileşiği kullanılarak hazırlanan Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotun elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri incelenecektir.

4.2. Al/oc-ZnPc/p-Si/Al Akım-Gerilim karakteristiği

Yapılan akım-gerilim ($I-V$) ölçümlerinde hazırlanan Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısının doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü. Belirli bir V potansiyeli altında tutulan bir diyottan geçen akım,

$$I = I_0 \exp \left[\frac{e(V-IR_S)}{nkT} \right] \quad (4.1)$$

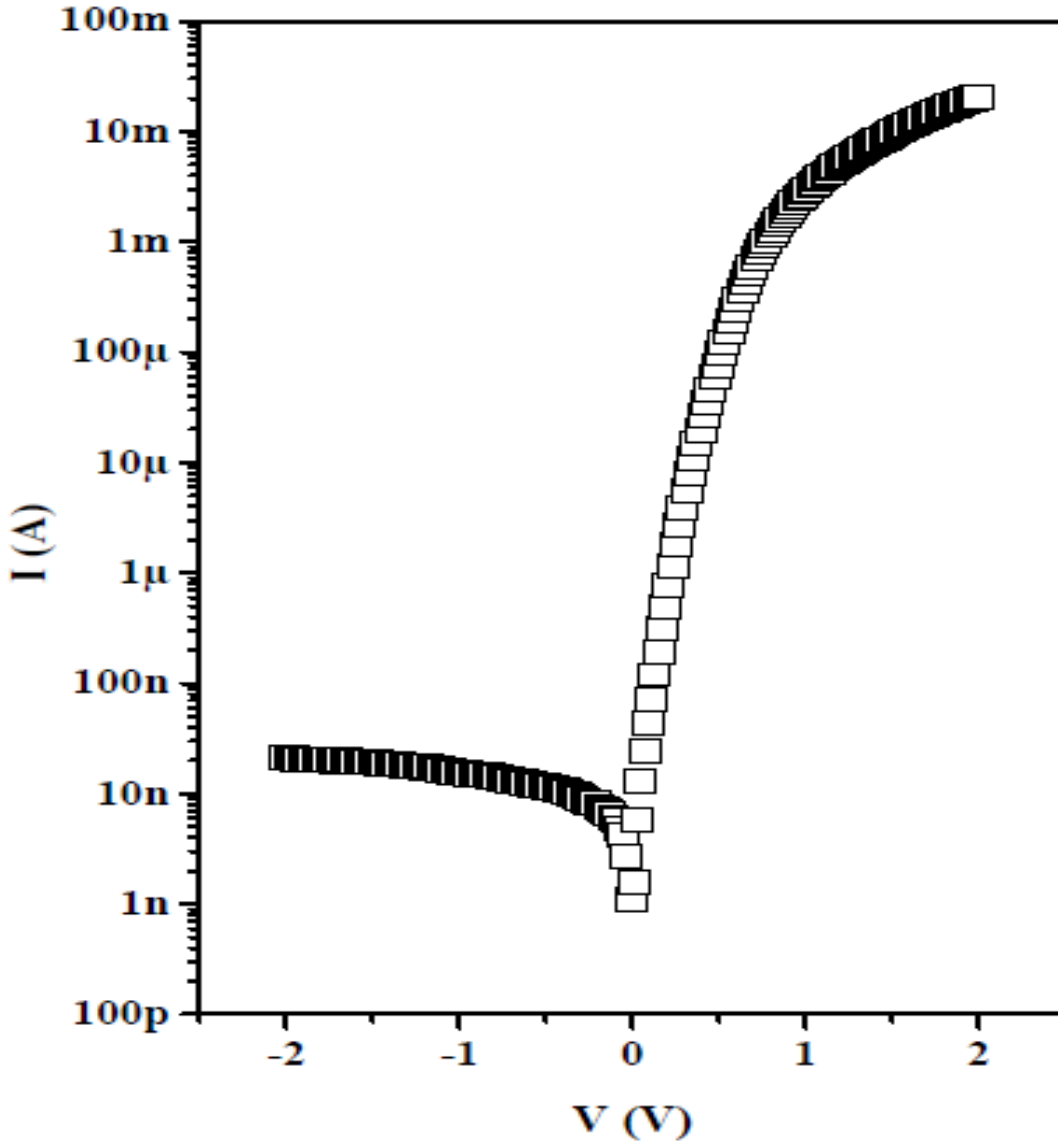
Denklemleri ile ifade edilmektedir. Burada e elektronik yük, V uygulanan gerilim, R_S seri direnç, n boyutsuz idealite faktörü, k boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akım değeridir. I_0 'ın değeri aşağıdaki gibi yazılabilir.

