

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİLİSYUM TABANLI ORGANİK METAL YARIİLETKEN KONTAKLARIN
FOTODİYOT VE ELEKTİRİKSEL KARAKTERİZASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERHAN AKYOL

FİZİK ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Nezir YILDIRIM

BİNGÖL 2024

**SİLİSYUM TABANLI ORGANİK METAL YARIİLETKEN KONTAKLARIN
FOTODİYOT VE ELEKTİRİKSEL KARAKTERİZASYONU**

Prof. Dr. Nezir YILDIRIM danışmanlığında, Erhan AKYOL tarafından hazırlanan bu çalışma 25/07/2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Başkan :Doç. Dr. Abdullah ÖZKARTAL *İmza* :

Üye :Doç. Dr. İkrım ORAK *İmza* :

Üye :Prof. Dr. Nezir YILDIRIM *İmza* :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulunun// Tarih ve/
no'lu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Zafer ŞİAR
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Silisyum Tabanlı Organik Metal Yarıiletken Kontakların Fotodiyot ve Elektiriksel Karakterizasyonu tez yazım ve çalışmalarında yardımlarını, deneyimlerini ve bilgilerini esirgemeyen, araştırmaların ve çalışmaların bitmesi süresince gerekli desteği veren değerli hocam Prof. Dr. Nezir YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Tez çalışmalarını ve izlemeleri sırasında önerdikleri yönlendirmeler ve katkılarından dolayı değerli hocam Doç. Dr. İkrım ORAK ve Doç. Dr. Kadir EJDERHA'ya teşekkürlerimi sunuyor ve minnettar olduğumu bilmesini isterim.

Aynı zamanda benimle çalışmalar boyunca beraber olarak her türlü fedakarlığı yaparak çalışmalarına destek veren Muhammet şAHİN ve Ebubekir DEMİR arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

Bu süreç boyunca benimle berabere büyük emekleri olan, hiçbir fedakârlığı eksik etmeyen ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdikleri sabır ve fedakârlıktan dolayı eşim Nurşin ve sevgili oğlum Ömer Asaf'a özellikle teşekkürü bir borç bilirim.

Erhan AKYOL

Bingöl 2024

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETİ.....	3
3. KURAMSAL TEMELLER	5
3.1. Yarıiletken Malzemeler	5
3.1.1. Katkılı Yarıiletkenler.....	6
3.1.2. Katkısız Yarıiletkenler	7
3.2. Foto Diyotlar	8
3.2.1. Foto Diyotların I-V Karakteristiği.....	12
3.2.2. Fotovoltaik Parametreler	13
3.2.3. Açık Devre Gerilimi	14
3.2.4. Dolum Faktörü	14
3.2.5. Foto Duyarlılık	15
3.3. Metal Yarıiletken Omik Kontaklar	15
3.4. Sıçratma Tekniği ve DC Magnetron Sputtering Yöntemi	17
3.5. Fotovoltaik Pil ile Elektrik Üretimi	20
3.6. Silisyum Güneş Pilleri	22
3.7. Organik Güneş Pilleri	24
3.8. İnce Film Güneş Pilleri.....	25
3.9. Schottky Diyot I-V Özelliklerinin Norde Fonksiyonu Araştırılması	26
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
4.1. Numunenin Temizlenmesi ve Elde Edilmesi	34
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	39
5.1. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve Görüntüleri	39

5.2. Akım Gerilim Karakteristikleri ve Diyot Parametreleri.....	43
5.3. Kapasitans-Gerilime Bağlı Diyot Karakteristikleri	54
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	67
KAYNAKLAR	69

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	: Diyotun etkin alanı
A^*	: Richardson sabiti
E_c	: İletkenlik bandının tabanının enerjisi
E_{fm}	: Metalin fermi enerji seviyesi
E_{fs}	: Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
E_v	: Valans bandının tavanını enerjisi
E_g	: Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
E	: Elektronun yükü
Φ_b	: Engel yüksekliği
Φ_m	: Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
$I-V$: Akım-gerilim
I_0	: Doyma akımı
J	: Akım yoğunluğu
J_{sm}	: Metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu
J_{ms}	: Yarıiletkenden metale doğru akan akım yoğunluğu
J_0	: Ters beslem doyma akım yoğunluğu
K	: Boltzmann sabiti
K	: Kelvin
η	: İdealite faktörü
Mm	: Mikro metre
R_s	: Seri direnç
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
V_d	: Difüzyon potansiyeli
η	: Güneş Pili Verimi
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi
MY	: Metal Yarıiletken
SD	: Schottky Diyot

FF : Dolum Faktörü

MPP : Maksimum Güç Noktası

MΩ : Mega ohm

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	a) n tipi yarıiletken b) p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi	7
Şekil 3.2.	T=0 ve T>0 sıcaklıklarında doğal yarıiletkenlerin iletim ve valans bantlarının şematik gösterimi.....	8
Şekil 3.3.	Foto diyotun fotonla uyarılması a) elektronun bantlar arası geçişi b) safsızlık enerji seviyesinden iletim bandına geçişi.....	9
Şekil 3.4.	Foto diyotun şematik gösterilişi.....	10
Şekil 3.5.	Foto diyotun karanlıkta ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri.....	12
Şekil 3.6.	Foto diyotun karanlık ve aydınlık durumlarda I-V karakteristiği (Özdere, 2021)	15
Şekil 3.7.	Magnetron sıçratma katodu.....	19
Şekil 3.8.	Schottky diyotlarda düz beslem altındaki metal-yarıiletken kontak için enerji-band diyagramı, imaj azalma etkisi.....	30
Şekil 4.9.	a) Metil kırmızısı molekül yapısı b) Schottky diyotun şematik gösterimi.....	34
Şekil 4.10.	Sputter ve termal buharlaştırma Sistemi, NANOVAK NVTS-400.....	36
Şekil 4.11.	Döndürmeli Kaplama VTC-100 Vacuum Döndürerek kaplayıcı.....	36
Şekil 4.12.	Döndürerek kaplama yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi.....	37
Şekil 4.13.	Akım-Gerilim solar simülatörü/probe station.....	37
Şekil 4.14.	MSE marka yüksek tavlama fırını.....	38
Şekil 5.15.	Atomik Kuvvet Mikroskobu Park Systems XE-100E ve 2D Temsili Görsel.....	39
Şekil 5.16.	Pd/n-Si/Al/Ag referans AFM yüzey morfolojisi ve 10 μm^2 yüzey kesiti.....	40

Şekil 5.17.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama yüzey morfolojisi ve 5 µm ² yüzey kesiti.....	41
Şekil 5.18.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag damlama yüzey morfolojisi ve 10 µm ² yüzey kesiti.....	42
Şekil 5.19.	Pd/n-Si/Al/Ag referans diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi.....	45
Şekil 5.20.	Pd/n-Si/Al/Ag referans diyotun seri direnç grafiği.....	46
Şekil 5.21.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi.....	47
Şekil 5.22.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama numunesinin seri direnç grafiği.....	47
Şekil 5.23.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag damlama diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi.....	48
Şekil 5.24.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag damlama numunesinin seri direnç grafiği.....	49
Şekil 5.25.	Bir güneş piline ait akım-gerilim grafiği.....	50
Şekil 5.26.	Referans numunesinin (Pd/p-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı.....	51
Şekil 5.27.	Döndürerek kaplayıcı numunesinin (Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı.....	52
Şekil 5.28.	Damlama numunesinin (Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı.....	53
Şekil 5.29.	Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile 0 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-2-V grafiği.....	58
Şekil 5.30.	Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile +2 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği.....	59
Şekil 5.31.	Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile +2 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği.....	60
Şekil 5.32.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile 0 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-2-V grafiği.....	61

Şekil 5.33. Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği.....	62
Şekil 5.34. Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği.....	63
Şekil 5.35. Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Damlama diyotun -2 ile 0 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-2-V grafiği.....	64
Şekil 5.36. Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Damlama diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği.....	65
Şekil 5.37. Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Damlama diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği.....	66

TABLolar LİSTESİ

Tablo 5.1.	Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin I-V ve Norde ölçümleri.....	46
Tablo 5.2.	Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama numunesinin I-V ve Norde ölçümleri.....	48
Tablo 5.3.	Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag damlama numunesinin I-V ve Norde ölçümleri.....	49
Tablo 5.4.	Pd/n-Si/Al/Ag referans diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri.....	52
Tablo 5.5.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri.....	53
Tablo 5.6.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm ² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri.....	54
Tablo 5.7.	Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	58
Tablo 5.8.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	61
Tablo 5.9.	Pd/C ₁₅ H ₁₅ N ₃ O ₂ /N-Si/Al/Ag Damlama diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri.....	64

SİLİSYUM TABANLI ORGANİK METAL YARIİLETKEN KONTAKLARIN FOTODİYOT VE ELEKTİRİKSEL KARAKTERİZASYONU

ÖZET

Bu çalışmada iki yüzeyi de parlatılmış olan n-tipi Si yarıiletken tabakanın bir yüzeyine Al metali buharlaştırıldıktan sonra omik kontak için tavlandı ve üç parçaya ayrıldı. Numunelerden birincisi Referans (Pd/n-Si/Al/Ag), metil kırmızısı ($C_{15}H_{15}N_3O_2$) ile döndürerek kaplama ve damlama yöntemleri ile Pd/ $C_{15}H_{15}N_3O_2$ /n-Si/Al/Ag Schottky diyotlar elde edilmiştir. Elde edilen Schottky diyotların karanlık ortamda akım gerilim (I-V) ölçümleri alındıktan sonra fotovoltajik özellikleri için solar simülatör 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında I-V ölçümleri de alınmıştır. Ayrıca her üç numunenin kapasitans-voltaj (C-V) değerlerinin sonuçları için 1,10,50,100, 1000, 5000 ve 10000 kHz altında ölçümleri yapıldı. I-V ve C-V ölçümlerinden yararlanarak diyotların idealite faktörü (n), potansiyel engel yüksekliği (Φ_B), verici katkı atomlarının yoğunluğu (N_D), difüzyon potansiyeli (V_d), Fermi enerji seviyesi (E_F) ve yapıların seri dirençleri (R_s) hesaplanarak literatürle karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler: n-tipi Si, Metil kırmızısı, Schottky diyot, Engel yüksekliği, İdealite faktörü.

PHOTODIODE AND ELECTRICAL CHARACTERIZATION OF SILICON-BASED ORGANIC METAL SEMICONDUCTOR CONTACTS

ABSTRACT

In this study, Al metal was evaporated on one surface of n-type Si semiconductor layer which was polished on both surfaces and then annealed for ohmic contact and divided into three pieces. First of the samples was Reference (Pd/n-Si/Al/Ag), Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag Schottky diodes were obtained by spin coating and dropping methods with methyl red (C₁₅H₁₅N₃O₂) After the current-voltage (I-V) measurements of the obtained Schottky diodes were taken in the dark, I-V measurements were also taken under 100 mW/cm² light intensity in solar simulator for photovoltaic properties. In addition, the results of the capacitance-voltage (C-V) values of all three samples were measured under 1,10,50,100, 1000, 5000 and 10000 kHz. Using I-V and C-V measurements, the ideality factor (n), potential barrier height (Φ_B), density of donor atoms (N_D), diffusion potential (Vd), Fermi energy level (E_F) and series resistance (Rs) of the structures were calculated and compared with the literature.

Keywords: n-type Si, organic surface, methyl red, Schottky diode, Norde function, barrier height, ideality factor.

1. GİRİŞ

Metal yarıiletken Schottky kontaklar, optoelektronik ve elektronik alanlarında oldukça sık kullanılmaktadır. Metal yarıiletken alan etkili transistörler, metal yarıiletken kontaklar, güneş pili, foto diyotlar, lazer diyotlar, mikro dalga devre elemanları, devrelerin anahtarlama hızını artırma ve daha pek çok alan ve uygulamaya sahip olup teknolojiler de yaygın bir kullanımı vardır. Metal yarıiletken diyotların elektriksel özellikleri yarıiletken ile metal kısımları arasında kullanılan ara yüzey malzemesine bağlı olarak değişir. Son zamanlarda organik elektronik, ekonomik olarak dünyaya önemli değerler katmaya başladı.

Günümüzde, organik elektroniklerdeki gelişmeler artan organik materyal araştırmalarına olan ilgiyi artırdı ve bu materyaller ilerleyen yıllarda elektronik uygulamalarda devrim yaratma potansiyeline sahip olabilir. Organik bileşiklerin zengin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri, onları elektronik endüstrisindeki uygulamalar için deneyimli adaylar yetiştiriyor. Organik alan etkili transistörler, Schottky diyotları, organik ışık yayan diyotlar, fotovoltaiik ve güneş pilleri gibi moleküler malzemelere dayanan birçok cihaz üretilmiştir (Aydoğan, 2014).

Metal yarıiletken yapıları, Schottky diyotları III-V bileşik yarıiletkenlerine dayalı aygıtlarda önemli bir rol oynamaktadır. MS kontaklarının I-V karakteristikleri genellikle ideal termiyonik emisyon akım modelinden sapar. MS kontaklarında bariyer yüksekliği ve idealite faktörü gibi karakteristik parametrelerin deneysel çalışmaları hakkında çok sayıda rapor bulunmaktadır (Yıldırım, 2009).

Elektriğin icadından sonra, katı iletkenliği ile ilgili yapılan çalışmalarda bazı katıların elektrik iletkenliği çok iyi olduğu, bazılarının az ve bazı katıların da hiç iletmediği görülmüştür. Genel de iletkenlik, iletim ve valans bantlarında olan taşıyıcı (elektron ve hol) yoğunluğu ile bu iletim ve valans bant aralığında bulunan yasak enerji bantı göre tanımlanır. Bu durumda da katılar; iletken, yarıiletken ve yalıtkan olarak üçe ayrılır. Şayet valans bantı tamamen doluyorsa veya bu iki bant birbirine yakın mesafelerde ise veya üst

üste binmiş ise bu çeşit katılara iletken denir. Taşıma kapasitesi az, yasak enerji bandı yalıtkan ile iletken arasındaki bölgedeysen, bu çeşit katılara yarıiletken adı verilir. Valans bandının tamamı dolu ve yasak enerji band aralığı çok büyük olan katılara yalıtkan denir. Yarıiletken maddelerin iletkenlik durumu genelde; aydınlanma şiddetine, sıcaklığa, elektrik alana, safsızlık atomlarının yoğunluğu ve manyetik alan gibi özelliklere bağlı olarak önemli ölçülerde değişir (Kittel, 1996).

Elektronik ve optik cihazlar için yarıiletken uygulamaları, genellikle kristal kafes yapısında kusurların oluşturulması ve bu kusurların kontrolüyle gerçekleştirilir. Kafes kusurları malzemenin taşıyıcı tipini ve konsantrasyonunu belirlemek için alıcı ve verici atomlarla katkılanması gerekir. Katkılamayla taşıyıcı hareketliliği de kontrol edilebilmektedir. Genel olarak, çeşitli safsızlıklar eklenerek oluşturulan p-tipi ve n-tipi yarıiletkenler, lazerler, ışık yayan diyotlar, foto çoğaltıcılar ve radyasyon detektörleri gibi uygulamalar için yarıiletken alanında yaygın olarak kullanılmaktadır (Weber, 2003).

2. KAYNAK ÖZETİ

Metal yarıiletken kontakların doğrultma işleminin anlaşılması için ilk adım, 1931 yılında atılmıştır. O yıllarda, Schottky, Störmer ve Waibel, akım geçerken kontakta potansiyel düşme olacağını ve bir tür potansiyel engelin varlığını ima etmişlerdir. Kuantum mekaniği geliştiğinde, 1932 yılında Wilson ve diğerleri, bu engel boyunca elektronların kuantum mekanik tünellemesi ile doğrultma işlemini açıklamaya çalışmışlardır. Mott'a göre, potansiyel engel yarıiletkenin ve metalin iş fonksiyonları arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Ayrıca, elektrik alanın sabit olması ve elektrostatik potansiyelin metale yaklaşırken aralarındaki uzaklıkla lineer olarak değişmesi için, engel bölgesinin yüklü safsızlıklardan yoksun olması gerektiğini öne sürmüştür. Buna karşın, Schottky 1939'da metale yaklaşıldığında elektrik alanın Poisson denkleminde göre lineer ve elektrostatik potansiyelin karesel olması için engel bölgesinin sabit yoğunluklu yüklü safsızlıklar içermesi gerektiğini kabul etmiştir. Bethe (1942) tarafından termiyonik emisyon teorisi, yarıiletken fiziğine önemli katkılarda bulunmuştur. Daha sonra metal yarıiletken kontaklar, mikro elektronik alanında geniş kullanım alanı bulmuştur. Yarıiletken yüzeyler, çeşitli koşullar altında büyütülebilir, farklı yeniden yapılanma şekilleri gösterebilir ve külçe halinden farklı bir periyodikliğe sahip olabilir. Bu karakteristiklerinden dolayı yarıiletken yüzeyler, farklı elektronik ve optik özellikler sergilerler (Srivastava, 2002).

Yarıiletkenlerin iletkenlikleri metallere göre daha düşük ve yalıtkanlardan daha yüksektir. Aynı zamanda yarıiletkenlerin iletkenlikleri, sıcaklık ve kimyasal saflık gibi malzeme kalitesine metallere göre çok daha fazla bağlıdır (Enderlin et. al., 1997).

Yarıiletkenler, element halinde ya da bileşik halde bulunabilir. Tek tür atomdan oluşan yarıiletkenler, Si ve Ge elementleridir. Bunlardan silisyum, bütünleşmiş devrelerde en fazla tercih edilen yarıiletken malzemedir (Neamen, 2003).

En iyi bilinen yarıiletkenlerden biri silisyumdur. Silisyum, teknolojik olarak oldukça önemli bir malzemedir. Si yüzeyler yarıiletken teknolojisinde prototip malzeme oluşu nedeni

ile deneysel ve teorik çalışmaların odağı haline gelmiştir. Si yüzeyler Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy) veya iyon bombardımanı tercih edilerek istenilen yönde alttaş üzerinde yapay olarak büyütülebilir, ya da basit kristalden kesilerek hazırlanabilir. Alttaş olarak sıklıkla (001), (110) ve (111) doğrultularında büyütülmüş yüzeyler kullanılmaktadır.

Foto diyotlar, ışığı akıma çeviren yarıiletken optoelektronik cihazlardır. Bir foto diyotun bileşenleri, yarıiletken bir malzeme ve bazı bağlantı noktalarıdır. Metal yarıiletken (Schottky), p-n ve p-i-n gibi. Metal yarıiletken ara yüzeyde, yarıiletken yüzeyine kaplanan metalin türüne bağlı olarak, farklı oluşumlar ortaya çıkabilir. Arayüzey üzerindeki önemli faktörler, örgü uyumsuzluğu, tanecik sınırlarından kaynaklanan zorlanmış alanlar ve metalin difüzyonu gibi etkilerdir. (Sharma, 1984).

Metal yarıiletken cihazların özelliklerini daha iyi anlamak için bu cihazların sıcaklığa bağlı elektriksel karakteristiklerinin elde edilmesi gerekir. Öte yandan, sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonlar, metal yarıiletken cihazların iletim mekanizması, ara yüz durumları ve bariyer homojensizliği hakkında daha fazla bilgi sağlar. Literatür incelendiğinde, öneminden dolayı farklı metal-yarı iletken yapıların sıcaklığa bağlı elektriksel karakterizasyonu ile ilgili birçok çalışma görülebilir. Orak ve arkadaşları (2017) yılında yaptıkları bir çalışmada Au/n-Si/Al Schottky diyotların akım gerilim karakteristikleri üzerindeki termal tavlama ve numune sıcaklığının etkilerini incelediler ve değişen sıcaklıkla değişen kapasitans ve diyot parametrelerini elde ettiler.

Gülnahar (2023) yılında, p-tipi bir Si alt tabaka üzerine termal yolla fabrikasyon işlemleri yapılan Au/Al metalizasyon ile oluşturulan Au/Al/p-Si kontak yapısında sıcaklığa bağlı akım-gerilim ölçümleri alınmış ve bu ölçümlerden bazı engel parametrelerinin sıcaklıkla ilişkili analizleri yapılmıştır.

Literatür taramasında Pd/n-Si ile ilgili olarak çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bizde bununla ilgili olarak çalışmalarda bulunduk.

Bu tez çalışmasında Silisyum tabanlı Metal/Yarıiletken ve Metal/Arayüzey/Yarıiletken yapılar elde edilecek bu yapıların elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri incelenecektir.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Yarıiletken Malzemeler

Tek metal elektrik alan altında bir elektrik akımı üretir. Aksine, bir elektrik alanın uygulanması, bir yalıtkanda akım üretmez. Bu malzemeler arasındaki farkı enerji bant teorisi açıklamaktadır. Tamamen dolu bir bant, bir elektrik alan varlığında bile elektrik akımı üretmez. Bu nedenle, bir katının, yalnızca bazı bantlar dolu olduğunda bir metal davranışı sergilediği sonucu ortaya çıkar (Omar, 1993).

Malzemedeki elektronlar sıcaklık, ışık, basınç gibi dış etkenlerle uyarıldığında, valans bandından iletim bandına aktarılır. Bu sayede valans bandının üst kısmı boşluklarla, iletim bandının alt kısmı da elektronlarla dolar. Böylelikle her iki bant kısmen dolu olur ve bir elektrik alan altında elektrik akımı taşır. Elektronlar ve holler yarıiletkenler için iki farklı yük taşıyıcısıdır (Omar, 1993; Aslan vd., 2020).

Bantlar arasındaki aralık, yasak enerji aralığıdır. Bu aralığın üst kısmındaki bant iletkenlik bandı, altta bulunan bant ise valans bandı olarak adlandırılmaktadır. Yasak enerji aralığı metallerde yok denecek derecede azdır. Yalıtkanlarda ise bu aralık oldukça büyüktür. Yarıiletkenler bu iki malzeme arasında bir yasak enerji aralığına sahiptir. Yasak enerji değerleri kıyaslandığında 3,8 eV' dan küçük değerdekiler yarıiletken, 4 eV'dan büyük değerdekiler yalıtkandır. Yasak enerji aralığı $E_g \cong 2eV$ değerinde ya da daha küçük olanlar önemli yarıiletkenlerdir (Dugan, 2019; Aslan vd., 2020)

Yarıiletkenlerin sıcaklık arttıkça elektriksel iletkenlikleri artmaktadır. Mutlak sıcaklık değerinde ($T=0$ K) ise yarıiletkenler, yalıtkan gibi davranırlar. Farklı malzemelerle katkılanan yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliklerinde değişimler gözlenmektedir. Doğru katkı oranlarıyla yarıiletkenler metaller kadar iletken olabilmektedirler. Yarıiletkenlerde, katkı malzemesine göre katkı bölgesinde, daha fazla boşluk ya da daha fazla elektron oluşmaktadır.

Yarıiletkenin n tipi veya p tipi olduğu yük taşımalarına göre belirlenir. Katkılı yarıiletkenlerde yük taşıyıcısı elektronlar ise n tipi, yük taşıyıcıları boşluklar ise p tipi yarıiletken olarak adlandırılmaktadır (Dugan, 2019).

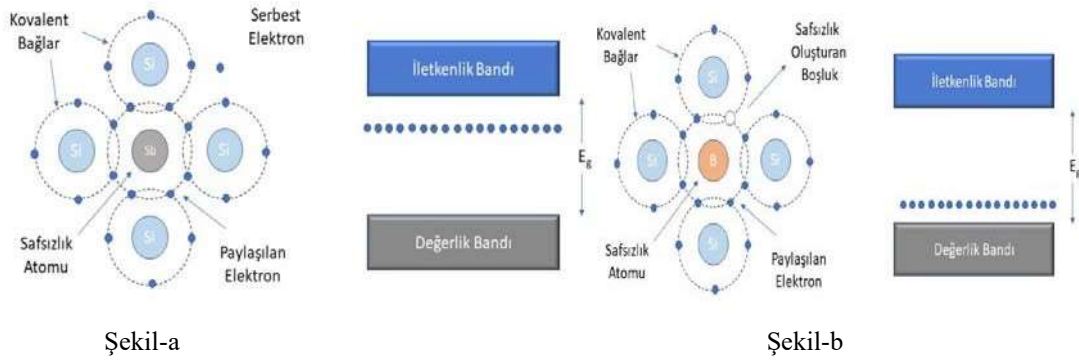
3.1.1. Katkılı Yarıiletkenler

Katkısız yarıiletkenlerde valans bandının tamamen dolu olması, iletkenlik bandında elektronun olmaması, mutlak sıcaklığın sıfır olması durumunda malzeme iletken değildir. Katkısız yarıiletkenlerde termal uyarımla valans bandından elektronlar iletim bandına yükseltilir ve eşit sayıda yük taşıyıcıları oluşur. Katkılı yarıiletkenlerde ise yük taşıyıcıların sayısı birbirinden farklıdır. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri uygun katkılama ile değişmektedir ve yarıiletkenlerin en özgün özelliklerinden biri de budur. Çok az miktarda uygun katkı maddesinin uygun yöntemlerle eklenmesiyle yarıiletkenlerin iletkenlikleri birçok büyüklük mertebesinde değiştirilebilmektedir (Jacoboni, 2010).

Yarıiletkenlerde istenilen doğrultuda yapılan katkılama işleminde safsızlık atomları, elektron verici ya da elektron alıcı olmak üzere işlev görmektedir. Safsızlık atomlarının elektron alıcı ya da elektron verici olması bakımından yarıiletkenler n-tipi ya da p-tipi olarak adlandırılırlar ve farklı özellikler gösterirler. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar elektronlardır ve safsızlık atomları donör yani elektron verici atomdur. Element yarıiletkenlerden ve periyodik cetvelin IV. grup elementlerinden olan Si, Ge kristallerine farklı yöntemlerle periyodik cetvelin V. grup P, Sb, As, N elementlerinden birinin çeşitli yöntemlerle katkılanması sayesinde n-tipi yarıiletkenler oluşturulur (Taner, 2010).

