

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**KİNOLİN SARISI BİLEŞENLİ SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Ali UĞUR
DANIŞMAN: Yrd. Doç. Dr. Arife GENÇER İMER

VAN-2015

T.C.
YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**KİNOLİN SARISI BİLEŞENLİ SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Ali UĞUR

Bu çalışma YYÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı tarafından **FBE-2015-YL007**
No'lu proje olarak desteklenmiştir.

VAN-2015

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı'nda Yrd. Doç. Dr. Arife GENÇER İMER danışmanlığında, Ali UĞUR tarafından sunulan “**Kinolin Sarısı Bileşenli Schottky Diyotların Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince 04/06/2015 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile başarılı bulunmuş ve Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza:

Üye: Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK

İmza:

Üye:Yrd. Doç. Dr. Arife GENÇER İMER

İmza:

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/..... tarih ve sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza

Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

İmza

Ali UĞUR

ÖZET

KİNOLİN SARISI BİLEŞENLİ SCHOTTKY DİYOTLARIN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

UĞUR, Ali

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Arife GENÇER İMER

Haziran 2015, 70 sayfa

Bu tez çalışmasında, (100) yönelimine sahip ve öz direnci 1-10 Ω -cm olan p-Si kristali kullanılmıştır. Kinolin sarısı ($C_{18}H_{11}NO_2$, bileşiğinin 1×10^{-2} molarlık çözeltisi metanol kullanılarak hazırlanmıştır. Öncelikle, hazırlanan çözelti ile optik ve elektrik karakterizasyon ölçümleri için sırasıyla lam ve p-Si üzerine ince film kaplanmıştır. $(\alpha(h\nu))^2-h\nu$ grafiği yardımıyla kinolin sarısının (KS) yasak enerji band aralığı 2.73 eV olarak belirlenmiştir. Yüksek vakum ortamında alüminyum metali termal buharlaştırılarak Al/KS/p-Si yapısı elde edilmiştir.

Üretilen Al/KS/p-Si yapısının oda sıcaklığında karanlık ortamda akım-gerilim (I - V) ve kapasitans-gerilim (C - V) ölçümleri alınarak I - V grafiğinden diyotun doğrultucu özellik gösterdiği anlaşılmıştır. $\ln I$ - V grafiği yardımıyla ortalama idealite faktörü, ortalama engel yüksekliği değerleri sırasıyla 1.23 ve 0.76 eV olarak belirlenmiştir. Cheung ve Norde fonksiyonları yardımıyla ortalama seri direnç değerleri sırasıyla 1.002 k Ω ve 1.498 k Ω olarak hesaplanmıştır. C - V ölçümleri 0.2-3.0 MHz aralığında alınmış ve C^{-2} - V grafikleri yardımıyla engel yüksekliği hesaplanıp diğer bulgularla karşılaştırılmıştır.

Ayrıca, Al/KS/p-Si diyotunun 40-100 mW/cm² ışık şiddeti altında I - V ölçümleri alınmıştır. Işık şiddeti arttıkça ters beslem akımının arttığı gözlenmiştir. Üretilen yapının sahip olduğu fotodiyot özelliği sayesinde optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Schottky diyot, Kinolin sarısı, Cheung ve Norde fonksiyonları.

ABSTRACT

DETERMINATION OF ELECTRICAL PROPERTIES OF QUINOLINE YELLOW BASED SCHOTTKY DIODES

UĞUR, Ali

M. Sc., Department of Physics

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Arife GENÇER İMER

June 2015, 70 pages

In this study, a p-Si wafer with (100) orientation and mobility of 1-10 Ω -cm have been used. 1×10^{-2} M solution of quinoline yellow ($C_{18}H_{11}NO_2$) have been prepared with methanol. A thin film of quinoline yellow (QY) has been coated by using this solution on the glass and p-Si substrate for optical and electrical measurements, respectively. Optical energy band gap of QY have been defined as 2.73 eV by using an $(\alpha(h\nu))^2$ - $h\nu$ graph. Aluminum has been thermally evaporated on the QY thin film under high vacuum condition. Finally, the Al/QY/p-Si structure has been obtained.

The current-voltage (I - V) and capacitance-voltage (C - V) measurements of fabricated Al/QY/p-Si structure were taken under dark at room temperature. It is understood from the I - V measurements that the fabricated heterostructure showed rectification property. The mean value of ideality factor and barrier height of the diode has been defined as 1.23 ve 0.76 eV from $\ln I$ - V graphs, respectively. The mean value of series resistance of contacts has been calculated as 1.002 k Ω and 1.498 k Ω by Cheungs and Norde functions, respectively. C - V measuremants have been performed in the range 0.2-3.0 MHz, and the barrier height of diode has been recalculated by C^{-2} - V graphs and compared the previous results.

In addition, the I - V measurements of Al/QY/p-Si structure have been repeated under the light which had intensity of 40-100 mW/cm². It has been observed that the reverse bias current of the diode increased with the incresing the illumination intensity. Therefore, it can be used optoelectronic applications such as photodiode.

Key words: Schottky diode, Quinoline yellow, Cheung ve Norde functions.

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimim boyunca ve tez çalışmasında her türlü bilgi, deneyim ve yardımlarını esirgemeyen her konuda rehberlik ve fedakârlık yapan, çalışma imkânı sunan danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Arife GENÇER İMER 'e teşekkür ederim.

Öncelikle, tez çalışmama katkıları, yönlendirmeleri ve deneyimleri ile ışık tutmaları nedeniyle saygıdeğer tez jüri üyelerine teşekkür ederim.

Ayrıca lisansüstü eğitimim boyunca değerli bilgilerinden istifade ettiğim Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden sayın Prof. Dr. Bahşeli GULİYEV, Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ, Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR, Doç. Dr. Bahattin ERDİNÇ, Doç. Dr. Harun AKKUŞ, Yrd. Doç. Dr. Bahri BATI, Yrd. Doç. Dr. Emel KİLİT DOĞAN'a ve laboratuvar deneyimlerinden istifade ettiğim Dicle üniversitesi öğretim üyesi sayın Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez yazımı sürecinde, teknik desteklerini esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Mustafa TEKPINAR , Arş. Gör. Ömer Faruk ÖZDEMİR, Nurullah SELÇUK ve Abdulkadir KORKUT'a teşekkür ederim.

Bu çalışma, Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Başkanlığı (YYUBAP) tarafından FBE-2015-YL007 No'lu proje olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı YYUBAP koordinatörlüğüne ve sabırla her türlü yardımlarını esirgemeyen çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, tezin deneysel ölçümleri sırasında laboratuvar imkânlarını, teknik desteklerini ve her türlü yardımı esirgemeyen Dicle Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Araştırma Merkezi çalışanlarına, özellikle Ahmet TOMBAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans eğitimim ve çalışmalarım esnasında beni destekleyip teşvik eden eşim Yasemin UĞUR'a gösterdiği sabırdan dolayı teşekkür ederim.

2015

Ali UĞUR

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ.....	3
3. TEORİK BİLGİ.....	7
3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	7
3.2. Metal p-tipi Yarıiletken Kontaklar.....	11
3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar.....	11
3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak.....	13
3.2.3. Metal p-tipi yarıiletken metal yapısı.....	14
3.3. Metal-Yarıiletken Kontaklarda Akım İletim Mekanizmaları.....	15
3.3.1. Termiyonik emisyon teorisi.....	15
3.3.2. Difüzyon teorisi.....	16
3.3.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi.....	17
3.3.4. Cheung fonksiyonları yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesi.....	18
3.3.5. Norde fonksiyonları yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesi.....	21
3.3.6. Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda Schottky kapasitesi.....	25
3.4. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri.....	29
3.4.1. Yarıiletkenlerde soğurma olayları.....	30
3.4.2. Doğrudan bant geçişi.....	32
3.4.3. Dolaylı bant geçişi.....	33

3.5. Fotoelektrik Özelliklerin Belirlenmesi.....	34
3.5.1. Hava kitlesi.....	34
3.5.2. Güneş pillerinin karakterizasyonu.....	36
4. MATERYAL ve METOD.....	41
4.1. Giriş.....	41
4.2. Kinolin Sarısı Molekülü.....	41
4.3. Kinolin Sarısı Molekülünün Optik Ölçümlerinin Alınması.....	42
4.4. Yarıiletkenin Temizlenmesi.....	43
4.5. Kontakların Üretimi.....	44
4.5.1. Al omik (alt) kontağın yapılması.....	44
4.5.2. Al doğrultucu (üst) kontakların yapılması.....	47
4.5.3. Akım-gerilim ölçümlerinin alınması.....	48
4.5.4. Kapasitans-gerilim ölçümlerinin alınması.....	49
5. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	51
5.1. Giriş.....	51
5.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi.....	51
5.2.1. Kinolin sarısı molekülünün soğurma karakteristiği.....	51
5.2.2. Optik metot yardımıyla E_g nin belirlenmesi.....	52
5.3. Al/Kinolin Sarısı/p-Si Diyotunun Akım-Gerilim Karakteristiği.....	53
5.3.1. Cheung fonksiyonları ile karakteristiklerin belirlenmesi.....	55
5.3.2. Norde fonksiyonu ile karakteristiklerin belirlenmesi.....	59
5.4. Al/Kinolin Sarısı/p-Si Diyotunun Kapasite-Gerilim Karakteristiği.....	61
5.5. Fotoelektriksel Özelliklerin İncelenmesi.....	63
6. SONUÇLAR.....	65
KAYNAKLAR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	71

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Kinolin sarısı ile ilgili özellikler.....	42
Çizelge 5.1. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının $\ln(I)$ - V grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri.....	54
Çizelge 5.2. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri.....	58
Çizelge 5.3. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının Norde fonksiyonları ile hesaplanan elektriksel parametreleri.....	60
Çizelge 5.4. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} - V grafiği yardımıyla hesaplanan elektriksel parametreleri.....	63
Çizelge 5.5. Al/KS/p-Si diyotunun farklı ışık şiddeti altındaki karakteristik güneş pili parametreleri.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Metal-yarıiletken kontak şeması.....	8
Şekil 3.2. Özgün yarıiletken enerji-bant yapısı.....	9
Şekil 3.3. P-tipi ve n-tipi katkılı yarıiletken enerji-bant yapısı.....	10
Şekil 3.4. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontağın enerji-bant diyagramı a) Kontakdan önce, b) Kontakdan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ durumunda.....	12
Şekil 3.5. Metal p-tipi Yarıiletken Omik Kontakın Enerji Bant Diyagramı a) Kontakdan Önce, b) Kontakdan Sonra, c) $V > 0$ Durumunda ve $V < 0$ Durumunda.....	13
Şekil 3.6. P^+ PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı..	14
Şekil 3.7. Düz beslem altındaki metal/yarıiletken kontakta imaj kuvvet azalma etkisi.....	15
Şekil 3.8. Metal p-tipi yapılarda doğrultucu kontağın a) potansiyel dağılımı ve b) yük dağılımı.....	26
Şekil 3.9. Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması.....	30
Şekil 3.10 Uyarılmış elektronun valans banda geçerken bir foton yayınlanması.....	30
Şekil 3.11 Yarıiletkende temel soğurma spektrumu.....	31
Şekil 3.12 Doğrudan ve dolaylı bant geçişleri.....	33
Şekil 3.13 Hava kitle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi...	35
Şekil 3.14 Siyah cisim ışıması, AM0 ve AM1.5 spektrumlarının spektral ışıması.....	36
Şekil 3.15 a) Bir güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi b) akım-gerilim grafiği	37
Şekil 3.16 Güneş pilinde karakteristik akım-gerilim grafiği.....	38
Şekil 3.17 Güneş pilinde pilde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi	39
Şekil 3.18 a)Güneş pili üzerine paralel direnç etkisi ($R_s=0$ durumunda) b) Güneş pil üzerine seri direnç etkisi ($R_p=\infty$ durumunda).....	39
Şekil 4.1. Kinolin sarısının moleküller yapısı.....	41
Şekil 4.2. UV-Vis optik soğurma ölçüm cihazı.....	43
Şekil 4.3. Termal buharlaştırma cihazı.....	45

Şekil 4.4. Tavlama işleminin gerçekleştirildiği fırın.....	46
Şekil 4.5. İnce filmin oluşturulduğu dönel kaplama cihazı.....	47
Şekil 4.6. Al/ KS/p-Si diyotunun şematik gösterimi ve SEM fotoğrafı.....	48
Şekil 4.7. I - V ölçümünde kullanılan Keitley 6487 picoampermeter/voltaj kaynağı...	48
Şekil 4.8. C - V ölçümünde kullanılan HP 4294A impedans analizör cihazı.....	49
Şekil 5.1. Kinolin sarısı molekülünün soğurma spektrumu.....	52
Şekil 5.2. Kinolin sarısı molekülünün $(a(h\nu))^2-h\nu$ grafiği.....	52
Şekil 5.3. Oluşturulan tüm Al/ KS /p-Si diyotlarının $\ln(I)$ - V grafiği.....	54
Şekil 5.4. a) Al/ KS/ p-Si yapısı 1 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.....	56
Şekil 5.4. b) Al/ KS/ p-Si yapısı 2 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.....	56
Şekil 5.4. c) Al/ KS/ p-Si yapısı 3 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.....	57
Şekil 5.4. d) Al/ KS/ p-Si yapısı 4 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.....	57
Şekil 5.4. e) Al/ KS/ p-Si yapısı 5 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.....	58
Şekil 5.5. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si yapısı diyotlarının $F(V)$ - V grafiği.....	60
Şekil 5.6. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C - V grafiği.....	62
Şekil 5.7. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} - V grafiği.....	63
Şekil 5.8. Al/KS/p-Si/diyotunun, güneş similatörü altında farklı ışık şiddetlerinde elde edilen $\ln(I)$ - V grafikleri.....	64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
Φ_b	Schottky engel yüksekliği
n	İdealite faktörü
R_s	Seri direnci
Φ_e	Etkin engel yüksekliği
Φ_{po}	Boşluk için engel yüksekliği
I_o	Ters beslem doyma akımı
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ^e	Elektron yakınlığı
E_c	İletkenlik band kenarı
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_d	Donor enerji seviyesi
E_s	Yarı iletken enrji seviyesi
V_i	Kontak potansiyel farkı
V_F	Kontaga uygulanan doğru beslem gerilimi
V_R	Kontaga uygulanan ters beslem gerilimi
V_{dif}	Difüzyon potansiyeli
I_n	Toplam akım yoğunluğu
J_o	Akım yoğunluğu
A^*	Richardson sabiti
W_D	Tükenim bölgesi kalınlığı
V	Uygulanan gerilim
$F(V)$	Norde fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron yakınlığı
N_d	Verici (donor) yoğunluğu
N_a	Alıcı (akseptör) yoğunluğu

Simgeler**Açıklama**

N_c	İletkenlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu
N_v	Değerlik bandının etkin taşıyıcı yoğunluğu
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_i	Yalıtkan tabakanın dielektrik sabiti
E_g	Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
A^{**}	Etkin Richardson sabiti
k	Boltzmann sabiti
T	Mutlak sıcaklık
I_{ph}	Işık tarafından oluşturulan akım
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_m	Maksimum akım
P_{max}	Maksimum güç
V_{oc}	Açık devre gerilimi
η	Güneş pilinin enerji dönüşüm verimi
$\rho(x)$	Uzay yükü yoğunluğu
$\psi(x)$	Potansiyel fonksiyonu
$h\nu$	Foton enerjisi
E_i	Yarı iletken ilk enerjisi
E_s	Yarı iletken son enerjisi
m_e^*	Elektronun etkin kütlesi
m_h^*	Boşluğun etkin kütlesi
α_s	Soğurma katsayısı
α_e	Yayılma katsayısı
E_{ph}	Fonon enerjisi
H	Cismin boyu
L	Gölge boyu

Kısaltmalar**Açıklama****KS**

Kinolin sarısı

C-V

Kapasitans- gerilim

I-V

Akım-gerilim

MIS

Metal-Yalıtkan Yarıiletken

MS

Metal-Yarıiletken

SD

Schottky diyot

TE

Termiyonik Emisyon

TED

Termiyonik Emisyon Difüzyon

Al/p-Si/Al

Alüminyum(Omik Kontak) p-Tipi Silisyum

(Doğrultucu Kontak) Alüminyum

1.GİRİŞ

Yarıiletken inorganik malzemelerin temel özellikleri ve uygulamaları yıllardan beri geniş araştırma konusu olmuştur. Elektronik ve optoelektronik cihazlarda gün geçtikçe kullanımı artan bu yapılar ayrıca sanayi ve ekonomik alanda da oldukça önemli bir paya sahiptir. Yarıiletken malzemeler dediğimizde ilk aklımıza gelen silisyum, germanyum, galyum arsenik, indiyum fosfat gibi inorganik kristal malzemelerdir. Silisyum doğada bol miktarda bulunmasından dolayı yarıiletken teknolojisinde silisyum tabanlı devre elemanı üretimi ve kullanımı oldukça yaygındır. Üretilen bir devre elemanının çalışma performansının artırılması için öncelikle karakteristik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu nedenle, yarıiletken teknolojisinde temel yapı elemanlarının fiziksel, optik ve elektronik özelliklerini incelemek için metal yarıiletken kontaklarla ilgili araştırmalar her geçen gün artmaktadır. Bu araştırmaların bir kısmı farklı metotlarla mikro/nano boyut yarıiletken filmler üretme alanında yapılırken, bir kısmı da teknolojik geniş uygulama alanları sebebiyle Schottky diyotların elektriksel karakteristiklerinin doğası ve modifiye edilebilirliği konusunda yoğunlaşmıştır.

Metal-yarıiletken Schottky kontaklarda elektriksel iletkenlik p-n eklem diyotlardan farklı olarak çoğunluk taşıyıcılarla sağlanır. Bu sebeple açma kapama zamanı çok kısa olup yüksek frekanslarda çalışabilirler. Bu yüksek anahtarlama hızı sayesinde birçok elektronik devre elemanının oluşumunda kullanımı artmıştır. Örneğin, mikrodalga karıştırıcılar, detektörler, hızlı anahtar uygulamaları, varaktör, güneş pilleri gibi. Bilindiği üzere Schottky diyotların elektriksel parametrelerini ara yüzey özellikleri etkiler ve diyot karakteristiğini belirlemede önemli rolü vardır. Son zamanlarda ara yüzey tabaka olarak organik malzemelerin kullanıldığı Schottky kontakların elektrik ve fotovoltaiik özellikleri hakkında yapılan çalışmalarda dikkat çekici bulgular elde edilmiştir. Schottky kontakların barrier yüksekliğinin değişimi ve Schottky tipi güneş pillerinde açık devre voltajı ve pil verimliliğinin artması için organik malzemelerin metal ve inorganik yarıiletken arasında ara yüzey tabaka olarak kullanılabildiklerine dair pek çok rapor yayınlanmıştır. Ayrıca organik ara yüzey tabaka varlığı nedeniyle metal-yarıiletken (MS) kontağın metal ara bölge yarıiletken (MIS) kontağa dönüştürdüğü gösterilmiştir. Organik malzemelerin yasak enerji aralıklarının farklı değerler alması, maliyetlerinin ucuz olması ve farklı amaçlara uygun olarak farklı

özellikte kolaylıkla sentezlenebilir olması organik moleküllerin devre elemanları tasarımında tercih edilmelerine neden olmaktadır.

Bu çalışmada hedeflenen, kinolin sarısı molekülü kullanılarak doğrultucu kontak üretilebilirliği ve kontak karakteristiklerinin organik materyal yardımıyla modifiye edilebilirliği yarı iletken aygıt üretimi açısından çok büyük öneme sahiptir. Bu çalışmanın amacı, π bağları açısından zengin kinolin sarısı molekülü kullanarak ara yüzey tabakalı kontaklar oluşturup, bu kontakların doğrultucu ya da omik özelliklerini incelemek ve akım-gerilim (I - V) ve kapasitans-gerilim (C - V) ölçümlerini alarak, grafikler yardımıyla ve hesaplamalarla karakterizasyon işlemlerini yapmaktır. Bu bağlamda, öncelikle p-Si altta RCA işlemine göre temizlendikten sonra mat yüzeyi üzerine vakum cihazında Al metali kaplandı. Daha sonra numune 450 °C sıcaklığında 15 dakika süreyle azot gazı ortamında fırında tavlandı. Böylece aygıtın omik kontağı hazırlanmış oldu. Elde edilen bu kontakta sonra, p-Si'un parlak yüzeyine dönöl kaplama yöntemi ile KS ince filmi oluşturuldu. Sonra tekrar vakum cihazına yerleştirilen numunenin üstüne Al buharlaştırılarak Al/KS/p-Si/Al diyotu hazırlandı. Diyotun karanlık ortamdaki akım gerilim (I - V) ölçümleri yardımıyla doğrultucu özelliğe sahip olduğu gözlemlendi. Bu ölçümler kullanılarak elektriksel parametreleri (idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnci) hesaplandı. Ayrıca, Al/KS/p-Si/Al diyotunun kapasite gerilim (C - V) ölçümleri yardımıyla elektriksel özellikleri incelendi ve elde edilen bulgular I - V verilerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldı. Bunlara ek olarak, diyotun fotoelektrik özelliklerini incelemek için güneş simalatörü altında I - V ölçümleri alındı. Kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri belirlendi. Elde edilen sonuçlardan Al/KS/p-Si/Al yapısının fotodiyot, fotodedektör, fotosensör ve güneş pili uygulamalarında kullanılabilirliği ortaya koyuldu.

