

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

**SnO₂/p-Si HETEROEKLEM YAPILARIN TERMAL BUHARLAŞTIRMAYLA
ÜRETİLMESİ, DİYOT VE FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Mehmet Ali EVCİL
DANIŞMAN: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

VAN-2019

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

**SnO₂/p-Si HETEROEKLEM YAPILARIN TERMAL BUHARLAŞTIRMAYLA
ÜRETİLMESİ, DİYOT VE FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN: Mehmet Ali EVCİL

VAN-2019

KABUL VE ONAY SAYFASI

Fizik Anabilim Dalı'nda Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ danışmanlığında, Mehmet Ali EVCİL tarafından sunulan “**SnO₂/p-Si Heteroeklem Yapıların Termal Buharlaştırma ile Üretilmesi, Diyot ve Fotovoltaik Özelliklerinin İncelenmesi**” isimli bu çalışma Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili hükümleri gereğince **18/07/2019** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından **oy birliği /oy çokuğu** ile başarılı bulunmuş ve **Yüksek lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Rıdvan KARAPINAR

İmza: 

Üye: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

İmza: 

Üye: Dr. Öğr. Ü. Abdullah ÖZKARTAL

İmza: 

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 26.07.2019 tarih ve 2019/40-L sayılı kararı ile onaylanmıştır.

İmza: 
Enstitü Müdürü
Prof. Dr. Suat SENSOY
Enstitü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Mehmet Ali EVCİL

ÖZET

SnO₂/p-Si HETEROEKLEM YAPILARIN TERMAL BUHARLAŞTIRMAYLA ÜRETİLMESİ, DİYOT VE FOTOVOLTAİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

EVCİL, Mehmet Ali

Yüksek Lisans Tezi, Fizik Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

Temmuz 2019, 85 sayfa

SnO₂/p-Si heteroeklem üretimi için $\rho = 1-10 \Omega \cdot \text{cm}$ öz dirençli p-Si (100) tek kristal wafer kullanıldı. Silisyum'un (p-Si) kimyasal temizleme işlemi geleneksel prosedüre göre yapıldı. Omik kontak yapımı için, kristalin arka yüzeyine kimyasal olarak temizlenmiş olan Al (%99.999) metali, vakum kaplama ünitesi kullanılarak buharlaştırıldı. Ardından kuartz tüplü fırın vasıtasıyla 580 °C de azot atmosferinde 3 dakika süreyle tavlandı. Omik kontak işleminden sonra tedarikçiden alındığı şekliyle (ilave bir işlem yapılmadan) toz halindeki SnO₂ kullanılarak vakum kaplama ünitesinde termal buharlaştırma yöntemi ile SnO₂/p-Si heteroeklem yapılarının üretimleri gerçekleştirildi. Üretilen heteroeklem yapılarıdaki SnO₂ filmlerin optiksel incelemesi için, "Shimadzu 2450 UV-Vis spektrofotometre" cihazı kullanılarak, görünür ışık bölgesinde filmin yüzeyine düşen foton dalga boyuna karşılık geçirgenlik ölçümleri alındı. SnO₂/p-Si heteroeklemlerin elektriksel karakterizasyonu için, "Keithley 6487 pikoammeter and voltage source" cihazı kullanılarak, numunelerin oda sıcaklığında ve karanlıkta doğru ve ters beslem akım-voltaj (I-V) ölçümleri alındı ve numunelere ait idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ_b), doğrultma faktörü, seri direnç (R_s) gibi karakteristik parametreler belirlendi. Ayrıca elde edilen sonuçların doğruluğunu kontrol etmek için Norde fonksiyonu ve Cheung fonksiyonları kullanıldı. Numunelerin fotovoltaiik parametrelerinin belirlenmesi için bir solar simülatör yardımıyla, AM1.5 (100 mW/cm²) aydınlatma altında I-V ölçümleri yeniden alındı ve doldurma faktörü (FF), dönüşüm verimi (η) gibi parametreler belirlendi. Bunların yanısıra numunelerin Kapasitans-Voltaj (C-V), Kapasitans-Frekans (C-f), İletkenlik-Voltaj (G-V), İletkenlik-Frekans (G-f) ölçümleri de alındı.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaiik, Güneş pili, Heteroeklem, Kalay oksit, Kontak.



ABSTRACT

PRODUCTION OF SnO₂/p-Si HETEROJUNCTION STRUCTURES BY THERMAL EVAPORATION, INVESTIGATION OF DIODE AND PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF THEM

EVCİL, Mehmet Ali

M.Sc. Thesis, Department of Physics

Supervisor: Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

July 2019, 85 pages

For the production of SnO₂/p-Si heterojunction, p-Si (100) single crystal wafer with resistivity of $\rho = 1-10 \Omega \cdot \text{cm}$ was used. Chemical cleaning of silicon (p-Si) was carried out according to the conventional procedure. For ohmic contact construction to the back surface of the crystal, Al (99.999%) metal, chemically cleaned, was evaporated using a vacuum coating unit. It was then annealed for 3 minutes in a nitrogen atmosphere at 580 °C by means of a quartz tube furnace. After the ohmic contact process, the tin oxide/p-Si heterojunction structures were produced by thermal evaporation in a vacuum coating unit using powdered tin oxide as obtained from the supplier (without further processing). For the optical examination of the tin oxide films in the produced heterojunction structures, the transmittance measurements vs the photon wavelength falling on the surface of the film in the visible light region were carried out using "Shimadzu 2450 UV-Vis spectrophotometer" device. For electrical characterization of the SnO₂/p-Si heterojunctions, forward and reverse bias current-voltage (IV) measurements were carried out at room temperature and in dark using the "Keithley 6487 picoammeter and voltage source" device. The characteristic parameters of the contacts such as ideality factor (n), barrier height (Φ_b), rectifying factor and series resistance (R_s) were determined. In addition, Norde function and Cheung functions were used to check the accuracy of the results obtained. In order to determine the photovoltaic parameters of the samples, I-V measurements were taken under AM1.5 (100 mW / cm²) illumination with the help of a solar simulator and parameters such as filling factor (FF) and conversion efficiency (η) were determined. In addition, Capacitance-Voltage (C-V), Capacitance-Frequency (C-f), Conductivity-Voltage (G-V), Conductivity-Frequency (G-f) measurements of the samples were also taken.

Keywords: Contact, Heterojunction, Photovoltaic, Solar cell, Tin oxide.



ÖN SÖZ

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi' ne Yüksek lisans tezi olarak sunduğum bu çalışmamın yürütülmesinde, araştırılmasında ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimin ışığında şekillendiren, kendilerini hayatım boyunca örnek alacağım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ' ye sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans tez çalışmalarım sürecinde Bölümün ve Fakültenin imkânlarından yararlanmamda katkılarını esirgemeyen Fizik Bölümü Başkanı sayın Prof. Dr. Harun AKKUŞ' a ve Fen Fakültesi Dekanı sayın Prof.Dr. Cemil TUNÇ' a teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü eğitim sürecinde karşılaştığım tüm sorunların çözümünde, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen anneme, abime ve kız kardeşlerime sonsuz teşekkürlerimi ederim.

2019

Mehmet Ali EVCİL



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
ÖN SÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1.GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ	13
2.1. Yenilenebilir ve Temiz Enerji Kaynağı	13
2.2. Güneş Enerjisi.....	13
2.3. Güneş Pilleri	15
2.4. Güneş Pili Karakteristikleri	20
2.4.1. Bir güneş pilinin aydınlıkta ve karanlıkta akım-voltaj karakteristiği	20
2.5. Yarıiletkenler	24
2.6. p-n Eklemler	26
2.7. Metal-Yarıiletken Kontaklar	28
2.7.1 Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak	28
2.7.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak	30
2.7.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak	32
2.7.4. Metal /p-tipi yarıiletken omik kontak	35
2.8. Omik Kontak Elde Etme Yöntemleri.....	37
2.9. Akım İletim Teorileri.....	37
2.9.1. Termoyonik emisyon teorisi	37
2.9.2. Difüzyon teorisi	40
2.9.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi	41
2.9.4. T_0 etkili akım iletimi	42
2.10. Cheung Fonksiyonları.....	42

	Sayfa
2.11. Norde Fonksiyonu.....	44
2.12. p-n Eklem Diyotların Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristikleri	45
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	49
3.1. İnce Film Güneş Pili Üretimi.....	49
3.2. İnce Filmlerde Foton Soğurma Olayı	50
3.3. İnce Film Elde Etme Yöntemleri	52
3.3.1. Termal buharlaştırma yöntemi.....	52
3.3.2 Manyetik alan saçırma yöntemi.....	53
3.3.3 Püskürtme ile kaplama yöntemi.....	54
3.3.4 Spin kaplama yöntemi	54
3.3.5 Daldırma yöntemi ile kaplama.....	55
4. BULGULAR	57
4.1. Deneysel İşlemler	57
4.1.1. Kimyasal Temizleme İşlemi	57
4.1.2. Kontak yapımı işlemleri	58
4.2. Ölçme ve değerlendirme işlemleri.....	59
4.2.1. Akım-voltaj (I-V) karakteristikleri	60
4.2.1a. Cheung fonksiyonlarının kullanılması.....	63
4.2.1b. Norde fonksiyonlarının kullanılması.....	65
4.2.2. Fotovoltaik Karakteristikler.....	68
4.2.3. Kapasitans-Voltaj (C-V) Karakteristikleri.....	69
4.2.4. İletkenlik- Voltaj (G-V) Karakteristikleri.....	73
4.2.5. Kapasitans-frekans (C-f) Karakteristikleri.....	74
4.2.6. SnO ₂ filminin optiksel özellikleri	75
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZ GEÇMİŞ.....	87

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Fabrikasyon durumuna göre 1Watt güç için üretilen güneş pili maliyet tablosu.....	4
Çizelge 4.1. Karanlık ortamda diyotların karakteristik parametreleri.....	62
Çizelge 4.2. SnO ₂ /p-Si diyotların Cheung fonksiyonları ile belirlenen karakteristik parametreleri.....	65
Çizelge 4.3. Norde fonksiyonları ile elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri.....	67



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Güneş ışığı spektrumu	14
Şekil 2.2. Güneş ışınlarının yeryüzüne gelme açısının değişimi	15
Şekil 2.3. Fotovoltaik aygıtım çalışma ilkesi	16
Şekil 2.4. Bir p-n eklem diyotta fotovoltaik etki.....	17
Şekil 2.5. $R_S = 0$ durumunda paralel direncin etkisi.....	18
Şekil 2.6. $R_{SH} = \infty$ durumunda seri direncin etkisi	19
Şekil 2.7. Güneş pili eşdeğer devresi	19
Şekil 2.8. Güneş pilinin aydınlık ve karanlıkta I-V grafiği.....	22
Şekil 2.9. Bir güneş pilinin akım-voltaj eğrisi	24
Şekil 2.10. Farklı yarıiletken özelliklere sahip enerji-bant diyagramı	25
Şekil 2.11. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlere ait enerji-bant seviyeleri	26
Şekil 2.12. PN eklemi ve eklemeye ait enerji-bant diyagramı.....	27
Şekil 2.13. Metal ve n-tipi yarıiletkenlere ait enerji-bant seviyeleri.....	29
Şekil 2.14. Metal ve n-tipi doğrultucu kontağa ait kontak hali enerji-bant seviyeleri.....	30
Şekil 2.15. Metal/n-tipi yarıiletkenlere ait kontak öncesi enerji-bant seviyeleri.....	31
Şekil 2.16. Metal/n-tipi omik kontağa ait kontak hali enerji-bant (denge) durumu.....	31
Şekil 2.17. Metal/n-tipi omik kontağa ait ($V < 0$) durumu.....	32
Şekil 2.18. Metal/n-tipi omik kontağa ait ($V > 0$) durumu.....	32
Şekil 2.19. Metal/p-tipi doğrultucu kontağa ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı.....	33
Şekil 2.20. Metal/p-tipi doğrultucu kontağa ait kontak sonrası enerji-bant diyagramı.....	33
Şekil 2.21. Metal/p-tipi doğrultucu kontağa ait ($V \neq 0$) durumu.....	34
Şekil 2.22. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı....	35
Şekil 2.23. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait kontak sonrası enerji-bant diyagramı....	36
Şekil 2.24. Metal/p-tipi omik kontağa ait ($V \neq 0$) durumu.....	36
Şekil 2.25. Doğru beslem altında imaj kuvvet etkisini gösteren metal/yarıiletken kontağın enerji-bant diyagramı	38
Şekil 2.26. Yarıiletkenlere -V uygulandığında Metal/n-tipi yarıiletkenin enerji-bant diyagramı.	38

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Termal buharlaştırmayla ince film oluşturmak için 'EDWARDS AUTO 306' vakum kaplama cihazı	49
Şekil 3.2. Omik kontak yapımı işleminde kullanılan kuartz tüplü tavlama fırını	50
Şekil 3.3. Üretilen heteroeklem güneş pilinin yapısı	50
Şekil 3.4. Termal buharlaştırma sisteminin şeması.....	53
Şekil 3.5. Manyetik alanda DC saçtırma sistemi	54
Şekil 4.1. SnO ₂ /p-Si diyotlarının; a) Karanlık, b) Aydınlatma altında $\ln I - V$ grafikleri	61
Şekil 4.2. Güneş pili karakterizasyonunda kullanılan güneş simülatörü	62
Şekil 4.3. SnO ₂ /p-Si diyotlarının $dV/d(\ln I)$ grafikleri	63
Şekil 4.4. SnO ₂ /p-Si diyotlarının H(I)-I grafikleri	64
Şekil 4.5. SnO ₂ /p-Si diyotlarının F(V)-V grafikleri.....	67
Şekil 4.6. SnO ₂ /p-Si diyotlarının aydınlatma altında J-V grafiği.....	69
Şekil 4.7. SnO ₂ /p-Si (D1) diyotuna ait sabit frekans C-V grafikleri.....	70
Şekil 4.8. SnO ₂ /p-Si (D1) diyotuna ait f=500 kHz ve f=1000 kHz sabit frekans değerlerinde $C^{-2}-V$ grafikleri.....	71
Şekil 4.9. C-V-f ve G-V ölçüm işlemleri için kullanılan 'AGILENT 4294A PRECISION IMPEDANCE ANALYZER' cihazı	72
Şekil 4.10. Akım-Voltaj ölçümleri için kullanılan 'KEITHLEY 6487 PICOAMMETER/VOLTAGE SOURCE' cihazı	72
Şekil 4.11. SnO ₂ /p-Si (D1) diyotunun f=1 kHz, 10 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz sabit frekans değerlerinde iletkenlik-voltaj grafikleri	74
Şekil 4.12. SnO ₂ /p-Si (D1) diyotunun on beş ayrı sabit gerilim değerlerinde C-f grafikleri..	75
Şekil 4.13. Termal buharlaştırma ile kaplanan SnO ₂ filminin foton dalga boyuna karşılık geçirgenlik grafiği	76
Şekil 4.14. Optik soğurma ve geçirgenlik ölçümleri için kullanılan UV-Vis spektrofotometre cihazı.....	77
Şekil 4.15. Termal buharlaştırma ile kaplanan SnO ₂ filminin foton enerjisine karşılık $(ahV)^2$ grafiği.....	77

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A	Diyotun etkin alanı
A^*	Richardson sabiti
A^{**}	Düzenlenmiş Richardson sabiti
Al	Alüminyum
$^{\circ}\text{C}$	Celcius derece
E_g	Yasak enerji bant aralığı
E_v	Elektron Volt
E_f	Fermi enerji seviyesi
E_c	İlteken bandının taban enerji seviyesi
E_v	Vakum enerji seviyesi
E_s	Vakum seviyesinin tepesi
Φ_m	Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ_s	Yarıiletkenin elektron ilgisi
V_d	Difüzyon potansiyeli
I_o	Ters doyma akım yoğunluğu
N	idealite faktörü
Φ_b	Diyodun engel yüksekliği
k	Boltzman sabiti
T	Kelvin cinsinden oda sıcaklığı
P_{\max}	Maksimum güç
P_{gir}	Giriş gücü
R_s	Seri direnç
R_{sh}	Paralel direnç

Simgeler**Açıklama**

Sn	Kalay
SnO	Kalay (II) Oksit
SnO₂	Kalay (IV) Oksit
GaAs	Galyum Arsenayt
CdTe	Kadmiyum Tellür
N₂	Azot gazı
I	Akım şiddeti
V	Diyota uygulanan greilim
C	Kapasite (Sığa)
G	İletkenlik
f	Frekans
J	Akım yoğunluğu
J_o	Doyma akım yoğunluğu
V_{oc}	Açık devre gerilimi
J_{sc}	Kısa devre akım yoğunluğu
FF	Dolum faktörü
η	Verim
I_{sc}	Kısa devre akımı
I_o	Doyma akımı
I_L	Fotoakım
α	Soğurma katsayısı
λ	Dalgaboyu
Y	İdealite faktöründen büyük ilk tam sayı
kT	Termal enerji
I_m	Maksimum güç akımı
V_m	Maksimum güç voltajı
W	Deplasyon (Uzay yükü) bölgesi

Kısaltmalar**Açıklama****AM**

Air Mass

mA

mili Amper

mV

mili Volt

mW

mili Watt

hV

Foton enerjisi

AC

Alternatif akım

DC

Doğru akım

pF

Piko Farad

PV

Fotovoltaik

kHz

Kilohertz

MHz

Megahertz



1. GİRİŞ

Enerji, insanoğlu yaşamı için oldukça önemli ve en temel ihtiyaçlarından biridir. Dünya nüfusu ile ilgili yapılan bir araştırmaya göre 2008 yılından itibaren kentlerde yaşayan insan nüfusunun kırsal kesimlerde yaşayan insan nüfusunu geçtiği tespit edilmiştir. Artış oranları göz önüne alındığında ise gelecek yıllarda her beş kişinden dördünün şehirlerde yaşayacağı tahmin edilmektedir. Yapılan bu araştırmalar sonucunda insanoğlu için enerji ihtiyacının artacağı ise kaçınılmaz bir durum olacaktır. Yaşantımızı devam ettirmeyi sağlayan enerjinin büyük çoğunluğunu yenilenemez enerji kaynağı olan fosil yakıtlar ve nükleer enerji gibi insan sağlığına tehdit unsuru teşkil eden enerji kaynakları karşılamaktadır. Bu durum bilim insanlarını daha fazla ve daha temiz enerji kaynağı arayışına sevk ediyor. Güneş; sahip olduğu yüksek, temiz ve yenilenebilir enerji kaynağı olması itibariyle insanoğlunun ihtiyaç duyduğu enerji miktarını önemli bir ölçüde karşılama gücüne sahiptir. Petrol, kömür, uranyum gibi çevreye zararlı olan enerji kaynakları gibi savaş sebebi olmayan barışçıl bir enerji kaynağıdır. Dünya üzerine 20 dakikada düşen güneş enerjisi miktarı insanoğlunun bir günde kullandığı enerji miktarına eř değerdir. Güneşten gelen ışık dünyaya ulaşmadan önce atmosferdeki farklı tabakalarda farklı oranlarda soğurulur. Dünya yüzeyine ulaşan ışık miktarı yaklaşık $1000\text{W}/\text{m}^2$ ($100\text{mW}/\text{cm}^2$)' dir. Buna göre her metrekareye düşen ışık miktarı yaklaşık olarak 1kW ' tır. Bu da kullanılabilir güneş enerjisi miktarının oldukça iyi bir değerde olması demektir (Aydoğan, 2015).

Günümüzde güneş enerjisinden değişik şekillerde faydalanılmaktadır. Örneğin su ısıtma amacıyla çatılara kurulan düzeneklerle güneş ışığının dalga enerjisi, ısı enerjisine dönüştürölmektedir. Bunun yanı sıra güneş ışığının parçacık özelliğine dayalı çalışan ve güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren aygıtlarda geliştirilmiştir ki bunlara güneş pilleri veya fotovoltaiik piller denir. Güneş pilleri aslında elektronik devre elemanlarıdır ve foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştürürler. Ancak bir güneş pili, yüzeyine düşen foton enerjisinin tamamını değil, sadece bir kısmını elektrik enerjisine dönüştürür, dolayısıyla yüzde yüz bir dönüştürme söz konusu değildir. Diğer bir ifadeyle yüzde yüzlük bir verim söz konusu değildir. şimdiye kadar güneş pilleri üzerine yapılan deneysel çalışmalarda %20-%30 luk verimlere laboratuvar

şartlarında ulaşılabilmektedir. Günümüzde güneş pili üzerine yapılan çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Bir güneş pilinde enerji dönüşümünün gerçekleştirilmesi için, değişik yöntemlerle üretilen doğrultucu kontak yapılarına ihtiyaç vardır. Bu yapılar metal-yarıiletken kontaklar olabileceği gibi p-n eklem yapıları da olabilir. Doğrultucu kontak yapılarının ara yüzeyinde yüklerin kutuplanması ile oluşan bir iç yapılanma potansiyeli (built-in potential) ve dolayısıyla sürekli bir elektrik alanı varlığı, fotonların ara yüzeyde veya ara yüzey komşuluğunda oluşturduğu elektron-boşluk çiftlerini ayrıştırarak kutuplara doğru sürüklenmesine sebep olur. Dolayısıyla yüzeye düşen foton enerjisine dayalı bir gerilim oluşur.

Güneş pili teknolojisinin kronolojik gelişim süreci kısaca şu şekilde meydana gelmiştir:

1839 Alexandre Edmond Becquerel: Fotovoltaik etkiyi keşfeden ilk bilim insanıdır.

1876 Adams ve Day: Katı cisimlerde fotovoltaik etkiyi gözlemleyen ilk bilim insanıdır.

1933 Charles Fritts: Altın ve Selenyuma dayalı ilk güneş pilini tasarlamış ve etkilerini gözlemlemiştir.

1946 Russell Ohl: Güneş pillerinde günümüzde de pek yaygın olarak kullanılan silisyum tabanlı ilk güneş pilini tasarlamıştır.

1954 Modern güneş pili sürecinin başlangıcı: Yarıiletkenler ile yapılan deneyler sonucunda belli safsızlıklar ile katkılanmış silisyumun ışığa daha çok duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

1958 Peter Iles: İlk uydu için güneş pili yaptı ve neticesinde farklı ülkeler arasında güneş pili için ortak çalışmalar başladı.

1970 Zhores Alferov: Ga-As elementleri ile ilk heteroeklem yapıları güneş pilini yaptı.

1973-1974 Petrol Sorunu: Petrol krizinin yaşandığı bu zamanlarda insanoğlu enerji ihtiyacını karşılamak için yeni arayışlar içerisine girdi. Güneş enerjisi ise temiz bir enerji kaynağı olmasının yanı sıra üstelik bedavaydı. Bu tarihten itibaren global olarak birçok ülkede yarıiletken teknolojisi üzerine araştırma ve geliştirme laboratuvarları kuruldu. 1980'li yıllardan sonra ise güneş pillerinde verimin artırılması, kullanım ömrünün uzatılması ve maliyetin düşürülmesi gibi unsurlar bu teknolojiye uzun bir

sürecin başlamasına olanak sağladı. Güneş pillerinin maliyeti, kullanılan malzemeler, tarihsel gelişim süreçleri ve tasarımı açısından üç farklı kategoride sınıflandırabiliriz:

1.Nesil Güneş Pilleri (Tek Kristal ve Çok Kristal Silisyum Güneş Pilleri): Güneş pilleri yapısında en çok tercih edilen malzeme tek kristal silisyumdur. Bu yapıya sahip malzeme ile üretilen güneş pilleri 700 nm' den daha büyük dalga boyuna sahip ışık enerjilerini soğurabilmektedir. Bu da güneş enerjisi spektrumunda kızılötesi bölgeye karşılık gelmektedir. Bu tip güneş pillerinin verimi %25 oranında iyi bir değere sahip olup Chrozalski kristal çekme tekniği ile üretilir. Silindirik bir yapıya sahip olmasından dolayı üretimi maliyetli olup bizi 2. Nesil güneş pillerine yönlendirmektedir. Çok kristal silisyum güneş pili ise erimiş silisyum yapısının kalıba dökülerek soğumaya bırakılması ile üretilir ve kare şeklinde dilimlenir. Daha az maliyete sahip olmasının yanı sıra en büyük dezavantajı ise silisyum kristallerinin sınır bölgelerinde iç direnç meydana getirmesi ve verimliliklerinin %15 oranında sınırlı kalmasıdır.

2.Nesil Güneş Pilleri (İnce film Güneş Pilleri): Verim oranı %10 değerlerine sahip bu tür güneş pilleri yapısında kristal yapıya sahip olmamaları iç dirençlerinin yüksek olmasına neden olmaktadır. Üretimi 1. Nesil güneş pillerine nazaran daha az maliyetli ve daha fazla ışık absorbe etme gücüne sahiptir. 2. Nesil diğer güneş pilleri ise şu şekildedir:

- Amorf Silisyum güneş pilleri
- CuInSe_2 ve Cu(InGa)Se_2 güneş pilleri
- CdT ve Cds güneş pilleri
- GaAs ve InP güneş pilleri
- Organik güneş pilleri
- Boya hassasiyetli güneş pilleri

3.Nesil Güneş Pilleri (Çok Eklemlı yapıya sahip Güneş Pilleri): Birden fazla katmanda yapıya sahip olan bu tür güneş pillerinin üretim amacı farklı dalga boylarına ait güneş ışınlarını olabildiğince maksimum seviyede soğurup verimi arttırmaktır. Çok eklemlı güneş pillerinin verimi %40 oranlarına ulaşabilmektedir. Bu şekilde 1. ve 2. Nesil güneş pillerine göre daha yüksek verim ve daha düşük maliyete sahiptirler. Eklemler; organik, inorganik veya hem organik hem inorganik (hibrit) şeklinde olabilir.

Çizelge 1.1. Fabrikasyon durumuna göre 1 Watt güç için üretilen güneş pili maliyet tablosu.

Güneş Pili	1.Nesil	2.Nesil	3.Nesil
Watt başına düşen maliyet	3,5 - 4 \$	2,6 - 4 \$	1,0 - 2,8 \$

(Kalowekamo & Baker, 2009).

Güneş pili uygulamalarında aktif tabaka olarak SnO; SnO₂ kullanımı pek yaygın olmasa da bu konuda oldukça fazla çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda kalay oksit ince filmlerinin fiziksel özellikleri, püskürtme yöntemi ile büyütülen kalay oksit katkılı heteroeklem yapılarının incelenmesi, farklı metotlar ile optiksel özelliklerinin araştırılması ve ince film çalışmaları ön planda yer almaktadır.

Çağlar ve ark. (2009), SnO₂/p-Si/Al nanoyapılı diyotu, önce termal buharlaştırma ile Al/p-Si omik kontağını oluşturmuşlar, daha sonra p-Si ve cam altlık üzerine sol jel spin kaplama metodu ile SnO₂ kaplayarak elektrolit parametrelerini araştırmışlardır. SnO₂ filmlerin yasak bant aralığını ve mikroyapı özelliklerini optik soğurma metodu ile SEM ile analiz etmişlerdir. SnO₂ filmlerin direkt bant geçişli ve optik bant aralığını 3.58 eV olarak hesaplamışlardır. Üretmiş oldukları SnO₂/p-S diyotların idealite faktörünü 2,1; engel yüksekliğini 0.87 eV ve seri direncini 36.35 kΩ olarak hesaplamışlardır.

Lee ve ark. (2011), 2011 yılında Lee ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada 200-250 nm ZnO partiküllerini ağırlıkça %5 olacak şekilde 5 nm SnO₂ kolloid yapısına ekleyerek nano tanecikli ZnO-SnO₂ kompozit elektrotları elde etmişlerdir. Nano tanecikli SnO₂ elektrotunu elde etmek için ZnO partikülleri asetik asit ile uzaklaştırılmıştır. Geleneksel ZnO elektrotunun kullanıldığı %1.66'lık BDGP verimiyle karşılaştırıldığında, kompozit elektrotlarının kullanıldığı BDGP' inde elde edilen verim %3.96 ve SnO₂ elektrotunun kullanıldığı BDGP' inde elde edilen verim ise %2.98 olarak bulunmuştur.

Romeo ve ark, (1999), yüksek verimli CdTe/CdS ince film çalışması yapmışlardır. Bunun için öncelikle cam alttaban üzerine püskürtme ile ön kontak olarak ITO/SnO ikili katmanı oluşturulmuş, daha sonra iyi bir heteroeklem güneş pillerinde anahtar unsur olduğunu ifade ettikleri CdS katmanını CdCl₂ ile oluşturmuşlardır. CdTe katmanını 'space sublimation' tekniği ile oluşturduktan sonra, püskürtme tekniği ile

Sb₂Te₃ bileşiğini arka kontak yaparak hetero yapıda güneş pili fabrikasyonunu yapmışlardır. AM 1.5G (Global) aydınlatma koşullarında; açık devre gerilimini $V_{oc}=858$ mV, kısa devre akım yoğunluğunu $J_{sc}=23$ mA/cm², dolun faktörünü % 74 ve enerji dönüşüm verimini $\eta=14,6$ hesap etmişlerdir.

