

**T.C.
BİNGÖL-BATMAN ÜNİVERSİTELERİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Ag/AZURE A/n-Si VE Ag/AZURE C/n-Si YAPILARIN
FOTOVOLTAİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ENES DURUMLU**

Fizik Anabilim Dalı

**TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Nezir YILDIRIM**

BİNGÖL 2017

T.C.
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

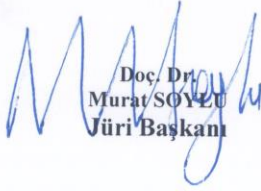
Ag/Azure A/n-Si ve Ag/Azure C/n-Si YAPILARIN FOTOVOLTAİK
ve ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

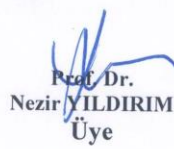
YÜKSEK LİSANS TEZİ

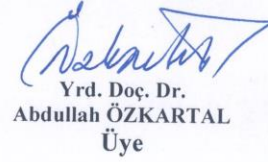
Enes DURUMLU

Enstitü Anabilim Dalı : FİZİK

Bu tez 29.12.2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.


Doç. Dr.
Murat SOYLU
Jüri Başkanı


Prof. Dr.
Nezir YILDIRIM
Üye


Yrd. Doç. Dr.
Abdullah ÖZKARTAL
Üye

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. İbrahim Y. ERDOĞAN
Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışma, Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü öğretim üyesi hocam, Prof. Dr. Nezir YILDIRIM danışmanlığında yürütülmüştür. Yüksek lisans eğitimim boyunca benden bilgi ve tecrübesini esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Nezir YILDIRIM' a çok teşekkür ederim.

Bu çalışmada kullanılan numunelerin hazırlanmasında, deneylerin yapılmasında ve sonuçların değerlendirilmesinde katkılarından dolayı Yrd. Doç. Dr İkram ORAK' a teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmanın gerçekleştirilmesi için imkân sağlayan Bingöl Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü ve Bingöl Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı mensuplarına teşekkür ederim.

Ayrıca yüksek lisans eğitimime başlama sürecinde ve aynı zamanda tez çalışmalarımda bana her türlü desteği sunan aileme teşekkürlerimi sunarım.

Enes DURUMLU
Bingöl 2017

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
KISALTMA VE SİMGELER.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLolar LİSTESİ.....	ix
ÖZET.....	x
ABSTRACT.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETİ.....	4
3. KURAMSAL TEMELLER.....	9
3.1. Metal Yarıiletken Kontaklar.....	9
3.1.1. Metal n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar.....	10
3.1.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar.....	12
3.2. Schottky Engel Yapısının Oluşumu.....	14
3.2.1. Schottky-Mott Teorisi.....	15
3.2.3. Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi.....	17
3.2.4. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi.....	21
3.2.5. Norde Modeline Göre Akım-Gerilim Eğrisinin Özellikleri.....	23
3.2.6. Cheung-Cheung Metodu.....	24
4. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26

4.1. Numunenin Temizlenmesi ve Elde Edilmesi	26
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	28
5.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri	28
5.2. Fotovoltaik Ölçümlerin Elde Edilmesi.....	35
KAYNAKLAR.....	46
ÖZGEÇMİŞ	49



KISALTMA VE SİMGELER

A	: Diyodun 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
N	: İdealite faktörü
Mm	: Mikro metre
R_s	: Seri direnç
χ_s	: Yarıiletkenin elektron ilgisi
V_d	: Difüzyon potansiyeli
η	: Güneş Pilinin Verimi
I_{sc}	: Kısa Devre Akımı
V_{oc}	: Açık Devre Gerilimi

MY : Metal Yariletken
SD : Schottky Diyot
FF : Dolun Faktörü
MPP : Maksimum Güç Noktası
Vo : Açık Devre Voltajı



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1.	Metal n-tipi Yarıiletken Schottky kontağın enerji-bant diyagramı a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra termal denge durumunda c) doğru beslem durumu, d) ters beslem durumu (Rhoderick ve Williams, 1988).....	11
Şekil 3.2.	Metal n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı a) Kontakdan önce b) Kontakdan sonra ve termal dengede.....	12
Şekil 3.3.	Metal n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı $V \neq 0$ olması durumunda.....	13
Şekil 3.4.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın; a) (—) beslem olmayan b)($V = 0$) c) Ters beslem uygulanmış d) ($V = -V$) durumlardaki enerji bant diyagramlarını göstermektedir (Rhoderick ve Williams, 1988).....	15
Şekil 3.5.	Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı: (—) beslem olmayan ($V = 0$) ve ters beslem uygulanmış ($V = -V$) durumlardaki bantları.....	18
Şekil 3.6.	Seri direncin, akım gerilim karakteristiğine etkisi.....	22
Şekil 4.1.	a) Azure A moleküler yapısı b) Ag/Azure A/n-Si/Al Schottky diyodun şematik gösterimi (kalınlıklar orantılı değildir).....	26
Şekil 5.1.	Ag/n-Si için Schottky diyotların grafiği.....	29
Şekil 5.2.	Ag/n-Si Schottky diyotların Seri direnç grafiği.....	31
Şekil 5.3.	Cheung fonksiyonlarına Ag/n-si için $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln)$ grafiği.....	32
Şekil 5.4.	Cheung fonksiyonlarına Ag/Azure A/n-si için $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln)$ grafiği.....	33
Şekil 5.5.	Cheung fonksiyonlarına Ag/Azure C/n-si için $H(I)-I$ ve $dV/d(\ln)$ grafiği.....	34
Şekil 5.6.	Organik boya esaslı güneş piline denk elektriksel devre şeması eğrisi	36

Şekil 5.7.	Güneş Pilinin Akım-Gerilim Grafiği.....	37
Şekil 5.8.	Ag/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülatör altında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.....	38
Şekil 5.9.	Akım gerilim ölçümlerinden elde edilen Ag/n-Si/Al (referans) diyodun 100 mW/cm ² ışık altında fotovoltik parametreleri.....	39
Şekil 5.10.	Ag/Azure A/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülatör altında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.....	40
Şekil 5.11.	Ag/Azure A/n-Si/Al diyodun 100 mW/cm ² ışık yoğunluğu altında fotovoltik parametreleri.....	41
Şekil 5.12.	Ag/AzureC/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülatör altında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.....	42
Şekil 5.13.	Ag/Azure C/n-Si/Al diyodun 100 mW/cm ² ışık yoğunluğu altında fotovoltik parametreleri.....	43

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 5.1.	I-V ve NORDE denklemlerinden parametre değerleri	30
Tablo 5.2.	Cheung metoduna ait parametreler	34
Tablo 5.3.	Ara yüzeyli ve Ara yüzeysiz numunelerin 100mW/cm ² ışık altında fotovoltaj parametreleri.....	44



Ag/AZURE A/n-Si VE Ag/AZURE C/n-Si YAPILARIN FOTOVOLTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Bu çalışmada (100) doğrultusunda büyütülmüş iki yüzeyi parlatılmış n-tipi Si waferin bir yüzeyine omik kontak olarak Al metali buharlaştırıldıktan sonra tavlansarak numune üç parçaya ayrıldı. Referans (Ag/n-Si/Al), Azure A mavisini kullanılıp (Ag/Azure A/n-Si/Al) ve Azure C kullanılarak (Ag/AzureC/n-Si/Al) schottky diyotları elde edilmiştir. Elde edilen Schottky diyotların karanlıkta akım-gerilim (I-V) ölçümleri alındıktan sonra fotovoltaik özellikleri için solar simulator 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında I-V ölçümleri alınmıştır. Karanlıkta yapılan ölçümlerden karakteristik diyot parametreleri olan idealite faktörü ile engel yükseklikleri; referans numune için 1,60-0,81 eV, Ag/Azure A/n-Si numunesi için 1,78- 0,79 eV ve Ag/Azure C/n-Si numunesi için 1,89-0,78 eV olarak sırasıyla elde edilmiştir. Norde fonksiyonları ile Cheung fonksiyonlarından bazı diyot parametreleri hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca 100 mW/cm² ışık yoğunluğu altında fotovoltaik parametreler hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlardan diyotların verimleri düşük olmakla beraber fotovoltaik özellik gösterdiği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: n-tipi Si, organik arayüzey, azure a, schottky kontak.

INVESTIGATION ON PHOTOVOLTAIC AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF Ag/AZURE A/n-Si AND Ag/AZURE C/n-Si STRUCTURES

ABSTRACT

In this work, two-sided polished Si wafer used grown in the direction of (100). Al metal was evaporated as an ohmic contact on one surface, and then annealed to separate the sample into three pieces. Schottky diodes were obtained using reference (Ag / n-Si / Al), Azure A (Ag / Azure A / n-Si / Al) and AzureC (Ag / AzureC / n-Si / Al). Current-voltage measurements were obtained Schottky diodes in the dark and under a light intensity of 100 mW/cm^2 for photovoltaic properties. The ideality factor and the barrier heights were calculated from current-voltage measurements in the dark; 1.81, 0.81 eV for the reference sample, 1.78, 0.79 eV for the Ag/Azure A/n-Si sample and 1.89, 0.78 eV for the Ag/Azure C/n-Si sample respectively. Some diode parameters were obtained from Norde functions and Cheung functions and the results are compared. Photovoltaic parameters were also calculated under a light intensity of 100 mW/cm^2 . From the results it was seen that the diodes show low efficiency and photovoltaic properties.

Keywords: n-type Si, organic interface, azure a, interface, schottky contacts.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, giderek artan enerji talebi ve insanoğlunun bu amaçla yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesi ile birlikte Ar-Ge faaliyetleri ABD, Avrupa Birliği ve Japonya tarafından büyük yoğunlukla desteklenmekte ve teşvik edilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar fosil enerji kaynaklarında gözlenen dışa bağımlılık riskini uzun vadede ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Son yıllar içerisinde ülkemiz de bu doğrultuda enerji ihtiyacının karşılanması konusunda yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji üretimine büyük destek vermektedir.

Bu amaçla özellikle ortaya çıkan güneş enerjisinden elektrik enerjisi üretimi konusunda çalışmalar artmakta ve bu doğrultuda birçok yeni ve farklı türde fotovoltaik pil üretimi ile sonuçlanmıştır.

Elektronik cihazların boyutlarının küçülmesi ile birlikte yarıiletken malzemelerin yüzey ve arayüzey maddelerinin teknoloji ve aygıt uygulamalarında büyük rol oynadığı bilinmektedir. Yapılan birçok deneysel metot ve yöntemler metallerin, yarıiletkenlerin ve yalıtkanların atomik, elektronik ve kimyasal bağ yapısını belirlemek için kullanılmaktadır.

Bu optik ve elektronik özelliklerdeki gelişmeler,1960'lı yıllarda yüzey fiziğinin doğmasına ve başlı başına yeni bir araştırma alanı haline gelmesine yol açmıştır. Geçtiğimiz son 30 yılda yarıiletken yüzey ve ara yüzeylerin ve buna bağlı olarak da kuantum çukurları, kuantum telleri ve kuantum noktaları gibi düşük boyutlu yapıların araştırılmasında çok büyük bir artış meydana gelmiştir (Srivastava 1997).

Bu amaç doğrultusunda yarıiletken malzemeler; üzerine yapılan bazı işlemlerle farklı elektronik ve optik özellikler gösterebilirler. Bu işlemlere örnek olarak farklı koşullar altında büyütme işlemleri ve yeniden yapılanma şekillenimlerini gösterebilirler (Srivastava 2002).

İyi bir yarıiletken olan Silisyum üzerine yapılan çalışmalar ve giderek artan enerji talebi ile güneş pili çalışmalarına yönelmişlerdir. Silisyuma baktığımız zaman; Si elmas yapıda kristalleşir ve en yakın 4 atomla komşu bağ yapar (tetrahedral yapı) bu bağlar kovalent bağ yapısındadır. Si teknolojik açıdan çok önemli bir malzeme olduğundan yarıiletken teknoloji de prototip malzeme durumundadır.

Bu durumdan dolayı deneysel ve teorik çalışmalar da en çok kullanılan malzeme odağı haline gelmiştir. Silisyum yapılar alttaş üzerinde yapay olarak büyütülebilir ya da basit kristalden kesilerek hazırlanabilir. Alttaş da genel olarak (001), (110), (111) doğrultusunda büyütülmüş kristaller kullanılmaktadır.

Yarıiletken doğrultucu kontakların temel teorisi ve tarihi gelişimi;1957 yılında Henisch tarafından “Doğrultucu Yarıiletken Kontaklar” adlı bir kitapta toplandı (Henisch 1984). Schottky metal-yarıiletken kontaklar, elektronik ve optoelektronik alanlarında devamlı kullanılmaktadır. Schottky kontaklar güneş pili, metal-yarıiletken alan etkili transistörler, lazer diyotlar, foto diyotlar, devrelerin anahtarlama hızını artırma, mikro dalga devre elemanları gibi birçok uygulama alanına sahiptir.

Metal-yarıiletken kontakların elektriksel karakteristikleri metal ile yarıiletken arasında kullanılan ara yüzey malzemesinin cinsine bağlı olarak değişmektedir. Metal-yarıiletken kontakların ara yüzey durumları engel yüksekliği, idealite faktörü gibi diyota ait birçok özelliği değiştireceğinden kullanılan malzemenin özellikleri önemlidir (Sze 1981; Rhoderick 1988). Organik yarıiletken malzemelere geleceğin malzemesi gözüyle bakılmaktadır. Bilgi ve teknolojik gelişmelere paralel olarak gelişen elektronüğün temel malzeme taşı olan silisyuma alternatif yeni malzeme arayışları, dikkatleri organik yarıiletken malzemeler üzerinde toplamış durumdadır (Aktaş 2006).

Günümüzde birçok araştırmacı metal yarıiletken yapıların elektriksel özelliklerini değiştirmek için ara yüzey malzemesi olarak organik yarıiletken malzeme kullanımı üzerine çalışmalar yapmaktadır (Yakuphanoglu 2010).

Organik molekülleri, farklı bir organik molekül veya inorganik madde ile başka formülasyonlarda birleştirmek ve böylece çok farklı yapı ve özelliklere sahip elektriksel ve optiksel aygıtlar üretmek mümkündür (Ocak 2010).

Malzemelerin emilimleri, onların optik özelliği olan, dalga boyuna bağlı olarak değişebilen soğurma katsayıları ile sınırlıdır. Ucuz ve çok bulunan amorf silisyum güneş pili çalışmalarında en çok tercih edilen malzemelerden biridir. Fakat güneşin yaydığı elektromanyetik spektrum 300-2200 nm arasında olmasına rağmen amorf silisyum emilimi 300-600 nm arasında değişmektedir. Dolayısıyla, bu malzemenin daha etkin bir emilim sağlaması için değişik teknikler ve alternatif mekanizmalar üzerinde araştırmalar yapılmaktadır (Grandidier et. al. 2011).



2. KAYNAK ÖZETİ

Güneş pilleri; üzerine düşen güneş ışığını doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlardır. Bu aygıtlara fotovoltaik hücreler de denilmektedir. İlk olarak fotovoltaik üzerine yapılan çalışma sonucu 1839 yılında Becquerel tarafından gözlenmiştir. Becquerel, bir elektrolit çözelti içerisindeki elektrot üzerine ışığın düşmesi durumunda bir foto gerilimin oluştuğunu gözlemlemiştir.

1954 yılında Chaplin ve arkadaşları Bell laboratuvarlarında yaptığı ilk güneş pili çalışmalarında Silisyum kullanılmış. Daha sonra yapılan araştırmalarda Silisyum tabanlı güneş pilleri verimliliğinde hızlı bir artış elde edilmiştir. Silisyum çok kolay bulunan hammadde olması ve yüksek verimliliğe sahip olması da çalışmaları artırmıştır. Zararlı etkilerinin olmaması dahası çok az fark edilmeyecek kadar olması kristal formunun kolay elde edilmesi güneş pili çalışmalarında kullanılmasını artırmıştır.