Si ve Ge atomlarına beş değerlikli safsızlık atomları eklendiğinde Si ve Ge atomunda dört elektron ile safsızlık atomundaki dört elektron birleşerek kovalent bağ oluşturur. Bağ yapamayan beşinci elektron da safsızlık atomuyla kuvvetsiz bir bağ kurar. Güçsüz bağlanan elektronlar yasak enerji aralığında donör enerji seviyeleri oluştururlar. Bu enerji seviyesindeki atomlar küçük bir enerjiyle uyarılmaları sonucunda iletim bandına geçebilirler ve valans bandında boşluk oluşmaz. Buna ek olarak valans bandındaki elektronlardan da geçiş olabilir ve orada elektron geçişi kadar boşluk oluşur. Fakat iletkenlik bandına donör enerji seviyesinden ve valans bandından geçen elektronların

sayısı, valans bandında oluşan boşluklardan fazladır. Elektronlar, n tipi yarıiletkenler için çoğunluk taşıyıcıları olmaktadır (Dugan, 2019). Şekil 3.1.a' da n tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi şematik olarak görülmektedir.



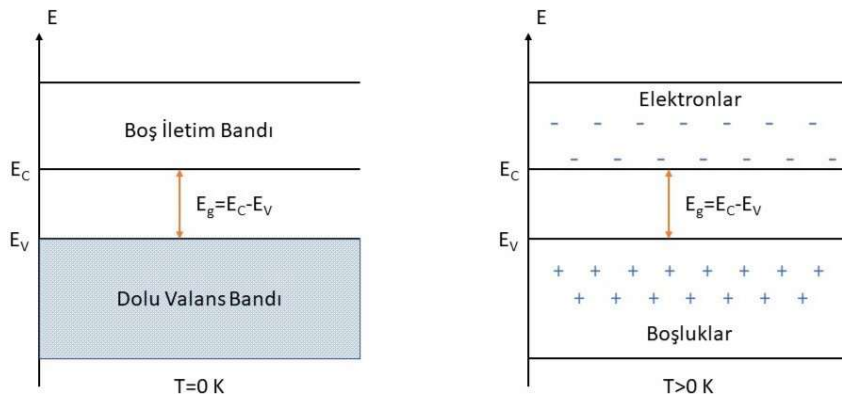
Şekil 3.1. a) n tipi yarıiletken b) p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi

p-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcılar boşluklardır ve safsızlık atomları akseptör yani elektron alıcı atomlardır. Periyodik cetvelin III. grup elementlerinden olan B, Al gibi elementler IV. gruptaki Si ve Ge elementlerine katıldığında, Si ya da Ge elementlerinin dört değerlik elektronlarıyla safsızlık atomunun üç değerlik elektronu kovalent bağ yapar. Si ya da Ge dördüncü kovalent bağda elektron katkısını tek başına sağlar. Safsızlık atomundan bu bağa elektron gelmez. Böylece dördüncü kovalent bağda bir boşluk oluşur. Holl adı verilen bu boşluklar için safsızlık atomları bir elektron alır hale gelir. Bu safsızlık atomları, elektron alıcı atomlar olarak adlandırılır. Uygulanan voltajla p-tipi yarıiletkende hollerle elektronların yer değişimi hareketi nedeniyle bir iletim söz konusu olur ve p-tipi yarıiletkenlerde holler çoğunluk yük taşıyıcıları olarak tanımlanır (Batmaz, 2020). Şekil 3.1.b' de p tipi yarıiletken için kovalent bağ oluşumu ve safsızlık enerji düzeyi şematik olarak görülmektedir.

3.1.2. Katkısız Yarıiletkenler

Katkısız bir yarıiletkende her iki yük taşıyıcısı, elektronlar ve boşluklar, birbirine eşit sayıdadır. Bununla birlikte, birçok uygulamada, sadece bir tür taşıyıcıya sahip olan malzemelere ihtiyaç vardır. Bu doğrultuda yarıiletkeni uygun malzemelerle katkılayarak, elektron ya da boşluk içeren malzemeler elde edilmektedir (Omar, 1993).

Katkısız yarıiletkenler ısıyla uyarıldıklarında valans bandından iletim bandına bir elektron geçişi olur. Bu elektrona karşılık valans bandında da tek bir boşluk oluşur. Bu boşlukların yeri valans bandındaki diğer elektronlarla yer değiştirerek değişir ve böylece boşluklar hareket halinde olur. Boşlukların ve elektronların serbest hareketi sayesinde elektriksel iletkenlik sağlanmış olur (Dugan, 2019; Taner, 2010). Şekil 3.2.'te katkısız yarıiletkenin sıcaklık değişimiyle iletim ve valans bantlarındaki değişim görülmektedir.

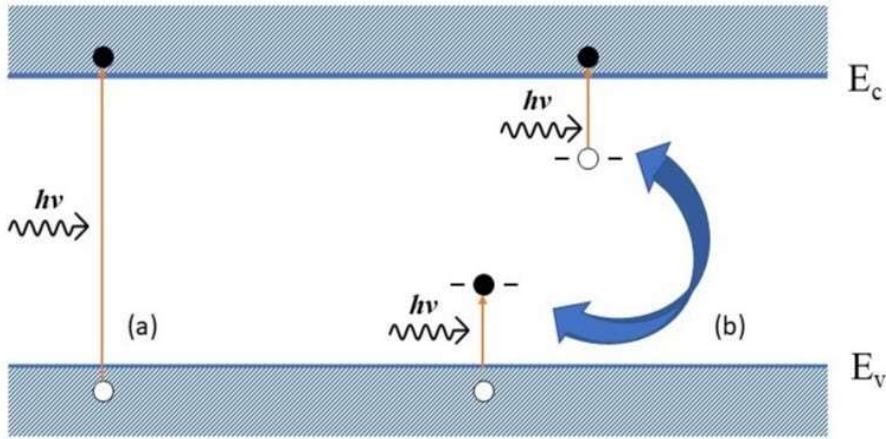


Şekil 3.2. T=0 ve T>0 sıcaklıklarında doğal yarıiletkenlerin iletim ve valans bantlarının şematik gösterimi

3.2. Foto Diyotlar

Teknolojideki uygulama alanı oldukça geniş olan foto diyotlar, ters besleme voltajı altında üzerine ışık düşmesiyle elektriksel bir iletim sağlayan devre elemanlarıdır. Üzerine ışık düşen foto diyotta, fotonun enerjisi valans bandında bulunan elektronları uyarır ve iletim bandına geçen elektronlar sayesinde diyottan akım geçmesi sağlanır. Foto diyotlar doğru beslemede tıpkı bir diyot davranışı sergilerler. Bir devrede foto diyotlar, devreye ters bağlanır ve ters yönde oluşan sızıntı akımın artmasıyla devrede kontrolü yapmaktadırlar. Foto diyotların içerisinde oluşan elektron boşluk çiftlerinin uyarılma etkisiyle hareketleri sonucunda bu kontrol sağlanmaktadır. Foto diyotlardan geçen akım, gelen ışık şiddetiyle doğru orantılı bir şekilde değişmektedir (Çavaş, 2011; Aslan, 2019; Göktaş, 2018).

Foto diyotlar, kontaklarla ince filmlerin bir araya getirilmesi ve birbiriyle etkileşimiyle oluşturulmaktadır. Foto diyotların ışığa olan yüksek duyarlılığı, yüksek cevap hızı, güvenilirliği ve az maliyetli bir devre elemanı olmaları önemli özelliklerindedir ve optik sistemlerinde tercih edilmektedirler (Aslan, 2019; Demirbilek, 2019).



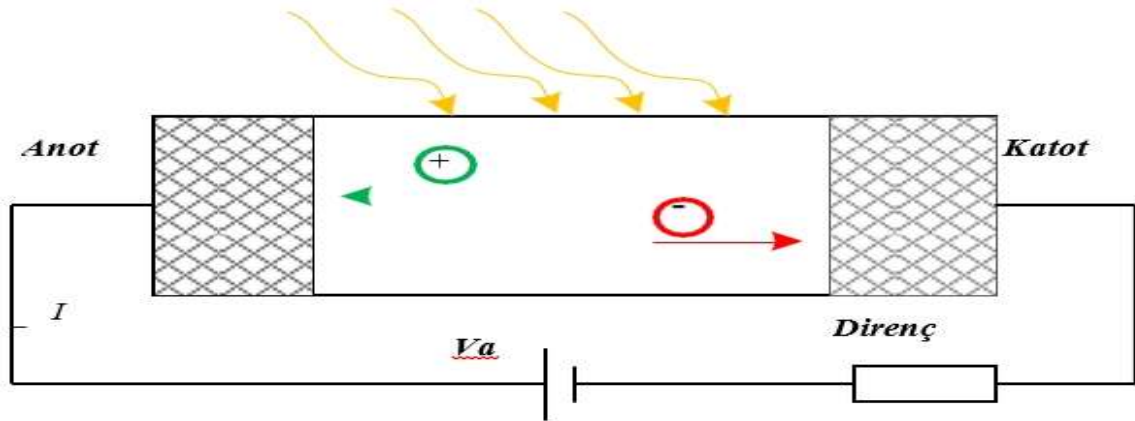
Şekil 3.3. Foto diyotun fotonla uyarılması a) elektronun bantlar arası geçişi b) safsızlık enerji seviyesinden iletim bandına geçişi

Görünür ışık, ultraviyole ışık veya ışımayı algılayarak bunu bir elektriksel sinyale dönüştüren aygıtlara fotodiyot denilmektedir. Işıma birimi fotodiyotlarda W/m^2 veya W olabilir ve elektriksel çıkış birimleri olarak ise $I-V$ kullanılır. Bir malzemenin elektromanyetik ışımaları absorbe ederek elektriksel iletkenlikte değişme göstermesi foto iletkenlik olarak adlandırılır ve bir yarıiletkenin fotoiletken olabilmesi için serbest elektron ve hollerden meydana gelen bir yapısının olması gerekir. Yarıiletken tarafından ışık absorbe edildiği zaman yapılarında bulunan serbest elektronlar ve holler rastgele dağılırlar ve böylelikle elektriksel iletkenlikte artış meydana gelir. Üzerine ışık uygulanan bir fotoiletken malzemenin yapısında bulunan yüklerin bantlararası nasıl geçiş yaptığı ve yasak enerji aralığının üzerine çıkarak iletkenlikte meydana gelen artışın nasıl gerçekleştiği Şekil 3.3'te gösterilmiştir (Kara, 2020).

Foto diyotların anot ve katot olmak üzere iki uçları vardır. Foto diyotlar üzerine ışık düşürülüp besleme voltajı ve ters besleme uygulandığı zaman iletken hale gelip katottan anoda doğru akım geçirirler. Doğru besleme yapıldığında foto diyotlar normal diyota benzer şekilde çalışırlar. Foto diyotlarda fotonlar bir mercekten geçerek p ve n tipi malzemelerin birleştiği bölgeye odaklanır ve bu durumdan dolayı fotonların enerjileri absorbe edilerek valans bandındaki elektronların iletim bandına geçmesi sağlanır. Foto diyotlar üzerine düşen ışığın şiddeti arttıkça daha çok akım geçer. Bu durum fotonun ışık şiddetinin p-n yüzeyinin birleşimindeki direnci azaltmasından kaynaklanır ve fotodiyot gönderilen ışığın şiddeti p-n yüzeyindeki direnç ile ters orantılıdır (Özdere, 2021).

Şekil 3.4'te fotodiyot şematik olarak gösterilmiştir. Foto diyotun anoduna, anottan daha düşük bir potansiyele sahip ters besleme gerilimi uygulandığı zaman, yarıiletken içerisinde bir elektrik alanı oluşur ve bu elektrik alanı, anot ve katodun etrafında foto taşıyıcıların toplanmasına neden olur. Anotta pozitif ve katotta negatif yükler belirleyerek elektrik akımının oluşmasını sağlar. Bu akım fotoakım olarak adlandırılır ve bir foto diyotta fotoakım genellikle üç aşamada oluşur. (Aslan, 2019);

- I. Yarıiletkende fotonun absorbe edilmesi ve serbest taşıyıcıların üretilmesi,
- II. Belirli bir bölgede meydana gelen elektrik alan, taşıyıcıların toplanmasına olanak tanır.
- III. Kontaktlarda taşıyıcıların bir araya gelmesi, elektrik alanın etkisiyle gerçekleşir.



Şekil 3.4. Foto diyotun şematik gösterilişi

Foto diyotlar ışığa karşı duyarlı olmalarının yanında çalışma hızları çok yüksek olmasından dolayı fiber optik kablolar ile veri iletilmesinde kullanılabilirler. Ayrıca, ışık ölçüm cihazlarında, ışık detektörlerinde, elektronik flaşlarda, opto-kuplatörlerde, bilgisayar, fotoğraf makinesi ve transistörlerde yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. (Aslan, 2019).

Foton enerjisinin foto diyottaki yükleri uyarmasıyla bantlar arasında gerçekleşen geçiş, Şekil 3.4'te görülmektedir. Burada gelen foton enerjisinin taşıyıcı yüklere etki etmesiyle elektriksel iletim gerçekleşmektedir. Foto diyotta optik uyarılma tüketim bölgesinde yük taşıyıcıları oluşmakta ve yüksek elektrik alanı oluşmaktadır. Bu elektrik alanının etkisiyle taşıyıcı yükler malzeme içerisinde hareket eder ve uç kısımda toplanırlar (Özmen,2015).

Diyotların çalışması için üç farklı çalışma metodu:

- $E_g > h > q\phi_b$ ve $V < V_B$ durumu için V_B engel geçme voltajı için tanımlanmıştır. Fotonla uyarılan foto diyottaki metal elektronları, engel gerilimini aşabilir. Engeli geçen elektronlar yarıiletkende toplanırlar. Bu sayede metal yarıiletken foto diyotlarda engel yüksekliği belirlenebilmektedir. Aynı zamanda bu durum metaldeki sıcak elektron geçişinde kullanılmaktadır.
- $h > E_g$ ve $V < V_B$ durumu için foto diyot tarafından soğurulan foton enerjisi yarıiletkende elektron ve boşluk çiftleri oluşturur. Bu modda diyotun genel yapısı p-i-n fotodiyotuna benzemektedir.
- $h > E_g$ ve $V > V_B$ durumu için fotodiyot çıkış bozulma bölgesinde çalışabilmektedir (Çavaş, 2011; Aslan, 2019; Özmen, 2015).

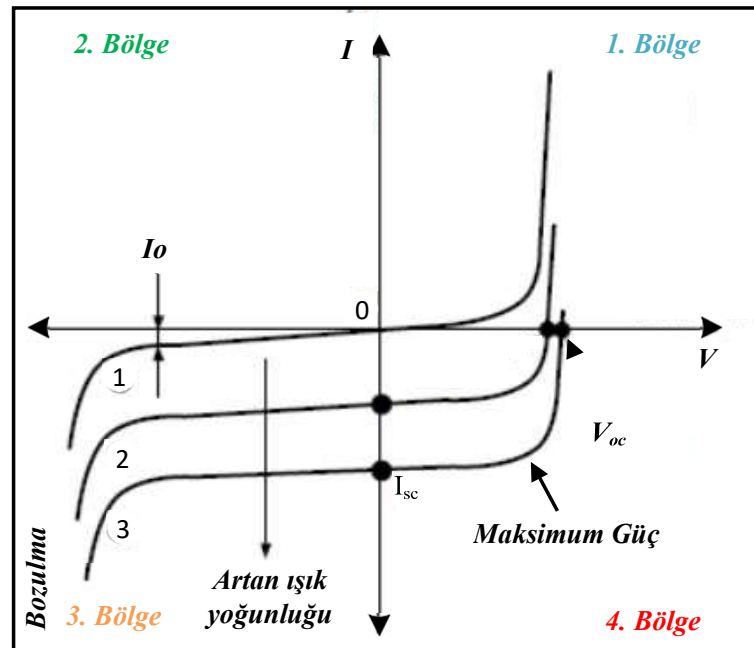
Ters beslemede foto diyotta fotoakım için, gelen fotonun enerjisinin engel yüksekliğinden büyük olması gerekmektedir. Soğurulan fotonun enerjisiyle elektron ve boşluk çiftleri hareket eder. Ters beslemede anotta uygulanan anottan daha küçük bir ters besleme gerilimi yarıiletkenin yapısında bir elektrik alan oluşturur. Elektrik alanın etkisiyle anotta pozitif, katotta negatif yükler oluşur ve böylece devrede bir fotoakım oluşur. Fotoakımın oluşma adımları şu şekilde sıralanabilir:

- Gelen fotonun malzeme tarafından soğurulması ve yük taşıyıcılarının oluşması.
- Elektrik alan altında yük taşıyıcılarının hareketi.
- Anot ve katot kontaklarında yük taşıyıcılarının bir araya gelmesidir (Dere, 2014; Aslan, 2019).

Bir yarıiletken ve bir metalin kontak oluşturularak bir araya getirilmesi sayesinde metal yarıiletken foto diyotlar oluşur. Metalin ve yarıiletkenin enerji bant diyagramları farklıdır ve bu iki malzemenin kontaklarla birleştirilmeleri sonucunda aralarında yük geçişleri oluşmaktadır. Bu yük geçişleri foto diyotun ısıl dengeye ulaşmasına kadar devam eder. Oluşan metal yarıiletken foto diyotundaki metal ve yarıiletkenin Fermi enerji düzeyi ısıl denge sağlandığında aynı seviyededir (Dere, 2014).

3.2.1. Foto Diyotların I-V Karakteristiği

Foto diyotların I-V karakteristikleri, içerindeki akım taşıma mekanizmalarının çeşidine bağlı olarak ortaya çıkar. Metal-yarıiletken eklemleri ve p-n eklemleri nedeniyle farklı mekanizmalar ortaya çıkar (Özdere, 2021). Foto diyotların I-V karakteristikleri normal diyotların I-V karakteristiğine şekilsel olarak benzerler. Bir foto diyotun karanlıkta ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri şekil 3.5'te görölmektedir.



Şekil 3.5. Foto diyotun karanlıkta ve aydınlık durumlarda I-V karakteristikleri.

Foto diyotun ışığa duyarlı yüzeyine ışık gelmediğinde sadece termal yoldan azınlık taşıyıcılarla oluşan akım fotodiyot üzerinden akar ve bu akım karanlık akım olarak isimlendirilir. Şekil 3.5'teki A foto diyotun karanlık durumdaki I-V göstermektedir. Görüldüğü gibi I-V karakteristikleri dört bölgeden meydana gelmiştir. Birinci bölgedeki I ve V pozitifdir ve foto diyota uygulanan gerilim doğru polaritededir. Bu bölge foto diyotun doğru besleme bölgesi olarak adlandırılır ve fotodiyot uygulamalarına fotodiyot normal bir diyot davranışı gösterdiğinden uygun değildir. İkinci bölgede foto diyotun herhangi bir cevabı yoktur ve üçüncü bölgede ise küçük bir akım (I_s) akmaktadır. Foto diyotun çalışma alanı üzerine gelen ışığın şiddet arttıkça bu bölgedeki eğriler aşağıya doğru negatif akım yönünde değişir. Bu eğrilerin V=0 ekseninde akım eksenini kestiği

nokta kısa devre akımıdır (I_{SC}). Akım sıfır olduğunda ise eğrilerin voltaj eksenine ile kesiştiği noktalar ise açık devre voltajıdır (V_{OC}). Ters besleme voltajlarının çok yüksek olduğu durumlarda akım hızlıca artar ve diyot çalışamaz hale gelir. Bu bölgede meydana gelen ters bozulma bölgesi olarak adlandırılır (üçüncü bölge). Işığı algılama için uygun bölge ters polaritesi gerilimin uygulandığı bölge olan üçüncü bölgedir. Foto diyotun fotovoltaj bölgesi ise dördüncü bölgedir (Gündüz, 2007).

I-V karakteristiği, bant genişliği ve kuantum verimi, foto diyotların üç ana karakteristiğidir ve bir foto diyotun performansı bu özelliklerle belirlenir. Yüksek bozulma voltajı ve düşük karanlık akımları diyotların eklem niteliklerinin bir göstergesidir. Karanlık durumdaki polarite sırasında diyottan geçen akım düşük karanlık akımı gösterir ve foto diyotun hassasiyetinin göstergesidir. Burada ters polarite voltajının değeri bozulma voltajıdır ve ters polarite voltajının sınırını gösterir. Bu sınır geçildikten sonra kazanç ve çarpma mekanizmaları foto diyotun çalışmaya başladığı voltaj sınırını gösterir ve bu sınırdan sonra diyot çalışmaya başlar (Özdere, 2021).

Bir akım üretici olan fotodiyot, yeterli miktarda ışığa maruz kaldığında çalışmaya başlar. Işık, fotodiyot içinde zayıf bir akım oluşturur ve foto diyota bir gerilim uygulandığında devredeki yük direncinden dolayı fotoakım oluşur. Bu yük, dış devre direncinin toplamıdır ve fotoakımın bir kısmı iç direnç üzerinde, büyük kısmı ise dış devre direnci üzerinde oluşur. Bu özellikleri sayesinde foto diyotlar, fotovoltaj veya akım kaynağı olarak kullanılabilirler. Foto diyotların doğru akım karakteristikleri incelendiğinde, seri direnç, bariyer yüksekliği ve idealite faktörü elde edilebilir. (Gündüz, 2007).

3.2.2. Fotovoltaj Parametreler

Foto diyotların veya güneş pillerinin yük karakteristikleri, spektral kuantum verimi, açık devre voltajı, kısa devre akımı, doluluk faktörü, maksimum güç noktasındaki voltaj, maksimum güç noktasındaki akım, maksimum çıkış gücü, seri direnç ve şönt direnci gibi çeşitli fotovoltaj parametreler kullanılarak analiz edilir. Bu parametreler, foto diyot veya güneş pili performansının değerlendirilmesinde önemli rol oynar ve çeşitli uygulamalarda kullanılmak üzere karakterizasyonlarını sağlar. (Kara, 2020; Aslan, 2019; Gündüz, 2007).

3.2.3. Açık Devre Gerilimi

Işığa maruz kalan diyotun I-V karakteristiğinde, eğrinin voltaj eksenini kestiği noktadaki voltaj V_{oc} 'dir ve akım sıfır olduğunda Denklem 3.1 yardımıyla hesaplanabilir (Aslan, 2019; Gündüz, 2007).

$$V_{oc} = \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left[\left(\frac{I_0}{I_s}\right) + 1\right] \quad (3.1)$$

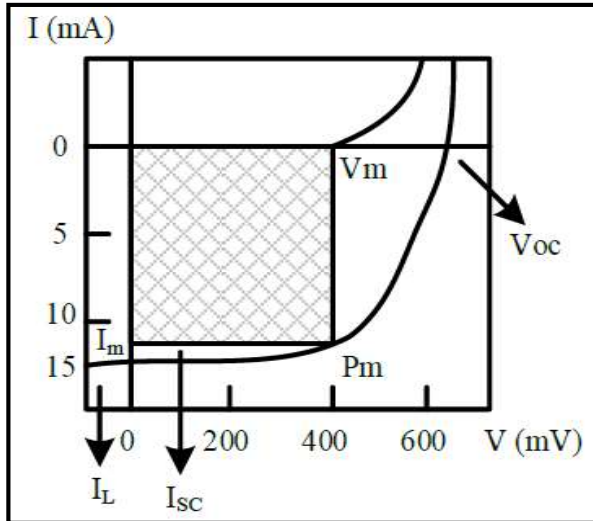
Denklem 3.1'den görüldüğü gibi yüksek V_{oc} değerlerine yüksek n değeriyle ulaşılabilir. Bu durum her zaman geçersiz yüksek n ancak yüksek I_s değerleri ile elde edilebilir ve p-n eklemleri için V_{oc} her zaman, n 'nin değerinin 1'e yakın düşük değerlerinde daha yüksektir.

3.2.4. Dolum Faktörü

Dolum faktörü (FF) Denklem 3.2 yardımıyla hesaplanabilir (Aslan, 2019; Gündüz, 2007).

$$FF = V_m I_m / V_{oc} I_{sc} \quad (3.2)$$

FF Şekil 3.6'da verildiği gibi I-V çizgilerinin kullanılmasıyla elde edilen şekillerin (kare veya dikdörtgen) alanları ile ilişkilidir. Bant aralığı yüksek olan malzemeler V_{oc} değerlerinin yüksekliğinden dolayı yüksek FF değerine sahiptirler (Aslan, 2019; Gündüz, 2007). Normalleştirilmiş V_{oc} 'ye bağlı FF, V_m/V_{oc} ve I_m/I_{sc} 'nin değişimi Şekil 3.6'da görülmektedir (Özdere, 2021).



Şekil 3.6. Foto diyotun karanlık ve aydınlık durumlarda I-V karakteristiği (Özdere, 2021).

3.2.5. Foto Duyarlılık

Optik gücü meydana getiren fotoakım ile ilgili olan foto duyarlılık foto diyotların ölçüm parametrelerinden biridir ve foto diyotlarda ışığa karşı hassasiyetin bir ölçüsüdür. Foto diyotlarda fotoakımın (I_{ph}) verilen dalga boylarında foto diyota gelen ışın gücüne oranı foto duyarlılığı verir. Diğer bir deyişle foto diyota gelen ışığın gücünün elektrik akımına çevrilen etkisinin ölçüsüdür. Foto diyotlarda foto duyarlılık değeri ışığın dalga boyu, sıcaklık ve ters besleme voltajının değişmesinden etkilenir ve foto duyarlılık değeri Denklem 3.3 ile bulunabilir.

$$PR = \frac{I_{ph}}{p} \quad (3.3)$$

Foto diyotların duyarlılıklarını yükseltmek için fotodiyot yüzeyine çarpan ışıkla yansıyan ışık arasındaki oranı düşürmek gereklidir (Gündüz, 2007).