2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

Metal-yarıiletken kontaklar konusundaki bilgiler 19. yüzyıla dayanmaktadır. Konu üzerindeki sistemli çalışmalar yirminci yüzyılda yapılmıştır. Metal yarıiletken (MS) kontak diyotlarla ilgili ilk çalışma 1874 yılında Braun'un metal sülfat kristallerinde elektriksel iletkenliğin asimetrik olduğunu bulmasına dayanır.

1895 yılında Marconi'nin radyo iletişimi üzerine yaptığı deneyler Braun'un dikkatini çekmiş ve bu deneylerden yola çıkan Braun, Marconi'nin sonuçlarını nokta kontak metal-yarı iletken doğrultuculara ve detektörlere başarıyla uygulamıştır.

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda engel yüksekliğini, iş fonksiyonunu ve ara yüzey hallerini dikkate alarak incelemişler (Crowell ve Sze, 1965a).

Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termiyonik emisyon teorilerini birleştirerek (emisyon-difüzyon teorisi) ortaya koymuşlardır (Crowell ve Sze, 1965b).

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 M/S ara yüzeyinde bir potansiyel engeli oluştuğunu ilk defa Schottky ortaya koydu ve bundan dolayı bu kontaklara bu bilim adamına atfen "Schottky diyotları" denilmeye başlandı. 1938 yılında ise Schottky (1938) ve Mott (1938) birbirinden bağımsız olarak potansiyel engel (Φ_b) oluşumunun, metal ve yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farkın (Φ_m ve Φ_s) sonucu olduğunu belirtti.

Guliyev (1985), ince filmlerde elektron taşınma olaylarını incelemiştir. Ayrıca ince filmlerde iletkenliğin düşük manyetik alanlarda, manyetik alanın karesiyle orantılı olarak değiştiğini ortaya koymuştur.

Türüt ve arkadaşları (1996) ara yüzey oksit tabakalı ve ara yüzey tabakasız Al/p-Si Schottky diyotlarında ara yüzey halleri ve ara yüzeydeki sabit yükleri dikkate alarak, I - V ve C - V karakteristiklerini inceleyip, engel yüksekliği, idealite faktörü ve ara yüzey durum yoğunluklarını tespit etmişlerdir. Ara yüzey hallerinin, metal-yarıiletken kontaklarda ters besleme karşı ölçülen $1/C^2$ diyagramında bükülmeye sebep olup, C - V

karakteristiklerini etkileyebileceği Szatkowski ve Sieranski tarafından deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

Türüt ve Sağlam (1996), metal yarıiletken kontaklarda ara yüzey hal yoğunluğunu ve bunun sebep olduğu artık sığayı deneysel olarak incelemişler ve bu sığanın, frekansın artmasıyla azaldığını, yani ara yüzey hal yoğunluğunun artan frekansla azaldığını kaydetmişlerdir.

Çetinkara ve ark. (1999), Au/n-Si Schottky diyotlarında, kontakten önce yüzeyde oluşan doğal oksidin diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Omik kontakten sonra numuneyi parçalara ayırarak, bunlardan bir parçasını en kısa sürede hiç bekletilmeden Schottky kontak yapıp, bu numuneyi referans olarak kabul etmişlerdir. Daha sonra diğer numuneleri değişik sürelerde hava ortamında beklettikten sonra, bunlara da Schottky kontak yapıp, referans numune ile bu numuneleri engel yükseklikleri bakımından karşılaştırmışlar ve yüzeylerin hava ortamında kalma süreleri arttıkça, engel yükseklikleri de artarak referans numunenin engel yüksekliğine yaklaştığını kaydetmişlerdir.

Temirci ve ark. (2001), yüksek engelli ve yüzey pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky diyotlar elde etmek için anodik oksidasyon yöntemini kullanmışlar. Omik kantağı oluşturulmuş olan p-Si kristalinin parlak yüzeyi üzerine oksit tabakası oluşturmak üzere 0.1 molarlık KOH çözeltisinde anot olarak bağlayarak, p-tipi Si üzerine anodizasyon metoduyla çok ince bir oksit tabakası oluşturduktan sonra Schottky diyotları üretilmiştir. Üretilen numunelerin ölçümlerinden elde edilen elektriksel karakteristikleri net olarak ortaya koyabilmek ve karşılaştırma yapabilmek için, referans p-Si Schottky diyotların yanı sıra yüzeyi anodizasyon metoduyla pasifize edilmiş numuneler hazırlanarak I - V , C - V ve G - V ile C - f karakteristiklerinden numunelerin idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve diğer Schottky parametreleri belirlenip karşılaştırılmıştır. Yüzeyi anodik oksidasyon yöntemiyle pasifize edilmiş numunenin idealite faktörü 1'e çok yakın bir değer olarak elde edilirken, anodik oksit tabakalı numunenin ise en büyük engel yüksekliği değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

1977 yılında, ünlü fizikçiler Alan Heeger, Alan G. Mac Diarmid ve Hideki Shirakawa'nın, polimerlerin elektriksel özellikleri üzerine yaptığı çalışmalar bilim alanında 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 materyallerin sahip oldukları yapısal değiştirilebilirliği, ucuz üretim maliyeti, sentezlenme kolaylığı ve büyük yüzey alanına sahip aygıt üretimine elverişliliği gibi nitelikleri sayesinde günümüz elektronik teknolojisinde çok çeşitli uygulamaları vardır. Organik bileşenli aygıt üretimi oldukça yeni bir çalışma alanıdır.

Sharma (1995), Al/ClAlpc/ITO, In/ClAlpc/ITO ve Au/ClAlpc/ITO yapılarını üreterek bunların elektriksel özelliklerini incelemiştir. Au/ClAlpc/ITO yapısının dışında diğerlerinin doğrultucu özellik gösterdiğini belirlemiştir. Au/ClAlpc/ITO yapısının doğrultucu özellik göstermemesinin ClAlPc organiğinin p-tipi yarıiletken davranış sergilediğinden kaynaklandığını belirtmiştir.

Yakuphanoglu ve ark. (2007), Au/CuPc/p-Si yapısını üretilip, yapının elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonunu incelemiştir. Yapılan ölçümler sonucunda diyotun idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 2.38 ve 0.71 eV olduğu tespit edilmiştir. Işık altında alınan $I-V$ ölçümleri sonucunda yapının fotodiyot özelliği gösterdiği bildirilmiştir.

Kılıçoğlu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, metilen kırmızısı kullanılarak üretilen Al/MR/p-Si diyotunun $I-V$ ve $C-V$ ölçümleri alınmıştır. Diyotun doğrultucu özellik gösterdiği ve idealite faktörü ve engel yüksekliğinin sırasıyla 1.21 ve 0.821 eV olarak kapasite gerilim ölçümleri yardımıyla hesaplandığı belirtilmiştir (Kılıçoğlu ve ark., 2007).

Ocak ve arkadaşları metilen mavisini ara yüzey tabakası olarak kullanıp Sn/MB/p-Si diyotunu üreterek, diyotun elektriksel parametrelerini belirlemek için $I-V$ ve $C-V$ ölçümleri yapmıştır. Elde edilen bulgular sonucunda metilen mavisinin engel yüksekliğini ciddi oranda değiştirdiğini, diyot karakteristiğine etki ettiğini göstermiştir (Ocak ve ark., 2009).

Akkılıç ve ark. (2010), Cu(II)/n-Si/AuSb kontak üretilip, $I-V$ karakteristiğini inceleyerek yapının doğrultucu özellik gösterdiğini rapor etmiştir. Farklı metotlar kullanarak Schottky diyotun elektriksel parametrelerini hesaplayıp karşılaştırılmış ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu belirtmiştir. İdealiteden sapma nedenini doğal ara yüzey tabakası varlığına ve yüksek seri direnç etkisine atfetmiştir.

Temirci ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Cu(II)-APTH ve Co(II)-APTH organiklerini kullanarak Schottky kontaklar üretilip, elektriksel özellikleri incelenmiştir. Co(II) kompleksin kullanıldığı diyotun karakteristik parametreleri 5 farklı numune için hesaplanmıştır. Kontakın doğrultucu özellik gösterdiği belirtilmiş ve doğrultma oranı 6.55×10^3 olarak hesaplanmıştır (Temirci ve ark., 2010; 2011).

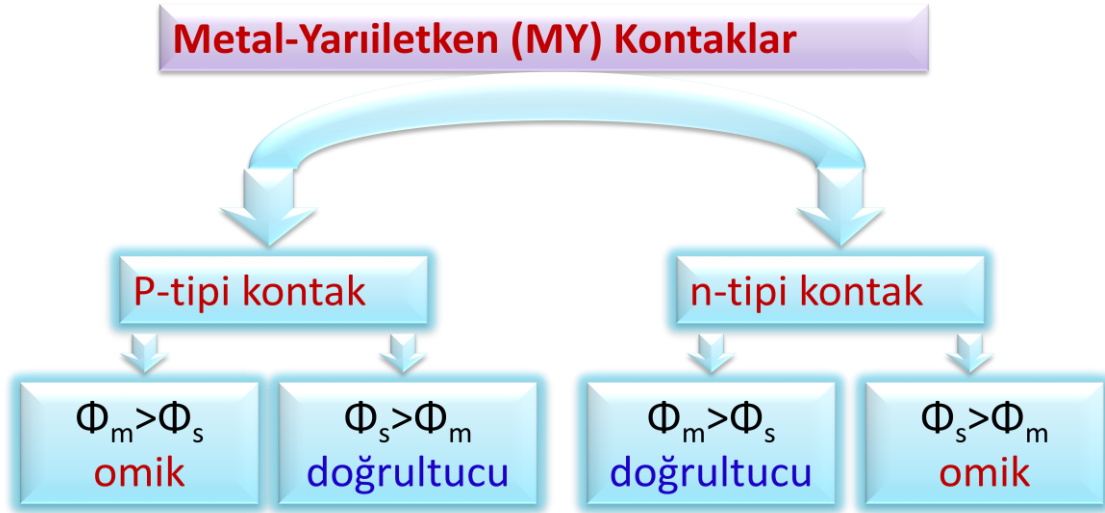
Tombak ve ark. (2014), metal ile inorganik yarıiletken ara yüzeyinde komarin 30 boyası ile ince film oluşturup, üretilen aygıtın sıcaklık bağımlı *I-V* ölçümleri almışlar. Elde edilen bulgular ışığında diyotun engel yüksekliği sıcaklıkla artarken, seri direnin sıcaklıkla azaldığını belirtmişlerdir.

Gencer Imer ve ark. (2014), Pt(II)-APTH molekülünü ara yüzey tabakası olarak kullanmış ve bu diyotun *I-V* ölçümlerini almıştır. Diyotun doğrultucu özellik gösterdiğini, doğrultma oranının 4.40×10^2 olduğunu, ortalama engel yüksekliği değerinin 0.765 eV olduğunu kaydetmişlerdir.

3.TEORİK BİLGİ

3.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ile yarıiletkenin belirli şartlar altında biraraya getirilmesi ile kontak oluşturulur. Kontak; ideal şartlarda maddelerin sıfır dirençle birbirine temas ettirilmesidir. Normal şartlarda kontak haline getirilen maddelerin yüzeylerinin temiz, oksitsiz, parlak ve pürüzsüz olması istenilen bir durumdur. Metal, yarıiletken ile kontak oluşturulduğunda termal denge kuruluncaya kadar metal ile yarı iletken arasında yük geçişleri olur. Metalden yarıiletkene, yarı iletkeniden metale elektron geçişi, metal ile yarıiletkenin Fermi enerji düzeylerinin eşit olduğu termal denge durumuna kadar devam eder. Böylece metal yarıiletken ara yüzeyinde yüklerin ayrılması ve yeniden dağılmasıyla yeni bir potansiyel engeli oluşur. Ara yüzey bölgesi, yarıiletken tarafında oluşan ve hareketli yüklerin olmadığı yüksek dirençli bir bölgedir. Metal-yarıiletken ara yüzeyinde bir potansiyel engel oluştuğunu ilk olarak Schottky, eklemde oluşan bu potansiyelin metal ile yarıiletken iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklandığını ise Mott açıklamıştır. Daha sonra bu teoriler birleştirilerek Schottky-Mott adını almıştır. Schottky-Mott teorisine göre potansiyel engeli, metal ile yarı iletkenin iş fonksiyonları arasındaki fark sebebiyle oluşur (Sharma, 1984). 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 grupta incelenir. Bu durum aşağıdaki gibi özetlenebilir.



Şekil 3.1. Metal-yarıiletken kontak şeması.

Metal p-tipi yarıiletken kontaklara geçmeden önce bu konuda sıkça kullanılan bazı kavramları tanımlayalım.

Metalin iş fonksiyonu (Φ_m): Bir elektronu Fermi enerji seviyesinden vakum seviyesine çıkarmak için veya serbest hale getirmek için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Yarıiletkenin iş fonksiyonu (Φ_s): Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır. Fermi enerjisi, katkılanan atomların yoğunluğu ile değiştiği için Φ_s de değişen bir özelliktir.

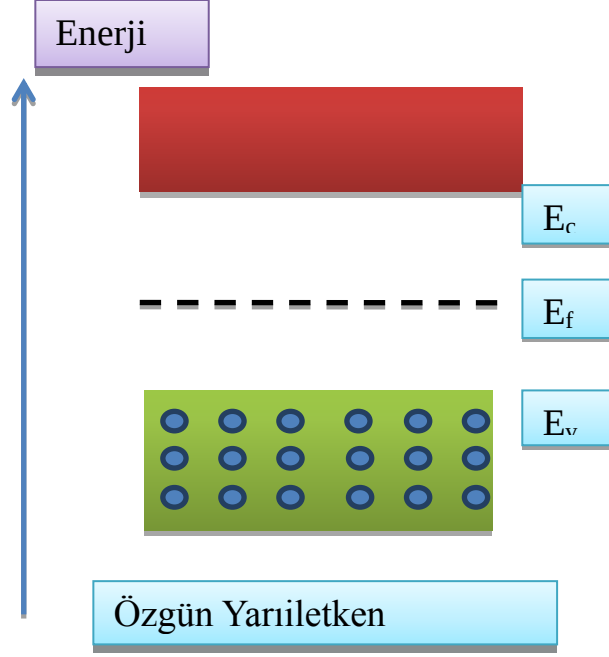
Fermi enerjisi (E_f): Fermi enerjisi mutlak sıfır sıcaklığında ($T=0$ Kelvin) en son dolu enerji seviyesindeki elektronun enerjisine denir. Fermi enerjisinin üstündeki bütün seviyeler boştur.

Yarıiletkenin elektron yatkınlığı (χ): Yarıiletkenin vakum seviyesi ile iletkenlik bandı arasındaki enerji seviyeleri farkıdır ve χ ile gösterilir.

Vakum seviyesi: Bir metalin en dışındaki sıfır kinetik enerjili bir elektronun enerji seviyesi veya bir elektronu yüzeyden koparıp serbest hale gelmesi için ihtiyaç duyulan minimum enerji miktarıdır.

Katkılı yarıiletkenler: Yarıiletkenleri içinde bulundurdıkları atomlara göre **Özgün** veya **Katkılı** olmak üzere iki grupta inceleyebiliriz.

a) Özgün Yarıiletkenler: Aynı cins atom veya atom gruplarından oluşmuş, içerisinde herhangi bir yabancı atom bulundurmeyan yarıiletkenlerdir. Özgün yarıiletkende elektronların ve boşlukların sayıları birbirine eşittir. Fakat, yarıiletkenlerin günlük hayattaki pratik amaçlara yönelik kullanılabilmesi için katkılanmaları gerekir.



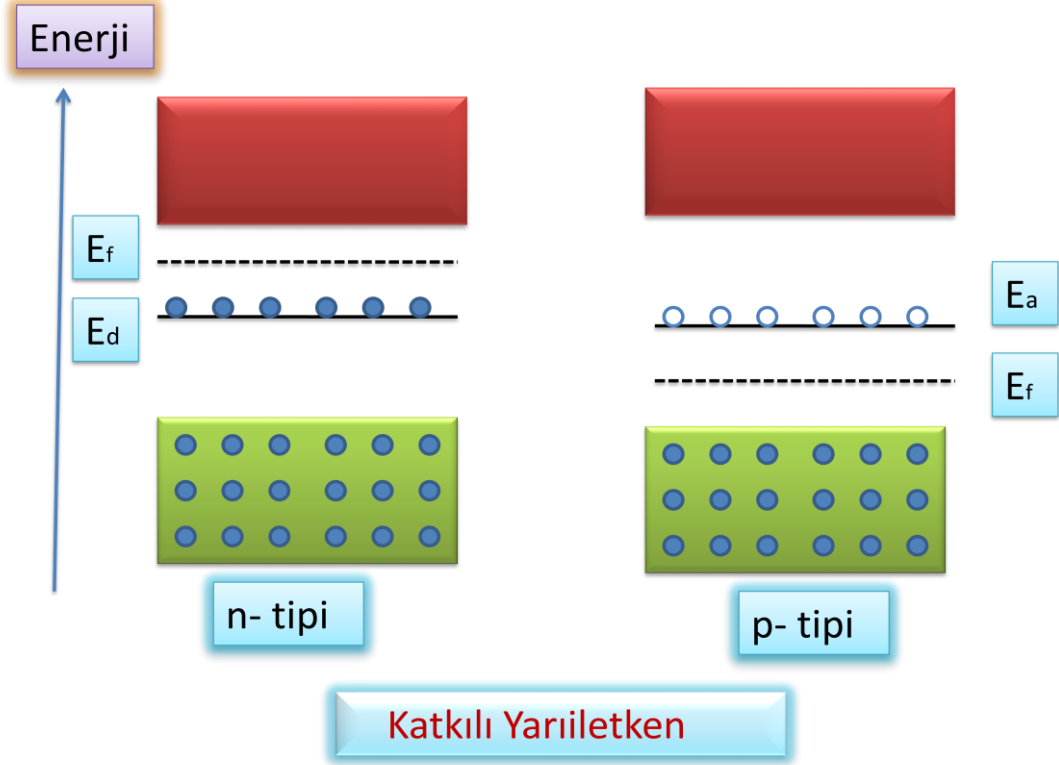
Şekil 3.2. Özgün yarıiletken enerji-bant yapısı.

b) Katkılı yarıiletkenler: Yarıiletkenlerde iki tip katkılama yapılmaktadır. Bunlar n-tipi ve p- tipi katkılama olarak adlandırılır.

n-tipi katkılama: Fosfor, Arsenik veya Antimon gibi beş değerlikli bir atom, Silisyum veya Germanyum kristalinde normal atomların yerleştiği örgü noktalarından birine yerleşirse; bu yabancı atom en yakın komşuları olan dört atomla kovalent bağ oluşturduktan sonra geriye bir değerlik elektronu kalır. Yani katkı atomunun beşinci değerlik atomu bağa giremez ve iletim elektronu olarak kristalin içinde serbestçe hareket edebilir hale gelir.

Bu durumda 1 elektronunu kaybeden katkı atomu artı yüklü hale gelir. Yarıiletken kristale elektron veren bu tür atomlara verici (donor) atomlar denir. Her bir verici (donor) atom kristale fazladan 1 elektron kattığı için kristalde (-) yüklü taşıyıcı

yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere n-tipi katkılı yarıiletkenler denir ve bu tip yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcı elektronlardır.