Silisyum üzerine yapılan metal-yarıiletken kontak çalışmaları ilk olarak vakumda yarılmış yüzeyler üzerine uygulanmıştır. Bu türden yüzeyler üzerinde ilk kapsamlı çalışma 1963 yılında yapılmış, 10^{-6} Torr basınçta yarılmış silisyum yüzeyi metal buharlaştırmadan önce birkaç saniye 10^{-4} Torr basınçtaki oksijene maruz bırakıldıktan sonra başka kaynaklardan gelebilecek bulaşmayı önleyecek kadar hızlı şekilde Pt, Pd, Ni, Au, Cu, Ag ve Al metalleri buharlaştırılmış ve engel yükseklikleri kapasite-gerilim ölçümlerinden belirlenmiştir. Pt, Pd, Ni ve Au ile yapılan diyotlarda oksijene maruz kalmanın engel yüksekliği üzerinde önemli bir etkiye sahip olmadığı, ancak Cu, Ag ve Al ile yapılan diyotlarda engel yüksekliğinin 0,1 eV kadar azaldığı bulunmuştur (Archer and Atalla 1963).

Çok yüksek vakumda 10^{-8} Torr yarılmış ve kimyasal metotlarla hazırlanmış silisyum yüzeyleri için, engel yüksekliğinin yüzeyin hazırlanma şartlarına bağlılığını araştırmışlardır. Kapasite-gerilim ölçümlerinden vakumda yarılmış yüzeyler için elde

ettikleri engel yüksekliklerinin Archer ve Atalla'nın sonuçları ile çok iyi uyum içinde olduğunu, Au ve Ni için vakumda yarılmış ve kimyasal temizlenmiş yüzeylerin engel yükseklikleri arasında fark olmadığını, ancak Cu, Ag ve Al için kimyasal temizlenmiş yüzey durumundaki engel yüksekliklerinin daha düşük olduğunu bulmuşlardır. Kimyasal hazırlanmış yüzeyler üzerinde üretilen diyotların engel yüksekliklerinde yaslanma ile yaklaşık 0,2 eV'luk bir değişme olduğunu gözlemişlerdir (Turner and Rhoderick 1968).

Güneş pilleri başlangıçta uzay programlarında kullanılmak üzere geliştirilmiştir. 1970'li yıllardan sonra yaşanan enerji krizinden dolayı alışılmış enerji kaynaklarından alternatif enerji kaynaklarına olan ilgi ve güneşin önemli enerji kaynağı olmasından dolayı, güneş pillerindeki araştırma ve geliştirme çalışmalarına hız verilmiştir. Bu çalışmalarda yapılan temel amaç, daha ekonomik ve daha yüksek verimliliğe sahip güneş pillerinin planlanması olmuştur. Bu çalışmalarda günümüzde büyük hızla devam etmektedir. Yapılan bu çalışmalarda hem ekonomiklik hem de verimlilik yönünden ilerlemeler kaydedilmiştir.

Başlangıçta ilk dönemlerde fotovoltaiik hücrelerin watt maliyetleri 350 dolar civarında iken bu 1966 yılında 100 dolara, 1977 yılında 15 dolara ve günümüzde ise bu miktar giderek küçülerek 3-4 dolara kadar düşmüştür. İlk yapılan güneş pillerinin verimi yaklaşık olarak %1-2 civarında iken günümüzde bu verimlilik %24 civarına kadar dönüşüm verimine sahip güneş pilleri geliştirilmiştir ve geliştirilmektedir.

Hirose ve ekibi, büyütme şartlarına göre kuvartzlarda CVD ile büyütülen Si filmlerin elektriksel özellikleri hakkında sistematik bir araştırma gerçekleştirdiler. Si filmlerinin 280 °C yüksek sıcaklıklar da iletkenliği, büyütme sıcaklığına bağlı olarak gözlenen aktivasyon enerjisi (0,53-0,61eV) gösterir. Daha düşük sıcaklıklarda gözlenen aktivasyon enerjisi, fermi seviyesine yakın, derin tuzaklara doğru artan iletkenliğe bağlanmıştır. Foto iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi, fermi seviyesinin hem altındaki hem üstünde büyütülmüş durumda ki bantların varlığını ortaya çıkarmıştır.

Yine yapılan bir çalışmada Yoshikara ve ekibi 1980 yılında yapmış oldukları çalışmalarında fosfor ve bor atomları eklenmiş olan katmanlarla oluşturulmuş (n-tipi ve p-tipi) çok kristalli Silisyum filmlerin iletkenliği için gerekli aktivasyon enerjisinin doping konsantrasyonu ile ters orantılı olduğunu bulmuştur.

Wu 1980 yılında n ve p-tipi yarıiletken Schottky diyotların yüzey yükünü ve ara yüzeyde düşen gerilimi göz önünde bulundurarak, Cowley ve Sze'nin ara yüzey tabaka teorisini geliştirmiş, sabitleşmiş pozitif yüzey yük artışının potansiyel engelini düşürdüğünü ve ara yüzey tabakasında düşen gerilimde doğru besleme I-V karakteristiklerinden bulunan idealite faktörünü arttırdığını bulmuşlardır.

Forest ve arkadaşları 1981 yılında yapmış olduğu çalışmada ara yüzey maddesi olarak organik malzeme kullanarak (PTCDA), yarıiletken olarak da p-tipi Silisyum kullanarak Schottky kontaklarını hazırlamışlar. Diyotların akım gerilim karakteristiklerinin kontak yapılırken kullanılan metale bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Chattopadhyay and Daw 1986 yılında ideal olmayan Schottky (MIS) diyotların akım-gerilim ve kapasite-gerilim karakteristiklerini inceleyip, engel yüksekliği ile oksit tabakasının kalınlığı arasındaki ilişkinin Cowley ve Sze tarafından 1965 yılında ileri sürülen yüzey halleri ve engel yüksekliği modeline uyduğunu bulmuşlardır.

Tuzak durumu yoğunluğu ve wafer öz direnci büyültme sıcaklığının artmasıyla azalır. Tuzak durumu yoğunluğu, tavlama işlemi azalırken O₂ katkısının artmasıyla artış gösterir. CVD filmlerde iletkenliğin aktivasyon enerjisi, doping konsantrasyonunun artmasıyla beraber azalma gösterir.

Gomila and Rubi 1997 yarıiletken eklem boyunca taşıyıcıların değiş tokuşunu analiz ederek, ara yüzey hal yoğunluğunun belirlenmesi için bir bağıntı elde etmişlerdir. Bu bağıntıya bağlı olarak, idealite faktörü için düz beslem durumunda tüm beslem üzerinde geçerli analitik bir ifade bulmuşlardır.

Yeşilkaya 1998 yılında güneş pillerinin mikro işlemci konum kontrolü tasarımı ve gerçekleştirilmesi ele alınmıştır. Bu amaçla güneş pillerinin Güneş'i izleyerek gün boyu maksimum güç üretimi planlanmış ve buna bağlı elektronik sistem gerçekleştirilmiştir.

Çetinkara 1999 yılında Au/n-Si Schottky diyotlarda, kontakta önce yüzeyde oluşan doğal oksit tabakasının diyot karakteristikleri üzerine etkisini araştırmışlardır. Omik kontakta sonra numuneyi parçalara bölerek, farklı sürelerde temiz oda havasına maruz bırakılmış Schottky diyotlar üretilip, bu diyotların engel yüksekliklerini havaya maruz kalma süresi bakımından karşılaştırmışlardır.

Horman ve ekibinin yapmış olduğu çalışmada; safir üzerine RF sputtering ile büyütülen filmler üzerindeki çalışmaları ile büyütülen filmlerin, öz direncinin Silisyumun beklenen öz direncinden oldukça küçük olduğunu gözlemişler. Ayrıca, iletkenlik tipinin büyütülen filmlerle değişmediğini ve özelliğini koruduğunu, bununla birlikte elektron hareketinin hedef elektron hareketinden küçük olduğunu belirtmiştir.

Wu ve arkadaşları ise; 2003 yılında yapmış oldukları çalışmalarında çoklu bir güneş paneli uygulaması yaparak DC/DC dönüştürücüler ile paralel akımları düzenlemeye çalışmışlardır. Bu şekilde iki adet panel ile maksimum güç noktası izleme (MPPT) ile akım paylaşım analizini gerçekleştirmişlerdir.

Akkılıç ise 2003 yılında ara yüzey tabakalı ve ara yüzey tabakasız Sn/n-Si Schottky diyot yapılarının I-V karakteristiklerini incelemiştir. İdealite faktörünün uygulanan gerilimle ve etkin engel yüksekliğinin de idealite faktörüyle değişimini teorik ve deneysel olarak araştırmıştır.

Vural ve arkadaşları 2007 yılında ara yüzey maddesi olarak organik malzeme kullanarak çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında Al ile n-GaAs arasına Rhodamine-101 organik malzeme ile yine Cu ile n-GaAs arasına Rhodamine-101 organik malzeme koyarak iki numunenin sonuçlarını karşılaştırmıştır. Almış olduğu sonuçlarda ara yüzey organik yarı iletken malzemenin konulmasının diyotun özelliklerini modifiye ettiği şeklinde belirterek açıklamıştır.

Orak ve arkadaşları 2012 yılında yapmış oldukları çalışmada Silisyum tabanlı organik-inorganik diyotların elektriksel karakterizasyonu incelemiş ve p-Si ve n-Si alt taşlar üzerine organik/inorganik (CuPc, C60, ZnO, CdO) yarıiletken filmleri üretmiş. Diyotların idealite faktörleri yarı-logaritmik I-V grafiklerinden elde etmişlerdir. Grafiğin doğru besleminin lineer bölgesinden eğim alınarak hesaplanan idealite faktörü değerlerinin hepsi 1'den büyük çıkmıştır. Tüm diyotların sıcaklığa bağlı I-V karakterizasyonları yapılmış. Sıcaklık artışıyla birlikte diyotların idealite faktörü değerlerinin düştüğü görülmüştür (Orak 2012).

Aynı zamanda, Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotların elektriksel karakterizasyonu sıcaklığa bağlı olarak ayrıntılı bir şekilde yapılmış. Bu Schottky diyot numunelerinin, hazırlanmasında (100) doğrultuda büyütülmüş, yaklaşık olarak 500 µm kalınlığında ve 1-

20-cm özdirence sahip Tellür katkılı n-tipi GaAs kristali kullanılmış. Hazırlanan bu Ag/PDI/n-GaAs organik ara yüzeyli Schottky diyotların, akım-gerilim (I-V) karakteristikleri 75–350 K aralığında ve sığa-gerilim (C-V) karakteristikleri ise oda sıcaklığında ve 1 Mhz frekansta incelendi. Burada Ag/PDI/n-GaAs Schottky diyotunun artan sıcaklıkla daha iyi bir doğrultucu özellik gösterdiği görülmüştür. Böylece akımın, sıcaklıkla üstel olarak arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca I-V karakteristiklerinden hesaplanan idealite faktörü değerleri sıcaklık artışıyla 1'e yaklaşmakta olup yaklaşık ideal diyot davranışı göstermektedir (Boy 2013).

Güneş pilleri, hem bulk(hacimli) hemde ince film şeklinde büyütülmüş yarı iletken malzemelerden yapılabilmektedir. Bizde yapmış olduğumuz bu tez çalışmasında Si tabanlı ara yüzey olarak organik malzeme kullanarak (Azure A ve C) ve kullanılmayarak oluşturduğumuz diyotların akım-gerilim karakteristiklerine bakarak elde edilen grafiklere bağlı olarak güneş pili özelliğini incelemiştir.

Bu çalışmada (110) doğrultusunda büyütülmüş p-tipi silisyum üzerine Azure-A organik malzemesi kullanılarak elde edilen ara yüzeyli schottky diyotlar ve ara yüzey malzemesi kullanmadan elde edilen diyotların karanlık ve solar simülatör altında I-V ölçümleri alınarak engel yüksekliği, idealite faktörü ve fotovoltaik parametreleri hesaplanmıştır.

3. KURAMSAL TEMELLER

3.1. Metal Yarıiletken Kontaklar

Metal ve yarıiletken maddelerin iletkenlik özelliklerinin incelenmesi, bu malzemelere uygun kontakların yapılması ile mümkündür (Buget ve Wright 1967). Kontak yapı dediğimiz genel anlamda iki maddenin dirençle ideal durumda sifıra yakın durumda birbirine temas etmesi şeklinde oluşur. Temas eden yüzeylerin, pürüzsüz ve parlak olması ile ideal bir kontak elde edilir (Card ve Rhoderick, 1971; Chattopadhyay and Daw,1986; Rhoderickand Williams, 1988;Horvath 1988).

Shottky diyotların genel yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için iletken ve yarıiletkenin iletkenlik özellikleri iyi bilinmelidir. Yarıiletken kristal ile kontak yapılacak olan malzeme birbirine en az dirençle temas ettirilmelidir. İyi bir kontak yapı oluşturabilmek için kontak yapılacak malzemelerin yüzeyleri pürüzsüz ve temiz olmalıdır. Metal ve yarıiletken maddeler kontak bir yapı oluşturduğunda her iki maddeden birbirine doğru yük akışı meydana gelir ve bu yük akışı her iki maddenin fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder (Ziel 1968).

Bir metal ile bir yarıiletken arasında kontak yapılırsa, doğrultucu (Shottky) ve doğrultucu olmayan (omik) olmak üzere iki gruba ayrılır. Kontak yapının doğrultucu veya omik olması metal ve yarıiletken malzemenin iş fonksiyonuna bağlıdır.

Bu yüzden iş fonksiyonu, E_{Fm} enerjisine sahip (metal Fermi seviyesi) bir elektronu metalden uzaklaştırmak için elektrona verilmesi gereken enerji olarak tanımlanabilir. Benzer şekilde yarıiletkenin iş fonksiyonu bir elektronu yerleştiği E_{Fsc} fermi seviyesinden uzaklaştırmak için gerekli enerji olarak tanımlanabilir.

Φ_m (metal Fermi iş fonksiyonu) Φ_s (yarıiletkenin iş fonksiyonu) olmak üzere;

Metal- n tipi yarıiletken kontak yapılarında;

$\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu (Schottky) kontak

$\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu olmayan (omik) kontak oluşur.

Metal-p tipi yarıiletken kontak yapılarında

$\Phi_m > \Phi_s$ ise doğrultucu olmayan (omik) kontak,

$\Phi_m < \Phi_s$ ise doğrultucu (Schottky) kontak oluşur (Li 2006).

3.1.1. Metal-n-tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Metal n-tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_{mm} > \Phi_{ms}$ şeklinde oluşan kontaklar Schottky doğrultucu kontaklardır. Oda sıcaklığında alıcıların hepsi iyonize olmuş durumdadırlar. Kontakta önce, Şekil 3.1. a' da görüldüğü üzere yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar aşağıdadır.

