

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALARDA KULLANILMAK  
ÜZERE ELEKTRO-KİMYASAL BİRİKTİRME YÖNTEMİ  
İLE ÜRETİLEN YARIİLETKEN ZnS İNCE FİMLERİN  
KARAKTERİZASYONU**

**Esra ERTÜRK**

**Yüksek Lisans Tezi**

**Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Danışman: Prof. Dr. HAFIZ ALİSOY**

**T.C.**

**TEKİRDAĞ NAMIK KEMAL ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FOTOVOLTAİK UYGULAMALARDA KULLANILMAK ÜZERE  
ELEKTRO-KİMYASAL BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN  
YARIİLETKEN ZnS İNCE FİMLERİN KARAKTERİZASYONU**

**Esra ERTÜRK**

**ELEKTRONİK VE HABERLEŞME MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN: PROF. DR. HAFIZ ALİSOY**

**TEKİRDAĞ-2019**

**Her hakkı saklıdır**

Prof. Dr. HAFIZ ALİSOY danışmanlığında, Esra ERTÜRK tarafından hazırlanan “Fotovoltaik Uygulamalarda Kullanılmak Üzere Elektro-Kimyasal Biriktirme Yöntemi İle Üretilen Yarıiletken ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu” isimli bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Juri Başkanı: Doç. Dr. Nil KÜÇÜK

*İmza :*

Üye: Prof. Dr. Hafız ALİSOY

*İmza :*

Üye: Doç. Dr. Reşat MUTLU

*İmza :*

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu adına

Doç. Dr. Bahar UYMAZ

Enstitü Müdürü

# ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FOTOVOLTAİK UYGULAMALARDA KULLANILMAK ÜZERE  
ELEKTRO-KİMYASAL BİRİKTİRME YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN  
YARIİLETKEN ZNS İNCE FİLMLEİN KARAKTERİZASYONU

**Esra ERTÜRK**

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Hafız ALİSOY

Çinko sülfid (ZnS), güneş pillerinde kullanım için uygun olan 3,5-3,7 eV arasında geniş bir yasak enerji aralığına sahip önemli bir inorganik yarı iletkenidir. ZnS ince filmler, insan vücudu için toksik değildir ve içeriğinde bulunan elementler çok ucuz ve bol miktarda bulunur. Geniş alanlara kaplama özelliği ve ekonomik olmasından dolayı yarıiletken ince filmlerin elektrokimyasal olarak biriktirilmesi gün geçtikçe popüler olmaktadır. ZnS ince filmler, basit üç elektrotlu sistem ve sulu çinko klorür ve sodyum tiyosülfat çözeltileri kullanılarak oda sıcaklığında elektro-kimyasal biriktirme yöntemi ile iletken cam altlık üzerine biriktirildi. NaCl ile ZnS / iyonik çözeltinin Mott-Schottky (Ag / AgCl'a karşı 1 / C<sub>2</sub>) analizi, 100 Hz'de sabit bir frekansta, 10 mV'lik bir AC genliğinde gerçekleştirildi. Düz bant potansiyeli ve taşıyıcı konsantrasyonu, C-V ölçümleriyle hesaplandı.

**Anahtar kelimeler:** Elektrokimyasal biriktirme, ZnS yarıiletkeni, Mott-Schottky analizi

2019, 47 sayfa

## **ABSTRACT**

MSc. Thesis

**CHARACTERIZATION OF SEMICONDUCTOR ZnS THIN FILMS  
PRODUCED BY ELECTRO-CHEMICAL DEPOSITION METHOD  
FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS**

**Esra ERTÜRK**

Tekirdağ Namık Kemal University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electronics and Telecommunication Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Hafız ALİSOY

Zinc sulfide, is an important inorganic semiconductor with a wide bang gap ranging from 3.5-3.7 eV which is suitable for applications in solar cells. ZnS thin films are nontoxic to human body, very cheap and abundant. The semiconductor thin film deposition from aqueous solution becomes increasingly popular because it has advantages of economical and capability of large area deposition. Zinc sulfide thin films have been deposited onto indium tin oxide glass substrate by electrodeposition method at room temperature using a simple three-electrode system and aqueous solutions of zinc chloride and sodium thiosulfate solutions. Mott-Schottky ( $1/C^2$  vs  $Ag/AgCl_{sat.}$ ) analysis of ZnS/ionic solution with NaCl were carried out at an AC amplitude of 10 mV at a constant frequency at 100 Hz. The flat band potential and carrier concentration are estimated by C-V measurements.

**Keywords:** Electrodeposition, ZnS Semiconductor, Mott-Schottky Analyze

**2019, 47 Pages**

# İÇİNDEKİLER

## Sayfa

<b>ÖZET</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ii</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÇİZELGE DİZİNİ</b> .....	<b>v</b>
<b>ŞEKİL DİZİNİ</b> .....	<b>vi</b>
<b>KISALTMALAR</b> .....	<b>viii</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>ix</b>
<b>1.GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER</b> .....	<b>4</b>
2.1. Enerji İhtiyacı.....	4
2.2.Güneş Enerjisi.....	5
2.3. Yarıiletkenler.....	7
2.4. p-n Eklem Yapısı.....	8
2.5.Güneş Pili Yapısı.....	12
2.6 Çinko Sülfid (ZnS) Yarıiletken.....	13
2.7. Elektrokimyasal Biriktirme.....	15
2.7.1. Faraday Yasaları.....	16
2.7.2.Elektrolit.....	17
2.7.3.Elektrotlar.....	17
2.7.4. Güç Kaynağı.....	17
2.8. Mott-Schottky Teorisi.....	19
2.9. Yarıiletkende Foton Soğurulması.....	23
<b>3.MATERYAL ve YÖNTEM</b> .....	<b>26</b>
3.1. Çözelti ve Altlıkların Hazırlanması.....	26
3.2. Elektrokimyasal Biriktirme Sistemi.....	27
3.3. Dönüşümlü Voltmetri.....	28
3.4. Optik Özelliklerin Belirlenmesi.....	30
3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu.....	32

<b>4. BULGULARI ve TARTIŞMA</b> .....	<b>35</b>
4.1. Dönüşümlü Voltmetri .....	35
4.2. n-tipi ZnS Yarıiletken İnce Filmin büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	36
4.3. p-tipi ZnS Yarıiletken İnce Filmin büyütülmesi ve Karakterizasyonu .....	40
<b>5. SONUÇ</b> .....	<b>43</b>
<b>6.KAYNAKLAR</b> .....	<b>44</b>

## ÇİZELGE DİZİNİ

### Sayfa

Çizelge 4.1. Eşdeğer elektronik devre elamanlarının n-tipi ZnS ince filminin Nyquist verisine fit sonuçları .....	38
Çizelge 4.2. Eşdeğer elektronik devre elamanlarının p-tipi ZnS ince filminin Nyquist verisine fit sonuçları .....	41



## ŞEKİL DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Bölgelere bağlı Dünya elektrik ihtiyacı.....	4
Şekil 2.2.Paralel Optik Eksen Geometrisinin Şematik Gösterimi.....	7
Şekil 2.3a)Saf, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin bant yapıları.....	8
b) p-n eklem oluşumu.....	9
c)p-n eklem enerji bant diyagramı.....	9
Şekil 2.4.p-n eklem ileri besleme ve ters besleme altında enerji bant diyagramı.....	11
Şekil 2.5. Güneş pilinin yapısı.....	12
Şekil 2.6. Çinko Sülfid yarıiletkeninin kristal yapıları .....	13
a) kübik yapıda ZnS,.....	13
b) altıgen yapıda vürtzit.....	13
Şekil 2.7. İki farklı güneş pili yapısında ZnS yarıiletkeninin kullanımı.....	14
Şekil 2.8. İki elektrotlu elektrokimyasal hücrede yükseltgenme.....	15
Şekil 2.9. Metal ve n-tipi yarıiletkenin eklem olmadan ve eklem olduktan sonraki enerji bant yapıları.....	19
Şekil 2.10. Metal ve p-tipi yarıiletkenin eklem olmadan ve eklem olduktan sonraki enerji bant yapıları.....	20
Şekil 2.11.Metal yarı iletken bir eklem için a) yük ve b) alan dağılımları.....	21
Şekil 2.12. Doğrudan geçişli bant aralıklı yarıiletkenlerin foton soğurulması .....	24
Şekil 3.1. Ultrasonik banyo.....	26
Şekil 3.2. Elektrokimyasal biriktirme sistemi.....	27
Şekil 3.3. Dönüşümlü voltmetri potansiyel sinyali.....	28
Şekil 3.4.Dönüşümlü voltmetri.....	29
Şekil 3.5. Optik ölçüm sistemi.....	30
Şekil 3.6. n-tipi ve tipi yarıiletkenlerin Mott-Schottky eğrileri.....	31
Şekil 3.7. SEM'in basit şeması.....	32
Şekil 4.1. Üç elektrotlu hücre.....	35
Şekil 4.2. ZnS yarıiletkeni için Hazırlanan Çözeltilinin Dönüşümlü Voltmetri eğrisi.....	35
Şekil 4.3. n-tipi ZnS yarıiletken ince filmin SEM resmi .....	36
Şekil 4.4. n-tipi ZnS yarıiletkenin Mott-Schottky eğrisi .....	37
Şekil 4.5. n-tipi ZnS yarıiletkenin Nyquist eğrisi.....	38
Şekil 4.6. n-tipi ZnS yarıiletken ince filmin $(ahv)^2$ 'nin $hv$ 'ye göre grafiği.....	39

Şekil 4.7.p-tipi ZnS yarıiletken ince filmin SEM resmi.....	40
Şekil 4.8.p-tipi ZnS yarıiletkenin Mott-Schottky eğrisi.....	41
Şekil 4.9. n-tipi ZnS yarıiletkenin Nyquist eğrisi.....	42
Şekil 4.10. p-tipi ZnS yarıiletken ince filmin( $ah\nu$ ) <sup>2</sup> 'nin $h\nu$ 'ye göre grafiği.....	42

## KISALTMALAR

ZnS	: Çinko Sülfid
ED	: Elektrokimyasal biriktirme
UV-VIS	: Ultraviyole-görünür ışık
VC	: Dönüşümlü voltmetri
WE	: Çalışma elektrot
CE	: Karşıt elektrot
RE	: Referans elektrot
SEM	: Taramalı elektron mikroskop
İTO	: İndiyum katkılı Kalay oksit
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
NABİLTEM	: Namık Kemal Üniversitesi Merkezi Laboratuvarı

## **TEŞEKKÜR**

Bu tez çalıőmasını gerçekleőtirmemi sağlayan ve tez çalıőmalarım sırasında gösterdiği büyük ilgi ve yardımlarından dolayı danıőmanım Sayın Prof. Dr. Hafız ALİSOY'a, tez çalıőmalarım süresince her konuda yardımcı olan ve çalıőmalarıma destek olan Sayın hocalarıma, arkadaőlarıma ve aileme çok teşekkür ederim.

Esra ERTÜRK

## 1.GİRİŞ

Son yıllarda, dünya enerji tüketimi önemli ölçüde artmış ve yakın gelecekte artmaya devam etmesi bekleniyor (Anonim, 2013; Anonim-a, 2015). Bu artışa katkıda bulunan başlıca faktörler, küresel nüfus artışı, yükselen yaşam standardı ve ekonomik ilerlemedir. Enerji, üretimin en temel ihtiyacı olmasından dolayı ülkelerin ekonomik gelişimiyle ilişkilidir. Gelişmekte olan ülkelerde enerjiye olan talep ile ekonomik büyüme arasında güçlü bir ilişki vardır. Hızlı bir şekilde gelişmekte olan ülkemizin enerjiye olan ihtiyacı gün geçtikçe artmaktadır. Ne yazık ki, enerji üretiminin büyük bir bölümü sınırlı kullanılabilirliğe sahip olan fosil yakıt kaynaklarına (yani petrol, kömür ve doğalgaz) dayanıyor (Anonim-b, 2013). Geleneksel fosil yakıtlarının kullanımına dayanan enerji üretiminin yoğun olarak kullanımı ile artan çevre sorunları ve kaynakların kısıtlı hale gelmesi ve yakın gelecekte tükenecek olması gerçeği, ülkemizdeki yenilenebilir enerji kaynaklarının teknolojilerinin geliştirilmesini ve etkin bir şekilde kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir.

Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarından, güneş en bol ve umut verici enerji kaynağıdır çünkü dünyanın tüm enerji tüketimini karşılayabilme potansiyeline sahiptir. Bir saat içinde Dünya yüzeyine ulaşan güneş enerjisinin bir yıl içinde dünyanın toplam enerji tüketimine neredeyse eşdeğer olduğunu düşünürsek, güneş enerjisinin verimli şekilde toplanması, aktarılması ve depolanmasını sağlayan sistemlerle ilgili araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır (Anonim-c, 2015). Ülkemizin coğrafi konumu ve büyük potansiyelinden dolayı güneş enerjisi, yenilenebilir enerji kaynakları içinde ön plana çıkmaktadır (Turan, 2011).

Güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmekte kullanılan yöntemlerden biri fotovoltaik güneş pili'dir. Yarıiletken bir diyot yapısına sahip olan fotovoltaik (PV) güneş pili, güneş ışığının taşıdığı enerjiyi doğrudan elektrik akımına dönüştüren bir araçtır. Günümüzde PV teknolojisi, elektrik üretim maliyeti açısından fosil yakıtlarla rekabet edememektedir. Aradaki bu farkı kapatmak için PV sistemlerinin, enerji dönüşüm verimliliği (PCE) arttırılarak ve güneş pilinin üretim maliyetleri düşürülerek, yüksek verimli, uygun maliyetli güneş panelleri kullanılmalıdır.

Güneş pilleri, kristal silisyum güneş pilleri, ince film güneş pilleri, nano teknolojiye dayalı güneş pilleri olarak üretilmektedir. Günümüzde güneş pillerinin üretiminin çoğunda, yeryüzünde bol miktarda bulunması, zehirli olmaması, bozulma zamanının uzun olması, geri dönüştürülebilir olması ve yarıiletken özelliğinden dolayı Silisyum (Si) elementi kullanılmaktadır (Turan, 2011; Poortmans & Arkhipov, 2006; Sze, 1981; Aberle, 2006;

Geunhee & ark., 2006; Niira & ark., 2001). Kristal Si (c-Si) güneş pilleri pazar payında en çok yere sahiptir. Buna karşın üretim maliyeti yüksektir. Maliyetinin büyük kısmı hammaddeye gitmektedir (Geunhee & ark., 2006; Niira & ark., 2001; Gestel & ark., 2009; Tsuda & ark., 1997) ve ayrıca üretim süreci zor ve pahalıdır.

Çinko sülfür (ZnS), 3.70 eV'lik doğrudan optik bant genişliğinde önemli geniş bir bant aralığına sahip olan II-VI grubu bir yarı iletken materyaldir (Yasuda & ark, 1986). Bu bant aralığı, güneş hücrelerinde pencere malzemesi olarak kullanıldığında 2.42 eV bant aralığında bulunan CdS ile karşılaştırıldığında kısa dalga boyu bölgesinde (350-550) nm yüksek geçirgenliğe izin vermesinden dolayı daha uygundur. ZnS, 2.40'lık bir kırılma indeksine (n) sahiptir ve bu da ince film güneş hücrelerinde yansıma önleyici kaplama olarak uygulanmasını mümkün kılmaktadır (Tec-Yam & ark., 2012). ZnS literatürde yoğun bir şekilde çalışılmaktadır ve günümüzde güneş hücreleri (Echendu, Fauzi, & ark., 2014; Echendu & Dharmadasa, 2015) ve çeşitli fotonik cihazların üretimi (Echendu, Weerasinghe, & ark., 2013; Echendu & Dharmadasa, 2013) alanlarında kullanımını artmaktadır.

ZnS, büyütme koşullarına bağlı olarak elektriksel iletimde n- veya p-tipi (Echendu, Weerasinghe, & ark., 2013) olabilmektedir. Bu malzeme genellikle her iki durumda da doğrudan optik enerji aralığını gösteren çinko sfalerit ve / veya vürtzit kristal yapılarında büyütülebilmektedir (Lokhande & ark., 1989). n veya p tipi elektrik iletimli ZnS, özellikle güneş pilleri ve diğer elektronik cihazların üretiminde önemlidir. Tampon / pencere olarak kimyasal banyo çökeltme (CBD) yönteminde ZnS'nin dahil edilmesiyle, CdS (Tec-Yam & ark., 2012) kullanılarak elde edilen % 19.9 verimlilik ile karşılaştırıldığında ZnS / Cu (In, Ga) Se<sub>2</sub> güneş pillerinde % 18.6'lık bir verim sağlanmıştır. Echendu ve diğ. (Echendu, Fauzi, & ark., 2014), ZnS / CdTe solar hücrelerinde pencere katmanı olarak n-tipi ZnS'yi % 12 verim ile birleştirmişlerdir. Junfeng Han ve arkadaşları (Han & ark., 2013) ZnS / CdS / CdTe solar hücre yapısında ZnS'yi % 10'un üzerinde dönüşüm verimliliği ile kullanmışlardır. Pudov ve diğ. (Pudov & ark., 2002), CIGS tabanlı güneş hücrelerinde CBD-ZnS'yi bir pencere katmanı olarak kullanmış ve üzerinde dönüşüm verimliliği sağlamışlardır. CdS / CdTe solar hücre yapısı içinde şimdiye kadar en iyi yarıiletken olan CdS yerine ZnS gibi daha geniş bant aralığındaki malzeme kullanılması dönüşüm verimliliği daha da iyileştirilebilir.