3.3. Metal Yarıiletken Omik Kontaklar

Omik kontaklar, metal ile yarıiletken arasında ohm kanununa uygun bir iletim sağlayan kontaklardır. Yarıiletken yüzeyde omik kontak oluşturulması için genellikle şu adımlar izlenir:

1. Yarıiletken Yüzeyin Metal ile Kaplanması: İlk adım, yarıiletken yüzeyin istenilen bölgelerine metal kaplanmasıdır. Bu metal altın (Au) veya alüminyum (Al) gibi yüksek iletkenliğe sahip metallerden seçilir.

2. Isıl Tavlama İşlemi: Metal kaplama üzerine yüksek sıcaklıkta bir ısıl tavlama işlemi uygulanır. Bu işlem, metaldeki elektronların yarıiletken yüzeyine difüzyon yapmasını sağlar. Metalin yüzeyine uygulanan ısıl işlem, elektronların yarıiletken içine geçiş yapmasını kolaylaştırır.

3. Bariyer Yüksekliği ve Elektron Tünelleme: Yarıiletken içindeki katkı konsantrasyonu arttıkça bariyer yüksekliği azalır. Bu durum, elektronların yarıiletken yüzeyine tünelleme yoluyla geçişini kolaylaştırır. Sonuç olarak, omik kontaklar yarıiletken yüzeyde düşük dirençli bir bağlantı sağlar.

Omik kontakların başarılı olması için doğru metal seçimi ve uygun ısıl işlem parametreleri kritiktir. Bu süreçlerin dikkatli kontrolü, istenilen elektriksel performansın elde edilmesini sağlar.

Metal yarıiletken kontakların çoğu, genellikle termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilir. Bu yöntem, bir vakum cihazında metalin bir numune üzerine kaplanması veya toz ve diğer kirliliklerden arındırılmış arayüzey elde etmek için kullanılır.

Buharlaştırma ile elde edilen diyotların büyük bir kısmı, genellikle difüzyon pompası ile pompalanan ve yaklaşık 10^{-6} Torr basınç sağlayan bir vakum cihazında üretilir. Holland (1956), bu kaplama yöntemini kullanarak çeşitli metal filmleri üretmiştir. Yüksek sıcaklığa dayanabilen metaller Molibden ve Titanyum, genellikle Elektron Işın Isıtma (Electron Beam Heating) yöntemiyle buharlaştırılır. Bu yöntemde, metal, yüksek enerjili bir elektron demeti ile ısıtılarak buharlaştırılır. Düşük erime sıcaklığına sahip metaller Alüminyum ve Altın ise, genellikle bir filaman şeklindeki rezistansın ısıtılmasıyla kolaylıkla buharlaştırılabilir. Bu yöntemler, metal-yarıiletken kontakların üretiminde kullanılan yaygın tekniklerdir ve her bir metalin özellikleri ve uygulama gereksinimleri dikkate alınarak seçilir.

Yarıiletken yüzeyinde hiç oksit tabakası olmasa dahi, yarıiletkenin vakum cihazına konulana kadar havadaki tozlarla etkileşmesi veya istenen vakum basıncına ulaşana kadar geçen süre içinde oksit tabakası oluşabilir. Örneğin, 10^{-5} Torr basınçta yüzeye çarpan gaz molekülleri, yaklaşık 0,1 saniyede bir tabaka oluşturabilir. Silisyum üzerindeki oksijen için beklenen yapışma katsayısı 10^{-3} 'e kadar düşerse, tek bir tabaka oluşması için kısa bir zaman (yaklaşık 100 saniye) yeterli olabilir. Ancak, vakum pompasının basıncının düşmesi zamanı genellikle 10'larca dakikaya kadar sürebilir, bu nedenle yarıiletken yüzeyi daha yüksek basınca maruz kalabilir. Son basınç değerine ulaşıldıktan sonra, vakum sistemi içinde yüzeyin hazırlanması için yarma (cleave) veya dağlama (etching) gibi işlemler yapılıyorsa, yüzeyin oksitlenmesini önlemek için vakumun genellikle 10^{-7} Torr civarında tutulması gereklidir. Bu düşük basınç seviyesini koruyabilmek için çok iyi bir vakum cihazı gereklidir. (Joyce and Neave 1971).

Ayrıca, bir ara yüzey tabakası, difüzyon pompasından buharın adsorpsiyonu sonucu oluşabilir. Cowley ve Sze (1965), iyon pompası kullanarak bu tür kirliliklerden korunmanın mümkün olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, 10^{-7} ila 10^{-8} Torr vakuma ulaşabilen iyon pompası kullanımı yaygındır. Ara yüzey tabakasının oluşmasını önlemenin etkili yolu, yaklaşık 10^{-10} Torr gibi çok düşük basınçta yüksek vakum altında bir filmi yarıiletken yüzeyine hızla buharlaştırmaktır. Bu işlem, yüzeyin istenmeyen kirliliklerle kirlenmesini ve ara yüzey tabakasının oluşmasını minimize etmeye yardımcı olur. (Rhoderick, 1978).

3.4. Sıçratma Tekniği ve DC Magnetron Sputtering Yöntemi

Manyetik alanda sıçratma, nanokristal yapıda boyut, yoğunluk ve kalınlığının kontrol edilebildiği bir üretim yöntemidir. Son yapılan çalışmalar, bu yöntemin gelişimiyle genellikle manyetik alan alanında büyük ilerlemeler kaydedildiğini göstermektedir. Manyetik alanda sıçratma ile üretilen malzemeler, mikro elektronik, optik, manyetik ve optik kayıt ortamları, solar kontrol endüstrisi gibi geniş bir endüstriyel kullanım alanına sahiptir.

Bu yöntem, çok tabakalı film büyütme için uygun bir teknik olarak kabul edilir ve kaplama sırasında sıcaklık, film kalınlığı, kaplama miktarı ve gazın kimyasal bileşimi

gibi parametrelerin kontrolünü sağlar. Genellikle çok hedefli sıçratma sistemleri kullanılarak çok tabakalı filmler büyütülür. Bu sayede, istenen yapısal özelliklere sahip malzemeler elde edilebilir ve endüstriyel uygulamalarda kullanılabilir hale gelirler.

Sıçratma tekniği, hedef atomların plazma iyon bombardımanının yardımıyla koparılarak alt tabakaya biriktirme metodudur. Sıçratmada sıklıkla Ar gazı kullanılır. Bu gaz iyonize edilmiş ve hedefe malzemeye doğru hızlandırılmış olduğundan hedef atomlara çarparak enerji ve momentum transferi sonrasında hedef atomlar kopartılarak iyonizasyon gerçekleştirilir.

Hızlandırılmış iyonlar ile katı malzeme yüzeylerinin bombardıman edilmesiyle malzemelerin katı halden buharlaştırılması olan temel sıçratma işlemi, uzun süredir bilinmekte ve kullanılmaktadır.

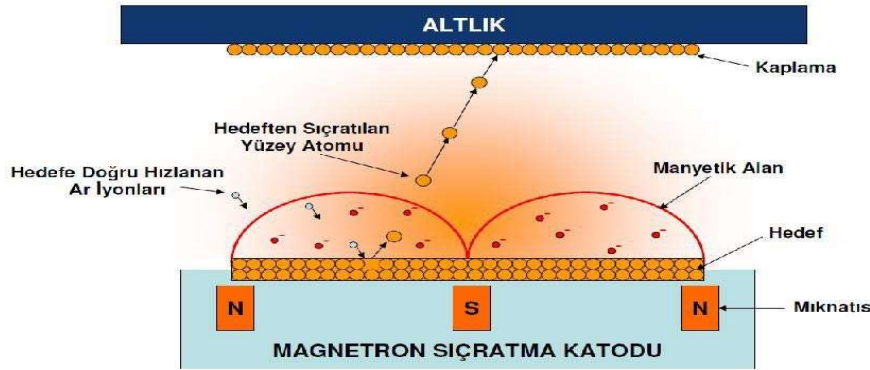
Bu işlemle çoğu malzeme başarılı bir şekilde kaplanabilirken, bazı zayıf yönler de bulunmaktadır. Bu zayıf yönler arasında düşük kaplama oranı, plazmada düşük iyonlaşma verimi ve yüksek taban malzeme ısınma etkileri bulunmaktadır. Bu sınırlamalar, manyetik alanda sıçratma ve daha sonrasında kararlı olmayan manyetik alanda sıçratma gibi yeni tekniklerle aşılmaya çalışılmıştır.

Sıçratma teknikleri, film üretimi için çeşitli yöntemler sunar. Bunlar arasında şunlar bulunmaktadır:

- DC diyot sıçratma
- AC sıçratma
- RF (Radyo Frekans) sıçratma
- DC Magnetron sıçratma
- DC darbeleri Magnetron sıçratma
- İyon ve plazma ışın sıçratma

Bu teknikler arasında özellikle DC Magnetron Sputtering tekniği üzerinde durulacaktır. DC Magnetron sıçratma tekniğinde, argon iyonları elektrik alanına dik doğrultuda bir manyetik alanla hızlandırılır. Bu manyetik alan, hedef üzerindeki iyon konsantrasyonunu

artırarak kaplama sürecini iyileştirir ve daha homojen bir film oluşturulmasına olanak sağlayacaktır.



Şekil 3.7. Magnetron sıçratma katodu

Temel sıçratma işlemi, bir hedef (katot) plakanın önünde bulunan bir plazma içinde oluşturulan enerjik iyonlar tarafından gerçekleştirilir. Bu iyonlar, hedef atomlarını bombardıman ederek atomların kopmasına veya sıçramasına neden olur. Bu süreç sonucunda kopan veya sıçrayan atomlar, kaplanacak yüzey üzerinde ince bir film oluşturur (Şekil 3.7). İyon bombardımanının bir yan ürünü olarak, hedef yüzeyinden ikincil elektronlar da yayılır. Bu elektronlar, plazmanın sürdürülmesinde önemli bir rol oynarlar çünkü plazma içindeki yük dengesini sağlarlar ve plazmanın stabilitesini korumaya yardımcı olurlar. Bu elektronlar ayrıca kaplama sürecinin kontrolünde ve filmin özelliklerinin belirlenmesinde etkilidirler.

DC Sputter tekniği, hedef numuneye 400-700V arasında negatif bir potansiyel uygulayarak oluşturulan plazmadaki pozitif iyonlar sayesinde çalışır. Bu iyonlar, hedefe çarparak momentum değişimi yoluyla atomları yerlerinden çıkarır; bu işlem saçırma olarak adlandırılır. Saçırılan iyonların bir kısmı altlık yüzeyine çarpar ve burada bir film oluşturur. Bu süreç sırasında, hedef yüzeyine çarpan pozitif yüklü iyonlarla başka ara etkileşimler de oluşturabilir. Manyetik alanın etkisiyle hedeften kopan elektronlar yüzeyde dolanmaya başlar. Bu elektronlar yüksek yoğunluklu bir plazma oluşturarak DC Magnetron sıçratma sürecini başlatır. DC Magnetron sıçratma tekniğinin önemli avantajlarından biri, bu yoğun plazma ortamında yüksek sıçratma yoğunluğunun elde edilebilmesidir. Ancak DC Magnetron sıçratmanın dezavantajları da vardır. Örneğin,

hedef üzerinde oluşan düzensiz plazma Magnetron oluşumunu etkileyebilir. Ayrıca, üretim sürecinin düzgün bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için altlığın hedefe göre doğru konumlandırılması gereklidir.

İyi bir kaplama işlemi için, sıçratma vakum cihazında ($<10^{-7} - 10^{-8}$ Torr basınçta) ve düşük gaz basıncı ($<5 \times 10^{-3}$ Torr) koşullarında gerçekleştirilmelidir. Bileşik hedefler kullanılarak üretilen filmlerde, taşıma ve yoğunlaşma sırasında en uçucu elementlerin eksik olabileceği durumlarla karşılaşılabilir (örneğin SiO_2 ve Al_2O_3 'teki oksijen gibi). Bu durumu önlemek için sıçratma sisteminde kullanılan gazlara bu elementler ilave edilebilir. Sıçratma sistemiyle üretilen malzemenin yapısını etkileyen başlıca parametreler şunlardır:

- Gaz içinde sıçratılan parçacıkların enerjisi ve kütleleri
- Bombardıman açısı
- Hedefin yapısal özellikleri (örneğin bağlanma enerjisi)
- Hedefin morfolojisi (yüzey düzgünlüğü azaldıkça sıçratma kalitesi de düşebilir)

Bu parametrelerin dikkatlice kontrol edilmesi, istenen film özelliklerinin elde edilmesinde kritik öneme sahiptir.

3.5. Fotovoltaik Pil ile Elektrik Üretimi

Fotovoltaik hücrelerinin çalışma prensibi, güneş ışınlarının hücre üzerine düşmesiyle başlar. Güneş ışınlarının bir kısmı hücre tarafından emilirken, bir kısmı geri yansıtılır ve geriye kalan kısım da hücreyi geçerek devam eder. Hücreye emilen fotonların enerjisi, bu fotonların atomlarda bulunan değerlik bandındaki elektronlara aktarılır. Bu ek enerji, elektronların kovalent bağlarla bağlı oldukları atomlardan kopmalarına neden olur.

Kopan elektronlar, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin bir araya getirildiği bölgede (p-n birleşim) oluşan elektrik alan vasıtasıyla dış devredeki yüke taşınır. Bu elektrik alan, p-n birleşiminin özelliğidir ve elektronların hareket etmesini sağlar. Elektronların p-n birleşimindeki elektrik alanı geçerek dış devredeki yüke taşınması, hücrede bir elektrik akımının oluşmasını sağlar.

Bu süreç, fotovoltaik hücrelerin güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren temel mekanizmasını açıklar. Elektronların serbest kalması ve elektrik alanı sayesinde taşınması, hücrenin elektrik üretimini sağlar ve güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde edilmesini mümkün kılar.

Özellikle Çok-Kristalli (Multicrystalline) ve Tek-Kristalli (Singlecrystalline) yapılar ekonomik ve verim oranı daha ulaşılabilir düzeyde olduğu için ticari uygulamalarda daha çok tercih edilmektedir (Maycock, 2003).

Güneş pillerinin geliştirilmesindeki temel hedeflerden biri, ideal koşulları sağlayacak bir fotovoltaik hücre elde etmektir. İdeal bir güneş pili için aranan özellikler şunlardır:

1. Yasak Enerji Aralığı: Optimal bir güneş pili için yasak enerji aralığının 1,1 ile 1,7 elektron volt (eV) arasında olması tercih edilir. Bu değer, güneş ışığının büyük bir kısmını emebilen ve dolayısıyla yüksek verim sağlayabilen bir malzeme özelliğidir.
2. Direkt Bant Yapısı: Malzemenin direkt bant yapısına sahip olması, elektronların ve boşlukların doğrudan bant geçişleri yoluyla enerji yayması ve absorpsiyon verimliliğini artırması açısından önemlidir.
3. Kolay Elde Edilebilirlik: Üretim sürecinde kullanılan malzemelerin kolay temin edilebilir olması, endüstriyel ölçekte üretimi kolaylaştırır ve maliyetleri düşürür.
4. Zehirsiz ve Çevre Dostu: Kullanılan malzemelerin zehirli olmaması ve çevre üzerinde olumsuz etkilerinin minimal olması, güneş pillerinin sürdürülebilirlik açısından avantajlı olmasını sağlar.
5. Uygun Büyüklükte ve Kullanım Alanı: Malzemenin büyük alanlarda kullanımı ve farklı uygulamalara uygun olması, güneş enerjisi sistemlerinin geniş çapta yaygınlaşmasını sağlar.
6. Yüksek Fotovoltaik Dönüşüm Verimi: Güneş ışığını elektrik enerjisine dönüştürme veriminin yüksek olması, malzemenin güç üretiminde etkinliğini gösterir.

7. Uzun Süreli Dayanıklılık: Güneş pillerinin uzun vadeli performansını ve dayanıklılığını artıran malzeme özellikleri, ekonomik ve çevresel açıdan sürdürülebilir bir seçenek olmalarını sağlar.

Şu anda, tüm bu özelliklere sahip ideal bir materyal henüz bulunmamakla birlikte, ince filmler ve kristal silisyum güneş pilleri için en önemli iki materyal olarak öne çıkmaktadır. Her iki malzeme de farklı avantajlar sunarak güneş enerjisi teknolojilerinin gelişimine katkıda bulunmaktadır. (Goetzberger, 2003).

3.6. Silisyum Güneş Pilleri

Silisyum, fotovoltaik (güneş pili) teknolojilerinde uzun yıllardır en çok kullanılan malzemedir ve bu konumunu uzun süre koruyacağı öngörülmektedir. Bu durum, silisyumun yarıiletken özelliklerinin tipik olarak gösterilmesi ve güneş pilleri için uygun fotovoltaik özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, silisyum teknolojisinin gelişmiş olması ve ekonomik avantajları da tercih edilmesinde etkili rol oynamaktadır.

Dünya genelinde güneş panelleri üretiminde en yaygın teknoloji kristal silikon teknolojisidir. Bu teknoloji, farklı silikon yapılarını kullanarak çeşitli varyantlara sahiptir. Bunlar arasında tek-kristalli silikon (mono kristal), çok-kristalli silikon (polikristal), ribbon-Si (şerit silikon) ve tabaka-silikon (sheet silicon) bulunmaktadır. Her bir teknoloji, farklı üretim metotları ve avantajları ile pazar içinde yerini almıştır.

Ayrıca, güneş enerjisi teknolojilerinde alternatif üretim teknikleri ve materyaller üzerine yapılan çalışmalar da devam etmektedir. İnce-film teknolojisi, güneş hücrelerinin daha ince tabakalar halinde üretimini sağlayarak farklı uygulama alanlarına olanak tanırken, organik güneş teknolojileri de maliyetleri düşürmek için önemli bir araştırma alanı olmuştur.

2004 yılında uygulanan PV sistemlerin %94'ü kristal silikon teknolojisi ile gerçekleştirilmiştir. Bu sistemler, tek-kristalli, çok-kristalli, ribbon-Si ve tabaka-Si gibi çeşitli silikon yapılarını içermektedir.

Teknolojinin bu kadar geniş bir yelpazede kullanılması, farklı uygulama gereksinimlerine ve ekonomik şartlara göre çözümler sunabilmesinden kaynaklanmaktadır.

Sonuç olarak, güneş enerjisi sektörü sürekli olarak gelişmekte ve farklı teknolojiler ile materyaller üzerinde yapılan çalışmalar, verimliliği artırmak, maliyetleri düşürmek ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla devam etmektedir. Bu çabalar, gelecekte daha sürdürülebilir ve yaygın olarak kullanılan güneş enerjisi çözümleri sağlama yolunda ilerlemeyi hedeflemektedir. (Kazmerski, 2006).

“Czochralski”, “Float-zone” ya da “Ribbon” metodu ile üretilen silindir şeklindeki tek kristalli silisyum külçeleri, ince tabakalar olarak kesilir. Daha sonra bu tabakalar üzerine, fosfor ve bor atomları eklenerek n-tipi ve p-tipi katmanlar oluşturulur. Güneş pilinin üst ve alt yüzeyinde genellikle silikon nitrat veya silikon dioksit malzemelerinden yapılmış, elektrik akımını toplayacak nikel, bakır ve gümüşten yapılmış negatif kontaklar bulunmaktadır. Bu kontaklar, gömülü yapıda olup kendi içindeki kayıpları ve iletim direncini minimize eder. Güneş pili tabakalarının ön yüzeyi, daha iyi ışık toplama ve yansımaları azaltma amacıyla piramit veya konik şekillerde tasarlanabilir. (Goetzberger, 2003).

Çok kristalli silisyum malzemelerde, kristal yapıdaki damarlar birbirlerine yöneliktir ve elektriksel özellikleri genellikle tek kristalli hücrelerle benzerlik gösterir. Damarların kalitesi kalınlıklarıyla doğru orantılıdır. Damarlar arasındaki süreksizlikler iletimde engelleyici bir rol oynar. Çok kristalli silisyum üretim teknolojileri, tek kristalli hücrelere göre daha az enerji gerektirir ve bu nedenle maliyetleri ekonomiktir. Ancak, çok kristalli yapının fotovoltaj dönüşüm verimi tek kristalli yapıdan genellikle daha düşüktür. Yine de düşük maliyeti, çok kristalli silisyumu daha geniş alanlarda kullanışlı hale getirmiştir.

İnce film teknolojisi, silikon malzemenin tabaka olarak elde edilip ayrı güneş hücrelerinin üretildiği ve elektriksel olarak bağlandığı tabakalar üzerine dayanır. Bu teknoloji, 300 µm kalınlığında üretilen üç veya daha fazla tabakadan oluşan materyallerin esnek olması ve birçok uygulamada kullanılabilirlik sağlaması avantajına sahiptir. Ancak, 100 µm kalınlığındaki tabakaların üretimi (yüksek mekanik kırılma, kesim sırasında sıcaklık hassasiyeti gibi) ve taşınması gibi dezavantajları da bulunmaktadır. (Kazmerski, 2006).

Mono Kristal Si teknolojilerinin dönüştürme verimi yavaş da olsa düzenli bir biçimde gelişme göstermektedir. Bu teknoloji ile üretilen sistemlerin verimliliği laboratuvar ortamlarında elde edilen en yüksek verim %27,5 olarak elde edilmiştir (<https://css.umich.edu>).

Amorf silikon (a-Si) güneş pilleri, ince film güneş pili teknolojisinin önde gelen örneklerinden biridir. İlk olarak Schottky bariyer yapısında üretilmişlerdir, ancak daha sonra geliştirilen p-i-n yapısıyla daha yüksek performans elde edilmiştir. p-i-n yapısındaki piller, kalay oksitle kaplı iletken bir yüzey üzerine çöktürme yöntemi ile fabrikasyon edilir ve bu yüzeyin arkası daha sonra metalle kaplanır. Amorf silikon güneş pillerinin verimleri genellikle %5 ila %8 arasında değişmektedir. Ancak, bu piller kısa sürede bozunuma uğrayarak çıkışlarında azalma yaşayabilirler.

Amorf silikon malzemesinin önemli özelliklerinden biri yüksek soğurma katsayısına sahip olmasıdır. Bu özellik, 250°C civarında kolayca geniş yüzeylere kaplanabilmesini sağlar. Amorf silikonun kristalli silikondan ayıran bir diğer özellik ise silisyum atomlarının malzeme içinde düzensiz ve gelişigüzel dağılmış olmasıdır. Yarıiletken içine %5 ile %12 arasında hidrojen katılmasıyla elektriksel özellikler iyileştirilebilir. Günümüzde a-Si, genellikle ev içi uygulamalarda sıkça kullanılan bir malzemedir. Dayanıklı hücrelerden elde edilen verim genellikle %13'lere kadar çıkabilirken, modül verimleri genellikle %6 ila %8 aralığındadır.

"c-Si/a-Si" yapı olarak bilinen bir yöntem, kristalli ve amorf silikon yapılarının birleşiminden oluşur. Bu yapıda, kristal silikon (c-Si) tabakası iki amorf silikon (a-Si) tabakasının ortasına yerleştirilir. Bu yöntemin yüksek verim, düşük işleme sıcaklıkları (200°C'nin altında), enerji geri dönüşüm sürelerinin kısa olması ve maliyetlerde azalma gibi önemli avantajları vardır. Yapılan çalışmalar sonucunda Japonya'da bu yapıyla elde edilen verimlerin %20,7'ye kadar çıktığı gözlemlenmiştir. (Goetzberger, 2003).

3.7. Organik Güneş Pilleri

Organik ve inorganik hibrit güneş hücreleri, güneş enerjisi dönüşümünde farklı yaklaşımlar sunarlar. Organik hibrit hücreler, moleküler ve polimerik yapılar olarak iki

gruba ayrılabilirler. Bu hücreler, yüksek ışık emilim özelliklerine sahip olup, çok düşük miktarlarda kullanımları yeterli olabilmektedir. Organik hibrit hücreler, enerji geri dönüşüm süreleri kısa olduğundan büyük alanlarda kullanımlarında inorganik hibrit hücrelerle rekabet halindedirler.

Bu düşük verim seviyesi, organik hibrit hücrelerin ticari uygulamalarının geniş ölçekte yaygınlaşmasını sınırlamaktadır. Ancak sürekli olarak yapılan araştırmalar ve gelişmelerle bu verim seviyesinin artırılması hedeflenmektedir. Organik hibrit güneş hücreleri, özellikle esnek ve hafif uygulamalarda potansiyel avantajlar sunarak gelecekte güneş enerjisi teknolojilerinde önemli bir yer edinebilirler. (Goetzberger, 2003).

3.8. İnce Film Güneş Pilleri

Amorf silisyum güneş pilleri, absorpsiyon özellikleri nedeniyle kristal silisyum güneş pillerine göre avantaj sağlar. Amorf silisyumun absorpsiyon katsayısı, kristal silisyumdan daha yüksektir. Bu durum, amorf silisyumun daha ince tabakalar halinde kullanılmasına olanak tanırken, aynı zamanda daha az malzeme kullanılmasıyla üretim maliyetlerini düşürebilir.

Örneğin, güneş ışınlarının belirli bir dalga boyunda (0.7 mikron altı) amorf silisyum tarafından absorblanması mümkünken, kristal silisyumda aynı ışınların absorblanabilmesi için çok daha kalın (500 mikron) bir malzeme gerekebilir. Bu nedenle, amorf silisyum güneş pilleri, daha ince tabakalar halinde üretilebilir ve bu da montaj ve kullanım kolaylığı sağlar.