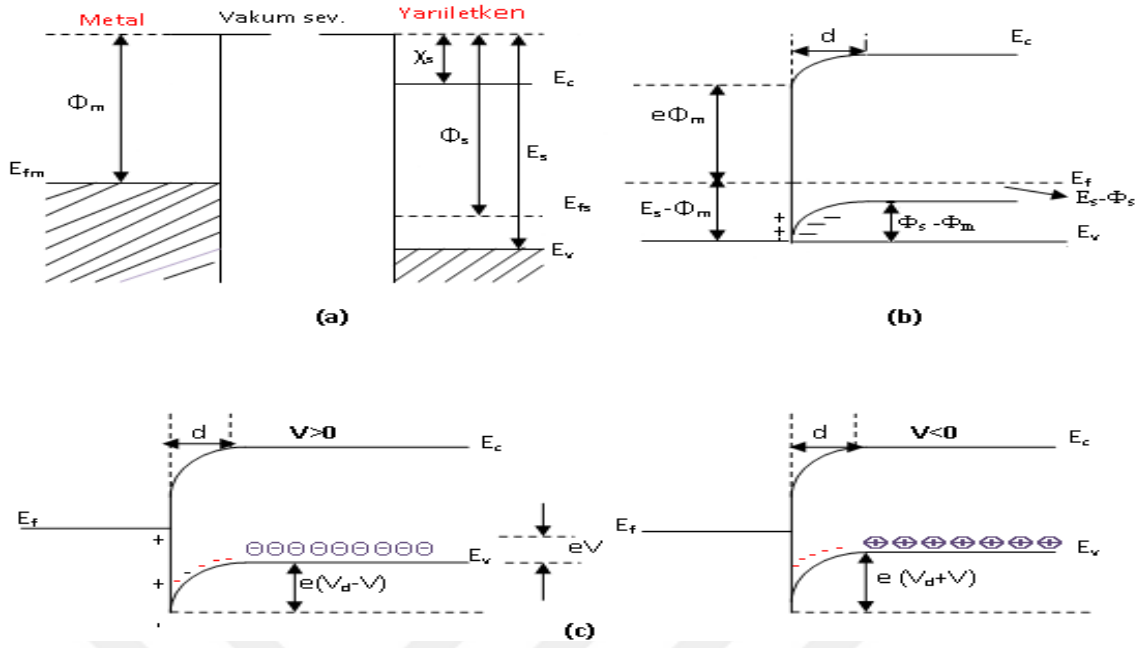
Kontaktın sonra her iki maddenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar metalden yarıiletkene doğru elektron akışı olur. Bunun sonucu olarak, yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler d kalınlığında bir uzay yükü tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (3.1)$$

olur. V_d difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontakın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E - e\Phi_m \quad (3.2)$$

ile verilir.



Şekil 3.1. Metal n-tipi yarıiletken Schottky kontağın enerji-bant diyagramı a) kontakdan önce, b) kontakdan sonra termal denge durumunda c) doğru beslem durumu, d) ters beslem durumu (Rhoderick ve Williams, 1988)

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşabilecek kadar enerji kazanarak metalin içine geçebilirler. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı elektronlar da engeli aşabilecek kadar enerji kazanarak, yarıiletkenin içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen eşit ve zıt yönlü I_0 akımı oluşur.

Yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa Şekil 3.1.b'de görüldüğü üzere, soldan sağa akan hol akımı değişmez. Fakat yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşeceğinden yarıiletkenden metale geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır.

Bunun sonucu olarak sağdan sola doğru akan akım $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar azalır. Sağdan sola doğru olan akım pozitif kabul edilirse bu durumda karakteristik akım,

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

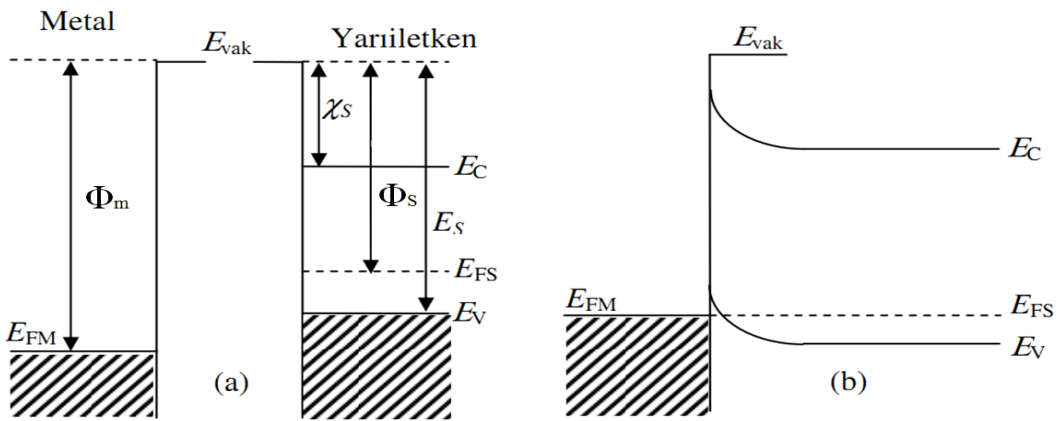
olacaktır. Burada I_0 doyma akımıdır. Bu bir doğrultucu kontak durumudur.

3.1.2. Metal n-Tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

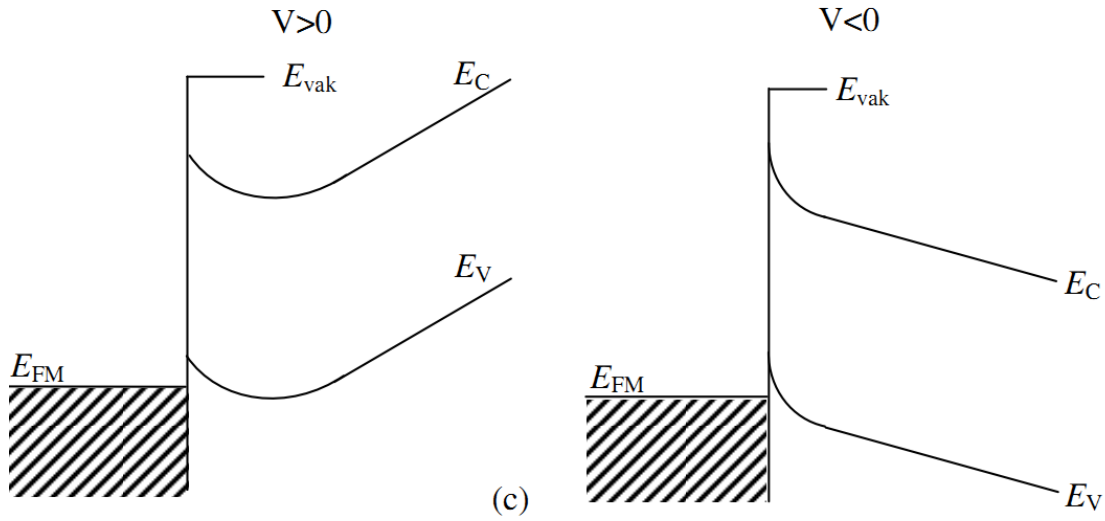
Omik kontak, uygulanan gerilimin polaritesinden bağımsız olarak her iki yönde de akım akışına minimum direnç gösteren bir metal yarıiletken eklemidir (Brillson 1993, Neamen1992).

$\Phi_m > \Phi_s$ (metalın iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük olduğu) durumu inceleyelim. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere, yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra bir yük alışverişi meydana gelecektir. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak metal tarafına akarlar ve metal tarafından bir negatif yüzey yükü oluştururlar. Bundan dolayı yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.2’de görüldüğü üzere $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer.

Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p-tipi olur. Bir V voltajı uygulandığında, bu potansiyel farkı tüm yarı iletken bölge boyunca dağılır. $\Phi_m - \chi_s$ nispeten elektronlar zorlukla karşılaşmadan engeli geçebilirler. Doğru beslem durumunda, elektronlar metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca hareket edebilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarı iletken metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan elektronlar da kolay bir şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Bu durum omik kontaktaır.



Şekil 3.2. Metal n-tipi yarıiletken omik kontakın enerji-bant diyagramı a) Kontakta önce b) Kontakta sonra ve termal dengede



Şekil 3.3. Metal n-tipi yarıiletken omik kontağın enerji-bant diyagramı $V \neq 0$ olması durumunda

Bir metalin iş fonksiyonu Φ_m , bir elektronun Fermi seviyesinden metalin yüzeyi dışındaki (vakum seviyesi) durgun bir hale uyarılması için gerekli olan enerji miktarıdır. İş fonksiyonu kuantum mekaniği kullanılarak hesaplandığında, iki parçadan oluştuğu bulunur. Bu iki parçayı aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

- Kristalin periyodik potansiyeli ve elektronun diğer elektronlarla etkileşiminden doğan ve elektronun enerjisini temsil eden hacim katkısı;
- Yüzeydeki dipol tabakasının varlığından kaynaklanan yüzey katkısıdır.

Genelde metal yüzeyindeki atomların çevresinde elektron yük dağılımı çekirdeğe nazaran simetrik olarak yerleşmez. Bu yüzden, pozitif ve negatif yükün merkezleri çakışık değildir ve bir dipol tabakası oluşturur. Benzer şekilde yine, bir yüzeye bağlantılı durumla ya da yeniden oluşma da bir dipol tabakasına sebep olabilir. Eğer oluşan dipol tabakası birim alan başına bir ρ elektriksel dipol yer değiştirmesine sahipse, vakum ile metalin iç kısmı arasında ρ/ϵ_0 büyüklüğünde bir elektrostatik potansiyel farkı olacaktır. Elektrostatik potansiyeldeki bu değişmeden dolayı, bir elektronun $\theta\rho/\epsilon_0$ enerjisindeki değişim iş fonksiyonunun bir parçasını oluşturur. Elektron yük dağılımındaki herhangi bir düzenleme yüzey dipol tabakasında ve bu dolayısıyla iş fonksiyonunda bir değişime sebep olacaktır. Aynı kristalin farklı kristalografik yüzleri de farklı büyüklüklerde yüzey dipollerinden dolayı farklı Φ_m değerlerine sahip olabilirler.

Bir yarıiletkenin iş fonksiyonu Φ_s fermi seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkıdır ve aynı zamanda gövde ve yüzey katkılarından müteşekkildir. Genellikle, yarıiletkende Fermi seviyesinde müsaağeli enerji halleri yoktur ancak iş fonksiyonu bir elektronu valans ve iletkenlik bandından uyararak için gerekli enerjilerin ağırlıklı ortalamasını temsil eden istatıksel bir kavramdır.

Bir yarıiletken için diğer önemli bir yüzey parametresi elektron ilgisidir. (χ) Yüzey dışında, durgun haldeki bir elektronun enerjisi ile yüzeyin hemen içinde iletkenlik bandı tabanındaki bir elektronun enerjisi arasındaki fark olarak bilinir. Elektron ilgisi iş fonksiyonuna benzer şekilde yüzey dipollerine karşı hassastır. Eğer bantlar düz ise, yani yarıiletken içinde hiç elektrik alanı yoksa, iş fonksiyonu ve elektron ilgisi birbirine

$$\Phi = \chi + \xi \quad (3.4)$$

bağıntısı ile birbirine bağlıdır. Burada ξ Fermi enerjisi ile iletkenlik bandı tabanı arasındaki enerji farkı χ_s ise; yarıiletkenin elektron ilgisidir. Sonuç olarak bir elektronu valans bandından uzaklaştırmak için ihtiyaç duyulan minimum iyonlaşma enerjisi;

$$I = \chi_s + E_g \quad (3.5)$$

bağıntısı ile verilir (Rhoderick ve Williams, 1988).

3.2. Schottky Engel Yapısının Oluşumu

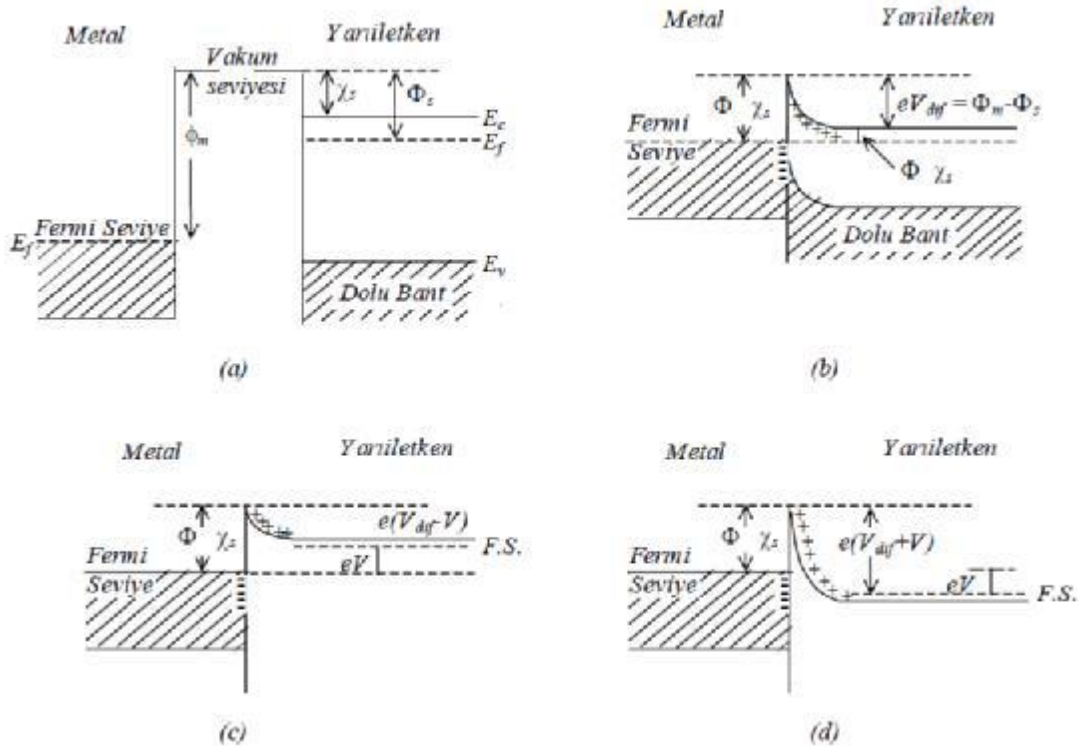
Bir metalle bir yarıiletken kontak hale getirildiklerinde, oluşan yapı da iki durum gözlenir.

- 1) Metalin yarıiletkenle aralarında hiçbir engel olmadan temasta olduğu ideal durum (Schottky –Mott teorisi)
- 2) Metal ile yarıiletken arasında ince bir yalıtkan tabakanın olduğu gerçek durum (Bardeen teorisi)

3.2.1. Schottky-Mott Teorisi

Schottky engelinin oluşumunu anlamak için metal ile yarıiletkenin başlangıçta elektriksel olarak nötr ve birbirinden ayrı olduğunu kabul edelim. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 görüldüğü üzere metalinkinden daha küçük bir iş fonksiyonuna sahip n-tipi bir yarıiletkenin band diyagramı verilmektedir. Eğer metal ile yarıiletken bir tel ile kontak haline getirilirse elektronlar yarıiletkenden metale geçer ve Fermi seviyeleri Şekil 3.4'de gösterildiği gibi aynı düzeye gelmeye zorlanır.