ZnS ince filmler CBD (Limei & ark., 2009; Ilenikhena, 2008) ardışık iyonik katman adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) (Ateş & ark., 2007), ultrasonik kimyasal püskürtme (Falcony, 1992; Hernández-Fenollosaa & ark., 2008) ve elektro-kimyasal biriktirme (Echendu

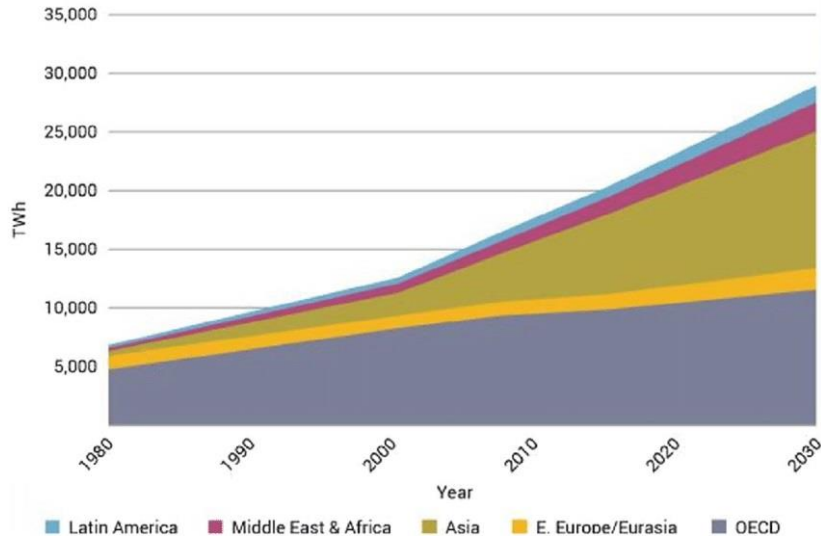
& Dharmadasa, 2013; Lokhande & ark., 1989) gibi farklı teknikler kullanılarak büyütülmüştür. ZnS ince filmler, birçok araştırmacı tarafından yukarıda bahsedildiği gibi farklı teknikler kullanılarak büyütülmüştür. Bhalerao ve ark. (Bhalerao & ark., 2013) paslanmaz çelik alt tabaka üzerinde elektro-kaplama ile n-tipi ZnS ince filmleri Falcony ve ark. (Falcony, 1992) iletken cam alttaşı üzerinde ZnS: Mn'yi spray pyrolysis tekniği ile elde etmiştir.

Tez çalışmasında, Zn (Çinko) ve S(Sülfür) kaynakları kullanılarak yapılacak sulu elektrolitlerden iletken cam alttaşlar üzerine ZnS ince filmlerin kaplanması için elektro-kimyasal biriktirme yöntemi kullanılacaktır. Elektro-kimyasal biriktirme, yöntem olarak basit olması, iç katkılanmaya olanak sağlaması, düşük maliyetli olması, düşük sıcaklıkta yapılabilmesi, az kimyasal atık üretiminin olması ve optoelektronik uygulamalarda geniş bir şekilde kullanılmasından dolayı avantajlıdır.

## 2. KURAMSAL TEMELLER

### 2.1. Enerji İhtiyacı

Enerji bütün dünyada her geçen gün daha çok önem kazanan değerlerdendir. Enerjinin bilimsel, ekonomik ya da teknolojik açıdan tek başına incelenmesi mümkün değildir. Çünkü yaşantımız üzerinde çevresel, sosyal ve ekonomik olarak etkileri olduğundan bir bütün olarak incelemek gerekir. Enerji kaynaklarına bakıldığında ana kaynak olarak fosil yakıt kaynakları kömür, petrol ve doğalgaz kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bu kaynakların kısıtlı olması, enerji ihtiyacının artması ile sürdürülebilirliğinin olmaması önemli sorun oluşturmaktadır. Enerjiye talebin artması ile fiyatlardaki yükselme ekonomik açıdan sorun yaratırken, fosil yakıtlarda karbondioksit salınım hızındaki artış küresel ısınmaya sebep olarak çevresel ve politik açıdan da sorun teşkil etmektedir. Şekil 2.1.'deki grafik enerji talebinde beklenen artışı göstermektedir. Enerjiye olan talep artan oranda artmakta ve bu artışın her geçen yıl daha da artacağı öngörülmektedir. Enerji talebi 20 yılda %40 artış göstererek 17TWy'den 23TWy'a çıkmıştır. Artan nüfus, ekonomide ilerlemeler, yaşam standartlarının yükselmesi, küreselleşme gibi başlıca etkenler yeni enerji kaynakları arayışını kaçınılmaz yapmıştır.



Şekil 2.1. Bölgelere bağlı Dünya elektrik ihtiyacı (Anonim-d, 2009).

Günümüzde enerji ihtiyacının %85'i fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Bu yakıtlar atmosfere CO<sub>2</sub> salınımı yapar. Bu da küresel ısınmanın ana nedenlerinden olduğu düşünülmektedir (Anonim-e, 2019). Doğal hayatı tehdit eden bu sorunun çözümü ise güneş, jeotermal, rüzgar enerjisi, dalga gücü, biyokütle gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile mümkündür. Avrupa Birliği 2020 yılında CO<sub>2</sub> emisyonunu düşürme ve yenilenebilir enerji



kaynakları ile %20 daha fazla enerji üretme görevini üstlenmiştir. Bu da yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının artışı ile mümkündür. 2013 yılı itibari ile yenilenebilir enerji kaynakları küresel enerji üretiminde %5.3 paya sahiptir. Bu pay alternatif enerjinin pazar payının az olmasına rağmen gayet iyi artmaktadır. 2012-2013 yıllarında yenilenebilir kaynaklardan elde edilen enerji üretimi %16.3 artış göstermiştir (Perrin, 2014).

Güneş enerjisi diğer yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde çok fazla miktarda olması, temiz ve kolayca erişilebilir olması sebebi ile daha fazla dikkat çekici olmuştur. Güneş enerjisi yenilenebilir enerji kaynaklarının içinde en hızlı gelişen dalı olmuştur. Güneşin 380x10<sup>21</sup> Kw yaydığı enerjinin 170x10<sup>12</sup> Kw'lık kısmını Dünya almaktadır. Bu enerji çok büyük bir enerjidir (Anonim-d, 2009). Özellikle güneş enerjisinde fotovoltaik teknoloji fosil yakıtlara alternatif olmasında önemli bir etken oluşturmaktadır. Güneş enerjisinden elektrige dönüşümüne fotovoltaik enerji denilmektedir. Güneş enerjisi ile oluşturulan dönüşüm sistemlerinin hem evsel hem de endüstriyel kullanımda güvenilir olarak ısı ve elektrik ürettiği kanıtlanmıştır. Ayrıca maliyetinin düşük olması ve veriminin yüksek olması fotovoltaik teknolojinin talebini arttırmaktadır. Özellikle gelişmiş ülkelerde bu alanda rekabet artmakta ve daha fazla ilgi görmektedir.

## **2.2. Güneş Enerjisi**

Güneş enerjisi ile oluşturulan dönüşüm sistemlerinde atık ürünün olmaması, mekanik açıdan hareketli parçaya ihtiyaç duymaması avantajlarıdır. Ayrıca güneşli havalarda veya yapay ışık kaynağının olduğu ortamlarda çalışabilmektedir. Ancak sistem tam anlamı ile ışığa bağlı olarak çalışmaktadır. Sistemin bakım, yakıt gibi maliyetleri düşük olmasına karşın başlangıçtaki maliyetleri oldukça yüksektir. Bu durum geniş alan uygulamalarında çok daha ciddi bir dezavantaj oluşturmaktadır. Bunun dışında elektrik şebekesinde alternatif akım kullanılırken fotovoltaik pillerden doğrudan akım üretilir. Şebekeden uzak olan konumlarda enerji depolanması gerekmektedir.

Güneş ana enerji kaynağıdır ve güneş çok ciddi miktarda enerji sağlamaktadır. Güneşten sağlanan ortalama güç yoğunluğu tahmini olarak 342W/m<sup>2</sup> olduğu söylenmektedir (Anonim-f, 2019). Dünyanın aldığı bütün enerji hesaplanacak olsa 148PWh değeri elde edilir.2013yılı itibari ile dünyadaki enerji tüketimi 19.9TWh idi. Bu değer dünyaya gereken güneş enerjisinin 7400 kat daha fazlasıdır. Bu da güneş enerjisinin ne kadar büyük bir potansiyel olduğunu göstermektedir.

Güneş enerjisini ısı ve ışık şeklinde yaymaktadır. Güneşten elde edilen enerji çekirdeğinde meydana gelen füzyon sürecinde açığa çıkan ışıma enerjisi olmaktadır. Bu füzyon sürecinde hidrojen gazı helyuma dönüşmektedir. Yukarıda verdiğimiz rakamsal verilerde de gördüğümüz gibi dünyaya gelen enerji insanlığın ihtiyaç duyduğu enerjiden çok çok fazladır. Güneş enerjisinden yararlanmak amacı ile yapılan çalışmalar 1970'lerden sonra başlamış, bu konudaki araştırmalar giderek de hız kazanmıştır. Gerek teknolojik olarak meydana gelen ilerlemeler gerekse maliyetlerde de sağlanan azalma güneş enerjisini temiz ve alternatif bir enerji kaynağı olarak kabul edilmesini sağlamıştır.

Enerjinin dönüşüm şekline göre güneş enerjisinin kullanıldığı çeşitli teknolojiler ortaya çıkmıştır. Bunlardan birisi sıcak su sistemleridir. Su ve kazandan oluşan sistemde su ısıtılmaktadır. Genellikle ev tipi sistemlerde kullanılmaktadır. Özellikle ülkemizde Akdeniz ve Ege Bölgesinde kullanılan güneş kolektörleri ile bir yılda 290 bin TEP ısı enerjisini yaklaşık olarak almaktadır (Anonim-g, 2019).

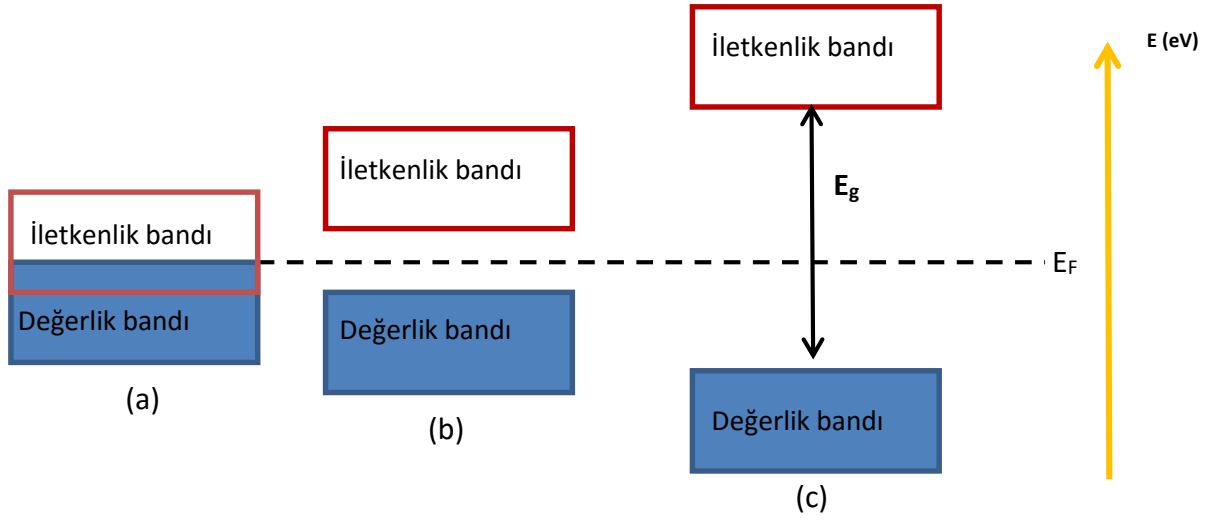
Güneş santrallerinde güneşin ısınma etkisi kullanılmaktadır. Aynalar aracılığı ile güneş ışığı içi yağ dolu borulara odaklandırılır. Yüksek ısıya ulaşan yağ borularla suların bulunduğu depolara gider. Su yağın ısınımlarını alarak basınçlı buhar haline gelir. Bu da türbin ile jeneratörden oluşan sistemi hareket ettirir. Elektrik üretimi sağlandıktan sonra basıncını kaybeden su yoğunlaştırılmak üzere depolarda bekler ve çevrim bu şekilde devam eder.

Güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmede fotovoltaik sistemler yani güneş pilleri de kullanılmaktadır. Güneş panelleri yüzeyine gelen güneş ışığı fotovoltaik etkiden güneş ışığını doğrudan elektriğe dönüştüren yarı iletkenlerdir. Güneş pillerinden güneş panelleri, güneş panellerinden fotovoltaik sistemler oluşmaktadır. Güneş panellerinin kullanım alanları çok geniştir.

Ancak üretim maliyetlerinin yüksek olması, verimlerinin düşük olması sebebi ile diğer enerji kaynaklarının yanında yer alamadı. Bu enerjiden kütle ölçüğünde yararlanabilmek için güneş pillerinin maliyetinin ciddi oranda düşürülmesi gerekiyordu. Tüm bunların sonunda "ikinci nesil güneş pilleri" yani ince film güneş hücreleri ile güneş pillerinde kullanılan malzeme maliyeti düşürüldü. Bu güneş pillerine güneş ışığını emen tabakanın kalınlığı birkaç mikrometre mertebesinde. Günümüzde güneş enerjisinden elektrik enerjisi elde etmede kullanılan güneş pillerinin yapısına göre verimlilikleri %5 ile %20 arasında değişmektedir.

### 2.3. Yarıiletkenler

Katıhal fiziğinde malzemeler, elektronik bant yapılarına göre sınıflandırılırlar. Metaller elektronlarla kısmen doldurulmuş bir banta sahiptir ve bu da onlara iyi iletkenlik özellikleri sağlar. Öte yandan yarı iletkenler ve yalıtkanlar, tamamen dolu ya da tamamen boş bantlara sahiptir. Yalıtkanlar ve yarı iletkenler arasındaki fark, değerlik bandının üst sınırı ile iletkenlik bandının alt sınırı arasındaki yasak enerji aralığıdır. Yalıtkanlar geniş bant aralığına sahipken (yaklaşık 5 ila 10 eV), yarı iletkenler daha küçük bir bant aralığına sahiptir (genellikle 1 eV civarındadır). Şekil 2.2, bu sınıflandırmayı şematik olarak göstermektedir.



Şekil 2.2 a) Metal, b) Yarıiletken ve c) Yalıtkana ait enerji bant yapıları

Yarı iletkenler, metaller ile yarı iletkenler arasında elektriksel özelliklere sahiptir. Bununla birlikte, bir yarı iletkene farklı değerlik elektronuna sahip atomlar ekleyerek, elektriksel özellikleri değiştirilebilir ve bu işleme katkılama denir. Yarıiletken malzemeye daha fazla değerlik elektronuna sahip bir atom eklenmesi durumuna elektron fazlalığı olacağından n-tipi katkılama (negatif için n) denir. Daha az değerlik elektronlarına sahip bir atom eklenmesi durumunda boşluklar (pozitif yüklüymüş gibi davranan) oluşacağından p-tipi katkılama yapılmış olur (pozitif için p).

Bir yarı iletkeni katkılama Fermi enerjisini değiştirir. Fermi seviyesi katkılanmamış yarıiletkenlerde değerlik bandı ve iletkenlik bandı arasında ve tam ortada yer alır. p-tipi yarı iletkende, Fermi enerjisi değerlik bandına yaklaşırken, n-tipi yarıiletkende Fermi seviyesi iletkenlik bandına yaklaşır. Fermi enerjisindeki bu değişim, güneş pilleri gibi yarı iletken cihazlarda önemli bir rol oynar.

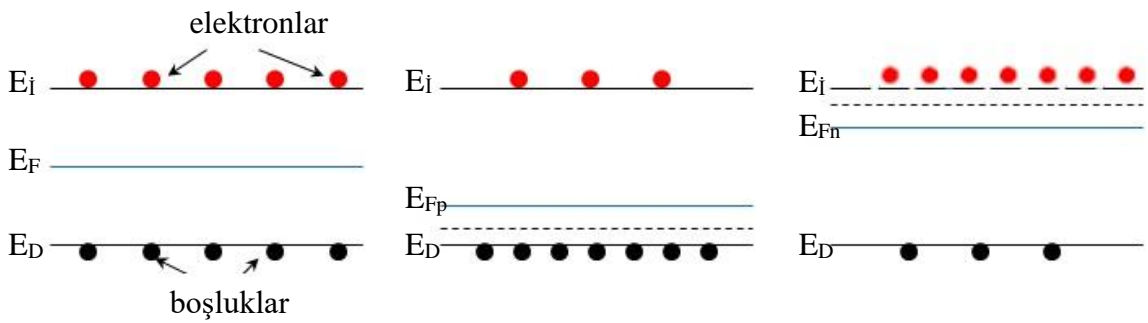
## 2.4. p-n Eklem Yapısı

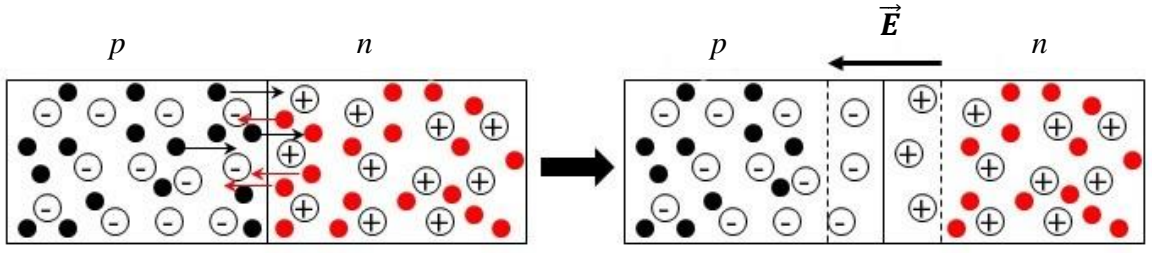
p tipi ve n tipi yarı iletkenlerin bir araya gelmesiyle bir p-n eklem oluşur. Bir p-n eklem aynı yarı iletken malzemenin farklı biçimde katkılı olduğu bir homoeklem (n- ve p-tipi) veya farklı katkı tiplerine sahip iki farklı malzemenin bir araya getirilmesi ile bir heteroeklem olabilir.

Eğer p- ve n-tipi yarı iletkenler kontak olursa, her iki bölgedeki yük taşıyıcılarının konsantrasyon farklarından dolayı n-bölgesindeki elektronlar p-bölgesine ve p-bölgesindeki boşluklarda n-bölgesine yani elektronların hareketinin tersine difüzyona uğrarlar. n bölgesindeki elektronlara çoğunluk taşıyıcıları, p bölgesindeki elektronlara azınlık taşıyıcıları denir. Benzer şekilde, p bölgesindeki boşluklara çoğunluk taşıyıcıları, n bölgesindeki boşluklara azınlık taşıyıcıları denir. Yüklerin difüzyonundan dolayı kontak ara yüzünün yakınında, n bölgesinde pozitif yüklü donör (verici) iyonları ve p bölgesindeki negatif yüklü akseptör (alıcı) iyonları tükenim bölgesi denen bu bölgede oluşurlar.