H. Cachet, J. Bruneaux, G. Folcher, C. Levy - Clement, C. Vard, M. Neumann - Spallart; (1997), İlk kez püskürtme yöntemi ile üretilen bir bağlantının fotovoltaiik özellik oluşturduğu gösterilmiştir. Makro gözenekli n-tipi silikon üzerine ince, şeffaf, iletken bir SnO₂ katmanı fotoelektrokimyasal aşındırma yöntemi ile kontak haline getirilmiştir. A.M 1.5 koşullarında %10 oranında fotovoltaiik etkiye sahip güneş pili üretmişlerdir.

Cheng ve ark. (2012), tepkiyen olarak SnO₂ ve H₂O kullanarak 300 ile 450 °C arasındaki sıcaklıklarda ALD tekniği ile büyüttükleri SnO₂ ince filmlerin taşıyıcı konsantrasyonu, taşıyıcı mobilitesi, elektriksel direnci gibi özellikleri üzerine biriktirme sıcaklığının etkisini açıklamışlardır.

Siefert (1984), In₂O₃ ve SnO₂ ince filmlerini corona püskürtme yöntemi ile hazırlamış ve filmlerin elektriksel ve optiksel özelliklerini incelemiştir. In₂O₃ ince filmleri için görünür bölgede maksimum % 88 optik geçirgenlik özelliğine sahip olduğunu bulmuştur. In₂O₃ ince filminin oluşması için minimum 350 C' de alttaban sıcaklığının olması gerektiğini vurgulamıştır. 0.36 µm kalınlığındaki In₂O₃ ince filminin özdirenci $16,5 \times 10^{-4}$ Ω.cm olarak bulmuştur. In₂O₃ ince filmlerinin % 5,5 oranında Sn katkılanması ile oluşturulan 0.22 µm kalınlığındaki ITO ince filminin özdirencini $2,0 \times 10^{-4}$ Ω.cm, % 7,6 oranında Sn katkılanması ile oluşturulan 0.33 µm kalınlığındaki ITO ince filminin özdirencini de $1,8 \times 10^{-4}$ Ω.cm değerlerinde bulmuştur. Ayrıca püskürtme yöntemi ile vakumda buharlaştırma yöntemini karşılaştırmıştır.

Antonaia ve ark. (1992), püskürtme yöntemi ile SnO₂ ince filmleri yapmışlar ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Stokiyometrik oranda su ve alkol karışımına 0.4 M SnCl₄ ile HF ilave edip püskürtme çözeltisi hazırlayarak, 440 C' de hazırlanan filmlerin taşıyıcı yük konsantrasyonu ile kristal büyüklüğü arasında fonksiyonel bir ilişki olduğunu belirlemişlerdir.

Shadia ve ark. (2010), püskürtme yöntemi ile SnO₂:F/CdS:In kontak yapısını elde etmişler ve fiziksel özelliklerini incelemişlerdir. Kontakın omik ya da yarı omik

yapıda olduğunu belirtmişlerdir. Optik geçirgenliğini ayrı ayrı cam alt tabakada büyütürken optik spektroskopisi ile incelemiştir.

Feng ve ark. (2010), CdS/SnO₂/Cam heteroeklem güneş pillerinde ince film büyütmede çözeltideki CdCl₂ oranlarının ve tavlamanın etkisini Raman spektrometresi ile araştırmışlardır. CdS ince filminin güneş pilleri için iyi bir pencere materyali olduğunu tespit etmişlerdir.

H. Iida; N. Shiba; T. Mishuku; H. Karasawa; A. Ito; M. Yamanaka; Y. Hayashi; (1993), Şeffaf olmayan SnO₂ filmin yüzeyindeki ortalama tane büyüklüğü ile a:Si H güneş pilinin dönüşüm arasındaki ilişki araştırılmıştır. Dönüşüm verimliliğinin %7,9' u AM-100mW/cm² de ortalama 0,4 µm tane büyüklüğünde SnO₂ film kullanılarak elde edilmiştir.

Jinyun Liu, Tao Luo, Sitaramanjanya Mouli T., Fanli Meng, Bai Sun, Minqiang Li and Jinhuai Liu; (2010), Boya duyarlı güneş pili uygulaması için geliştirilmiş fotovoltaiğe özelliğe sahip eşsiz bir mercan benzeri gözenekli SnO₂ oyuk mimarisi hazırlanmış ve ilk kez özel yapının oluşturulması için bir biyomimetik yutma büyüme mekanizması da önerilmiştir.

M.K.I Senevirathna, P.K.D.D.P Pitigalaa, E.V.A Premalal, K. Tennakone, G.R.A Kumara, A. Konno; (2008), TiO₂' den yapılmış boya duyarlı güneş hücreleri, geleneksel fotovoltaiğe hücrelere ucuz bir alternatif olarak kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Boya duyarlılığı için uygun olan benzer bant boşluğuna sahip diğer bilinen kararlı oksit malzemesi ise SnO₂' dir. SnO₂ bazlı hücreler ciddi rekombinasyon kayıplarına eğilimliyse de SnO₂ kristalinin ultra ince bir MgO ile kaplandığı SnO₂/MgO filmlerinden oluşan hücrelerin makul derecede yüksek verim sağladığı tespit edilmiştir. SnO₂/MgO hücrelerinin boya ve elektrolit bozulmasına TiO₂ hücrelerden daha iyi direnç gösterdiği bulunmuştur. Ayrıca, SnO₂ üzerindeki ultra ince MgO bariyeri, uzun süreli kullanım veya hücrenin depolanması sırasında bozulmadan kaldığı tespit edilmiştir.

H. Iida; N. Shiba; T. Mishuku; A. Ito; H. Karasawa; M. Yamanaka; Y. Hayashi; (1982), A:Si H p-i-n solar hücrelerin transformasyon iletken film substratları üzerindeki dönüşüm verimliliği üzerine çalışılmıştır. Şeffaf iletken filmin hazırlanma yönteminden bağımsız olarak SnO₂ film paralel plaka elektrolit tipi bir plazma C.V.D tarafından yüksek verimli hücre üretimi için ITO filmlerine göre bir avantaj sağlamıştır. SnO₂ ince

film ve a:Si H filminin hazırlık koşullarının optimize edilmesiyle %7.19'luk bir dönüşüm verimliliği elde edilmiştir.

Kirthi Tennakone, Jayasundara Bandara, Priyangi Konara Mudiyansele Bandaranayake, Gamaralalage Rajanya Asoka Kumara and Akinori Konno; (2001), Nanokristal yapıya sahip SnO₂ bazlı boya duyarlı fotoelektrokimyasal güneş pilleri, 325-375 mV'lik çok düşük açık devre gerilimlerine ve %1'lik verime sahiptir. Bununla birlikte, SnO₂ kristallerinin ince bir MgO filmi ile kaplanması üzerine, voltaj ve verim sırasıyla 650-700 mV ve %6,5'e yükselmiştir. Dış MgO kabuğundaki fotonlanmış boyaların, SnO₂'ye elektronları tünellerebileceğini ve ters tünelleme olasılığının düşük rekombinasyonları baskılayabildiğini ve böylece verimi arttıracaklarını gösteren kanıtlar sunmuştur.

Zhengdao Li, Yong Zhou, Tao Yu, Jianguo Liu and Zhigang Zou; (2012), Zn- katkılı SnO₂ fotoanotları kullanılan boya duyarlı güneş pili, daha yüksek açık devre foto voltajları, daha büyük kısa devre akımları, daha uzun elektron ömürleri ve katkısız SnO₂ muadillerinden daha fazla boya yüklemesi sergiler.

Jing Chen, Chen Li, Feng Xu, Yidan Zhou, Wei Lei, Litao Sun and Yan Zhang; (2012), Hidrotermal yöntem ile hassaslaştırılmış boya güneş hücreleri ile üst tabaka olarak SnO₂ ve alt tabaka olarak TiO₂ kullanılarak oyuk SnO₂ küreleri sentezlenmiştir. Azaltılmış transfer direnci, daha hızlı difüzyon sabitleri ve artırılmış ışık hasadı nedeniyle, çift katmanlı DSSC' nin SnO₂ üst tabakası ile performansı, SnO₂ üst tabakası olmayandan daha iyi olmuştur. Bu çift katmanlı DSSC' nin AM 1,5; 100mW/cm² ışık altında %4.15'lik bir maksimum güç dönüşüm verimliliği elde edilmiştir.

Seung-Chul Lee, Jae-Ho Lee, Tae-Sung Oh, Young-Hwan Kim; (2003), Şeffaf ve iletken olan SnO₂ ince filmler, güneş pili substratının elektrot malzemeleri için düşük maliyetli bir işlem olan sol-jel yöntemi ile geliştirilmiştir. Ön madde çözeltisi izopropil alkol içinde çözülmüş kalay izopropoksitten yapılmıştır. Hidroliz oranı, trietanolamin ilavesiyle kontrol edilmiştir. Borosilikat cam üzerine kalay oksit üzerine daldırma ve spin kaplama tekniği uygulanmıştır. İnce filmin öz direnci 0.01Ω-cm' nin altında ve geçirgenliği görünür bir aralıkta %90'nın üzerinde tespit edilmiştir.

Sibel Gürakar (2015); Püskürtme yöntemiyle büyütülen katkılı SnO₂/Si heteroeklemlerin incelenmesi; Bu çalışmanın amacı SnO₂/Si heteroeklem yapılarının elektriksel özelliklerinde yapının bir tabakası olan SnO₂ ince filmlerin Sb, Co, In, Cu ve

Al atomlarıyla katkılanmasıyla oluşacak değişiklikleri incelemektir. Bu amaçla, katkılı SnO₂ ince filmler alt tabaka olarak cam ve Si kristalleri kullanılarak püskürtme yöntemiyle büyütülmüştür. X-ışınları toz kırınım yöntemiyle filmlerin yapı analizi yapılmıştır. Filmlerin optiksel ölçümleri yapılarak yasak enerji bant aralıkları ve optiksel sabitler belirlenmiştir. İnce filmlerin iki nokta yöntemiyle iletkenlik-sıcaklık ölçümlerinden aktivasyon enerjileri hesaplanmış ve akım-iletim mekanizmaları belirlenmiştir. SnO₂/Si heteroeklem yapıların akım-gerilim-sıcaklık, kapasite-gerilim-sıcaklık ve kapasite-frekans-sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Yapılan ölçümlerden yararlanarak yapı parametreleri bulunmuş ve oda sıcaklığında yapılara ait bant diyagramları belirlenmiştir.

Koçyiğit ve ark. (2013), Farklı taban sıcaklıklarında spray pyrolysis metoduyla elde edilen SnO:Sb:F ince filmlerin bazı fiziksel özelliklerine altlık sıcaklığının etkisinin araştırılması; Bu çalışmada spray pyrolysis (püskürtme) tekniği kullanılarak cam altlık üzerine farklı taban sıcaklıklarında yüksek ve düşük çözücü konsantrasyonunda Sb ve F katkılı SnO₂ ince filmler (SnO₂:Sb:F) büyütülmüş ve elde edilen filmlerin bazı fiziksel özelliklerine, altlık sıcaklığının etkisi araştırılmıştır. XRD ölçümlerinden; ince filmlerin tetragonal polikristal yapıda oldukları ve tercihli yönelimlerin (110) ve (200) boyunca olduğu görülmüştür. UV-VIS ölçümlerinden; yüksek çözücü konsantrasyonunda elde edilen filmler %30, düşük çözücü konsantrasyonunda elde edilenler ise %85 seviyelerinde saydamlığa ve 3,10-3,71 eV aralığında değişen E_g (yasak enerji bant aralığı) değerlerine sahip olduğu anlaşılmış, sıcaklığın etkisi ile saydamlık ve E_g değerlerinin sürekli değiştiği görülmüştür.

Tuğba Kayaer (2014), Nanoyapılı SnO₂ filmlerinin sol jel spin kaplama metodu ile elde edilmesi ve karakterizasyonu; Bu çalışmada, borofloat alttaşlar üzerine sol jel spin kaplama metodu kullanılarak katkısız ve F katkılı SnO₂ filmleri elde edilmiştir. Katkısız ve F katkılı SnO₂ filmlerinin XRD desenlerinden filmlerin polikristal yapıya sahip oldukları, tetragonal rutil yapıda kristallendikleri sonucuna varılmıştır. Ayrıca filmlerin tanecik boyutu, örgü parametreleri ve yapılanma katsayısı gibi yapısal parametreleri de hesaplanmıştır. Bütün filmlerin (110) tercihli yönelimine sahip olduğu görülmüştür. Filmlerin optik bant aralıkları optik soğurma spektrumu yardımıyla belirlenmiştir. Buna göre; katkısız filmler için optik bant aralığı 3,48-4,23 eV arasında, F katkılı SnO₂ filmleri için ise 3,69-4,16 eV arasında bulunmuştur.

Miraç Alaf (2007), Kalay (Sn) ve kalay oksit (SnO_2) ince filmlerin üretim ve karakterizasyonu; saf halde bulunan kalay termal buharlaştırma yöntemi ile paslanmaz çelik üzerine farklı ortam basınçlarında biriktirilip, üretilen saf kalay kaplamaların kalay oksit esaslı filmler elde etmek için farklı altlık sıcaklıklarında DC plazma ile oksitlenmiştir. Bu ince filmlerin büyüme sırasında üretim şartlarının ve oksidasyon parametrelerinin etkisini incelemek için karakterize edilip sonuç olarak, tane boyutu 10-20nm aralığında değişen nanokristal yapıda filmler elde edilmiştir. Üretilen ince kalay oksit esaslı filmlerin lityum pil hücrelerinde geleneksel olarak kullanılan grafit anot için iyi bir numune olduğu tespit edilmiştir.

Meltem Demir (2005), SnO_2 filmlerinin bazı fiziksel özellikleri üzerine taban sıcaklığının etkisi; SnO filmleri ultrasonik kimyasal püskürtme tekniği ile 200, 250, 300 ve 350 °C taban sıcaklıklarında elde edilip, filmlerin kalınlıklarının 1.66-4.00µm arasında değiştiği ve artan taban sıcaklığına bağlı olarak kalınlıkların azaldığı belirlenmiştir. Filmlerin yasak enerji aralıklarının 3,1-3,7 eV aralığında değiştiği tespit edilmiştir. Filmlerin iletim mekanizmalarını incelemek amacıyla elde edilen I-V karakteristiklerinden filmlerin omik özellik olduğu görülmüştür.

Pien, Ting Yu (2016), Farklı tavlama koşullarına sahip SnO ve n-tipi SnO_2 ince film transistörlerin karakteristik özelliklerinin incelenmesi; Tamamlayıcı devrelerin gelişimi için p-tipi ve n-tipi TFT'leri üretmek ve optimize etmek için farklı tavlama kanallarını kullanarak kanal katmanı olarak SnO ve SnO_2 'yi kullanmışlardır.

Arote, Sandeep A. , Tabhane, Vilas A. , Pathan, Habib M.(2017); SnO_2 kullanarak boya duyarlı güneş pillerinin geliştirilmiş fotovoltaiik performansının incelenmesi; Bu çalışmada boya duyarlı güneş pili hücresi çalışması için Hidrotermal sentez yöntemi kullanılmıştır. Hazırlanan örneklerin bant aralığı SnO_2 'den daha büyüktür ve hidrotermal reaksiyon süresinde artış ile 3.64 ile 3.81 eV arasında değişmiştir. Sonuç olarak SnO_2 yapılarına sahip DSSC, sırasıyla V_{oc} , J_{sc} ve η yaklaşık olarak 0.43V, 4.36mA/cm² ve %1.11 ile iyi bir fotovoltaiik performans sergilediği gözlemlenmiştir.

Abdullah Huda, Yunos Nor Haslinda, Mahalingam Savisha, Ahmad Masrianis, Yuliarto Brian (2016); SnO_2 /SWCNTS tabanlı hassaslaştırılmış güneş pilinin fotovoltaiik ve EIS performansı; Boya duyarlı güneş pili (DSSC), bir tür ince film ve 3.Nesil fotovoltaiik aygıtlardır. Bu çalışmada, kalay dioksit/tek cidarlı karbon nanotüp

(SnO₂/SWCNT) kullanılan DSSC, doktor bıçağı tekniği kullanılarak başarılı bir şekilde üretilmiştir. SnO₂ tabanlı DSSC' de optimum SWCNT konsantrasyonunu belirlemişlerdir. DSSC' nin performansını etkileyen faktörleri analiz etmek için yapısal AFM ve XRD, optik Uv-Vis analizleri yapılmıştır.

Bouras Karima, Schmerber Guy, Rinnert Herve, Aureau Damien, Park Hyeonwook, Ferblantier Gerald, Colis Silviu, Fix Thomas, Park Chinho, Kim Woo Kyoung, Dinia Aziz, Slaou, Abdelilah (2016); Güneş pili cihazları için magnetron sıçratma ile üretilen Nd katkılı SnO₂ ince filmlerin yapısal, optiksel ve elektriksel özelliklerinin incelenmesi; Bu çalışmada, CIGS bazlı güneş pillerine eklenen foton yönetim özelliğine sahip Nd katkılı SnO₂ üzerinde çalışılmıştır. En yüksek fotovoltaiik etki ve elektriksel verilerin ölçüldüğü 300 °C' de büyütülmüş Nd katkılı SnO₂ filmi için optimal bir koşul bulunmuştur. Nd-SnO₂ filmlerinin, CIGS bazlı güneş pilleri üzerinde uygulanmasının en iyi güç dönüşüm verimliliği ile sonuçlandığı görülmüştür.

Im Jong-San, Sang I. Park, Jeon Jin-Wan, Lim Koeng Su (2009); Silisyum güneş pillerinin SnO₂ kaplı substrat üzerine üretilmesi; Tohum katmanı yerleştirme tekniği kullanılarak SnO₂ kaplamalı cam üzerine hidrojen monokristal silisyum güneş pilleri üretilmişlerdir. Tohum tabakasını kullanarak herhangi bir arka reflektör olmaksızın $V_{oc}= 0.535V$, $J_{sc}= 16,0 \text{ mA/cm}^2$, $FF= 0.677$ ve dönüşüm verimliliği $\eta= \%5,7$ olarak hesaplanmıştır. Spektral cevap ise 400-1100nm aralığında olduğu tespit edilmiştir.

El Etre A.Y & Reda, S.M, (2010); Boya duyarlı güneş pili uygulaması için elektrodepozisyon yöntemi ile üretilen nanokristalin SnO₂ ince filmin karakterizasyonu; Bu çalışmada hazırlanan SnO₂ ince filmi boyaya duyarlı güneş pili hücresinde bir elektrot olarak uygulanmıştır. SnO₂ elektrotu, eristosin boyası ile başarılı bir şekilde duyarlı hale getirilmiş ve fotoelektrokimyasal ölçümler; $J_{sc}= 760\mu A/cm^2$, $FF=0,4$, $V_{oc}=0.21V$ ve toplam dönüşüm verimliliği $\eta=\%0.06$ oranında hesaplanmıştır.

Nam-GyuPark, Man Gu Kang, Kwang Sun Ryu, Kwang Man Kim, Soon Ho Chang; (2004); Boya duyarlı SnO₂ güneş pillerinin fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi; SnO₂ güneş pili yapısı için karakteristik özelliklerinin değişimini malzemeye katkılanan Zn oranının belirlediği gözlemlenmiştir. SnO₂ filmi için AM 1.5 ışınımı altında elde edilen $V_{oc}=600mV$, $J_{sc}=9.09mA/cm^2$, $FF=\%62$ ve $\eta=\%3,4$ olarak hesaplanmıştır.

Özkartal ve Temirci (2016), Sn/p-Si Schottky tipi fotovoltaikleri termal olarak üretmişler ve arayüzey durumlarını anodik oksidasyon ve kimyasal dağlama yöntemi ile etkileyerek, değişik arayüzeylere sahip diyot ve fotovoltaik karakteristik parametreleri arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir ve bu parametreler arasında çok yakın bir ilişki olduğunu ortaya koymuşlardır.

Bu tez çalışması ile amacımız SnO₂/p-Si heteroeklem diyot üretimini, bilgilerimiz dahilinde daha önce denenmemiş olan termal buharlaştırma yöntemi kullanarak üretmek, diyot ve fotovoltaik karakteristiklerini incelemek. Yapılan karakterizasyon işlemleri sonucunda elde edilen diyot parametrelerinin literatürle karşılaştırarak, üretmiş olduğumuz diyotların nitelik olarak durumunu ortaya koymak. Böylece pratik bir yöntem olan termal buharlaştırma yönteminin SnO₂/p-Si heteroeklem diyot üretiminde de kullanılabileceği bilgisini literatüre kazandırmak.

Yüksek lisans tezi olarak ortaya koyduğumuz bu çalışmamızın birinci bölümünde konu ile ilgili literatür taraması ve çalışmanın önemini gösteren giriş bölümü, ikinci bölümde konu ile ilgili kuramsal temeller, üçüncü bölümde ise üretilen SnO₂/p-Si numunelerinin hazırlanması, deneysel aşamaları ve kullandığımız materyal-yöntem tekniği, dördüncü bölümümüzde ise akım-voltaj (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) kapasitans-frekans (C-f), iletkenlik-kapasitans (G-V) ve iletkenlik-frekans (G-f) ölçümlerinden elde ettiğimiz temel diyot karakteristik parametrelerinin yer aldığı araştırma bulguları ve beşinci bölümde ise numuneler üzerinde alınan ölçümlerin literatür değerleri ile karşılaştırılıp yorumlanması ve tartışılması kısmı yer alacaktır.



2. KAYNAK BİLDİRİŞLERİ

2.1. Yenilenebilir ve Temiz Enerji Kaynağı

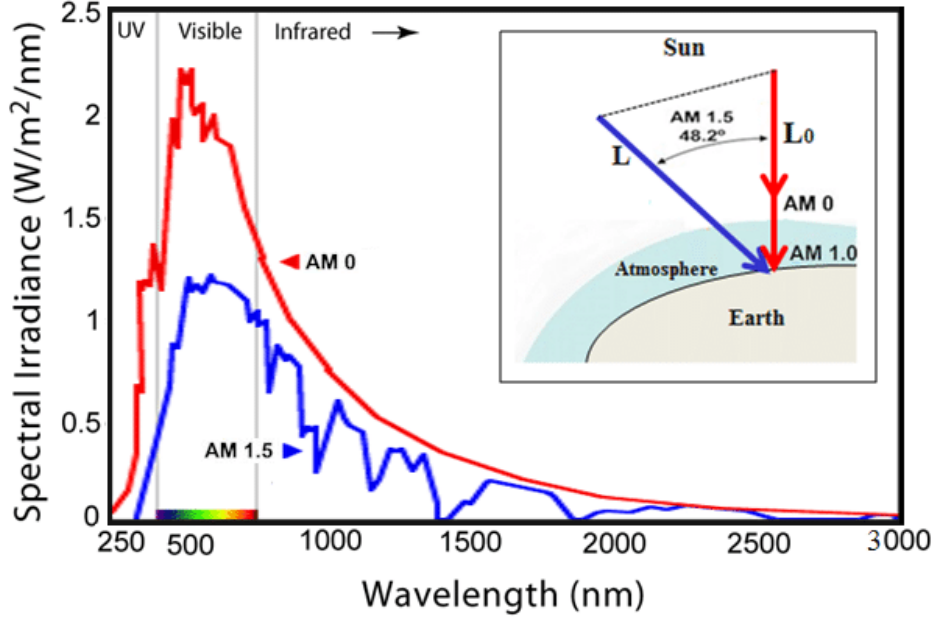
Son yüzyılın en çok kullanılan yakıtları arasında yer alan fosil yakıtlar, oluşması binlerce yılı bulmakta fakat tüketimi hızlı bir şekilde gerçekleşmektedir. Bununla beraber çevreye verdiği zararları göz önüne aldığımızda yenilenebilir ve daha temiz enerji kaynaklarına yönelmek insanoğlu için daha avantajlı bir durum oluşturmaktadır.

Gezegemimizin ısı ve ışık gibi yaşam kaynağının temellerini oluşturan güneş, doğal dengemizi korumakla beraber insanoğlunun enerji ihtiyacını karşılamak için büyük bir fırsattır. 5 milyar yıldan daha fazla süredir hayatta olan güneş, dünyanın varoluşundan bugüne kadar kusursuz bir biçimde bizlere enerji kaynağı olmaya devam etmektedir. Nükleer enerji ve fosil yakıt gibi enerji kaynakları ile kıyaslandığında güneş enerjisi insanoğlunun geleceği açısından büyük önem arz etmekte ve tükenmek bilmeyen bir enerji kaynağını ön plana çıkarmaktadır. İnsanoğlunun gelecekte yaşamını sürdürebilmesi için güneşten faydalanması ve fotovoltaik dönüştürücüler üzerinde daha çok çalışılma yapılması gerekmektedir. Günümüz teknolojisinde hala maliyeti yüksek olup kullanım alanları istenilen oranda gelişmemiş olan güneş pilleri (fotovoltaikler) gelecek neslin kurtuluş anahtarı olarak görülmektedir.

2.2. Güneş Enerjisi

Güneş enerjisi milyonlarca yıldır kullandığımız ve hala günü gününe tükettiğimiz bir enerji kaynağıdır. Yüzey sıcaklığı 6000 Kelvin ve çekirdek sıcaklığı yaklaşık olarak 2×10^7 Kelvin olan güneşimizin üçte birini yalnız başına hidrojen gazı ve geriye kalan kısmını ise helyum ve bazı elementler oluşturmaktadır. Güneş enerjisi, güneşten gelen ışınların dünyaya ulaşması ile elde ettiğimiz bir enerji türüdür ve maliyeti insanoğlunun doğaya zarar vermediği sürece bedavadır. Dünya atmosferi dışında ışınlam şiddeti ortalama 1300W/m^2 iken bu değer dünya yüzeyi üzerinde $0-1000 \text{W/m}^2$ değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. Bu durumun başlıca nedenleri arasında dünyamızın geoid bir yapıya sahip olması, ışımların atmosferdeki gaz

tabakaları nedeniyle emilmesinden dolayı oluşmaktadır. Güneşten gelen ışımaların atmosferde aldıkları yol gün boyu değişmekte olup bu değişim güneş ile tepe noktası arasındaki açının hava kütlesi (air mass); AM olarak ifade edilmiştir. Aşağıdaki şekilde güneşten dünya üzerine gelen ışımaların dalga boylarına ve radyasyon yoğunluğuna göre değişim grafiği verilmiştir.

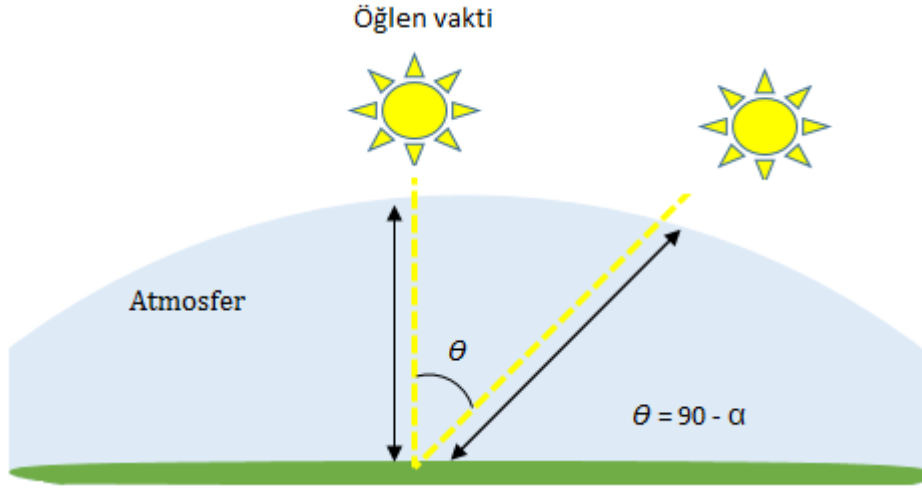


Şekil 2.1. Güneş ışığı spektrumu (Dagher, 2014).

Şekil üzerinde atmosfer dışındaki (AM0) ve atmosfer içindeki (AM1.5) ışık yoğunluğunun spektral değerleri görülmektedir. Güneş ışınlarının atmosfere olan yol uzunluğu (L); ve güneş ışınlarının dünya yüzeyine olan en kısa mesafesi (L₀) olmak üzere yüzeye gelen ışık şiddetinin gücünü ölçmemizi sağlayan eşitlik (2.1) aşağıda verilmiştir.

$$AM = \frac{L}{L_0} \approx \frac{1}{\cos \theta} \quad (2.1)$$

Bu eşitlik bize, güneş ışınlarının yeryüzü ile yaptığı açı değerinin arttıkça ışık yoğunluğunun azalacağını göstermektedir.



Şekil 2.2. Güneş ışınlarının yeryüzüne gelme açısının değişimi.

Güneş ışınlarının dünya yüzeyine doğru gelme açısının değişimi Şekil 2.2 de detaylı bir şekilde görülmektedir. Aşağıda farklı AM ve buna bağlı açı değerlerine karşılık gelen ışık yoğunluğu değerleri verilmiştir (Özmenteş, 2017).

AM0: (1353 W/m²): Dünya atmosferi dışındaki ışık yoğunluğu, (Açı değeri 0).

AM1: (1040 W/m²): Güneş ışınlarının dik bir şekilde dünya yüzeyine ulaştığı durum, (Açı değeri 0).