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

Bu ifadede A diyotun yüzey alanı, A^* Richardson sabitidir ve Φ_b ise engel yüksekliğidir. Bir diyotun idealite faktörü değeri $\ln I-V$ grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden

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

ifadesi yardımıyla hesaplanır. Ölçümler sonucunda oda sıcaklığında elde edilen $\ln I-V$ grafiği Şekil 4.1 de gösterilmiş ve denklem 4.3 kullanılarak elde edilen idealite faktörü $n=1,44$ olarak hesaplandı. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının sebebi diyotların ideallikten saptığını gösterir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu sonuçlara benzer sonuçlar bulunmuştur.



Şekil 4.1 Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısının I-V grafiği

Çakar ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, pironin-B arayüzey tabakalı Al/pironin-B/p-Si diyotu hazırlanmış ve idealite faktörü 2,10 olarak ölçtüler. İdealite faktörünün ideallikten sapmasının nedeni, ara yüzey tabakasının varlığına, ara yüzey durumlarına ve seri direncin etkisine bağladılar (Çakar ve ark. 2004). Bazı araştırmacılar, ideallikten saptmaya neden olarak, organik ara tabaka ile ikinci bir mekanizmanın ara yüzeyde oluşmasını göstermiştir (Asubay ve ark. 2008). Bazı araştırmacılar ise, tükenim bölgesinde elektron ve deşiklerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlamışlardır (Yakuphanoglu 2007).

Ocak doktora tezinde Ag, Al, Au, Cr, Cu metallerini kullanarak metal/MnHA/n-Si yapılarını elde etmiştir. Elde ettiği Ag/MnHA/n-si, Al/MnHA/n-si, Au/MnHA/n-si, Cr/MnHA/n-si, Cu/MnHA/n-si, yapılarının idealite faktörleri sırasıyla, 1.24, 1.95, 1.43, 1.15, 1.09 olarak hesaplamıştır. Üretilen diyotlardaki bu ideallikten sapmalar genellikle kullanılan ara tabakanın varlığına, ara yüzey durumlarına ve seri direncin etkisine bağlanır (Ocak, 2010). Bazı araştırmacılar ideallikten saptmaya neden olarak organik ara tabaka ile ikinci bir mekanizmanın ara yüzeyde oluşmasını gösterirken, bazı araştırmacılar tükenim bölgesinde elektron ve deşiklerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlamışlardır.

Diyota ait engel yükseklikleri $\ln I-V$ grafiğinin I eksenini kestiği noktadaki doyma akım değeri olan I_0 kullanılarak

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

formülü ile hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen engel yüksekliği 0,78 eV olarak bulundu.

Norde 1979 yılında, engel yüksekliği ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (4.5)$$

Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tam sayıdır. $I(V)$ ifadesi $I-V$ eğiminden elde edilen akım değeridir. Bu çalışmada elde edilen idealite faktörü 1,44 olduğundan γ değeri 2 alınır. Bu metotta engel yüksekliği ifadesi

Diyot	n	I_0	Φ_b (eV)
Al/oc-ZnPc/p-Si/Al	1,44	$9,47 \times 10^{-8}$	0,78

Çizelge 4.1. Oluşturulan Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotlarının $\ln I-V$ grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri.

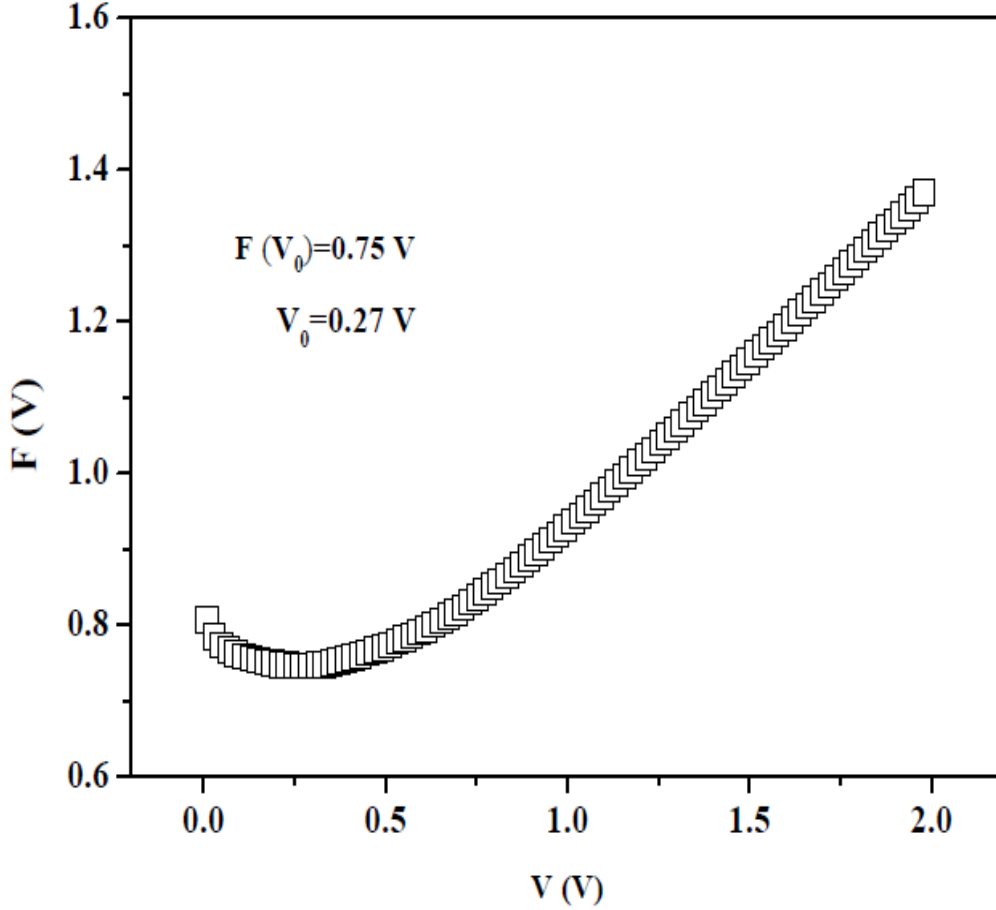
$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

