

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYASAL SPREY PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN FePc/Si HETEROEKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİ**

Fizikçi Pelin AYDOĞAN

FBE Fizik Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kubilay KUTLU

İSTANBUL, 2010

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KİMYASAL SPREY PÜSKÜRTME YÖNTEMİYLE
ÜRETİLEN FePc/Si HETEROEKLEMLERİN
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİ**

Fizikçi Pelin AYDOĞAN

FBE Fizik Anabilim Dalında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Kubilay KUTLU

İSTANBUL, 2010

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ÖNSÖZ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	3
2.1 Ftalosiyaninlerin yapısal özellikleri.....	3
2.1.1 Ftalosiyaninlerin Genel Özellikleri	5
2.1.2 Ftalosiyaninlerin Fiziksel Özellikleri	5
2.2 Silisyumun Yapısal Özellikleri	6
2.3 Heteroeklemler	11
2.3.1 p-n Eklemleri	14
2.3.2 Organik Yarıiletkenler ve Özellikleri	17
2.4 Güneş Pilleri	18
2.4.1 p-n Homoeklemlili Güneş Pilleri	19
2.4.2 p-n Heteroeklemlili Güneş Pilleri	20
2.4.3 İnce Film Güneş Pilleri	21
2.4.4 Schottky Eklem Güneş Pilleri.....	22
2.4.5 Organik Boya Esaslı İnce Film Güneş Pilleri.....	23
2.4.6 Organik Güneş Pilleri	23
2.5 İnce Film Hazırlama Yöntemleri	24
2.5.1 Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi	25
2.5.2 Vakum Altında Buharlaştırma Yöntemi	25
2.5.3 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi	26
2.5.4 Kimyasal Sprey Püskürtme Yöntemi.....	26
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	29
3.1 FePc/Si Heteroeklemlili İnce Filmlerin Oluşturulması	29
3.1.1 Altlıkların Hazırlanması	29
3.1.2 Çözeltilerin Hazırlanması	30
3.1.3 Kimyasal Sprey Püskürtme Yöntemi ile Kaplama İşlemi	30
3.2 Eklemlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler	31
3.2.1 XRD Yöntemi ile Filmlerin Analizi	31
3.2.2 FePc/Si Filmlerin Raman Spektroskopisi ile İncelenmesi	33
3.2.3 FePc/Si Filmlerin SEM Analizi	35
3.3 FePc/Si Heteroeklemlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi	36
3.3.1 Akım-Gerilim Ölçümleri	36

3.3.1.1	I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi.....	36
3.3.2	Kapasitans-Gerilim (C-V) Ölçümleri	37
3.3.2.1	C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi	38
3.3.3	FePc/Si Filmlerin Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi.....	38
4.	BULGULAR.....	40
4.1	FePc Filmlerin Yapısal Özellikleri	40
4.1.1	FePc Filmlerin XRD Analiz Sonuçları	40
4.1.2	FePc/Si Filmlerin Raman Analizi Sonuçları	41
4.1.3	FePc Filmlerin SEM Sonuçları.....	43
4.2	FePc/n-Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri	44
4.2.1	FePc/n-Si Eklemlerin Karanlık ve Aydınlıktaki Akım-Gerilim Karakteristikleri. 44	
4.2.2	FePc/n-Si Eklemlerin İletim Mekanizmaları	50
4.2.3	FePc/n-Si Eklemin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri.....	57
4.3	FePc/p-Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri	60
4.3.1	FePc/p-Si Eklemlerin Karanlık ve Aydınlıktaki Akım-Gerilim Karakteristikleri. 60	
4.3.2	FePc/p-Si Eklemlerin İletim Mekanizmaları	64
4.3.3	FePc/p-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri.....	69
4.4	FePc/Si Eklemlerin Optik Özellikleri ve Yasak Bant Aralığının Hesaplanması... 72	
5.	SONUÇ VE TARTIŞMALAR.....	75
	KAYNAKLAR.....	78
	ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGE LİSTESİ

Pc	Phthalocyanine
MPc	Metalli ftalosiyanin
Fe	Demir
Ni	Nikel
H ₂ Pc	Dihidrojen ftalosiyanin
CdTe	Kadmiyum Tellür
CIGS	Bakır indiyum galyum disellenür
a-Si	Amorf Silisyum
As	Arsenik
Sb	Antimon
P	Fosfor
N	Azot
In	İndiyum
Ga	Galyum
Al	Alüminyum
B	Bor
Ag	Gümüş
Ge	Germanyum
E _d	Donör enerji seviyesi
E _a	Akseptör enerji seviyesi
E _H	Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi
$\vec{k}$	Dalga vektörü
m _e [*]	Elektronun etkin kütlesi
J	Akım yoğunluğu
q	Temel yük
h	Planck Sabiti
μ _n	Elektronların mobilitesi
μ _p	Boşlukların mobilitesi
A ^{**}	Richardson sabiti
R _{ec}	Rekombinasyon sabiti
V _{oc}	Açık devre gerilimi
E _i	Özden yarıiletken Fermi seviyesi
S	Alan

A	Eğim
$q\Phi_n$	İletim bandının tabanı ile Fermi seviyesi arasındaki enerji farkı
$q\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
χ	Alınganlık (afinite)
E_C	İletim bandının taban enerjisi
E_V	Valans bandının tavan enerjisi
E_F	Fermi enerji seviyesi
ϵ_s	Silisyumun permitivitesi
ϵ_{FePc}	Demir ftalosiyanınin permitivitesi
Φ_{bi}	Bariyer yüksekliği
C_D	Fakirleşme bölgesinin kapasitansı
η	İdealite faktörü
V_{bi}	Oluşma potansiyeli
N_D	Donör Konsantrasyonu
N_A	Akseptör Konsantrasyonu
X_n	n-tipi katkı bölgesinin uzunluğu
X_p	p-tipi katkı bölgesinin uzunluğu
E_g	Yasak band enerjisi
V	Uygulanan besleme voltajı
V_F	Doğru yönde besleme
V_R	Ters yönde besleme
k	Boltzmann sabiti
T	Sıcaklık
q	Temel yük

KISALTMA LİSTESİ

MS	Metal-Yarıiletken Kontak
I-V	Akım-Gerilim
C-V	Kapasitans-Gerilim
Fcc	Yüzey merkezli kübik kristal yapı
Bcc	Cisim merkezli kübik kristal yapı
DC	Doğru akım
AC	Alternatif akım
PVD	Physical Vapor Deposition
CVD	Chemical Vapor Deposition
XRD	X-Ray Diffraction
SEM	Scanning Electron Microscopy
RCA	Radio Corporation of America
FWHM	Full Width Half Maksimum
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
EHP	Electron-Hole Pair
LED	Light Emitting Diode
OLED	Organic Light Emitting Diode
IR	Infrared
MBE	Molecular Beam Epitaxy

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Ftalosiyanın molekülünün genel yapısı.....	4
Şekil 2.2 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı.....	6
Şekil 2.3 n-tipi Si (donör katkılı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007).....	7
Şekil 2.4 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007).....	7
Şekil 2.5 p-tipi Si (akseptör katkılı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007).....	8
Şekil 2.6 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007).....	8
Şekil 2.7 (a) direkt ve (b) indirekt bantlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992).....	9
Şekil 2.8 a) p ve n tipi iki farklı yarıiletkenin ve b) p-n heteroeklemin enerji band diyagramları (Tyagi M.S. 1991).....	11
Şekil 2.9 İleri yönde beslenen bir p-n eklemin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.10 Ters yönde beslenen bir p-n eklemin şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.11 Organik yarıiletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları.....	17
Şekil 2.12 Schottky güneş pilinin enerji-band diyagramı (Tyagi M.S. 1991).....	22
Şekil 2.13 Kimyasal Sprey Püskürtme tekniğinin şematik diyagramı.....	28
Şekil 3.1 X Işınlının Atomik Düzlemlerden Kırınımı.....	31
Şekil 3.2 XRD Sisteminin Şematik Gösterimi.....	32
Şekil 3.3 Philips PW3710 Model XRD Cihazı.....	33
Şekil 3.4 Rayleigh Saçılması ve Raman Saçılması.....	34
Şekil 3.5 Horiba Jobin Yvon Labram HR800UV Mikro Raman Cihazı.....	35
Şekil 3.6 Jeol 5410 model SEM cihazı ve şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.7 Oda sıcaklığında dc iletkenlik ölçüm sistemi.....	36
Şekil 3.8 Frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi.....	37
Şekil 3.9 Aquila Marka NKD 7000V Model Optik Analiz Cihazı.....	39
Şekil 4.1 Kimyasal sprej püskürtme yöntemiyle n-Si altlık üzerine büyütülen FePc/Si filmlerin XRD deseni.....	40
Şekil 4.2 n-Si(100) altlık üzerine büyütülmüş FePc/Si filmlerin Raman spektrumu.....	41
Şekil 4.3 (a-b-c) FePc/Si filmin yüzey görüntüsü (1000-3500-5000 büyütmede).....	43
Şekil 4.4 (a,b) Farklı çözeltilerde hazırlanan, (c,d) farklı çözeltilerde ve tavlama işlemi uygulanarak hazırlanan FePc/n-Si heteroeklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri.....	46
Şekil 4.5 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim (I_F-V_F) karakteristikleri.....	47

Şekil 4.6 Ag/FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin tam logaritmik akım-gerilim ($\ln I-\ln V$) karakteristikleri	50
Şekil 4.7 Ag/p-FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için $\ln I_F-\ln V_F$ karakteristikleri	51
Şekil 4.8 Ag/FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin düz besleme altında düşük gerilimlerdeki $\ln I-V^{1/2}$ karakteristikleri	52
Şekil 4.9 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim (I_R-V_R) karakteristikleri	54
Şekil 4.10 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_R-V_R karakteristikleri	55
Şekil 4.11 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemin yüksek frekanslardaki C-V karakteristiği	57
Şekil 4.12 Ag/FePc/n-Si eklemin düşük frekanslardaki C-V karakteristiği	58
Şekil 4.13 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemin 1 MHz frekansta $1/C^2-V$ karakteristiği	59
Şekil 4.14 (a,b) Farklı çözeltilerde hazırlanan, (c,d) farklı çözeltilerde ve tavlama işlemi uygulanarak hazırlanan FePc/p-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıktaki yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri	62
Şekil 4.15 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin düz beslemede yarı logaritmik akım-gerilim (I_F-V_F) karakteristikleri	64
Şekil 4.16 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_F-V_F karakteristikleri	65
Şekil 4.17 FePc/p-Si eklemlerin ters beslemede yarı logaritmik akım-gerilim (I_R-V_R) karakteristikleri	67
Şekil 4.18 FePc/p-Si eklemlerin ters beslemede (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_R-V_R karakteristikleri	68
Şekil 4.19 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin yüksek frekanslardaki C-V karakteristiği	69
Şekil 4.20 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin düşük frekanslardaki C-V karakteristiği	70
Şekil 4.21 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin 1 MHz frekansta ($1/C^2-V$) karakteristiği	71
Şekil 4.22 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin Optiksel Geçirgenlik Spektrumu	72
Şekil 4.23 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin Optiksel Soğurma Spektrumu	73
Şekil 4.24 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin $(ah\nu)^{1/2}-E(h\nu)$ Grafiği	74

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkenin çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007)	10
Çizelge 4.1 Raman Aktif Kipleri ve Bağ Çeşitleri	42
Çizelge 4.2 Ag/p-FePc/n-Si/Ag eklemlerin temel diyot parametreleri	49
Çizelge 4.3 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin temel diyot parametreleri	63

ÖNSÖZ

Bitirme tezimin hazırlanmasında her türlü bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, bana her koşulda yol gösterici olan ve hayatımın her alanında bana yeni ufuklar açan, öğrencisi olmaktan onur duyduğum saygıdeğer tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kubilay Kutlu' ya,

Tez çalışmam süresince bana devamlı yol gösteren, bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan, desteğini, vaktini, içten ilgi ve alakasını benden esirgemeyen, bana karşı hep sabırlı olan Sayın Yrd. Doç. Dr. Beyhan Tatar' a,

Deneysel ölçümlerimin yapılması esnasında her türlü yardım ve desteğini benden esirgemeyen, değerli bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım Sayın Doç.Dr. Orhan Özdemir'e,

Çalışmalarım süresince her türlü destek ve yardımlarını benden esirgemeyen, beni daima motive eden sevgili arkadaşlarım Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir ve Evrim Saatci'ye,

Lisans dönemimden bugüne kadar böyle sıcak bir ortamda mutlu olmamı sağlayan tüm Yıldız Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü çalışanlarına,

Hayatımda karşılaştığım tüm zorlukların aşılmasında beni sürekli cesaretlendirip sevgi ve yardımlarıyla daima yanımda olan, maddi ve manevi her konuda benden desteklerini esirgemeyen, attığım her adımda, verdiğim her kararda bana inanan ve güvenen sevgili aileme,

En içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Pelin AYDOĞAN

Mayıs, 2010

KİMYASAL SPREY PÜSKÜRTME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN FePc/Si EKLEMLERİN ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

Pelin AYDOĞAN
Fizik Bölümü, Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

FePc filmler, (100) yönelimli n-tipi silisyum ve (111) yönelimli p-tipi silisyum üzerine ilk defa kimyasal sprej püskürtme yöntemiyle büyütülmüştür. Büyütülen filmlerin yapısal ve yüzeysel özellikleri XRD, RAMAN ve SEM analizleriyle, elektriksel özellikleri ise akım-gerilim ve kapasitans-gerilim ölçümleriyle incelenmiştir.

Corning cam altlık üzerine büyütülen FePc filmlerinin geçirgenlik ve soğurma analizlerinden bu filmlerin optiksel özellikleri incelendi. Bu ölçümlerden hesaplanan soğurma katsayılarının kullanılması ile elde edilen $(\alpha h\nu)^{1/2}$ - $h\nu$ grafiğinden FePc'nin yasak enerji bant değeri 2.6 eV olarak bulundu.

Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin akım-gerilim karakteristikleri oda sıcaklığında yapılan ölçümlerle incelenmiştir. Eklemlerin karanlıkta alınan akım-gerilim karakteristiklerinden yaklaşık 10^3 kat doğrultucu özellik gösterdiği belirlendi. Eklemlerin I-V karakteristikleri incelendiğinde farklı gerilim değerlerinde iki bölgeden oluştukları ve bu bölgelerde düşük alan emisyon akım mekanizmalarından (Pool-Frenkel-Schottky) ile yüksek akım mekanizmalarından SCLC akım mekanizmalarının kısmen etkin olduğu gözlenmiştir. Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerinin idealite sabiti ve bariyer yüksekliği için değerler sırasıyla 1.09-1.97 ve 0.75-0.97 eV aralığında olduğu belirlenmiştir. Ag/FePc/p-Si/Ag eklemler için yapılan benzer ölçümlerde, p-n eklemlerde olduğu gibi bazı örneklerin yaklaşık 10^3 kat doğrultucu özellik gösterdiği belirlendi. Eklemlerin idealite sabiti ve bariyer yüksekliği sırasıyla 1.18-3.3 ve 0.66-0.98 eV arasında bulunmuştur.

Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin admitans analizleri geniş frekans aralığında (1Hz-1MHz) kapasitans-gerilim ölçümleriyle yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde, yüksek frekansların pozitif gerilim bölgesinde frekansa bağımsız sabit bir sığa değeri olduğu belirlenmiştir. C-V analizlerinden FePc'nin katkılama miktarı $N_d = 4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ ve eklemin oluşma potansiyeli $V_{bi} = 0.60 \pm 0.05 \text{ V}$ bulunmuştur. Ag/FePc/p-Si/Ag eklemlerin C-V analizleri yapılmış olup sonuçlar incelendiğinde pozitif gerilimlerde gözle görülür kesin bir frekans bağımlılığı olduğu fark edilmiştir. C-V analizlerinden taşıyıcı konsantrasyonunun değeri $N_d = 2.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ ve eklemin oluşma potansiyeli $V_{bi} = -1 \pm 0.05 \text{ V}$ bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Demir Ftalosiyanın, Kimyasal Sprej Püskürtme, Yapısal ve Elektriksel Özellikler, Akım Mekanizmaları, Optik özellikler

ELECTRICAL AND OPTICAL PROPERTIES OF FePc/Si FILMS SYNTHESIZED BY CHEMICAL SPRAY PYROLYSIS TECHNIQUE

Pelin AYDOĞAN

Department of Physic, M.Sc. Thesis

ABSTRACT

FePc films were synthesized on (100) oriented n-type silicon and (111) oriented p-type silicon by chemical spray pyrolysis technique. The structural and morphological properties of the films were investigated by XRD, RAMAN and SEM analysis and the electrical features of the heterojunctions were investigated with I-V and C-V measurements.

The transmission and absorbtion analysis were performed by the optical measurements. The energy band gap of the FePc was found 2.6 eV respectively.

The electrical analysis of the Ag/FePc/n-Si/Ag heterojunction has performed by I-V measurements at room temperature. These heterojunctions possessed rectifying features, substantiated from I-V measurement under dark condition. Under forward and reverse bias, it was recognized that the junctions have two bias voltage regions, that means current transport mechanisms. This mechanisms were identified as (Pool-Frenkel,Schottky) and SCLC current mechanisms.The ideality factor and the barrier height values were calculated between 1.09-1.97 and 0.75-0.97 eV respectively. With the help of the similar investigations on Ag/FePc/p-Si/Ag junctions, the same current transport mechanisms were found out. The ideality factor and the barrier height of the junction are determined at the range of 1.18-3.3 and 0.66-0.98 eV respectively.

The C-V measurements for the Ag/FePc/n-Si/Ag junction were performed at room temperature. C-V analysis of the Ag/FePc/n-Si/Ag junction indicated that for the positive bias there is no frequency dependence. From C-V measurements, the doping concentration and the built-in potential of the sample are calculated $N_d=4 \times 10^{22} \text{ m}^{-3}$ and $V_{bi}= 0.60 \pm 0.05 \text{ V}$ respectively.

C-V analysis of the Ag/FePc/p-Si/Ag junction has indicated that for the positive bias of the high frequencies there is obvious frequency dependence. The doping concentration and built-in potential are calculated $N_d = 2.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ and $V_{bi}=-1 \pm 0.05 \text{ V}$ respectively.

Keywords: Iron-Phthalocyanine, Chemical Spray Pyrolysis Technique, Structural and Electrical Properties, Current Mechanisms, Optical Properties

1. GİRİŞ

Organik yarıiletken malzemelere geleceğin malzemesi gözüyle bakılmaktadır. Bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen elektroniğin temel malzeme taşı olan silisyuma uyumlu yeni malzeme arayışları, dikkatleri organik yarı iletken malzemeler üzerinde toplamış durumdadır. Özellikle ftalosiyaninler, optik algılayıcılar ve gaz sensörleri gibi bazı alanlarda olmazsa olmaz malzemelerdendir. Dolayısıyla, bu malzemelerin ince filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin sıcaklık, ışık, nem ve hazırlanma şekli gibi parametrelere bağlılığının belirlenmesi hem yeni uygulama alanlarının araştırılması hem de mevcut uygulamalarda üretilen aygıtın geliştirilebilmesi konusunda bir ön bilgi sağlayacaktır (Balraju P., 2009).

Ftalosiyaninler, ısıl ve kimyasal kararlılıkları, ince filmlerinin kolay hazırlanabilmesi, yakın infrared (IR) bölgede yüksek soğurma bandına sahip olmaları ve elektriksel özelliklerinin katkılama ile büyük oranda değiştirilmesi gibi nedenlerden dolayı üzerlerinde en çok çalışılan organik yarıiletken malzemelerdir (Sharma G.D, 2006).

Ftalosiyaninler üzerindeki çalışmaların bir kısmı farklı moleküler yapılara sahip yeni malzemelerin sentezlenmesi üzerine, diğer bir kısmı da bu malzemelerin elektriksel, optik ve manyetik özelliklerinin belirlenerek yeni uygulama alanlarının araştırılması üzerinde odaklanmıştır (Kumar G.A, 2000).

Bugün ftalosiyaninler ışık yayan diyot (LED), moleküler termometre, magnet ve değişik gazların algılanmasında algılayıcı madde olarak en çok aranan malzeme grubu olduğu gibi alan etkili transistörlerden, fotovoltatik aygıtlara, optik veri depolamadan, güneş pillerine, atmosferik kirliliğe neden olan zehirli gazların algılanmasından fotodinamik kanser terapisinde foto algılayıcı madde olarak kullanılmasına kadar geniş uygulama potansiyeline sahiptirler. Ftalosiyaninlerin bu uygulamalarının hemen hepsi, ince film halindeki yarıiletken ftalosiyanin malzemenin elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır (Roy M.S., 2004). Dolayısıyla, uygulamada kullanılacak ftalosiyanin malzemenin ince filminin kolay hazırlanabilir olması tercih nedeni olmaktadır. Ayrıca ftalosiyanin ince filmlerin elektriksel, optik ve gaz algılama özelliklerinin film hazırlama yöntemine çok bağlı olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ftalosiyanin malzemelerin, potansiyel uygulama alanlarının belirlenmesi ve amaca uygun malzeme olup olmadığının söylenebilmesi için, ince film halindeki ftalosiyaninlerin elektriksel ve optik özelliklerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekmektedir. Ftalosiyaninlerin elektriksel özellikleri doğru akım (dc) ve alternatif akım (ac) davranışlarından tayin edilir (El-Nahass M.M, 2007).

Filmlerin doğru akım elektriksel özelliklerinin belirlenmesi, uygun bir elektrot yapısı üzerine hazırlanan filmlerin sıcaklığın fonksiyonu olarak akım- gerilim karakteristiklerinin ölçülmesi esasına dayanır (Debnath A.K., 2008).

Malzemelerin alternatif akım özelliklerinin belirlenmesinde ise yaygın olarak empedans spektroskopisi yöntemi kullanılır. Empedans spektroskopisi, frekansın fonksiyonu olarak iletkenlik, kapasite, empedansın gerçel ve sanal kısımları gibi büyüklüklerin ölçülmesi esasına dayanır. Bu yöntemle, yük iletim mekanizması, kimyasal reaksiyon mekanizması, dipol davranışları ve dielektrik sabiti hakkında bilgi edinmek mümkündür (Ma J., 2007).

Ftalosiyanın ince filmlerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde gerek film hazırlama yöntemlerinin gerekse filmin hazırlanacağı taban malzemesinin ve elektrot yapısının seçimi son derece önemlidir. Ftalosiyanın ince filmlerinin hazırlanmasında yaygın olarak Langmuir Blodgett, vakum süblimasyon, preslenmiş tablet, spin kaplama, püskürtme ve damlatma gibi yöntemler kullanılır. Langmuir Blodgett yöntemi ancak belirli bir çözücüde çözünebilen ftalosiyanınlar için kullanılabilen bir yöntem iken, vakum depozisyon yöntemi uzun substitute gruplara sahip olan ftalosiyanın molekülleri için kullanılamamaktadır. Püskürtme yöntemi, oda sıcaklığında kloroformla çözülebilen maddelerde kullanılabilirken, damlatma yöntemi, özellikle uçucu organik bileşiklerde çözünen ftalosiyanınlar için, kolay ve ucuz bir yöntem olmasından dolayı en çok tercih edilen film hazırlama yöntemidir. Bu yöntemlerle hazırlanan filmlerde, filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin filmin hazırlama yöntemine sıkıca bağlı olduğu bilinmektedir. Bunun yanında filmlerin fiziksel özellikleri, filmi hazırlanacak ftalosiyanınların uygun çözücü içinde çözüldükten sonraki konsantrasyonu, altlık malzemesinin sıcaklığı ve türüne göre de değişiklik gösterebilmektedir (Aziz M.S., 2006).

Bu malzemelerin kullanılmasıyla imal edilecek herhangi bir aygıtın en yüksek verimle çalışabilmesi için, kullanılan malzemenin iyi belirlenmiş koşullarda (sıcaklık, nem, altlık malzemesinin özellikleri v.b.) hazırlanan ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin tüm ayrıntılarıyla incelenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada FePc/Si heteroeklemler ilk defa kimyasal sprey püskürtme tekniği ile üretilmiştir. Büyütülen FePc/n-Si ve FePc/p-Si eklemlerin XRD, RAMAN ve SEM yöntemleri ile yapısal ve morfolojik özellikleri, akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) ölçümleri ile de elektriksel özellikleri incelenmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

2.1 Ftalosiyaninlerin yapısal özellikleri

‘Phthalocyanine’ sözcüğü ‘naphtha (kaya yağı)’ ve ‘cyanine (koyu mavi)’ sözcüklerinin Yunanca karşılıklarından türetilmiştir. Ftalosiyanin (Pc) ismi ilk kez 1933 yılında Imperial Bilim ve Teknoloji Kolejinde çalışan Profesör Reginald P. Linstead tarafından metallsiz ve metalli ftalosiyaninler ve bunların türevlerinden oluşan organik bileşikler sınıfını tanımlamak için kullanılmıştır (Thomas, 1990).

1928 yılında Scottish Dyes Ltd. şirketinin Grangemouth tesislerinde endüstriyel olarak ftalikanhidrit ve amonyaktan ftalimid üretilirken reaksiyon ortamında mavi-yeşil renkli bir safsızlık görülmüştür. İncelemeler sonucu bu safsızlığın reaktörün cam astarındaki bir çatlaktan dış demir gövdeye sızan ftalimidin demirle yaptığı bir ürün olduğu ve çok kararlı, çözünmeyen pigment özelliği taşıdığı anlaşılmıştır. Bu ürün daha sonra demir ftalosiyanin (FePc) olarak belirlenmiştir.

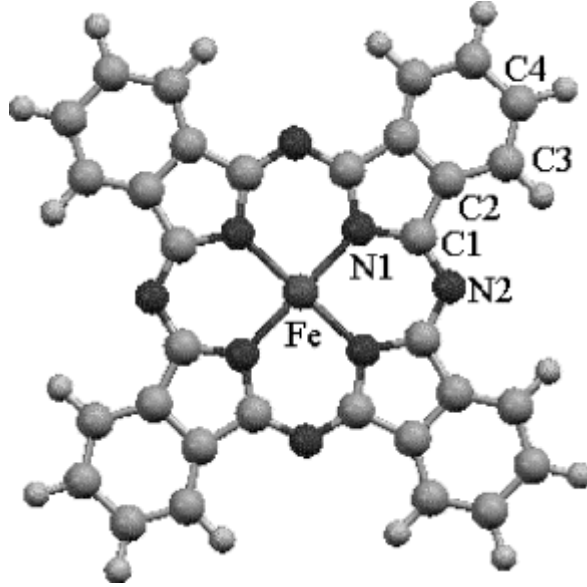
Ftalosiyaninin ilk sentezinden yaklaşık çeyrek yüzyıl sonra metalli ve metallsiz ftalosiyaninlerin yapıları Imperial Chemical Industries tarafından desteklenen Linstead ve arkadaşlarının 1929 yılında başlayan uzun süreli çalışmaları ile Robertson’ın (Robertson, 1935; 1936; Robertson ve Woodward, 1937) X-ışını Kırınım Analizleri sonucunda 1933-1940 yılları arasında yayınlanmıştır (British Patent 322,169).

Ftalosiyanin birçok metal iyonu alabilecek büyüklükte, kompleks oluşumuna doğrudan katılan pirol halkarındaki dört azot atomu ile iki imino hidrojen atomu içeren dört iminoizindolin ünitesinden oluşmuş simetrik bir makrohalkadır. Bu yapı daha sonra X-ışını Kırınım Analizi tekniği ile de doğrulanmıştır.

Molekülün bir bütün olarak geometrisini ve elektron yapısını belirleyen bu merkezin yapısı metal komplekslerinin oluşumundaki kinetik parametrelerin belirlenmesinde büyük öneme sahiptir. Elektronik yapı N-H bağlarının kararlılığını ve solvent molekülü bağlama yatkınlığını belirler.

Ftalosiyanin molekülünün merkezindeki iki hidrojen atomunun periyodik tablonun hemen hemen bütün metal iyonlarıyla yer değiştirmesi sonucu birçok metalli ftalosiyanin sentezlenmiştir. 1935 yılında çok miktarda üretilerek piyasaya verilmiştir. İlk defa elde edilen ve patenti alınan ftalosiyanin boyası polisülfonatıdır. Daha sonraki yıllarda katalitik yükseltgenme, indirgenme, sıvı kristal, manyetik, gaz sensör gibi özellikleri araştırılmıştır.

Ftalosiyeninlerin kullanım alanları göstermiş olduğu bu özellikler sayesinde giderek artmaktadır. Metalsiz ftalosiyeninler ‘serbest baz ftalosiyenin’, ‘dihidrojen ftalosiyenin’ (H_2Pc) ya da yalnız ‘ftalosiyenin’ (Pc) olarak adlandırılırlar. Metalli ftalosiyeninlerde (MPc) bulunan katyon ftalosiyeninden önce kullanılarak kısaltma yapılır (NiPc gibi). Metalli ftalosiyeninler, non-lineer optik, Langmuir-Blodgett (LB) filmlerinde ve elektrokimyasal cihazların yapımında kullanılırlar. Metalli ftalosiyeninlerle ilgili bu kadar geniş araştırma ve çalışma yapılmasının nedeni çok iyi elektriksel özellikler göstermeleri ve çok kaliteli ince film oluşturma yetkinlikleridir. Ayrıca moleküler ve kristal yapıları kolaylıkla değiştirilerek özellikleri incelenebilir.



Şekil 2.1 Ftalosiyenin molekülünün genel yapısı

2.1.1 Ftalosiyeninlerin Genel Özellikleri

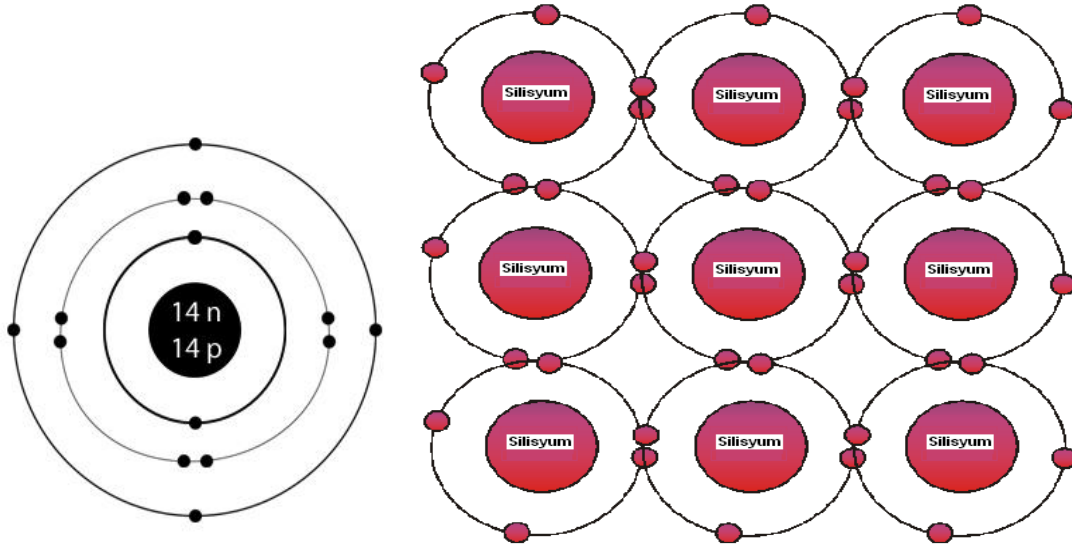
Ftalosiyeninler kimyasal ve termik kararlılığa sahiptirler. Havada 400–500 °C’ ye kadar önemli bir bozunmaya uğramazlar. Vakumda metal komplekslerinin büyük bir kısmı 900 °C’ den önce bozunmaz. Kuvvetli asitlere ve bazlara karşı dayanıklıdırlar. Bozunmadan süblimleşir ve kolay kristallenirler. Böylece, çok saf ürünler elde edilebilir. 70’den fazla değişik metal ile metalo ftalosiyeninler sentezlenmiştir. Metal iyonun metalo ftalosiyeninlerin fizikokimyasal özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır. Makrosiklik yapının oksido redüksiyon veya fotokimyasal uyarılmış haldeki özellikleri, metalin özelliklerine oldukça bağlıdır.

