



**Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al HETEROEKLEM YAPILARIN
ÜRETİMİ VE GÜNEŞ PİLİ POTANSİYELİNİN
DEĞERLENDİRİLMESİ**

Halit TERMAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM
Yüksek Lisans Tezi
Fizik Ana Bilim Dalı
2023
(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANA BİLİM DALI

**Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al HETEROEKLEM YAPILARIN ÜRETİMİ VE GÜNEŞ PİLİ
POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ**

(Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al Heterojunction Production and Evaluation of Solar Cell Potential)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Halit TERMAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Erzurum
Aralık, 2023

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Halit TERMAN tarafından hazırlanan “ Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al Heteroeklem Yapıların Üretimi Ve Güneş Pili Potansiyelinin Değerlendirilmesi ” başlıklı çalışması 29 / 12 / 2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Fizik Ana Bilim Dalı, Katıhal Fiziği Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof.Dr.Songül DUMAN <i>Erzurum Teknik Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof.Dr. Muhammet YILDIRIM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Dr. Öğr. Üyesi. Sevda SARITAŞ <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Aslı Islak İmzalıdır
Enstitü Müdürü

Bu çalışmayı Atatürk Üniversitesi BAP Hibe Numarası altında desteklemiştir.
Proje No: FBA-2023-11526.

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM danışmanlığında sunulan “Au/Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al Heteroeklem Yapıların Üretimi ve Güneş Pili Potansiyelinin Değerlendirilmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	1	30
Materyal ve Metot	11	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	15	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	24	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Halit TERMAN	Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM
29.12.2023	29.12.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

☐ Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

☐ Enstitü Yönetim Kurulunun/....../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans Tezi olarak sunduğum bu çalışma Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Nonoaygıt Üretim ve Karakterizasyon Laboratuvarında yapılmıştır. Çalışmalarım süresince her türlü desteğini gördüğüm, tez danışmanım çok kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Akademik çalışmalarda teorik ve pratik bilgisinden istifade ettiğim, Fizik bölümünde Güneş pili ile ilgili çalışmalara öncülük eden hocalarım Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya teşekkür ederim.

Tezimde kullanmış olduğum $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ aktif tabaka ince film büyütmede ve tezin yazılmasında emeği olan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevda SARITAŞ'a çok teşekkür ederim.

Halit TERMAN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Au/Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al HETEROEKLEM YAPILARIN ÜRETİMİ VE GÜNEŞ PİLİ POTANSİYELİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

Halit TERMAN

Danışman: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Amaç: Bu tez çalışması, n tipi Si üzerine inorganik bir yarı iletken aktif tabaka ile yapılan heteroeklem tasarımını içermekte; aynı zamanda, (RF)-(DC) co-sputter tekniği ile elde edilen filmin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerini karakterize etmeyi amaçlamaktadır.

Yöntem: Heteroeklem tasarımında, n tipi Si alttaşlar üzerine 2 farklı p tipi Fe_{2-x}Sn_xO₃ ince filmi RF-DC co-sputter tekniği ile büyütüldü Birinci film (N1) için DC güç kaynağı 150 W ve Sn hedef için RF güç kaynağı 50 W olarak; ikinci film (N2) için DC güç kaynağı 150 W ve Sn hedef için RF güç kaynağı 25 W olarak ayarlanmıştır. Üst kontak için Au metali, alt kontak için Al metali kullanılarak 2 adet Au/Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al heteroeklem elde edilmiş ve heteroeklemlerin Güneş pili potansiyeli değerlendirilmiştir.

Bulgular: Soğurma ölçümleri kullanılarak, N1 için bant aralığı 2,7 eV olarak ve N2 için 2,45 eV olarak bulundu. SEM görüntülerinde ince filmlerin yüzeyinde homojen bir dağılım olduğu ve N1/n-Si'deki tane boyutlarının daha belirgin ve büyük olduğu görülmüştür. AFM ölçümü ile Fe_{2-x}Sn_xO₃ pürüzlülük değeri N1/n-Si için Ra:4,6 Sa:8,3 nm ve N2/n-Si için Ra:4,5 nm, Sa:5,9 nm olarak belirlendi. XRD grafiğinde N1 için 33,2° ve 35,5° açılarında; N2 için 35,5°, 34,0° ve 24,5° açılarında görülen pikler tetragonal yapılar için karakteristik piklerdir. Au/N1/n-Si/Al yapısı için karanlıkta 2,03 olarak hesaplanan idealite faktörü değerinden diyot kalitesinin iyi olmadığı görülmektedir. Ancak Au/N1/n-Si/Al yapısının akım-voltaj (I-V) grafiğinde 10-150 mW/cm² aralığında artan ışık şiddeti ile ters beslem akımının artması, yapının ışığa duyarlı olduğunu göstermektedir. Au/N1/n-Si/Al için karanlıkta 0,77 eV olarak hesaplanan engel yüksekliği Si tabanlı bir diyot için uygun değerdedir.

Sonuç: Fe_{2-x}Sn_xO₃ ışığa duyarlılığı Güneş pili uygulaması için potansiyel bir malzeme olduğunu ve geliştirilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: RF-DC Co-Sputter, Fe_{2-x}Sn_xO₃, Güneş Pili

Aralık 2023, 60 Sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

FABRICATION OF $\text{Au/Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3/\text{n-Si/Al}$ HETEROJUNCTION STRUCTURES AND EVALUATION OF THEIR SOLAR CELL POTENTIAL

Halit TERMAN

Supervisor: Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM

Purpose: This thesis aims to design a heterojunction on n-type silicon with an inorganic semiconductor active layer. Additionally, it aims to characterize the film obtained through the (RF)- (DC) co-sputter technique structurally, morphologically, and optically.

Method: In heterojunction design, two different p-type $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ thin films were grown on n-type Si substrates by RF-DC co-sputter technique. For the first film (N1), the DC power supply was 150 W and the RF power supply for the Sn target was 50 W; for the second film (N2), the DC power supply was 150 W and the RF power supply for the Sn target was 25 W. Two $\text{Au/Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3/\text{n-Si/Al}$ heterojunctions were obtained using Au metal for the upper contact and Al metal for the lower contact and the solar cell potential of the heterojunctions was evaluated.

Findings: Using absorption measurements, the band gap for N1 was found to be 2.7 eV and 2.45 eV for N2. SEM images showed a homogeneous distribution on the surface of the thin films and the grain sizes in N1/n-Si were more pronounced and larger. By AFM measurement, the $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ roughness value was determined as Ra:4.6 Sa:8.3 nm for N1/n-Si and Ra:4.5 nm, Sa:5.9 nm for N2/n-Si. The peaks at 33.2° and 35.5° for N1 and 35.5° , 35.5° , 34.0° and 24.5° for N2 in the XRD graph are characteristic peaks for tetragonal structures. The ideality factor value of 2.03 in the dark for the Au/N1/n-Si/Al structure indicates that the diode quality is not good. However, in the current-voltage (I-V) graph of the Au/N1/n-Si/Al structure, the increase in the reverse supply current with increasing light intensity in the range of 10-150 mW/cm^2 indicates that the structure is photosensitive. The calculated barrier height of 0.77 eV for Au/N1/n-Si/Al in the dark is suitable for a Si-based diode.

Results: The photosensitivity of $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ shows that it is a potential material for solar cell application and can be improved.

Keywords: RF-DC Co-Sputter, $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$, Solar Cell

December 2023, 68 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİN	ix
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	9
Yarı İletkenlerin.....	9
Metal, yarı iletken ve yalıtkan arasındaki fark	9
p ve n Tipi Yarıiletken	10
p-n Eklemleri	11
Fotovoltaik Etki.....	12
Geçiş Metal Oksitleri	13
Fotovoltaiklerde Geçiş Metal Oksitler	14
<i>n-Tipi Geçiş Metal Oksitler</i>	15
<i>p-Tipi Geçiş Metal Oksitler</i>	16
<i>Heteroeklem Geçiş Metal Oksit Güneş Pilleri</i>	17
Heteroeklem Güneş Pillerinin Fiziksel Arka Planı ve Temelleri.....	18
Akım-Voltaj Karakteristikleri	18
İnce Filmler Hazırlama Yöntemleri	19
<i>Magnetron Saçtırma (Sputter)</i>	20
Analitik Teknikler	22
Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)	22
X-ışını kırınımı (XRD) spektroskopisi.....	23
UV-görünür soğurma spektroskopisi	24
Atomik Kuvvet Mikroskobu	24
MATERYAL ve YÖNTEM	27
Giriş	27
n-Si ve Cam Alttaş Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanma Süreci	27

Fe _{2-x} Sn _x O ₃ İnce Film Kaplama	30
Büyütmede Kullanılan RF Magnetron Saçtırma (Sputter) Sistemi.....	30
Deney ve Ölçüm Sistemleri	31
Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi.....	31
Optik Soğurma Ölçüm Sistemi	35
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	34
Giriş	34
Soğurma ölçümleri	34
Taramalı Elektron Mikroskop Görüntüleri	36
Atomik Kuvvet Mikroskop görüntüleri.....	39
X- Işını Kırınım Ölçümleri.....	40
Akım –Voltaj Ölçümleri.....	42
SONUÇ VE ÖNERİLER	46
KAYNAKLAR.....	47
ÖZGEÇMİŞ.....	53

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Numune 1 ve 2’de $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ için enerji aralığı değerleri35

Tablo 2. Numune 1 ve Numune 2 için bariyer yüksekliği ve idealite faktörü için değerler....44



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Metallerin, yarı iletkenlerin ve yalıtkanların bant aralığı yapıları .	9
Şekil 2. Yarı iletkenlerin p ve n tipi katkılama işleminin şeması	11
Şekil 3. Bir p-n bağlantısının bant yapısının diyagramı ve temas ettiğinde	12
Şekil 4. (a) Bir fotovoltaiik hücrenin yapısı ve (b) şerit diyagramı. Farklı bölgelerin ilgili boyutlarına uyulmamıştır	13
Şekil 5. Fotovoltaiiklerde oksitlerin uygulanması: şeffaf elektrotlar, ışık emiciler, taşıma katmanları, benzersiz işlevlere sahip malzemeler olarak	15
Şekil 6. (a) İdeal bir Güneş pili ve (b) şönt R_{SH} ve seri R_S dirençlerine sahip bir Güneş pili devresi. (c) İnce film Güneş pilinin akım-voltaj eğrisi	18
Şekil 7. Heteroeklem geçiş metal oksit güneş hücresi yapısı	19
Şekil 8. İnce filmler hazırlama yöntemleri şeması.	20
Şekil 9. RF ve DC Magnetron Sputter sisteminin şematik gösterimi	22
Şekil 10. X ışınlarının kırınımı	23
Şekil 11. Farklı AFM çalışma modlarının diyagramları. (a) Temas modu ve (b) aralıklı temas modu	26
Şekil 12. Termal buharlaştırma ünitesi.	29
Şekil 13. Tavlama fırını.	29
Şekil 14. Magnetron sputter sistemi.	30
Şekil 15. $Au/Fe_{2-x}Sn_xO_3/n-Si/Al$ heteroeklem yapısının şematik diyagramı.	31
Şekil 16. I-V ölçüm sistemi.	32
Şekil 17. UV-görünür soğurma spektrometresi.	33
Şekil 18. N1 filminin soğurma spektrumu.	34
Şekil 19. N2 filminin soğurma spektrumu.	35
Şekil 20. N1 filmi için $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiğı.	36
Şekil 21. N2 filmi için $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiğı.	36
Şekil 22. N1/n-Si diyotunun SEM görüntüsü.	37
Şekil 23. N2 /n-Si diyotunun SEM görüntüsü.	37
Şekil 24. N1'in EDX ölçüm.	38
Şekil 25. N2'in EDX ölçüm.	38
Şekil 26. N1/n-Si diyotunun AFM görüntüsü.	39
Şekil 27. N2 /n-Si diyotunun AFM görüntüsü.	40
Şekil 28. N1 ince filminin XRD spektrumu.	41
Şekil 29. N2 ince filminin XRD spektrumu.	41

Şekil 30. Au/ N1 /n-Si/Al yapısı için karanlıkta ve 10-150 mW/cm ² ışık altında yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.	42
Şekil 31. Au/N2/n-Si/Al yapısı için karanlıkta ve aydınlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.	42
Şekil 32. Au/N1/n-Si/Al yapısı için karanlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.....	43
Şekil 33. Au/N2/n-Si/Al yapısı için karanlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.....	44



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

A	: Soğurma
AFM	: Atomik Kuvvet Mikroskobu
Ag	: Gümüş
Al	: Alimünyum
AlGaO	: Alüminyum galyum oksit
Ar	: Argon
Au	: Altın
BaTiO₃	: Barium Titanate
BDGP	: Boya ile Duyarlılaştırılmış Güneş Pili
BSF	: Arka Yüzey Alanı
Ca₂Fe₂O₅	: Kalsiyum Demir Oksit
C.B.	: Conduction Band (İletim Bandı)
CdO	: Kadmiyum Oksit
cm	: Santimetre
CMOS	: Metal-Oksit-Yarı İletken
Co-Fe	: Kobalt-demir
CrO₂	: Krom Oksit
Cu₂O	: Bakır Oksit
DC	: Doğru Akım
DI	: İyonize Su
dk	: Dakika
E	: Elektrik Alan
E_g	: Enerji Bandı Boşluğu
eV	: Elektronvolt
Fe	: Demir
Fe₃O₄	: Demir Oksit
FF	: Dolum Faktörü
Ga	: Galyum
Ge	: Germanyum
h	: Planck Sabiti
HCl	: Hidroklorik Asit
HF	: Hidrojen Florür
H₂O₂	: Hidrojen Peroksit
H₂SO₄	; Sülfürik Asit
hν	: Foton Enerjisi

In₂O₃	: İndiyum Oksit
ITO	: İndiyum Kalay Oksit
I-V	: Akım-Voltaj
I_{sc}	: Kısa DeVre Akı
I₀	: Gelen Işığın Yoğunluğu
I*	: İletilen yoğunluk
J	: Akım Yoğunluğu
JSC	: Kısa DeVre Akım Yoğunluğu
K	: Kelvin
LaCrO₃	: Lantan Krom Oksit
LaNiO₃	: Lantan Nikel Oksit
LED	: Işık Yayan Diyot
LiF	: Lityum Florür
mA	: Miliamper
MgF₂	: Magnezyum Florür
MnO	: Manganez Oksit
mm	: Milimetre
MoO₃	: Molibden Oksit
mV	: Milivolt
MW	: Megawatt
mW	: Miliwat
n	: Bir Tam Sayıdır (1, 2, 3, ...)
Na	: Sodyum
NH₄OH	: Amonyum Hidroksit
NiO	: Nikel Oksit
nm	: Nanometre
O	: Oksijen
OLED	: Organik Işık Yayan Diyot
NPs	: Nanoparçacık
PV	: Fotovoltaik
PVD	: Fiziksel Buhar Biriktirme
P_{max}	: Maksimum Güç
Ra	: Yüzeysel Pürüzlük
RF	: Radyo Frekansları
R_s	: Seri Direnç
RSH	: Paralel Direnç
RuO₂	: Rutenyum Oksit
S	: Kükürt

Sa	: Çizgisel Pürüzlük
sa	: Saat
sccm	: Dakikada Standart Santimetreküp
SCO	: Yarıiletken Oksit
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	: Silisyu
Si₃N₄	: Silisyum Nitrür
Sn	: Kalay
Sn₂O₃	: Kalay Oksit
Sr	: Stronsiyum
TCO	: Şeffaf İletken Oksitler
TMO	: Geçiş Metal Oksitleri
TiO₂	: Titanyum Dioksit
UV	: Ultraviyole ışınlar
V.B.	: Valans Bandı (Değerlik Bandı)
V₂O₃	: Vanadium Oksit
VOC	: Açık DeVre Voltajı
W	: Watt
WO₃	: Tungsten oksit
XPS	: X-Işını Fotoelektron Spektroskopisi
XRD	: X-Işını Kırınımı
ZnM₂O₄	: Spinel
ZnO	: Çinko Oksit
Å	: Angstrom
η	: Güneş pilinin verimliliği
° C	: Celcius
Ω	: Ohm
ρ_c	: Temas Direncini
λ	: Dalga Boyu
Φ	: İş Fonksiyonu
θ	: Kırınım açısıdır

GİRİŞ

Endüstriyel gelişme, teknolojik sanayileşme oranındaki artış ve nüfustaki büyük artışla temsil edilen birçok ekonomik, teknik ve sosyal faktör, enerji talebinde önemli bir artışa yol açmıştır. Yenilenemeyen fosil yakıtlar en büyük enerji kaynaklarından biridir ve bu nedenle yoğun tüketim bu kaynağın tükenme tehlikesiyle karşı karşıya kalmasına sebep olmaktadır. Ayrıca, fabrikalarda ve ulaşımda fosil yakıt tüketiminden kaynaklanan emisyonlardan kaynaklanan iklim değişikliği, insanlığın karşı karşıya olduğu en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. Bahsi geçen nedenler, ülkeleri alternatif enerji kaynakları aramaya ve yenilenebilir enerji alanındaki araştırmaları desteklemeye itmiştir. Fotoelektrik etkinin keşfi, dünya üzerindeki en büyük enerji kaynağı olan Güneş'ten faydalanmanın temelini atmıştır (Hahn *et al.* 2006). İlk Güneş pili 1954 yılında geliştirildi ve o zamandan beri güneş pillerinin geliştirilmesi ana araştırma alanlarından biri haline geldi (Goetzberger *et al.* 1998). Geçtiğimiz yıllarda, yüksek verimli, düşük maliyetli ve çevre dostu güneş pillerine ulaşmak için birçok Güneş pili türü geliştirilmiştir. Geçtiğimiz on yıllar boyunca güneş pillerinin geliştirilmesi üzerine yapılan yoğun çalışmalar, gelişimlerinin zaman bağlamına göre üç temel grupta sınıflandırılan birçok güneş pili türünün geliştirilmesine yol açmıştır.

Temel olarak, Silisyuma (Si) dayanan ve piyasadaki ticari güneş pillerinin %85'ini oluşturan birinci nesil güneş pilleri Si tabanlı güneş pilleridir (Aberle, 2009). Si güneş pilleri, monokristal ve polikristal Si gibi çeşitli tiplere ayrılır (Bahtiyar, 2015). Si güneş hücrelerinin imalatı, bir p-n bağlantısı oluşturmak için katkılama yolu ile n-tipi ve p-tipi Si üretimine bağlıdır (MacDonald, 2012). Si güneş pilleri yüksek güç dönüşüm verimliliğine ve uzun vadeli kararlılığa sahiptir, ancak yine de pahalıdır.

İkinci nesil güneş pilleri, birinci nesile göre daha az verimli ve daha ucuz olan ince film güneş pilleri olarak bilinir. Bu güneş pilleri temel olarak amorf Si, polikristal Si ve kadmiyum tellürit bazlıdır (Chopra *et al.* 2004).

Üçüncü nesil güneş pilleri şu anda güneş pili geliştirme araştırmalarında en geniş alanı kaplamaktadır. Bu nesil, hepsi aynı çalışma prensibine sahip olan boyaya duyarlı güneş pilleri, kuantum noktalı güneş pilleri, perovskit güneş pilleri ve metal oksit güneş pilleri gibi çeşitli güneş pili türlerini içerir (Yan *et al.* 2014).

Bir güneş enerjisi dönüşüm cihazının etkinliği, çalışmasında yer alan her bir aşamanın başarılı bir şekilde yürütülmesine bağlıdır. Güneş enerjisi dönüşüm sürecinin ilk aşaması, bir

fotonun bir elektronu valans bandındaki en yüksek enerji seviyesinden iletim bandındaki en düşük enerji seviyesine yükseltmesi için gereken minimum enerjiyi ifade eden "bant aralığı" olarak bilinen optik özellik etrafında odaklanır. Bant aralığı değerinden daha düşük enerjilere sahip fotonlar soğurulamaz ya yansıtılır ya da iletilir, bu da kayıplara neden olur. Sonuç olarak, güneş pili bu fotonların yokluğunda genellikle "kısa devre akımı" olarak adlandırılan düşük miktarda akım üretir (Nelson, 2003). Bununla birlikte, fotonlar bant aralığını önemli ölçüde aşan enerjilere sahip olduklarında, fazla enerjileri ek güç üretimine katkıda bulunmak yerine ısı olarak dağılır. Sonuç olarak, güneş pilinin " V_{oc} " değeri düşer (düşük bir voltaj çıkışı) (Baruch *et al.* 1995). Bu nedenle bant aralığının değerinin optimize edilmesi gerekir.

Yük taşıma, güneş enerjisini dönüştürme sürecindeki ikinci aşamadır. Bir elektron bir fotondan enerji soğurduğunda, valans bandından ayrılması ve oluşan boşluğun (hol) malzeme içinde hareket etmesi gerekir. Eğer elektron boşluk ile yeniden birleşirse, kazanılan enerji kaybedilir. Bu yük yok oluşu, "ışınimsal rekombinasyon" olarak bilinen kendiliğinden emisyon yoluyla veya "ışınimsal olmayan rekombinasyon" olarak adlandırılan enerjinin elektronlara veya fononlara aktarılması yoluyla gerçekleşebilir. Yöntem ne olursa olsun, elektron-boşluk rekombinasyon oranının, iletkenlikleri ile tanımlanan elektron ve boşluğun ayrılma ve hareket oranlarından daha düşük olması esastır (Rawat *et al.* 2017).

Nihai adım ise elektrik veya yakıt üretmektir. Elektron ve boşluk malzeme içinde sürüklenerek ya da dağılarak hareket edebilir ve davranışları cihaza bağlı olarak değişir. Bir akım üretebilir (fotovoltaiklerde), yakıt üreten yüzey reaksiyonlarında yer alabilir (fotokatalitik cihazlarda) veya aynı anda hem akım hem de yakıt üretebilirler (fotoelektrokimyasal hücrelerde) (Walter *et al.* 2010). Bu nedenle güneş enerjisi dönüşümü için pratik bir malzemenin tasarlanması zordur, çünkü birkaç gereksinimin aynı anda karşılanması gerekir: malzeme optimum bant aralığına, düşük elektron boşluk rekombinasyon oranına, optimum bant kenarı konumlarına sahip olmalı ve ayrıca büyük ölçekli dağıtım için ucuz olmalıdır.

Birinci sıra geçiş metal oksitleri (TMO) güneş enerjisi dönüşüm cihazlarında alternatif malzemeler olarak hizmet etme potansiyeline sahiptir. Birincil faydaları, bol miktarda bulunmalarından ve sıklıkla doğal mineraller olarak bulunmalarından kaynaklanmaktadır, bu da düşük üretim maliyetleri ile sonuçlanmaktadır. Bir diğer avantajlı özellikleri ise düşük toksisiteLERİDİR, bu da bu cihazların üretimi, kullanımı ve bertarafı ile ilgili çevresel kaygıları azaltır (Fthenakis *et al.* 2000).

Bununla birlikte, bazı TMO'lar (örneğin MnO , Fe_3O_4 ve NiO) güneş enerjisini absorbe etmek için çok büyük bant aralığına sahiptir (Van *et al.* 1991; Hüfner, 1994; Toroker, 2011). Ayrıca, fotovoltaikler için ideal bant aralığı olan $\sim 1,5$ eV ile karşılaştırıldığında, Sn_2O_3 gibi

güneş enerjisini absorbe etmek için çok küçük bant aralıklarına sahip bazı metal oksitler de vardır (Nelson, 2003; Sanon *et al.* 1991). Bu sorun, fotovoltaik uygulamalara uygun bir enerji bant aralığı elde etmek için bu oksitlerden bazılarının bir araya getirilmesiyle çözülebilmektedir. Geçiş metal oksitleri, p-tipi hem de n-tipi yarı iletkenler olarak oldukça öne çıkmaktadır. TMO'ların hem p-tipi hem de n-tipi olabilmesi, daha karmaşık elektronik ve optoelektronik cihazlar tasarlamak için çeşitli heteroeklem yapılarının oluşturulmasına olanak sağlaması açısından avantajlıdır.

Geissbühler *et al.* (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, Si heteroeklem güneş pillerinde katkılı amorf Si filmlerin geniş bant aralıklı geçiş metal oksitleri ile değiştirilmesi, parazitik ışık emilim kayıplarının azaltılmasında umut verici sonuçlar göstermiştir. Araştırmacılar, p tipi amorf Si'yi molibden oksit (MoO_x) ile değiştirerek bu sorunu etkili bir şekilde ele alabilmişlerdir. Güneş pillerinde MoO_x gibi geçiş metal oksitlerinin kullanılmasıyla ilgili önemli bir zorluk, genellikle baskılı metal kontakların sertleştirilmesi için gerekli olan 130°C 'nin üzerindeki sıcaklıklarda tavlamanın etkisidir. Bu tür yüksek sıcaklıkta tavlama, bu cihazlardaki boşluk toplamayı olumsuz etkileyerek performansın düşmesine neden olabilir. Bu engelin üstesinden gelmek için araştırmacılar, alternatif bir yaklaşım olarak elektrodpozit bakır ön metalizasyonu benimsemişlerdir. Bu yöntemi kullanarak, molibden oksit boşluk toplayıcılı bir Si heteroeklem güneş pilinin %80'i aşan bir FF değeri ve %22,5'lik ispatlanabilir bir enerji dönüşüm verimliliği sergiemiştir. (Geissbühler *et al.* 2015).