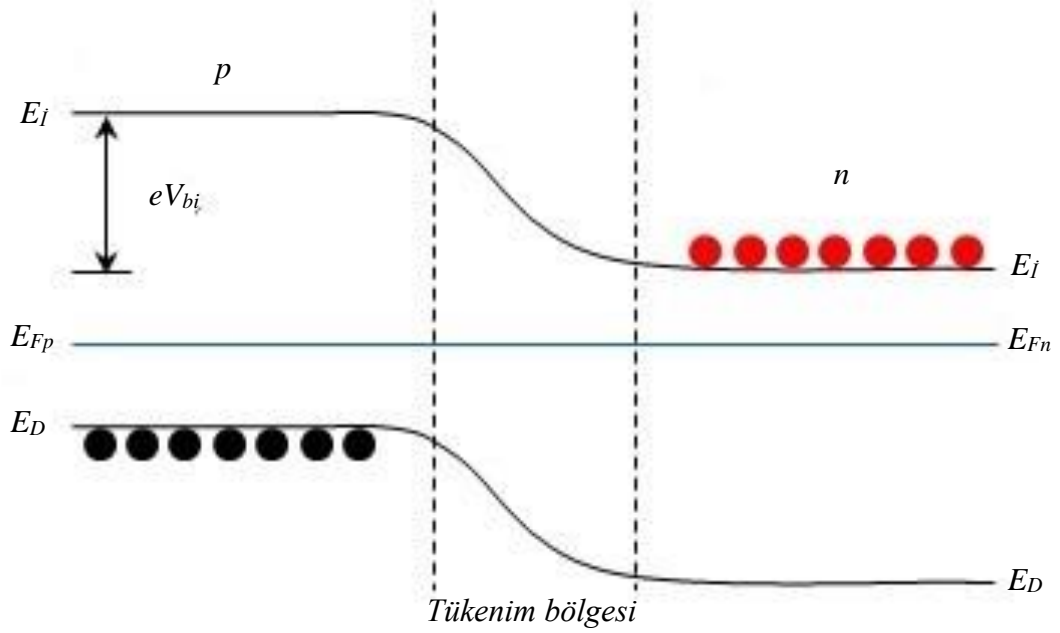
Tükenim bölgesindeki sabit pozitif ve negatif yükler, n bölgesindeki pozitif donör iyonlarından p bölgesindeki negatif alıcı iyonlara doğru bir elektrik alanı oluşturur. Elektrik alanın bir sonucu olarak, ilgili yük taşıyıcı tiplerinin difüzyon akımlarının engelleyen sürüklenme akımları ortaya çıkar. Isısal dengede, iki akım (difüzyon ve sürüklenme akımları) birbirlerini dengeler. Dengede, Fermi seviyesi aynı hizada olmalıdır (her iki tarafta da aynı olmalıdır). Bu nedenle, enerji bantları, p-n bağlantısının sınırlarına yakın kurulan yerleşik potansiyele eşit bir bükülme oluşur. Şekil 2.3'de, saf, p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerin bant yapısını (a) p-n eklem oluşumunu (b) ve p-n eklem enerjisi bandı şeması (c) görülmektedir.

Şekil 2.3a. Saf, p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin bant yapıları





Şekil 2.3b.p-n eklemine oluşumu



Şekil 2.3c.p-n eklemine enerji bant diyagramı

Dış besleme olmadığı sürece termal dengede, eklem bölgesinde oluşan elektron ve boşluk difüzyon akımları ve eklem bölgesindeki elektrik alanından dolayı oluşan elektron ve boşluk sürüklenme akımlarının toplamı sıfırdır, yani net akım sıfırdır.

Denge durumunda sırasıyla elektronların ve boşlukların akım yoğunluklarını olan  $J_n$  ve  $J_p$  eşit olması kullanılarak yapı potansiyeli elde edilebilir. Elektronların ve boşlukların akım yoğunlukları aşağıda verilmiştir. (Erol & Balkan, 2015)

$$J_n = e \left( \mu_n n E + D_n \frac{dn}{dx} \right) \text{elektron} \quad (1)$$

$$J_p = e \left( \mu_p p E - D_p \frac{dp}{dx} \right) \text{boşluk} \quad (2)$$

Yukardaki eşitlikler kullanılarak yapı potansiyeli donör ve akseptör yoğunluğuna bağlı olarak aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$V_{bi} = \frac{k_B T}{e} \ln \left( \frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

Yukardaki eşitliklerde,  $\mu$  yük taşıyıcıların hareketliliğini yani mobilitelerini,  $e$  elektronun yükünü,  $D$  difüzyon katsayısını,  $E$  elektrik alanını ayrıca,  $p$  ve  $n$  sırasıyla boşluk ve elektron konsantrasyonunu temsil eder. Ayrıca,  $N_A$  ve  $N_D$ , sırasıyla akseptör ve donör konsantrasyonunu belirtir,  $n_i$ 'de saf taşıyıcı yoğunluğudur ve  $k_B T/q$ 'da termal potansiyeldir.

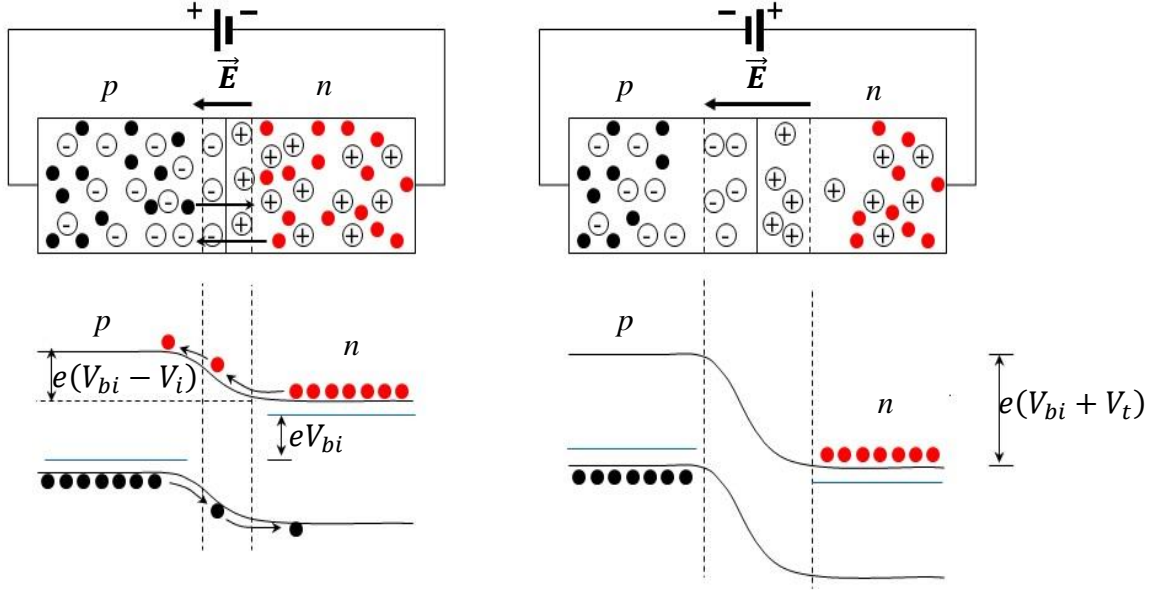
Dış elektrik alan olmadığında elektronların ve boşlukların difüzyon ve sürüklenme akımlarının toplamı yani net akım sıfırdır. Dış elektrik alan varlığında veya p-n eklem harici uygulanan bir voltajla sürüklenme ve difüzyon akım yoğunlukları arasındaki denge bozulur. Bu nedenle p-n eklemde net bir akım geçmeye başlar.

p-n eklem ileri besleme ( $V_i$ ) durumunda yani p tarafına n tarafına göre pozitif potansiyel uygulandığında n ve p bölgeleri arasındaki potansiyel farkı yani yapı potansiyeli  $V_{bi}$  (bariyer) uygulanan potansiyel kadar azalmaktadır.

$$V_{net} = V_{bi} - V_i \quad (4)$$

p-n eklemi geri besleme durumunda ise uygulanan potansiyel negatiftir ve eklemdeki toplam potansiyel uygulanan potansiyel kadar artar (Şekil 2.4.).

$$V_{net} = V_{bi} + V_t \quad (5)$$



Şekil 2.4.p-n eklem in ileri besleme ve ters besleme altında enerji bant diyagramı

Denge durumunda eklem bölgesinde serbest yükler olmadığından tükenim bölgesinin direnci n ve p- tarafındaki nötr bölgelere göre çok daha büyük olacağından uygulanan potansiyelin çoğu eklem bölgesine düştüğü, ayrıca zayıf enjeksiyon ve tükenim bölgesindeki jenerasyon ve yeniden birleşmeler ihmal edilerek p-n eklem in akım- voltaj davranışı analitik olarak elde edilir (Erol & Balkan, 2015).

$$I = I_0 [\exp(eV/k_B T) - 1] \quad (6)$$

Yukarıdaki eşitlikte  $I_0$  p-n eklem in sızıntı veya doyum akımı olarak adlandırılır ve aşağıdaki gibi verilir.

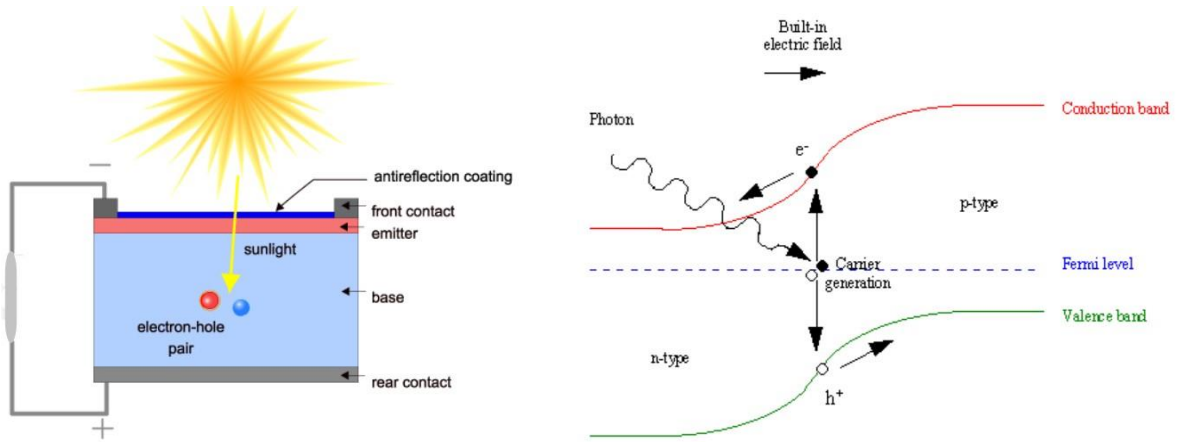
$$I_0 = eA \left[ \frac{D_n n_i^2}{N_A L_n} + \frac{D_p n_i^2}{N_D L_p} \right] \quad (7)$$

Burada A p-n eklem in alanı ve  $L_p$  ve  $L_n$  sırasıyla boşlukların ve elektronların difüzyon uzunluğudur.

## 2.5. Güneş Pili Yapısı

Güneş pilleri, p-n eklem gelen ışığı kullanarak elektrik üretirler. Optik soğurma katsayısı ( $\alpha$ ), belirli bir dalga boyuna sahip ışığın, emilmeden önce ne kadar içeri nüfuz ettiğini belirler. Düşük soğurma katsayısına sahip bir malzemede, ışık sadece zayıf bir şekilde emilir ve eğer malzeme yeterince ince ise, bu dalga boyuna karşı şeffaf görünür. Güneş pilleri için ışığı absorbe etmek için gerekli yarı iletken malzemenin kalınlığı  $10^{-8}$  ila  $10^{-4}$  m arasındadır.

Işığın enerjisi yasak enerji aralığından daha az olduğunda, bir elektronu değerlik bandından iletim bandına uyararak için yeterli enerjiye sahip değildir ve ışık absorbe edilmez. Yasak enerji aralığından daha büyük enerjili fotonlar yarıiletken tarafından absorbe edildiğinde, yük taşıyıcıları oluşur. Bu durumda foton yarıiletken bir elektron tarafından absorbe edilir ve elektron uyarılarak, değerlik bandından yasak enerji aralığını geçerek iletkenlik bandına ulaşır ve geride boşluk bırakır. Böylece elektron boşluk çifti oluşur. Bir p-n eklemde ara yüzeyinde bulunan elektrik alanı nedeniyle, elektron n-tipi malzemeye hareket ederken, delik p-tipi malzemeye hareket eder ve bir elektrik akımı oluşturur (Şekil 2.5). Bu işlem fotovoltaiik etki olarak adlandırılır ve tüm güneş hücrelerinin temelini oluşturur.



Şekil 2.5. Güneş pilinin yapısı (Honsberg & Bowden, 2019)

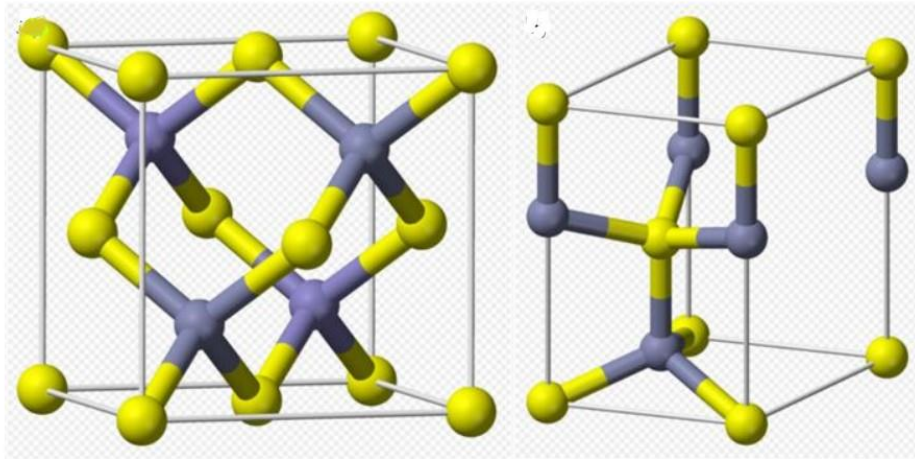
Özetle, güneş pili yeterli enerjiye sahip güneş ışığına maruz kaldığında, fotonlar atomlar tarafından emilir (absorbe) ve yarı iletken taşıyıcılar oluşturur. Taşıyıcılar p-n eklemde yapısı gereği oluşan elektrik alanla ayrılır ve güneş hücresinin temas noktalarında toplanır ve bir elektrik akımı oluşturur. Bir güneş pilinin verimliliği, akım-gerilim (I-V) karakteristiğinden elde edilir.



## 2.6. Çinko sülfid (ZnS) Yarıiletkeni

Çinko sülfid (ZnS), keşfedilen ilk yarı iletken malzemeler arasında yer almaktadır. Geniş bir enerji boşluğuna ve yüksek geçirgenliğe sahiptir. Son yıllarda fotovoltaik ve optoelektronik cihazlar da dahil olmak üzere farklı uygulamalar için umut vaat eden alternatif bir malzemedir (Benyahia & ark., 2015). Geniş bir enerji aralığına sahip olmasından dolayı (3.5 - 3.9 eV aralığında) ZnS, ışığa duyarlı cihazlar, UV ışınlarına dayalı cihazlar ve elektrominesans cihazlar için daha uygundur (Zakerian & Kafashan, 2018). Ayrıca, ZnS toksik değildir, bol ve ucuzdur. Aslında, ZnS'nin özellikleri henüz ayrıntılı bir şekilde araştırılmamıştır, bu da bu materyali daha ileri çalışmalar için gerçek bir araştırma alanı yapmaktadır.

Çinko sülfid (ZnS) yarıiletkeni, iki kristal formu vardır: kübik (sfalerit veya çinkoblende) ve altıgen (wurtzite) (Wells, 1984). Şekil 2.6. a) ve b) 'de gösterildiği gibi. Kübik ZnS 3.54 - 3.6 eV'lik bir bant boşluğuna sahipken, altıgen ZnS'nin bant aralığı 3.74 - 3.87 eV<sup>1,2</sup>'dir, Ayrıca geniş ve doğrudan geçişli bant aralığına sahip bir yarı iletken malzemedir (Kittel, 1996).

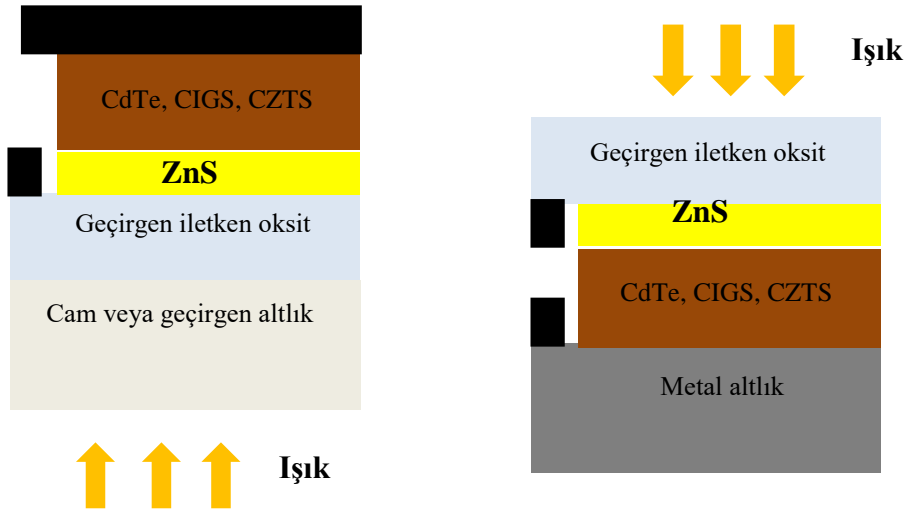


Şekil 2.6. Çinko Sülfid yarıiletkeninin kristal yapıları a) kübik yapıda ZnS, b) altıgen yapıda würtzit

Çinko sülfid (ZnS) yarıiletkeninin mavi ışık yayan diyot, elektrolüminesans cihazlar, fotovoltaik hücreler ve optoelektronik cihazlar gibi birçok teknolojik uygulamaları mevcuttur. Ayrıca, ZnS yarıiletken ince filmler, fotovoltaik teknolojisinde son yıllarda özellikle dikkat çekmektedir. ZnS filmlerinin avantajlarından biri, elektrokimyasal biriktirme, püskürtme, moleküler ışın epitaksi, kimyasal buhar biriktirme, termal buharlaştırma, püskürtme pirolizi ve

kimyasal banyo biriktirme gibi çeşitli tekniklerle kolayca hazırlanabilmeleridir (Zakerian & Kafashan, 2018).