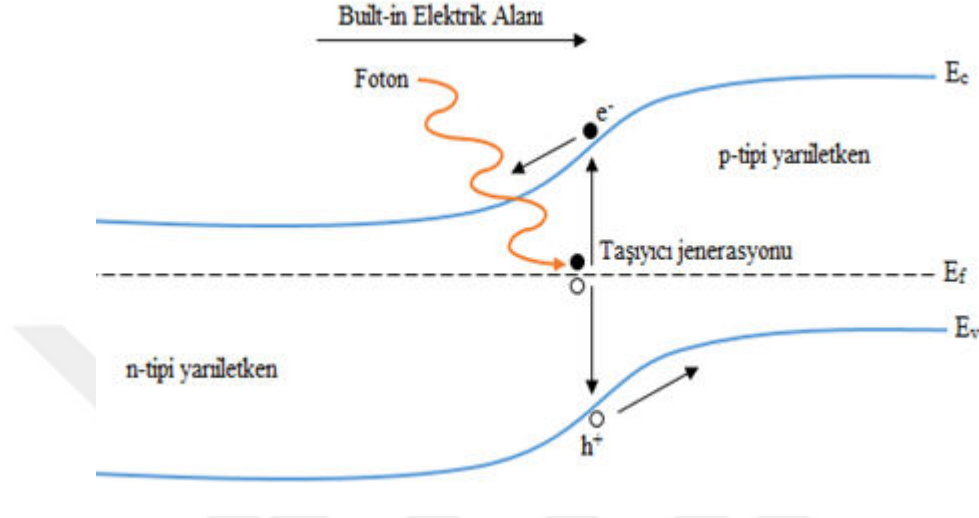
AM1.5: (930 W/m²): Güneş ışınlarının dünya yüzeyindeki etkisini hafif bir şekilde kaybettiği durum, (Açı değeri 48,2).

AM2: (840 W/m²): Güneş ışınlarının yeryüzü ile yaptığı açı değeri 60 derece iken ışık yoğunluğunu ifade eder.

2.3. Güneş Pilleri

Güneş pilleri, foton enerjisini fotovoltajik yolla doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren elektronik aygıtlardır. Basit bir biçimde anlatılmak gerekirse bir yarı iletken n ve p tipi bölgeler oluşturmakla yapılabilir. Bu n ve p tipi bölgelerin kesişim noktasında yük farklılığından oluşan bir elektrik alan meydana gelir. Güneş ışınları n ve p tipi bölgeleri arasında veya bu bölgeye yakın noktalarda elektron-boşluk çifti oluşturarak yüklerin akmasını sağlar. Güneş pilinin uçları tamamlayıcı bir devreye

bağlandığı anda doğru akım meydana gelir ve bu akıma fotovoltaik akım denir. Fotovoltaik süreç ışığın aygıt üzerine düştüğü sürece devam eder. Aşağıdaki şekilde bir fotovoltaik aygıtın çalışma ilkesi görülmektedir.



Şekil 2.3. Fotovoltaik aygıtın çalışma ilkesi (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

Aygıt içerisine düşen fotonun enerjisi eğer aygıtın yasak enerji bant aralığından büyük ise ısı enerjisi olarak kristal örgüye aktarılır. Enerjisi yasak enerji bant aralığından daha küçük olan fotonlar ise aygıtı oluşturan yarıiletkenler ile hiçbir etkileşime girmeden aygıtı terk ederler. Dolayısıyla aygıt, enerjisi düşük olan bu tür fotonlar için açık bir kapı görevi görür. Bu gibi düşük enerjili fotonların pil çıkışına hiçbir katkısı olmaz.

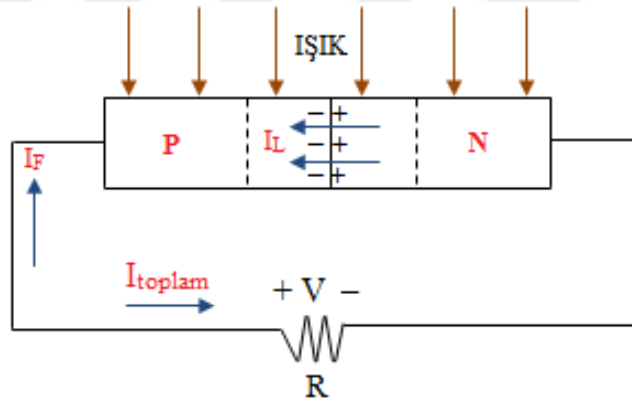
Yeterli enerjiye sahip olan fotonların ise elektron-holl çiftleri üreterek içeride oluşan iç yapılanma potansiyeli aracılığıyla aygıtın eklem bölgesine sürüklenirler ve zıt kutuplara ayrıştırılırlar.

Çalışma prensibi bu şekilde olan bir güneş pilinin yüksek verim sağlayabilmesi için bazı parametrelerin optimal şartları sağlaması gerekmektedir. Örneğin soğurucu tabakanın yeterince ince olması aygıt üzerine düşen fotonların büyük bir bölümünün absorbe edilmesini sağlar. Dolayısıyla soğurucu tabakanın ince olması üretilen filmin kalitesini de bir o kadar önemli kılmaktadır. İnce film kalitesinin yanısıra aygıtın yasak enerji bant aralığının da ideal seviyede olması gerekir. Aygıtın yasak enerji bant aralığının gelen fotonun enerjisinden ne çok büyük ne de çok küçük olması gerekir.

Böyle bir durumda foton soğurucu tabaka tarafından absorbe edilmeden aygıtı terk edebilir veya aygıtın aşırı derecede ısınmasına sebep olabilir. Gelen fotonun enerjisinin $h\nu \approx E_g$ veya $h\nu \geq E_g$ olması pilin çıkış gücü açısından büyük önem arz etmektedir.

Bir güneş pilinden elde edilen akım ortalama 20mA/cm^2 ve pilin uçları arasındaki gerilimde yaklaşık 0.5V olduğundan yüksek akım veya gerilim oluşturmak için güneş pillerini seri veya paralel bir biçimde bağlamak gerekir (Engin, 1995).

Genel olarak DC akım üreten güneş pilleri kullanım amaçlarına göre invertörler (dönüştürücü) yardımı ile AC akıma da dönüştürülebilirler. Güneş pilleri üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı evlerin elektrik ihtiyaçlarının giderilmesine pek cevap veremese de şehir dışında bulunan yapılarda, trafik levhaları, telefon bataryalarının şarj edilmesinde ve aşınmaya karşı metalik inşaların korunmasında kullanılmaktadır.



Şekil 2.4. Bir p-n eklem diyotta fotovoltajik etki.

Şekil 2.4'te I_L ; p-n eklem uzay yük bölgesine düşen fotonlardan dolayı oluşan fotoakım ve I_F ; doğru beslem altında oluşan doğru akım olmak üzere eşitlik (2.2) de ideal diyot ($n = 1$) için;

$$I = I_L - I_F = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

Fotoakım daima ters beslem yönündedir. İki durum söz konusudur. Bunlardan biri kısa devre durumu, diğeri ise açık devre durumudur. Eşitlik (2.2) ifadesinde kısa devre durumu için $V = 0$ ve $R = 0$ ve ikinci terim sıfır olur, böylece;

$$I = I_L = I_{sc} \quad (2.3)$$

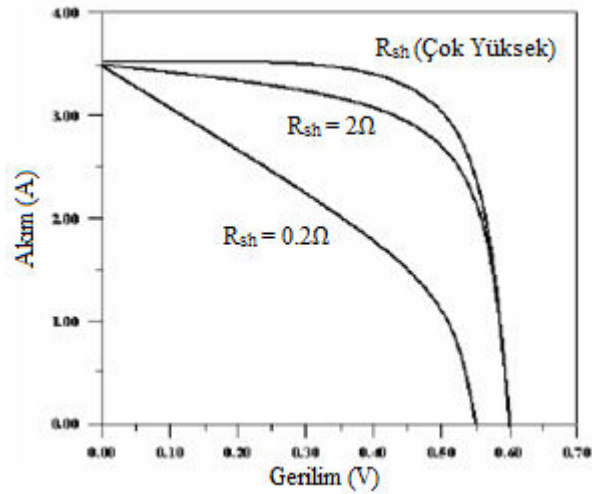
olur. Burada I_{sc} ; kısa devre akımını göstermektedir. Açık devre durumunda direnç sonsuz olur ($R \rightarrow \infty$) ve net akım sıfır olur. Eşitlik (2.2) ifadesi aşağıdaki eşitliğe indirgenir:

$$I = 0 = I_L - I_o \left[\exp\left(\frac{eV_{oc}}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.4)$$

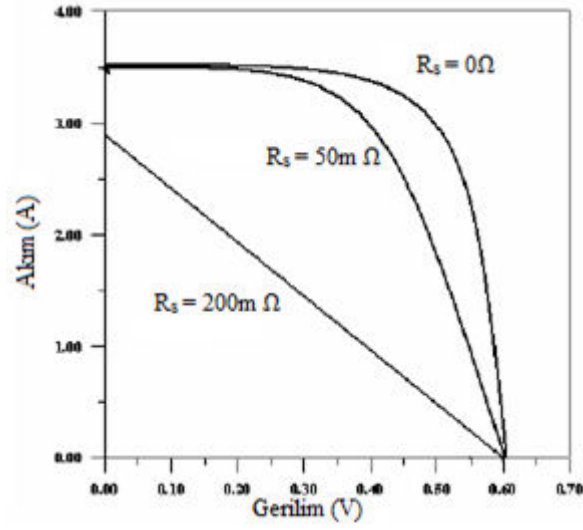
Bu son ifadede V_{oc} ; açık devre gerilimini gösterir. Eşitlik (2.4) denklemini V_{oc} 'ye göre çözümlenirse;

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_L}{I_o} \quad (2.5)$$

elde edilir.

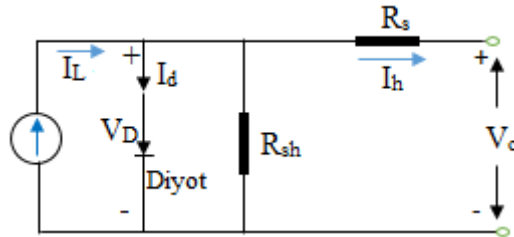


Şekil 2.5. $R_s = 0$ durumunda paralel direncin etkisi (Özkartal, 2015).



Şekil 2.6. $R_{sh} = \infty$ durumunda seri direncin etkisi (Özkartal, 2015).

İdeal bir güneş pili yapısında seri direncin mümkün olduğunca düşük ve paralel direncin ise olabildiğince büyük olması gerekir. Seri direncin artması kısa devre akımı ve açık devre gerilimini azaltacağı gibi paralel direncinde çok küçük değerleri aynı şekilde bu olaya sebebiyet verecektir.



Şekil 2.7. Güneş pili eşdeğer devresi (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

Şekil 2.7' de bir güneş pilinin temel devresi ve bu devrede bir diyot ile devre üzerinde seri ve paralel dirençler gösterilmektedir. R_s ve R_{sh} burada sırasıyla seri ve paralel direnci temsil etmektedir.

Güneş pillerinin üretimi günümüz teknolojisinde pek de maliyetli olmamasına karşın bu üretimin ülkemiz çapında üretimi olanaklı gözükmemektedir. Geleceğin enerji ihtiyacını karşılayacak ve hala bebeklik döneminde olan bu teknoloji üretmediğimiz sürece bizi dışarıya bağımlı olmaktan kurtaramayacaktır.

Bir güneş pili yapısının oluşabilmesi için en önemli faktör öncelikle diyot özelliği gösteriyor olmasıdır. Şekilde görüldüğü gibi güneş pili yapısı iki temel

tabakadan oluşmaktadır. Bu tabakalarda biri güneş ışığını soğuran ve burada elektron-boşluk çifti üreten tabaka, diğeri ise bu oluşan taşıyıcıları toplayan tabakadır. Bunlara sırasıyla absorber ve collector denir.

Güneş pilleri genel olarak birbirine seri ve paralel bağlı dirençler içerirler. Burada seri dirence R_s ve paralel dirence R_{sh} denilmektedir. Seri dirence neden olan başlıca fiziksel nedenler arasında; güneş pili üretiminde kullanılan yarıiletkenin direnci, bağlantılar arasında kullanılan metalin direnci ve metal bağlantılar ile yarıiletken arasında oluşan dirençler olarak sıralayabiliriz. R_{sh} yani paralel direncin oluşmasına neden olan katkılar arasında ise; eklem bölgesinde oluşan sızmalar, kristal yapıdaki kusurlar ve eklem bölgesindeki safsızlıklar olduğunu söyleyebiliriz.

2.4. Güneş Pili Karakteristikleri

Güneş pilinin akım-voltaj eğrisi ışık olmayan ortamlarda normal bir p-n kavşağın karakteristiğini vermektedir. Dışarıdan herhangi bir gerilim uygulanmadığı sürece diyottan akım geçmemektedir. Işık altına bırakıldığı anda ise devrede bir elektrik akımı meydana gelmektedir. $J(A/cm^2)$; birim yüzeye düşen akım yoğunluğu V (volt); malzeme üzerinde oluşan gerilim olmak üzere, fotonlardan kaynaklanan akımın artması eğriyi pozitif bölgeye taşıyacaktır.

Bir güneş pilinin karakterizasyonunu gösteren birçok parametre mevcuttur. Bunlar; açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), doluluk oranı veya dolum çarpanı (FF), ve dönüştürme verimi (η) dir. Bu parametreler altında üretilen bir güneş pilinin kalitesi, kullanım ömrü, maliyet tablosu gibi özellikler aşağı yukarı tahmin edilebilmektedir.

2.4.1. Bir güneş pilinin aydınlıkta ve karanlıkta akım-voltaj karakteristiği

Doğrultucu bir kontağın akım-voltaj karakteri Termiyonik Emisyon Teorisine dayanır. Doğrultucu özellikten dolayı ters beslem akımı ihmal edilebilecek kadar küçük, doğru beslem akımı ise üstel bir nitelik gösterir. Dolayısıyla bir Schottky diyotun

karanlık altındaki akım-voltaj ilişkisi şu şekilde ifade edilebilir (Rhoderick ve Williams, 1988);

$$I = \left[AA^*T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.6)$$

bu denklemdaki ilk terim sızıntı akımıdır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.7)$$

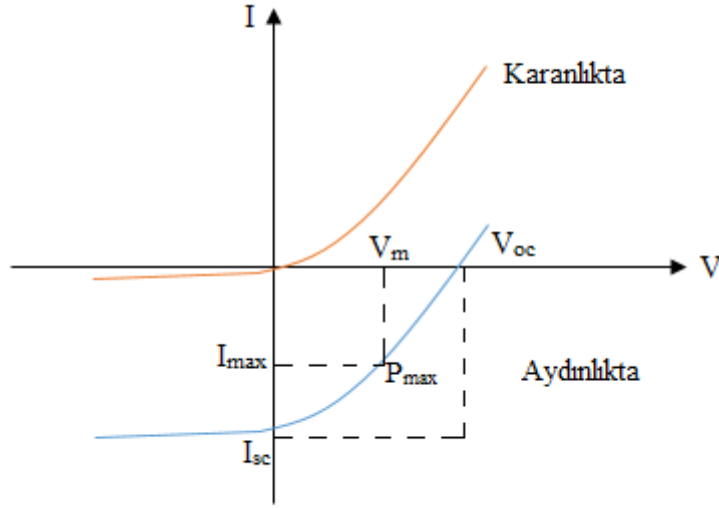
Burada A; diyot alanı, A^{*}; Richardson sabiti (p-Si için 32 A/cm²K²) ve Φ_b; engel yüksekliğini ifade etmektedir. 2.7 eşitliğini dikkate alarak, 2.6 ifadesi yeniden yazılırsa;

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.8)$$

Burada e; elektronun yükü, V; uygulanan gerilim, k; boltzman sabiti, T; mutlak sıcaklık, n; idealite faktörünü ifade eder. Aygıtta yaklaşık olarak 75 mV' tan daha büyük bir gerilim uygulandığı zaman; $eV \gg nkT$ olur ve parantez içerisindeki 1 değeri $\left(\frac{eV}{nkT}\right)$ nin yanında çok küçük kalacağından ihmal edilebilir. Dolayısıyla (2.8) denklemini aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] \quad (2.9)$$

Güneş ışığı etkisi altında oluşan akımın yönü ile karanlık altındaki akımın yönü ters yönlüdür. Bundan dolayı net akımı yazarken her iki akımın farkını almamız gerekmektedir. Aydınlıkta bir diyotun akımı;



Şekil 2.8. Güneş pilinin aydınlık ve karanlıkta I-V grafiği.

$$I = I_o \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \right] - I_L \quad (2.10)$$

Buradaki I_L , güneş pilinin aydınlıkta fotonlar tarafından üretilen akımı göstermektedir. Sonuç olarak net akım ifadesini aşağıdaki gibi ifade edebiliriz;

$$I = I_f - I_L \quad (2.11)$$

Bir fotovoltaik aygıtın karakteristik parametreleri Şekil 2.8 de gösterilmiştir. Başlıca güneş pili karakteristikleri ve tanımları aşağıda verilmiştir.

Açık Devre Gerilimi (V_{oc}): Güneş pilinin uçları arasındaki direnç sonsuz iken yani devre açık iken ölçülen gerilime açık devre gerilimi denir. Bir p-n eklem yapıda açık devre geriliminin yapının ara yüzeyi ile doğrudan ilişkisi vardır. Bir p-n eklem güneş pilinde açık devre gerilimi (2.5) eşitliğinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$V_{oc} = \frac{kT}{e} \ln \frac{I_L}{I_o} \quad (2.12)$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere açık devre geriliminin idealite faktörü ile doğrudan bir ilişkisi olduğu görülüyor. İdeal bir diyotta idealite faktörünün 1 olması gerekmektedir. Bu durum ancak akım iletiminin termiyonik emisyon ile gerçekleştiği zaman mümkün olmaktadır. Şayet 1 den büyük olduğu durumlarda ise akım iletiminin rekombinasyon ve jenerasyon akımlarının baskın olduğunu ifade eder ki, bu durum bize bir güneş pilinde V_{oc} ' yi bulmamıza yardımcı olur. Özetle açık devre gerilimini arttırmak için; güneş pilindeki sıcaklığın düşük tutulması, rekombinasyon ve jenerasyon akımlarının düşük olması arzu edilir (Aydoğan, 2015).

Kısa Devre Akımı (I_{sc}): Oluşturulan kontaklar arasındaki gerilim farkı sıfır iken ölçülen akıma kısa devre akımı denir. Kısa devre akımı fotonların oluşturduğu yük taşıyıcılarının sayısına ve bu yüklerin dış devrede ayrılıp toplanma hızlarına bağlıdır. Kısa devre akımını arttırmak için aygıtın tüm seri direnci mümkün olabildiğince küçük olmalıdır. Aygıtın sıcaklığı kademeli olarak arttırıldığında V_{oc} azalırken I_{sc} ' nin arttığı görülür. Ayrıca yarı iletkenin bant aralığının azalması oluşan elektron-holl çifti sayısının artmasına neden olacağı için bu durum kısa devre akımını arttırmaya yönelik bir eğilimde bulunacaktır.

Dolum Çarpanı veya Dolgu Faktörü [Fill Factor: (FF)]: Dolum çarpanı ışınım altındaki akım-gerilim eğrisinde akımların eksi, gerilimlerin pozitif olduğu bölgede hesaplanan en büyük değerinin $V_m \times I_m$ çarpımının, $V_{oc} \times I_{sc}$ ye oranı olarak tanımlanır.

Dolayısıyla dolum çarpanı;

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (2.13)$$

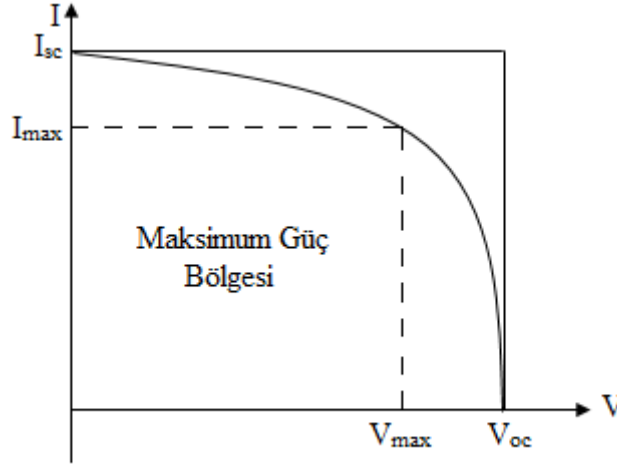
ifadesi ile tanımlanır.

Dönüştürme Verimi (η): Bu aşamaya kadar tanımlanan karakteristik parametreler belirlendikten sonra aygıtın ürettiği elektrik enerjisi hakkında bilgi edinebilmek için dönüştürme verimi ifadesinden faydalanırız. Dönüştürme verimini dolum çarpanı ifadesine göre yazacak olursak;

$$\eta = \frac{\text{Çıkış gücü}}{\text{Giriş gücü}} = \frac{V_m \times I_m}{P_{gir}} = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times FF}{P_{gir}} \quad (2.14)$$

Burada P_{gir} birim yüzeye düşen gücü ifade eder.

Maksimum Güç (P_{max}): Güneş pili üzerinde ölçülen akım-voltaj karakteristiğinin



Şekil 2.9. Bir güneş pilinin akım-voltaj eğrisi.

gösterdiği maksimum akım ile maksimum gerilim noktalarının çarpımı bize P_{max} verir. Pilden alınabilecek maksimum güç pilin akım-voltaj eğrisi içerisine çizilebilecek maksimum alanlı dikdörtgen yapının alanına eşittir.

Güneş pili yapılarında verimi sınırlayan en önemli faktörlerden birisi de fotonları absorbe eden soğurucu tabakadır. Güneşten gelen bu fotonlar elektron-boşluk çiftleri oluşturarak yarı iletken tarafından soğurulur. Bu tabaka genellikle yarıiletken malzemenin bant aralığı da büyük önem taşımaktadır. Gelen ışınımın belli bir kısmı geriye yansıyor kalan kısmı da yarı iletken tarafından hapsedilmektedir. Dolayısıyla yarı iletken içerisine giren ışınım $hV > E_g$ ise elektron-boşluk çifti oluşur, $hV < E_g$ ise fotonlar enerjilerini yarı iletken malzemenin atomlarına aktararak numunenin ısınmasına neden olarak yok olurlar.

2.5. Yarıiletkenler

Doğamızda var olan atomlar elektriği iletip iletmeme özelliklerine göre üç grupta değerlendirilir. Bunlar elektriği iyi iletebilme özelliğine sahip iletkenler, elektriği

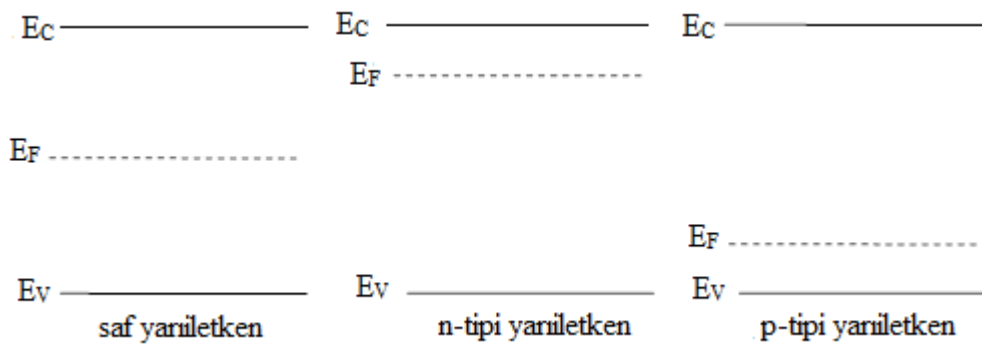
iletememe özelliğine sahip yalıtkanlar ve elektriği dışarıdan herhangi bir eylemin etkisi ile iletebilme özelliğine sahip yarıiletken malzemelerdir. Yarıiletkenler doğada saf halde buldukları gibi bileşik yapılarda da bulunabilirler. Silisyum, Germanyum ve Selenyum gibi yarıiletkenler elektronik teknolojisinin önde gelen yarıiletken malzemeleridir. Yine yarıiletken malzeme olarak kullanılan Kalay oksit, Bakır oksit, İndiyum fosfür, Galyum arsenik ise bileşik yarıiletkenler olarak üretilip kullanılmaktadırlar. İletkenlik özelliklerine göre üç farklı kategoride yer alan bu malzemelerin özdirençleri arasında;

İletkenler: Özdirenci $< 10^{-4}\Omega$

Yalıtkanlar: Özdirenci $> 10^{12}\Omega$

Yarıiletkenler: İletkenlikleri, içerisine katılan malzemenin miktarına bağlı olarak değişen bu malzemelerin özdirençleri iletken ve yalıtkan özdirenç değerleri arasında değişmektedir. Fakat bu değer, iletkenlik katsayısına daha yakın bir aralıkta yer almaktadır.

Günümüz teknolojisinde kullanılan ve birçok elektronik devre elemanlarının yapıtaşını oluşturan yarıiletkenler gelecek zamanın teknolojisi açısından büyük önem taşımaktadır. Oda şartları altında yalıtkan özellik sergileyen bu malzemelerin en büyük özelliği ise katkı malzemesi ekleyerek (doping yaparak) elektriksel iletkenliklerinin değiştirilmesidir. Örneğin silisyum gibi bir yarıiletkene periyodik cetvelin III. grubundan uygun bir element katılırsa değerlik bandı yukarı bir şekilde bükülme sergileyerek p-tipi yarıiletken oluşmuş olur. P-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları hol adı verilen ve elektronun geride bıraktığı boşluktur.



Şekil 2.10. Farklı yarıiletken özelliklere sahip enerji-bant diyagramı.

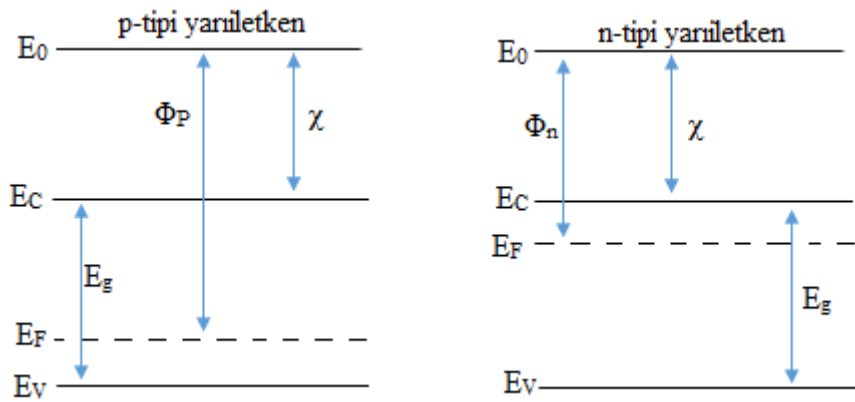
Yine silisyuma periyodik cetvelin V. grubundan bir yarıiletken katılanırsa bu sefer değerlik bandının aşağı doğru çekildiği görülür ve bu tip yarıiletkenlere ise n-tipi yarıiletkenler adı verilir. N-tipi bazlı yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları elektronlardır.

Şekil 2.10 da görüldüğü gibi saf bir yarıiletken malzemede fermi enerji düzeyi iletkenlik bandı ile valans bandının ortasında yer alırken n-tipi yarıiletkende bu seviye iletkenlik bandına, p-tipi yarıiletkende ise valans bandına daha yakın bulunmaktadır.

Valans elektronların bulunduğu banda valans bandı (E_v), bu bandın üzerinde bulunan izinli banda ise iletkenlik bandı (E_c) denir. Mutlak sıcaklık noktasında elektronların hepsi valans bandında yer alırlar. Dışarıdan gelen herhangi bir etkinin sonucunda (sıcaklık, manyetik alan, ışık vb.) valans bandındaki bu elektronlar kazanmış oldukları enerji sayesinde yasak enerji bant aralığını geçerek iletkenlik bandına ulaşırlar. Yasak enerji bant aralığını (E_g) geçmeleri için absorbe ettikleri enerji bu bant aralığının enerjisine eşit veya büyük olmak zorundadır. Aksi halde E_g ' den daha az olan bu enerjileri depolayıp malzeme içerisinde ısınmalara yol açacaktır.