Hsu *et al.* (2014) tarafından yapılan bir çalışmada, farklı LiF kalınlıklarının p- $\text{Ni}_{(1-x)}\text{O}$ içeren inorganik güneş pillerinin cihaz performansı üzerindeki etkisi, Li/n-Si/LiF/Al yapısı üzerinde araştırılmıştır. n-Si yüzeyi p- $\text{Ni}_{(1-x)}\text{O}$ ile kaplanmıştır: RF sputter tekniği kullanılarak Li ile kaplanmış ve ardından 12 Å, 15 Å, 18 Å ve 20 Å LiF, Al metal kontakdan önce termal buharlaştırma tekniği kullanılarak n-Si yüzeyinde biriktirilmiştir. LiF katmanı olmayan cihaz tasarımında, $J_{sc}= 18,1 \text{ mA/cm}^2$, FF= %57,5 ve $\eta= \%4,20$ olarak hesaplanmıştır. Metal kontakdan önce 12 Å LiF tabakası biriktirildiğinde, cihazın J_{sc} değeri $20,40 \text{ mA/cm}^2$ 'ye, FF değeri %63,4'e ve η değeri %5,67'ye yükselmiştir. LiF kalınlığının 15 Å'a çıkarılması, $21,33 \text{ mA/cm}^2$ 'lik J_{sc} değeri, %67,0 FF değeri ve %6,31 η değeri ile sonuçlanmıştır. Bu değerler p- $\text{Ni}_{(1-x)}\text{O}$ için elde edilen en yüksek performansı temsil etmektedir. Ayrıca Li/n-Si/LiF/Al güneş pili tasarımı içinde elde edilen en yüksek performansı temsil etmektedir. Bununla birlikte, LiF tabakasının kalınlık artışı, cihazın performansı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olmuş ve güç dönüşüm verimliliğinde bir azalmaya neden olmuştur (Hsu *et al.* 2014).

Minami *et al.* (2015) tarafından yapılan bir çalışmada, n-tipi katman olarak bir alüminyum-galyum-oksit (Al-Ga-O) ince filmi ve bakır levhaların termal olarak

oksitlenmesiyle hazırlanan bir p-tipi Na katkılı Cu_2O ($\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$) tabakasını dahil ederek Cu_2O tabanlı heteroeklem güneş pillerinin verimliliğini artırma çabaları detaylandırılmıştır. Araştırmacılar, deneyler yoluyla n-tipi $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{O}$ ince film için optimum Al içeriğini yaklaşık %2,5 olarak (x) belirlemişlerdir. Bu özel bileşim, n-tipi $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{O}$ /p-tipi $\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$ heteroeklem güneş pilleri için yaklaşık $15 \Omega \text{ cm}$ 'lik optimize edilmiş bir dirençle sonuçlandı. Araştırmacılar, $\text{MgF}_2/\text{AZO}/\text{Al}_{0,025}\text{Ga}_{0,975}\text{O}/\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$ konfigürasyonunu içeren bir heteroeklem yapısı kullanarak %6,1 verimliliğe sahip bir güneş pili elde ettiler. Bu cihaz $V_{oc}=0,84 \text{ V}$, $J_{sc}=10,95 \text{ mA/cm}^2$ ve $\text{FF}=0,66$ göstermiştir. Optimize edilmiş heteroeklem güneş pili, 60 nm kalınlığında n-tipi oksit ince film tabakası ve 0,2 mm kalınlığında $\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$ tabakası kullanılarak üretilmiştir ve her ikisi de istenen direnci elde etmek için dikkatlice seçilmiştir. Genel olarak bu çalışma, Cu_2O tabanlı heteroeklem güneş pillerinin verimliliğini arttırmada n-tipi katman olarak Al-Ga-O ince filmin ve Na katkılı Cu_2O tabakasının başarılı bir şekilde kullanıldığını göstermektedir. Rapor edilen cihazın umut verici performansı, güneş pili teknolojisinde daha fazla gelişme için uygun bir seçenek olarak potansiyelini göstermektedir (Minami *et al.* 2015).

Minami, *et al.* (2016) tarafından yapılan bir çalışmada araştırmacılar, n-tipi pencere katmanı olarak bir çinko-germanyum-oksit ($\text{Zn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}$) ince filmi ve Cu levhaların termal olarak oksitlenmesiyle hazırlanan bir p-tipi Na katkılı Cu_2O ($\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$) tabakasını birleştirerek Cu_2O tabanlı heteroeklem güneş pillerinin verimliliğini başarıyla geliştirdiler. Heteroeklem güneş pillerinin performansının, öncelikle $\text{Zn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}$ ve $\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$ arasındaki elektron afinite farkının neden olduğu iletim bandı süreksizliği nedeniyle $\text{Zn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}$ ince filmlerindeki Ge içeriğinden (x) etkilendiği bulunmuştur. Darbeli lazer biriktirme kullanılarak hazırlanan $\text{Zn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}$ ince filmlerinde x'in optimum değerinin 0,62 olduğunu tespit eden ekip, MgF_2/Al katkılı $\text{ZnO}/\text{Zn}_{0,38}\text{Ge}_{0,62}\text{O}/\text{Cu}_2\text{O}:\text{Na}$ konfigürasyonuna sahip bir heteroeklem güneş pilinde %8,1 gibi etkileyici bir verimlilik elde etti. Bu güneş pili $V_{oc}=1250 \text{ mV}$, $J_{sc}=11,8 \text{ mA/cm}^2$ ve $\text{FF}=0,65$ sergilemiştir. Verimlilikte gözlenen artış, Cu_2O tabanlı heteroeklem güneş pillerinde n-tipi pencere katmanı olarak $\text{Zn}_{1-x}\text{Ge}_x\text{O}$ 'nun kullanılma potansiyelini göstermektedir (Minami *et al.* 2016).

Gerling *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada, n-tipi kristal Si heteroeklem güneş pillerinde ön p-tipi kontaklar olarak hizmet veren MoO_3 , WO_3 ve V_2O_5 olmak üzere üç geçiş metal oksidinin karşılaştırmalı bir analizini sunmaktadır. Yüksek iş fonksiyonları ($>5 \text{ eV}$) ve geniş enerji bandı boşlukları nedeniyle, bu oksitler, X-ışını fotoelektron spektroskopisi ile doğrulandığı üzere, oksijen boşluk kusurlarından (MoO_{3-x}) kaynaklanan yarı iletken özelliklere sahip şeffaf delik seçici kontaklar olarak işlev görmektedir. Üretim süreci, vakumlu termal buharlaştırma kullanılarak geçiş metal oksitlerinin 15 nm kalınlığındaki katmanlarının

biriktirilmesini içeriyordu. Test edilen üç cihaz arasında V_2O_5/n -Si heteroeklemi en yüksek performansı sergileyerek %15,7'lik kayda değer bir dönüşüm verimliliği ve ($J_{sc}=34,4 \text{ mA/cm}^2$ ve $FF=75,3$) ile 606 mV'luk bir açık devre voltajı elde etmiştir, MoO_3 tabanlı güneş pili %13,6 verimlilik ve ($J_{sc}=34,1 \text{ mA/cm}^2$ ve $FF=68,8$) ile 581 mV açık devre voltajı ile takip ederken, WO_3 tabanlı hücre %12,5 dönüşüm verimliliği ve ($J_{sc}=33,3 \text{ mA/cm}^2$ ve $FF=65$) ile $V_{oc}=577 \text{ mV}$ göstermiştir. Bu bulgular, Si heteroeklem güneş pilleri için yeni bir konsept sunmakta ve toksik dopant gazların ortadan kaldırılması ve basitleştirilmiş düşük sıcaklıkta üretim süreci gibi çeşitli avantajlar sağlamaktadır. V_2O_5 tabanlı güneş pilinin başarısı, güneş pili teknolojisinde daha fazla ilerleme potansiyeline işaret etmekte ve güneş enerjisinden yararlanmaya yönelik daha verimli ve çevre dostu yaklaşımları teşvik etmektedir (Gerling *et al.* 2016).

Um *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada, molibden oksit (MoO_x) ve lityum florür (LiF) ince filmleri katkııçermeyen ve seçici taşıyıcı kontaklar olarak kullanarak verimli tüm arka kontaklı Si nanohole güneş pilleri üretmek için yeni bir yaklaşım getirdiler. Bu ince filmler doğrudan Si üzerine biriktirilerek hücrenin arka yüzeyine Al elektrotların yerleştirildiği yenilikçi bir tasarım oluşturuldu. Araştırmacılar, MoO_x ve LiF ince filmlerini bir araya getirerek MoO_x/Si arayüzünde etkili taşıyıcı toplama elde etmiş ve hem Si hem de LiF/Al elektrot arayüzünde rekombinasyonu bastırmıştır. Bu tamamen geri kontaklı tasarıma sahip 1 cm^2 Si nanohole güneş pilleri, %15,4'e varan kayda değer bir güç dönüşüm verimliliği göstermiştir. Ayrıca, $V_{oc}=561 \text{ mV}$ olarak ölçülmüş ve $FF= \%74,6$ 'ya ulaşmıştır. Özellikle, Auger/yüzey rekombinasyonundaki önemli azalma ve mükemmel Si-nanohole ışık Emilimi nedeniyle, güneş pillerimiz kısa dalga boylu ışık ($\sim 400 \text{ nm}$) için %83,4'lük bir harici kuantum verimliliği sergilemekte ve düzlemsel bir hücreye ($23,8 \text{ mA/cm}^2$) kıyasla kısa devre akım yoğunluğunda ($36,8 \text{ mA/cm}^2$) dramatik bir iyileşme (%54,6) sağlamaktadır (Um *et al.* 2016).

Wu *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada, n-tipi Si güneş pillerinde katkı içermeyen arka kontaklar olarak kullanılan geçiş metal oksit (TMO) yayıcıların elektriksel özelliklerini araştırmaktadır. Araştırmacılar, güneş pillerinde p-tipi kontaklar olarak işlev gören, farklı elektriksel özelliklere sahip üç farklı TMO'yu (WO_x , MoO_x ve V_2O_x) karşılaştırmıştır. Sonuçlar, TMO'ların n-tipi Si'da önemli bant bükülmesine neden olduğunu ve enjeksiyon seviyesine bağlı arayüzey rekombinasyon hızında ve kontak direncinde bir azalmaya yol açtığını göstermektedir. Test edilen TMO/n-Si kontakları arasında V_2O_x/n -Si kontağı, $0,034 \Omega \text{ cm}^2$ 'lik ρ_c ile en umut verici performansı göstermiştir. Bu temas, yoğun katkılı a-Si: H(p)/n-Si kontaklarında göre önemli avantajlar sunmuştur. V_2O_x tabanlı güneş pili, MoO_x/n -Si ($FF= \%15,09$, $V_{oc}= 594 \text{ mV}$) ve WO_x/n -Si ($FF= \%12,44$, $V_{oc}= 539 \text{ mV}$) güneş pillerinden daha iyi performans göstererek %16,59 ile en yüksek verimi ve 610 mV açık devre

voltajını elde etmiştir. Ayrıca, bu çalışma WO_x , V_2O_x ve Cs_2CO_3 'ü arka kontaklı güneş pillerinde kullanan ilk çalışmadır. Bulgular, V_2O_x 'un katkısız n-Si güneş pillerinde umut verici bir p-tipi kontak malzemesi olarak kullanılma potansiyelini vurgulamakta ve diğer geçiş metal oksitlerine dayanan geleneksel kontaklara kıyasla cihaz performansını ve verimliliğini artırmaktadır (Wu *et al.* 2016).

Yan *et al.* (2016) tarafından yapılan çalışmada, kombinatorial yöntemler kullanarak yüksek performanslı güneş pilleri için soğurucu katmanlar olarak Co-Fe oksit kompozitlerini incelemeye odaklandılar. Co'ya eklenen yaklaşık %33 Fe'lik kritik bir bileşimde, Co-Fe oksitlerin normalden ters spinel yapıya yapısal bir dönüşümü olduğunu buldular. Bileşimdeki bu değişim, kristalik, simetri, alt kafes titreşim modları, optik bant aralığı ve elektrik direnci dahil olmak üzere malzemenin özelliklerinde çeşitli değişikliklere yol açtı. Bu Co-Fe oksit kompozitler, Cam/FTO/TiO₂/Co-Fe-O/Au 'dan oluşan çok katmanlı bir geometriye sahip tüm oksit güneş pillerinde emici katmanlar olarak kullanıldığında, fotovoltaiik performansta kayda değer gelişmeler gözlenmiştir. Özellikle, yaklaşık %45 Fe bileşiminde, güneş pilleri $V_{oc}=534$ mV, $J_{sc}=53$ mA/cm² ve FF = %55 dahil olmak üzere gelişmiş özellikler sergilemiştir. Ayrıca, daha yüksek kobalt içeriğine sahip cihazlara kıyasla P_{max} 'ta (maksimum güç çıkışı) %200'lük önemli bir artış olmuştur. Araştırmacılar, güneş pili özellikleri ile Co-Fe-O tabakasının kimyasal bileşimi arasında güçlü bir korelasyon kurmak için çeşitli malzeme özelliklerinin kombinatorial veri haritalarını kullandılar. Bu korelasyon, Co-Fe-O tabanlı tamamen oksit güneş pillerinin ilerlemesi için çok önemli olan Co-Fe-O sistemi hakkında değerli bilgiler ve anlayışlar sunuyor. Bu çalışma, malzeme özelliklerinin ve bunların bileşime bağımlılığının daha iyi anlaşılmasıyla, Co-Fe-O kompozitlerine dayalı daha verimli ve yüksek performanslı tamamen oksit güneş pillerinin potansiyel gelişimine katkıda bulunmaktadır (Yan *et al.* 2016).

Mehmood *et al.* (2017) tarafından yapılan bir çalışmada araştırmacılar, MoO_x hol seçici kontaga dayalı kısmi katkısız asimetric Si heteroyapı güneş pilini (P-DASH) incelemek için Silvaco TCAD simülasyonunu kullandılar. Güneş pilinin performansını optimize etmek için çeşitli tasarım parametrelerini analiz ettiler. Simülasyon sonuçları, MoO_x için daha yüksek bir iş fonksiyonunun boşluklar için Schottky bariyerinin azalmasına yol açtığını ve cSi/MoO_x arayüzünde elektronlar için bir engelleme kontagi oluşturduğunu gösterdi. Bu optimize edilmiş MoO_x kalınlığı ve arka yüzey alanı (BSF) katkılama konsantrasyonunun birleştirilmesiyle, güneş pili etkileyici performans ölçütlerine ulaşmıştır. 4,6 Ω .cm n-tipi gofret için P-DASH güneş pili $V_{oc}= 724$ mV, $J_{sc}= 38,7$ mA/cm², FF= %78 FF ve $\eta= \%22,07$ sergilemiştir (Mehmood *et al.* 2018).

Mallem *et al.* (2019) tarafından yürütülmüş bir çalışmada araştırmacılar, ön yüzey kontağına uygulanan katkısız bir MoO_x (Molibden Oksit) katmanını kullanarak güneş pilleri üretti. Termal olarak buharlaştırılan MoO_x filmler yüksek geçirgenlik, yüksek bant aralığı ve düşük soğurma katsayısı gibi optik özellikler sergileyerek güneş pillerinde yaygın olarak kullanılan a-Si: H(p) ve μ c-SiO_x: H(p) güneş pillerinde yaygın olarak kullanılan H (p) katmanları. Üretilen MoO_x/c-Si heterojonksiyon güneş pilleri, %20'lik önemli bir (η) ile dikkate değer bir performans elde etti. Bu hücreler ayrıca 695 mV'luk en iyi V_{oc}, 38,88 mA/cm²'lik yüksek (J_{sc}) ve %74,0'lük (FF) göstermiştir. Bu sonuçlar, MoO_x'in SHJ güneş pili uygulamalarında alternatif p-katkılı a-Si:H yayıcı katmanları için mükemmel bir katkı maddesi içermeyen malzeme olduğunu ima eder (Mallem *et al.* 2019).

Sagar ve Rao (2020) tarafından yürütülmüş bir çalışmada araştırmacılar, geçiş metal oksit nano-ince filmleri spin kaplama yoluyla Si güneş pillerinin yüzeyine uygulamışlardır. Hem ZnO hem de Al₂O₃, iyi optik şeffaflık, uygun kırılma indisi ve dokulu kaplama oluşturma yeteneği dahil olmak üzere daha iyi elektriksel ve optik davranışları nedeniyle ARC olarak da kullanılmaktadır. Bu filmler, yansıma yoluyla gelen ışığın kaybını en aza indirmek ve sonuç olarak güneş pili yapısı içindeki ışık emilimini iyileştirmek için tasarlanmıştır. MgO Hücresi, V_{oc} = 0,571 V, J_{sc} = 27 mA cm⁻² ve FF = 0,64 ile en iyi %9,864 η performansı elde etmiştir, sonra ZnO tabanlı güneş pili V_{oc} = 0,564 V, J_{sc} = 26 mA cm⁻² ve FF = 0,66 ile %9,633 η ile takip ederken, sonra Al₂O₃ tabanlı güneş pili V_{oc} = 0,562 V, J_{sc} = 26 mA/cm² ve FF = 0,61 ile %9,125 η ile takip ederken (Sagar *et al.*, 2020).

Biçer (2021) tarafından yürütülmüş bir çalışmada güneş pillerinin fotoelektrokimyasal özelliklerini geliştirmek için çinko oksit (ZnO) ve titanyum dioksiti (TiO₂) birleştiren hetero nanoyapılar üretmektir. Sentez süreci, güneş pili verimliliğini artırmada umut vaat eden bu hibrit malzemelerin hazırlanmasına odaklanarak dikkatlice tanımlanmıştır. ZnO-TiO₂ hetero nanoyapıların performansını değerlendirmek için çeşitli fotoelektrokimyasal deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu incelemeler, malzemelerin güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürme kabiliyetini değerlendirmeyi amaçlamıştır. Fotoakım yoğunluğu, açık devre voltajı ve genel güç dönüşüm verimliliği gibi temel parametreler ölçüldü ve analiz edildi. Sonuçlar, ZnO-TiO₂ hetero nanoyapılarının, tek tek ZnO veya TiO₂ nanoyapılarına kıyasla gelişmiş fotoelektrokimyasal performans sergilediğini göstermiştir. Geliştirilmiş verimlilik, her iki malzemenin entegrasyonundan kaynaklanan sinerjik etkiye bağlanmaktadır. Heteroyapının benzersiz özellikleri, daha verimli yük ayrımı ve taşınmasına yol açarak daha yüksek güneş pili performansına katkıda bulundu. Fotoelektrokimyasal performans sonuçlarından, ZnO-TiO₂ ince filmlerden oluşan BDGP'lerin nanoparçacıklara (%1,21), nanorodlara (%2,91) ve

hiyerarşik olarak dallanmış nanorodlara (%6,61) göre η sahip olduğu görülmektedir. Yüksek η nedeniyle, hiyerarşik olarak dallanmış nanorodlar BDGP'ler için güneş pili performansında önemli bir gelişme olarak düşünülebilir (Biçer. 2021).

Nasser *et al.* (2022) tarafından yürütölmüş bir çalışmada, 22,5 μm kalınlığındaki düşük kaliteli Cz p-tipi c-Si güneş pillerinde tam alan arka kontak olarak gümüş (Ag) ile birlikte MoO_x , V_2O_x ve WO_x dâhil olmak üzere delik seçici geçiş metal oksit (TMO) katmanlarının kullanımını araştırmaktır. Metal oksit ince filmler, oda sıcaklığında termal buharlaştırma kullanılarak doğrudan p-tipi c-Si alttaş üzerinde biriktirilmiştir. Bu TMO'lar büyük bir iş fonksiyonuna sahiptir ve p-tipi c-Si ile arayüzeyde güçlü delik birikimine yol açar. Sonuç olarak, yalnızca delikler taşınabilmekte ve hem arayüzey rekombinasyon akım yoğunluğunu (J_0) hem de kontak direncini (ρ_c) etkili bir şekilde azaltmaktadır. Araştırmacılar, farklı delik seçici TMO/Ag arka kontaklara sahip güneş pillerinin performansını değerlendirmek için akım üretimi ve kayıp simölasyonları gerçekleştirdiler. Arka kontakta TMO/Ag bulunması, özellikle daha uzun dalga boylarında parazitik ışık emilimini önemli ölçüde azaltıyor. Bu etki ultra ince tabaka için daha belirgin hale geliyor ve geleneksel Al kontaklara göre önemli avantajlar sunuyor. En iyi cihaz performansı, $V_{oc}= 555 \text{ mV}$, $FF= \%76$ ve $J_{sc}= 33,2 \text{ mA/cm}^2$ ile $\%14$ gibi oldukça yüksek bir (η) gösteren $\text{MoO}_x/\text{p-tipi c-Si}$ Güneş pilleri tarafından elde edilmiştir (Nasser *et al.* 2022).

Bu çalışmanın amacı, n-tipi Si üzerine p-tipi $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ince filmleri DC-RF magnetron co-sputter tekniğı ile büyötmek ve elde edilen yapıların güneş pili potansiyelini değerlendirmektir.

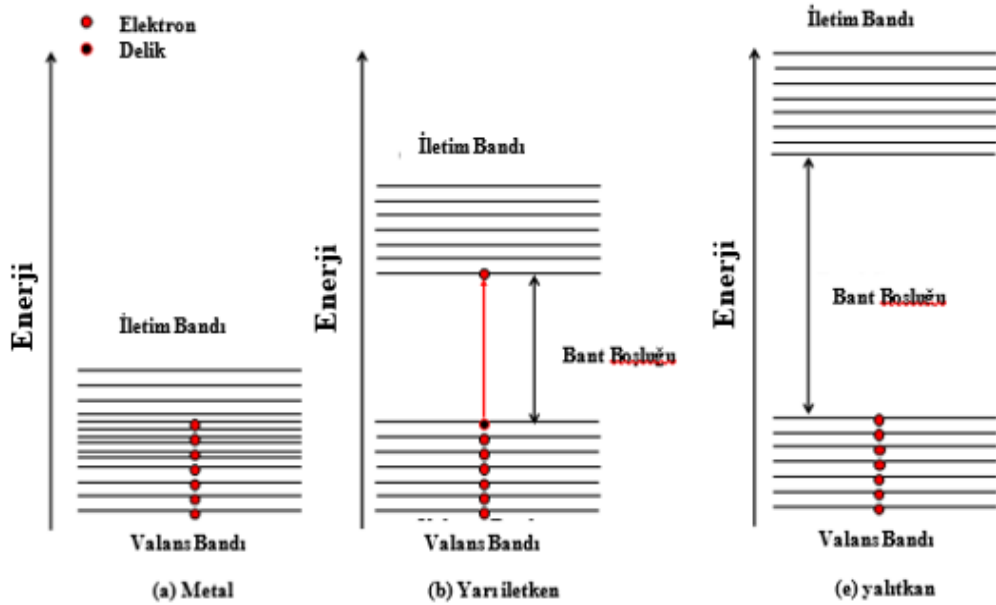
KURAMSAL TEMELLER

Yarı İletken

Güneş pili cihazlarında elektrik enerjisi üretimine dahil olan fenomenleri ve fiziği anlamak için yarı iletkenlerin kökenlerini araştırmak çok önemlidir.

Metal, yarı iletken ve yalıtkan arasındaki fark

Bant diyagramına (Şekil 1) ve enerji bantlarının üst üste binmesine dayanarak, malzemeler üç ayrı kategoride sınıflandırılabilir: metaller, yarı iletkenler ve yalıtkanlar. Bu sınıflandırma, farklı malzemeler arasındaki kafes parametreleri ve atomlar arası mesafelerdeki değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Yarı iletkenleri diğer malzeme gruplarından ayıran en önemli özellik bant aralıklarıdır. Yarı iletkenler, metallerin ve yalıtkanların enerji seviyeleri arasında kalan bir bant aralığına sahiptir (Nelson, 2003).



Şekil 1. Metallerin, yarı iletkenlerin ve yalıtkanların bant aralığı yapıları (Nelson, 2003).

