T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ - BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOL-GEL YÖNTEMİ KULLANILARAK METAL/ NiPc / İNORGANİK YARIİLETKEN YAPILARIN OLUŞTURULMASI VE ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Umran EFE

Enstitü Anabilim Dalı : Fizik

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ

Haziran 2016

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ - BATMAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SOL-GEL YÖNTEMİ KULLANILARAK METAL/ NiPc / İNORGANİK YARIİLETKEN YAPILARIN OLUŞTURULMASI VE ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Umran EFE

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 02.06.2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

Doç. Dr.	**Doç. Dr.**	**Doç. Dr.**
Sezai ASUBAY	**Ömer GÜLLÜ**	**Osman Pakma**
Jüri Başkanı	**Üye**	**Üye**

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Doç. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Hazırladığım bu çalışma Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ rehberliğinde gerçekleştirilmiş bir yüksek lisans tezi olup çalışmam süresince yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Doç. Dr. Ömer GÜLLÜ' ye teşekkürlerimi bir görev bilirim.

Laboratuvar çalışmalarım esnasında yardımlarını esirgemeyen Batman Üniversitesi öğretim üyeleri Doç. Dr. Osman PAKMA ve Yrd. Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN hocalarıma şükranlarımı sunarım.

Bingöl ve Batman Üniversitesi Fizik Bölümünün öğretim üyeleri değerli hocalarıma teşekkür ederim.

Her aradığımda yardımıma koşan ve beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan dostum arkadaşım kardeşim Matematik öğretmeni Metin ÖRGE'ye teşekkür ederim.

Bütün eğitim hayatımda sabırla sırtlarında taşıyan ve beni bu günlere getiren hayattaki en değerli varlıklarım olan anneme, babama ve eşime teşekkür ederim.

Ayrıca tez yazım sürecinde gösterdiği tahamüllünden ve yardımlarından dolayı eşime teşekkür ederim.

Umran EFE

Bingöl 2016

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ……... ii
İÇİNDEKİLER……... iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ……..... v
ŞEKİLLER LİSTESİ……..... vii
TABLOLAR LİSTESİ……..... ix
ÖZET……..... x
ABSTRACT……..... xi

1. GİRİŞ……..... 1

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR……..... 4

3. MATERYAL VE METOD……..... 10
3.1. Metal – Yarıiletken Eklemler……..... 10
3.1.1. Metal/p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Eklemler…..... 10
3.1.2. Metal/p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar…..... 12
3.1.3. Metal (Omik)/p-Tipi Yarıiletken/Metal(Doğrultucu) Yapısı.....… 14
3.1.4. Schottky Kontaklarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi..... 15
3.1.5. Engel Yüksekliği Üzerindeki Etkiler……..... 17
3.1.6. Metal – Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi..... 19
3.2. Norde Fonksiyonu……..... 22
3.3. Cheung Fonksiyonu……..... 25
3.4. Optik Soğurma…..... 27
3.5. Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi..... 28
3.6. Silisyum Kristali (Si)……..... 29
3.7. Alüminyum (Al)……..... 30
3.8. Nikel Fitalosiyanin (NiPc)……..... 31

3.9. Deneysel İşlemler..... 32
3.9.1. Kristalin Temizlenmesi……..... 32
3.9.2. Schottky Diyotların Hazırlanması..…..... 33
3.9.3. Deney ve Ölçüm Sistemi.....…..... 34

4. ARAŞTIRMA BULGULARI…….……..... 35
4.1. Optik Soğurma Ölçümleri……..... 35
4.2. Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri..... 37
4.3. Fotoelektriksel Özelliklerin İncelenmesi..... 38
4.4. Al/NiPc/p-Si/Al Diyodunun C-V Karakteristiği..... 39
4.5. Norde Fonksiyonu ile Diyot Parametrelerinin Bulunması..... 45
4.6. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi. 46
4.7. Al/NiPc/p-Si/Al Diyodunun Kapasite-Frekans Karakteristiği..... 47

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA…….…….. 50

KAYNAKLAR……..... 56
ÖZGEÇMİŞ……..... 63

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Diyotun etkin alanı
A*	: Richardson sabiti
C	: Kapasite
d	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
E_c	: İletkenlik bandının tabanı
E_f	: Fermi enerji seviyesi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E_v	: Değerlik bandının tavanı
eV	: Elektron volt
e	: Elektron yükü
ε_s	: Yarıiletkenin dielektrik sabiti
ε_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
Φ_b	: Schottky engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φs	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
h	: Planck sabiti
I_0	: Ters beslem akımı
I_{sc}	: Kısa devre akımı
J	: Akım yoğunluğu
k	: Boltzmann sabiti
m_h^*	: Boşluğun etkin kütlesi
m_n^*	: Elektronun etkin kütlesi
n	: İdealite faktörü
N_a	: Alıcı (akseptör) konsantrasyonu
N_c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_d	: Verici (donor) konsantrasyonu

p^+ : Aşırı katkılanmış p-tipi yarıiletken

R_s : Seri direnç

T : Mutlak sıcaklık

V_n : Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark

V_{dif} : Difüzyon potansiyeli

V_{oc} : Açık devre gerilimi

V : Uygulanan potansiyel

AC : Alternatif akım

AM 1.5 : Hava kütlesi 1.5

CuPc : Bakır Fitalosiyanin

CoPc : Kobalt Fitalosiyanin

C- V : Kapasite- gerilim

C- f : Kapasite- frekans

DC : Doğru akım

FePc : Demir Fitalosiyanin

G- V : Kondüktans- gerilim

G- f : Kondüktans- frekans

I-V : Akım- gerilim

ITO : İndiyum kalay oksit

LED : Işık yayan diyot

MIGS : Metal- induced gap states

MS : Metal- Yarıiletken kontak

MIS : Metal- Yalıtkan- Yarıiletken kontak

NiPc : Nikel Fitalosiyanin

Pc : Fitalosiyanin

p- InP : p tipi indiyum fosfat

PPy : Polipirol

RR : Doğrultma oranı

ZnPc : Çinko Fitalosiyanin

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Üretilen Al/NiPc/p-Si/Al schottky diyotunun yapısı 3

Şekil 3.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu diyotun enerji bant diyagramları a) kontaktan önce, b) kontaktan sonra ve termal dengede, c) düz beslem durumunda (V>0), d) ters beslem durumunda (V<0) 11

Şekil 3.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak için enerji-bant gösterimi, a)kontak öncesi, b)kontak sonrası ve termal dengede, c) düz beslem durumunda (v>0), d) ters beslem durumunda (v<0) 13

Şekil 3.3. Termal dengedeki p^+pm yarıiletken diyotunun enerji bant gösterimi 14

Şekil 3.4. Düz beslemde metal yarıiletken Schottky kontaklarda imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı 15

Şekil 3.5 +e imaj yükü 18

Şekil 3.6. Metal p-tipi yarıiletken yapılarda doğrultucu diyotun a) potansiyel dağılımı, b) yük dağılımı 19

Şekil 3.7. Yarıiletkende temel absorbsiyon spektrumu 28

Şekil 3.8. Bir yarıiletkende absorbsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden yasak enerji aralığının belirlenmesi (doğrudan bant geçişli madde) 29

Şekil 3.9. Fitalosiyanin molekülünün yapısı 31

Şekil 3.10. $C_{32}H_{12}N_8Na_4NiO_{12}S_4$ yapısı 32

Şekil 4.1. Damlatma yöntemi ile cam altlık üzerine büyütülen NiPc ince filminin soğurma grafiği 36

Şekil 4.2. Damlatma yöntemi ile cam altlık üzerine büyütülen NiPc ince filminin $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ grafiği 36

Şekil 4.3. Al/p-Si referans ve Al/NiPc/P-Si/Al diyotlarının karanlık ortamda I–V grafiği 38

Şekil 4.4. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun karanlık ve ışık altındaki I–V eğrileri 39

Şekil 4.5. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait C-V grafiği 40

Şekil 4.6. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait G-V grafiği 41

Şekil 4.7. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} – V grafiği 42

Şekil 4.8. Al/NiPc/p-Si/Al ekleminin farklı frekanslardaki C^{-2} – V grafiğinden elde edilen engel yüksekliğinin frekansa bağlı değişimi 43

Şekil 4.9. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} – V grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonunun frekansa bağlı değişimi 44

Şekil 4.10. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} – V grafiğinden elde edilen difüzyon potansiyelinin frekansa bağlı değişimi 44

Şekil 4.11. Al/NiPc/p-Si/Al eklemine ait F(V)-V grafiği 45

Şekil 4.12. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun H(I)-I ve dV/d(InI)-I grafikleri 46

Şekil 4.13. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait C-F grafiği 48

Şekil 4.14. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait G-F grafiği 49

TABLOLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Silisyumun oda sıcaklığındaki bazı özellikleri……..... 29

Tablo 3.2. Alüminyumun oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri...…….... 30

Tablo 4.1. LnI-V, Cheung, Norde ve Foto I-V değişimlerinden elde edilen diyot parametreleri….....……... 43

Tablo 4.2. C^{-2}-V grafiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri, alıcı taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli.....…….. 47

SOL-GEL YÖNTEMİ KULLANILARAK METAL/ NiPc / İNORGANİK YARIİLETKEN YAPILARIN OLUŞTURULMASI VE ELEKTRİKSEL PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada p-tipi Silisyum kristali üzerine damlatma yöntemi kullanılarak nikel fitalosiyanin (NiPc) kaplandı. NiPc ince film üzerine termal buharlaştırma sistemi kullanılarak vakum altında saf alüminyum buharlaştırıldı ve Al/NiPc/p-Si diyotu üretildi. Al/NiPc/p-Si yarıiletken diyotun ışıksız ve ışıklı ortamda akım-voltaj (I-V) karakteristiği ölçüldü. I-V grafiği yardımıyla bu yapının doğrultucu özelliğe sahip olduğu gözlendi. Işıklı ortamdaki ölçümler 300 Watt ışık altında gerçekleştirildi ve bu ölçümler sonucunda diyotun fotodiyot özellik gösterdiği görüldü. Farklı frekanslarda kapasite-gerilim (C-V) ve kondüktans-gerilim (G-V) ölçümleri alındı. C-V ölçümleri kullanılarak bulunan C^{-2}-V grafiklerinin eğimlerinden diyotun difüzyon potansiyeli, engel yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonu değerleri hesaplandı. Ayrıca Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak Al/NiPc/p-Si Schottky kontağın diyot parametreleri hesaplandı. Ayrıca kapasite-frekans (C-f) ve kondüktans-frekans (G-f) ölçümleri 0,40V-1,60V aralığında ΔV= 0,05 V adımla alındı.

Anahtar Kelimeler: Schottky diyot, nikel fitalosiyanin, idealite faktörü, engel yüksekliği.

DETERMINATION OF ELECTRICAL PARAMETERS AND FABRICATION OF METAL/NiPc/INORGANIC SEMICONDUCTOR STRUCTURES BY USING SOL-GEL METHOD

ABSTRACT

In this study, nickel phthalocyanine (NiPc) material has been coated onto p-type silicon by using drop cast method. Al metal was grown on the NiPc thin film by thermal evaporator system under vacuum condition and then Al/NiPc/p-Si diode was fabricated. It was performed current–voltage (I-V) measurements of Al/NiPc/p-Si semiconductor diode under dark and light illumination conditions at room temperature. It has been seen that this structure exhibits rectifying behavior from I-V plot. The I-V measurement for the illumination effect has been performed by 300 watt light. It has been seen that the diode has photodiode mode. Capacitance-voltage (C-V) and conductance-voltage (G-V) measurements were performed as a function of frequency. The values of diffusion potential, barrier height and acceptor carrier density were calculated from the slope of C^{-2}-V plot obtained by using C-V measurements. Also the diode parameters of Al/NiPc/p-Si Schottky contact were extracted by using Cheung and Norde functions. Furthermore, the measurements of capacitance-frequency (C-f) and conductance-frequency (G-f) were performed in the range of 0.40V-1.60V with a step of $\Delta V = 0.05$ V.

Keywords: Schottky diode, nickel phthalocyanine, ideality factor, barrier height.

1. GİRİŞ

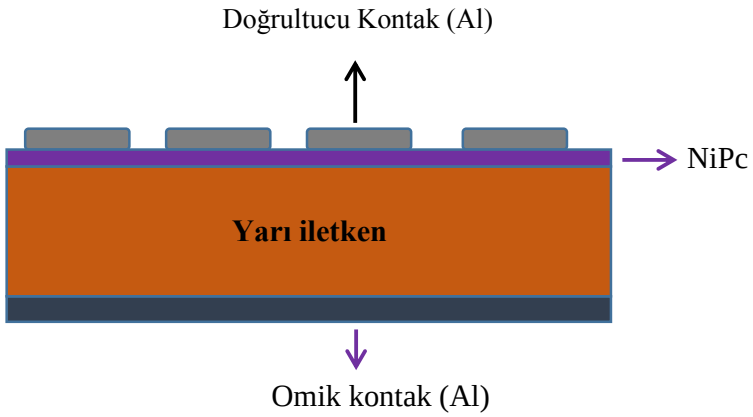
Kimya Nobel ödülü (2000 yılı) alan Alan Hegeer ve araştırma grubunun, 1977 yılında, polimerlerin elektriksel özellikleri üzerine yaptığı çalışmalar sonucunda organik malzemelerin elektriksel ve optoelektronik aygıt yapımında inorganik malzemeler yerine kullanılabileceğine dair fikirlerin gelişmesine sebep olmuştur. Kolay üretilebilmeleri, düşük maliyetli olmaları ve geniş kullanım alanları olması organik malzemelere karşı olan alakayı önemli bir oranda arttırmıştır (Ocak 2010).

Son zamanlarda yapılan çalışmalar, katıhal çalışmalarında organik malzemelerin fotoelektrik, elektrik, optik ve magnetik özellikleri açısından çok ilginç özelliklere sahip olduklarını göstermiştir. Özellikle, FET'ler, güneş pilleri, sensörler, plastik bataryalar, optik veri saklayıcılar, organik elektrolüminesans devre elemanları, anahtarlama devre elemanları gibi birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Organik malzemeler, atomların iyonik veya kovalent bağlarından oluşur, bağımsız moleküllere dayanır ve zayıf moleküller arası etkileşmelerle karakterize edilirler. Organik malzemeler optoelektronik ve elektronik devre elemanlarında ince filmler halinde oluşturulurlar. Organik filmler, vakumda buharlaştırarak kaplama, spin yöntemiyle kaplama, elektrokimyasal kaplama gibi tekniklerle yapılırlar (Yasuhiko 2000, Aydoğan 2004).

Günümüz elektroniğinde metal-yarıiletken kontaklar çok önemli rol oynayan devre elemanlarıdır. Metal ve yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerinden yararlanmak, onlara uygun kontaklar uygulayarak elektronik devrelerde kullanma yolundaki ilk ciddi araştırma, 1870'li yıllarda Braun tarafından yapılmıştır (Braun 1874). 1900'lü yılların başlarında yarıiletken temelli üretilen ilk pratik devre elemanı metal/yarıiletken kontaklardır. Schottky yapılar olarak da bilinen bu kontak yapısı, yarıiletken teknolojisinde değişik uygulama olanakları sağlamaktadır. Günümüzde vakum teknolojisi sayesinde geçmiş tarihlerde yaşanan sıkıntı aşılmış olup yeniden üretilebilen ve güvenilir metal/yarıiletken kontakları üretmek çok kolaylaşmıştır. Elektronik sanayiinde,

metal/yarıiletken kontaklarından, daha çok, hızlı anahtaruygulamaları (switching), mikrodalga karıştırıcı dedektörleri, varaktörler (uygulanan gerilimle kapasitesi değişen kondansatörler) ve Schottky engel tabakalı alan etkili transistörleri olarak faydalanılmaktadır. Öncelikle radyo detektörü, daha sonraları radar detektörü ve mikrodalga diyotu olarak geliştirilmiştir. İkinci Cihan Harbi yıllarında, mikrodalga radarlarının geliştilmesiyle nokta diyotlar, ağırlıklı olarak mikrodalga detektör diyotu ve frekans dönüştürücüsü olarak kullanmışlardır (Torrey 1948, Aydın 2003). Baird 1964 yılında Metal-yarıiletken (MS) alan etkili transistörü buldu. MS yapıların karakteristikleri sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülerek, sıcaklığın tayininde kullanılmıştır (Chandra 1983). 1931'de Walter Schottky ve çalışma arkadaşları, metal/yarıiletken kontakların doğrultma işlemi yapmasına ilişkin ilk adım atılmıştır (Rhoderick 1988, Schottky 1938). Schottky ve Mott doğrultma işleminin görünen yönünün elektronların potansiyel bariyer üstünden sürüklenme ve difüzyon mekanizmalarıyla geçişi temel alınarak izah edilebileceğini belirtmişlerdir (Rhoderick 1988, Schottky 1938, Mott 1938). Mott'a göre, metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarının birbirinden farklı olmalarından ötürü bir potansiyel bariyeri meydana gelmektedir. Elektrik alanın sabit olması ve elektrostatik potansiyelin metal yaklaşımında olduğu gibi mesafeyle lineer olarak değişebilmesi için engel bölgesi kirliliklerden arınmıştır (Mott 1938). Aksine Schottky, metal yaklaşımında olduğu gibi Poisson denklemine göre elektrik alanın lineer olarak artması, elektrostatik potansiyelin ikinci dereceden değişmesi için yüklü kirliliklerin konsantrasyonunun sabit olduğu engel bölgesi fikrini kabul etmiştir (Schottky 1938). İkinci dünya harbi döneminde germanyum ve silisyum ile nokta kontak diyotlar mikrodalga radarlarda kullanılmış, bu önemli gelişme yarıiletken fiziğinin gelişimine önemli derecede yardımcı olmuştur. Bu dönemdeki en önemli katkı; Bethe'nin termoiyonik emisyon teorisidir denebilir (Bethe 1942, Tung 2001, Asubay 2008).

Bu çalışmamızın amacı, nikel fitalosiyanin (NiPc) organik bileşiğini kullanarak Şekil 1.1 de basit gösterimi bulunan Al/NiPc/p-Si/Al Schottky kontak yapısını üretmek ve üretilcek Al/NiPc/p-Si/Al kontağın elektriksel parametrelerini, karanlık ve ışık ortamında bulmaktır. Ayrıca bu tezde Norde ve Cheung fonksiyonları kullanılarak Al/NiPc/p-Si/Al kontağının elektriksel parametreleri (idealite faktörü (n) ,engel yüksekliği (Φ_b)ve seri direnç (R_s)) hesaplanacaktır.



Şekil 1.1. Üretilen Al/NiPc/p-Si/Al Schottky diyotunun yapısı

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Cheung ve Cheung (1986), düz beslem *I-V* ölçümleri yardımıyla diyot parametrelerinin hesaplanmasına ilişkin geliştirdikleri modele dayanarak idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç ifadelerini elde etmiştir.

Wang vd (1992), GaAs yüzeyini P_2S_5 içeren çözeltilerle pasive etmeyi denediler ve kullandıkları bu çözeltilerle pasive edilmiş ara yüzeylerine sahip Au/GaAs Schottky eklemlerin engel yüksekliğinin bir hafta süresince havaya maruz bırakıldığında değişmediğini gözlediler.

Eftekhari (1993), bir çalışmasında, *n*-GaAs'ın yüzey pasivasyonu için selenyum kullanarak elde ettiği MIS Schottky kontakların elektriksel karakteristikleri üzerindeki etkilerini inceledi. Bu çalışmasında ara yüzey hal yoğunluğunun ve tuzak yoğunluğunun azaldığını, bunlara bağlı olarak engel yüksekliği ve ters beslem sızıntı akımının da azaldığını gözlemledi. Bu bulguları ara yüzeyde ve GaAs gövdesinde yüzeye yakın ince bir tabakada gerçekleşen As-Se, Se-Se bağ oluşumlarıyla izah etmeye çalıştı (Güllü 2004).

Wang ve Ashok (1994), hidrojen ile modifiye edilmiş *n*- ve *p*-GaAs yüzeylerine Au büyütüp elektriksel karakteristiklerini I-V, C-V, SR (Spreading Resistans) ve DLTS teknikleriyle incelediler. Au/*n*-GaAs için engel yüksekliğini 0,56 eV, kontrol numunesi için ise 0,80 eV olarak buldular.

Onganer (1996), anodik oksidasyon metodunu kullanarak *p*-tipi Si üzerine metalik polipirol kaplayarak polimer/p-Si Schottky kontak elde edip, C-V ve I-V karakteristiklerini incelemişlerdir. Üretilen bu diyotun iyi bir doğrultucu kontak özelliği gösterdiğini ve I-V karakteristiğinden, engel yüksekliğini Φ_b =0,84 eV ve C-V karakteristiğinden Φ_b =0,94 eV olarak tespit ettiler. İdealite faktörü ise n=1,2 olarak

bulunmuştur. Karakteristiklerinin, bir polimer eritme işleminden sonra, artan engel yüksekliği ve azalan idealite faktörüyle önemli ölçüde iyileştirilebileceğini ve büyük engel yüksekliğine sahip metalik polipirol/*p*-Si yapıların, *p*-Si'un derin seviyelerin karakterizasyonu için kullanılabileceğini göstermişlerdir (Aydoğan 2004).

Kang ve Park (2002), GaAs yüzeyini pasive etmek için sülfürlü ve hidrojenli çözeltiler kullanarak ürettikleri yarıiletken üzerine yaptıkları metal/GaAs Schottky diyotlara ait arayüzeylerini, kapasite-voltaj değişimlerinden faydalanarak incelediler. Bununla birlikte sülfürleme ve hidrojenlendirme işlemlerinin GaAs yüzeyine hiçbir zarar vermediğini ileri sürdüler (Güllü 2004).

Kwong vd (2003), çalışmalarında ITO/fitalosiyanin/Al güneş hücrelerini dört farklı fitalosiyanin bileşiğini (NiPc, CuPc, CoPc ve FePc) kullanarak üretmiş ve bu güneş hücrelerinin fotovoltaik karakterlerini incelemiştir. Araştırma sonucunda %0,0052 verim ile bakır fitalosiyaninli hücrenin en büyük performans gösterdiği rapor edilmiştir.