olarak verilir. Burada $F(V_0)$ ifadesi $F-V$ grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir. Yapılan hesaplamalarda bu değer 0,75 bulunmuştur. V_0 ise bu değere karşılık gelen gerilim

değeridir ve 0,27 volt olarak hesaplanmıştır. Şekil(4.2) te hazırlamış olduğumuz Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun $F(V)$ - V grafiği verilmiştir.

Norde metodunda seri direnç değerleri

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



Şekil 4.2 Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun $F(V)$ - V grafiği

förmülü ile bulunur. Burada I değeri V_0 değerine karşılık gelen akım değeridir. Yapılan hesaplamalarda engel yüksekliği 0,86 eV ve seri direnç değeri 5,46 k Ω olarak bulundu. Burada bulunan engel yüksekliği ifadesi I - V grafiğinden elde edilen değerlerle uyum göstermektedir.

4.3 Al/oc-ZnPc/p-Si/Al Diyodunun Kapasite-Gerilim Karakteristiği.

Kapasite-gerilim ($C-V$) karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların $C-V$ karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve ara yüzey durumlarının devre elamanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi söz konusudur. Şekil 4.3 Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotuna ait 100, 200, 500 kHz, 1, 2 ve 5 MHz frekanslarda ve -3 ile 3 volt arasında $C-V$ grafiklerini göstermektedir. Grafikten de çok net bir şekilde anlaşılacağı gibi diyotta düşük frekanslarda kapasite değerleri frekans artarken artmaktadır. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir. Yeterince yüksek frekansta alınan kapasite-gerilim ölçümlerinde ise, ara yüzeydeki yüklerin AC sinyallerini takip edemediğini göstermektedir.

Diyotun karakteristik parametreleri ayrıca ters besleme $C^{-2}-V$ eğrilerinden de hesaplanabilir. Artan ters besleme gerilimi ile yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar geriye doğru çekilir ve tükenim bölgesinin genişliği $w+\Delta w$ kadar artar. Tükenim bölgesindeki yükte meydana gelen değişim, kapasitede bir değişime neden olur.