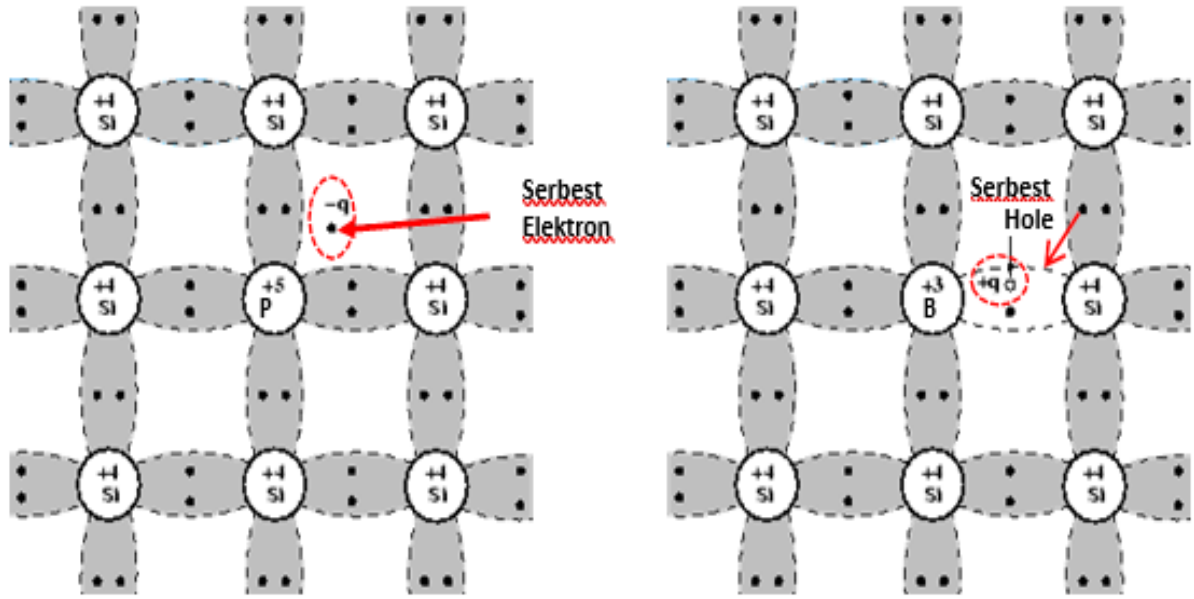
Metaller, elektronların iletim bandında serbestçe hareket etmelerini ve elektriği iletmelerini sağlayan kısmen dolu bir bant ile karakterize edilir. 0°K 'de bile bir metal iletkenidir. Bununla birlikte, bir yarı iletken 0°K 'de bir yalıtandır çünkü bantları ya tamamen dolu ya da boşdur. Normal koşullar altında ($T = 300^{\circ}\text{K}$), enerji bantı boşluğu (E_g) 5,18 eV'den küçük olan bir yarı iletken, üst bantı kısmen dolduran termal emisyon nedeniyle elektrik iletkenliğine sahip olma eğilimindedir. E_g değeri 5,18 eV'den büyük olan bir yarı iletken ise yalıtkan olma eğilimindedir (Sze et al. 2006).

p ve n Tipi Yarıiletken

Yarı iletkenler asal (intrinsic) ve katkılı (ekstrinsik) olarak iki tipe ayrılabilir. Asal bir yarı iletken, kafes yapısında fiziksel veya kimyasal kusurlar, boşluklar, safsızlıklar bulunmayan bir yarı iletkenidir. Pratikte, sentez süreci nedeniyle malzemede her zaman bir miktar kusur veya safsızlık bulunacak olsa da asal bir yarı iletken idealize edilmiş bir durumu temsil eder. İyi kristalografik kaliteye sahip gerçek katkısız yarı iletken kristaller, asal yarı iletkenlere örnek olarak düşünülebilir. Asal yarı iletkenler elektron ve boşluklardan oluşan düşük serbest yük taşıyıcı konsantrasyonuna sahiptir ve bu da düşük elektriksel iletkenlikle sonuçlanır (Nelson, 2003).

Yarı iletkenlerin elektriksel iletkenliğini artırmak için katkılama çok önemli bir yaklaşımdır. Katkılama, yarı iletken malzemeye safsızlıklar ekleyerek valans bandının maksimumuna veya iletim bandının minimumuna yakın yeni enerji seviyeleri oluşturulur. Bu katkılı yarı iletkenler katkılı yarı iletkenler olarak adlandırılır. Termodinamik dengede, iletim bandındaki elektronların (n) konsantrasyonu, katkılı yarı iletkenlerde valans bandındaki deliklerin (p) konsantrasyonundan farklıdır. Bu fark, öncelikle malzemeye kontrollü özelliklere sahip düşük konsantrasyonda safsızlıkların kasıtlı olarak eklenmesiyle elde edilir, bu da doping olarak bilinir. Doping, yarı iletkenlerin özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Dikici, 2012).

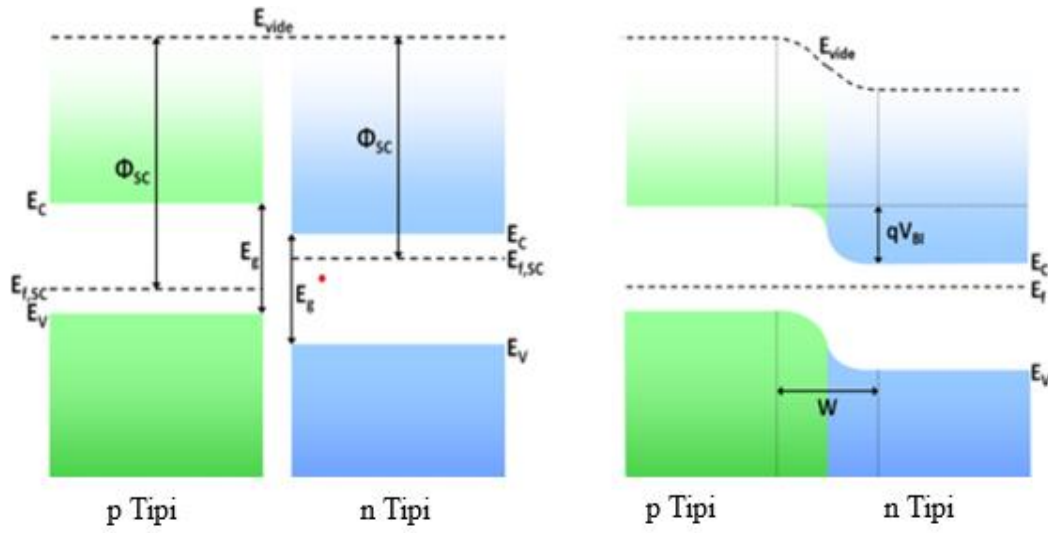
Katkılama yoluyla safsızlıkların eklenmesi, yarı iletkendeki elektron ve delik konsantrasyonlarını değiştirir. n-tipi yarı iletkenlerde elektron konsantrasyonu delik konsantrasyonundan daha yüksektir. Bu, yarı iletkenin, Şekil 2'te gösterilen ana malzemeye kıyasla fazladan değerlik elektronlarına sahip olan fosfor veya arsenik gibi safsızlıklarla katkılanmasıyla elde edilir. Bu ekstra elektronlar, malzemenin elektrik iletimine katkıda bulunan hareketli yük taşıyıcıları haline gelir. Tersine, p tipi yarı iletkenlerde delik konsantrasyonu elektron konsantrasyonundan daha yüksektir. Bu, yarı iletkenin, Şekil 2'te gösterilen ana malzemedan daha az değerlik elektronuna sahip olan bor veya galyum gibi safsızlıklarla katkılanmasıyla gerçekleştirilir. Daha az elektronun varlığı, valans bandında elektrik iletimine katkıda bulunan yük taşıyıcıları olarak hareket eden "eksik" elektronlar veya delikler yaratır (Kittel, 1996). Yarı iletkenlerde elektrik iletimi iki tür yük taşıyıcıya bağlıdır: elektronlar (negatif yük taşıyıcılar) ve delikler (elektronların yokluğunu temsil eden pozitif yük taşıyıcılar). Doping yoluyla elde edilen yük taşıyıcı konsantrasyonlarındaki bu değişimler, yarı iletkenlerin elektriksel özelliklerini ve davranışlarını önemli ölçüde etkiler. Örneğin, 10^5 Si atomu başına bir bor atomu eklenmesi, oda sıcaklığında Si'un iletkenliğini 10^3 kat artırabilir (Würfel, 2016).



Şekil 2. Yarı iletkenlerin p ve n tipi katkılama işleminin şeması (Bıyıklı, 2020)

p-n Eklemi

Zıt katkılama türlerine (n ve p) sahip iki yarı iletkenin birleştirilmesi p-n eklemi (birleşimi) olarak bilinen durumu yaratır. Sonuç olarak, yükler eklemin bir tarafından diğer tarafına aktarılır. n-tipi bir yarı iletken, Fermi seviyesi iletim bandının yakınında bulunur ve bu da serbest elektronların bolluğunu gösterir. Öte yandan, p-tipi bir yarı iletken, Fermi seviyesi değerlik bandına yakındır, bu da daha yüksek bir boşluk konsantrasyonuna işaret eder (değerlik bandında elektron yokluğu). Bu iki tip yarı iletken bir bağlantı noktası oluşturmak üzere bir araya getirildiğinde, Fermi seviyeleri denge kurmak için birbirleriyle hizalanma eğilimindedir. Bu hizalanma, iletim ve değerlik bantlarının bükülmesi yoluyla gerçekleşir. Bu bükülme, Şekil 3'te gösterilen tükenme bölgesi (W) adı verilen bir bölge oluşturur. Tükenme bölgesinin oluşumu iki ana olaydan etkilenir: difüzyon ve yüklerin sürüklenmesi. Difüzyon, yük taşıyıcılarının (elektronlar veya delikler) yüksek konsantrasyonlu bir alandan düşük konsantrasyonlu bir alana hareketini ifade eder ve yük yoğunluklarının eşitlenmesine yol açar. Öte yandan sürüklenme, yük taşıyıcılarının bağlantı noktası boyunca uygulanan bir elektrik alanına yanıt olarak hareket etmesini içerir. Difüzyon ve sürüklenmenin birleşik etkisi, tükenme bölgesinin oluşmasına ve p-n bağlantısının genel davranışına katkıda bulunur (Dikici, 2012; Guitouni *et al.* 2017).



Şekil 3. Bir p-n bağlantısının bant yapısının diyagramı ve temas ettiğinde (Guitouni et al. 2017).

Bir p-n eklemının tükenme bölgesi (W) içinde, serbest yüklerin ayrılması atomların iyonlaşmasına yol açar. Tükenme bölgesinin genişliği yarı iletkendeki katkıkonsantrasyonuna bağlıdır ve katkı konsantrasyonu arttıkça azalır. Bu, daha yüksek bir katkılama konsantrasyonunun daha dar bir tükenme bölgesi ile sonuçlanacağı anlamına gelir (Guitouni et al. 2017).

Bir p-n eklemi durumunda, birleştirilen yarı iletken malzemelerin yapısına bağlı olarak iki farklı senaryo ortaya çıkabilir. Bir homoecklem, n-tipi ve p-tipi yarı iletken malzemelerin aynı yapıda olduğu durumu ifade eder. Homoeckleminin bir örneği, birleşimin her iki tarafının da Si'dan oluştuğu Si bazlı fotovoltaik (PV) güneş pilleridir. Öte yandan, farklı doğalara sahip iki yarı iletken malzeme birleştirildiğinde bir heteroecklem meydana gelir. Bu durum, farklı yarı iletken malzemelerin ince katmanlarını kullanan çoğu PV güneş hücresi için geçerlidir. Heteroecklemlerde iki malzeme arasındaki arayüz, güneş pilinin performansını artırabilecek ek özellikler ve karakteristikler sunar (Belaqziz et al. 2018; Onwudiwe, 2022).

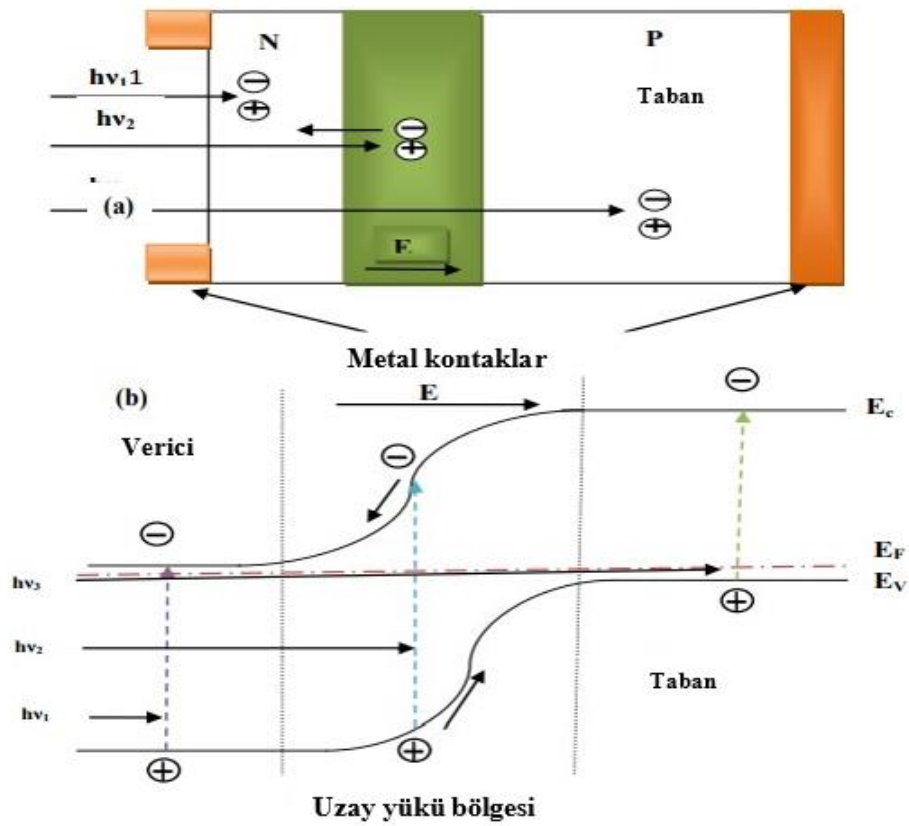
Fotovoltaik Etki

Fotovoltaik hücre, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bir cihazdır. Bu dönüşüm aşağıdaki üç mekanizmaya dayanır:

- ❖ Cihazı oluşturan malzeme tarafından fotonların (enerjisi boşluktan daha büyük olan soğurulması;
- ❖ Foton enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesi, bu da yarı iletken malzemede elektron/boşluk çiftlerinin yaratılmasına karşılık gelir;

❖ Cihazda üretilen parçacıkların toplanması.

Fotovoltaik endüstrinin de yarı iletkenlere olan ilginin temel nedeni iletkenlik ve değerlik bandına sahip olması ve yasak bant aralığının kontrol edilebilmesidir. Fotovoltaik hücreyi oluşturan malzeme bu nedenle iki enerji seviyesine sahip olmalı ve akımın akmasına izin verecek kadar iletken olmalıdır: Üretilen parçacıkları toplamak için, oluşturulan elektron/delik çiftlerini ayıracak bir elektrik alanına ihtiyaç vardır. Bu genellikle bir p-n bağlantısı kullanılarak elde edilir. Heteroeklemler ve Scott jonksiyonları gibi diğer yapılar da kullanılabilir. Fotovoltaik hücrelerin çalışması Şekil 4(a,b)'te gösterilmiştir. Gelen fotonlar n ve p bölgelerinde ve uzay yükü bölgesinde taşıyıcılar oluşturur. Foto-taşıyıcılar bölgeye bağlı olarak farklı davranacaktır (Belaqziz *et al.* 2018; Guitouni *et al.* 2017).



Şekil 4. (a) Bir fotovoltaik hücrenin yapısı ve **(b)** şerit diyagramı. Farklı bölgelerin ilgili boyutlarına uyulmamıştır (Guitouni *et al.* 2017).

Geçiş Metal Oksitleri

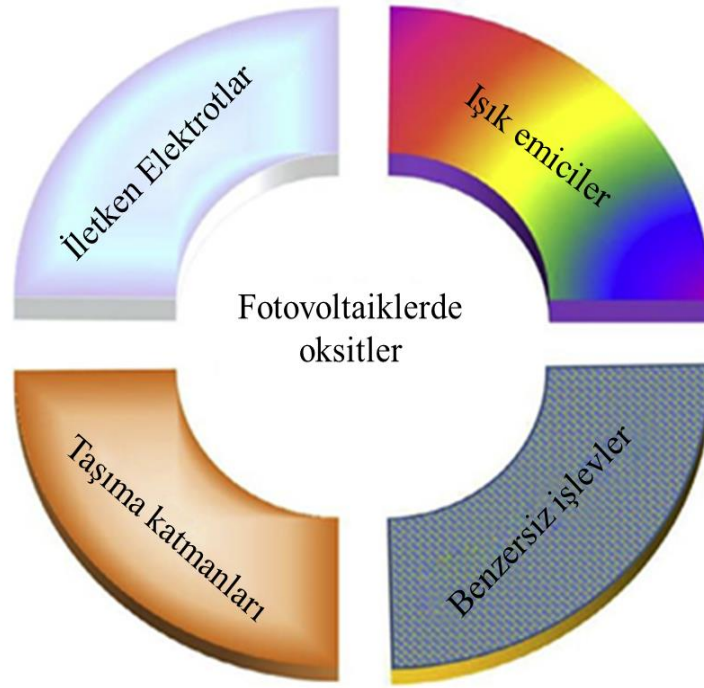
Geçiş metal oksitleri, çok çeşitli yapı ve özellikler sergileyen oldukça ilgi çekici bir katı malzeme kategorisini temsil eder. Bu bileşiklerdeki metaller ve oksijen arasındaki bağ, ağırlıklı olarak iyonik olandan önemli ölçüde kovalent veya metalik olana kadar değişebilir. Geçiş metal oksitlerinde gözlemlenen istisnai özellikler, dış d-elektronlarının ayırt edici doğasına atfedilebilir. Bu oksitler tarafından sergilenen elektronik ve manyetik özelliklerin dikkat çekici

spektrumu özel bir takdiri hak etmektedir. Örneğin, spektrumun bir ucunda metalik davranış sergileyen oksitler (örneğin, RuO_2 , LaNiO_3) bulunurken, diğer ucunda yüksek derecede yalıtkan oksitler (örneğin, BaTiO_3) bulunur. Ek olarak, bazı oksitler sıcaklık, basınç veya bileşim gibi faktörlere bağlı olarak her iki bölgeden de geçer (örneğin, V_2O_3). İlgi çekici elektronik özellikler de yük yoğunluğu dalgaları (örneğin, $\text{K}_{0.3}\text{Mo}_{0.3}$), yük sıralaması (örneğin, Fe_3O_4) ve kusur sıralaması (örneğin, $\text{Ca}_2\text{Fe}_{205}$) gibi olgulardan ortaya çıkar. Ayrıca, geçiş metal oksitleri ferromanyetizmden (CrO_2) antiferromanyetizme (NiO , LaCrO_3) kadar çeşitli manyetik özellikler sergiler (Maekawa *et al.* 2004; Rao, 1989).

Fotovoltaiklerde Geçiş Metal Oksitler

Sanayi devriminin 20. yüzyılın başlarında küresel elektrifikasyona doğru ilerlemesiyle birlikte, malzemelerdeki elektronik özelliklerin incelenmesi bilim insanları ve mühendisler için merkezi bir odak noktası haline gelmiştir. Bu bağlamda oksitler, yalıtkanlar ve yarı iletkenlerden metalik iletkenler ve süper iletkenlere kadar tüm iletkenlik spektrumunu kapsar (Tsuda *et al.* 2000). İlk katı hal transistörünün 1948 yılında piyasaya sürülmesi, elektronik alanında devrim yaratarak radyolar, hesap makineleri ve bilgisayarlar gibi daha küçük ve daha uygun fiyatlı tüketici cihazlarının üretilmesini sağlamıştır. Bununla birlikte, gerçek teknolojik atılım tamamlayıcı metal-oksit-yarı iletken (CMOS) teknolojisinin geliştirilmesiyle gerçekleşti ve bu da bir geçiş oksitinin, yani bu örnekte SiO_2 'nin mühendisliğiyle yakından ilişkiliydi. CMOS teknolojisinin kullanımı elektronik cihazların ilerlemesinde çok önemli bir rol oynamıştır (Kahng, 1960).

O zamandan beri oksitler çeşitli alanlarda giderek daha fazla uygulama alanı bulmuştur. Oksitler güneş pillerinde yalıtkanlar, yarı iletkenler ve iletkenler gibi farklı rollerde kullanılmakta, böylece daha düşük maliyetler ve gelişmiş cihaz kararlılığı gibi avantajlar sunmaktadır. Çeşitli fotovoltaik teknolojiler olsa da, bir güneş pilinin temel yapısı tipik olarak, ışığın elektriğe dönüşüm verimliliğini en üst düzeye çıkarmak amacıyla iki taşıyıcı çıkarma katmanı arasına sıkıştırılmış bir ışık emici katmandan (serbest taşıyıcılardan arındırılmış) oluşur. Oksitler şeffaf iletken elektrotlar, ışık emiciler, taşıma katmanları olarak bulunabilir veya yapıya manyetizma, ferroelektriklik ve piroelektriklik katabilir Şekil 5'te gösterilmiştir. (Hameiri, 2016).



Şekil 5. Fotovoltaiklerde oksitlerin uygulanması: şeffaf elektrotlar, ışık emiciler, taşıma katmanları, benzersiz işlevlere sahip malzemeler olarak (Pérez-Tomás *et al.* 2018).

Geçiş metal oksitleri, p-tipi hem de n-tipi yarı iletkenler olarak oldukça öne çıkmaktadır. TMO'ların hem p-tipi hem de n-tipi olabilmesi, daha karmaşık elektronik ve optoelektronik cihazlar tasarlamak için kullanılabilecek çeşitli heteroeklem yapılarının oluşturulmasına olanak sağladığından avantajlıdır (Guillén *et al.* 2011; Yu *et al.* 2016).

n-Tipi Geçiş Metal Oksitler

1950'lerden bu yana, n-tipi yarı iletkenler Oksitler (SCO'lar) elektrotlar için kullanılan baskın malzemeler olmuştur (Dixon *et al.* 2016). Aslında, bir SCO elektrotun ilk araştırması 1907 yılında Bädeker tarafından kadmiyum oksit (CdO) üzerinde yapılmıştır (Baedeker, 1907). Şu anda, n-tipi yarı iletkenler esas olarak In_2O_3 , SnO_2 , ZnO ve bunların karışımları gibi geçiş metal oksitlerden (TMO'lar) oluşmaktadır. Bu malzemeler, metal-oksit yapıları içinde mükemmel yörünge örtüşmesi sergileyerek düşük etkili elektron kütleleri ve dolayısıyla yüksek elektron hareketlilikleri ile sonuçlanır. Yüksek katkılanabilirlikleri ve geniş bant aralıkları, elektronik ve optoelektronik cihazlar için eV sahibi yapılar olarak önemlerine daha da katkıda bulunur (Ginley *et al.* 2011).

Bu TMO'larda yüksek iletkenlik elde etmek için, konsantrasyonu katkılama artırılır. Katkılamadaki artış, iyonize safsızlıklardaki serbest yüklerin saçılması nedeniyle hareketliliğin artmasına neden olur. Bununla birlikte, maksimum taşıyıcı konsantrasyonunun ana malzeme içindeki katkının çözünürlüğü (yaklaşık $\sim 10^{21}/\text{cm}^3$) ile sınırlı olduğunu, taşıyıcı hareketliliğinin

ise dejenere katkılı yarı iletkenlerde evrensel bir süreç olan iyonize safsızlık saçılması ile sınırlı olduğunu belirtmek önemlidir (Ellmer *et al.* 2008).

p-Tipi Geçiş Metal Oksitler

Genel olarak, alıcı tipi yarı iletken oksitler (SCO'lar) n-tipi muadillerine kıyasla daha yüksek direnç gösterir ve şu anda endüstriyel uygulamalarda p-tipi TMO bulunmamaktadır. Metal oksitlerin içsel elektronik yapısı nedeniyle p-tipi TMO'larda düşük direnç elde etmek daha zordur. Çoğu oksit malzeme, güçlü bir şekilde lokalize olmuş O 2p-türevi orbitallerden oluşan bir valans bandına sahiptir. Oksijen yüksek elektronegatifliğe sahip nispeten küçük bir atom olduğundan, sık alıcılar eklemek ve büyük delik etkin kütleleri elde etmek zorlaşır (Zhang *et al.* 2016).

Bununla birlikte, deliklerin n-tipi muadillerine benzer şekilde belirli p-tipi oksitler içinde hala önemli hareketlilik sergileyebileceği unutulmamalıdır. Arketipik bir örnek, 100 cm²/Vs'yi aşan bir Hall hareketliliği gösteren Cu₂O'dur (Li *et al.* 2009). Cu₂O'daki daha yüksek p-tipi hareketlilik, Cu 3d¹⁰'un enerji seviyesinin O 2p⁶ orbitallerine yakın olduğu ve bu orbitaller arasında önemli kovalent değişimle sonuçlanan değerlik bandının tepesine yakın bant yapısına atfedilir (Hu *et al.* 2008). Bununla birlikte, Cu₂O'daki kısa Cu-Cu mesafesi önemli 3d¹⁰-3d¹⁰ etkileşimlerine yol açarak bant aralığının yaklaşık 2,1 eV azalmasına neden olur ve bu da onu TCO olarak kullanım için uygunsuz hale getirir (Zuo *et al.* 1999).