Şekil 3.3. p-tipi ve n-tipi katkılı yarıiletken enerji-bant yapısı.

p-tipi katkılama: Silisyum veya Germanyum yarıiletkenine B, Al, Ga veya In gibi 3 değerlikli elementler katılırsa bu atomlar ana yarıiletkenin örgü noktalarına yerleşirler. Katkı atomu en yakın komşuları olan dört atomla yapacağı dört kovalent bağdan birinde bir elektron eksik kalır. Bu eksiklik başka bağdan ayrılan bir elektron tarafından tamamlanır. Böylece elektronun ayrıldığı yerde bir boşluk oluşur. Oluşan boşluk ise kristalin içinde serbestçe hareket edebilir durumdadır.

Elektron kazanan katkı atomu eksi yüklü hale gelir. Kristalden elektron aldığı için bu tür atomlara alıcı (akseptör) atomlar denir. Her bir alıcı atom (akseptör) atom kristalden 1 elektron aldığı için kristalde (+) yüklü boşlukların yoğunluğu artmış olur. Bu tür katkılanmış yarıiletkenlere p-tipi katkılı yarıiletkenler denir ve bu tip yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcı boşluklardır.

3.2. Metal p-tipi Yarıiletken Kontaklar

Metal p-tipi yarıiletkenlerde akıma katkısı büyük oranda çoğunluk taşıyıcıları olan boşlukları sağlamaktadır. Metal p-tipi yarıiletkenin omik ya da doğrultucu kontak olmasını metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları belirler. Şekil 3.1’de de gösterildiği gibi $\Phi_m > \Phi_s$ ise omik, $\Phi_s > \Phi_m$ ise doğrultucu kontak oluşur.

3.2.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu kontaklar

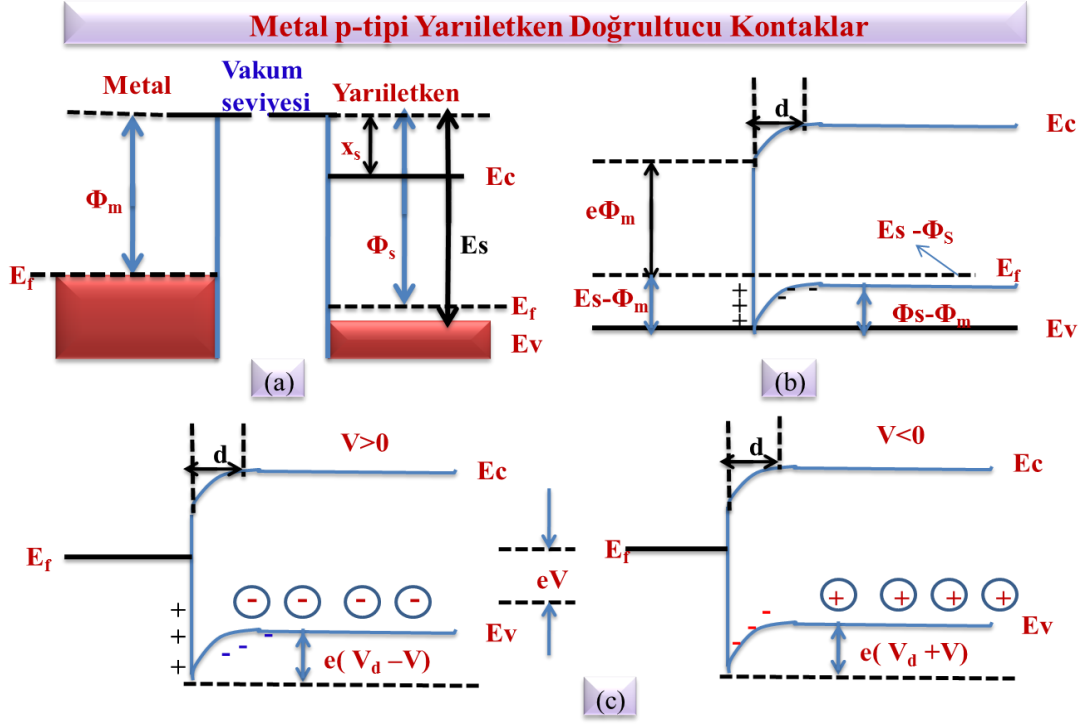
Akım taşıyıcıları (boşluk ve elektron) bir doğrultudan diğerine göre daha kolay geçiyorsa bu tür kontaklara doğrultucu kontak denir. Metal p-tipi yarıiletken kontaklarda, $\Phi_s > \Phi_m$ ise doğrultucu kontak (Schottky kontak) oluşur. Şekil 3.4.a’da görüldüğü gibi kontakdan önce yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır. Kontakdan sonra p-tipi yarıiletken ve metal arasında yük akışı meydana gelir. Şekil 3.4.b’de görüldüğü gibi bu yük akışı yarıiletkenin ve metalin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Elektronlar metalden ayrıldığında geride pozitif yük fazlalığı meydana gelir. Metalin elektron sayısı yarıiletkenin elektron sayısından fazla olduğundan dolayı ara yüzeyde bir yük fazlalığı meydana gelecektir. Yarıiletken kısmına geçen elektronlar oradaki boşlukları iyonize ederler. Elektronlar, yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcısı olan boşluklarla birleşerek sadece yüklü alıcı iyonlardan yani akseptörlerden oluşan ve bu nedenle yük taşıyıcıdan yoksun d genişliğinde bir arınmış bölge oluşur. Böylece metal yüzeyi ile yarıiletken arasında uzay yükü bölgesinde; metalden yarıiletkene doğru bir elektriksel alan dolayısıyla bir potansiyel oluşur. Yarıiletken tarafındaki boşluklar için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \quad (3.1)$$

olur. Burada V_{dif} difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisinde bu potansiyel metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındakideşikler için engel yüksekliği; ise

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad \text{dir.} \quad (3.2)$$

Metal kısma negatif bir dış gerilim ($-V$) uygulandığında kavşak doğru beslemde olur. Kavşağın potansiyel engeli $e(V_{\text{dif}} - V)$ kadar iner. Bunun sonucunda daha çok elektron metalden p-tipi yarıiletkenine geçer. Böylece p-tipi yarıiletkeniden metale net bir akım meydana gelecektir.



Şekil 3.4. Metal p-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontakın Enerji Bant Diyagramı
a) Kontak öncesi, b) Kontak sonrası, c) $V>0$ durumunda ve $V<0$ durumunda.

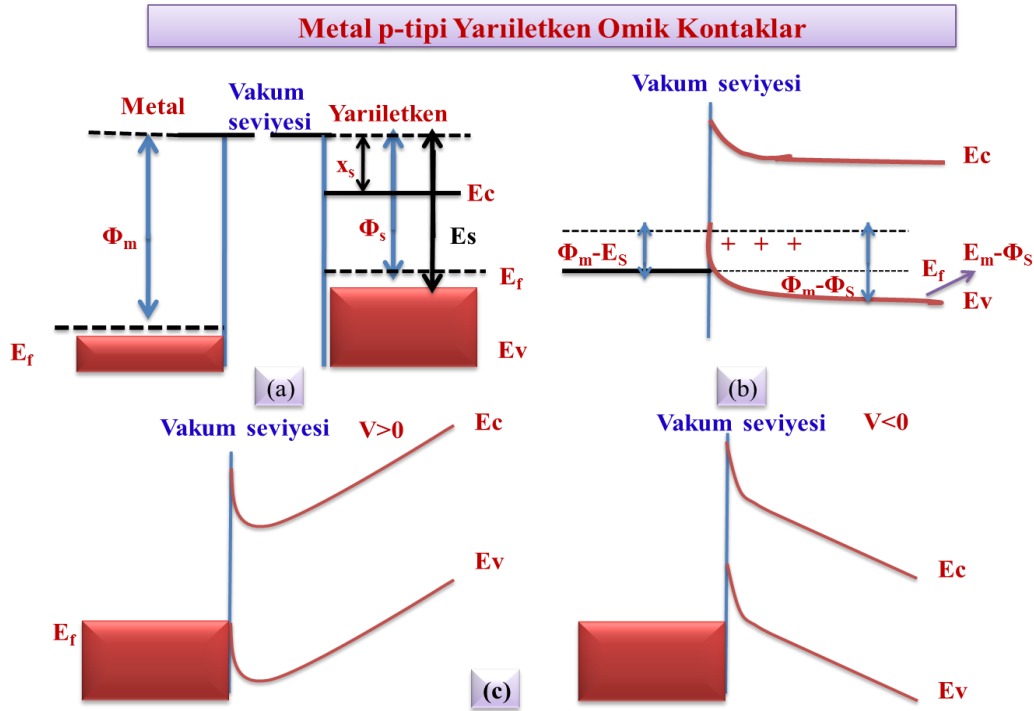
Uygulanan potansiyel ters çevrilirse yani kontak ters beslem durumunda olursa, kavşaktaki potansiyel engeli $e(V_{\text{dif}} + V)$ kadar olacaktır. Bu engel metalden yarıiletkenine geçen elektron sayısını azaltacak ve kavşaktan denge durumuna göre çok küçük bir akım geçmiş olacaktır. Bundan dolayı p-tipi yarıiletken-metal kavşağının doğrultucu özellik gösterdiği bilinir. Akımda, uygulan bu potansiyelden dolayı $\exp[eV/kT]$ çarpanı kadar bir değişim meydana gelecektir. Meydana gelen net akım ise;

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

denklemleri ifade edilir.

3.2.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak

Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük ise $\Phi_m > \Phi_s$ omik kontak oluşur. Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir metal-yarıiletken eklemdir. Kontakta önce Şekil.3.5.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalinkinden daha yukarıdadır. Bundan dolayı kontakta sonra yük değişimi meydana gelir. Yarıiletken tarafındaki elektronların bir kısmı metal tarafına geçiş yapar. Bu elektron akışı metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder.



Şekil 3.5. Metal p-tipi Yarıiletken Omik Kontakın Enerji Bant Diyagramı a) Kontakta önce, b) Kontakta sonra, c) $V > 0$ durumunda ve $V < 0$ durumunda.

Şekil.3.5.b'de görüldüğü gibi yarıiletkenin enerji seviyeleri, metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşit oluncaya kadar, $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı iner. Ve yarıiletken kısmında boşluk konsantrasyonu artar. P-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıların boşluklar olmasından dolayı yarıiletkenin daha fazla p-tipi olduğu söylenebilir. Burada meydana gelen yük bölgelerinin ikisi de yüzey yükü niteliğindedir. Doğrultucu

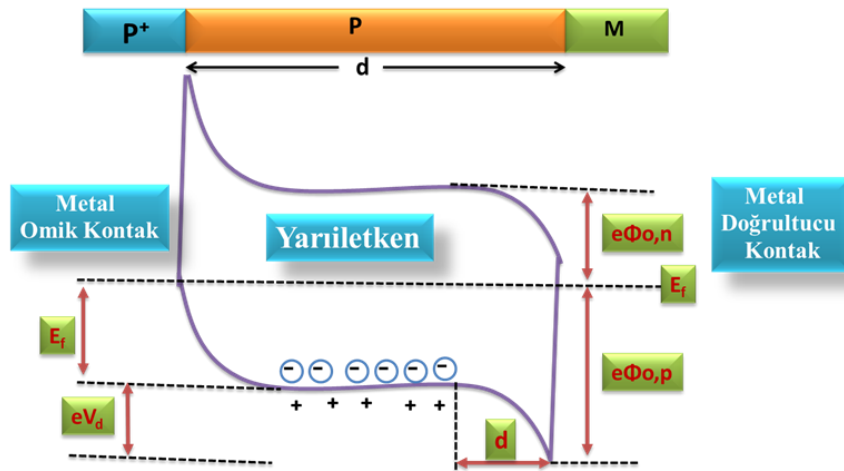
kontakta gibi herhangi bir potansiyel engeli meydana gelmediğinden, metal kısmındaki elektronlar kolaylıkla yarıiletken tarafına geçiş yapabilir. Doğru ve ters beslem durumlarında yarıiletken metale veya metalden yarıiletkene kolaylıkla bir iletim akımı meydana gelebilir. Kontak her iki yönde de yük geçişine izin verdiğinden dolayı omik kontak olarak adlandırılır.

3.2.3. 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 kontakta meydana gelir. Termal dengedeki yapının enerji bant diyagramı Şekil 3.6' da gösterildiği gibi, P^+ omik kontak tarafına, $V > 0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında, yapı doğru beslemde olur. P^+ tarafına $V < 0$ olacak şekilde bir gerilim uygulandığında ise yapı ters beslemde olur. P^+PM yapısı, diyot özelliğine sahip bir yapıdır. Böyle bir yapı yarıiletken diyot olarak adlandırılır. Şekil 3.6' da görüldüğü gibi boşluklar için engel yüksekliği (Φ_{po}) ile gösterecek olursak,

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

denklemini ile ifade edilir.



Şekil 3.6. P^+PM yarıiletken diyot yapısının termal dengede enerji-bant diyagramı.

Yukarıdaki varsayımlardan dolayı, akım iletimi sadece engel yüksekliğine bağlıdır. Yarıiletkenin metale doğru olan $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu, bu durumda, standart-termiyonik emisyon denklemi ile verilir (Bethe, 1942).

$$J_{s \rightarrow m} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) \quad (3.5)$$

Doyma akım yoğunluğunu veren ifade

$$J_{0,T} = A^* T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.6)$$

olup, buradaki A^* Richardson sabiti olup aşağıdaki gibi gösterilir. (Dündar, 2007).

$$A^* = \frac{4\pi q m^* k^2}{h^3} \quad (3.7)$$

3.3.2. Difüzyon Teorisi

Schottky'nin ileri sürdüğü bu teoride temel varsayımlar kısaca şöyle özetlenebilir. (Crowell ve ark., 1966):

- 1) $e\Phi_b$ engel yüksekliği, kT 'den çok büyüktür. ($e\Phi_b \gg kT$),
- 2) Tükenim bölgesinde elektron çarpışmaları etkindir.
- 3) Tükenim bölgesinin sınırları içerisinde ($x = 0$ ve $x = w$) taşıyıcı konsantrasyonu akım akışından etkilenmez.
- 4) Yarıiletkenin safsızlık konsantrasyonu dejenere değildir.

Tükenim bölgesinde akım, yerel elektrik alana ve taşıyıcıların konsantrasyon gradyentine bağlı olduğu için akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$J = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT}\right) \left(\frac{q(V_{bi} - V) 8\pi N_D}{\epsilon_s}\right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\frac{qV}{kT} - 1\right] \quad (3.8)$$

Burada doyma akım yoğunluğunu veren ifade de aşağıdaki gibi olur:

$$J_{0,D} = \left(\frac{q^2 D_n N_c}{kT} \right) \left(\frac{q(V_{bi}-V)8\pi N_D}{\epsilon_s} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.9)$$

Sonuç olarak termiyonik emisyon akım yoğunluğu ($J_{0,T}$) ile difüzyon akım yoğunluğu ($J_{0,D}$) birbirine benzer. Ancak termiyonik emisyon yoğunluğu $J_{0,T}$ sıcaklığa bağlı iken, $J_{0,D}$ ise gerilimdeki değişimlerden çabuk etkilendiği görülüyor.

3.3.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Yukarıda tanımlanan termiyonik emisyon ve difüzyon teorilerinin bir sentezi olan bu teori metal-yarıiletken ara yüzeyi yakınında termiyonik tekrardan birleşim hızı (v_R)'nın sınır koşullarından türetilir (Sze, S. M., 1981). Ayrıca, metal-yarıiletken arayüzeyindeki kuantum mekaniksel yansıma ve elektron optik-fonon saçılma etkileri de göz önüne alınır. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi için akım yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$J = \left(\frac{q N_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}} \right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\frac{qV}{kT} - 1 \right] \quad (3.10)$$

Buradaki v_R , termiyonik yeniden birleşme hızı, v_D , difüzyon kaynaklı yeniden birleşme hızı olarak tanımlanıp 10^6 - 10^7 cm/s aralığındadır. Bu iki terimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$v_R = \frac{A^* T^2}{q N_c} \quad (3.11)$$

$$v_D = \mu E \quad (3.12)$$

Burada iki durum göz önüne alındığında;

- 1) $v_R \leq v_D$ ise termiyonik emisyon baskındır.
- 2) $v_R > v_D$ ise difüzyon baskındır.

Difüzyonun baskın olduğu ikinci durum için akım yoğunluğu denklemi aşağıdaki biçimi ile verilebilir:

$$J \cong qN_c v_D \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\frac{qV}{kT} - 1\right] \quad (3.13)$$

Buradaki $v_D = \mu E$ olduğundan, yukarıdaki 3.13 eşitliği aşağıdaki gibi yazılır.

$$J \cong qN_c \mu E \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\frac{qV}{kT} - 1\right] \quad (3.14)$$

Doyma akımı yoğunluğu ise aşağıdaki gibi verilir.

1) $v_R \leq v_D$ için:

$$J_0 = \left(\frac{qN_c v_R}{1 + \frac{v_R}{v_D}}\right) \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.15)$$

2) $v_R > v_D$ için:

$$J_0 \cong qN_c \mu E \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \quad (3.16)$$

3.3.4. Cheung fonksiyonları yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesi

Metal-yarıiletken yapılarda idealite faktörü n , engel yüksekliği Φ_b ve seri direnç R_s değerlerinin akım gerilim (I - V) karakteristikleri yardımı ile belirlenmesinde yaygın olarak Cheung ve arkadaşları tarafından sunulan metot kullanılır. Schottky diyotun Eş. 3.3'te verilen karakteristik akım denklemi aşağıdaki gibidir.

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

Bu denklemdeki I_0 ifadesi açılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.17)$$

Termiyonik emisyon teorisinin 1. varsayımını dikkate aldığımızda ($eV \gg kT$) denklemdeki ‘-1’ ifadesi ihmal edilebilir. O zaman denklem aşağıdaki gibi yeniden düzenlenebilir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (3.18)$$

Diyottaki seri direnç, gerilimin azalmasına neden olacağından voltajın yerine $V - IR_s$ yazılarak yeniden düzenlenir.

$$I = AA^*T^2 \left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.19)$$

Her iki tarafın $\ln$ 'ni alındığında,

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \ln\left[\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\right] + \ln\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right) \quad (3.20)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{e(V-IR_s)}{nkT} \quad (3.21)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = -\frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eV}{nkT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.22)$$

$$\ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) - \frac{eV}{nkT} = -\frac{e\Phi_b}{kT} - \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.23)$$

$$\frac{eV}{nkT} - \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = \frac{e\Phi_b}{kT} + \frac{eIR_s}{nkT} \quad (3.24)$$

$$V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.25)$$

denklemini elde edilir.

- 1) Denklem, V 'yi yalnız bırakacak şekilde düzenlenip her iki tarafın $\ln I$ 'ya göre türevi alınır.

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.26)$$

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln I - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln(AA^*T^2) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.27)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{dV}{d(\ln I)} - \left(\frac{nkT}{e}\right) \frac{dV[\ln(AA^*T^2)]}{d(\ln I)} + \frac{d(n\Phi_b)}{d(\ln I)} + \frac{d(IR_s)}{d(\ln I)} \quad (3.28)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) - 0 + 0 + R_s \frac{dI}{d(\ln I)} \quad (3.29)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + R_s \frac{1}{\left[\frac{d(\ln I)}{dI}\right]} \quad (3.30)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + R_s \frac{1}{\left[\frac{I}{I}\right]} \quad (3.31)$$

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \left(\frac{nkT}{e}\right) + IR_s \quad (3.32)$$

Elde edilen son 3.32 eşitliği 1. Cheung&Cheung fonksiyonudur. Bu denklem yardımı ile $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiği çizilerek R_s ve n parametreleri bulunabilir.

- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin eğiminden seri direnç (R_s) değeri bulunur.
- $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinin düşey eksenini kestiği nokta yardımı ile idealite

faktörü (n) bulunur. Bulunan bu n -idealite faktörü daha sonra aşağıda gösterilen 2. Cheung&Cheung fonksiyonunda kullanılarak seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) hesaplanır.

2) Eş. 3.25 de, eşitliğin sağ tarafı $H(I)$ ile gösterilirse denklem aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.33)$$

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (3.34)$$

Elde edilen 3.34 eşitliği 2. Cheung&Cheung fonksiyonudur. Bu denklemden $H(I) - I$ grafiği çizilirse R_s ve Φ_b parametreleri bulunabilir.