İki katının yüzeylerinin dışında durgun haldeki elektronların enerjileri artık aynı değildir. İki malzeme arasında sağdan sola doğru yönelmiş olan bir elektrik alan mevcuttur. Metalin yüzeyinde yarı iletkendeki pozitif yük tarafından dengelenen negatif bir yük vardır. Bu yüzey yükü basitçe Thomas-Fermi perdeleme uzaklığı yaklaşık olarak 0.5 \AA^0 içerisinde bulunan ekstra iletkenlik



Şekil 3.4. Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontağın; a) (—) beslem olmayan b) ($V = 0$) c) Ters beslem uygulanmış d) ($V = -V$) durumlardaki enerji bant diyagramlarını göstermektedir (Rhoderick ve Williams, 1988).

elektronlarından ibarettir. Yarıiletken n-tipi olduğu için, pozitif yük, yüzeyden uzaklaşarak elektronlardan arınmış bir bölgede kompanse olmamış pozitif donor iyonlarını geride bırakan, iletkenlik elektronları tarafından sağlanacaktır. Donor konsantrasyonu metaldeki elektronların konsantrasyonundan mertebeye çok daha düşük olduğundan telafi edilmemiş donörler d kalınlıklı bir tabakayı işgal ederler. Bu tabakanın genişliği bir p-n eklemesindeki arınma bölgesinin genişliği ile kıyaslanabilir düzeydedir ve bu durumda yarıiletkendeki bantlar şekildeki gibidir. Metal ve yarı iletkenin dış yüzeyindeki elektrostatik potansiyeller arasındaki V_i farkı $V_i = \delta E$ ile verilir. δ burada metal ile yarıiletken arasındaki ayırım ve E_i aradaki elektrik alandır. Eğer metal ile yarıiletken birbirine yaklaşır ve E_i sonlu bir değer alırsa, V_i sifıra gider ve sonunda metal ile yarıiletken birbirine temas ettiğinde, aradaki vakum tabakası kalktığı için, ideal bir metal yarıiletken kontak elde edilir. V_i sifıra gideceğinden, Fermi seviyesine göre ölçülen engel yüksekliği;

$$\Phi_{bn} = \Phi_m - \chi_s \quad (3.6)$$

formülü ile verilir. Pek çok metal-yarıiletken kontak uygulamasında, genellikle yarıiletkenin ara yüzeyinde 10-20 Å kalınlığında ince bir yalıtkan oksit tabaka mevcut olduğu için, Şekil 3.4'de gösterildiği üzere ideal duruma asla ulaşamaz. Böyle bir yalıtkan film sık sık ara yüzey tabakası olarak adlandırılır. Gerçek bir kontak bu yüzden farklıdır. Ancak, oksit tabakası ince olduğu için elektronlar kolayca tünelleme yapabilirler. Ayrıca oksit tabakasındaki V_i potansiyel düşmesi küçük olduğu için, bu tabakanın varlığına rağmen denklemi hala geçerlidir.

Genellikle Schottky'e atfedilmesine rağmen denklem ilk olarak 1938 yılında Mott tarafından kapalı olarak ifade edilmiştir. Bu bağıntı bundan dolayı Schottky-Mott sınırı olarak göz önüne alınır. Bu bağıntı ile aşağıdaki 3 durum elde edilmiştir.

- Metal ile yarıiletken kontak haline getirildiğinde Φ_m ve χ_s 'ye yüzey dipol katkıları değişmez.
- Yarıiletkenin yüzeyinde lokalize haller yoktur.
- Metal ile yarıiletken arasında mükemmel kontak durumu vardır.

Metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engelinin şekli arınma bölgesindeki yük dağılımına bağlıdır. Eğer iletkenlik bandı tabanı gövdedeki ilk pozisyondan $3kT/q$ kadar yükselirse elektron yoğunluğu bir mertebe düşer ve bu düzlem ile metal ile yarıiletken ara yüzeyi arasındaki uzay yükü tamamıyla kompanse edilmemiş donörlerden kaynaklanır. Elektron yoğunluğunun bir mertebeden daha az olmadığı (deplasyon yaklaşımı) geçiş bölgesinde bantların bükülmesine ihmal edersek, engelin şekli tümüyle donörlerin uzaysal dağılımı ile belirlenecektir.

Schottky (1938) tarafından ilk olarak ileri sürülen, Schottky ve Spenke (1939) tarafından detaylandırılan modelde, yarıiletken metal sınırına kadar tam olarak homojen kabul edilir. Böylece, kompanse edilmemiş donörler arınma bölgesinde düzgün bir uzay yüküne sahip olurlar ve elektrik alan şiddeti Gauss teoremine uygun olarak arınma bölgesi sınırından uzaklıkla doğrusal olarak artarken, elektrostatik potansiyel Şekil 3.4'de görüldüğü üzere karesel artar. Bu şekilde görülen parabolik engel Schottky engeli olarak bilinir.

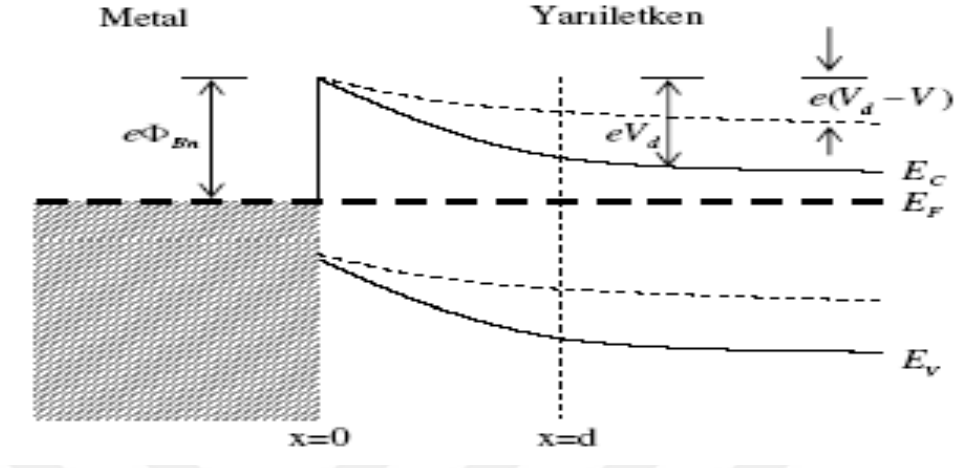
3.2.3. Schottky Diyotlarda Akım İletimi ve Termiyonik Emisyon Teorisi

Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeni ile taşıyıcıların salınması olayı termiyonik emisyon teorisi olarak bilinmektedir. Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termiyonik alan emisyon teorisi ile açıklanmaktadır.

Metal yarıiletken Schottky kontaklarda termiyonik emisyon teorisi taşıyıcıların termal enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarı iletkene geçmesidir. Schottky kontaklarda akım çoğunluk taşıyıcılar tarafından sağlanır (Ziel 1968, Rhoderick and Williams 1988). Metal n-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal p-tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise boşluklar akımı sağlar.

Termiyonik emisyon teorisi oluşturulurken Maxwell-boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için Schottky kontağa ait potansiyel engelinin, kT enerjisinden daha büyük olduğu ve Schottky bölgesindeki taşıyıcı çarpışmalarının çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Bu teoriye göre, eğer elektronların salınacağı yüzey katod olarak kullanılır ve bütün yayılan elektronlar bir araya toplanırsa, katodun verdiği akıma doyma akımı, yayılan elektronların akım yoğunluğuna da doyma akım yoğunluğu adı verilmektedir. Şekil

3.5’de görüldüğü üzere V_a büyüklüğünde doğru beslem gerilimi uygulanmış Schottky kontak görülmektedir.



Şekil 3.1 Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu kontakın enerji bant diyagramı: (—) beslem olmayan ($V = 0$) ve ters beslem uygulanmış ($V = -V$) durumlardaki bantları

Bilinmesi gereken metalden yarıiletkene doğru akan akım yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$, ve $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğudur. $J_{s \rightarrow m}$ akım yoğunluğu x yönünde ve engeli aşabilecek büyüklükte hızlara sahi elektronların konsantrasyonunun bir fonksiyonudur. Kontak yüzeyini x -eksenine dik kabul ettiğimizde, taşıyıcı hızları V_x ile $V_x + dV_x$ arasında olan yüzey birimi başına elektron yoğunluğu,

$$dn = N_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp \left(-\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \quad (3.7)$$

eşitliği ile verilir. Burada N_d donör yoğunluğu, m_n^* elektronun etkin kütlesi, k Boltzman sabiti ve T mutlak sıcaklıktır.

Akım yoğunluğu için,

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (3.8)$$

ifadesi yazılabilir. Burada dn yerine yukarıdaki değeri yazılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \int_{V_{0x}}^{\infty} V_x \exp\left(-\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) dV_x \quad (3.9)$$

denkleminde

$$J_{s \rightarrow m} = eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{m_n^* V_x^2}{2kT} \right) \quad (3.10)$$

elde edilir.

$$\frac{1}{2} m_n^* V_x^2 \geq eV_d \quad (3.11)$$

olduğu göz önüne alındığı takdirde yarıiletken metale akım yoğunluğu ifadesi ;

$$J_{s \rightarrow m} = eN_d \left(\frac{m_n^*}{2\pi kT} \right)^{1/2} \exp\left(-\frac{eV_d}{kT} \right) \quad (3.12)$$

şeklinde olacaktır.

Burada (3.11) ifadesinde $V_{0x} = \left(\frac{2eV_d}{m_n^*} \right)^{1/2}$ elektronun eV_d engelini aşması için gerekli limit hızdır. İletkenlik bandı tabanı sıfır enerji seviyesi olarak alınırsa, donör yoğunluğu,

$$N_d = N_c \exp\left(-\frac{E_F}{kT} \right) = 2 \left(\frac{2\pi m_n^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_F}{kT} \right) \quad (3.13)$$

eşitliği ile verilir. Bu ifade (3.13) deki eşitlikte yerine yazılırsa akım yoğunluğu;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(-\frac{eV_d + E_F}{kT} \right) \quad (3.14)$$

şeklinde elde edilir. Metal tarafındaki potansiyel engelinin yüksekliği olur. Şekil 3.5'de görüldüğü üzere ;

$$e\Phi_{bn} = eV_d + E_F$$

şeklinde ki ifadeyi yukarıda denklemde yerine yazılırsa;

$$J_{s \rightarrow m} = \left(\frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \right) T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \quad (3.15)$$

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.16)$$

şeklinde olacaktır. Bu ifademiz de A^* Richardson sabiti olup

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

şeklinde ifade edilmektedir.

Metal/n-tipi yarıiletken Schottky diyodu düz beslem altındayken (omik tarafa-V uygulanırsa), engel yüksekliği azalır, bu nedenle diyot akımı uygulanan gerilime bağlı $\exp(eV/kT)$ çarpanı katarak artar. Böylece akım yoğunluğu denklemi;

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \left[\exp\left(\frac{eV}{kT} \right) \right] \quad (3.17)$$

şeklinde yazılabilir.

Sıfır beslem ($V=0$) durumunda, metalden yarıiletkene doğru olan akım yoğunluğu, yarıiletkenden metale doğru olan doyma akım yoğunluğuna (J_0) eşit olur. Sonuç olarak, toplam net akım yoğunluğu;

$$J = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT} \right) \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (3.18)$$

J_0 =doyma akım yoğunluğu olmak üzere;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{bn}}{kT}\right) \quad (3.19)$$

ifadesi ile verilir. Böylece bu durumda geçen akım yoğunluğunu;

$$J = J_0 \left[\exp\left(\frac{eV_a}{kT}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

ifadesine dönüşür.

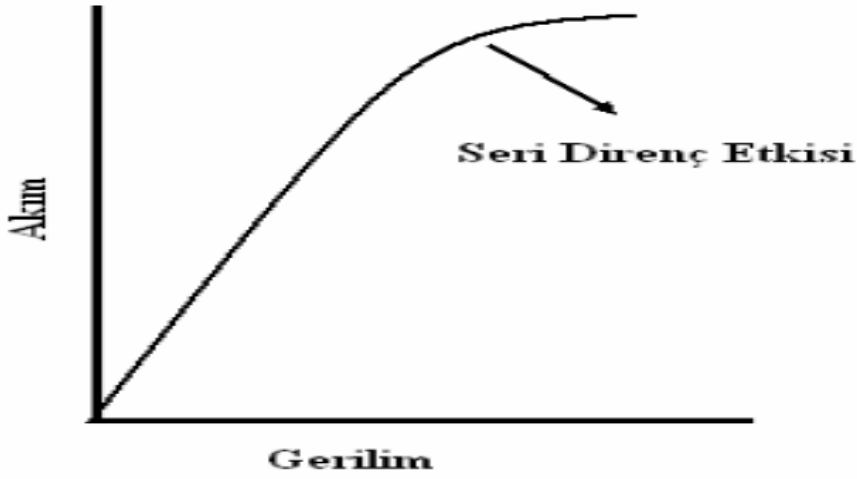
Φ_{bn} Schottky engel yüksekliğinin imaj kuvveti nedeniyle azaldığı ve $\Phi_{bn} = \Phi_{b0} - \Delta\Phi_{b0}$ şeklinde verildiği dikkate alınarak (3.19) denklemi yeniden düzenlenirse ;

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_{b0}}{kT}\right) \exp\left(\frac{e\Delta\Phi}{kT}\right) \quad (3.21)$$

olur. Böyle durumda engel yüksekliğindeki değişim $\Delta\Phi$ değişimi; artan elektrik alanla yada artan ters beslem gerilimiyle artacaktır.

3.2.4. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi

Metal-yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan tükenim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği dirence seri direnç denir ve R_s ile gösterilir. Bu etki, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının düşmesine neden olur. Şekil 3.6 görüldüğü üzere bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direncin etkisi ile meydana gelen diyot akımındaki azalmayı göstermektedir (Sze 2007).



Şekil 3.6. Seri direncin akım gerilim karakteristiğine etkisi

Metal-yarıiletken yapıların düz besleme I-V karakteristiklerinin yardımı ile Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında Cheung tarafından bir metot sunulmuştur. Termiyonik emisyon teorisi dikkate alındığında bir diyottan geçen akımın denklemi ;

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (3.22)$$

formülü olarak yazılır. Seri direnç etkisi dikkate alındığında uygulanan potansiyelin IR_s kadarlık gerilimi nötral bölge üzerine düşüreceği göz önüne alınırsa $(V-IR_s)$ olarak yazılır ve denklem ;

$$I = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_b}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (3.23)$$

halini alır. Son eşitlik kullanılarak potansiyel fark ;

$$V = \frac{nkT}{q} \ln\left(\frac{I}{AA^* T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (3.24)$$

olarak elde edilir. Denklem 3.24'in lnI'ya göre türevi alındığında;

$$\frac{dV}{d\ln I} = \frac{nkT}{q} + IR_s \quad (3.25)$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre $dV/d\ln(I)$ 'in I göre grafiği bir doğru verecektir ve bu doğrunun eğimi seri direnç değerini verecektir. Bu doğrunun $dV/d\ln(I)$ eksenini kestiği noktadan idealite faktörü değeri hesaplanabilir. Engel yüksekliğini bulmak için;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{q}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (3.26)$$

şeklinde bir $H(I)$ fonksiyonu tanımlanmıştır. 3.25 ve 3.26 eşitlikleri kullanılarak ;

$$H(I) = n\Phi_\beta + IR_s \quad (3.27)$$

yazılabilir. (3.25) eşitliği kullanılarak $H(I)$ - I grafiği çizildiğinde yine bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi, seri direnci verecektir. Bu doğrunun $H(I)$ eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği hesaplanabilir (Ocak 2010).

3.2.5. Norde Modeline Göre Akım-Gerilim Eğrisinin Özellikleri

Norde metodu, seri direnç çok büyük olduğunda arayüzey düzensizliklerinden bağımsız olarak ideal diyotlar için Φ_B 'nin tespit edilebilmesi için standart metotta yapılan bir ilerlemedir. Akım yoğunluğu ifadesi;

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_d}{kT}\right) \right] \quad (3.28)$$

şekline yeniden yazılabilir. (3.27) ifadesinde $\ln I$ 'nın V 'ye karşı grafiği ($e\Phi_B$) engel yüksekliğinin tayini için farklı bir imkan sağlar. Bu durum yarıiletken diyotta bir seri dirence neden olur. Akım voltaj karakteristiği, $kT/e \ll V \ll IR$ aralığındaki gerilimler için doğru şekilde iken, R çok büyük ise doğru kısım oldukça dar olur. Bu seri direnç etkisini ortadan kaldırmak için $F(V)$ fonksiyonu kullanılır. $F(V)$ fonksiyonu ;

$$F(V) = \frac{V}{2} - \frac{1}{\beta} \ln\left(\frac{1}{AA^*T^2}\right) \quad (3.29)$$

ile verilmektedir. Burada A diyodun alanı, A^* modifiye edilmiş Richardson sabitidir. Eğer $F(V)$ 'nin değişimine karşılık hiçbir seri direnç yoksa $F(V)$ 'ye karşılık $V=-1/2$ 'dir ve eğrinin extrapole edilerek $F(V)$ eksenini kestiği nokta direkt olarak Schottky engel yüksekliğini verir. Eğer yalnızca bir seri direnç varsa, fonksiyon asimptotik olarak $+1/2$ 'nin bir gradiyentine eşit olur. Her iki durumda da V_0 voltaj değerinde bir minimum vardır.

$$I = I_s e^{\beta V/n} \quad (3.30)$$

$$\Phi_B = F(V_0) + \frac{V_0}{2} - \frac{1}{\beta} \quad (3.31)$$

Seri direnç değeri ;

$$R = (\beta I_0)^{-1} \quad (3.32)$$

Burada I_0 , V_0 doğru beslem değerindeki akım değeridir.