2.6. p-n Eklemler

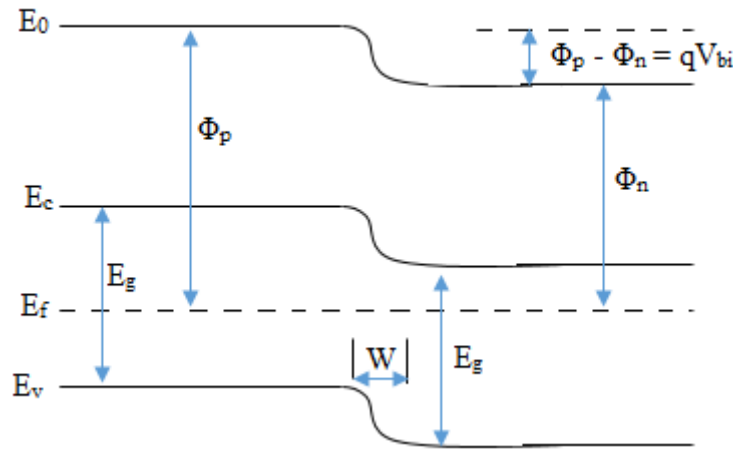
pn eklemi, p-tipi ve n-tipi iki yarıiletkenin kontak haline getirilmesi ile oluşturulur. Yasak enerji bant aralık değerleri farklı olan bu iki yarıiletkenin kontak haline getirilmesine heteroeklem denir. Eğer yapı aynı tür eklemlerden meydana geliyorsa, yani (n-tipi; n-tipi veya p-tipi; p-tipi) bu tür yapılara homoeklem yapı



Şekil 2.11. p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlere ait enerji bant seviyeleri (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

denilmektedir. Güneş pili, diyot, transistör, tristör ve optoelektronik aygıtlar gibi teknolojide önemli yer edinen bu malzemelerin temel yapı taşı heteroeklem yapıları oluşturmaktadır. Geniş bir kullanım alanına sahip olan bu yapının üretiminde dikkat edilmesi gereken bazı hususlar mevcuttur. Bunlar arasında kontak haline getirilecek olan malzemelerin örgü sabitlerinin uyumlu olması, gerilim farklarından kaynaklanan uyuşmazlığın en aza indirilmesi gibi önemli parametreler yer alır. Heteroeklem bir yapıya sahip materyalin kontak oluşmadan önceki enerji-bant diyagramı aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

Φ_p ve Φ_n sırasıyla p-tipi ve n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu, V_{bi} içyapı potansiyeli, E_0 vakum seviyesi, E_g yasak enerji bant aralığı, E_c iletkenlik bandı, E_v valans bandı, E_f fermi enerji seviyesi ve χ yarı iletkenin elektron ilgisi göstermektedir. P-tipi ve N-tipi yarıiletkenlerine ait enerji bant yapılarının kontak haline gelmeleri durumunda aşağıdaki şekilde görüldüğü gibi bir bükülme meydana gelir.



Şekil 2.12. PN eklemi ve eklemeye ait enerji bant diyagramı (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

N-tipi yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar, pozitif yüklü p-tipi yarıiletken bölgesine geçerken arkasında pozitif yüklü safsızlık atomları bırakırlar. Pozitif yüklü bu safsızlık atomlarının işgal ettiği bölgeye deplasyon bölgesi denilmektedir. Şekil 2.12 de deplasyon bölgesi (w) ile gösterilmiştir. P tipi yarıiletken bölgeye geçen bu elektronlar yine bu bölgedeki holler ile birleşerek nötr atomları meydana getirirler. Elektronların yük yoğunluğundan kaynaklanan p bölgesine

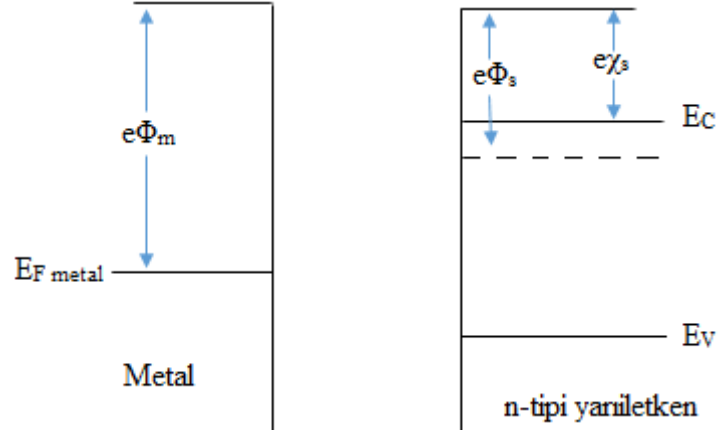
difüzyonu yine p bölgesinde azınlık olan elektronlar tarafından itilmesi sonucu bir süre sonra denge halini almalarına neden olur. Bu dengelenme sonucunda n-tipi elektronları eklemeye kontağa uzak tarafında birikmesine yol açar. Bu olayın tam tersi durumunda yine n-tipi elektronlarının p bölgesindeki hareketleri gibi p hollerinin de n bölgesinde aynı fiziksel oluşumları sergileyeceğini söyleyebiliriz.

2.7. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Bir metal ile bir yarıiletken arasında iki tip kontak oluşabilmektedir. Bunlardan birincisi Schottky kontak olarak adlandırdığımız lineer bir akım-gerilim karakteristiğine sahip olmayan doğrultucu kontak, diğeri ise akım-gerilim karakteristiği lineer bir yapıya sahip olan omik kontaklardır. Metal ile yarıiletkenin kontak haline getirilmesi hususunda bu iki kristalin aralarında minimum bir direnç değeri olması gerektiği anlamına gelir. Oluşabilecek direnç değerinin en aza indirilebilmesi için kontak yapımında kullanılacak olan metal ile yarıiletken kristallerinin elektrostatik özellikleri ve yüzey pürüzsüzlükleri (temizlikleri) büyük önem taşımaktadır. Kontak haline getirilecek olan malzemelerin farklı enerji-bant seviyelerinden kaynaklanan bir yapıya sahip olmaları, kontak oluştuğu anda metal ile yarıiletken arasında fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar bir yük alışverişi gerçekleşir.

2.7.1 Metal/n-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak

Bir metal ile n-tipi yarıiletken bir malzemeyi ele alalım. Kontak oluşumundan sonra metalin üzerine düşecek fotonların metal üzerinden koparacakları elektronları vakum ortamına itebilmeleri için uygun bir enerji seviyesine sahip olmaları gerekir. Bu enerjinin ise en az $E = h\nu$ enerjisinin Φ_m ile gösterilen metalin iş fonksiyonuna eşit veya daha büyük olması gerekmektedir. İşte burada metalin fermi enerji seviyesindeki bir elektronu metalden uzaklaştırmak için gerekli olan enerjiye metalin iş fonksiyonu diyebiliriz. Aynı şekilde yarıiletkenin sahip olduğu iş fonksiyonu ise (Φ_{sc}) bir elektronu bulunduğu yarıiletkendeki fermi seviyesinden uzaklaştırmak için gerekli olan enerji olarak tanımlayabiliriz.



Şekil 2.13. Metal ve n-tipi yarıiletken için temas öncesi enerji-bant seviyeleri (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

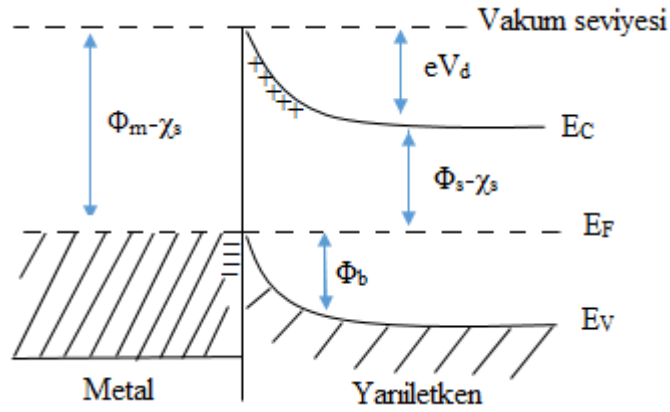
Metal ile yarıiletken temas haline getirildikleri zaman Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar aralarında bir yük alışverişi meydana gelir. Bu yük alışverişinde yarıiletkenin iletkenlik bandından metale doğru elektronların geçişi gözlemlenir. Elektronların geçiş durumu bittiğinde ise termodinamik denge sağlanmış olur. Yarıiletkenden metale doğru geçen bu elektronlar arkalarında pozitif yüklü donör atomları bırakırlar. Bu etkileşim sonucunda yarıiletkenin yüzeye yakın olan bölgesi ile metal yüzey arasında bir deplasyon (uzay yükü) bölgesi oluşur. Bu bölgenin sonsuz incelikte olduğu kabul edilir. Metal ile yarıiletkenin temas oluşturmalarından sonra Fermi enerji seviyelerinin eşitlenmesi ve arada oluşan bir uzay yükü bölgesi oluşması yarıiletken tarafındaki bant bükülmesi;

$$qV_i = q(\Phi_m - \Phi_{sc}) \quad (2.15)$$

ifadesine eşit olacaktır. Metal ile yarıiletken arasında oluşan bu bant bükülmesi fazla elektronların metale geçmesini engelleyen bir potansiyel engeli oluşmasını sağlar. Metal içerisindeki elektronlar;

$$\Phi_b = (\Phi_m - \chi) = V_i + (E_c - E_f) \quad (2.16)$$

eşitliği ile verilen bir Φ_b potansiyel engeli ile karşılaşırlar.



Şekil 2.14. Metal ve n-tipi doğrultucu kontağa ait kontak hali enerji-bant seviyeleri (Biber, 2000, düzeltilmiş).

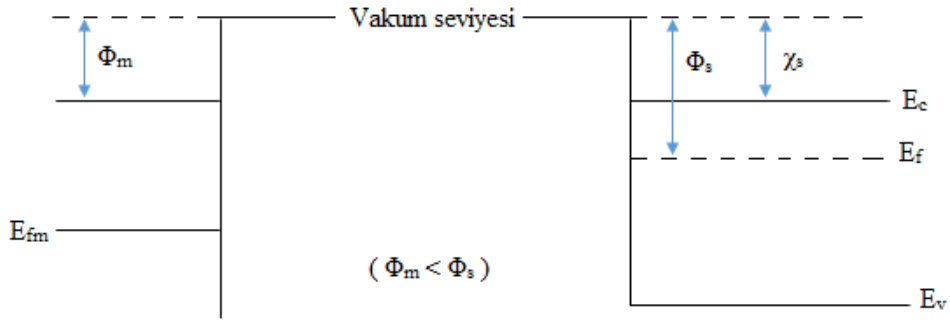
Sonuç olarak oda sıcaklığındaki bu potansiyel duvarını sadece termal yol ile enerji kazanan bazı elektronlar aşabilmektedir. Bu engeli aşıp yarıiletken den metale geçen elektronların oluşturduğu akım I_{m-s} ile gösterilir. Bu akım sızıntı akımı (I_o) olarak bilinir. Bunun nedeni ise elektronların hareket yönü ile elektrik akımının hareket yönünün ters olmasından kaynaklıdır.

Metal-yarıiletkenden oluşan bu kontak yapıya bir doğru beslem voltajı uygulandığı anda yarıiletken tarafında oluşan engel potansiyeli (V_d) azalır ve metal tarafa daha fazla elektron geçişi sağlanmış olur. Böylece ters yönde metalden yarıiletkene doğru oluşan elektron akışı ise kesilmiş olur.

2.7.2. Metal/n-tipi yarıiletken omik kontak

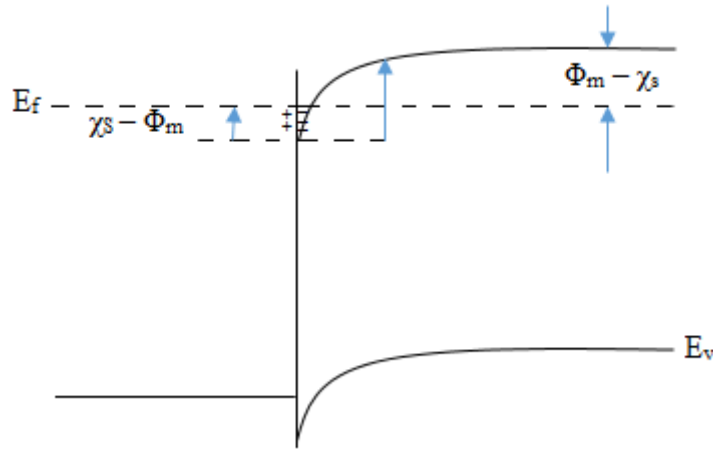
Omik kontak; ohm yasasına uyan ($V=I.R$) dolayısıyla doğrultucu özellik göstermeyen ve metal ile yarıiletken arasındaki direnç minimum düzeyde olan bir kontak yapısıdır.

Şekil 2.15' de görüldüğü üzere bir metal ile yarıiletken arasında oluşacak kontak yapısını ele alalım. Başlangıçta metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olduğu görülmektedir. Bir başka deyişle metalin fermi enerji seviyesi yarıiletkenin fermi enerji seviyesinden ($\Phi_s - \Phi_m$) kadar aşağıdadır. Yani; $E_{fm} > E_f$ dir.



Şekil 2.15. Metal/ n-tipi yarıiletken için temas öncesi enerji-bant seviyeleri (Biber, 2000, düzeltilmiş).

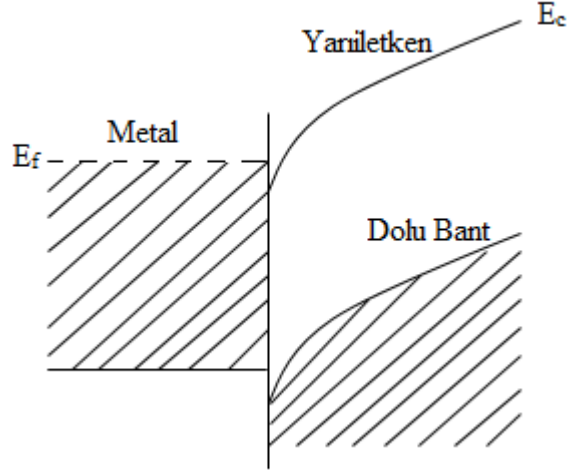
Kontakt oluştuktan sonra bantın bükülme miktarı ve potansiyel duvarı küçük olacağından dolayı metal tarafındaki elektronların yarıiletken tarafa geçişleri oldukça kolay olacaktır. Metalden yarıiletken doğru geçen elektronlar burada elektron fazlalığı oluşturacakları için yarıiletkenin yüksek oranda n-tipi özellik göstermesine neden olacaktır. Dolayısıyla yarıiletkenin yüzeyindeki bu aşırı elektron birikmesi burada bir yüzey yükü tabakası oluşmasını sağlayacağı gibi yine metalden yarıiletken doğru geçerek metal tarafta hollerin oluşmasıyla da kontakt yapı arasında bir dipol tabakası meydana gelecektir.



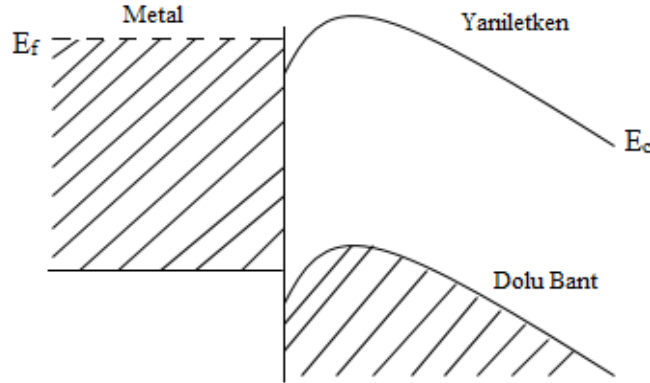
Şekil 2.16. Metal/n-tipi omik kontak için temas hali enerji-bant (denge) durumu (Biber, 2000, düzeltilmiş).

Sonuç olarak metal ile yarıiletken arasında bir potansiyel engeli görülmeyeceği gibi elektronların kontakt yapı boyunca serbest bir şekilde iki yönlü hareket edecekleri

gözlemlenir. Bu tür kontaklara omik kontak denilmektedir. Omik kontakta, kontak direncinin minimum olması istenen bir durumdur. Zira omik kontak direnci yüksek olursa, bu durum diyot akımını olumsuz etkileyecektir. Diyotun ideal durumdan uzaklaşmasına sebep olacaktır.



Şekil 2.17. Metal/n-tipi omik kantağa ait ($V < 0$) durumu (Biber, 2000, düzeltilmiş).

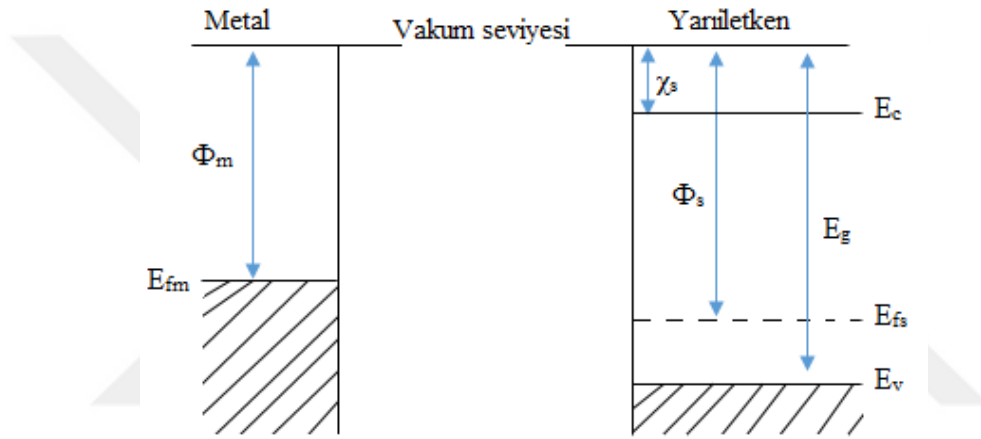


Şekil 2.18. Metal/n-tipi omik kantağa ait ($V > 0$) durumu (Biber, 2000, düzeltilmiş).

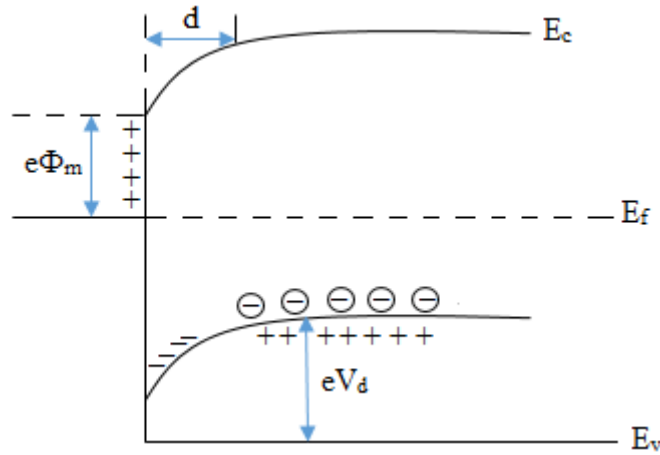
2.7.3. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu (Schottky) kontak

N-tipi yarıiletkenlerde olduğu gibi p-tipi yarıiletkenlerde de kantağın türünü belirlemek için öncelikli olarak metal ile yarıiletkenin iş fonksiyonlarına bakılır.

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ($\Phi_m < \Phi_s$) ise doğrultucu kontak, tersi durumda ($\Phi_m > \Phi_s$) ise omik kontak oluşumu gözlemlenir. Kontak oluşumundan önce yarıiletkenin fermi enerji seviyesi (E_f) metalin fermi enerjisi seviyesinden (Φ_s, Φ_m) kadar düşüktür. Kontak oluşumundan sonra metalden yarıiletkene doğru termodinamik denge sağlanana kadar elektron geçişi meydana gelir. Dolayısıyla yarıiletkenin yüzeyi negatif yükler ile birikip burada bir yüzey yükü tabakası oluşacaktır. Yarıiletken tarafta negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler ile d kalınlığında bir uzay yükü tabakası oluşur.



Şekil 2.19. Metal/p-tipi doğrultucu kontakta ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı (Temirci, 2000, düzeltilmiş).



Şekil 2.20. Metal/p-tipi doğrultucu kontakta ait kontak sonrası enerji-bant diyagramı (Temirci, 2000, düzeltilmiş).

Yarıiletken bölgeye ait enerji bant seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiği için yarıiletken taraftaki holler için yüzey engeli;

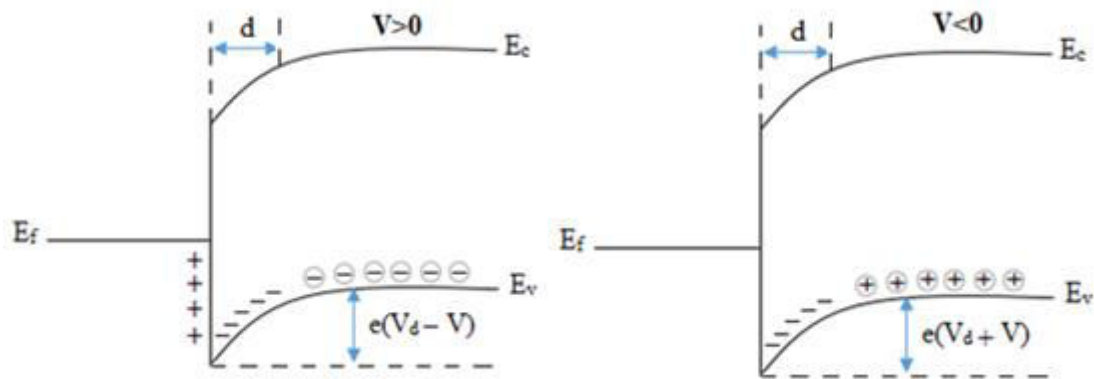
$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \quad (2.17)$$

Burada V_d difüzyon potansiyelidir. Konağın metal bölgesindeki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \quad (2.18)$$

ile gösterilir. E_s ; vakum seviyesinin tepesi ile valans bandının tabanı arasındaki mesafeyi temsil eder. Termal uyarılmadan dolayı metal içerisindeki bazı holler potansiyel engelini aşabilecek kadar enerji kazanarak yarıiletken içerisine girebilirler. Ters durumda da yarıiletken içerisindeki bazı holler yine termal uyarılma sonucunda potansiyel engeli aşıp metal içerisine geçebilirler. Bu durum kontak boyunca engelden geçen eşit ve zıt yönlü I_0 akımını oluşturacaktır.

Yarıiletkene pozitif bir voltaj uygulandığında metalden yarıiletkene doğru holl akımı değişmez fakat yarıiletkenden metale doğru akan holl akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Dolayısıyla yarıiletken bölgedeki enerji seviyeleri eV kadar düşecek ve



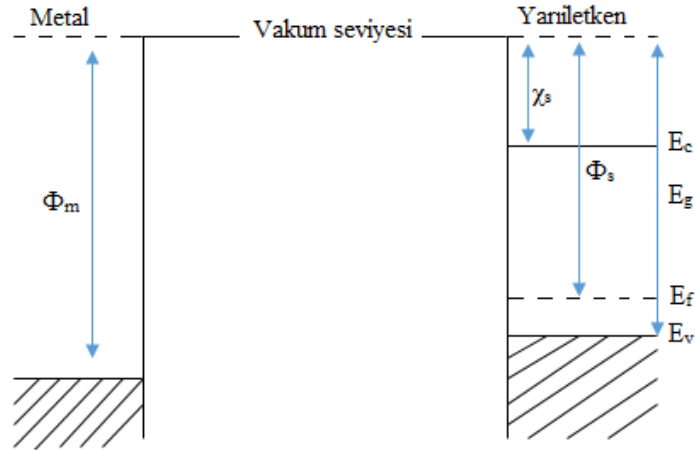
Şekil 2.21. Metal/p-tipi yarıiletken doğrultucu konağa ait $V \neq 0$ durumu (Temirci, 2000, düzeltilmiş).

yariletkenden metale doğru geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalmış olacaktır. Sonuç olarak yariletkenden metale doğru olan akım pozitif kabul edilirse akım-gerilim karakteristiği aşağıdaki gibi olacaktır.

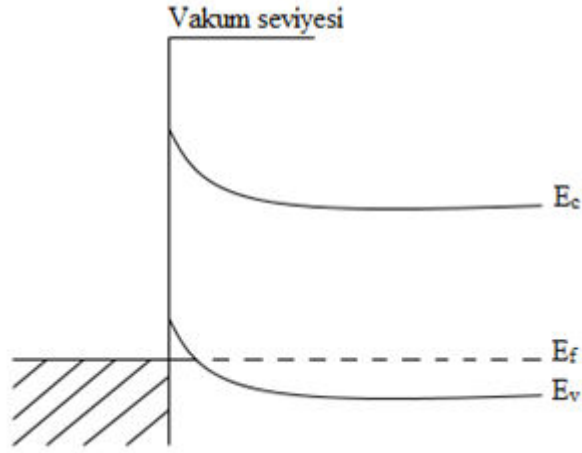
$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.19)$$

2.7.4. Metal /p-tipi yariletken omik kontak

Metal/p-tipi yariletken doğrultucu kontağın aksine omik kontak yapısında metal ile yariletkenin iş fonksiyonları $\Phi_m > \Phi_s$ olacak şekildedir. Kontak oluşumundan önce yariletkenin fermi enerji seviyesi (E_f) metalin fermi enerji seviyesinden ($\Phi_m - \Phi_s$) kadar düşüktür. Kontak oluşumundan sonra bir yük akışı meydana gelecektir. Yariletken bölgedeki elektronlar arkalarında pozitif bir yüzey yükü bırakacak şekilde metal tarafına geçiş yaparak bir yüzey yükünün oluşmasına neden olacaktır. Dolayısıyla yariletken gövdedeki fermi enerji seviyesi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağıya düşüp yariletkendeki holl yoğunluğunun artmasına ve aşırı p-tipi özellik göstermesine yol açacaktır.

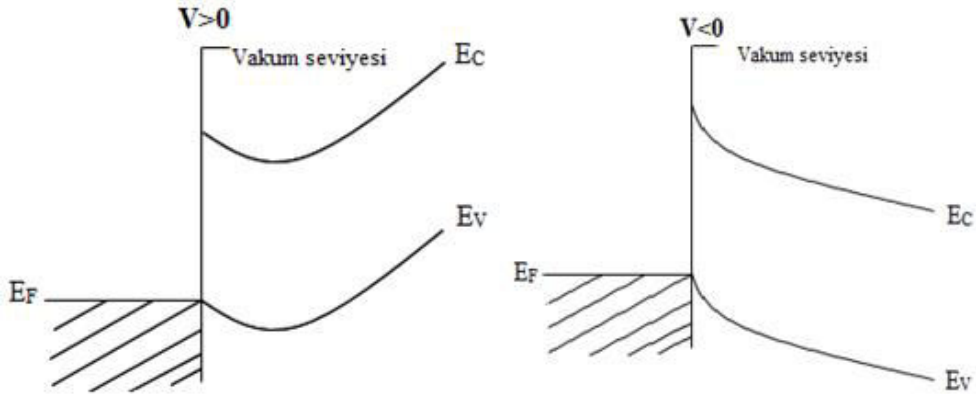


Şekil 2.22. Metal/p-tipi yariletken omik kontağa ait kontak öncesi enerji-bant diyagramı.



Şekil 2.23. Metal/p-tipi yarıiletken omik kontağa ait kontak sonrası enerji-bant diyagramı (Temirci, 2000).

Elektronlar, metal bölgeden yarıiletken gövdenin içindeki boş durumlara doğru kolayca geçiş yapabilirler. Bu yük akışı yarıiletkenden metale doğru hollerin akışına karşılık gelir. Metal tarafa geçen bu holler metalin elektronlar tarafından oluşturulan yoğun yüzey yükü ile karşılaşınca kısa bir zaman diliminde nötralize olurlar.



Şekil 2.24. Metal/p-tipi omik kontağa ait $V \neq 0$ durumu (Temirci, 2000).

2.8. Omik Kontak Elde Etme Yöntemleri

Omik kontak elde etmek için genellikle 3 farklı yol kullanılmaktadır. Bunlardan birincisi; düşük bir engel duvarı oluşturarak elektronların her iki tabaka arasında geçişlerinin kolay olmasını sağlamaktır. İkinci yöntem ise üretilecek kontaklar arasında elektronların her iki tarafa tünelleme yolu ile geçişlerini sağlayabilmeleri için dar bir potansiyel engeli oluşturmaktır. Potansiyel engeli; elektronların bir engel içerisinden kuantum mekaniksel tünelleme yaparak yarıiletkenin yüzeyini yüksek katkılı veya aşırı tiplilik (p^{++} veya n^{++}) olacak şekilde katkılama ile üretilir. Son olarak da termal difüzyon yöntemi ile üretilen dar bant aralığı ve kontak tabanı özelliklerine sahip bir tabaka oluşturma ile omik kontak oluşumu elde edilebilir (Aydoğan, 2004).

2.9. Akım İletim Teorileri

Metal-yarıiletken kontaklarda akım iletimi genel olarak çoğunluk taşıyıcıları ile gerçekleşirken pn eklem yapılarında ise azınlık taşıyıcıları ile sağlanmaktadır. Doğru beslem altında temel olarak beş tane akım iletim mekanizması mevcut iken ters beslem de ise yine bu işlemlerin tersi gerçekleşmektedir. Bu teoriler sırasıyla;

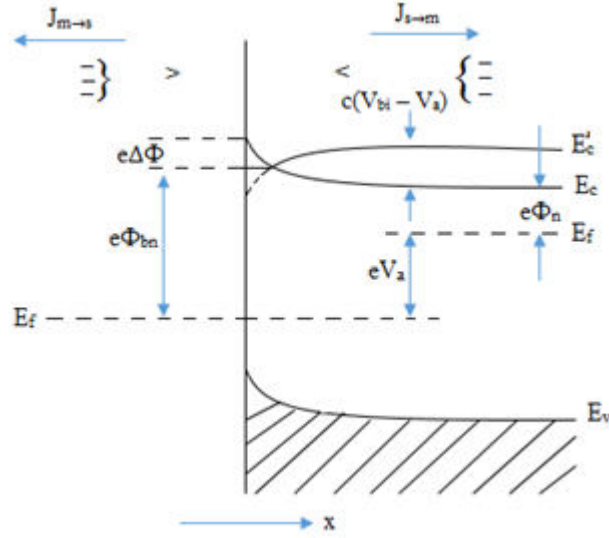
- Termiyonik Emisyon Teorisi
- Difüzyon Teorisi
- Termiyonik Emisyon-Difüzyon
- Kuantum Mekaniksel Tünelleme
- Tünelleme ve Rekombinasyon olarak sınıflandırılır.