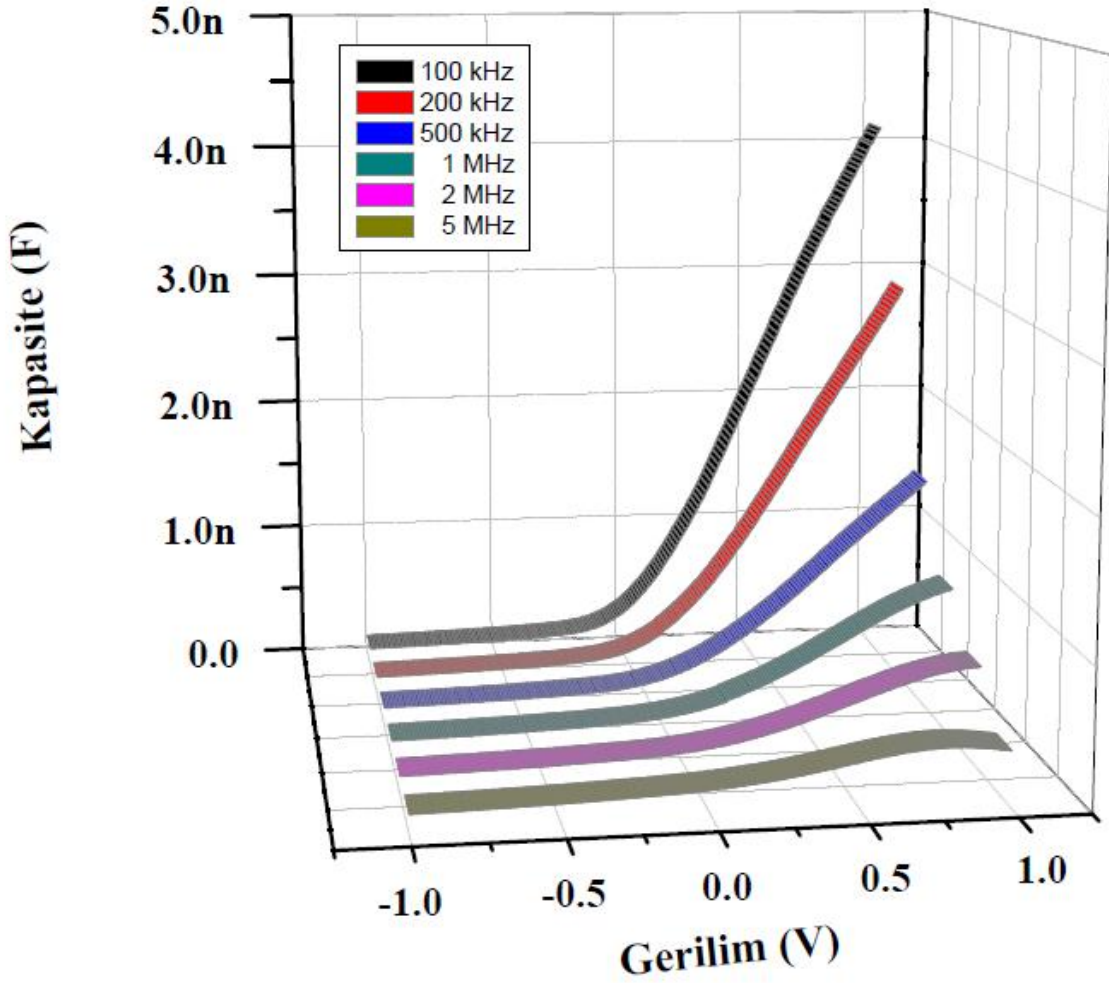
Ara yüzey bölge kapasitesi metal/p-tipi yarıiletken diyotlar için

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_a+V)}{e\epsilon_0 A^2 N_a} \quad (4.8)$$

olarak verilir. Burada A diyotun etkin alanı, ϵ_0 yarıiletkenin dielektrik sabiti, V_a ise $C^{-2} - V$ eğrisinin V eksenini kestiği yerden hesaplanan sıfır belsem difüzyon potansiyelidir. Diyotun 1 MHz deki $C^{-2} - V$ eğrisi şekil (4.5) de gösterilmiştir. Diyota ait engel yüksekliği aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

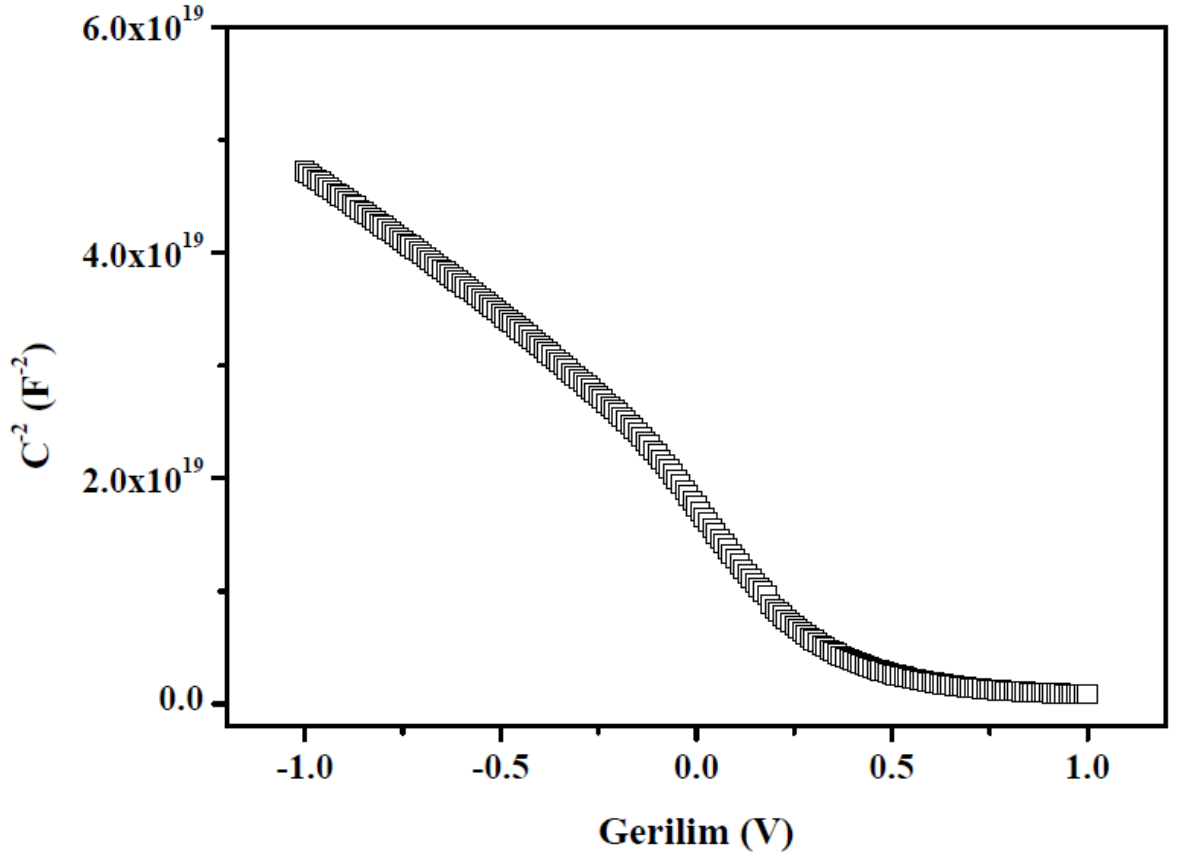
$$\Phi_b(C - V) = V_a + E_f \quad (4.9)$$