Engel yüksekliği eğer seri direnç çok küçükse extrapole edilmiş eğrinin $F(V)$ eksenini kestiği noktadan ya da eğer seri direnç çok büyükse minimum $F(V)$ 'deki pozisyonundan bulunabilir.

Buna ek olarak Φ_B 'nin voltaj bağımlılığı ya da iletim mekanizması termiyonik emisyonadaki gibi hesaba katılmaz. ($N_d < 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) hafifçe dop edilmiş diyotlarda termiyonik alan emisyon eğrisinin ihmal edilmesine sık sık rastlanır. Bunun nedeni büyük ölçüde geniş engellerin tünelleme ihtimalini oda sıcaklığında tünelleme mekanizmasının güvenli bir şekilde ihmal edilebileceği bir seviyeye düşürmesidir.

3.2.6. Cheung-Cheung Metodu

Seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü gibi diyot parametrelerinin bulunabilmesi için birkaç yöntem vardır. Bunlardan biri Cheung tarafından türetilen Cheung fonksiyonlarıdır. Cheung fonksiyonları ;

$$\frac{dV}{d \ln I} = n \frac{kT}{q} + IR_2 \quad (3.33)$$

$$H(I) = V - n \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I_0}{AA^* T^2} \right) \quad (3.34)$$

Potansiyel engel yüksekliğini bulmak için aşağıdaki gibi bir eşitlik yazılır.

$$H(I) = IR_s + n\Phi_b \quad (3.35)$$

Denklem (3.33)'de $dV/d\ln(I)$ -I grafiği çizildiğinde elde edilen doğrunun eğimi seri direnci (R_s) verir.

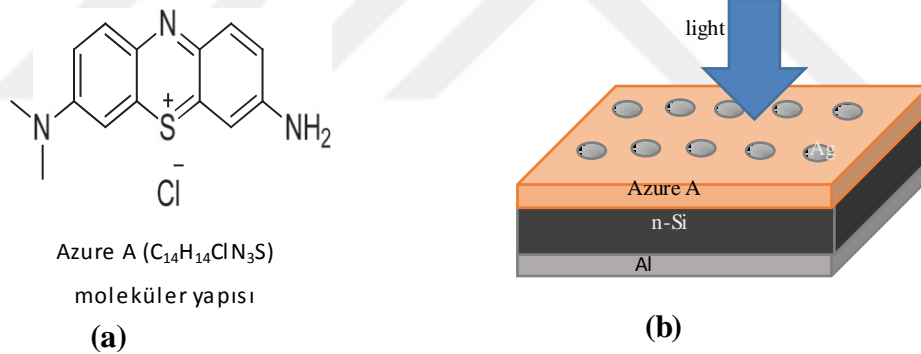
$I=0$ 'a karşılık düşey eksenin kestiği noktanın değerinin kT/q 'ya oranı ise idealite faktörünü verir.

Aynı şekilde (3.33) denkleminde $H(I)$ -I grafiği çizilerek elde edilen doğrunun eğimi (R_s) değerini, $I=0$ 'a karşılık düşey eksenin kestiği nokta ise engel yüksekliğini $n\Phi_b$ değerini verir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Numunenin Temizlenmesi ve Elde Edilmesi

Bu çalışmada; 400 µm kalınlıkta, [100] doğrultusunda büyütülmüş, donör konsantrasyonu $2,5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ olan ve iki yüzü parlatılmış n-Si kristalleri kullanılarak bir yüzeyine omik kontak olarak Al metali buharlaştırıldıktan sonra tavlamanarak numune üç parçaya ayrıldı. Referans (Ag/n-Si/Al), Azure A mavisi kullanılıp (Ag/Azure A/n-Si/Al) ve Azure C kullanılarak (Ag/Azure C/n-Si/Al) şeklinde üç adet schottky diyot elde edildi. Organik ara yüzey malzemesi kullanılarak elde edilen Ag/Azure A/n-Si/Al yarıiletken Schottky diyodun şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmektedir.



Şekil 4.1. a) Azure A moleküler yapısı b) Ag/Azure A/n-Si/Al Schottkydiyodun şematik gösterimi (kalınlıklar orantılı değildir)

Numunenin her iki yüzünün parlatılmış olmasından dolayı, yüzeylerde herhangi bir mekanik temizlemeye ihtiyaç duyulmadı. Kristal üzerindeki organik ve anorganik kirlilikleri temizlemek ve yüzeyde olması muhtemel pürüzleri gidermek için basamakları aşağıda verilen kimyasal temizleme basamakları izlendi:

- Aseton’de ultrasonik olarak 10 dakika yıkama,
- Metanol’de ultrasonik olarak 10 dakika yıkama,
- Deiyonize su ile yıkama,

- d) RCA1 (H₂O: H₂O₂: NH₃; 6:1:1) içinde 50–60 °C’de 10 dakika yıkama,
- e) Seyreltilmiş HF (H₂O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- f) RCA2 (H₂O: H₂O₂: NH₃; 6:1:1) içinde 50–60 C’de 10 dakika yıkama,
- g) Deiyonize su ile yıkama,
- h) Seyreltilmiş HF (H₂O: HF; 10:1) çözeltisinde 30 sn yıkama,
- i) Akan de-iyonize su içerisinde 15–20 dakika bekletme,
- j) Azot gazı (N₂) ile kurutma.

Ayrıca omik kontak için kullanılacak alüminyum buharlaştırma öncesi metanol’de 5 dk ultrasonik olarak yıkandı. Temizleme işleminden sonra Si numuneler omik kontak oluşturmak üzere vakum cihazına konuldu ve 10⁻⁵ torr basınçta Si waferin bir yüzeyine termal olarak buharlaştırıldı. Vakum ortamından alınan numune kontakların homojen olması ve yarıiletkenin içine nüfuz etmesi için buharlaştırma işleminden sonra numune N₂ ortamında 570 °C’de 3 dakika tavlama fırınında tavlansak omik kontak elde edildi. n tipi Si waferin bir tarafına Al omik kontak yapıldıktan sonra damlatma tekniği ile ara yüzey malzemesi olarak organik Azure A mavisini (C₁₄H₁₄CIN₃S) kullanıldı. Omik kontak işleminden hemen sonra Schottky kontak yapmak için DC magnetron sputter sistemine Ag hedef plaka yerleştirildi.

DC sputter tekniği ile Si waferin diğer yüzeyine yaklaşık 1,5 mm çapında Schottky kontaklar yapıldı. Sonuç olarak Ag/n-Si/Al (referans) Ag/Azure A/n-Si/Al Ag/Azure C/n-Si/Al Metal/arayüzey/yarıiletken/metal numuneler elde edildi. Elde edilen Schottky diyodun (SD) karanlıkta ve solar simülátörde 100mW/cm² ışık altında elektriksel ve fotovoltaik özellikleri araştırılmıştır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Akım-Voltaj Karakteristikleri

Diyodun idealite faktörünün hesaplanmasında deneysel I - V ölçümleri termiyonik emisyon teorisi ile analiz edilebilir. (3.27) eşitliğine her iki tarafın \ln 'i alındıktan sonra V 'ye göre diferansiyeli alınıp düzenlenirse,

$$n = \frac{q}{kT} \left(\frac{dV}{d \ln I} \right) \quad (5.1)$$

elde edilir. İdealite faktörü (n), diyodun ideal özelliklerden sapmasını gösteren boyutsuz bir parametredir. İdeal bir diyot için bu faktör yaklaşık olarak 1'e eşit olmalı. Grafiklerin doğru beslem bölgesindeki lineer kısmına fit edilmesiyle elde edilen doğrunun eğimi ve düşey eksenini kestiği noktadan doyma akımı yardımıyla termiyonik emisyon teorisinden idealite faktörleri ve engel yükseklikleri hesaplanır. $\ln I$ - V grafiğinin doğrusal kısmına fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta I_0 doyma akımını verir. (3.27) ifadesindeki I_0 doyma akımı ;

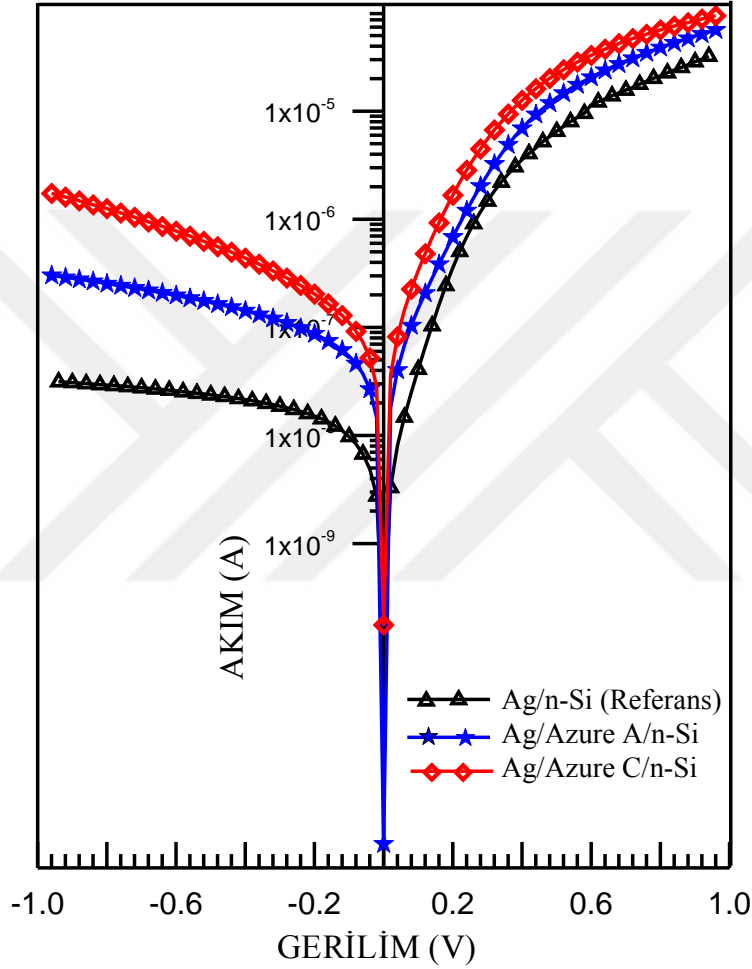
$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (5.2)$$

şeklinde tanımlanır. Burada A diyot alanı, A^* Richardson sabiti olup n -tipi Si için $A^*=112$ A/K^2cm^2 , T Kelvin olarak sıcaklık, k Boltzmann sabiti, q elektronun yükü ve Φ_b sıfır gerilimde engel yüksekliği olarak tanımlanmıştır. (5.2) eşitliğinin her iki tarafının tabii logaritması alınarak, Φ_b 'ye göre çözümlerse;

$$e\Phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (5.3)$$

şeklinde engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

Bulunan bu değerler ve diğer sabit veriler (5.1) ve (5.3)'de yerine yazılarak idealite faktörleri ve engel yüksekliği hesaplanır. Şekil 5.1'de Akım-Voltaj ölçümlerinden referans ve arayüzeyli numunenin oda sıcaklığında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği ile fit doğrusu birlikte verilmiştir.



Şekil 5.1. Ag/n-Si için Schottky diyotların grafiği

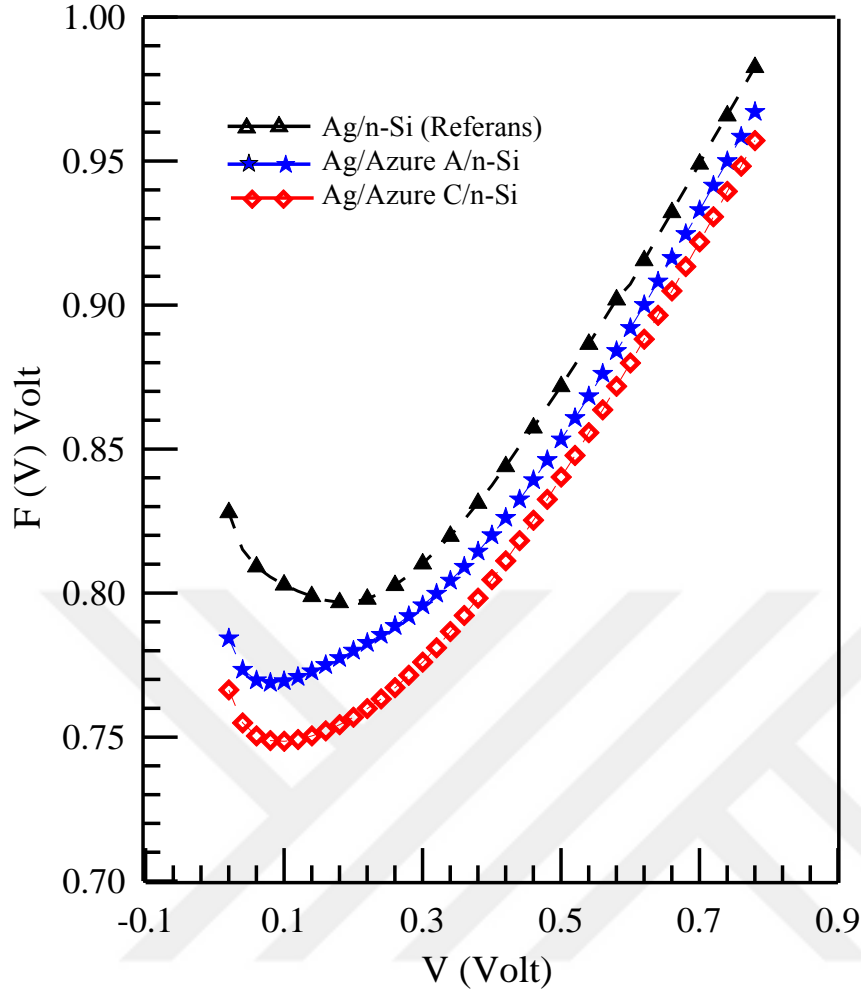
Tablo 5.1. I-V ve NORDE denklemlerinden parametre değerleri

NUMUNE ADI	I-V		NORDE	
	İdealite faktörü	Engel yüksekliği (eV)	Engel yüksekliği (eV)	SERİ DİRENÇ (Ω)
Ag/n-Si/Al	1,60	0,81	0,86	$4,2 \times 10^4$
Ag/AzureA/n-Si/Al	1,78	0,79	0,78	$5,2 \times 10^4$
Ag/AzureC/n-Si/Al	1,89	0,78	0,77	$1,6 \times 10^4$