Günümüzde ile ilgili çalışmalar öncelikli çalışmalar arasında yer almaktadır. İnce film güneş hücrelerinde CdS, bir tampon tabakası olarak kullanılan en yaygın yarı iletken malzeme olmuştur. Bununla birlikte, Cd elementinin ağır metal ve toksik olması çevre ve insan sağlığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı Cd yerine yeni malzeme arayışları ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Byoung-Min & ark., 2019). ZnS yarıiletkeninin toksit olmaması, yeryüzünde bol bulunması ve ucuz olması nedeniyle alternatif malzemeler arasında en umut verici adaylardan biri olarak kabul edilmektedir. Buna ek olarak, ZnS, oda sıcaklığında 3.5 - 3.9 eV'lik geniş ve doğrudan geçişli enerji aralığına sahiptir ve bu, 2.45 eV enerji aralığına sahip CdS ile karşılaştırıldığında daha avantajlıdır.



Şekil 2.7. İki farklı güneş pili yapısında ZnS yarıiletkeninin kullanımı

İnce film heteroeklem güneş hücrelerinin verimliliği, emici ve tampon tabakaları arasındaki ara yüz özelliklerine güçlü bir şekilde bağlıdır. ZnS ince filmler, yüksek geçirgenliğe, geniş enerji aralığına sahip olması ve yalıtım özellikleri nedeniyle mükemmel bir katman olacağı düşünülmektedir (Şekil 2.7). Düşük yansıtıcılığından dolayı, ZnS yarıiletkeni ince film güneş pillerinin temel bir parçası olan yansıma önleyici kaplamalar olarak da uygulanabilir. CdS yerine ZnS yarıiletkeninin kullanılması sonucu CIGS ince film güneş hücrelerinin kısa dalga boylarında kuantum verimliliği % 13,3 oranına arttırdığı gözlenmiştir (Echendu & Dharmadasa, 2015). ZnS yarıiletkeninin n-tipi ve p-tipi üretilebiliyor olması CdTe, CIGS ve CZTS tabanlı ince film güneş hücrelerinde kullanılması ile ilgili araştırmalar gün geçtikçe artmaktadır.

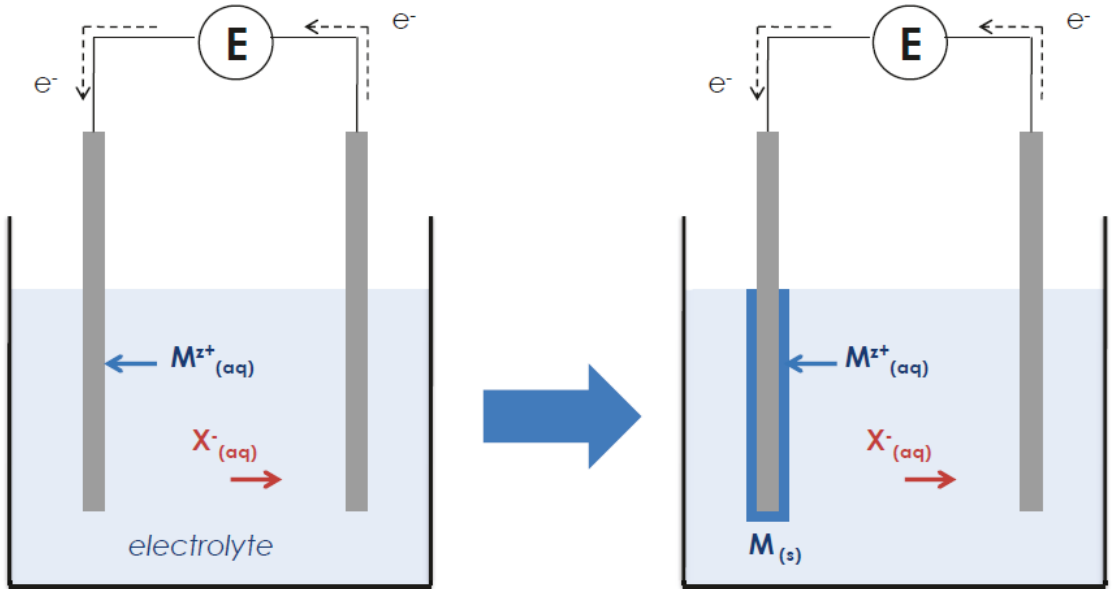
## 2.7. Elektrokimyasal Biriktirme

Metallerin elektrolizle kaplanması bir yüzyıldan beri uygulanmaktadır. Bu yöntemin gelişmesi çoğunlukla sanatsal yollarla olmuştur. Bunun yanında elektro-kimyasal biriktirme yöntemi yarı iletken, süper iletken, polimer film gibi çok çeşitli malzemelerin filmlerinin elde edilmesinde kullanılmaktadır (Macdonald & Schmuki, 2007).

Elektro-kimyasal biriktirme tekniğinin temel avantajlarından bazıları şunlardır:

- Düzensiz şekilli yüzeylerin yanı sıra geniş alanlarda da film büyötmek mümkündür.
- Kompozit olarak modüle edilmiş yapılar veya alaşımlar elektroliz edilebilir.
- Çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir.
- Özellikle maliyet, yüksek verim ve ölçeklenebilirlik açısından caziptir.

Elektrokimyasal biriktirme metalik aynaların ve korozyona dayanıklı yüzeylerin hazırlanmasında da kullanılmıştır. En basit şekliyle elektrodepozisyon, metal iyonları içeren bir elektrolitten, üzerinde biriktirmenin istendiği bir elektrot veya altlık ve bir karşı elektrottan oluşur. Bir elektrolit içinden bir akım geçtiğinde, katyonlar ve anyonlar sırasıyla katoda ve anoda doğru hareket eder ve bir yük aktarma reaksiyonundan sonra elektrot üzerinde birikirler (Şekil 2.8.). Elektrokimyasal biriktirmenin keşfi, Michael Faraday ve onun ünlü elektroliz yasalarına kadar uzanmaktadır.



Şekil 2.8. İki elektrotlu elektrokimyasal hücrede yükseltgenme (Vauche, 2016)

### 2.7.1. Faraday Yasaları

Elektrokimyasal biriktirme sürecinin arka planında, Faraday'ın elektrik miktarına bağlı reaksiyona girmiş malzemenin kütlesini birbirine bağlayan yasaları vardır. Faraday'ın birinci ve ikinci elektroliz yasaları, bir elektrotta biriken bir maddenin miktarının, kullanılan elektrik miktarıyla orantılı olduğunu belirtir. Faraday yasaları şu şekilde yazılabilir (Macdonald & Schmuki, 2007):

$$Q = I \cdot \Delta t = z \cdot n \cdot F \quad (8)$$

Bu eşitlikte Q kulomb (C) cinsinden yük miktarı, I Amper (A) cinsinden akım, t saniye (s) olarak zaman, z biriken iyonun yükü veya yükseltgenme durumundaki değişim, n mol (mol) olarak biriken metalin miktarı ve F Faraday sabitidir (1 mol tarafından taşınan elektrik yükü miktarına karşılık gelen 96485 C.mol<sup>-1</sup>'dir). Kaplanan ince filmin kalınlığı e, aşağıdaki şekilde elde edilebilir (Macdonald & Schmuki, 2007).

$$t = \frac{m}{\rho \cdot A} = \frac{M \cdot n}{\rho \cdot A} = \frac{M}{\rho \cdot A} \cdot \frac{I \cdot \Delta t}{z \cdot F} \quad (9)$$

Yukarıdaki eşitlikte m gram (g) cinsinden kaplanan ince filmin kütlesi, ρ birim hacimdeki kütle miktarı (g/m<sup>3</sup>) olan metalin kütle yoğunluğu, A m<sup>2</sup> cinsinden kaplama alanı ve M atom kütlesi (g/mol). Faraday'ın yasaları, ideal bir durumda elektrokimyasal biriktirmenin teorik bir yaklaşımını verir. Ancak, uygulamalarda, elektronlar veya iyonlar istenmeyen reaksiyonlara katıldığı zaman, kayıplar meydana gelebilir. Elektrokimyasal biriktirme sürecine katkıda bulunmayan akım kayıp sayılır. Bu kayıplar ısı ve / veya kimyasal yan ürünler şeklinde olabilir. Mevcut verimlilik η, istenen kimyasal reaksiyonu sağlayan bir elektrolitik hücrenin (veya bir elektrotun) içinden geçen akımın, genellikle yüzde olarak ifade edilen oranıdır.

$$\eta = \frac{m_{kap}}{m_F} \times 100 \quad (10)$$

Bu eşitlikte  $m_{kap}$  kaplanan metalin kütlesini ve  $m_F$  yan reaksiyonların olmadığı durumda Faraday yasalarından beklenen kütle miktarıdır (Macdonald & Schmuki, 2007).

Basit bir elektro-kimyasal biriktirme sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşur:

### 2.7.2. Elektrolit

Elektrolit iyonların elektro-kimyasal olarak birikmesini sağlar. Elektriksel olarak iletken olması gerekir, sulu, susuz veya erimiş olabilir; ve uygun metal tuzları içermesi gerekir. Bazen elektro-kimyasal biriktirmenin kalitesini arttırmak için katkı maddesi eklenebilir. Katkı maddesi filme dahil olmasa bile, yapışma, yüzey kalitesi, homojenlik vb. gibi özellikleri artırabilir (Macdonald & Schmuki, 2007).

### 2.7.3. Elektrotlar

En az iki elektrot (katot ve anot) gereklidir. Bu elektrotlar boyunca uygulanan bir elektrik alan, iyonlar için ana itici gücü sağlar. Pozitif ve negatif iyonlar, sırasıyla katot ve anotta birikir. Katodik biriktirme elektro-kimyasal biriktirmede daha popülerdir.

Her iki elektrotun Helmholtz katmanında bilinmeyen etkilerden kaçınmak için, uygulanan potansiyeller her zaman referansa göre belirlenmelidir. Bu, iki elektrot - elektrolit ara yüzünden birinin sabit tutulması gerektiği anlamına gelir. Bu, sabit bir potansiyel farkına sahip bir redoks çifti içeren, iyi tanımlanmış bir sistem olan referans elektrotu (RE) kullanılarak elde edilebilir. Böyle bir referans elektrotu tipik olarak kendi içinde bulunur ve elektriksel olarak yalnızca bir tuz köprüsü yoluyla elektrokimyasal sisteme bağlanır. Redoks çiftinde bir değişikliği önlemek için, bu referans elektrotundan yüksek akımların geçmemesi için özen gösterilmelidir. Yüksek akımlar, elektrokimyasal biriktirme için oldukça normal ve gerekli olduğundan, bu referans elektrot, elektrokimyasal hücrede ikinci elektrotun yerine geçemez, ancak üçüncü bir elektrot olarak sokulması gerekir (Gerischer, 1962; Frumkin, 1963).

### 2.7.4 Güç Kaynağı

Güç kaynağı;

1. Sabit DC voltaj olabilir, bu da potansiyostatik birikime yol açar,
2. Sabit DC akım olabilir, bu da Galvanostatik birikime yol açar veya
3. Değişik dalga formunda ve puls şeklinde akım veya gerilim olabilir.

Elektro-kimyasal biriktirme, aşağıdaki gibi açıklanabilir. Bir elektrik alan uygulanmasında,  $M^{n+}$  katoda geçer ve kimyasal eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir (Bockris & Reddy, 1973).



Eğer elektrolit aynı anda biriktirilebilecek birden fazla tür içeriyorsa, elektro-kimyasal biriktirme aşağıdaki gibi olur;



veya



Yukarıdaki kimyasal eşitlikte de görüldüğü gibi çok bileşenli bir bileşiği veya alaşımı elektro-kimyasal biriktirme yöntemi ile biriktirebiliriz (Bockris & Reddy, 1973).

Elektro-kimyasal biriktirme sürecinde, elektrolitteki iyonik konsantrasyon azalacağından tuz ilave edilerek veya karşıt elektrot korozyona uğratılarak elektrolitteki iyonların konsantrasyonu sabit tutulabilir.

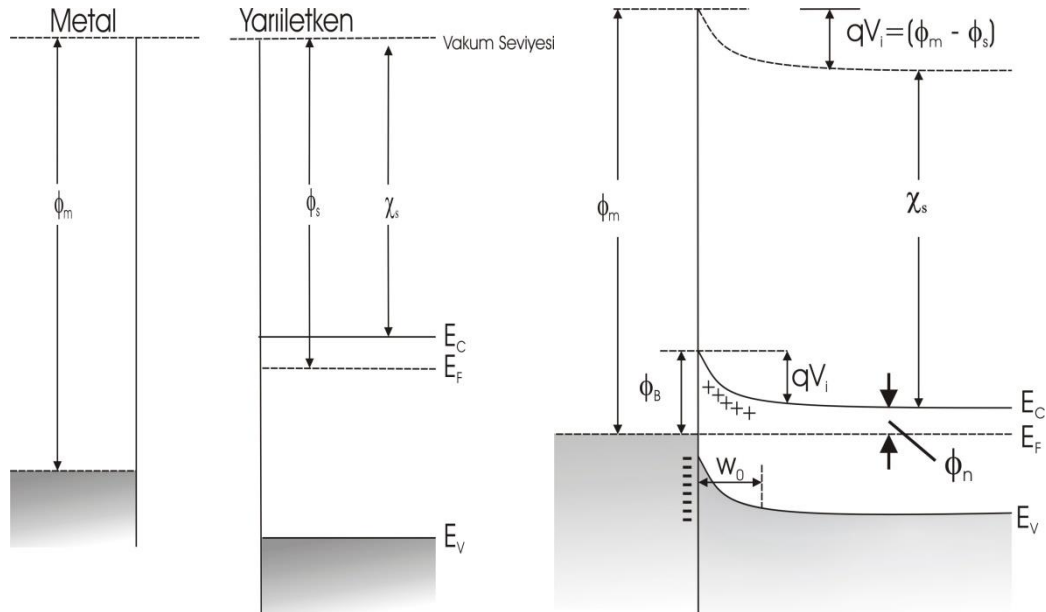
İyonların yük transferi veya elektro-kimyasal biriktirme aşağıdaki sırayla gerçekleşir,

- İyonik türler, birikmenin meydana geleceği altlığın olduğu elektroda doğru hareket eder. Bu bölge reaktif bölge olarak kabul edilir.
- Hareketli iyonik türler elektron transferi yapmadan elektroda ulaştıklarında ön yerleşme yeri veya dış Helmholtz düzlemi olarak adlandırılan arayüzeyde yük transferi yaparlar. Bu bölge yük transfer bölgesi olarak kabul edilir.
- Elektrotta yük aktarımı tamamlanır ve elektrodepzisyon gerçekleşir.

Butler-Volmer modeline göre, biriken iyonların yük aktarımı yalnızca sonuncunun dış Helmholtz düzlemine ulaştığı zaman gerçekleştiği kabul edilmektedir. Yük aktarma reaksiyon hızı hesaplanırken, iyonların yük aktarma reaksiyonu tarafından tüketilme hızlarının dış Helmholtz düzlemine ulaştığı hıza eşit olduğu varsayılmaktadır. Yük aktarma bölgesinde veya ön reaksiyon bölgesinde iyonlar, elektrotta yük transferi yaparak elektrolitten elektroda aktarılır. Eğer yük aktarma hızı iyonların taşıma hızından büyükse, arayüz bölgesinde iyonik tür kalmaz. Öte yandan, iyonların hareketi çok daha hızlı ise, bu, arayüz bölgesinde iyonların birikmesine yol açacaktır. İyonların aktarım akısı ve yük aktarma akısı arasındaki bu eşitsizlik, konsantrasyon polarizasyonuna veya aşırı potansiyele neden olur (Gerischer, 1962; Bockris & Reddy, 1973).

## 2.8. Mott-Schottky Teorisi

Şekil 2.9a'da., n tipi bir yarı iletkenle bir metalin enerji bandı diyagramı görülmektedir. Metal iş fonksiyonunun  $\phi_m$  yarı iletken iş fonksiyonundan farklı olduğu ( $\phi_m > \phi_s$ ) görülmektedir. İş fonksiyonu, Fermi seviyesi ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı olarak tanımlanır. Ayrıca, iletken bant kenarı ile yarı iletkendeki vakum seviyesi arasındaki enerji farkı elektron ilgisi  $\chi$  olarak tanımlanır. Metal yarı iletkenle temas ettirildiğinde, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri termal dengede eşitlenir. Aynı zamanda vakum seviyesi sürekli olmalıdır. Bu iki durum sağlandığında Şekil 2.9b'de gösterildiği gibi ideal metal-yarı iletken eklemine enerji bandı diyagramı oluşur (Sharma, 1984).

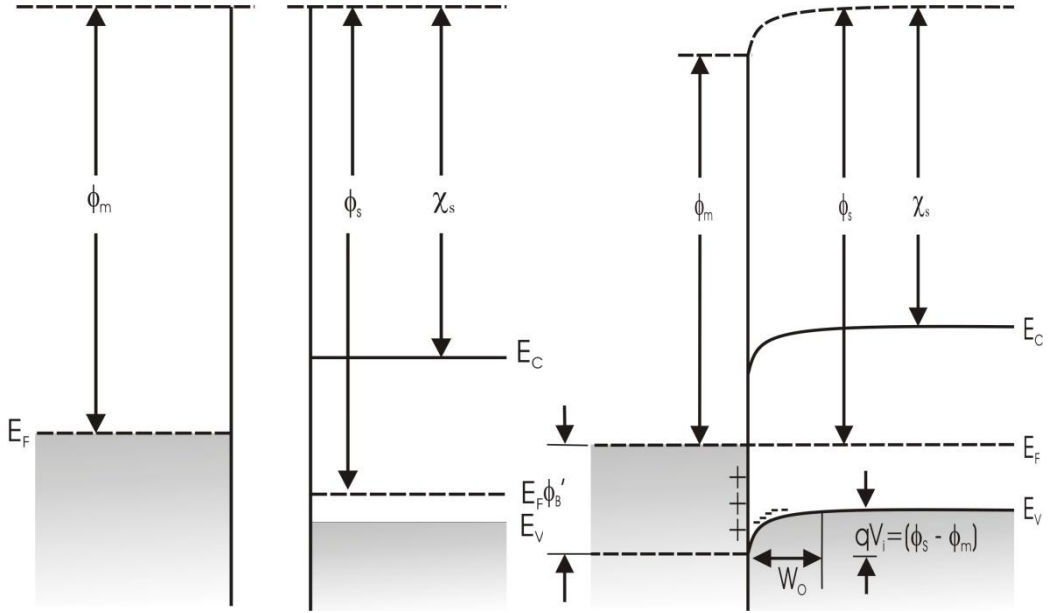


Şekil 2.9. Metal ve n-tipi yarıiletkenin eklem olmadan ve eklem olduktan sonraki enerji band yapıları.