2.1.2 Ftalosiyeninlerin Fiziksel Özellikleri

Oldukça kararlı yapılarıyla ftalosiyeninler moleküler fiziğin önemli deneylerinde kullanılmışlardır. Linstead metalsiz ve birçok metalli ftalosiyeninlerin vakumda süblimleştirmeyeyle büyük tek kristaller oluşturarak saflaştırılabileceğini göstermiştir. Ftalosiyeninlerin birçoğunun rengi kimyasal kristal yapısına göre çeşitlilik gösterir. Örneğin, bakır ftalosiyenin rengi yüzeydeki sübstitute klor atomlarının sayısının artmasıyla maviden yeşile kayar. Ftalosiyenin bileşiklerinin çoğunun erime noktası yoktur. Havada 400-500 °C’ ye kadar önemli bir bozunmaya uğramazlar. Vakumda metal komplekslerinin büyük bir kısmı 900°C’ den önce dekompoze olmaz.

2.2 Silisyumun Yapısal Özellikleri

Katılmal fiziğinde önemli bir yere sahip olan silisyum, periyodik tablonun 4. grubunda yer alır ve elektron dağılımı şu şekildedir: $_{14}\text{Si} : 1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Silisyum atomunun valans kabuğuna dört elektron ($3s^2 3p^2$) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her Si atomunun 4 valans elektronları ($3s^2 3p^2$) durumundan (sp^3) durumuna geçer. Silisyum elmas yapı şeklinde kristalleşir ve bu yapıda her bir Si atomu 4 komşu Si atomu ile kovalent bağ yapar (Şekil 2.1). Şekil 2.2’de de görüldüğü gibi elmas yapıda (000) ve $\left(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4}\right)$ konumlarında iki atom bulunmaktadır. Elmas yapının ilkel hücresinde tek atom değil iki atom bulunur ve birim hücresinde de 8 atom mevcuttur.



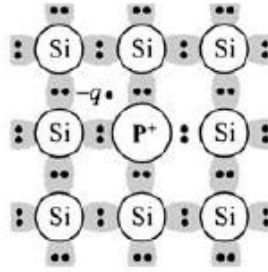
Şekil 2.2 Silisyumun elektron yerleşimi ve bağ yapısı

Si atomuna, periyodik cetvelin 5. grup elementlerinden biri (As, Sb, P, N gibi) katkılандığında n-tipi Si elde edilir. 5. grup elementlerin son yörüngelerinde beş valans elektronu bulunur. Bu elektronların dördü Si atomunun dört valans elektronu ile kovalent bağ oluşturur, geriye kalan tek elektron ise katkı atomuna zayıf bağlıdır ve çok çabuk serbest kalır (Şekil 2.4). Bu durumda katkı atomu Si kristaline örgü içinde serbestçe hareket edebilen bir elektron vermiş olur. Katkı atomu elektron verdiği için donör; bu şekilde katkılanan yarıiletken de n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.5’de de gösterildiği gibi donör atomları yarıiletken enerji band diyagramında iletim bandının hemen altına yerleşir. Donör enerji seviyesi E_d ;

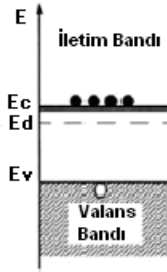
$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H \quad (2.1)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada, ϵ_r yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti, m_e elektronun kütlesi, m_e^* elektronun etkin kütlesi, E_H hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisini ifade eder (13.6 eV).

n-tipi yarıiletkende donörün iyonlaşması ile valans bandında delik oluşmadığı için donör konsantrasyonuna bağlı olarak n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu delik konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte elektronlar baskın olacaktır. Yani, n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlardır ve azınlık yük taşıyıcıları ise deliklerdir.



Şekil 2.3 n-tipi Si (donör katkılı) yarıiletkenin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)



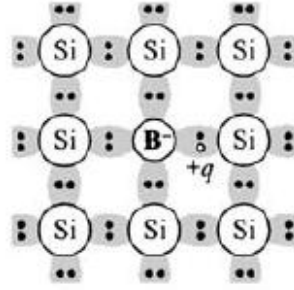
Şekil 2.4 n-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)

Si atomuna, periyodik cetvelin 3. grup elementlerinden biri (In, Ga, Al, B gibi) katkıldığında p-tipi Si elde edilir. 3. grup elementlerinin son yörüngelerinde üç valans elektronu bulunur. Bu üç valans elektronu Si atomunun dört valans elektronunun üçü ile kovalent bağ yapar ve Si atomunun bir elektronu bağ yapamaz. Bu elektronun karşısında delik olur. Bu delik diğer Si = Si bağlarından bir elektronun bu boşluğa yerleşmesiyle doldurulabilir. Bu defada elektronun kopmuş olduğu yerde bir delik meydana gelir, bu boşluk da başka komşu atomlardan kopan elektronlarla doldurulur. Bunun neticesinde valans bandında delik oluşmuş olur ve bu delik

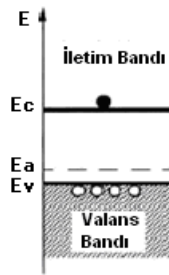
örgü içerisinde bağımsız olarak hareket eder (Şekil 2.6). Yani katkı atomu Si kristalinden bir elektron almış olur. Katkı atomu elektron aldığı için akseptör olarak, akseptör atomları ile katkılanmış yarıiletken de p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Şekil 2.6'da gösterildiği akseptör atomları yarıiletken enerji band diyagramında valans bandının hemen üzerine yerleşir. Akseptör enerji seviyesi E_a ;

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_h^*}{m_h} \right) E_H \quad (2.2)$$

bağıntısı ile ifade edilir. Burada m_h deliklerin kütlesi, m_h^* ise deliklerin etkin kütlesini ifade eder.



Şekil 2.5 p-tipi Si (akseptör katkı) yarıiletkeninin bağ yapısı (Sze M. S., 2007)



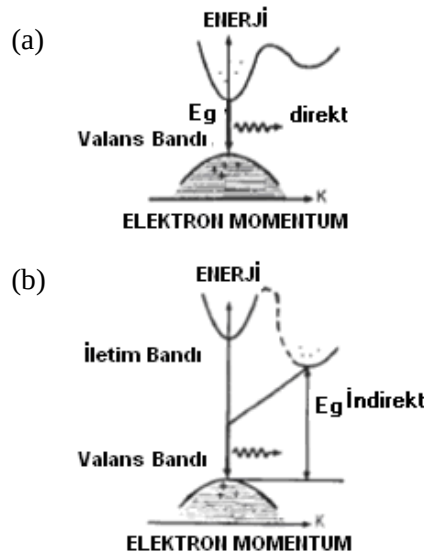
Şekil 2.6 p-tipi yarıiletkenin termal dengedeki enerji band diyagramı (Sze M. S., 2007)

p-tipi yarıiletkende akseptör atomunun valans bandından bir elektron koparmasından dolayı iletim bandında bir elektron oluşmadığı için, akseptör konsantrasyonuna bağlı olarak p-tipi yarıiletkendeki delik konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan büyük olacaktır. Bu nedenle elektriksel iletkenlikte delikler baskın rol oynayacaklardır. Yani p-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları delikler olup, azınlık yük taşıyıcıları da elektronlardır.

Yarıiletken üzerine düşen bir fotonun yarıiletken tarafından soğurularak, valans bandındaki bir elektronun yasak bandı aşarak iletim bandına geçmesi iki şekilde olabilir:

1. Direkt geçişler
2. İndirekt geçişler

Eğer yarıiletkenin bant yapısı Şekil 2.7 (a)'da gösterildiği gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı aynı doğrultuda ($\vec{k} = 0$) ise böyle yarıiletkenlere direkt bant geçişli yarıiletkenler denir. Bu; enerji-momentum uzayında dalga vektörü değişiminin sıfır olması anlamına gelir ($\Delta\vec{k} = 0$). Yani, direkt bantlı yarıiletkenlerde elektron valans bandından iletim bandına dalga vektöründe veya momentumunda herhangi bir değişiklik olmadan geçer.



Şekil 2.7 (a) direkt ve (b) indirekt bantlı yarıiletkenlerin iletim ve valans bandı arasındaki elektron geçişinin modeli (Ohring M., 1992)

İndirekt geçişli yarıiletkenlerde Şekil 2.7b'de görüldüğü gibi iletim bandının tabanı ile valans bandının tavanı k-momentum uzayında farklı değerlerdedir. Bu da, enerji-momentum uzayında dalga vektöründeki değişimin sıfırdan farklı olması anlamına gelir ($\Delta\vec{k} \neq 0$).

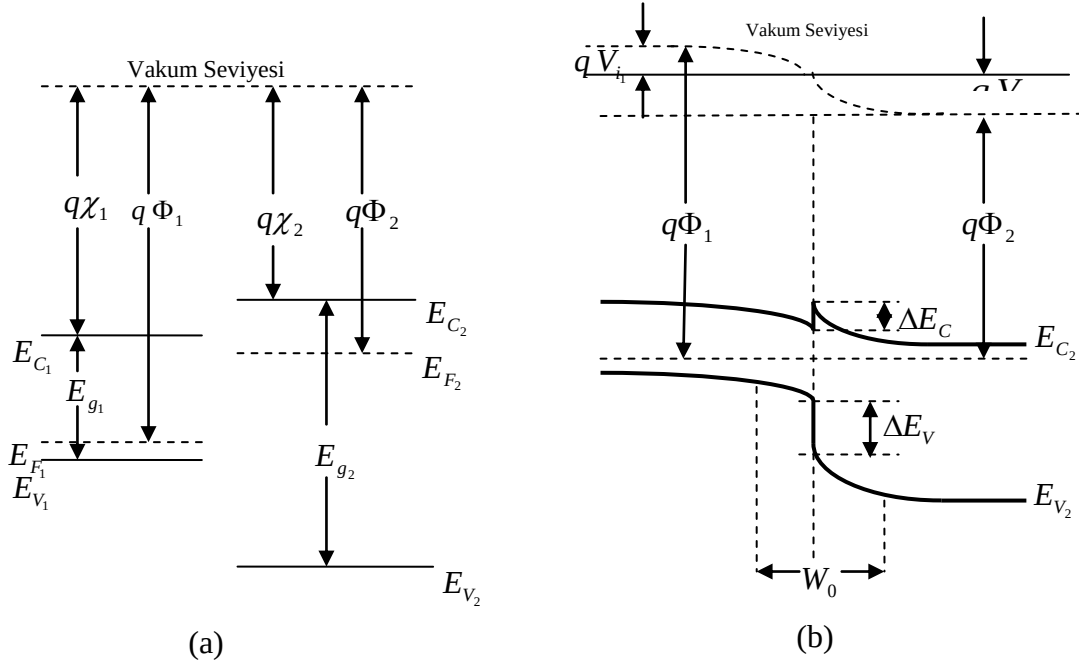
Bu geçişte enerji korunur fakat soğurulan fotonun momentumunun, valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için yeterli olmadığından dolayı ortamdaki bir fononun (kristaldeki örgü atomlarının titreşim kuantı) soğurulması veya ortama yayılması gerekmektedir. Çizelge 2.1’de de ifade edildiği gibi Si kristali indirekt geçişli bir yarıiletken ve yasak enerji aralığı 1.12 eV’dir.

Çizelge 2.1 Silisyum yarıiletkenin çeşitli parametreleri (Sze M. S., 2007)

Özellikler	Si
Atom yoğunluğu (cm^{-3})	5.02×10^{22}
Atomik ağırlık	28.09
Kristal yapısı	Elmas
Yoğunluk (g / cm^3)	2.329
Örgü sabiti ($^{\circ}A$)	5.43102
Dielektrik sabiti	11.9
Elektron alınganlığı $\chi(V)$	4.05
Yasak bant aralığı (eV)	1.12 (indirekt)
İletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_C (cm^{-3})$	2.8×10^{19}
Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu $N_V (cm^{-3})$	2.65×10^{19}
Asal taşıyıcı konsantrasyonu $n_i (cm^{-3})$	9.65×10^9
Elektron etkin kütlesi (m^* / m_e)	$m_l^* = 0.98$ $m_t^* = 0.19$
Boşlukların etkin kütlesi (m^* / m_h)	$m_{lh}^* = 0.16$ $m_{hh}^* = 0.49$
Elektronların sürüklenme mobilitesi $\mu_n (cm^2 / V - s)$	1,450
Boşlukların sürüklenme mobilitesi $\mu_p (cm^2 / V - s)$	500
Doyum hızı (cm / s)	1×10^7
Bozulma alanı (V / cm)	$2.5 - 8 \times 10^5$
Azınlık taşıyıcı ömrü (s)	$\approx 10^{-3}$
Kırılma indisi	3.42
Optik-fonon enerjisi (eV)	0.063
Erime noktası ($^{\circ}C$)	1414
Isısal iletkenlik $W / cm - K$)	1.56
Isısal yayılma (cm^2 / s)	0.9
Isı kapasitesi ($J / mol - ^{\circ}C$)	20.07

2.3 Heteroeklemler

Kimyasal aynı yarıiletkenin içindeki p-tipi ve n-tipi bölgelerin kontağı, p-n heteroeklem ya da p-n eklem olarak adlandırılır. İki kimyasal farklı yarıiletkenin bir kristaldeki kontağı, heteroeklem olarak tanımlanır. Heteroeklemler p-n, n-p, p-p ve n-n tipi olabilir.



Şekil 2.8 a) p ve n tipi iki farklı yarıiletkenin ve b) p-n heteroeklemin enerji band diyagramları (Tyagi M.S. 1991)

Şekil 2.8a'da açıklanan dar band bölgesine (E_{g1}) sahip p-tipi yarıiletken ile geniş band bölgesine (E_{g2}) sahip n-tipi yarıiletken sırası ile Φ_1 ve Φ_2 termodinamik iş fonksiyonlarına ve χ_1 ve χ_2 elektron afinitesi sahiptirler. İş fonksiyonu elektronu fermi seviyesinden vakum seviyesine, elektron afinitesi ise elektronu iletkenlik bandından vakum seviyesine çıkartmak için gerekli olan enerjilerdir. Bu iki farklı yarıiletken birbiri ile kontağı sağlandığında, heteroeklem termik dengeye gelene kadar eklemde karşılıklı olarak elektron- boşluk akışı olacaktır. P-n homoeklemdeki gibi n-tipindeki iyonlaşmış donörler ve p-tipindeki iyonlaşmış akseptörler ile heteroeklemde bir arınma bölgesi oluşturacaktır. Sistem dengeye ulaştığı zaman eklemin her iki tarafındaki fermi düzeyi çakışıktır ve vakum seviyesi her yerde bant kenarlarına paralel ve sürekliidir. Eklemdaki yarıiletkenlerin yasak enerji aralıkları farklı olması nedeniyle iletim bandı sınırında bir süreksizlik oluşur ve bu iki iletim bandı arasındaki fark ΔE_c olarak tanımlanır ve denklem (2.3) yardımı ile hesaplanır.

$$\Delta E_c = q(\chi_1 - \chi_2) \quad (2.3)$$

Benzer olarak Denklem (2.4) yardımı ile valans bandındaki kesinti hesaplanabilir.

$$\Delta E_V = (E_{g2} - E_{g1}) - q(\chi_1 - \chi_2) = \Delta E_g - \Delta E_c \quad (2.4)$$

İdeal şartlarda p-n heteroeklemlerde doğru yön akımını büyük oranda azınlık yük taşıyıcıların bariyerden enjeksiyonu oluşturur. Şekil 2.8b'de görüldüğü gibi geniş band bölgesine sahip yarıiletkendeki (n-tipi) elektronlar ve dar band bölgesine sahip (p-tipi) boşluklardan daha düşük bir bariyer ile karşılaşılır. Eğer iki yarıiletkenin band bölgeleri yeteri kadar farklı olmasaydı dar band bölgesine sahip yarı iletken den kaynaklanan enjeksiyon ihmal edilebilir. Bu durumda akım n-tipi yarıiletkenden p-tipi yarıiletkene doğru olur. Bu durum bize heteroeklemlerin enjeksiyon laserler ve çift kutuplu transistorlar gibi cihazların kullanımında büyük bir avantaj sağlar. Dolayısıyla şekildeki p-n heteroeklem için akım voltaj karakteristiği denklem (2.5)'de verildiği haliyle uygun olabilir.

$$I = \frac{qAD_n n_{po}}{L_n} \left[\exp\left(\frac{K_2 V_a}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

Denklemde n_{po} termal dengede p-tipi yarıiletken içerisindeki elektron konsantrasyonudur ve $K_2 V_a = V_{a2}$ dir. Denklem bu şekliyle p-n heteroeklemlerin diğer akım bileşenlerinin ihmal edilmesinden dolayı deneysel sonuçlarla yeterince uyuşmaz. Örneğin bazı durumlarda arınma bölgesindeki jenerasyon ve rekombinasyon akımları önemli olabilir. Çoğu zaman eklem geniş bölgesindeki ara yüzey durumlarından ve band bölgesinin devamsızlığından dolayı elektronların kuantum mekaniksel tünellemesinden oluşan akım da baskın olabilir.

n-n veya p-p heteroeklemler için baskın akım taşıma mekanizması bariyeri geçen termoiyonik emisyon taşıyıcılarıdır ve akım gerilim karakteristiği denklem (2.6)'daki gibidir.

$$I = I_s \left(1 - \frac{V_a}{V_i} \right) \left[\exp\left(\frac{V_a}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

$$I_s = \frac{qAR^*TV_i}{k} \exp\left(\frac{-V_i}{V_T}\right) \quad (2.7)$$

Burada R^* etkin Richardson sabitidir.

Heteroeklemlerde kullanılan farklı iki yarıiletkenin örgü sabitlerinin ve termal genişleme katsayılarının kusursuz olarak eşleşmesi pek mümkün değildir. Dolayısıyla aynı kristal yapıya sahip olsalar bile örgü sabitlerindeki farktan dolayı örgü içerisinde kusurlar oluşur. Oluşan bu kusurlar ara yüzey dislokasyonları şeklindedir ve kusur yoğunlukları örgüler arasındaki uygunluk derecesine bağlıdır. Kristal yapıdaki kusurlar yasak enerji bandındaki izinli enerji seviyelerinin artmasına neden olur. Kusurlardan dolayı oluşan bu seviyeler eklem bölgesindedir ve rekombinasyon merkezi

gibi davranırlar. Bu bölgenin dar olması nedeni ile akım, elektronların tünelleme olayı neticesinde eklemenin bir tarafından diğerk tarafına doğru akar. Bu durum güneş pillerinin veriminin azalmasına neden olur. Örgü yapıları mümkün olduğu kadar benzer yarıiletkenler kullanılarak heteroeklemlerin özellikleri idealleştirmek mümkündür.

Heteroeklemler çeşitli yöntemler kullanılarak elde edilebilir. Bunlardan bazıları ara yüzey alaşım tekniğı (interface-alloy), epitaksiyel büyütme tekniğı, vakumda çökeltme tekniğı ve benzeri yöntemlerdir. Bu yöntemlerden epitaksiyel büyütme yöntemi son yıllarda çok sık kullanılmaktadır. Bu yöntemle büyütölmüş filmlere *epitaksiyel filmler* ve heteroeklemlere ise *epitaksiyel heteroeklemler* denir. Bu yöntemle tek kristal heteroeklemlerin büyütölmesi şu şartlara bağılıdır.

- a) Büyütölen kristalin ve altlığın kristal örgüleri aynı yapıda olmalıdır (kübik- kübik vb.).
- b) Büyütölen filmin ve altlığın örgü parametrelerinin değerkleri (a_1, a_2) çok yakın olmalıdır. Örgü parametrelerinin farkları uygunsuzluk parametresi (ε) ile karakterize edilmektedir.

$$\varepsilon = \frac{a_1 - a_2}{\bar{a}} 100 = 2 \frac{(a_1 - a_2)}{(a_1 + a_2)} 100 \quad (2.8)$$

Epitaksiyel yöntemle tek kristal filmi tek kristal altlığın üstünde büyötmek için $\varepsilon \leq 3\%$ olmalıdır, aksi taktirde film- altlık sınırında deformasyon ve dislokasyonlar oluşur ve bu nedenle polikristal yapıya sahip filmler büyötmektedir.

- c) Filmin ve altlığın genleşme katsayılarının değerkleri çok yakın olmalıdır ($\alpha_1 \approx \alpha_2$).

Heteroeklemlerin, fotodetektör, güneş pili, yarıiletken lazer, ışık yayan diyot ve çift kutuplu transistor gibi birçok cihazın yapımında çok büyük öneme sahiptir ve heteroeklemler ile ilgili birçok uygulamaya rastlamak mümkündür (Tatar B., 2007).

2.3.1 p-n Eklemleri

p-n eklemleri, tüm yarı iletken düzeneklerin (diyot, transistör, FET, güneş pili vs.) temel yapısıdır. Güneş pillerinde oluşturulan p-n eklemlerinde, p-tipi ve n-tipi malzemelerin birleştiği yüzeyler büyük tutulmuştur. Bu arakesitlere düşen fotonların enerjilerinin bir kısmı, yarıiletkenlerdeki serbest elektronları hareket ettirir. Bu sayede elektrik akımı üretilmiş olur. Saf yarıiletkenlerin; akseptör (alıcı) atomlarıyla katkılanması sonucu p-tipi yarıiletkenler, donör (verici) atomlarıyla katkılanması sonucu n-tipi yarıiletkenler elde edilir. p-n eklemi teorik olarak p-tipi bir yarıiletkenle n-tipi bir yarıiletkenin birleştirilmesinden oluşur. Fakat p-tipi ve n-tipi yarıiletken maddelerin ayrı ayrı üretilip, sonra bunların birbirine yapıştırılmasıyla elde edilemez. p-n eklemi, kristalin büyütülmesi sırasında p-tipi ve n-tipi bölgeleri arasında oluşturulur. Basit bir p-n eklemi, uygun şartlar altında n-tipi bir yarıiletken içerisinde oluşturulacak p-tipi bir bölgeyle veya p-tipi bir yarıiletken içerisinde oluşturulacak n-tipi bir bölgeyle elde edilir.

p-n eklemi, bir yarıiletkenin iletkenliğinin bir tipten başka bir tipe değiştiği bölgedir. p-tipi bölge, n-tipi bölge ve bunların arasında yer alan p-n eklem bölgesi olmak üzere üç ayrı yarıiletken bölgesinden oluşur. p-n eklem bölgesinde hareketli yükler bulunmaz. Hareketli yük taşıyıcılarını azaltan bu bölgeye tüketim veya fakirleşme (depletion region) bölgesi de denir.

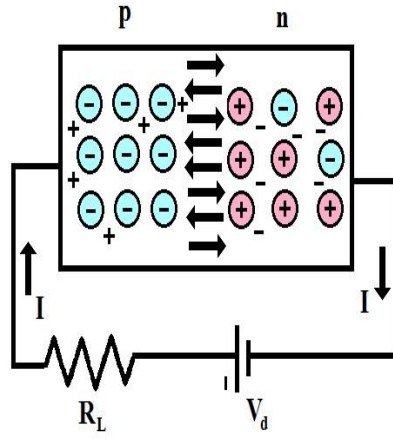
p-n eklemleri incelenirken, p-tipi bir yarıiletkenle n-tipi bir yarıiletkenin fiziksel olarak birbirine eklendiği düşünülür. p-n eklemi oluşturulduğunda; temas bölgesinin yakınındaki serbest yükler, yoğunluklarının küçük olduğu bölgeye doğru hareket ederler. n-tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları olan serbest elektronlar p-tipi bölgesine, p-tipi bölgesinin çoğunluk yük taşıyıcıları olan serbest holler n-tipi bölgesine geçerler. Bu geçişin sonucu olarak, eklemin her iki tarafındaki atomlar iyonlaşırlar. Eklemin p-tipi bölgesi negatif, n-tipi bölgesi pozitif yüklenir. Çoğunluk yük taşıyıcılarının yoğunluklarının az olduğu bölgeye doğru olan geçişleri, p-tipi ve n-tipi bölgeleri arasında termodinamik bir denge kuruluncaya kadar devam eder. Her iki bölgenin Fermi enerji seviyeleri aynı olduğunda yük geçişi durur ve eklem çevresinde bir elektrik alan oluşur. Bu elektrik alanın yönü, n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye doğru olurken, büyüklüğü kullanılan yarıiletkenlere ve bunların katkılanmalarına bağlı olarak değişir (Oktik, 2001).

p-n ekleminin oluşumu sırasında iyonlaşan donör ve akseptör atomları arasında kontak (temas veya difüzyon) potansiyeli denilen bir potansiyel farkı meydana gelir. Kontak potansiyelini meydana getiren yükler sabit olduğu için kontak potansiyeli ortadan kaldırılamaz. Bu potansiyel farkı, p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye geçecek holler ve n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye geçecek elektronlar için bir

potansiyel duvarı oluşturur. Bununla birlikte kontak potansiyel farkı, p-n eklemının her iki tarafındaki azınlık yük taşıyıcılarının karşı bölgeye geçmesini sağlar. Bu şekilde n-tipi bölgedeki holler p-tipi bölgeye, p-tipi bölgedeki elektronlar n-tipi bölgeye geçerek sürüklenme akımlarını oluştururlar. p-n ekleminde çoğunluk yük taşıyıcılarının oluşturduğu difüzyon akımları, azınlık yük taşıyıcılarının oluşturduğu sürüklenme akımları ile dengelenir. p-n eklemindeki temas potansiyel farkı, bir voltaj kaynağı değildir. Bu yüzden p-n ekleminde bir akım geçmesini sağlayamaz. Eğer temas potansiyel farkı bir voltaj kaynağı olsaydı; p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye doğru bir akım geçerdi. Bunun için çoğunluk yük taşıyıcılarının bölgeler arasındaki potansiyel duvarını asmaları gerekirdi. Fakat bu durumda p-n eklemının hiçbir zaman denge durumuna gelmemesi gerekirdi. Ayrıca herhangi bir akımın varlığında, p-n eklemi kısa devre yapıldığında; omik kontakın iç direncinden dolayı ısınması beklenir. Ne var ki yapılan deneylerde, omik kontakın ısınması sonucu devreden herhangi bir akımın geçmediği anlaşılmıştır. p-n eklemının kısa devre yapılması, yük taşıyıcılarına enerji sağlamaz; eklem dengede kalır ve p-n ekleminde herhangi bir akım geçmez.

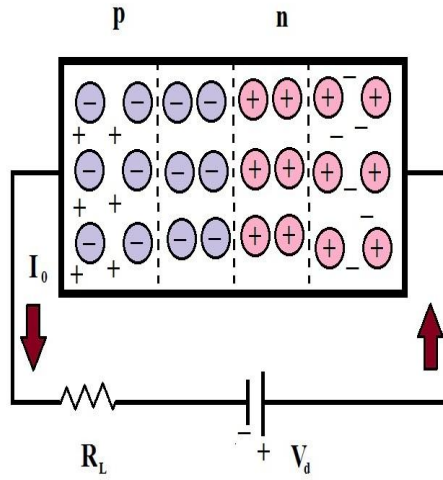
p-n eklemının en belirgin özelliği, akımı yalnızca bir doğrultuda iletmesidir. Fakat çoğunluk yük taşıyıcılarının difüzyonu sonucu p-n eklem bölgesinde meydana gelen iç elektrik alan, hareketli yükler için bir potansiyel engeli oluşturur. Bu yüzden bir dış devre gerilimi uygulanarak, bu potansiyel engeli ortadan kaldırılır ve eklemden akım geçmesi sağlanır. p-n eklemine bir dış devre gerilimi uygulanması işlemine, p-n eklemının beslenmesi ya da kutuplandırılması (polarizasyonu) denir. Bu işlem doğru yönde ve ters yönde olmak üzere iki şekilde yapılabilir.

p-n eklemının ileri yönde beslenmesi, bir dış voltaj kaynağının pozitif kutbu eklem p-bölgesine; negatif kutbu da n-bölgesine bağlanarak yapılır. Bu durumda dış voltaj kaynağının p-tipi bölgeye hol, n-tipi bölgeye elektron sağladığı düşünülür. Kaynak tarafından sağlanan bu yükler ile p-n eklem bölgesinde oluşan potansiyel engeli alçalır. Bunun sonucu olarak da, çoğunluk yük taşıyıcılarının difüzyonu kolaylaşır. Difüzyon akımıyla sürüklenme akım arasındaki denge bozulur. p-n ekleminde Şekil 2.9’da gösterilen yönde bir akım geçer (Küpeli A.Ö, 2005).



Şekil 2.9 İleri yönde beslenen bir p-n eklemin şematik gösterimi

p-n ekleminin ters yönde beslenmesi Şekil 2.10'da gösterilen şekilde, bir dış voltaj kaynağının pozitif kutbu eklemin n-bölgesine; negatif kutbu da p-bölgesine bağlanarak yapılır.



Şekil 2.10 Ters yönde beslenen bir p-n eklemin şematik gösterimi

2.3.2 Organik Yarıiletkenler ve Özellikleri

Organik yarıiletken malzemelere geleceğin malzemesi gözüyle bakılmaktadır. Bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen elektroniğin temel malzeme taşı olan silisyuma uyumlu yeni malzeme arayışları, dikkatleri organik yarı iletken malzemeler üzerinde toplamış durumdadır. Bu yapılar karbon ve hidrojen atomlarından meydana geldikleri için “organik yarıiletken” olarak adlandırılırlar. Organik yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklıkla üstel bir artış göstermektedir. Organik yarıiletken malzemelerin optik ve elektronik özellikleri konjuge sisteme bağlanacak fonksiyonel gruplar ile istenilen doğrultuda değiştirilebilmektedir. Bu özellikler güneş pili veya OLED gibi sistemin çalışması için çok önemlidir. Ancak organik yarıiletkenlerin işlenebilme gibi mekanik özellikleri de çok önemlidir. Şekil 2.11, organik yarıiletkenlerin işlenebilme ve mekanik özelliklerine göre sınıflandırılmasını göstermektedir. Ayrıca organik yarıiletkenler, birkaç tane tekrarlanan birim içeren (oligomer) veya hiç içermeyen moleküller (monomer) ve tekrarlanan birim sayısı 10’dan fazla olan moleküller (polimer) olarak birbirlerinden ayrılırlar. Oligomerler ve monomerler ışığı soğuruyorlar ise kromofor olarak adlandırılırlar. Bunlara çözünür ise “boya”, çözünmezler ise “pigment” denir.



Şekil 2.11 Organik yarıiletkenlerin mekanik ve işlenebilme özelliklerine göre sınıflandırılmaları

2.4 Güneş Pilleri

Işığın elektrik enerjisine dönüştürülmesine fotovoltaik olay denir. En önemli fotovoltaik aygıtlar güneş pilleridir. Güneş pillerinin geçmişi Becquerel (1839) keşfine kadar uzanmaktadır. Becquerel, deney sırasında elektrolit içindeki elektrodun üzerine düşen ışığın akım oluşturduğunu gözlemlemiş ve bunu rapor etmiştir. Benzer olayı Adams ve Day (1877) katı selenyumda da gözlemişlerdir.