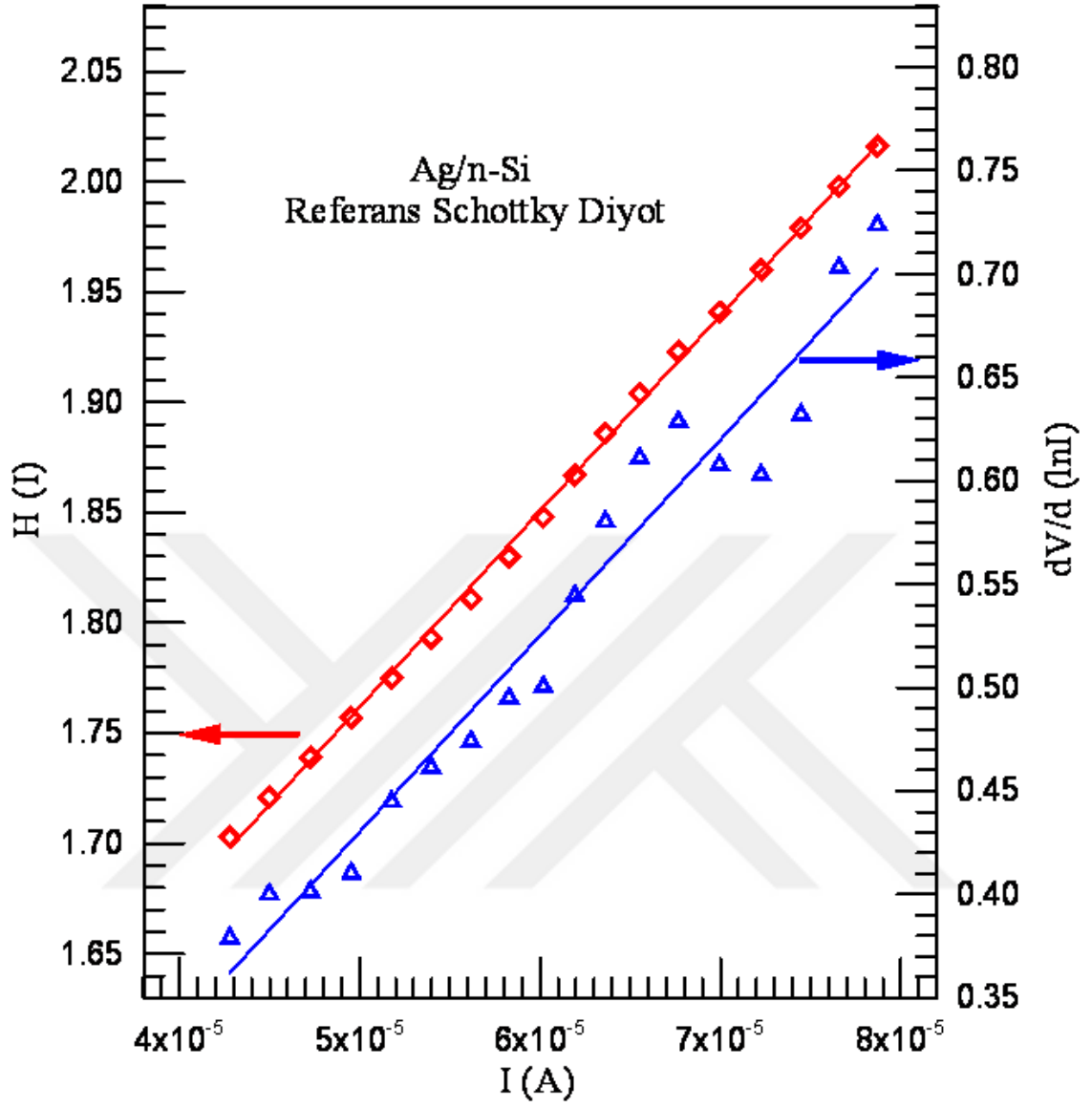
Özaydın ve arkadaşları Cu(II) complex/n-Si heteroeklem yapılarında I-V ölçümlerine göre idealite faktörü ile engel yüksekliğini 2,22 ise 0,73 eV, Norde fonksiyonlarından seri direnç ve engel yükseliğini 6,7 k Ω , 0,77 eV sırasıyla elde ettiler. Bu sonuçlar ile bizim imal ettiğimiz diyotlar uyum içindedir (Özaydın 2013).

Güllü ve Türüt, ürettikleri Al/quercetin/p-InP Schottky diyodunda engel yüksekliğindeki değişimin sebebini organik ara tabakanın, yarıiletkenin uzay yükü bölgesini etkileyerek etkin engel yüksekliğini değiştirmesine atfettiler (Güllü Ö. and Türüt A, 2008).

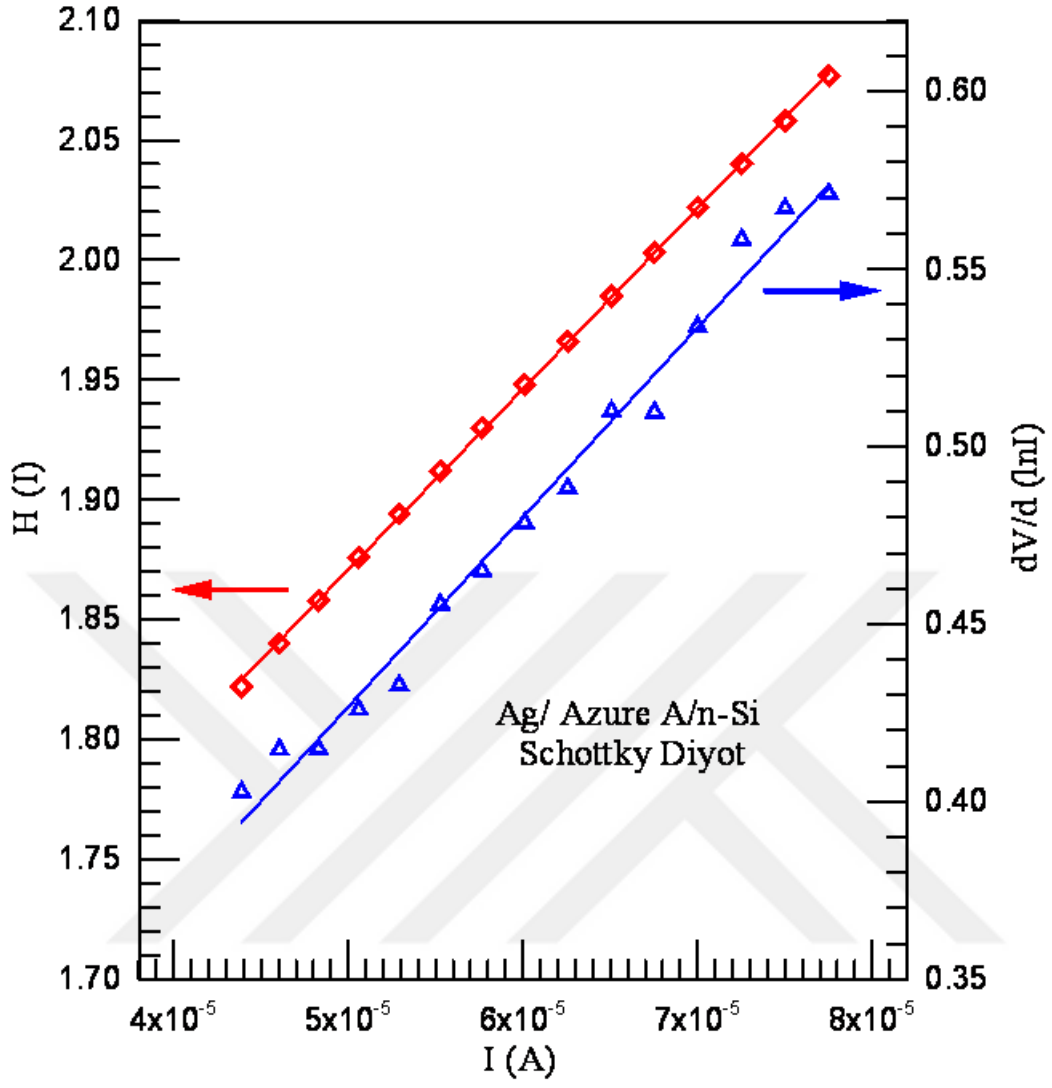
Orak ve ark. (2015) farklı organik arayüzey kalınlıklarına göre Al/p-Si and Al/Azure C/p-Si yapısını üreterek I-V ve C-V ölçümlerinden idealite faktörü ve engel yüksekliğini hesaplamışlar. 2 $\mu\text{l} / \text{cm}^2$ ve 4 $\mu\text{l}/\text{cm}^2$ kalınlıklarında sırasıyla idealite faktörü ve engel yüksekliğini; 1,10-1,15 ve 1,26, 0,57 eV-0,64 eV ve 0,65 eV olarak hesaplamışlar. Bu sonuçlar imal ettiğimiz diyotlarla uyum içindedir (Orak 2015).



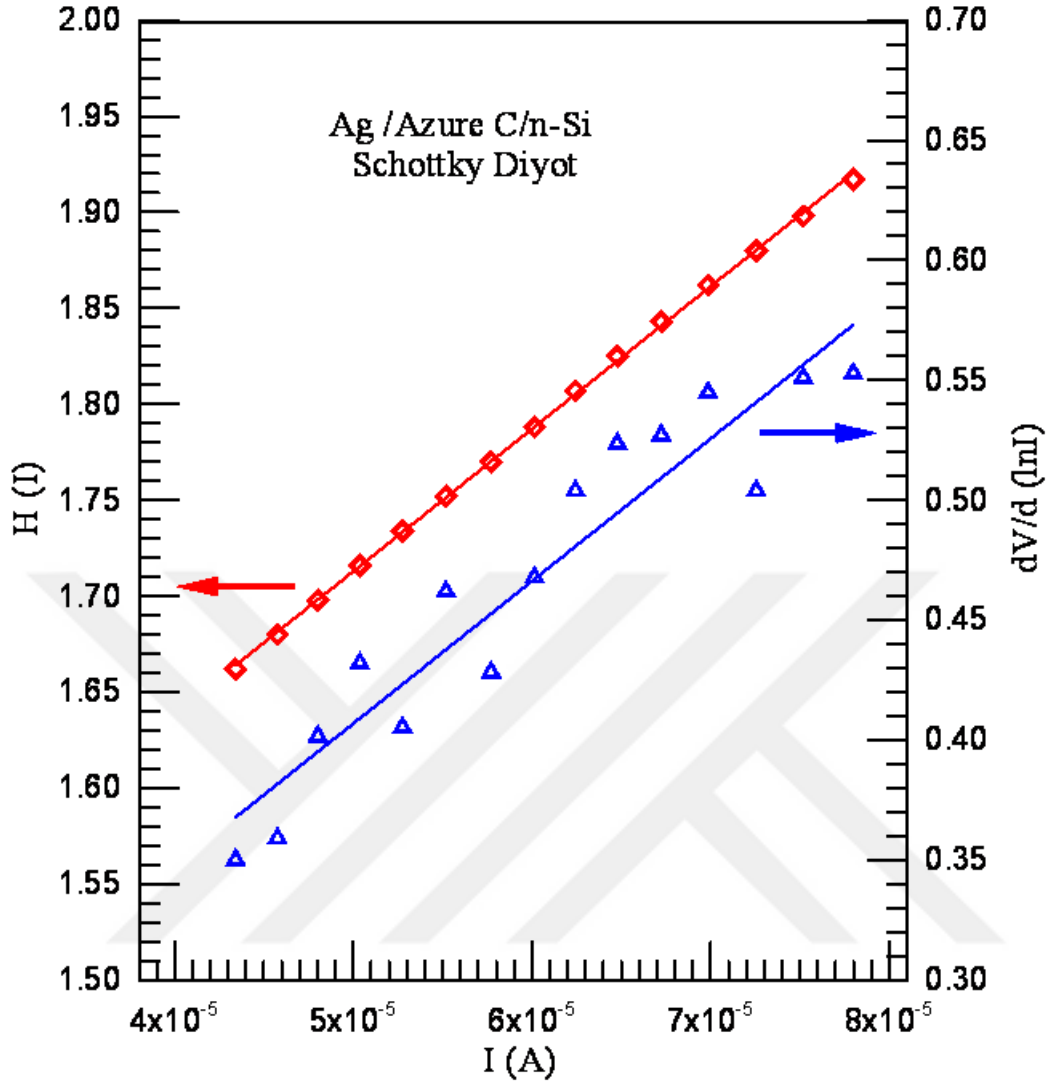
Şekil 5.2. Ag/n-Si Schottky diyotların Seri direnç grafiği



Şekil 5.3. Cheung fonksiyonlarına Ag/n-si için H(I)-I ve dV/d(ln) grafiği



Şekil 5.4. Cheung fonksiyonlarına Ag/Azure A/n-si için H(I)-I ve dV/d(ln) grafiği



Şekil 5.5. Cheung fonksiyonlarına Ag/Azure C/n-si için H(I)-I ve dV/d(ln) grafiği

Tablo 5. 2. Cheung metoduna ait parametreler

NUMUNE ADI	dV/d(lnI)-I		H(I)-I	
	İdealite faktörü	SERİ DİRENÇ (Ω)	Engel yüksekliği (eV)	SERİ DİRENÇ (Ω)
Ag/n-Si/Al	1,7	1,9x10 ⁴	0,89	2,0x10 ⁴
Ag/AzureA/n-Si/Al	1,8	1,08x10 ⁴	0,87	1,98x10 ⁴
Ag/AzureC/n-Si/Al	1,9	0,89x10 ⁴	0,89	1,6x10 ⁴

Cheung-Cheung metodu ile d(V)/d(lnI)-I ve H(I)-I grafikleri yardımıyla seri direnç, idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplandı. Hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri Tablo 5.2 de yer almaktadır. Güllü ve ark. (2010) ise; Al/new

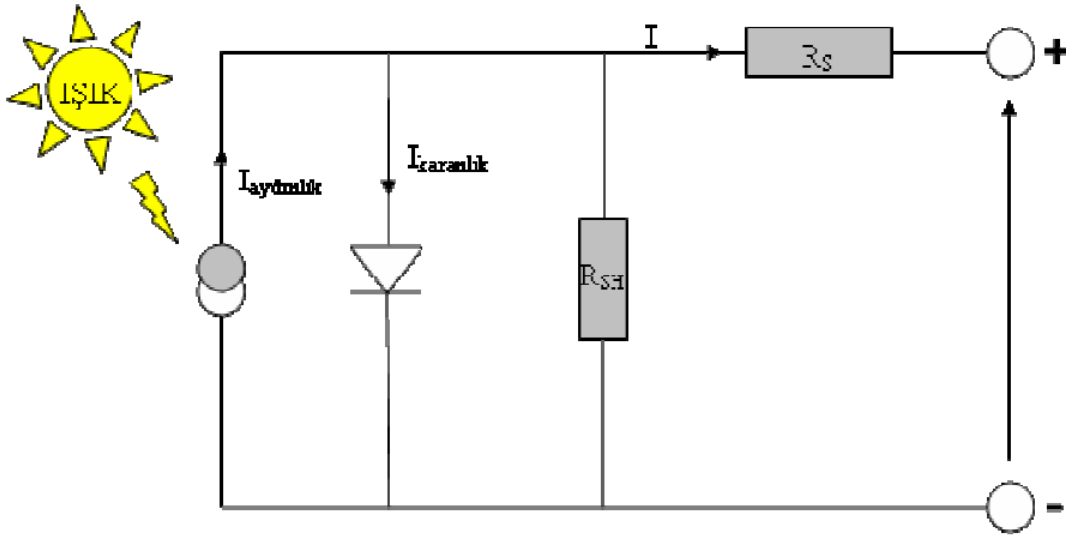
fuchsin/n-Si yapılarına ait çalışmalarında $dv/d\ln I$ ölçümlerinden idealite faktörü ve seri direnç değerlerini 3,61-965 Ω olarak hesaplamışlardır. $H(I)$ - I grafiği Ref 'e göre lineer olmalıdır. Bu eğim seri direncin farklı bir değerini verecektir. Yapmış oldukları çalışmada $H(I)$ - I ölçümlerinden seri direnç ve engel yüksekliğini sırasıyla 980 Ω ve 0,88 eV olarak hesaplamışlardır. Bu sonuçlar ile bizim imal ettiğimiz diyotlar uyum içindedir (Güllü et. al. 2010).