P-tipi oksitlerin iletkenliğini artırmak için iyi bilinen bir yaklaşım, Kawazoe, Hosono *et al.* (1997) tarafından Cu bazlı üçlü oksitler için tanımlandığı gibi, değerlik bandının kimyasal modülasyonudur (Kawazoe *et al.* 1997). Bu oksitlerde, bağlanmaya dahil olan orbitaller güçlü kovalent etkileşimler oluşturarak değerlik bandının tepesinde önemli bir dağılıma ve delik lokalizasyonunda bir azalmaya yol açar. Ek olarak, kapalı kabuk d¹⁰ konfigürasyonu, d-d uyarımlarından kaynaklanan renklenmeyi önlemeye yardımcı olarak görünür ışık için optik şeffaflık sağlar. Bu prensibi takiben, delafossitler (Nagarajan *et al.* 2001; Snure *et al.* 2007; Ueda *et al.* 2001) ve SrCu₂O₂ (Kudo, 1998) gibi Cu⁺ taşıyan oksitlere dayanan bir dizi p-tipi yarı iletken oksitler (SCO'lar) keşfedilmiştir.

Daha yakın zamanlarda, iletim bandının kimyasal modülasyonu kavramı, d⁶ ve d³ konfigürasyonları gibi yarı kapalı kabuklara sahip diğer malzemelere de uygulanmıştır. Bu, ZnM₂O₄ spinelleri ve (La, Sr) CrO₃ gibi Cr bazlı oksitler dahil olmak üzere bir dizi yeni p-tipi SCO'nun tanımlanmasına yol açmıştır (Zhang *et al.* 2015). Bu kimyasal modülasyon yaklaşımı uygulandığında, bu malzemeler gelişmiş p-tipi iletkenlik sergilemekte ve şeffaf elektronik alanında potansiyel uygulamalar sunmaktadır.

Heteroeklem Geçiş Metal Oksit Güneş Pilleri

Heteroeklem yapılarının en önemli avantajı ve özelliği, enerji bariyerlerini manipüle ederek yük taşıyıcılarının iletimini kontrol etme yeteneklerinde yatmaktadır. Ek olarak, bu heteroyapılar, özellikle optoelektronik cihazlarda optik radyasyonu verimli bir şekilde yakalama kabiliyetine sahiptir. Fotovoltaik cihazlar (PV) ve ışık yayan diyotlar (LED'ler), önemli elektriksel ve optik özellikler sergileyen ve yüksek verimli cihazların tasarımını sağlayan heteroeklemlere örnektir (Nelson, 2003).

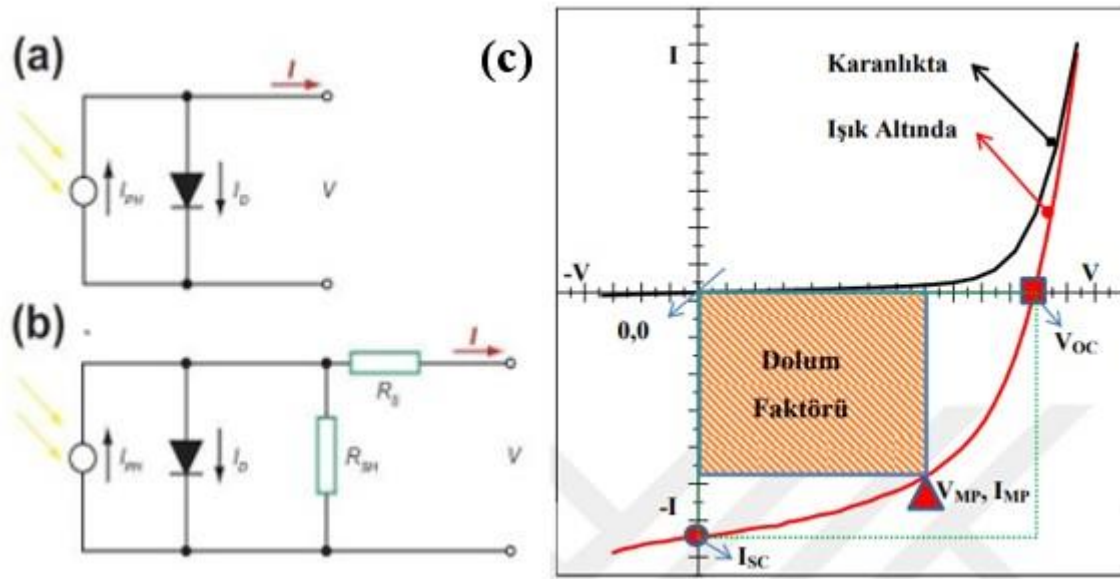
Bir heteroeklem, farklı enerji bandı boşluklarına sahip iki yarı iletkenin birleşmesiyle oluşur. Spesifik olarak, bir tarafı p-tipi yarı iletken ve diğer tarafı n-tipi yarı iletken yapılmış bir p-n yapısından oluşur. ZnO (çinko oksit) ve TiO₂ (titanyum dioksit) gibi TMO'lar, hem n-tipi hem de p-tipi yarı iletkenler olarak etkili bir şekilde işlev görebilir (Lira-Cantu *et al.* 2006). TMO'ların hem n-tipi hem de p-tipi yarı iletkenler olarak görev yapabilmesi, çeşitli heteroeklem yapılarının oluşturulmasına izin verdiği için avantajlıdır. Bu çok yönlülük, sofistike elektronik ve optoelektronik cihazların geliştirilmesi için fırsatlar yaratmaktadır. Ayrıca TMO'lar fotokataliz, güneş pilleri, sensörler ve şeffaf elektronikler gibi çeşitli alanlarda uygulama alanı bulmaktadır. Son yıllarda, TMO'ların Si güneş pillerinde kullanımında önemli ilerlemeler kaydedilmiştir (Avasthi *et al.* 2013; Bullock *et al.* 2014; Liu *et al.* 2014; Yang *et al.* 2013). Geissbu"hl"er ve arkadaşları gibi araştırmacılar, MoO_x tabanlı heteroeklem Si güneş pillerini, %22,5'e kadar ulaşan etkileyici güç dönüşüm verimliliği (PCE) ile başarıyla göstermişlerdir (Bullock *et al.* 2014). Bu kayda değer başarı, düşük maliyetli TMO'ların heteroeklem güneş pillerinde iletken katmanlar olarak kullanılmasının umut verici potansiyeline işaret etmektedir. TMO'ların Si güneş pillerindeki heteroeklem yapısının bir parçası olarak dahil edilmesiyle, cihazın performansını ve verimliliğini artırmak mümkün hale gelmektedir. TMO'ların benzersiz elektriksel ve optik özellikleri, daha yüksek PCE değerlerine yol açan gelişmiş yük taşıyıcı taşınmasına ve güneş ışığının emilmesine katkıda bulunur. Bu bulgular, yenilenebilir enerji üretiminde ve benimsenmesinde önemli bir rol oynayabilecek uygun maliyetli ve verimli güneş pili teknolojilerinin geliştirilmesi için heyecan verici umutlar yaratmaktadır. Bu alandaki araştırmalar ilerlemeye devam ettikçe, TMO tabanlı heteroeklem güneş pillerinde daha fazla ilerleme bekleyebilir ve bizi daha sürdürülebilir ve daha yeşil bir enerji geleceğine yaklaştırabilir (Yang *et al.* 2013).

Heteroeklem Güneş Pillerinin Fiziksel Arka Planı ve Temelleri

Akım-Voltaj Karakteristikleri

Bir güneş pilinin ışık altındaki veriminin belirlenmesi, bir güneş pilinin en önemli özelliğidir. Bu özellik, güneş pileme temas elektrotları üzerinden bir ön gerilim uygulanarak belirlenir ve böylece ön gerilimin her değeri için akımın belirli bir değeri elde edilir. Aydınlatma altında veya karanlıkta güneş pilinin neden olduğu akım ile ön gerilimdeki değişikliklerden kaynaklanan I-V eğrisi aracılığıyla güneş pilinin performansını tanımlamak için birkaç önemli parametre çıkarmak mümkündür. I-V eğrisinden belirlenebilecek en önemli parametreler güç dönüşüm verimliliği (PCE), kısa devre akım (I_{sc}), açık devre voltajı (V_{oc}) ve dolum faktörüdür (FF) (Lindholm *et al.* 1979).

İdeal güneş pili devrede bir diyot ile paralel bağlı bir akım kaynağı şeklinde temsil edilir ve gerçekte ideal bir güneş pili olmadığı için devreye Şekil (6)'deki gibi bir şönt ve bir seri direnç eklenmiştir.



Şekil 6. (a) İdeal bir Güneş pili ve **(b)** şönt R_{SH} ve seri R_S dirençlerine sahip bir Güneş pili devresi. **(c)** İnce film Güneş pilinin akım-voltaj eğrisi (Şentürk, 2018)

Kısa devre akım (I_{sc}), voltaj sıfır olduğunda aydınlatma altında güneş pili tarafından üretilen maksimum akı temsil eder ve güneş pilinin alanı ve güneş pilinin yüzeyine gelen foton sayısı dâhil olmak üzere çeşitli faktörlere bağlıdır. Açık devre gerilimi (V_{oc}), akım sıfır olduğunda güneş pilinin elektrotları arasındaki gerilimin maksimum değeridir ve güneş pilindeki soğurma katmanının bant aralığına bağlıdır (Augusto, 2017).

Güneş pilinden elde edilen maksimum güç veya maksimum güç noktası (MPP), I-V eğrisinden elde edilen maksimum voltaj (V_{mpp}) ve akım (I_{mpp}) değerleriyle de belirlenebilir:

$$P_{max} = I_{mpp} \cdot V_{mpp}$$

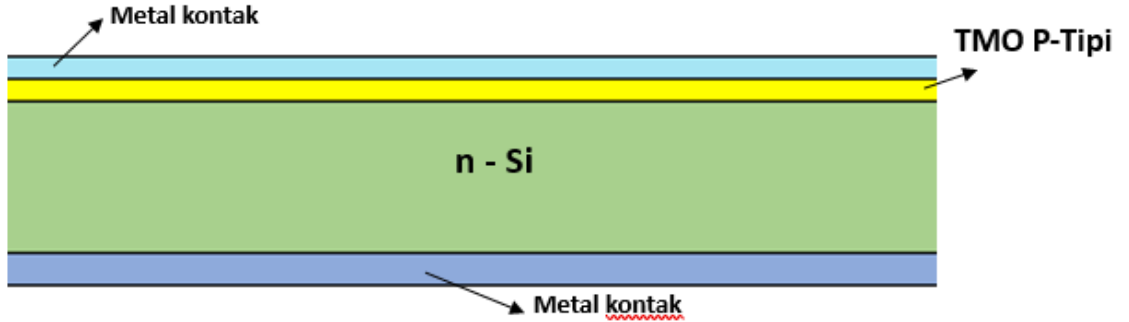
Güneş pilinin verimliliği (η), aydınlatma altında güneş pili tarafından üretilen maksimum gücün bu hücrenin yüzeyine düşen optik güce bölünmesinin sonucudur ve şu şekilde verilir:

$$\eta = P_{mpp} / P_{in} = (I_{mpp} * V_{mpp}) / P_{in} = (I_{sc} * V_{oc} * FF) / P_{in}$$

Dolurma faktörü, ürünün maksimum güç noktasındaki voltaj ve akımın kısa devre akımı ve açık devre voltajı ürününe bölünmesinden elde edilen oranı gösterir:

$$FF = (I_{mpp} * V_{mpp}) / (I_{sc} * V_{oc})$$

Heteroeklem geçiş metal oksit güneş pilleri, birbiri üzerine biriktirilen birkaç katmandan oluşur: Si bir alt tabaka üzerine biriktirilen metalik elektrot katmanı (kullanılan oksit p tipi ise Si n tipi olduğu ve oksit n tipi ise Si un p tipi olduğu), geçiş metal oksit katmanı ve metalik elektrot katmanı. Heteroeklem geçiş metal oksit güneş hücresi yapı için bir örnek Şekil 7’de verilmiştir.

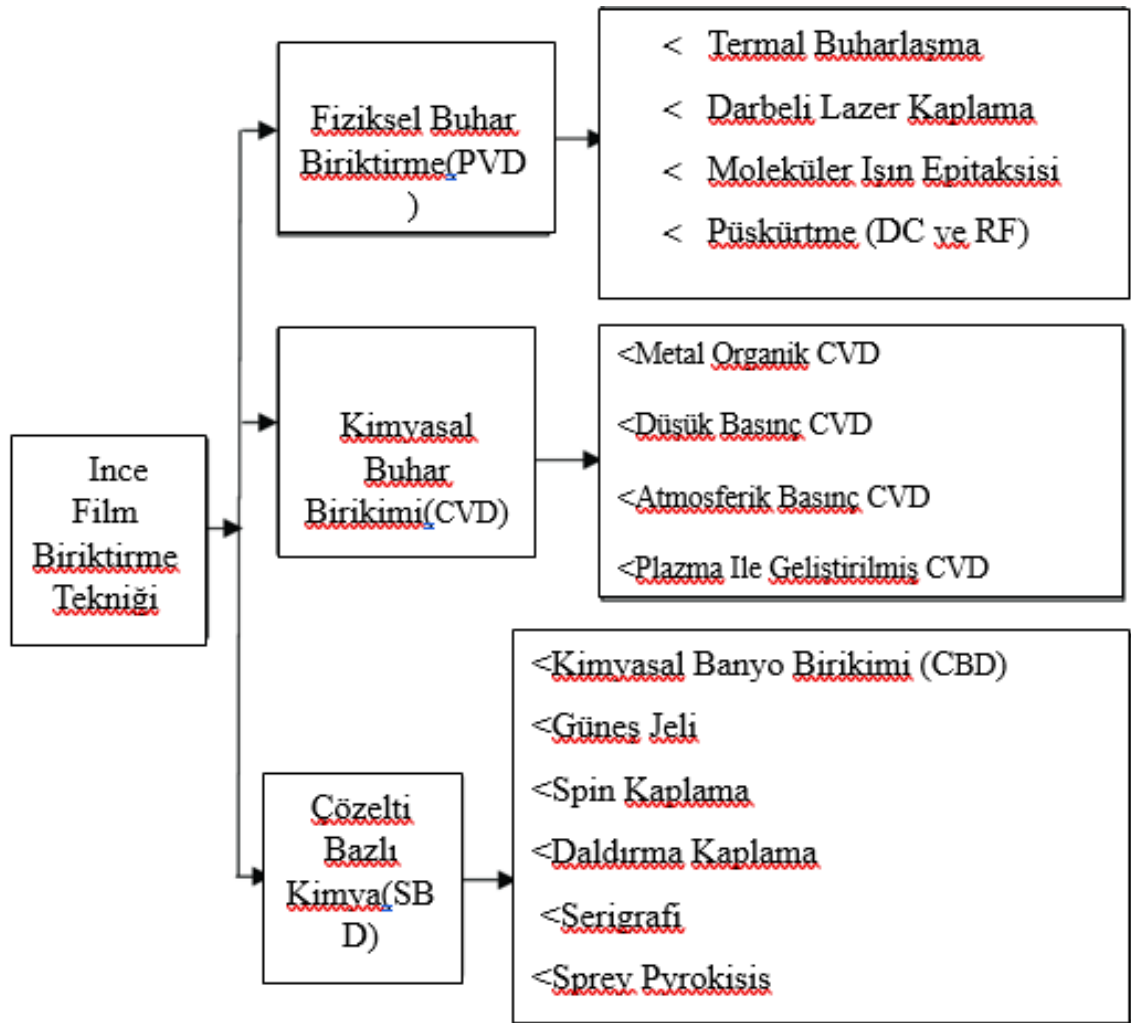


Şekil 7. Heteroeklem geçiş metal oksit güneş hücresi yapısı (Liang *et al.* 2015).

İnce Filmler Hazırlama Yöntemleri

Güneş pillerinin verimliliği büyük ölçüde üretilen filmlerin kalitesine ve buna bağlı olarak kullanılan biriktirme tekniklerine bağlıdır. İnce film üretim teknolojilerinin şeması, Şekil 8’de verilmiştir (Poortmans *et al.* 2006).

Bu çalışmada Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD) yöntemlerinden biri olan püskürtme biriktirme yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 8. İnce filmler hazırlama yöntemleri şeması (Ukoba *et al.* 2018).

Magnetron Saçtırma (Sputter)

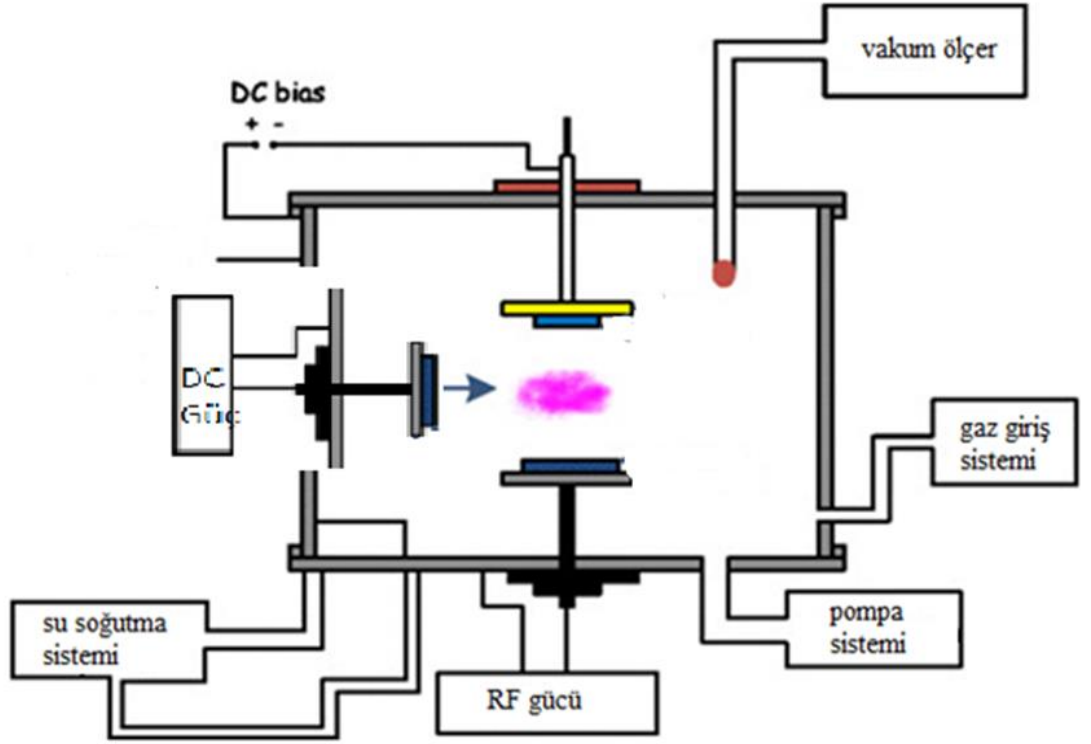
Düz panel ekranlar ve güneş pilleri gibi elektronik uygulamalar için şeffaf iletken oksitler (TCO) yaygın olarak kullanılmaktadır. DC veya darbeli DC magnetron püskürtme, nispeten yüksek biriktirme hızlarında ve orta maliyetlerde iyi malzeme kalitesine sahip TCO filmlerini biriktirmek için uygun bir yöntemdir. Bununla birlikte, klasik DC magnetron püskürtme işlemi, hedef yüzeyden ikincil elektron emisyonu yoluyla boşalmayı sürdürmek için nispeten yüksek bir işlem voltajı gerektirir ve bu da yüksek püskürtme hızlarına neden olur. DC işleminin bazı sınırlamalarını ele alan alternatif bir yaklaşım, RF-superimposed DC püskürtmedir. RF işlemlerinde 13,56 MHz uyarma frekansında, iyonizasyon öncelikle yığın plazmadaki salınan elektronlar tarafından yönlendirilir ve DC işlemlerine kıyasla önemli ölçüde daha düşük deşarj voltajlarına yol açar (Cebulla *et al.* 1998). Ayrıca, RF prosesleri alt tabakanın plazma iyonları, özellikle de Ar^+ iyonları tarafından orta enerji seviyelerinde daha fazla bombardıman edilmesini kolaylaştırır. Bunun nedeni, bir RF deşarjında plazma potansiyeli ile yüzey potansiyel ($V_p - V_f$) arasındaki daha büyük farktır. RF proseslerindeki orta enerjili iyon

bombardımanı, filmlerin büyümesine yardımcı olarak daha iyi ve daha yoğun film kalitesi elde edilmesini sağlayabilir(Ellmer *et al.* 1998a; Ellmer *et al.* 1998b).

Uygulanan DC gücüne belirli bir miktar RF gücünün eklendiği RF-superimposed DC püskürtme kullanılarak, ITO (indiyum kalay oksit) gibi malzemeler için daha iyi film kalitesi elde etmek mümkündür. RF ve DC Magnetron Sputter sisteminin şematik gösterimi için bir örnek Şekil 9'da verilmiştir. ITO, düz panel ekran endüstrisinde şeffaf bir ön ve arka kontak olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Bendervd *et al.* 1999; Sigdel *et al.* 2010). RF/DC tekniği, saf DC işlemlerine kıyasla makul derecede yüksek biriktirme oranlarında ITO filmlerinin daha iyi film kalitesine veya daha düşük alt tabaka sıcaklıklarında karşılaştırılabilir film kalitesine olanak tanır. Ayrıca, RF/DC püskürtme ile biriktirilen filmler, özellikle OLED'ler gibi organik malzemelere dayalı ekranlar için çok önemli olan olağanüstü pürüzsüzlük sergiler (Tak *et al.* 2002).

Püskürtme işleminin baskın eğilimi, basitleştirme için altı adıma ayrılabilir:

- a) Biriktirme odasının, tipik olarak 10^{-6} Torr civarında düşük bir basınca tahliye edilmesi.
- b) Argon veya ksenon gibi inert gazlar gibi püskürtme gazının odaya sokulması.
- c) Bir tür plazma olan ışına deşarjı oluşturmak için hazneye yerleştirilmiş iki elektrot arasına voltaj uygulanması.
- d) Işıma deşarjı içinde, serbest elektronlar püskürtme gazı atomlarıyla çarpışarak elektronların atomlardan ayrılmasına ve püskürtme gazının pozitif iyonlarının oluşmasına neden olur.
- e) Püskürtme gazının pozitif iyonları, uygulanan voltaj nedeniyle negatif yüklü elektrot olan katoda doğru hızlanır.
- f) Pozitif iyonlar ile katot arasındaki çarpışmalar sayesinde katot yüzeyini oluşturan atomlar yer değiştirir ve alt tabaka üzerine biriktirilir. Depolanacak malzemeler bu süreçte katot olarak kullanılır (Kosari, 2021).



Şekil 9. RF ve DC Magnetron Sputter sisteminin şematik gösterimi (Jain *et al.* 2016).

Analitik Teknikler

Taramalı Elektron Mikroskopisi (SEM)

Elektron mikroskobu, yüzey topografisi, morfolojisi ve bileşimi hakkında ayrıntılı bilgi sağlama kabiliyeti nedeniyle malzeme numunelerinin yüzeylerini incelemek için yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Elektron mikroskobu, 1 nm kadar düşük çözünürlük ve malzeme yüzeyinin 300000 katına kadar amplifikasyon kapasitesi ile yüksek (Marturi *et al.* 2012).

Taramalı elektron mikroskobunda (SEM) elektronlar bir katottan veya bir tungsten telden yayılır ve yüksek voltaj uygulanarak hızlandırılır. Hızlandırılan bu elektron demeti, manyetik lensler ve metal yarıklar kullanılarak vakumlanmış bir sütun içinde odaklanır. Hızlandırılan birincil elektronlar daha sonra numune yüzeyi ile etkileşime girerek elastik ve elastik olmayan saçılmalar yoluyla enerjilerini kaybederler. Birincil elektronlar ve malzeme arasındaki etkileşimin kapsamı, hızlandırma voltajı, malzemenin atom numarası ve elektron ışınının geliş açısı gibi çeşitli faktörlere bağlıdır. Hızlandırıcı voltaj ne kadar yüksek olursa, birincil elektronlar ile malzeme arasındaki etkileşim hacmi de o kadar büyük olur. Birincil elektronların malzemenin atomlarıyla etkileşimi sırasında çeşitli sinyaller yayılır. Bu sinyaller arasında ikincil elektronlar, saçılan elektronlar ve X-ışınları yer alır. Bunlar arasında ikincil elektronlar, yüzey topografisi ve morfolojisi hakkında değerli bilgiler sağladıkları için özel bir öneme sahiptir. İkincil elektronları tespit ve analiz ederek SEM, numunenin yüzey yapısının

ince ayrıntılarını ortaya çıkaran yüksek çözünürlüklü görüntüler oluşturabilir (McMahon, 2008).