İlk modern güneş pili Si tek kristalinden p/n eklemi oluşturularak yapılmıştır ve %6'lık verim elde edilmiştir(Chapin,1954). Güneş pili yapımında o yıllarda CuS/CdS ve GaAs'tan da yararlanılmıştır. GaAs'tan yapılan güneş pillerinde 1956 yılında %4'lük bir verim elde edilirken yeni teknolojilerin gelişmeleriyle %24'lük verime Si tek kristalinden yapılan güneş pillerinde ise %19'luk verime ulaşılmıştır.

Güneş pillerinin maliyeti 1956 yılında watt başına 350 dolar iken yapılan teknolojik gelişmelerle 1983 yılında watt başına 2 dolara kadar düşürülmüştür. Güneş pilleri, maliyetinin yüksek olması nedeniyle ilk yıllarda sadece uzay araştırmalarında, uzay araçlarının enerji ihtiyaçlarının karşılanmasında kullanılmıştır. Dünyada son yıllarda baş gösteren enerji kriziyle yeni enerji kaynaklarına olan ihtiyaç güneş pillerinin önemini arttırmıştır. Si tek kristalinin büyütülme, safsızlık yerleştirilmesi, büyütülen kristal çubuktan dilimler kesilmesi sırasındaki madde kaybı ve tek kristal kalınlığının çok az kısmının kullanılması maliyet yönünden çok büyük sınırlamalar getirmiştir. Bu sınırlamayı kaldırmak için güneş pilleri konusunda çok yoğun çalışmalar başlatılmış ve amorf silisyumun yukarıdaki sınırlamaları karşılayabileceği belirlenmiştir. Bir güneş pilinde 1µm kalınlığında silisyum tabakasına gerek duyulması, bunun güneş ışığının bütün spektrumundan yararlanacak şekilde çok katlı güneş pilleri yapımına imkan vermesi amorf silisyuma büyük önem kazandırmıştır.

Güneş pillerinin; son on yılda pazarını cep telefonlarından sonra, en hızlı büyüyen endüstriyel mallardan biri olduğu vurgulanmaktadır. Artan üretim hacmi ve düşen fiyatlar, güneş pillerini önceleri şebekenin olmadığı bölgelerde müstakil uygulamalar için uygun hale getirmiştir. Özellikle 90'lı yılların ortalarına kadar güneş pillerinin esas pazarları, çeşitli uluslararası yardım uygulamalarının hedefi olan 3. dünya ülkelerindeki gelişmemiş altyapı destek programları olmuştur. Bu değişimin temel nedeni, gelişmiş ülkelerde 90'lı yılların ortalarından itibaren uygulanmaya başlanan teşvik programlarıdır. Bu alanda örnek gösterilen Federal Alman Yenilenebilir Enerji Yasası ile Alman pazarı, en hızlı büyüyen Pazar olmuştur. Güneş pillerinin Alman kentlerindeki mimari uygulamaları her geçen gün artmaktadır. Devlet teşvikleri ile büyüyen üretim hacimleri, hemen tüm endüstriyel teknolojilerde rastlanan maliyet düşüşlerini, beraberinde getirmektedir.

Güneş pilleri, elektrik enerjisinin gerekli olduğu her uygulamada kullanılabilir. Güneş pili modülleri uygulamaya bağlı olarak; akümülatörler, invertörler, akü şarj denetim aygıtları ve çeşitli elektronik destek devreleri ile birlikte kullanılarak bir güneş pili sistemi (fotovoltaik sistem) oluştururlar. Bu sistemler, özellikle yerleşim yerlerinden uzak, elektrik şebekesi olmayan yörelerde, jeneratöre yakıt taşımanın zor ve pahalı olduğu durumlarda kullanılırlar. Bunun dışında dizel jeneratörler ya da başka güç sistemleri ile birlikte karma olarak kullanılmaları da mümkündür. Kullanım alanları ve kullanıcı kitleleri büyük bir hızla artan güneş pilleri konusundaki araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu pillerin üstün yanları arasında uzun ömürlü olması (yaklaşık 20-30 yıl), çevre kirliliği yaratmaması, hareketli kısımlar içermediğinden aşınmaması sayılabilirken; zayıf yanları arasında düşük güçlü olması, yalnız gündüzleri çalışması ve ekonomik olmaması sayılabilir.

Güneş pillerinin çalışma ilkesi, fotovoltaik dönüşüm olayına dayanır. Fotovoltaik dönüşümde güneş ışığını soğuracak malzeme, yasak enerji aralığı güneş spektrumu ile uyumlu ve elektrik yüklerinin bir birinden ayrılabilmesine izin verebilecek özellikte bir yarıiletken olmalıdır (Oktik, 2001). Fotovoltaik olay, iki aşamada meydana gelir. Bunlar, birer taşıyıcı yük çifti olan elektron-hol çiftinin oluşturulması ve bu yük çiftlerinin birbirinden ayrılması olayıdır. En basit olarak bir güneş pili yapımı; herhangi bir yarıiletkende n-tipi ve p-tipi bölgeler oluşturularak gerçekleştirilebilir. Oluşturulan bu n-tipi ve p-tipi bölgelerin geçiş bölgesindeki p-n eklemi kesiminde, doğal olarak bir elektrik alanı kurulur. Bu bölgede oluşan elektrik alan, yapısal elektrik alan olarak adlandırılır. Yarıiletken eklemin güneş pili olarak çalışması için eklem bölgesinde fotovoltaik dönüşümün sağlanması gerekir. Bu dönüşüm iki aşamada olur. Önce eklem bölgesine ışık düşürülerek, elektron-hol çiftleri oluşturulur. Sonra bunlar, bölgedeki elektrik alan yardımıyla bir birlerinden ayrılır (Engin,1995; Küpeli,2005).

2.4.1 p-n Homoeklemlı Güneş Pilleri

Homoeklemlı bir güneş pilinde, p-n ekleminin her iki tarafı aynı kristal yapıları yarıiletken içermektedir. Fakat bu tip güneş pillerinde katkılama yöntemleri çeşitlilik göstermektedir. Katkılama yöntemlerine göre, dört ayrı p-n homoeklemlı güneş pili yapısı vardır. Bunlar sıg homoeklemlı güneş pilleri, yüksek alçak yayınlayıcı (High-low emitter) güneş pilleri, ön yüzey alanlı güneş pilleri ve düşey homoeklemlı güneş pilleridir (Engin, 1995). Tek kristalli veya çok kristalli (polikristal) olarak aynı cins yarı iletken materyal kullanılarak üretilirler. Polikristallerin elde edilmesi zor ve pahalıdır. Polikristalden yapılan homoeklemlı güneş pilleri, tek kristalden yapılanlara göre sıcaklığa karşı daha dayanıklı, daha yüksek verimli ve daha uzun ömürlüdürler. p-n

homoeklemlı güneş pillerinin ideal verimlilikleri yaklaşık %28 'dir. p-n homoeklemlı güneş pillerinin yapımında en yaygın olarak kullanılan malzemeler, Silisyum(Si) ve Galyum arseniktir (GaAs). Güneş pillerinin yapımında daha çok silisyum tercih edilir. Çünkü silisyum kullanılarak elde edilen p-n ekleminin açık devre gerilimi daha büyüktür. Silisyumun spektral cevabı, germanyumda olduğu gibi kızılötesi ışınlar kadar uzanamaz. Fakat bu sınırlama, ışık kaynağı olarak güneş kullanıldığı zaman ciddi bir sorun oluşturmaz. Çünkü güneş ışığında en yüksek enerjili ışınım, görünür bölgede yeşil ışınım ve bu her iki madde için de uygundur. Akkor ışık kaynağı kullanılması halinde; germanyumun uçları arasındaki gerilim küçük olmasına rağmen, çıkışından elde edilen güç silisyuma göre daha büyüktür. Çünkü germanyumun yasak bant genişliği silisyumdan daha küçüktür ve daha küçük enerjilerde fotoakım elde edilmesine olanak verir (Oral M.,1979; Köse S.,1986; Küpeli,2005).

2.4.2 p-n Heteroeklemlı Güneş Pilleri

Son zamanlarda p-n homoeklemlı güneş pillerine göre daha kolay ve daha ucuza elde edilebilmesi, birim ağırlık başına daha yüksek güç sağlanması, sıcaklığa ve radyasyona karşı daha fazla dayanıklılık göstermesi gibi üstün özelliklerinden dolayı; heteroeblem adı verilen ince film güneş pilleri kullanılmaya başlanmıştır. Bu üstün özelliklerine karşın, verimleri homoeklemlı güneş pillerine göre düşüktür.

Heteroeklemlı bir güneş pilinde p-n ekleminin her iki tarafı farklı iki yarıiletken oluşur. p-n ekleminin her iki yanının iş fonksiyonları (Fermi düzeyinden bir elektronu boşluk düzeyine geçirmek için gerekli enerji), elektron ilgileri (electron affinity, iletim bandı kenarında bulunan bir elektronu boşluk düzeyine geçirmek için gerekli enerji), bant aralıkları ve katkı konsantrasyonları farklıdır.

Termal dengede olan iki yarıiletken birleştirildiğinde, Fermi düzeyleri sistemin her yerinde aynı olur. Fakat sistemde iş fonksiyonlarının farkına eşit olan bir elektrostatik potansiyel enerji, dolayısıyla bir potansiyel engeli ortaya çıkar. Aynı zamanda p-n ekleminin iletim bandı kenarında, kullanılan yarıiletkenlerin elektron ilgileri farkına eşit olan ve valans bandı kenarında, bant aralıkları farkına bağımlı olan süreksizlikler oluşur. Bantlarda oluşan bu süreksizlikler, fotovoltaiik olay için istenmeyen özelliklerdir. Bu tür süreksizlikler, uygun katkılamanın yapılması ve uygun elektron ilgisi olan yarıiletkenlerin seçilmesiyle ortadan kaldırılabilir (Küpeli A.Ö., 2005).

Heteroeklemlı bir güneş piliinde p-n eklemının her iki tarafını, tamamen aynı kristal yapıda yapmak imkansızdır. Bu uyumsuzluk (bozukluk), yasak bant aralığında izinli enerji durumlarının ortaya çıkmasına ve geçiş bölgesinde birleşme merkezlerinin oluşmasına sebep olur. Bu tuzaklar aynı zamanda, p-n ekleminde tünelleme olayının olmasını sağlar. Bu durumların her ikisi de, güneş pilinin isleyişini olumsuz yönde etkiler. Heteroeklemlı güneş pillerinde, eklemın iki yanındaki yarı iletkenlerin örgü sabitlerinin birbirine çok yakın olmasına çalışılır. Bundan başka heteroeklem güneş pili yapımında, soğurucu olarak kullanılacak materyalin 1-1.7 eV aralığı içinde, direkt bir yasak bant aralığına sahip olmasına dikkat edilmelidir. Soğurucu, yaklaşık 2.5 eV 'luk yasak bant aralığına sahip bir pencere katmanı içerisinde aydınlatılmalıdır. Pencere materyali fazlaca katkılanmış, soğurucu materyal ise orta derecede katkılanmış olmalıdır. Bundan başka, soğurucu materyal ile pencere materyalinin yarıiletkenlik tipleri karşıt tipte seçilmelidir.

2.4.3 İnce Film Güneş Pilleri

Birinci nesil güneş pili teknolojisi deyimi genellikle kristal silisyum güneş pilleri için kullanılmaktadır. İkinci nesil güneş pilleri denildiğinde ise, amorf silisyum (a-Si), Kadmiyum Tellür (CdTe), Bakır indiyum galyum disellenür (CIGS) ve ince film kristal silisyum gibi ince film güneş pilleri ifade edilmektedir. İnce film güneş pillerinin üretimine başlanmasındaki en büyük sebep, daha düşük üretim maliyetleriydi. Silisyum güneş pili panelleri 100 cm² alana sahip bağımsız güneş gözelerinden meydana gelirken, ince film güneş pilleri ise çok daha geniş alanlarda üretilebilmekte, bu da büyük ölçekli üretimler için maliyeti düşüren bir faktördür.

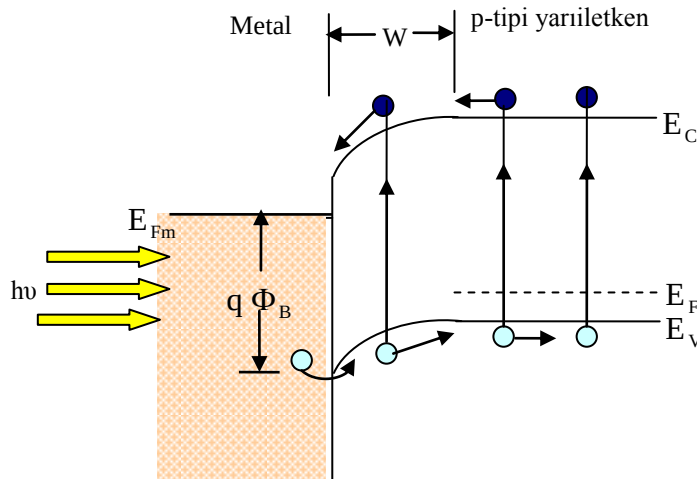
Ayrıca, direk bant aralıklı yarı iletken malzemelerde olduğu gibi, ince film yarı iletken malzemeler silisyuma göre çok daha yüksek soğurma katsayısına sahiptirler. Bu nedenle de 1 µm kalınlığında bir yarı iletken filmi yeterli olmaktadır. Silisyum güneş pillerinde ise bunun 100– 1000 katı daha kalın bir filme ihtiyaç vardır. Bu açıdan, pahalı yarıiletken malzeme kullanımı azaltılmış olmaktadır (Halme 2002).

2.4.4 Schottky Eklem Güneş Pilleri

Schottky eklem güneş pilleri için yarıiletken üzerine çok ince ($100 \text{ \AA}$ dan daha ince) bir metal filmle kaplanmalıdır. Şekil 2.12’de p-tipi yarıiletken ile hazırlanan bir güneş pili için enerji band diyagramı verilmiştir. Işık ön yüzeye geldiğinde yani metale geldiğinde $h\nu > q\Phi_B$ enerjisine sahip olan fotonların metal içindeki boşlukları uyarak metal ile yarıiletkenin ara yüzeyindeki Schottky bariyerini aşarak yarıiletkene geçmesini sağlayabilir.

Bununla birlikte çok ince bir metal film olduğundan dolayı ışık yarı iletken içerisinde geniş bir bölgeye kadar girebilir ve $h\nu > E_g$ enerjisine sahip olan fotonlar arınma bölgesinden ve yarıiletkenin içerisinde elektron-boşluk çiftleri üretir. Oluşan boşluklar arka kontağa doğru hareket ederlerken elektronlar ise eklemde toplanırlar bunun sonucu olarak da diyottakinin tersine bir fotoakım oluşur. Metalden yarıiletkene geçen boşlukların termoiyonik emisyonu sonucu oluşan diyotun karanlık akımı fotoakıma karşıdır.

Bir Schottky bariyer diyotta oluşan karanlık akım p-n eklemdekinden yaklaşık birkaç kat fazladır bundan dolayı da Schottky güneş pilinde açık devre gerilimi (V_{oc}) p-n eklem güneş pilinden daha düşüktür. Schottky güneş pilleri tek tip altlığa gereksinim duyulması, açık devre geriliminin metalin iş fonksiyonuna bağlılığı nedeniyle daha büyük iş fonksiyonlu metaller kullanılarak açık devre geriliminin büyütülebilmesi, diyod ideallik faktörünün bire yakın olması ve düşük sıcaklıklarda işlem yapılabilmesi bakımından önemlidir. Sonuç olarak bu pillerdeki verim p-n eklem güneş piline göre çok daha düşüktür. Schottky güneş pillerinin en büyük avantajı onların yapımında difüzyon işlemindeki gibi yüksek sıcaklık gerekmediğinden üretim maliyeti daha düşüktür (Tatar B.,2007).



Şekil 2.12 Schottky güneş pilinin enerji-band diyagramı (Tyagi M.S. 1991)

2.4.5 Organik Boya Esaslı İnce Film Güneş Pilleri

Geniş bant aralıklı yarıiletkenler, yüzeylerinde organik boyalar adsorplanarak görünür bölgeye duyarlı hale getirilebilirler. Duyarlı hale getirmenin temeli 19.yüzyılda fotoğraf tekniğinin geliştirilmesine dayanmaktadır. 1873'te Alman kimyacı Herman Vogel, gümüş halojenür kristallerine uygun boyaların ilavesi ile bu kristaller yeşil ışığa duyarlı hale gelerek daha öncesine kıyasla çok daha gerçekçi fotoğraflar meydana gelmektedir. Fotoelektrotların ilk duyarlaştırılması ilk olarak Moser tarafından rapor edilmiştir. Daha önce, geniş bant aralıklı yarı iletkenlerin boya kullanarak görünür bölgeye duyarlı hale getirilmesi Fujihira ve Anderson tarafından rapor edilmiştir (Zafer C., 2006).

2.4.6 Organik Güneş Pilleri

Enerji ihtiyacı ve tüketiminin arttığı dünyamızda organik yarıiletkenlerden üretilen güneş pilleri özellikle son 2-3 yılda bu ihtiyacın karşılanmasında rol oynayabilecek birer seçenek olduklarını kanıtladılar. Organik güneş pilleri fikri, kolaylıkla üretilebilen ve geniş alanlarda işlenebilen düşük maliyetli organik ve polimer fotovolataik malzemelerin gelişimi ile ortaya çıkmıştır. Bazı organik malzemeler ile güneş pili verimlerinde başarılı sonuçların elde edilmiş olması ve organik donör ve akseptör moleküller arasında yüksek verimli yük transfer proseslerinin ortaya konması son yıllarda organik güneş pilleri üzerine araştırmaların yoğunlaşmasına sebep olmuştur. Güneş pillerinde kullanılan organik malzemeler iletken polimerleri, boyaları, pigmentleri ve sıvı kristalleri içermektedir. Bunların içerisinde iletken polimerler, foto fiziksel özellikleri en iyi bilinen ve çalışılan malzemelerdir (Sariciftci ve Heeger 1992).

Sentetik organik malzemeler, örneğin plastikler, günlük yaşantımızın her alanında, örneğin, paketlenme ve kaplama malzemesi, dayanıklı ve esnek malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Bilimin ve teknolojinin gelişmesine paralel olarak organik yarıiletken malzemelerin de keşfi çok büyük sürpriz olmamıştır. Çok yakın zamanda elektronik malzemelerin temel yapı taşı olan inorganik yarı iletkenlerin organik özdeşleri ile değişmesi çok muhtemel görünmektedir. Bu değişim kullanılan cihazların hafiflik ve esneklik gibi avantajlar kazanmasını da sağlayacaktır. Yeni organik elektronik malzemelerin muhtemel uygulamalarından bir tanesi de organik güneş pilleridir(Zafer C, 2006). Organik güneş pili üretiminin potansiyel esin kaynağı düşük üretim maliyetleri, organik yarıiletkenlerin esnek yapılı (plastik) ve geniş yüzeylere kaplanabilir olmaları, kolay üretilebilmeleri ve istenilen yüzeye uygulanabilmeleri olmuştur. Bu teknolojinin temeli elektron verici ve elektron alıcı moleküller arasında meydana gelen etkin elektron transferinin gözlenmesiyle başlamış ve bu transfere günümüzde de duyulan ilgi artarak devam etmektedir.

2.5 İnce Film Hazırlama Yöntemleri

İnce filmlerin hazırlanması amacıyla geliştirilmiş birçok yöntem vardır. Bunlardan bazıları vakumda, atomik veya moleküler çökeltme işlemleri, bazıları da atmosfer basıncı yakınındaki taşıyıcı bir gaz veya sıvıdan çökeltme işlemleridir. Oluşturulan ince filmin mikroyapısı ve dolayısıyla fiziksel özellikleri üzerinde çökeltme yöntemlerinin etkisi büyüktür. Bu yöntemler yardımı ile angströmden milimetre mertebesine kadar değişen kalınlıklarda ince film yapılar oluşturulabilmektedir. Genel olarak büyütme işlemi üç basamakta gerçekleştirilir:

- a) Atomik, moleküler veya iyonik numunelerin oluşturulması,
- b) Bu numunelerin bir ortamdan geçirilmesi,
- c) Bir alt tabaka üzerine bu numunelerin toplanması.

Yarıiletken ince filmler taban olarak kullanılan bir materyal üzerine başka bir malzemenin çok ince katmanlar halinde çöktürülmesi ile elde edilen, kalınlıkları 100Å ile birkaç µm arasında değişen malzemelerdir. Teknolojik ve bilimsel olarak önemi gittikçe artan yarıiletken ince filmleri elde etmek için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yarıiletken filmler kimyasal buhar çöktürme, vakum altında buharlaştırma, epitaksiyel, magnetron sputtering, kimyasal püskürtme, elektro çöktürme ve kimyasal banyo çöktürme gibi birçok farklı teknikle üretilmektedir (Sze, 1981; Krishnakumar, et al., 1987). Bilimde ve teknolojiye gelişmeler yeni üretim tekniklerinin ortaya çıkmasına, diğer tekniklerinde gelişmesine imkan vermektedir. Son yıllardaki bilimsel çalışmalar özellikle manuel kontrolü devre dışında bırakan tamamen bilgisayar tabanlı, basit ve ekonomik tekniklerle daha düşük boyutlu, kompleks ve kaliteli malzemelerin üretimi ve incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

2.5.1 Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi

Moleküler Demet Epitaksi (MBE), 1970'lerde yüksek kaliteli yarıiletken ince film üretmek için geliştirilmiştir. O zamandan bu yana kolay kontrol edilebilir olması, düşük ısıda işlem görmesi ve tam doping kontrolü gibi avantajları nedeniyle hassas elektronik, optoelektronik ve mikrodalga cihazların gelişiminde önemli bir sistem olarak kullanılmaktadır.

MBE sisteminde yarıiletken malzemeyi oluşturan elementin moleküler yada atomik yapıdaki demeti ince film oluşturmak amacıyla ısıtılmış kristal yapıdaki bir taban üzerine biriktirilir. Daha basit bir anlatımla ısıtılmış taban yüzeyine ulaşan her atomun yüzeyde hareket edip uygun bir yer bularak yeni bir kristal kafes oluşturmak için yeterli zamanı vardır.

Tipik bir MBE sistemi üç ana bölümden oluşur. Yükleme odası, hazırlık tampon odası ve büyütme odası. Yükleme odası, diğer vakum odalarındaki bütünlüğü muhafaza ederek numunenin vakum odasına getirilmesinde ve vakum odasından çıkarılmasında kullanılır. Hazırlık tampon odası, numunenin hazırlanmasında ve su ve benzeri kirliliklerden ısıtılarak ilk sistem içi temizliğinin yapılmasında kullanılan birimdir. Büyütme odası, yarıiletken ince filmin büyütüldüğü yerdir.

2.5.2 Vakum Altında Buharlaştırma Yöntemi

Vakum altında termal buharlaştırma çalışmaları Edison'un 1884 tarihli akkor halde termal buharlaştırma ve film oluşturma patentiyle ortaya çıkmasına rağmen bu yöntem hiçbir uygulamada kullanılmamıştır. O dönemde kaynağın ısıtılması kullanılan vakum malzemelerine zarar verecek nitelikteydi. 1887'de Nahrwold vakumda süblimasyon yoluyla platin film oluşumunu açıkladı ve vakumda termal buharlaştırma yöntemini film oluşturmak için kullanan ilk bilim adamı oldu. 1917 yılında ise Stuhlman vakumda ayna oluşturmak için akkor gümüş kablo kullanarak, gümüş çökelttiğini açıkladı.

Termal buharlaştırma, vakum ortamında maddenin ısıtılarak buhar basıncının yükselmesiyle madde yüzeyinden ayrılan atom ve molekülerin taban yüzeyine tutunması işlemidir. Buharlaşma sıvı (erime noktasının üstünde) yada katı (süblimleşme) bir yüzeyden olabilir. Sistem tepkime kavanozu, mekanik ve difüzyon pompaları, yüksek akım düşük voltajlı bir devre ve bir plazma jeneratöründen oluşur. Vakumda buharlaştırma yöntemiyle, optik izolasyon kaplamalar, iletken filmler, korozyon engelleyici kaplamalar, fiberoptik sensör deneylerinde kullanılan çok özel yansıtma özelliklerine sahip aynalar üretilebilir.

2.5.3 Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemi

Buhar biriktirme işlemleri genellikle iki grup altında toplanır;

1.Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)

2.Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Fiziksel buhar biriktirme, temelde farklı yöntemlerle (buharlaştırma, söktürme veya lazer ablasyonu ile) üretilen kaynak buharın, film oluşturmak için bir yüzey üzerine yoğunlaştırılması işlemidir.

PVD işlemleri üç ana süreçten oluşur. Bunlardan birincisi buhar fazı üretimidir. Malzeme buhar haline, buharlaştırma, söktürme, lazer ablasyon, gazlar, buharlar vb. ile getirilir. İkinci adım buharın kaynaktan hedef tabana taşınması sürecidir. Moleküler akış, plazma yaratarak buhar iyonlaştırma yoluyla gerçekleştirilir. PVD işlemlerinde üçüncü basamağı taban üzerinde film geliştirme süreci oluşturur. Bu süreç kaynak buharın taban üzerinde yoğunlaşmasını ve gelişme süreci ile filmin oluşmasını kapsar. Bu üç basamağın bağımsız kontrol derecesi, biriktirme sürecinin çok yönlülüğünü veya esnekliğini belirler. PVD süreçlerinde bu üç basamak bağımsız olarak kontrol edilebilmekte ve böylece yapı, özellikler ve birikme oranı kontrolü ile büyük esnekliğe sahip olmaktadır. CVD süreçlerinde ise bu üç basamak taban üzerinde aynı anda meydana gelir ve birbirinden bağımsız olarak kontrol edilemez.

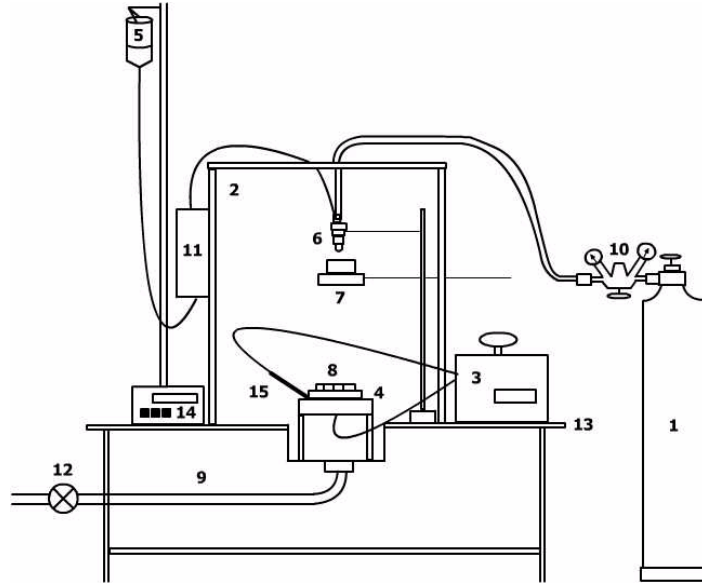
2.5.4 Kimyasal Sprey Püskürtme Yöntemi

Kimyasal sprej püskürtme (Spray Pyrolysis) tekniği elde edilecek ince film için belirli molaritelerde hazırlanan çözeltilerin belirli hacimlerde karıştırılarak ısıtılan tabanlar üzerine püskürtülmesiyle yarı iletken filmlerin üretilmesini sağlayan bir kimyasal çöktürme tekniğidir. Bu teknikte CdS, ZnS, ZnSe, CdSe, CdZnS, CdAIS gibi ikili ve üçlü bileşiklerin yanı sıra fotovoltaiik heteroeklem güneş pilleri de elde edilebilmektedir.

Elde edilen filmlerin özellikleri farklı parametrelere göre değişir. Bunlar püskürtülen çözelti miktarı, taban sıcaklığı, püskürtme hızı, tabanın cinsi, püskürtme süresi, püskürtme başlığı ile taban arasındaki mesafe, taşıyıcı gazın cinsi, akış hızı ve kullanılan çözeltinin molaritesidir (Krishnakumar, 1987). Kimyasal Püskürtme tekniğinde taban materyali olarak genellikle silikonlu ve payreks camlar, titanyum, tungsten, alüminyum gibi metallerin yanı sıra seramik ve polimer malzemeler de kullanılmaktadır (Sze, 1981).

Kimyasal Püskürtme tekniğinde püskürtme kabini 1x1x1 m³ ebatlarında ve ahşap veya paslanmaz çelikten yapılmaktadır. Kabinin altında püskürtme esnasında oluşan atık gazlar içi su dolu kapalı bir kap içerisinden geçirilerek laboratuvar dışına temizlenmiş olarak atılmaktadır. Püskürtme başlığı taşıyıcı gazın yardımıyla çözeltinin parçalanmasını ve bir osilatör yardımıyla da damlacıkların daha iyi atomize olmasını sağlar. Püskürtme başlığı genellikle pyrex camdan veya paslanmaz çelikten yapılmaktadır. Pyrex camdan yapılan püskürtme başlığının çözelti çıkış kısmı zamanla aşınmaya bağlı olarak bozulur. Püskürtme başlığında çıkış kısmının düzgünlüğünü kaybetmesi püskürtme konisinin bozulmasına buna bağlı olarak da üretilen filmlerin fiziksel özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olur. Bir osilatör ile birlikte kullanılan ultrasonik püskürtme başlığının ağız kısmının geometrisi cam püskürtme başlığına göre çok daha düzgün olmasına rağmen püskürtme sonrası temizlenmediği takdirde tortu oluşmaktadır. Bu nedenle çözeltinin geçtiği hortumda ve püskürtme başlığında oluşan tortuları önlemek için her püskürtme sonunda çözeltinin geçtiği hortum ve püskürtme başlığı saf su geçirilerek temizlenmelidir. Kimyasal Püskürtme tekniğinde önemli parametrelerden biri de püskürtme hızıdır. Püskürtme hızı; sisteme gönderilen toplam çözelti miktarının, püskürtme zamanına bölünmesiyle hesaplanabilir. Püskürtme hızı sistemde içinden çözelti geçen bir akış hızı ölçer (1-20ml/dk) vasıtası ile de ölçülmektedir. Püskürtme hızının fazla olması taban sıcaklığının kontrolünü zorlaştırmakta, film yüzeylerinde tortu oluşturmaktadır. Bu durum üretilen filmlerin fiziksel özelliklerini değiştirmektedir.

Kimyasal Sprey Püskürtme tekniğinde taban ile püskürtme başlığı arasındaki mesafe elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerini etkileyen bir başka parametredir. Bu uzaklık genellikle 30-40 cm arasında değişim göstermektedir. Bu mesafenin daha kısa tutulması kalın filmlerin ve taban yüzeyinde tortuların oluşmasına neden olur. Yüksek sıcaklıklarda ise erken buharlaşmadan dolayı tabana ulaşan damlacıkların sayısı ve tabana tutunma azalacaktır. Bu yüzden yüksek taban sıcaklıklarında bu mesafenin azaltılması gerekmektedir. Püskürtme başlığına gelen çözeltiyi atomize etmek için belirli basınçlarda azot gazı veya hava taşıyıcı gaz olarak kullanılır. Kimyasal Sprey Püskürtme tekniği karmaşık aletler içermeyen kısa zamanda daha geniş yüzeyli (cm² mertebesinde) ince filmlerin elde edilmesini sağlayan ekonomik ve basit bir tekniktir.