- $H(I) - I$ grafiğinin eğimi seri direnç (R_s) değeri bulunur.
- $H(I) - I$ grafiğinin düşey eksenini kestiği nokta ve 1. Cheung&Cheung fonksiyonu yardımı ile hesaplanmış olan idealite faktörü (n) kullanılarak engel yüksekliği (Φ_b) bulunur.

3.3.5. Norde fonksiyonları yardımı ile Schottky diyot parametrelerinin belirlenmesi

Termiyonik emisyon teorisindeki 3.5 eşitliğini, diyotun etkin alanı A ile çarpıldığında toplam I_n akımın değeri aşağıdaki gibi bulunur. ($eV \gg 3kT$) alındığında,

$$I_n = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \exp\left(\frac{eV}{kT}\right) \quad (3.35)$$

İdeal bir Schottky diyot için termiyonik emisyon etkili akım ifadesi,

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_d}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (3.36)$$

ile verilir. Burada V_d difüzyon potansiyeli $\beta = e/kT$ ve I_0 , doyma akımı olup

$$I_0 = AA^*T^2 \exp(-\beta\Phi_b) \quad (3.37)$$

ifadesine sahiptir. $\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \gg 1$ için

$$I \cong I_0 \exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \quad (3.38)$$

bulunur. Burada $\ln(I)$ 'nin V ye karşı grafiği ($e\Phi_b$) engel yüksekliğinin tayini için alternatif imkân sağlar. Bu durum yarıiletken diyotta bir seri dirence neden olur. Akım-gerilim karakteristiği, küçük gerilimler için doğru şeklinde iken, R çok büyük ise doğru kısım oldukça dar olur. Bu seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için $F(V)$ fonksiyonu kullanılır:

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I}{AA^*T^2} \right) \quad (3.39)$$

Seri dirençli bir diyot için akım; $V_d = V - IR$ olarak alınırsa,

$I = I_0[\exp(\beta V_d) - 1]$ buradan da V_d yerine $V - IR$ yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$I = I_0[\exp[\beta(V - IR)] - 1] \quad (3.40)$$

bağıntısı ile verilir. $V_d \gg \frac{kT}{e}$ olduğu kabul edilip Eş. 3.40, 3.39 eşitliğinde yerine yazılırsa,

$$F(V) = \Phi_b + IR - \frac{V}{2} \quad (3.41)$$

denklemini elde edilir. İdeal durumda $R=0$ olur. Bu durumda denklem yeniden yazılırsa

$$F(V) = \Phi_b - \frac{V}{2} \quad (3.42)$$

ifadesi bulunur. Bu fonksiyon eğimi (-1/2) olan bir doğru denklemine ifade eder. Halbuki, Eş. 3.40'ta Ohm yasası gereğince $I=V/R$ 'dir. Bu ifade Eş. 3.39' da yerine yazılırsa,

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (3.43)$$

olarak elde edilir. Çok büyük gerilimler için bu ifade eğimi 1/2 olan bir doğruya ulaşacaktır. Burada $F(V)$ nin küçük akımlar için ideal hale, büyük akımlar için $F_R(V)$ eğrisine yaklaşacağı sonucuna varılır. $F(V)$ fonksiyonu bu iki nokta arasında bir minimum değere sahiptir. (3.41) eşitliğinin V 'ye göre türevi alındığında,

$$\frac{dF(V)}{dV} = R \left(\frac{dI}{dV} \right) - \frac{1}{2} \quad (3.44)$$

denklemini elde edilir.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} \left[1 + R \left(\frac{dI}{dV} \right) \right]^{-1} \quad (3.45)$$

ve

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV} [I_{min} \exp(\beta V)] = \beta I \quad (3.46)$$

olduğundan, fonksiyonun türevi,

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{\beta R I}{1 + \beta R I} - \frac{1}{2} \quad (3.47)$$

olarak elde edilir. $\frac{dF(V)}{dV} = 0$ değeri $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki I_{min} akımını verecektir. Buna göre (3.47)'den I_{min} akımı,

$$I_{min} = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{qR} \quad (3.48)$$

olarak bulunur. I_{min} akımına karşılık gelen gerilim,

$$V_{min} = I_{min}R + V_d(I_{min}) = V_{min} = \frac{1}{\beta} + \ln \left(\frac{I_{min}}{AA^*T^2} \right) \quad (3.49)$$

elde edilir. Buna göre $F(V)$ 'nin minimum değeri,

$$F(V_{min}) = \frac{V_{min}}{2} - \frac{1}{\beta} \left(\frac{I_{min}}{AA^*T^2} \right) \quad (3.50)$$

olur. I_{min} ve V_{min} 'nin ölçülen değerleri kullanılarak doğru gerilim uygulanan Schottky diyotta akım;

$$I = AA^*T^2 \exp \left(- \frac{e\Phi_b}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_d}{nkT} \right) \quad (3.51)$$

şeklindedir. Burada n idealite faktörü olup $1 < n < 2$ dir. n , sıcaklık ve uygulama gerilimden bağımsız birimsiz bir sabittir. Eş. 3.41’de 3.42 bağıntısını yerine yazarsak, $F(V)$ için;

$$F(V) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right)V + \Phi_B + \frac{IR}{n} \quad (3.52)$$

ifadesi elde edilir. $R = 0$ ideal hali için $F(V)$ fonksiyonu $((n-2)/2n) < 0$ eğimli bir doğru olacaktır. $n = 1$ iken eğim $(-1/2)$ ’ye eşittir. O halde $n = 1$ durumu ideal Schottky diyet durumudur. Eş. 3.52’ nin V ’ye göre diferansiyeli alındığında

$$\frac{dF(V)}{dV} = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right) + \left(\frac{R}{n}\right)\left(\frac{dI}{dV}\right) \quad (3.53)$$

elde edilir. 3.51 eşitliğinin V_d ’ye göre diferansiyeli ise

$$\frac{dI}{dV_d} = \frac{\beta I}{n} \quad (3.54)$$

$$V_d = V - IR \quad (3.55)$$

olur ve eşitliğin I ya göre diferansiyeli alındığında ise,

$$\frac{dV_d}{dI} = \frac{dV}{dI} - R \quad (3.56)$$

elde edilir. Gerekli düzenlemeler yapıldıktan sonra,

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI/(dV_d)}{1 + R dI/dV_d} \quad (3.57)$$

bağıntısı bulunur. Eş. 3.57’ yi 3.53 eşitliğinde yerine yazarsak,

$$\frac{dF(V)}{dV} = \frac{n-2+\beta RI}{2(n+\beta RI)} \quad (3.58)$$

elde edilir. $dF(V)/dV=0$ durumu $F(V)$ 'nin minimum noktasındaki akımı verecektir. 3.58 ifadesinden seri direnç,

$$R = \frac{2-n}{\beta I_{min}} \quad (3.59)$$

elde edilir. Buna karşılık gelen akım Eş. 3.54 'ten

$$V_{min} = V_d(I_{min}) + IR \quad (3.60)$$

şeklinde yazılır. Eş.3.52'te V yerine V_{min} , I yerine I_{min} ve R 'nin değerini yerine yazarsak,

$$F(V_{min}) = \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{n}\right) V_{min} + \Phi_B - \frac{2-n}{\beta n} \quad (3.61)$$

ifadesi bulunur. $n=1$ için R ve Φ_B hesaplanırsa, $R = (2-n)/\beta I_{min}$ ise $R = \left(\frac{kT}{e}\right) I_{min}$ için,

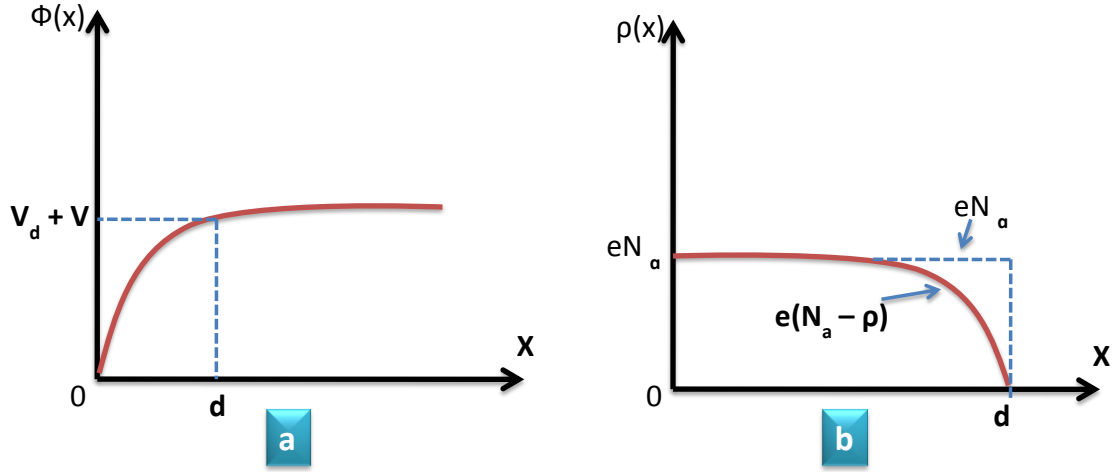
$$\Phi_B = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{2} - \frac{kT}{q} \quad (3.62)$$

ifadesi elde edilir.

3.3.6. Metal-yarıiletken Schottky diyotlarda Schottky kapasitesi

Kapasite-gerilim karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların C - V karakteristiği ara yüzey durumlarına karşı çok hassastır ve aygıtların elektriksel özellikleri üzerine kuvvetli bir etkiye sahiptir. Düşük frekanslarda kapasitenin artması, uygulanan AC sinyalinin yük taşıyıcıları tarafından takip edilebilme yeteneğine bağlıdır. Yeterince yüksek frekansta kapasite-gerilim ölçümleri alınabilirse ara yüzeydeki yükler AC sinyallerini takip edemez. Metal-yarıiletken kontak yapılarında, tükenim 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 3.8. 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 kullanılabilir. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyotun engel tabakasındaki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği

$$\nabla^2 \Psi(x) = \frac{d^2 \Psi}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.63)$$

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

$$\rho(x) = e(N_a + N_d) \quad (3.64)$$

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.3.8'de 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 uzay yük yoğunluğu,

$$\rho(X) \cong eN_a \quad (3.65)$$

olarak yazılabilir. 3.63 ve 3.65 eşitliklerinden,

$$\frac{d^2 \psi}{dX^2} = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \quad (3.66)$$

denklemini elde edilebilir. Bu denklemin çözümü aşağıdaki şu sınır değerleri için yapılırsa;

- 1) $x=0$ için $\psi(x) = 0$
- 2) $x > d$ için $\psi(x) = V_d + V$
- 3) $x=d$ için $\frac{d\psi(x)}{dX} = 0$

Eş. 3.66 için, üçüncü sınır şartı göz önüne alınıp, integral alındığında;

$$E(X) = -\frac{d\psi(x)}{dX} = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} (x - d) \quad (3.67)$$

bu eşitlikte birinci sınır şartı dikkate alınarak integral alınır

$$\psi(x) = -\frac{eN_a}{\epsilon_s \epsilon_0} \left(\frac{1}{2} x^2 - xd \right) \quad (3.68)$$

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

$$d = \left[\frac{2\epsilon_s \epsilon_0}{eN_a} (V_d \pm V) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.69)$$

bulunur. Bu ifade Schottky bölgesinin genişliğini temsil eder. Burada $V>0$ için kontak doğru; $V<0$ için ise kontak ters belsemededir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu ise ;

$$Q = eN_a \cdot d \quad (3.70)$$

ile verilir. 3.69 ve 3.70 eşitliklerinden,

$$Q = [2\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a(V_d \pm V)]^{\frac{1}{2}} \quad (3.71)$$

eşitliği elde edilir. Schottky kapasitesi, 3.71 eşitliğini sağlayan Q yükünün, uygulanan gerilime göre değişimi olarak tanımlanır. Dolayısı ile kapasite,

$$C = \frac{\partial Q}{\partial V} \quad (3.72)$$

olarak yazılıp, 3.71 ve 3.72 eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a}{2(V_d \pm V)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.73)$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \quad (3.74)$$

bulunur. Buradan da görülüyor ki tükenim bölgesi kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters, akseptör yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Eğer uygulanan gerilim artarsa kapasite azalır ve Schottky tabakasının genişliği de artar. Benzer olarak, akseptör yoğunluğu artarsa, kapasite yine artar ve buna bağlı olarak schottky tabakasının genişliği azalır. Eşitlik 3.73 yardımıyla,

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s\varepsilon_0eN_a} \quad (3.75)$$

olarak yazılabilir. Buradan anlaşıldığı gibi C^{-2} - V grafiği bir doğru verir ve bu doğrunun eğiminden akseptör yoğunluğu N_a ,

$$N_a = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 e} \frac{dV}{d(C^{-2})} \quad (3.76)$$

şeklinde elde edilir. Ayrıca doğrunun yatay eksenini kestiği noktadan ise difüzyon potansiyeli V_d bulunur.

3.4. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

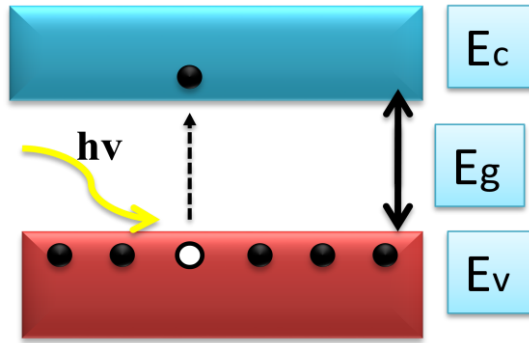
Işık demeti malzeme ile etkileşime girdiğinde, bir kısmı malzeme tarafından yansıtılır, bir kısmı malzeme tarafından soğurulur, bir kısmı ise malzemenin içinden karşı tarafa geçerek yoluna devam eder (Soylu, 2006). Optik özellikler yardımıyla, yarıiletkenin enerji bant yapısı ve elektronların ve boşlukların davranışları hakkında bilgiler elde edilir.

Herhangi bir malzeme üzerine, değişik frekanslardan oluşan bir ışın demeti gönderildiğinde, malzemeyi meydana getiren atomlar, bu frekanslar arasında uygun enerjili olan fotonları soğurarak, atomun elektronları daha yüksek enerji seviyelerine geçiş yaparlar.

Soğurma, elektromanyetik dalga ile malzemedeki yüklerin etkileşmesi sonucu ortaya çıkan enerji değişimi olarak bilinir. Gelen ışığın dalga boyuna göre optik soğurma değişmektedir. Işık demeti bir malzemenin içine girdiğinde, eğer enerjisi malzemenin yasak enerji bant aralığından fazla ise, soğurma olayı gerçekleşir. Bu olay sonucu, gelen ışığın enerjisi malzemenin elektronlarına transfer edilir. Bu soğurma özelliğinden faydalanılarak yapılan ölçümler, soğurma spektroskopisinin temelini oluşturur. Soğurma ölçümleri geniş bir dalga boyu aralığında yapılırsa, ortamdan geçen ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasındaki bağıntı soğurma spektrumunu verir. Her malzemenin soğuracağı dalga boyu spesifiktir, yani her malzeme ancak belirli bir dalga boyunda ışığı soğurabilir. Buradan yola çıkılarak soğurma spektrumları çizilen bir yarıiletkenin bant yapısı incelenip, yasak enerji bant aralığı belirlenebilir. Ayrıca elde edilen soğurma spektrumu kullanılarak bir takım teorik hesaplamalar ile malzemenin yansıma, geçiş, soğurma katsayıları, kırılma indisi ve dielektrik sabiti gibi bazı optik parametreleri hesaplanabilir (Ketenci, 2010).

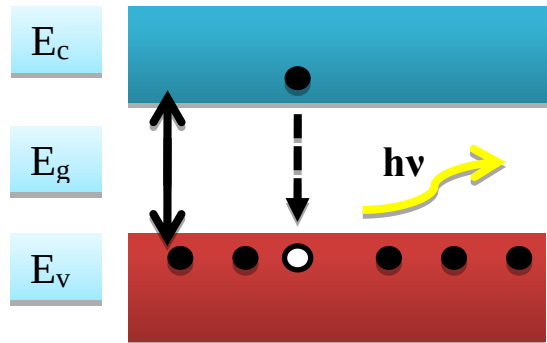
3.4.1. Yarıiletkenlerde Soğurma Olayları

Bir yarıiletken malzemenin, valans bandındaki bir elektron optik yolla uyarılarak yasak enerji bant aralığını geçebilir. Bu işlem Şekil 3.9’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 gerçekleştiğinde, fotonun malzeme tarafından tamamen soğurulduğu ifade edilir. Bu olayın gerçekleşme şartı, olaya sebebiyet veren fotonun enerjisinin en az yarıiletkenin yasak enerji bant aralığına eşit ya da daha büyük olmasıdır.



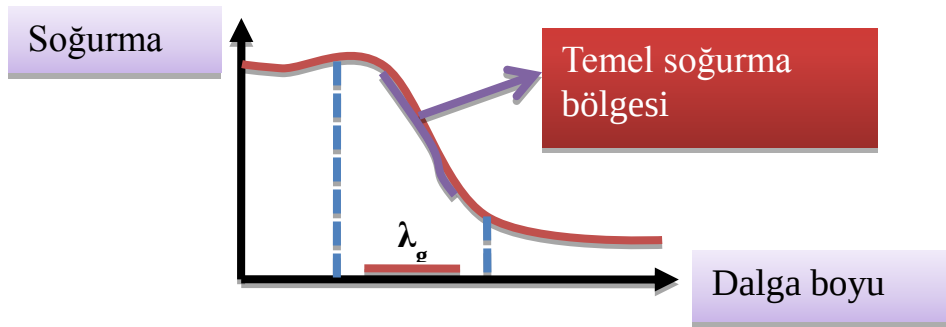
Şekil 3.9. Valans bandındaki bir elektronun optik yolla uyarılması.

Yukarıdaki olayın tersi olan süreçte ise, bir iletim elektronu bir boşlukla birleşerek enerjisi $h\nu$ olan bir foton üretir. Bu durum Şekil 3.10’da gösterilmiştir. Bu işlem de ışık yayan diyotların (LED) ve yarıiletken lazerlerin temelini oluşturur (Turton, 2005).



Şekil 3.10. Uyarılmış elektronun valans banda geçerken bir foton yayınlanması.

Temel soğurma; yarıiletken üzerine gelen bir fotonun valans bandında bulunan bir elektron tarafından soğurulmasıyla elektronun iletim bandına geçmesi olayıdır. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi, bu soğurma olayı soğurma-dalga boyu spektrumunda hızlı bir artış ile gözlenir ve bu dalgaboyu aralığı soğurma bölgesi olarak bilinir. Bu durumda temel soğurma bölgesi yarıiletken bir malzemenin enerji bant aralığını belirlemek için kullanılabilir. Bu olay valans ve iletim bandı arasındaki yasak enerji aralığının büyüklüğünü hesaplamamıza yardım eder.



Şekil 3.11. Yarıiletkende temel soğurma spektrumu.

Elektronlar temel soğurma bölgesinde doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki şekilde geçiş yapabilir. Her iki geçişte de elektronlar valans bandından iletim bandına geçerler, ancak geçişte kullanılan yollar farklıdır. Bir yarıiletken malzemede foton soğurulması işleminde elektronun momentum korunumu sağlanmalıdır. Doğrudan geçişlerde, elektron momentumunda bir değişiklik olmadan geçer. Bu tip geçişler için α ile foton enerjisi $h\nu$ ve yasak enerji bant aralığı E_g arasındaki bağıntı aşağıdaki gibi ifade edilir. (Omar, 1975).

$$\alpha(h\nu) = (h\nu - E_g)^m \quad (3.77)$$

Bir yarıiletkenin bant aralığı, soğurma katsayısı ve yarıiletken üzerine gelen fotonun enerjisinin bilinmesi ile belirlenebilir. Doğrudan bant aralıklı bir yarıiletken malzemede $(\alpha h\nu)^2$ 'nin gelen ışığın enerjisinin $(h\nu)$ fonksiyonu olarak çizilen grafiğinin lineer kısmının enerji eksenini $(\alpha(h\nu))^2=0$ da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletken malzemenin yasak enerji bant aralığını verir. Bu yöntem “optik metot” olarak bilinir.

Yarıiletken malzemede; katkı atomlarının yoğunluğunun arttırılması sonucunda, enerji seviyelerinde yarılmalar meydana gelir ve verici veya alıcı akseptör seviyeleri “safsızlık bandı” olarak tanımlanan bir bant oluştururlar. Bir başka önemli etki ise, yasak enerji aralığı içine bantların genişlediğini gösteren bant sarkmalarının oluşumudur. İyonlaşmış vericiler, iletim bandındaki elektronlar üzerine çekici bir kuvvet ve valans bandındaki boşluklar üzerine ise itici bir kuvvet uygulayarak bant sarkmalarının oluşmasına sebep olur (Mott,1971).