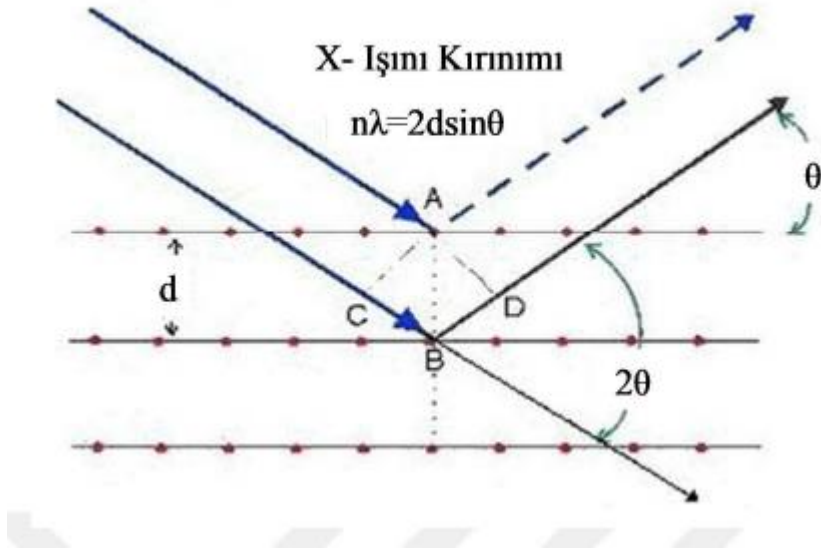
X-ışını kırınımı (XRD) spektroskopisi

X-ışını kırınımı (XRD) tekniği, maddelerin kristal yapısını incelemek için temel bir yöntemdir, çünkü X-ışınları bir kristaldeki kristal düzlemler arasındaki boyutlarla benzer büyüklükte dalga boylarına sahiptir. X-ışınları bir malzeme ile etkileşime girdiğinde, malzeme içindeki atomik diziler tarafından kırılırlar ve esasen gelen X-ışınları için üç boyutlu kırınım ağları olarak hareket ederler. Bu X-ışını kırınimleri üst üste binerek yıkıcı ve yapıcı girişimlere yol açar. Yapıcı girişimler, Bragg yasası tarafından tanımlanan koşullar karşılandığında Şekil (10) 'deki gibi belirli kristal düzlemlerde meydana gelir:

$$n\lambda = 2d\sin\theta$$

Burada:

- n : bir tam sayıdır (1, 2, 3, ...)
- λ : X-ışınlarının dalga boyudur
- d : kristaldeki iki düzlem arasındaki mesafedir
- θ : kırınım açısıdır.



Şekil 10. X ışınlarının kırınımı (Razeghi, 2006).

Pratik açıdan, XRD örnek bileşiklerin tanımlanması ve karakterizasyonu için kullanılır. Kırınım açıları ölçülerek ve Bragg yasası kullanılarak, kırınım pikleri için karşılık gelen d -boşlukları belirlenir. Her bileşik, farklı örnek malzemelerin kolayca tanımlanmasını sağlayan farklı bir d -boşlukları kümesine sahiptir. Bu karakteristik d -boşlukları kümesi, her bileşik için

benzersiz bir "parmak izi" sağlayarak araştırmacıların bir numunede bulunan kristal fazları tanımlamasına ve kristal yapısını analiz etmesine olanak tanır. Bu, malzeme bilimi, jeoloji, kimya ve katı hal fiziği de dahil olmak üzere birçok alanda çok önemlidir (Bunaciu *et al.* 2015a).

UV-görünür soğurma spektroskopisi

UV-görünür soğurma spektroskopisi, bir ışık demeti içinden geçerken bir numunenin absorpsiyonunu ve geçirgenliğini ölçmeye dayanan veya kullanılan ışığın dalga boyunun bir fonksiyonu olarak numunenin yüzeyinden yansıtıcılığı ölçen bir tekniktir. Bu spektroskopik yöntem, ultraviyole, görünür ve yakın kızılötesi bölgeleri kapsayan 190 nm'den 1100 nm'ye kadar uzanan spektral aralıkta kullanılır. Bu aralıkta, birçok yarı iletken malzeme ve organik bileşik, bu aralıktaki enerjilere sahip fotonları absorbe etme yeteneğine sahiptir ve bu da onların temel durumdan uyarılmış duruma geçmesine neden olur. UV-görünür aralığında bir malzemede ki atomlar veya moleküller ile ışık arasındaki etkileşim, malzemenin elektronik özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlar. Araştırmacılar, soğurma spektrumunu inceleyerek, numune içinde meydana gelen elektronik yapı, enerji seviyeleri ve geçişler hakkında bilgi edinebilirler (Bunaciu *et al.* 2015b; Skoog *et al.* 2017). Ek olarak, optik bant aralığı enerjisi aşağıdaki Tauc formülü ile hesaplanır:

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{n/2}$$

Burada:

- A: sabit
- α : soğurma katsayısı
- h : planck sabiti
- ν : ışık frekansı
- E_g : bant aralığı enerjisidir

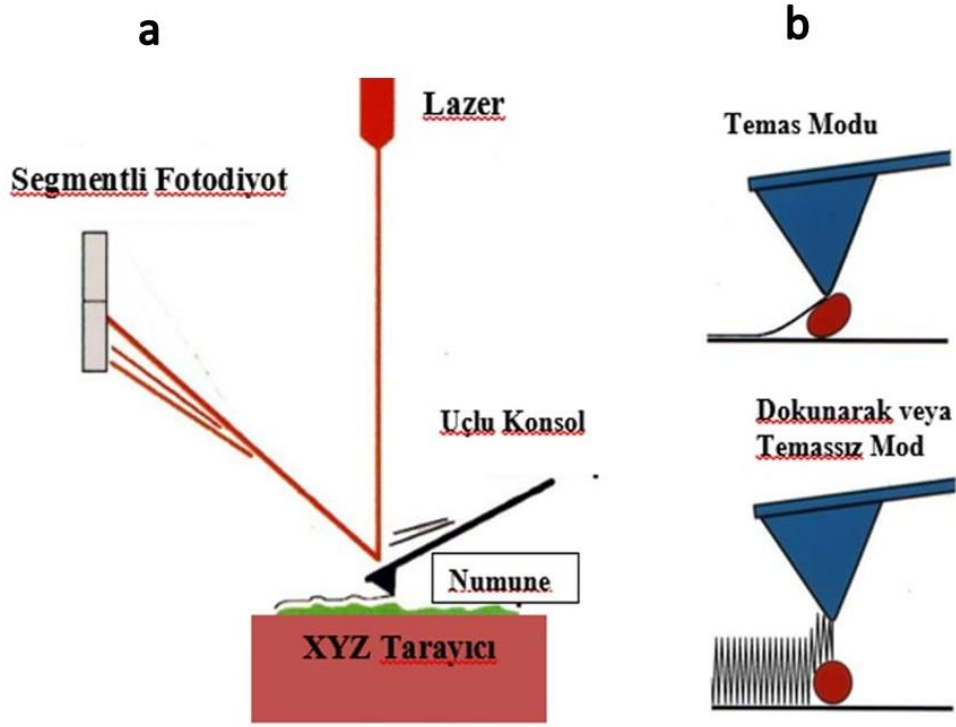
Formülde n değerine optik geçişin türüne göre karar verilir (doğrudan geçiş için n=1) (Li *et al.* 2018).

Atomik Kuvvet Mikroskobu

Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) gerçekten de polimerler, seramikler, kompozitler, cam ve biyolojik örnekler dahil olmak üzere çok çeşitli yüzeyleri görüntülemek için kullanılan güçlü ve çok yönlü bir tekniktir. Araştırmacıların yüzey özelliklerini görselleştirmelerine ve atomik ve moleküler ölçeklerde yüksek çözünürlüklü görüntüler elde etmelerine olanak tanır. AFM'nin en güçlü yönlerinden biri, AFM ucu ile numune yüzeyi arasında hareket eden çeşitli

kuvvet türlerini ölçme ve lokalize etme yeteneğidir. Bu kuvvetler arasında yapışma gücü, manyetik kuvvetler ve mekanik özellikler yer alır. Araştırmacılar bu kuvvetleri inceleyerek farklı malzemelerin yüzey özellikleri ve etkileşimleri hakkında değerli bilgiler edinebilirler (Aliofkhazraei *et al.* 2014).

Şekil 11(a-b)'de görüldüğü gibi, AFM, tipik olarak yaklaşık 10 ila 20 nm çapında, bir konsol üzerine tutturulmuş keskin bir uç kullanarak çalışır. AFM ucu genellikle Si (Si) veya Si nitrür (Si_3N_4) gibi malzemelerden mikro olarak üretilir. Uç, numune yüzeyi ile etkileşime girer ve ortaya çıkan uç-yüzey etkileşimleri kantileverin hareket etmesine neden olur. Bu hareket, bir lazer ışınının kantilever üzerine odaklanması ve yansıyan ışığın bir fotodiyot kullanılarak tespit edilmesiyle hassas bir şekilde ölçülür. Fotodiyotun sinyali, AFM ucuna etki eden kuvvetlerle ilişkili olan kantileverin sapması hakkında bilgi sağlar. Bir AFM (Hiesgen *et al.* 2009) temas ve dokunma modları gibi iki temel modda çalıştırılır. Temas modunda, AFM ucu yüzeyle sürekli temas halindedir. Temas modunda, AFM ucu numune ile sürekli temas halinde kalır. Bu mod tipik olarak, uç ile yüzey arasındaki kuvvetlerin ilgi çekici olduğu kuvvet eğrisi ölçümleri gibi belirli uygulamalar için kullanılır. Öte yandan, aralıklı temas modu veya genlik modülasyonu modu olarak da bilinen dokunma modu, AFM görüntülemesi için yaygın olarak kullanılan önerilen moddur. Bu modda, AFM kantilever numune yüzeyinin üzerinde salınır veya titreştirilir. Uç, salınım döngüsü sırasında aralıklı olarak yüzeye dokunur ve uç ile numune arasındaki yanıl kuvvetleri azaltır (Sinha Ray, 2013). Bu nazik dokunma hareketi hem ucun hem de numune yüzeyinin bütünlüğünün korunmasına yardımcı olur. AFM'nin hassasiyeti, çeşitli yüzeylerdeki atomları ve yapıları görüntülemesine ve manipüle etmesine olanak tanır. AFM ucunun tepe noktasında, alttaki yüzeydeki tek tek atomlar, uçtaki her bir atomla yeni başlayan kimyasal bağlar oluşturdıklarında "algılanabilir". Bu ince kimyasal etkileşimler, ucun titreşim frekansında tespit edilebilen ve haritalanabilen hafif değişikliklere yol açar. Bu özellik, atomik ve moleküler seviyelerde yüksek çözünürlüklü görüntüleme ve analiz olanağı sağlayarak AFM'yi nanobilim ve nanoteknoloji araştırmalarında çok önemli bir (Hiesgen *et al.* 2009).



Şekil 11. Farklı AFM çalışma modlarının diyagramları. **(a)** Temas modu ve **(b)** aralıklı temas modu (Nguyen-Tri *et al.* 2020).

MATERYAL ve YÖNTEM

Giriş

Bu tez çalışmasında, inorganik bir yarı iletken aktif tabaka ile n tipi Si üzerine heteroeklem tasarımı yapılmıştır. Ayrıca RF-DC co-sputter tekniği ile elde edilen filmin yapısal, morfolojik ve optik karakterizasyonu yapılmıştır. Tasarlanan heteroeklemin performansı değerlendirilmiştir. Heteroeklem üretiminde Au metali üst kontak olarak, Al metal alt kontak olarak kullanılmıştır. n tipi Si malzeme üzerine p tipi $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ince filmi oluşturuldu. Bu bölüm, $\text{Au/Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3/\text{n-Si/Al}$ yapısını oluşturmak için gerekli üretim sürecini sunmaktadır. Ayrıca bu bölüm, elde edilen yapıların I-V ölçümleri, yapısal, morfolojik ve optik soğurma için kullanılan cihazlar ve teknikler hakkında bilgi içermektedir.

n-Si ve Cam Alttaş Temizlenmesi ve Numunelerin Hazırlanma Süreci

Bu çalışmada, elde edilen heteroeklemlerin istenilen kalitede olabilmesi için Si kristal yüzeylerinin kimyasal kirliliklerden arındırılması gerekmektedir.

İlk olarak tüm alttaşlar, elmas kesici vasıtasıyla $2 \times 2 \text{ cm}^2$ boyutlarında kesildi. Daha sonra kullanılacak Si ve cam alttaşlara temizleme işlemi uygulandı. Si alttaşlar için kimyasal ve fiziksel kirlilikleri uzaklaştırmak amacıyla RCA temizleme prosesi uygulandı. RCA-1 ve RCA-2 olarak ard arda iki aşamada oluşmaktadır. Kimyasal kirlilikleri (doğal oksit tabakası, karbon kalıntıları, el kiri) Si yüzeyinden temizlemek için RCA-1 kullanılmaktadır. RCA-2 ise Si üzerinde oluşan daha zor çıkan fosfor, karbon, yağ gibi kirlilikleri temizlemek için uygulanmaktadır.

- Ultrasonik temizleme sisteminde seton içinde 10 dk bekletildi.
- Ultrasonik temizleme sisteminde metanol içinde 10 dk bekletildi.
- Deiyonize su (DI) içinde 5 dk bekletildi. Ön temizlikten sonra asıl temizleme prosesi başlatıldı.

RCA-1:

- Su, NH_4OH , H_2O_2 sırasıyla 5:1:1 oranında kullanıldı.
- Üç bileşenden oluşan temizleme solüsyonu 60°C 'ye ısıtıldı.
- Si, bu ısıtılmış solüsyonda 10 dk bekletildi.
- DI su ile yıkandı.
- % 10'luk seyreltik HF solüsyonunda 30 s bekletildi.

- RCA -1 prosesi sona erdikten sonra RCA-2 prosesine geçildi.

RCA- 2:

- Su, HCl, H₂O₂ sırasıyla 6:1:1 oranında kullanıldı.
- Üç bileşenden oluşan temizleme solüsyonu 60°C'ye kadar ısıtıldı,
- Si'lar ısıtılan solüsyonun içine 10 dk bekletildi.
- DI suyla yıkandı.
- % 10'luk seyreltik HF solüsyonunda 30 s bekletildi.
- DI sudan geçirilen alttaşlar DI su ile 10 dk ultrasonik titreşimde işlem gördü.
- Temizlik prosesinden geçen alttaşlar azot gazıyla kurutuldu.

Cam alt taşlar Pirana adı verilen bir proses uygulandı:

- İlk olarak cam alttaşlar sıvı sabun ile ovalanarak yıkandı.
- Beher içine konulan DI suda ultrasonik titreşimde 15 dk temizlendi.
- H₂O₂, H₂SO₄ ve DI sudan oluşan solüsyonu sırasıyla 1:5:1 oranında kullanıldı.
- Bu solüsyonda 3 sa bekletildikten sonra solüsyondan çıkarılan alttaşlar bol DI su ile yıkandı.
- DI suda ultrasonik titreşimde 15 dk bekletildi.
- Sputter işlemi ile bütütme yapılacağı ana kadar DI suda bekletilen alttaşlar izoproponaldan geçirilerek azot gazı ile kurutuldu.

Heteroeklemlerin üretimi sırasında, safsızlıkların heteroeklem parametreleri üzerindeki olumsuz etkilerinden kaçınmak için temiz ortam koşullarını korumak ve bozulmamış malzemeler kullanmak çok önemlidir. Bu bağlamda, süreçte kullanılan çeşitli bileşenler için özel temizleme prosedürleri uygulanmıştır. Buharlaştırma için kullanılan Al ve Au metalleri seyreltik HF ile temizleme işleminden geçirilmiştir. Tavlama işleminde kullanılacak olan kuvars pota, aseton ve metanol kullanılarak yaklaşık 5'er dk boyunca titizlikle yıkanmıştır. Ayrıca, buharlaştırma için kullanılan ısıtıcı %10 HCl ile ultrasonik temizliğe tabi tutuldu, an DI su ile iyice durulandı ve ardından kurutuldu.

Si alltaşın mat tarafına Al alt kontağı oluşturmak için, Si alttaş vakum sistemi içinde uygun yüksekliğe dikkatlice yerleştirildi. Metal buharlaştırma işlemi esnasında uygun yükseklik, buharlaşan metal ile yarı iletken malzeme arasında optimum etkileşimi sağladığı için çok önemlidir. Bu durumda, metal yarı iletken yüzey üzerine atomik ölçekte daha yoğun bir şekilde kaplanır. Si alttaşın parlak yüzeyini korumak ve buharlaşan metalden kaynaklanan herhangi bir kirlenmeyi önlemek için parlak yüzey üzerine bir lamel yerleştirildi. Vakum sistemi hazırlandıktan ve çalışır hale getirildikten sonra, içindeki basınç yaklaşık 10⁻⁵ Torr'a

düşürüldü. Ardından, ısıtıcı üzerine yerleştirilen Al metali, buharlaştırma ünitesinde (Şekil 12) ısıtıcıya yüksek bir akım uygulanarak buharlaştırıldı. Kısa bir süre sonra vakum cihazına hava verildi ve sistem dengeye ulaştığında numuneler vakumdan çıkarılarak kimyasal olarak temizlenmiş bir kuvars potaya aktarıldı. Tavlama işlemi Şekil 13'te gösterilen fırın kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu adımda n-tipi numune 520°C'de 3 dk boyunca N₂ ortamında tavlannmıştır. Tavlama işleminin ardından kuvars pota tavlannmış numunelerle birlikte dikkatlice dışarı alınmış ve soğumaya bırakılmıştır. Bu işlemler sonucunda n-Si/Al alt kontaklar elde edilmiştir.



Şekil 12. Termal buharlaştırma ünitesi.



Şekil 13. Tavlama fırını.

Fe_{2-x}Sn_xO₃ İnce Film Kaplama

Büyütmede Kullanılan RF Magnetron (Saçtırma) Sputter Sistemi

Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃ /n-Si/Al yapısına elde etmek için Fe_{2-x}Sn_xO₃ aktif tabakası PVD-MİDAS 3M markalı magnetron sputter sistem (Şekil 14) ile büyütüldü. Büyütme işlemi ve metal kontak buharlaştırma işlemleri Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde temiz odada yapılmıştır. Sistemin kazan basıncı 1×10^{-7} Torr'a kadar indirilebilir. Alttaş sıcaklığı 450 °C'ye kadar çıkabilir. Alttaş döndürme dakikada 3-30 tur sayısına (rpm) sahip olabilmektedir. İki RF güç ve biri DC güç kaynağı olmak üzere toplamda üç adet hedef kullanılabilir ve böylece ikili ve üçlü bileşikler büyütülebilir.

Sputter tekniği, kimyasal işlemlerle temizlenmiş ısıtılmış alt tabaka üzerindeki metal hedeften koparılan iyon, atom ve moleküllerin inert gaz yardımıyla ince bir film halinde büyütülmesidir. Büyütülecek malzemenin metal hedeften koparılması için argon bir RF veya DC güç kaynağı yardımıyla inert gaz taşıyıcı plazma haline getirilir ve plazma hedef metalin yüzeyine vurarak koparma işlemini gerçekleştirir.

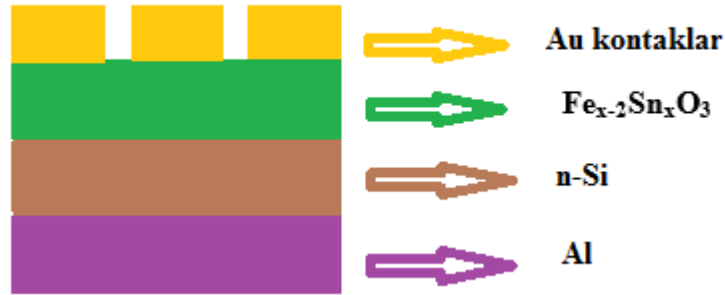


Şekil 14. Magnetron sputter sistemi.

Sn metal hedefler 2 inç (çap), Fe sputter folyosu hedefi ise 2 inç (çap) boyutundadır. DC güç tabancasına bir Fe hedef, RF güç kaynağının bulunduğu bölüme Sn metal hedef yerleştirilmiştir. Birinci numune için DC güç kaynağı 150 W iken RF güç kaynağı Sn hedef için 50 W olarak ayarlanmıştır (N1/n-Si/Al). Ayrıca ikinci numune için DC güç kaynağı 150 W iken RF güç kaynağı Sn hedef için 25 W olarak ayarlanmıştır (N2 /n-Si/Al). Vakum odasına

6×10^{-6} Torr basınca (taban basıncı) kadar yerleştirilen cam ve Si alttaşlar 450° 'ye kadar ısıtıldı. Ardından dakikada 100 santimetreküp (sccm) inert argon gazı gönderildi ve plazma oluşturuldu. Daha sonra $7,8 \times 10^{-3}$ Torr basınçta büyütölmek üzere 42 sccm argon ve 3 sccm oksijen gazı verildi.

Deneyin sonraki adımlarında, Au/ $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ /n-Si/Al üst kontak yapılarının üretimine başlanmıştır. $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ kaplı ve alt kontaklı numuneler, 1 mm çapında deliklere sahip pirinç bir gölge maskesi üzerine dikkatlice yerleştirildi ve üst kontağı oluşturmak için ince film kaplanmış yüzeyin yukarı bakması sağlandı ve üzeri bir cam lamel ile kapatıldı. Üst kontak işlemi için kaplama ünitesinin cam fanusu kapatıldı ve kaplama ünitesinin içindeki basınç yaklaşık 10^{-5} Torr'a düşürüldü. İstenilen vakum basıncı elde edildikten sonra sisteme akım uygulandı. Büyütölen $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ kaplı yüzey üzerine 40 nm kalınlığında bir Au metal tabakasının buharlaştırılmasıyla, Şekil 16'da gösterildiği gibi üst kontaklar oluşturulmuştur.



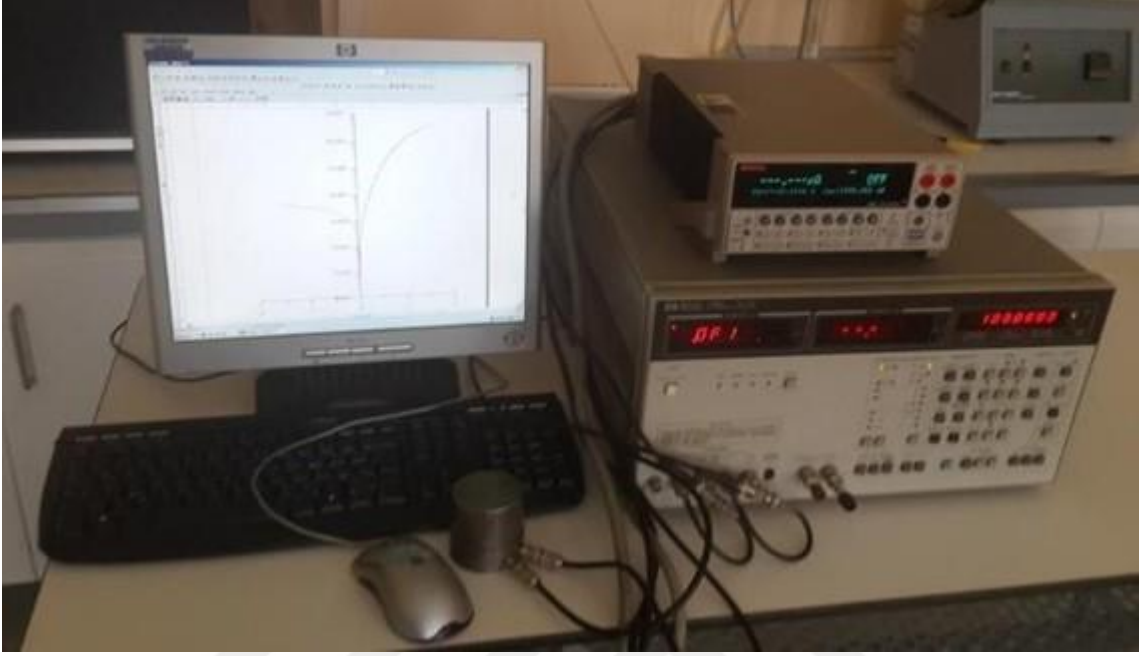
Şekil 15. Au/ $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ /n-Si/Al heteroeklem yapısının şematik diyagramı.

Deney ve Ölçüm Sistemleri

Akım-Voltaj Ölçüm Sistemi

Üretilen inorganik heteroeklemlerin karakteristik parametrelerini belirlemek için, Au/ $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ /n-Si/Al yapıları üzerinde (Au/N1/n-Si/Al, Au/N2/n-Si/Al) hem karanlık hem de aydınlık koşullarda $10\text{-}150 \text{ mW/cm}^2$ arasında değişen aydınlatma seviyelerinde I-V ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümler için bir Keithley 2400 (Şekil 16)) ve bir Sciencetec güneş simülatörü kullanılmıştır. Keithley 2400, akım ve voltajı yüksek doğrulukla ölçebilen hassas bir cihazdır. Bilgisayar yazılımı aracılığıyla çalıştırılabilir ve düzenlenebilir, bu da onu güneş pili karakterizasyonu için standart bir araç haline getirir. Sciencetec güneş simülatörü, simülasyon amacıyla belirli ışık seviyelerini çoğaltabilen bir cihazdır. Güneş aydınlatması altında çalışma koşullarının taklit edilmesine olanak sağlar. I-V ölçümleri sırasında, bu simülatör farklı ışık yoğunlukları sağlayarak heteroeklemlerin değişen aydınlatma koşulları altındaki performansının değerlendirilmesine olanak sağlamıştır. Bu ölçüm cihazları kullanılarak,

Au/Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al yapılarının karakteristik parametreleri hem karanlık koşullarda hem de farklı ışık yoğunluklarında belirlenmiştir. Bu ölçümler, güneş pili teknolojisinin geliştirilmesi ve optimizasyonunda önemli bir rol oynayarak, çeşitli aydınlatma seviyeleri altında güneş pillerinin performansı hakkında değerli bilgiler sunmaktadır.