Amorf silisyumun bu avantajları, özellikle taşınabilir cihazlar ve esnek substratlar gibi uygulamalarda tercih edilmesini sağlamaktadır. Daha az malzeme kullanımı, üretim maliyetlerini düşürmenin yanı sıra, hafif ve esnek güneş panelleri tasarlamak için de olanak sağlar. Bu özellikler, amorf silisyum güneş pillerini güneş enerjisi teknolojilerinde önemli bir seçenek haline getirir. Yapacağımız bu çalışmada Silisyum üzerine metal doğrultucu kontakları Sputter tekniği ile büyütüp güneş pili özelliğine bakacağız. Ayrıca bu çalışma esnasında bazı organik malzemeleri ara yüzey maddesi olarak kullanacağız.

Elde edilen yapıların solar simülatör altında ve karanlıkta akım-gerilim karakteristiklerine bakılarak numunelerin sonuçları değerlendirilecek. Yapılan çalışmalar sonrası numunelerin güneş pili özellikleri araştırılacaktır.

3.9. Schottky Diyot I-V Özelliklerinin Norde Fonksiyonu Araştırılması

Schottky engel diyotları için seri direnç ve engel yüksekliği gibi parametrelerin belirlenmesi, diyotun karakterizasyonu ve uygulama bağlamına göre değişiklik gösterebilir. Ancak genel olarak bu parametreler aşağıdaki şekilde belirlenebilir:

1. Seri Direnç: Seri direnç, bir Schottky diyotunun elektriksel özelliklerini etkileyen önemli bir parametredir. Diyotun belirli bir akım geçişi sırasında direnç kaybını temsil eder. Seri direnç, diyotun iletkenliğini etkileyerek genellikle düşük iletkenlikteki bileşenlerle ilişkilendirilir.

Seri direnç, diyotun I-V eğrisinin düzleşmesine ve maksimum güç noktasının belirlenmesine yardımcı olur. Seri direnç, genellikle I-V eğrisi üzerindeki eğimi ifade eden bir değer olarak belirtilir.

2. Engel Yüksekliği: Schottky diyotlarının en önemli özelliklerinden biri, metal- yarı iletken ara yüzeyinde oluşan engel yüksekliğidir. Bu, diyotun elektriksel özelliklerini büyük ölçüde etkileyen ve elektronların diyot üzerinde nasıl davranacağını belirleyen bir parametredir. Engelin yüksekliği, elektronların ve boşlukların bir yarı iletken ve bir metal arasında hareket etme eğilimini ve enerji seviyelerini tanımlar.

Engelin yüksekliği, metalin ve yarı iletkenin cinsine ve aralarındaki temasın niteliğine bağlı olarak değişir. Bu parametre, diyotun I-V eğrisi ve elektriksel özellikleri üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Bu parametreler genellikle deneysel yöntemlerle belirlenir. İşte bu parametrelerin belirlenmesi için bazı yöntemler:

I-V Karakterizasyonu: Schottky diyotunun I-V eğrisinin ölçülmesi, seri direncin ve engel yüksekliğinin belirlenmesinde temel bir adımdır. I-V eğrisi üzerindeki eğim seri direnci verirken, diyotun sıcaklığa duyarlı engel yüksekliği de belirlenebilir.

C-V ölçümleri: Schottky diyotunun kapasitans-voltaj ölçümleri, diyotun yarı iletken ile metal arasındaki engel yüksekliğinin belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntem, diyotun bölge yüksekliği hakkında doğrudan bilgi sağlar.

Fermi Seviyesi Değişikliği Ölçümleri: Diyotun Fermi seviyesi değişiklikleri, diyotun engel yüksekliği ve yarı iletken ile metal arasındaki etkileşim hakkında bilgi sağlayabilir.

İdeali olmayan etkiler için düzeltilmiş modeller kullanımı: Özellikle düşük sıcaklıklarda ve yüksek frekanslarda, diyotun seri direnci ve engel yüksekliği üzerinde etkili olan ideali olmayan etkileri düzeltmek için modeller geliştirilebilir ve bu modellerle deneysel sonuçlar doğrulanabilir.

Bu parametrelerin belirlenmesi, Schottky diyotunun belirli bir uygulama veya tasarım için uygunluğunu değerlendirmek ve optimize etmek için önemlidir. Her parametre, diyotun elektriksel performansı ve verimliliği üzerinde belirleyici bir rol oynar ve bu nedenle dikkatle belirlenmelidir. 1979'de Norde bir formül önermiştir. Norde;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (3.4)$$

$n = 1$ durumunda R_s için akım denklemi,

$$I = I_0 \left[\exp\left\{\frac{q}{kT}(V_D - IR)\right\} - 1 \right] \quad (3.5)$$

burada, $I_0 = AA^*T^2 e^{\left(\frac{-q\phi_B}{kT}\right)}$ 'dir. Denklemden $V_D > kT/q$ kabul edilirse denklem 3.4 ve 3.5'ten;

$$F(V) = \phi_B + IR - \frac{V}{2} \quad (3.6)$$

denkleme dönüşür.

İdeal bir durum için $R_s=0$ 'dır. $F(V)$ doğrunun eğimi $-1/2$ olan, düz bir doğru içermektedir. Düz doğrunun $F(V)$ eksenini kestiği nokta engel yüksekliğini Φ_b 'yi vermektedir. Seri direnç R_s olur ise;

$$F(V) = F_R(V) \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{R_s A A^* T^2}\right) \quad (3.7)$$

olur. Denklem 3.7'de eğimi büyük gerilim değerleri için eğim değeri $+1/2$ olan düz bir çizgiyi verir. $F(V)$ değeri küçük akım değerleri için ideal duruma yakın olurken, büyük akım değerleri için $F_R(V)$ 'ye yaklaşacaktır. Bu iki uç nokta arası $F(V)$ minimum değere sahiptir. Denklem 3.5 gerilime göre türevi alınırsa;

$$\frac{dF}{dV} = R_s \left(\frac{dI}{dV}\right) - \frac{1}{2} \quad (3.8)$$

olur.

$$\frac{dI}{dV} = \frac{dI}{dV_D} \left[1 + R_s \left(\frac{dI}{dV_D}\right)\right]^{-1} \quad (3.9)$$

$$\frac{dI}{dV_D} = \frac{d}{dV_D} \left[I_0 e^{\left(\frac{qV}{kT}\right)} \right] = \frac{q}{kT} I \quad (3.10)$$

şeklindedir. Burada V_D diyot üzerine düşen gerilimdir. dI/dV_D gerilime göre türev alınırsa;

$$\frac{dF}{dV} = \frac{\frac{qR_s I}{kT}}{1 + \frac{qR_s I}{kT}} - \frac{1}{2} \quad (3.11)$$

ifadesi elde edilir. $dF/dI=0$ yazıldığında F 'nin minimum olduğu noktadaki I_0

$$I_0 = I_{F(V)\min} = \frac{kT}{qR_s} \quad (3.12)$$

şeklinde bulunur. $V_{F(V)}$ değeri;

$$V_{F(V)\min} = I_0 R + V_D(I_0) = \frac{kT}{q} + \ln \frac{I_{F(V)\min}}{AA^*T^2} \quad (3.13)$$

şeklinde bulunur ve $F(V)$ 'nin minimum değeri şu şekilde verilir;

$$F(V) = F_R(V) \frac{V}{2} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{R_S AA^* T^2} \right) \quad (3.14)$$

eşitliği ile elde edilir. $I_{F(V)\min}$, $V_{F(V)\min}$, $F(V)$ ölçülen değerleri ve denklem 3.13 ve 3.14 kullanılarak seri direnç;

$$R_S = kT/qI_0 \quad (3.15)$$

ve engel yüksekliği;

$$\Phi_B = F(v) \min + \frac{v_{F(v)\min}}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (3.16)$$

parametreleri bulunur. (Norde, 1979; Yakuphanoğlu, 2007)

Schottky diyotlarda elektron taşınımı, potansiyel engeli üzerinden termoiyonik emisyon teorisi ile açıklanır. Bu teori, yüksek sıcaklıktaki yüzeylerden kaynaklanan termal enerji ile taşıyıcıların serbest bırakılması sürecini tanımlar. Schottky diyotlarda, metal ve yarıiletken ara yüzeyinde oluşan potansiyel engel, taşıyıcıların geçişini etkiler. Diyot iletkenliği, bu potansiyel engelin yüksek sıcaklıktan kaynaklanan termal enerji nedeniyle taşıyıcıların emisyonuyla sağlanır. İşte bu süreç, termoiyonik emisyon olarak bilinir. Termoiyonik emisyonun temel prensibi şöyledir:

- Metal yüzeyindeki elektronlar, yüksek sıcaklık nedeniyle termal enerji kazanırlar.
- Bu enerji, elektronların metal-yarıiletken ara yüzeyindeki potansiyel engeli aşmasına ve yarıiletken tarafına geçmesine yol açar.
- Elektronlar, bu geçiş sırasında diyotun iletkenliğini sağlamak için kullanılır.

Termoiyonik emisyon teorisi, bu elektron geçişinin I-V karakteristiğini belirleyen temel mekanizmayı açıklar. İdeal olmayan etkileri içeren faktörlerle birlikte Norde fonksiyonu gibi matematiksel formüllerle süreç analiz edilir ve diyotun performansı değerlendirilir.

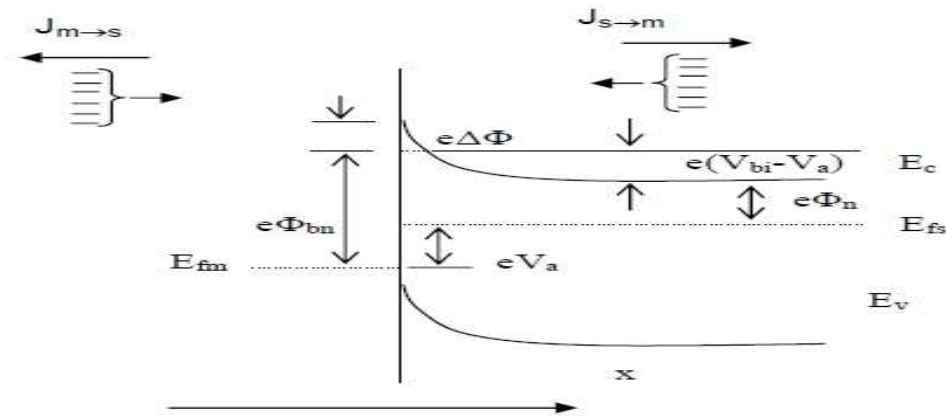
Bu açıklamalar, Schottky diyotlarda termoiyonik emisyonun temel işleyişini ve bu emisyon sürecinin diyotun elektriksel özellikleri üzerindeki etkilerini anlamamıza yardımcı olur. Termoiyonik emisyon, özellikle yüksek sıcaklık ve belirli enerji seviyelerinde diyotların çalışma verimliliğini belirlemede kritik bir rol oynar.

Metal yarıiletken Schottky diyotlarda akım çoğunlukla taşıyıcıları tarafından sağlanır (Ziel, 1968; Rhoderick and Williams, 1988). Metal n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektron metal p- tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar. Termoiyonik emisyon teorisi, Schottky diyotlarda yüksek sıcaklıklı metallere yarıiletkenlere elektron geçişini açıklar. Bu teori oluşturulurken şu kabuller yapılır:

1.Potansiyel Engel (Φ_B) ve kT : Elektronların metal-yarıiletken ara yüzeyinden geçebilmesi için potansiyel engel (Φ_B), kT (k: Boltzmann sabiti, T: mutlak sıcaklık) enerjisinden büyük olmalıdır. Bu, elektronların emisyonu için gereken enerji bariyerini temsil eder.

2.Termal Denge Durumu: Maxwell-Boltzmann istatistiksel mekaniği, sistemdeki termal dengenin korunduğu ve termal enerjinin serbest bırakılan elektronlara etki etmediği koşullarda geçerlidir.

3.Taşıyıcı Çarpışmaları: Elektronların emisyon sürecinde taşıyıcı çarpışmalarının az olduğu varsayılır. Bu durum, emisyonun düzenli ve istikrarlı olmasını sağlar.



Şekil 3.8. Schottky diyotlarda düz beslem altındaki metal-yarıiletken kontak için enerji-band diyagramı, imaj azalma etkisi

Şekil 3.8’da V_a büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky diyet görülmektedir. Burada $J_{s \rightarrow m}$ yarıiletken metale doğru akan akım yoğunluğu ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru gerçekleşen akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahip elektronların bir fonksiyonudur. Bu nedenle;

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c metal içindeki termiyonik emisyon için gerekli minimum enerjidir. V_x sürüklenme yönündeki hızdır. Artan elektron konsantrasyon;

$$dn = g_c(E) f(E) dE \quad (3.18)$$

ile verilir. Burada $g(E)$ iletkenlik bandındaki hal yoğunluğu ve $f(E)$ fermi-Dirac ihtimaliyet fonksiyonudur. Maxwell- Boltzmann yaklaşımı uygulayarak elektrton konsantrasyonu için;

$$dn = \frac{4\pi(2m_n^*)^{2/3}}{h^3} \sqrt{E - E_c} \exp\left[-\frac{(E - E_c)}{kT}\right] dE \quad (3.20)$$

yazılabilir. $(E - E_c)$ enerjisi serbest elektronun kinetik enerjisi kabul edilirse;

$$(E - E_c) = \frac{1}{2} m^* V^2 \quad (3.21)$$

$$dE = m^* V dv \quad (3.22)$$

ve

$$\sqrt{E - E_c} = V \sqrt{\frac{m_n^*}{2}} \quad (3.23)$$

olur. Bu sonuçlardan yola çıkarak denklem 3.20 ifadesi yeniden düzenlenirse;

$$dn = 2 \left(\frac{m_n^*}{h} \right) \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-m_n V^2}{2kT} \right) 4\pi V^2 dV \quad (3.24)$$

elde edilir. Bu denklem hızları V ile $V+dV$ aralığında değişen elektronların sayısını verir.

Hız, bileşenlerine ayrılırsa;

$$V^2 = V_x^2 + V_y^2 + V_z^2 \quad (3.25)$$

olur. Buradan denklem 3.17'den;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right) \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \int_{V_{ox}}^{\infty} V_x \exp \left(\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* V_y^2}{2kT} \right) dV_y \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left(\frac{-m_n^* V_z^2}{2kT} \right) dV_z \quad (3.26)$$

şeklinde yazılabilir. V_{ox} hızı, x doğrultusundaki harekette elektronun potansiyel engelini aşabilmesi için gerekli olan minimum hızdır. Son ifadede aşağıdaki değişken değiştirmeleri yapılabilir.

$$\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} = \alpha^2 - \frac{e(V_{bi} - V_a)}{kT} \quad (3.27.a)$$

$$\frac{m_n^* V_y^2}{2kT} = \beta^2 \quad (3.27.b)$$

$$\frac{m_n^* V_z^2}{2kT} = \gamma^2 \quad (3.27.c)$$

yazılabilir. Bu durumda $V_x \rightarrow V_{ox}$ şartı için $\alpha=0$ olur. Yine $V_x dV_x = \frac{2kT}{m_n^*} \alpha d\alpha$ yazılabilir.

Bu ifadeler denklem 3.25'te kullanılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = 2e \left(\frac{m_n^*}{h} \right) \left(\frac{2kT}{m_n^*} \right)^2 \exp \left(\frac{-e\Phi_n}{kT} \right) \exp \left(\frac{-e(V_{bi} - V_a)}{kT} \right) \int_0^{\infty} \alpha \exp(-\alpha^2) d\alpha \int_{-\infty}^{\infty} (-\beta^2) d\beta \int_{-\infty}^{\infty} (-\gamma^2) d\gamma \quad (3.28)$$

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_n + V_{bi})}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) \quad (3.29)$$

veya

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_n)}{kT} \right) \exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) \quad (3.30)$$

olur. Şekil 3.9'dan anlaşıldığı gibi $\Phi_{bn} = \Phi_n + V_{bi}$ ve uygulama gerilimi sıfır olduğunda $J_{s \rightarrow m}$ ile $J_{m \rightarrow s}$ birbirine eşit olur. Yani;

$$J_{m \rightarrow s} = \left(\frac{4\pi e m_n k^2}{h^3} \right) T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT} \right) \quad (3.31)$$

olur. Eklemdaki net akım yoğunluğu $J = J_{s \rightarrow m} - J_{m \rightarrow s}$ olur. Daha açık ifadeyle;

$$J = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT} \right) \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.32)$$

olur. Burada A^* Richardson sabitidir.

$$A^* = \left(\frac{4\pi e m_n k^2}{h^3} \right) \quad (3.33)$$

J_0 ters doyma akım yoğunluğu olmak üzere;

$$J = J_0 \left[\exp \left(\frac{eV_a}{kt} \right) - 1 \right] \quad (3.34)$$

$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT} \right) \quad (3.35)$$

şeklinde gösterilir.

Φ_{bn} Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\Phi_{bn} = \Phi_{b0} - \Delta\Phi_{b0}$ şeklinde verildiği dikkate alınarak denklem 3.35 alınarak yeniden düzenlenirse;

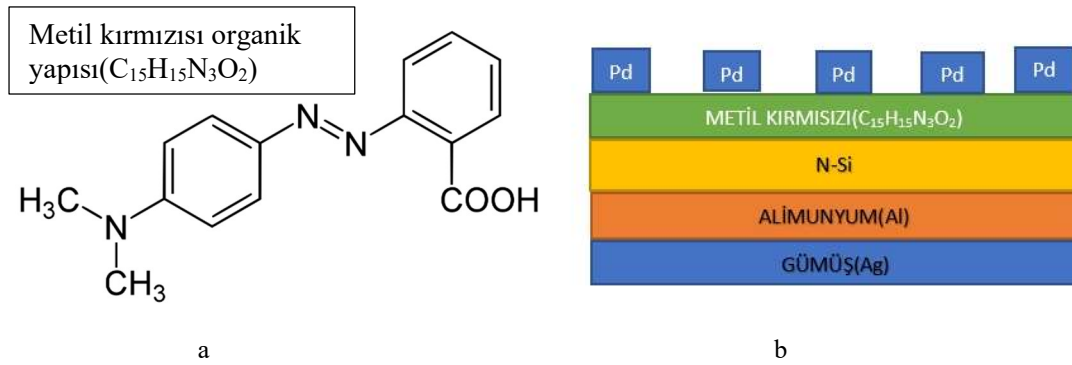
$$J_0 = A^* T^2 \exp \left(\frac{-e(\Phi_{bn})}{kT} \right) \exp \left(\frac{e\Delta\Phi}{kT} \right) \quad (3.36)$$

olur (Neamen, 1992).

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Numunenin Temizlenmesi ve Elde Edilmesi

Yapılan çalışmada 400 µm kalınlıktaki, (100) doğrultusunda büyütülmüş elektron verici konsantrasyonu $2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan ve iki yüzeyi parlatılmış n-Si kristalleri kullanılarak bir yüzeyine omik kontak olarak Al metali buharlaştırıldıktan sonra tavlansak numune üç parçaya ayrıldı. Referans (Pd/n-Si/Al/Ag), Döndürerek kaplama yöntemi ile Metil kırmızısı kullanılıp (Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag) ikinci numune hazırlandı ve Damlama yöntemi ile de Metil kırmızısı kullanılarak üçüncü numune hazırlanarak (Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag) metal yarıiletken yapıları elde edildi. Organik ara yüzey malzemesi kullanılarak elde edilen (Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag) yarıiletken Schottky diyotun şematik gösterimi Şekil 4.9 (b) 'de verilmektedir.



Şekil 4.9. a) Metil kırmızısı molekül yapısı b) Schottky diyotun şematik gösterimi

Numune iki taraflı kristal yüzeyine muhtemel olabilecek organik ve inorganik kirliliklerden temizlemek ve pürüzleri gidermek için kimyasal temizleme yöntemleri aşamalı olarak uygulama yöntemleri şöyle sıralandı:

- Ultrasonik temizleme cihazı ile silisyum malzeme 100 ml trikloroetilen sıvısına daldırılarak 15 dk. süre zarfında ilk yıkama işlemi gerçekleştirilmiş oldu.
- 50 ml aseton ile 15 dk. Ultrasonik temizleme cihazı ile yıkanma işlemi yapıldı.
- Etil alkol ile 15 dk. yıkanma işlemi yapıldı.

- d) %10 seyreltilmiş HCl çözeltide 1 dk. bekletildi.
- e) Silisyum numunesi 10'ar dk. olacak şekilde iki defa Ultrasonik temizleme cihazı ile deiyonize su ile yıkama işlemi yapıldı.
- f) Azot (N₂) gazı ile kurutma işlemi yapıldı.

Temizleme işlemlerinden sonra n-Si malzemesi üzerine omik kontak yapılmak üzere hemen vakum cihazına yerleştirildi. $6,46 \times 10^{-6}$ torr basınçta Silisyum numunesinin bir yüzeyine termal buharlaştırma yapılarak alüminyum ile kaplandı. Vakum ortamından alınan numune, kantağın homojen olması ve yarıiletken içinde nüfuz etmesi için tavlama işlemine tabi tutuldu. N₂ ortamında 585°C'de 3 dakika boyunca tavlandı. Numuneye tavlama yapıldıktan sonra Al üzerine termal buharlaştırma yöntemi ile Ag ile kaplama yapıldı ve numune üç parçaya ayrıldı.

Bu parçalardan birisi referans olacak şekilde ayrıldı. Toz halinde bulunan metil kırmızısı İkinci parçaya döndürerek kaplayıcı yöntemi şekil 4.12'te 10 kez 8 mikrolitre miktarında arayüzey organik malzeme kullanılarak oluşturuldu ve üçüncü parçaya damlama cihazı ile metil kırmızısı 20 mikrolitre 10 kez damlatılarak da hot plate ile ısıtılarak arayüzey malzemesi oluşturuldu.

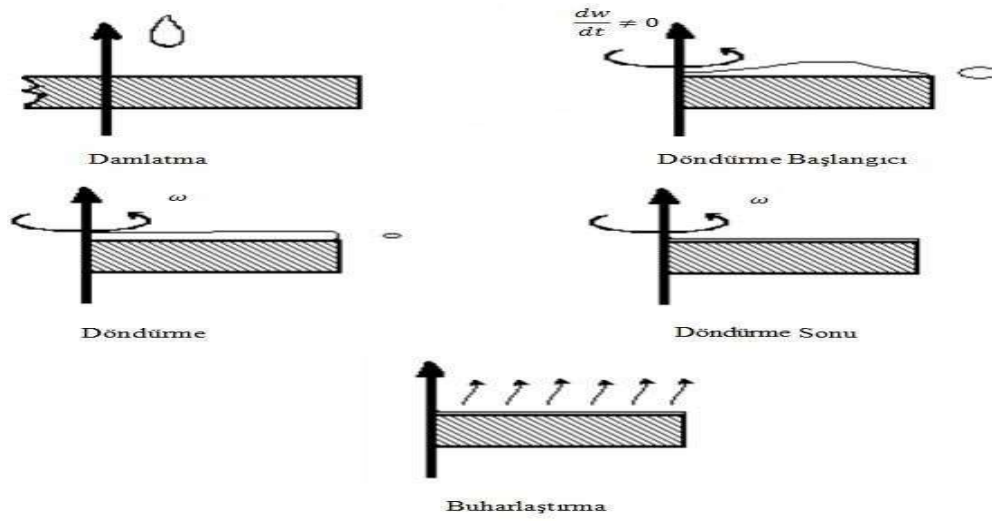
Diğer yüzeyi organik olarak kaplanan numuneler ve arayüzey kaplatılmayan referans numunemiz kimyasal olarak temizlenmiş doğrultucu kontak maskesine yerleştirildi. Maskeye sabitlenen numuneler Sputter Sistemine yerleştirildi. Vakum cihazımızın değeri $9,5 \cdot 10^{-6}$ torr'a geldiğinde, Ar gazı altında Paladyum ile kaplanarak 0,5 mm çapında metal yarı iletken ve metal arayüzey yarıiletken Schottky diyotlar elde edildi.



Şekil 4.10. Sputter ve termal buharlaştırma Sistemi, NANOVAK NVTS-400

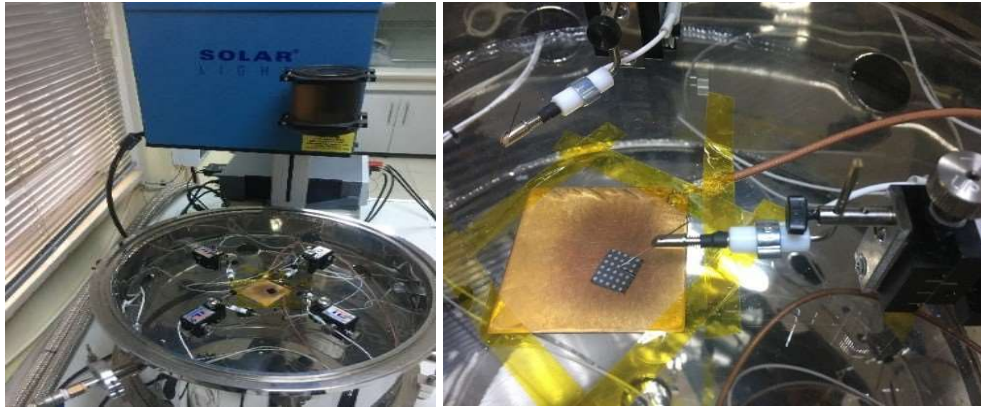


Şekil 4.11. Döndürmeli Kaplama VTC-100 Vacuum Döndürerek kaplayıcı



Şekil 4.12. Döndürerek kaplama yöntemi ile film kaplama şematik gösterimi

Metil kırmızısı organik malzemenin hazırlanmasında 100 ml kloroform ile 0,02 gr metil kırmızısı yarım saatte yakın bir zaman dilimine kadar karıştırılarak oluşturuldu. Numunelerin arayüzey organik malzeme olarak metil kırmızısı kullanıldıktan sonra ikinci ve üçüncü materyaller 100 °C sıcaklıkta ve argon gazı eşliğinde 3'er dk. bekletilerek hazır duruma getirildi.