Karataş ve Altındal (2004), hazırladıkları Zn/p-Si Schottky diyotlarının temel parametrelerini (engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç) *lnI-V* ve Norde ve Cheung fonksiyonları ile hesaplamış ve elde ettikleri sonuçlar arasında iyi bir uyum olduğu gözlenmiştir.

Aydoğan (2004), Sn/PPy/n-Si/Au-Sb diyodunun değişik sıcaklıklarda deneysel I-V, C-V ve C-f ölçümlerini yapıp bu ölçümler yardımıyla temel diyot parametrelerini tespit etti. Ara yüzey özelliklerinin devre elemanının performansı, güvenirliliği ve kararlılığı üzerinde önemli rol oynadığı bilinmektedir. Schottky engel yüksekliği, yarıiletkenin çoğunluk taşıyıcılarının kendilerine ait bant kenarı ile Fermi enerji seviyesi arasındaki farktır. İdeal bir Schottky engel yüksekliği, metalden dolayı oluşan arayüzeyin (MIGS) sürekliliği ile tanımlanırlar. Bu modelden sapmalar, yapıyla ilgili ara yüzeydeki dipoller, ara yüzey yapısı ve ara yüzey kusurları ile ortaya çıkan ikincil türden mekanizmalara atfedilmektedir. Yüzey hazırlama metotlarının avantajlarına rağmen metalden dolayı ara yüzeyin değişmesi söz konusu olmaktadır. Böylece bu durumlar göz önünde bulundurularak, temel diyot parametreleri üzerine sıcaklığın etkisi ve düşük sıcaklıklarda akım iletim mekanizması açıklanmaya çalışıldı (Aydoğan 2004).

El-Nahass vd (2005), NiPc'in toz halini termal buharlaştırma yöntemini kullanarak Au/NiPc/p-Si kontak oluşturmuş ve oluşturdukları kontağın fotoelektriksel ve elektriksel karakteristiklerini araştırmışlardır. Üretilen NiPc/p-Si kontağının doğrultucu karakter sergilediğini ve bu kontağın seri direncinin 750 Ω, paralel direncinin 1,7 MΩ ve doğrultma oranının 1750 olduğunu bulmuşlardır. Bu yapının fotovoltaik ölçümleri sonucunda V_{oc}= 0,32 V, I_{sc}= 186 μA ve veriminin %1,11 olduğunu bildirmişlerdir.

El–Nahass vd (2005), karanlıkta Au/p-ZnPc/p-Si un 302 K - 364 K sıcaklık aralığında akım-voltaj karakteristiklerini incelemişler ve bu yapının doğrultucu özellik gösterdiğini tespit etmişler. Düşük ileri beslemde akım yoğunluğu hollerin termiyonik emisyonları tarafından sınırlandırıldığını görmüşler.

El-Nahass vd (2007), çalışmlarında NiPc filmini termal buharlaştırma yöntemiyle n-Si üzerine kaplayarak p-NiPc/n-Si diyotunu üretmiş ve bu heteroeklemin elektriksel iletim parametrelerini değişik sıcaklıklarda *I-V* ve oda sıcaklığında *C-V* değişimleri ile tespit etmişler.

Yakuphanoğlu vd (2007), oluşturdukları p-Si/CuPc/Au kontağın fotoelektriksel ve elektriksel karakteristiklerini araştırmıştır. Yapılan ölçümler neticesinde p-Si/CuPc/Au kontağın n= 2,38 ve Φ_b= 0,71 eV olduğunu tespit etmiştir. 3500 lüks ışık altında yapmış olduğu *I-V* ölçümleriyle kontağın fotovoltaik parametrelerini V_{oc}= 0,16 V ve I_{sc}= 0,45 μA olarak buldular ve üretilen kontağın fotodiyot özellik sergilediği görülmüştür.

Yakuphanoğlu vd (2008), ürettikleri p-Si/CoPc/Al diyot ile p-Si/Al MS diyotunun elektriksel karakteristiklerini karşılaştırmışlar sonuç olarak CoPc organik tabakanın Al/p-Si kontağının elektriksel karakteristiklerini değiştirdiği ve bu kontağın diyot parametrelerini sırasıyla; n=1,33, Φ_b=0,90 eV, R_s=314,5 kΩ olarak hesaplamışlardır.

Güllü ve Türüt (2008), çözelti–işleme metoduyla quercetin/p-InP heteroeklem güneş hücresi yapısını üretmiş ve oda sıcaklığında *I-V* ve *C-V* karakteristikleri ile incelemişlerdir. Karanlıkta ileri beslem *I-V* karakteristiklerinden bu yapı için bariyer yüksekliği 0,86 eV ve idealite faktörü 3,20 olarak elde edilmiştir. Quercetin/p-InP yapısı için bariyer yüksekliği ve serbest taşıyıcı konsantrasyonu değerleri sırasıyla 1,63 eV ve

$3,8\times10^{17}$ cm^{-3} olarak ölçülmüş, seri direnç hesaplamasında Cheung metodu kullanılmıştır. Bu yapı 120 lüks ışık altında V_{oc} =0,36 V ve I_{sc} =35,3 nA bulunarak fotovoltaik davranış sergilemiştir.

Asubay vd (2009), değişik metal (Bakır, Altın, Alüminyum, Kalay, Kurşun, Titanyum, Çinko) /p-tipi InP Schottky diyotları ile ilgili bir dizi çalışma yapmışlardır. Engel yüksekliğinin homojensizliğinden dolayı diyot parametreleri bir diyottan diğerine farklılık göstermiştir. Metal-yarıiletken kontakların engel yüksekliği metal-induced gap states (MIGS) tarafından belirlenir. Metal/p-tipi InP Schottky kontakların deneysel verilerinden elde edilen homojen engel yüksekliği fiziksel MIGS ve kimyasal elektronegatiflik kombinasyonları üzerine tahminleri doğrulamıştır.

Güllü vd (2010), p-Si yarıiletken kristal üzerine organik film kaplayarak Al/ Congo Red= CR/p-Si (MIS) yapısı oluşturmuş, elde edilen Al/CR/p-Si MIS yapısının iyi bir doğrultucu özellik gösterdiği gözlenmiş. Üretilen bu yapı için ileri beslem *I-V* karakteristikleri kullanılarak n= 1,68 ve Φ_b=0,75 eV bulunmuştur. Si'un uzay yükü bölgesini etkileyen CR organik ara yüzeyi etkili bariyer yüksekliğini arttırmıştır. Bulunan 0,77 eV engel yüksekliği geleneksel Al/p-Si Schottky diyotları engel yüksekliği (0,5 eV) değerinden oldukça yüksektir. MIS diyotun ara yüzey-durum yoğunluğunun $1,24x10^{13}$ - $2,44x10^{12}$ $eV^{-1}cm^{-2}$ aralığında değiştiği bulunmuştur.

Ocak (2010), yaptıkları çalışmada metanoldeki MnHA bileşiğinin çözeltisini kullanarak MnHA/n-Si eklemler oluşturmuş ve bu eklemler üzerine gümüş, alüminyum, altın, krom, bakır, galyum, kurşun ve kalay gibi metallerin ince filmleri elektron demeti veya termal buharlaştırma yöntemleri ile kaplanarak metal/MnHA/n-Si yapılarını elde etmiştir. Elde ettiği bu yapılar doğrultucu özellik göstermiştir. Ürettiği metal/MnHA/n-Si yapılarının elektriksel parametrelerini hesaplamış, *I-V* ölçümleri güneş simulatörü altında ölçülerek bu diyotların fotovoltaik özellikleri araştırılmıştır.

Gupta vd (2011), gerçekleştirdikleri çalışmada lazer depolama ve termal buhar tekniklerini kullanarak ZnO ve CuPc tabanlı p-n eklemlerini üretmişler; yapılan ölçümlerle ZnO-CuPc ekleminin *I-V* karakteristiğinin doğrultucu özellik gösterdiği görülmüştür. Bu yapının engel yüksekliği 0,63$\pm$0,02 eV ve idealite faktörü 4,0$\pm$0,3

değerleri *I-V* verileri kullanılarak hesaplanmıştır. Cheung ve Norde metotları *I-V* karakteristikleriyle ölçülen eklem parametrelerini karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Hamidi (2011), Al/Tips:MEHPPV/p-Si Schottky diyotunu üreterek bu diyotun ışıksız ortamda engel yüksekliğini 0,79 eV ve idealite faktörünü 7,43 ölçerken, ışıklı ortamda engel yüksekliğini 0,86 eV ve idealite faktörünü de 8,02 olarak tespit etmiştir. Diyotun idealite faktörünün 1'den büyük olması yapının ara yüzey durumlarının yoğunluğuna bağlanmıştır. Ayrıca bu yapının ışığa duyarlı olduğu ve fotodiyot özelliği gösterdiğini saptamıştır.

Güllü vd (2012), yaptıkları çalışmada Au/Rh-101/n-InP Schottky diyotları için akım-voltaj karakteristiğinden engel yüksekliğini 0,88 eV olarak bulmuşlardır. Bu değer üretilen Schottky diyotları için yüksek bir değerdir. Bu değerin yüksek çıkması, n-InP ile Au arasındaki organik arayüzeyin bir etkisine atfedilmiştir. Au/Rh-101/n-InP Schottky diyotun C-V karakteristikleri kullanılarak V_d= 0,78 V ve Φ_b=0,88 eV olarak ölçülmüştür. Işık altındaki *I-V* ölçümlerinden faydalanarak kısa devre akımı 1,70 μA ve açık devre voltajı 240 mV olarak bulunmuştur.

Yıldız (2012), ürettiği Al/oc-ZnPc/p-Si Schottky diyotunun, oda sıcaklığında yapılan *I-V* ölçümleri yardımıyla idealite faktörünü 1,438 ve engel yüksekliğini 0,784 eV olarak hesaplamıştır. Norde fonksiyonları yardımıyla diyotun seri direnç değerini 5,46 kΩ olarak hesaplamış. Ayrıca diyotun karanlık ortamda 40-100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında *I-V* ölçümlerini yapmış ve üretmiş olduğu bu diyotun fotodiyot özelliğine sahip olduğunu tespit etmiştir.

Janardhanam vd (2014), Au/CuPc/n-GaN yapılar elde etmiş ve bu yapıların akım-voltaj kapasitans-voltaj ve G-V gibi elektriksel özelliklerini incelemiş ve Au/n-GaN MS diyotunun elektriksel özellikleri ile karşılaştırmışlardır. Yapılan çalışmada CuPc organik arayüzeyin Au/ n-GaN yapının diyot parametrelerini önemli ölçüde değiştirdiğini ve bu yapı için n= 1,33, R_s= 1,9 kΩ ve Φ_b=1,02 eV olduğunu hesaplamışlardır.

Aslan vd (2015), Al/CuPc/p-InP/Au-Zn diyotunu üreterek, oda sıcaklığında *I-V* ölçümleri yardımıyla idealite faktörünü 1,52 ve engel yüksekliğini 1,03 eV olarak hesaplamıştır.

Üretilen yapı için Norde fonksiyonu kullanılarak R_s= 321 Ω ve Φ_b =1,26 eV şeklinde bulundu. Yine d(V)/d(lnI)-I grafiğinden R_s= 115 Ω ve n= 2,28 ve H(I)-I grafiğinden de R_s= 132 Ω ve Φ_b =1,60 eV olarak bulundu. Al/CuPc/p-InP kontağın fotovoltaik ölçümleri sonucunda V_{oc}=0,37 V ve I_{sc}= 0,018 μA şeklinde bulunmuştur. Elde edilen diyotun fotodiyot özelliğine sahip olduğunu göstermişlerdir.

Reddy (2015), yaptıkları çalışmada n-InP üzerine oluşturduğu NiPc film üzerine Au buharlaştırarak, NiPc ince filmli ve ince filmsiz Au/n-InP diyotlar üretmiştir. Diyotların I-v karakteristiğinden NiPc ince filmsiz Au/n-InP diyotun engel yüksekliğini 0,59 eV, NiPc ince filmli diyodun engel yüksekliğini 0,82 eV olarak bulmuştur.

3. MATERYAL METOT

3.1. Metal – Yarıiletken Eklemler

Metal/yarıiletken kontak yapısında olan Schottky diyotlarda meydana gelen doğrultma işlemi, yarıiletkenin eklem tarafındaki tükenim tabakası tarafından sağlanır (Schottky 1938). Bir metal/yarıiletken kontak ani bir ara yüzey oluşuncaya kadar metal ve yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri arasındaki farkın ortadan kalkması ile elde edilebilir (Mönch 1995). Schottky kontakların karakteristiklerinin anlaşılabilmesi, yalıtkan malzemelerin ve yarıiletken kristal malzemelerin elektriksel parametrelerinin araştırılabilmesinin bir yöntemi de numuneye uygun kontakların seçilmesi ile mümkündür. Kontak, kristal ile kristale uygulanacak olan kontak malzemesinin en az dirençle temas etmeleridir. İdeal diyotun elde edilebilmesi, kontak için kullanılacak malzemelerin yüzeylerinin kirlerden arındırılmış ve pürüzsüz olmasıyla doğrudan ilişkilidir. Kontağı üretmek için kullanılan maddeler elektrokimyasal gerilimleri aynı seviyeye gelinceye kadar yük alışverişi yaparlar (Ziel 1968, Rhoderick 1988). Metal-yarıiletken kontaklar, yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonlarına (Φ_s , Φ_m) bağlıdır. Doğrultucu kontak üretmek istiyorsak; p-tipi yarı iletkenlerde $\Phi_s > \Phi_m$, n-tipi yarıiletkenlerde $\Phi_m > \Phi_s$ olmalıdır. Omik kontak üretilmek istendiğinde ise p-tipi yarı iletkenlerde $\Phi_m > \Phi_s$, n-tipi yarı iletkenlerde $\Phi_m < \Phi_s$ olmalıdır.

3.1.1. Metal/p-Tipi Yarıiletken Doğrultucu Eklemler

Bu şekilde meydana gelen bir kontak için $\Phi_m < \Phi_s$ olsun. Oda sıcaklığında alıcı atomların (akseptör) tümü iyonlaşmış kabul edelim. Kontak haline getirilmeden önce,
Şekil 3.1.a'da gösterildiği şekilde metalin Fermi düzeyi yarıiletkenin Fermi düzeyinden Φ_s-Φ_m kadar yüksektir. Kontak yapıldıktan sonra her iki malzemenin Fermi düzeyleri aynı düzey oluncaya kadar metal tarafından yarıiletken tarafına doğru elektron geçişi devam eder. Yarıiletken tarafındaki pozitif boşluklar, bu elektronlardan ötürü iyonlaşırlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonlaşmış alıcı atomlar *d*

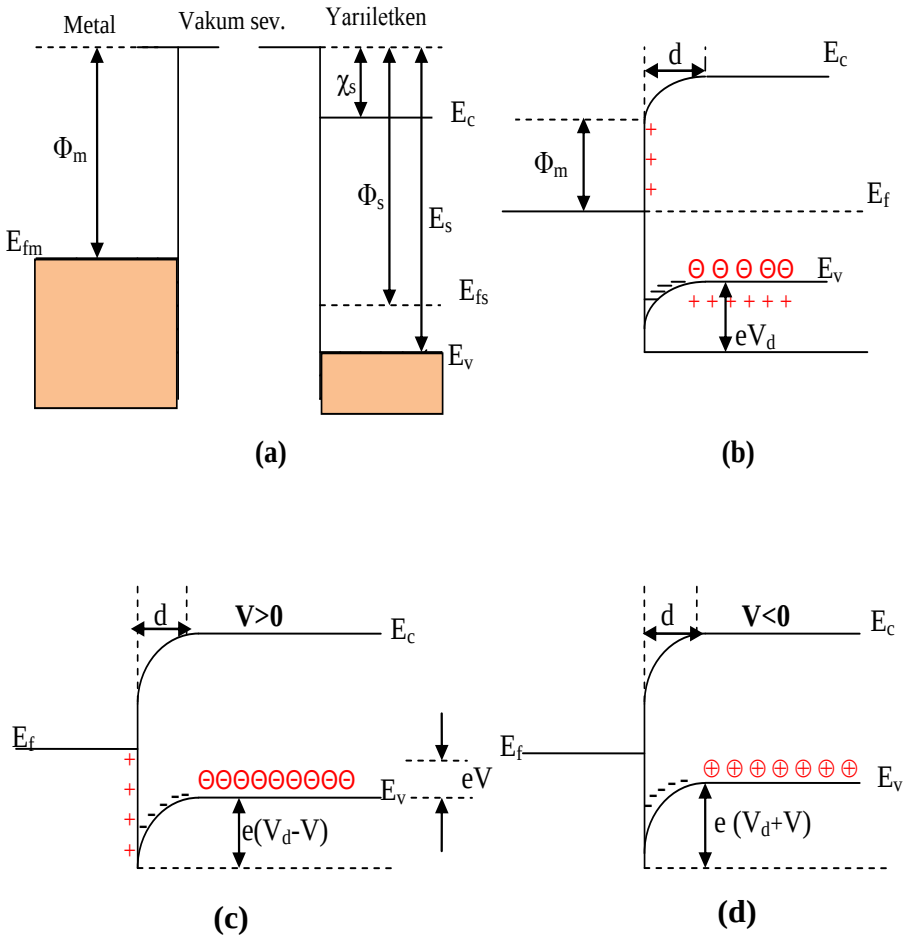
genişliğindeki bir uzay yükü bölgesi içerisinde dağılım gösterirler. Yarıiletken bölgedeki enerji seviyeleri Φ_s-Φ_m miktarınca yükseldiği için, bu bölgedeki holler için yüzey engeli;

$$eV_{dif} = \Phi_s - \Phi_m \qquad 3.1$$

olur. Burada V_{dif} difüzyon gerilimidir. Yarıiletken bölgedeki bu gerilim, metalin yüzeyine göre tespit edilir. Kontağın metal bölgesi içindeki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \qquad 3.2$$

ifadesi ile verilir (Ziel 1968, Rhoderick 1988).



Şekil 3.1. Metal p-tipi yarıiletken doğrultucu diyotun enerji bant diyagramları a) kontaktan önce, b) kontaktan sonra ve termal dengede, c) düz beslem durumunda (*V>0*), d) ters beslem durumunda (*V<0*)

Isıl uyarılma nedeniyle, yarıiletken içindeki bir kısım holler potansiyel engelini aşabilecek enerjiyi kazanarak, metale nüfuz edebilirler. Benzer biçimde metalin içinde ısıl olarak oluşmuş bazı holler de engeli aşabilecek enerjiyi kazanarak, yarıiletkenin içine nüfuz edebilirler. Bu durumda kontak yapıda engeli aşan eşit büyüklükte ve zıt yönde iki I_0 akımı oluşur.

Yarıiletken bölgeye bir V potansiyeli uygulandığında (şekil 3.1.c), sağa doğru akan boşluk akımı değişmez, ancak boşluk akımının tersi yön olan sola doğru akan akım üstel bir çarpan ($\exp(eV/kT)$) miktarınca değişir. Bunun neticesi olarak yarıiletkendeki enerji düzeylerinin tamamı eV miktarınca alçalır ve böylece yarıiletkenden metale nüfuz eden holler için engel yüksekliği eV kadar azalmış olur. Neticede sola doğru olan akım pozitif kabul edilecek olursa, karakteristik akım (Ziel 1968, Rhoderick 1988);

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

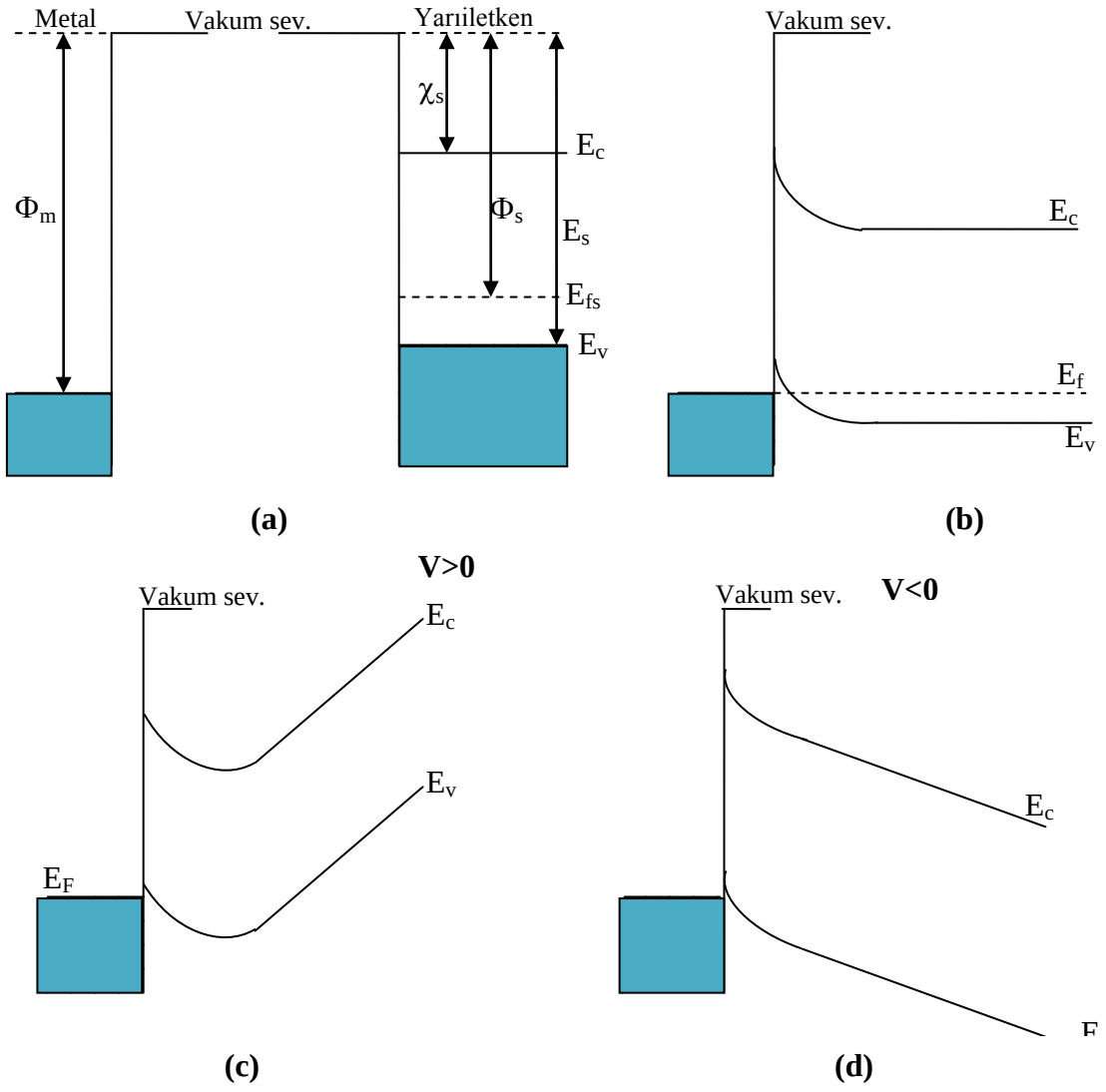
olur. Bu bir doğrultucu kontaktır. Bu denklemde I_0 doyma akımını, V uygulanan potansiyeli, k Boltzmann sabitini, T mutlak sıcaklığı ifade eder.