Şekil 2.13 Kimyasal Sprey Püskürtme tekniğinin şematik diyagramı

Şekil 2.13'deki şematik diyagramda (1) taşıyıcı gaz tüpünü, (2) püskürtme odasını, (3) ısıtıcıyı, (4) bakır bloğu, (5) çözelti kabını, (6) püskürtme başlığı, (7) püskürtme baslarken ve sona erdiğinde damlaları engelleyen sürgü sistemi, (8) pyrex cam tabanları, (9) atık taşıyıcı tüp boru, (10) taşıyıcı gaz ve püskürtme gazı göstergelerini, (11) akış hızı ölçeri, (12) vantilatörü, (13) masayı, (14) osilatörü, (15) termokuplı göstermektedir (Süvüt,H.H.,2005).

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada n-tipi Si (100) ve p-tipi Si (111) taşıyıcılar üzerine kimyasal sprej püskürtme yöntemi ile oda sıcaklığında FePc ince filmler ilk kez büyütülmüştür. Bunun için önce taşıyıcılar temizlenerek kaplamaya hazır hale getirilmiş olup daha sonra kimyasal sprej püskürtme yöntemi ile filmler kaplanarak yapı analizleri, yüzey morfolojileri ve elektriksel özellikleri incelenmiştir.

3.1 FePc/Si Heteroeklemlı İnce Filmlerin Oluşturulması

3.1.1 Altlıkların Hazırlanması

Kaplama işleminde kullanılacak olan (100) yönelimine sahip n-tipi ve (111) yönelimine sahip p-tipi Si altlıklar 50x50x3 mm boyutlarında kesilerek hazırlandı. Kullanılan n-tipi Si altlıkların öz dirençleri 5-10 Ω -cm ve p-tipi Si altlıkların öz dirençleri 10.5-19.5 Ω -cm'dir.

Altlıklar kaplama öncesi RCA temizleme yöntemi göz önünde bulundurularak temizlendi.

RCA temizleme yöntemi:

1. Altlıklar trikloretilen ($C_2H_4Cl_3$) içinde 5 dakika kaynatılır.
2. Ardından saf suya tutulur.
3. Ultrasonik sistemde çalkalama işlemine tabi tutulur.
4. Altlıklar HCl/ H_2O_2 (1/1 oranındaki) çözeltisine 10 dakika batırılır.
5. Altlıklar H_2SO_4/H_2O_2 (2/1 oranındaki) çözeltiye 5 dakika süresince batırılır.
6. Ardından altlıklar 5 dakika boyunca saf suyla yıkanır.
7. Son olarak altlıklar HF/ H_2O (1/10 oranındaki) çözeltiye 30 saniye batırılıp çıkarılır.
8. Ardından tekrar saf suda 15-20 dakika yıkanır.

3.1.2 Çözeltinin Hazırlanması

Kimyasal sprej püskürtme yöntemi ile hazırlanan filmler için çözelti hazırlamak önemli bir prosedir. Çözelti hazırlanırken, çözünen ve çözücülerin miktarlarının ayarlanması ile çözelti konsantrasyonları kontrol edilir. Bu tez çalışmasında, çözeltinin hazırlanması sürecinde farklı çözücüler kullanılmıştır ve aynı zamanda farklı çözelti konsantrasyonları da kullanılarak FePc filmler hazırlanmıştır. FePc çözücüsü olarak kloroform, metanol ve etanol çözücülerini kullanıldı. İlk aşamada bu çözücüler tek tek farklı miktarlardaki FePc tozu ile karıştırılarak çözeltiler elde edildi. FePc tozunun çözücü içerisinde iyice çözünebilmesi için çözeltiler manyetik karıştırıcıda değişik süreler uygulanarak karıştırıldı. Daha sonraki aşamalarda bu çözücülerle ikili karışımlar oluşturularak çözeltiler hazırlandı. Yapılan denemeler sonucunda kaplama işlemi için en uygun çözeltinin etanol-metanol karışım çözücüsünden oluşan çözeltinin olduğu anlaşıldı. Bu karışım temel alınarak farklı miktarlarda çözücü ve FePc'den oluşan çözeltiler hazırlandı ve sprej püskürtme yöntemi ile kaplama işlemi için hazır hale getirildi.

3.1.3 Kimyasal Sprej Püskürtme Yöntemi ile Kaplama İşlemi

FePc/Si filmler (100) yönelimine sahip n-tipi silisyum, (111) yönelimine sahip p-tipi silisyum altlıklar ve corning cam üzerine kimyasal sprej püskürtme yöntemi kullanılarak Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü İnce Film Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında hazırlanmıştır. İlk olarak altlıklar Al folyolar kullanılarak maskelendi. Kaplama işlemi için farklı sıcaklıklar kullanılarak en uygun altlık sıcaklığının (150°) olduğu tespit edildi. Temizlenerek maskelenen altlıklar ısıtıcı taban sistem üzerine belirli aralıklarla yerleştirildi. Hazırlanan çözeltinin toplam kaplama süresi 30 dakika sürecek şekilde belirli bir frekans değerinde altlıklar üzerine püskürtülmesi ile kaplama işlemi gerçekleştirildi. Bazı filmler püskürtme işleminin tamamlanmasının ardından kendiliğinden soğumaya bırakılırken, elde edilen filmlerden bazıları da tavlamanın kaplama işlemi üzerindeki etkisini incelemek üzere Protherm PTF 14/75/450 model tüp fırında 350° sıcaklıkta 15 ve 30 dakika sürelerinde ısıtılma işlemine tabi tutuldu.

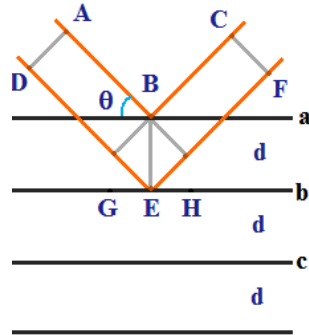
3.2 Eklemlerin Yapısal Özelliklerinin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

3.2.1 XRD Yöntemi ile Filmlerin Analizi

XRD yöntemi kristal katıların yapısal özelliklerinin incelenmesinde kullanılan güçlü analitik bir yöntemdir. X ışını radyasyonunun dalga boyu “ λ ” ile numunenin atomik düzlemleri arasındaki uzaklık “ d ” arasındaki ilişki Bragg Yasası ile verilmektedir. Birbirlerine paralel ve eşit mesafeli atomik düzlemlerden kırılan X ışınları bu düzlemlerden yansıyorlarmış gibi hareket etmektedirler. XRD’ de kaydedilen yansıma tek bir düzlemden değil paralel düzlemler takımından gelen yansımaların toplamıdır. Şekil 3.2’de görüldüğü gibi 1, 2 ve 3 numaralı düzlemlerden yansıyan dalgaların kaydedilebilmesi için birbirlerini kuvvetlendirmeleri yanı aynı fazda olmaları gerekmektedir. İki ışının aynı fazda olması için yol farkı λ ’nın tam katlarına eşit olmalıdır. $GE+EH=n\lambda$ ve $GE=d\sin\theta$, $EH=d\sin\theta$ olduğu şekilden görülmektedir. Yerlerine koyulursa “Bragg Yasası” olarak bilinen,

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (3.1)$$

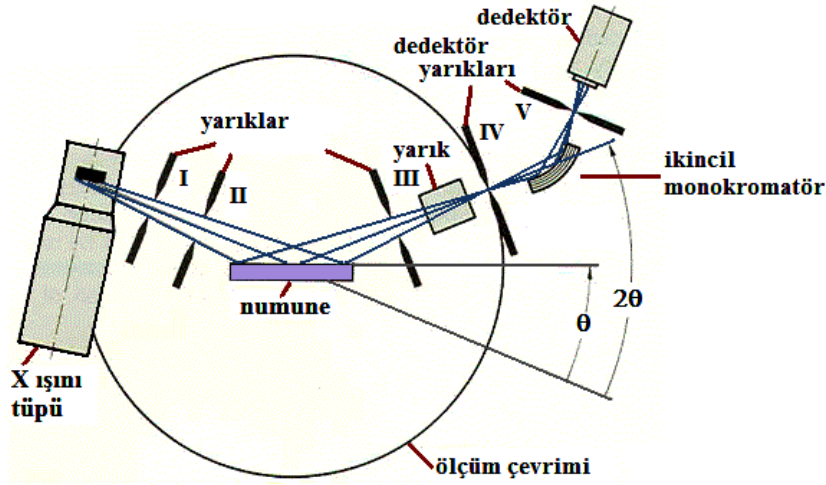
eşitliği elde edilir.



Şekil 3.1 X Işınlarnının Atomik Düzlemlerden Kırınımı

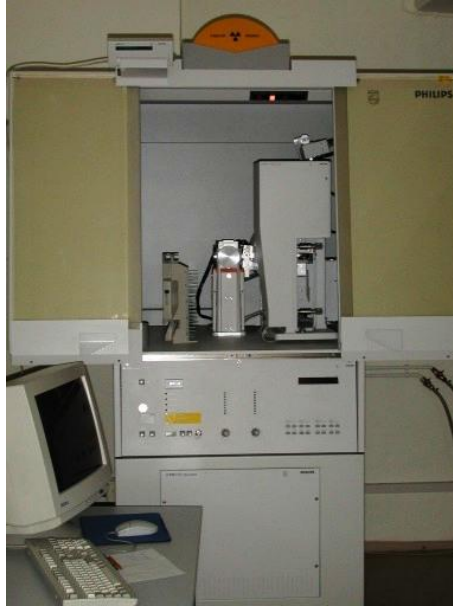
“ n ” yansımanın mertebesi ve “ θ ” difraksiyon veya Bragg açısı olarak adlandırılmaktadır ve numune düzlemi ile X ışını kaynağı veya yansıma doğrultusu arasındaki açı olarak değerlendirilir.

Difraksiyon desenleri farklı atomların girişimi sonucu olduğundan farklı bileşikler için difraksiyon deseni farklıdır. Şekil 3.1’den görüldüğü gibi Bragg açısı numune ile X ışını kaynağı arasındaki açı olduğundan yansıyan X ışını demeti ile dedektör arasında açı 2θ kadardır. Oluşan desen 2θ açılarına karşılık gelen yansıma şiddetlerinin serisini içeren difraksiyon desenindeki her bir pik numune içerisindeki spesifik düzlem setlerine karşılık gelmektedir. XRD desenindeki her bir pikin FWHM (yarı yükseklikteki tam genişlik) kristal boyutu ve yapıdaki örgüdeki biçim değişiklikleri (örgü distorsiyonu) hakkında bilgi taşımaktadır. Eşitlik (3.1)’de verilen Bragg Bağıntısı, farklı kristal yapılar için örgü parametreleri ile düzlem Miller indislerine ait parametreler arasındaki bağıntılar birleştirilerek tanecik boyutu hakkında bilgi veren Scherrer bağıntısı bulunmaktadır.



Şekil 3.2 XRD Sisteminin Şematik Gösterimi

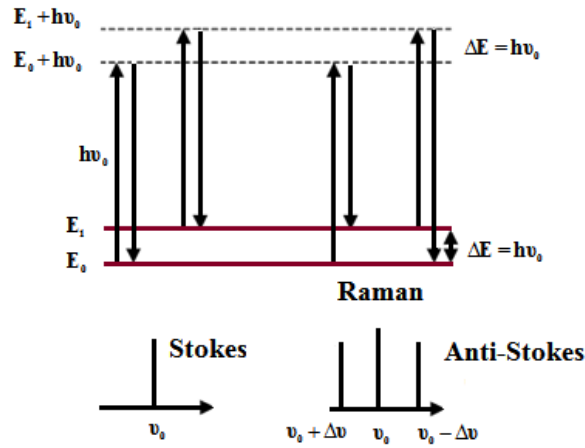
FePc/Si filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi, Yüzey Teknolojisi ve Korozyon Laboratuvarı’nda bulunan “Philips PW3710” model XRD cihazı ile 40 kV - 40 mA’de üretilen 0.154 nm dalgaboylu Cu- K_{α} ışını kullanılmıştır. X ışını giriş açısı 0.5° olarak alınmıştır. (2θ) 20° - 45° , arasındaki açılar her biri 0.02° olan adımlar ile taranmıştır ve her bir adımda 0.25 saniye boyunca ölçüm alınmıştır.



Şekil 3.3 Philips PW3710 Model XRD Cihazı

3.2.2 FePc/Si Filmlerin Raman Spektroskopisi ile İncelenmesi

Raman spektroskopisi molekül ve fotonun elastik olmayan çarpışmasının bir sonucu olan moleküler saçılma spektroskopisi olarak bilinmektedir. Bir numune foton kaynağı ile ışınlандığında kaynağın enerjisinin bir kısmını moleküle vererek molekülü daha yüksek bir enerji seviyesine uyarabilir. Uyarılmış düzey kararlı olmadığı için molekül düşük enerjili düzeye geri döner. Bu olay sırasında enerji kaybı yok ise Rayleigh saçılması oluşmuş olur. Molekül $E_0 + h\nu_0$ düzeyine uyarılıp tekrar E_1 düzeyine geri döner ve molekül $(E_1 - E_0)$ kadar enerji kazanırken foton $(E_1 - E_0)$ kadar enerji kaybeder ise bu durumda saçılan ışığın frekansı, gelen radyasyonun frekansından daha düşük olur ve saçılma çizgileri Stokes çizgileri olarak adlandırılır. Yani taban titreşim düzeyinde bulunan atomlar fotonun enerjisini soğurarak bir üst seviyedeki uyarılmış titreşim düzeyine geçerek Stokes saçılmalarını oluştururlar. Birinci uyarılmış titreşim düzeyinde bulunan atomlar ise daha üst bir seviyeye uyarılırlar ve $(\nu_0 + \Delta\nu_{\text{titreşim}})$ frekansında saçılarak anti Stokes saçılmalarını oluştururlar. Saçılan ışığın frekansı gelen ışığın frekansından küçük ise Stokes, büyük ise Anti Stokes saçılmasıdır. Genellikle oda sıcaklığında atomlar uyarılmış titreşimsel enerji düzeylerinde bulunmadığından Stokes saçılmaları daha şiddetlidir. Şekil 3.4'te Rayleigh saçılması ve Stokes/anti-Stokes hatları gösterilmektedir. Raman saçılmaları $10\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$ aralığında ortaya çıkmaktadır ve kristalde bulunan optik fononların titreşiminden kaynaklanmaktadır.

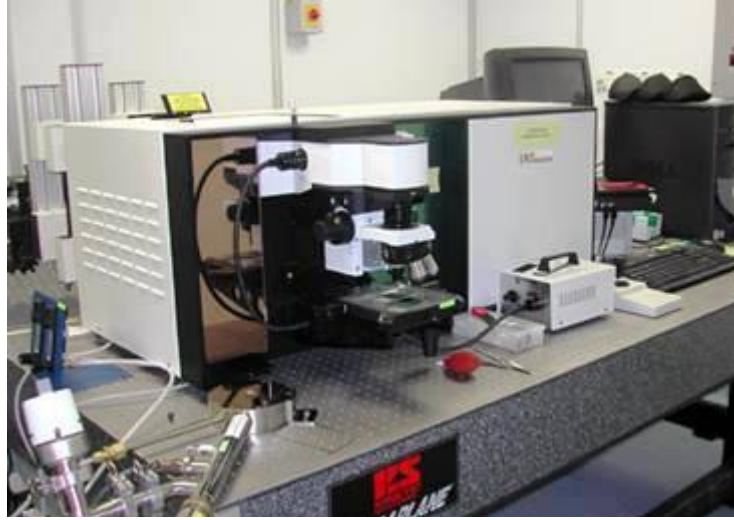


Şekil 3.4 Rayleigh Saçılması ve Raman Saçılması

Raman spektroskopisinde ışınlama kaynağı olarak genellikle lazerler kullanılmaktadır. Ölçüm sistemi, numune tutucu sistem ve spektrometre/detektör birleşiminden oluşmaktadır.

Raman spektrumları x ekseninde şiddete karşılık, y ekseninde kaynağının frekansı ile ölçülen radyasyonun frekansı arasındaki fark yani “Raman kayması” olarak çizilmektedir. Raman kaymaları doğrudan molekülün titreşim ve dönme enerji düzeylerindeki farklar ile ilişkilidir ve bu her malzeme için tek olduğundan malzeme karakterizasyonunda ve analizinde Raman spektroskopisi kullanılmaktadır. Raman kaymaları ölçümde kullanılan ışığın dalga boyuna bağlı değildir, bir malzemeye saf olmayan bir atom katkıldığında iki etkiye neden olur. Bunlardan ilki kristalin öteleme simetrisinin bozulması diğeri ise kusur atomunun titreşimsel özellikleri ile ilgili yeni modlar oluşmasıdır.

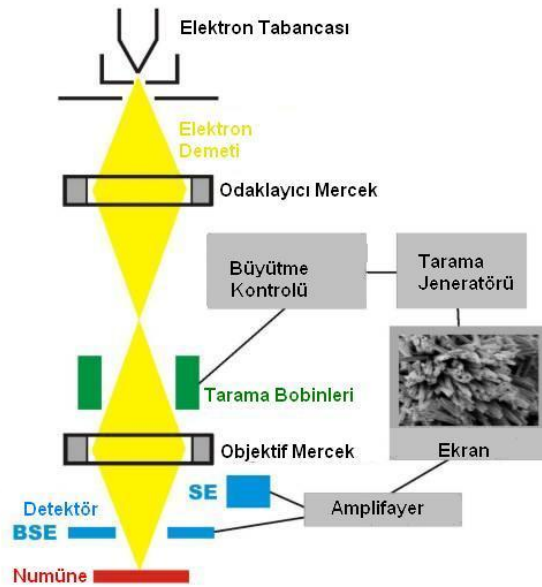
FePc/Si filmlerin yapısal özelliklerini belirlemek için, İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde bulunan “Horiba Jobin Yvon Labram HR–UV Spektrometre HR800UV” marka mikro Raman cihazı ile incelenmiştir. Raman ölçümlerinde çıkış gücü 20 mW olan 632.817 nm dalga boyuna sahip Helyum Neon lazer kullanılmıştır. HeNe lazerin çıkış gücü numune yüzeyinde ~10mW olarak ölçülmüştür ve Raman analizleri standart 100x mikroskop objektifi ile numune üzerinde spot çapı 0.86 μ m olan bir bölgeden alınmıştır. Raman spektrumları 100–800 cm^{-1} aralığında seçilerek, ölçümler 5x5 s süre ile yapılmıştır.



Şekil 3.5 Horiba Jobin Yvon Labram HR800UV Mikro Raman Cihazı

3.2.3 FePc/Si Filmlerin SEM Analizi

FePc/Si filmlerin yüzey görüntülerinin alınması için JEOL 5410 SEM model taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscopy) kullanıldı. SEM görüntüleri için 10kV ve 15kV enerjili elektron demetleri kullanıldı ve genelde x1000, x3500 ve x5000 büyütme tercih edildi. Görüntüler filmin yüzeyinden birkaç yerden alındı. Şekil 3.6'da Jeol 5410 model SEM cihazı ve şematik gösterimi yer almaktadır.

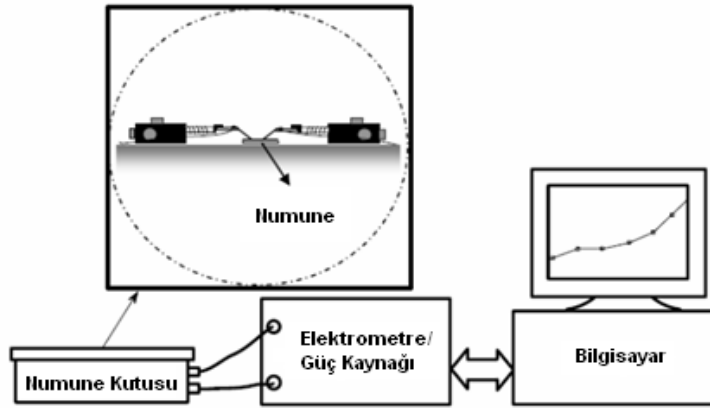


Şekil 3.6 Jeol 5410 model SEM cihazı ve şematik gösterimi

3.3 FePc/Si Heteroeklemlerin Elektriksel Özelliklerinin Belirlenmesi

3.3.1 Akım-Gerilim Ölçümleri

Hazırlanan örneklerin oda sıcaklığındaki akım-gerilim ölçümleri Şekil 3.7’de gösterilen sistemle elde edilmiştir. Bunun için akım-gerilim sisteminde Keithley 6517 marka elektrometre kullanılmıştır.



Şekil 3.7 Oda sıcaklığında dc iletkenlik ölçüm sistemi

Akım-gerilim ölçümleri, p ve n tipi taşıyıcılar üzerine FePc/Si ince filmlerden elektriksel kontaklar yapıldıktan sonra alındı. Eklemlerin kontak malzemesi olarak Ag pasta kullanıldı. Silisyumun arka ve ön yüzüne (FePc kaplı) Ag pasta ile omik kontak yapıldı akım-gerilim ölçümleri bu kontaklar üzerinden okundu.

3.3.1.1 I-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

Bir diyotun akım gerilim ölçümü yapıldığında diyotun doğrultma özelliği olduğu görülür, yani düz besleme gerilimi altında akım iletilirken, ters beslemede akım neredeyse hiç iletilmeyecektir. Bir diyotun düz besleme uygulanması durumunda, üzerinden geçireceği akım gerilimle üstel olarak değişir. Akım skalası logaritmik olarak alındığında, termiyonik emisyonun gerçekleştiği düşük gerilim bölgesinde, yani gerilimin $3kT/q$ değerinden küçük olduğu kısımda, lineer bir bölge görülür. Bu bölge saptanıp eğimi hesaplanarak diyotun o sıcaklık için idealite sabiti ve bariyer yüksekliği hesaplanabilir.

İdeal diyot denklemi,

$$I = I_0 \left(e^{qV/kT} - 1 \right) \quad (3.2)$$

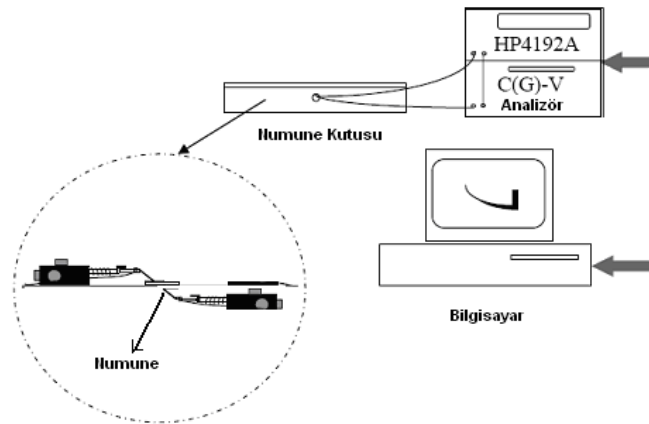
$$\eta = \frac{q}{AkT} \quad (3.3)$$

$$\phi_B = -\frac{kT}{q} \left[\ln I_0 - \ln(S \times A^{**} \times T^2) \right] \quad (3.4)$$

Burada q :elektronun yükü, k :Boltzman sabiti, A :logI-V eğrisinin lineer kısmının eğim değeri, ϕ_B : Bariyer yüksekliği, A^{**} :Richardson sabiti.

3.3.2 Kapasitans-Gerilim (C-V) Ölçümleri

Admittans yöntemi yüke duyarlı spektroskopik bir tekniktir. Burada dc gerilimin üzerine bindirilmiş ac sinyali incelenen örneğe uygulandığında, örneğin üzerinden geçen ac akım ile bulunur. Bu ac akım, sığa ve iletkenlik kısımları içerisinde barındırır. Ayrıca örneklerin frekans duyarlılığı uygulanan dış dc voltajın ac modülasyonu (frekansıyla) izlenebilir. Kapasitans ve iletkenlik ölçümlerinin yapıldığı bilgisayar kontrollü sistem HP4192A model empedans analizör ve kHz-MHz frekans aralığında farklı kapı biaslarında admitans sıcaklık taramasını kaydetmek için kullanılan bir sıcaklık kontrol ünitesi ile (Lakeshore 331) bir Helyum kapalı daire kreostat (Material Research System CSW-2025) cihazlarından oluşmaktadır. Ölçüm sisteminin şematik gösterimi Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu ölçümler bilgisayar kontrollü LABVIEW programıyla yapıp çeşitli gerilim değerlerinde admitansın frekans taraması elde edilmiştir.



Şekil 3.8 Frekansa bağlı kapasitans-gerilim ölçüm sistemi

3.3.2.1 C-V Ölçümlerinden Diyot Parametrelerinin Belirlenmesi

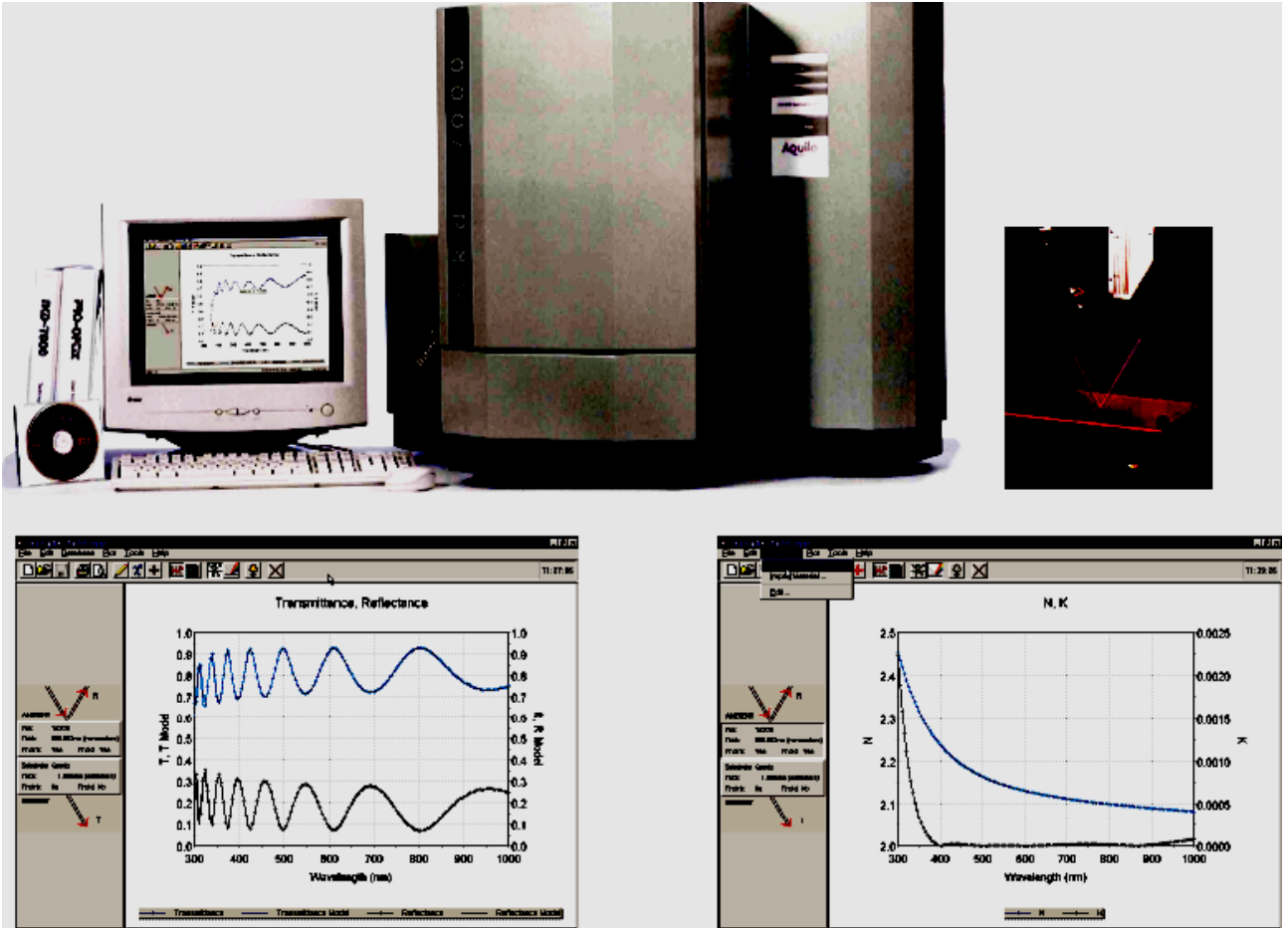
Admitans analizi dc sinyalin üzerine bindirilmiş bir ac sinyali ile gerçekleşir. İnce filmlerin C-V ölçümlerinden eklem bariyer yüksekliği ve yarıiletkenin katkılama miktarı belirlenebilir. Alınan değerlerden $1/C^2$ -V grafiği çizildiğinde, eğri ekstropole edilerek gerilim eksenini kesmesi sağlanır. Ekseni kestiği nokta oluşum potansiyelini (V_{bi}) verir. Bu doğrunun eğim değeri kullanılarak katkılama miktarı (N_d) belirlenebilir.

$$N_D = \frac{2}{qS^2\epsilon \left(\frac{d(1/C^2)}{dV} \right)} \quad (3.5)$$

Burada “S” elektrotun alanı, “ ϵ ” FePc’nin elektriksel geçirgenliğidir.

3.3.3 FePc/Si Filmlerin Optiksel Özelliklerinin Belirlenmesi

Kimyasal sprej püskürtme tekniği ile corning cam üzerine hazırlanan FePc filmlerin optik özelliklerinin incelenmesi için İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, İnce Film Laboratuvarı’nda bulunan Aquila Marka “NKD 7000V” model optik analiz cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz ince filmlerin ve optik taşıyıcıların analizi için tasarlanmış bilgisayar kontrollü bir spektrofotometredir. Bu sistem ile 20cm x 25cm aralığında numuneler için polarize veya polarize olmamış yansıtma ve geçirgenlik değerlerini aynı anda ölçebilmek ve ardından ölçülen verilerin analizini yaparak kırma indisi ve film kalınlığını bulmak mümkündür.