Şekil 16. I-V ölçüm sistemi.

Optik Soğurma Ölçüm Sistemi

Üretilen ince filmlerin optik soğurma analizleri için Atatürk Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü' Kristal Büyütme Laboratuvarı'nda yer alan Çift Işınlı UV-Vis Spektrometre kullanılarak soğurma ölçümleri alındı. Yarıiletkenlerin optik soğurma kenarı ve yasak enerji aralığını belirlemede en çok kullanılan yöntemlerden birisi soğurma ölçüm metodudur. Cam altış üzerindeki ince filmlerin soğurma ölçümleri oda sıcaklığında Şekil 17'de verilen Perkin

Elmer UV/Visible Lambda 2S (Şekil 17) spektrometresi yardımıyla alınmıştır. Kullanılan spektrometrik ölçüm aralığı 175–1100 nm 'dir



Şekil 17.UV-görünür soğurma spektrometresi.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

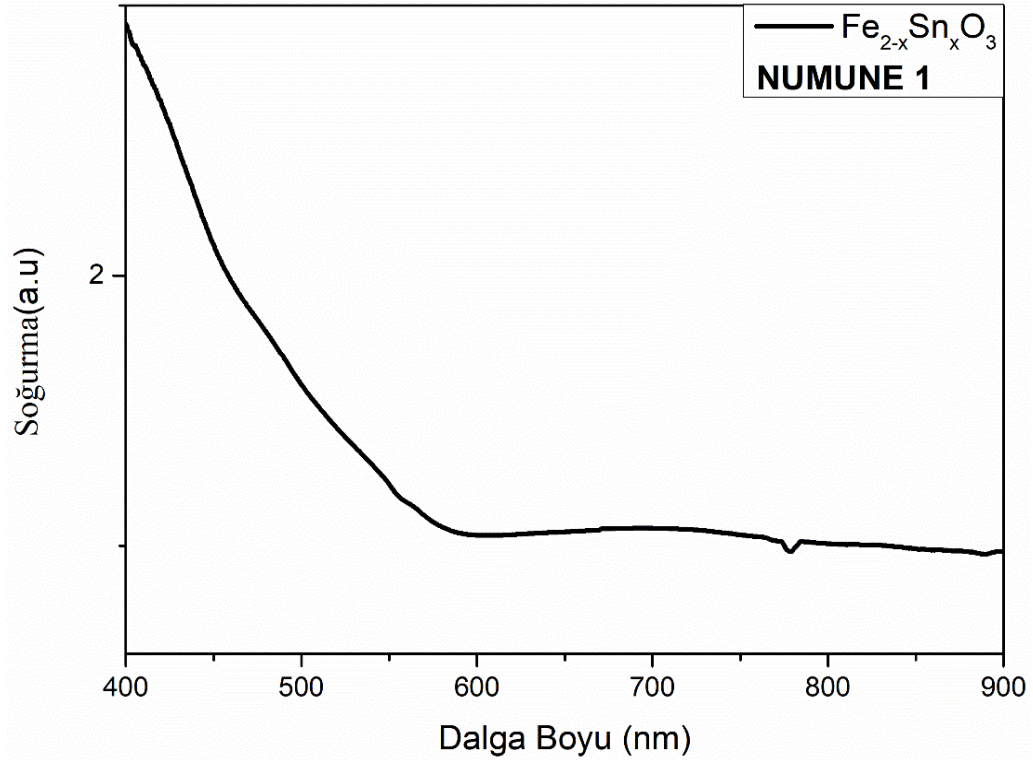
Giriş

Au/ Fe_{2-x}Sn_xO₃/n-Si/Al yapısına ait farklı Sn miktarlarında (farklı “x” değerlerinde) Fe_{2-x}Sn_xO₃ aktif tabakası PVD-MİDAS 3M markalı magnetron sputter sistem ile büyütüldü.

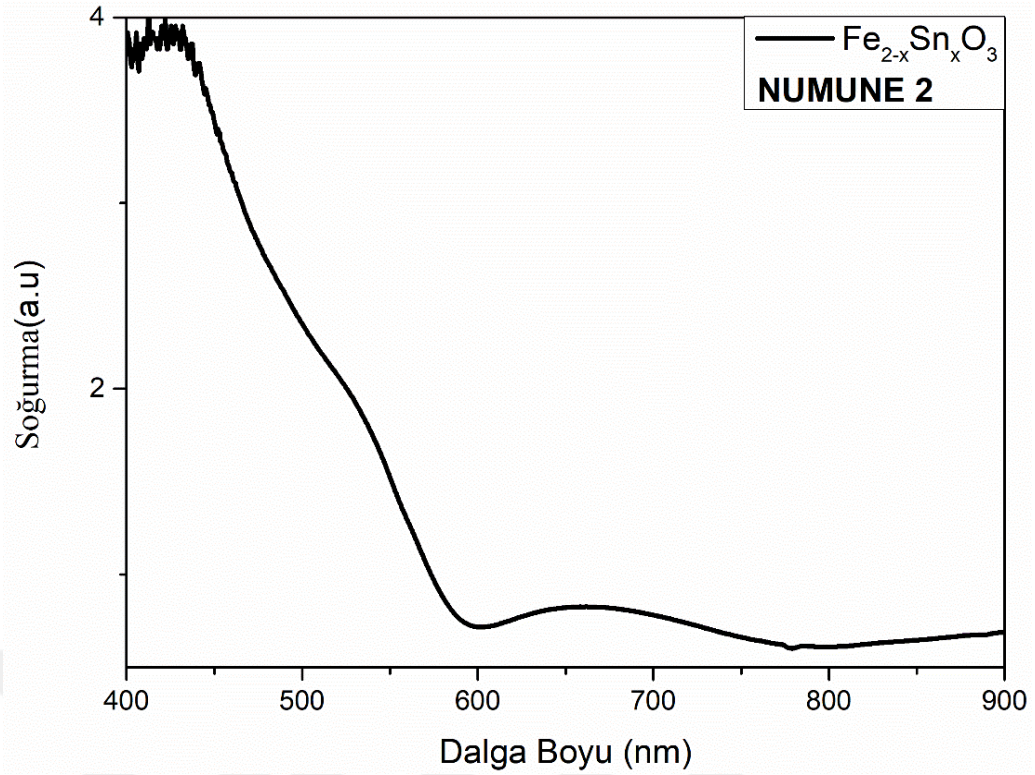
DC güç tabancasına bir Fe hedef, RF güç kaynağını bulunduğu bölüme Sn metal hedef yerleştirilmiştir. DC güç kaynağı 150 W iken RF güç kaynağı Sn hedef için 50 W olarak ayarlanmıştır (Au/ N1/n-Si/Al). Ayrıca ikinci numune için, DC güç kaynağı 150 W iken RF güç kaynağı Sn hedef için 25 W olarak ayarlanmıştır (Au/ N2 /n-Si/Al).

Soğurma ölçümleri

Şekil 18 ve 19’da cam alttaşlar üzerine büyütülen N1 ve N2 ince filmlerin soğurma spektrumları verilmiştir. N1 ince filmi 400 nm ile 600 nm dalga boyu aralığında görünür bölgede iyi soğurma sağlar. Uygulanan farklı RF güç kaynağı değerinden dolayı N1 ve N2 filmlerinde, Sn farklı x değerine sahiptir ve bu nedenle soğurma spektrumunda değişim meydana gelmiştir.



Şekil 18. N1 filminin soğurma spektrumu.

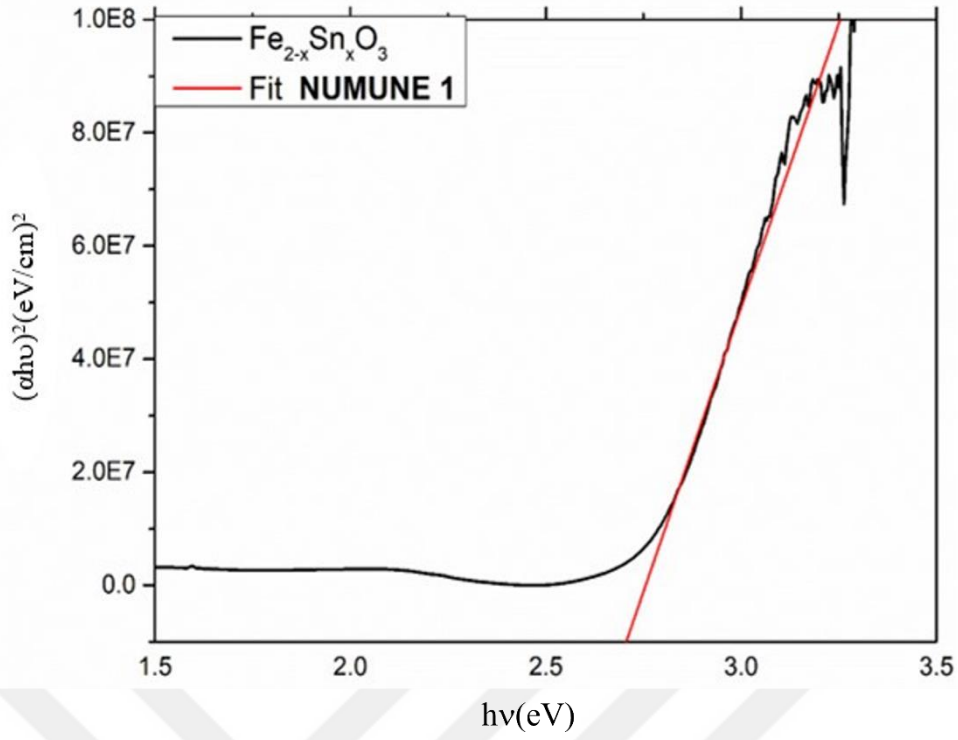


Şekil 19. N2 filminin soğurma spektrumu.

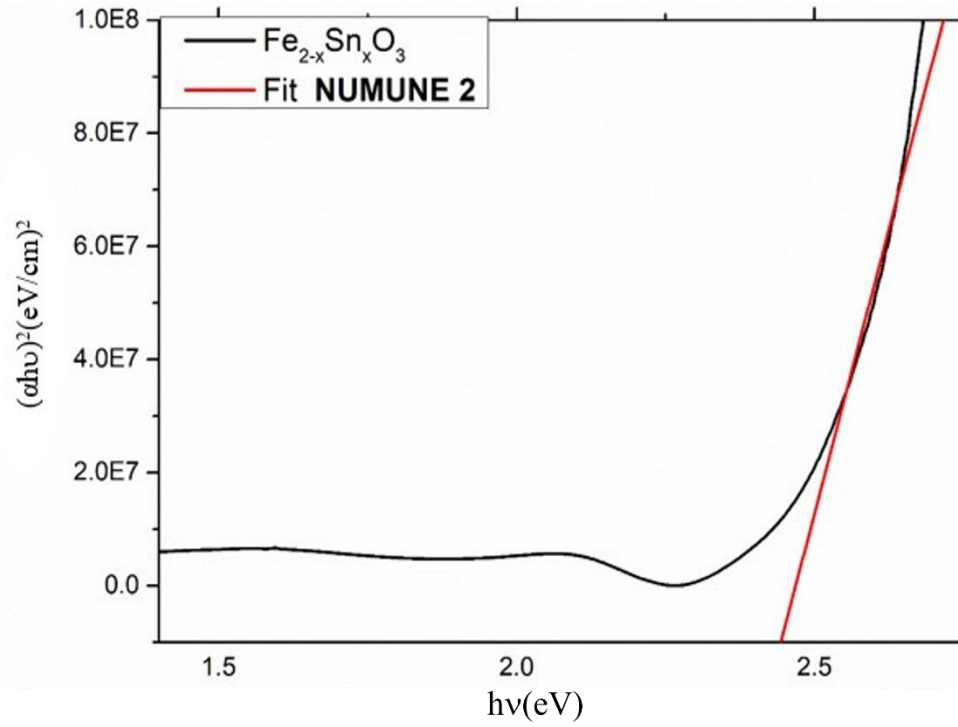
Tauc formülü kullanılarak, Şekil 20, 21’de $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ yapısının bant aralığı N1 ve N2 için ayrı ayrı hesaplanmıştır. Yasak enerji bant aralığı N1 filmi için 2,7 eV ve N2 için 2,45 eV olarak hesaplanmıştır (Tablo 1). Sn hedef için radyo frekans güç kaynağının 25 W olarak ayarlanması sonucunda oluşturulan N2 filmi, N1 filmine göre daha az Sn metali içerdiğinden dolayı yasak enerji bant aralığında daralma meydana gelmiştir.

Tablo 1. N1 ve N2’de $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ için Enerji Aralığı Değerleri

	N1	N2
$E_g(\text{eV})$	2,7	2,45



Şekil 20. N1 filmi için $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

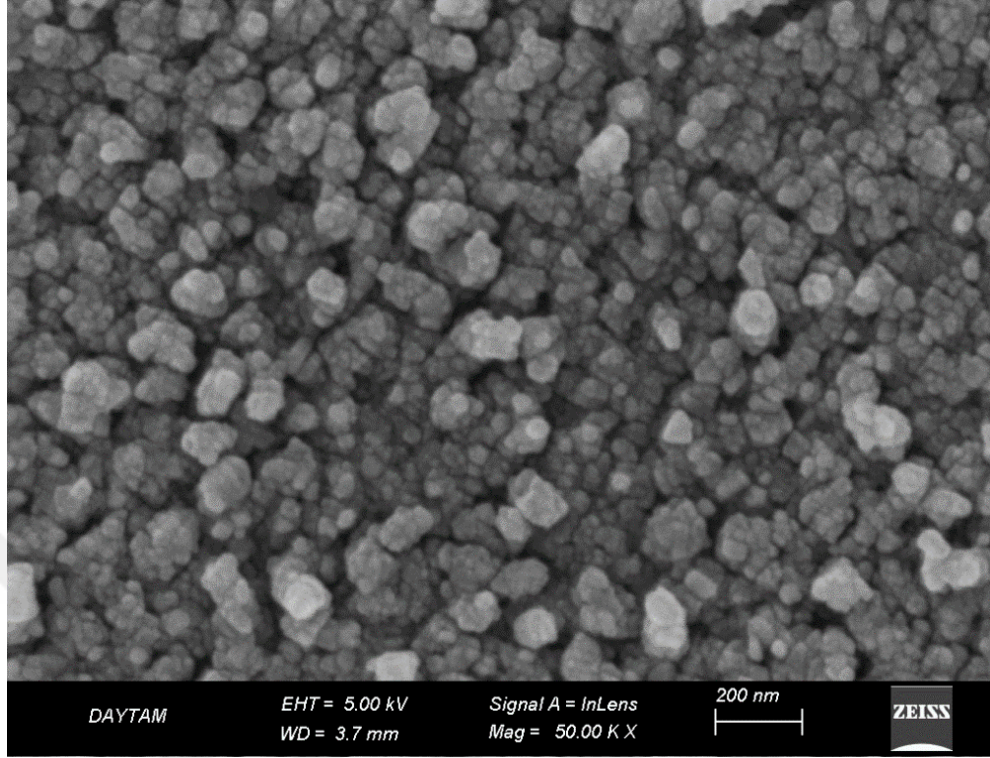


Şekil 21. N2 filmi için $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

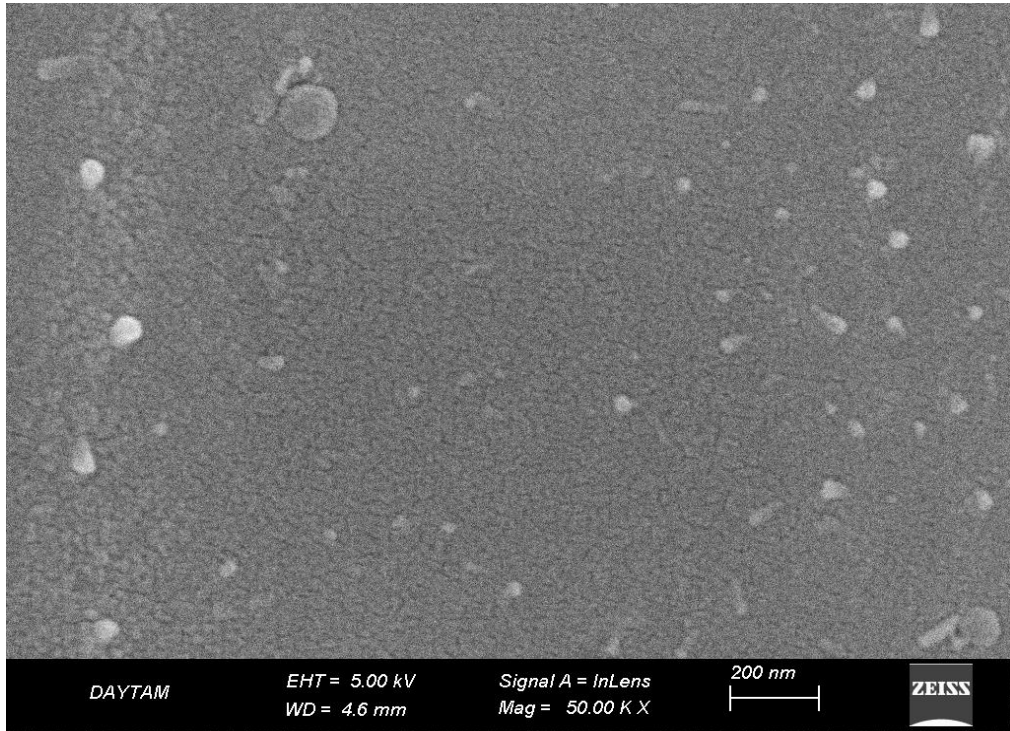
Taramalı Elektron Mikroskop Görüntüleri

Üretilen ince filmlerin morfolojik analizleri için Sigma 300 Model Zeiss Gemini marka FEG-SEM (Taramalı Elektron Mikroskop) cihazı ile n-Si alttaşların yüzeyine kaplanan N1/n-Si ve N2/n-Si filmlerinin görüntüleri alınmıştır (Şekil 22-23).

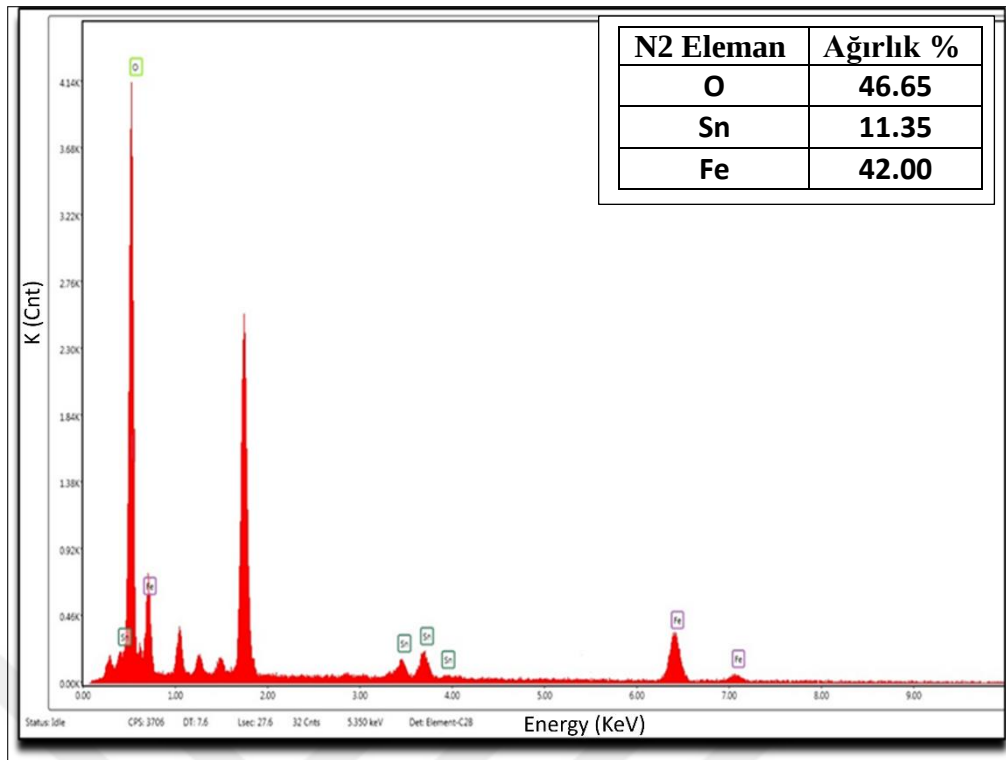
SEM görüntülerinden, ince filmlerin yüzeyde homojen bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca N1/n-Si'deki tanecik boyutları daha belirgin ve daha büyüktür.



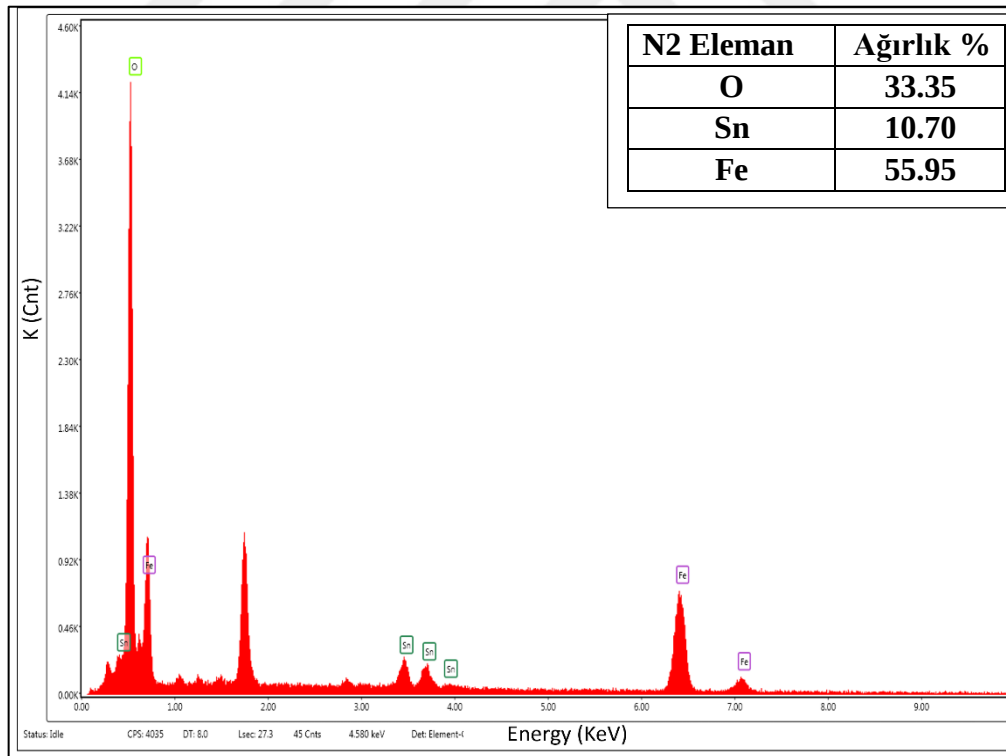
Şekil 22. N1/n-Si diyotunun SEM görüntüsü.



Şekil 23. N2 /n-Si diyotunun SEM görüntüsü.



Şekil 24. N1'in EDX ölçüm.



Şekil 25. N2'in EDX ölçüm.