3.1.2. Metal / p-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik eklem, uygulanan potansiyelin yönelimine bağlı olmadan her iki yönde de yük geçişine en az direnç sergileyen bir metal/yarıiletken eklemdir (Ziel 1968, Rhoderick 1988). Akım-gerilim arsındaki ilişkinin Ohm Yasası ile verildiği eklemler omik davranış gösterirler. Eklem direncinin değeri de omik eklemin kalitesini belirler.

Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan küçük olduğu ($\Phi_m > \Phi_s$) durumu ele alalım. Metal ve yarıiletkenin kontak yapılmadan önceki ve kontak yapıldıktan sonraki enerji bant dağılımı Şekil 3.2 de çizilmiştir. Kontak yapılmadan önce, yarıiletkenin fermi düzeyi metalin fermi düzeyinden Φ_m-Φ_s kadar yukarıdadır (Şekil 3.2a). Kontak yapıldıktan sonra bir yük alışverişi gerçekleşecektir. Bu alışveriş sonucunda yarıiletken tabakadan metal bölgesine, yarıiletken tabakasında pozitif boşluk bırakarak elektron geçişi meydana gelir. Her iki tarafın Fermi düzeyleri aynı seviyeye geldiğinde yani dengeye erişildiğinde, yarıiletken tarafında pozitif işaretli yüzey yükü

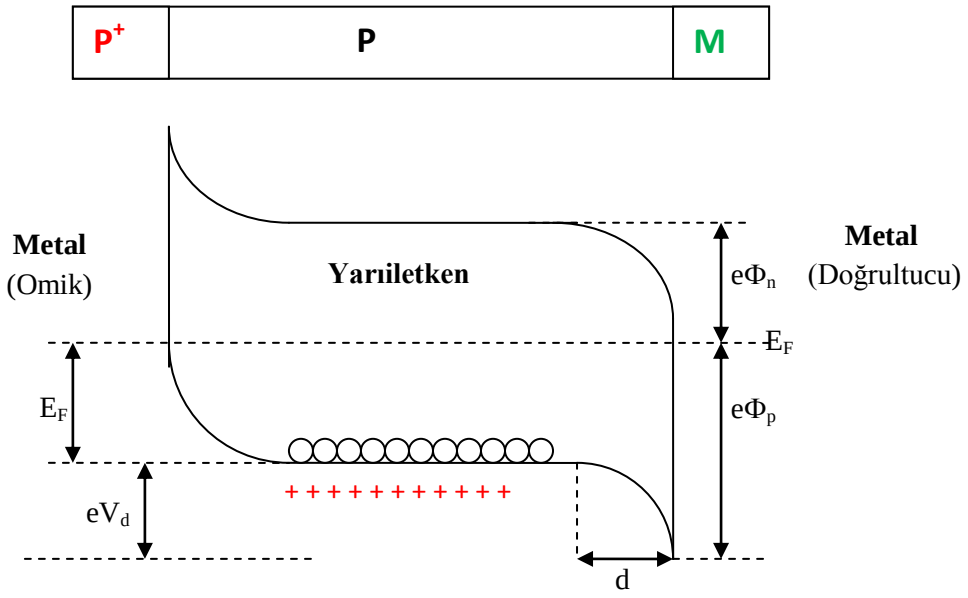
metal tarafında da negatif işaretli yüzey yükü meydana gelir. Bu sebepten ötürü yarıiletken tarafındaki Fermi enerji düzeyi Şekil 3.2b'de gösterildiği gibi Φ_m-Φ_s kadar aşağı iner. Pozitif boşluk sayısının artmasından ötürü, yarıiletken yüzeyi daha çok p-tipi özellik kazanır. Bir V gerilimi uygulanırsa, bu elektriksel gerilim bütün yarıiletken tabaka boyunca dağılım gösterir (Şekil 3.2c ve Şekil 3.2d). Düz beslem uygulandığı zaman, elektronlar, metalden yarıiletken tabakadaki boş seviyelere kolayca geçiş yapabilirler. Bu elektron geçişi, pozitif boşlukların yarıiletkenden metale geçişine karşılık gelir. Metale geçen pozitif boşluklar, yüksek elektron yoğunluğundan ötürü hemen nötürleşirler. Ters beslem uygulandığında, metalin iletkenlik bandında ısısal olarak ortaya çıkan pozitif boşluklar da kolaylıkla yarıiletken bölgesine geçebilirler (Sze 1981, Neamen 1992).



Şekil 3.2. Metal p-tipi yarıiletken omik kontak için enerji-bant gösterimi, a)kontak öncesi, b)kontak sonrası ve termal dengede, c) düz beslem durumunda (*V>0*), d) ters beslem durumunda (*V<0*)

3.1.3. Metal (Omik)/p-tipi Yarıiletken/ Metal (Doğrultucu) Yapısı

Metal (Omik)/*p*-tipi Yarıiletken/Metal (Doğrultucu) yapısı; *p*-tipi yarıiletkenin bir yüzeyinin aşırı katkılanması sonucunda elektron açısından yoğun p^+p omik eklemi ve diğer tarafına yapılan PM doğrultucu ekleminden oluşmaktadır. Bu yapıya ait enerji-bant diyagramı aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 3.3. Termal dengedeki P^+PM yarıiletken diyotunun enerji bant gösterimi

p^+ omik eklem bölgesine, pozitif bir potansiyel (V>0) uygulandığında, kontak düz beslemde olur. p^+ tarafına negatif bir potansiyel (V<0) uygulandığında ise yapı ters beslemde olur. p^+pM yapısı diyot gibi davranmasından dolayı, bu özelliklerdeki kontak yarıiletken diyot şeklinde isimlendirilir. Şekil 3.3' de görüldüğü gibi holler için bariyer değeri;

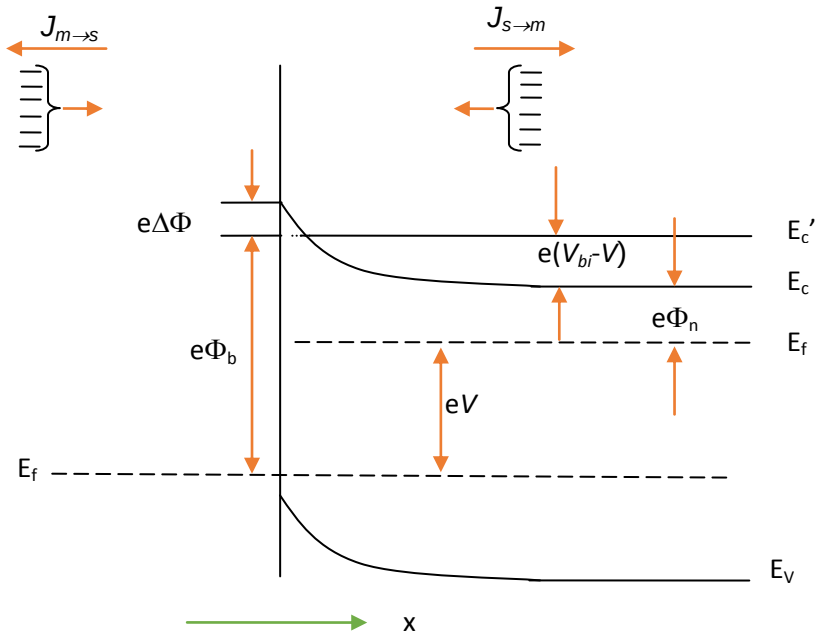
$$e\phi_p = eV_d + E_F \qquad 3.4$$

denklemiyle verilir (Sağlam 1991).

3.1.4. Schottky Kontaklarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi

Diyotlarda, elektron ve pozitif boşlukların sıcak bir yüzeyden emisyonu, Termoiyonik Emisyon Olayı şeklinde tanımlanır. Termoiyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların yeterli miktarda termal enerjiyi kazanıp metalden yarıiletkene veya tam tersi yöne yarıiletkenden metale potansiyel engeli aşıp geçmesidir (Ziel 1968, Rhoderick 1988).

Metal-yarıiletken kontaklarda akım çoğunluk taşıyıcılar tarafından oluşturulur. Metal/n--tipi yarıiletken kontaklarda elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken kontaklarda ise, pozitif boşluklar akımı meydana getirir.



Şekil 3.4. Düz beslemde metal yarıiletken Schottky kontaklarda imaj azalma etkisine ait enerji-bant diyagramı

Termoiyonik emisyon teorisi incelenirken, Maxwell-Boltzman yaklaşımını uygulayabilmek ve ısıl denge olayının bozulmaması için, doğrultucu kontağın bariyer yüksekliğinin, kT enerjisinden daha yüksek olduğu ve arınma tabakasındaki taşıyıcı çarpışmaların yeterince az olduğu farzedilmektedir. Şekil 3.4 te gösterilen düz beslem potansiyeli (V_a) uygulanan bir Schottky kontakta $J_{s\to m}$ yarıiletken tarafından metal tarafına doğru gerçekleşen akım yoğunluğu ve $J_{m\to s}$ ise metal tarafından yarıiletken tarafına gerçekleşen akım yoğunluğudur. $J_{s\to m}$ akım yoğunluğu, x yönünde ve potansiyel bariyeri geçebilecek hızlardaki elektronların yoğunluğunun bir fonksiyonudur (Ziel,

1968, Rhoderick 1988). Bu nedenle,

$$J_{s\to m} = e\int_{E_c}^{\infty} v_x d_n \qquad 3.5$$

İle ifade edilebilir. Denklemdeki E_C metaldeki termoiyonik salınım için ihtiyaç bulunan en küçük enerji, v_x sürüklenme yönündeki hızdır.

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e(\phi_{bn})}{kT}\right)\exp\left(\frac{eV_a}{kT} - 1\right) \qquad 3.6$$

denklemi, artan elektron konsantrasyonudur. Burada A^* ;

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \qquad 3.7$$

ile verilir ve termoiyonik emisyon için etkin Richardson sabitidir. Genel durum için (3.6) ifadesi

$$J = J_0\left(\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1\right) \qquad 3.8$$

şeklinde gösterilir. Bu eşitlikteki, J_0 ters beslem doyma akım yoğunluğu şeklinde tanımlanır ve

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT}\right) \qquad 3.9$$

olarak yazılır. Φ_{bn} bariyerinin imaj-kuvvet etkisinden dolayı düştüğü ve $\Phi_{bn} = \Phi_{bo} - \Delta\Phi$ olarak ele alıması gerektiğinden (3.9) eşitliği,

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e(\Phi_{b0})}{kT}\right)\exp\left(\frac{e(\Delta\Phi)}{kT}\right) \qquad 3.10$$

şeklinde yazılabilir. Bariyerdeki $\Delta\Phi$ düşmesi, yükselen elektrik alanla ya da yükselen ters beslem voltajı ile artacaktır. Denklem 3.8' i I akım ifadesi olarak aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right) \quad 3.11$$

Bu denklem, ideal diyotlar için geçerlidir (Ziel, 1968, Rhoderick 1988). İdeal faktörü *n* olmak üzere, bu denklemi daha genelleştirmek için aşağıdaki gibi yazabiliriz.

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right) \quad 3.12$$

Bir diyotun seri direnci R_s olmak üzere

$$I = I_0 \left(\exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) - 1 \right) \quad 3.13$$

şeklinde yazabiliriz.

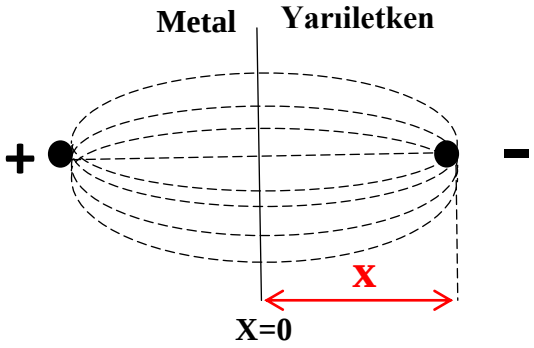
3.1.5. Engel Yüksekliği Üzerindeki Etkiler

İdeal bir diyot için bariyer değeri;

$$\phi_b = \phi_m - \chi_s \quad 3.14$$

denklemi ile verilir. Burada χ_s yarıiletken için elektron ilgisi, Φ_m, kontaktaki metalin iş fonksiyonudur.

Bazı etkiler, (3.14) denkleminde ifadesini bulan Schottky engel yüksekliğinde sapma oluşturabilir. Bu etkilerden biri Schottky etkisidir. Schottky etkisi, katotta emisyon akımının, artan alan kuvvetiyle artması şeklinde tarif edilir. Metalden x kadar uzaklıkta dielektrik ortam içindeki bir elektron elektrik alan üretecektir. Üretilen bu elektrik alan çizgileri, metal yüzeyine dik olmalı ve bu çizgiler metalin yüzeyinden iç kısma doğru x kadar bir mesafede yerleşmiş bir +e imaj yükü ile aynı olmalıdır. Bu imaj etkisi Şekil 3.5 'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. +e imaj yükü

İmaj yükü ile Coulumb etkileşmesinden ötürü elektron üzerine etkiyen kuvvet,

$$F = \frac{-e^2}{4\pi(2x)^2\varepsilon_s} = -eE \qquad 3.15$$

denklemi ile verilir. Buradan yola çıkarak potansiyel için aşağıdaki ifade elde edilebilir.

$$-\Phi(x) = +\int_x^\infty E dx = \int_x^\infty \frac{e}{4\pi(2x)^2\varepsilon_s} dx = \frac{-e}{16\pi x\varepsilon_s} \qquad 3.16$$

Buradaki x integral değişkenidir ve $x = \infty$ alındığında potansiyel sıfır kabul edilir. Herhangi bir dış elektrik alan olmadığında (dış elektrik alan sıfır olduğunda), potansiyel denklemi (3.16) ifadesiyle verilmiştir. Sıfırdan farklı bir dış alan varsa (metal-yarıiletken ara yüzeyindeki toplam potansiyele imaj potansiyeli de katıldığında) potansiyel,

$$-\Phi(x) = \frac{-e}{16\pi x} - E.x \qquad 3.17$$

eşitliğine dönüşür. (3.17) denklemindeki ikinci kısım dış alandan ötürü potansiyel bariyerindeki azalmayı temsil etmektedir. Bariyerdeki bu azalma, Schottky etkisi ve imaj kuvveti etkisi ile engel yüksekliğinin azalması olarak bilinir. Schottky engel düşmesini $\Delta\Phi$ ve bu düşmenin gerçekleştiği uzaklık X_m , $\frac{d[e\Phi(x)]}{d_x} = 0$ şartından,

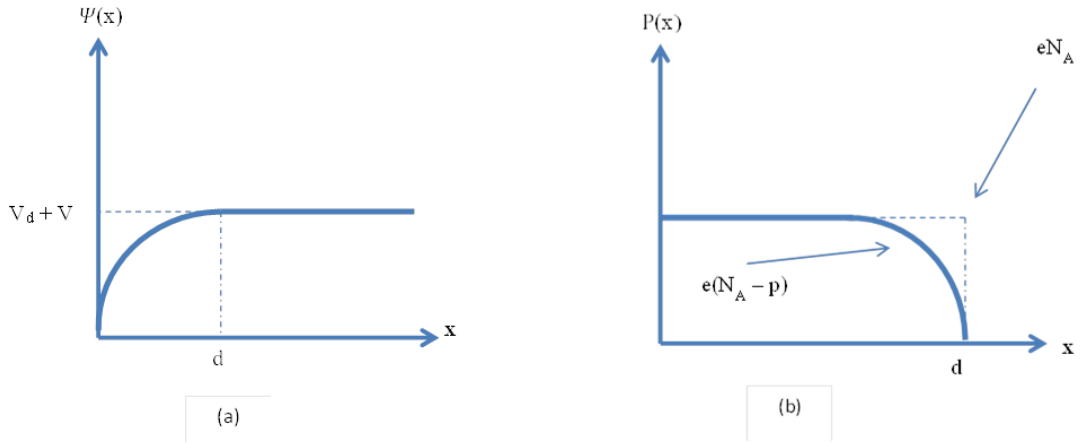
$$x_m = \sqrt{\frac{e}{16\pi E\varepsilon_s}} \qquad 3.18$$

$$\Delta\Phi = \sqrt{\frac{eE}{4\pi\varepsilon_s}} \qquad 3.19$$

ifadeleri ile verilir (Rhoderick 1988).

3.1.6. Metal – Yarıiletken Schottky Diyotların Engel Kapasitesi

Schottky kontaklarda oluşan arınma (tükenim, deplasyon) bölgesi, bir dipol gibi davranacağından bir kondansatör görevi görür. Ters beslem durumunda uygulanan gerilim arttıkça arınma bölgesi genişler.



Şekil 3.6. Metal *p*-tipi yarıiletken yapılarda doğrultucu diyotun; a) Potansiyel dağılımı, b) Yük dağılımı

Schottky bölgesinin kapasitesi, bu yük dağılımından dolayı değişecektir. Bu özelliklerinden dolayı Schottky diyotları, gerilim kontrollü değişken kapasitörler olarak kullanılabilmektedirler. Schottky bölgesinin kapasitesini bulmak için, diyodun engel bölgesindeki potansiyel dağılımının Poisson eşitliği;

$$\nabla^2\Psi(x) = \frac{d^2\Psi(x)}{dX^2} = -\frac{\rho(x)}{\varepsilon_s\varepsilon_0} \qquad 3.20$$

şeklinde ifade edilebilir (Ziel 1968).

Burada ε_s ile ε_0 sırasıyla yarıiletkenin ve boş uzayın dielektrik katsayısı ve $\rho(x)$ uzay-yük yoğunluğudur. Uzay yük yoğunluğu;

$$\rho(x) = e(N_a - N_d) \qquad 3.21$$

olarak yazılabilir (Rhoderick 1988). Burada N_d, yarıiletkendeki iyonize olmuş donor yoğunluğu, N_a, yarıiletkendeki iyonize olmuş alıcı yoğunluğudur. $\Psi(x)$ potansiyel fonksiyonu ile uzay yük yoğunluğu ρ(x)'in konuma bağlı değişimleri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

Engel tabakasının potansiyelini V_d ve kontağa uygulanan potansiyeli V ile gösterelim. $e(V_d - V) >> kT$ olduğunda $0 \leq x \leq d$ aralığında yük taşıyıcılar d uzunluğunda Debye difüzyon uzunluğu ile verilen bir bölgede kısmen bulunacaklardır. Dolayısı ile p-tipi yarıiletken için $N_a >> N_d$ olduğundan uzay yükü yoğunluğu için

$$\rho(x) = eN_A \qquad 3.22$$

yazılabilir. (3.20) ve (3.22) eşitliklerinden

$$\frac{d^2\Psi(x)}{dx^2} = -\frac{N_A}{\varepsilon_s\varepsilon_0} \qquad 3.23$$

elde edilir. (3.23) ifadesinin çözümü aşağıdaki sınır şartları altında aranabilir

1) $X = 0\ için\ \Psi(X) = 0$
2) $X \geq 0\ için\ \Psi(X) = V_d \pm V$
3) $X = d\ için\ \Psi(X) = \frac{d\,\Psi(X)}{dx} = 0$

(3.23) denklemi için üçüncü sınır şartını dikkate alarak integral alırsak, arınma bölgesi için elektrik alanı bulabiliriz.

$$E(x) = -\frac{d\Psi(x)}{d(x)} = -\frac{eN_A}{\varepsilon_s\varepsilon_0}(X - d) \qquad 3.24$$

yukarıdaki sınır şartlarından birincisini dikkate alarak (3.24) ifadesinin integrali alınacak olursa,

$$\Psi(x) = \frac{eN_A}{\varepsilon_s\varepsilon_0}\left(\frac{1}{2}x^2 - d\right) \qquad 3.25$$

elde edilir. (3.25) ifadesinin çözümü de ikinci sınır şartı dikkate alınarak çözülürse;

$$d = \left[\frac{2\varepsilon_s\varepsilon_0}{eN_A}(V_d \pm V)\right]^{1/2} \quad 3.26$$

ifadesi elde edilir. Bu ifade, Schottky bölgesinin genişliğidir. Burada $V > 0$ için kontak doğru, $V < 0$ için kontak ters beslemdedir. Yarıiletkende birim alan başına düşen yük yoğunluğu;

$$Q = -eN_A d \quad 3.27$$

ile verilir. (3.26) ve (3.27) eşitlikleri dikkate alındığında;

$$Q = -[2\varepsilon_s\varepsilon_0(V_d \pm V)]^{1/2} \quad 3.28$$

ifadesi elde edilir. Ayrıca Schottky kapasitesi (3.28) eşitliğine sahip Q yükünün uygulanan gerilime bağlı değişimi olarak tanımlanır. Buna göre kapasite için,

$$C = \left|\frac{\partial Q}{\partial V}\right| \quad 3.29$$

yazılarak (3.28) ve (3.29) eşitliklerinden,

$$C = \left[\frac{\varepsilon_s\varepsilon_0 e\, N_A}{2(V_d+V)}\right]^{1/2} \quad 3.30$$

veya

$$C = \frac{\varepsilon_s\varepsilon_0}{d} \quad 3.31$$

olarak bulunur(Rhoderick 1988).