3.4.2.Doğrudan bant geçişi

Enerjisi $h\nu$ olan bir foton doğrudan bant geçişli bir yarıiletkene geldiğinde, bir elektronu değerlik bandından iletim bandına geçirir. Bu durumda yarıiletkenin enerji farkı ilk enerjisi E_i , son enerjisi E_s olmak üzere; (Pankove, 1975)

$$h\nu = E_s - E_i \quad (3.78)$$

denklemleri ile verilmektedir. Parabolik bantlar için ise;

$$E_s - E_i = \frac{p^2}{2m_e^*} \quad (3.79)$$

ifadesi ile gösterilir. Burada ise m_e^* elektronun etkin kütesidir.

$$E_i = \frac{p^2}{2m_h^*} \quad (3.80)$$

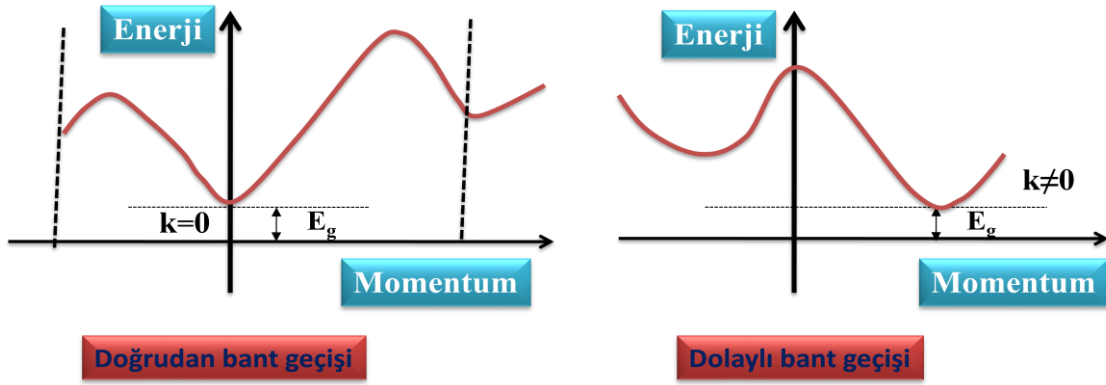
ifadeleri ile gösterilir. Burada m_e^* , elektronun etkin kütesi, m_h^* boşluğun etkin kütesini göstermektedir. Eş. 3.78, 3.79 ve 3.80 düzenlendiğinde,

$$h\nu - E_g = \frac{p^2}{2} \left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \right) \quad (3.81)$$

denklemleri elde edilir. Doğrudan bant geçişinde α ile $h\nu$ arasındaki bağıntı ise;

$$\alpha(h\nu) \approx B(h\nu - E_g)^m \quad (3.82)$$

denklemleri ile verilir. Burada B sabit bir sayı, m ise doğrudan izinli geçişler için $1/2$, yasaklı geçişler için ise $3/2$ değerlerini alabilen bir sabittir. Ayrıca Eş. 3.82'den $\alpha(h\nu)$ değerini sıfır yapan değer ise yarıiletkenin yasak enerji bant aralığı değerini belirlemektedir (Mott, 1971).



Şekil 3.12. Doğrudan ve dolaylı bant geçişleri.

3.4.3. Dolaylı bant geçişi

Değerlik bandının maksimum noktası ile iletkenlik bandının minimum noktasının momentumları farklı olduğunda elektron momentumunun korunması için, foton soğurma olayına ilave bir parçacık eklenir. Bu durumda ise momentum korunumu için bir fononun yayılması veya soğurulması gereklidir. Fonon soğurulmasında, soğurulma katsayısı $h\nu > E_g - E_{ph}$ durumunda aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\alpha_s(h\nu) = \frac{B(h\nu - E_g + E_{ph})^m}{\exp\left(\frac{E_{ph}}{kT}\right) - 1} \quad (3.83)$$

ve fonon yayılmasında, soğurma katsayısı $h\nu > E_g + E_{ph}$ durumunda

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{B(h\nu - E_g - E_{ph})^m}{1 - \exp\left(\frac{-E_{ph}}{kT}\right)} \quad (3.84)$$

olarak yazılır. Burada α_s soğurma katsayısı ve α_e yayılma katsayısı, E_{ph} ise fonon enerjisidir. Her iki ihtimalin de olabileceğini düşünülerek;

$$\alpha(h\nu) = \alpha_s(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \quad (3.85)$$

olarak yazılabilir. $\alpha_s(h\nu)$ ve $\alpha_e(h\nu)$ değerleri yerine yazıldığında ise;

$$\alpha_s(h\nu) = \frac{B(h\nu - E_g + E_{ph})^m}{\exp\left(\frac{E_{ph}}{kT}\right) - 1} + \frac{B(h\nu - E_g - E_{ph})^m}{1 - \exp\left(\frac{-E_{ph}}{kT}\right)} \quad (3.86)$$

denklemini elde edilebilir. Burada m , dolaylı izinli bant geçişli bir yarı iletken için 2, veya yasaklı geçiş için 3 değerlerini alabilen bir sabiti gösterir. (Gaffar ve ark., 2003)

3.5. Fotoelektrik Özelliklerin Belirlenmesi

Fotovoltaik hücre, fotovoltaik enerji dönüşümü ile ışık enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren önemli bir ayardır. Yarıiletken malzemeler diğer teknolojik aygıtların temelini oluşturduğu gibi fotovoltaik hücrelerin yapısını da oluşturmaktadır. Enerji dönüşümü, ışık enerjisinin soğurulması ile yarıiletkende elektron-hol çiftlerinin oluşması ve yük taşıyıcı ayrışmasından meydana gelmektedir. Çoğu durumda yük taşıyıcı ayrışmasında p-n eklemleri kullanılır.

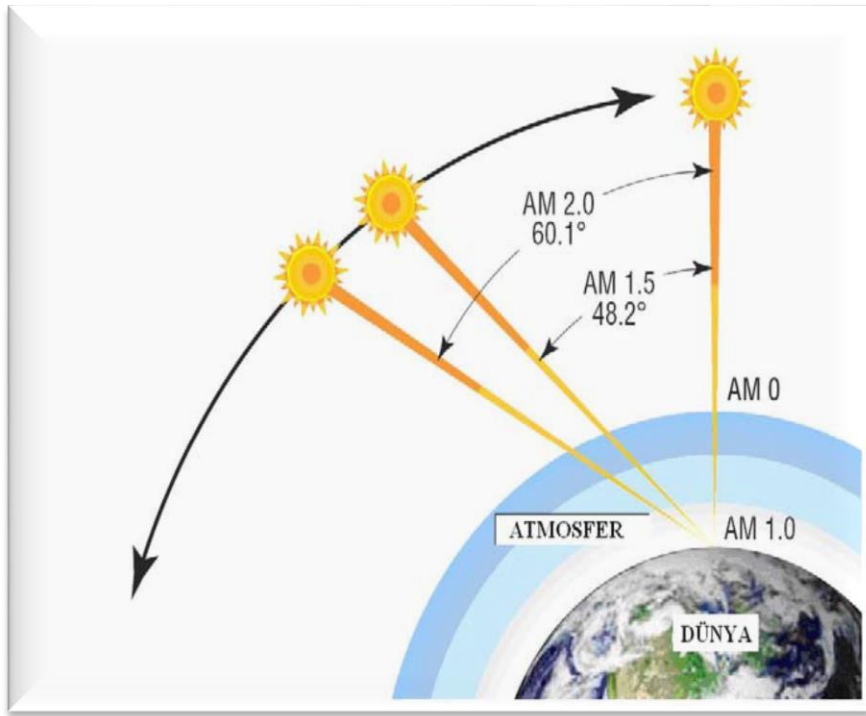
3.5.1 Hava kitlesi

Yerküre üzerine düşen güneş ışımasının spektrumu, sıcaklığı yaklaşık 5800 K olan kara cismin spektrumunun hemen hemen aynısıdır, bu yüzden güneş ışıması kara cisim ışıması olarak değerlendirilip modellenebilir. Atmosferden geçerken güneşten gelen ışık şiddetinin ne kadar azalacağı uzaklığa dolayısıyla dünyanın yüzeyindeki konuma bağlıdır. Ayrıca soğurma ve saçılma olayları güneş ışınları atmosferde ilerledikçe artar. Atmosfer üzerinde, ışıma yoğunluğu yaklaşık 1353 W/m² dir ve bu ışımanın spektral dağılımı sıfır hava kitlesi (AM0) olarak nitelendirilir. En kısa mesafe güneş ışınları dik olarak dünya yüzeyine ulaştığı zamandır ve spektrum hava kitlesi

katsayısı bir (air mass one, AM1) olarak adlandırılır. Diğer gelme açılarında atmosferde alınan optik yol artacağından atmosfer kayıpları da artacaktır. Hava kitlesi atmosferde alınan yolun, en kısa yola oranıdır. Diğer bir deyişle, hava kitlesi, dünya yüzeyine ulaşan ışınların spektrumunun ve yoğunluğunun atmosfer tarafından ne kadar etkilendiğinin ölçüsüdür. Hava kitlesi (Air Mass)

$$Air\ mass = \frac{1}{\cos \theta} \quad (3.87)$$

ile ifade edilir. Burada θ ışığın geliş açısıdır.

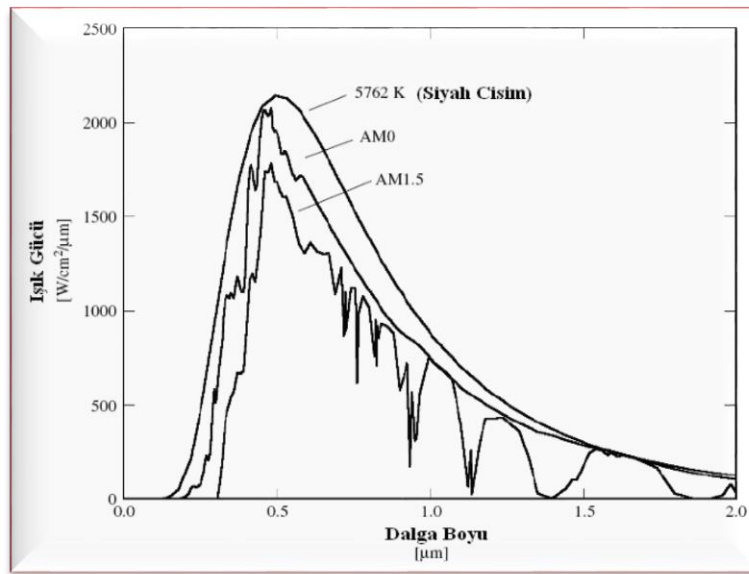


Şekil 3.13. Hava kitle numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi (Ocak, 2010) .

Green, hava kütlesi kolay yoldan bulunması için aşağıdaki formülü geliştirmiştir (Green, 1992).

$$Air\ mass = \sqrt{1 + (L/H)^2} \quad (3.88)$$

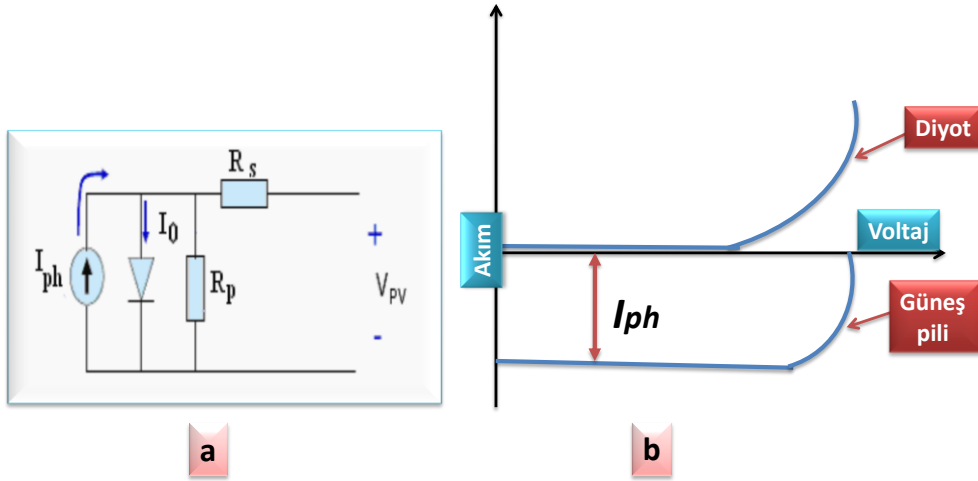
burada H cismin boyu ve L gölge boyudur. Güneş pillerinin performanslarının karşılaştırılmasında standart olarak AM1.5G spektrumu ve toplam 1000 W/m^2 güce sahip ışık kullanılmaktadır. Şekil 3.13'te hava kitlesi numaralarına göre güneş ışınlarının dünyaya gelişini ve Şekil 3.14'te kara cisim ışımasını, AM0 ve AM1.5 spektrumlarının spektral ışımasını göstermektedir. Bir güneş pilinin performansı üzerine düşen ışığın spektral dağılımına ve ışık şiddetine bağlıdır. Bu nedenle güneş pilleri arasında karşılaştırma yapmak için aynı spektrum altındaki davranışları incelenmelidir.



Şekil 3.14. Siyah cisim ışıması, AM0 ve AM1.5 spektrumlarının spektral ışıması (Ocak, 2010)

3.5.2. Güneş pillerinin karakterizasyonu

Güneş pilinin çalışma prensibi fotonların soğurulmasıyla elektron-boşluk çiftlerinin oluşması ve oluşan elektron boşlukların dış devrede akımları ile elektriksel güç eldesi esasına dayanır. Bir güneş pili Şekil 3.15.a'da gösterildiği gibi doğrultucu bir diyota bağlanmış bir akım kaynağı ile gösterilebilir. Şekil 3.15.b'de ayrıca diyot ve güneş piline ait akım gerilim grafiklerinin üst üste binmesi şematize edilmiştir.



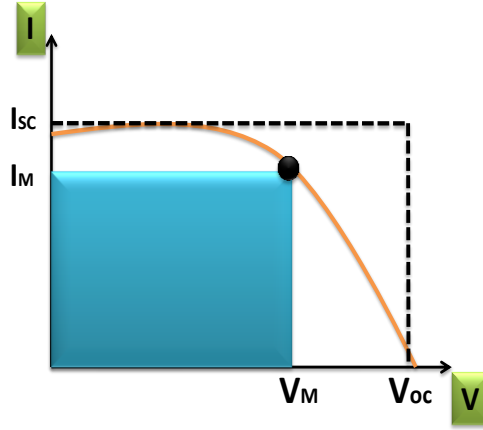
Şekil 3.15. Bir güneş piline ait a) eşdeğer devrenin gösterimi b) akım-gerilim grafiği.

Güneş pilini karakterize eden parametreleri elde etmek için diyodun açık devre modunda çalıştığını varsayalım. Bir güneş pilinin akım gerilim karakteristiği Shockley tarafından aşağıdaki gibi ifade edilmiştir (Shockley, 1950).

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.89)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, e elektron yükü ve V pilin iki terminali arasına uygulanan gerilimdir. 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 3.14 Eş. 3.90'e 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 gerilimdir ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (3.90)$$



Şekil 3.16. Güneş piline ait karakteristik akım-gerilim grafiği.

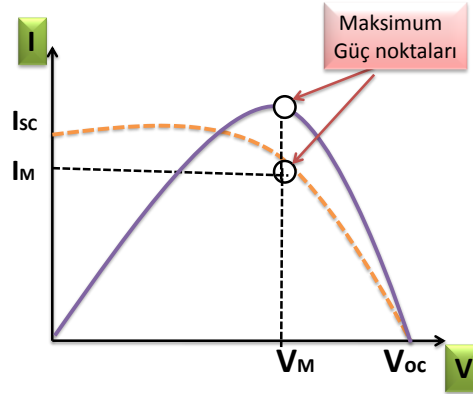
Grafikte ifade edilen I_m ve V_m ifadeleri sırasıyla maksimum gücün elde edildiği akım ve gerilim değerleridir. Pil tarafından üretilen güç Şekil 3.17’de gösterilmektedir. Pilden elde edilen maksimum güç,

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (3.91)$$

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,

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in} S} \quad (3.92)$$

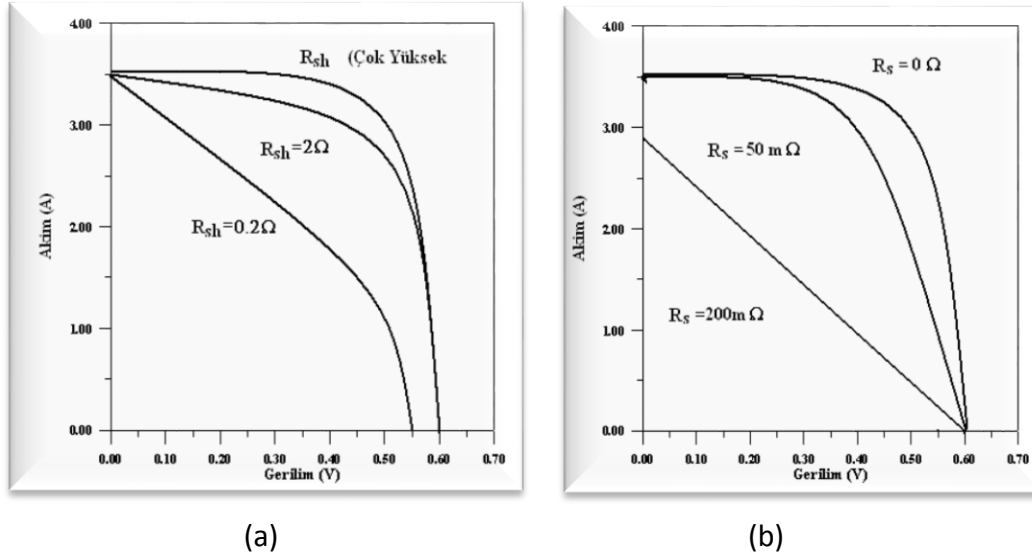
şeklinde yazılır. Burada P_{in} pil yüzeyine düşürülen ışığın gücü ve S pilin etkin alanıdır. Bundan dolayı ölçümlerde kullanılan simülatörün ışık gücü ile pilin etkin alanının çarpılması ile net güç bulunur. Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan diğer bir parametre, doluluk oranıdır. Bu terim, elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ile kısa devre akımlarının çarpımına oranıdır ve 3.91 eşitliği ile ifade edilir (Gray,2003).



Şekil 3.17. Güneş pilinde pilde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc}I_{sc}} = \frac{nP_{in}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.93)$$

Güneş pillerinde maksimum gücün elde edildiği nokta 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 3.18. (a) Güneş pili üzerine paralel direnç etkisi ($R_s=0$ durumunda), (b) Güneş pili üzerine seri direnç etkisi ($R_p=\infty$ durumunda).

Güneş pilinin üreteceği gücün maksimum olması için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır;

- Kısa devre akımı maksimum olmalıdır, bu şartın sağlanması için foton şiddeti yoğunlaştırıcı sistemler kullanılabilir.
- Açık devre gerilimi yüksek olmalıdır, bu şartın sağlanması için yükseltmek için sızıntı akımı küçük olmalıdır.
- Seri direnç düşük olmalıdır, böylece güneş pilinin dolum faktörü değeri artırılabilir.

4. MATERİYAL ve METOD

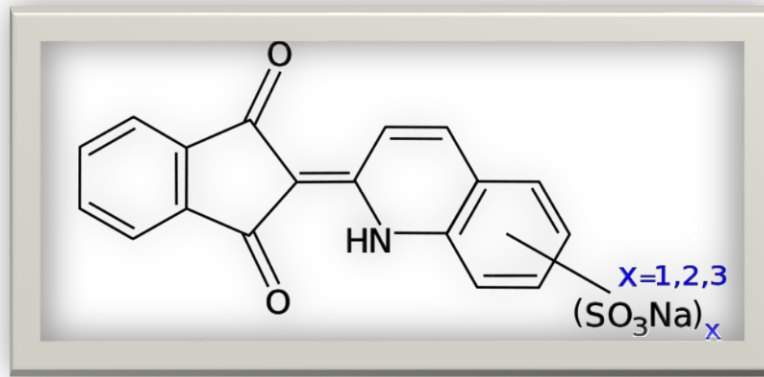
4.1.GİRİŞ

Bu bölümde, Al/Kinolin sarısı (KS)/p-Si yapısını oluşturmakta kullanılan KS molekülünün, molekül formülü, molekülün bağ yapısı ve kimyasal özellikleri, molekülün optik özelliklerinin nasıl belirlendiği ve yarıiletkenin temizlenmesi kontakların oluşturulmasında izlenen basamaklar anlatılmıştır. Ayrıca, üretilen diyotun elektriksel parametrelerini belirlemek için gerekli olan *I-V* ve *C-V* ölçümlerinden bahsedilmiştir.