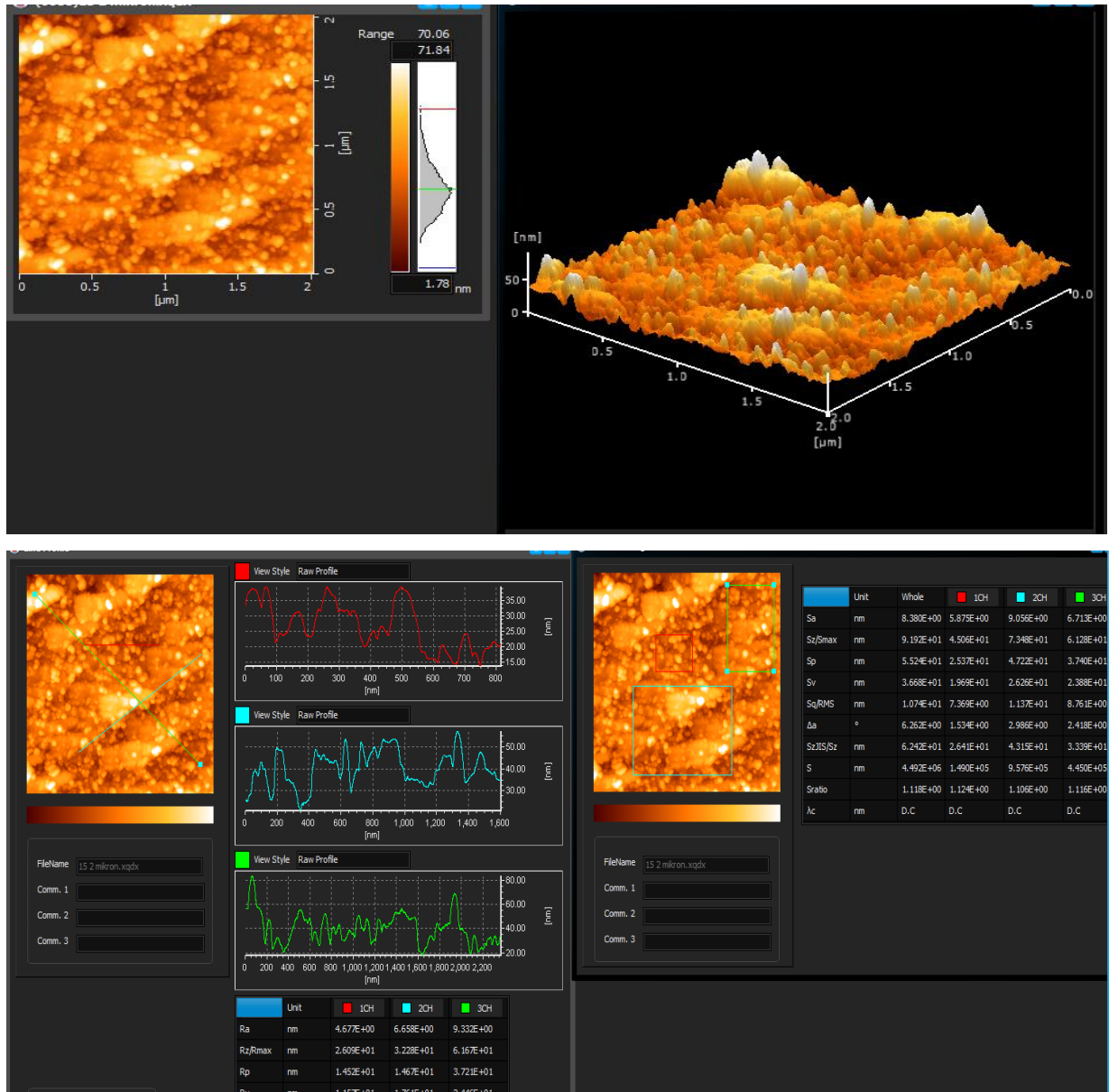
N1 ve N2 filmleri için EDX ölçüm sonuçları Şekil 24 ve 25'te verilmiştir. 50 W'lık RF güç değerinde hazırlanan N1 filminde Sn katkı oranı, 25 W'lık RF güç değerinde hazırlanan N2 filminin yapısındaki Sn katkı oranından daha fazla olduğu görülmektedir.

Atomik Kuvvet Mikroskop görüntüleri

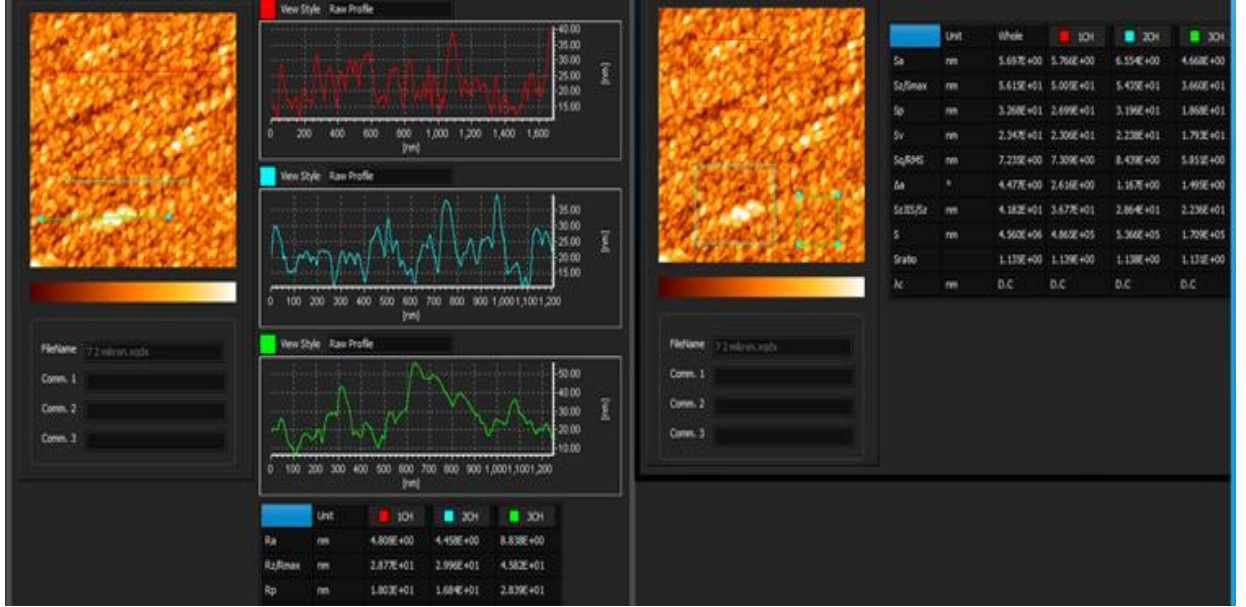
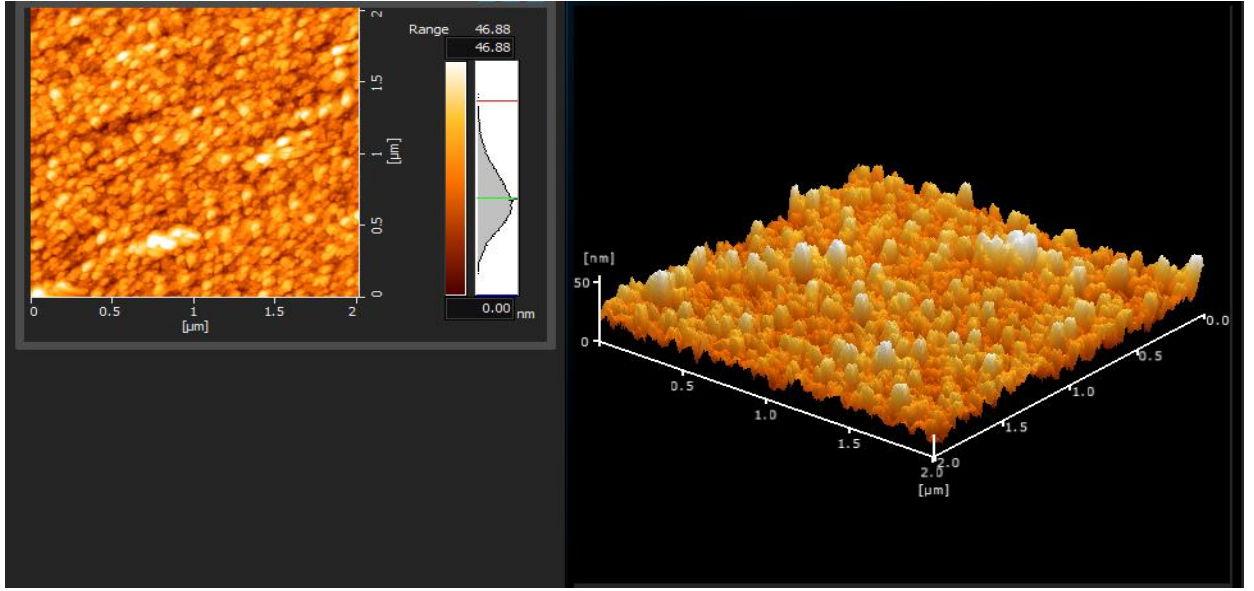
Üretilen ince filmlerin topografik görüntüleri Hitachi marka AFM Atomik Kuvvet Mikroskop (AFM) 5000 II Model cihaz ile dinamik kuvvet modunda ölçüm alınmıştır. N1/n-Si ve N2/n-Si için $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ filminin 2D-3D AFM görüntüleri Şekil 26 ve 27’de verilmiştir.

$\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ filmleri için SEM görüntüsü ile uyumlu olarak AFM görüntülerinde de küresel tanecikler gözlemlenmiştir.

AFM ölçümü ile $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ yapı pürüzlülük değeri N1/n-Si için Ra: 4,6 Sa: 8,3 nm ve N2/n-Si için Ra:4,5nm, Sa:5,9 nm olarak belirlenmiştir.



Şekil 26. N1/n-Si diyotunun AFM görüntüsü.

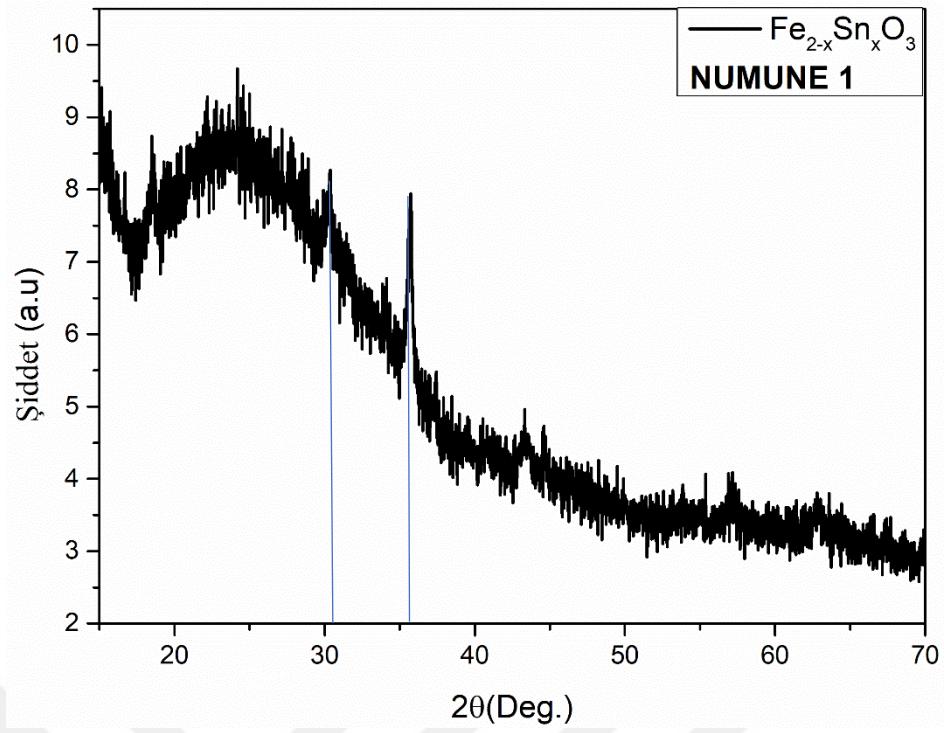


Şekil 27. N2 /n-Si diyotunun AFM görüntüsü

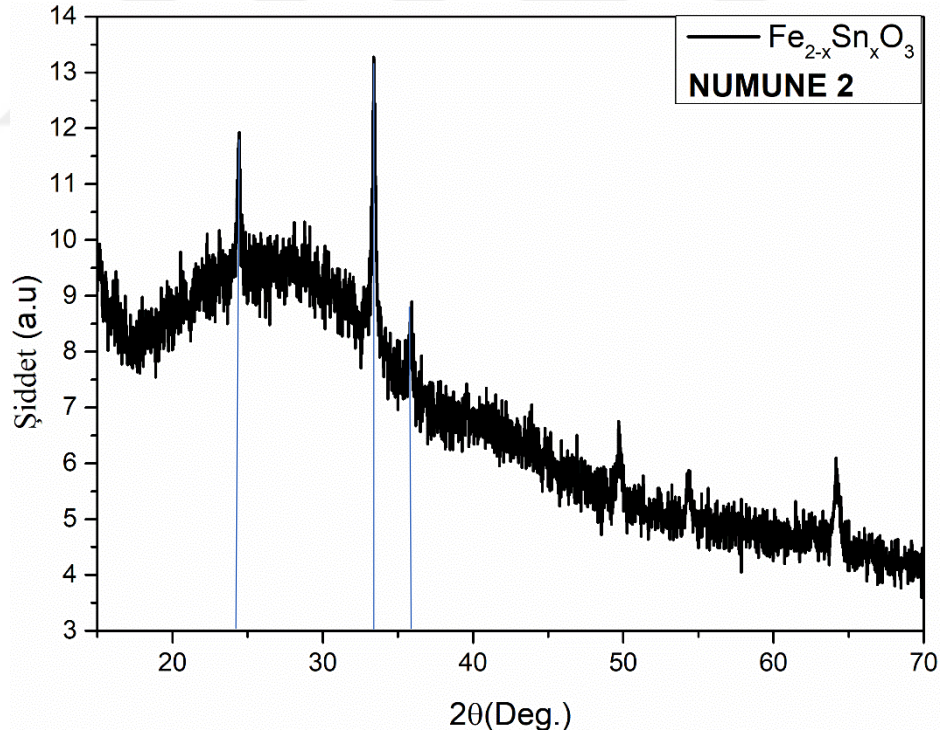
X- Işını Kırınım Ölçümleri

X- Işını Kırınım (XRD) ölçümleri, malzemelerin kristal yapıları hakkında bilgi verir. Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Kristal Büyütme Laboratuvarında bulunan XRD Bruker D2 Phaser cihazı kullanılmıştır.

Sputter tekniği ile cam üzerinde büyütülen N1 ve N2 filmlerinin 15° ile 70° arasındaki XRD ölçümleri Şekil 28 ve 29'da verilmiştir.



Şekil 28. N1 ince filminin XRD spektrumu

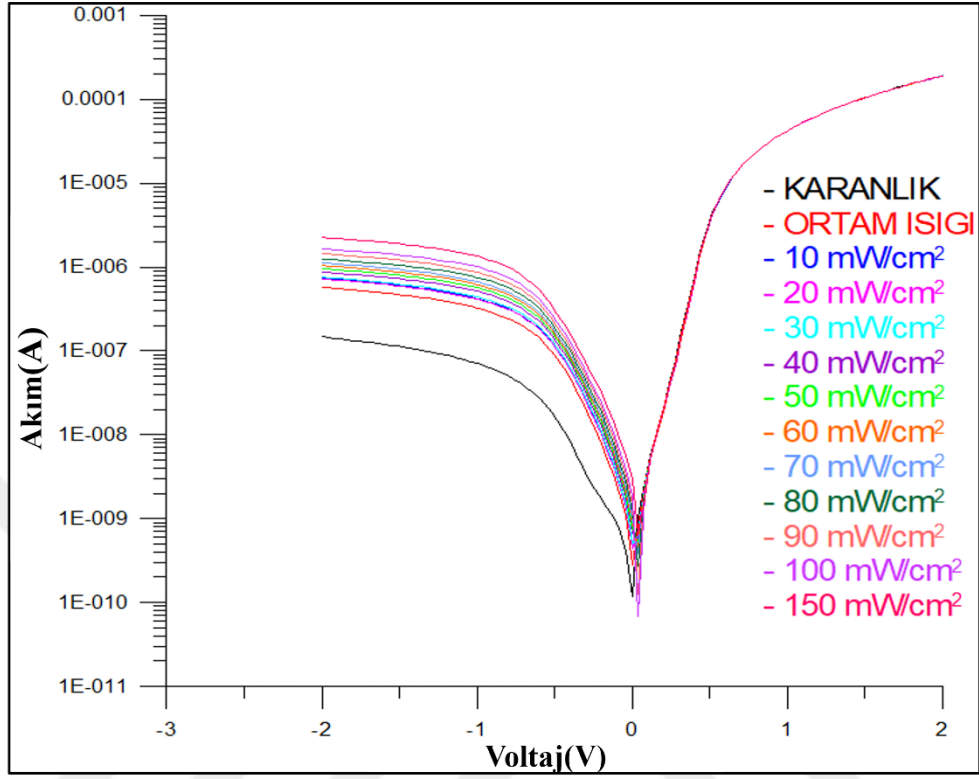


Şekil 29. N2 ince filminin XRD spektrumu

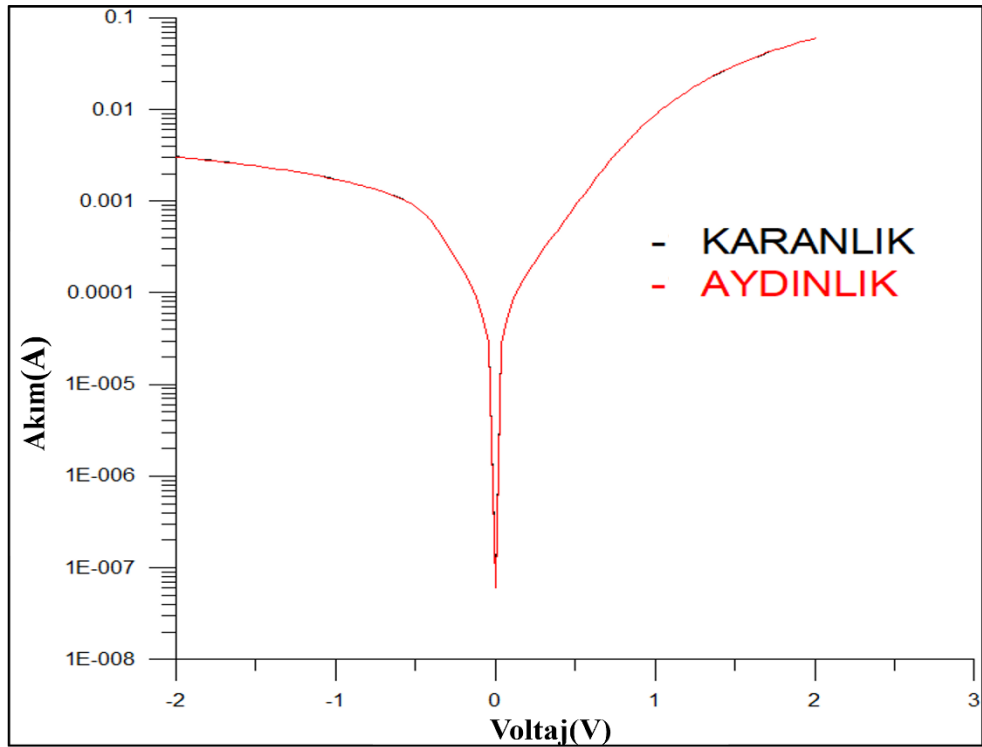
XRD grafiğinde N1 için $33,2^\circ$ ve $35,5^\circ$ açılarında; N2 için $35,5^\circ$, $34,0^\circ$ ve $24,5^\circ$ açılarında görülen pikler tetragonal yapılar için karakteristik piklerdir [Ref Kodu: 01 -088-0432].

Akım –Voltaj Ölçümleri

Üretilen yapıların karanlıkta, gün ışığı ve 10-150 mW/cm²'lık ışık altında karakteristik parametrelerini belirlemek için Akım–Voltaj (I–V) ölçümleri (Şekil 29-30) alınmıştır.



Şekil 30. Au/ N1 /n-Si/Al yapısı için karanlıkta ve 10-150 mW/cm² ışık altında yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği



Şekil 31. Au/N2/n-Si/Al yapısı için karanlıkta ve aydınlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.

Doğru beslem akımı uygulanan potansiyele bağlı olarak;

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nKT} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

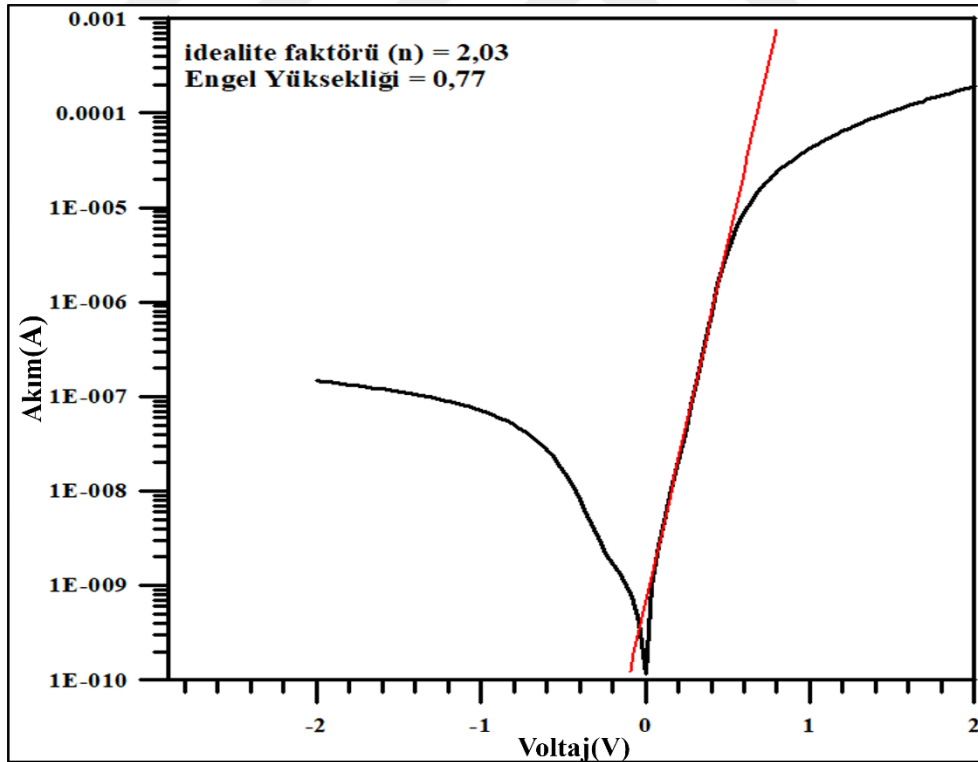
Denklemler ile verilir. Bu ifadede $eV \gg nkT$ koşulu geçerli olduğunda, üstel terimin yanındaki '1' değeri göz ardı edilebilir. Bu durumda eşitlik,

$$I = I_0 \left[\exp \left(\frac{eV}{nKT} \right) \right] \quad (5)$$

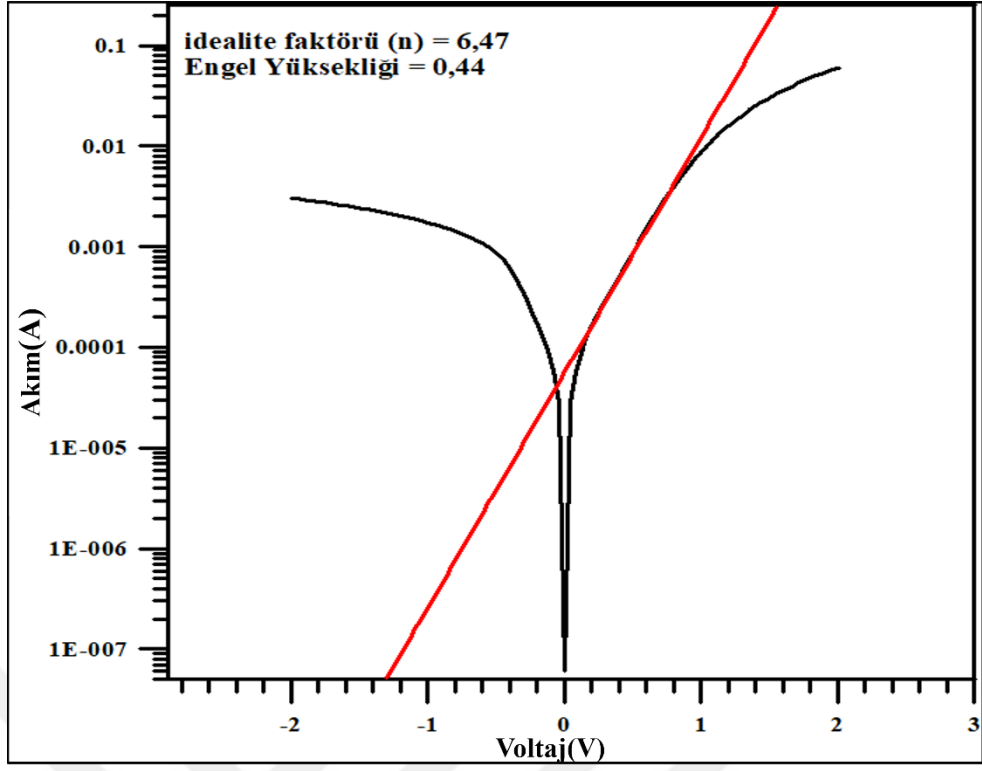
ile verilir. (5) ifadesinin her iki tarafının tabii logaritmasını alıp, sonra da V 'ye göre türevi alınırsa idealite faktörü için (6) ifadesi elde edilir.

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (6)$$

Şekil 32 ve 33'te gösterildiği I-V eğrisinin düz bölgesine bir doğru fit çizildiğinde, bu fitin eğimi $dV/d(\ln I)$ ifadesine karşılık gelir. $dV/d(\ln I)$, elektron yükü ($e=1,6 \times 10^{-19}$ C), Boltzmann sabiti ($k=8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık ($T=300$ K) değerleri (6) eşitliğinde yazılırsa heteroeklemler için idealite faktörü değerleri hesaplanır.



Şekil 32. Au/N1/n-Si/Al yapısı için karanlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği



Şekil 33. Au/N2/n-Si/Al yapısı için karanlıkta yarı logaritmik ölçekte I-V grafiği.