Bu sonuca göre arınma bölgesinin kapasitesi, uygulanan gerilim ve Schottky bölgesinin genişliği ile ters ve alıcı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Efektif kontak alanı A ile

çoğunluk taşıyıcılarının dalga fonksiyonun uzay yükü bölgesine sızmasından ileri gelen kT/q terimin ilave edilmesi ile kontak kapasitesi,

$$C = A\left[\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 q\, N_A}{2(V_d - kT/q + V)}\right]^{1/2} \qquad 3.32$$

ile verilir.

3.2. Norde Fonksiyonu

Norde 1979 yılında, engel yüksekliği hesabı ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot ileri sürmüştür (Norde 1979). Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \qquad 3.33$$

Diyot için seri direnç *Rs*, akım denklemi denklem 3.13 ile verilmiştir. Bu denklemde *Vd* > *kT/q* kabul edip gerekli işlemleri yaparsak (3.33) ifadesi,

$$F(V) = \Phi_b + IR_s - \frac{1}{2}V \qquad 3.34$$

Denklemi şeklinde yazılabilir. İdeal durum için *Rs*=0, *F(V)* eğimi 0,5 olan düz bir çizgiyi verir. *F(V)* ekseniyle kesiştiği nokta Φ_b' yi verir. Diğer bir deyişle sadece bir direnç için

$$F(V) = F_R(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{V}{RAA^*T^2}\right) \qquad 3.35$$

denklemi ile ifade edilebilir.

$$\frac{dF}{dV} = R_s\left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \qquad 3.36$$

Büyük potansiyeller için dF/dV = 1/2 ile doğrusal bir çizgiye yakınsayacaktır. Denklem 3.13'ün diferansiyeli alınırsa

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d}\left(1 + R_s\left(\frac{dI}{dV_d}\right)\right)^{-1} \quad 3.37$$

Buradan da

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_d}(I_s \exp(\beta V_d)) = \beta\, I \quad 3.38$$

ve

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\beta R ı}{1+\beta R I} - \frac{1}{2} \quad 3.39$$

dF/dV=0 eşitliği denklemde yerine yazıldığında *F(V)* fonksiyonunun en küçük alındığında, I_0 akımı elde edilecektir. Buradan da,

$$I_0 = \frac{1}{\beta R} = \frac{kT}{eR} \quad 3.40$$

elde edilir. Buradan

$$V_0 = I_0 R_s + V_d(I_0) = \frac{1}{\beta} + \ln\left(\frac{I_0}{AA^* T^2}\right) \quad 3.41$$

olur ve *F(V)* fonksiyonunun en düşük değeri olan,

$$F(V_0) = \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta}\left(\frac{I_0}{AA^* T^2}\right) \quad 3.42$$

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

$$R_s = \frac{kT}{eI_0} \quad 3.43$$

ve

$$\Phi_b = F(V_d) + \frac{V_0}{2} - \frac{kT}{e} \quad 3.44$$

denklemine ulaşılır.

Norde'un önerdiği yöntem, ideal hallerde ve seri direncin az olduğu hallerde geçerliliğini korur (Bohlin 1986).

(3.13) eşitliği ile daha önce verilen akım gerilim karakteristiği dikkate alınarak, seri bir *F(V)* fonksiyonu yazılabilir.

$$F(V,\gamma) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) \qquad 3.45$$

Buradaki *γ, n* değerinden büyük olan ilk tamsayıdır. (3.41) ile (3.42) birleştirildiğinde

$$F(V,\gamma) = \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\eta}\right)V + \Phi_{b} + \frac{IR_{s}}{\eta} \qquad 3.46$$

şeklinde yazılır.

İdeal bir diyot göz önüne alındığında bu fonksiyon;

$$F(V,\gamma) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta}\ln\left(\frac{V}{R_{s}AA^{*}T^{2}}\right) \qquad 3.47$$

olacaktır.

Bu fonksiyon yüksek gerilim değerleri sözkonusu olduğunda 1/γ eğimi ile düz çizgiye yaklaşacaktır. γ sabiti *n*' den büyük oldukça fonksiyon minimum değere sahip olacaktır. (3.45) denkleminin gerilime bağlı diferansiyeli alındığında,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{1}{\gamma} - \frac{1}{\eta} + \frac{R_{s}}{\eta}\left(\frac{dI}{dV}\right) \qquad 3.48$$

ve denklem (3.47)'ten

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\beta I}{\eta} - \frac{\beta R_{s} I}{\eta}\left(\frac{dI}{dV}\right) \qquad 3.49$$

Denklem 3.47 ve 3.48 birleştirilirse

$$\frac{dI}{dV} = \frac{\frac{\beta I}{\eta}}{1+\frac{\beta R_s I}{\eta}} \quad 3.50$$

Denklem 3.47 ve 3.48 birleştirilse,

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\eta-\gamma+\beta R_s I}{\gamma(\eta+\beta R_s I)} \quad 3.51$$

dF/dV=0 minimum değerinde

$$I_0 = \frac{\gamma-\eta}{\beta R_s} \quad 3.52$$

Denklem 3.46 ve 3.51 kullanılarak

$$F(V_0,\gamma) = (\frac{1}{\gamma}-\frac{1}{\eta})V_0 + \Phi_b + \frac{\gamma-\eta}{\beta\eta} \quad 3.53$$

Burada I_0 ve V_0 değerleri minimumda benzeşirler. Sonuç olarak;

$$\Phi_b = F(V_0,\gamma) + \left(\frac{1}{\eta}-\frac{1}{\gamma}\right)V_0 - \left(\frac{\gamma-\eta}{\beta\eta}\right) \quad 3.54$$

$$R = \frac{\gamma-\eta}{\beta I_0} \quad 3.55$$

elde edilir (Norde 1979).

3.3. Cheung Fonksiyonu

Metal-yarıiletken yapıların (Schottky diyot) doğru belsem *I-V* karakteristiklerinin hesaplanmasında Cheung (1986) farklı bir yöntem geliştirdi. Buna göre termiyonik emisyon teorisinden bulunan akım yoğunluğu diyotun etkin alanı *A* ile çarpıldığında, diyot üzerinden geçen toplam akım;

$$J_{s\to m} = \left(A^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\phi_{bn}}{kT}\right)\right)\left(\exp\frac{eV}{kT} - 1\right) \quad 3.56$$

$$I = A.J = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\phi_{bn}}{kT}\right)\left(\exp\left(\frac{eV}{kT} - 1\right)\right) \quad 3.57$$

olarak bulunur. Burada $qV>>3kT$ olduğu için denklemdeki 1 değeri ihmal edilebilir. Pratikte, uygulanan potansiyelin hepsi arınma bölgesinde düşmediği için, idealden uzaklaşma meydana gelir. Bunu hesaba katmak için, birimi olmayan sabit bir değer olan *n* kullanılır. Bu durumda akım denklemi,

$$I_{n} = AA^{*}nT^{2}\exp\left(-\frac{e\phi_{bn}}{kT}\right)\left(\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)\right) \quad 3.58$$

şekline dönüşür. Burada *V* uygulanan voltajdır. Bu voltajın seri dirençten dolayı IR_s kadar kısmı düşer. Dolayısıyla *V* yerine $V - IR_s$ seklinde yazılabilir. Burada akım denklemi;

$$I_{n} = A.J = AA^{*}nT^{2}\exp\left(-\frac{e\phi_{bn}}{kT}\right)\left(\exp\left(\frac{e(V-IR_{s})}{nkT}\right)\right) \quad 3.59$$

biçiminde yazılabilir. Bu denklemin doğal logaritması alınırsa

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I_{n}}{AA^{*}T^{2}}\right) + n\phi_{bn} + I.R_{s} \quad 3.60$$

eşitliği oluşur. Bu eşitliğin *lnI* 'ya göre türevi alınırsa,

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I.R_{s} \quad 3.61$$

eşitliğine dönüşür. Bu eşitlikten; *dV/d(lnI)* - *I* eğrisi çizilirse bir doğru vereceği anlamı çıkar. Bu lineer çizginin eğimi R_s'yi, düşey koordinat ile kesiştiği nokta ise *n'* yi verir (Cheung and Cheung 1986).

Potansiyel engelini (ϕ_{bn}) bulmak için, (3.59) bağıntısı göz önünde bulundurularak

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) \quad 3.62$$

şeklinde bir bir *H(I)* fonksiyonu tanımlanabilir. O halde potansiyel engelini bulmak için (3.60) ve (3.61) eşitliklerinden

$$H(I) = n\phi_{bn} + I.R_s \quad 3.63$$

şeklinde yazılabilir. (3.63) eşitliğinin *H(I)-I* eğrisi çizilirse yine bir lineer çizgi verecektir. Bu lineer çizginin eğimi R_s değerini, lineer çizginin *H(I)* eksenini kestiği nokta ise $e\phi_{bn}$ değerini verir.

3.4. Optik Soğurma

Temel absorbsiyon, bir malzemede valans seviyesindeki bir elektronun maddeye gelen bir foton absorblayarak iletkenlik seviyesine atlaması veya eksiton oluşturması şeklinde tanımlanır (Ayhan 2012).

Temel absorbsiyon olayı maddenin yasak enerji aralığını tayin etmede kullanılır. Maddenin yasak enerji aralığı E_g ile gelen ışının frekansı ν arasındaki ilişki

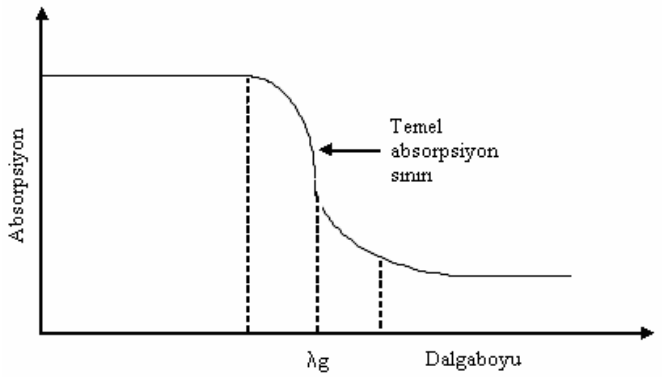
$$\nu \geq E_g/h \quad 3.64$$

şeklinde yazılabilir. Gelen fotonun dalga boyu λ_g

$$\lambda_g \leq hc/E_g \quad 3.65$$

şeklindedir. Bu eşitlikte, *h* Planck sabitini, *c* ise ışık hızını temsil eder. Şekil 3.7'den görüldüğü gibi bir yarıiletkenin temel absorbsiyon spektrumunda λ_g değerine yakın değerlerden başlayarak absorbsiyonda bir artma görülür. İncelenen materyal λ_g den küçük değerlerde güçlü bir absorblayıcı, λ_g den büyük değerlerde ise transparan karakteristik sergiler. Arada kalan sınır, temel absorbsiyon sınırı şeklinde adlandırılır. Bir

malzemenin temel absorbsiyon sınırında doğrudan ve doğrudan olmayan bant geçişi olmak üzere iki tür geçiş durumu olur (Pankove 1971).

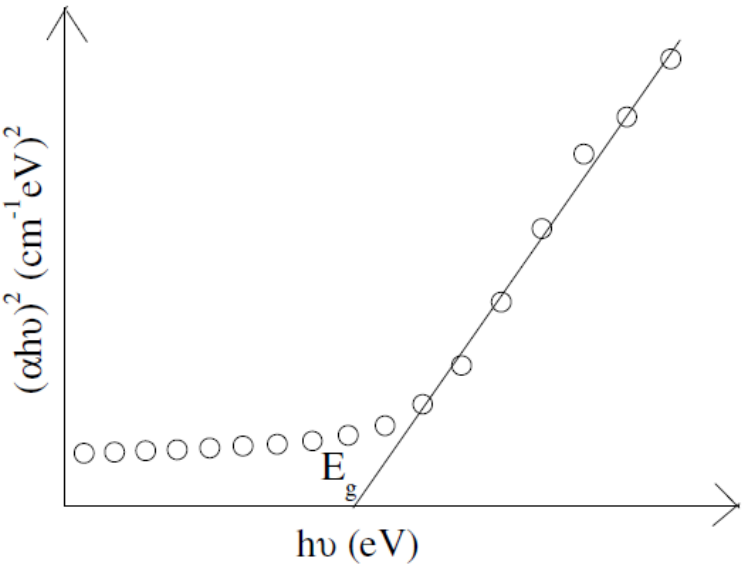


Şekil 3.7. Yarıiletkende temel absorbsiyon spektrumu

3.5. Yarıiletkenlerin Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Yarıiletken filmlerin optik bant enerjisinin hesaplanmasında optik absorbsiyon ölçümleri kullanılır. Absorbsiyon ölçümü, yarıiletkenlerin optik bant değerinin hesabında yaygın olarak kullanılır.

Absorbsiyon yöntemiyle malzemenin optik bant değerini belirlemek amacıyla $(\alpha h\upsilon)^n \sim h\upsilon$ eğrisi çizilir (Şekil 3.8). Eğrinin doğrusal olan kısmının $h\upsilon$ koordinatını $(\alpha h\upsilon)^n = 0$ ile kesiştiği nokta o malzemenin optik bant değerini verir. Burada *n* değeri, doğrudan bant geçişli maddelerde $n = 2$, dolaylı bant geçişli maddelerde $n = 1/2$ alınır.



Şekil 3.8. Bir yarıiletkende absorbsiyon katsayısının fotonun enerjisine göre değişiminden yasak enerji aralığının belirlenmesi (doğrudan bant geçişli madde)

3.6. Silisyum Kristali (Si)

Tseng ve Wu (1987) ya göre; Silisyumun (Si) keşfi ilk olarak 1824 te Berzelius tarafından gerçekleştirmiştir. Si'un doğadaki mecudiyei silikat ve tuzları halindedir. Taş kürenin 1/4‟üne yakını Si elementinden oluşur. Silisyum materyalinin bazı temel değerleri Tablo 3.1 de gösterilmiştir (Çuha 2010)

Tablo 3.1. Silisyumun Bazı Özellikleri

Özellikler	***Si***
Atom yoğunluğu (cm^3)	$5,0\ 10^{22}$
Atom ağırlığı	28,09
Kristal yapı	Elmas
Yoğunluğu (g/cm^3)	2,328
Dielektrik sabiti	11,9
İletkenlik bandındaki durumların yoğunluğu N_c (cm^{-3})	$2,8 \times 10^{19}$
Valans bandındaki durumların yoğunluğu N_v (cm-3)	$1,04 \times 10^{19}$
Saf taşıyıcı Yoğunluğu n_i (cm^{-3})	$1,45 \times 10^{10}$
Saf özdirenci (Ω.cm)	$2,3 \times 10^{5}$

Tablo 3.1: (Devam): Silisyumun Bazı Özellikleri

Örgü sabiti (A^0)	5,43095
Elektronların etkin kütlesi m^*/m_0	m_l^*=0,98, m_t^*=0,19
Deşiklerin etkin kütlesi, m^*/m_0	m_{lh}^*=0,16, m_{hh}^*=0,49
Elektron yakınlığı χ (eV)	4,05
Yasak enerji aralığı (eV)	1,12
Mobilitesi elektron – hol ($cm^2/V.s$)	1,450 – 500
Erime sıcaklığı (^0C)	1414
Termal iletkenliği	1,56
İş fonksiyonu (eV)	4,60 – 4,85
Kırılma alanı (V/cm)	3×10^5
Kaynama sıcaklığı (^0C)	2900
Molar hacmi (ml/mol)	12,06
Mineral sertliği	6,5

3.7. Alüminyum (Al)

1827 yılında Wohler tarafından keşfedilmiştir. Yumuşak ve hafif ve gümüşümsü renkte bir metaldir. Atom numarası 13, simgesi Al'dir. Dünyamızda serbest halde bulunmaz. Çoğunlukla $Al_2O_{3.2}H_2O$ (boksit) şeklinde bulunur ve oksidasyona karşı yüksek direnci ile bilinir. Alüminyumun oda sıcaklığındaki bazı fiziksel özellikleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir (Aydın 2003).

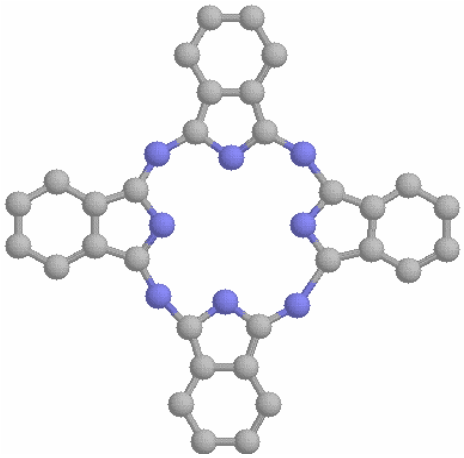
Tablo 3.2. Alüminyumun Bazı Fiziksel Değerleri

Özellikler	***Al***
Yoğunluk (g/cm^3)	2,7
Erime sıcaklığı (^0C)	≈660
Kaynama sıcaklığı (^0C)	2519
Termal iletkenliği (W/cm.K)	237
Mineral sertliği	2,75
Elektriksel iletkenliği ($\Omega^{-1}.cm^{-1}$)	$3,77 \times 10^5$
İş fonksiyonu (eV)	4,08

3.8. Nikel Fitalosiyanin (NiPc)

Fitalosiyanin tesadüfi bir şekilde bulunan, yapısı çok sağlam, renkleri koyu mavi ve yeşilin tonlarında olan bir maddedir. Isı, ışık ve çözücülere karsı dayanıklı oldukları için plastik ve yağlı boyalarda kullanılırlar. Yeşil organik boyarmaddelerde klor ve bromlu türevleri çok önemlidir. Nanlineer optik malzeme olarak, sıvı kristal olarak, algılayıcı olarak gaz sensörlerinde, yakıt hücrelerinde, optik veri depolamada, elektrofotografide, kanser için tedavi ve tanı tekniği olan foto dinamik terapide (PDT) ışığa duyarlı madde olarak kullanılır (Çoban 2007)

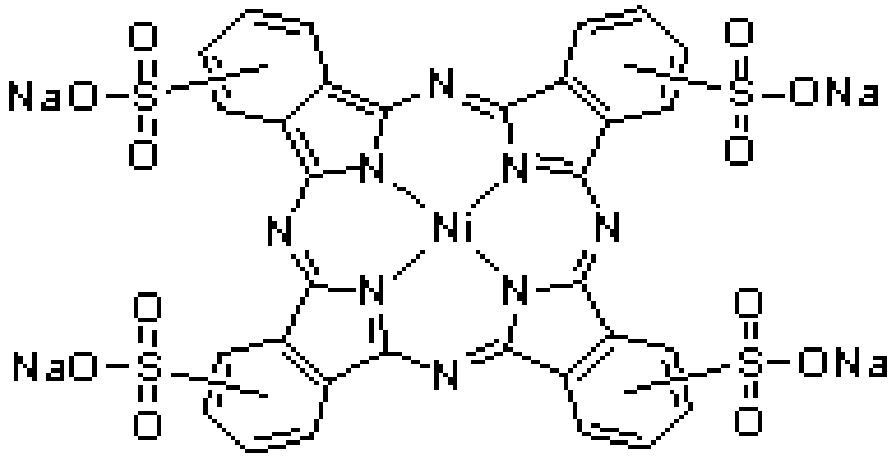
İlk olarak 1907' de ftalimid ve asetik anhidritten yüksek sıcaklıkta osiyanobenzamid üretilirken bulundu. Ftalikanhidrit ve amonyaktan ftalimid üretildiği sırada mavi-yeşil bir madde ortaya çıkar. Tamamen rastlantısal olarak bu madde fitalosiyanin olarak adlandırılır. Linstead ve arkadaşları, metalli ve metalli olmayan fitalosiyaninlerin yapısını 1934'te açıklamışlardır. Daha sonra periyodik cetveldeki metallerin birçoğu kullanılarak metalli fitalosiyaninler hazırlanmıştır. Fitalosiyanin bileşiklerindeki elektronik spektrumda (UV) iki karakteristik pik gözlemlenir. Fitalosiyanin bileşiğinin oluşup oluşmadığı ya da metal içerip içermediği bu işlemle belirlenir. İlk pik 320-370 nm civarında güçlü bir absorbsiyonla ortaya çıkar. Bu pik, B bandı veya Soret bandı olarak adlandırılır. İkinci pik ise 650-700 nm civarında keskin bir absobsiyonla ortaya çıkan Q bandıdır. Q bandının özelliği molekül simetrisine göre şekillenmesidir. Optoelektronik çalışmalarda termal ve kimyasal denge ortaya koydukları için tercih edilirler. Fitalosiyanin molekülü, Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Fitalosiyanin molekülünün yapısı

Fitalosiyaninlerin başlangıçta sadece boyar madde ve pigment olarak kullanılmasına rağmen, zamanla, sahip olduğu elektronik, optik, yapısal ve koordinasyon özelliklerinin keşfedilmesi ve bu özelliklerin amaca göre değiştirilebilmesi nedeniyle, ftalosiyaninlerin ileri teknoloji malzemesi olarak kullanılmalarının yolu açılmıştır. Bu uygulama alanlarına örnek olarak, bilgi teknolojisi, yarı iletkenler, fotohassaslaştırıcılar, elektrokromik araçlar, gaz dedektörler, moleküler malzemeler, ve lineer olmayan optik materyaller, Langmuir-Blodgett tabakalar ve pek çok katalitik işlem verilebilir (Akkurt 2009).

Bu çalışmada Sigma-Aldrich firmasından alınan ve molekül formülü $C_{32}H_{12}N_8Na_4NiO_{12}S_4$ (Nickel(II) phthalocyanine-tetrasulfonic acid tetrasodium salt), formül ağırlığı $979{,}4\ g/mol$, sulu çözeltisi lacivert renkli olan nikel fitalosiyanin bileşiği kullanılmıştır. Bileşiğin yapısı Şekil 3.10'de gösterilmiştir.