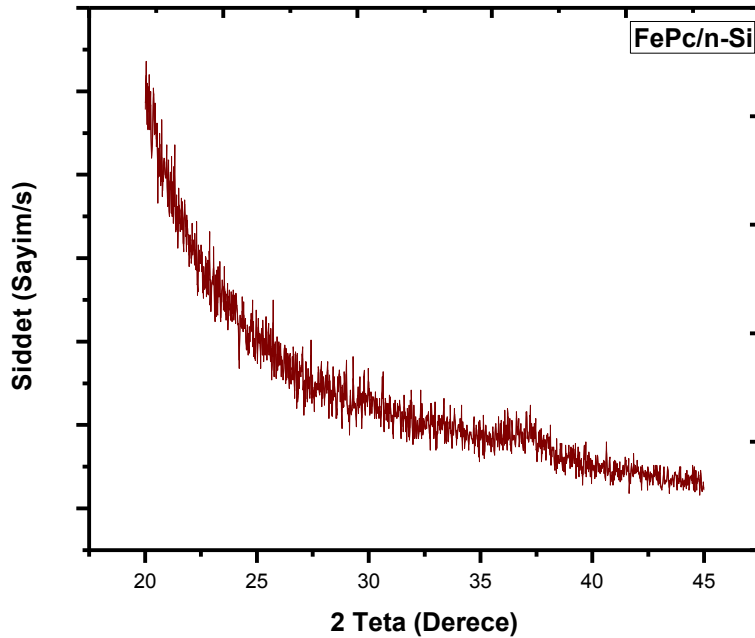
Şekil 3.9 Aquila Marka NKD 7000V Model Optik Analiz Cihazı

4. BULGULAR

4.1 FePc Filmlerin Yapısal Özellikleri

4.1.1 FePc Filmlerin XRD Analiz Sonuçları

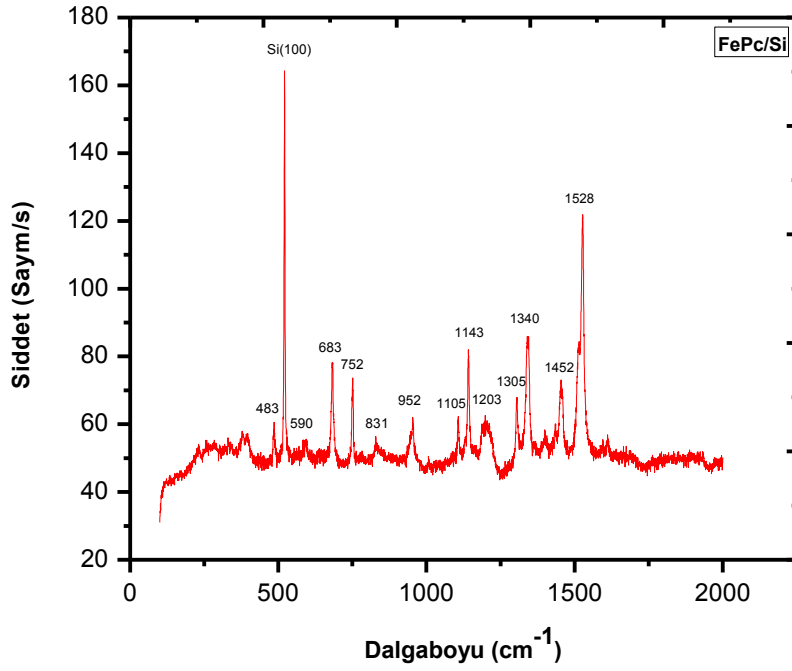
Kimyasal sprey püskürtme tekniği ile 150 °C altlık sıcaklığında n-Si (100) ve p-Si (111) altlıklar üzerine kaplanarak hazırlanan FePc filmlerin XRD spektrumları $20^\circ < 2\theta < 45^\circ$ aralığında ve 2° giriş açısıyla alındı. FePc filmin X-ışınları kırınım deseni Şekil 4.1’de verilmiştir. XRD deseni incelendiğinde herhangi bir açıda şiddetli bir pike rastlanamamıştır. Bu durumun sonucunda, bu yöntemle üretilen FePc filmlerin bu aralıkta herhangi bir kristal düzleminin oluşmadığı anlaşılmıştır. Dolayısıyla XRD analizleri sonucunda FePc filmlerin amorf yapıda olduğunu söyleyebiliriz. Literatür incelemelerinde genellikle FePc filmleri X-ışınları kırınım desenlerinde bu malzemeye ait pikler $0^\circ < 2\theta < 15^\circ$ aralığında görülmüştür. Fakat bizim kullandığımız cihazın dedektör durumu bu aralığı incelememize el vermediği için, bizim ürettiğimiz filmlerin incelediğimiz bölgede herhangi bir kristalin düzleme sahip olup olmadığını söyleyemiyoruz.



Şekil 4.1 Kimyasal sprey püskürtme yöntemiyle n-Si altlık üzerine büyütülen FePc/Si filmlerin XRD deseni

4.1.2 FePc/Si Filmlerin Raman Analizi Sonuçları

FePc filmlerin Raman spektrum ölçümleri mikro Raman (confocal micro-Raman) sistemi ile filmin yüzeyinden alındı. Şekil 4.2’de n-Si(100) altlık üzerine kimyasal sprej püskürtme tekniği ile büyütülmüş FePc filmin Raman spektrumu görülmektedir. FePc filmin Raman spektrumu incelendiğinde 520 cm^{-1} de yer alan şiddetli Si pikinin altlıktan geldiği açıktır. FePc’ye ait pikler sırasıyla 483, 590, 683, 752, 831, 952, 1105, 1143, 1203, 1340, 1452 ve 1523 cm^{-1} dalga sayılarına karşılık gelmektedir. Bu piklerin hepsi diğer organik yarıiletken M-Pc’ler için de geçerlidir ve literatürle uyum içindedir. Bu Raman deseni göz önünde bulundurulduğunda, grafikte yer alan bağ piklerinin hangi bağlara karşılık geldiği Çizelge 4.1’de verilmiştir.



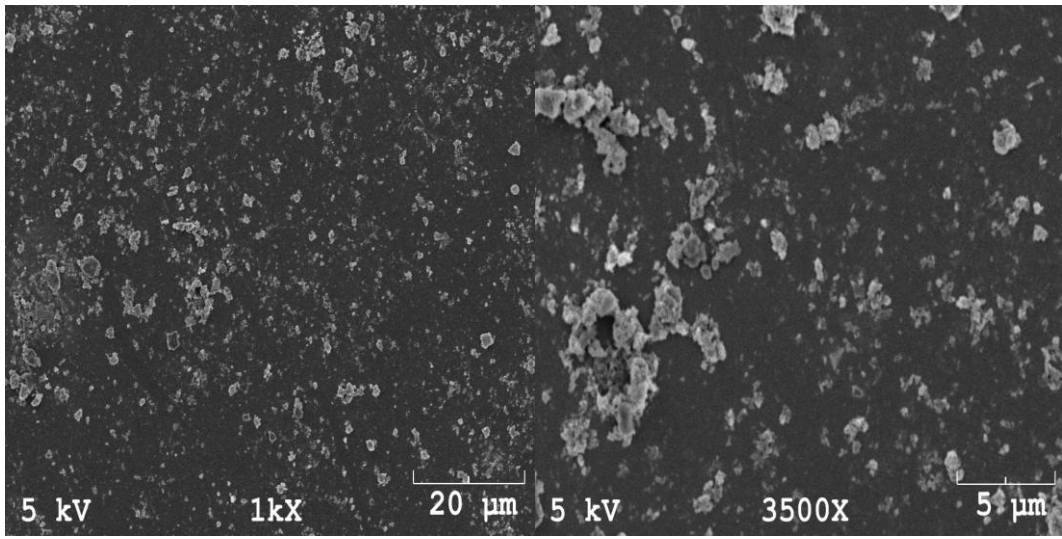
Şekil 4.2 n-Si(100) altlık üzerine büyütülmüş FePc/Si filmlerin Raman spektrumu

Çizelge 4.1 Raman Aktif Kipleri ve Bağ Çeşitleri

Dalga Sayısı (cm^{-1})	Bağ Çeşitleri	Bağ Sayısı	Raman Aktif Kipleri			Bağ uzunluğu veya açının dereceleri
			A_{1g}	B_{1g}	B_{2g}	
483	$C_{\alpha}-C_{\beta}-C_{\beta}$	8	1	1	1	106.5°
590	$C_{\alpha}-C_{\beta}$	8	1	1	1	$1.450 A^{\circ}$
683	$N_{\alpha}-C_{\alpha}-C_{\beta}$	8	1	1	1	110.0°
752	$C_{\alpha}-C_{\beta}-C_{\gamma}$	8	1	1	1	131.8°
831	$C_{\beta}-C_{\beta}-C_{\gamma}$	8	1	1	1	121.7°
952	$H-C_{\gamma}-C_{\beta}$	8	1	1	1	121.5°
1105	$C_{\alpha}-C_{\beta}$	8	1	1	1	$1.450 A^{\circ}$
1143	$C_{\alpha}-N_{\beta}$	8	1	1	1	$1.322 A^{\circ}$
1203	$H-C_{\gamma}-C_{\delta}$	8	1	1	1	121.5°
1340	$C_{\beta}-C_{\gamma}$	8	1	1	1	$1.395 A^{\circ}$
1452	$N_{\beta}-C_{\alpha}-C_{\beta}$	8	1	1	1	122.5°
1523	$C_{\alpha}-N_{\beta}-C_{\alpha}$	4	1	1	0	121.3°

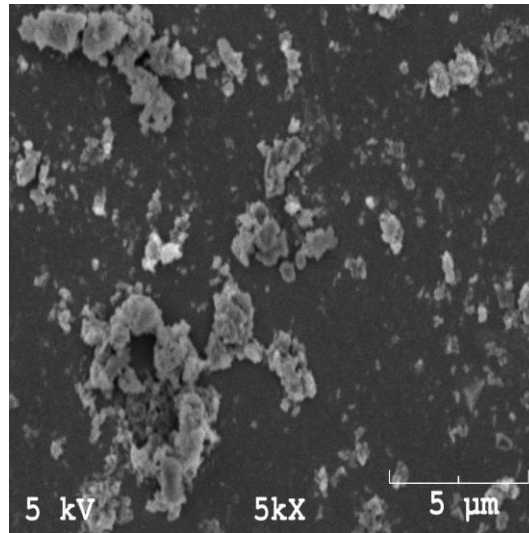
4.1.3 FePc Filmlerin SEM Sonuçları

FePc filmlerin yüzey morfolojileri farklı büyütme ölçekleri kullanılarak SEM incelemeleri ile yapılmıştır ve Şekil 4.3’de FePc/Si numuneler için yüzey mikro fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.3’de görüldüğü gibi büyütülen filmlerin yüzey görüntülerinden bu filmlerin yüzeylerinin çok homojen olmadığı ve çeşitli büyüklüklerde adacık şeklinde birikmeler olduğu gözlenmiştir. Kimyasal spreyle püskürtme tekniği ile üretilen filmlerin yüzey özellikleri literatürde incelendiğinde genel olarak bizim filmimizde karşılaştığımız benzer özelliklerde oldukları görülmüştür. Büyütülen FePc filmlerin yüzey morfolojilerinin bu kadar düzensiz ve keyfi bir dağılımda olması üretim tekniğinin getirdiği bir sonuçtur.



(a)

(b)



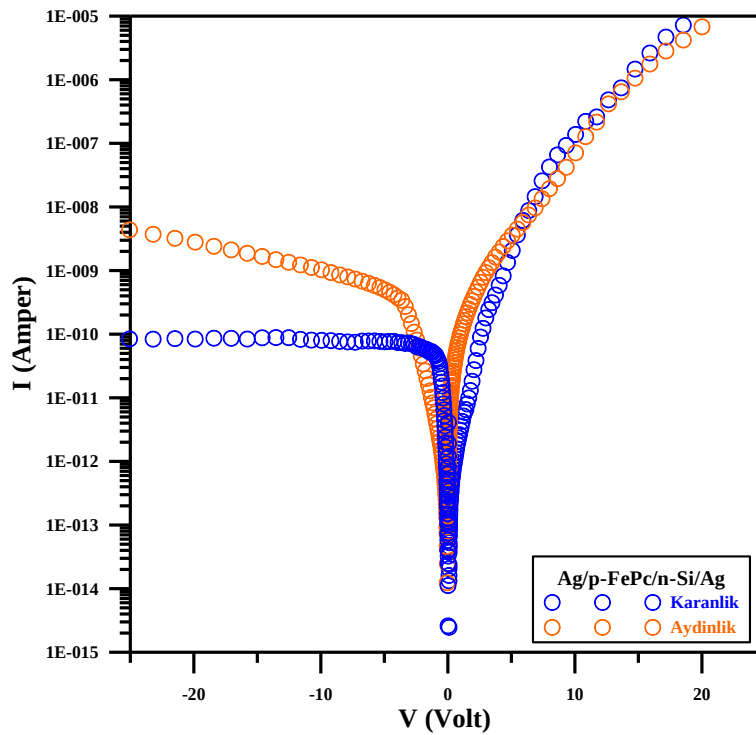
(c)

Şekil 4.3 (a-b-c) FePc/Si filmin yüzey görüntüsü (1000-3500-5000 büyütmede)

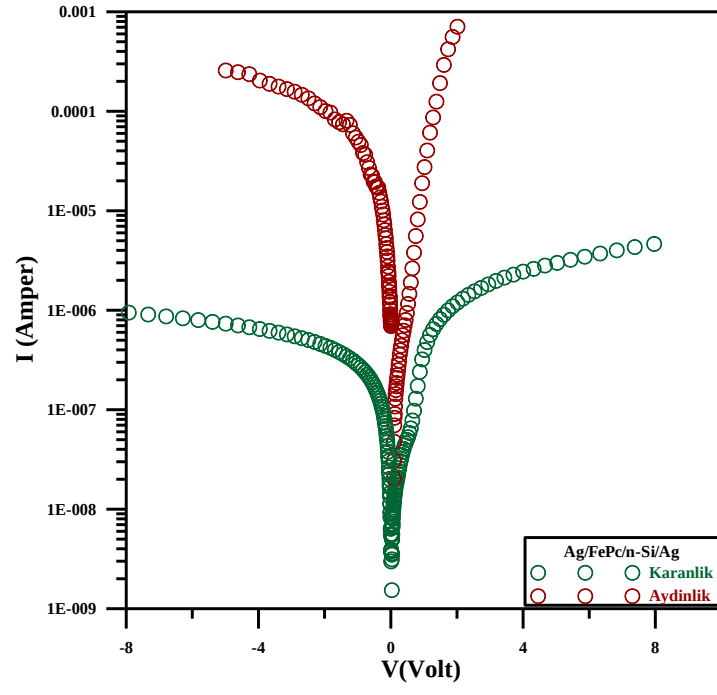
4.2 FePc/n-Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri

FePc/n-Si Eklemlerin elektriksel özelliklerini incelemek için örneklerimizi üretim proseslerine göre adlandırdık. Deneysel kısımda detaylı olarak anlatılan üretim özelliklerine göre; farklı çözeltilerle hazırlanan Örnek 1 ve Örnek 2 filmlerimizden p-n heteroeklemler üretilirken, Örnek 3 ve Örnek 4 filmlerinden hazırlanan p-n heteroeklemler ise sırasıyla 15 ve 30 dakika ısıtılma tabi tutularak üretilmiştir. Bu eklemlerin elektriksel özellikleri üç kısımda incelendi. İlk olarak eklemlerimizin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-gerilim karakteristikleri incelenerek, diyot parametreleri belirlendi. İkinci aşamada ise eklemlerin iletim mekanizmaları belirlendi. Son olarak eklemlerin kapasitans-gerilim ölçümleri incelenerek bu ölçümlerden ilgili parametreler hesaplandı.

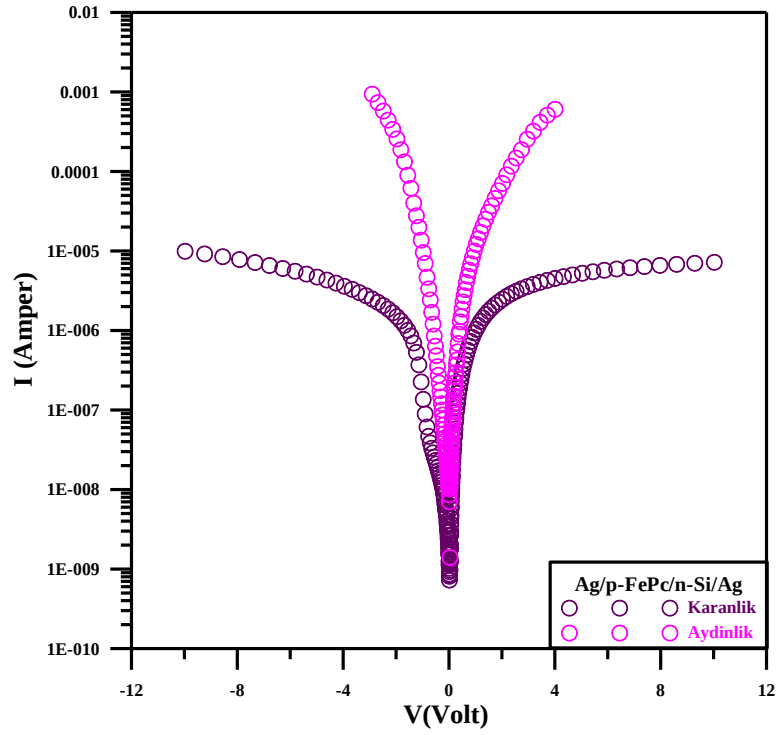
4.2.1 FePc/n-Si Eklemlerin Karanlık ve Aydınlıktaki Akım-Gerilim Karakteristikleri



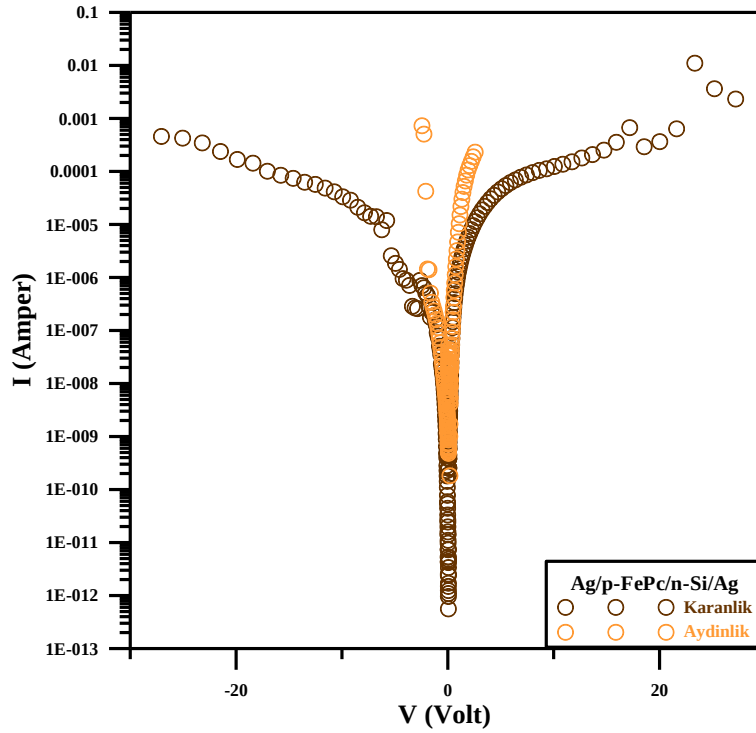
a) Örnek 1



b) Örnek 2



c) Örnek 3

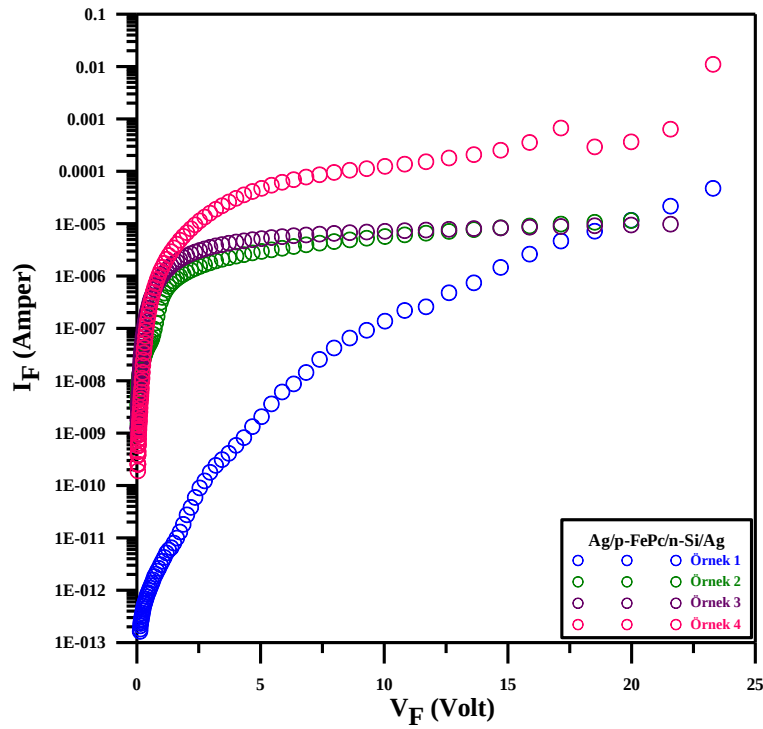


d) Örnek 4

Şekil 4.4 (a,b) Farklı çözeltilerde hazırlanan, (c,d) farklı çözeltilerde ve tavlama işlemi uygulanarak hazırlanan FePc/n-Si heteroeklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri

Şekil 4.4 a,b,c ve d'de p-FePc/n-Si heteroeklemlere ait yarı logaritmik akım-gerilim grafiği verilmiştir. Örnek 1'e ait olan akım-gerilim grafiğinde görüldüğü üzere bu eklemelerin belirli oranda doğrultma özellikleri ve ışığa duyarlılıkları mevcuttur (Çizelge 4.2). Bu eklemelerin doğru yöndeki akım-gerilim grafiğinin termo iyonik bölgesi göz önünde bulundurularak hesaplanan temel diyet parametrelerinden ideallik faktörü ve bariyer yüksekliği ($n=1.91$, $\Phi_B=0.97$ eV) Çizelge 4.2'de yer almaktadır. Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere bu eklemelerin ideallik faktörünün ~ 2 'ye yakın olması bu eklemelerde rekombinasyon mekanizmasının baskın olduğu anlamına gelir. İdeallik faktörü; eklem bölgesindeki tuzak merkezleri, katkı seviyeleri ve kusur seviyeleri gibi çeşitli etkenlerden dolayı ~ 1 (termo iyonik akım mekanizmasının baskın olma durumu) değerinden uzaklaşmaya başlar. İdeallik faktörünün 1 değeri en ideal diyet durumudur. Şekil 4.4 b'de yer alan Örnek 2'nin yarı logaritmik akım-gerilim grafiğinden bu eklemelerin doğrultma özelliğinin düşük olduğu buna karşılık foto duyarlılığının yaklaşık 350 kat civarında olduğu görülmektedir (Çizelge 4.2). Bu eklemelerin ideallik faktörü Örnek 1'dekine yakın bir değerde çıkmıştır ve aynı şekilde bu eklemelerde de rekombinasyon akım mekanizmasının baskın olduğu söylenebilir. Bu iki eklemelerin üretim prosesindeki tek fark çözeltinin yüzde olarak değişimidir ve iki eklem de kaplamadan sonra ısıtılma işlemine tabi tutulmamıştır. Bu iki eklem karşılaştırıldığında Örnek 1 ile hazırlanan heteroeklemlerin elektriksel özelliklerinin daha iyi olduğu anlaşılmıştır. Örnek 3 ve Örnek 4; bu çözelti yüzdesiyle

hazırlanmış olup, sırasıyla 15 dakika ve 30 dakika ısıtılma tabi tutularak üretilmiştir. Şekil 4.4 c ve d'de Örnek 3 ve Örnek 4'e ait olan yarı logaritmik akım-gerilim grafikleri yer almaktadır. Tavlama işleminin etkisiyle her iki örneğin doğrultma özellikleri düşük çıksa da eklemlerin foto duyarlılıklarında çok büyük bir iyileşme görülmüştür (Çizelge 4.2). Her iki eklemde de ideallik faktörü ve bariyer yüksekliği karşılaştırıldığında, tavlamanın etkisiyle ideallik faktörleri diyotların ideal değeri olan 1'e doğru yaklaşırken bariyer yüksekliklerinin de birbirine yakın değerlerde çıktığı görülmüştür. Ayrıca tavlama süresinin uzatıldığı Örnek 4 için ideallik faktörünün en ideal değere yakın olması; tavlama işleminin eklemlerin elektriksel özelliklerini iyileştirebileceğini göstermiştir. İdeallik faktörünün, ısıtılma uygulanan eklemlerde 1'e yakın olması ayrıca bu eklemlerde termo iyonik emisyon mekanizmasının baskın hale geldiğini göstermektedir. Bu olay Örnek 3 ve Örnek 4 numaralı heteroeklemlerin kontak bölgesinde meydana gelen çeşitli safsızlık seviyelerinin, tavlamanın etkisiyle azaltılması (rekombinasyon ve jenerasyon olaylarının oluşma olasılıklarının azaltılması) olarak açıklanabilir.



Şekil 4.5 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim (I_F - V_F) karakteristikleri

Şekil 4.5’de verilen $\ln I$ - V grafiğinin $V_F < 3kT/q$ bölgesinin yani termo iyonik emisyon mekanizmasının baskın olacağı bölgenin akım gerilim ilişkisi aşağıdaki gibi incelenmiştir. Doğru yön akımının

$$I = I_0 \exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{qV}{kT}\right)\right] \quad (4.1)$$

$$I_F = I_0 \exp[AV_F - 1] \quad (4.2)$$

ifadesiyle orantılı olduğu bilinmektedir. I_0 doyum akımını belirtir ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_{B0}}{kT}\right) \quad (4.3)$$

ifadesiyle değişir. Bu denklemdeki A^* Richardson sabitini, A alanı, q elektrik yükünü ve k Boltzman sabitini temsil eder. Eşitlik (4.2)’deki A eğimi temsil eder ve iletim mekanizmasına göre sıcaklığa bağlı olarak değişebilir ve Eşitlik (4.4) ile ifade edilir;

$$A = \frac{d \ln I_F}{dV_F} \quad (4.4)$$

ideallik sabiti,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (4.5)$$

bariyer yüksekliği,

$$\phi_{B0} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (4.6)$$

şeklinde verilir. Anlaşılabileceği üzere, n , ϕ_B ve A diyodun performansı ile doğrudan ilişkilidir ve etkin akım mekanizmaları için ipuçlarını verir. Eğer akım, tünelleme akımı ise A sıcaklıktan bağımsız ve I_0 ’ın sıcaklığa bağıllığı,

$$I_0 \propto \exp[-E_A/kT] \quad (4.7)$$

ifadesiyle orantılı olur. Öte yandan, akım fakirleşme bölgesindeki rekombinasyon akımından oluşmuş ise,

$$A = \frac{q}{\eta kT} \quad (4.8)$$

olacaktır.

İdealite değeri bu durum için 1 ve 2 aralığında bulunur. I_0 ise sıcaklığa bağlı olarak

$$I_0 \propto \exp[-E_G/2kT] \quad (4.9)$$

ifadesiyle değişir. Difüzyon akımı etkin ise, A ve doyum akımı $A = \frac{q}{kT}$ ve $I_0 \propto \exp[-E_G/kT]$

ifadeleriyle değişir. Son olarak termoiyonik emisyon akımı için ise bu ifadeler,

$$A = \frac{q}{kT} \text{ ve } I_0 \propto \exp\left[-\frac{\phi_B}{kT}\right] kT^{3/2} \quad (4.10)$$

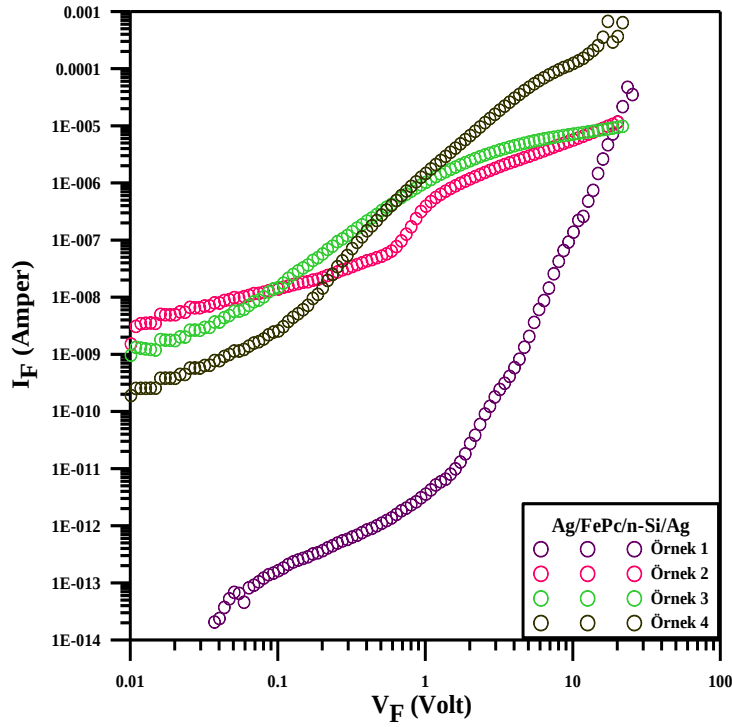
şeklindedir.

Çizelge 4.2 Ag/p-FePc/n-Si/Ag eklemlerin temel diyot parametreleri

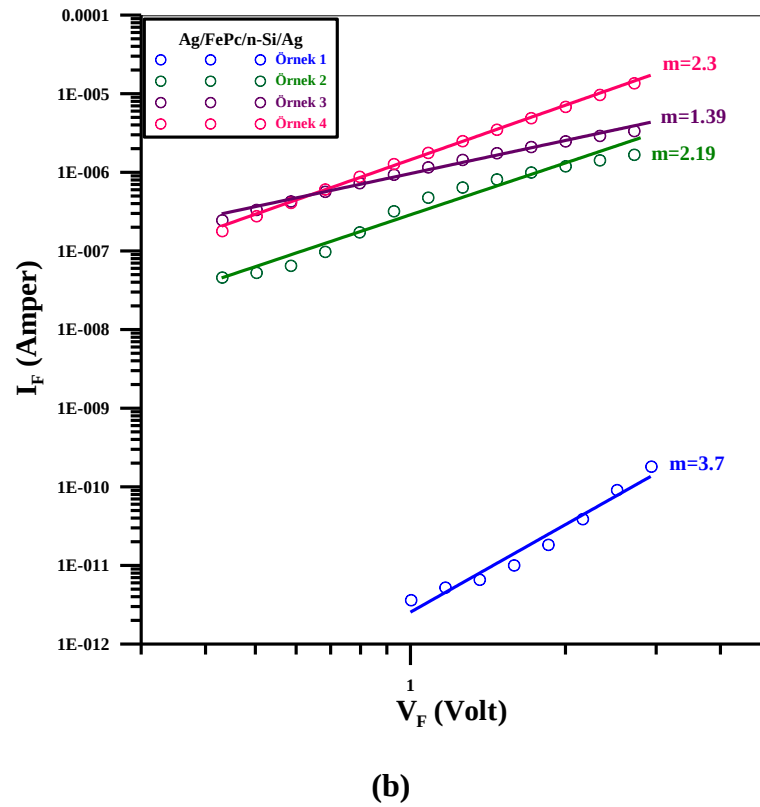
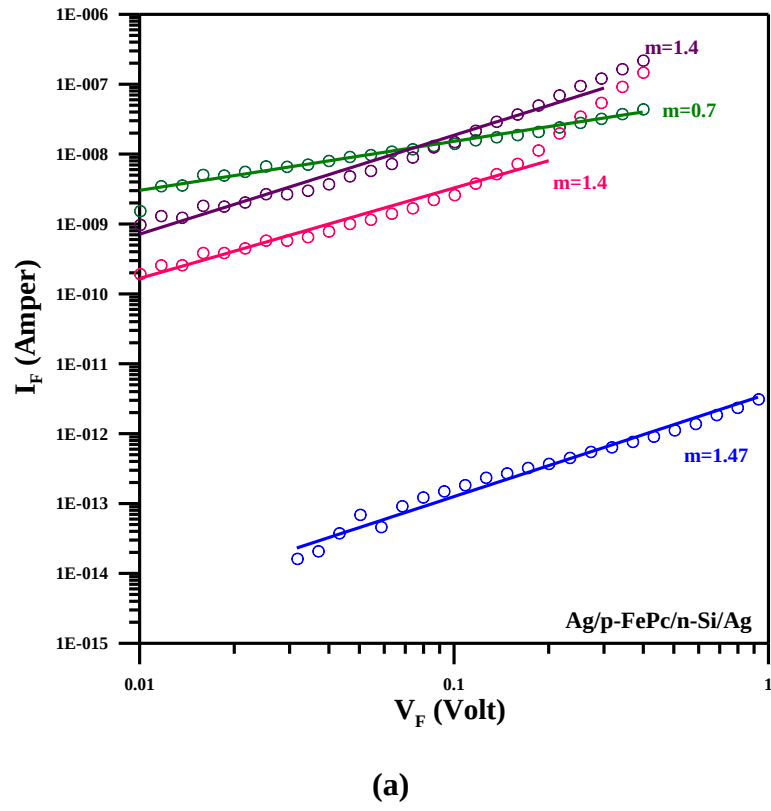
	η	B.Y	Doğrultma Katsayısı	Fotoduyarlılık	V_{OC}
Örnek 1	1.91	0.97	8×10^3	15	5mV
Örnek 2	1.97	0.75	10	350	92mV
Örnek 3	1.48	0.77	-	400	400mV
Örnek 4	1.09	0.82	25	1500	100mV

4.2.2 FePc/n-Si Eklemlerin İletim Mekanizmaları

FePc/n-Si heteroeklemlerin iletim mekanizmalarını incelemek için öncelikle doğru (V_F) ve ters (V_R) besleme gerilimleri altındaki durumlarını inceledik. FePc/n-Si eklemlerin doğru beslemedeki akım-gerilim ilişkisi Şekil 4.6’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ısıtıl işlem uygulanan örnekler benzer bir akım mekanizması gösterirken diğer örnekler daha farklı bir akım mekanizması göstermiştir. Bu eklemlerin doğru beslemedeki akım-gerilim ilişkisini anlamak için, tam logaritmik akım-gerilim grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler, düşük ve yüksek elektrik alanlı iki bölge seçilerek incelenmiştir.