Şekil 4.13. Akım-Gerilim solar simülatörü/probe station

Işık şiddetine bağlı ölçümler belirlenmiş voltaj aralığında solar simülatörde 100 mW/cm² ışık altında akım-gerilim ölçümleri şekil 4.13'te Keithley 2400 güç kaynağı eşliğinde alındı. Aynı zamanda numunelerin karanlıkta akım gerilim ve kapasite-gerilim ölçümleri yapıldı. Son olarak materyaller AFM (atomik kuvvet mikroskobu) ile yüzey yapısı incelendi.



Şekil 4.14. MSE marka yüksek tavlama fırını

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

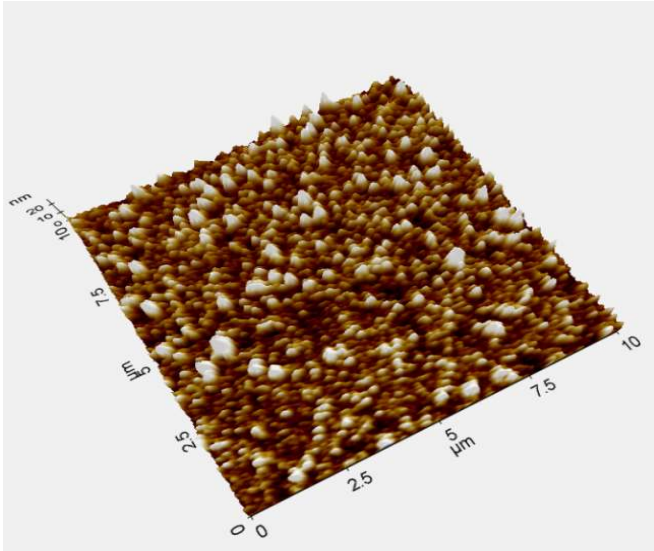
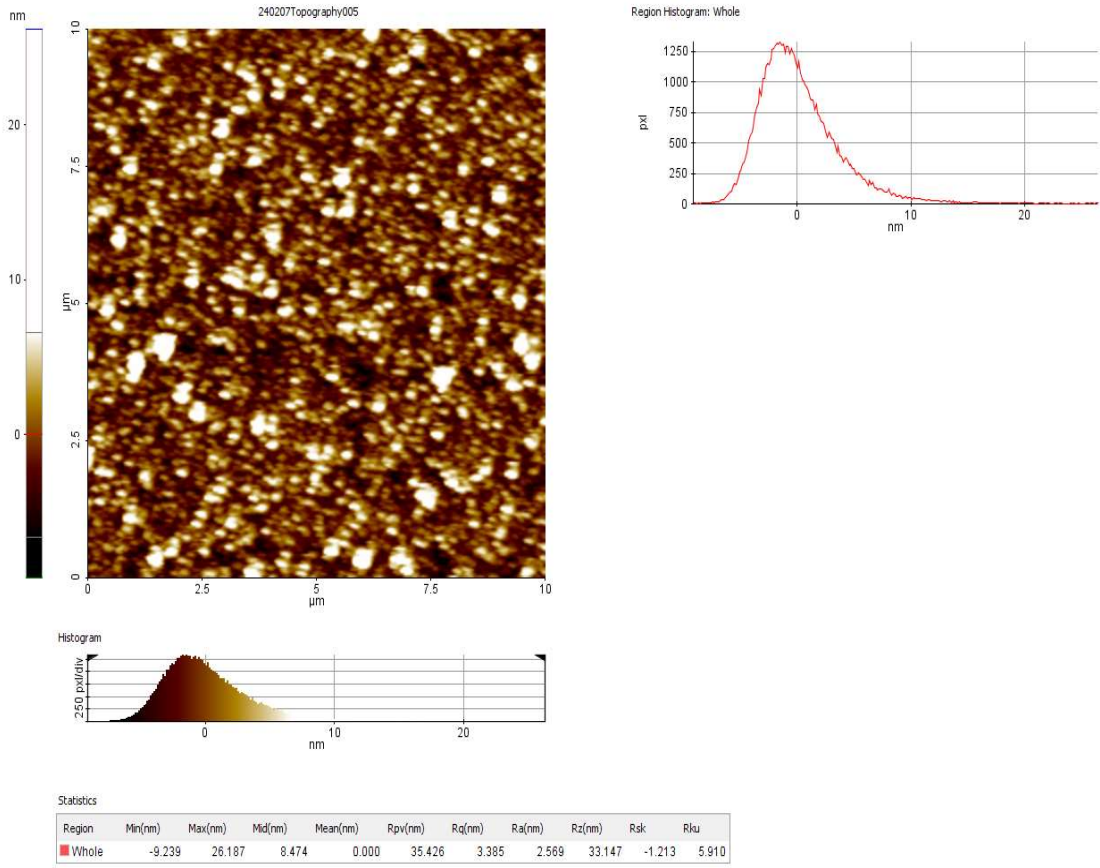
5.1. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ve Görüntüleri

Ara yüzeye kaplanan polimer film yapısının yüzey morfolojisi, AFM cihazı kullanılarak incelendi. AFM, atomik ölçekte sivri bir iğne ucuyla numune yüzeyini üç boyutlu ve yüksek çözünürlükte taramak için kullanılan çok yönlü ve güçlü bir mikroskop olarak bilinir. Bu cihaz, kompozitler, seramikler, film kaplamaları, yapay ve biyolojik zarlar, metaller, yarıiletkenler ve polimerler gibi çeşitli materyallerin incelenmesinde kullanılır. (Aydoğan 2011).

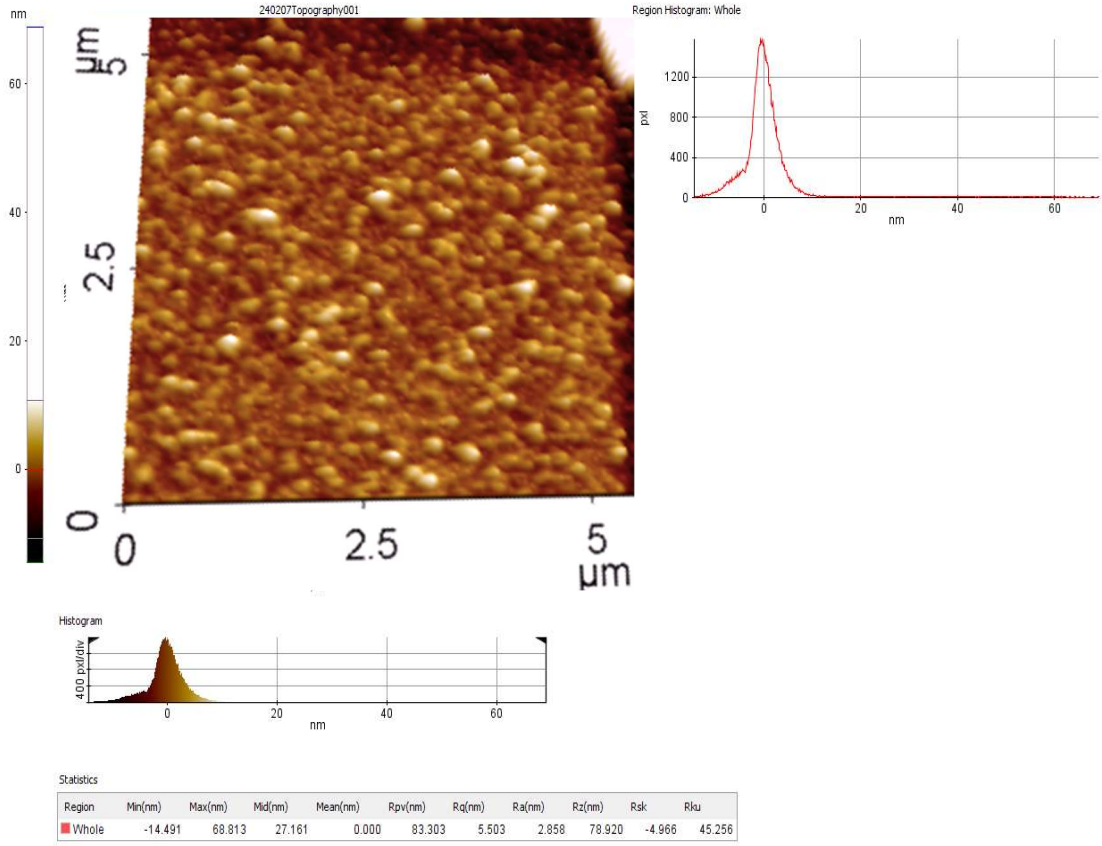


Şekil 5.15. Atomik Kuvvet Mikroskobu Park Systems XE-100E ve 2D Temsili Görsel

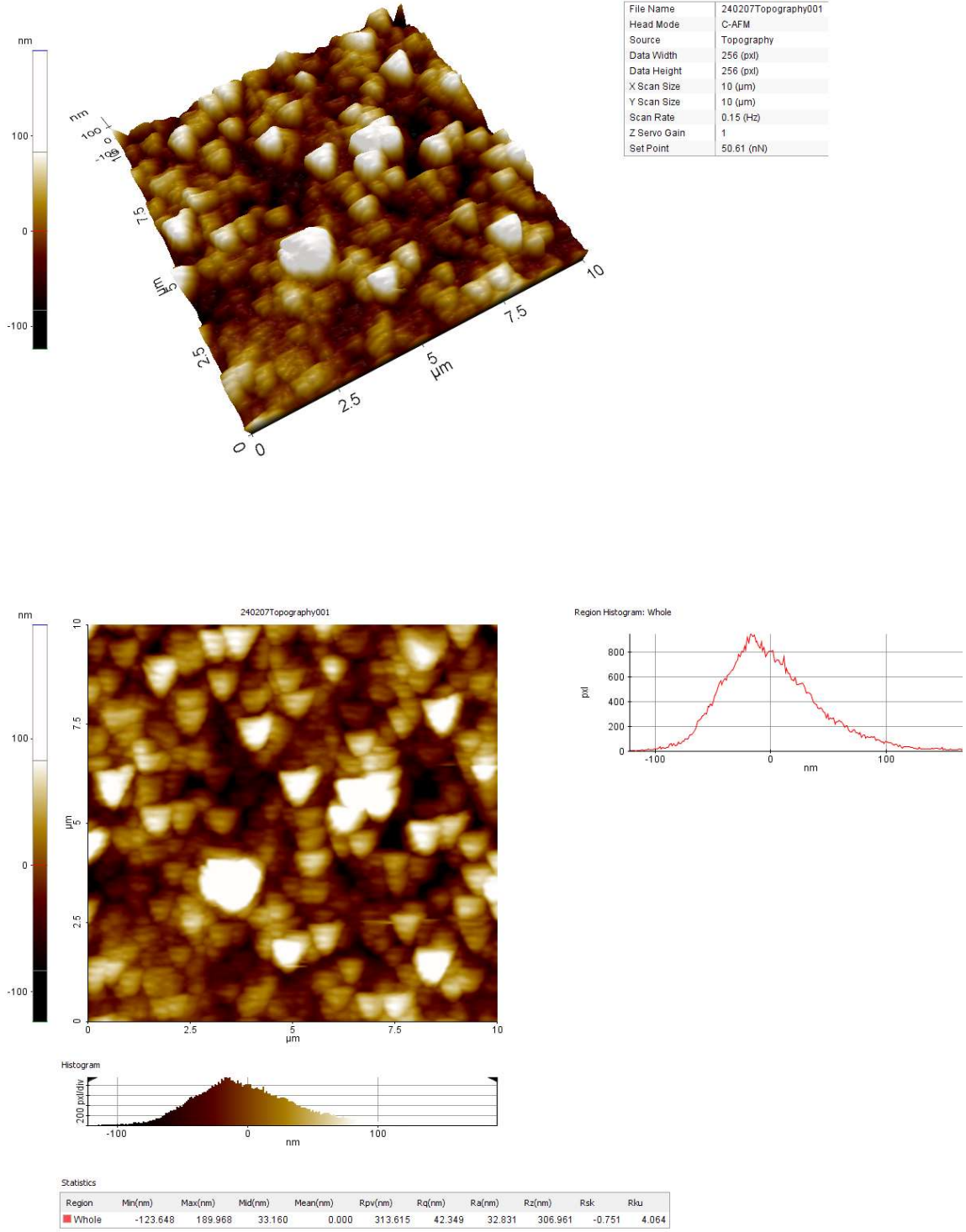
Numune yüzeyi, lazer ışınıyla taranarak yaklaşık 0.2 nm ile 10 nm arasında değişen kalınlıklarda prop ile yapılan ölçümlerle incelenir. Lazer ışını, iğne benzeri malzemenin üzerinden yansır ve bu yansıma, fotodiyot aracılığıyla algılanır. Eğer iğne hareket ederse, yansıyan ışının açısında değişiklikler meydana gelir. Bu değişiklikler, konuma duyarlı foto diyot PSPD (Position sensitive photo diode) kullanılarak tespit edilir. Lazer ışınındaki bu sapmalar sayesinde, nano-ölçekteki yüzeyin girinti ve çıkıntıları kaydedilir. Bu süreç, kabartmalı haritalara benzeyen bir yöntem olarak düşünülebilir. Yüzeyin farklı yüksekliklerinde ve geometrik şekillerindeki farklılıklar, nano yüzeyin topografik haritasının çıkarılmasını sağlar. Böylece nano yüzeyin detaylı bir topografik görüntüsü oluşur.



Şekil 5.16. Pd/n-Si/Al/Ag referans AFM yüzey morfolojisi ve $10 \mu m^2$ yüzey kesiti



Şekil 5.17. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama yüzey morfolojisi ve 5 μm^2 yüzey kesiti



Şekil 5.18. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag damlama yüzey morfolojisi ve 10 μm² yüzey kesiti

5.2. Akım Gerilim Karakteristikleri ve Diyot Parametreleri

Diyotların I-V ölçümleri oda sıcaklığında Keithley 2400 model cihaz kullanılarak gerçekleştirildi. Diyotların karakteristik parametreleri olan engel yüksekliği ve idealite faktörü hesaplandı. İdealite faktörü, diyotun ideallüğünden ne kadar uzaklaştığını belirten boyutsuz bir parametredir ve ideal durum için 1'e eşittir. Bu faktör, termiyonik emisyon teorisine dayanarak elde edilen akım ve gerilim ilişkisinden hesaplandı.

Hazırlanan diyotların yapı bakımından bazı temel elektriksel parametreleri I-V ölçümlerinden yararlanarak idealite faktörü (n) ve potansiyel engel yüksekliği ve diğer parametreler hesaplandı.

Denklem;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (5.1)$$

formülü ile $J = I/A$ durumunu gözeterek, I akımının gerilim ile exponansiyel olarak arttığı Denklem 5.1'de görülmektedir. I akımının, sıfır beslem altında oluşan zıt yönlü I_0 akımının da katsayısı olarak arttığı görülmektedir. Denklem 5.1'da -1 değeri sıfır beslemde ters yönlü oluşan akım değerini temsil etmektedir. Fakat doğru yönde uygulanan gerilime belirli büyüklükte ise bu -1 ile temsil edilen ters yönlü akımın değeri ihmal edilecek kadar küçüktür. Diyot parametrelerini için referans olarak alacağımız idealite faktörü için;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (5.2)$$

eşitliğinden yararlanıldı. Diyot düz beslem durumunda besleme gerilimi $eV \gg kT$ olduğunda, denklemdeki -1 alınmayabilir. Bu durumda;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (5.3)$$

şeklinde yeni bir formül yazılabilir. Bu eşitliğin her iki tarafının tabii logaritması alınarak V'ye göre türevi alınır, idealite faktörü;

$$n = \frac{e}{kT} \cdot \frac{dv}{d(\ln I)} \quad (5.4)$$

olarak elde edilir.

Burada elde edilen yarı logaritmik $\ln I$ - V grafiğinin düz beslem bölgesine yer alan lineer aralığına bir fit alındığı zaman ortaya çıkan doğrunun eğiminden idealite faktörü elde edilir. Yine bu doğrunun eğiminden $V=0$ 'da düşey ekseni kestiği nokta bize I_0 doyma akımını verir. Denklem 5.2'de I_0 doyma akımı;

$$I_0 = A \cdot A^* \exp\left(\frac{-e\phi_b}{kT}\right) \quad (5.5)$$

Denklem 5.5 her iki tarafı tabii logaritması alınarak, $e\phi_b$ 'ye göre çözümlenirse;

$$e\phi_b = kT \cdot \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (5.6)$$

şeklinde engel yüksekliği formülü elde edilir. Boltzaman sabiti $k = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$ olarak, T kelvin cinsinden ortamın sıcaklığını $T=300 \text{ K}$ olarak, A diyot etkin alanını $A = 7,85 \times 10^{-3} \text{ cm}^2$, A^* Richardson sabiti olup n-Si için $112 \text{ A/K}^2 \text{ cm}^2$ dir. Bu değerler Denklem 5.4 ve 5.6'da yerlerine yazılırsa engel yüksekliği ve idealite gibi temel diyot parametrelerine ulaşılmış oluruz.

Norde fonksiyonu, Schottky diyotların I-V karakteristiklerini tanımlamak için kullanılan modeldir ve bu fonksiyon genellikle diyotların seri direnç değerleri ile engel yüksekliklerini bulmak için kullanılır. Norde fonksiyonundan seri direnç değerini elde etmek için $R=(\beta I_0)^{-1}$ ifadesinden yola çıkarak $\beta=1/kT$ alınarak, $V>3/\beta$ voltaj aralığında $\ln I$ - V eğrisinden bulunur;

$$R_S = \frac{kT(\gamma-\eta)}{I_0} \quad (5.7)$$

şeklinde düzenlenebilir.

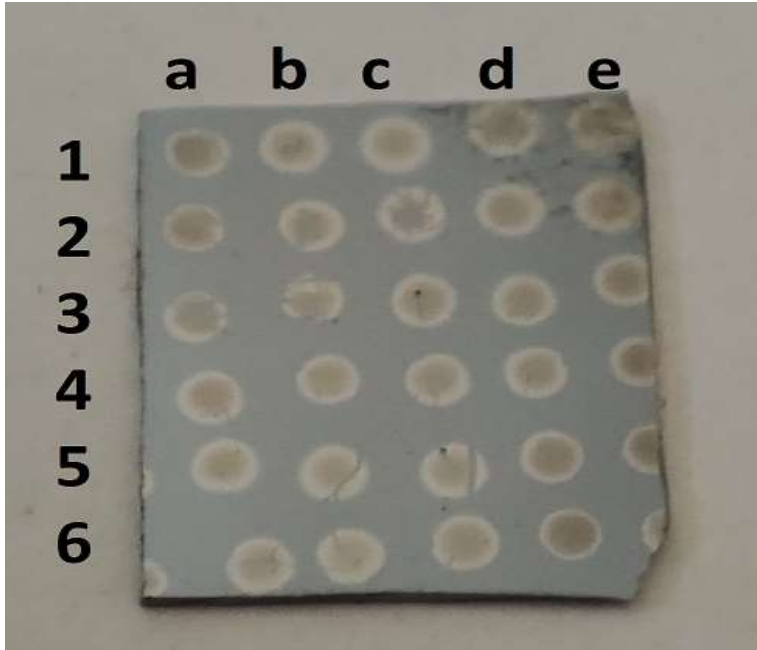
Burada γ ifadesi n değerinden büyük olan ilk tam sayıdır. I_0 ise $\ln I-V$ grafiğindeki fit doğrusunun $V=0$ 'daki akım değeridir. Bu çalışmamızda Norde modelinde engel yüksekliği ise;

$$\phi_B = F(v_0) + \frac{v_0}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (5.8)$$

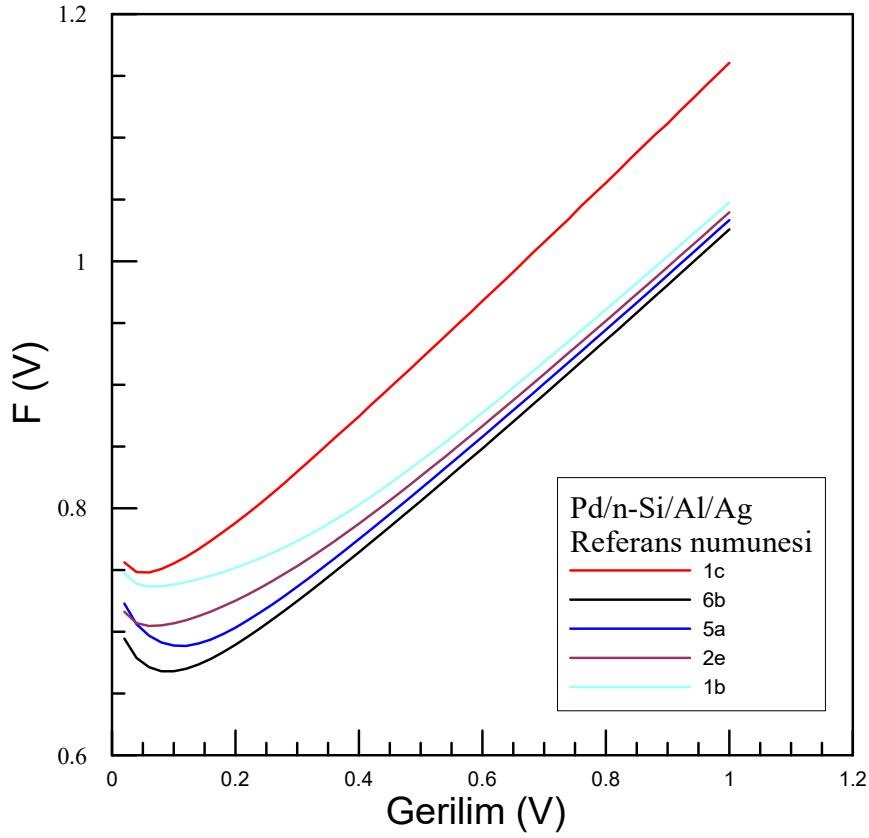
şeklinde verilir. Burada $F(v_0)$ ifadesi F-V grafiğinin minimum F(V) değeridir.

Norde'nin kullandığı bu model, ideal durumlar ve düşük seri direnç değerleri için geçerlidir ve Bohlin'in ideal olmayan durumlar için genelleştirilmiş Norde modeli, seri direnç ve engel yüksekliği değerlerini hesaplamak için kullanılabileceğini göstermiştir. (Bohlin, 1986).

Tablo 5.1, 5.2, 5.3' de oda sıcaklığında ve karanlık ortamda yapılan ölçümlerin sonucu olarak her bir diyot için hesaplanan değerler ile Şekil 5.19, 5.21 ve 5.23'te numunelerin hazırlanan diyotta ölçüm yapılan yerlerin gösterimi verilmiştir. Ayrıca Şekil 5.20, 22 ve 24' te verilen grafikler ile Norde seri direnç hesaplaması yapıldı.