2.9.1. Termiyonik emisyon teorisi

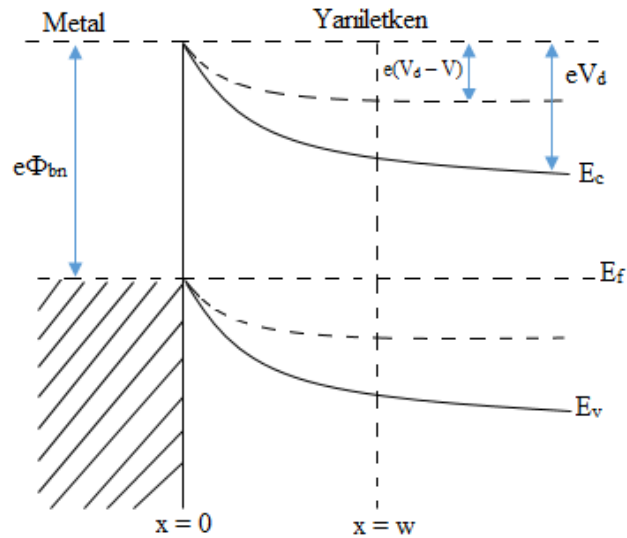
Elektronların kuantum mekaniksel bir işlemle metal ve yarıiletken arasında potansiyel engelini aşmaları olayı termiyonik emisyon olarak adlandırılır (Ziel, 1968). Bu işlem elektronların termal enerjileri sayesinde gerçekleşir. Bu olay metal/n-tipi yarıiletken kontaklarda çoğunluk taşıyıcısı olan elektronlar, metal/p-tipi yarıiletken yapılarında ise yine çoğunluk taşıyıcısı olan boşluklar tarafından sağlanır. Bu teoriye göre;

- Akım, termal yollar ile uyarılan çoğunluk taşıyıcıları ile sağlanır.

- Potansiyel engeli kT/q dan çok daha büyüktür. ($e\Phi_b \gg kT/q$)
- Taşıyıcıların ortalama serbest yolu deplasyon bölgesinden daha geniş olduğu için yarıiletkenden metale doğru akan serbest hollerin deplasyon bölgesindeki çarpışmaları ihmal edilebilir.
- İmaj kuvvetlerinin etkisi akım engel yüksekliğine zayıf bağlı oldukları için ihmal edilebilir.



Şekil 2.25. Doğru beslem altında imaj kuvvet etkisini gösteren metal/yarıiletken kontağın enerji bant diyagramı (Temirci, 2000, düzeltilmiş).



Şekil 2.26. Yarıiletkene $-V$ uygulandığında Metal/n-tipi yarıiletkenin enerji bant diyagramı (Özmenteş, 2017, düzeltilmiş).

Doğru beslem gerilimi (V_a) aygıta uygulandığında elektronların yarıiletkenden metale geçmeleri için aşmaları gereken potansiyel engel $\Phi_b - V_a$ ' ya eşit olur. Verilen parametreler doğrultusunda yarıiletkenden metale doğru gerçekleşen akı yoğunluğu $J_{s \rightarrow m}$ potansiyel engeli geçmeye yetecek kadar olan elektronların konsantrasyonu ve bunların hızına bağlıdır. $J_{m \rightarrow s}$ ise metalden yarıiletkene doğru gerçekleşen akı yoğunluğunu temsil eder. Dolayısıyla;

$$J_{s \rightarrow m} = e \int_{E_c}^{\infty} V_x dn \quad (2.20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada E_c ; metal içerisindeki termiyonik emisyon işleminin gerçekleşmesi için gerekli olan minimum enerjiyi ifade eder. V_x ise akı yönündeki taşıyıcıların sürüklenme hızıdır. Sonuç olarak termiyonik emisyon akımı;

$$J_{s \rightarrow m} = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q(\Phi_b - V_a)}{kT} \right] \quad (2.21)$$

Burada R^* , Richardson sabiti olmak üzere; $4\pi m_e q k^2 / h^3 e$ eşittir ve A diyotun yüzey alanıdır.

$V_a = 0$ iken $J_{m \rightarrow s} = -J_{s \rightarrow m}$ ve $J_{s \rightarrow m}$ nin sabit olduğu ve uygulanan gerilimden bağımsız olduğu dikkate alınarak;

$$J_{s \rightarrow m} = -AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b}{kT} \right] \quad (2.22)$$

yazılabilir. Diyottaki net akım $J_{m \rightarrow s} + J_{s \rightarrow m}$ olduğu için akım ifadesi gerilimin fonksiyonu olduğu için;

$$J = AR^*T^2 \exp \left[-\frac{q\Phi_b}{kT} \right] \left[\exp \left(\frac{qV_a}{kT} \right) - 1 \right] \quad (2.23)$$

ifadesine dönüşür. Bu denklem bir pn eklemine yapısına benzer akım-gerilim karakteristiğini tanımlar. Ayrıca akım hem sıcaklığa (T) hem de metal ile yarıiletken arasındaki potansiyel engel yüksekliğine (Φ_b) bağlıdır (Aydoğan, 2011).

2.9.2. Difüzyon teorisi

Difüzyon; farklı konsantrasyonlara sahip iki ayrı bölgede yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye yüklerin hareket etmesi olayıdır. Schottky tarafından öne sürülen difüzyon teorisinin dayandığı varsayımlar (Schottky ve Spence, 1939);

- Oda sıcaklığında potansiyel engeli açık bir şekilde kT/q dan büyüktür.
- Taşıyıcıların ortalama serbest yolları deplasyon bölgesinin genişliğinden daha az olduğu için buradaki elektron çarpışmaları ihmal edilemez.
- $x=0$ ve $x=w$ noktalarında taşıyıcı konsantrasyonları temel denge durumuna sahip oldukları için akım akışından etkilenmezler.
- Yarıiletkenin katkı atomu konsantrasyonu dejenere değildir. Deplasyon bölgesindeki akım konsantrasyon farkına bağlı olduğundan akım yoğunluğu denklemini kullanılır. Bu denklem metal/n-tipi yarıiletken kontaklar için;

$$J_x = J_n = q \left[n(x)\mu E(x) + D_n \frac{dn}{dx} \right] \quad (2.24)$$

$$J_x = qD_n \left[\frac{dn(x)}{dx} \right] \quad (2.25)$$

şeklinde. Burada $n(x)$ elektron yoğunluğu, μ elektron mobilitesi, D_n elektron difüzyon sabiti ve $E(x)$ Schottky bölgesindeki elektrik akımıdır. Dolayısıyla difüzyon teorisinde akım denklemini;

$$J_x = J_o \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.26)$$

olur. Burada J_o doyma akım yoğunluğu olmak üzere gerilime oldukça bağlı durumdadır.

2.9.3. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisi

Bu teori Crowell ve Sze' nin metal-yarıiletken arayüzey kenarında tanımlanmış oldukları V_r rekombinasyon hızı üzerine kurulmuştur. Metal-yarıiletken gövdeye uygulanan gerilim, yarıiletken metale doğru bir elektron akışına neden olur. Taşıyıcıların bir kısmı optik fonon geri saçılmalarına bir diğer kısmı ise kuantum mekaniksel yansımalarına maruz kaldığından net akım değeri azalır. Termiyonik emisyon-difüzyon teorisine göre metal-yarıiletken ara yüzeyinde bulunan elektronlar optik fononlar ile etkileşmeksizin potansiyel engel üzerinden geçme olasılığı ve ortalama iletim katsayısı değeri A^* termiyonik emisyon teorisindeki Richardson sabiti A^{**} olarak değişir. Dolayısıyla akım-gerilim denkleminin en genel hali;

$$J = J_o \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.27)$$

ile verilir. Burada J_o doyma akım yoğunluğu, T sıcaklık ve n diyotun idealite faktörü olmak üzere;

$$J_o = -A^* T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \quad (2.28)$$

şeklinde gösterilir.

Termiyonik emisyon teorisine göre Schottky diyotlarda idealite faktörü 1'e eşittir ve ideal değerden sapmaları belirleyebilmek için n ile gösterilir. A^{**} düzenlenmiş Richardson sabiti ve β ; engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişim katsayısı olmak üzere;

$$A^{**} = A^* \left[\exp\left(\frac{\beta}{kT}\right) \right] \quad (2.29)$$

ile verilir. Dolayısıyla akım yoğunluğu ifadesinin son hali;

$$J = J_o = \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.30)$$

ifadesine dönüşür. Denklemden de anlaşılacağı üzere n değeri 1' den büyük değerler aldıkça engel yüksekliğinin voltaja olan bağıllığı artacaktır. İdealite faktörü yalıtkan tabaka kalınlığının ve arayüzey hallerinin artması ile orantılı olacak bir biçimde artmaktadır. İdeal bir Schottky diyotta idealite faktörü $1 < n < 1,2$ değerleri arasında yer alır (Fener, 2010).

2.9.4. T_0 etkili akım iletimi

İdealite faktörü değerinin 1' den büyük olması hayali kuvvet ya da arayüzey durumlarından kaynaklanıyorsa (n) sıcaklıktan bağımsız olmalıdır. Aynı şekilde idealite faktörünün 1' den büyük olması termoiyonik alan emisyonu veya tüketim bölgesinde oluşan rekombinasyon akımlarından kaynaklanıyorsa bu durumda (n) sıcaklığa bağlı durumdadır. T_0 etkili akım yoğunluğu bağıntısı aşağıda verilmiştir.

$$J = R^{**} T^2 \exp\left[-\frac{q\phi_b}{k(T+T_0)}\right] \left\{ \exp\left[\frac{qV}{k(T+T_0)}\right] - 1 \right\} \quad (2.31)$$

Bu ifadede R^{**} ; modifiye edilmiş Richardson sabiti olmak üzere T_0 ; geniş bir sıcaklık aralığında voltajdan bağımsız olan bir parametredir. İdealite faktörünün sıcaklığa bağlı olduğunu gösteren deneysel ifade aşağıda gösterilmiştir.

$$n = 1 + \frac{T}{T_0} \quad (2.32)$$

2.10. Cheung Fonksiyonları

1986 yılında Cheung&Cheung tarafından sunulan bu modelde bir metal-yarıiletken kontak yapısının doğru beslem akım-gerilim karakteristiklerinden faydalanılarak Schottky diyot parametrelerinin hesaplanması sağlanmıştır. Dolayısıyla

termiyonik emisyon teorisinde bulunan akım yoğunluğu (J) diyotun (A) mevcut alanı ile çarpılırsa diyottan geçen net akım değeri;

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.33)$$

olarak verilir. Pratikte uygulanan gerilimin çoğu arınma bölgesine düşmediğinden ideal durumlardan sapmalar meydana gelecektir. Bu durumu akım denkleminde kullanılan ve birimsiz bir sabit olan idealite faktörü (n) parametresidir. $eV_a \gg kT$ için 1 ihmal edilebilir. Buna göre 2.33 eşitliği yeniden düzenlenirse;

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) \right] \quad (2.34)$$

şeklinde olur. Bu eşitlikte V uygulanan voltaj olmak üzere bu voltajın IR_s kadar kısmı seri dirençten dolayı düşer. Dolayısıyla V yerine $V - IR_s$ yazılabilir. Akım denkleminin son hali;

$$I = A.J = \left[AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_s)}{nkT}\right) \right] \quad (2.35)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu eşitliğin doğal logaritması alınarak V' ye göre çözümlenirse;

$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) + n\Phi_b + IR_s \quad (2.36)$$

eşitliğine dönüşür. Bu eşitliğin $\ln I$ ' ya göre türevi alınır;

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_s \quad (2.37)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik bir doğru denklemdir ve $dV/d(\ln I)$ ' nın I'ya göre grafiğinin bir doğru vereceği açık bir şekilde görülmektedir. Bu doğrunun eğimi seri

direnci (R_s) ve yatay eksenini kestiği nokta ise $\frac{nkT}{e}$ ifadesini verecektir. (Cheung&Cheung, 1986). (2.35) bağıntısından faydalanarak, akıma bağlı;

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right) \ln\left(\frac{I}{AA^*T^2}\right) \quad (2.38)$$

şeklinde bir fonksiyon tanımlanarak;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (2.39)$$

yazılabilir. Bu son eşitlikte (2.37) eşitliği gibi bir doğru denklemdir ve bu denklem kullanılarak H(I)-I grafiği çizilecek bir doğru verir, bu doğrunun eğimi de bize seri direnci (R_s) ve doğrunun H(I) eksenini kestiği nokta ise ($n\Phi_b$) potansiyel değerini verecektir.

2.11. Norde Fonksiyonu

Norde tarafından önerilen bu modelde çoğu Schottky diyotun engel yüksekliği ve buna bağlı olarak seri direncini hesaplamak mümkündür. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu aşağıdaki gibi ifade edilir (Norde, 1979);

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right] \quad (2.40)$$

Burada γ ; idealite faktöründen büyük olan ilk tamsayı değerini ifade ederken I(V) ise gerilime bağlı değişen akım değerini gösterir.

Norde fonksiyonu yardımı ile engel yüksekliği değerini hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanabiliriz.

$$\Phi_b = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (2.41)$$

Bu eşitlikte $F(V_0)$; $F(V_0) - V$ grafiğinde minimum voltaj değerine karşılık gelen minimum $F(V)$ değeridir.

Norde fonksiyonundan yararlanarak seri direnç (R_s) hesabı aşağıdaki denklem ile elde edilebilir.

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{q(I_{min})} \quad (2.42)$$

Doğrultucu kontaklarda engel yüksekliğinin belirlenmesi için Norde fonksiyonu kullanılması durumunda sağlıklı sonuçlar almak için kontakın akım-voltaj karakteristiklerinin Termiyonik Emisyon (TE) Teorisi ile uyum içinde olması gerekir. Yani I-V grafiklerinde ters beslem tarafındaki akım hemen hemen uygulanan voltajdan bağımsız olması gerekir. Aynı zamanda doğru beslem akımı da üstel bir karakter göstermeli. Bu durumda diyot'un idealite faktörü de tabii ki 1'e yakın olmalıdır. Eğer kontakta ait elde edilen I-V grafiği yukarıdaki özelliklere sahip değilse, bu durumda Norde fonksiyonu kullanılarak elde edilen engel yüksekliği değeri çok sağlıklı bir sonuç olmayabilir.

Norde modeli Schottky diyotlarda direnç ve engel yüksekliği değerlerini yaklaşık olarak ortaya koyabildiği için pratikte eğri fit metodunu kullanmak daha elverişli gözükmemektedir. Bu yöntem ile herhangi bir Schottky diyotun karakteristik özelliklerini rahat ve minimum sapmalarla tayin etmek mümkündür.

2.12. p-n Eklem Diyotların Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristikleri

Metal/Yarıiletken kontaklar üretilirken kontak ara yüzeyinde oksitlenme meydana gelmektedir (Neamen, 1997). Meydana gelen bu yalıtkan tabakanın kalınlığı (δ) olmak üzere C-V karakteristiklerinde;

$$C_i = \frac{\epsilon_i \epsilon_0 A}{\delta} \quad (2.43)$$

denklemleri kullanılarak bulunabilir. Bu eşitlikte A ; diyot alanı, C_i ; oksit tabakasının kapasitansını, ϵ_i ; ara yüzeyde oluşan oksit tabakasının elektriksel yük geçirgenliğini ve ϵ_0 ; boş uzayın elektriksel yük geçirgenliğini ifade eder.

Sabit frekans değerlerinde yapılan C-V ölçümlerinden elde edilen parametrelerin elde edilebilmesi için C^2 -V eğrileri çizilir. Eğrilerin lineer kısımlarının extrapole edilmesi sonucunda kesme gerilimi (V_0) ve eğimlerinden ise akseptör yoğunlukları (N_A) elde edilir. Ara yüzey hallerinin olmadığı durumlarda ise kesme gerilimi ile difüzyon potansiyeli arasındaki bağıntıyı veren eşitlik;

$$V_0 = V_d - \frac{kT}{q} \quad (2.44)$$

ile ifade edilir (Sze, 1981). Ara yüzey hallerinin bulunduğu durumlarda ise;

$$V_0 = \left(V_d - \frac{kT}{q} \right) (1 + \alpha) \quad (2.45)$$

ifadesine dönüşür (Akkal ve ark. 2000). Bu eşitlikte;

$$\alpha = \frac{qN_{ss}\delta}{\epsilon_i} \quad (2.46)$$

ile ifade edilirken, N_{ss} ; ara yüzey durum yoğunluğunu göstermektedir (Singh, 1985). Ara yüzey halleri dikkate alındığında C^2 -V doğrularının eğimi;

$$\frac{d(C^2)}{dV} = \frac{2}{q\epsilon_s A^2 N_A} \cdot \frac{1}{(1+\alpha)} \quad (2.47)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada ϵ_s ; silisyumun dielektrik sabiti olmak üzere $\left(\frac{1}{1+\alpha} \right)$ terimi C_2 şeklinde bir sabit olarak tanımlanır. Silisyum için dielektrik sabiti; $\epsilon_s = 11.8 \epsilon_0$ dir.

$$C_2 = \frac{2}{q\epsilon_s N_A (d(C^2)/dV)} = \frac{N_A}{N_A'} = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_i + qN_{ss}\delta} \quad (2.48)$$

ile ifade edilir (Chattopadhyay ve Daw, 1986). Burada N_A ve $N_{A'}$ sırasıyla deneysel ve kuramsal olarak C^{-2} - V grafiğinin eğiminden hesaplanan akseptör yoğunluklarını ifade etmektedir. Burada ifade edilen akseptör yoğunluklarının oranından C_2 ve elde edilen C_2 değerinin (2.47) eşitliğinde $\frac{1}{1+\alpha}$ ile tanımlanan ifadeden α ve (2.46) eşitliğinden ise N_{ss} değerleri elde edilir. Fermi enerji seviyelerini hesaplamak için;

$$E_F = kT \ln \frac{N_V}{N_A} \quad (2.49)$$

eşitliği kullanılır. Bu eşitlikte N_V ; valans bandındaki etkin durumların yoğunluğu olmak üzere;

$$N_V = 2 \left(\frac{2\pi m_p^* kT}{h^2} \right)^{3/2} \quad (2.50)$$

ile hesaplanır. Bu eşitlikte m_p^* ; boşlukların etkin kütlesi ve m_0 durgun deşik kütlesi olmak üzere silikon için $m_p^* = 0.56m_0$, galyum arsenik için $m_p^* = 0.48m_0$ ve germanyum için $m_p^* = 0.37m_0$ olarak verilmektedir. (2.50) eşitliğinden silikon için $N_V = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak elde edilir (Neamen, 1992).

C^{-2} - V grafiklerinden faydalanarak $\Phi_b(c-v)$ değerleri;

$$\Phi_b(C - V) = \frac{V_d}{n} + E_F \quad (2.51)$$

ifadesinden hesaplanabilir. Bu eşitlikte V_d ; difüzyon potansiyeli, n ; I - V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü ve E_F ; fermi seviyesini ifade eder.

Ayrıca arayüzey durum yoğunlukları I - V ölçümlerinden de belirleneceği üzere (Card and Rhoderick, 1971) tarafından arayüzey durum yoğunluğuna ve oksit tabakasının kalınlığına bağlı olarak idealite faktörünü;

$$n = 1 + \frac{\delta}{\epsilon_i} \left(\frac{\epsilon_s}{W_D} + qN_{SS} \right) \quad (2.52)$$

ile belirtmiştir. Burada W_D ; tüketim bölgesinin genişliği olmak üzere;

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S W_D}{qN_A}} \quad (2.53)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. (2.52) eşitliği yeniden düzenlenirse;

$$N_{SS} = \frac{1}{q} \left[(n-1) \left(\frac{\varepsilon_i}{\delta} \right) - \left(\frac{\varepsilon_s}{W_D} \right) \right] \quad (2.54)$$

ifadesine dönüşür.

Bu durumda yüksek frekans bölgelerindeki kapasiteyi (C_{HF}), tüketim bölgesi kapasitesi ile ilişkilendirebiliriz. Aynı şekilde düşük frekans bölgesinde oluşan fazlalığı ise (C_{LF}), arayüzey durumlarıyla (C_{LS}) ilişkilendirebiliriz. Tüketim bölgesi durum yoğunluğunun (N_{IS}), ara yüzey hallerinin en düşük limitini veren ifade aşağıdaki eşitlikte verilmiştir (Tavakolian ve Sites, 1988).

$$N_{IS} = \frac{C_{LF} - C_{LS}}{q} \quad (2.55)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. İnce Film Güneş Pili Üretimi

İnce film üretim aşamamızda özdirenci 1-10 Ω .cm ve (100) doğrultusunda büyütülmüş olan p-Si kristali kullanıldı. p-Si kristaline geleneksel kimyasal temizleme işlemi uygulandıktan sonra omik kontak işlemini gerçekleştirmek için vakum kaplama cihazının ısıtıcı potasına koyduğumuz %99.999 saflıktaki alüminyum metali kristalin mat tarafına buharlaştırıldı. Buharlaştırma işleminin ardından sıcaklığı önceden 580°C ye ayarlanmış quartz tüpün içerisinde azot gazı (N₂) ile 3 dk boyunca tavlansak omik kontak işlemi tamamlanmış oldu.



Şekil 3.1. Termal buharlaştırmayla ince film oluşturmak için 'EDWARDS AUTO 306' vakum kaplama cihazı.

Omik kontak işleminden sonra numune tekrar vakum kaplama cihazına alınarak doğrultucu kontak kısmının yapım aşamalarına başlandı. Numunenin parlak kısmı vakum kaplama cihazı içerisinde aşağı bakacak şekilde yerleştirildikten sonra %99.0+

saflıktaki toz SnO₂ yarıiletken bileşegi yarıçapı 1 mm olan maske kullanılarak numune üzerine buharlaştırıldı ve alanı 0.0314 cm² olan dairesel diyotlar üretilmiş oldu.



Şekil 3.2. Omik kontak yapımı işleminde kullanılan kuartz tüplü tavlama fırını.

SnO₂
p-Si (100)
Al

Şekil 3.3. Üretilen heteroeklem güneş pilinin yapısı.

3.2. İnce Filmlerde Foton Soğurma Olayı

İnce filmlerin optiksel özelliklerini belirlemek amacıyla iki farklı parametreden faydalanılır. Bu parametreler soğurma katsayısı (α) ve bant aralığıdır (E_g). Soğurma katsayısı film üzerine düşen fotonun enerjisine bağlı olarak değişeceğinden (α), hV ' nün bir fonksiyonu olur.

$$E = hV = \frac{hc}{\lambda} \quad (3.1)$$

Burada E; foton enerjisi, h; Planck sabiti, c; ışık hızı ve λ ; gelen ışığın dalga boyunu gösterir. Optik soğurma denkleminde faydalanarak;

$$I = I_0 \exp(-\alpha d) \quad (3.2)$$

Burada α , soğurma katsayısını temsil eder ve (3.2) eşitliğinden aşağıdaki şekilde elde edilebilir (Pankove, 1971).

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(\frac{I_0}{I} \right) \quad (3.3)$$

Bu eşitlikte I_0 ; film üzerine düşen ışığın yoğunluğu, I filmin içerisine geçen ışığın yoğunluğu, d ; filmin kalınlığı ve $\left(\frac{I}{I_0} \right)$ oranı ise % olarak geçirgenliği ifade eder. Aynı şekilde soğurma denklemini kullanarak optik geçirgenlik için;

$$Y = \frac{I}{I_0} = (e^{-\alpha d}) \quad (3.4)$$

ifadesi elde edilebilir.

$$\alpha(h\nu) = A_0 (h\nu - E_g)^p \quad (3.5)$$

Taue eşitliği olarak adlandırılan bu ifadede p ; malzemeye özgü elektronik geçiş ihtimaliyeti olmak üzere direct bant aralığı için 1/2, indirect bant aralığı için ise 2' dir. Bu eşitlikten faydalanarak bant aralığı hesapları yapıldı. Çalışmamızda kullandığımız SnO₂ filmi direkt bant aralığına sahip yarıiletken olduğu için $p = \frac{1}{2}$ olacaktır (Ogo ve ark., 2008; Çağlar ve ark., 2009; Baco ve ark., 2012; Hsu ve ark., 2014).

$$\alpha h\nu = \alpha_0 (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (3.6)$$

Bu eşitlikte α_0 sabit bir sayı olmak üzere ($\alpha_0 = 1$) her iki tarafın karesi alınırsa;

$$(\alpha hV)^2 = hV - E_g \quad (3.7)$$

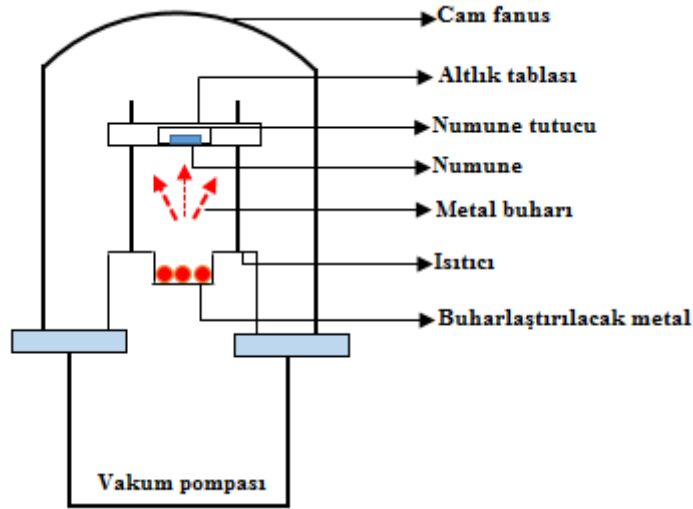
olacaktır. α' yı sıfır yapan hV değeri (E_g) olduğu için $\alpha^2 - hV$ grafiğinde α^2 nin extrapole bir şekilde minimum değere gittiği ve lineer kısmına fit çizildiğinde bu fitin yatay eksenini kestiği nokta bize bant aralığını (E_g) verecektir.

3.3. İnce Film Elde Etme Yöntemleri

İnce film elde etmenin birçok yöntemi olduğu gibi bunlar arasında en yaygın olarak kullanılanları termal buharlaştırma, magnetron saçtırma, püskürtme, spin kaplama ve daldırma yöntemleridir.

3.3.1. Termal buharlaştırma yöntemi

Bu yöntem yüksek vakum ortamında gerçekleştirilen, bir metalin ısıtılarak buharlaştırılması sonucu malzeme üzerine yoğunlaştırılması prensibine dayanır. Buharlaştırma yöntemi için kullanılan vakum cihazının basıncı $10^{-11} - 10^{-12}$ mm-Hg değerine kadar inebilmektedir. Yüksek sıcaklığın gerekli olduğu bu metotta akım, tungstenden yapılan ısıtıcılar aracılığıyla sağlanır. Bu yöntem ile buharlaştırılacak olan malzeme ısıtılarak molekülleri haline getirilir ve kaplanacak olan tabakanın oksitlenmiş tarafına yoğunlaştırılır. 10^{-5} Torr basınç altında uygulanan bu yöntemde dahi ortamda hava kirliliklerinden bahsetmek mümkündür. Örneğin kaplama yapılacak olan malzemenin cihaz içerisine konulana kadar geçen sürede veya cihazın istenilen basınç değerine düşmesi için geçen süre içerisinde hava ile etkileşmesi sonucu yüzeyinde bir oksit tabakası oluşabilir. Bu nedenle ortamda oluşabilecek kirlilikler, kaplama yapılacak yüzey ile temas etmesi sonucu numunenin idealden uzaklaşmasına neden olacaktır. Bu gibi olumsuz durumları önlemek amacıyla vakum sistemlerinin difüzyon pompa çıkışı



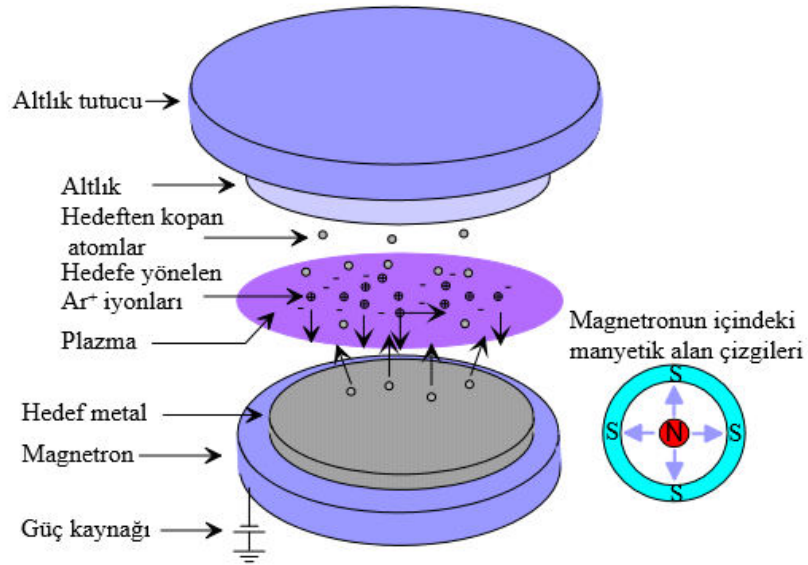
Şekil 3.4. Termal buharlaştırma sisteminin şeması (Ejderha, 2012, düzeltilmiş).

kısımlarına su soğutmalı ve sıvı azot tuzaklayıcıları konulur. Malzeme üretiminde kullanılan vakum kaplama cihazı yukarıdaki şekilde gösterilmiştir.