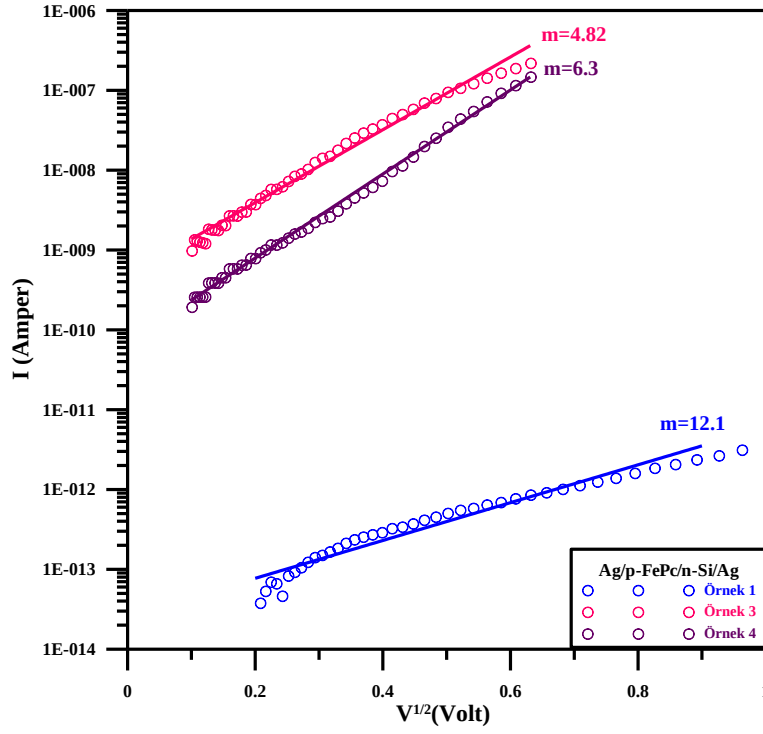


Şekil 4.6 Ag/FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin tam logaritmik akım-gerilim ($\ln I$ - $\ln V$) karakteristikleri



Şekil 4.7 Ag/p-FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için

$\ln I_F - \ln V_F$ karakteristikleri



Şekil 4.8 Ag/FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin düz besleme altında düşük gerilimlerdeki $\ln I-V^{1/2}$ karakteristikleri

Doğru besleme altında düşük ve yüksek elektrik alanına sahip iki bölgeye ayrılmış tam logaritmik akım-gerilim grafikleri Şekil 4.7 a ve b’de verilmiştir. FePc/n-Si eklemlerin düşük elektrik alan bölgesinde ($0.01 < V_F < 0.4$) $\ln I-\ln V$ grafikleri incelendiğinde bu bölgedeki Örnek 1, Örnek 3 ve Örnek 4’e ait doğruların eğimleri yaklaşık olarak aynı çıkmıştır. Bu da bize bu bölgede eklemlerin aynı akım mekanizmalarını kullandığını gösterir. Örnek 2’ye ait doğrunun eğim değerine göre, bu eklemin omik özellik gösterdiğini söyleyebiliriz. Bu eklemlerin düşük elektrik alan bölgesindeki akım mekanizmalarını anlamak için çizilen Şekil 4.8’deki $\ln I-V^{1/2}$ grafiklerinin eğimlerinden üç örnek için deneysel bir beta (β) değeri bulunmuştur. Denklem (4.13) yardımı ile yapılan hesaplamalarda bu deneysel değerlerin teorik olarak hesapladığımız beta değerleri (Schottky ve Pool-Frenkel akım mekanizmaları için β değerleri sırası ile $1.87 \times 10^{-5} \text{ eV}(V^{1/2} \text{ m}^{-1/2})$, $3.75 \times 10^{-5} \text{ eV}(V^{1/2} \text{ m}^{-1/2})$ hesaplanmıştır) ile karşılaştırmaları yapılarak hangi mekanizmaların geçerli olduklarını tespit etmiş olduk. Zaten düşük alan emisyonu mekanizmaları olan Pool-Frenkel ve Schottky akım mekanizmalarından birinin bu bölgede baskın olduğunu bu diyotların idealite faktörlerinin değerlerine bakıldığında da söylemek mümkündür. Çünkü bu bölgelerde rekombinasyon olaylarından kaynaklanan taşıyıcıların akıma etkisi fazladır. Bu eklemlerin hepsi için bu bölgede düşük alan emisyon mekanizması olan tek bir akım mekanizmasının (Pool-Frenkel akım mekanizması) geçerli olduğunu tespit ettik.

Schottky akım mekanizması için akım,

$$I = A^* T^2 \exp\left(\frac{-\phi}{kT}\right) \exp\left(e\beta_s V^{1/2} / kTd^{1/2}\right) \quad (4.11)$$

Pool-Frenkel akım mekanizması için akım,

$$I = I_{PF} \exp(e\beta_{PF} V^{1/2} / kTd^{1/2}) \quad (4.12)$$

şeklinde ifade edilir. Burada β_s Schottky beta katsayısını, β_{PF} Pool-Frenkel beta katsayısını temsil eder.

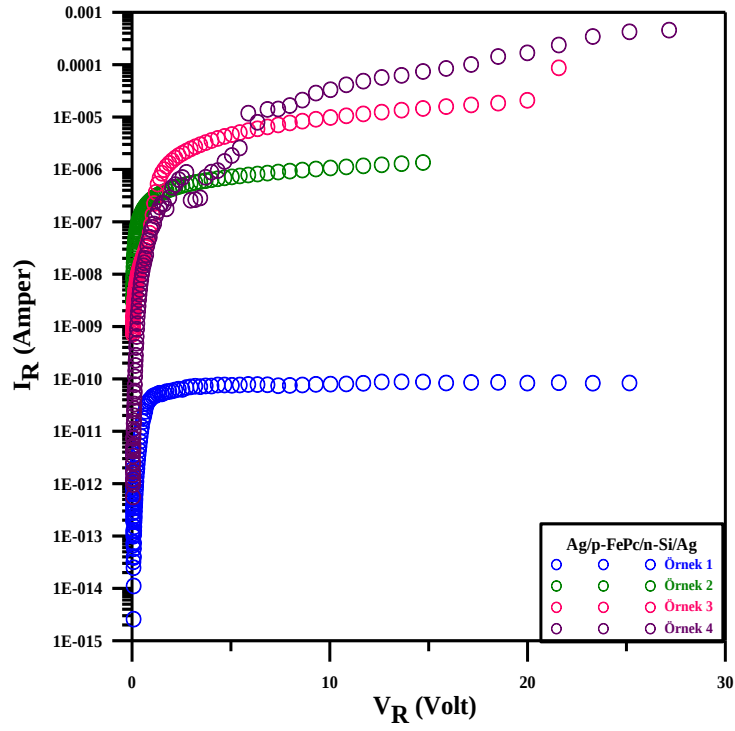
Teorik β değeri,

$$2\beta_s = \beta_{PF} = \left(\frac{e}{\pi\epsilon_{FePc}}\right)^{1/2} \quad (4.13)$$

denklemi kullanılarak hesaplanır. Bu denklemde “e” elektrik yükünü ve “ ϵ ” malzemenin elektriksel geçirgenliğini temsil eder.

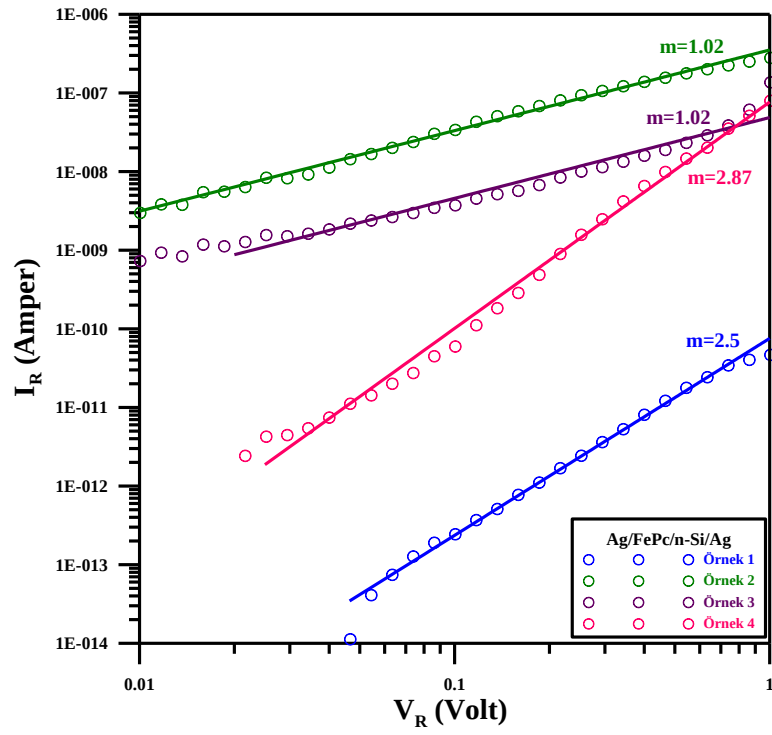
$\epsilon_{FePc} = 3.61 \times 10^{-11}$ F/m, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ değerleri Denklem (4.13)’de yerine konulduğunda, $\beta_s = 1.87 \times 10^{-5}$ eV(V^{1/2}m^{-1/2}), $\beta_{PF} = 3.75 \times 10^{-5}$ eV(V^{1/2}m^{-1/2}) olarak bulunur.

Şekil 4.7 b’de bu eklemelerin yüksek elektrik alan bölgesindeki ($V_F > 0.4V$) LnI-LnV grafikleri eğim değerleri ile verilmektedir. Yüksek elektrik alan bölgesinde ise Örnek 3 ile adlandırılan eklem akım mekanizmasının değişmediği grafikte görülmektedir. Bunun yanı sıra diğer eklem için LnI-LnV grafiğinin eğim değerleri ($I \propto V^m$) $m > 2$ olarak bulunmuştur. $m > 2$ olması da bize bu eklemelerin hepsi için uzay yük limitli akım (SCLC) mekanizmasının yüksek elektrik alan bölgesinde baskın olduğunu göstermektedir. Literatürde de yapılan benzer çalışmalarda bu iki elektrik alan bölgesine rastlanılmıştır ve bizim gözlemlediğimiz şekilde sırası ile değişen akım mekanizmalarının olduğu hakkında bilgiler verilmiştir. Özellikle yüksek elektrik alan bölgesinde, bu tür organik yarı iletkenlerden yapılan p-n heteroeklemeler için SCLC akım mekanizmasına literatürde sıkça rastlanılmaktadır. Bu açıdan da ürettiğimiz FePc/n-Si heteroeklemlerin elektriksel özellikleri literatürle uyum içerisindedir.

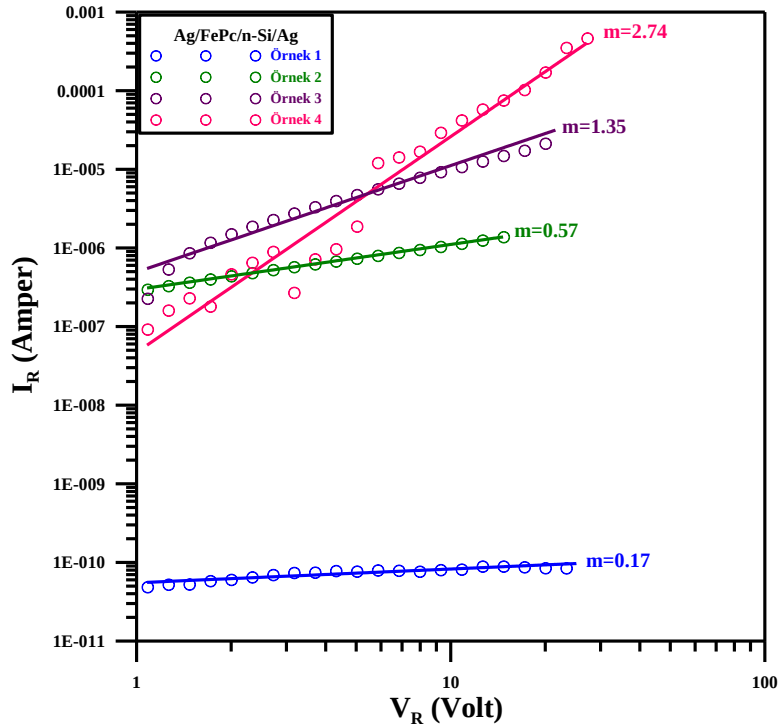


Şekil 4.9 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin yarı logaritmik akım-gerilim (I_R - V_R) karakteristikleri

FePc/n-Si eklemlerin ters besleme gerilim altındaki akım-gerilim ilişkisi Şekil 4.9'da gösterilmektedir. Aynı şekilde bu eklemlerin ters beslemede de düşük ve yüksek elektrik alan bölgelerini ayrı ayrı incelemek gereklidir (Şekil 4.10 (a)-(b)).



(a)

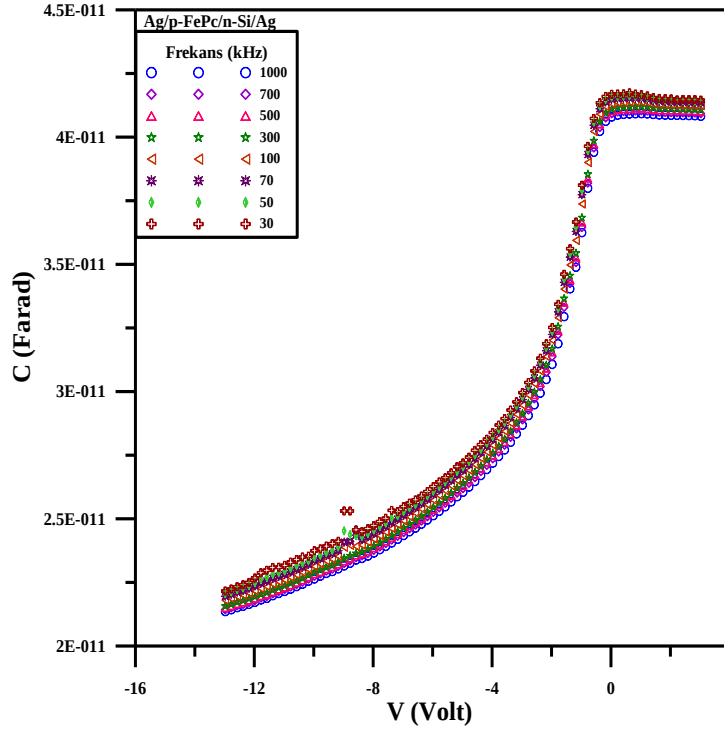


(b)

Şekil 4.10 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_R - V_R karakteristikleri

Şekil 4.10 a’da FePc/n-Si heteroeklemlerin düşük elektrik alan bölgesindeki ($0.01V < V_R < 0.4V$) $\ln I$ - $\ln V$ grafiği verilmiştir. Bu grafikteki eğim değerleri incelendiğinde, Örnek 1 ve Örnek 4 olarak adlandırılan eklemlerin eğimleri $m > 2$ olduğu için bu eklemlerde SCLC akım mekanizmasının baskın olduğunu söyleyebiliriz. Örnek 2 ve Örnek 3 eklemlerin eğim değerlerinin $m \sim 1$ civarında olması nedeniyle bu eklemlerin omik özellik gösterdiğini söyleyebiliriz. FePc/n-Si eklemlerin yüksek elektrik alan bölgesindeki ($V_R > 0.4V$) akım-gerilim ilişkisi Şekil 4.10 b’de verilmiştir. Bu grafikteki eğim değerleri incelendiğinde, Örnek 4 eklemının akım mekanizmasında bir değişiklik gözlenmediği görülmüştür. Örnek 3 eklemının $\ln I$ - $V^{1/2}$ grafiği incelendiğinde, bu eklemdede etkin akım mekanizmasının Schottky akım mekanizması olduğu tespit edilmiştir. Örnek 1 ve Örnek 2 eklemlerinin yüksek elektrik alan bölgesinde $\ln I$ - V grafiklerine bakıldığında ise verilen gerilimle bu örneklerin akımlarında bir değişikliğin gözlenmediği yani doyma akımına ulaştıktan sonra akımın bu değer civarında sabit kaldığı görülmüştür.

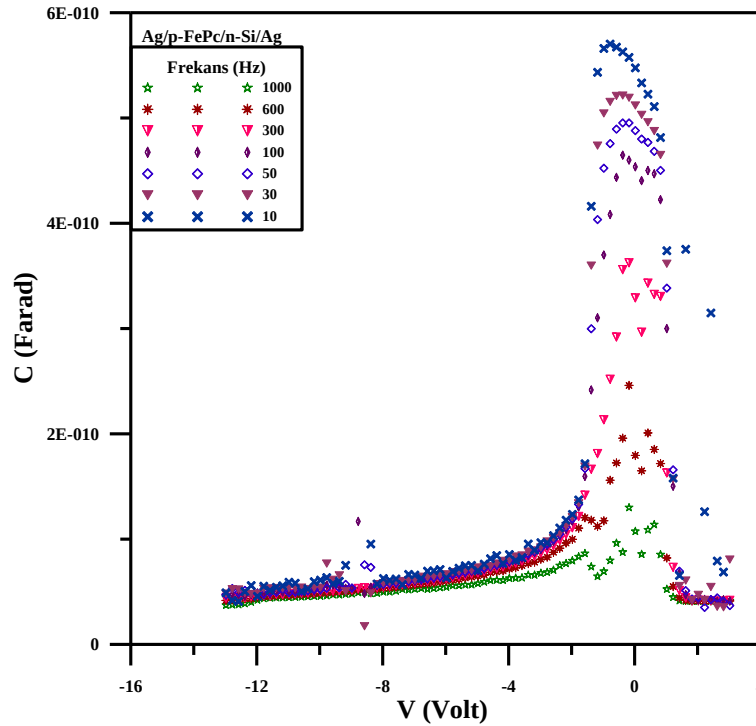
4.2.3 FePc/n-Si Eklemin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri



Şekil 4.11 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemin yüksek frekanslardaki C-V karakteristiği

Bir p-n heteroeklemin sığa-gerilim incelemeleri iki türlü yapılabilir. Bunlardan ilki; bir MOS tipi diyot kapasitans-gerilim analizi yapılmış gibi incelenir. Diğeri ise, bir p-n heteroeklemin kapasitans-gerilim analizi göz önünde bulundurularak akım mekanizmasına bağlı olarak incelenir. Biz burada p-n eklemlerin C-V grafiklerini MOS tipi diyotun C-V analizini yapılmış gibi inceledik. p-FePc/n-Si heteroekleminin sığa-gerilim ilişkisi, oda sıcaklığında 1Hz-1MHz frekans aralığında incelenmiştir. Uygulanan frekans değişimine göre C-V grafikleri, yüksek frekans ve düşük frekans değerleri için Şekil 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.11’de yüksek frekans uygulamalarında voltaj değişimi ile eklemlerin yığılma bölgesi ve ters yığılma bölgeleri arasındaki geçişler ile ikisi arasındaki fakirleşme bölgesi düzgün bir şekilde görülmektedir. C-V değişimindeki $V > 0$ bölgesinde (yığılma bölgesinde), yüksek frekanslardaki değişimler için gerilimden bağımsız sabit bir sığa değeri görülmektedir. Aynı zamanda bu bölgenin frekans ve gerilim ile değişmemesi bu bölgeye ekstra bir fazlalık yük geçişi olmadığını yani kusurların ve azınlık yük taşıyıcılarının etkisinin ihmal edilebileceği bir etki göstermektedir. P-n heteroeklemler için yüksek frekanslardaki C-V grafiğinin düz bant bölgesi incelendiğinde, düz bant sığasının herhangi bir şekilde frekansa bağlı olmadığı görülmektedir. Düz bant voltajı (V_{FB}) ise grafikten -2V olarak bulunmuştur. Düz bant bölgesindeki bu kayma film ile altlık arasında oluşmuş olabilecek doğal SiO_2 yalıtkan

tabakasının yük dağılımına bağlıdır. Zaten düşük frekanslardaki yığılma bölgesindeki saçılmalar da bu yalıtkan tabakanın varlığının bir ispatıdır. Yüksek frekanslarda deplasyon bölgesinde herhangi bir saçılma olmaması nedeni ile $1/C^2$ -V grafiği bu yüksek frekans değerleri kullanılarak çizilmiştir ve bu bölgeden oluşum potansiyeli (V_{bi}), katkılama miktarı (N_d) hesaplanmıştır. Bu eklemlerin kapasitans-gerilim özellikleri düşük frekanslardaki değişim ile incelendiğinde yığılma bölgesinde yüksek bir frekansa bağımlılık görülmektedir (Şekil 4.12). Bu eklemlerin C-V grafiğinde frekansın azalması ile birlikte saçılmaların arttığı gözlemlenmiştir. Düşük frekanslarda rastlanılan bu saçılma olayı genellikle MIS (metal-yalıtkan-yarıiletken) tipi diyotların sığa-gerilim değişimlerinde görülmektedir ve bu saçılma, genellikle ara yüzeydeki yalıtkan tabakanın etkisi ile açıklanabilir. Bizim örneklerimizde ise bu durum, kusurlar ve azınlık yük taşıyıcılarından yığılma bölgesinin kapasitansına katkısının açık bir şekilde yansımaktadır. Ayrıca filmlerin kaplandığı Si altlığın yüzey kısmında beklenen doğal bir SiO_2 yalıtkan tabakasının varlığı kapasitans-gerilim ilişkisindeki bu olay ile desteklenir. Yığılma bölgesinde oluşan fazlalık yük taşıyıcılarının etkisi fakirleşme bölgesinden ters yığılma bölgesine olan geçişin yani düz bant bölgesinin düşük bir gerilim aralığında olmasına neden olmuştur. Dolayısıyla ters yığılma bölgesinin bitiminde başlayan fakirleşme bölgesinin içerisinde belli bir frekans bağımlılığı gözlemlenmiştir. Bu eklemlerde ters yığılma bölgesinde herhangi bir frekansa bağımlılık gözlemlenmemiştir. Bu sonuç, düşük frekanslarda FePc için azınlık yük taşıyıcı olan elektronların yığılma bölgesinde fazladan oluştuğunu gösterirken ters yığılma bölgesinde herhangi bir fazlalık yük değişimi görülmemektedir.



Şekil 4.12 Ag/FePc/n-Si eklemin düşük frekanslardaki C-V karakteristiği

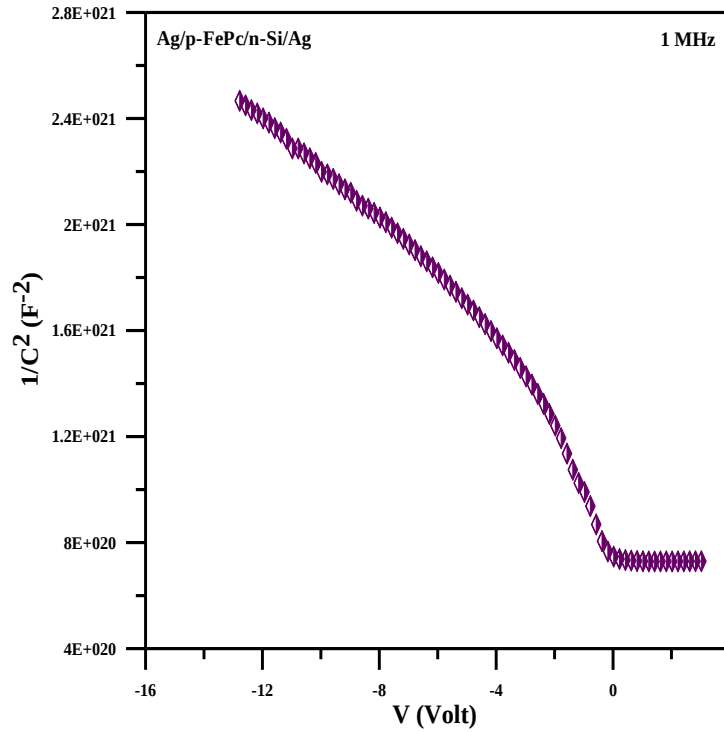
Şekil 4.12'deki grafik incelendiğinde düşük frekansların $V > 0$ bölgesinde frekansa bağlılık açıkça görülmektedir. Azınlık yüklerinin ve arayüzeyde var olabilecek kusurların etkilerini ihmal edebilmek için, 100kHz ve üstündeki frekans değerlerindeki C-V eğrileri kullanılarak katkılama miktarı ve oluşma potansiyeli bulunabilir. Anderson keskin eklem difüzyon modeline göre kapasitans,

$$C = \left\{ \frac{qN_D N_A \epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_0}{2N_D \epsilon_1 + N_A \epsilon_2} \frac{1}{(V_{bi} - V_R)^{1/2}} \right\} \quad (4.14)$$

ile ifade edilmiştir. N_D ve N_A FePc ve n-Si yarıiletken taşıyıcı konsantrasyonları ve $\epsilon_1(\epsilon_2)$, FePc(n-Si)'nin dielektrik geçirgenliği (permitivite), V_{bi} ise oluşma potansiyelidir.

$$N_D = \frac{2}{qS^2 \epsilon \left(\frac{d(1/C^2)}{dV} \right)} \quad (4.15)$$

C-V grafiklerinden deplasyon bölgesinin uzunluğu; X_n ve X_p uzunlukları (yani p ve n tipi katkı bölgelerinin uzunlukları) hesaplanarak bulundu. $X_n \gg X_p$ olduğu için tek yönelimli bir deplasyon bölgesi varmış gibi düşünülerek N_D , bu bölgenin uzunluğundan hesaplandı.



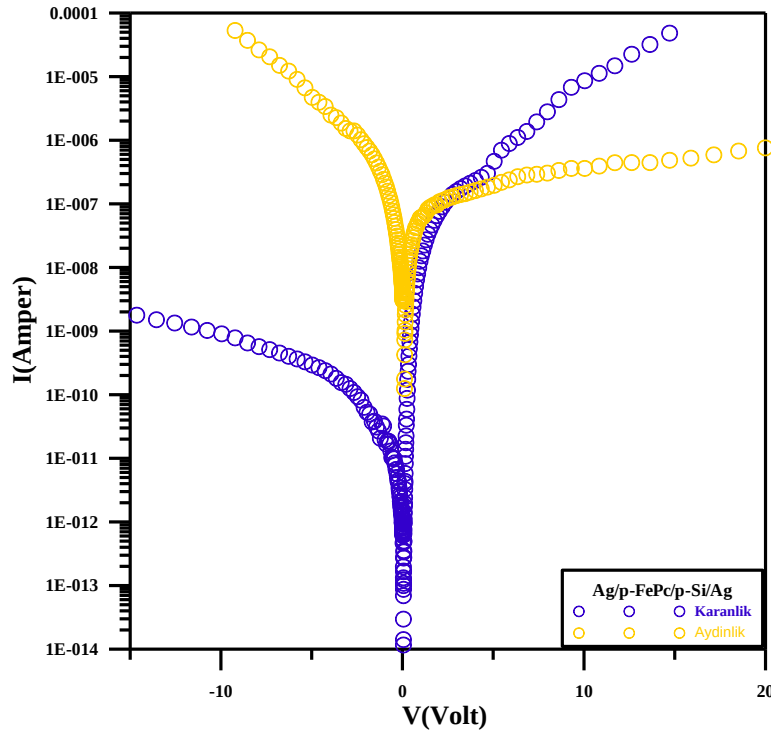
Şekil 4.13 Ag/FePc/n-Si/Ag eklemine 1 MHz frekansta $1/C^2$ -V karakteristiği

Şekil 4.13'deki FePc/n-Si eklemin 1MHz frekanstaki $1/C^2$ -V eğrisi ekstreple edilerek gerilim eksenini kestiği nokta belirlenirse bu değer oluşma potansiyelini gösterir. Şekil 4.13'den elde edilen bu değer $0.60 \pm 0.05V$ civarında olduğu anlaşılmıştır. $1/C^2$ -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun (N_d) değeri $4 \times 10^{22} m^{-3}$ olarak belirlenmiştir.

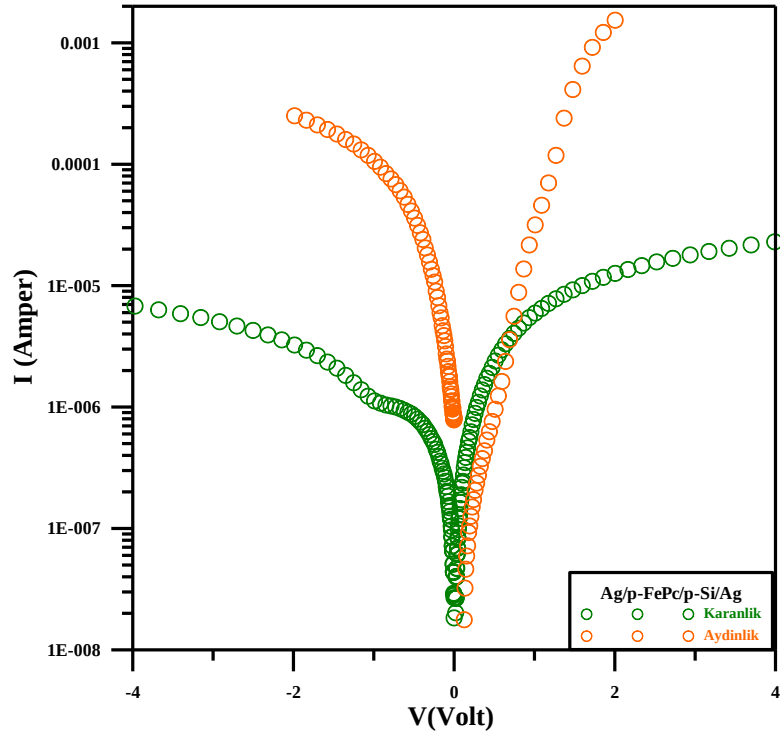
4.3 FePc/p-Si Eklemlerin Elektriksel Özellikleri

FePc/p-Si eklemlerin elektriksel özelliklerini incelemek için örneklerimizi Bölüm 4.2'de olduğu gibi üretim proseslerine göre adlandırdık. Deneysel kısımda detaylı olarak anlatılan üretim özelliklerine göre; farklı çözeltilerle hazırlanan Örnek 5 ve Örnek 6 filmlerimizden p-p heteroeklemler üretilirken, Örnek 7 ve Örnek 8 filmlerinden hazırlanan p-p heteroeklemler ise sırasıyla 15 ve 30 dakika ısıtılma tabi tutularak üretilmiştir. Bu eklemlerin elektriksel özellikleri üç kısımda incelendi. İlk olarak eklemlerimizin karanlık ve aydınlık ortamlardaki akım-gerilim karakteristikleri incelenerek, diyot parametreleri belirlendi. İkinci aşamada ise eklemlerin iletim mekanizmaları belirlendi. Son olarak eklemlerin kapasitans-gerilim ölçümleri incelenerek bu ölçümlerden ilgili parametreler hesaplandı.