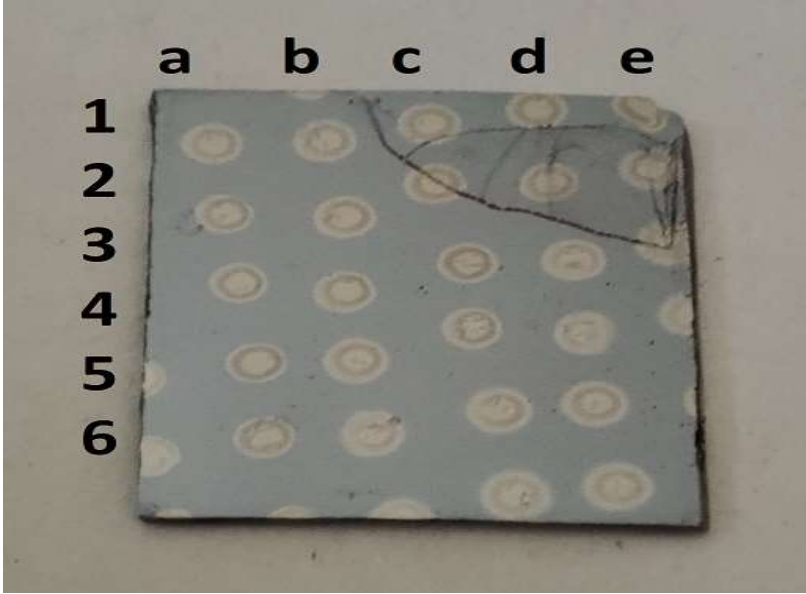
Şekil 5.19. Pd/n-Si/Al/Ag referans diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi



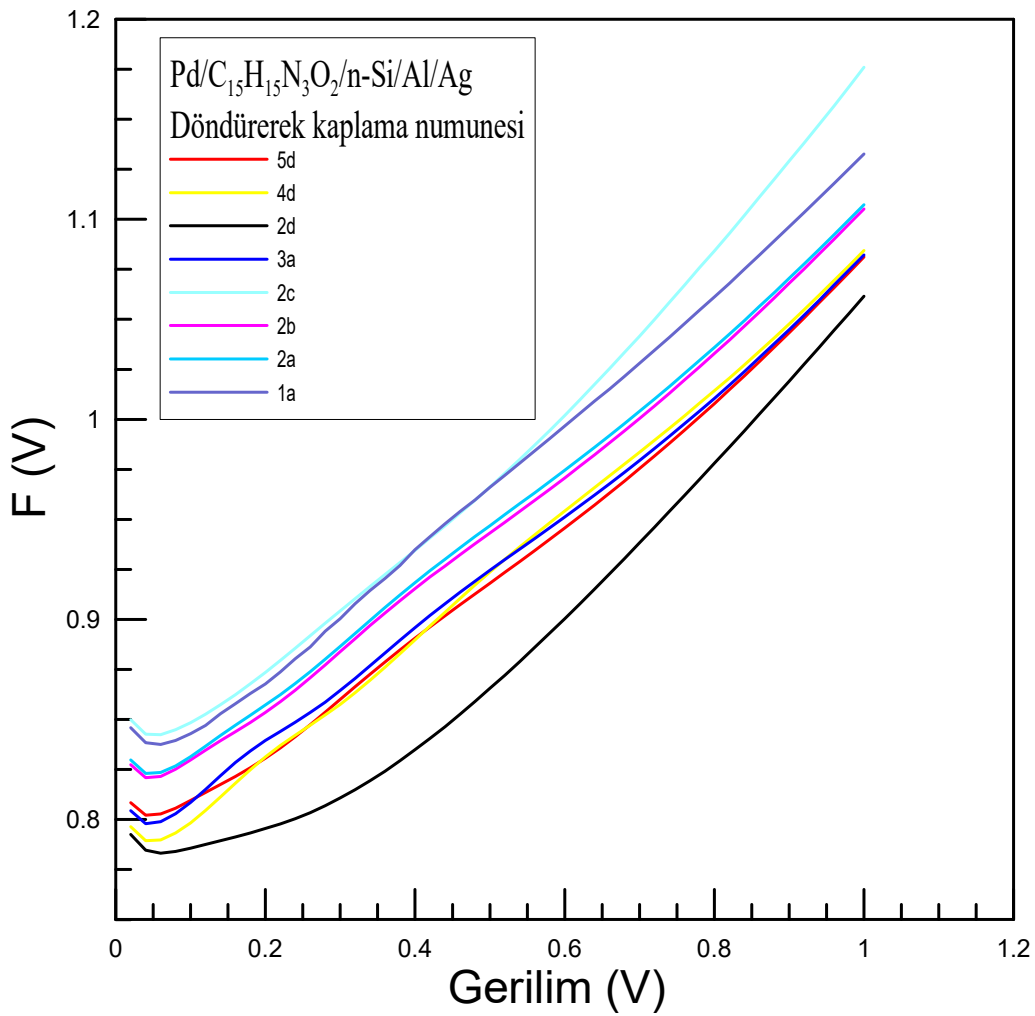
Şekil 5.20. Pd/n-Si/Al/Ag referans diyotun seri direnç grafiği

Tablo 5.1. Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/n-Si/Al/Ag numunesinin I-V ve Norde ölçümleri

REFERANS	I-V		NORDE	
	Engel yüksekliği (eV)	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)	Seri direnç Ω
1b	0,73	2,36	0,73	$1,5 \times 10^{11}$
1d	0,69	2,12	0,69	$4,4 \times 10^{10}$
1c	0,70	2,12	0,74	$3,2 \times 10^{10}$
2e	0,70	1,97	0,70	$2,1 \times 10^9$
4e	0,67	2,01	0,67	$2,1 \times 10^{10}$
5a	0,71	1,33	0,72	$7,8 \times 10^9$
5c	0,67	1,98	0,70	$1,6 \times 10^8$
6b	0,69	1,21	0,69	$6,8 \times 10^7$



Şekil 5.21. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi



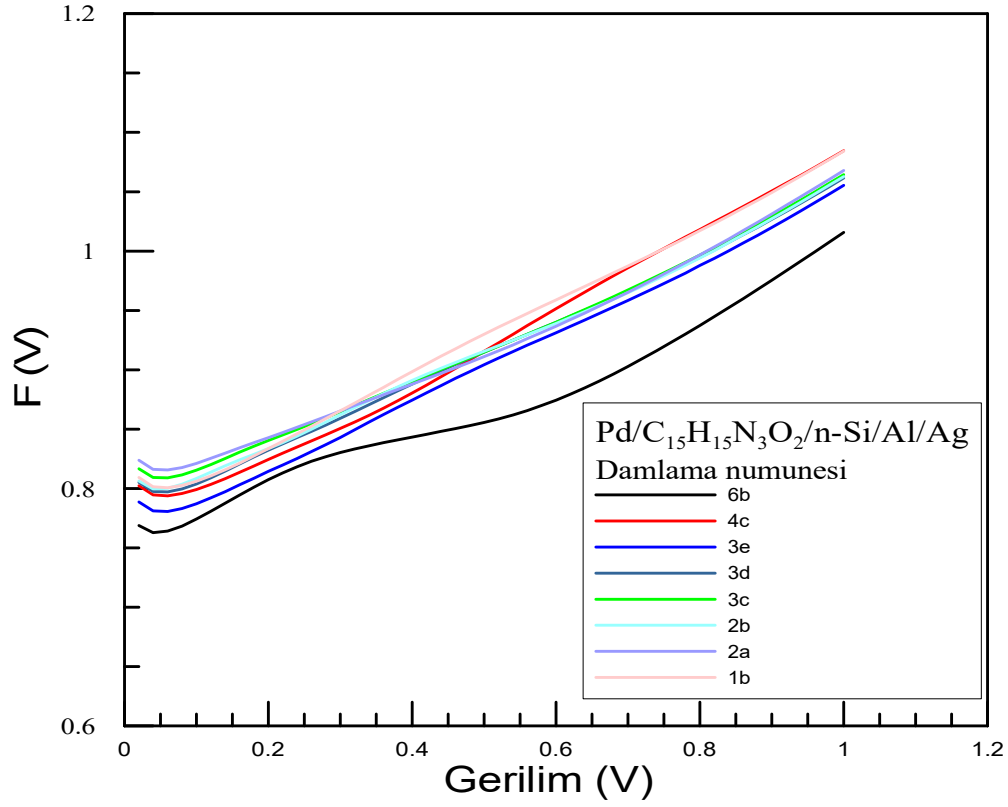
Şekil 5.22. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama numunesinin seri direnç grafiği

Tablo 5.2. Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplama numunesinin I-V ve Norde ölçümleri

Döndürerek kaplama	I-V		NORDE	
	Engel yüksekliği (eV)	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)	Seridirenç Ω
1c	0,83	2,37	0,83	1,6x10 ¹³
1a	0,84	2,49	0,83	9,1x10 ¹²
2a	0,82	2,68	0,81	3,1x10 ¹²
2b	0,81	2,68	0,81	2,1x10 ¹²
2d	0,78	1,99	0,78	1,4x10 ¹⁰
2c	0,83	2,26	0,83	1,1x10 ¹³
3a	0,79	3,04	0,78	3,6x10 ¹²
4d	0,78	2,85	0,78	4x10 ¹¹
5d	0,80	2,50	0,84	1,5x10 ¹²



Şekil 5.23. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag damlama diyotun ölçüm yapılan yerlerin gösterimi



Şekil 5.24. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag damlama numunesinin seri direnç grafiği

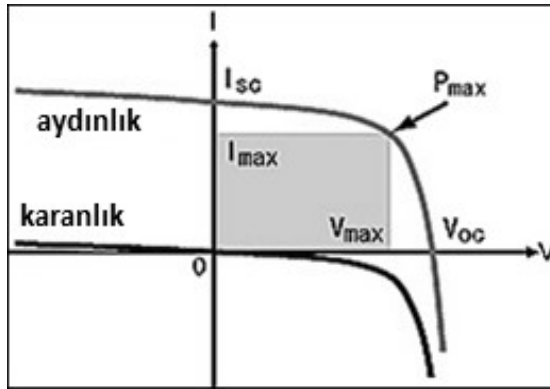
Tablo 5.3. Oda sıcaklığında karanlık ortamda alınan Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag damlama numunesinin I-V ve Norde ölçümleri

Damlama	I-V		NORDE	
	Engel yüksekliği (eV)	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)	Seri direnç Ω
1b	0,80	2,36	0,79	1,8x10 ¹²
2a	0,81	2,35	0,81	3,2x10 ¹²
2b	0,79	2,73	0,79	1,1x10 ¹¹
3c	0,80	2,47	0,80	2,1x10 ¹²
3d	0,79	2,48	0,79	1,3x10 ¹²
3e	0,77	1,33	0,78	8,7x10 ¹¹
4c	0,79	2,34	0,79	1,4x10 ¹²
6b	0,77	1,25	0,76	7,2x10 ¹¹

Fotovoltaik ölçümlerde Schottky diyotlar, ışık altında güneş pili gibi işlev görebilirler. Bu diyotlarda, üzerlerine gönderilen fotonlar tarafından emilerek elektron-hol çiftleri oluşturulur. Elektronlar genellikle diyotun negatif terminaline, holler ise pozitif terminaline yönelir, bu da güneş pilinin işleyişini sağlar. Bir güneş pilinin akım-gerilim karakteristiği aşağıdaki gibi ifade edilebilir: (Shockley, 1950);

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{kT} \right) - 1 \right] \quad (5.9)$$

Burada I_{ph} , ışıkla beraber oluşan akımı ifade eder ve pil üzerine düşen foton akışına bağlı olarak değişiklik gösterebilir. I_0 ise doyma akımını temsil eder, bu da güneş pili karanlık ortamda klasik bir doğrultucu gibi işlev görebildiğini gösterir.



Şekil 5.25. Bir güneş piline ait akım-gerilim grafiği

Bir güneş pilinde değerlerin hesaplanması için şekil 5.25’de akım-gerilim grafiğinden I_{max} ve V_{max} ifadeleri maksimum gücü elde edebilmemiz için gereken akım ve gerilimi ifade etmektedir. Bu durumda;

$$P_{max} = I_{max} \cdot V_{max} \quad (5.10)$$

olarak ifade edilir. Güneş pili verimliliği, pilin aldığı ışık enerjisinden elektrik enerjisine dönüşüm yüzdesini ifade eder. Bu değer, pilin maksimum gücünün pil üzerine düşen ışık gücüne oranlanmasıyla hesaplanır.;

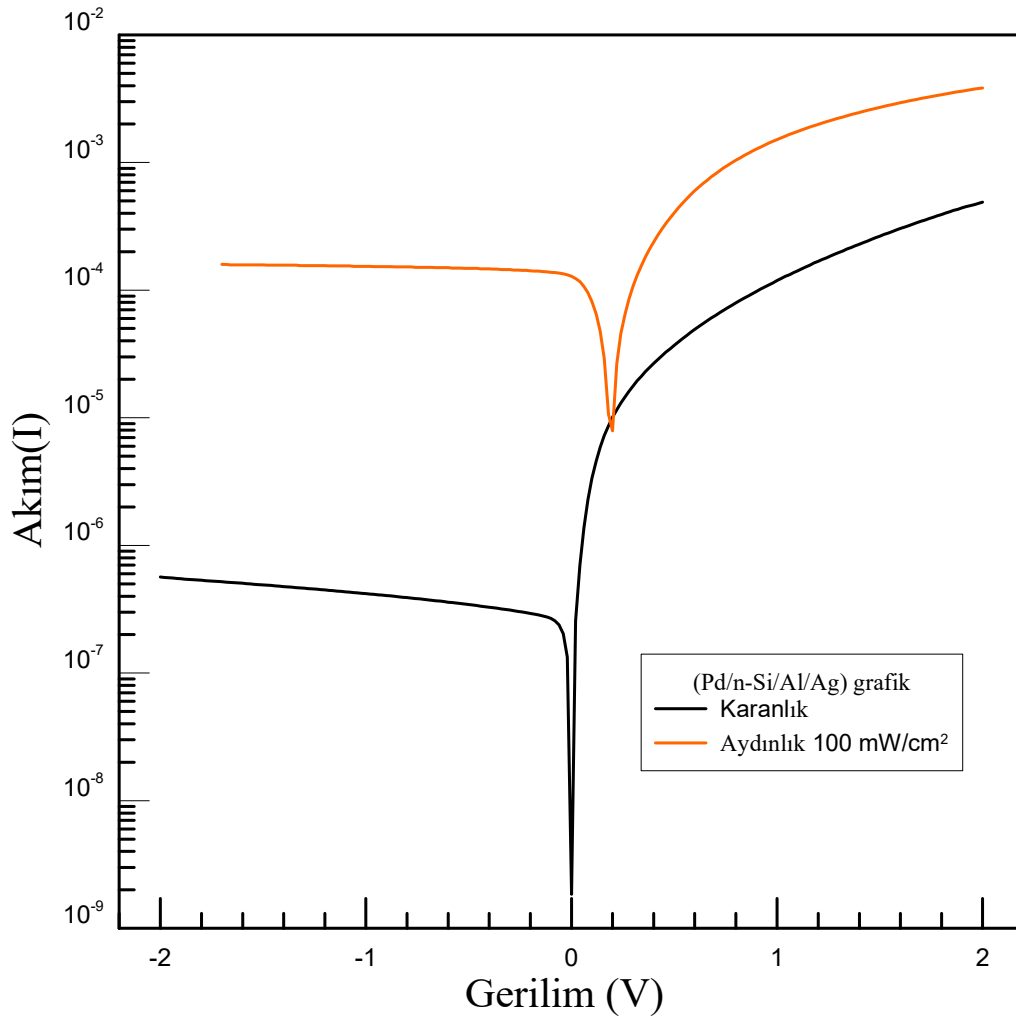
$$\eta = \frac{P_{max}}{p_{in} \cdot A} \quad (5.11)$$

Burada P_{in} , pil üzerine düşen ışığın gücünü; A ise pilin etki alanını (diyot alanı) temsil eder. Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan bir diğer önemli parametre ise doluluk faktörüdür. Bu terim, elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ve kısa devre akımının çarpımına oranlanmasıyla hesaplanır.;

$$FF = \frac{P_{max}}{v_{oc}I_{sc}} = \frac{P_{in}}{v_{oc}I_{sc}} \quad (5.12)$$

ifade edilmektedir.

Numunelerimiz şekil 4.13'te Akım-Gerilim solar simülatör cihazında ışık altında elde edilen yarı logaritmik I-V grafikleri ve güneş pili verimlilikleri incelendiğinde;

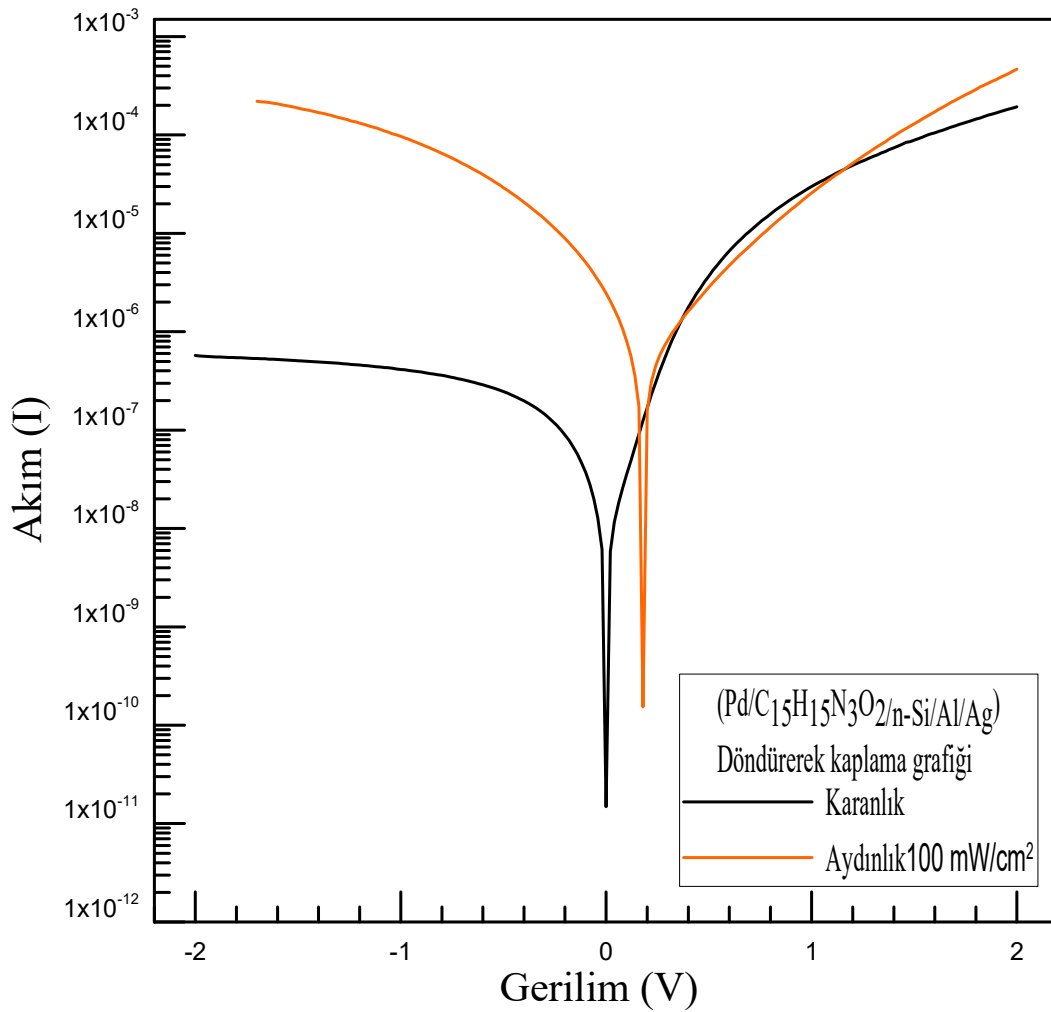


Şekil 5.26. Referans numunesinin (Pd/p-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm^2 ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı

Tablo 5.4. Pd/n-Si/Al/Ag referans diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri

Işık şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mV)	FF Doluluk oranı	η Güneş Enerji Verimi
100 w/cm ²	0,000128	0,20	8,12E-05	0,10	31,72	1,03E+01

Şekil 5.26'da referans numunesinin karanlık ve 100 mW/cm² ışık altında gerilim grafiğinden elde edilen $I_{sc} = 1,28 \times 10^{-2} \text{mA}$, $V_{oc} = 0,20 \text{ mV}$, $I_{max} = 8,12 \times 10^{-5} \text{mA}$, $V_{max} = 0,10 \text{ mV}$, değerlerinden yola çıkılarak doluluk faktörü $FF = \%31,72$ ve güneş enerji verimlilik değeri $n = \%1,03$ olarak hesaplanmıştır.

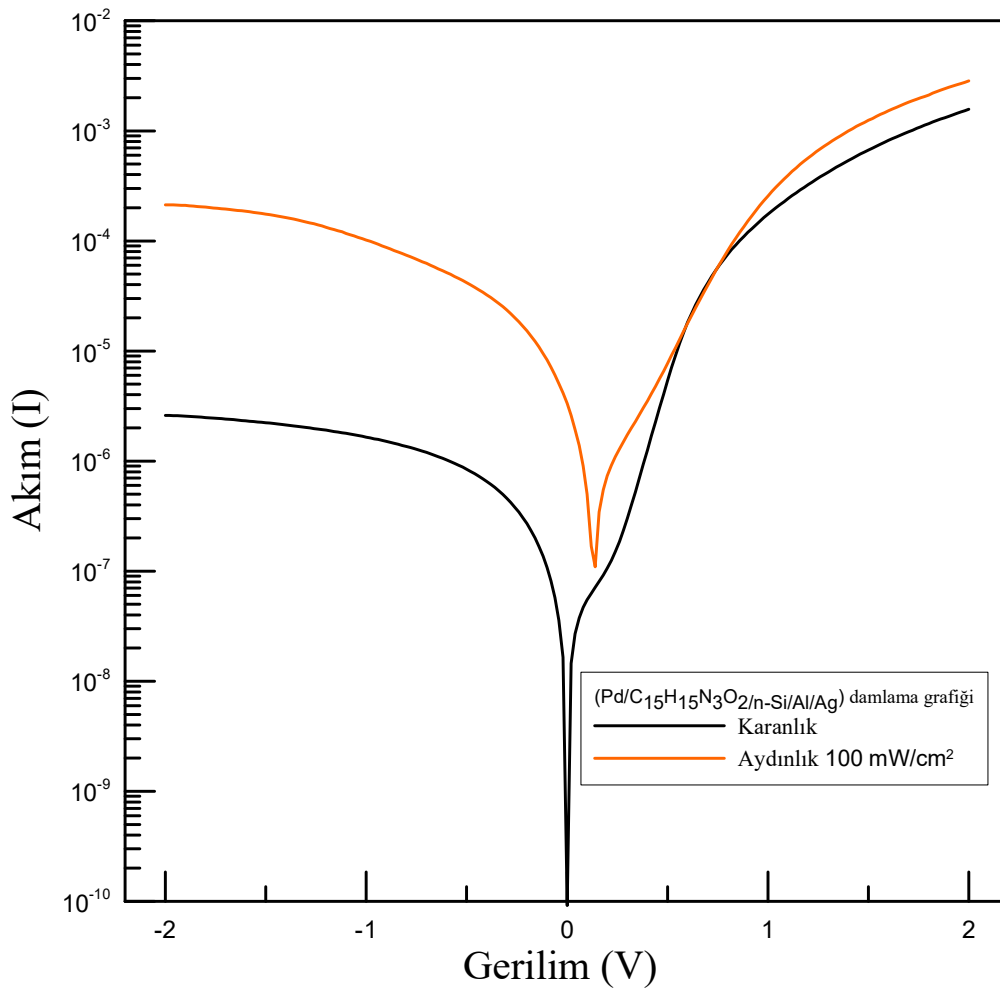


Şekil 5.27. Döndürerek kaplayıcı numunesinin (Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı

Tablo 5.5. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri

Işık şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (Mv)	FF Doluluk oranı	η Güneş enerji verimi
100 w/cm2	2,45E-06	0,18	1,06E-06	0,08	19,29	1,09E-01

Şekil 5.27’de Döndürerek kaplayıcı numunesinin karanlık ve 100 mW/cm² ışık altında gerilim grafiğinden elde edilen $I_{sc} = 2,45 \times 10^{-6} mA$, $V_{oc} = 0,18 mV$, $I_{max} = 1,06 \times 10^{-6} mA$, $V_{max} = 0,08 mV$, değerlerinden yola çıkılarak doluluk faktörü $FF = \%19,29$ ve güneş enerji verimlilik değeri $n = \%1,09 \times 10^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.28. Damlama numunesinin (Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag) karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiği ve güneş enerjisi verimliliği çıkarımı

Tablo 5.6. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag diyot yapısının karanlık ve 100 mW/cm² ışık şiddeti altında lnI-V grafiğinden elde edilen diyot parametreleri

Işık şiddeti mW/cm ²	I _{sc} (mA)	V _{oc} (mV)	I _{max} (mA)	V _{max} (mV)	FF Doluluk oranı	η Güneş enerji verimi
100 w/cm ²	3,33E-06	0,16	1,38E-06	0,06	15,56	1,06E-01

Şekil 5.28'da referans numunesinin karanlık ve 100 mW/cm² ışık altında gerilim grafiğinden elde edilen $I_{sc} = 3,33 \times 10^{-6} \text{mA}$, $V_{oc} = 0,16 \text{ mV}$, $I_{max} = 1,38 \times 10^{-6} \text{mA}$, $V_{max} = 0,06 \text{ mV}$, değerlerinden yola çıkılarak doluluk faktörü $FF = \%15,56$ ve güneş enerji verimlilik değeri $n = 1,06 \times 10^{-1}$ olarak hesaplanmıştır.

5.3. Kapasitans-Gerilime Bağlı Diyot Karakteristikleri

Schottky kontakların akım iletim mekanizmalarının yanı sıra elde edilen diyotun frekansa karşı verdiği tepkiyi belirlemek amacıyla, frekansa bağımlı incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler referans olarak Pd/n-Si/Al/Ag ve Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag ara yüzey katmanlı döndürerek kaplayıcı ve damlama numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Hazırlanan diyotların deneysel olarak C-V ve iletkenlik ölçümleri doğru ve ters gerilim altında (-2V ve +2V), 1, 10, 50, 100, 500, 1000, 5000, 10000 kHz frekansta ve oda sıcaklığında gerçekleştirildi.

C-V ve G/ω-V ölçüm sonuçlarından yola çıkarak C-V ve G/ω-V grafikleri ile C⁻²-V eğrileri elde edildi. Bu eğrilerden yararlanarak kontak potansiyel farkı (V_o), difüzyon potansiyeli (V_D) ve donör katkı atomlarının yoğunluğu (N_D) elde edilerek literatürle karşılaştırıldı.

C-V ve İletkenlik (kondüktans)-voltaj karakteristikleri, oda sıcaklığında geniş bir frekans aralığında (1-10000 kHz) incelenmiş ve Şekil 5.31 ile 39 arasında bu karakteristikler görülmüştür. C-V eğrileri, terslenim, yığılım ve tükenim tabakalarından oluşan üç bölgeye sahip olduğunu göstermektedir. Diyot parametrelerinin incelenmesi, diyot kontak aralığında varlığı bilinen uzay yükü bölgesinin ve ön gerilimlenmiş terslenim bölgesinin

genişliği ile ilişkilidir. Düşük frekans değerlerinde gerilimi takip eden yüksek pik verilen bölge, tükenim bölgesi olarak adlandırılabilir. Bu tükenim bölgesindeki pikler, yasak enerji aralığında mevcut olan arayüzey durumlarının varlığını teyit eder. Diyot grafiklerinde kapasitenin artan gerilim değerlerinde aşağı yönlü eğilimi, seri direnç varlığını işaret eder.

Diyot arayüzey durumları, düşük frekanslarda AC sinyali takip edebilir ve bu nedenle tükenim bölgesinde diyot kapasitans değerlerinde aktif bir rol oynar. Ancak yüksek frekanslarda, arayüzey durumları AC sinyali takip edemez ve kapasite ile iletkenlik (G/w) değerlerine katkıda bulunamazlar. (Karand Dahlke 1972).

Bütün bunların yanı sıra, düşük gerilim değerleri dikkate alındığında, uygulanan AC sinyalinin kapasite ve iletkenlik grafiklerinde kayda değer değişiklikler meydana getirmediği gözlenmektedir.

Gerilim değeri arttıķça, Şekil 5.29, 32 ve 35'de görüldüğü gibi iletkenlik değerleri doğru besleme bölgesinde artmaktadır; bu davranış, C-V karakteristiği ile benzerlik göstermektedir.