Şekil 32 ve 33'te, fit edilen doğrunun $V=0$ 'da düşey eksenini kestiği nokta doyma akım yoğunluğuna karşılık gelir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_b}{kT}\right) \quad (7)$$

Denklem (7)'nin her iki tarafının doğal logaritması alınıp $e\phi_b$ terimi izole edilirse denklem (8) ile verilen engel yüksekliği ifadesi elde edilir.

$$e\phi_b = kT \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \quad (8)$$

(8) ifadesinde, A , diyodun etkin alanı A^* , Richardson sabiti olup, bu değer n-Si için $112 \text{ A/K}^2\text{cm}^2$ 'dir. Heteroeklem yapılar için hesaplanan idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Au/N1/n-Si/Al ve Au/N2/n-Si/Al Diyotları İçin Engel Yüksekliği ve İdealite Faktörü Değerleri

	n	ϕ_b (eV)
Au/ N1 /n-Si/Al	2,03	0,77
Au/ N2 /n-Si/Al	6,47	0,44

Au/N1/n-Si/Al yapısı için karanlıkta 2,03 olarak hesaplanan idealite faktörü değerinden diyot kalitesinin iyi olmadığı görülmektedir. Ancak Au/N1/n-Si/Al yapısının I-V grafiğinde 10-150 mW/cm² aralığında artan ışık şiddeti ile ters beslem akımının artması, yapının ışığa duyarlı olduğunu göstermektedir. Au/N1/n-Si/Al için karanlıkta 0,77 eV olarak hesaplanan engel yüksekliği Si tabanlı bir diyot için uygun değerdedir. Ayrıca farklı ışık şiddetleri altında negatif akım değerinin pozitif voltaj değerine kayması Au/N1/n-Si/Al yapısının Güneş pili uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir (Şekil 30).

Şekil 33'ten Au/N2/n-Si/Al yapısı için 6,47 olarak hesaplanan idealite faktörü değeri diyot kalitesinin oldukça kötü olduğunu belirtmektedir. Au/N2/n-Si/Al yapısının engel yüksekliği (0,44 eV) Si tabanlı diyotlar için hesaplanan değerlerden çok düşüktür. Ayrıca Au/N2/n-Si/Al için doğrulma oranıda çok düşüktür. Au/N2/n-Si/Al yapısında, ışık altındaki I-V karakteristiğinde herhangi bir değişim görülmemektedir. Bu durum aslında, Sn katkısı arttıkça malzemenin ışığa duyarlılığının arttığını göstermekte ve uygun oranda Sn katkısı ile yapının güneş pili uygulamalarında bir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, Au/ $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ /n-Si/Al yapısını elde etmek için $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ aktif tabakası magnetron sputter sistemi ile büyütülmüştür. DC güç kaynağına Fe ince folyo, RF güç kaynağı parçasına da Sn metal hedefler yerleştirilmiştir. Au/ N1/n-Si/Al yapısını elde etmek için DC güç kaynağı 150 W iken Sn hedef için RF güç kaynağı 50 W olarak ayarlanmıştır. Ayrıca Au/ N1/n-Si/Al yapısını elde etmek için DC güç kaynağı 150 W iken RF güç kaynağı Sn hedef için 25 W olarak ayarlanmıştır. Vakum odasına 6×10^{-6} Torr basınca (taban basıncı) kadar yerleştirilen cam ve Si alt tabakalar 450 dereceye kadar ısıtıldı. Soğurma ölçüleri sonucunda, Tauc formülünü kullanarak $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ ince filmleri için yasak bant aralığı değeri, N1 için 2,7 eV ve N2 için 2,45 eV olarak hesaplandı. Sn hedef için Rf güç değerinin 25 W olarak ayarlanması sonucunda oluşturulan N2 filminin daha düşük enerji aralığına sahip olduğu görülmüştür. İnce film SEM görüntülerinden yüzeyde homojen bir dağılımın olduğu görülmüştür. Ayrıca N1/n-Si'deki tane boyutlarının daha belirgin ve büyük olduğu görülmüştür. $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ filmleri için SEM görüntüsü ile uyumlu olarak AFM görüntülerinde de küresel tanecikler gözlemlenmiştir. AFM ölçümü ile $\text{Fe}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$ yapı pürüzlülük değeri N1/n-Si için $R_a:4,6$; $S_a:8,3$ nm ve N2/n-Si için $R_a:4,5$ nm, $S_a:5,9$ nm olarak belirlenmiştir. XRD grafiğinde N1 için $33,2^\circ$ ve $35,5^\circ$ açılarında; N2 için $35,5^\circ$, $34,0^\circ$ ve $24,5^\circ$ açılarında görülen pikler tetragonal yapılar için karakteristik piklerdir.

Elde edilen heteroeklem yapıların, karanlıkta, gün ışığı ve $10\text{-}150 \text{ mW/cm}^2$ ışık altında karakteristik parametrelerini belirlemek için I-V ölçümleri alınmıştır. Au/N1/n-Si/Al yapısı için karanlıkta 2,03 olarak hesaplanan idealite faktörü değerinden diyot kalitesinin iyi olmadığı görülmektedir. Ancak Au/N1/n-Si/Al yapısının I-V grafiğinde $10\text{-}150 \text{ mW/cm}^2$ aralığında artan ışık şiddeti ile ters beslem akımının artması, yapının ışığa duyarlı olduğunu göstermektedir. Au/N1/n-Si/Al için karanlıkta 0,77 eV olarak hesaplanan engel yüksekliği Si tabanlı bir diyot için uygun değerdedir. Ayrıca farklı ışık şiddetleri altında negatif akım değerinin pozitif voltaj değerine kayması Au/N1/n-Si/Al yapısının Güneş pili uygulamalarında kullanılabileceğini göstermektedir.

KAYNAKLAR

- Aberle, A. G. (2009). Thin-film solar cells. *Thin solid films*, 517(17), 4706-4710.
- Aliofkhazraei, M., & Ali, N. (2014). AFM Applications in Micro/Nanostructured Coatings. *Comprehensive Materials Processing*, 7, 191-241. Elsevier.
- Würfel, P., & Physics. (2016). *Physics of Solar Cells From*, Wiley-VCH. Geliş tarihi Temmuz 16, 2023.
- Augusto, A., Herasimenka, S. Y., King, R. R., Bowden, S. G., & Honsberg, C. (2017). Analysis of the recombination mechanisms of a silicon solar cell with low bandgap-voltage offset. *Journal of Applied Physics*, 121(20).
- Avasthi, S., McClain, W. E., Man, G., Kahn, A., Schwartz, J., & Sturm, J. C. (2013). Hole-blocking titanium-oxide/silicon heterojunction and its application to photovoltaics. *Applied Physics Letters*, 102(20).
- Baedeker, K. (1907). *Über die elektrische Leitfähigkeit und die thermoelektrische Kraft einiger Schwermetallverbindungen*. JA Barth.
- Bahtiyar, U. (2015). Afyonkarahisar'da Kurulu Olan Monokristal, Polikristal ve İnce Film Güneş Panellerinin Verimliliğinin İncelenmesi.
- Baruch, P., De Vos, A., Landsberg, P. T., & Parrott, J. E. (1995). On some thermodynamic aspects of photovoltaic solar energy conversion. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 36(2), 201-222.
- Becerril-Romero, I., Sylla, D., Placidi, M., Sánchez, Y., Andrade-Arvizu, J., Izquierdo-Roca, V., ... & Espindola-Rodríguez, M. (2020). Transition-metal oxides for kesterite solar cells developed on transparent substrates. *ACS applied materials & interfaces*, 12(30), 33656-33669.
- Belaqziz, M., Medjnoun, K., Djessas, K., Chehouani, H., & Grillo, S. E. (2018). Structural and optical characterizations of Cu₂SnS₃ (CTS) nanoparticles synthesized by one-step green hydrothermal route. *Materials Research Bulletin*, 99, 182-188.
- Bender, M., Trube, J., & Stollenwerk, J. (1999). Deposition of transparent and conducting indium-tin-oxide films by the rf-superimposed DC sputtering technology. *Thin Solid Films*, 354(1-2), 100-105.
- Bıyıklı, O. (2020). *Manufacturing and characterization of perovskite thin films using novel methods* (Doctoral dissertation, Izmir Institute of Technology (Turkey)).
- Biçer, M. (2021). ZnO-TiO₂ Hetero Nano Yapılarının Sentezi ve Güneş Pilleri için Fotoelektrokimyasal Performansı. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(3), 262-272.
- Bullock, J., Cuevas, A., Allen, T., & Battaglia, C. (2014). Molybdenum oxide MoO_x: A versatile hole contact for silicon solar cells. *Applied Physics Letters*, 105(23).
- Bunaciu, A. A., UdrişTioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015a). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.
- Bunaciu, A. A., UdrişTioiu, E. G., & Aboul-Enein, H. Y. (2015b). X-ray diffraction: instrumentation and applications. *Critical reviews in analytical chemistry*, 45(4), 289-299.

- Cebulla, R., Wendt, R., & Ellmer, K. (1998). Al-doped zinc oxide films deposited by simultaneous rf and dc excitation of a magnetron plasma: relationships between plasma parameters and structural and electrical film properties. *Journal of Applied Physics*, 83(2), 1087-1095.
- Chopra, K. L., Paulson, P. D., & Dutta, V. (2004). Thin-film solar cells: an overview. *Progress in Photovoltaics: Research and applications*, 12(2-3), 69-92.
- Dikici, M. (2012). Katıhal fiziği. Seçkin Yayıncılık. films prepared by chemical spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 516(7), 1622-1625.
- Ellmer, K., Cebulla, R., & Wendt, R. (1998). Transparent and conducting ZnO (: Al) films deposited by simultaneous RF-and DC-excitation of a magnetron. *Thin Solid Films*, 317(1-2), 413-416.
- Ellmer, K., Cebulla, R., & Wendt, R. (1998). Characterization of a magnetron sputtering discharge with simultaneous RF-and DC-excitation of the plasma for the deposition of transparent and conductive ZnO: Al-films. *Surface and Coatings Technology*, 98(1-3), 1251-1256.
- Ellmer, K., & Mientus, R. (2008). Carrier transport in polycrystalline transparent conductive oxides: A comparative study of zinc oxide and indium oxide. *Thin solid films*, 516(14), 4620-4627.
- Van Elp, J., Potze, R. H., Eskes, H., Berger, R., & Sawatzky, G. A. (1991). Electronic structure of MnO. *Physical Review B*, 44(4), 1530.
- Fthenakis, V. M., & Moskowitz, P. D. (2000). Photovoltaics: environmental, health and safety issues and perspectives. *Progress in photovoltaics: research and applications*, 8(1), 27-38.
- Geissbühler, J., Werner, J., Martin de Nicolas, S., Barraud, L., Hessler-Wyser, A., Despeisse, M., ... & Ballif, C. (2015). 22.5% efficient silicon heterojunction solar cell with molybdenum oxide hole collector. *Applied Physics Letters*, 107(8).
- Gerling, L. G., Mahato, S., Morales-Vilches, A., Masmitja, G., Ortega, P., Voz, C., ... & Puigdollers, J. (2016). Transition metal oxides as hole-selective contacts in silicon heterojunctions solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 145, 109-115.
- Ginley, D. S., & Perkins, J. D. (2011). Transparent conductors. In *Handbook of transparent conductors* (pp. 1-25). Boston, MA: Springer US.
- Goetzberger, A., Knobloch, J., & Voss, B. (1998). *Crystalline silicon solar cells* (Vol. 1, pp. 114-118). Chichester: Wiley.
- Guillen, C., & Herrero, J. (2011). TCO/metal/TCO structures for energy and flexible electronics. *Thin Solid Films*, 520(1), 1-17.
- Guitouni, S., & Attaf, N. (2017). *Elaboration et étude de structures à base de couches minces de ZnO et de chalcogénures (CIS, CZTS) pour des applications photovoltaïques* (Doctoral dissertation, Université Frères Mentouri-Constantine 1).
- Hahn, G., Seren, S., Kaes, M., Schonecker, A., Kalejs, J. P., Dubé, C., ... & Belouet, C. (2006, May). ReView on ribbon silicon techniques for cost reduction in PV. In *2006 IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference* (Vol. 1, pp. 972-975). IEEE.
- Hameiri, Z. (2016). Photovoltaics literature survey (No. 125). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 24(3), 405-407.

- Hiesgen, R., & Haiber, J. (2009). MEASUREMENT METHODS | Structural Properties: Atomic Force Microscopy. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, 696-717. Elsevier.
- Hsu, F. H., Wang, N. F., Tsai, Y. Z., Wu, C. Y., Cheng, Y. S., Chien, M. H., & Houn, M. P. (2014). Enhanced carrier collection in p-Ni_{1-x}O: Li/n-Si heterojunction solar cells using LiF/Al electrodes. *Thin Solid Films*, 573, 159-163.
- Hu, J. P., Payne, D. J., Egdel, R. G., Glans, P. A., Learmonth, T., Smith, K. E., ... & Harrison, N. M. (2008). On-site interband excitations in resonant inelastic x-ray scattering from Cu₂O. *Physical Review B*, 77(15), 155115.
- Hüfner, S. (1994). Electronic structure of NiO and related 3d-transition-metal compounds. *Advances in Physics*, 43(2), 183-356.
- Jain, N. K., Sawant, M. S., Nikam, S. H., & Jhavar, S. (2016). Metal deposition: Plasma-based processes. *Encyclopedia of Plasma Technology*, 722-740.
- Kahng. (1960). 1960: Metal Oxide Semiconductor (MOS) Transistor Demonstrated | The Silicon Engine | Computer History Museum. U. S. Patent No. 3,102,230 . Geliş tarihi Temmuz 17, 2023, gönderen.
- Kawazoe, H., Yasukawa, M., Hyodo, H., Kurita, M., Yanagi, H., & Hosono, H. (1997). P-type electrical conduction in transparent thin films of CuAlO₂. *Nature*, 389(6654), 939-942.
- Kittel, C. (1996). Katıhal Fizigine Giriş (ingilizce 6. Basımdan çeviri), Türkçesi: Karaoglu B. Güven Kitap Yayın Dağıtım Ltd. Sti., İstanbul.
- Kosari Mehr, A., & Kosari Mehr, A. (2021). Grid-Assisted Co-Sputtering Method: Background, Advancement, and Prospect. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 41(3), 713-744.
- Kudo, A., Yanagi, H., Hosono, H., & Kawazoe, H. (1998). A new p-type conductive oxide with wide band gap, SrCu₂O₂. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 526.
- Li, B. S., Akimoto, K., & Shen, A. (2009). Growth of Cu₂O thin films with high hole mobility by introducing a low-temperature buffer layer. *Journal of Crystal Growth*, 311(4), 1102-1105. North-Holland.
- Liang, Z., Su, M., Zhou, Y., Gong, L., Zhao, C., Chen, K., ... & Xie, W. (2015). Interaction at the silicon/transition metal oxide heterojunction interface and its effect on the photovoltaic performance. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17(41), 27409-27413.
- Li, C., Yu, S., Dong, H., Liu, C., Wu, H., Che, H., & Chen, G. (2018). Z-scheme mesoporous photocatalyst constructed by modification of Sn₃O₄ nanoclusters on g-C₃N₄ nanosheets with improved photocatalytic performance and mechanism insight. *Applied Catalysis B: Environmental*, 238, 284-293.
- Lindholm, F. A., Fossum, J. G., & Burgess, E. L. (1979). Application of the superposition principle to solar-cell analysis. *IEEE transactions on electron devices*, 26(3), 165-171.
- Lira-Cantu, M., & Krebs, F. C. (2006). Hybrid solar cells based on MEH-PPV and thin film semiconductor oxides (TiO₂, Nb₂O₅, ZnO, CeO₂ and CeO₂-TiO₂): Performance improvement during long-time irradiation. *Solar energy materials and solar cells*, 90(14), 2076-2086.

- Liu, R., Lee, S. T., & Sun, B. (2014). 13.8% efficiency hybrid Si/organic heterojunction solar cells with MoO₃ film as antireflection and inversion induced layer. *Advanced materials*, 26(34), 6007-6012.
- MacDonald, D. (2012). The emergence of n-type silicon for solar cell manufacture. Australian Solar Energy Society.
- Maekawa, S., Tohyama, T., Barnes, S. E., Ishihara, S., Koshihara, W., & Khaliullin, G. (2004). *Physics of transition metal oxides* (Vol. 144). Springer Science & Business Media.
- Mallem, K., Kim, Y. J., Hussain, S. Q., Dutta, S., Le, A. H. T., Ju, M., ... & Yi, J. (2019). Molybdenum oxide: A superior hole extraction layer for replacing p-type hydrogenated amorphous silicon with high efficiency heterojunction Si solar cells. *Materials Research Bulletin*, 110, 90-96.
- Marturi, N., Dembélé, S., & Piat, N. (2012, June). Performance Evaluation of Scanning Electron Microscopes using Signal-to-Noise Ratio. In *The 8th International Workshop on MicroFactories, IWMF'12*. (pp. 1-6).
- McMahon, G. (2008). *Analytical instrumentation: a guide to laboratory, portable and miniaturized instruments*. John Wiley & Sons.
- Mehmood, H., Nasser, H., Özkol, E., Tauqeer, T., Hussain, S., & Turan, R. (2018). Physical device simulation of partial dopant-free asymmetric silicon heterostructure solar cell (P-DASH) based on hole-selective molybdenum oxide (MoO_x) with crystalline silicon (cSi). In *2017 International Conference on Engineering and Technology (ICET)* (pp. 1-6). IEEE.
- Minami, T., Nishi, Y., & Miyata, T. (2015). Heterojunction solar cell with 6% efficiency based on an n-type aluminum–gallium–oxide thin film and p-type sodium-doped Cu₂O sheet. *Applied Physics Express*, 8(2), 022301.
- Minami, T., Nishi, Y., & Miyata, T. (2016). Efficiency enhancement using a Zn_{1-x}Gex-O thin film as an n-type window layer in Cu₂O-based heterojunction solar cells. *Applied Physics Express*, 9(5), 052301.
- Nagarajan, R., Draeseke, A. D., Sleight, A. W., & Tate, J. (2001). p-type conductivity in CuCr_{1-x}Mg_xO₂ films and powders. *Journal of Applied Physics*, 89(12), 8022-8025.
- Nasser, H., Borra, M. Z., Çiftçinar, E. H., Eldeeb, B., & Turan, R. (2022). Fourteen percent efficiency ultrathin silicon solar cells with improved infrared light management enabled by hole-selective transition metal oxide full-area rear passivating contacts. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 30(8), 823-834.
- Nelson, J. (2003). The Physics of Solar Cells. *The Physics of Solar Cells*. PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO. Geliş tarihi Temmuz 15, 2023.
- Nguyen-Tri, P., Ghassemin, P., Carriere, P., Assadi, A. A., & Nguyen, D. D. (2020). Recent Progressive Use of Advanced Atomic Force Microscopy in Polymer Science: A ReView.
- Onwudiwe, D. C., Tshabalala, T., Elemike, E. E., & Okpara, E. C. (2022). Structural and optical characterizations of Cu₂SnS₃ nanoparticles and the electrochemical studies. *Results in Materials*, 13, 100251.
- Pérez-Tomás, A., Mingorance, A., Tanenbaum, D., & Lira-Cantú, M. (2018). Metal oxides in photovoltaics: all-oxide, ferroic, and perovskite solar cells. In *The future of semiconductor oxides in next-generation solar cells* (pp. 267-356). Elsevier.

- Poortmans, J., & Arkhipov, V. (Eds.). (2006). *Thin film solar cells: fabrication, characterization and applications* (Vol. 18). John Wiley & Sons.
- Rao, C. N. R. (1989). Transition metal oxides. *Annual ReView of Physical Chemistry*, 40(1), 291-326. Annual ReViews 4139 El Camino Way, PO Box 10139, Palo Alto, CA 94303-0139, USA.
- Rawat, R., Lamba, R., & Kaushik, S. C. (2017). Thermodynamic study of solar photovoltaic energy conversion: An overview. *Renewable and Sustainable Energy ReViews*, 71, 630-638.
- Razeghi, M. (2006). *Fundamentals of solid state engineering* (p. 30). New York: Springer.
- Sagar, R., & Rao, A. (2020). Increasing the silicon solar cell efficiency with transition metal oxide nano-thin films as anti-reflection coatings. *Materials Research Express*, 7(1), 016433.
- Sanon, G., Rup, R., & Mansingh, A. (1991). Band-gap narrowing and band structure in degenerate tin oxide (SnO₂) films. *Physical ReView B*, 44(11), 5672.
- Sigdel, A. K., Ndione, P. F., Ke, Y., Widjonarko, N. E., Perkins, J. D., van Hest, M. F., ... & Berry, J. J. (2010, June). Superimposed RF/DC magnetron sputtering of transparent Ga: ZnO with high conductivity for photovoltaic contacts applications. In *2010 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference* (pp. 003270-003274). IEEE.
- Sinha Ray, S. (2013). 4—Techniques for characterizing the structure and properties of polymer nanocomposites. *Environmentally friendly polymer nanocomposites*, 74-88.
- Skoog, D. A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of instrumental analysis*. Cengage learning.
- Snure, M., & Tiwari, A. (2007). CuBO₂: A p-type transparent oxide. *Applied physics letters*, 91(9).
- Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). *Physics of Semiconductor DeVices*. *Physics of Semiconductor DeVices*. Wiley. Geliş tarihi Temmuz 16, 2023.
- Şentürk, A. (2018). Fotovoltaik modüllerin akım-gerilim eğrilerinin simülasyonunda kullanılacak olan yöntemin seçimi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(1), 341-354.
- Tak, Y. H., Kim, K. B., Park, H. G., Lee, K. H., & Lee, J. R. (2002). Criteria for ITO (indium–tin-oxide) thin film as the bottom electrode of an organic light emitting diode. *Thin Solid Films*, 411(1), 12-16.
- Toroker, M. C., Kanan, D. K., Alidoust, N., Isseroff, L. Y., Liao, P., & Carter, E. A. (2011). First principles scheme to eValuate band edge positions in potential transition metal oxide photocatalysts and photoelectrodes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(37), 16644-16654.
- Tsuda, N., Nasu, K., Fujimori, A., Siratori, K., Tsuda, N., Nasu, K., ... & Siratori, K. (2000). Introduction to Electronic States in Oxides and an Overview of Transport Properties. *Electronic Conduction in Oxides*, 5-55.
- Ueda, K., Hase, T., Yanagi, H., Kawazoe, H., Hosono, H., Ohta, H., ... & Hirano, M. (2001). Epitaxial growth of transparent p-type conducting CuGaO₂ thin films on sapphire (001) substrates by pulsed laser deposition. *Journal of Applied Physics*, 89(3), 1790-1793.

- Ukoba, K. O., Eloka-Eboka, A. C., & Inambao, F. L. (2018). ReView of nanostructured NiO thin film deposition using the spray pyrolysis technique. *Renewable and Sustainable Energy ReViews*, 82, 2900-2915.
- Um, H. D., Kim, N., Lee, K., Hwang, I., Seo, J. H., & Seo, K. (2016). Dopant-free all-back-contact Si nanohole solar cells using MoO_x and LiF films. *Nano letters*, 16(2), 981-987.
- Walter, M. G., Warren, E. L., McKone, J. R., Boettcher, S. W., Mi, Q., Santori, E. A., & Lewis, N. S. (2010). Solar water splitting cells. *Chemical reViews*, 110(11), 6446-6473.
- Wu, W., Bao, J., Jia, X., Liu, Z., Cai, L., Liu, B., ... & Shen, H. (2016). Dopant-free back contact silicon heterojunction solar cells employing transition metal oxide emitters. *physica status solidi (RRL)–Rapid Research Letters*, 10(9), 662-667.
- Yan, J., & Saunders, B. R. (2014). Third-generation solar cells: a reView and comparison of polymer: fullerene, hybrid polymer and perovskite solar cells. *Rsc Advances*, 4(82), 43286-43314.
- Yan, Z., Keller, D. A., Rietwyk, K. J., Barad, H. N., Majhi, K., Ginsburg, A., ... & Zaban, A. (2016). Effect of Spinel Inversion on (Co_xFe_{1-x})₃O₄ All-Oxide Solar Cell Performance. *Energy Technology*, 4(7), 809-815.
- Yang, J. H., Jung, H. H., Seo, J., Kim, K. D., Kim, D. H., Lim, D. C., ... & Ryu, S. Y. (2013). Dopant-free hydrogenated amorphous silicon thin-film solar cells using molybdenum oxide and lithium fluoride. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(45), 23459-23468.
- Yu, X., Marks, T. J., & Facchetti, A. (2016). Metal oxides for optoelectronic applications. *Nature Materials* 2016 15:4, 15(4), 383-396. Nature Publishing Group. Geliş tarihi Temmuz 18, 2023.
- Zhang, K. H., Du, Y., Papadogianni, A., Bierwagen, O., Sallis, S., Piper, L. F., ... & Chambers, S. A. (2015). Perovskite Sr-doped LaCrO₃ as a new p-type transparent conducting oxide. *Advanced Materials*, 27(35), 5191-5195.
- Zhang, K. H. L., Xi, K., Blamire, M. G., & Egdell, R. G. (2016). P-type transparent conducting oxides. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 28(38), 383002. IOP Publishing. Geliş tarihi Temmuz 18, 2023.
- Zuo, J. M., Kim, M., O'keeffe, M., & Spence, J. C. H. (1999). Direct observation of d-orbital holes and Cu–Cu bonding in Cu₂O. *Nature*, 401(6748), 49-52.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Halit TERMAN
Doğumtarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Maarşurin Lisesi
Lisans:	İdlip Üniversitesi
Yükseklisans:	Atatürk üniversitesi
Doktora:	
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	