Bu tezde bulunan ışık altı akım-gerilim ölçümleri ve SEM analizi Yüzüncü Yıl Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Başkanlığının 2012-FED-B007 ve 2015-FBE-YL007 nolu projeleri desteği ile Dicle Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Araştırma Merkezinde yapılmıştır.

4.2. Kinolin Sarısı Molekülü

Kinolin sarısı bir gıda boyası olup sarı renkte toz veya granüller halinde bulunmaktadır. Suda çözünür nitelikte olan bu madde, etanolde çok az çözünür. 416 nm arasında değişen bir maksimum soğurma dalga boyuna sahiptir. Gıda sanayii, kimya ve eczacılıkta kullanılır.



Şekil 4.1. Kinolin sarısının moleküler yapısı.

Bu çalışmada kullanılan π bağları açısından zengin, basit molekül formülü $C_{18}H_{11}NO_2$ kinolin sarısı heterosiklik bileşiği Sigma-aldrich firmasından temin edilmiştir. Zengin π bağları içeren Kinolin sarının moleküler yapısı Şekil 4.1. de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kinolin sarısı ile ilgili özellikler

Özellikler	
Moleküler formülü	$C_{18}H_{11}NO_2$
Molar kütlesi	477.38 g/mol
Görünüm	Yeşilimsi sarı toz
Erime noktası	150 °C (ayrışma)
Çözünürlük olarak su	4 g/100 ml
Asitlik (pK_a)	1.8

4.3. Kinolin Sarısı Molekülünün Optik Ölçümlerinin Alınması

Öncelikle Kinolin sarısı molekülü metonolde çözülerek 10^{-3} Molar çözelti hazırlandı. Hazırlanan çözelti temiz bir lam üzerine kaplandı ve ısıtıcı ile ~ 50 °C, 30 sn de kurutuldu, böylece çözücünün buharlaşması sağlandı. Hazırlanan numune optik ölçümler için cihaza yerleştirildi. Temiz bir lam yardımıyla referans ölçümü alındıktan sonra 200-900 nm dalgaboyu aralığında soğurma ölçümleri yapıldı.



Şekil 4.2. UV-Vis optik soğurma ölçüm cihazı.

Bu çalışmada yapılan soğurma deneyleri "Shimadzu UV-2450" spektrometre aracılığıyla 200-900 nm dalgaboyu aralığında oda sıcaklığında yapılmıştır. Ölçülerin yapıldığı spektrometre cihazının fotoğrafı Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Ölçümler normal geniş açısı koşullarında numunenin normaline paralel olarak gönderilen ışık demeti ile gerçekleştirilmiştir.

4.4. Yarıiletkenin Temizlenmesi

Bu çalışmada 1–10 Ω -cm özdirence ve (100) yönelimine sahip p-Si yarıiletken alttaş olarak kullanılmıştır. İdeale yakın bir Schottky diyotu yapabilmek için yarıiletken yüzeyi çok temiz olmalıdır. Bu nedenle yüzeyin organik ve mekanik kirlerden arındırılmış olması gerekir. Numunenin kimyasal temizlemesinde uluslararası kaynaklarda yaygın olarak kullanılan temizleme metodu kullanıldı. Bu metoda göre aşağıdaki işlemler sırasıyla takip edildi.

- 1) Aseton'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 2) Metanol'da ultrasonik olarak 10 dakika yıkandı.
- 3) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 4) RCA1 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{NH}_3;6:1:1$) 'de 60°C 'de 10 dakika kaynatıldı.
- 5) Seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF};1:10$) ile 30 saniye yıkandı.
- 6) RCA2 ($\text{H}_2\text{O}:\text{H}_2\text{O}_2:\text{HCl};6:1:1$) 'de 60°C 'de 10 dakika kaynatıldı.
- 7) Deiyonize su ile iyice yıkandı.
- 8) Seyreltik HF ($\text{H}_2\text{O}:\text{HF};1:10$) ile 30 saniye yıkandı.
- 9) 15-20 dakika akan deiyonize su içerisinde yıkandı.
- 10) Azot gazı (N_2) ile kurutuldu.

Ayrıca buharlaştırmada kullanılacak metaller metanolda 5 dakika ultrasonik olarak ve bu metallerin konacağı tungsten ısıtıcı % 10'luk HCl ile yıkandıktan sonra, deiyonize su ile durulandı ve kurutuldu.

4.5. Kontakların Üretimi

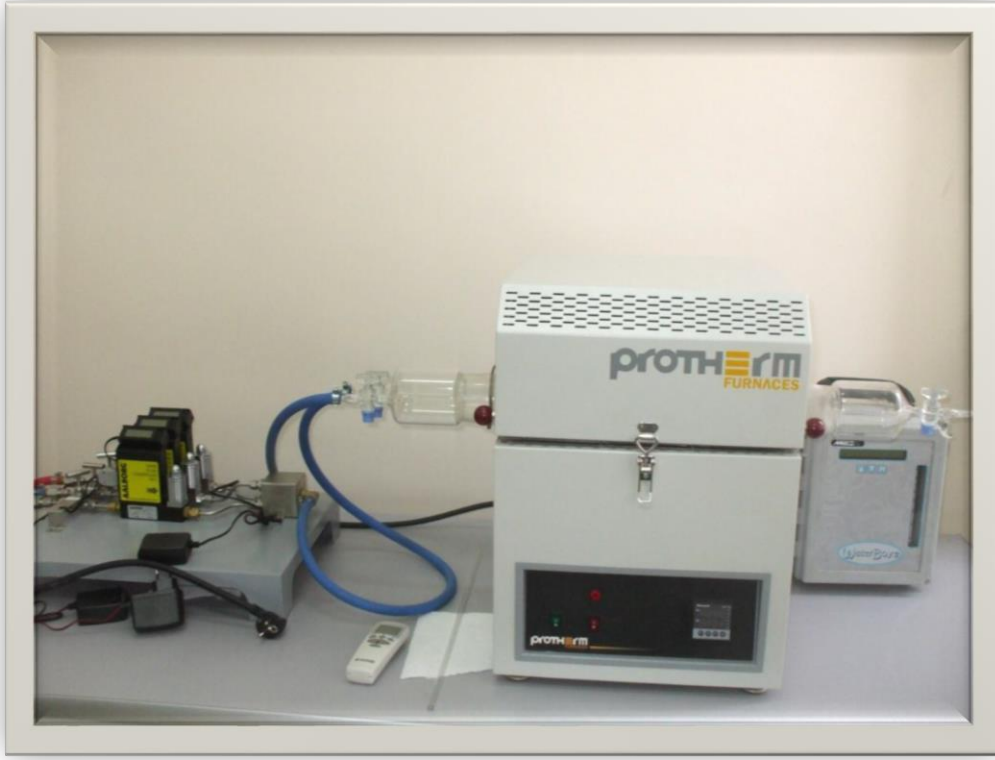
4.5.1. Al Omik (Alt) kontak yapılması

Diyotların üretimine, omik kontak oluşturulması ile başlandı. Şekil 4.3'de verilen termal buharlaştırma cihazının numune tutucu bölümüne parlak yüzeyi yukarı bakacak şekilde p-Si, tungsten ısıtıcı bölümüne ise Al metali (%99.9 saflıkta) yerleştirildi. Basınç değeri $\sim 10^{-5}$ Torr değerine ulaştığında tungsten flamana $\sim 35\text{ A}$ 'lık akım verilerek Al metali, p-Si'un mat yüzeyine kaplandı.



Şekil 4.3. Termal buharlaştırma cihazı.

Oluşturulan kontaklar numune tutucudan alınıp öncesinde kimyasal olarak temizlenmiş olan kuartz potanın içine konularak Şekil 4.4'te verilen 450 °C sıcaklığa ayarlanmış quartz fırında azot ortamında, 15 dakika tavlandı. Böylece, numunenin omik kontak kısmı hazırlanmış oldu.



Şekil 4.4. Tavlama işleminin gerçekleştirildiği fırın.

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, kinolin sarısı molekülünün metanol sıvısı kullanılarak 1×10^{-2} molarlık çözeltisi hazırlandı. Omik kontak yapıp temizlenen numune Şekil 4.5'te gösterilen SCS-G3 spin coater (dönel kaplama) cihazına parlak yüzey üstte kalacak şekilde yerleştirilip cihaz 2000 rpm ile 1 dakika çalıştırılarak hazırlanan çözelti yavaşça damlatılıp numunenin üzerinde ince film oluşturuldu.



Şekil 4.5. İnce filmin oluşturulduğu dönel kaplama cihazı.

4.5.2. Al doğrultucu (üst) kontağın yapılması

Omik kontak üzerine Kinolin sarısı kaplandıktan sonra KS/p-Si yapısı elde edildi. Bu yapıya üst kontak yapımı için, kullanılacak % 99.99'lık Al ısıtıcıya yerleştirildi. Her bir deliği 1 mm çapında olan maske, nokta kontaklar yapabilmek için numune tutucuya yerleştirildi. Üzerine Al üst kontak yapılacak olan KS/p-Si'un, organik kaplanan tarafı aşağı doğru (Al'a doğru) bakacak şekilde numune tutucudaki maskenin üzerine yerleştirildi. Buharlaştırma ünitesinin cam fanusu kapatılıp vakum cihazı çalıştırılarak vakumun 10^{-5} Torr mertebesine kadar inmesi beklendi. Basınç $\sim 10^{-5}$ Torr mertebesine ulaşınca, ısıtıcı tungsten flamanı akım verilerek % 99.99'lık Al, KS/p-Si'un organik kaplı yüzeyine maskenin boşlukları üzerinden kaplanıp nokta kontaklar oluşturuldu. Bir müddet bekledikten sonra vakum cihazına hava verilip buharlaşma ünitesi açıldı. Elde edilen Al/KS/p-Si diyotunu şematik gösterimi ve filmin SEM fotoğrafı Şekil 4.6 da verilmiştir.



Şekil 4.6. Al/ KS/p-Si diyotunun şematik gösterimi ve SEM fotoğrafı.

4.5.3. Akım-gerilim ölçümlerinin alınması

Elde edilen Al/KS/p-Si yapısının, elektriksel karakterizasyonunun belirlenmesi için, öncelikle bu yapının -3.0 ile 3.0 V değerleri arasında 0.02 V artışlarla akım-gerilim (I - V) ölçümleri alındı. Farklı ışık şiddetleri altında Şekil 4.7’de verilen Keithley sourcemeter ve solar simülasyon cihazı kullanılarak yapılan ölçümler ve elde edilen veriler bilgisayar ortamına aktarıldı. Bu ölçümler sonucunda, yapımızın doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü.



Şekil 4.7. Işık altı I - V ölçümünde kullanılan voltaj kaynağı ve solar simülasyon cihazı.

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

4.5.4. Kapasitans-gerilim ölçümlerinin alınması

Diyotun sabit frekans altında kapasitans-gerilim (C - V) ölçümleri farklı frekans değerleri için Şekil 4.8’de verilen HP 4294A (40 Hz-110 MHz) İmpedans Analizör cihazı kullanılarak gerçekleştirildi. Numunenin (C - V) ölçümleri (-3 ile 3) V 30 mV artışlarla 200, 500, 1000, 2000, 3000 kHz sabit frekans değerlerinde alınmıştır.



Şekil 4.8. C - V ölçümünde kullanılan HP 4294A impedans analizör cihazı.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Giriş

Bu bölümde, kinolin sarısının optik özellikleri ve Al/KS/p-Si diyodunun elektriksel özelliklerinin tesbiti için alınan ölçümler ve elde edilen sonuçlar detaylı olarak verilmektedir. Öncelikle kinolin sarısının optik özelliklerinin incelemek için soğurma ölçümleri alındı. Alınan ölçümler analiz edilip kinolin sarısı molekülünün 111yasak enerji band aralığı hesaplandı. Kinolin sarısı molekülü kullanılarak hazırlanan Al/KS/p-Si diyodunun oda sıcaklığında karanlıkta ve farklı ışık şiddeti altındaki akım-gerilim ölçümleri ve farklı frekans değerlerindeki kapasitans-gerilim ölçümleri alındı. Diyodun elektriksel karakteristik parametreleri olan idealite faktörü (n), seri direnç (R_s), engel yüksekliği (Φ_b) değerleri akım-gerilim ölçümlerinden Norde ve Cheung' fonksiyonları kullanılarak hesaplandı. Sabif frekans altındaki kapasite-gerilim (C - V) ölçümleri farklı frekans değerleri için alındıktan sonra, bu ölçümler kullanılarak (C^2 - V) grafikleri çizilip hesaplanan engel yüksekliği değeri diğer bulgularla karşılaştırıldı.

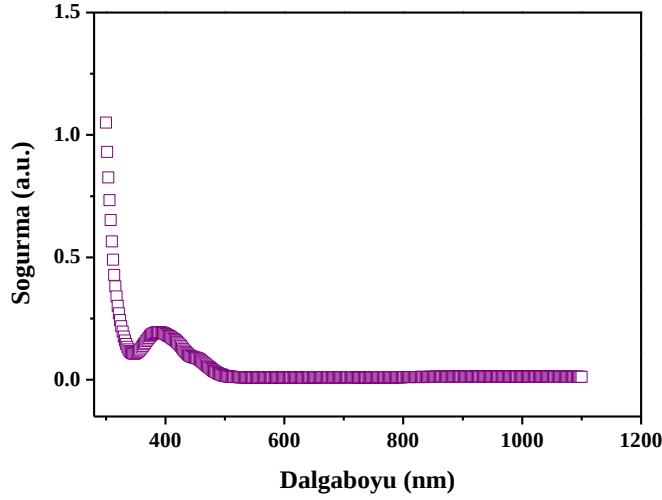
5.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

5.2.1. Kinolin sarısı molekülünün soğurma karakteristiği

KS molekülünün optik özelliklerinin tayin edilebilmesi için temizlenip, kurutulmuş lam üzerine, metanolde çözülmüş KS molekülünün ince filmi oluşturuldu. Daha sonra bu ince filmin görünür bölge soğurma ölçümü Perkin Elmer Lambda 36 UV/VIS spektrofotometresi kullanılarak alındı. Şekil 5.1.a'da KS kompleksinin soğurma spektrumu görülmektedir. KS bileşiğinin optik bant aralığı (E_g) (Pankove 1975),

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^m \quad (5.1)$$

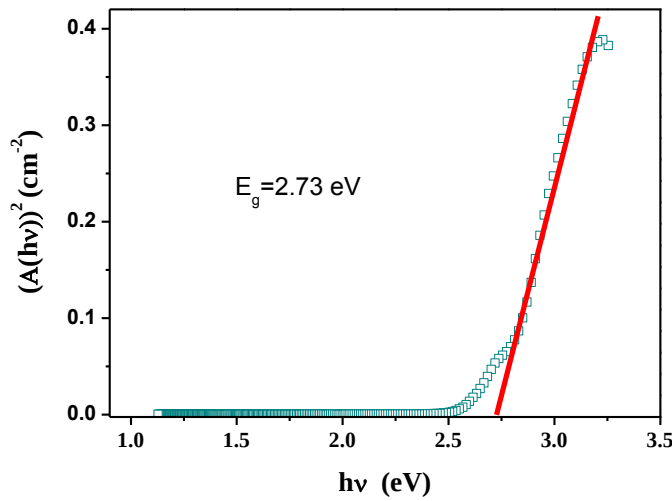
eşitliği ile çözülebilir. Burada α soğurma katsayısı, B sabit sayı, $h\nu$ gelen ışığın enerjisi ve m doğrudan bant aralığı için $\frac{1}{2}$ 'dir.



Şekil 5.1. Kinolin sarısı molekülünün soğurma spektrumu.

5.2.2. Optik metot yardımıyla E_g nin belirlenmesi

Şekil 5.1' in verileri ve Eş. 5.1 kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen $(A(h\nu))^2 - h\nu$ grafiği Şekil 5.2'de görülmektedir. KS molekülünün doğrudan E_g bant aralığı $(A(h\nu))^2 - h\nu$ grafiğinin lineer kısmının yatay eksenini kestiği noktadan 2.73 eV olarak hesaplandı. 2.73 eV bant aralığı ile KS molekülünün bir yarıiletken band aralığına sahip olduğu, elektriksel ve optik devre elemanı üretiminde kullanılabileceği hakkında öngörü elde edildi.



Şekil 5.2. Kinolin Sarısı molekülünün $(A(h\nu))^2 - h\nu$ grafiği.

5.3. Al/Kinolin Sarısı/p-Si Diyodunun Akım-Gerilim Karakteristiği

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

$$I = I_0 \exp \left[\frac{e(V - IR_s)}{nkT} \right] \quad (5.1)$$

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.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp \left[-\frac{e\Phi_b}{kT} \right] \quad (5.2)$$

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

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (5.3)$$

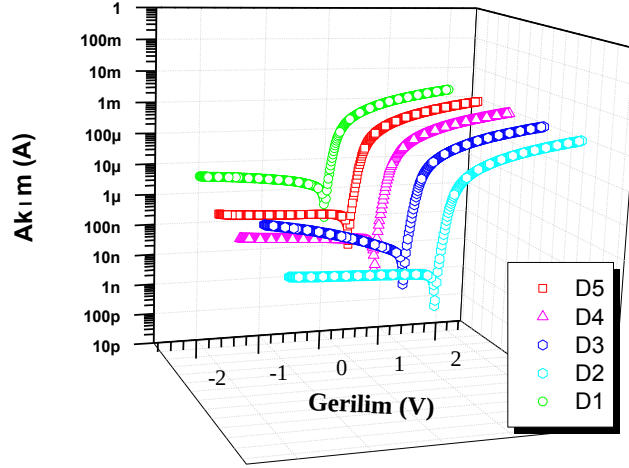
ifadesi yardımıyla hesaplanır. Ölçümler sonucunda elde edilen $\ln I$ - V grafiği (Şekil 5.3) ve Eş. 5.3 kullanılarak ortalama idealite faktörü değeri $n=1.23$ olarak hesaplandı.

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

$$\Phi_b = \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (5.4)$$

eşitliği ile hesaplanabilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen ortalama engel yüksekliği değeri 0.76 eV olarak bulundu. Bu değer geleneksel Al/p-Si MS kontağın engel yüksekliği değerinden 0.19 eV daha yüksektir. Bu bulgular yardımıyla, KS ara

tabakanın varlığının aygıtın performansını etkilediği ve MS kontağın karakteristiklerinin organik arayüzey tabaka ile modifiye edilebilirliği söylenebilir.



Şekil 5.3. Oluşturulan tüm Al/ KS /p-Si diyotlarının $\ln(I)$ -V grafiği.

Ayrıca herbir kontak için yapılan hesaplamalarda elde edilen n ve Φ_b değerleri Çizelge 5.1 de verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi idealite faktörü değeri herbir kontak noktası için 1'den büyük çıkmıştır. İdealite faktörünün 1'den büyük olması diyotların ideallikten saptığının göstergesidir. Daha önce yapılan çalışmalarda bu sonuçlara benzer sonuçlar bulunmuştur (Çakar ve ark., 2004).

Çizelge 5.1. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının $\ln(I)$ -V grafiklerinden elde edilen elektriksel parametreleri.

Diyot no	I_0 (A)	n	Φ_b (eV)
D ₁	5.94×10^{-7}	1.30	0.69
D ₂	2.73×10^{-7}	1.15	0.77
D ₃	2.04×10^{-7}	1.19	0.77
D ₄	3.86×10^{-7}	1.33	0.77
D ₅	2.80×10^{-7}	1.18	0.78
D _{ort}	3.47×10^{-7}	1.23	0.76

Örneğin Akkılıç ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, Cu II complex arayüzey tabakalı Cu II complex/n-Si/AuSb diyotu hazırlanmış ve idealite faktörü 1.84 ve engel yüksekliği 0.77 eV olarak ölçülmüştür (Akkılıç ve ark. 2010). Ek olarak, Ocak ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, enzim arayüzey tabakalı Al/enzim/p-Si diyotunun engel yüksekliğinin geleneksel Al/p-Si kontaktağın değerinden 0.20 eV daha yüksek olduğu rapor edilmiştir (Ocak ve ark., 2013). Bazı araştırmacılar ideallikten sapmaya neden olarak organik ara tabaka ile ikinci bir mekanizmanın ara yüzeyde oluşmasını gösterirken (Asubay ve ark. 2008), bazı araştırmacılar tükenim bölgesinde elektron ve deşiklerin tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlamışlardır (Yakuphanoglu 2007).