3.3.2 Manyetik alan saçırma yöntemi

Kontak çalışmaları için kaplama yapımında en çok kullanılan yöntemlerden birisi de manyetik alan saçırma yöntemidir. Düşük basınç ve voltaj altında elektronların etkin kullanılması bu yöntem ile kaplama işleminin yapılmasına olanak sağlıyor. Manyetik saçırma yönteminde katot olarak kullanılan bir elektrottaki atomların pozitif yükler tarafından bombardıman edilmesi sonucu altlık üzerinde ince bir tabaka oluşturma esasına dayanır (Ejderha, 2012).

Bu yöntemi etkin kılan en önemli unsur ise elektronların manyetik alan vasıtasıyla yönlendirilerek çarpışmaların katot yüzeyine daha yakın yerlerde olmasına olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla katot yüzeyi bölgesinde iyonizasyonun artması sonucu düşük basınç değerlerinde plazma oluşturabilen manyetik alanlar manyetik alanlar meydana getirilebilir. Çalışma basıncının düşürülmesi ile sıçratılan hedef atomlarının gaz fazındaki saçılma durumu daha az olacağından altlık üzerinde biriken tanecik sayısı daha yüksek olur (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



Şekil 3.5. Manyetik alanda DC saçtırma sistemi (Ejderha, 2012)

Manyetik alan saçtırma tekniği genel olarak üç farklı yöntem ile uygulanabilir. Bunlar; DC (Doğru akım), RF (Radyo frekansı) ve DC-RF saçtırma yöntemleridir. Yaygın olarak kullanılan DC saçtırma yöntemi yukarıdaki şekilde gösterilmiştir.

3.3.3 Püskürtme ile kaplama yöntemi

İnce film üretiminde pratik ve ucuz olan bu yöntemde, üretilecek film için hazırlanan sulu çözeltinin hava veya azot gazı aracılığıyla sıcak altlık üzerine püskürtülmesi esasına dayanır. Bu yöntemi avantajlı duruma getiren en önemli unsurlar arasında vakum ortamına ihtiyaç duyulmaması, n-tipi ve p-tipi katkılama durumuna izin vermesidir. Üretilecek filmin karakteristik özellikleri püskürtme başlığının çapı, başlığın altlıktan olan mesafesi, püskürtme süresi, çözeltinin kalitesi gibi birçok parametreye bağlıdır.

3.3.4 Spin kaplama yöntemi

Sert bir tabaka üzerine ince film üretmek için kullanılan bu yöntemde, kullanılan altlıkların küçük olması kaplama işlemi açısından oldukça önemlidir. Spin kaplama yöntemi genel olarak dört ayrı süreçten oluşur. Bunlar; kaplama, döndürme, döndürmeyi bitirme ve buharlaştırma aşamalarıdır.

Kaplama aşamasında, kaplanacak malzemenin üzerine bir miktar sıvı dökülür ve buradan döndürme işlemine geçilir. Döndürme işlemi sırasında oluşan merkezci kuvvet, malzeme üzerindeki sıvının radyal bir şekilde yüzeyden dışarı doğru akmasına neden olur. Dışarı doğru akan sıvının azalması sonucunda filmin inceliği de azalır ve döndürme işlemi bitirilir. Son aşama olan buharlaştırma evresi üretilecek ince filmin fiziksel özellikleri açısından çok önemlidir. Üretilen ince filmin kaplanan yüzey boyunca homojen olarak yayılması ve filmin inceliği spin kaplama yöntemini oldukça avantajlı duruma getirmektedir.

3.3.5 Daldırma yöntemi ile kaplama

Yüzeyinde homojen bir film dağılımı ve kalınlığı gibi büyük avantajlara sahip olan bu yöntem genel olarak beş farklı aşamadan oluşur. Bunlar daldırma, çekme, kaplama, süzülme ve buharlaştırma aşamalarıdır. Daldırma aşamasında kaplanacak olan malzeme hızlı bir şekilde hazırlanan solün içine daldırılır ve sole fazla maruz bırakılmadan aynı hız ile geri yukarı çekilir. Üçüncü aşama olan kaplama aşamasında ise alttaşın sole maruz kalan kısımları kaplanmış olur. Süzülme aşamasında ise yer çekimi kuvveti, alttaş ile sol arasındaki yüzey gerilimi ve taşıyıcı kuvvetleri etkilidir. Sol, alttaş kenarlarından yüzey kısmını terk ederken, yüzeyde kalan fazla sol damlacıkları ise buharlaşarak uçar. Bu şekilde kaplama işlemi tamamlanmış olur (Sönmezoğlu ve ark., 2012).



4. BULGULAR

Bu bölümde SnO₂/p-Si p-n eklem diyotunun üretim aşamalarını, ölçüm işlemlerin, gerekli hesaplamalar, grafikler ve değerlendirmeler ele alınacak. Çalışmamızda kullanılan toz halindeki kalay (IV) oksit [kalay (IV) oksit: SnO₂] Sigma&Aldrich firmasından temin edilmiştir. Substrate malzeme olarak p-tipi (1 0 0) silisyum wafer kullanıldı. Kalay (IV) oksit'e herhangi bir ilave kimyasal temizleme işlemi uygulanmazken, p-Si için literatürde mevcut olan geleneksel kimyasal temizleme işlemi uygulandı. Film kaplama işlemi için Edwards 306A vakum kaplama cihazı kullanıldı. Omik kontak için Al(%99.999) metali kullanıldı. Ana işlem sürecinde takip edilen adımlar: Malzeme temini-kimyasal temizleme işlemi-numune fabrikasyonu-ölçüm ve karakterizasyon işlemleri şeklindedir.

4.1. Deneysel İşlemler

Çalışmamıza ait tüm deneysel işlemleri Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi "Yarı iletken Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu Laboratuvarı" nda yapılmıştır. Deneysel işlemler sırasıyla; kimyasal temizleme, omik kontak yapımı, tavlama işlemi, doğrultucu kontak yapımı, aydınlık ve karanlıkta I-V ölçüm işlemleri, C-V, G-V, C-f, G-f ölçüm işlemleri şeklindedir. Deneysel işlemlerin ardından ilgili grafikler çizildi ve gerekli hesaplamalar yapıldı, elde edilen sonuçlar değerlendirildi ve yorumlandı.

4.1.1. Kimyasal Temizleme İşlemi

Kontak üretiminde (1 0 0) doğrultusunda büyütülmüş öz direnci $\rho=1-10 \Omega.cm$ olan p-Si kullanılmıştır. Sonuçların daha sağlıklı elde edilebilmesi için kullanılacak olan numunenin yüzeyinde oluşabilecek kirlere iyice arındırılmış olması gerekir. Dolayısıyla kimyasal temizleme işlemine tabi tutulur.

Si kristalinin yüzey temizleme işlemi esnasında sırasıyla aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

- 1- Asetonda ultrasonik olarak 10 dakika yıkanır.
- 2- Metanolde ultrasonik olarak 10 dakika yıkanır.
- 3- Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 4- RCA1 ($H_2O : H_2O_2 : NH_3 ; 6:1:1$) oranında $60^{\circ}C$ ' de 10 dakika yıkanır.
- 5- Seyreltik HF ($H_2O : HF ; 10:1$) oranında 30 saniye yıkanır.
- 6- RCA2 ($H_2O : H_2O_2 : HCl ; 6:1:1$) oranında $60^{\circ}C$ ' de 10 dakika yıkanır.
- 7- Deiyonize su ile iyice yıkanır.
- 8- Seyreltik HF ($H_2O : HF ; 10:1$) oranında 30 saniye yıkanır.
- 9- 15-20 dakika zaman aralığında akmakta olan Deiyonize su içerisine konulur.
- 10- Azot gazı (N_2) ile kurutma işlemine tabi tutulur.

Buna ilave olarak kontak üretim aşamasında kullanılacak olan bazı metal materyaller metanol ile 5 dakika boyunca ultrasonik yıkama cihazı ile yıkandıktan sonra seyreltik hidroklorik (HCl) asit ile de yıkandıktan sonra deiyonize su ile iyice çalkalanıp kurutuldu. Metali buharlaştırmada kullanılan Tungsten ısıtıcı pota da aynen metalin yıkama işlemine tabi tutuldu. Sigma&Aldrich firmasından alınan toz halindeki kalay (IV) oksit (SnO_2) ise herhangi bir kimyasal temizleme işlemine tabi tutulmadı.

4.1.2. Kontak yapımı işlemleri

- a) Temiz haldeki vakum fanusu açılarak, kontak üretiminde kullanılacak olan ısıtıcı pota (tungsten) %10' luk derişime sahip HCl ile yıkandıktan sonra deiyonize su ile durulanıp kurutuldu ve vakum cihazındaki yerine monte edildi.
- b) Kimyasal olarak temizlenmiş olan ve numunenin arka yüzeyine buharlaştırılacak olan %99.999 saflıktaki Al metali ısıtıcı potanın içerisine yerleştirildi.
- c) Yukarıda detayları yazılı kimyasal temizleme işlemi uygulanmış olan p-Si (1 0 0) tek kristali, ısıtıcı potanın yukarısında bulunan numune tutucu düzeneğin üzerine yerleştirildi.
- d) Termal buharlaştırma yöntemi için kullanılacak olan vakum cihazının fanusu kapatıldı ve cihaz çalıştırılarak hazır hale getirildi.
- e) Vakum cihazı içerisindeki basınç değeri 10^{-5} torr değerine düştükten sonra potaya akım verilerek akkor hale getirildi ve içerisindeki Al metali buharlaştırıldı.

- f) Buharlaştırma işlemi bittikten sonra vakum cihazı içerisine hava verilip fanus basıncı atmosfer basıncı değerine dönünce arka (mat) yüzeyine Al metali kaplanmış olan p-Si kristali yerinden alınarak, hava ortamında fazla bekletmeden, daha önce sıcaklığı 580 °C' ye ayarlanmış ve içinden azot gazı geçmekte olan kuartz tüplü fırının ortasına (kaplanan yüzey yukarı gelecek şekilde) yerleştirildi. Kuartz tüpün ortasındaki numune 3 dakikanın sonunda kuartz maşayla tüpün uç noktasına çekilerek soğuması beklendi.
- g) Omik kontak yapımı sürecindeki kullanılan ısıtıcı pota değiştirilerek yerine kimyasal olarak temizlenmiş başka bir pota yerleştirildi. Üzerine buharlaştırılacak olan %99.99 saflıktaki toz SnO₂ yerleştirildi.
- h) Arka yüzeyi omik kontak yapılmış olan p-Si kristali, ısıtıcı potadan yaklaşık 10-12 cm yukarıda konumlanmış olan numune tutucunun üzerindeki maskenin üzerine, parlak yüzeyi aşağı bakacak şekilde, yerleştirildi.
- i) Termal buharlaştırma yöntemi için kullanılacak olan vakum cihazı çalıştırılarak hazır hale getirildi.
- j) Vakum cihazı içerisindeki basınç değeri 10⁻⁵ torr değerine düştükten sonra numune üzerine buharlaştırma işlemi yapıldı.
- k) Buharlaştırma işlemi bittikten sonra vakum cihazı içerisindeki basınç değeri atmosfer basıncı değerine gelince, vakum kabındaki (fanus) numune tutucunun üzerinde bulunan numune alınarak fanus tekrar kapatıldı ve cihazın çalışmasının sonlandırılması işlemi başlatıldı. Böylece kontak yapımı sürecide tamamlanmış oldu.

4.2. Ölçme ve değerlendirme işlemleri

Elde edilen numunenin Akım-Voltaj (I-V), Kapasitans-Voltaj (C-V), Kapasitans-Frekans (C-f) ve İletkenlik-Voltaj (G-V), İletkenlik-frekans (G-f) ölçümleri için 'KEITHLEY 6487 PICOAMMETER/VOLTAGE SOURCE' ve 'AGILENT 4294A IMPEDANCE ANALYZER' cihazları kullanılmıştır. Aydınlatma altında I-V ölçümlerini gerçekleştirmek için ayrıca bir solar simülatör cihazı kullanıldı.

4.2.1. Akım-voltaj (I-V) karakteristikleri

Numunelerin -1.0 Volt ile +1.0 Volt aralığında ters beslem ve doğru beslem ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta alındı. I-V karakteristiklerinden numunelerin idealite faktörü, doyma akım yoğunlukları ve engel yüksekliği değerleri belirlendi. Karanlıkta bir doğrultucu kontağın genel akım denklemi (2.6) eşitliğinde aşağıdaki gibi ifade edilmiştir:

$$I = \left[AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (4.1)$$

Bu ifadedeki ilk terim;

$$I_o = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\Phi_b}{kT}\right) \quad (4.2)$$

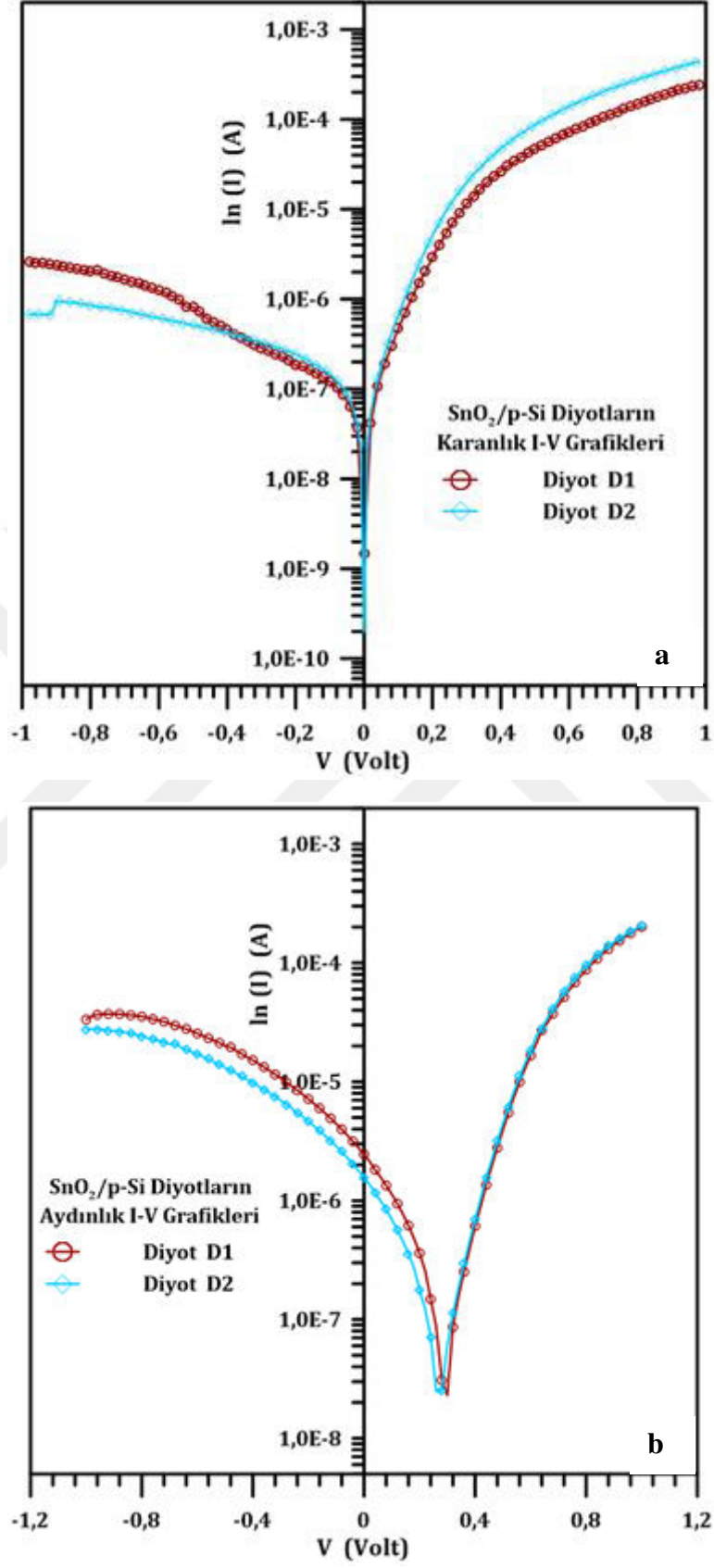
ters doyma akımını ifade eder. Buna sızıntı akımı da denir. Son ifadeden anlaşılacağı gibi engel yüksekliğinin artmasıyla doyma akımı hızlı bir şekilde azalır. Diğer bir ifadeyle engel yüksekliği düşerse sızıntı akımı artar. Buradan anlaşılan o ki, sızıntı akımına izin veren düşük engel yüksekliğidir. (4.1) eşitliğinde $eV \gg kT$ için ifadedeki 1 değeri üstel terim yanında çok küçük kalacağından ihmal edilebilir. Bunu göz önünde tutarak ve (4.2) eşitliğini de dikkate alınarak, (4.1) eşitliği yeniden yazılırsa,

$$I = I_o \exp\left(\frac{eV}{nkT}\right) \quad (4.3)$$

olur. Bu ifadenin önce her iki tarafının tabii logaritmasını alıp, sonra I' nın V' ye göre diferansiyeli alınıp, n' göre çözümlenirse;

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (4.4)$$

elde edilir. Bu son ifade diyotun idealite faktörünü ifade eder. Eşitlik (4.4) ifadesindeki $\frac{dV}{d(\ln I)}$ terimi lnI- V grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmının eğiminden elde



Şekil 4.1. SnO₂/p-Si diyotlarının; a) Karanlık, b) Aydınlatma altında $\ln I$ -V grafikleri.

edildi. (4.2) eşitliğinin tabii logaritmasını alıp, Φ_b ' ye göre çözümlenirse engel yüksekliği için;

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

ifadesi elde edilir. Engel yüksekliğini hesaplamak için kullanılacak bağıntıda I_0 , doyma akım yoğunluğu, $\ln I-V$ grafiğinin doğru beslem tarafındaki lineer kısmına çizilen lineer fit'in akım eksenini kestiği noktadan tespit edilir.



Şekil 4.2. Güneş pili karakterizasyonunda kullanılan güneş simülatörü.

Çizelge 4.1. Karanlık ortamda diyotların karakteristik parametreleri.

Aygıt	Doyma akımı I_0 (A)	İdealite faktörü (n)	Engel Yüksekliği Φ_b (eV)
D1	1.90×10^{-7}	2.85	0.69
D2	2.79×10^{-7}	2.73	0.68

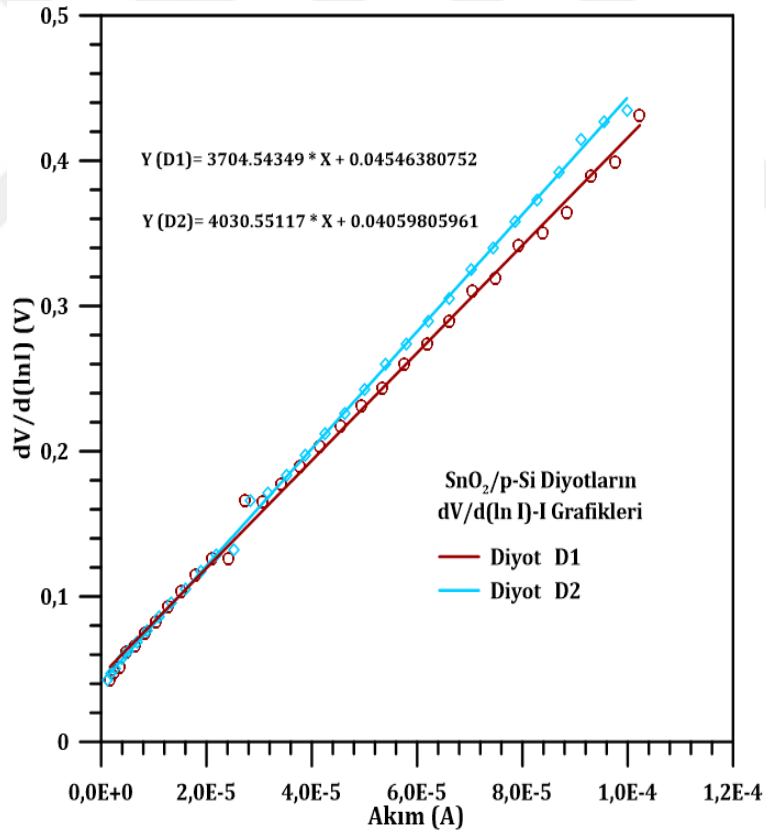
D1 ve D2 diyotlarının ± 0.6 volt'ta doğrultma oranları sırasıyla 58.11 ve 226.50 olarak tespit edildi. Çizelge 4.1'deki idealite faktörü değerleriyle birlikte değerlendirildiğinde D2 diyotunun idealite faktörü D1 diyotuna göre daha iyi, aynı şekilde D2 diyotunun doğrultma çarpanı değeri D1 diyotundan daha yüksek. I-V karakteristiklerinden D1 ve D2 diyotlarının engel yüksekliği için elde ettiğimiz değerler sırasıyla 0.69 eV ve 0.68

eV olup, literatürle uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu diyotların idealite faktörü değerleri de aynı şekilde literatürle uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır (Kaya, 2019 ve Kaya, 2019). Bunun yanı sıra SnO₂/p-Si heteroeklem diyotların engel yüksekliği için daha yüksek değerler rapor edenlerde olmuştur (Çağlar, 2009).

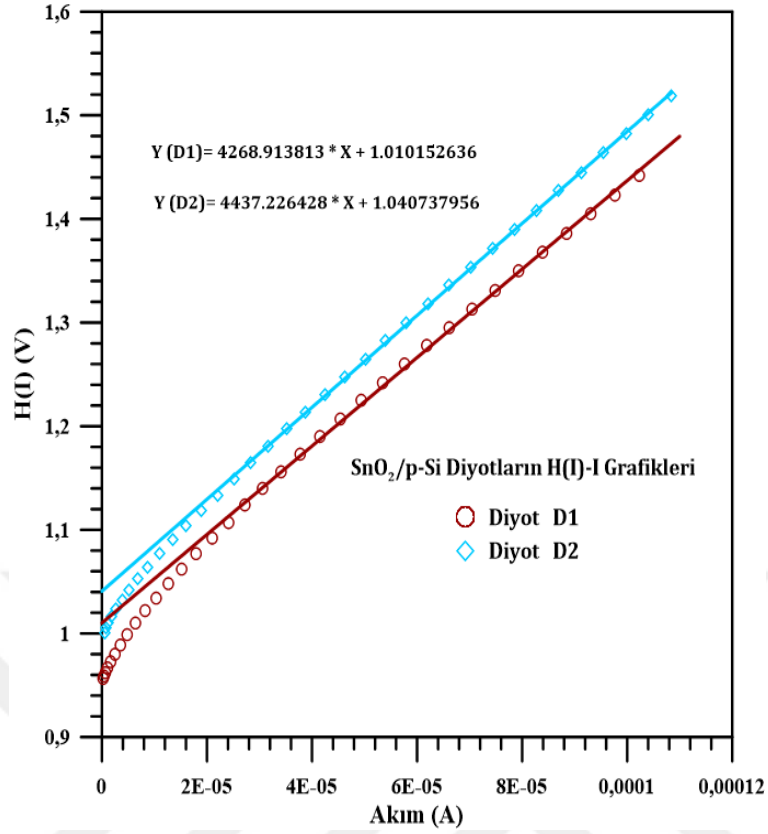
4.2.1a. Cheung fonksiyonlarının kullanılması

Cheung fonksiyonları kullanılarak numunenin idealite faktörü (n), seri direnci (R_s) ve engel yüksekliği (Φ_b) yeniden hesaplandı.

(2.36) eşitliğinin $\ln I$ ' ya göre türevi alınarak elde edilen;



Şekil 4.3. SnO₂/p-Si diyotlarının dV/d(ln I) grafikleri.



Şekil 4.4. SnO₂/p-Si diyotlarının H(I)-I grafikleri.

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = nkT + IR_s \quad (4.6)$$

ifadesinden idealite faktörü (n) ve seri direnç(R_s) ;

$$H(I) = n\Phi_b + IR_s \quad (4.7)$$

ifadesinden ise engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) elde edildi.

Cheung fonksiyonları kullanılarak elde edilen $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiği Şekil 4.3' de görülmektedir. $\frac{dV}{d(\ln I)} - I$ grafiğinde görüldüğü üzere doğrunun I = 0 iken düşey eksenini kestiği noktadan idealite faktörü ve doğrunun eğiminden de seri direnç (R_s) hesaplandı.

Bu şekilde D1, D2 diyotlarına ait $\frac{dV}{d(I_nI)} - I$ grafikleri yardımıyla elde edilen seri direnç büyüklükleri sırası ile 3704.54 Ω ; 4030.55 Ω olarak bulundu. Bu diyotların idealite faktörleri ise sırasıyla 1,76; 1,57 olarak hesaplandı. Benzer şekilde $H(I) - I$ grafikleri yardımıyla D1 ve D2 diyotlarına ait seri direnç değerleri sırasıyla 4268.92 Ω ve 4437.23 Ω olarak elde edilmiştir. Diyotların engel yüksekliği değerleri ise D1 için 0.57 eV ve D2 için 0.66 eV olarak elde edilmiştir. (Çizelge 4.2)

Çizelge 4.2. SnO₂/p-Si diyotların Cheung fonksiyonları ile belirlenen karakteristik parametreleri.

Diyot Adı	İdealite faktörü (n)	Seri Direnç (Ω)	
		$\frac{dV}{d(I_nI)} - I$ grafiği kullanılarak	H(I)-I grafiği kullanılarak
D1	1.76	3704.54 Ω	4268.92 Ω
D2	1.57	0.66	4030.55 Ω

Elde edilen seri direnç değerleri incelendiğinde hem $\frac{dV}{d(I_nI)} - I$ ve hem de H(I)-I grafiklerinden elde edilen değerlerin oldukça yüksek değerler olduğu anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, buharlaştırma yönteminde p-Si kristalinin ön (parlak) yüzeyine toz halindeki SnO₂ materyalini buharlaştırırken, SnO₂ yapısındaki oksit'in daha düşük sıcaklıklarda buharlaşması ve ara yüzeyde bir oksit tabakasına sebep olmuş olabilir. Diyotların seri direnç değerlerinin nispeten büyük değerlere sahip olması elbette ki onların fotovoltaik performansını ve verimini olumsuz etkileyecektir (Goetzberger ve ark., 1998). Bunun yanı sıra $\frac{dV}{d(I_nI)} - I$ ve H(I)-I grafiklerinden elde edilen seri direnç değerleri kendi içerisinde tutarlı ve uyum içerisinde oldukları anlaşılmaktadır.

4.2.1b. Norde fonksiyonlarının kullanılması

Norde tarafından ortaya konan bu model ile kontağın engel yüksekliği ve seri direnci hesaplanır. Norde fonksiyonu (2.37) eşitliğine göre aşağıdaki gibi ifade edilir (Norde, 1979);

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

Bu eşitlikte γ , idealite faktöründen büyük olan ilk tamsayı, $I(V)$ ise akım-voltaj eğrisinden elde edilen akım değeridir.

Şekil 3.4 de uygulanan voltaja karşılık $F(V)$ grafiği görülmektedir. Bu grafikte voltajın belli bir değerinde $F(V)$ minimum değer almaktadır. Norde fonksiyonunu minimum yapan voltaj değeri V_o olmak üzere, buna bağlı Norde fonksiyonu da $F(V_o)$ olur. Bu bilgiler ışığında $F(V) - V$ grafiği yardımı ile engel yüksekliği (2.38) eşitliğinden;

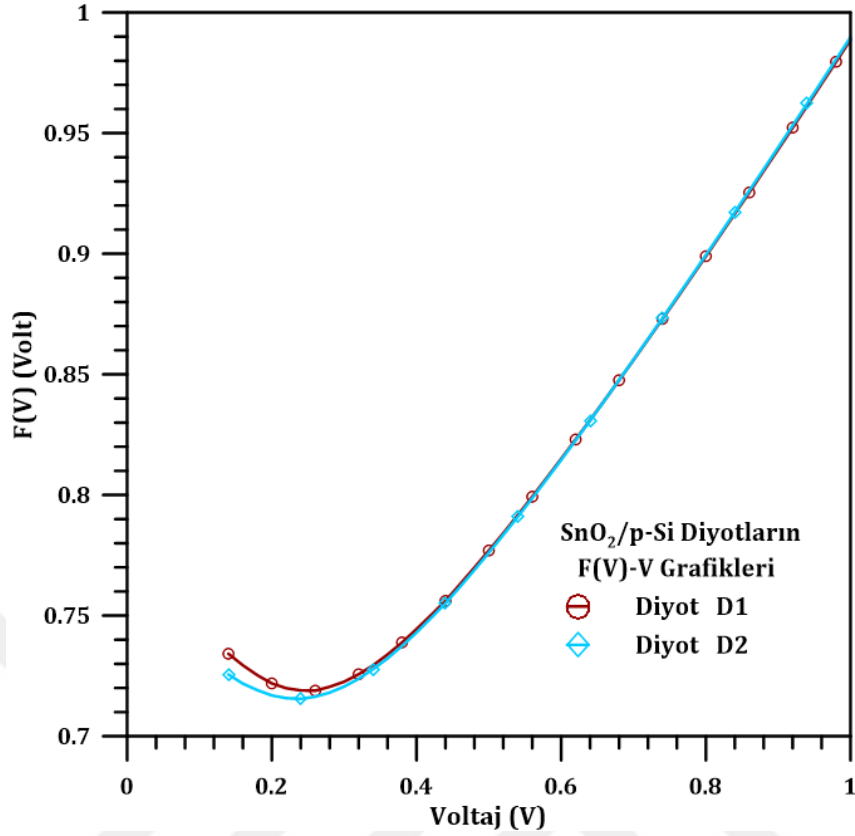
$$\Phi_b = F(V_o) + \frac{V_o}{\gamma} - \frac{kT}{q}$$

elde edilebilir. Bu ifadede $F(V_o)$, yukarıda da ifade edildiği gibi Şekil 4.5' deki $F(V) - V$ grafiğine ait $F(V)$ nin minimum noktasına karşılık gelen değeri ve V_o ise bu değere karşılık gelen voltaj değerini (V) göstermektedir.