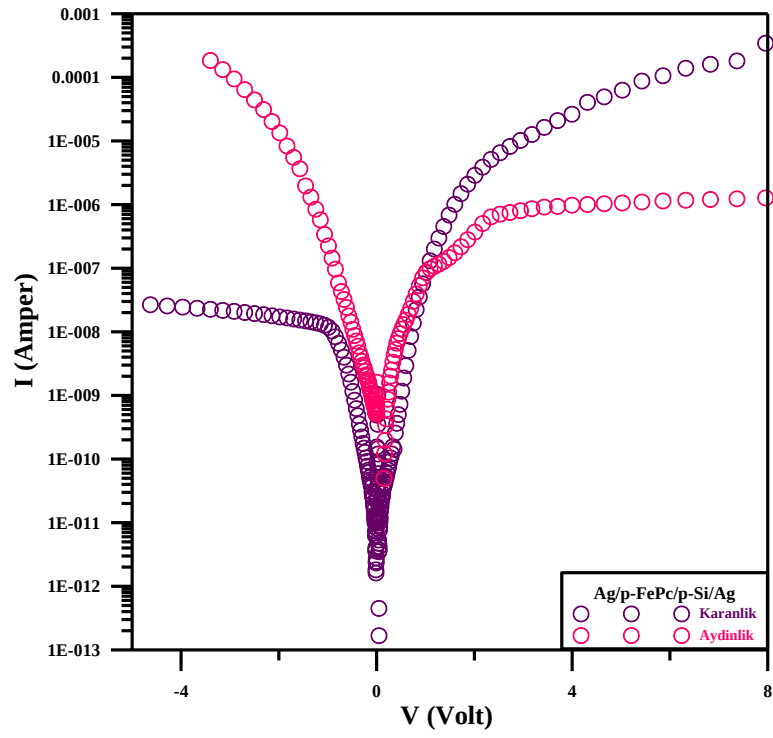
4.3.1 FePc/p-Si Eklemlerin Karanlık ve Aydınlıktaki Akım-Gerilim Karakteristikleri



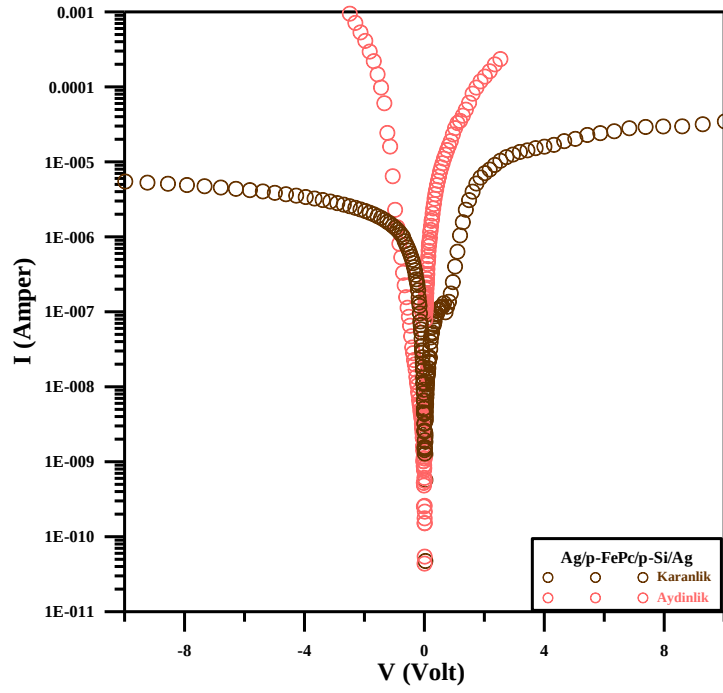
(a) Örnek 5



(b) Örnek 6



(c) Örnek 7



(d) Örnek 8

Şekil 4.14 (a,b) Farklı çözeltilerde hazırlanan, (c,d) farklı çözeltilerde ve tavlama işlemi uygulanarak hazırlanan FePc/p-Si heteroeklemlerin karanlık ve aydınlıktaki yarı logaritmik akım-gerilim karakteristikleri

Şekil 4.14 a-b-c-d’de FePc/p-Si eklemlerin oda sıcaklığında aydınlık ve karanlıktaki yarı logaritmik akım-gerilim ilişkisini gösteren grafikler yer almaktadır. Örnek 5’e ait akım-gerilim grafiğine bakıldığında bu eklemin belirli oranda doğrultma özelliği gösterdiği görülmektedir. Bu eklemin doğru yöndeki akım-gerilim grafiğinin termoiyonik bölgesi göz önünde bulundurularak hesaplanan temel diyot parametrelerinden ideallik faktörü $\eta = 1.18$, bariyer yüksekliği $\Phi_B = 0.98$ eV olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3). Şekil 4.14 b’de gösterilen Örnek 6’ya ait akım-gerilim grafiğinden bu eklemin doğrultma ve fotoduyarlılık özelliklerinin düşük olduğu görülmektedir. Bu eklemin ideallik faktörü $\eta = 1.6$, bariyer yüksekliği $\Phi_B = 0.66$ eV olarak hesaplanmıştır. Örnek 5 ve Örnek 6 eklemleri, aynı çözeltinin farklı yüzdelерinde hazırlanarak üretilmiştir. Örnek 7 ve Örnek 8 eklemleri ise yine bu çözeltilerle hazırlanmış olup, sırasıyla 15 ve 30 dakika ısıtma işlemi tabi tutularak üretilmiştir. Şekil 4.14c ve d’de Örnek 7 ve Örnek 8’e ait yarı-logaritmik akım-gerilim grafikleri yer almaktadır. Örnek 7’ye ait akım-gerilim grafiği incelendiğinde tavlamanın etkisiyle bu eklemin doğrultma ve fotoduyarlılık özelliklerinde belirgin bir iyileşmenin görüldüğü anlaşılmaktadır. Örnek 8’e ait akım-gerilim grafiği göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalarda ise bu eklemin temel diyot parametrelerinden ideallik faktörünün $\eta = 1.95$, bariyer yüksekliğinin $\Phi_B = 0.72$ eV olduğu bulunmuştur.

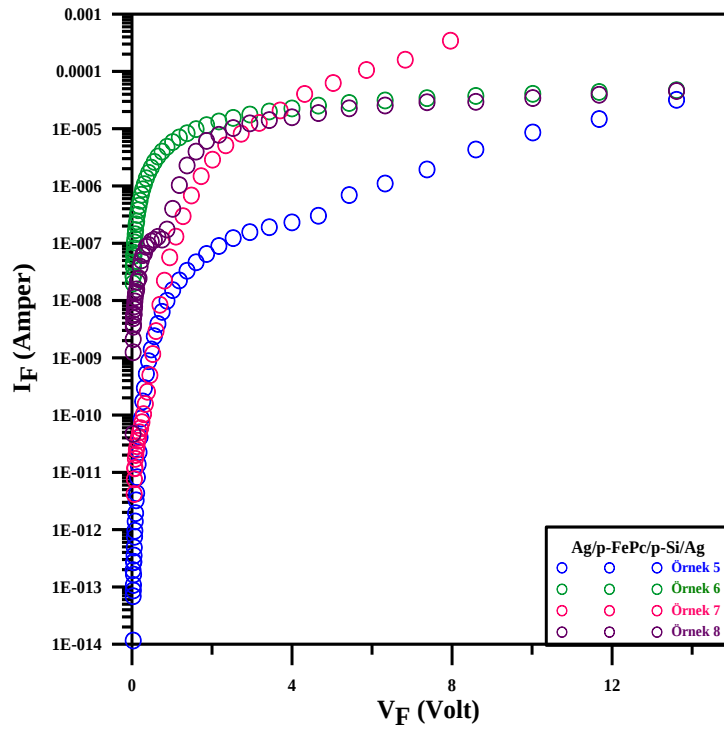
İdeallik faktörüne bakılarak bu eklemden rekombinasyon olaylarından meydana gelen akım mekanizmalarının baskın olduğu söylenebilir. Çizelge 4.3’de dört örneğimize ait temel diyot parametreleri verilmiştir.

Çizelge 4.3 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin temel diyot parametreleri

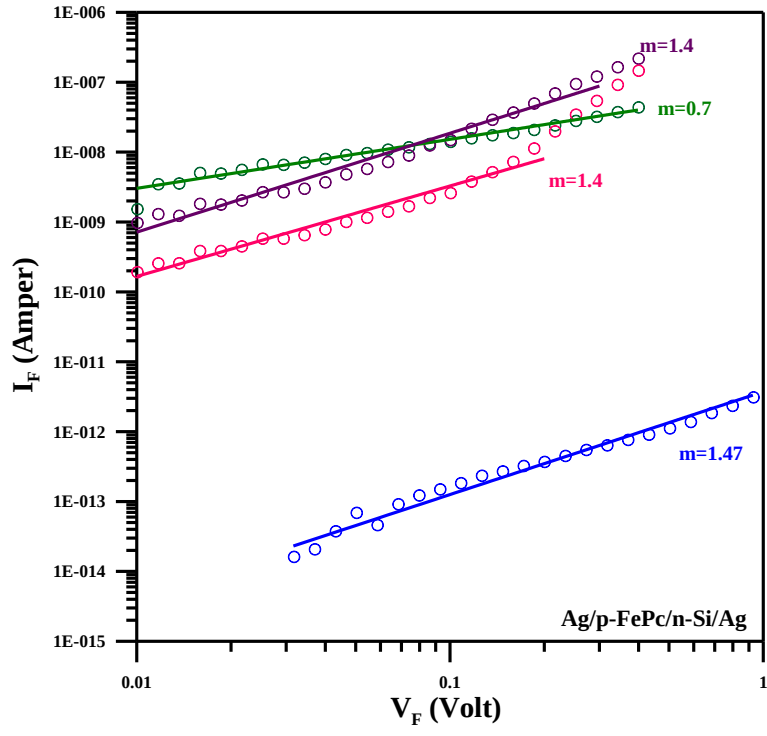
	İdeallik faktörü (η)	B.Y (eV)	Doğrultma Katsayısı	Fotoduyarlılık	V _{OC}
Örnek 5	1.18	0.98	9×10^3	20	60mV
Örnek 6	1.6	0.66	40	20	76mV
Örnek 7	3.3	0.87	8×10^3	8300	80mV
Örnek 8	1.95	0.72	20	60	90mV

4.3.2 FePc/p-Si Eklemlerin İletim Mekanizmaları

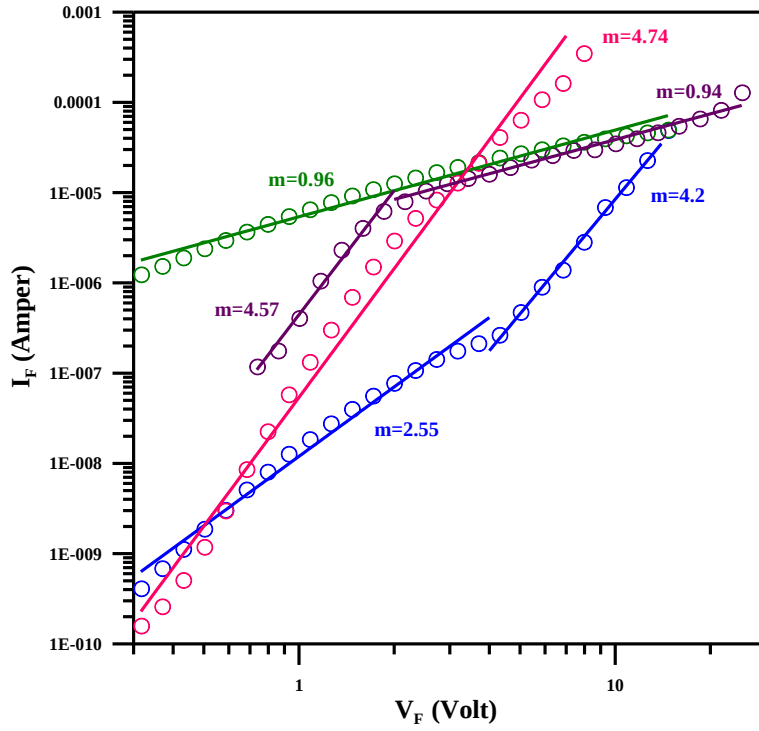
FePc/p-Si eklemlerin iletim mekanizmalarını incelemek için doğru (V_F) ve ters (V_R) besleme gerilimleri altındaki akım-gerilim karakteristiklerini inceledik. FePc/p-Si eklemlerin doğru beslemedeki $\ln I-V$ grafiği Şekil 4.15’de verilmiştir. Bu eklemlerin doğru beslemedeki iletim mekanizmalarını daha iyi anlamak için tam logaritmik akım-gerilim grafikleri çizilmiştir. Bu grafikler, düşük ve yüksek elektrik alanlı iki bölge seçilerek incelenmiştir.



Şekil 4.15 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin düz beslemede yarı logaritmik akım-gerilim (I_F-V_F) karakteristikleri



(a)

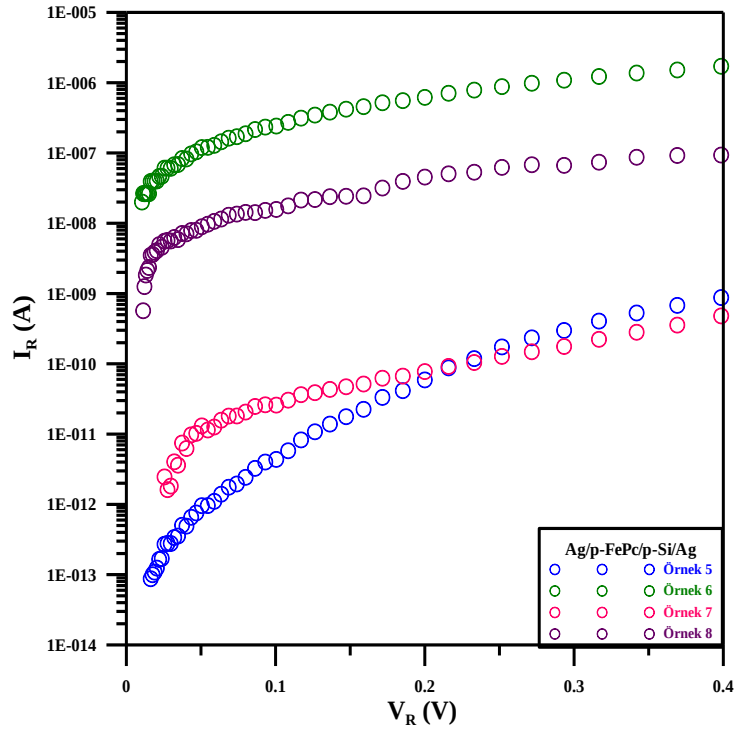


(b)

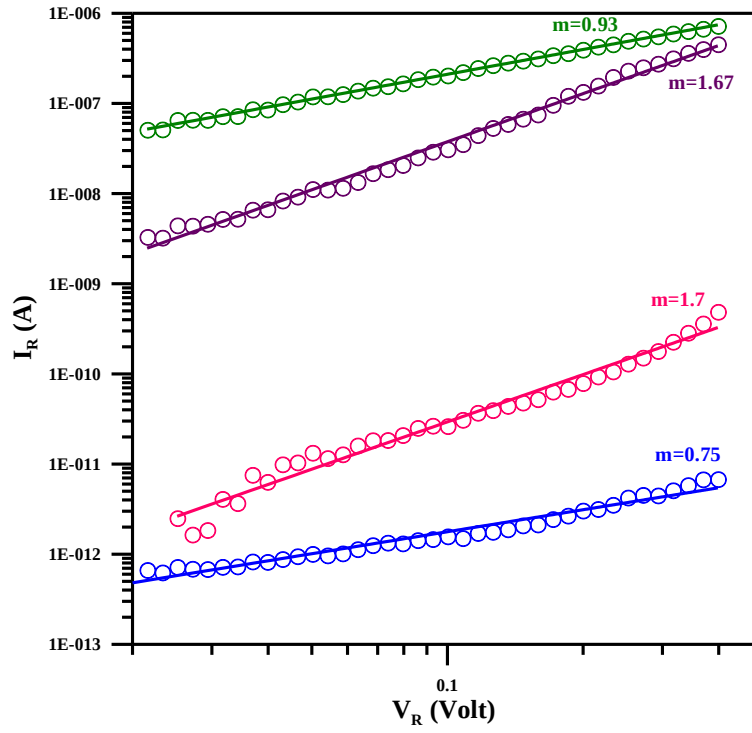
Şekil 4.16 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemlerin (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_F - V_F karakteristikleri

Doğru besleme gerilim altındaki düşük ve yüksek elektrik alanına sahip tam logaritmik akım-gerilim grafikleri Şekil 4.16a ve b’de verilmiştir. FePc/p-Si eklemlerin düşük elektrik alan bölgesindeki ($0.01 < V_F < 0.4$) grafiklerin doğruları incelendiğinde, Örnek 6 ekleminin eğim değeri $m=0.7$ olarak bulunurken, Örnek 5, Örnek 7 ve Örnek 8’e ait doğruların eğimleri ise birbirine yakın değerlerde (~ 1.4) çıkmıştır. Bu da bize düşük elektrik alan bölgesinde Örnek 5, Örnek 7 ve Örnek 8 eklemlerinin benzer akım mekanizmasına sahip olduklarını gösterir. Bu bölgenin akım mekanizmalarını daha iyi anlamak için çizilen $\ln I-V^{1/2}$ grafiğinden elde edilen beta (β) değeri ile Denklem (4.13) yardımı ile hesaplanan teorik beta (β) değerleri karşılaştırıldı. Schottky ve Pool-Frenkel akım mekanizmaları için teorik hesaplanan β değerleri sırası ile $1.87 \times 10^{-5} \text{ eV}(V^{1/2} \text{ m}^{-1/2})$, $3.74 \times 10^{-5} \text{ eV}(V^{1/2} \text{ m}^{-1/2})$ bulunmuştur. FePc/p-Si eklemlerin $\ln I-\ln V$ grafiklerinden elde edilen deneysel β değerleri teorik hesaplanan Pool-Frenkel β değerine yakın bulunduğu için, bu eklemlerde Pool-Frenkel akım mekanizmasının geçerli olduğunu belirledik. Bu eklemlerin yüksek elektrik alan bölgesindeki ($V_F > 0.4$) $\ln I-\ln V$ grafikleri, eğim değerleri ile birlikte Şekil 4.16 b’de verilmiştir. Örnek 6 ekleminin $\ln I-V$ grafiği incelendiğinde eğim değerinin 1 civarında olduğu görülmüştür ve dolayısıyla bu bölgede eklem omik özellik gösterir. Yüksek elektrik alan bölgesinde Örnek 5, Örnek 7 ve Örnek 8 eklemine ait grafiğin eğim değerlerinin $m > 2$ olması, bu eklemlerde SCLC akım mekanizmasının baskın olduğunu göstermektedir.

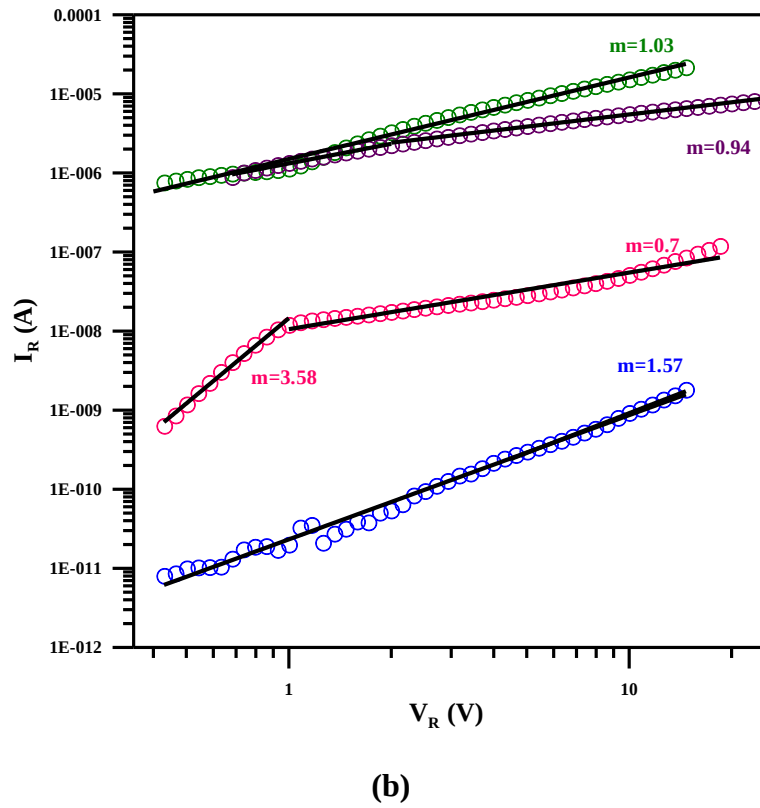
FePc/p-Si eklemlerin ters besleme gerilim altındaki $\ln I-\ln V$ grafikleri Şekil 4.17’de verilmektedir. Bu eklemlerin ters besleme gerilim altındaki iletim mekanizmalarını incelemek için bu grafikleri de düşük ve yüksek elektrik alan bölgelerine ayırarak incelemek gerekmektedir.



Şekil 4.17 FePc/p-Si eklemlerin ters beslemede yarı logaritmik akım-gerilim (I_R - V_R) karakteristikleri



(a)

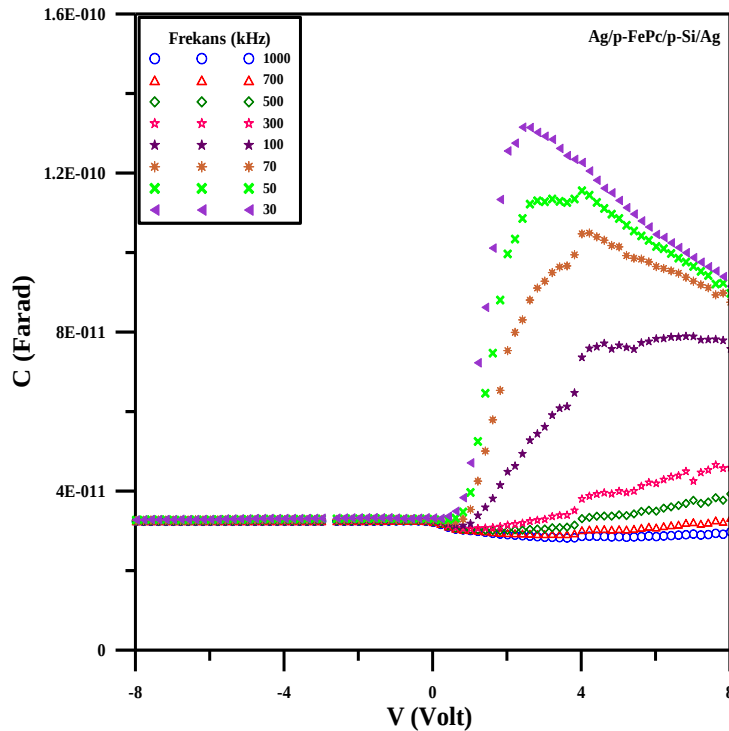


Şekil 4.18 FePc/p-Si eklemlerin ters beslemede (a) düşük gerilimler (b) yüksek gerilimler için tam logaritmik I_R - V_R karakteristikleri

FePc/p-Si eklemlerin ters besleme altındaki düşük elektrik alan bölgesine ($0.01 < V_R < 0.4$) ait $\ln I$ - $\ln V$ grafiği Şekil 4.18 a'da verilmiştir. Bu grafikteki eğim değerleri incelendiğinde, Örnek 5 ve Örnek 6 eklemlerinin benzer akım mekanizmasına sahip olduğu anlaşılmıştır. Aynı şekilde Örnek 7 ve Örnek 8 eklemlerinin de eğim değerlerinin birbirine yakın olması nedeniyle aynı akım mekanizmasına sahip olduğu söylenebilir. Bu eklemlerin çizilen $\ln I$ - $V^{1/2}$ grafiklerinin eğim değerlerinden elde edilen deneysel beta (β) değerleri göz önünde bulundurulduğunda yine Pool-Frenkel akım mekanizmasının baskın olduğu gözlenmiştir. Yüksek elektrik alan bölgesinde ise (Şekil 4.18 b) Örnek 6 eklemının akım mekanizmasında bir değişim gözlenmezken, Örnek 7 eklemi ile birlikte doyma akımına ulaştıktan sonra akım değerinin sabit kaldığını söyleyebiliriz. Bu bölgede Örnek 8 eklemi iki farklı mekanizmadan oluşmaktadır. ($0.4 < V_R < 1$) aralığında SCLC akım mekanizması gözlenirken ($V_R > 1$) bölgesinde verilen gerilimle akımın bir doyma noktasına geldiği ve artık değişmediği gözlemlendi. Örnek 5'te ise yine düşük alan emisyon mekanizmalarından Pool-Frenkel akım iletim mekanizmasının baskın olduğu çizilen grafiğin eğiminden tespit edilmiştir.

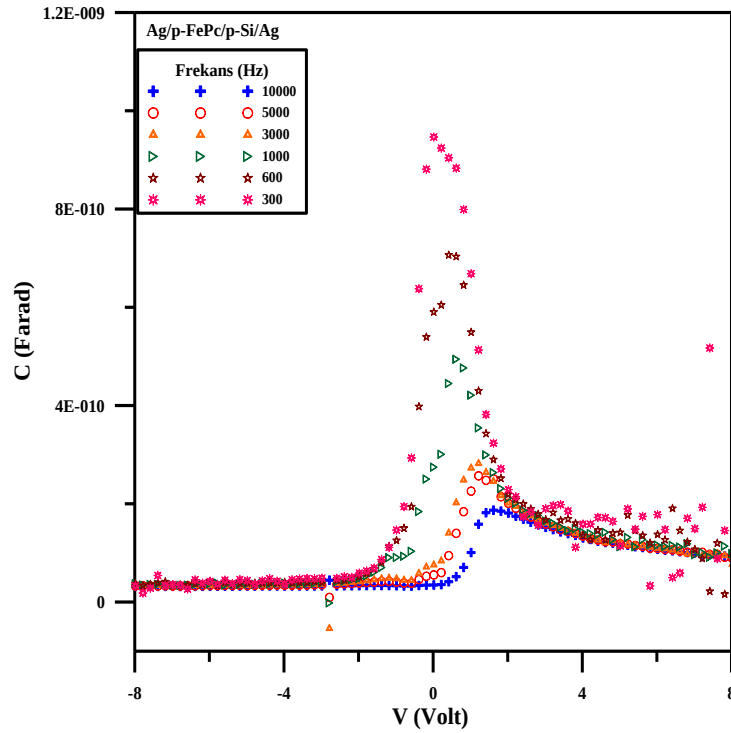
4.3.3 FePc/p-Si Eklemlerin Kapasitans-Gerilim (C-V) Karakteristikleri

Oda sıcaklığında 1Hz-1MHz frekans aralığında incelenen p-FePc/p-Si heteroekleminin yüksek frekans değerleri için çizilen sığa-gerilim değişimi Şekil 4.19'da verilmiştir. Voltaj değişimi ile $V > 0$ bölgesinde (ters yığılma bölgesinde) belirgin bir şekilde frekansa bağlılık görülmektedir. C-V değişiminin $V < 0$ bölgesinde ise (yığılma bölgesinde) frekansa bağımsız sabit bir sığa değeri görülmektedir. Bu eklemlerin kapasitans-gerilim değişimlerinde frekansın azalması ile birlikte saçılmaların arttığı gözlemlenmiştir. Bu eklemlerin yüksek frekans C-V grafikleri incelendiğinde aslında FePc/n-Si eklemlerde düşük frekans bölgesindeki C-V karakteristiğine benzer bir özellik gösterdiği yani MOS tipi diyotların düşük frekans C-V özelliklerine benzediği açık bir şekilde görülmektedir. Fakat yüksek frekanslarda böyle bir frekans bağımlılığının nedeni olan yığılma bölgesine oksit tabakadan geçen yük girişinin bu frekanslarda etkilenmesi beklenmeyen bir durumdur. Yüksek frekanslardaki bu geçişlerin frekans bağımlılığının sebebi olarak, eklemin her iki bölgesindeki çoğunluk yük taşıyıcıların boşluklar olması nedeniyle arayüzeydeki doğal oksit tabakasında meydana gelen yüklerin difüzyonunun frekansa bağıllığı ile açıklanabilir.