Cheung metodu ile hesaplanan idealite faktörünün $\ln I$ - V grafiğinden hesaplanan idealite faktöründen büyük çıkması seri direncin ve ara yüzey durumlarının etkisine bağlanabilir. Ayrıca Norde metodu ile hesaplanan seri direncin Cheung metodu ile hesaplanan seri dirençten büyük olması, Norde fonksiyonlarının tüm doğru beslem değerleri üzerinde hesaplanırken, Cheung fonksiyonlarında sadece seri direnç bölgesinin hesaba katılmasıyla açıklanabilir (Ocak, YS 2010). Card and Rhoderick (1971) Vakumda yarılmış n-tipi Silisyum üzerine düşük iş fonksiyonuna sahip Mg, Ca, K ve Na metalleriyle ürettikleri Schottky diyot yapılarını incelediler. Akım-gerilim ölçümlerinden bu metallerle üretilen diyotların engel yüksekliklerinin çok düşük ve 0,40-0,85 eV aralığında iki grup halinde; birinci grubun 0,45 eV, ikinci grubun ise 0,70 eV civarında olduğunu buldular (Crowel et al 1965; Szydlo and Poirier 1973).

5.2. Fotovoltaik Ölçümlerin Elde Edilmesi

Fotovoltaik sistemler genellikle, karanlık da dahil olmak üzere farklı ışınım şiddetlerinde uygulanan gerilime göre değişen akım yoğunluğunun ölçülmesi ile karakterize edilirler. Aynı zamanda, düşük ışınım şiddetindeki monokromatik ışık altında gelen fotonun, elektrik akımına dönüşüm verimi olarak nitelendirilen IPCE de (Incident Photonto Current Conversion Efficiency) özellikle organik fotovoltaik sistemlerde çok sık ölçülen ve sistemin çalışması hakkında çok önemli bilgiler veren bir tekniktir.

Işınım altında güneş pili, elektriksel bir devre gibi değerlendirilmektedir. Akım kaynağına paralel olarak, diyot ve paralel direnç (R_{SH}) bulunmaktadır. Ayrıca, güneş pili üretiminde kullanılan malzemelerin tümünden kaynaklanan seri direnç (R_S) bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Organik boya esaslı güneş piline denk elektriksel devre şeması.

Şekil 5.6 gerçek organik boya esaslı güneş pilinin basitleştirilmiş, tek diyotlu sistemde karanlık akımı modelidir. Gerçek pil yapısı ise çok daha karışıktır ve farklı yük taşıma süreçlerini içeren çoklu diyot modeli ile açıklanabilir. Kısa Devre Akımı (I_{sc}), Pil üzerine uygulanan gerilim $V_a=0$ Volt iken ölçülen akım, kısa devre akımıdır. Bu durumda;

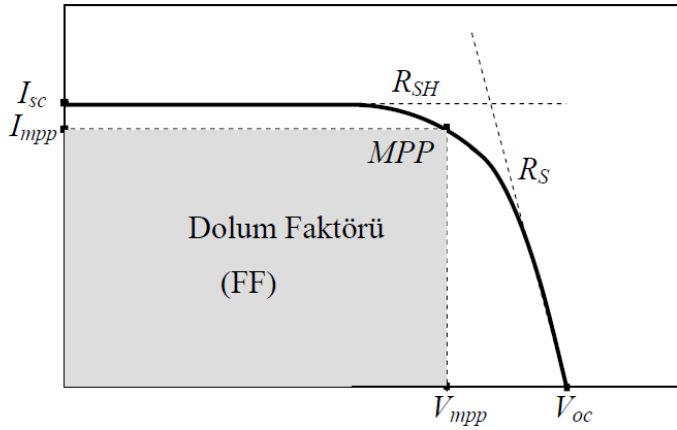
$$I_{0c} = I_{aydınlık} \quad (5.4)$$

şeklinde basitleşmektedir. Kısa devre akımı, ışımının bir fonksiyonudur. Kısa devre akımı yoğunlu ise (J_{0c}), kısa devre akımının, fotoaktif yüzey alanına bölümüdür. Açık Devre Gerilimi (V_{0c}): devre üzerinden hiç akım geçmiyor iken ($I=0$), yani şekil (Şekil 5.6)'da görüldüğü üzere;

$$V_a = V_{0c} \quad (5.5)$$

Bu durumda,

$$I_{ayd} = I_0 \left[\left(\exp\left(\frac{V_{0c}}{V_{th}}\right) - 1 \right) \right] \quad (5.6)$$



Şekil 5.4. Güneş Piline Akım-Gerilim Grafiği

$$V_{oc} = V_{th} \ln \left(\frac{I_{ayd}}{I_0} - 1 \right) \cong V_{th} \ln \left(\frac{I_{ayd}}{I_0} \right) \quad (5.7)$$

Eşitliği V_{oc} 'nin ışınım şiddetine bağımlılığını göstermektedir.

Maksimum Güç Noktası (MPP) güneş piline V_a gerilimi uygulanırken elde edilen güç, uygulanan potansiyelde oluşan akım ile potansiyelin (V_a) çarpımı olarak tanımlanmaktadır. Elde edilen gücün en yüksek olduğu noktaya Maksimum Güç Noktası (MPP) denir ve bu noktadaki akım ve gerilime de güneş pilinin maksimum akımı (I_m) ve maksimum gerilimi (V_m) olarak ifade edilir.

$$MPP = V_m \cdot J_m \quad (\text{mW/cm}^2) \quad (5.8)$$

Dolum Faktörü (FF), pilin bir güç kaynağı olarak kalitesinin bir ölçüsüdür ve maksimum gücün, açık devre gerilimi ile kısa devre akımı çarpımına orandır.

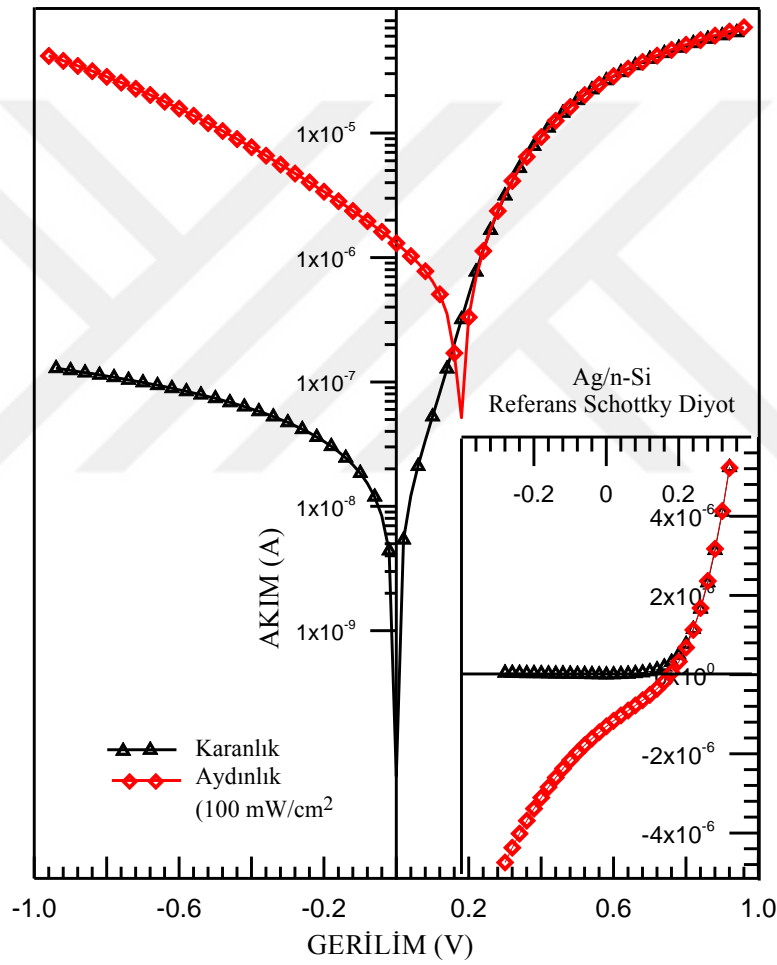
$$FF = \frac{V_m \cdot J_m}{V_{oc} \cdot J_{oc}} = \frac{MPP}{V_{oc} \cdot J_{oc}} \quad (5.9)$$

Güneş pilinin “iyi” olarak nitelendirilmesi için, dolum faktörünün (FF) = 0,75-0,8 aralığında olması gerekmektedir. FF değeri, hem seri hem paralel dirençler tarafından etkilenmektedir. Kullanılan malzemelerin ve elektrotlarla kontakların direncinden

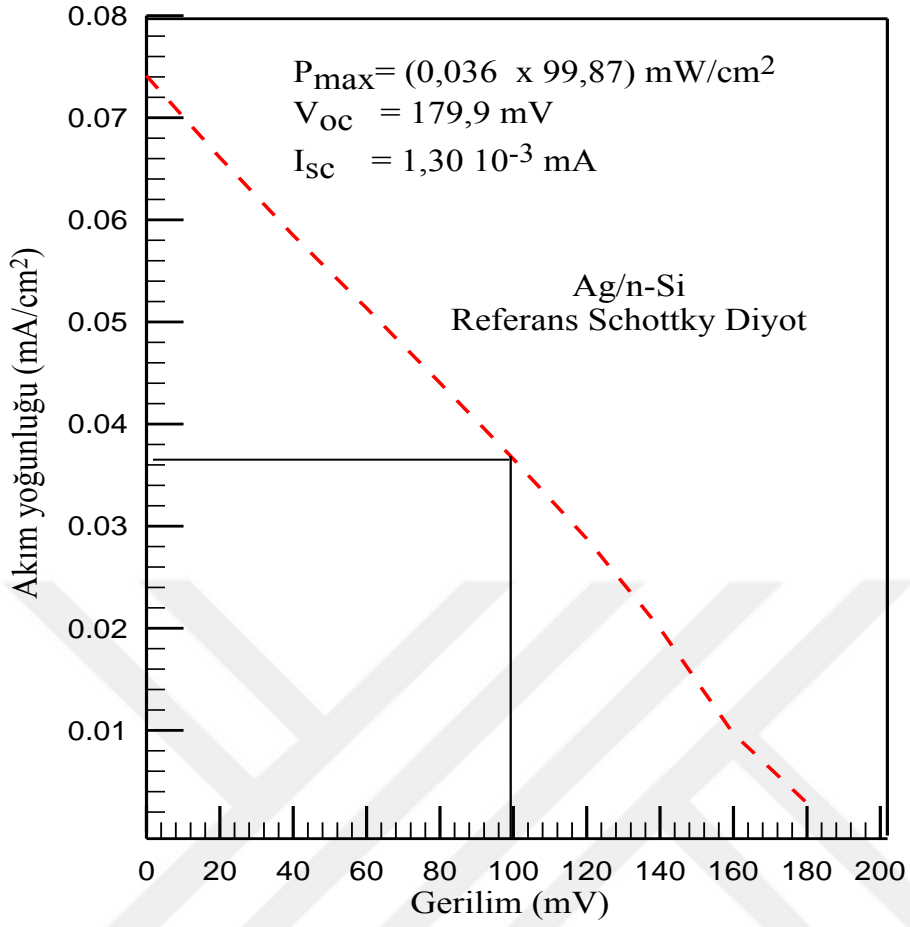
kaynaklanan iç direnç mümkün olduğu kadar küçük, paralel direnç olarak tanımlanan pilin kabuğuna ulaşma direnci ise mümkün olduğu kadar yüksek olmalıdır (Şekil 5.3).

Verim (η), güneş pilinin performansının ifadesidir ve elde edilen maksimum gücün (MPP), güneş pili yüzeyine gelen ışık şiddetine ($P_{ışık}$) orandır.

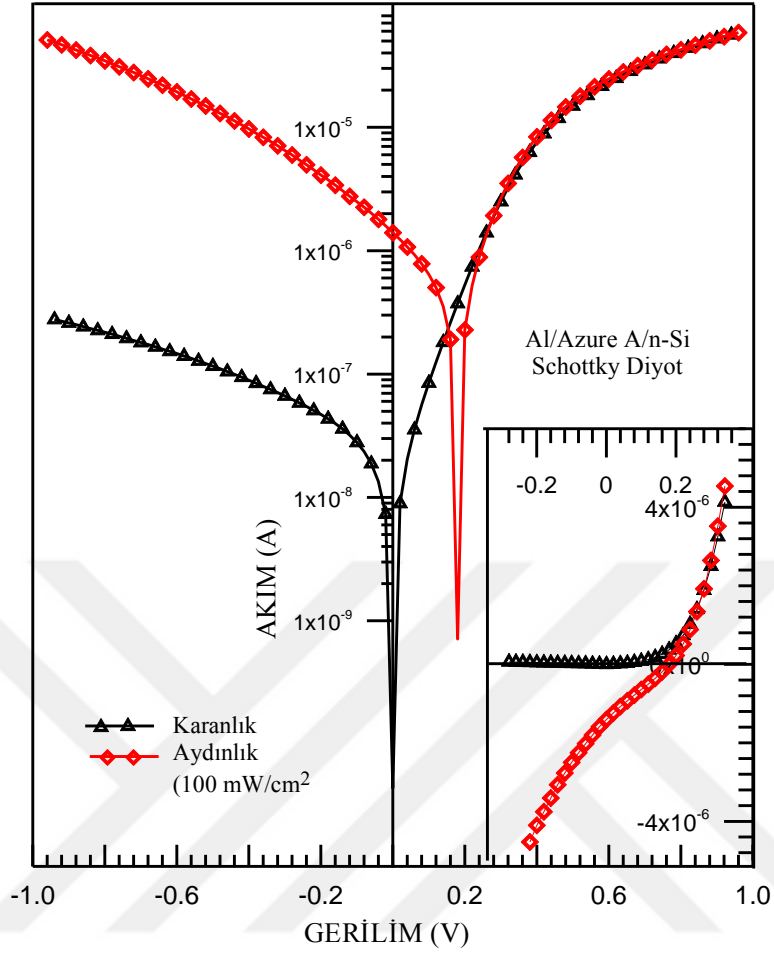
$$\eta = \frac{MPP}{P_{ışık}} = \frac{V_m \cdot J_m}{P_{ışık}} \cdot FF \quad (5.10)$$



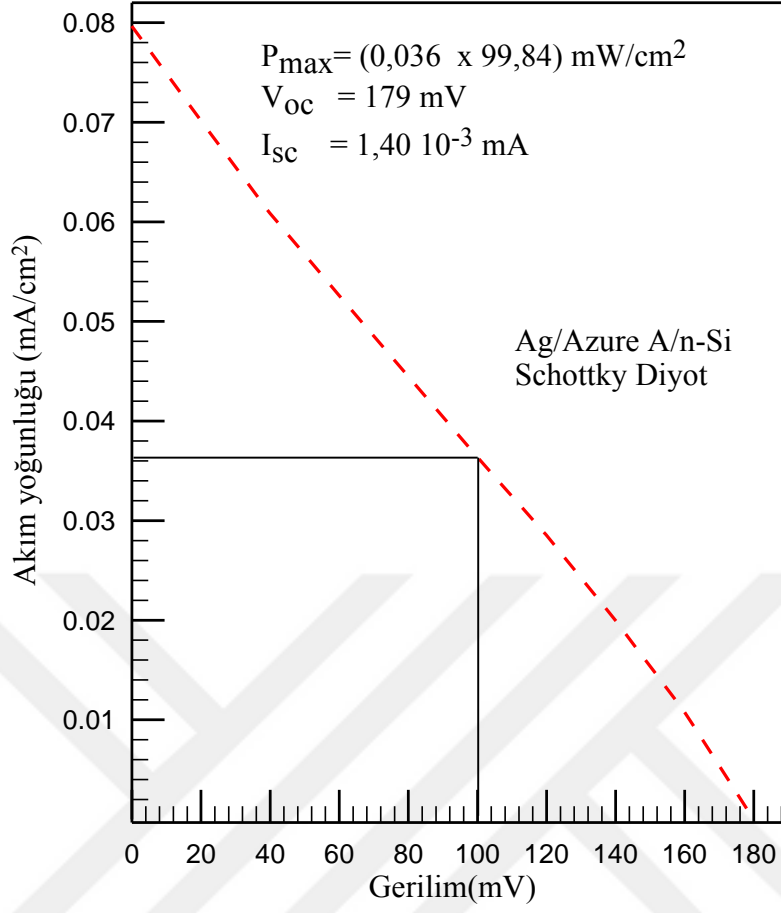
Şekil 5.5. Ag/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülasyon altında yarı logaritmik akım- gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.