C-V sonuçlarından difüzyon gerilimi (V_d), alıcı yoğunlaşması (N_a), tüketim tabakası genişliği (W_D), Fermi enerjisi (E_F), seri direnç (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_{b0}) parametreleri bulundu. Nicollian–Brews metoduna (Nicollian, E.H., Brews, 1982) göre seri direnç (R_s);

$$R_s = G_m / G_m^2 + (\omega C_m)^2 \quad (5.13)$$

bu denklemde, C_m ölçülen Kapasitans, G_m ölçülen kondüktans ve herhangi bir ön gerilim için ω ($=2\pi/T$) açısal frekanstır. Tükenme bölgesi, C^{-2} -V grafiğinin lineer kısmına fit yapılarak birçok diyot parametresi bu denklemde hesaplanabilir.

$$C^{-2} = \frac{2(V_R - V_0)}{q \epsilon_0 N_A A^2} \quad (5.14)$$

Bu denklemde V_R ters gerilim voltajı, N_a akseptör atomların uyarıcı konsantrasyonu V_0 olabilecek ön gerilimde doğrunun V eksenini kestiği nokta, q elektronik yükü ve ϵ_0

boşluğun di-elektrik sabiti olarak tanımlanır. Bu denklemden yararlanarak şekil, $C^{-2}-V$ grafikleri her frekans için uygulanan gerilim voltaj aralığı geniş düz bir çizgi sergiler. Böylece, N_a değeri $C^{-2}-V$ 'nin doğrusal kısmının eğiminden elde edilmiştir

Doğru ve ters beslemde metal-organik-yarıiletken Schottky diyotun deneysel olarak difüzyon potansiyeli (V_D), alıcı atomları sayısı (N_A), fermi enerji seviyesi (E_F), tüketim bölgesi genişliği (W_D) ve frekansa bağlı engel yüksekliği $\Phi_B(C-V)$ gibi elektriksel parametrelerini $C^{-2}-V$ 'nin terslenim bölgesi eğimi ve aşağıdaki eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir (Rhoderick, 1988; Sharma, 1984; Sze, 1981; Card, 1971).

$$V_0 = V_D - kT/q \quad (5.15)$$

burada V_0 ise ters beslemdeki $C^{-2}-V$ grafiğinin lineer kısmının yatay eksen ile kesiştiği noktadır.

$$N_a = \frac{2}{q\epsilon_0 A^2} \left[-\frac{1}{d(C^{-2})/dV} \right] = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 \tan(\theta)} \quad (5.16)$$

Fermi enerji seviyesi;

$$E_F = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_C}{N_A} \right) \quad (5.17)$$

Tükenim tabaka genişliği;

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{qN_A}} |V_1 - V| \quad (5.18)$$

ile bulunur.

Engel yüksekliği ise;

$$\Phi_B = \left(C_2 V_0 + \frac{kT}{q} \right) + \left(\frac{kT}{q} \right) \ln \left(\frac{N_V}{N_A} \right) = V_D + E_F \quad (5.19)$$

bağıntısı ile bulunur. Buradan N_v değerini de;

$$N_v = 4.82 \times 10^{15} T^{\frac{3}{2}} \left(\frac{m_h^*}{m_0} \right)^{3/2} \quad (5.20)$$

olarak hesaplanınca bu değer $N_v=2,8 \times 10^{19}$ olarak bulunur. Maksimum elektrik alanı E_m ise;

$$E_m = \sqrt{2qN_D V_D / \epsilon_s \epsilon_0} \quad (5.21)$$

bağıntısı ile hesaplanır.

Diyotun yalıtkan bir tabakaya sahip olmadığı ve yarıiletkenin düzgün bir katkı konsantrasyonuna sahip olduğu varsayılır. Bu durumda, $1/C^2$ 'nin V_R 'ye göre grafiği doğrusal olarak dikkate alınabilir ve eğimi bize katkı konsantrasyonunu belirlememize yardımcı olur.

Bu diyotların hesaplamalarında kullanılan C_2 formül ise geçerli olan akseptör yoğunluğunun teorik olarak akseptör yoğunluğuna oranı şeklinde ifade edilmektedir.

$$C_2 = N_A(\text{exp}) / N_A(\text{theor.}) \quad (5.22)$$

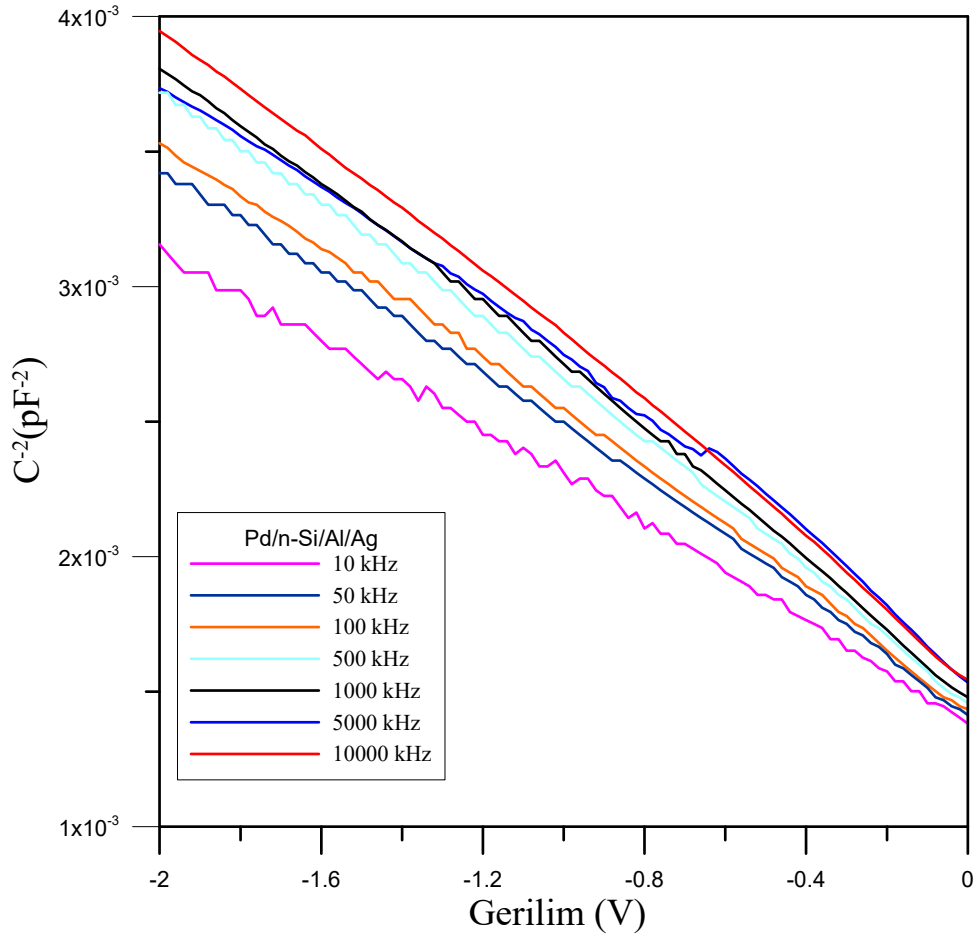
ile bulunur.

C-V analizi, diyotun kontak bölgesinde bulunan uzay yükü bölgesinin ve gerilimlenmiş terslenim bölgesinin genişliği ile ilişkilendirilir. Düşük frekanslı gerilim değerlerinde, gerilimi takip eden yüksek pik verilen bölge tükenim bölgesi olarak adlandırılabilir. Bu tükenim bölgesindeki pikler, yasak enerji aralığında mevcut olan arayüzey durumlarını, yani arayüzey tabakasının varlığını teyit eder. (Şahinkaya, 2020)

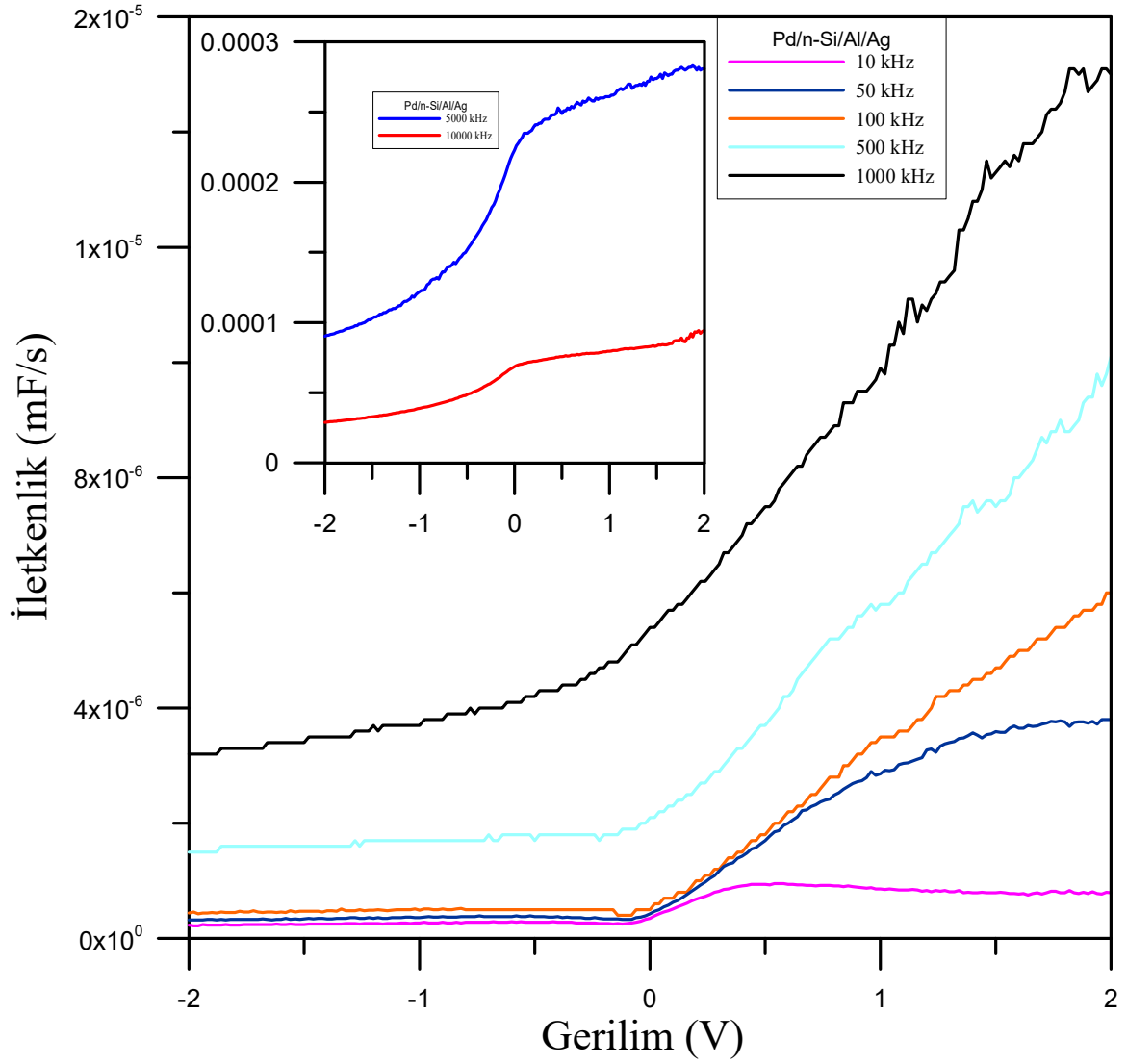
Değişen frekans gerilim değerlerinde diyot parametreleri incelenmiş olup bu değişkenler tablo 5.7, 8 ve 9' da frekans değişim durumlarına göre sıralanmıştır.

Tablo 5.7. Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyot parametreleri

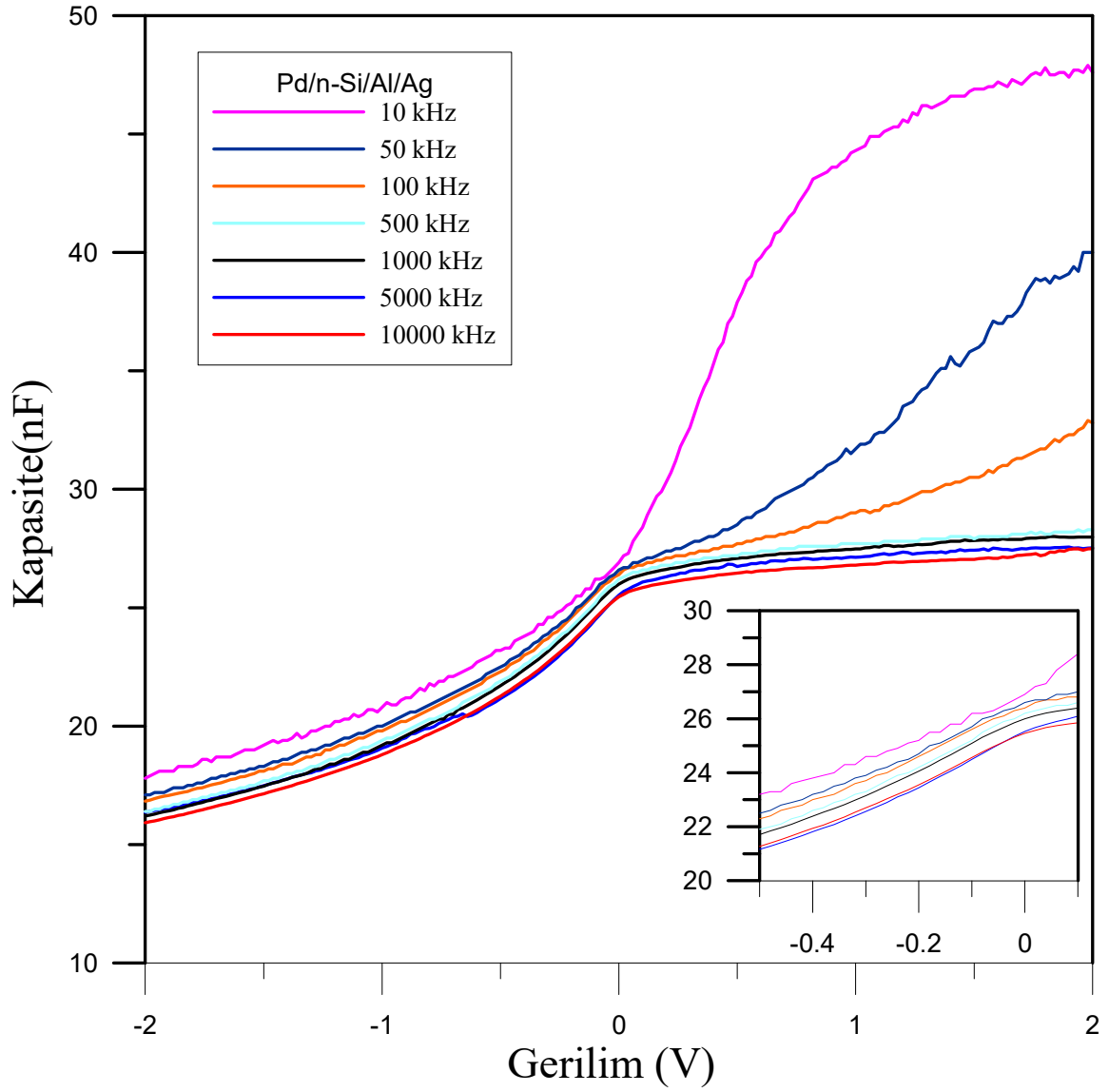
Frekans (Hz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³)	C ₂	V _D (V)	E _f (eV)	E _m (V/cm)	F _B (eV)	W _D
1,E+04	9,210	1,635945	2,24E+14	0,52	1,661	0,304	10672,17	1,966	3,09E-04
5,E+04	10,820	1,446	1,92E+14	0,45	1,471	0,308	9309,22	1,779	3,13E-04
1,E+05	11,513	1,400	1,85E+14	0,43	1,425	0,309	8987,69	1,734	3,14E-04
5,E+05	13,122	1,336	1,72E+14	0,40	1,361	0,311	8467,79	1,673	3,19E-04
1,E+06	13,816	1,319	1,67E+14	0,39	1,344	0,311	8304,24	1,656	3,21E-04
5,E+06	15,425	1,333	1,62E+15	3,76	1,358	0,252	25956,59	1,612	1,04E-04
1,E+07	16,118	1,528	1,80E+14	0,42	1,553	0,309	9250,77	1,863	3,33E-04



Şekil 5.29. Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile 0 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C⁻²-V grafiği



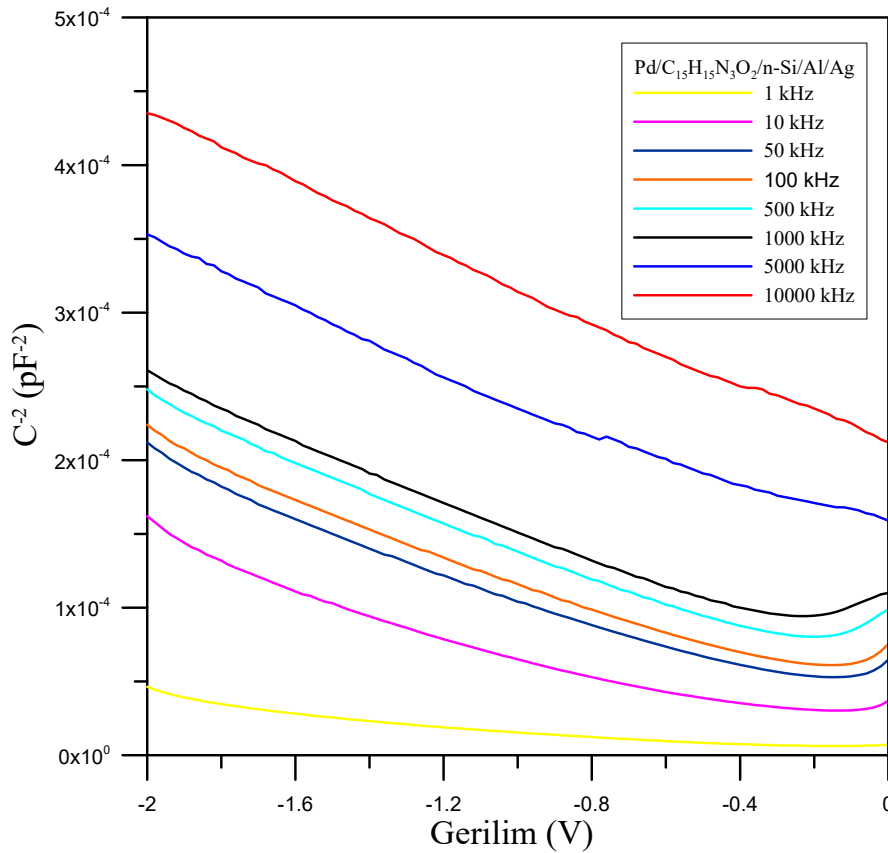
Şekil 5.30. Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile +2 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w -V grafiği



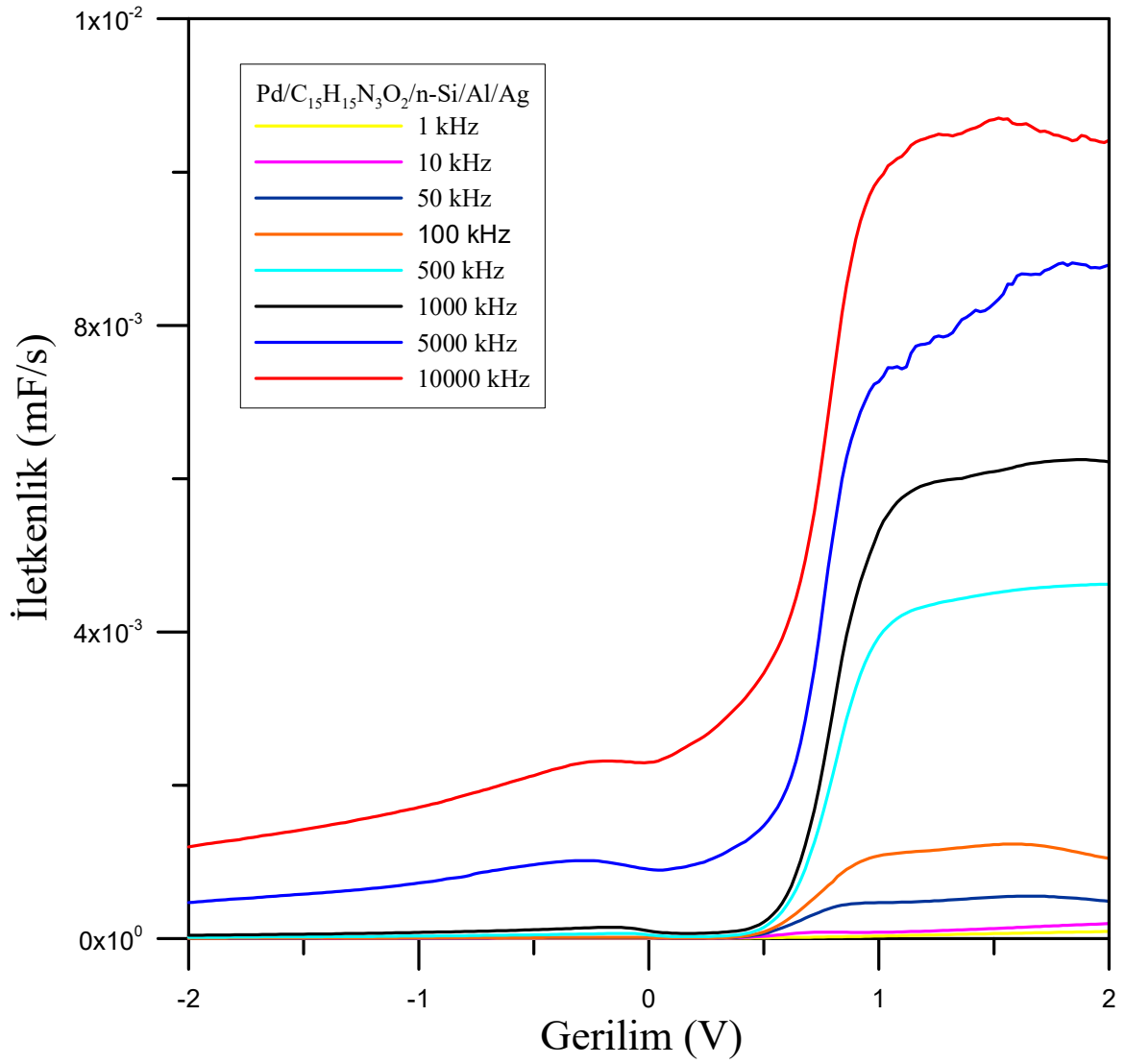
Şekil 5.31. Pd/n-Si/Al/Ag Referans diyotun -2 ile +2 volt arasında 10-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği

Tablo 5.8. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyotparametreleri

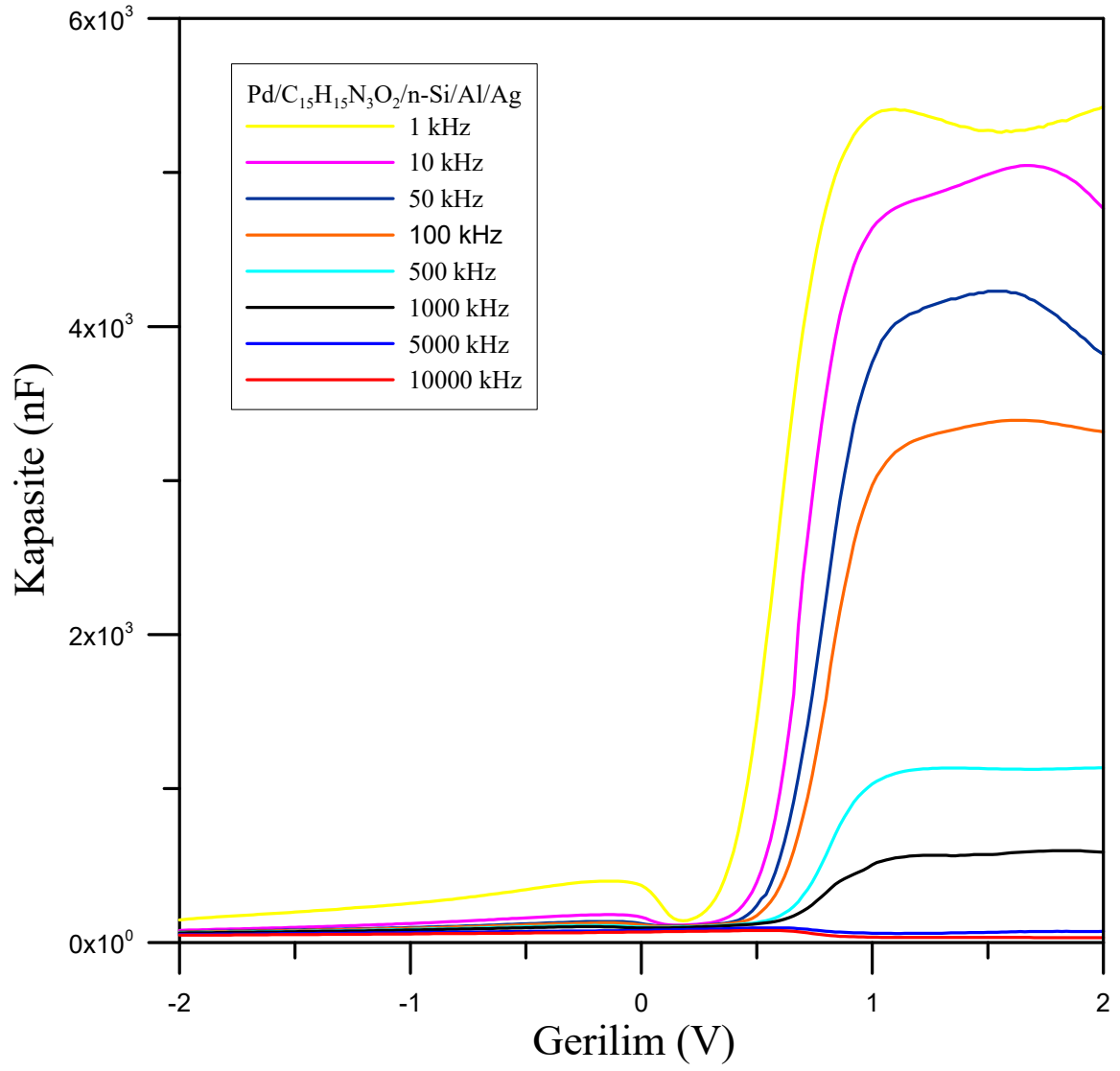
Frekans (Hz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³)	C ₂	V _D (V)	E _f (eV)	E _m (V/cm)	F _B (eV)	W _D
1,E+03	6,908	0,000978	1,07E+16	24,90	0,026	0,204	9242,68	0,230	1,09E-06
1,E+04	9,210	0,149	3,03E+15	7,03	0,174	0,236	12704,82	0,411	2,53E-05
5,E+04	10,820	0,380	2,40E+15	5,58	0,405	0,242	17271,51	0,648	4,54E-05
1,E+05	11,513	0,465	2,32E+15	5,39	0,490	0,243	18683,91	0,734	5,11E-05
5,E+05	13,122	0,063	2,23E+15	5,17	0,088	0,244	7738,37	0,333	1,92E-05
1,E+06	13,816	0,802	2,21E+15	5,13	0,827	0,244	23664,97	1,072	6,88E-05
5,E+06	15,425	0,802	2,21E+15	5,13	0,827	0,244	23664,97	1,072	6,88E-05
1,E+07	16,118	0,804	2,21E+15	5,13	0,829	0,244	23697,50	1,075	6,89E-05