Bu ideal durumda; bariyer yüksekliği  $\phi_B$ , metal iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisi arasındaki farktır.

$$\phi_B = \phi_m - \chi_s \quad (15)$$

Benzer şekilde, metal ve p-tipi yarıiletken arasında oluşan ideal eklem (Şekil 2.10) içinde bariyer yüksekliği hesaplanabilir. Burada metalin iş fonksiyonu p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olmalıdır.



Şekil 2.10. Metal ve p-tipi yarıiletkenin eklem olmadan ve eklem olduktan sonraki enerji bant yapıları.

Bu durumda p-tipi yarıiletken ile metal arasında oluşan bariyer yüksekliği aşağıdaki gibi olur.

$$\phi'_B = E_g - (\phi_m - \chi) \quad (16)$$

Eşitlikte  $E_g$  yarıiletkenin bant aralığıdır. Herhangi bir metalin verilen bir yarıiletkenin n-tipi ve p-tipi ile yaptığı eklemlerin bariyer yüksekliklerinin toplamı o yarıiletkenin yasak enerji aralığını verir (Tyagi, 1991).



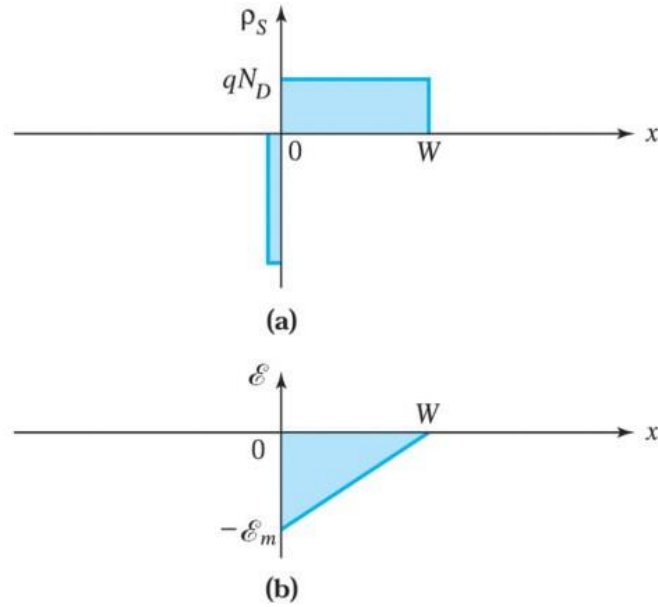
$$\phi_B + \phi'_B = E_g \quad (17)$$

Şekil 2.9 ve Şekil 2.10'da görülen  $qV_i$  eklem potansiyel farkı veya eklem yapı potansiyeli olarak tanımlanır ve yarı iletken den metale geçen elektronların geçmesi gereken potansiyel bariyeridir.

$$qV_i = \phi_B - \phi_n \quad (18)$$

Son eşitlikte  $\phi_n (=E_c - E_F)$ , Fermi seviyesinin yasak bandın ne kadar içerisinde olduğunu ve  $q$  elektron yükünü ifade etmektedir (Sharma 1984). Benzer sonuçlar p-tipi yarıiletken içinde yazılabilir.

Metal yarı iletken bir eklem için yük ve alan dağılımları sırasıyla Şekil 2.11a ve 2.11b'de gösterilmektedir. Metalin mükemmel bir iletken olduğu ve yarı iletken den metale aktarılan yüklerin metal yüzeyinde çok dar bir bölgede bulunduğu göz önüne alınmıştır (Sze, 1981).



Şekil 2.11. Metal yarı iletken bir eklem için a) yük ve b) alan dağılımları

$W$ , yarıiletkendeki uzay yük bölgesinin genişliğidir ve  $x < W$  için  $\rho_s = qN_D$  olmakta iken  $x > W$  için  $\rho_s = 0$  olduğu şekilde de görülmektedir. Böylece yük dağılımı, doğrultucu p<sup>+</sup>-n eklemi ile aynıdır.

Elektrik alanın maksimum değeri arayüzeyde almakta ve büyüklüğü mesafe ile doğrusal olarak azalmaktadır. Elektrik alan dağılımı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$|E(x)| = \frac{qN_D}{\epsilon_s}(W - x) = E_m - \frac{qN_D}{\epsilon_s}x \quad (19)$$

$$E_m = \frac{qN_D W}{\epsilon_s} \quad (20)$$

Yukarıdaki eşitliklerde  $\epsilon_s$  yarıiletkenin dielektrik geçirgenliğidir. Şekilde?’deki alan Elektrik alan eğrisinin altındaki alanla temsil edilen uzay yük bölgesi boyunca potansiyel;

$$V_i - V = \frac{E_m W}{2} = \frac{qN_D W^2}{2\epsilon_s} \quad (21)$$

Eşitliği ile verilir. Tükenim bölgesi genişliği de aşağıdaki gibidir.

$$W = (2\epsilon_s (V_i - V)/qN_D)^{1/2} \quad (22)$$

Yukarıdaki eşitlik kullanılarak yarıiletkendeki uzay yük yoğunluğu  $Q_{SC}$ ,

$$Q_{SC} = qN_D W = (2q\epsilon_s N_D (V_i - V)/qN_D)^{1/2} \quad (23)$$

elde edilir. Bu eşitlikte  $V$  ileri beslemede  $V_F$ ’ye veya geri beslemede  $-V_R$  eşit olur. Eşitlik 23’ten birim alan başına tükenim bölgesi kapasitansı hesaplanabilir.

$$C = \left| \frac{\partial Q_{SC}}{\partial V} \right| = \left( \frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_i - V)} \right)^{1/2} = \frac{\epsilon_s}{W} F / cm^2 \quad (24)$$

$$\boxed{\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_i - V)}{q\epsilon_s N_D} (F / cm^2)^{-2}} \quad (25)$$

Eşitlik 25'ten görüldüğü gibi  $1/C^2$ 'nin uygulanan potansiyele değişiminden katkı konsantrasyonunu ve taşıyıcı yük yoğunluğu bulunabilir.

$$N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[ \frac{-1}{d(1/C^2)/dV} \right] \quad (26)$$

Tükenim bölgesi boyunca taşıyıcı yoğunluğu  $N_D$  sabitse  $1/C^2$ 'nin uygulanan potansiyele göre grafiği düz bir doğru olur ve doğrunun uygulanan potansiyel eksenini kestiği potansiyelde yapı potansiyelini verir (Sze, 1981).

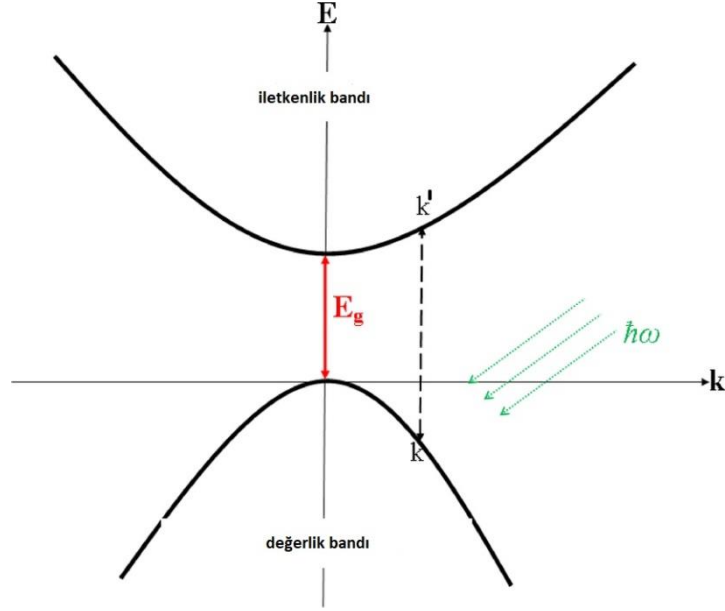
## 2.9. Yarıiletkenlerde Foton Soğurulması

Elektron-boşluk çiftinin güneş ışığının soğurulması ile oluşturulması güneş pillerinin çalışma prensibinin temelini oluşturur. Değerlik bandındaki elektronun iletkenlik bandına uyarılmasına "temel uyarılma" denir. Üst banda geçen elektron arkasında boşluk bırakır. Soğurma olayında ise bütün parçacıklar toplam enerji ve momentumu korunmalıdır. Bir fotonun momentumunu  $P_f = h/\lambda$  ile, kristalin momentumunu  $P_k = h/l$  olduğundan, fotonun momentumu kristal momentumundan çok küçük küçüktür. Fotonun enerjisi temel enerji seviyesinden ( $E_1$ ) uyarılmış enerji seviyesine ( $E_2$ ) geçme olasılığı  $p_{12}$  olarak adlandırılmaktadır. Temel durumda sahip olunan elektron yoğunluğu  $g_d(E_1)$ , uyarılmış seviyedeki  $g_i(E_2)$  ile doğru orantılıdır. İki seviye arasındaki bütün geçişlerin toplamı aşağıda verilmiştir (Pankove, 1971);

$$\alpha(h\nu)K \propto \sum p_{12} g_i(E_2)g_d(E_1) \quad (27)$$

Soğurma olayında değerlikten iletkenlik bandına uyarılan elektronun gerisinde bir boşluk bırakır. Bu yüzden elektron-boşluk çifti meydana gelir. Eşitlik 27'de değerlik bandındaki seviyelerin dolu, iletim bandındaki seviyelerin boş varsayılmıştır.

ZnS gibi yarı iletkenlerin soğurulması Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Foton soğurulduğunda elektronun iletkenlik bandına geçişinde hem momentum hem de enerji korunur. Bu durumda ilk durumun kristal momentumu  $P_1$ , son durumun kristal momentumuna eşittir.



Şekil 2.12. Doğrudan geçişli bant aralıklı yarıiletkenlerin foton soğurulması

Enerji korunduğu için soğurulan foton enerjisi (Pankove, 1971);

$$h\nu = E_2 - E_1 > E_g \quad (28)$$

şeklinde yazılabilir. Bantların parabolik olduğu düşünülürse,

$$E_d - E_1 = \frac{p^2}{2m_p^*} \quad (29)$$

$$E_2 - E_i = \frac{p^2}{2m_n^*} \quad (30)$$

bağıntıları yazılabilir. Eşitlik 29 ve 30 kullanılarak aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$h\nu - E_g = \frac{p^2}{2} \left( \frac{1}{m_p^*} + \frac{1}{m_n^*} \right) \quad (31)$$

Doğrudan geçişlerde soğurma katsayısı;

$$\alpha(h\nu) \sim A^* (h\nu - E_g)^{1/2} \quad (32)$$

Eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte  $A^*$  bir sabittir.

### 3. MATERYAL ve YÖNTEM

Tezdeki deneysel çalışmalar kapsamlı olarak bu bölümde anlatılmaktadır. ZnS yarıiletken ince film,elektrokimyasal biriktirme tekniği kullanılarak kaplanmıştır. Üretim öncesi hazırlık ve üretim aşamaları verilmiştir. Ayrıca morfolojik, optik ve elektriksel özelliklerinin karakterizasyonu yapılmıştır.

#### 3.1. Çözelti ve Aftlıkların Hazırlanması

Deneyde kullanılan kimyasallar  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , LiCl ve  $Na_2S_2O_3$  Sigma-Aldrich'den sağlanmıştır. Kimyasalların saflığı %99'dan fazladır.

ITO kaplı cam 1x2 cm ebatında kesilmiştir, üzerinde herhangi bir parçacık kalmaması için ultra derecede saf su kullanılarak yıkanmıştır. Sonra sırası ile 10 dk asetonda, 10 dk isopropanolda, 10 dk'da saf suda ultrasonik titreştiricide (Şekil 3.1) temizlenip, hızlı bir şekilde kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Ana çözücü saf suyun Ph değeri 2 olarak ayarlanmıştır. Yapılan çalışmalarda elektrokimyasal ve depozisyonda kullanılan çözeltilerin Ph değeri hidroklorik asit kullanılarak istenen değere ulaşılmıştır. Kullanılan çözeltiler 25° C oda sıcaklığında, 50 ml hacme sahip çözeltilerde yapılmıştır.

ZnS ince filmin depozisyon çözeltilerinde 10 mM  $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ , 100 mM LiCl ve 10 mM  $Na_2S_2O_3$  bulunmaktadır. ZnS yarıiletken ince filmlerin elektrokimyasal karakterizasyonunda dönüşümlü voltmetri (CV) tekniği kullanılmıştır. Zn ve S elementleri için indirgenme potansiyelleri belirlenip ZnS yarıiletken ince filmlerin üretimi çeşitli depozisyon yöntemleri uygulanmıştır.



Şekil 3.1. Ultrasonik banyo

### 3.2. Elektrokimyasal Biriktirme Sistemi

Gamry Referans 3000 Potentiostat/Galvanostat cihazı kullanılarak deneysel çalışmalar yapılmıştır. ‘‘PHE200 fiziksel elektrokimya yazılımı’’ ile karakterizasyon ve kaplama deneylerinin kontrolleri yapılmaktadır. Çalışmada kullanılan sistemde potentiostat/galvanostat, elektrokimyasal hücre ve deneysel çalışmaların kontrol edildiği ve verilerin işlenip kaydedildiği bilgisayardan oluşmaktadır (Şekil 3.2.).



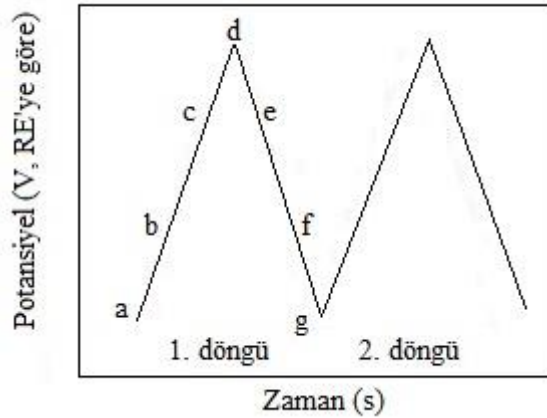
Şekil 3.2. Elektrokimyasal biriktirme sistemi.

Kurulan sistemde çalışma elektrodu olarak kalay oksit (indium tin oxide, ITO) iletken camlar ( $7-10 \Omega \text{ cm}^{-2}$ ), Ag/AgCl referans elektrot olarak ve platin tel karşıt elektrot olarak kullanılmıştır. Çalışma elektrodu katot, karşıt elektrot anot olmaktadır. Elektrokimyasal biriktirme sisteminde çalışma ve karşıt elektrotlara çeşitli potansiyeller uygulanıp referans elektrot ile çalışma elektrotundaki potansiyel kontrol edilerek çalışma ve karşıt elektrotlar arasındaki akım kaydedilir.

Çalışma elektrotunun yüzey alanı  $1 \times 1 \text{ cm}$ , çalışma ve referans elektrotun arasındaki mesafe  $1,5 \text{ cm}$ , referans ve karşıt elektrot arasındaki mesafe  $2 \text{ cm}$  olarak ölçülmüştür.

### 3.3. Dönüşümlü Voltmetri

Döngüsel voltametri genellikle çözeltilerdeki kimyasalların elektrokimyasal özelliklerini incelemek için kullanılır. Elektrokimyasal hücrede potansiyelin belli bir aralıkta döngüsel olarak taranıp meydana gelen akımın ölçüldüğü tekniğe dönüşümlü voltametri denir. Burada çalışma elektrot voltajı döngüsel değiştirilerek, akım ölçülür. Çalışma elektrodunun potansiyeli ise sabit potansiyelli referans elektrota göre olur. Uygulanan potansiyelin elektriksel sinyali Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Şekle göre negatif yöndeki taramada potansiyel (a) gibi büyük bir değerden başlar; d gibi daha düşük değerde sonlanır. Bir iyonun yükseltgenmesi veya indirgenmesinde pik noktadaki d potansiyeli uygun bir potansiyel değeridir ve dönüşüm potansiyeli olarak bilinir. Ters yönde olan taramada pozitif yöndeki taramadaki d'den g'ye Şekil 3.3.'deki gibi gerçekleşir. Sonuç olarak a'dan d'ye indirim, d'den g'ye yükseltgenme olur.



Şekil 3.3. Dönüşümlü voltmetri potansiyel sinyali

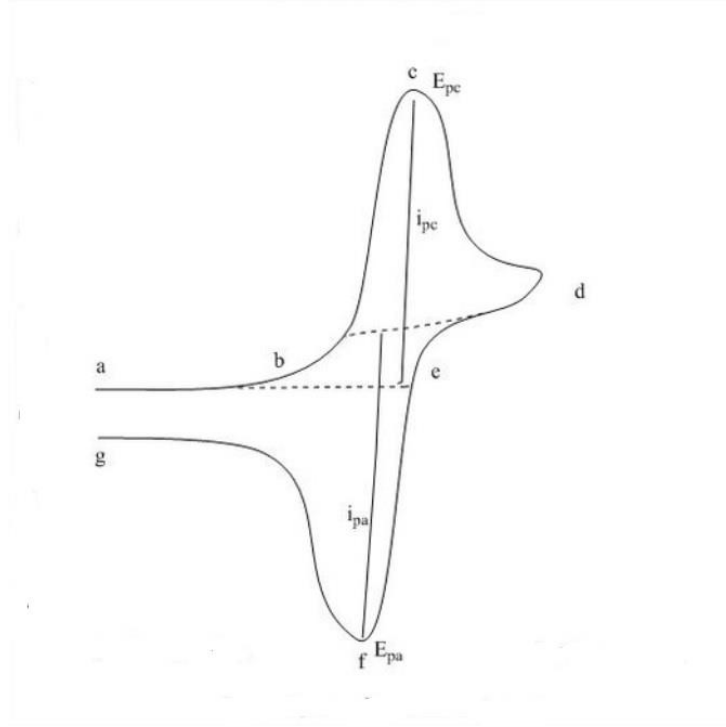
Pozitif potansiyel ile başlandığında iyonlardan bazıları yükseltgenmeye maruz kalabilir. Oluşan döngü sürekli olabilir, taramanın hızı da ayarlanabilir. Uyarma sinyalinin eğiminden tarama hızı hesaplanır. Çalışma elektrotunun tarama boyunca akımının ölçülmesi ile dönüşümlü voltametri elde edilir.