Burada E_f değeri p tipi yarıiletkenin nötral bölgesindeki iletim bandının en düşük değeri ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyel farktır.



Şekil 4.3. Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotuna ait C-V grafiği

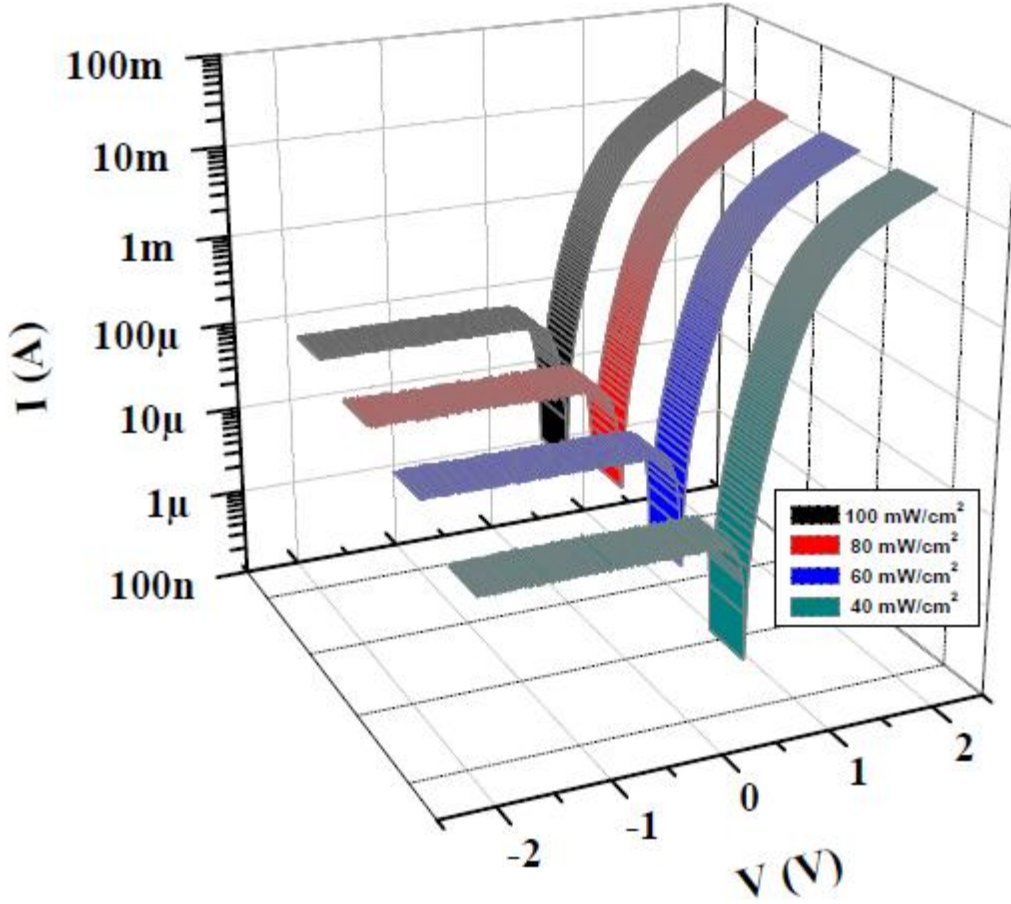
Yapılan matematiksel hesaplamalar sonucunda, engel yüksekliğinin değeri $\Phi_b = 0,88$ eV bulunmuştur. Daha önceden $I-V$ grafiği kullanılarak bulunan engel yüksekliği $\Phi_b = 0,78$ eV olarak bulunmuştu. Metal-yarıiletken veya metal-yalıtkan-yarıiletken yapılarda, homojen olmayan engel modeline göre, $C-V$ ölçümlerinden elde edilen değerler $I-V$ ölçümlerinden elde edilen değerlerden daha büyüktür. Çünkü $I-V$ ve $C-V$ ölçümlerinde kullanılan metotlar farklıdır. Kapasite tüketim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas değildir. Bu yüzden ölçülen engel yüksekliği, engel yüksekliği dağılımının ortalama değeridir. Buna karşın, ara yüzeyden geçen akım engel yüksekliğine üstel olarak bağlıdır ve ara yüzey dağılımına karşı daha hassastır.