5.3.1. Cheung fonksiyonları ile karakteristiklerin belirlenmesi

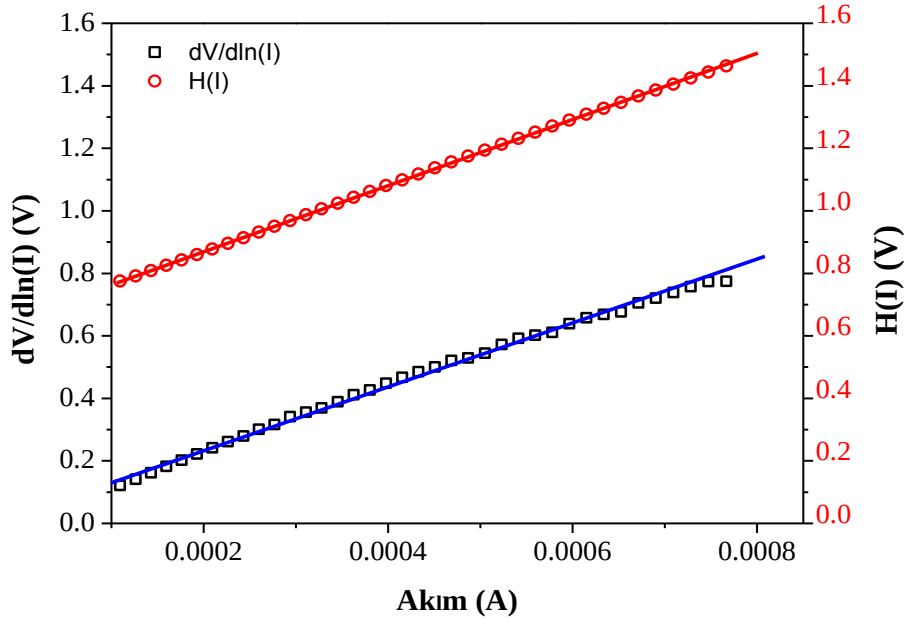
Diyotlara ait seri direnç değerleri Cheung (Cheung 1986) tarafından geliştirilen metot ile hesaplanabilir. Cheung bağıntıları,

$$\frac{dV}{d\ln(I)} = IR_s + n \left(\frac{kT}{q} \right) \quad (5.5)$$

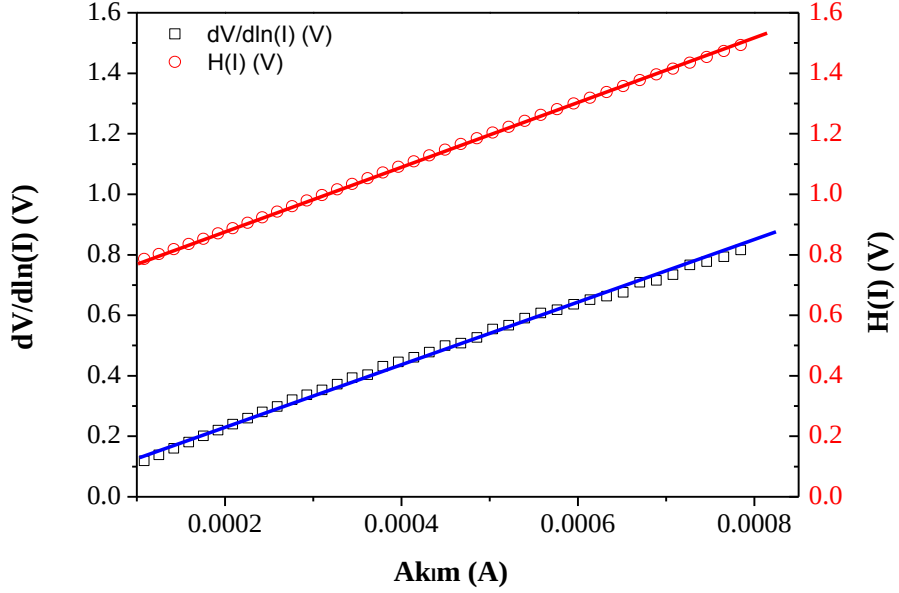
$$H(I) = V - \left(\frac{n k T}{q} \right) \ln \left(\frac{I}{A A^* T^2} \right) \quad (5.6)$$

$$H(I) = IR_s + n \Phi_b \quad (5.7)$$

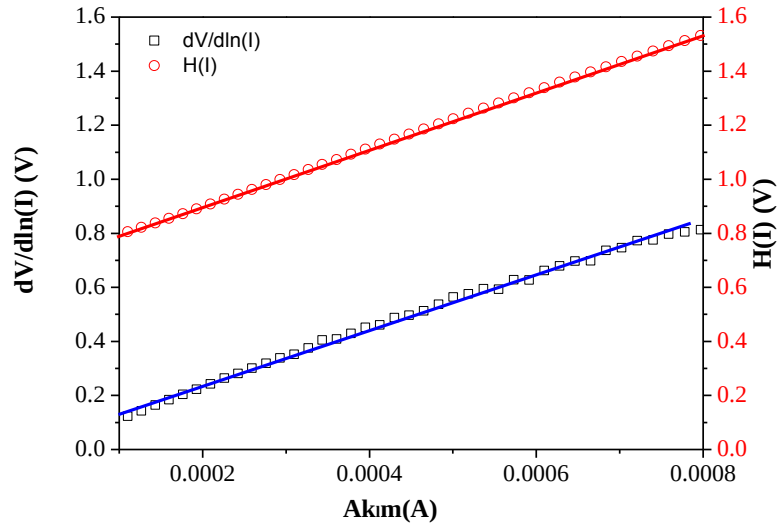
şeklinde verilir. $dV/d\ln(I)-I$ ve $H(I)-I$ eğrileri seri direnç bölgelerinde lineer doğrular vermelidir. Tüm kontaklara ait $dV/d\ln I-I$ ve $H(I)-I$ eğrileri Şekil 5.4(a-e)'de gösterilmiştir. Grafiklerde görüldüğü gibi tüm diyetler seri direnç bölgelerinde lineer bölgeye sahipler. $dV/d(\ln I)-I$ grafiklerinin eğimlerinden R_s ve düşey eksen kestiği yerden $n(kT/q)$ değerleri hesaplanır. Benzer şekilde $H(I)-I$ eğrilerinin eğimlerinden R_s ve düşey eksen kestiği yerden Φ_b değerleri bulunur. Her iki grafikten elde edilen R_s değerleri yöntemin doğruluğunu kontrol amaçlı kullanılır. Bu yöntemlerle elde edilen tüm sonuçlar Çizelge 5.2 'de gösterilmiştir.



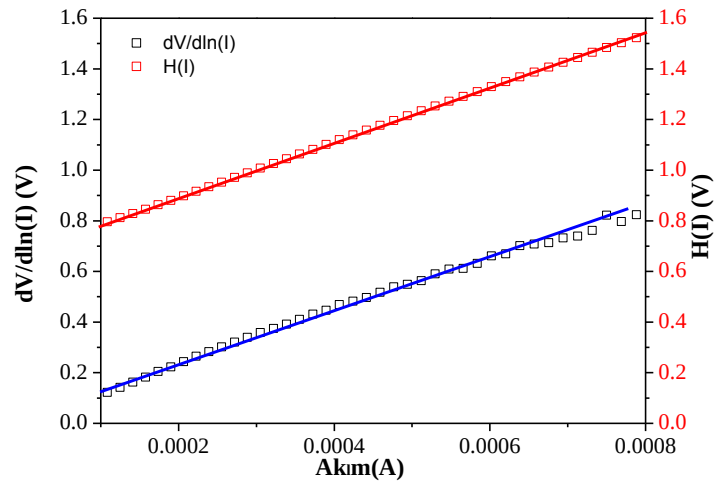
Şekil 5.4. a) Al/ KS/ p-Si yapısı 1 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.



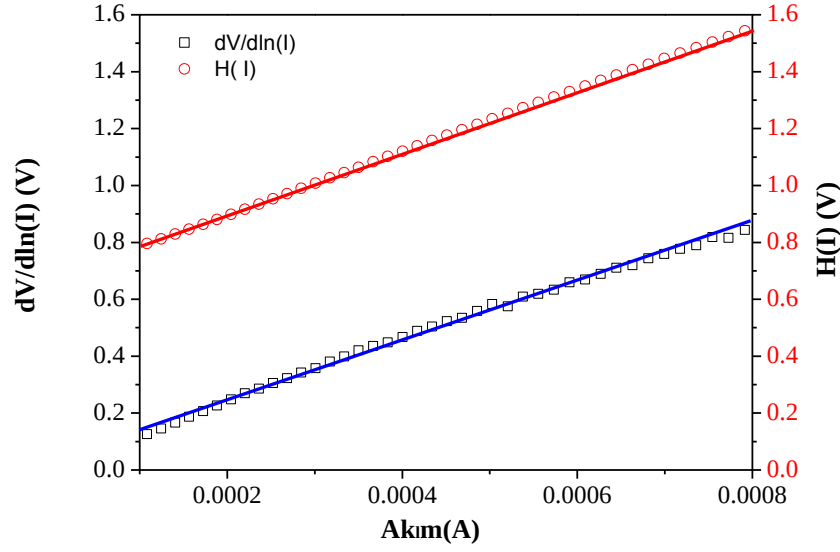
Şekil 5.4. b) Al/ KS/ p-Si yapısı 2 nolu diyota ait $H(I)$ - I ve $dV/d(\ln I)$ - I eğrileri.



Şekil 5.4. c) Al/ KS/ p-Si yapısı 3 nolu diyota ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.



Şekil 5.4. d) Al/ KS/ p-Si yapısı 4 nolu diyota ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.



Şekil 5.4. e) Al/ KS/ p-Si yapısı 5 nolu diyota ait $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln I)-I$ eğrileri.

Çizelgeden görüldüğü gibi Cheung 1 ve Chenug 2 fonksiyonları yardımıyla hesaplanan Seri direnç değerleri birbiri ile uyumludur. Bununla beraber, idealite faktörleri ve engel yüksekliği değerleri de $\ln(I)-V$ grafiğinden elde edilen bulgularla uyum içindedir.

Çizelge 5.2. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının Cheung fonksiyonları kullanılarak hesaplanan elektriksel parametreleri

Kontak no	Cheung-1		Cheung-2	
	n	R_s (Ω)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
D ₁	1.13	1007	981	0.71
D ₂	1.13	1007	986	0.72
D ₃	1.24	1009	1004	0.69
D ₄	1.09	1034	1007	0.75
D ₅	1.16	1092	1032	0.70
D _{ort}	1.15	1029	1002	0.72

5.3.2. Norde fonksiyonu ile karakteristiklerin belirlenmesi

Norde engel yüksekliği ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir (Norde 1979). Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu,

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (5.8)$$

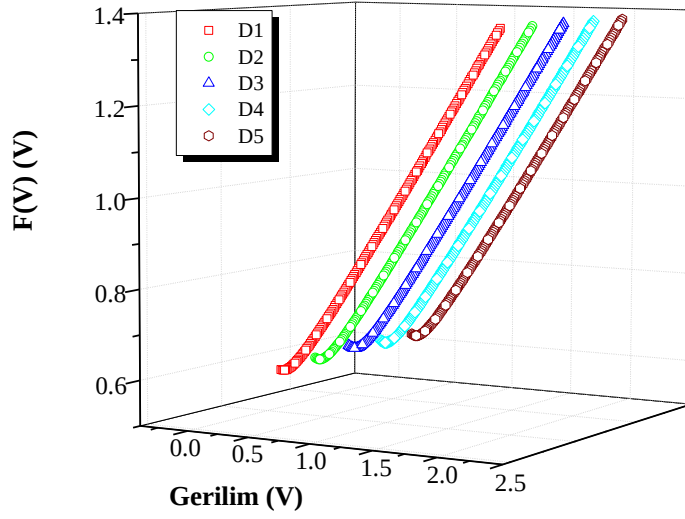
şeklinde yazılmaktadır (Karataş ve ark., 2007). Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tam sayıdır ve $I(V)$ ifadesi I - V eğiminden elde edilen akım değeridir. Bu çalışmada elde edilen tüm diyotların idealite faktörleri 1-2 aralığında olduğundan dolayı γ değeri 2 olarak alındı. Bu metotta engel yüksekliği,

$$\Phi_b = F(V_{min}) + \frac{V_{min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (5.9)$$

olarak verilir. Burada $F(V_{min})$ ifadesi F - V grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir, V_{min} ise bu değere karşılık gelen gerilim değeridir. Şekil 5.5 tüm diyotlara ait $F(V)$ - V grafiklerini vermektedir. Norde metodunda seri direnç değerleri,

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{qI_{min}} \quad (5.10)$$

formülü ile bulunur. Burada I_{min} değeri V değerine karşılık gelen akım değeridir. Çizelge 5.3'de tüm diyotların Norde fonksiyonları tarafından elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç sonuçlarını göstermektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi engel yüksekliği değerleri hem $\ln(I)$ - V grafiklerinden hem de Cheung fonksiyonları ile elde edilen sonuçlarla uyum göstermektedir. Fakat Cheung fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerleri Norde fonksiyonları ile elde edilen seri direnç değerleri arasında farklılık vardır. Bu fark metodların yapılarından kaynaklanmaktadır. Norde metodunda sadece seri direnç bölgesi hesaba katılırken, Cheung metodunda tüm doğru beslem değerleri üzerinde hesaplama yapılmasına atfedilebilir (Güllü ve ark.2008). İki farklı metod ile elde edilen değerler arasındaki benzeri farklılıklar daha önceki çalışmalarda da rapor edilmiştir (Tombak ve ark., 2014).



Şekil 5.5. Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının $F(V)$ - V grafiği.

Örneğin, Gencer Imer ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, oda sıcaklığında alınan ölçümlerin $\ln(I)$ - V grafiğinden idealite faktörü ortalama değeri 3.57, engel yüksekliği 0.75 eV olarak hesaplanırken, Cheung metodu yardımıyla idealite faktörü ortalama değeri 3.93, engel yüksekliği değeri 0.78 eV ve seri direnç ortalama değeri 1156 Ω olarak bulunmuştur. Norde metodu yardımıyla yenilenen hesaplar sonucunda ise engel yüksekliği 0.79 ve seri direnç değeri 2875 Ω bulunmuştur. Bu farklılık yine metodların yapısal farklılığına atfedilmiştir.

Çizelge 5.3 Oluştulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının Norde fonksiyonları ile hesaplanan elektriksel parametreleri

Kontak no	$F_{\min}$ (V)	$V_{\min}$ (V)	$I_{\min}$ (A)	R_s (Ω)	Φ_b (eV)
D ₁	0.697	0.175	0.151×10^{-7}	1487	0.75
D ₂	0.702	0.165	0.150×10^{-7}	1496	0.75
D ₃	0.709	0.165	0.143×10^{-7}	1373	0.76
D ₄	0.706	0.185	0.157×10^{-7}	1495	0.77
D ₅	0.704	0.155	0.132×10^{-7}	1639	0.75
D _{ort}	0.704	0.169	0.146×10^{-7}	1498	0.77

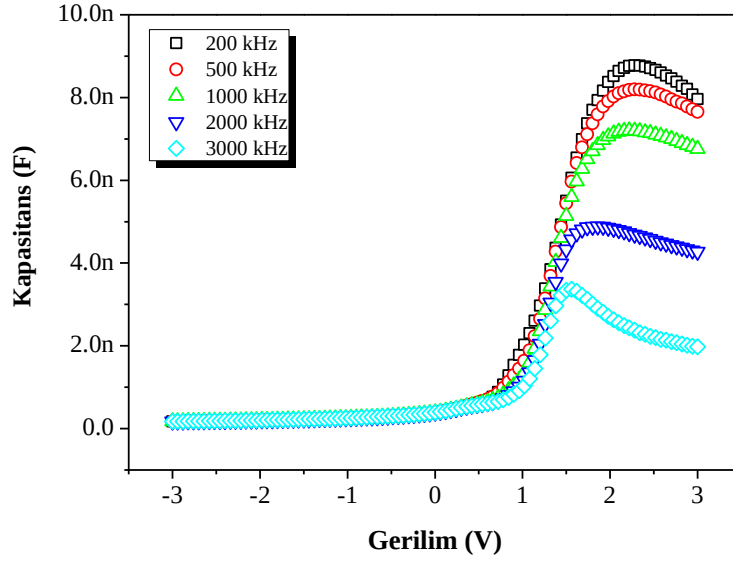
5.4. Al/Kinolin Sarısı/p-Si Diyodunun Kapasitans-Gerilim Karakteristiği

Kapasitans-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 5.6 Al/KS/p-Si diyotunun 200, 500, 1000, 2000, 3000 kHz, frekanslarda -3.0 ile 3.0 V aralığında 30 mV artışlarla alınan ölçümün C-V grafiklerini göstermektedir. Grafiklerden görüldüğü gibi tüm frekanslarda kapasite değerleri gerilim artarken artmaktadır. Buna ek olarak yüksek frekanslarda kapasite değeri düşmüştür. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini göstermektedir. Yeterince yüksek frekansta alınan kapasite-gerilim ölçümleri ara yüzeydeki yüklerin AC sinyallerini takip edemediğini göstermektedir.

Diyotların 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-Si diyotlar için (Rhoderick ev ark.,1988)

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d+V)}{q\epsilon_s \epsilon_0 A^2 N_a} \quad (5.11)$$

olarak verilir. Burada A diyotun etkin alanı, ϵ_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, V_d ise C^{-2} -V eğrisinin yatay eksenini kestiği yerden hesaplanan sıfır beslem difüzyon potansiyelidir. Tüm yapılara ait C^{-2} -V eğrileri Şekil 5.7’de gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C-V grafiği.

Diyota ait engel yüksekliği aşağıda verilen eşitlik 5.12 yardımı ile hesaplanabilir.

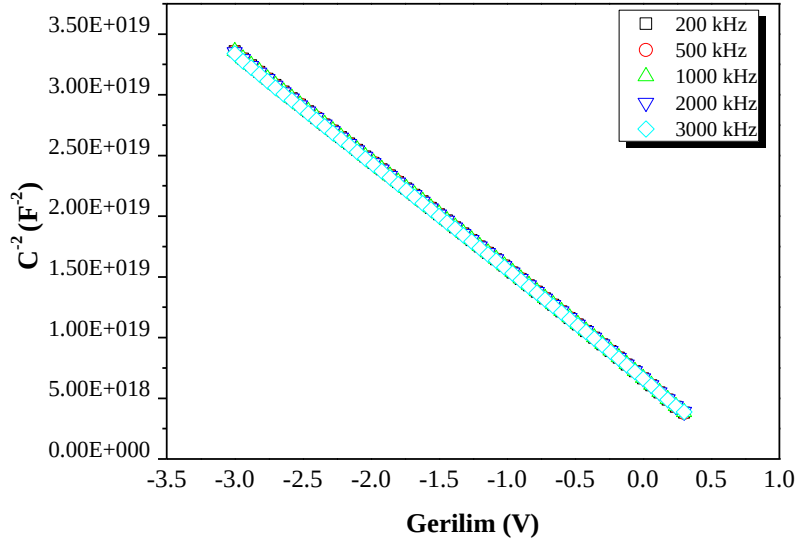
$$\Phi_b(C - V) = \frac{V_d}{n} + V_p \quad (5.12)$$

Burada V_p değeri yarıiletkenin nötral bölgesindeki valans bandının en yüksek değeri ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyel farktır, yani Fermi enerji seviyesine karşılık gelir.