Şekil 3.10. $C_{32}H_{12}N_8Na_4NiO_{12}S_4$ yapısı

3.9. Deneysel İşlemler

3.9.1. Kristalin Temizlenmesi

Bu çalışmada 1–10 Ωcm özdirençli ve (100) yönelimli p tipi Si kristal kullanmıştır. Kontak üretimi için numunenin organik ve mekanik kirlerden temizlenmesi büyük ehemmiyet arz eder. p tipi Si kristal mekanik olarak parlatmaya ihtiyaç duymadığı için sadece aşağıda anlatılan kimyasal temizlik süreci gerçekleştirildi:

1. Aseton içinde titreşimli olarak 15 dakika yıkandı.
2. Metanol çözeltisinde titreşimli olarak 15 dakika yıkandı.
3. RCA1 (H_2O:H_2O_2:NH3;6:1:1) çözeltisinde 60 ^{0}C'de 15 dakika kaynatıldı.
4. Seyreltik HF (H_2O:HF;10:1) çözeltisinde 30 saniye yıkandı.
5. RCA2 (H_2O:H_2O_2:HCl;6:1:1) çözeltisinde 60 ^{0}C'de 10 dakika kaynatıldı.
6. Seyreltik HF (H_2O:HF;10:1) ile 30 saniye yıkandı.

Yukarıdaki süreçten sonra kristal bol miktarda deiyonize su ile durulandı ve en son azot (N_2) gazı ile kurutuldu.

3.9.2. Schottky Diyotların Hazırlanması

İlk önce numunenin mat yüzeyine Al (%99.99 saflıkta) omik eklemi oluşturuldu. Bu amaçla önce molibden pota ve Al metali yüzde on seyreltik HCl çözeltisiyle, ardından deiyonize suyla bolca temizlendi ve N_2 ortamında kurutuldu. Isıtıcı pota termal buharlaştırma sistemine konularak iyice yakıldı. Al metali potanın içine konulduktan sonra Si kristali, vakum sistemindeki konumuna mat tarafı aşağıya bakacak şekilde yerleştirildi. Yaklaşık 5 x 10^{-6} torr vakumda Si kristalinin parlak olmayan tarafına Al metali kaplandı. Si kristal, fırında azot ortamında 500 $^{\circ}$C' de 3 dakika ısıl işleme tabi tutularak omik kontak yapılmış oldu.

Omik kontak yapımından sonra yarıiletkenin muhtemel oksitlenmeye karşı, önce yüzde on seyreltik HF kullanılarak kristalin parlak yüzeyi temizlendi, sonra deiyonize suyla temizlendi ve N_2 ile kurutuldu. Numunenin parlak yüzeyine 10 ml 18 MΩ dirençli de iyonize suya 0,035 g NiPc $C_{32}H_{12}N_8Na_4NiO_{12}S_4$ (Nickel(II) phthalocyanine-tetrasulfonic acid tetrasodium salt) eklenerek oluşturulmuş 0,00357 mol/lt lik 20 µl NiPc çözeltisi damlatıldı. Böylece organik film elde edildi. NiPc/p-Si/Al yapısında NiPc tabakasının kaplı olduğu yüzeyin üzerine 5 x 10^{-6} torr' da Al kaplanarak çapı 1mm olan (diyot alanı =7.85 x 10^{-3} cm^2) Al/NiPc/p-Si/Al yapısı elde edildi. NiPc filminin optik özelliklerini incelemek için kimyasal temizliği yapılmış cam altlık üzerine 20 µl NiPc çözeltisi damlatıldı ve NiPc ince film oluşturuldu.

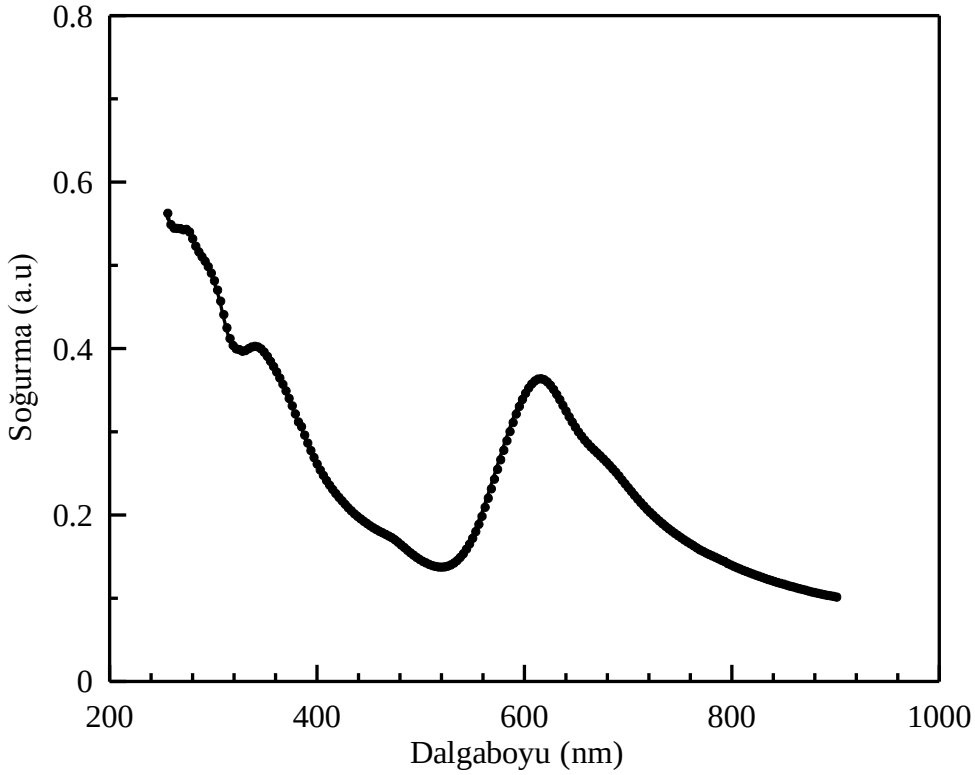
3.9.3. Deney ve Ölçüm Sistemi

Diyotun *I-V* ve *C-V-f ve G-V-f* ölçümleri Keithley 4200 SCS cihazı ile yapıldı. Yapılan ölçümler sonucunda diyotun doğrultucu özelliğe sahip olduğu görüldü. Işık ortamında yapılan ölçümler için güneş simülatöründen faydalanıldı.

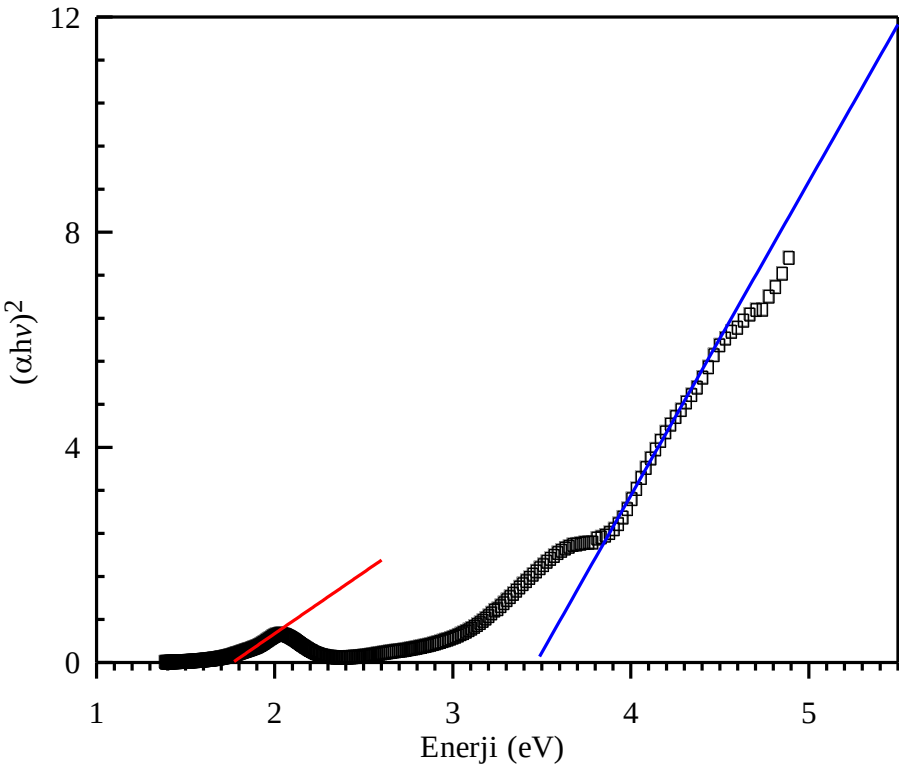
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Optik Soğurma ölçümleri

Yarıiletkenlerin malzemelerin bant aralığını öğrenmek için yaygın ölçümlerden birisi optik absorpsiyon yöntemidir. Optik absorpsiyon ölçümleri sırasında malzeme zarar görmez. Şekil 4.1'de cam tutucu yüzey üstünde üretilen NiPc filmlerinin optik soğurma yöntemiyle araştırılması için Perkin-Elmer Lambda 2S UV-Visible spektrofotometresinden yararlanılmıştır. Cam altlık üzerinde damlatma yöntemi ile büyütülen NiPc ince filminin soğurma ölçümü Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Şekilde NiPc ince filmine ait Q ve B (Soret) bandı olarak adlandırılan 2 soğurma piki görülmektedir. Bu soğurma ölçümü daha önceki çalışmalarla uyum sergilemektedir (Joseph 2007, Unni 2000). Soğurma spektrumunda yaklaşık 610 nm (görünür bölge) dalga boyu civarında ortaya çıkan pik Q bandı olarak adlandırılır. Yine spektrumda 280 nm (ultra viyole) dalga boyu civarında ortaya çıkan pik ise B (Soret) bandı olarak bilinir. Soğurma spektrumundaki pikler, NiPc molekülünün aromatik 18π elektron sistemleri içindeki orbitallerden ve merkez metal (Ni) atomun orbitallerinin üst üste binmesinden kaynaklanır. B (Soret) bandında 250 - 450 nm dalgaboyu aralığında gerçekleşen geçişe, π-π^* elektronik geçişi denir. Bu geçiş ince filmin soğurma kıyısını verir. NiPc'in iletkenliği fitalosiyaninin makrosiklik halkasındaki π elektron sisteminin konjügasyonundan kaynaklanır (Unni 2000). Tauc bağıntısı kullanılarak, Şekil 4.2'de $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ değişimi gösterilmektedir. Bu grafikte iki banda ait lineer bölge görülmektedir. Çizilen bu grafikten Q ve B (Soret) bantlarına ait bant kenarı soğurmasının doğrusal olan bölgelerin enerji koordinatına uzatılmasıyla doğrudan bant aralığı değerleri elde edilmiştir. Damlatma metoduyla oluşturulan NiPc ince filminin doğrudan bant aralığı değerleri; 1,76 eV (Q bandı) ve 3,47 eV (B bandı) olarak belirlenmiştir. Bulunan doğrudan enerji bant değerleri, literatürde verilen değerler ile uyum içerisindedir (Hussein 2012, Joseph 2007, Shah 2008, Unni 2000).



Şekil 4.1. Damlatma yöntemi ile cam altlık üzerine büyütülen NiPc ince filminin soğurma grafiği



Şekil 4.2. Damlatma yöntemi ile cam altlık üzerine büyütülen NiPc ince filminin $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ grafiği

4.2. Schottky Kontaklarda Akım-Gerilim Ölçümleri

Herhangi bir V geriliminin fonksiyonu olarak diyot akımı,

$$I = I_0 \exp\left(\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1\right) \quad 4.1$$

denklemi ile ifade edilir (Ziel 1968). Son denklemde eV >> nkT olursa sağdaki 1 sayısı, üstel kısma göre göz ardı edilebilir. Eşitliğin son şekli,

$$I = I_0 \exp\left(\left(\frac{eV}{nkT}\right)\right) \quad 4.2$$

şeklinde olur. (4.2) denklemi kullanılarak idealite faktörü için,

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

eşitliğine ulaşılır.

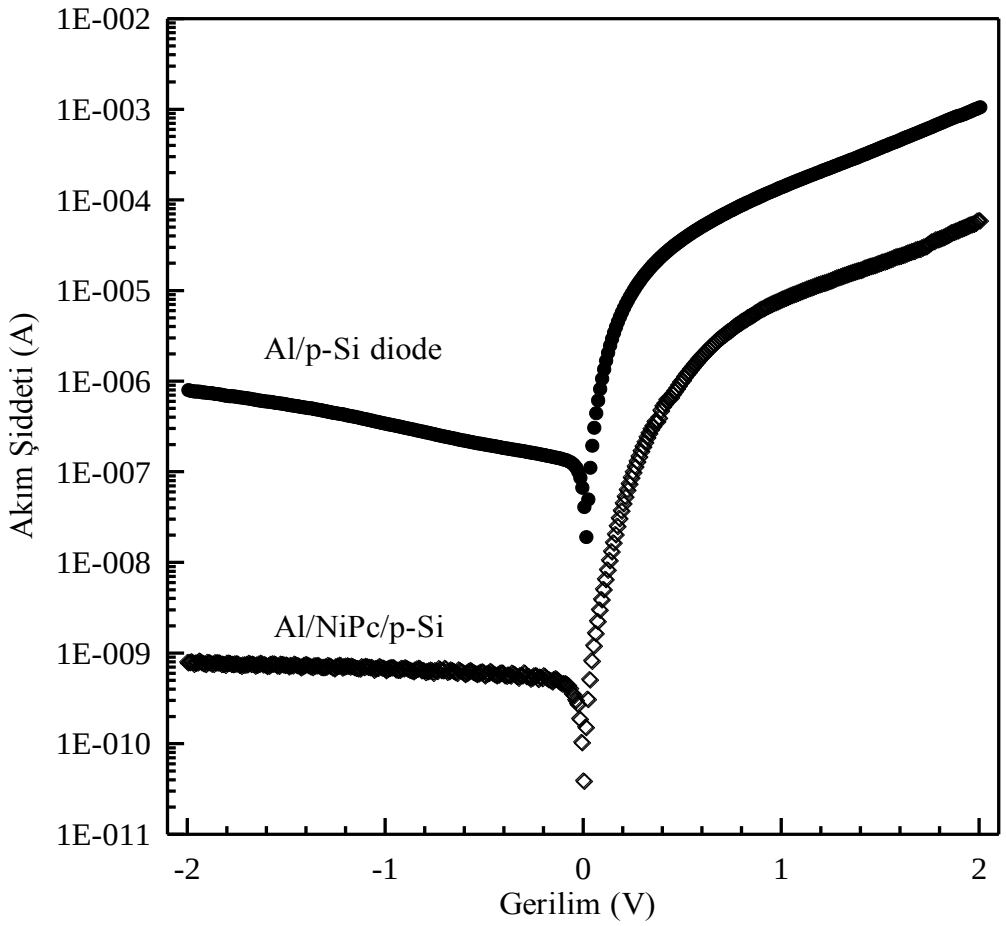
Kontaklar için dV/dlnI değeri ile beraber diğer sabit değerler de (4.3) eşitliğinde kullanılarak n değerleri elde edilebilir. (4.2)'deki I_0 değeri,

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

olarak yazılabilir. Bu eşitlikten yola çıkarak engel yüksekliği,

$$\Phi_b = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad 4.5$$

Şeklinde yazılabilir. Bu ifadede A; kontak yüzey alanı (A=7,85 x 10^{-3} cm^2), A* Richardson sabiti (p-Si için A*=32 A/K^2cm^2) dir. I_0 ve Φ_b sırasıyla (4.4) ve (4.5) ifadeleri kullanılarak bulunur.



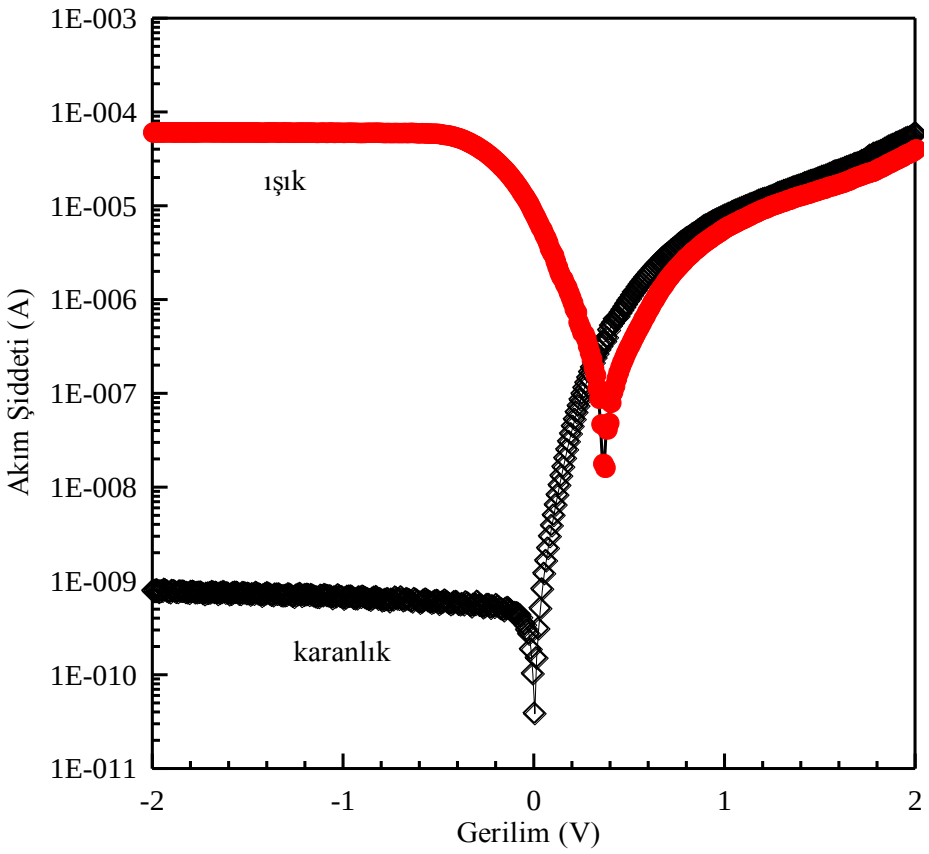
Şekil 4.3. Al/p-Si referans ve Al/NiPc/p-Si/Al diyotlarının karanlık ortamda *I–V* grafiği

Şekil 4.3'de Al/p-Si referans ve Al/NiPc/p-Si/Al diyotlarının karanlık ortamdaki lnI–V grafikleri gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi Al/NiPc/p-Si/Al diyotun akım değerleri önemli oranda (yaklaşık 3 mertebe) sınırlanmaktadır. Akımdaki bu azalma NiPc ince film tabakasına, arayüzeydeki doğal oksit tabakası ve arayüzey tabakasına atfedilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Al/p-Si referans diyotun ve Al/NiPc/p-Si diyotun engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,671eV ve 0,822eV, idealite faktörü değerleri de sırasıyla 1,722 ve 1,487 olarak bulundu.

4.3. Fotoelektriksel Özelliklerin İncelenmesi

Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun aydınlık ortamdaki *I-V* ölçümleri Keithley 4200 SCS ve güneş simülatörü altında 300 Watt ışık kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 4.4'de karanlık ve ışık altındaki *I-V* eğrileri görülmektedir. Diyota ışık uygulandığında ters beslem bölgesindeki

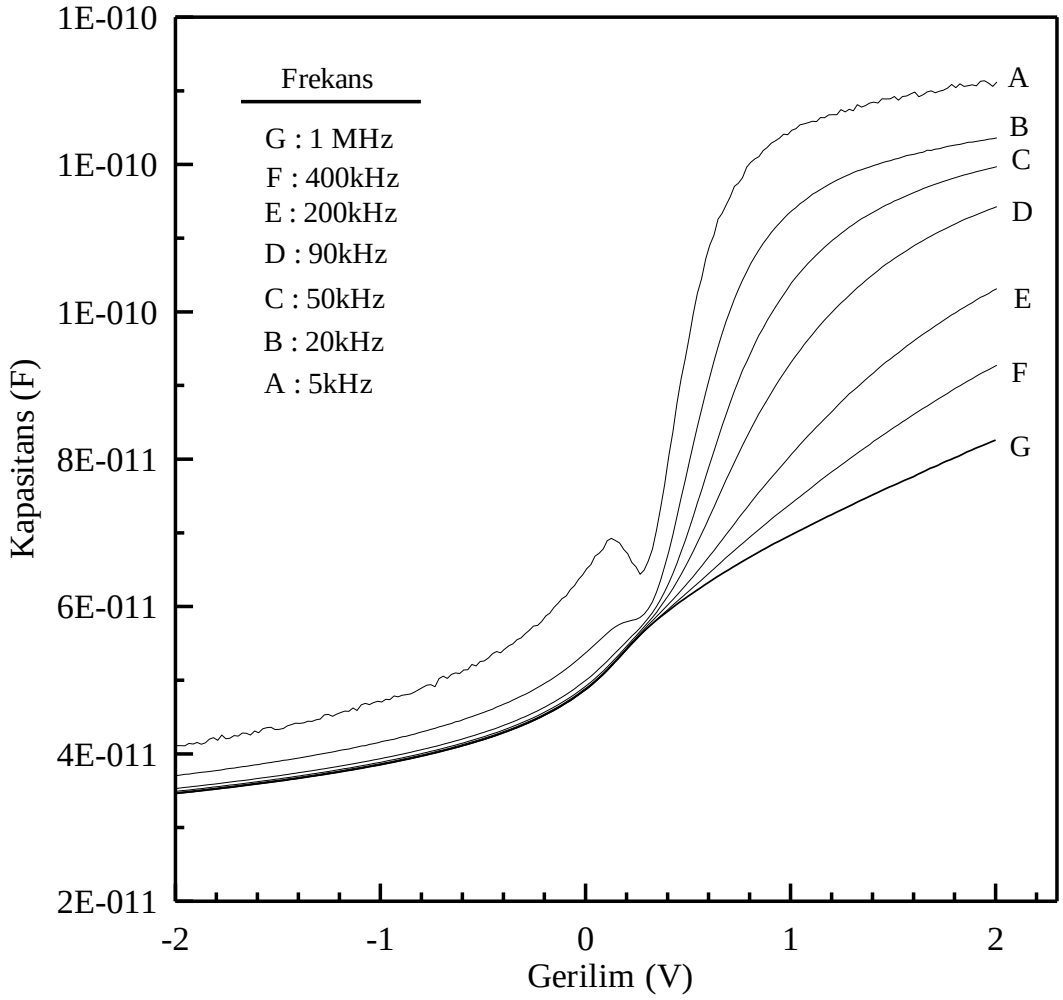
akım değeri, karanlık akımın yaklaşık 5 mertebe kadar artmıştır. Bu ölçümler doğrultusunda Al/NiPc/p-Si/Al diyot yapısının, fotodiyot özellik sergilediği bulundu. Diyotun fotovoltaik parametreleri V_{oc}=0,37 V ve I_{sc}= 8,17 µA olarak hesaplanmıştır.