Şekil 3.4'de bir elektronun indirgenmesi, yükseltgenmesi sonucu elde edilen dönüşümlü voltmetri gösterilmiştir. Şekle bakıldığında başlangıç potansiyeli a'dan, manevra potansiyeli d'ye doğru gerçekleştiği görülmektedir. İndirgenmenin olması için bölge negatif yönde taranmaktadır. Oluşan akıma katodik akım denilir. C noktasında eş potansiyel pik oluşur,  $E_{pc}$  katodik pike ait potansiyeli tanımlar. Elektrot yüzeyindeki iyonun tamamı indirgenince  $E_{pc}$ 'ye ulaşılmaktadır. Dönüşüm potansiyeli d'ye ulaşınca, d' den g'ye tarama pozitif yönde olur.



Bunun sonunda anodik akım ve beraberinde yükseltgenme meydana gelir. f potansiyel piki,  $E_{pa}$  anodik pikin potansiyelidir. Elektron yüzeyindeki iyonun tamamı yükseltgenince  $E_{pa}$  olur.  $E_{pc}$  ile  $E_{pa}$  arasındaki ilişki aşağıdaki gibi gösterilmektedir (Yıldırım, 2017).

$$E_{pa} - E_{pc} = \frac{0,059}{n} \quad (33)$$



**Şekil 3.4.**Dönüşümlü voltmetri

Anodik ile katodik yönde oluşan pik akımları 25° C Nerst denklemi kullanılarak hesaplanabilir (Kissinger, 1983)

$$i_p = (2,69 \times 10^{15}) n^{1/2} \cdot A \cdot D^{1/2} \cdot C \cdot v^{1/2} \quad (34)$$

Eşitlikteki  $i_p$  pik akımını (Amper cinsinden),  $n$  değeri elektron miktarını,  $A$  elektrot alanı ( $\text{cm}^2$  cinsinden),  $D$  difüzyon katsayısını ( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) cinsinden,  $C$  molar konsantrasyonunu ( $\text{mol}/\text{cm}^3$  cinsinden),  $v$  tarama hızını ( $\text{V}/\text{s}$  cinsinden) ifade etmektedir.

Tez çalışmasında yapılan dönüşümlü voltmetri analizlerinde tarama hızı 20Mv/s değeri ile önce katodik sonra anodik yönde taranmıştır, CV sonuçları kaydedilmiştir.

### 3.4. Optik Özelliklerin Belirlenmesi

Yarıiletken malzemelerin optik ölçüm sonuçlarından faydalanılarak belirlenen en önemli parametresi yasak enerji aralığıdır. Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığının direkt olarak belirlenmesinde belki de en basit yöntem temel soğurma spektrumunun ölçülmesidir. Enerjisi bilinen bir foton tarafından elektronun valans bandından iletim bandına uyarılması olarak adlandırılan ve soğurmanın keskin bir artış gösterdiği bölge temel soğurma bölgesi olarak tanımlanır. Temel soğurma bölgesinde, direkt ve indirekt bant geçişi olmak üzere iki tür geçiş olayı meydana gelebilir (Streetman, 1980). ZnS yarıiletkeninin direkt geçişli bant aralığına sahip olduğundan; gelen fotonun enerjisi ile  $E_g$  arasındaki ilişki;

$$n_0 \alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^2 \quad (35)$$

eşitliği ile verilir. Eşitlik 35 kullanılarak yasak enerji aralığı bulunur. Yarıiletken malzemenin yasak enerji aralığı, temel soğurma spektrumu kullanılarak çizilen  $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$  değişim grafiğinden belirlenir. Bu değişimin lineer kısmının doğrultusunun  $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri, yarıiletkenin yasak enerji aralığını vermektedir (Yıldırım, 2017).

Optik ölçüm sistemi Şekil 3.5.'de gösterilmiştir. Ölçümler PG-T60 UV-VIS spektrometre cihazı ile alınmıştır. Alınan optik ölçümler kullanılarak ZnS yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralığı hesaplanmıştır.

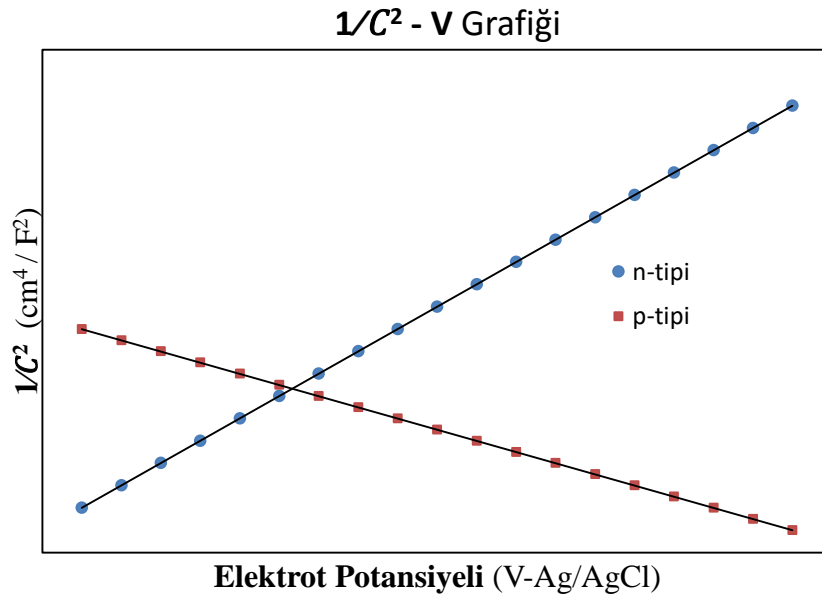


Şekil 3.5. Optik ölçüm sistemi

### 3.5. Mott- Schottky Analizi

Yarıiletkenlerin önemli parametrelerinden olan taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesi ile yarıiletkenin n-tipi veya p-tipi olduğu belirlenir. Ayrıca taşıyıcı yoğunluğu yarıiletkenin elektriksel özelliği açısından çok önemlidir. Taşıyıcı yoğunluğu, Hall-Etkisi yöntemi veya Kapasitans-Voltaj ölçümünden belirlenebilmektedir. Kapasitans-Voltaj karakteristiği, Mott-Schottky analizi olarak bilinmektedir. Elektrokimyasal biriktirme sisteminin avantajlarından biri, Mott-Schottky analizi yapılabilmesidir. Metal-yarıiletken eklem yani Schottky diyot yaklaşımı kullanılmaktadır. Burada elektrotlardan biri metal ve diğeri yarıiletken ince film olmakta ve ara yüzey olarak iletken çözelti kullanılmaktadır.

Mott-Schottky teorisinden elde edilen Eşitlik (26)'dan  $(N_D = \frac{2}{q\epsilon_s} \left[ \frac{-1}{d(1/C^2)/dV} \right])$  görüleceği üzere  $1/C^2$ 'nin uygulanan potansiyele göre grafiği doğrusal çıkacak olup, çizilen grafikten elde edilen doğrunun x-eksenini kestiği nokta eklem için iç potansiyeli (built-in potential) olan  $V_i$ 'yi vermektedir (Sze, 1981). Ayrıca grafikten elde edilen doğrunun eğimi kullanılarak ZnS yarıiletkenin katkı konsantrasyonu veya taşıyıcı konsantrasyonu elde edilir. Eşitlikteki  $N_D$  donör konsantrasyonudur, benzer hesaplama  $N_A$  akseptör konsantrasyonu için yapılabilir. Eğimin artı çıkması yarıiletkenin n-tipi olduğunu ve taşıyıcı konsantrasyonunun donör olduğunu, eğimin eksi çıkması ise yarıiletkenin p-tipi olduğunu ve taşıyıcı konsantrasyonunun akseptörler olduğunu gösterir (Şekil 3.6) .



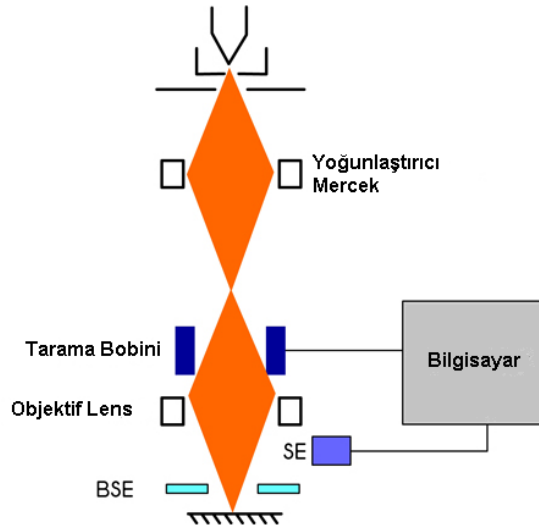
Şekil 3.6. n-tipi ve p-tipi yarıiletkenlerin Mott-Schottky eğrileri

### 3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu

Elektron demetinin yüksek gerilimle hızlandırılıp, örnek yüzeyinin taratılmasında örnekteki atom ve elektronlar arası etkinin algılayıcı tarafından toplanıp, sinyal güçlendiriciden geçmesinden sonra katot ışın tüpüne aktarılarak taramalı elektron mikroskobu(SEM) görüntüsü elde edilir. Elde edilen sinyaller dijitale çevrildikten sonra ekrana aktarılır. SEM'nun analiz ile görüntüyü birleştirmesi, odak derinliği, ayırım gücü gibi özellikleri cihazın avantajları arasındadır. Ayrıca kullanım kolaylığı, geniş bir aralıkta bilgi edinilebilmesi, fiyat uygunluğundan dolayı kullanışlıdır (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

SEM örneklerini 100 000 kat büyütülebilme gücüne sahip güçlü bir mikroskop olarak lif kesiti, kaplanmış yüzey karakterizasyonu, nano ölçekli katı malzeme analizinde kullanılmaktadır. Optik mikroskoplar da ise büyütme 1000 kattır ve ışık kırınımı çözünürlüğü sınırlamaktadır. Ayrıca ışık kırınımı 400 ile 700nm arasında olduğundan boyutları küçük nesnelere bazı özellikleri görünür ışıkta görünmemektedir (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

Dalga-parçacık özelliğine göre yüksek hızda hareket eden elektron kısa dalga boylu bir dalga özelliği de sergiler. Böylece kırınım çözünürlüğü iyi olan bir dalga elde edilecektir. Buna SEM ilkesi denir. Şekil 3.7.'de SEM'in basit şeması verilmiştir.



**Şekil 3.7.** Elektron tabancası, kondenser mercek, örnek, XY bobinleri, ikincil elektron detektörü, geri saçılmış elektron dedektörü, X ışını detektörü gösteren SEM şematik gösterimi (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

SEM, elektron tabancası, elektron ışını hareket ettiren XY bobin ve dedektör ile elektron ışınının boyutlarında elektron yoğunlaştırıcı mercekten oluşan bir sistemdir. Bununla birlikte “ikincil elektron detektörü” olarak bilinen elektron detektörü vardır. Ayrıca SEM'lerde genellikle “geri saçılan elektron detektörü” ile x-ışını detektörleri de bulunmaktadır (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

Elektron demetinde olan elektronlar, örnekteki atomlarla elastik olmayan çarpışma yaparak ikincil elektronları oluşturur. Yüzeyden 10nm derinlikte oluşup, enerjileri 50 eV değerindedir. Foto çoğaltıcı tüpte toplanıp, örneğin tarama sinyali ile konumu ilişkilendirilip yüzey görüntüsü meydana gelir (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

Oluşan diğer elektron grubu geri saçılma elektronlarıdır. 300nm derinlikten gelen yüksek enerjili elektronlardır. Yüksek enerjiden fotoçoğaltıcı tüp ile değil de katihal dedektörü ile tespit edilebilirler. Atom numarası büyük atomdan saçılan elektronların enerjisi de büyüktür (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

Karakteristik X ışınında, yüzeye çarpan elektron örnekteki atomun yörüngesinden bir elektron kopmasını sağlar. Enerji dengesini sağlamak için üst yörüngeden elektron gelip bu seviyeye geçer. Bu geçiş sırasında X ışını yayılır. Örneğin, 10mm<sup>2</sup> çaplı Si detektör ile algılanıp, sinyal yükselticiye oradan çok kanallı analizöre, oradan da SEM bilgisayarına gider. Sonuç olarak bu yöntem ile malzemenin nicel ve nitel olarak tespiti sağlanır.

Elektron tabancasında elektronları yayan tungsten filament bulunur. Pahalı olanlarında lantan heksaborat kullanılır. Sıcak filament termiyonik emisyonla elektron üretmektedir. Yüksek büyütme için alan emisyon tabancası adlı elektron kaynağı kullanılmaktadır. Bu modelde kaynak akım aracılığı ile ısıtılmamakta, bunun yerine elektronlar tungsten kristali ve zirkonyum oksitten oluşan kaynaktan elde edilmek için elektrik alan kullanılmaktadır. Elektronların sahip olduğu enerji 1-40keV arasında bir değerdir (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

Bütün elektronların yükü negatiftir. Böylece elektronlar birbirini itecek, bu itme elektronların çapını arttırıp çözünürlüğü bozacaktır. Bu yüzden ışını 5nm'den daha az çapa ulaştırmak için kullanılan bobinler yoğunlaştırıcı mercek bobinleridir (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

SEM’de elektron ışınının kullanımını optik mikroskoptan farklıdır. Işık mikroskobunda bütün örnek yanarken, SEM’de ise kiriş ile küçük bir nokta yanar. Işın “rasterleme” ile küçük adımlarla taşınır.

En uygun elektrik alanı uygulanarak, kirişte X ile Y yönünde hareket ettirilerek tüm örnek taranıp, analiz yapılır Burada elektron demetinin hareketini sağlamada kullanılan bobinler sapma bobini adını almıştır (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

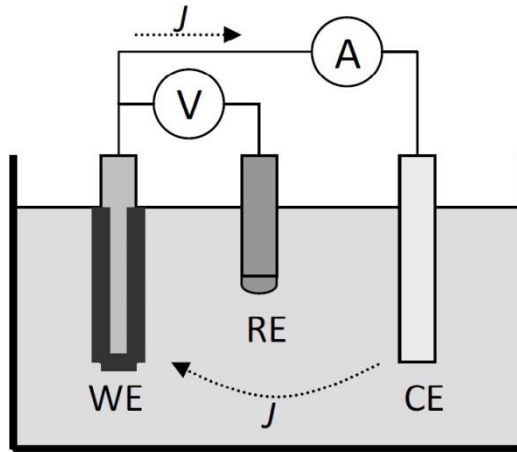
Elektron ışınları örneğe düşünce atomlarla etkileşime girip, elastik saçılma olur. Saçılma ile elektronlar yavaşlar. Atomlar enerjiyi emip iyonlaşır. Örnek atomdan gelen elektronların bazıları serbest kalacaktır. Bunlar “ikincil elektron” adını alır. Birincil elektronlara göre enerjisi (50 eV değerinden daha düşüktür.

Elektron ışını örnek yüzeyine düştüğünde elektronlar dağılıp, ışının çapı artar. Bu sebep ile baştan koni şeklinde yayılır ve yüzeyin altındaki bölgede inceler. Işın enerjisi derinlere indikçe azalır. İkincil elektron sayısı da azalır. Yüzeyde bulunan elektronlar kolayca kaçıp, detektöre ulaşır. Altan gelenler ise yüzeye çıkmadan yakalanmaktadır. Bu yüzden oluktan detektöre daha az ikincil elektron gelir. Genelde ikincil elektronlar yüzeyde üretilir. Sonuç olarak elektron ile örnek etkileşiminde ikincil elektronlar, X ışını ile geri saçılmış elektronlar açığa çıkabilir (Goldstein & ark., 2003; Zhou & Wang, 2007).

## 4. BULGULAR ve TARTIŞMA

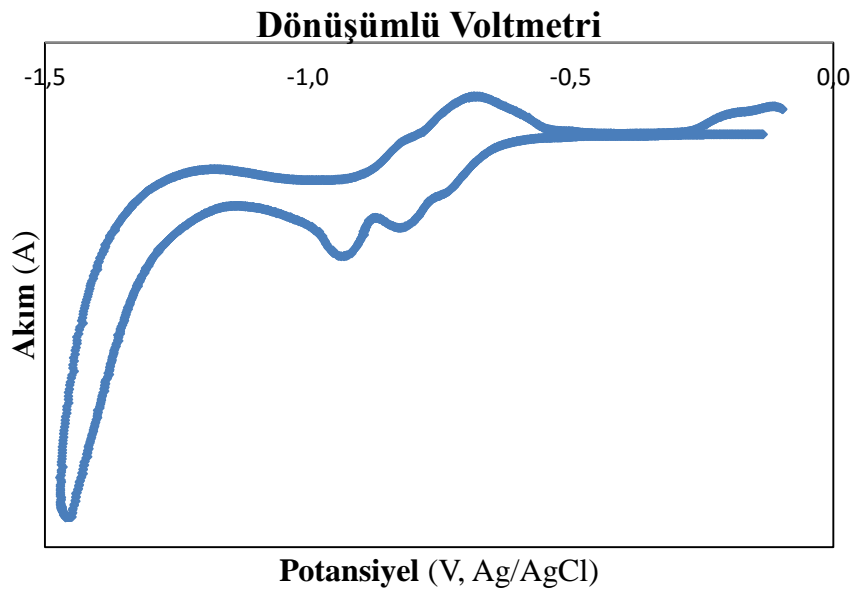
### 4.1. Dönüşümlü Voltmetri

Dönüşümlü voltmetri üç elektrotlu sistemle alınmıştır (Şekil 4.1.). Tarama  $20\text{mV/s}$ 'de  $0\text{ V}$ 'tan başlayarak  $-1,4\text{ V}$ 'tan döndürülmüştür.