Şekil 5.32. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile 0 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C⁻²-V grafiği



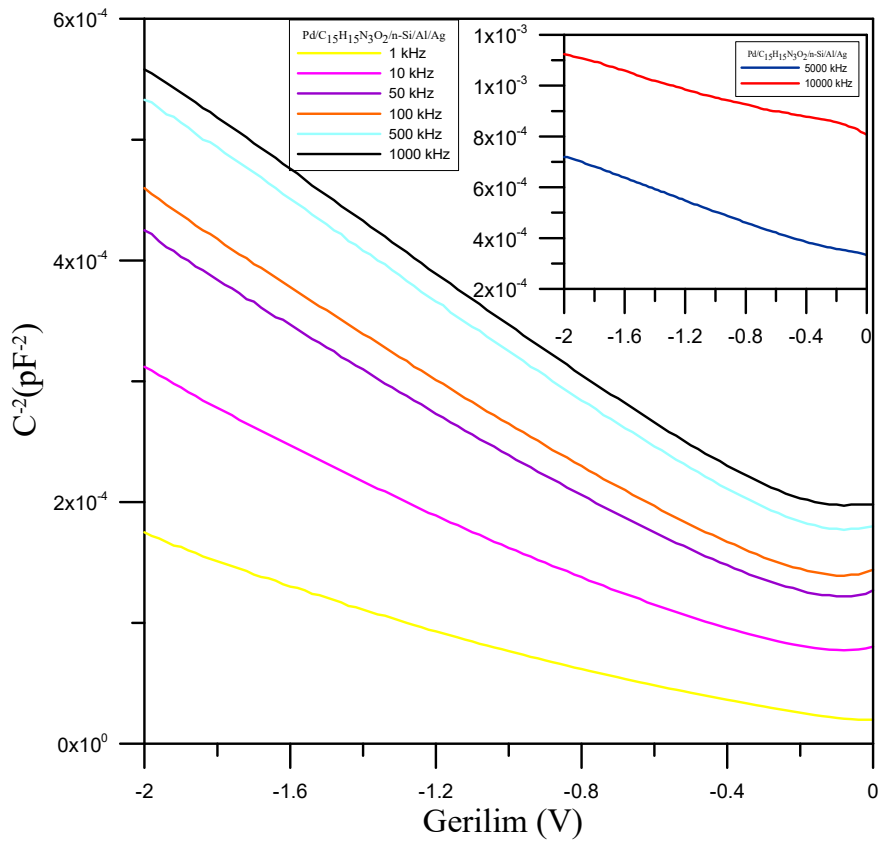
Şekil 5.33. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği



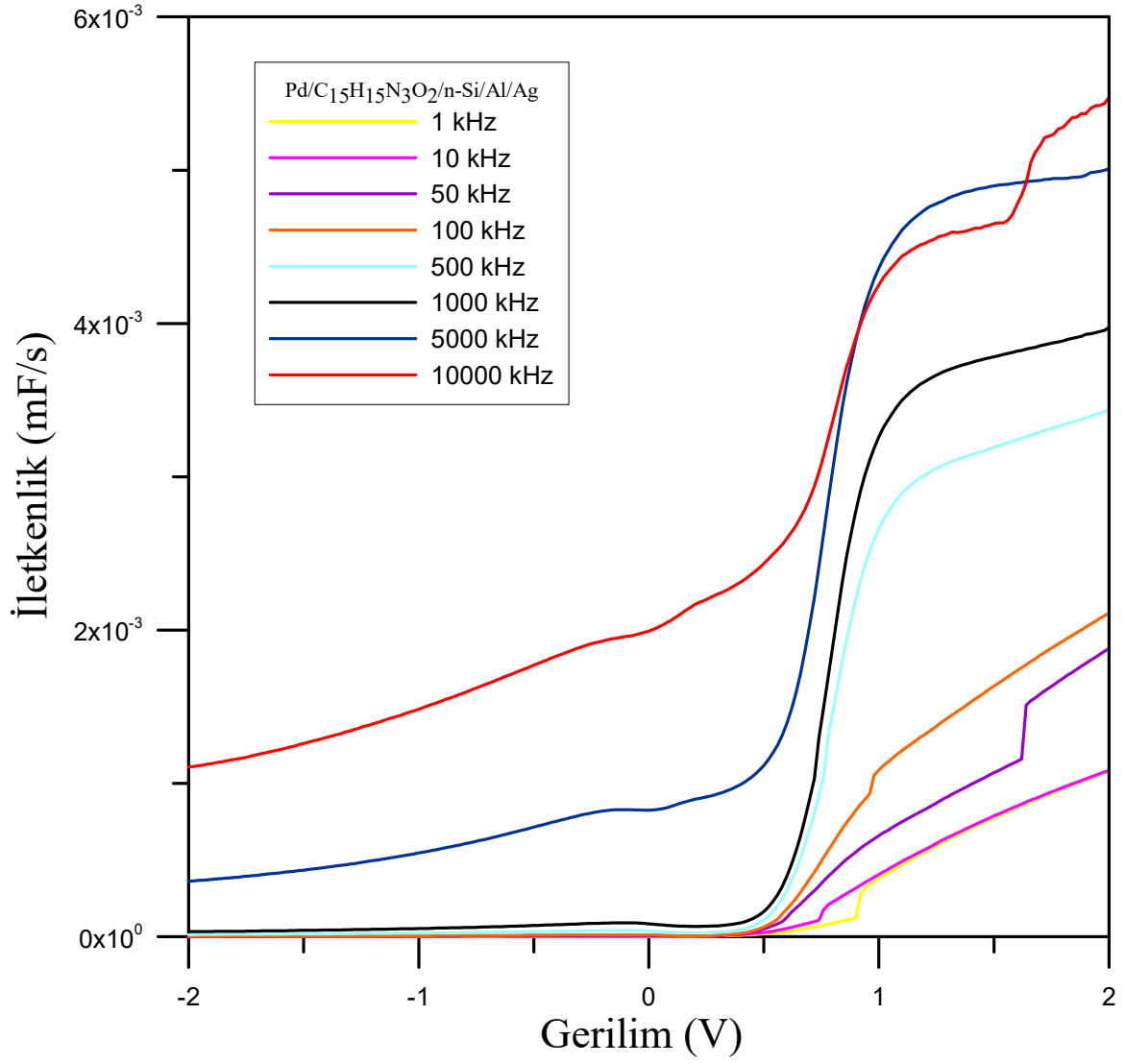
Şekil 5.34. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Döndürerek kaplayıcı diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği

Tablo 5.9. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Damlama diyotun Frekans – İletkenlik – Gerilim ölçümlerinden elde edilen diyotparametreleri

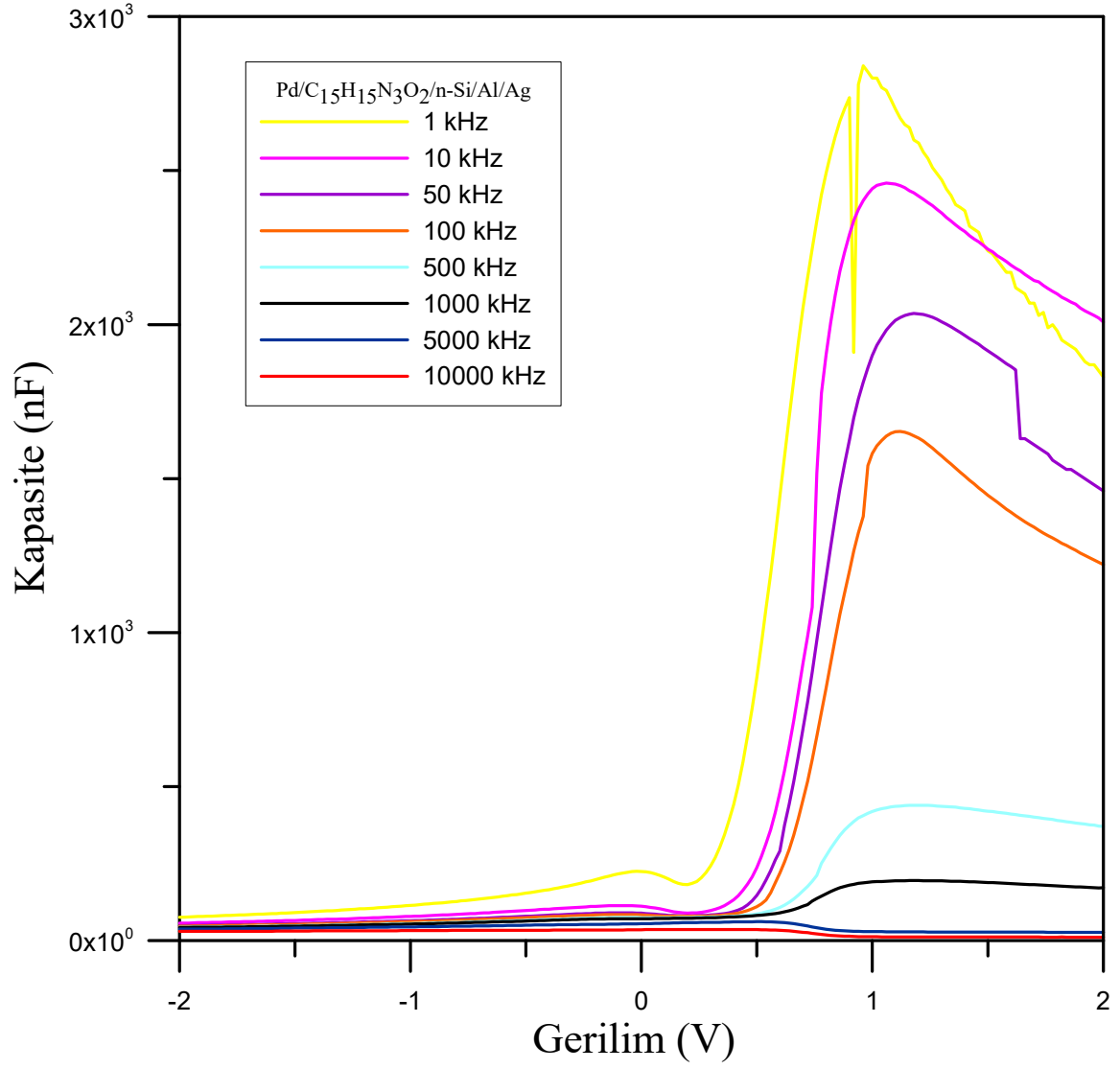
Frekans (Hz)	Ln (f)	V ₀ (V)	N _A (cm ⁻³)	C ₂	V _D (V)	E _f (eV)	E _m (V/cm)	F _B (eV)	W _D
1,E+03	6,908	0,053494	2,47E+15	5,73	0,078	0,242	7704,89	0,321	1,68E-05
1,E+04	9,210	0,386	1,57E+15	3,63	0,411	0,253	14050,72	0,666	5,67E-05
5,E+04	10,820	0,525	1,21E+15	2,80	0,550	0,260	14265,51	0,811	7,54E-05
1,E+05	11,513	0,596	1,14E+15	2,64	0,621	0,262	14708,03	0,884	8,28E-05
5,E+05	13,122	0,720	1,01E+15	2,34	0,745	0,265	15159,85	1,011	9,67E-05
1,E+06	13,816	0,797	9,86E+14	2,29	0,822	0,265	15758,90	1,088	1,03E-04
5,E+06	15,425	1,505	9,52E+14	2,21	1,530	0,266	21127,68	1,797	1,44E-04
1,E+07	16,118	5,384	1,29E+15	2,98	5,409	0,258	46175,26	5,668	2,34E-04



Şekil 5.35. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Damlama diyotun -2 ile 0 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C⁻²-V grafiği



Şekil 5.36. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Damlatma diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen G/w-V grafiği



Şekil 5.37. Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/N-Si/Al/Ag Damlama diyotun -2 ile +2 volt arasında 1-10000 kHz frekans aralığında elde edilen C-V grafiği

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında ara yüzeysiz ve metil kırmızısı ara yüzeyli metal/yarıiletken yapıların opto-elektronik özellikleri incelenmiştir. Bunun için arayüzey malzemesi olarak metil kırmızısı seçilmiş ve silisyum alt tabakalar üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle büyütülmüştür. Elde edilen her üç numune olan Pd/n-Si/Al/Ag referans, Pd/C₁₅H₁₅N₃O₂/n-Si/Al/Ag döndürerek kaplama ve damlama yöntemleri yapısının 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında fotovoltajik özellikleri ve karanlık ortamda I-V ve C-V karakteristikleri incelenmiştir.

İdealite faktörü ideal diyot için 1 olmalıdır. İdealite faktörü değerinin 1'den büyük bulunması diyotun ideallikten saptığının en büyük göstergesidir. Üretilen diyotların I-V ölçümleri oda sıcaklığında +2V ve -2V aralığında alınmıştır. lnI-V eğrisi incelendiğinde, lineer olmayan davranışlar gözlemlenmiştir. lnI-V grafiği parametreleri, bariyer yüksekliği, doyum akımı ve idealite faktörü gibi elektriksel özellikler termyonik emisyon teorisi kullanılarak hesaplanmıştır. İdealite faktörü değerlerinin 1'den büyük olduğu gözlemlenmiştir. Üretilen diyotların ideallikten uzaklaşmasının nedenleri arasında ara yüzey kirliliği, oksitlenmiş tabakalar, kontak oluşumu sırasında yüksek sıcaklık etkileri ve kimyasal temizleme işlemlerinin olumsuz etkileri bulunabilir. Bu durumun, bariyer yüksekliğindeki inhomojenlikleri, arayüzey durumları ve yüksek seri dirençle ilişkili olduğu düşünülebilir. (Doğan vd., 2017)

Diyotların seri dirençleri ne kadar düşük olursa, kaliteleri o kadar artar. Üretilen diyotların seri dirençleri ve engel yükseklikleri Norde fonksiyonu kullanılarak F-V grafikleri ile hesaplanmıştır. Düşük voltajlarda, yarı logaritmik ölçekte Schottky diyotların I-V karakteristikleri lineerdir. Ancak seri direnç, arayüzey tabakası ve arayüzey durumları gibi parametrelerin etkisi nedeniyle, yüksek voltajlarda metal-yarıiletken doğrultucu kontakların I-V karakteristiklerinde beklenen değerden sapmalar gözlemlenebilir. (Aydın vd., 2006).

Bu çalışmada diyotların seri direnç değerleri Norde yöntemi ile hesaplanmıştır. Norde yöntemi kullanılarak karanlıkta bulunan ortalama seri direnç değerleri referans için 3,24 M Ω döndürerek kaplama için 5,16 M Ω ve damlama 1,44 M Ω olarak bulunmuştur.

Hazırlanan bu üç numunenin I-V, norde ve frekans değerleri ile yapılan hesaplamalara göre engel yüksekliklerinin sonuçları şu şekildedir. Referans numunesinin I-V sonucu tablo 5.1’de ölçülürken, frekansa bağlı olarak 10 kHz değerinden sonra engel yüksekliği azalırken sadece 10.000 kHz frekansında bir engel yüksekliğinin arttığı görülmüştür. Döndürerek kaplama numunesinde I-V için tablo 5.2’de sonuçlar elde edildi. Frekansa bağlı olarak ise 1 kHz’den itibaren engel yüksekliği sürekli artarken bu değerlerden farklı olarak 500 kHz de düşüşle azaldığı görüldü. Damlama numunesinin I-V engel yüksekliği tablo 5.3’te olarak bulundu. Frekansa bağlı ise 1 kHz değerinden sonra sürekli olarak engel yüksekliği artmıştır. Frekans arttıkça diyotların R_s değerlerinde azalma gözlenmiştir. Bu frekansla değişim, lokalize arayüzey yüklerine, örneğin oksit-tuzaklı yükler, hareketli oksit yükleri ve sabit oksit yüklerine bağlanabilir. Termoyonik emisyon teorisi ve Norde metodu ile hesaplanan engel yükseklikleri karşılaştırıldığında, bu değerlerin genellikle birbirine yakın olduğu ancak küçük farklılıkların olduğu gözlemlenmektedir. Bu farklılık, engel yüksekliğinin homojen olmaması ve diyotların ideal olmayan davranışlarından kaynaklanabilir. Yapılan çalışmalarda, Schottky diyotlarda deneysel olarak elde edilen I-V karakteristiklerinin bazı durumlarda termoyonik emisyon modeli ile tam olarak uyuşmadığı gösterilmiştir. Özellikle idealite faktörü (n) değerinin 1.03’ten büyük olması durumunda, termoyonik emisyon modelinden sapmaların olduğu belirlenmiş ve bu durumun genellikle Schottky engel yüksekliğinin uygulama gerilimine bağımlılığı ile ilişkilendirilebileceği ifade edilmiştir. Ayrıca, idealite faktörünün yüksek olması ($n>1$), imaj kuvvet etkisi, engel yüksekliğinde azalma, jenerasyon-rekombinasyon akımları, arayüzey durumları ve tünelleme gibi çeşitli mekanizmalara da bağlanabilir. (Tung, 2001).

KAYNAKLAR

- Aslan, F. (2019). Organik-inorganik hibrit yarıiletken fotodiyotların geliştirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Aslan, F., Esen, H. ve Yakuphanoglu, F. (2020). Çeşitli Metal Oksitlere Katkılama Yapılarak Üretilmiş Fotodiyotların Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi: Bir Araştırma, *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 4(2), 41-54.
- Aydoğan, Ş. (2014). I–V–T (Current–Voltage–Temperature) Characteristics of The Au/Anthraquinone/p-Si/Al Junction Device.
- Aydoğan, Ş. (2011). Katıhal Fiziği. Nobel yayınları 112(69): 451-453.
- Batmaz, T. (2020), Elektrodepozisyon yoluyla elde edilmiş olan ni/n-GaAs schottky diyotlarının elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Bohlin, K. E. (1986). Generalized Norde plot including determination of the ideality factor. *Journal of Applied Physics* 60.3: 1223-1224.
- Card, H. C. and Rhoderick E. H. (1971) Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *Journal of Physics D: Applied Physics* 4(10): 1589.
- Cowley, A. M. and Sze S. M., (1965). Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor System. *J. Appl. Phys.* 36, (10), 3212.
- Çavaş, M. (2011). Nano yapıli metal oksit yarıiletkenler kullanılarak fotodiyotların üretilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Demirbilek, N. (2019). Çinko oksit arayüzeyli yarıiletken-yarıiletken UV fotodedektörler, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Dere, A. (2014). Grafen esasli fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.
- Doğan, H. Orak, İ., and Yildirim, N. (2017). Photovoltaic and Electrical Properties of Al/Ruthenium (II)-complex / p-Si Photodiode. *Cumhuriyet Science Journal* 38 (2): 329-329. <https://doi.org/10.17776/cumuscij.297189>.
- Dugan, S. (2019). CdO p-Si heteroeklem fotodedektörlerin üretilmesi ve elektriksel karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli.

Enderlerin R. and Horing N. J. M. (1997). *Fundamentals of Semiconductor Physics and Devices*. Singapore: World Scientific Publishing Co, 1.

Göktaş, Ö. F. (2018). Al katkılı n-ZnO p-Si heterojonksiyon fotodiyotun ışığa duyarlılık performansının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Gülnahar, M. (2023). Au/Al/p-Si eklem yapının akım-gerilim (I-V) karakteristiklerinin sıcaklığa bağlı karakterizasyonu ICSAR 2 nd International Conference on Scientific and Academic Research.

Gündüz, B. (2007). Organik Yarı İletken Fotodiyotların Hazırlanması ve Optoelektronik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Goetzberger, A., Hebling, C., Schock, H. W. (2003). *Photovoltaic Materials, History, Status and Outlook*, Materials Science and Engineering R40, p. 1-46.

Holland, L. (1956). *Vacuum deposition of thin films*. Chapman and Hall London.

Jacoboni, C. (2010), *Theory of Electron Transport in Semiconductors: A Pathway from Elementary Physics to Nonequilibrium Green Functions*. Springer Series in Solid-State Sciences: Heidelberg Dordrecht London New York, 108.

Joyce, B. A. and Neave, J. H. (1971). An investigation of silicon-oxygen interactions using Auger electron spectroscopy. *Surf. Sci.* 27, (3), 499-515.

Kar, S. and Dahlke, W. E. (1972) Interface states in MOS structures with 20-40 Å thick SiO₂ films on nondegenerate Si, *Solid State Electronics*, 15(2), p. 221–237.

Kara, F. (2020). Fe Katkılı TiO₂ İnce Filmlerin Üretimi ve Optik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kittel, C. (1996). *Charles Kittel Wiley, Introduction to Solid State Physics*.

Kocyigit, A., Orak, İ., Aydoğan, Z., Çaldıran ve Turut, A. (2017). “Temperature-dependent C-V characteristics of Au/ZnO/n-Si device obtained by atomic layer deposition technique”. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 28 (8): 5880-86. <https://doi.org/10.1007/s10854-016-6261-z>.

Lawrence L. Kazmerski, (2006) Solar photovoltaics R&D at the tipping point: A 2005 technology overview, *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena* 150, 105–135.

Maycock, P. D., (2003). *PVNews*, January–February 2003.

Neamen D. A. (2003). *Semiconductor Physics and Devices: Basic Principles (Third Edition)*, New York: McGraw-Hill, 1-2.

Nicollian, E. H. and Brews J. R. (1982). Metal oxide semiconductor (MOS) physics and technology. New York, 257–264.

Norde, H. (1979). A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance. Journal of Applied Physics, 50(7), 5052-5053.

Omar, M. A. (1993). Elementary Solid State Physics: Principles and Applications, California: Addison-Wesley Publishing Company Inc, 210-213.

Orak, İ., Ejderha. K. and Türüt, A. (2015) The electrical characterizations and illumination response of Co/N-type GaP junction device. Curr. Appl. Phys, 15: 1054–1061.

Özmen, D. (2015). YMnO_3 ve YCoO_3 ferroelektrik malzeme esaslı Si tabanlı fotodiyotların elektriksel özellikleri, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ.

Özdere, A. (2021). Hidrotermal Metod ile Nano Yarıiletken Malzeme Esaslı Fotodiyot Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kırklareli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Photovoltaik energy factsheets. Solar-Resource and potential
<https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/photovoltaic-energy-factsheet>

Rhoderick, E. H. (1978). Metal-Semiconductor Contacts. Oxford University, Clarendon Pres, Oxford.

Rhoderick, R. H. and Williams E. H. (1988). Metal-Semiconductor Contacts. London: Oxford University Press, 257–267.

Sharma, B. L. (1984). Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications Springer New York.

Shockley, W. (1950). Holes and electrons. Physics Today 3(10): 16–24.

Sze S (1981a) Physics of semiconductor devices 2nd edition. Microelectronics Journal.

Şahinkaya, M. (2020). Si tabanlı ru(II) kompleks yapısına alq3 organik bileşiğinin elektriksel ve fotovoltaik özelliklerini arttırmadaki etkisi. YL Tezi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, s. 93.

Taner, A. (2010). SILAR yöntemi ile ZnO yarıiletken filminin elde edilmesi ve bazı fiziksel özelliklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Tung, R. T. (2001). Recent advance in schottky barrier concept. Mat. Sci. Eng. R, 35 1-138.

Weber, E. R. (2003). Understanding defects in semiconductors as key to advancing device technology. *Physica B: Condensed Matter*, 340–342, 1–14.

Yakuphanoglu, F. (2007). Electrical characterization and interface state density properties of the ITO/C70/Au Schottky Diode. *J. Phys. Chem. C* 111(3): 1505-1507.

Yıldırım, N. and Türüt, A. (2009). A theoretical analysis together with experimental data of inhomogeneous Schottky barrier diodes *Microelectronic engineering* 86 (11), 2270-2274.

Yıldırım, N., Gündük, M. and Orak, İ. (2017). The Effects of Thermal Annealing and Sample Temperature on Current-Voltage Characteristics of Au/n-Si/Al Schottky Diodes. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 38(2), 275-285.

Ziel, A. V. (1968). *Solid State Physical Electronics*, Prentice-Hall, Inc., New-Jersey, 245.