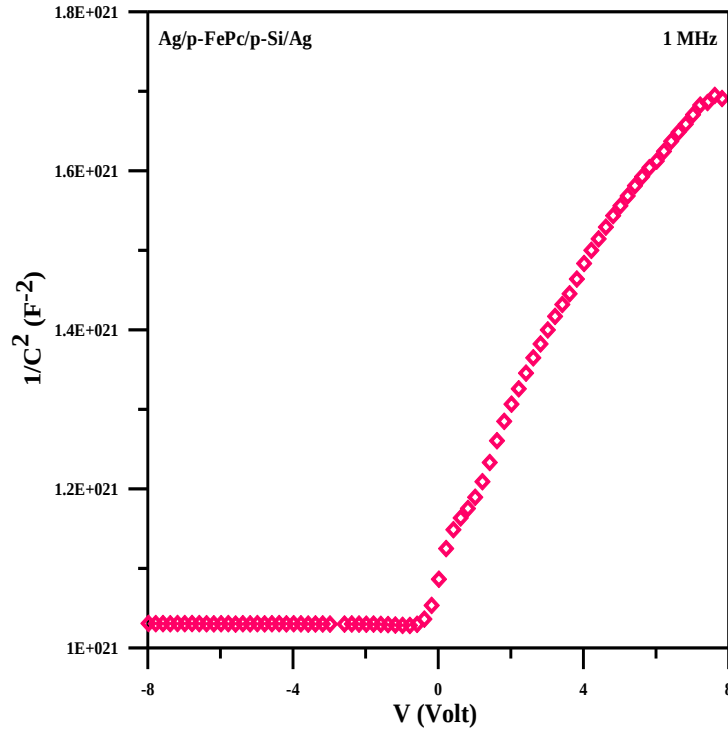


Şekil 4.19 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin yüksek frekanslardaki C-V karakteristiği

Şekil 4.20’de FePc/p-Si heteroekleminin düşük frekans değerleri için çizilen C-V grafiği verilmiştir. Grafikte görülen düşük frekanslarda ters yığılma bölgesi ile yığılma bölgesi arasında frekansa bağımlı bir bölge tespit edilmiştir. Düz bant bölgesinde göze çarpan bu olay, düz bant sığasının frekansa yüksek oranda bağımlı olduğunu göstermektedir. Bu bölgedeki SiO₂ yalıtkan tabakasında bulunan tuzaklar tarafından azınlık yük taşıyıcılarının yakalanması ile bir yük artışı olduğunu söylemek mümkündür. Fakat bu yük artışının düşük frekanslarda yalıtkan tabakanın sınırları içerisinde kaldığı, filmin içerisine bu yük taşıyıcılarının geçişinin ihmal edilebilecek kadar önemsiz olduğu ve dolayısıyla yığılma bölgesinde azınlık yük taşıyıcılardan gelen etkinin göz ardı edilebileceği görülmüştür. Bu da gösteriyor ki yığılma bölgesi ve ters yığılma bölgesinde aslında bir frekans bağımlılığı söz konusu değilken, p-p heteroekleminin düşük frekanslarda düz bant bölgesindeki yalıtkan tabakasının etkisi ile düz bant kapasitansında belirli saçılmaların gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 4.20 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin düşük frekanslardaki C-V karakteristiği

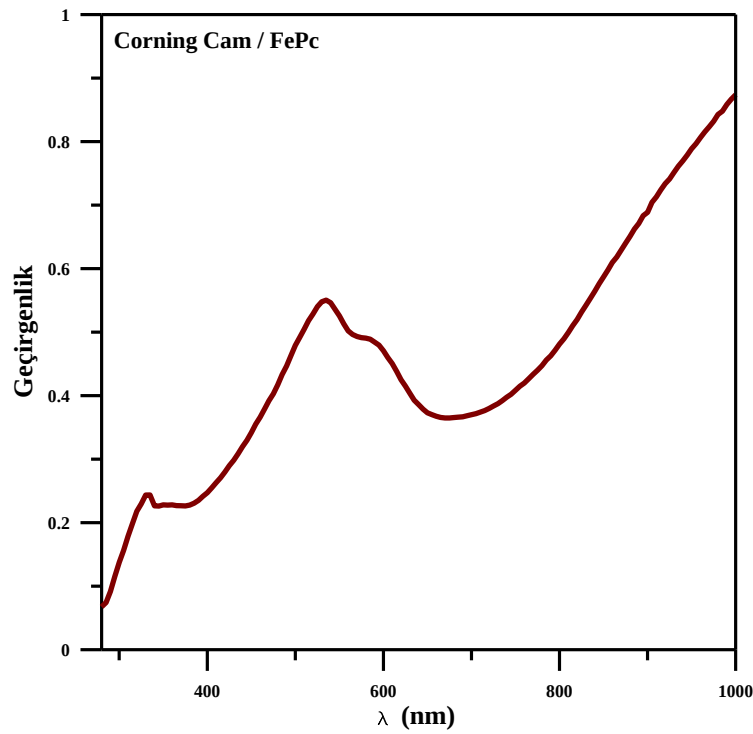


Şekil 4.21 Ag/p-FePc/p-Si/Ag eklemin 1 MHz frekansta ($1/C^2$ -V) karakteristiği

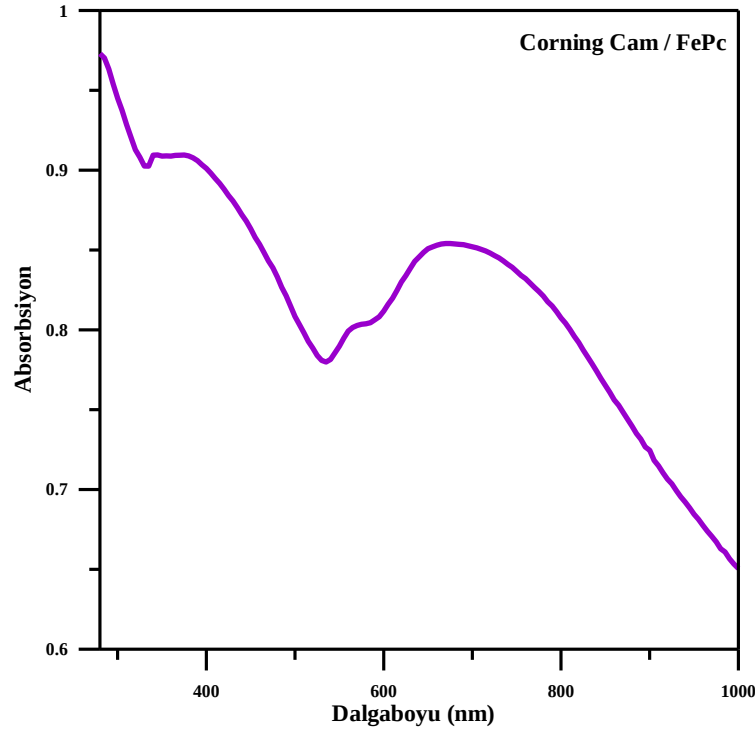
Şekil 4.21'deki FePc/p-Si ekleminin 1 MHz frekanstaki ($1/C^2$ -V) eğrisi ekstreple edilerek gerilim eksenini kestiği noktadan oluşma potansiyelinin $V_{bi} = -1 \pm 0.05V$ civarında olduğu anlaşılmıştır. $1/C^2$ -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun (N_d) değeri $2.5 \times 10^{23} m^{-3}$ olarak belirlenmiştir.

4.4 FePc/Si Eklemlerin Optik Özellikleri ve Yasak Bant Aralığının Hesaplanması

Corning cam üzerine büyütülen FePc filmlerinin oda sıcaklığında 280nm-1000nm dalgaboyu aralığında alınan optiksel geçirgenlik ve soğurma ölçümleri Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’de verilmiştir. Şekil 4.22’de görüldüğü gibi filmlerin görünür bölgede %50’nin üzerinde, uzak kızılötesi bölgede ise %80’nin üzerinde geçirgenliğe sahip oldukları belirlenmiştir. Şekil 4.23 incelendiğinde FePc filmlerin mor ötesi bölgede 350 nm civarında keskin bir soğurma kenarına sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 4.22 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin Optiksel Geçirgenlik Spektrumu



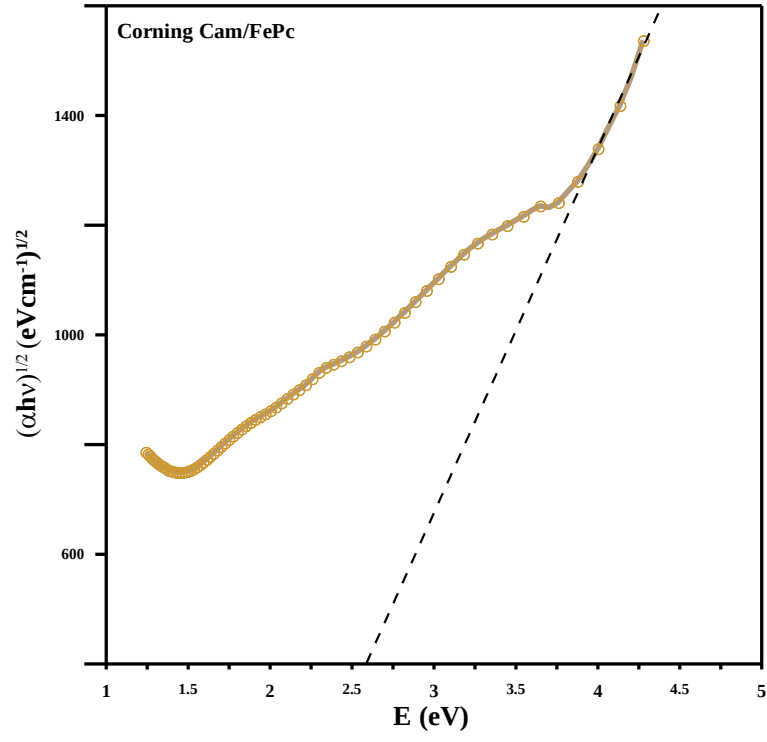
Şekil 4.23 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin Optiksel Soğurma Spektrumu

Yarıiletken FePc filmlerin yasak bant aralığının belirlenmesi için geçirgenlik (T) değerlerinden Denklem (4.16) yardımıyla yansıtma (R) değerleri elde edildi Denklem (4.17). Bu R değerlerinin Denklem (4.18)'de yerine konmasıyla “ α ” soğurma katsayısı hesaplandı. Bu değerden $(\alpha h\nu)^{1/2}$ optiksel soğurma karakteristiği ve foton enerjisi ($h\nu$) belirlendi. Şekil 4.24’de corning cam üzerine büyütülen FePc filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}-E(h\nu)$ grafiği verilmiştir. Bu grafiğin ekstropole edilerek enerji eksenini kestiği noktadan elde edilen değer FePc yarıiletkeninin optiksel yasak enerji bant aralığını gösterir. Şekil 4.24’den corning cam üzerine büyütülen FePc filmlerin yaklaşık 2.6 eV optik bant aralığına sahip oldukları belirlenmiştir. Bulunan yasak enerji aralığı değeri literatürde FePc için verilen yasak bant değerleri ile hemen hemen aynı çıkmıştır (Varghese S.,2002;Sharma G.D, 2006).

$$T = \frac{(1-R)}{(1+R)} \quad (4.16)$$

$$R = \frac{(1-T)}{(1+T)} \quad (4.17)$$

$$\alpha = -\frac{1}{d} \ln \left[\frac{\sqrt{(1-R)^4 + 4T^2 R^2} - (1-R)^2}{2TR^2} \right] \quad (4.18)$$



Şekil 4.24 Corning Cam Üzerine FePc Filmlerin $(\alpha h\nu)^{1/2}-E(h\nu)$ Grafiği

5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

Organik yarıiletken malzemelere geleceğin malzemesi gözüyle bakılmaktadır. Bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen elektroniğin temel malzeme taşı olan silisyuma uyumlu yeni malzeme arayışları, dikkatleri organik yarı iletken malzemeler üzerinde toplamış durumdadır. Organik yarıiletkenler; getirdikleri düşük altyapı maliyeti, geniş ve esnek yüzeylere uygulanabilme, kolay ve hızlı üretim yöntemleri ile uygulamaya özgü sentezlenebilen malzeme özellikleri gibi avantajlarla, silisyumun dolduramadığı alanlara girebilecek niteliklere sahiptir. Özellikle ftalosiyanınlar, optik algılayıcılar ve gaz sensörleri gibi bazı alanlarda vazgeçilmez malzemelerdendir. Ftalosiyanınlar, ısı ve kimyasal kararlılıkları, ince filmlerinin kolay hazırlanabilmesi, yakın infrared bölgede yüksek soğurma bandına sahip olmaları ve elektriksel özelliklerinin katkılama ile büyük oranda değiştirilmesi gibi nedenlerden dolayı üzerlerinde en çok çalışılan organik yarıiletken malzemelerdir. Bu malzemelerin ince filmlerinin elektriksel ve optik özelliklerinin sıcaklık, ışık, nem ve hazırlanma şekli gibi parametrelere bağlılığının belirlenmesi hem yeni uygulama alanlarının araştırılması hem de mevcut uygulamalarda üretilen aygıtın geliştirilebilmesi konusunda bir ön bilgi sağlayacaktır. Tüm saydığımız bu nedenlerden dolayı bu tez çalışmasında FePc filmler n-tipi Si ve p-tipi Si altlıklar üzerine büyütülerek incelendi.

Bu çalışmada FePc filmler ilk defa kimyasal sprey püskürtme yöntemi kullanılarak n ve p-tipi Si altlıklar üzerine büyütülerek FePc/n-Si ve FePc/p-Si heteroeklemler hazırlandı. FePc filmler bu teknikte hazırlanırken altlık sıcaklığı ve çözelti konsantrasyonlarına bağlılıkları da incelendi. Üretilen FePc filmlerin yapısal ve yüzey özellikleri XRD, RAMAN ve SEM analizleriyle incelendi. Bu filmlerden elde edilen FePc/n-Si ve FePc/p-Si heteroeklemlerin I-V ve C-V ölçümleri alınarak tüm bu eklemlerin elektriksel karakteristikleri ortaya konulmuştur.

XRD analizi sonucunda n-Si(100) ve p-Si(111) yönelimine sahip altlıklar üzerine büyütülen FePc filmlerin amorf yapıda olabileceği anlaşılmıştır. Yapılan RAMAN analizi sonucunda demir ftalosiyanın organik yarıiletkenine ait moleküler bağlar tespit edilmiştir. Aynı zamanda bu spektrumda 520 cm^{-1} de Silisyuma ait Si-Si Raman aktif modu da açıkça görülmektedir. FePc'ye ait bu kiplerin hepsi literatürde yapılan teorik ve deneysel çalışmalar incelendiğinde benzer dalgaboylarında bu bağlar ile karşılaştırıldığında literatürle aynı sonuçlar elde edildiği görüldü.

FePc filmlerin yüzey morfolojileri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Filmlerin SEM yüzey görüntüleri incelendiğinde, kimyasal sprey püskürtme tekniğinin bir sonucu olarak filmlerin yüzeyinin homojen bir şekilde dağılıma sahip olmadığı ve belirli bölgelerde adacıklar şeklinde biriktiği görülmüştür.

Bu sonuçların ışığında bu kaplama yöntemiyle elde edilen FePc filmlerin her iki altlık üzerinde başarıyla üretildiği ve p-FePc/n-Si (100) ve p-FePc/p-Si (111) heteroeklemlerin p-n ve p-p olmak üzere iki eklem şeklinde oluşturulduğu görüldü. Bu eklemelerin elektriksel özelliklerinin incelenmesi için her iki tarafa Ag kontak yapıldı. Ag/FePc/n-Si/Ag ve Ag/FePc/p-Si/Ag heteroeklemlerin elektriksel özellikleri akım-gerilim (I-V) ve kapasitans-gerilim (C-V) admitans ölçümleri ile incelendi.

Ag/FePc/n-Si/Ag eklem için oda sıcaklığında yapılan karanlık I-V ölçümlerinden, bu eklemelerin 10^3 civarında iyi bir doğrultma özelliği gösterebileceği tespit edildi. Bu eklemelerin doğru beslemedeki tam logaritmik akım-gerilim karakteristikleri incelendiğinde iki farklı bölgede eklemelerin farklı akım mekanizmaları gösterdiği görüldü. İlk bölge olan düşük gerilim altında ($V_F < 0.4V$) logI-V grafiğinin eğim değeri değişmemektedir, bu durumda bu eklemde düşük gerilimler için Pool-Frenkel akım mekanizmasının hakim olduğu görüldü. Daha yüksek gerilim bölgelerinde ise ($V_F > 0.4V$) eğim değerinin değiştiği görülmüştür. $0.4V$ 'u aşan gerilim değerleri için etkin akım mekanizması uygulanan gerilimin kuvvetiyle orantılıdır; yani $I \propto V^m$. Yüksek elektrik alan bölgesinde genelde $m > 2$ olduğu görülmüştür. Dolayısıyla bu bölgede etkin akım mekanizmasının SCLC iletim mekanizması olduğu bilinmektedir. Eklemelerin ters beslemede akım-gerilim karakteristikleri incelendiğinde, yine doğru beslemedeki gibi iki farklı elektrik alan bölgesi ilk bakışta göze çarpmıştır. Bu bölgelerde yapılan akım iletim mekanizması incelemelerinde doğru beslemede görülen benzer mekanizmaların burada da geçerli olduğu görülmüştür. Son olarak termiyonik emisyon teorisine göre diyot parametreleri hesaplanarak, idealite sabitinin 1.09 ile 1.97, bariyer yüksekliğinin ise 0.77 ile 0.97 eV arasında değiştiği görülmüştür. Tavlamanın etkisiyle idealite faktörünün iyileştiği görülmüştür. Bu durum da bize kaplamalardan sonra yapılan ısıtma işlem prosesi ile eklemelerin elektriksel özelliklerinin iyileştirilebileceği sonucunu göstermektedir. Ag/FePc/n-Si/Ag heteroeklemlerin geniş frekans aralığında admitans ölçümleri sonucunda sergilediği C-V davranışının MOS türü sığalarla benzerliği fark edilmiştir. Eklem C-V karakteristiğine bakıldığında $V > 0$ bölgesinde, yüksek frekanslar için gerilimden bağımsız sabit bir sığa gözlenirken, nispeten düşük frekanslarda sığada frekansa aşırı bağımlı bir yığılma bölgesi mevcuttur. Eklem $1/C^2$ -V eğrisinden, oluşma potansiyelinin $0.60 \pm 0.05V$ civarında olduğu görülmüştür. $1/C^2$ -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun (N_d) değeri $4 \times 10^{22} m^{-3}$ olarak belirlenmiştir.

Ag/FePc/p-Si/Ag eklem için de aynı işlemler yapıp genel olarak benzer sonuçlar elde edilmiştir. Örnek 7 olarak adlandırılan heteroeklemin tavlamanın etkisiyle doğrultma ve fotoduyarlılığında belirgin bir iyileşmenin olduğu gözlenmiştir. Ag/FePc/p-Si/Ag eklemelerin I-V karakteristikleri incelendiğinde n-tipi üzerine büyütülen eklemlele benzer özellikler gösterdiği görülmüştür. Doğru

beslemedeki düşük gerilim değerlerinde p-tipi üzerine büyütülen örnekler için de etkin akım mekanizmasının Pool-Frenkel olduğu belirlenmiştir. Daha yüksek gerilimlerde ise SCLC akım mekanizmasının baskın olduğu anlaşılmıştır. Eklemlerin idealite sabiti 3.3 ile 1.18, bariyer yüksekliği ise 0.66-0.98 eV arasında değişmektedir. Ag/FePc/p-Si/Ag heteroeklemlerin geniş frekans aralığında admitans ölçümleri (C-V) yapılmıştır. Eklemin C-V karakteristiğine bakıldığında pozitif gerilimlerde kayda değer bir frekans bağımlılığı olduğu görülmüştür. Eklemin kapasitansı belli bir düz bias değerinde birden keskin bir biçimde artmakta ve bir maksimum değere ulaştıktan sonra azaldığı, 0 Volt'dan küçük gerilim değerleri için sabit bir kapasitans değeri olduğu gözlenmiştir. Düşük frekanslarda ters yığılma bölgesi ile yığılma bölgesi arasında frekansa bağımlı bir bölge tespit edilmiştir. Düz bant bölgesinde göze çarpan bu olay, düz bant sığasının frekansa yüksek oranda bağımlı olduğunu göstermektedir. Eklemin $1/C^2$ -V eğrisinden, oluşma potansiyelinin -1 ± 0.05 V civarında olduğu görülmüştür. $1/C^2$ -V grafiğinin eğiminden taşıyıcı konsantrasyonunun (N_d) değeri $2.5 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ olarak belirlenmiştir.

Corning cam üzerine büyütülen FePc filmlerin optik ölçümlerinden geçirgenlik ve soğurma analizleri yapılmıştır. $(\alpha h\nu)^{1/2}$ -h grafiğinin ekstropole edilmesiyle FePc'nin yasak enerji bant aralığı 2.6 eV olarak bulunmuştur. Bu değer literatürdeki çalışmalarla uyum içerisindedir.

Sonuç olarak bu çalışmada, n-tipi Si(100), p-tipi Si(111) ve corning cam altlıklar üzerine ilk defa Kimyasal Sprey Püskürtme Tekniği kullanılarak üretilen FePc filmlerin yapılan yapı ve yüzey analizlerinin sonucunda başarılı bir şekilde üretildiği görüldü. Bu filmlerden hazırlanan FePc/n-Si ve FePc/p-Si heteroeklemlerin elektriksel karakteristikleri detaylı bir şekilde incelendi ve bu eklemlerin yüksek gerilim değerlerinde çalışabileceği tespit edildi. Bu eklemlerin ışığa duyarlılıkları incelenerek yapılacak ısı işlemler neticesinde fotovoltaiik özelliklerinin iyileştirilebileceği ortaya konuldu. Eklemlerin C-V incelemeleri sonucunda görülen yüksek frekans bağımlılığı, bize bu eklemlerin ara tabakasında oluşmuş olabilecek doğal bir SiO₂ yalıtkan tabakasının varlığını kanıtlamıştır ve bu eklemler MOS tipi bir diyot davranışı sergilemiştir. Sonuçta bu kaplama yöntemiyle büyütülen heteroeklemler, hem benzer akım iletim mekanizmaları göstererek hem de benzer C-V davranışları sergileyerek aslında elektriksel özelliklerinin direk tabana bağlı olmadığını, arayüzeydeki oksit tabakasına daha çok bağlı olduğunu gösterdi. Bu durum bize ilerisi için kimyasal sprej püskürtme tekniği ile üretilecek organik tabanlı heteroeklemler için iki önemli parametre üzerinde durmamızı söylemektedir. Bunlardan ilki; kaplama sonrası yapılan ısı işlemin kontrollü bir şekilde sistematik hale getirilmesi, diğeri ise bu eklemlerin arayüzeyinde oluşan oksit tabakasının kontrol edilebilecek bir sistemle hazırlanmasıdır. Organik FePc yarıiletkeninden üretilen bu eklemlerin hem elektronik teknolojisinde kullanılması ile hem de fotoduyarlılığının yüksek olması nedeni ile çalışılmasına devam edilmesi ilerisi için önemlidir.

KAYNAKLAR

- Aziz M.S., (2006), "Carrier Transport Mechanisms and Photovoltaic Properties of Au/p-ZnPc/Al Device", *Solid-State Electronics* 50, 1238-1243
- Baker R., Wilkinson D., Zhang J., (2008), "Electrocatalytic Activity and Stability of Substituted Iron Phthalocyanines Towards Oxygen Reduction Evaluated at Different Temperatures", *Electrochimica Acta* 53, 6906-6919
- Balraju P., Kumar M., Roy M.S., Sharma G.D., (2009), "Dye Sensitized Solar Cells Based on Modified Iron Phthalocyanine Nanostructured TiO₂ Electrode and PEDOT:PSS Counter Electrode", *Synthetic Metals*
- Bialek B., Kim I., Lee J., (2003), "First Principles Study on The Electronic Structures of Iron Phthalocyanine Monolayer", *Surface Science* 526, 367-374
- Byrne, G. T., Linstead, R. P. ve Lowe, A. R., (1934), "Phthalocyanines. Part II. The preparation of Phthalocyanine and Some Metallic Derivatives From o-Cyanobenzamide and Phthalimide", *J. Chem. Soc.*, 1017-1022.
- Caferov T., (1998), "Yarıiletken Fiziği 1", Yıldız Teknik Üniversitesi Matbaası, İstanbul
- Chapin, (1954), "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation Into Electrical Power", *Journal Applied Physic* 25, 676-677
- Debnath A.K., Samanta S., Singh A., Aswal D.K., Gupta S.K., Yakhmi J.V., Deshpande S.K., Poswal A.K., Sürgers C., (2008), "Growth of Iron Phthalocyanine Nanoweb and Nanobrush Using Molecular Beam Epitaxy", *Physica E*
- El-Nahass M.M., Abd-El-Rahman K.F., Darwish A.A.A., (2007), "Fabrication and Electrical Characterization of p-NiPc/n-Si Heterojunction", *Microelectronics Journal* 38, 91-95
- Engin R., 1995, "Güneş Pilleri", Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Yayınları, No:3
- Fa W., Zan L., Gong C., Zhong J., Deng K., (2008), "Solid-Phase Photocatalytic Degradation of Polystyrene with TiO₂ Modified by Iron(II) Phthalocyanine", *Applied Catalysis B:Environmental* 79, 216-223
- Farag A.A.M., (2007), "Optical Absorption Studies of Copper Phthalocyanine Thin Films", *Optic&Laser Technology* 39, 728-732
- Khrishnakumar K.P., Menon C.S., (2001), "Determination of The Thermal Activation Energy and Grain Size of Iron Phthalocyanine Thin Films", *Materials Letters* 48, 64-73
- Köse, S., 1986, "Yarıiletken Güneş Pilleri ve Verimlilikleri", Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Kumar G.A., Thomas J., George N., (2000), "Physical and Optical Properties of Phthalocyanine Doped Inorganic Glasses", *Kluwer Academic Publishers* 35, 2539-2542
- Küpeli A.Ö., (2005), "Güneş Pilleri ve Verimleri", Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Ma J., Wang J., Liu Y., (2007), "Iron Phthalocyanine As a Cathode Catalyst For a Direct Borohydride Fuel Cell", *Journal of Power Sources* 172, 220-224
- Mamuru S., Ozoemena K., (2009), "Impedimetric and Elecrocataytic Properties of Nanostructured FePc at Pyrolytic Graphite Electrode", *Materials Chemistry and Physics* 114, 113-119
- Maretti L., Esther C., Alvaro M., (2009), "Laser Flash Photolysis of Dioxo FePc intercalated in Hydrotalcite and Its Use as A Photocatalyst", *Journal of Photochemistry and Photobiology*

- Ohmori Y., Itoh E., Miyairi K., (2006), "Photovoltaic Properties of Phthalocyanine Based p-n Diode Evaporated onto Titanium Dioxide", *Thin Solid Films* 499, 369-373
- Oral, M., 1979, "Güneş Pilleri", İzmir İlker Matbaası
- Rajesh K.R., Menon C.S., (2007), "Study on The Device Characteristics of FePc and FePcCl Organic Thin Film Schottky Diodes: Influence of Oxygen and Post Deposition Annealing", *Journal of Non-Crystalline Solids* 353, 398-404
- Robertson, J. M., (1935), "An X-Ray Study of the Structure of the Phtalocyanines. Part I. The Metal-Free, Nickel, Copper and Platinum Complexes", *J. Chem. Soc.*, 615-621.
- Roy M.S., Kumar M., Jaiswal P., Sharma G.D., (2004), "Investigation of FePC Based Schottky Device As Gamma Radiation Sensor", *Radiation Measurements* 38, 205-209
- Sarıçiftçi, N. S., Smilowitz, L., Heeger, A. J. and Wudl, F., (1992), "Photoinduced electron transfer from a conducting polymer to buckminsterfullerene" *Science* 258, 1474-1476
- Seoudi R., El-Bahy G.S., El Sayed Z.A., (2006), "Ultraviolet and Visible Spectroscopic Studies of Phthalocyanine and Its Complexes Thin Films", *Optical Materials* 29, 304-312
- Scarfato A., Chang S., Kuck S., Brede J., Hoffmann G., Wiesendanger R., (2008), "Scanning Tunneling Microscope Study of Iron(II) Phthalocyanine Growth on Metals and Insulating Surfaces", *Surface Science* 602, 677-683
- Senthilarasu S., Sathyamoorthy R., Lalitha S., Subbarayan A., "Space Charge Limited Current Conduction in ZnPc Thin Films", *Solid State Electronics* 49, 813-817
- Sharma G.D., Kumar R., Roy M.S. , (2006), "Investigation of Charge Transport, Photo Generated Electron Transfer and Photovoltaic Response of FePc:TiO₂ thin films", *Solar Energy Materials&Solar Cells* 90, 32-45
- Siswana M., Ozoemena K., Nyokong T., (2006), "Electrocatalytic Behaviour of Carbon Paste Electrode Modified with FePc Nanoparticles Towards the Detection of Amitrole", *Talanta* 69, 1136-1142
- Soliman H.S., Farag A.A.M., Khosifan N.M, El-Nahass M.M., (2008), "Electrical Transport Mechanisms and Photovoltaic Characterization of Cobalt Phthalocyanine on Silicon Heterojunctions", *Thin Solid Films* 516, 8678-8683
- Sorokin A.B., Buisson P., Pierre A.C., (2001), "Encapsulation of Iron Phthalocyanine in Sol-Gel Materials", *Microporous and Mesoporous Materials* 46, 87-98
- Süvüt, H.H., (2005), "Değişik Yöntemlerle elde edilen CdS'ün Optik ve Elektriksel Özelliklerinin Karşılaştırılması", Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi
- Sze M.S., Kwog K.N., (2007), "Physics of Semiconductor Devices", John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey
- Tatar B., (2007), "β-FeSi₂ İnce Filmlerin Elde Edilmesi ve Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi", Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi
- Thomas, A. L., (1990), "Phthalocyanine Research and Applications", CRC Press, Florida.
- Varghese S., Iype M., Mathew E.J., Menon C.S., (2002), "Determination of The Energy Band Gap of Thin Films of Cadmium Sulphide, Copper Phthalocyanine and Hybrid Cadmium Sulphide/Copper Phthalocyanine From Its Optical Studies", *Materials Letters* 56, 1078-1083
- Zafer C., (2006), "Organik Boya Esaslı Nanokristal Yapılı İnce Film Güneş Pili Üretimi", Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi	26.10.1984	
Doğum Yeri	İskenderun	
Lise	1998-2002	İstanbul Köy Hizmetleri Anadolu Lisesi
Lisans	2003-2007	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü
Yükseklisans	2007-	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı

Yayın(lar)

Beyhan Tatar, A.Evrin Bulgurcuoğlu, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, Deneb Yılmaz, Orhan Özdemir ve Kubilay Kutlu, (2008), ‘Electrical and Photovoltaic Properties of Cr/Si Schottky Diodes’, International Journal of Hydrogen Energy.

Poster(ler)

Pelin Aydoğan, Beyhan Tatar, Kubilay Kutlu, Mustafa Ürgen, (2008), “Fabrication Properties Of Ag/p-FePc/n-TiO₂/FTO Heterojunction Photovoltaic Cell”, Nanomat 2008 International Workshop of Advanced Materials and Devices for Photovoltaic Applications.

Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, A. Evrim Bulgurcuoğlu, Kubilay Kutlu, (2008) “Conduction Mechanism Analysis in β -FeSi₂/n-Si Heterojunction Through J-V-T Measurements”, Nanomat 2008 International Workshop of Advanced Materials and Devices for Photovoltaic Applications.

Pelin Aydoğan, Beyhan Tatar, Kubilay Kutlu, (2008), “Fabrication and Electrical Properties Of FePc/Si Heterojunctions”, Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi.

Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Deneb Yılmaz, Pınar Gökdemir, Pelin Aydoğan, A. Evrim Bulgurcuoğlu, Kubilay Kutlu, (2008), “Electrical Features of Au/ β -FeSi₂/n-Si Heterojunction Through J-V-T Measurement”, Türk Fizik Derneği 25. Uluslararası Fizik Kongresi.

Deneb Yılmaz, Orhan Özdemir, Beyhan Tatar, Pelin Aydoğan, Kubilay Kutlu, Mustafa Ürgen, (2009), “Electrical Properties of CrSi₂/n-cryst.Si Heterojunction”, NANOTR V, 5. Ulusal Nanobilim ve Nanoteknoloji Konferansı.

Pelin Aydoğan, Beyhan Tatar, Kubilay Kutlu, (2009), “Structural Properties of FePc Thin Films Synthesis by Spray Pyrolysis Technique”, Türk Fizik Derneği 26. Uluslararası Fizik Kongresi.

Pelin Aydoğan, Beyhan Tatar, Orhan Özdemir, Kubilay Kutlu, (2010), “Observation of Excess Current/Capacitance Issues on Organic Based Heterojunctions”, SOLARTR 1 First Turkish Solar Energy Conference and Exhibition.

Proje

Kubilay Kutlu, Pelin Aydoğan, (2010), “Kimyasal Sprey Püskürtme Tekniği ile Üretilen FePc/Si Heteroeklemlerin Elektriksel ve Optik Özellikleri”, Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü (BAPK-YÜLAP), 2010-01-01-YL01.