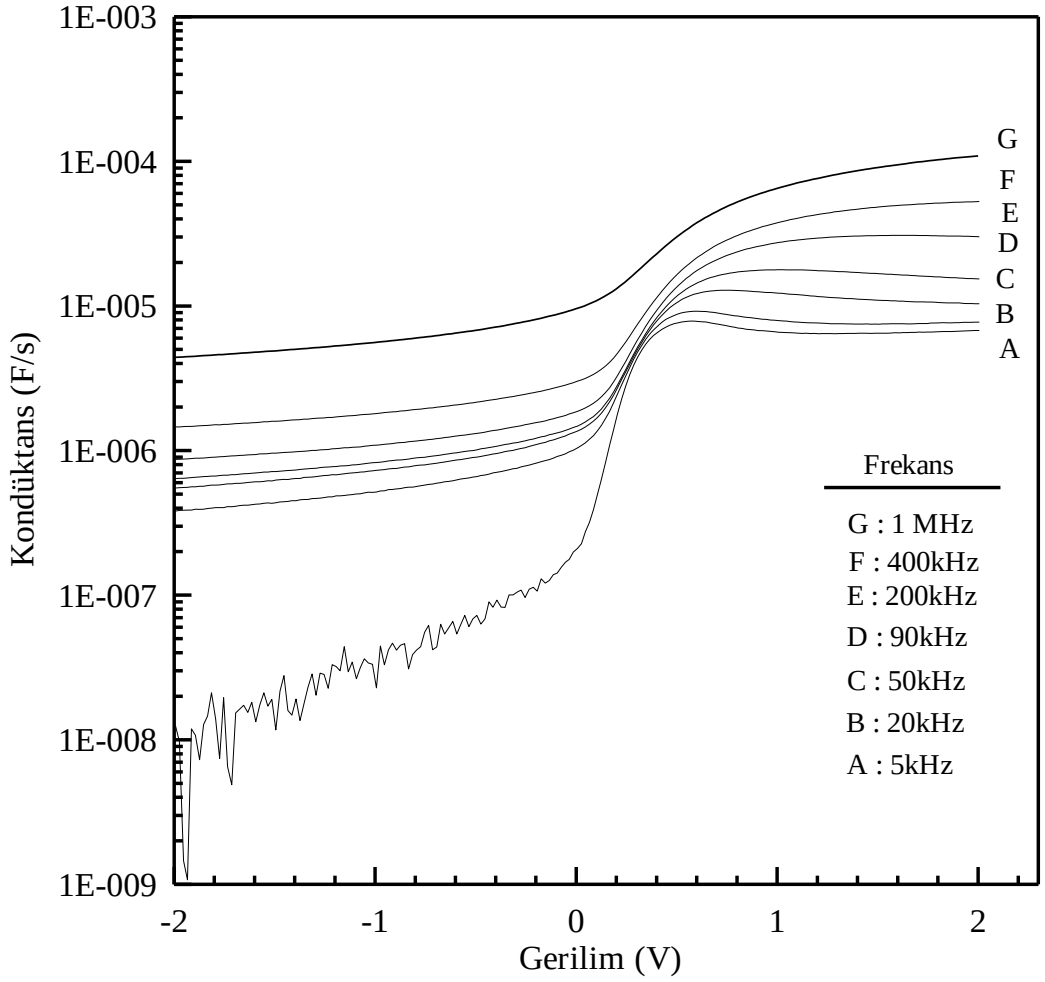
Şekil 4.4. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun karanlık ve ışık altındaki *I–V* eğrileri

4.4. Al/NiPc/*p*-Si/Al Diyodunun C-V Karakteristiği

C-V ölçümleri kontakların en hassas karakteristiklerinden birisidir. Kontakların C-V ölçümleri ara yüzey seviyelerine karşı oldukça hassastır ve ara yüzey seviyelerinin yarıiletken diyotların elektriksel parametreleri üzerine etkisi mevcuttur. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait 5, 20, 50, 90, 200 kHz, 400kHz ve 1 MHz frekanslarda ve -2 ile 2 volt arasında C-V ve G-V grafiklerini göstermektedir. Grafikten de görüleceği gibi Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun kapasite değerleri frekans arttıkça azalmaktadır. Oysa aynı diyotun kondüktans değerleri frekans arttıkça artmaktadır.



Şekil 4.5. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait C-V grafiği



Şekil 4.6. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait G-V grafiği

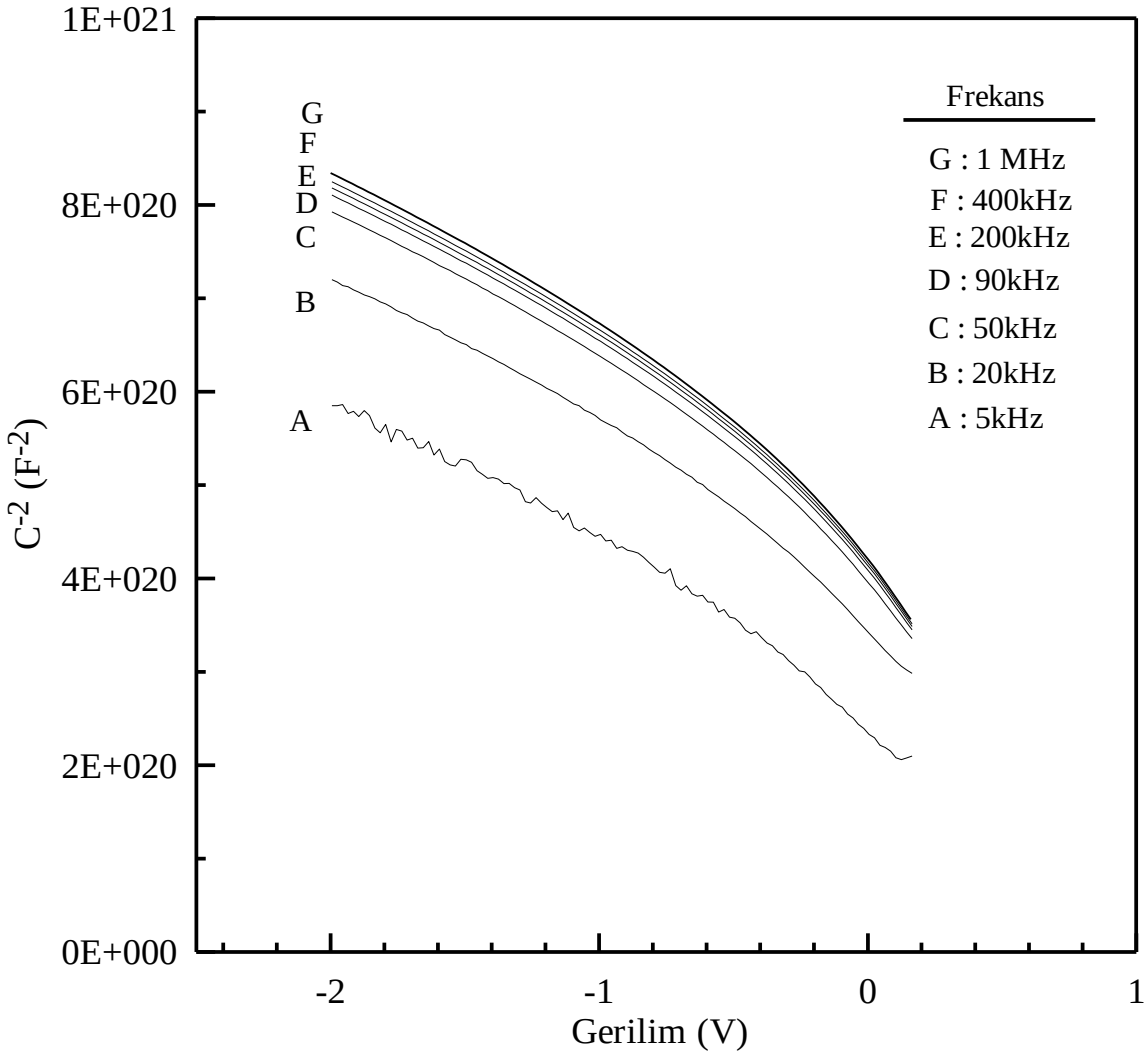
Diyotun elektriksel parametreleri C^{-2}–V grafiklerinden de bulunabilir. Metal/p–tipi yarıiletken diyotlar için diyot kapasitesi:

$$\frac{1}{c^2} = \frac{2(V_a+V)}{e\varepsilon_s\varepsilon_0 A^2 N_a} \qquad 4.6$$

şeklinde yazılabilir. Al/NiPc/p-Si/Al yapısının $1/C^2$-V eğrileri Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Diyotun Φ_b değeri 4.7 ifadesi ile elde edilir.

$$\emptyset_b(C-V) = V_d/n + E_f \qquad 4.7$$

Burada E_f, Fermi seviyesi olarak tarif edilir.

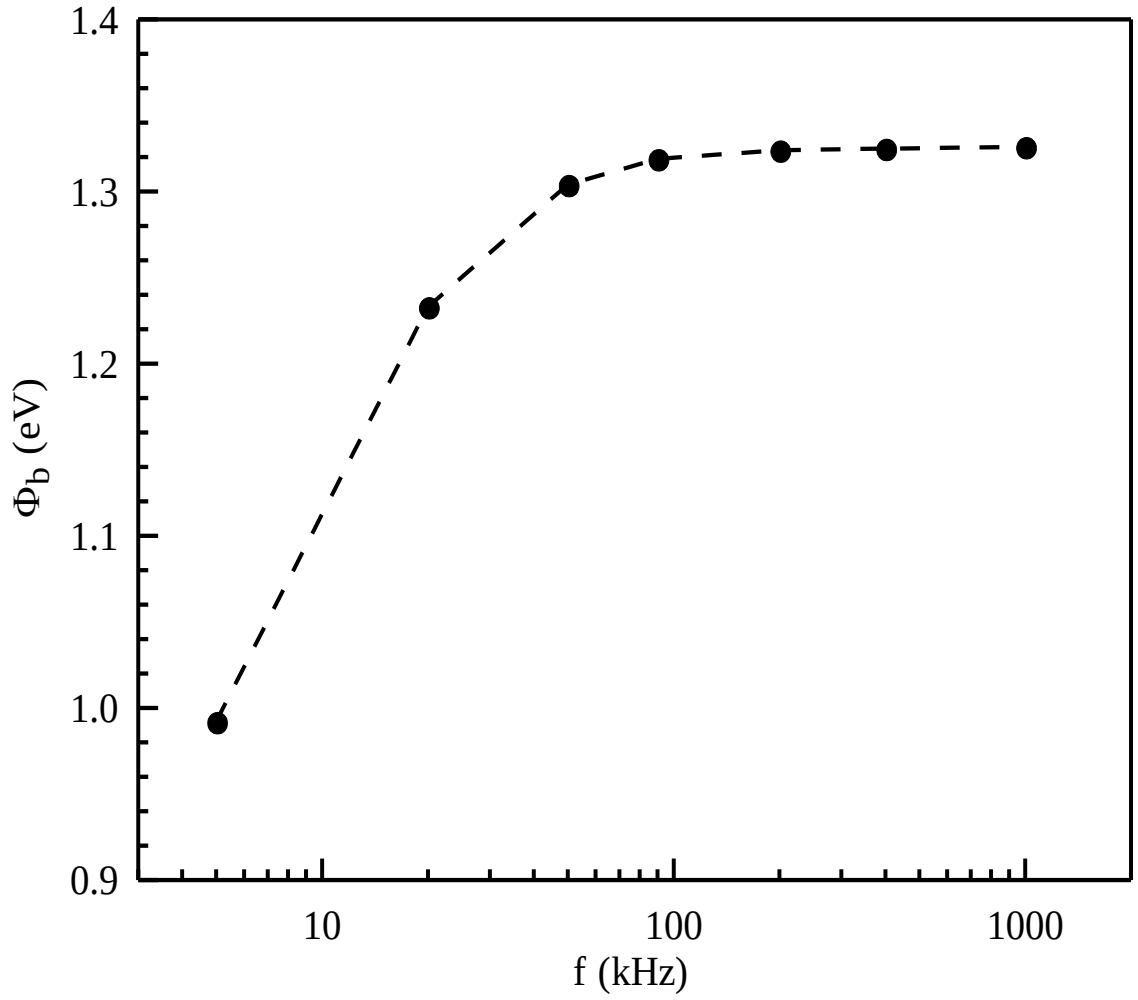


Şekil 4.7. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2} – V grafiği

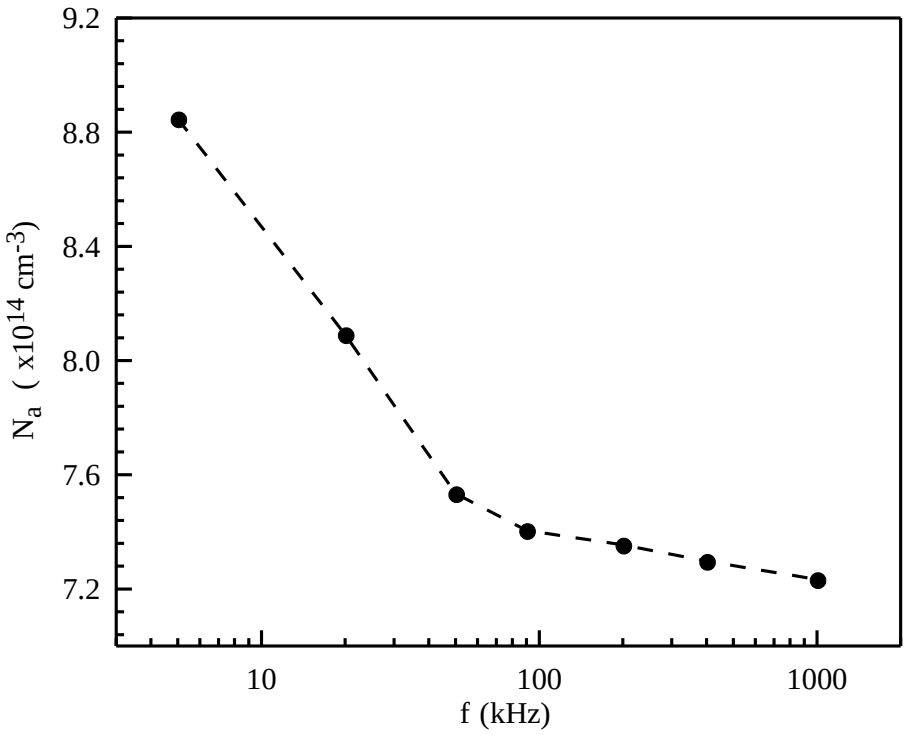
C^{-2}-V grafiklerinin lineer kısmı kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda, difüzyon potansiyeli, alıcı taşıyıcı konsantrasyonu, engel yüksekliği değerleri Tablo 4.2 de verilmiştir. 200 kHz frekanstaki C-V ölçümünden hesaplanan engel yüksekliğinin değeri Φ_b=1,323 eV bulunmuştur. Daha önceden *I-V* grafiği kullanılarak bulunan engel yüksekliği Φ_b=0,822 eV olarak bulunmuştu. Metal-yarıiletken ya da MIS yapılarda, *C-V* karakteristiklerinden hesaplanan değerler *I-V* karakteristiklerinden hesaplanan değerlerden daha yüksektir. Çünkü bu iki ölçümde kullanılan metotlar farklıdır. Kapasite arınım tabakasındaki potansiyel değişimlerinden fazla etkilenmez. Bu yüzden bulunan değer, potansiyel dağılımının ortalamasını temsil eder. Buna karşın, tükenim bölgesinden geçen akım potansiyel dağılımının üstel fonksiyonu olarak değişim gösterir ve potansiyel dağılımından oldukça etkilenir.

Tablo 4.1. lnI-V, Cheung, Norde ve foto I-V değişimlerinden elde edilen diyot parametreleri.

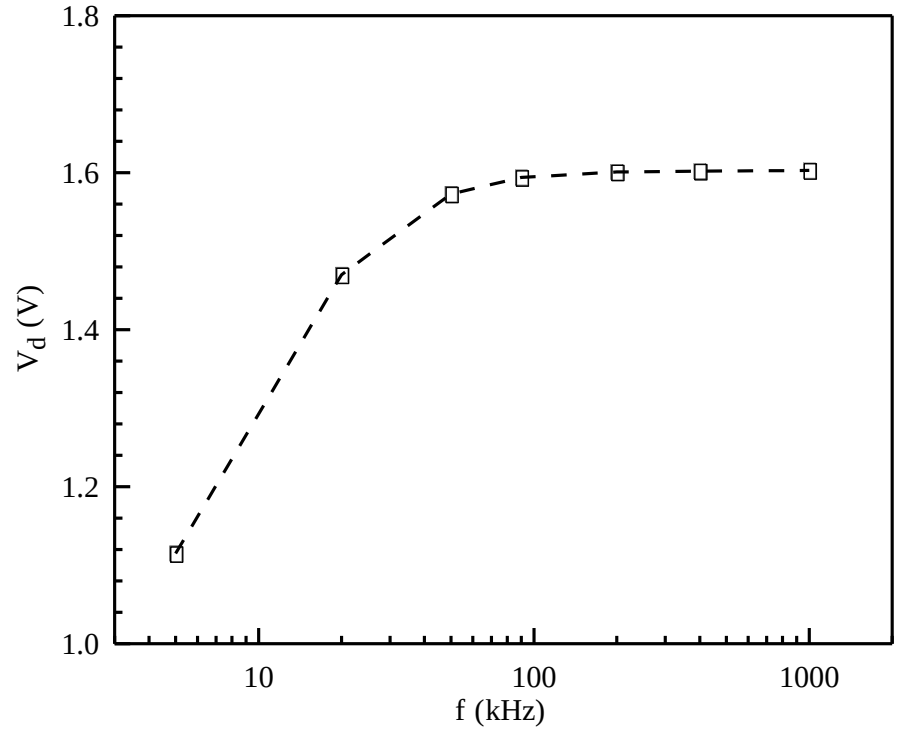
Yöntem	I_0	Φ_b (eV)	n	Rs (kΩ)	V_{oc} (V)	I_{sc} (µA)
LnI-V	$3,64x10^{-10}$	0,822	1,487	-	-	-
Foto I-V	-	-	-	-	0,37	8,17
dV/dlnI	-	-	3,510	14,64	-	-
H(I)-I	-	0,845	-	16,75	-	-
Norde	-	0,866	-	350,97	-	-



Şekil 4.8. Al/NiPc/p-Si/Al ekleminin farklı frekanslardaki C^{-2}–V grafiğinden elde edilen engel yüksekliğinin frekansa bağlı değişimi



Şekil 4.9. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2}–V grafiğinden elde edilen taşıyıcı konsantrasyonunun frekansa bağlı değişimi



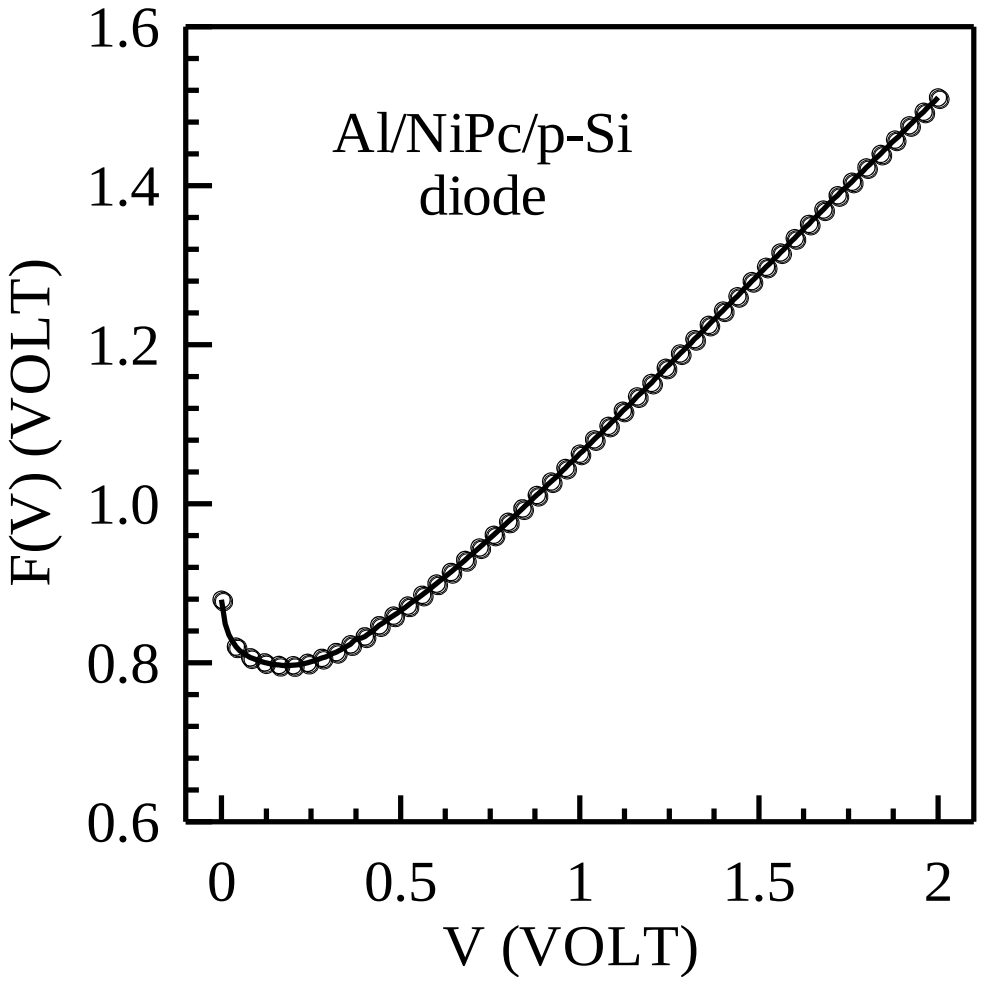
Şekil 4.10. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun farklı frekanslardaki C^{-2}–V grafiğinden elde edilen difüzyon potansiyelinin frekansa bağlı değişimi

4.5. Norde Fonksiyonu ile Diyot Parametrelerinin Bulunması

Norde fonksiyonu şöyle yazılabilir.