Şekil 4.1. Üç elektrotlu hücre

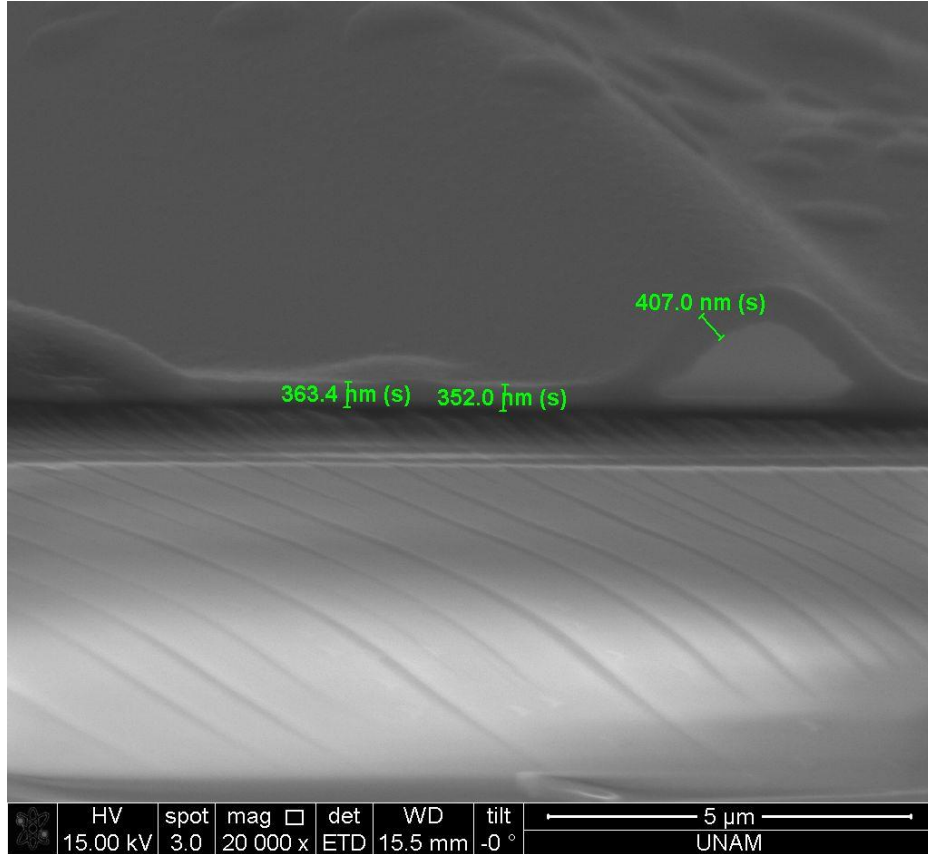
Dönüşümlü voltmetri ölçümlerinden çözeltide bulunan Zn ve S iyonlarının indirgenme potansiyelleri görülmektedir.  $-0,9\text{V}$  civarında S'ün indirgenmeleri olurken,  $-1,1\text{V}$ 'tan sonra Zn iyonunun indirgenmesi ağırlık kazanmaktadır. Dönüşüm voltmetri eğrisi incelenerek ZnS yarıiletken ince filmdeki Zn ve S miktarları ayarlanmaya çalışılmıştır.



Şekil 4.2. ZnS yarıiletkeni için hazırlanan çözeltinin dönüşümlü voltmetri eğrisi

## 4.2. n-tipi ZnS Yarıiletken İnce Filmin Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

n-tipi ZnS yarıiletken ince filmi 10 mM ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 100 mM LiCl ve 10 mM Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hazırlanan çözeltide -1,1V'ta 5dk biriktirilmiştir. Oluşan ZnS yarıiletken ince filmin kalınlığı SEM ölçümlerinden 374,14nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca SEM ölçümlerinden yüzey yapısının iyi olduğu görülmüştür.

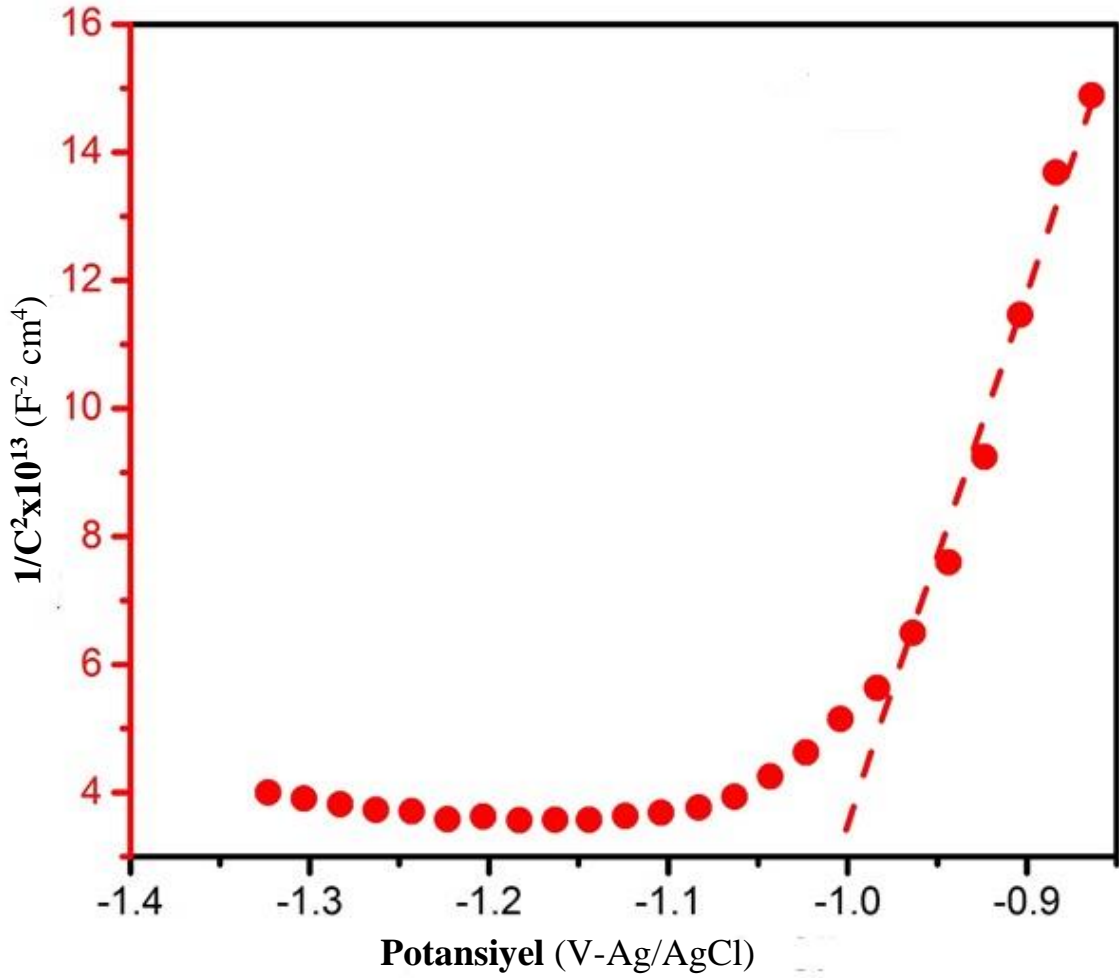


Şekil 4.3. n-tipi ZnS yarıiletken ince filmin SEM resmi.

Üretilen n-tipi ZnS yarıiletken ince filmin Mott-Schottky ölçümleri karanlıkta 0,1 M NaCl içeren sulu çözeltide 1000 kHz'lik sabit frekansta gerçekleştirildi. Şekil 4.4.'de görüldüğü gibi pozitif eğim, üretilen ZnS yarıiletken ince filminin n-tipi yarıiletken karakteristiği gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Hesaplamalarda Eşitlik 25 ve 26 kullanılmıştır. Eşitliklerde C yük kapasitansı, e elektronun yükü,  $\epsilon_0$  boş uzayın geçirgenliği ( $8.85 \times 10^{-14} \text{ Fcm}^{-1}$ ) ve  $\epsilon_r$  sentezlenen ZnS yarıiletken ince filminin dielektrik sabitidir. Literatüre bakıldığında (K.L. Chopra, 1964), oda sıcaklığında ZnS ince filminin dielektrik sabitini 4 olarak rapor etmiştir.



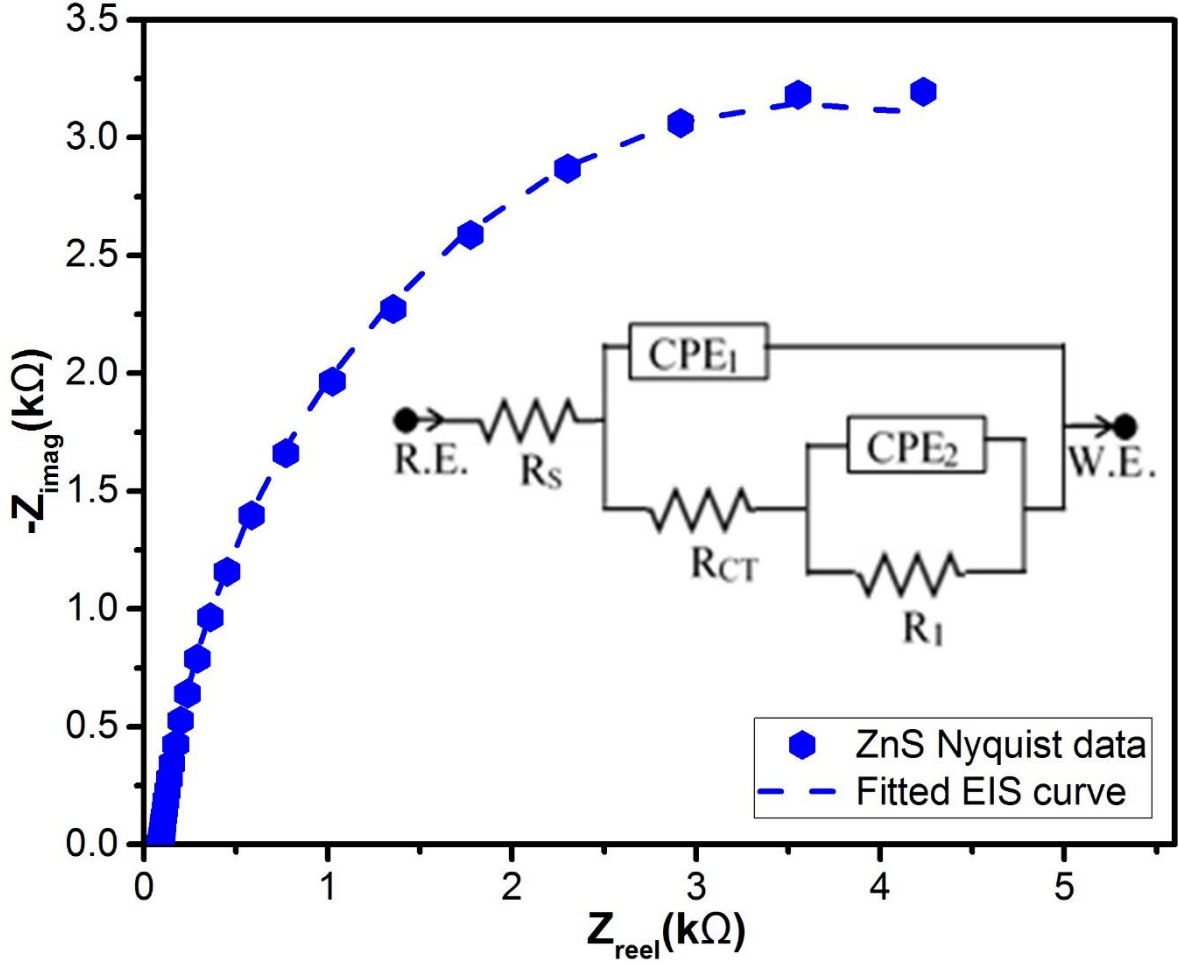
Yukarıdaki değerler ve grafikteki doğrunun eğimi Eşitlik 25 veya 26'da kullanılarak n-tipi ZnS yarıiletken ince filminin verici (donor) sayısı  $2,72 \times 10^{17} \text{ 1/cm}^3$  olarak hesaplanmıştır. ZnS ince filminin düz bant potansiyeli -1.29 V olarak bulunmuştur (MS yaklaşımına göre,  $1/C_2=0$  yapan değerden bulunmuştur).



Şekil 4.4. n-tipi ZnS yarıiletkenin Mott-Schottky eğrisi.

ZnS ince filminin Nyquist eğrisi Şekil 4.5'de görüldüğü gibidir. Ölçüm 0,2 Hz ile 300 kHz arasında alınmıştır. Nyquist verisine en uygun eşdeğer elektronik devre fit edilmiştir. Bu devre grafiğin üzerinde verildiği gibidir. Eşdeğer elektronik devrenin devre elemanları şu şekilde açıklanabilir:  $R_s$  çözelti direnci,  $R_{por}$  film yüzeyindeki porlu yani gözenekli yapıları temsil eden direnç, RCT elektrolit/ZnS ince film arayüzündeki yük transfer direnci ve CPE bileşenleri ise sabit faz elemanlarını temsil etmektedir. Eşdeğer elektronik devre elemanlarının

ZnS ince filminin Nyquist verisine fiti sonucu oluşmuş değerleri Tablo 1.'de verilmiştir.  $\chi^2$  yapılan fitin doğruluğunu göstermektedir ve bu değer  $10^{-4}$ 'ten küçük olduğunda, yapılan fitin çok iyi olduğu anlamına gelmektedir.

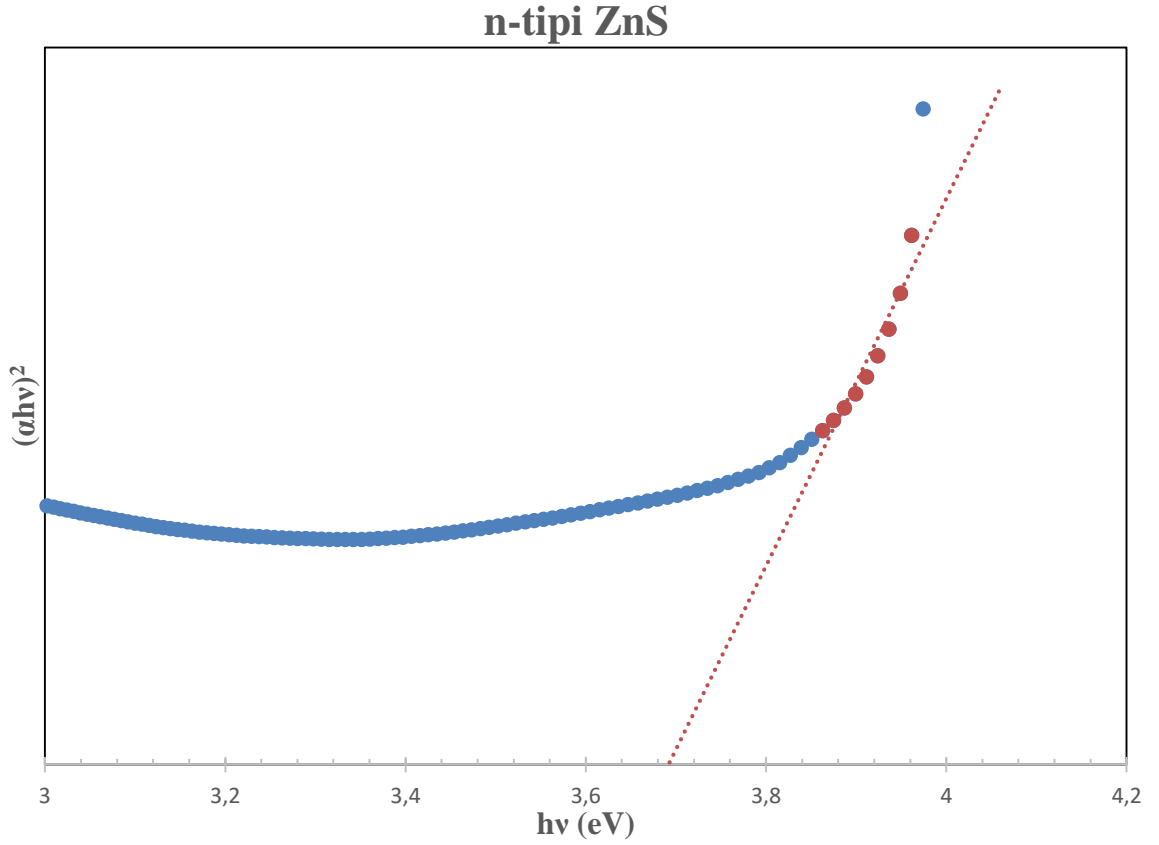


Şekil 4.5. n-tipi ZnS yarıiletkenin Nyquist eğrisi.

**Tablo 1.** Eşdeğer elektronik devre elamanlarının ZnS ince filminin Nyquist verisine fit sonuçları

Sentezlenen Film	$R_s$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{\text{pore}}$ ( $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{CT}$ ( $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ )	$CPE_c$ ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ ) $\alpha_1$	$CPE_{dl}$ ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ ) $\alpha_2$	$\chi^2 \times 10^{-4}$
n-tipi ZnS	752,9	6,065	269,0	13,81 0,637	61,03 0,496	4,84

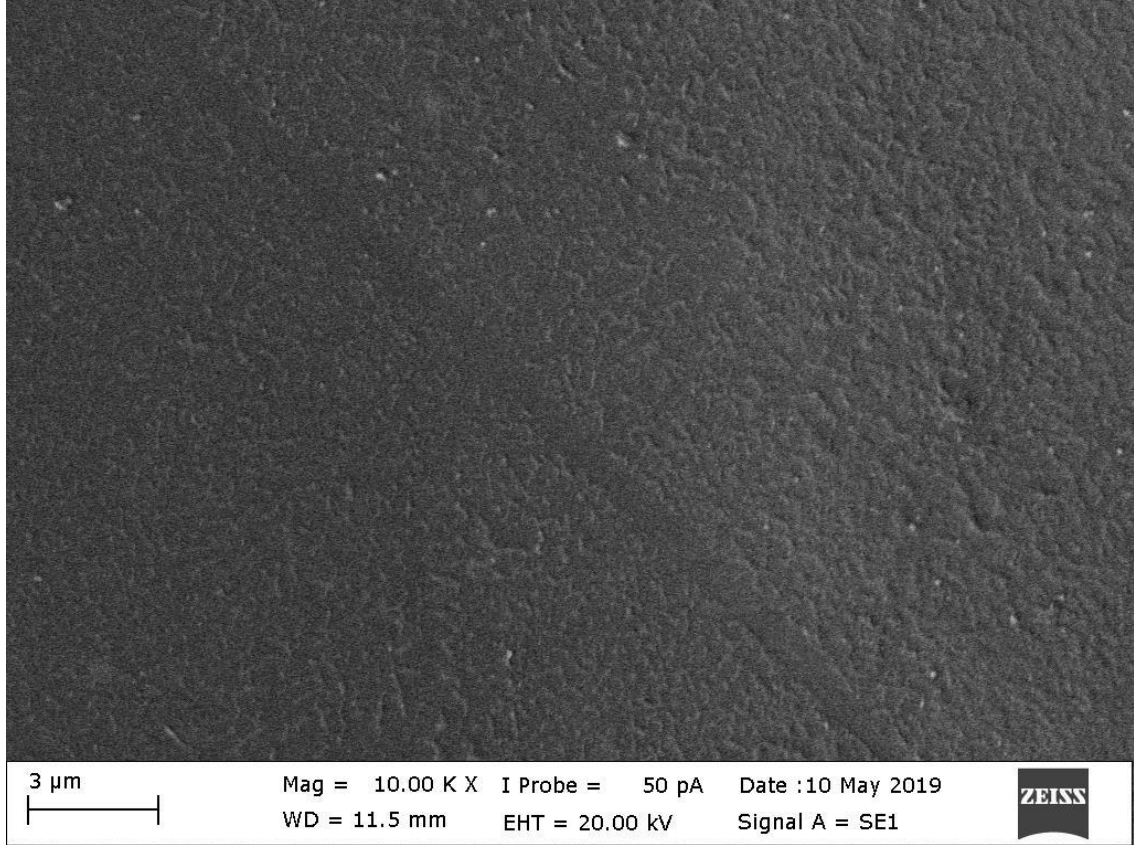
n-tipi ZnS yarıiletken ince filmlerin 200nm ile 900nm aralığında gerçekleştirilen optik soğurma spektrumundan elde edilen veriler kullanılarak çizilen Touch eğrisi Şekil 4.6'de görülmektedir. Doğrusal olan kısımdan elde yasak enerji aralığı değeri yaklaşık olarak 3,72eV olarak elde edilmiştir. Literatürde ZnS yarıiletkenin yasak enerji aralığı 3,5-3,7eV aralığına sahiptir.