Yine Norde fonksiyonu kullanılarak kontağın seri direncini (R_s) hesaplamak için (2.39) eşitliği,

$$R_s = \frac{kT(\gamma-n)}{q(I_{min})}$$

kullanılabilir. Burada k ; boltzman sabiti, T ; mutlak sıcaklık ve I_{min} ise $F(V_o)$ değerine karşılık gelen akım değeridir. (2.38) ve (2.39) eşitliklerinden elde edilen engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) değerleri Çizelge 4.3 de gösterilmiştir.



Şekil 4.5. SnO₂/p-Si diyetlerinin F(V)-V grafikleri.

Çizelge 4.3. Norde Fonksiyonları ile elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç değerleri.

Diyot	Engel Yüksekliği (eV)	Seri Direnç (Ω)
D1	0.78	545.50
D2	0.77	461.47

Norde fonksiyonundan elde edilen engel yüksekliği değerleri, I-V ve Cheung fonksiyonları yardımıyla elde edilen engel yüksekliği değerlerinden daha büyük olduğu görülmektedir. Bu durumu biz I-V ve Cheung fonksiyonları ile engel yüksekliği tespitinde, akımın daha geniş bir aralığını kullanarak işlem yapıldığını, bunun yanı sıra Norde fonksiyonunda ise sadece Norde fonksiyonunu minimum yapan, minimum potansiyel değeri ve bu minimum potansiyele karşılık gelen minimum akım değeri kullanılmasına atfedebiliriz.

Norde fonksiyonu ile elde edilen seri direnç değerinde ise minimum akım değeri (2.42) eşitliğinde doğrudan bölü olarak sonucu etkilemektedir.

4.2.2. Fotovoltaik Karakteristikler

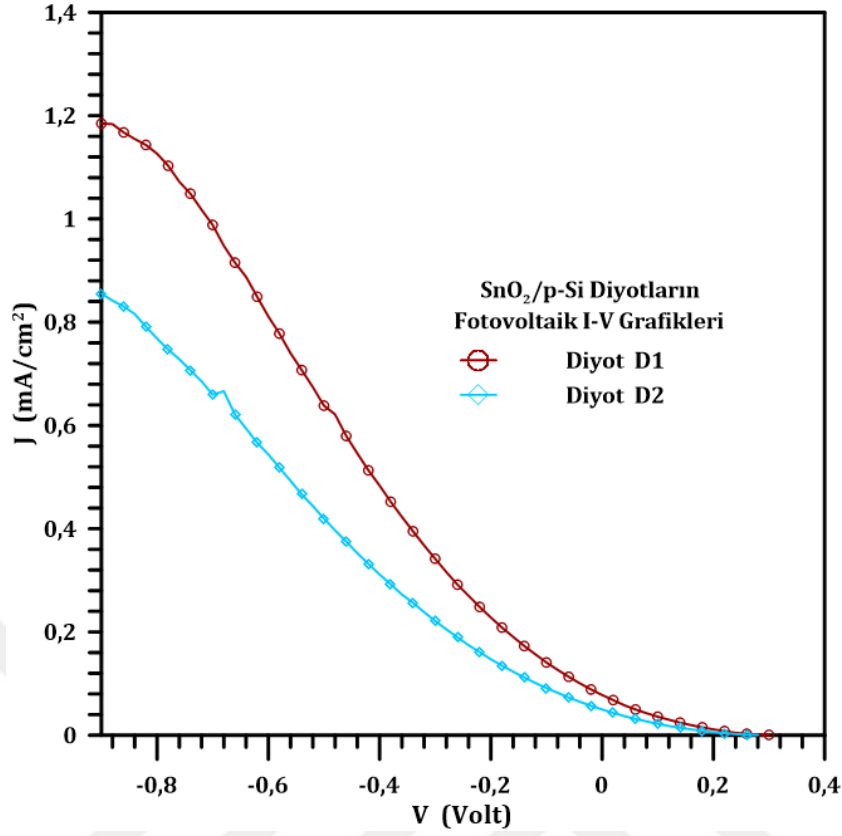
Üretilen numunelerin aydınlatma altında ölçümlerinin alınması için bir solar simulator cihazı kullanıldı. AM 1.5 ve (100 mW/cm²) aydınlatma şiddeti altında akım-voltaj ölçümleri alındı. Alınan ölçümlerden faydalanarak çizilen akım yoğunluğu-voltaj grafikleri Şekil 4.6' da gösterilmiştir. Grafiğin yatay ve düşey eksenini kestiği noktalar sırasıyla açık devre gerilimi (V_{oc}) ve kısa devre akımı (J_{sc}) değerlerini verir. (2.13) eşitliğinden dolum çarpanı (FF);

$$FF = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{sc}}$$

olarak ifade edilmektedir. Bu parametre üretilen numunenin kalitesiyle, iyi bir diyot olup olmadığı ile doğrudan ilintilidir. Dolum çarpanının değeri teorik olarak sıfır ile bir arasındadır. Ancak deneysel olarak elde edilen değerlere bakıldığında 0.20 nin üzerinde ve 1 değerinin biraz altındaki aralıkta değerler almaktadır. (2.14) eşitliğinden güneş pili verimi,

$$\eta = FF \frac{V_{oc} I_{sc}}{P_{in}} \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilir. Eşitlik (4.8) ifadesine bakıldığında FF terimi çarpan olarak verime etki etmektedir. FF ' nin değeri 1'in altında olacağı göz önüne alındığında genellikle verim değerini olumsuz etkileyebilir. Kontak alanı göz önüne alınarak ($A=0.0314 \text{ cm}^2$) akım yoğunlukları akımın kontak alanına bölünmesi ile elde edildi. ($J = \frac{I}{A}$). Şekil 4.6' da voltaja karşılık mA/cm² olarak akım yoğunluğunu göstermektedir.

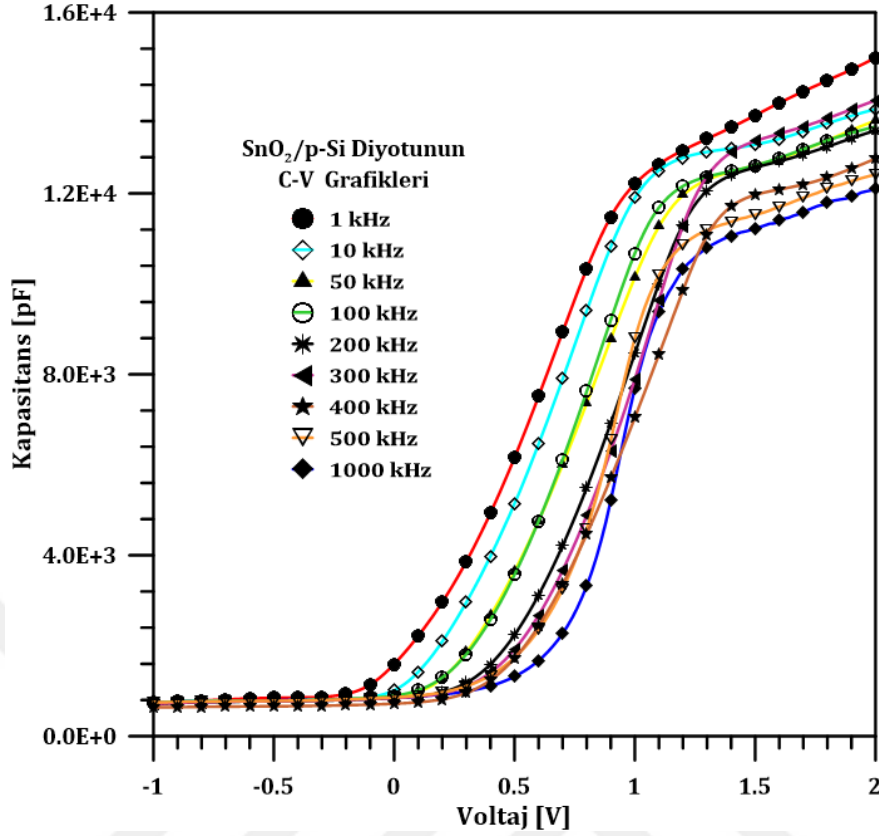


Şekil 4.6. SnO₂/p-Si diyotların aydınlatma altında J-V grafiği.

Şekilde D1 ve D2 diyotlarının açık devre gerilimleri sırasıyla 0.31 V ve 0.29 V, kısa devre akımları ise 0.078 mA ve 0.050 mA olarak tespit edildi. Dolum çarpanı değerleri sırasıyla 14.88 ve 15.17 olarak hesaplandı. Bu değerler literatürle karşılaştırıldığında oldukça küçük olduğu değerlendirilebilir. SnO₂ (D1 ve D2) p-n eklemlerin çıkış gücüne karşılık gelem maksimum voltaj değerleri sırasıyla 0.1 V ve 0.1 V, maksimum akım değerleri ise 0.036 mA ve 0.022 mA olarak tespit edildi.

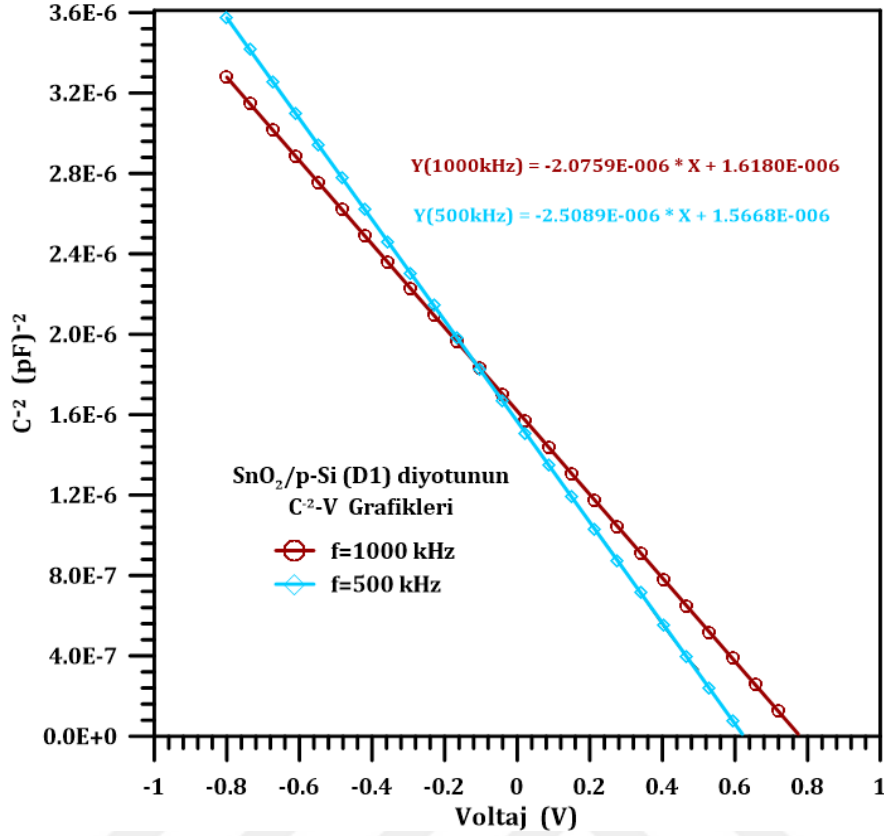
4.2.3. Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristikleri

Numunelerin Kapasitans-Voltaj (C-V), Kapasitans-Frekans (C-f), iletkenlik-Voltaj (G-V) ve iletkenlik-frekans (G-f) ölçümleri için “AGILENT 4294A PRECISION IMPEDANCE ANALYZER” cihazı kullanıldı.



Şekil 4.7. SnO₂/p-Si (D1) diyotuna ait sabit frekans C-V grafikleri.

C-V ölçümleri, $f = 1$ kHz, 10 kHz, 50 kHz, 100 kHz, 200 kHz, 300 kHz, 400 kHz, 500 kHz ve 1000 kHz sabit frekans değerlerinde ve -1 V ile 2V voltaj aralığında alındı. Numunelerden birine ait sabit frekans C-V grafikleri şekil 4.7’ de görülmektedir. Şekil 4.7’ de görüldüğü üzere negatif beslemde diyotun kapasitans değeri voltaja çok zayıf bağlı, buna karşılık voltaj değeri sıfıra yaklaşırken diyotun kapasitans değerinde azda olsa bir artış gözlenmekte ve voltajın sıfır değerinden itibaren, sabit frekans değerine de bağlı olarak, kuvvetli artışlar görülmektedir. Frekans değerlerine de bağlı olarak yaklaşık 1 volt ile 1.3 volt değerlerinde kapasitanstaki bu artış hızının aniden düşmekte olduğu görülmektedir. Böylece C-V grafiklerinde başlıca üç bölge olduğu anlaşılmaktadır. Kapasitanstaki değişim, diyottaki yük miktarı değişimine işaret eder. Kapasitanstaki değişimin maksimum olduğu orta bölge aynı zamanda akım-voltaj grafiğinde akımdaki maksimum değişimin olduğu bölge ile örtüşmektedir. C-V eğrileri çizilen D1 diyotunun $f=500$ kHz ve $f=1000$ kHz sabit frekans değerleri için C^{-2} -V grafikleri aşağıda verilmiştir.



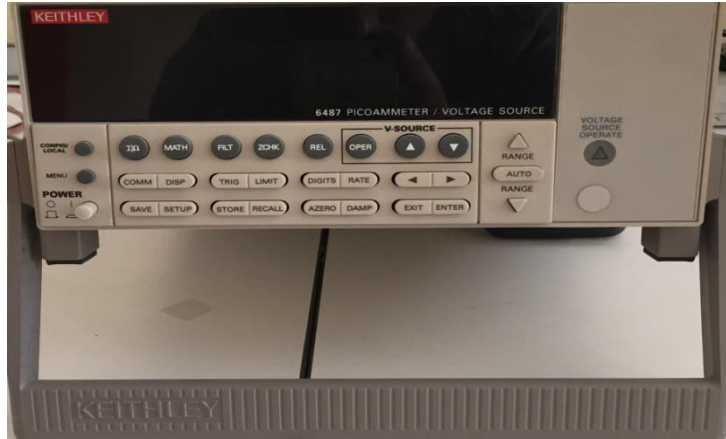
Şekil 4.8. SnO₂/p-Si (D1) diyotuna ait f=500 kHz ve f=1000 kHz sabit frekans değerlerinde C²-V grafikleri.

D1 diyotunun difüzyon potansiyeli (V_d) değerleri Şekil 4.8 yardımıyla 500 kHz frekans değerinde 0.62 eV ve 1000 kHz frekans değerinde ise 0.78 eV olarak belirlendi. Deneysel olarak tespit edilen difüzyon potansiyeli pn yapısındaki arayüzeyinde oluşan engel tabakasının en önemli kaynağıdır. Fermi enerji seviyesi ifadesi $E_F = kT \ln \frac{N_V}{N_A}$ ve burada N_V ; valans bandındaki durum yoğunluğu ve $N_V = 1.04 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (p-Si için); N_A ; akseptör yoğunluğu ve $N_A = 1.38 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho = 1 \text{ } \Omega\text{cm}$ için) ve $N_A = 1.38 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ($\rho = 10 \text{ } \Omega\text{cm}$ için) değerlerini kullandığımızda Fermi enerji seviyesi için 0.17 eV ile 0.23 eV arasında değerler elde edilir. Fermi enerji seviyesi için elde ettiğimiz bu değerleri ve $V_d = 0.78 \text{ eV}$ değerini (2.51) eşitliği ile kullanarak engel yüksekliği değerini 0.66 eV olarak elde ettik. C-V karakteristiklerinden elde ettiğimiz bu değer I-V karakteristiklerinden elde ettiğimiz engel yüksekliği değerleri ile örtüşmektedirler. Kontakın uzay yük bölgesinin, p ve n tarafında enerji bantlarındaki bükülmeye işaret eden V_d doping konsantrasyonları ile de ilintilidir. Zira bir

yarıiletkenin doping konsantrasyonu ne kadar yüksek ise (dejenere durum hariç), kontak yapıldığında p tipinde akseptör enerji seviyesinin, n tipinde donör enerji seviyesinin uzay yük bölgesinde kalan kısmında yüksek yük konsantrasyonundan dolayı iyonlaşma da daha fazla olabilir ve bu da bant bükülmesinin derinliğini etkileyebilir. Bunun yanı sıra p ve n tipi yarı iletken kontak bileşenlerinin iş fonksiyonları arasındaki farkın büyüklüğü, kontak yapıldıktan hemen sonra meydana gelecek olan difüzyon akımını tetiklemede başlıca faktördür.



Şekil 4.9. C-V-f ve G-V ölçüm işlemleri için kullanılan “AGILENT 4294A PRECISION IMPEDANCE ANALYZER” cihazı.

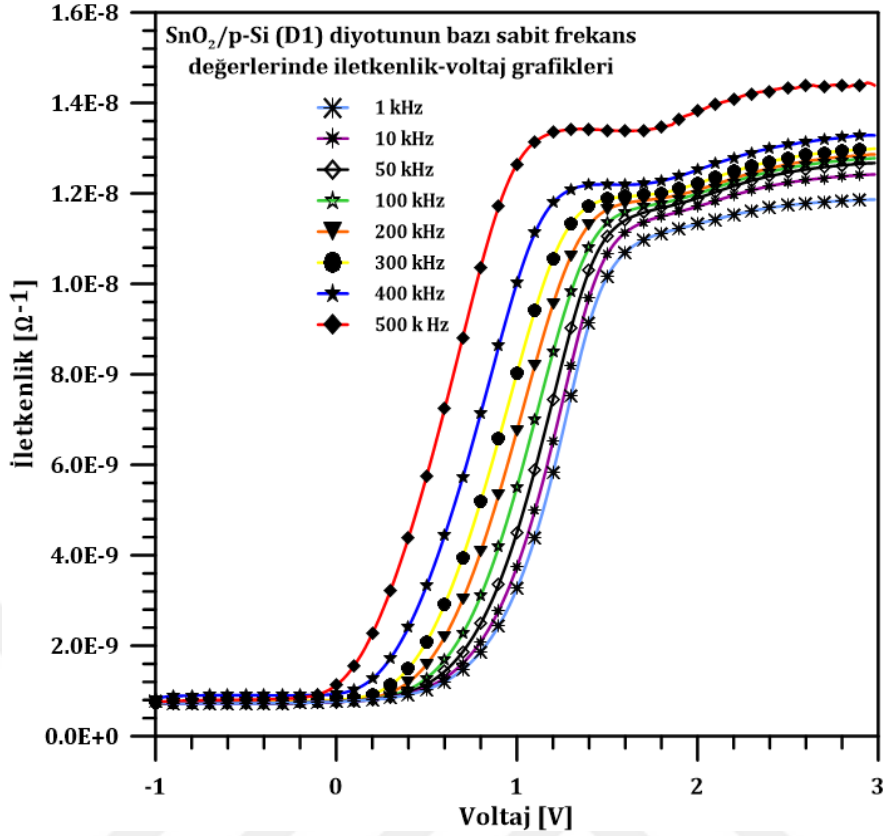


Şekil 4.10. Akım-Voltaj ölçümleri için kullanılan “ KEITHLEY 6487 PICOAMMETER/VOLTAGE SOURCE” cihazı.

Difüzyon akımı aslında çok kısa bir süreliğine vuku bulur ve iç yapılanma potansiyelinin (built-in potential) ve dolayısıyla buna bağlı olarak başlangıçtaki p-n elektrik alanına zıt yönde olan iç yapılanma elektrik alanının oluşmasıyla son bulur. Bu süre saniyelerle ifade edilebilir. Bir diyotun en önemli özelliği elektrik akımını belli bir yönde geçirmesi ve ona zıt yönde ise akımın geçmesine engel oluşturmasıdır. Dolayısıyla bu özellikteki kontaklara “doğrultucu kontak” (rectifier contact) denir. Doğrultucu kontakın temel yapısı ise iç yapılanma potansiyeline ve dolayısıyla iç yapılanma elektrik alanına bağlıdır.

4.2.4. İletkenlik- Voltaj (G-V) karakteristikleri

$\text{SnO}_2/\text{p-Si}$ (D1) diyotuna ait iletkenlik-voltaj ölçümleri -1 volt ile 3 volt aralığında ve $f = 1 \text{ kHz}, 10 \text{ kHz}, 50 \text{ kHz}, 100 \text{ kHz}, 200 \text{ kHz}, 300 \text{ kHz}, 400 \text{ kHz}, 500 \text{ kHz}$ sabit frekans değerlerinde alındı. Bu ölçümlere dayalı olarak çizilen iletkenlik-voltaj grafikleri Şekil 4.11 de görülmektedir. Şekil 4.11’ den de görüleceği üzere diyotun iletkenliği voltaja bağlı olarak artmaktadır. Grafiklerde iletkenliğin voltaja bağlı değişiminde genel olarak üç bölge dikkati çekmektedir. Birincisi negatif beslem bölgesi; bu bölgede pn eklem iletkenliği voltaja çok zayıf bağlı ve değeri oldukça düşük. İkinci bölge; voltajın sıfır olduğu değerden başlayarak yaklaşık olarak voltajın 1 volt ile 1.3 volt (sabit frekans değerlerine bağlı olarak) değeri arasındaki kısım. Bu bölgede iletkenlik voltaja kuvvetli bir şekilde bağlı ve hızlı bir yükseliş gösteriyor. Üçüncü bölge ise ikinci bölgenin bitiminden itibaren daha büyük voltaj bölgesindeki kısım. Bu bölgede iletkenlik, ikinci bölgeye göre artış hızı düşmekte ve voltaj bağımlılığı azalmakta olduğu görülüyor. Ancak birinci bölgedekine göre voltaj bağımlılığı hâlâ daha kuvvetli olduğu da anlaşılmaktadır. İletkenliğin voltaj bağımlılığını gösteren grafik, I-V grafiği ile de iyi bir uyum içerisindedir.

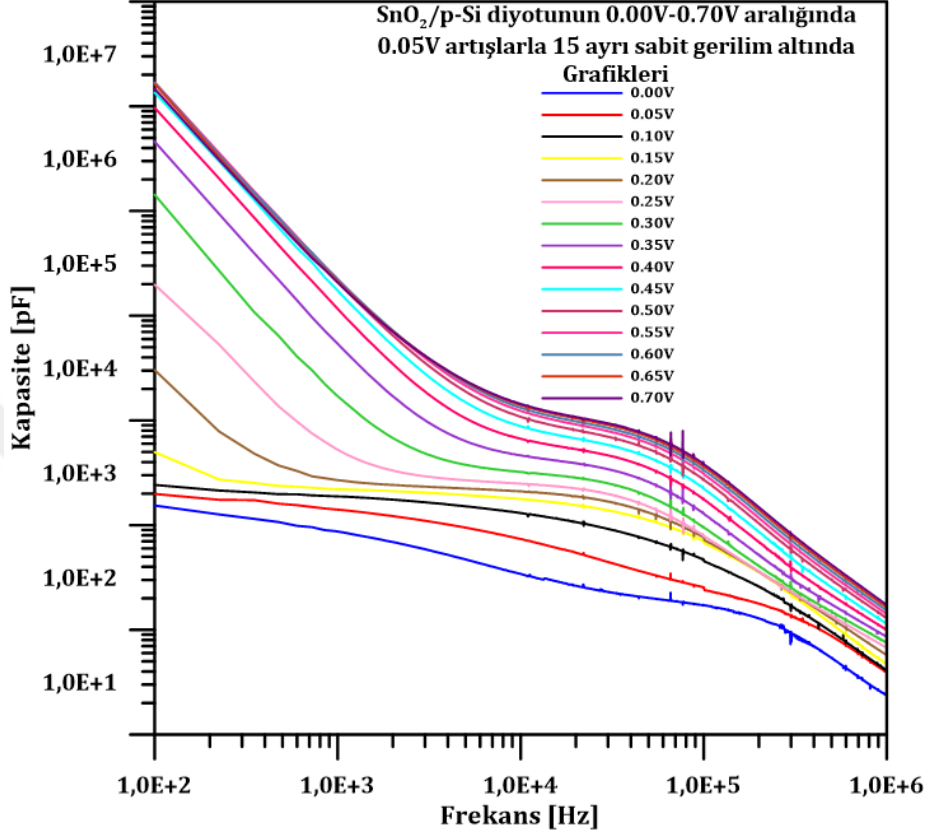


Şekil 4.11. SnO₂/p-Si (D1) diyotunun $f = 1 \text{ kHz}, 10 \text{ kHz}, 50 \text{ kHz}, 100 \text{ kHz}, 200 \text{ kHz}, 300 \text{ kHz}, 400 \text{ kHz}, 500 \text{ kHz}$ sabit frekans değerlerinde iletkenlik-voltaj grafikleri.

4.2.5. Kapasitans-frekans (C-f) karakteristikleri

SnO₂/p-Si (D1) numunesinin frekansa bağlı kapasitans ölçümleri, 0.00 V-0.70V aralığındaki on beş ayrı sabit gerilim altında, 100 Hz ile 1 MHz frekans değerleri arasında yapıldı ve grafikleri çizildi. Şekil 4.12, SnO₂/p-Si (D1) numunesine ait C-f grafiklerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü gibi düşük frekans bölgesinde kapasitans değerleri yüksek frekans bölgesine göre oldukça büyük. Aradaki fark ara yüzey tabakadaki fazla yüklerden kaynaklandığı düşünülebilir. Yüksek frekanslara doğru gidildikçe ara yüzeydeki bağlı yükler ac sinyali takip edemediğinden kapasiteye katkıda bulunamazlar. Sadece hızlı hallerin kapasiteye katkısı olur. Dolayısıyla yüksek ve düşük frekanslardaki kapasite arasında bir fark meydana gelir. Şekil 4.12' deki

grafiklerden görüleceği gibi, C-f grafiklerin deki eğriler düşük frekanslarda tam bir doyuma ulaşmamaktadır. Bu durum diyotun ideal olmaması ile ilgili olabilir.



Şekil 4.12. SnO₂/p-Si (D1) diyotunun on beş ayrı sabit gerilim değerlerinde C-f grafikleri.