Şekil 4.4. Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotuna ait 1 MHz frekansta çizilen $C^{-2} - V$ grafiği

4.4. Fotoelektriksel Özelliklerin İncelenmesi

Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun fotoelektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için yapıların $I-V$ ölçümleri AM1.5 global filtreye sahip güneş simülatörü altında 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² şiddetindeki ışık kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 4.5 bu ölçümlere ait aydınlık ve karanlık ortam kıyaslamalı $I-V$ grafiğini göstermektedir. Şekil 4.5 ten de çok net bir şekilde görüleceği gibi hazırladığımız diyot ışığa karşı tepki vermektedir. Ters beslem bölgesinde ışığın gücü artırıldığında, ters beslem akımının arttığı görülmektedir.



Şekil 4.5. Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun, güneş similatörü altında, 40, 60,80 ve 100 mW/cm^2 ışık şiddetlerinde elde edilen $\ln I - V$ grafikleri

Diyotun ışığa karşı duyarlılıklarının gözlemlenebilmesi için -1 V'da ve 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 yoğunluğa sahip ışık altındaki ve karanlıktaki akım değerleri incelenmiş ve V_{oc} , I_{sc} değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler aşağıdaki çizelgede belirtilmiştir.

İŞIK ŞİDDETİ (mW/cm^2)	İŞIĞA KARŞI DUYARLILIK	V_{oc} (mV)	I_{sc} (μA)
40	676,74	345	10,3
60	1735,62	385	26,5
80	2915,61	396	44,5
100	5024,70	406	72,7

Çizelge 4.2. -1 V'da ve 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 ışık altındaki V_{oc} , I_{sc} değerleri

5-SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Teknolojideki muazzam ilerleme bilim insanlarının bu alandaki ilgilerinin artmasına sebep olmuştur. Son zamanlarda, MS ve MIS yapılar üzerine yapılan çalışmalar, hızla artmaktadır. Bu çalışmalardan pek çoğu, yeni yarıiletken malzemelerin (özellikle organik malzemeler) geliştirmeyle ilgilidir. Ayrıca, geliştirilen yeni devre elemanlarının elektronik özelliklerinin belirlenip, uygulama alanlarının tespit edilmesine yönelik çalışmaların da, artarak devam ettiğini yakından takip etmekteyiz.

Bu tezde ZnPc (Çinko ftalosiyanın) bileşiği kullanılarak hazırlanan yapılar incelenmiştir. Bunun için öncelikle laboratuvar ortamında kimyasal olarak temizlenen (100) yönelimine sahip p-Si yarıiletken malzemesi kullanıldı. Yarıiletkenin mat yüzeyine Al metali yüksek vakum ortamında saçtırma yöntemiyle buharlaştırılıp, kuarz fırında tavlandı. Böylece omik kontağı hazırlanan yapının üzerine metanolde çözülün ZnPc bileşiği uygulanıp, ince film oluşturuldu. Daha sonra yüksek vakum ortamında Al metali buharlaştırılarak Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısı elde edildi.

Al/oc-ZnPc/p-Si/Al yapısının karanlım ortamda yapılan I-V ölçümlerinden yapının doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü. Yapılan hesaplamalarda idealite faktörünün 1,44 ve engel yüksekliğinin 0,78 eV olduğu hesaplandı. İdealite faktörü, ideal diyotlar için 1 dir. Bulduğumuz idealite faktörünün 1 den büyük olmasının nedeni, kullandığımız ara tabakanın varlığına, ara yüzey durumlarına ve seri direnç etkisine dayandırılabilir. Bu sonuç organik ara tabaka ile ikinci bir mekanizmanın ara yüzeyde oluşmasına, tükenim bölgesinde elektron ve deşiklerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlanmıştır.

Şekil 4.1 de görüldüğü gibi Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotunun $\ln I-V$ eğrisi yüksek voltaj değerlerinde lineerlikten sapmaktadır. Bunun nedenini seri direnç etkisine bağlamak doğru olur. Seri direnç değeri ve engel yükseklik değeri Norde tarafından geliştirilen hesaplama metoduna göre yapılmıştır. Seri direnç değeri 5,46 k Ω ve engel yüksekliği 0,87 eV olarak hesaplanmıştır.