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{1}{\beta}\left(\frac{I(V)}{AA^{*}T^{2}}\right) \qquad 4.8$$

Çalışmamızda I-V karakteristiğinden *n*= 1,487 olarak elde etmiştik. Bu yüzden γ değeri 2 olarak alınır.



Şekil 4.11. Al/NiPc/p-Si/Al eklemine ait F(V)-V grafiği

Norde metodunda engel yüksekliği ifadesi,

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \qquad 4.9$$

olarak verilir. Şekil 4.11 *F-V* grafiğini göstermektedir. Bu grafikten $F(V_0)$ değeri 0,797 V ve V_0 ise 0,19 V olarak bulundu. Bunlar kullanılarak Φ_b değeri 0,866 eV olarak elde edildi. R_s değeri denklem (3.55) yardımıyla 350,97 kΩ olarak hesaplandı.

4.6. Cheung Fonksiyonları ile Schottky Diyot Karakteristiklerinin Belirlenmesi

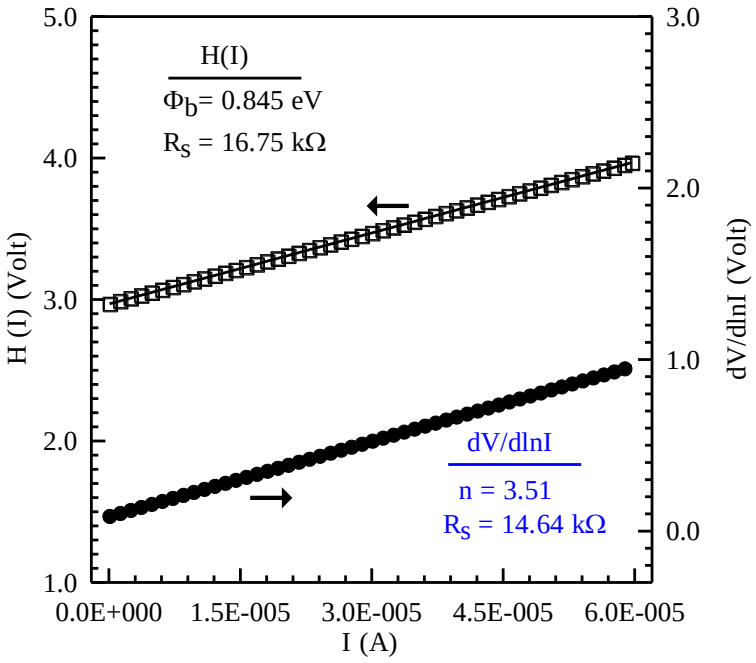
Cheung fonksiyonları:

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + I.R_s \qquad 4.10$$

ve

$$H(I) = n\phi_{bn} + I.R_s \qquad 4.11$$

denklemleri ile verilir. $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ değişimi Şekil 4.12' de gösterilmiştir. Bu grafikten diyot için n= 3,51 ve R_s= 14,64 kΩ şeklinde hesaplandı.



Şekil 4.12. Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun H(I)-I ve dV/d(InI)-I grafikleri

Şekil 4.12'de çizilen *H(I)–I* grafiğinden Φ_b= 0,845 eV ve R_s= 16,75 kΩ olarak bulundu.

Tablo 4.2. C^{-2}-V grafiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri, alıcı taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli.

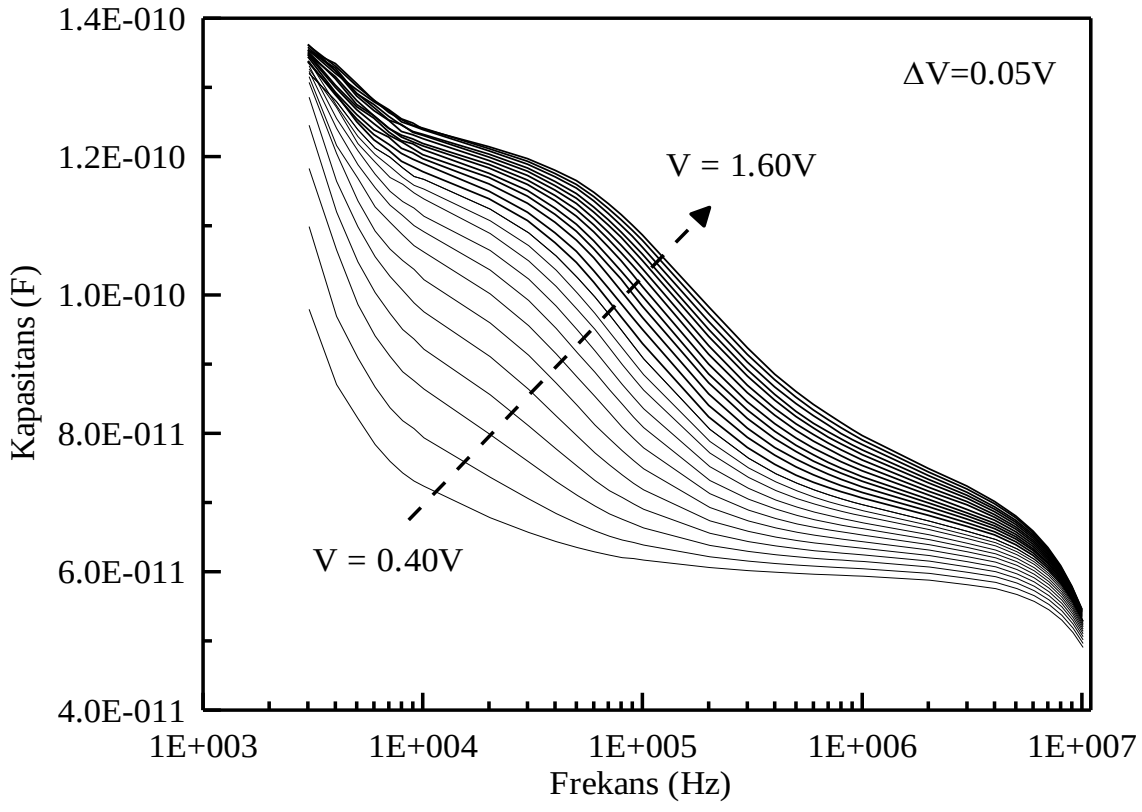
Frekans (kHz)	Φ_b (eV)	N_a ($x10^{14}cm^{-3}$)	V_d (V)
5	0,992	8,847	1,115
20	1,233	8,091	1,470
50	1,304	7,534	1,573
90	1,319	7,405	1,594
200	1,324	7,354	1,601
400	1,325	7,297	1,602
1000	1,326	7,233	1,603

4.7. Al/NiPc/p-Si/Al Diyodunun Kapasite-Frekans Karakteristiği

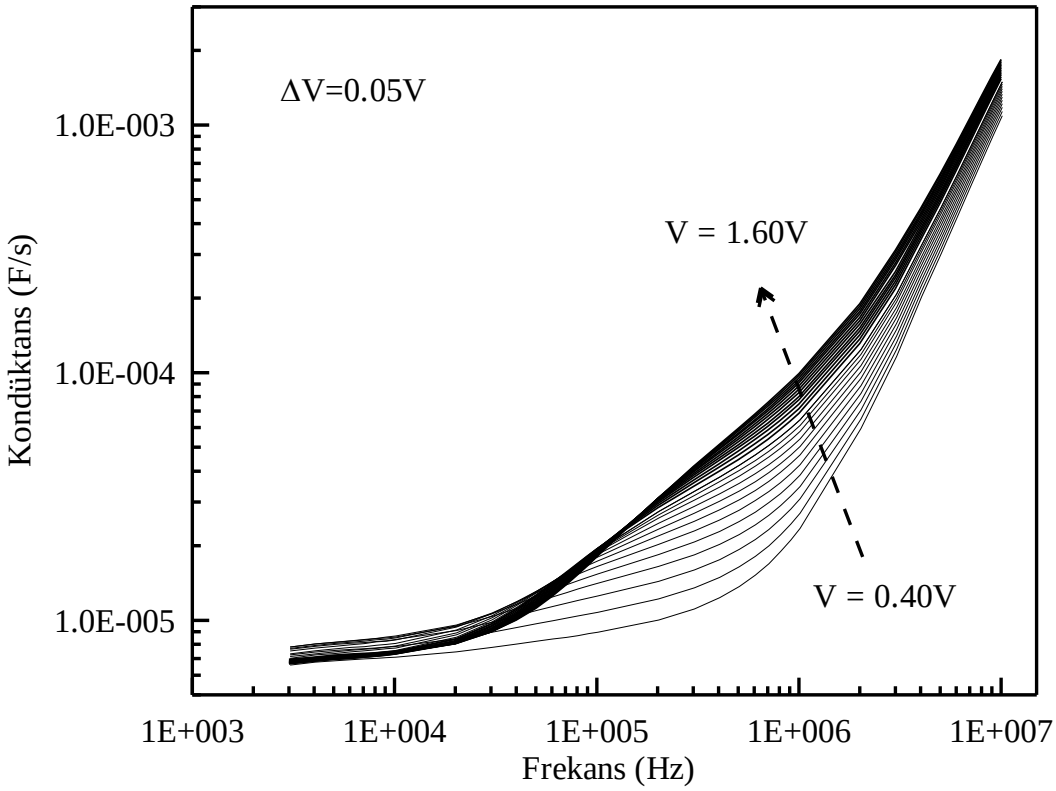
Kapasite-frekans (C-f) ölçümü Schottky kontakların en önemli karakteristiklerinden biridir. Şekil 4.13 ve Şekil 4.14 Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun belirli bir frekans aralığında değişik uygulama gerilimine bağlı olarak C-f ve G-f ölçümlerini göstermektedir. Al/NiPc/p-Si/Al diyodu için C-f ve G-f ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta 3kHz-10MHz aralığında alındı. Bu ölçümler 0,40 V'tan başlayarak 0,04V aralıkla 1,60V'a kadar alınmıştır. Grafikten çok net bir şekilde görüldüğü gibi diyotta düşük frekans bölgesinde kapasite değerleri hızlı bir şekilde artmaktadır. Özellikle düşük frekanslarda kapasite büyük iken, artan frekans değerlerine karşı kapasite, düşük frekans bölgesinde hızlı, yüksek frekanslara doğru gidildikçe yavaş bir şekilde azalmaktadır. Ayrıca aynı frekans değerlerinde gerilim arttıkça kapasite de artmaktadır. Schottky diyotlarda genellikle yüksek frekanslarda ara yüzeydeki yük yüksek frekanslarda a.c. sinyalini takip edemediği için kapasiteye katkısı oldukça azdır ve diyot sadece uzay yükü kapasitesine sahiptir. Düşük frekanslarda bu durumun tersi (yük a.c. sinyalini takip edebilir) söz konusudur ve bir artık kapasite oluşacaktır. Orta büyüklükteki frekans bölgesinde kapasite değeri hemen hemen sabittir. Frekans değeri artırılmaya devam edilince, belli bir frekans değerinden sonra artan frekansla kapasitenin azaldığı görülmektedir. Kapasitenin yaklaşık olarak sabit olduğu bölge arayüzey hallerinin sinyali takip edemediği anlamına gelir. Bu durumdaki kapasite (frekans ve dirençten bağımsız olan), $C = \frac{C_i(C_{sc}+qD_{it})}{C_{sc}+qD_{it}+C_i}$ eşitliği ile verilir. Yüksek frekanslarda devre elemanının kapasitesi, artan seri dirençle

kapasitenin azaldığını ifade eden $C = \frac{C_i(C_{sc}+qD_{it})(C_{sc}+C_i+qD_{it})}{w^2C_i^2A^2(C_{sc}+qD_{it})^2R_s^2+\left(C_{sc}+C_i+qD_{it}+C_iA\frac{J_{dc}}{kT/q}R_s\right)^2}$ ifadesi ile verilir (Chattopadhyay vd 1993). Dolayısı ile Şekil 4.13, *C-f* değişimlerinde görüldüğü gibi frekans arttıkça, özellikle yüksek frekans bölgelerinde kapasite küçük olduğu gibi kapasitif değişim de düşük frekans bölgesine göre oldukça azdır. Bu şekillerde yine yukarıda bahsedilen özellikleri de dikkate alacak olursak, yaklaşık olarak f=5 MHz'den büyük frekanslarda artan frekansla kapasite hızlı bir şekilde azalmaktadır. $\tau = \frac{1}{v_{th}\sigma N_d}\exp\left(\frac{q\psi_s}{kT}\right)$ eşitliğinden de görüldüğü gibi, zaman sabiti ara yüzey hallerinin yakalama tesir kesiti, katkı konsantrasyonu ve yarıiletkenin yüzey potansiyeline bağlıdır (Aydoğan 2004).

G-f ölçümleri için de Şekil 4.14' deki grafikten çok net bir şekilde görüldüğü gibi diyotta frekans arttıkça kondüktans değerleri hızlı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca aynı frekans değerlerinde (100 kHz ve üzeri yüksek frekans bölgesi için) gerilim arttıkça kondüktans da artmaktadır.



Şekil 4.13. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait C-f grafiği



Şekil 4.14. Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait G-f grafiği

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan çalışmada, *p*-Si yarıiletken kristali kullanılarak omik kontağı buharlaştırma ile ve doğrultucu tarafı (NiPc) damlatma yöntemiyle yapılan Al/NiPc/*p*-Si/Al diyotu ve bu diyotun *I-V, C-V, G-V, C-f* ve *G-f* karakteristikleri çalışıldı.

Öncelikle cam altlık üzerine damlatma yöntemiyle hazırlanan NiPc ince filminin optik soğurma ölçümü alındı. Cam altlık üzerine büyütülen NiPc tabakaların optik absorbsiyon tekniği ile incelenmesi Perkin-Elmer Lambda 2S UV-Visible spektrofotometresi ile yapılmıştır. Cam altlık üzerinde damlatma yöntemi ile büyütülen NiPc ince filminin soğurma ölçümü Şekil 4.1'de görülmektedir. Şekilden NiPc ince filmine ait Q ve B (Soret) bandı olarak adlandırılan 2 soğurma piki bulunmaktadır. Bu soğurma ölçümü daha önceki çalışmalarla uyum sergilemektedir (Joseph 2007, Unni 2000). Soğurma spektrumunda yaklaşık 610 nm (görünür bölge) dalga boyu civarında ortaya çıkan pik Q bandı olarak adlandırılır. Yine spektrumda 280 nm (ultra viyole) dalga boyu civarında ortaya çıkan pik ise B (Soret) bandı olarak bilinir. Soğurma spektrumundaki pikler, NiPc molekülünün aromatik 18π elektron sistemleri içindeki orbitallerden ve merkez metal (Ni) atomun orbitallerinin üst üste binmesinden kaynaklanır. B (Soret) bandında 250-450 nm dalgaboyu aralığında gerçekleşen geçişe, π-π^* elektronik geçişi denir. Bu geçiş ince filmin soğurma kıyısını verir. NiPc'in iletkenliği fitalosiyaninin makrosiklik halkasındaki π elektron sisteminin konjügasyonundan kaynaklanır (Unni 2000). Tauc bağıntısı kullanılarak, Şekil 4.2'de çizilen $(\alpha h\nu)^2$-$h\nu$ eğrisi gösterilmektedir. Bu grafikte iki banda ait doğrusal bölge görülmektedir. Çizilen bu grafikten Q ve B (Soret) bantlarına ait bant kenarı soğurmasının doğrusal olduğu bölgelerin enerji koordinatına uzatılmasıyla doğrudan bant aralığı değerleri elde edilmiştir. Damlatma tekniğiyle kaplanan NiPc ince filminin doğrudan bant aralığı değerleri; 1,76 eV (Q bandı) ve 3,47 eV (B bandı) olarak belirlenmiştir. Bulunan doğrudan enerji bant değerleri, literatürde verilen değerler ile uyum içerisindedir (Hussein 2012; Joseph 2007; Shah 2008; Unni 2000).

Al/NiPc/*p*-Si/Al diyotun *I-V* ölçümleri, "KEITLEY 4200 SCS" cihazı ile (+2V)-(-2V) aralığında 0,02 Volt adımlarla alındı. Şekil 4.3'de Al/p-Si referans ve Al/NiPc/p-Si/Al diyotlarının karanlık ortamdaki lnI–V grafikleri gösterilmektedir. Şekilden görüldüğü gibi Al/NiPc/p-Si/Al diyotun akım değerleri önemli oranda (yaklaşık 3 mertebe) sınırlanmaktadır. Akımdaki bu azalma NiPc ince film tabakasına, arayüzeydeki doğal oksit tabakası ve arayüzey tabakasına atfedilir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Al/p-Si referans diyotun ve Al/NiPc/p-Si diyotun engel yüksekliği değerleri sırasıyla 0,671eV ve 0,822eV, idealite faktörü değerleri de sırasıyla 1,722 ve 1,487 olarak bulundu. Schottky diyotlarda asıl akım iletim mekanizması Termoiyonik Emisyon (TE) modeli ile açıklanmaktadır. İdeal bir diyot için idealite faktörü (n) 1'dir. Ancak ideal durumdan sapmalar, idealite faktörünün 1'den büyük değerler almasına neden olabilir. Bu durumda n değeri 1'den uzaklaştıkça diyodun ideallikten uzaklaştığı söylenebilir. İdealite faktörünün 1'den büyük olması farklı nedenlere atfedilmektedir. Bunlar: 1) metal ve yarıiletken arasında ince bir oksit ve organik NiPc tabakasındaki arayüzey halleri, 2) Yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımı, 3) Arayüzeyde, elektrik alan etkisiyle imaj kuvvetinin düşmesi, 4) Uzay yükü bölgesinde jenerasyon/rekombinasyon akımları olabilir (Werner vd 1991).

El-Nahass at al. (2005), NiPc'in toz halini termal buharlaştırma yöntemini kullanarak elde ettikleri Au/NiPc/p-Si diyot yapısının idealite faktörünün 1,51, sızıntı akımının $1{,}2\text{x}10^{-8}$A RR= 1750, R_s =750 Ω ve R_p =1,7 MΩ olduğunu bildirmişlerdir. El–Nahass vd (2005), karanlıkta Au/p-ZnPc/p-Si cihazının 302 den 364 K'e değişen sıcaklıklarda akım-voltaj karakteristiklerini araştırmışlardır. Au/p-ZnPc/p-Si cihazı doğrultucu özellik göstermiştir. Düşük ileri beslemde akım yoğunluğu hollerin termiyonik emisyonları tarafından sınırlandırıldığı görülmüştür. El-Nahass ve at al. (2007), yapmış oldukları çalışmada NiPc filmini termal buharlaştırma ile n-Si üzerine oluşturarak p-NiPc/n-Si diyotunu elde etmiş ve bu heteroeklemin elektriksel iletim özelliklerini farklı sıcaklıklarda *I-V* ve oda sıcaklığında *C-V* karakteristikleri ile belirlemişlerdir. Yakuphanoğlu ve ark. (2007), Au/CuPc/p-Si yapı için n= 2,38 ve Φ_b =0,71 eV elde etmişlerdir. Yakuphanoğlu vd (2008), p-Si/CoPc/Al diyot yapısı için n= 1,33, Φ_b=0,90 eV ve R_s= 314,5 kΩ olarak elde etmişlerdir. Güllü ve Türüt (2008), quercetin/p-InP heteroeklem güneş pili yapısını için Φ_b ve n değerlerini sırasıyla 0,86 eV ve 3,20 olarak elde etmiştir. Güllü vd (2010), p-Si yarıiletken kristal üzerine organik film kaplayarak

Al/CR/P-Si diyotunun n ve Φ_b değerlerini sırasıyla 1,68 ve 0,75 eV olarak elde etmiştir. Hamidi (2011), Al/Tips:MEHPPV/p-Si Schottky diyotu için Φ_b = 0,79 eV ve n= 7,43 olarak rapor etti. Güllü vd (2012) yaptıkları çalışmada, Au/Rh-101/n-InP Schottky diyotları için engel yüksekliği değeri 0,88 eV ulaşmışlardır. Yıldız (2012), Al/oc-ZnPc/p-Si Schottky diyotunun idealite faktörünü ve engel yüksekliğini sırasıyla 1,438 ve 0,784 eV olarak hesaplamıştır. Norde fonksiyonları kullanılarak diyotun seri direnç değerini 5,46 kΩ olarak hesaplamıştır. Janardhanam vd (2014), Au/CuPc/n-GaN yapı için idealite faktörünün 1,33 engel yüksekliğinin 1,02 eV ve seri direncinin 1,9 kΩ olduğunu hesaplamışlardır. Aslan ve ark (2015), Al/CuPc/p-InP/Au-Zn diyotunu üreterek, oda sıcaklığında *I-V* ölçümleri yardımıyla engel yüksekliğini ve idealite faktörünü sırasıyla 1,03 eV ve 1,52 olarak hesaplamıştır. Reddy (2015), yaptıkları çalışmada n-InP üzerine oluşturduğu NiPc film üzerine Au buharlaştırarak, NiPc filmli ve filmsiz Au/n-InP kontaklar oluşturmuştur. Yapıların akım gerilim ölçümlerinden NiPc filmli diyodun engel yüksekliğini 0,82 eV olarak bulmuştur. Görüldüğü gibi, Al/NiPc/p-Si/Al diyotu için bulunan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri literatürdeki çalışma sonuçları ile uyum sergilemektedir.

Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun aydınlık ortamdaki *I-V* ölçümleri Keithley 4200 SCS ve güneş simülatörü altında 300 Watt ışık kullanılarak gerçekleştirildi. Şekil 4.4 bu ölçümlere ait karanlık ve ışık altındaki *I-V* eğrilerini göstermektedir. Diyota ışık uygulandığında ters beslem bölgesindeki akım değeri, karanlık akımın yaklaşık 5 mertebe kadar artmıştır. Diyotun açık devre voltajı V_{oc}=0,37 V ve kısa devre akımı I_{sc}= 8,17 μA olarak hesaplanmıştır. Bu ölçümler doğrultusunda Al/NiPc/p-Si/Al diyot yapısının, fotodiyot özellik gösterdiği görüldü.