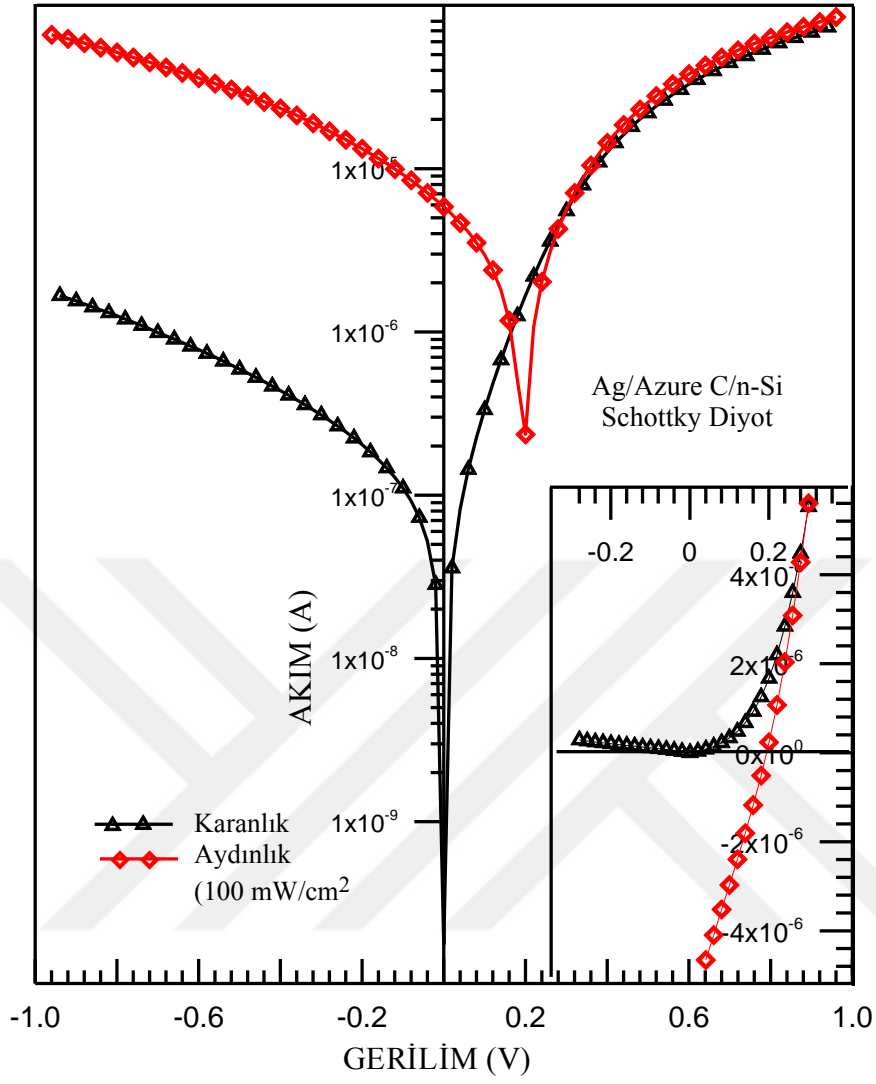
Şekil 5.6. Akım gerilim ölçümlerinden elde edilen Ag/n-Si/Al (referans) diyodun 100 mW/cm² ışık altında fotovoltaik parametreleri



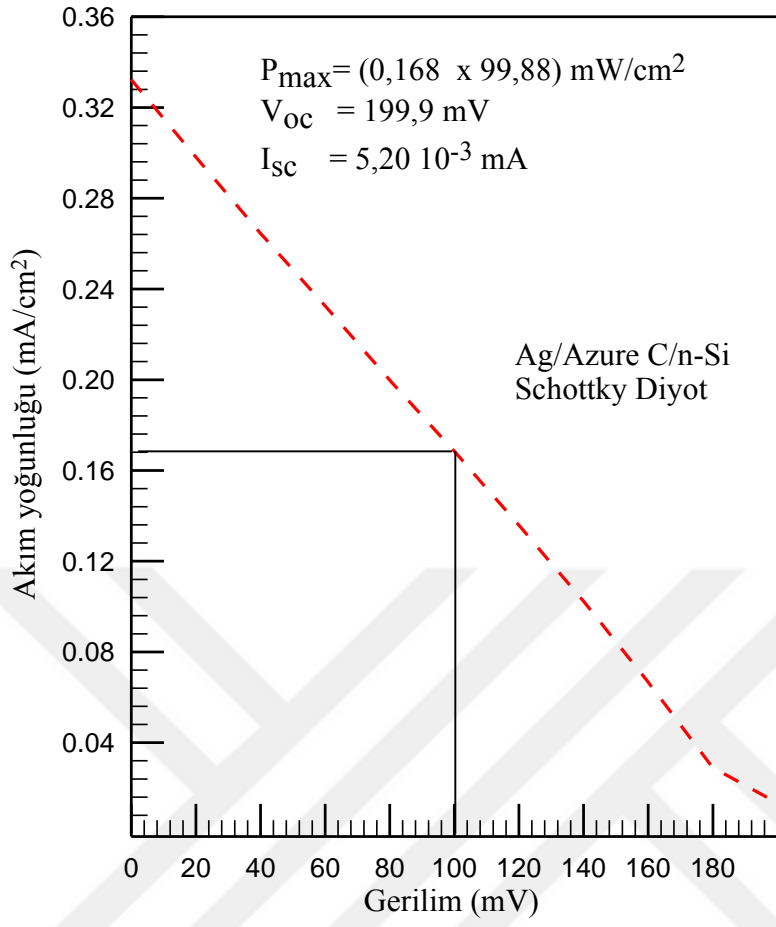
Şekil 5.7. Ag/Azure A/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülâtör altında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.



Şekil 5.8. Ag/Azure A/n-Si/Al diyodun 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında fotovoltmik parametreleri



Şekil 5.9. Ag/Azure C/n-Si/Al diyodun oda sıcaklığında karanlıkta ve solar simülatör altında yarı logaritmik akım-gerilim grafiği, lineer akım gerilim grafiği.



Şekil 5.10. Ag/Azure C/n-Si/Al diyodun 100 mW/cm^2 ışık yoğunluğu altında fotovoltajik parametreleri

Referans numune (Ag/n-Si/Al) ve arayüzeyli numuneler (Ag/Azure A/n-Si/Al) ve (Ag/Azure C/n-Si/Al) için AM 1,5 ve 100 mW/cm² ışınım altında fotovoltaik parametreleri Tablo 5.3 de görülmektedir.

Tablo 5.3. Ara yüzeyli ve Ara yüzeysiz numunelerin 100mW/cm² ışık altında fotovoltaik parametreleri

NUMUNE	I _{sc} (mA)	J _m (mA/cm ²)	V _m (mV)	V _{oc} (mV)	FF (%)	η _p (%)	M _{pp} =V _m *I _m (mW)
Ag/n-Si/Al	1,30E-03	3,66-E02	99,874	179,92	27,43	0,036554	0,0643
Ag/Azure A/n-Si/Al	1,40E-03	3,64E-02	99,84	179,88	25,38	0,036373	0,0640
Ag/Azure A/n-Si/Al	5,85E-03	1,69E-01	99,881	199,93	25,35	0,168679	0,2970

AM 1,5 ve 100 mW/cm² ışınım altında referans numune (Ag/n-Si) için açık devre voltajı 179,92 mV, kısa devre akımı 1,3 10⁻³ μA Fill faktörü %27,43 verim ise %0,036 olarak fotovoltaik parametreleri elde edilmiştir.

Aynı şekilde arayüzeyli numune (Ag/Azure A/n-Si) için açık devre voltajı 179,88mV, kısa devre akımı 1,4 10⁻³ μA Fill Faktörü %25,38 verim ise %0,036 (Ag/Azure C/n-Si) için açık devre voltajı 199,93 mV kısa devre akımı 5,85 10⁻³ μA Fill faktörü %25,35 verim ise %0,16 olarak fotovoltaik parametreleri elde edilmiştir.

Doğan ve ark. Al/ Ruthenium (II)-complex / p-Si çalışmalarında 100 mW/cm² ışınım altında yapmış oldukları çalışmada dolum faktörü, verimlilik, açık devre voltajı ve kısa devre akımını sırasıyla %60,8 %1,25-439,9 mV ve 36,6 10⁻³ μA olarak hesaplamışlar (Doğan ve ark. 2017). Sonuçlara bakıldığı zaman yapılan çalışmalar da numuneden alınan sonuçlara göre uygun sonuçlar elde edilip fotovoltaik özelliği gösterdiği görülmüştür. Numunemizin verimine baktığımız zaman Ag/Azure A/n-Si için verim düşük iken Ag/Azure C/n-Si için verim oranı biraz daha yüksek çıkmıştır. Bu sonuçlarla beraber verimi artırmak için ara yüzeye farklı kalınlıklarda organik malzemeler büyütülerek yeniden incelenebilir.

Güneş pilinin “iyi” olarak nitelendirilmesi için, dolun faktörünün (FF) = 0,75-0,8 aralığında olması gerekmektedir. Bizim bu yapmış olduğumuz çalışma sonucunda dolun faktörü (FF) referans(Ag/n-Si/Al) için; 0,27 ara yüzeyli Ag/Azure A/n-Si/Al için; 0,25 ve Ag/Azure C/n-Si/Al için; 0,25 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar ve ideal iyi güneş pilinin sonuçlarına bakarak kullanılan ara yüzeyin yerine farklı kalınlıklarda organik malzemeler kullanarak yeniden inceleme yapılabilir.



KAYNAKLAR

Aktaş Y (2006) Ftalosiyanın İnce Filmlerin Elektriksel ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü İstanbul

Archer RJ (1963) and Atalla MM Am Acad Sci NY 101: 697

Brillson LJ (1993) Contacts to semiconductors Noyes Publications New Jersey

Card HC and Rhoderick (1971) EH Studies of Tunnel MOS Diodes I Interface Effects in Silicon Schottky Diodes J Phys D Appl Phys 4: 1589-1601

Chattopadhyay P and Daw (1986) AN On the Current Transport Mechanism in a Metal-Insulator-Semiconductor (MIS) diode Solid State Elect 29: 555-560

Crowell CR, Sarace JC and Sze (1965) SM Surface State and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems Trans Metal Soc AIME 233: 478

Çetinkara HA (1996) Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniv Fen Bilimleri Enstitüsü

Doğan H, Orak I, Yıldırım N (2017) Al/Ruthenium(II) complex/ p-Si Fotodiyotun Fotovoltaik ve Elektriksel

Ejderha K, Yıldırım N, Türüt A and Abay B (2010) Influence of interface states on the temperature dependence and current-voltage characteristics of Ni/p-InP

Gomila G and Rubı (1997) M Relation for the Nonequilibrium Population of the Interface States: Effects on the Bias Dependence of the Ideality Factor J Appl Phys 81: 2674-2681

O Gullu, S Asubay, S Aydoğan, A Turut (2010) Electrical characterization of the Al/new fuchsin/n-Si organic-modified device

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

Henisch HK (1984) Semiconductor Contacts Celerondon Press New York

- Horwath ZSJ (1996) Comment on Analysis of I-V measurements of CrSi₂-Si Schottky structures in a wide temperature range Solid State Electron 39-176
- Jones FE Daniel-Hafer (2001) C Wood BP RG. Danner Lonergan M.C Current
- Karataş Ş and Altındal Ş (2005) Analysis of I-V characteristics of on Au/n-type GaAs
- Li SS (2006) Semiconductor Physical Electronics Springer New York
- N Szydło and R Poirier (1973) Alkaline-metals-silicon Schottky barriers Citation: Journal of Applied Physics Published by the American 44-1386
- Neaman D (1992) Semiconductor Physics and Devices RR.Donneley & Sons Company Sydney
- Vural Ö, Yıldırım N, Altındal S, Türüt A (2007) Met 157
- Ocak YS (2010) Organik-İnorganik Hbrt yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu Doktora Tezi D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Diyarbakır
- Orak I, Turut A (2015) Toprak M Synthetic Metals 200 66-73
- Orak I, Turut A, Toprak (2015) The comparison of electrical characterizations and photovoltaic performance of Al/p-Si and Al/Azure C/p-Si junctions devices
- Ozaydin C, Akkilic K, Ilhan S, Ruzgar S, Gullu O, Temel H (2013) Characterization of an Au/n-Si photovoltaic structure with an organic thin film Materials Science in Semiconductor Processing 1125-1130
- Rhoderick EH and Williams (1988) RH Experimental Studies of Metals on Semiconductors Metal-Semiconductor Contacts Clarendon Press Oxford 1-100
- Schmitsdorf RF, Kampen T U and Monch W (1997) Explanation of the linear correlation Schottky The development of silicon crystal rectifiers for microwave radar
- Simeonov, SS Kafedjüiska E (1997) Conduction via deep levels in Si Schottky diodes
- Soylu M, Orak I, Dayan O, Serbetci Z (2015) Microelectronics Reliability 55 2685- 2688
- Spicer, WE Chye PW PR Skeath Lindau I (1979) New and unified model for Schottky
- Srivastava GP (1997) Theory of semiconductor surface reconstruction. Rep Prog Phys
- Srivastava GP (2002) Surface passivation by dissociative molecular adsorption
- Sullivan, JP Tung, RT and Pinto MR. Graham WR (1991) Electron transport of.
- Sze SM (1981) Physics of semiconductor devices 2nd ed New York Wiley

Tung RT (1992) Electron transport at metal and semiconductor interfaces General theory
Phys Rev B 45 (23) 13509-13523

Tung RT (2001) Recent advances in Schottky barrier concepts Material Science and

Türüt A, Köleli F (1992) Semiconductive polymer-based Schottky diode Appl Phys 72(2)
818-819

Williams RH, Robinson GY (1985) Physics and chemistry of III-V compound

WU CY (1980) Interfacial Layer Theory of the Schottky Diodes J Appl. Phys 51: 3786-
3789

Yakuphanoglu F, Okur S (2010) Analysis of electronic parameters and interface states of
boron dispersed triethenolemine/p-Si structure by AFM, I-V, C-V-f and G/w-V-f
techniques Mikroelektronik Engineering 87: 30-34

Zhu S, Van Meirhaeghe RL Detavernier C (2000) Effect of annealing temperature on Ni
silicide/n-Si (100) Schottky contacts. Solid-State Electron 44-663

Zhu S, Van Meirhaeghe, RL Detavernier C (1999) A BEEM study of the temperature
dependence of the barrier distribution in Pt Si/n-Si Schottky diodes Solid-State Commun
112-611

Ziel AV (1968) Solid State Physical Electronics, Prentice Hall Inc New Jersey

ÖZGEÇMİŞ

1988 yılında Bingöl İli KİĞİ İlçesinde doğdu. İlk, orta ve liseyi Bingöl'de tamamladı. 2007 yılında Malatya İnönü Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünü kazandı. 2012 yılında mezun oldu. 2012 yılında tekrar Bingöl'e geri döndü.