Bu deneylerde kullanılan p-Si kristalinin öz direnci 1-10 ohm-cm olup, oda sıcaklığında mobilitesi $480 \text{ cm}^2/\text{V-s}$ olarak ve valans bandındaki durum yoğunluğu $N_v = 1.04 \times 10^{19}$ olarak üretici firma tarafından verilmektedir. Akseptör yoğunluğu, Eş. 3.76 da ilgili yerde C^{-2} -V grafiğinin lineer kısmının eğimi kullanılarak hesaplandı. Fermi enerji seviyesi ise,

$$V_p = E_f = kT \ln\left(\frac{N_v}{N_a}\right) \quad (5.13)$$

eşitliği yardımıyla hesaplandıktan sonra, Al/KS/p-Si diyotunun engel yükseliği değeri Eş. 5.12. kullanılarak hesaplandı. Farklı frekanslardaki C^{-2} -V grafiğinin lineer kısmı yardımıyla hesaplanan Al/KS/p-Si diyotunun karakteristik parametrelerinin değerleri Çizelge 5.4 te gösterilmiştir.



Şekil 5.7. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C^2 -V grafiği.

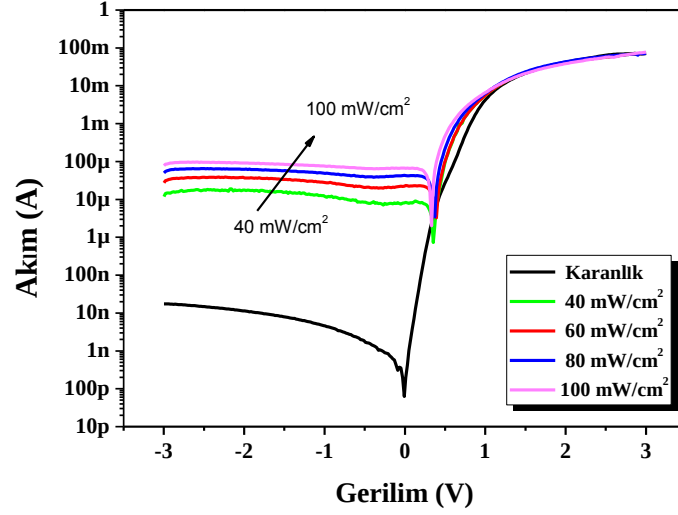
Çizelge 5.4. Al/KS/p-Si diyotunun farklı frekanslardaki C^2 -V grafiği yardımıyla hesaplanan elektriksel parametreleri

Frekans (kHz)	N_a (cm ⁻³)	E_f (eV)	V_d (eV)	V_d/n (eV)	$e\Phi_b$ (eV)
200	4.247×10^{15}	0.202	0.750	0.609	0.811
500	4.245×10^{15}	0.202	0.750	0.609	0.811
1000	4.256×10^{15}	0.202	0.760	0.618	0.820
2000	4.263×10^{15}	0.202	0.758	0.616	0.812
3000	4.283×10^{15}	0.202	0.762	0.619	0.821

5.5. Fotoelektrik Özelliklerin İncelenmesi

Al/KS/p-Si diyotunun fotoelektrik 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 5.8 bu ölçümlere ait aydınlık ve karanlık ortam kıyaslamalı $\ln(I)$ - V grafiğini göstermektedir. Şekil 5.8’ den de çok net bir şekilde görüleceği gibi üretilen diyot ışığa karşı duyarlıdır.

Ters beslem bölgesinde ışığın şiddeti artırıldığında, ters beslem akımının arttığı görülmektedir.



Şekil.5.8. Al/KS/p-Si/diyotunun güneş similatörü altında, farklı ışık şiddetlerinde elde edilen $\ln(I)$ -V grafikleri.

Diyotun ışığa karşı duyarlılıklarının gözlemlenebilmesi için -3.0 V'da ve 40, 60, 80 ve 100 mW/cm² yoğunluğa sahip ışık altındaki ve karanlıktaki akım değerleri incelenmiş ve V_{oc} , I_{sc} , değerleri bulunmuştur. Bulunan bu değerler Çizelge 5.5' te belirtilmiştir.

Çizelge 5.5. Al/KS/p-Si diyotunun farklı ışık şiddeti altındaki karakteristik güneş pili parametreleri

Işık Şiddeti (mW/cm ²)	V_{oc} (mV)	I_{sc} (μA)
40	593	8.16
60	653	22.28
80	713	42.93
100	713	66.82

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Teknolojideki çok hızlı ilerleme sebebiyle, son zamanlarda MS ve MIS yapılar üzerine dikkate değer çalışmalar yapılmaktadır. Ayrıca, geliştirilen yeni devre elemanlarının elektronik özelliklerinin belirlenmesi, farklı uygulama alanlarının tespit edilmesine yönelik çalışmaların sayısı da, her geçen gün artarak devam etmektedir.

Bu tezde, KS (Kinolin sarısı) bileşiğinin optik ve elektronik özellikleri incelenmiştir. Metanolde çözülerek hazırlanan KS çözeltisi ile lam üzerinde film oluşturulup *UV-Vis* ölçümleri alınmıştır. Bu ölçümler yardımıyla soğurma katsayısı hesaplanıp, malzemenin yasak enerji band aralığı 2.73 eV olarak bulunmuştur (Şekil 5.2). Elektronik özellikleri incelemek için KS bileşiği kullanılarak heteroeklemler oluşturulmuştur. Bunun için öncelikle laboratuvar ortamında kimyasal olarak temizlenen (100) yönelimine sahip p-Si yarıiletken malzemesi kullanıldı. Yarıiletkenin mat yüzeyine Al metali yüksek vakum ortamında buharlaştırılıp, kuartz fırında tavlandı. Böylece omik kontağı hazırlanan yapının üzerine metanolde çözülen KS bileşiği uygulanıp, spin kaplama cihazı ile ince film oluşturuldu. Daha sonra yüksek vakum ortamında Al metali buharlaştırılarak Al/KS/p-Si/Al yapısı elde edildi.

Oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının karanlık ortamda yapılan *I-V* ölçümlerinden yapının doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü. Yapılan hesaplamalarda idealite faktörünün ortalama değeri 1.23 ve engel yüksekliğinin 0.76 eV olarak belirlendi. İdealite faktörü, ideal diyotlar için 1 dir. Bulunan idealite faktörünün 1' den büyük olmasının nedeni, kullanılan ara yüzey tabakanın varlığına, yüzey durumlarına ve seri direnç etkisine atfedildi. Bu sonuç, organik ara tabaka ile ikinci bir mekanizmanın ara yüzeyde oluşmasına, tükenim bölgesinde elektron ve boşlukların tekrar birleşmesi veya uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlanabilir. Şekil 5.3 de görüldüğü gibi oluşturulan tüm Al/KS/p-Si diyotlarının $\ln(I)-V$ eğrisi yüksek gerilim değerlerinde lineerlikten sapmaktadır. Bunun nedenini seri direnç etkisine bağlamak doğru olur. Seri direnç değeri ve engel yükseklik değerlerini belirlemek için Cheung ve Norde tarafından geliştirilen hesaplama metodları kullanılmıştır. Sonuçlar Çizelge 5.2 ve 5.3 de verilmiştir. Cheung fonksiyonlarına göre seri direnç değerleri ortalaması 1.03 ve 1.00 k Ω , idealite faktörü değerleri ortalaması 1.15

ve engel yüksekliği ortalama değeri 0.72 eV olarak hesaplandı. Bu sonuçların akım-gerilim verilerinden elde edilen sonuçlarla uyum içinde olduğu görüldü. Norde metoduna göre seri direnç değerleri ortalaması 1.49 k Ω ve engel yüksekliği 0.77 eV olarak hesaplandı. Burada seri direnç değerinin farklı çıkmasının nedeni metodun kendi özelliğinden kaynaklanmaktadır.

Daha sonra oluşturulan yapının C-V ölçümleri yapılmış ve diyotun tüm frekanslarda kapasite değerlerinin, gerilim artarken arttığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak yüksek frekanslarda kapasite değeri düşmüştür. 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. Diyotun engel yükseklikleri C^2-V eğrisi kullanılarak tekrar hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda ters beslem C^2-V eğrisinden hesaplanan değer $\ln(I)-V$ 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 atfedilebilir.

Hazırlanan Al/KS/p-Si/Al diyotunun ışığa karşı duyarlılığını ölçmek için AM1.5 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 5.8 den kolaylıkla görüldüğü gibi, ters beslem bölgesinde akım yüksek bir oranda artmıştır. Bu sonuç, diyotun optoelektronik uygulamalarda (fotodiyot, fotosensör vb.) kullanılabileceğini göstermiştir (Ugur ve ark., 2015).

Bu tez çalışmasında, organik arayüzey tabakası olarak kinolin sarısının kullanılabilirliği ve bu arayüzey tabakası ile heteroeklemin elektriksel parametrelerinin modifiye edilebildiği gösterilmiş oldu. Ayrıca bu arayüzey tabaka ile Al/p-Si diyotunun ışığa duyarlılığı ortaya konuldu. Bu bağlamda, diyotun farklı amaçlara yönelik optoelektronik uygulamalarının tespit edilmesi, bu alanlarda kullanılmak üzere organik arayüzey tabakalı heteroeklem yapısı üretimi ve karakterizasyonuna dair yapılan çalışmalara katkı sağlanmış oldu.

KAYNAKLAR

- Akkılıç, K., Ocak, Y.S., Kılıçoğlu, T., İlhan, S., Temel, H., 2010, Calculation of current-voltage characteristics of a Cu(II) complex/n-S-/AuSb schottky diode. **Cur. Appl. Phys.**, **10**: 337-341.
- Asubay, S., Güllü, Ö., Türüt, A., 2008, Determination of the laterally homogeneous barrier height of thermally annealed and unannealed A/P-InP/Zn-Au Schottky barrier diodes. **Appl. Surf. Sci.**, **254**: 3558.
- Bethe, H.A., 1942. Theory of the boundary layer of crystal rectifiers. **MIT Radia. Lab. Rep.**, **43**: 12.
- Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics. **Appl. Phys. Lett.**, **49**: 85-87.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965a. Electron optical phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal semiconductor structures. **Sol. Sta. Electron.**, **8** (12): 979-990.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1965b. Electron-optical-phonon scattering in the emitter and collector barriers of semiconductor-metal-semiconductor structures. **Sol. Sta. Electron.**, **9**: 1035-1048.
- Crowell, C.R., Sze, S.M., 1966. Current transport in metal-semiconductor barriers. **Sol. Sta. Electron.**, **9**: 1035.
- Çakar M., Temirci, C., Türüt, A., 2004. The Schottky barrier height of rectifying , Cu/pyronine-B/p-Si, Au/pyronine-B/p-Si and Sn/pyronine-B/p-Si, and Al/pyronine-B/p-Si contacts. **Synt. Met.**, **142**: 177–180.
- Çetinkara, H. A., Sağlam, M., Türüt, A., Yalçın, N., 1999. The effects of the time-dependent and exposure time to air on Au/epilayer n-Si Schottky diodes. **Eur. Phys. J. Appl. Phys.**, **6**: 89-94.
- Dündar, T., 2007. *Ag/GaAs Schottky Yapıların I-V ve C-V Karakterizasyonu*. (yüksek lisans tezi, basılmamış). Selçuk Ün. Fen Bil. Ens. Konya. 22.
- Gaffar, M.A., El-Fadl, A.A., Anooz, S.B., 2003, Electron irradiation-induced effects on optical spectra of (NH₄)₂ZnCl_{4·x} Sr⁺² single crystals. **Cryst. Res. Technol.**, **38** (1): 83-93.

- Gencer Imer, A., Temirci, C., Gülcan, M., Sönmez, M. 2014. Electrical characteristic of organic-inorganic Pt(II) complex/p-Si semiconductor contacts. ***Mater. Sci. Semicon. Proc.***, **28**: 31-36.
- Gray J.L., Luque A., Hegedus, S., 2003. ***Handbook of Photovoltaic Science and Engineering***. S. John Wiley & Sons, Ltd.
- Green, D. W. E., 1992. Magnitude corrections for atmospheric extinction. ***International Comet Quarterly***, **14**: 55-59.
- Güllü, Ö., Aydoğan, S., Türüt, A., 2008. DNA- based organic-on-inorganic semiconductor Schottky structures: barrier enhancement and temperature effect issues. ***Microelectron. Eng.***, **85**: 1647.
- Guliyev, B., 1985. ***İnce Filmlerde Elektron Taşınma Olayları***. (doktora tezi, basılmamış). Bakü Ü, Fen Edebiyat Fakültesi, Bakü, Azerbaycan.
- Hiromitsu, I., Murakami, Y., Ito, T., 2003. Electroabsorption study of the inner electric field in Phthalocyanine/Perylene solar cells. ***Synt. Met.***, **137**: 1385.
- Karataş Ş., Altındal, Ş.; Türüt, A., Çakar, M., 2007. Electrical transport characteristics of Sn/p-Si Schottky contacts revealed from $I-V-T$ and $C-V-T$ measurements. ***Physica B***, **392** (1-2): 43.
- Ketenci, E., 2010. ***CdO: F Filmlerinin Üretimi ve Karakterizasyonu***, (yüksek lisans tezi, basılmamış). Osmangazi Üniversitesi, Fen Bil. Enst. Fizik Anabilim Dalı, Eskişehir.
- Kılıçoğlu, T., Aydın, M.E., Ocak, Y.S., 2007. The determination of the interface state density distribution of the Al/methyl red/ p-Si Schottky barrier diode by using a capacitance method. ***Physica B***, **388**: 244-248.
- Mott, N. F., 1938. Note on contact between a metal and an insulator or semi-conductor. ***Proc. Camb. Phil. Soc.***, **34**: 568-572.
- Norde, H., 1979 A modified forward $I-V$ plot for Schottky diodes with high series resistance . ***J. Appl. Phys.***, **50**: 5052.
- Ocak, Y.S., Kulakci, M., Kılıçoğlu, T., Turan, R. ve Akkılıç, K., 2009, Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of a Sn/Methylene Blue/p-Si Schottky diode. ***Synt. Met.***, **159**: 1603-1607.
- Ocak, Y.S., 2010. ***Organik-İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu***, (doktora tezi, basılmamış). D. Ü. Fen Bil. Enst. Diyarbakır.

- Ocak, Y.S., Guven, R.G., Tombak, A., Kilicoglu, T., Guven, K., Dogru, M., 2013. Barrier height enhancement of metal/semiconductor contact by an enzyme biofilm interlayer. *Philos. Mag.*, **93**: 2172–2181.
- Omar, M.A., 1975. *Elementary solid state physics: Principles and Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669.
- Pankove, J., 1975. *Optical Process in Semiconductors*, Dover Publications, Inc. New York,
- Rhoderick, E. H., Williams, R. H., 1988. *Metal-semiconductor Contacts*, Clarendon Press (Oxford), Oxford.
- Shockley, W., 1950. *Electrons and Holes in Semiconductors*, D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey.
- Schottky, W., Störmer, R. Waibel, F., 1931. Über gleichrichter nurlkungen von kupferoxyolul gegen fur gebruchte metallelektroden. *Zeits f. Hoch frequenztechnik*, **37**: 162.
- Schottky, W., 1938. The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers. *Z. Phys.*, **113**: 367-414.
- Schottky, W., Waibel, F., 1935. Zur theorie der thermischen fehlordnung in Kristallen. *Naturwissenschaften*, **23**(38): 656-657.
- Sharma G.D., 1995. Electrical and photoelectrical properties of Schottky barrier devices using the chloro aluminium phthalocyanines. *Synt. Met.*, **74**: 227-234.
- Sharma, L. H., 1984. *Metal Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*, Plenum Pres, New York & London, 176.
- Shirakawa, H. Louis, J. E. MacDiarmid, A. G, Chiang, C. K. Heeger, A. J., 1977. Synthesis of electrically conducting organic polymers: Halogen derivatives of poly acetylene. *Chem. Soc. Chem. Commun.*, **16**: 578-580.
- Sze, S. M., 1981. *Physics of Semiconductor Devices-Second Edition*, Wiley, USA.
- Soylu, M., 2006. *Atamalı katodik vakum ark depolama sistemiyle üretilen ZnO'nun elektriksel iletkenliği ve ısııl işlemle değişimi* (yüksek lisans tezi, basılmamış). Çukurova Üniversitesi, Fen Bil. Enst. Fizik Anabilim Dalı, Adana, 115 s.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt, A., 2001. High-Barrier height Sn/p-Si Schottky diyodes with interfaciallayer by anodizasyon process. *Appl. Surf. Sci.*, **172**: 1-7.

- Temirci, C., Gülcan, M., Goksen, K., Sönmez, M., 2010, Ohmic and rectifier properties of Al/Ligand(N-APTH) and Cu(II) complex contacts. *Microelectron. Eng.*, **87**: 2282-2287.
- Temirci, C., Gülcan, M., Goksen, K., Sönmez, M., 2011. Metal/semiconductor contact properties of Al/Co(II) complex compounds. *Microelectron. Eng.*, **88**: 41-45.
- Turton, R. 2005. *Katıların Fiziği*, (Çeviren: Yoğurtçu, Y.K.), Aktif Yayınevi, Erzurum, 436.
- Türüt, A., Batı, B., Kökçe, A., Sağlam, M., Yalçın, N., 1996. The Bias- dependence charge of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series Resistance Effect. *Phys. Scripta.*, **53**: 118-122.
- Tombak, A., Ocak, Y.S., Asubay, S., Kılıçoğlu, T., Ozkahraman, F., 2014. Fabrication and electrical properties of an organic-inorganic device based on coumarin 30 dye. *Mater. Sci. Semicon. Proc.*, **24**: 187-192
- Ugur, A., Gencer Imer, A., ve Ocak, Y.S., 2015. Electrical and photoelectrical characterization of an organic-inorganic heterojunction based on quinoline yellow dye. *Mater. Sci. Semicon. Proc.*, **39**: 569-574
- Wilson, A.H., 1932. *Proc. Roy. Soc. London Series A*, **48**: 136.
- Yakuphanoglu, F. 2007, Electronic and photovoltaic properties of Al/CuPc/p-Si photodiode junction barrier. *Sol. Eng. Mater. Sol. Cells*, **91**: 1182-1186.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*. Prentice - Hall, Inc., New Jersey.

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Ali UĞUR
Doğum Tarihi ve Yeri : 03.05.1976 Özalp
Medeni Durumu : Evli

EĞİTİM DURUMU

Lise mezuniyeti ve Yılı : Van Atatürk Lisesi - 1995
Lisans Mezuniyeti : YYÜ Fen Edebiyat Fizik- 1999
Tezsiz Yüksek Lisans : YYÜ. Eğitim Fakültesi 2002-2004
Yabancı Dil : İngilizce

BİLİMSEL FAALİYETLER :

- 1.İmza Yayınları Fen Bilimleri Zümre Başkanlığı (İstanbul)
- 2.MEB Onaylı Fen ve Teknoloji konu anlatımlı kitap ,soru bankası ve deneme sınavı

ULUSLARARASI HAKEMLİ DERGİLERDE YAYINLANAN MAKALE

1. **Ali Ugur**, Arife Gençer Imer, Yusuf Selim Ocak, Electrical and photoelectrical properties of an organic-inorganic heterojunction based on quinoline yellow , Mater. Sci. Semicon. Proc. 39 (2015) 569-574

ULUSLARARASI TOPLANTILARDA YAPILAN SÖZLÜ VE POSTER BİLDİRİ

1. **Ali Ugur**, Arife Gençer Imer, Yusuf Selim Ocak, Fabrication and electrical characterization of an organic-inorganic heterojunction based on quinoline yellow, 1st International conference on organic material technologies (OEMT 2015), Elazığ, Türkiye
2. **Ali Ugur**, Arife Gençer Imer, Yusuf Selim Ocak, Electrical characteristic parametres of organic-inorganic device based on bromotymol blue dye. Nanoscience and nanotechnology for next generation International conference on organic material technologies (NanoNG 2014) Elazığ, Türkiye

İş Denevimi

Projeler : 1-MEB Fatih Projesinde İmza Yayınları e-kitap

: 2-NanoNG14 İNTERNATİONEL CONFERENCE 20-22 August 2014

Çalıştığı Kurumlar :

1-1999 Ayazca İÖO Okul Müd.(Özalp)

2-2001 Gazi İÖO (Van Merkez)

3-2004 Türkiye Yardım Sevenler Derneği Md.Yrd (Van Merkez)

4-2005-2007 Ticare Meslek Lisesi Fizik Öğrt. (Van Merkez)

4-2008 -2014 Van Merkez Anadolu İHL

Adres : Anadolu İ.H.L Merkez/ Van

Cep Tel : 0505 5731271

e-Posta : ali_ugur176@hotmail.com