Daha sonra oluşturulan yapının C-V ölçümleri yapılmış ve diyotun düşük frekanslarda kapasite değerlerinin, frekans artarken arttığı gözlemlenmiştir. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini

göstermektedir. Ayrıca yeterince yüksek frekansta alınan $C-V$ ölçümleri ara yüzeydeki yüklerin AC sinyalini takip edemediğini göstermiştir.

Diyotların engel yükseklikleri C^2-V eğrisi kullanılarak tekrar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ters beslem C^2-V eğrisinden hesaplanan değerin $\ln I-V$ eğrisinden elde edilen değerden daha büyük olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni, kapasitenin tükenim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas olmamasına ve ölçülen engel yüksekliği değerinin, engel yüksekliği dağılımının ortalama değeri olmasına, buna karşın ara yüzeyden geçen akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olmasına ve ara yüzey dağılımına karşı hassas olmasına dayandırılmıştır.

Hazırlanan Al/oc-ZnPc/p-Si/Al diyotun ışığa karşı duyarlılığını ölçmek için AM 1,5 filtreye sahip güneş similatörü kullanılarak, 40-100 mW/cm² gücünde ışık şiddetine sahip ışık kaynağı altında ölçülmüş ve tüm yapıların akım gerilim ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.6 dan da rahatlıkla görüldüğü gibi, ters beslem bölgesinde akım yüksek bir oranda artmıştır. Bu sonuç, diyotun optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermiştir.

6. KAYNAKLAR

Akkılıç, K. Ocak, Y. S. Kılıçoğlu, T. İlhan, S. Temel, H. **2010**. Current Applied Physics, 337-341.

Akyuz, I., Atay, F., Bilgin, V., Kose, S. **2000**. The investigation of electrical and optical properties of ZnO and ZnO:Sn films obtained by ultrasonic Spray pyrolysis, Balkan Physics Letters, 22, special issue.

Akyüz, I. **2000**. Püskürtme tekniği ile elde edilen $Zn_{1-x}Cd_xS$ filmlerinin bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir (Yayınlanmamış).

Aydın, M. E. **2003**. Metal/yarıiletken ve Metal/oksit/yarıiletken Pb/p-Si ve Pb/n-Si Schottky engel diyotlarının karakteristik parametreleri ve arayüzey hallerinin enerji dağılımının belirlenmesi, Doktora Tezi, D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Bozkurt, A. Erçelebi, Ç. Toppare. **1997**. L.Synthetic metals, 87, 219-223.

Card, H.C. Rhoderick, E.H. **1971**. J. Phys. D: Appl. Phys., 4,1589.

Chattopadhyay, P. Sanyal, S. **1995**. Applied Surface Science, 89, 205

Chen, L.L. Li, W.L. Wei, H.Z. chu, B. Li, B. **2006**. Organic ultraviolet photovoltaic diodes based on copper phthalocyanine as an electron acceptor, Solar Energy Metals And Solar Cells, 90, 1788-1796.

Cheung, N.W. **1986**. J.Appl.Phys. Let. , 49, 85-87.

El-Nahass, M. M., Abd-El-Rahman, K. F., Farag, A.A.M., Darwish, A.A.A. **2005**. Organic Electronics, 129-136.

El-Nahass, M.M.; Abd-El-Rahman, K.F. ; Farag, A.A.M.; Darwish, A.A.A. **2005**. Organic Electronics, Photovoltaic properties of NiPc/p-Si (organic/inorganic) heterojunctions , 6, 129-136.

G.A. Rosquete-Pina, C. Zorrilla, S. Velumani, J. Arenas-Alatorre, J.A. Ascencio, **2004**. Applied Physics. A 79, 1913.

Gaffar, M.A., El-Fadl, A.A., Anooz, S.B. **2003**. Electron irradiation-induced effects on optical spectra of $(NH_4)_2ZnCl_4 \cdot x Sr^{+2}$ single crystals, Crystal Resorce Technology.

Gray J.L. **2003**. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Luque A., Hegedus, S. John Wiley & Sons, Ltd.

Green, Daniel W. E. **1992**. Magnitude Corrections for Atmospheric Extinction, International Comet Quarterly. Hiromitsu, Y. Murakami, T. Ito, **2003**. Synthetic Metals 137, 1385.

Ketenci, E. **2010**. CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu, Yüksek lisans tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.

Kılıçoğlu, T. **1988**. Anodik oksitli Al/SiO₂/Si Yapılarının Elektronik Özelliklerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Kılıçoğlu, T. Asubay, S. **2005**. The effect of native oxide layer on some electronic parameters of Au/n-Si/Au-Sb Schottky barrier diodes, Physica B, 58, 368.