Norde fonksiyonu *F-V* grafiği (Şekil 4.11) kullanılarak yapılan hesaplamalarda $F(V_0)$ değeri 0,797 V olarak bulundu. V_0 ise 0,19 V hesaplandı. Bu değerler kullanılarak Φ_b engel yüksekliği 0,866 eV bulundu. Norde metodu yardımı ile seri direncin büyüklüğü denklem (3.55) yardımıyla 350,97 kΩ olarak hesaplandı. Hesaplanan değerler Tablo 4.1'de verilmiştir.

Cheung fonksiyonları ve (Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de verilen) ln*I-V* grafiklerinden bulunan idealite faktörleri, engel yükseklikleri ve seri direnç değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1.'den de görüldüğü gibi, Cheung fonksiyonlarından elde edilen parametreler direkt olarak ln*I-V* grafiğinden elde edilen parametrelerden farklıdır. Bu durum yüksek akım ve yüksek gerilim değerlerine karşılık gelen bölgelerde seri direncin etkisine atfedilebilir.

Al/NiPc/p-Si/Al diyotuna ait *C-V* ve G-V ölçümleri "KEITHLEY 4200 SCS" cihazı ile +2 V-(-2)V aralığında 5, 20, 50, 90, 200 kHz, 400kHz ve 1 MHz frekans değerlerinde alındı. Şekil 4.5'de gösterilen frekansa bağlı olarak elde edilen *C-V* değişimlerinden de görüleceği gibi düşük frekanslardaki kapasite yüksek iken, frekans arttıkça kapasite azalmaktadır. Oysa Şekil 4.6'da G-V grafiğinde görüldüğü gibi Al/NiPc/p-Si/Al diyotun kondüktans değerleri frekans arttıkça artmaktadır. Bir Schottky diyodun ters beslem *C-V* değişiminden yararlanarak diyodun difüzyon potansiyeli, iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu (*p*-tipi yarıiletken için), Fermi enerji seviyesi ve dolayısı ile de (4.7) eşitliğinden engel yüksekliği hesaplanabilir. Bu amaçla Al/NiPc/p-Si/Al diyotunun $1/C^2$-*V* grafikleri iyi derecede lineer bir değişim göstermektedir. Ancak organik yarıiletkenlerin $1/C^2$-*V* eğrileri genellikle nonlineer davranış sergilemektedirler (Elbisawa at al. 1983). Ters beslem $1/C^2$-*V* grafiklerinin lineer kısmının fit edilmesiyle, V_d, (difüzyon potansiyeli) E_f, (fermi enerji seviyesi), engel yüksekliği ve N_a (iyonize olmuş akseptör konsantrasyonu) değerleri bulundu. Farklı frekans değerleri için bulunan engel yüksekliği değerleri Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'deki *C-V* değişimlerinden bulunan engel yükseklikleri *I-V* grafiklerinden elde edilen ve Tablo 4.1'de verilen engel yükseklikleri ile karşılaştırıldığında *C-V* değişimlerinden bulunan engel yüksekliklerinin farklı olduğu görülmektedir. Bu durum bir NiPc organik+oksit arayüzey tabakasının varlığı ve yarıiletkendeki tuzak seviyeleri ile açıklanabileceği gibi, engelin inhomojenliğine de atfedilebilir (Rhoderick 1988 ve Özdemir 2003). İnhomojen bir arayüzey için, bant bükülmesindeki ve engel yüksekliğindeki bölgesel değişimler akım ve kapasite için farklı Schottky engel yüksekliği sonucunu doğurur (Brillson 1982; Sullivan 1991).

I-V ve *C-V* ölçümleri temelde farklıdırlar. *I-V* ve *C-V* ölçümlerinin birbirinden farklı çıkmasının bir nedeni, her iki ölçüm tekniğinin farklı teknikler olmasıdır. *C-V* ölçümleri diyottaki empedans ölçümlerine dayanır. Devre elemanının kapasitesi uygulama geriliminin fonksiyonu olarak hesaplanır. Homojen bir engele sahip devre elemanında kapasite deplasyon bölgesinin genişliği ile orantılıdır. *I-V* grafiği ile engel yüksekliği,

akım akışı için bir aktivasyon potansiyeli olarak tanımlanabilen niceliği ifade eder. *C-V* değişiminden elde edilen engel yüksekliği aslında, deplasyon bölgesinin büyüklüğünün bir ölçümüdür. Şayet engeller homojen ve ideal iseler, her iki ölçüm tekniğinden elde edilecek olan ölçümlerin aynı sonuçları vermeleri gerekir. Homojenlik ve ideallik söz konusu olmadığı durumda, her iki ölçüm tekniğinden elde edilecek ölçümler farklı olacaktır. Dolayısı ile Al/NiPc/*p*-Si/Al diyodu homojen ve ideal olmadığı kabul edildiği için, her iki ölçüm tekniğinden elde edilen engel yüksekliği değerleri farklı olmaktadır.

Al/NiPc/*p*-Si/Al diyotunun *C-f* ve *G-f* ölçümleri de "KEITHLEY 4200 SCS" cihazı ile 3kHz-10 MHz aralığında, oda sıcaklığında 0,40 V' dan başlayarak, 0,05 V adımlarla 1,60 V' a kadar alındı. Schottky kontaklarda kapasite ölçümleri ara yüzey hakkında bilgi elde etmenin en önemli ölçüm tekniklerinden biridir. Schottky kontaklardaki ara yüzeyin durumu yarıiletken devre elemanının performansını, güvenirliliğini ve kararlılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Schottky kapasitans spektroskopi, düşük frekansta düz beslem uygulama geriliminin fonksiyonu olarak arayüzey hal kapasitesini tanımlamak için gerekli bilgiyi sağlayan bir ölçüm tekniğidir (Nguyen 2001; Özdemir 2003). Bu yüzden Al/NiPc/*p*-Si/Al diyodunun kapasite-frekans ölçümleri kullanılarak elde edilen *C-f* değişimlerinden görülebileceği gibi, yüksek uygulama gerilimlerinde kapasite büyük, uygulama gerilimi azaldıkça kapasite de azalmaktadır. *C-f* ölçümlerinde düşük frekanslardaki deneysel kapasite değeri, diyodun uzay yükü kapasitesi ile ara yüzey kapasitesinin toplamına eşittir. Genel olarak, denge durumunda ara yüzey halleri yeterince yüksek frekanslarda kapasiteye katkıda bulunamaz. Çünkü ara yüzey hallerinde yük a.c. (alternatif akım) sinyalini takip edemez. Bu durumda, Schottky engelli diyot sadece uzay yükü kapasitesine sahiptir. Düşük frekanslarda, ara yüzey hallerinin diyodun kapasitesine katkısı, yüksek frekanslara doğru azalır. Yine *C-f* değişimlerinden de görüldüğü gibi, düşük frekanslardaki yüksek kapasitenin nedeni, a.c. sinyalini takip edebilecek ara yüzeylerden kaynaklanan artık kapasiteye atfedilebilir (Batı 1998). Ayrıca *C-f* değişimlerinden de görüldüğü gibi, belli bir frekans değerinden sonra artan frekansla kapasitenin azaldığı görülmektedir. Kapasitenin yaklaşık olarak sabit olduğu bölgede ara yüzey hallerinin sinyali takip edemediğini belirttik. Bu durumdaki kapasite (frekans ve dirençten bağımsız olan), $C = \frac{C_i(C_{sc}+qD_{it})}{C_{sc}+qD_{it}+C_i}$ eşitliği ile verilir. Yüksek frekanslarda devre elemanının kapasitesi, artan seri dirençle kapasitenin azaldığını ifade eden;

$C = \frac{C_i(C_{sc}+qD_{it})(C_{sc}+C_i+qD_{it})}{w^2C_i^2A^2(C_{sc}+qD_{it})^2R_s^2+\left(C_{sc}+C_i+qD_{it}+C_iA\frac{J_{dc}}{kT/q}R_s\right)^2}$ ifadesi ile verilir (Chattopadhyay 1993). G-f ölçümleri için de Şekil 4.14 teki grafikten çok net bir şekilde görüldüğü gibi diyotta frekans arttıkça kondüktans değerleri hızlı bir şekilde artmaktadır. Ayrıca aynı frekans değerlerinde (100 kHz ve üzeri yüksek frekans bölgesi için) gerilim arttıkça kondüktans da artmaktadır. Bu değişimler literatürdeki çalışmalarla uyum içindedir.

Bu çalışmada p-tipi Silisyum kristali üzerine damlatma yöntemi kullanılarak nikel fitalosiyanin (NiPc) kaplanarak Al/NiPc/p-Si diyotu oluşturuldu. Al/NiPc/p-Si yarıiletken diyotun, karanlık ve ışık altında *I-V* karakteristikleri incelendi. *I-V* eğrilerinden bu diyotun doğrultucu karaktere sahip olduğu tespit edildi. NiPc arayüzey tabakasının engel yüksekliğini artırdığı görüldü. Farklı frekanslarda C-V ve G-V ölçümleri alındı. C-V ölçümleri kullanılarak bulunan C^{-2}-V grafiklerinin eğimlerinden diyot parametreleri hesaplandı. Ayrıca Cheung ve Norde fonksiyonları kullanılarak Al/NiPc/p-Si Schottky kontağın seri direnç ve temel diyot parametreleri elde edildi. Bununla beraber C-f ve G-f ölçümleri 0,40V-1,60V aralığında ΔV= 0,05 V adımla alındı. Aydınlık ortamda yapılan ölçümlerden diyotun fotodiyot özellik gösterdiği görüldü. Yapılan çalışmayla elde edilen sonuçlar dikkate alınarak, organik NiPc yapıların fotovoltaik diyot yapımında kullanılabilecekleri söylenebilir.

KAYNAKLAR

Akkurt, B., "Oktasübstitüe ftalosiyaninlere yeni fonksiyonel gruplar kazandırılması", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.1-2, İstanbul, 2009.

Aslan, F., Güllü, Ö., Ocak, YS., Rüzgar, Ş., Tombak, A., Özaydın, C., Pakma, O., Arsel, İ., "Organik arayüzey tabakalı Al/CuPc /p-InP kontakların fabrikasyonu ve elektriksel parametrelerinin incelenmesi", Batman University Journal of Life Sciences, 5(2): 263-275, 2015.

Asubay, S., "Metal/p-InP/metal Schottky kontakların akım-kapasite – gerilim karakteristiklerinin metal iş fonksiyonuna bağımlılığının incelenmesi", Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 2, Diyarbakır, 2008.

Asubay, S., Güllü, Ö. and Türüt, A., "Determination of the laterally homogeneous barrier height of metal/p-InP Schottky barrier diodes", Vacuum, 83: 1470-1474, 2009.

Aydın, ME., "Metal/yarı iletken (MS) ve metal/oksit/yarı iletken (MIS) Pb/p-Si ve Pb/n-Si kontakların karakteristik parametreleri ve arayüzey hallerinin enerji dağılımının belirlenmesi", Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.30, Diyarbakır, 2003.

Aydın, SBK., "Al/TiO_2/p-Si schottky diyotların akım-voltaj (ı-v) ve kapasitans-voltaj (c-v) karakteristikleri", Yüksek Lisans Tezi, Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.42-44, Yozgat, 2003.

Aydoğan, Ş., "Sn/PPy/n-Si/Au-Sb yapının bazı karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı akım-voltaj, kapasite-voltaj ve kapasite-frekans ölçümlerinden tayin edilmesi", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.2, Erzurum, 2004.

Ayhan, S., "n-Si/Metal Kompleksi/Au yapıların aygıtsal özellikleri ve panaf metal kompleksinin optiksel özelliğinin araştırılması", Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.44 - 51, Diyarbakır, 2012.

Batı, B., "İdeal ve ideal olmayan omik ve doğrultucu kontaklı Au/n-Si Schottky diyotlarda doğru beslem kapasite-voltaj-frekans karakteristikleri", Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü s.78, Erzurum, 1998.

Bethe, HA., "Theory of the Boundary Layer of Crystal Rectifiers." MIT. Radiation Lab. Rep. 43: 12. 1942.

Bohlin, KE., "Generalized Norde plot including determination of the ideality factor." J.Appl. Phys. 60: 1223, 1986.

Braun, F., "On the current cunduction through metal sulphides (in German)", Ann. Phys. Chem., 153: 556, 1874.

Brillson, L J., "The structure and properties of metal-semiconductor interfaces", Surf. Sci. Reports. 2: 123, 1982.

Chandra, MM. and Prasad, M., "Schottky barrier characteristics at low temperatures", Phys. Status Solidi A, 77: 715, 1983.

Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., "Frequency dependence of forwerd capaticance voltage characteristics of schottky barrier diodes", Solid-State Electron, 36: 605-610, 1993.

Cheung, SK. and Cheung, N. W., "Extraction of Schottky diode parameters from forward current-voltage characteristics", Appl. Phys. Lett., 49: 85-87, 1986.

Çoban, S., ''Polimer+nlo+ftalosiyanin yapıların lineer optiksel özelliklerinin belirlenmesi'', Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.1 Sakarya, 2007.

Çuha, B., "Au/N-Si (111) Schottky kontakların elektriksel karakteristiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.43-45, Ankara, 2010.

Eftekhari, G., "Electrical characteristics of selenium- treated GaAs MIS Schottky diodes", Semicond. Sci. Tech., 8: 409. 1993.

Elbisawa, F., Kurokawa, T. and Nara, S., "Electrical Properties of Polyacetylene/Polysiloxane Interface", J. Appl. Phys. 54: 3255, 1983.

El-Nahass, MM., Abd-El-Rahman, KF., Farag, AAM. and Darwish, AAA., "Photovoltaic properties of NiPc/p-Si (organic/inorganic) Heterojunctions", Organic Electronics, 6: 129-136, 2005.

El-Nahass, MM., Abd-El-Rahman, K F. and Darwish, AAA., "Fabrication and electrical characterization of p-NiPc/n-Si heterojunction", Microelectronics Journal, 38: 91-95, 2007.

El-Nahass, MM., Zeyada, HM., Aziz, MS. and El-Ghamaz, NA., "Carrier transport mechanisms and photovoltaic properties of Au/p-ZnPc/p-Si solar cell", Solid-State Electronics, 49: 1314-1319, 2005.

Güllü Ö., "Schottky metalinin kalınlığı ve H_2 tavlamasının Au/n-GaAs diyotlarının karakteristik parametreleri üzerine etkileri", Yüksek lisans tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.7, Erzurum, 2004.

Güllü, Ö., Türüt, A., "Photovoltaic and electronic properties of quercetin/p-InP solar cells", Solar Energy Materials & Solar Cells, 92: 1205-1210, 2008.

Güllü, Ö., "Ultrahigh (100%) barrier modification of n-InP Schottky diode by DNA biopolymer nanofilms", Microelectronic Engineering, 87: 648-651, 2010.

Güllü, Ö., Aydoğan, S. and Türüt, A., "Electronic parameters of high barrier Au/Rhodamine-101/n-Inp Schottky diode with organic interlayer", Thin Solid Films, 520: 1944-1948, 2012.

Güllü, Ö., Kılıçoğlu T. and Türüt A., "Electronic Properties Of The Metal/Organic Interlayer/Inorganic Semiconductor Sandwich Device", J. Phys. and Chem. Solid, 71: 351-356, 2010.

Gupta, RK., Yakuphanoğlu, F., Ghosh, K. and Kahol, PK., "Fabrication and characterization of p–n junctions based on ZnO and CuPc", Microelectronic Engineering, 88: 3067-3069, 2011.

Hamidi, Ş., "Organik yarıiletken/inorganik yarıiletken heteroeklem diyodunun elektriksel özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, s.23, Diyarbakır, 2011.

Hussein MT., Nasir EM., Al-Aarajiy AH., "Study on the UV-Visible of Ni-Phthalocyanine thin film Optical Properties", Int. J. Thin Film Sci. Tec. 1 No. 2: 71-76, 2012.

Janardhanam V., Jyothi I., Lee Ji-Hyun, Kim Jae-Yeon, Rajagopal Reddy V. and Choi Chel-Jong,, Electrical Properties and Carrier Transport Mechanism of Au/n-GaN Schottky Contact Modified Using a Copper Pthalocyanine (CuPc) Interlayer, Materials Transactions. 55: 758- 762, 2014.

Joseph, B. and Menon, CS., "Studies on the optical properties and surface morphology of nickel phthalocyanine thin films", E-Journal of Chemistry, Vol. 4, No.2: 255-264, 2007.

Kang, MG., and Park, HH., "Surface preparation and effective contact formation for GaAs surface", Vacuum, 67: 91-100, 2002.

Karataş, Ş. ve Altındal Ş., "İdeal olmayan schottky diyotlarının temel parametrelerinin akım-voltaj (*I-V*) karakteristiklerinden hesaplanması", Fen ve mühendislik dergisi, 2004.

Kwong, CY., Djuriié, AB., Lam, LSM and Chan, WK., Organic Photovoltaics III, Zakya H. Kafafi, Editor, Proceedings of SPIE, 4801, 2003.

Mott, NF., "Note On The Contact Between A Metal and An Insulator On Semiconductor", Proc. Cambridge Philos. Soc., 34: 568, 1938.

Neamen, DA., "Semiconductor physics and devices: Basic Principles", Irwin, Inc, Universty of New Mexico, 1992.

Nguyen, Van, C., Potje-Kamloth, "K., Electrical and NOx gas sensing properties of metallophthalocyanine-doped polypyrrole/silicon heterojunctions", Thin Solid Films, 392: 113-121, 2001.

Norde., H., "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance", Journal of Applied Physics, 50(7): 5052, 1979.

Ocak, YS., "Organik-İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu", Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.59-64, Diyarbakır, 2010.

Onganer, Y., Sağlam, M., Türüt, A., Efeoğlu, H. and Tüzemen, S. High barrier-metallic polymer/p-type Silicon Schottky diodes, Solid-State Electronics 39(5): 677, 1996.

Özdemir, AF., Türüt, A. and Kökçe, A., "The interface state energy distribution from capacitance-frequency characteristics of gold/n-type Gallium arsenide Schottky barrier diodes", Thin Solid Films, 425: 210-215, 2003.

Pauling, L., "The Nature of the Chemical Bond", 3rd edition, New York, Cornell University Pres, 1962.

Reddy V R., "Electrical and interfacial properties of Au/n-InP Schottky contacts with nickel phthalocyanine (NiPc) interlayer", Indian J Phys 89(5): 463–469, 2015.

Rhoderick EH. and Williams RH., "Metal-Semiconductor Contacts", Claredon Pres, Second Edition, Oxford, 1988.

Sağlam, M., "Al/n-Si Schottky diyotlarının ideal olmayan I-V, C-V karakteristikleri ve arayüzey hallerinin enerji dağılımı", Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s.12, Erzurum, 1991.

Shah M., Sayyad MH and Karimov KS., "Fabrication and Study of Nickel Phthalocyanine based Surface Type Capacitive Sensors", World Academy of Science, Engineering and Technology 43: 392-394, 2008.

Sharma, BL., "Physics of Schottky Barrier Junctions", Metal-Semiconductor Contacts Schottky Barrier Junctions and Their applications, Plenum Press, New York and London, 1-56, 1984.

Schottky, W., "The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar receivers", Z. Phys. 113: 367-414, 1938.

Sullivan, JP., Tung, RT., Pinto, MR. and Graham, WR., "Electron transport of inhomogeneous Schottky barrier: A numerical study", J. Appl. Phys. 70(12): 7403-7423, 1991.

Sze, SM., "Metal-Semiconductor Contacts", Physics of Semiconductor Devices 2nd ed.", John Wiley & Sons, New York, 250-270, 1981.

Tataroğlu, A. and Altındal, Ş., "Characterization of current-voltage (*I-V*) and capacitance-voltage-frequency (*C-V-f*) features of Al/SiO2/p-Si (MIS) Schottky diodes", Microelectronic Engineering 83: 582-588, 2006.

Torrey, HC., Whitmer CA., "Crystal Reectifers", Mc Graw Hill, 1948.

Tung, RT., "Recent advences in Schottky barrier concepts", Materials Science and Enginering R 35: 1-138, 2001.

Unni KNN., CS Menon, "Electrical, optical and structural studies on nickel phthalocyanine thin films", Materials Letters 45 _2000. 326–330, 2000.

Werner, JH. and Güttler, HH., "Barrier ınhomogeneities at schottky contacts", J. Appl. Phys., 69: 1522-1533, 1991.

Wang, Y., Darici, Y., and Holloway, P.H., "Surface passivation of GaAs P_2S_5-containing solutions." J.App.Phys., 71(6): 1992.

Wang, YG., and Ashok, SA., "Study of metal/GaAs interface modification by hydrogen plasma.", 1994. J. Appl. Phys., 75(5): 2447-2454, 1994.

Yakuphanoglu, F., "Electrical Characterization and Interface State Density Properties of the ITO/C_{70}/Au Schottky Diode", J. Phys. Chem. C, 111: 1505-1507, 2007.

Yakuphanoğlu, F., Kandaz, M., Yaraşır, MN. and Şenkal, BF., "Electrical transport and optical properties of an organic semiconductor based on phthalocyanine", Physica B., 393: 235-238, 2007.

Yakuphanoğlu, F., Kandaz, M. and Şenkal, BF., "Current-voltage and capacitance-voltage characteristics of Al/p-type silicon/organic semiconductor based on phthalocyanine rectifier contact", Thin Solid Films, 516: 8793–8796, 2008.

Yasuhiko S., “Organic materials for electronic and optoelectronic devices”, J. Mater. Chem., 10: 1, 2000.

Yıldız, M., “Çinko ftalosiyanin tabanlı heteroeklemin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, s.50, Diyarbakır, 2012.

Ziel, AV., Solid State Physical Electronics, (Prentice-Hall New-Jersey), p.245, 1968.

ÖZGEÇMİŞ

1978 yılında Mardin'de doğdu, ilk ve orta öğrenimini Mardin'de liseyi Balıkesir'in Edremit ilçesinde tamamladı. 2001 yılında Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü bitirdi. Halen Mardin Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesinde Fizik Öğretmeni olarak görev yapmaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.