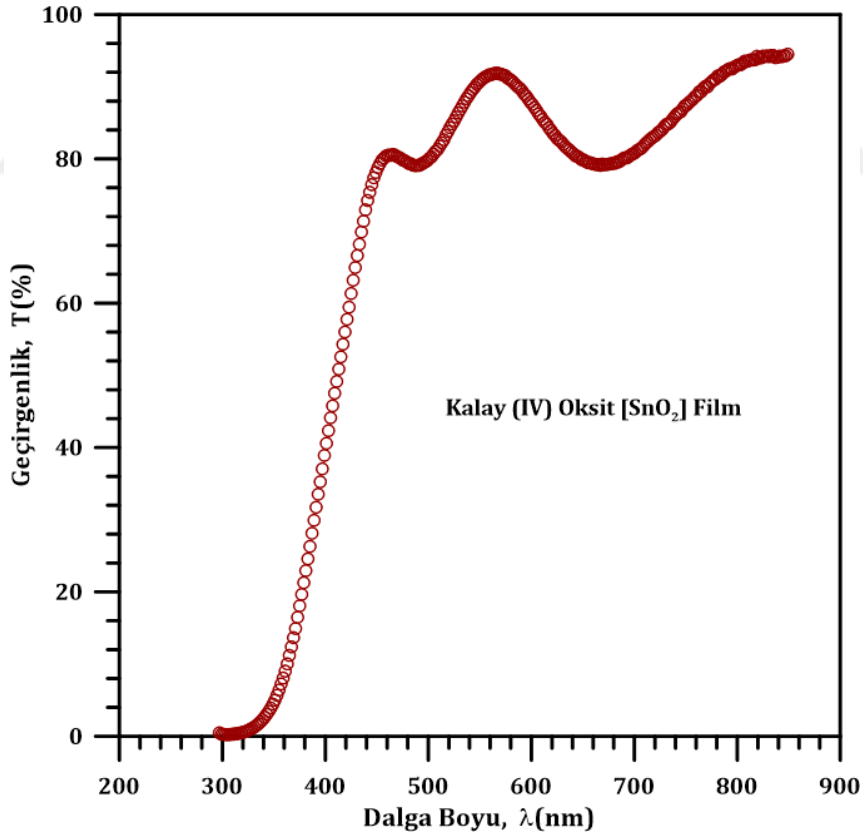
4.2.6. SnO₂ filminin optiksel özellikleri

SnO₂/p-Si diyotların vakum kaplama cihazında üretimi esnasında kristalin bitişğine yerleştirilen mikroskop camı (lam) üzerine kalay oksidin buharlaştırılmasıyla elde edilen SnO₂ filmi, üretim şartları itibariyle p-Si kristalinin yüzeyine kaplanan SnO₂ filmi ile tamamen özdeş olduğu aşikârdır. Bu bağlamda üretilen SnO₂/p-Si heteroeklem yapıdaki diyotlarda kullanılan SnO₂ filmlerin optiksel incelemesi için, "Shimadzu 2450 UV-Vis spectrophotometer" cihazı kullanılarak, görünür ışık bölgesinde filmin yüzeyine düşen foton dalga boyuna karşılık geçirgenlik ölçümleri alındı. Şekil 4.13, filmin yüzeyine düşen ışığın dalga boyuna karşılık yüzde olarak geçirgenliği

göstermektedir. Şekil 4.13' ten görüldüğü üzere film, üzerine düşen fotonların yüzde olarak bir kısmını geçirirken diğer bir kısmını ise soğurduğu anlaşılmaktadır. Foton enerjisinin belli bir aralığında SnO₂ filminin yüksek bir soğurma göstermesi, onun belli bir bant aralığına işaret eder. Direkt bandgap' e sahip SnO₂ filmi (Baco ve ark., 2012; Hsu ve ark., 2014) için 2.46 eşitliğinden,

$$(\alpha hV)^2 = hV - E_g$$

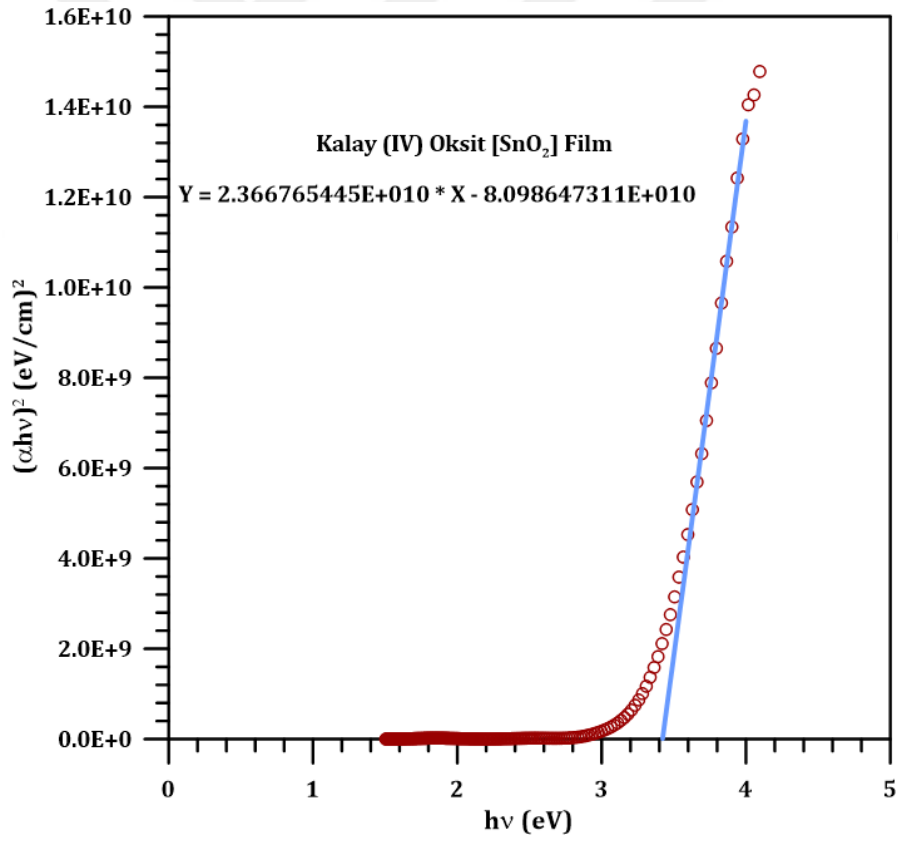
yararlanarak $(\alpha hV)^2$ nin hV ye göre grafiği çizilip elde edilen grafiğin lineer kısmına fit yapılarak, bu fit'in uzatılmasıyla doğrunun yatay eksenini kestiği noktada $(\alpha hV)^2 = 0$, yani $hV - E_g = 0$ olur dolayısıyla bu noktadaki $hV = E_g$ olacaktır. Böylece optik geçirgenlik ölçümü alınan SnO₂ filminin direkt bant aralığı belirlenmiş olur.



Şekil 4.13. Termal buharlaştırma ile kaplanan SnO₂ filminin foton dalga boyuna karşılık geçirgenlik grafiği.



Şekil 4.14. Optik soğurma ve geçirgenlik ölçüm işlemleri için kullanılan UV-Vis spektrofotometre cihazı.



Şekil 4.15. Termal buharlaştırma ile kaplanan SnO₂ filminin foton enerjisine karşılık $(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

Termal buharlaştırma ile kaplanan SnO₂ filmi için elde edilen bu sonuç literatür kayıtları ile yakın uyum içindedir (Çağlar ve ark., 2009; Baco ve ark., 2012; Hsu ve ark., 2014; Arote ve ark., 2017). Termal buharlaştırma ile üretmiş olduğumuz SnO₂ filmi için $E_g = 3.42 \text{ eV}$ 'luk bir optiksel bant aralığı elde etmemiz, söz konusu filmin yarı iletken karakterde olduğunu gösterir. Özellikle literatürde farklı yöntemlerle üretilen SnO₂ filmleri için elde edilen değerlerle yakın bir uyum içinde olması bu iddiayı güçlendirmektedir.



5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Kalay oksit/p-si heteroeklem yapıların üretimi ve karakterizasyon işlemleri için Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü bünyesinde bulunan “Yarıiletken Aygıt Üretimi ve Karakterizasyonu Laboratuvarı” kullanılmıştır. SnO₂ toz halinde Sigma&Aldrich firmasından temin edilmiştir. Toz SnO₂ kaplama işleminden önce herhangi bir kimyasal işlem uygulanmamıştır, alındığı şekliyle termal buharlaştırma yöntemiyle kaplama işlemi yapılmıştır. p-Si yüzeyine kaplanan kalay oksit’in buharlaştırma esnasında iletkenlik özelliğinde (iletken, yarıiletken) herhangi bir değişim olup olmadığını, diğer bir ifadeyle yarıiletken özelliğini koruyup korumadığını gözlemlemek için, vakum kaplama ünitesinde kaplama esnasında p-Si kristaline bitişik olarak yerleştirdiğimiz mikroskop camı (lam) üzerinde oluşan filmin optiksel geçirgenlik ölçümlerini alarak, yasak enerji aralığı incelemesi yaptık. Bizim bu çalışmada kullandığımız SnO₂ için elde ettiğimiz bandgap değeri 3.42 eV. Bu değer literatürdekilerle karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu anlaşılmaktadır (Çağlar ve ark., 2009; Baco ve ark., 2012; Hsu ve ark., 2014; Arote ve ark., 2017).

SnO₂/p-Si heteroeklem yapıların üretiminde değişik yöntemler kullanılmıştır. Bunlardan bazıları; elektron demeti buharlaştırma metodu “electron beam evaporation” (Kaya 2019), “Sol-gel spin coating” metodu (Çağlar, 2009), DC magnetik saçtırma yöntemi “DC magnetron sputtering” (Lee, 2019). Bizim SnO₂/p-Si heteroeklem diyotları için kullandığımız termal buharlaştırma yöntemi, bildiğimiz kadarıyla şu ana kadar SnO₂/p-Si heteroeklem üretiminde kullanılmamış. SnO₂/p-Si heteroeklem diyot üretimi için ilk defa bu çalışmamızla kullanmış olduğumuz termal buharlaştırma yöntemi ile üretmiş olduğumuz numunelerin literatürde mevcut olan farklı yöntemlerle üretilen SnO₂/p-Si heteroeklem diyotlarla karşılaştırmasını yaptığımızda; diyotların doğrultucu özellikleri itibariyle iyi bir nitelik sergilediklerini söyleyebiliriz. D1 ve D2 diyotları için elde ettiğimiz idealite faktörü değerleri sırasıyla 2.85 ve 2.73, bu değerler literatürdeki $n = 1.94, 3.12, 4.00$ ve (Kaya, 2019) ve $n = 2$ (Çağlar, 2009) değerleriyle uyum gösterdiği anlaşılmaktadır. Gerçekte ideal bir diyotun idealite faktörü değeri $n = 1$ olmalıdır. Ancak idealite faktörü için deneysel olarak elde edilen değerler genellikle 1’den büyük olarak elde edilmektedir. Diyodun ideallikten sapmasına neden

olan, kontak ara yüzeyinde oluşan kirlilikler, oksit tabakası, kontak üretimi esnasında oluşabilecek sıcaklık etkisi ve bunun sonuçları, kimyasal temizleme esnasında kimyasallardan kaynaklanan olumsuzluklar vs. gibi faktörler sebep olabilir. Mevcut çalışmada p-Si kristalinin ön yüzeyine film kaplaması için kullandığımız SnO₂ nin kendisi zaten oksit ihtiva ettiğinden, buharlaştırma esnasında ara yüzeyde oksit tabaka oluşması kaçınılmazdır. Bizim bu gerçekleri bildiğimiz halde SnO₂/p-Si heteroeklem üretiminde termal buharlaştırma yöntemi kullanmamızın sebebi, ürettiğimiz diyotların sadece diyot olarak değil, aynı zamanda fotovoltaiik incelemesinin de yapılmasıdır.

SnO₂/p-Si yapısındaki D1 ve D2 diyotları için I-V karakteristiklerinden elde ettiğimiz 0.69 eV ve 0.68 eV değerleri literatürdeki 0.65 eV, 0.62 eV ve 0.63 eV (Kaya, 2019) değerleriyle yakın bir uyum içinde olduğu görülmektedir.

Üretmiş olduğumuz SnO₂/p-Si heteroeklem diyotların karakterizasyon işlemlerinde Cheung ve Norde fonksiyonları da kullanıldı. Böylece diyotların hem seri direnç (R_s) değerleri hesaplandı ve hem de I-V karakteristiklerinden elde edilen idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri için karşılaştırma imkânı elde edilmiş oldu.

Numunelerin fotovoltaiik karakterizasyonu için bir solar simülatör yardımıyla AM 1.5 ve 100 mW/cm² aydınlatma altında I-V ölçümleri alındı. Yapılan hesaplamalar neticesinde termal buharlaştırma yöntemi ile üretmiş olduğumuz SnO₂/p-Si heteroeklem D1 ve D2 diyotları için açık devre gerilimleri sırasıyla 0.36 eV ve 0.22 eV ve kısa devre akımları ise 0.078 mA ve 0.050 mA olarak tespit edilmiştir. D1 ve D2 için dolum çarpanı değerleri sırasıyla yüzde 14.88 ve 15.17 olarak elde edildi. Açık devre gerilimi, kısa devre akımı ve dolum çarpanı (FF) için elde edilen değerler küçük olup, konu üzerinde çalışmalar yapılarak iyileştirilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Netice olarak, SnO₂/p-Si heteroeklem diyot üretiminde bilgilerimiz dahilinde daha önce denenmemiş olan termal buharlaştırma yöntemi kullanıldı ve üretim gerçekleştirildi. Yapılan karakterizasyon işlemleri sonucunda elde edilen diyot parametrelerinin literatürle karşılaştırıldığında kayda değer olduğunu anlaşıldı. Pratik bir yöntem olan termal buharlaştırma yönteminin SnO₂/p-Si heteroeklem diyot üretiminde de kullanılabilceğini ortaya kondu. Böylece üretilen diyotların doğrultucu özelliklerinin iyi olduğu, bunun yanı sıra fotovoltaiik özellik de sergiledikleri tespit edildi.

KAYNAKLAR

- Akkal, B., Benemara, A., Gruzza, B., and Bideux, L., 2000. Characterization of Interface States at Au/InSb/InP (100) Schottky Barrier Diodes As A Function of Frequency. *Vacuum*, **57**; 219-228.
- Alaf, M., 2007. *Kalay (Sn) ve Kalay Oksit (SnO₂) İnce Filmlerin Üretim ve Karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Altaş, İ. H., 1998. *Fotovoltaik Güneş Pilleri: Yapısal Özellikleri ve Karakteristikleri*. Bilesim Yayıncılık, 47: 66-71
- Antonia, A., Menna, P., Addonizio, M.L., Crocchiolo, M., 1992. Transport properties of polycrystalline tin oxide films. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **28**; 167-173.
- Aydoğan, Ş., 2004. *Sn/PPy/n-Si/Au-Sb Yapının Bazı Karakteristik Parametrelerinin Sıcaklığa Bağlı Akım-Voltaj, Kapasite-Voltaj ve Kapasite-Frekans Ölçümlerinden Tayin Edilmesi*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Aydoğan, Ş., 2011. Metal-yarıiletken kontaklar, 12. *Katıhal Fiziği*. Nobel Yayıncılık Yayınevi, Ankara. 609.
- Aydoğan, Ş., 2015. Güneş pilleri, (8). *Katıhal Elektronikliği* (1). Nobel Yayınevi, 1439, Ankara. 212.
- Ayyıldız, E., Temirci, C., Batı, B., Türüt, A., 2010. The effect of series resistance on calculation of the interface state density distribution in Schottky diodes. *International Journal of Electronics*, **88**: 625-633.
- Baco, S., Chik, A., Yassin, F. Md., 2012. Study on optical properties of thin oxide thin film at different annealing temperature. *Journal of Science and Technology*, **4**: (1): 61-72
- Batı, B., 1998. *İdeal ve İdeal Olmayan Omik ve Doğrultucu Kontaktlı Au/n-Si Schottky Diyotlarda Doğru Beslem Kapasite- Voltaj- Frekans Karakteristikleri*. EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, (Doktora Tezi), Erzurum.
- Biber, M., 2000. *Au/-Cu/n-GaAs Schottky Kontaktlarında Anodik Oksidasyon İşleminin Karakteristik Diyot Parametreleri Üzerindeki Etkileri*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bouras, K., Schmerber, G., Rinnert, H., Auerau, D., Park, H., Ferblantier, G., Colis, S., Fix, T., Park, C., Kim, W.K., Dinia, A., Slaoui, A., 2016. Structural, optical and electrical properties of Nd-doped SnO₂ thin films fabricated by reactive magnetron sputtering for solar cell devices. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **145**: 134-141.
- Cachet, H., Bruneaux, J., Folcher, G., Clement-Levy, C., Vard, C., Neumann-Spallart, M., 1997. n-Si/SnO₂ junctions based on macroporous silicon for photoconversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **46**: 101-114.
- Cafer, T., 2000. Yarıiletken Kontaktları ve Eklemleri, 3. *Katıhal Elektronikliği*. Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul. 233

- Card, H.C. and Rhoderick, E.H. 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. Interface effects in silicon Schottky diodes. *J. Phys. Appl. Phys.*, **4**: 1589-1601.
- Chattopadhyay, P. and Daw, A.N. 1986. On the current transport mechanism in a metal-insulator-semiconductor (MIS) diode. *Solid-State Electronics* **29**: 555-560.
- Cheng, H.E., Tian, D.C., Huang, K.C., 2012. Properties of SnO₂ Films Grown by Atomic Layer Deposition. *Procedia Engineering*, **36**: 510-515.
- Chen, J., Chen, L., Feng, X., Yidan, Z., Wei, L., Litao, S., Yan, Z., 2012. Hollow SnO₂ microspheres for high-efficiency bilayered dye sensitized solar cell. *RSC Advances*, **2**: 7384-7387.
- Cowley, A.M., Sze, S.M., 1965. Surface States and Barrier Height of Metal-Semiconductor Systems. *J. Appl. Phys*, **36**: 3212-3220.
- Çağlar, Y., Çağlar, M., İlcan, S., Yakuphanoglu, F., 2009. Determination of the electronic parameters of nanostructure SnO₂/p-Si diode. *Microelectronic Engineering*, **86**: 2072-2077.
- Dagher, S.K., 2014. *PbS Quantum Dot-Based Hetrojunction Solar Cells*. (Doktora Tezi). 38-39, Al Ain.
- Demir, M., 2005. *SnO₂ Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Taban Sıcaklığının Etkisi* (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- El Etre, A.Y., Reda, S.M., 2010. Characterization of nanocrystalline SnO₂ thin film fabricated by electrodeposition method for dye-sensitized solar cell application. *Applied Surface Science*, **256**: 6601-6606.
- Engin, M., 1995. *Fotovoltaik enerjinin ölçümü amaçlı bir elektronik doğru akım sayacı ile IBM PC uyumlu bir bellek sisteminin tasarımı*. (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Ejderha, K., 2012. *Magnetron Saçtırma Yöntemiyle Hazırlanan METAL/p-InP Schottky Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Tavlama ve Numune Sıcaklığına Bağlı Değişimlerinin İncelenmesi*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Fener, Y., 2010. *Al/p-Si/Al Schottky Kontakların Yük Depolama Kabiliyeti*. (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Feng, Z.C., Wei, C.C., Wee, A.T.S., Rohatgi, A., Lu, W., 2010. Effects of CdCl₂ treatment and annealing on CdS/SnO₂/glass heterostructures for solar cells. *Thin Solid Films*, **518**: 7199-7203.
- Goetzberger, A., Knobloch, J., Voss, B., 1998. *Cristalline Silicon Solar Cells*. John Wiley&Sons, New York.
- Gürakar, S., 2015. *Püskürtme Yöntemi ile Büyütülen Katkılı SnO₂/Si Heteroeklemlerin İncelenmesi*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Huda, A., Nor, H.Y., Savisha, M., Masrianis, A., Brian, Y., 2016. Photovoltaic and EIS Performance of SnO₂/SWCNTS Based-Sensitized Solar Cell. *Procedia Engineering*, **170**: 1-7.
- Hsu PC, Hsu CJ, Chang CH, Tsai SP, Chen WC, Hsieh HH, Wu CC, 2014. Sputtering Deposition of P-Type SnO Films with SnO₂ Target in Hydrogen-Containing Atmosphere. *Acs Appl Mater Inter*, **6**: (16): 13724-9.

- Iida, H., Shiba, N., Mishuku, T., Ito, A., Karasawa, H., Yamanaka, M., Hayashi, Y., 1982. High efficiency a-Si:H p-i-n solar cells using a SnO₂/glass substrate, *Journal&Magazines IEEE Electron Device Letters*, **3**: 114-115.
- Im, J.S., Park, S.I., Jeon, J.W., Lim, K.S., 2011. Fabrication of microcrystalline silicon solar cells on a SnO₂ coated substrate using seed layer insertion. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, **95**: 150-153.
- Kalowekamo, J., Baker., E., 2009. Estimating the manufacturing cost of purely organic solar cells. *Solar Energy*, **83**: 1224-1231.
- Karamanav, M., 2007. *Güneş Enerjisi ve Güneş Pilleri* (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Kaya, S., 2019. Evolutions on surface chemistry, microstructure, morphology and electrical characteristics of SnO₂/p-Si heterojunction under various annealing parameters. *Journal of Alloys and Compounds*, **778**: 889-899.
- Kaya, S., 2019. Co-60 gamma irradiation influences on device characteristics of n-SnO₂/p-Si heterojunction diodes. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research B*, **445**: 63–68.
- Kayaer, T., 2014. *Nanoyapılı SnO₂ Filmlerinin Sol jel Spin Kaplama Metodu ile Elde Edilmesi ve Karakterizasyonu* (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Koçyiğit, B.D., Tatar, D., Battal, A., Ertuğrul, E., 2013. Investigation of some properties of SnO₂:Sb:F thin films by an economic spray pyrolysis technique. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, **7**: 530-535.
- Lee, J.H., Park, N.G., Shina, Y.J., 2011. Nano-grain SnO₂ electrodes for high conversion efficiency SnO₂-DSSC, *Solar Energy Materials&Solar Cell*, **95**: 179-183.
- Lee, S.C., Lee, J.H., Oh, T.S., Kim, Y.H., 2003. Fabrication of thin oxide film by sol-gel method for photovoltaic solar cell system. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, **75**: 481-487.
- Lee, T., Dang, H.P., Duong, A.Q., Luc, Q.H., 2019. Effect of Sn-substituted Ga and In dopant content on the structural, electrical, and optical properties of p-type X-doped SnO₂ (X=Ga and In) films: Testing the photoelectronic effect of X-doped SnO₂/n-Si junctions. *Journal of Photochemistry & Photobiology A: Chemistry*, **376**: 88–99.
- Liu, J., Luo, T., Mouli, S., Meng, F., Sun, B., Li, M., Liu, J., 2010. A novel coral-like porous SnO₂ hollow architecture: biomimetic swallowing growth mechanism and enhanced photovoltaic property for dye-sensitized solar cells application. *Chem. Commun*, **46**: 472-474.
- Neamen, D.A. 1997. *Semiconductor Physics and Devices*, 2nd ed. Mc Graw-Hill, 746.
- Neamen, D.A. 1992. *Semiconductor Physics and Devices*, R.R. Donnelley&Sons Company, USA, 113.
- Ni, J., Zhao, X., Zheng, X., Zhao, J., Liu, B., 2009. Electrical, structural, photoluminescence and optical properties of p-type conducting, antimony- doped SnO₂ thin films. *ScienceDirect*, **57**: 278-285
- Norde, H., (1979), *J. Appl. Phys.*, **50**: 5052-5053.

- Ogo, Y.; Hiramatsu, H.; Nomura, K.; Yanagi, H.; Kamiya, T.; Hirano, M.; Hosono, H., 2008. p-channel thin-film transistor using p-type oxide semiconductor, SnO. *Appl. Phys. Lett.*, **93**: (032113), 1–3.
- Özek, F., 1998. Yarıiletkenler, 2. *Katıhal Elektronik*. 1, Ankara, AÜFF Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, Ankara. 85
- Özdemir, A.F., 2002. *Metal/n-tipi GaAs Schottky Diyotlarında Havada Oksitlenme ve Yaşlanmanın Akım-Gerilim (I-V) ve Kapasite, Kondüktans-Gerilim, Frekans (C, G-V, f) Karakteristiklerine Etkisi*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Özkartal, A., Temirci, C., 2016. Relationship between photovoltaic and diode characteristic parameters in the Sn/p-Si Schottky type photovoltaics. *ScienceDirect*: 100-102
- Özmenteş, R., 2017. *CuO İnce Film ve CuO/n-Si Heteroeklem Güneş Pili ve Karakterizasyonu* (Doktora Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Özmenteş, R., 2006. *Schottky Diyotların Karakteristik Parametrelerinin Belirlenmesinde Frekans Optimizasyonu*. (Yükseklisans Tezi). EÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Van.
- Özmenteş, R., Temirci, C., Özkartal, A., Ejderha, K., Yıldırım, N., 2018. Characterization of CuO/n-Si heterojunction solar cells produced by thermal evaporation. *Sciendo*, **36**: (4): 668-674
- Pankove, J.I., 1971. *Optical Processes in Semiconductors*. Prentice-Hall, New Jersey. 36.
- Park, N.G., Kang, M.G., Ryu, S.Y., Kim, K.Y., Chang, S.H., 2004. Photovoltaic characteristics of dye-sensitized surface-modified nanocrystalline SnO₂ solar cell. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **161**: 105-110.
- Rhoderick, E.H. and Williams, R.H., 1988. *Metal-Semiconductor Contacts*. Oxford University Press, Oxford.
- Romeo, N., Bosio, A., Tedeschi, R., Romeo, A., Canevari, V., 1999. A highly efficient and stable CdTe/CdS thin film solar cell. *Solar Energy Materials and Solar Cell*, **58**: 209-218.
- Schottky, W., Spence, E., 1939. *Wiss. Veröff. Siemens- Werken*, **18**: 225
- Senevirathne, M.K.I, Pitigala, P.K.D.D.P., Sivakumar, V., Jayaweera, P.V.V., Perera, A.G.U., Tennakone, K., 2008. Sensitization of TiO₂ and ZnO nanocrystalline films with acriflavine. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, **195**: 364-367.
- Shadia, J.I., Riyad, N.A., 2010. Characterization of the SnO₂:F/CdS:In structures prepared by the spray pyrolysis technique. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **94**: 878-883.
- Siefert, W., 1984. Properties of thin In₂O₃ and SnO₂ films prepared by corona spray pyrolysis, and a discussion of the spray pyrolysis process. *Thin Solid Films*, **120**: 275-282.
- Sönmezoğlu, S., Koç, M., Akın, S., 2012. İnce film üretim teknikleri. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **28**: (5): 390-402.

- Singh, A. 1985. Characterization of interface states at Ni/nCdF₂ Schottky barrier type diodes and the effect of CdF₂ surface preparation. *Solid-State Electronics*, **28**: 223-232.
- Sivaramasubramaniam, R., Muhamad, M. R. and Radhakrishna, S., 1993. Optical Properties of Annealed Tin (II) Oxide in Different Ambients. *Phys. Status Solidi A* **136**, 215-222.
- Sze, S.M. 1981. Physics of Semiconductor Devices. 2nd Ed. John Wiley&Sons Publ, 654, New York.
- Tavakolian, H. and Sites, J.R. 1988. Effect of interfacial states on open-circuit voltage. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twentieth IEEE, **2**: 1608-1613.
- Temirci, C., 2000. *Anodik Oksidasyon Metoduyla Yüksek Engelli ve Yüzey Pasivasyonlu Sn/p-Si Schottky Diyotların Fabrikasyonu*. (Doktora Tezi). EÜ, Fen Edebiyat Fakültesi, Erzurum.
- Temirci, C., Batı, B., Sağlam, M., Türüt. A., 2001. High- barrier height Sn/p-Si Schottky diodes with interfacial layer by anodizasyon process. *Appl. Surf. Sci*, **172**: 1-7
- Tennekone, K., Bandara, J., Bandaranayake, P.K.M, Kumara, G.R.A., Konno, A., 2001. Enhanced Efficiency of a Dye-Sensitized Solar Cell Made from MgO Nanocrystalline SnO₂. *Japanese Journal of Applied Physics*, **40**: Part 2 Number 7B.
- Türüt, A., Batı, B., Sağlam, M., Yalçın, N., 1996. The bias- dependence change of barrier height of Schottky diodes under forward bias by including the series resistance effect. *Phys. Scr.*, **53**: 118-122
- Türüt, A., 2011. Determination of barrier height temperature coefficient by Norde's method in ideal Co/n-GaAs Schottky. *Tübitak*, **36**: 235-244. Erzurum.
- Yu, P.T., 2016. Discussion on the characteristics of p-type SnO and n-type SnO₂ thin films under different annealing conditions (Doktora Tezi). China.
- Zhengdao, L., Yong, Z., Jiyuan, Z., Wenguang, T., Qí, L., Tao, Yu., Zhigang, Z., 2012. Hexagonal Nanoplate-Textured Micro-Octahedron Zn₂SnO₄: Combined Effects toward Enhanced Efficiencies of Dye-Sensitized Solar Cell and Photoreduction of CO₂ into Hydrocarbon Fuels. *Crystal Growth&Design*, **12**: 1476-1481.
- Ziel, A., 1968. *Solid State Physical Electronics*. Prentice- Hall, Inc., New Jersey



ÖZ GEÇMİŞ

Mehmet Ali EVCİL, 1992 yılında Hatay'ın İskenderun ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini Hatay'ın İskenderun ilçesinde tamamladı. 2016 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Eğitim Fakültesi Fizik Öğretmenliği Bölümü'nden mezun oldu. 2019 yılında Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Alanında Tezli Yüksek lisansını tamamladı.



T.C
VAN YÜZÜNCÜ YIL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
LİSANSÜSTÜ TEZ ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 10/07/2019

Tez Başlığı / Konusu: **SnO₂/p-si heteroeklem yapıların termal buharlaştırmayla üretilmesi, diyot ve fotovoltaiik özelliklerinin incelenmesi.**

Yukarıda başlığı/konusu belirlenen tez çalışmamın Kapak sayfası, Giriş, Ana bölümler ve Sonuç bölümlerinden oluşan toplam 78 sayfalık kısmına ilişkin, 10/07/2019 tarihinde şahsım/tez danışmanım tarafından turnitin intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtreleme uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 9 (dokuz) dur.

Uygulanan filtreler aşağıda verilmiştir:

- Kabul ve onay sayfası hariç,
- Teşekkür hariç,
- İçindekiler hariç,
- Simge ve kısaltmalar hariç,
- Gereç ve yöntemler hariç,
- Kaynakça hariç,
- Alıntılar hariç,
- Tezden çıkan yayınlar hariç,
- 7 kelimededen daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç (Limit inatch size to 7 words)

Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi Lisansüstü Tez Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılmasına İlişkin Yönergeyi inceledim ve bu yönergede belirtilen azami benzerlik oranlarına göre tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Gereğini bilgilerinize arz ederim.

10/07/2019
Tarih ve İmza

Adı Soyadı: **Mehmet Ali EVCİL**

Öğrenci No: **169102005**

Anabilim Dalı: **Fizik**

Programı: **Fizik**

Statüsü: Y. Lisans

Doktora

DANIŞMAN ONAYI
UYGUNDUR


Prof. Dr. Cabir TEMİRCİ

ENSTİTÜ ONAYI
UYGUNDUR


Prof. Dr. Saad SENSÖZ
Enstitü Müdürü