Mott, N.F. **1971**. Davis E.A. Electronic Processes in Non Crystalline Materials, Clarendon Pres, London.

Mott, N.F. **1938**. Proc. Cambridge Philos. Soc., 34, 568

Mönch, W. **1987**. The American Physical Society, 58 (12) 1260. Cheung, S.K.

Neamen, D. A. **2003**. Basic Principles, Semiconductor Physics And Devices, McGraw Hill, N.Y.

Nozu, S.; Matsuda, K.; Sugino, T. **1999**. Plasm. Jpn. J. Appl. Pyhs. 38, 295-297.

Ocak, Y.S. **2010**. Organik-İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu, Doktora Tezi, D. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Ocak, Y.S. Kulakçı, M. Kılıçoğlu, T. Turan, R. Akkılıç, K. **2009**. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode, Synthetic Metals, 159, 1603-1607.

Omar, M.A. **1975**. Elementary solid state physics: Principles and Applications, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669p.

P.A. Lane, J. Rostalski, C. Giebeler, S.J. Martin, D.D.C. Bradley, D. Meissner, **2000**. Solar Energy Materials and Solar Cells 63, 3.

P. Haisch, G. Winter, M. Hanack, L. Luer, H.J. Egelhaaf, D. Oelkrug. **1997**. Adv. Mater. 9, 316.

- Pankove, J. **1975**. Optical Process in Semiconductors. Dover Publications, Inc. New York.
- Rhoderick E.H. **1988**. Williams R.H. Metal-Semiconductor Contacts, Clarendon Pres, Second Edition, Oxford.
- Schottky, W. **1938**. Naturwissenschaften, 26, 843
- Schottky, W. Störmer, R. Waibel, F. **1931**. Zeits f. Hochfrequenztechnik, 37,162.
- Shirakawa, H. **1977**. Louis, E.J.; MacDiarmid, A.G.; Chiang, C.K. Heeger, A.J. Chem. Comun, 578.
- Smith, W.F.. **1990**. Principles of materials science and engineering, Mc Graw-Hill Inc., USA, 864 p.
- Soylu, M. **2006**. Atamalı katodik vakum ark depolama sistemiyle üretilen ZnO'nun elektriksel iletkenliği ve ısııl işleme değişimi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Adana, 115 s.
- Szatkowski, J. Sieranski, K. **1992**. Solid-State Electronics, 35,1013
- Sze, S. M. **1981**. Physics of Semiconductor Devices, J. W. And Sons Inc. New York.
- Tseng. H.H. Wu, C.Y. **1987**. Solid State. Electron, 30, 383-390.
- Turton, R. **2005**. Katıların Fiziği, (Çeviren: Yoğurtçu, Y.K.), Aktif Yayınevi, Erzurum, 436 s
- Türüt, A. and Sağlam, M. **1992**.Determination of the density of Si-Metal interface states and excess capacitance caused by them. Phsica B,179-285-2.
- W. Shockley, **1950**. Electrons and Holes in Semiconductors, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey.
- Wilson,A.H. **1932**. Proc.Roy.Soc.London, SeriesA, 48, 136.
- X. Tian, Z. Xu, F. Zhang, S. Zhao, G. Yuan, J. Li, Q. Sun, Y. Wang. **2010**. Curr. Appl. Phys. 10, 129.
- Yakuphanoğlu, F. **2007**.Solar Energy Materials & Solar Cells, , 91, 1182–1186.

Yakuphanoglu, F. Kandaz, M. Senkal, B.F. **2008**. Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Al/p-type silicon/Organic semiconductor based phthalocyanine rectifier contact. *Thin Solid Films* ,516, 8793–8796.

Yakuphanoglu, F. Kandaz, M. Yarasir, M. N. Senkal, F. B. **2007**. *Physica B*, 235-238.

Z.T. Liu, H.S. Kwok, A.B. Djuricic. **2004**. *Journal of physics. D, Applied Physics* 37, 678.

ÖZGEÇMİŞ**Adı Soyadı:** Mustafa Yıldız**Doğum Yeri:** Diyarbakır**Doğum Tarihi:** 16.11.1974**Medeni Hali:** Evli**Yabancı Dil:** İngilizce**Eğitim durumu (kurum ve yıl)****Lise** : Diyarbakır Atatürk Lisesi (1989-1992)**Lisans** : Boğaziçi Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği (1992-1998)**Çalıştığı Kurumlar ve yıl:**

Öğretmen Elazığ Bilgi Eğitim Dersanesi (1998-2000)

Öğretmen Diyarbakır Bilgi Dersanesi (2001-2003)

Öğretmen Diyarbakır Kültür Dersanesi (2003-2004)

Öğretmen Diyarbakır Hedef Dersanesi (2004-2007)

Öğretmen Diyarbakır Pisagor Dersanesi (2007-2010)

Öğretmen Diyarbakır Birey Dersanesi (2011-?)