Şekil 4.6.  $(\alpha hv)^2$ 'nin  $hv$ 'ye göre grafiği

### 4.3. p-tipi ZnS Yarıiletken İnce Filmin Büyütülmesi ve Karakterizasyonu

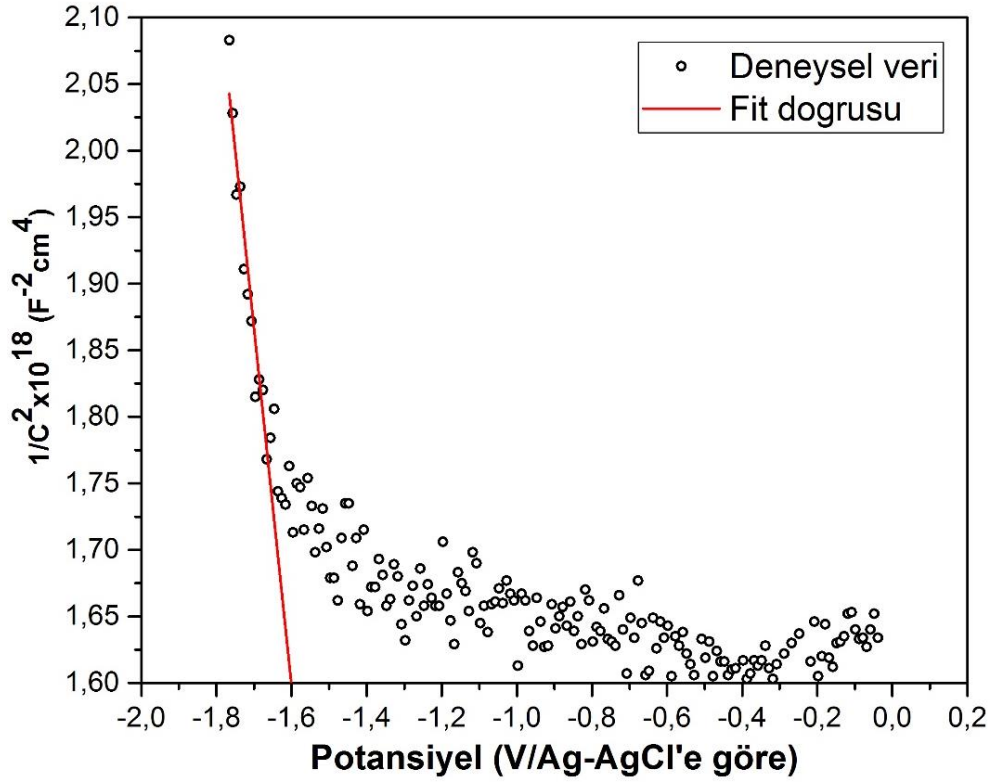
p-tipi ZnS yarıiletken ince filmi 10 mM ZnSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O, 100 mM LiCl ve 10 mM Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> hazırlanan çözeltide Zn için -1,35 V 200 s ve S için -0,5 V 180 s biriktirilmiştir. Oluşan ZnS yarıiletken ince filmin kalınlığı SEM ölçümlerinden 377nm olarak belirlenmiştir. Ayrıca SEM ölçümlerinden yüzey yapısının iyi olduğu görülmüştür (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. p-tipi ZnS yarıiletken ince filmin SEM resmi.

Üretilen p-tipi ZnS yarıiletken ince filmin Mott-Schottky ölçümleri karanlıkta 1 M NaCl içeren sulu çözeltide 20 kHz'lik sabit frekansta gerçekleştirildi. Şekil 4.8'de görüldüğü gibi negatif eğim, üretilen ZnS yarıiletken ince filminin p-tipi yarıiletken karakteristiği gösterdiğini açığa çıkarmıştır. Hesaplamalarda Eşitlik 25 ve 26 kullanılmıştır. Eşitliklerde C yük kapasitansı, e elektronun yükü,  $\epsilon_0$  boş uzayın geçirgenliği ( $8.85 \times 10^{-14} \text{ Fcm}^{-1}$ ) ve  $\epsilon_r$  sentezlenen ZnS yarıiletken ince filminin dielektrik sabitidir. Oda sıcaklığında ZnS ince filminin dielektrik sabiti 4 olarak alındı.

Yukarıdaki değerler ve grafikteki doğrunun eğimi Eşitlik 25 veya 26'da kullanılarak p-tipi ZnS yarıiletken ince filminin alıcı (akseptör) sayısı  $1,3 \times 10^{13} \text{ 1/cm}^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. ZnS ince filminin düz bant potansiyeli -1.04 V olarak bulunmuştur (MS yaklaşımına göre,  $1/C^2=0$  yapan değerden bulunmuştur).

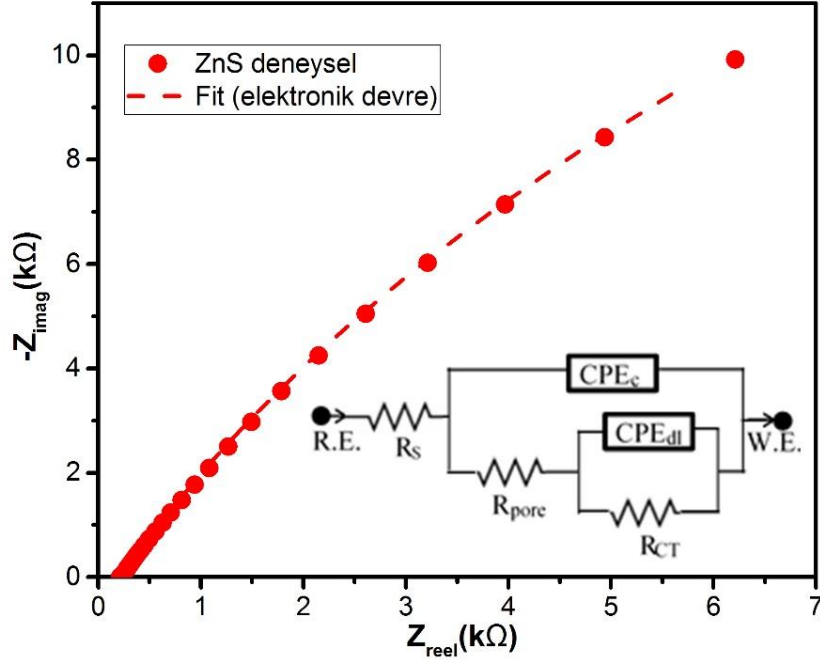


Şekil 4.8. p-tipi ZnS yarıiletkenin Mott-Schottky eğrisi.

ZnS ince filminin Nyquist eğrisi Şekil 4.9'de görüldüğü gibidir. Ölçüm 0,01 Hz ile 300 kHz arasında alınmıştır. Nyquist verisine en uygun eşdeğer elektronik devre fit edilmiştir. Bu devre grafiğin üzerinde verildiği gibidir. Eşdeğer elektronik devre elamanlarının ZnS ince filminin Nyquist verisine fiti sonucu oluşmuş değerleri Tablo 2.'de verilmiştir.  $\chi^2$  yapılan fitin doğruluğunu göstermektedir

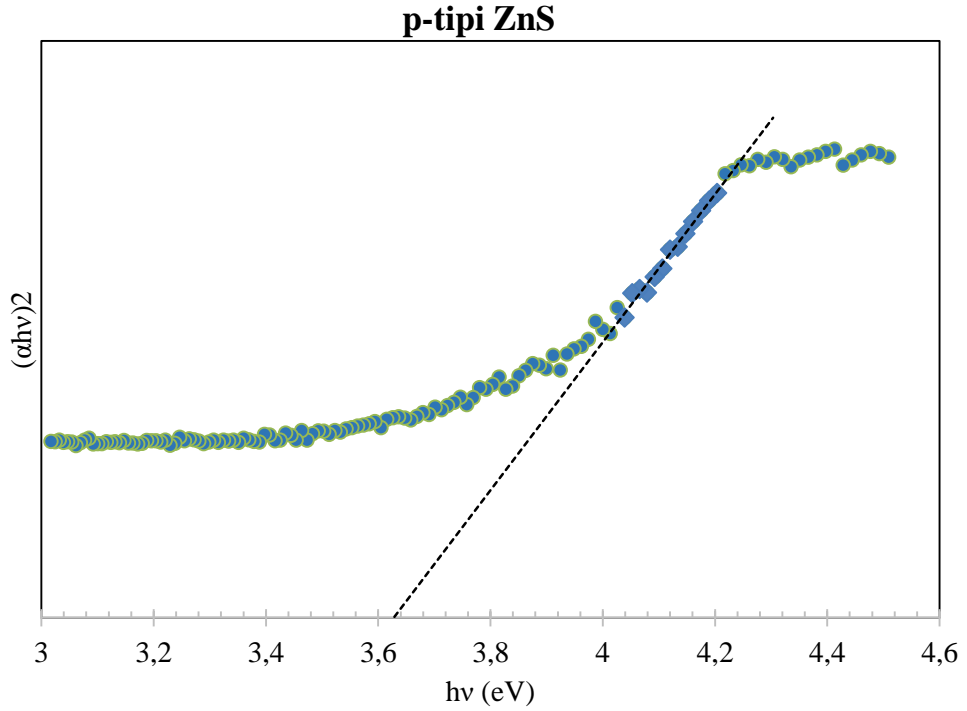
**Tablo 2.** Eşdeğer elektronik devre elamanlarının p-tipi ZnS ince filminin Nyquist verisine fit sonuçları

Sentezlenen Film	$R_s$ ( $\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{\text{pore}}$ ( $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ )	$R_{\text{CT}}$ ( $\text{k}\Omega\text{cm}^2$ )	$\text{CPE}_c$ ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ ) $\alpha_1$	$\text{CPE}_{d1}$ ( $\mu\text{Fcm}^{-2}$ ) $\alpha_2$	$\chi^2 \times 10^{-4}$
ZnS	219,6	49,7	6.065	73,52 0.784	6,33 1,00	6.47



Şekil 4.9. n-tipi ZnS yarıiletkenin Nyquist eğrisi.

n-tipi ZnS yarıiletken ince filmlerin 200nm ile 900nm aralığında gerçekleştirilen optik soğurma spektrumundan elde edilen veriler kullanılarak çizilen Touch eğrisi Şekil 4.10'da görülmektedir. Doğrusal olan kısımdan elde edilen yasak enerji aralığı değeri yaklaşık olarak 3,64eV olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.10.  $(\alpha hv)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye göre grafiği

## 5. SONUÇLAR

Tez çalışmasında doğada bol miktarda bulunan ve sağlık açısından zararsız olan Zn ve S elementlerini yapısında bulunduran, ayrıca geniş bant aralığına sahip ZnS yarıiletkeni üretilmiştir. Üretim yöntemi olarak vakum gerektirmeyen, elektriksel sinyallerin kontrolü ile üretim olanağı sağlayan elektrokimyasal biriktirme yöntemi tercih edilmiştir.

ZnS yarıiletkeni genellikle n-tipi olmaktadır. Bu nedenle CdTe, CIGS ve CZTS gibi p-tipi yarıiletken tabanlı güneş pillerinde CdS yerini alması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Bunun yanında n-ZnS/p-ZnS/(p-CdTe, CIGS ve CZTS) yapıları için p-tipi ZnS yarıiletkenin üretilmesi güneş pilinde verimi artıracakları düşünüldüğünden p-tipi ZnS üretimi önem kazanmaktadır.

Tez çalışmasında hem n-tipi ZnS yarıiletkeni hemde p-tipi ZnS yarıiletkeni elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile üretilmiştir. Yapılan SEM, Mott-Schottky ve UV-VIS analizleri ile üretilen ZnS yarıiletkenlerinin önemli parametreleri elde edilmiştir.

SEM analizlerinden ZnS yarıiletken ince filmin kalınlığı elde edilmiş ve yüzey yapısının homojen olduğu görülmüştür. Mott-Schottky analizinden üretilen yarıiletkenlerin tipleri belirlenmiş ve taşıyıcı konsantrasyonu hesaplanmıştır. p-tipi ZnS yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonu düşük çıkmıştır. p-tipi ZnS yarıiletkenin taşıyıcı yoğunluğunun artırılması ile ilgili çalışmaların yapılması gerekmektedir. Ayrıca UV-VIS analizinden elde edilen ZnS yarıiletken ince filmlerin bant aralıklarının beklenen değerlerde çıktığı görülmüştür.

n-tipi ve p-tipi ZnS yarıiletkeni ucuz, basit ve kontrol edilebilir bir çok parametreye sahip elektrokimyasal biriktirme yöntemi ile yapılan analizlerden de görüldüğü gibi başarılı bir şekilde üretilmiştir. Ayrıca bu yöntemle farklı elektriksel sinyallerin kullanılması ile farklı özelliklerde elektronikte çok önemli olan yarıiletken ince filmlerin üretilebileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Aberle, A. G. (2006). Fabrication and characterisation of crystalline silicon thin-film materials for solar cells. *Thin Solid Films*, (511) 26-34.
- Anonim. (2013). EIA International Energy Outlook 2013. US Energy Information Administration (EIA): [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2013).pdf) adresinden alındı
- Anonim-a. (2015). Key World Energy Statistic Retrieved. OECD/IEA: [https://www.iea.org/publications/freepublications\\_publication/KeyWorld\\_Statistics\\_2015.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications_publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf) adresinden alındı
- Anonim-b. (2013). World Energy Resources 2013. World Energy Council: [https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_survey.pdf](https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_survey.pdf) adresinden alındı
- Anonim-c. (2015). CO2 Emissions From Fuel Combustion. OECD/IEA: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2EmissionsFromFuelCombustionHighlights2015.pdf> adresinden alındı
- Anonim-d. (2009). World electricity consumption by region. *iea World Energy Outlook 2009*: [https://www.researchgate.net/figure/World-electricity-consumption-by-region-source-iea-World-Energy-Outlook-2009\\_fig1\\_318244208](https://www.researchgate.net/figure/World-electricity-consumption-by-region-source-iea-World-Energy-Outlook-2009_fig1_318244208) adresinden alındı
- Anonim-e. (2019). The Intergovernmental Panel on Climate Change. *ipcc*: <https://www.ipcc.ch/> adresinden alındı
- Anonim-f. (2019). Solar System Exploration. Nasa: <https://solarsystem.nasa.gov/solar-system/sun/overview/> adresinden alındı
- Anonim-g. (2019). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası. Yenilenebilir Enerji Genel Müdürlüğü: <http://www.yegm.gov.tr/MyCalculator/Default.aspx> adresinden alındı
- Ateş, A., & ark. (2007). Annealing and light effect on optical and electrical properties of ZnS thin films grown with the SILAR method. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 281-286.
- Benyahia, K., & ark. (2015). ZnS thin films deposition by thermal evaporation for photovoltaic applications. *J. Semicond.* , 103001–103004.
- Bhalerao, A. B., & ark. (2013). Photoelectrochemical Cell Based on Electrodeposited Nanofibrous ZnS Thin Film. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 996-1001.
- Bockris, J. O., & Reddy, A. K. (1973). *Modern Electrochemistry Vol.2*. New York: Plenum Press.
- Byoung-Min, J., & ark. (2019). High-Efficiency Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub> Thin Film Solar Cells Using ZnS and CdS Buffer Layers. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 1814-1819.
- Echendu, O. K., & Dharmadasa, I. M. (2013). Effects of Thickness and Annealing on Optoelectronic Properties of Electrodeposited ZnS Thin Films for Photonic Device Applications. *Journal of Electronic Materials*, 791–801.
- Echendu, O. K., & Dharmadasa, I. M. (2015). Graded-Bandgap Solar Cells Using All-Electrodeposited ZnS, CdS and CdTe Thin-Films. *Energies*, 4416-4435.



- Echendu, O. K., Fauzi, F., & ark. (2014). High short-circuit current density CdTe solar cells using all-electrodeposited semiconductors. *Thin Solid Films*, 529-534.
- Echendu, O. K., Weerasinghe, A. R., & ark. (2013). Characterization of n-Type and p-Type ZnS Thin Layers Grown by an Electrochemical Method. *Journal of Electronic Materials*, 692–700.
- Erol, A., & Balkan, N. (2015). *Yarıiletkenler ve Optoelektronik Uygulamaları 2.Baskı*. Ankara: Seçkin.
- Falcony, C. (1992). Luminescent properties of ZnS:Mn films deposited by spray pyrolysis. *Journal of Applied Physics*, 1525.
- Frumkin, N. (1963). *Advances in electrochemistry and electrochemical engineering vol.3*. New York: Interscience.
- Gerischer, H. (1962). *Recent Advance in Electrochemistry, Vol.I*. New York: Wiley Interscience.
- Gestel, V. D., & ark. (2009). Investigation of intragrain defects in pc-Si layers obtained by aluminum-induced crystallization: Comparison of layers made by low and high temperature epitaxy. *Materials Science and Engineering B*, 134-137.
- Geunhee, L., & ark. (2006). A study on the fabrication of polycrystalline Si wafer by direct casting for solar cell substrate. *Solar Energy*, 80(2):220-225.
- Goldstein, J., & ark. (2003). *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*. Berlin: Springer.
- Han, J., & ark. (2013). Preparation and characterization of ZnS/CdS bi-layer for CdTe solar cell application. *Journal of physics and chemistry of solids*, 1879-1883.
- Hernández-Fenollosaa, M. A., & ark. (2008). Role of precursors on morphology and optical properties of ZnS thin films prepared by chemical spray pyrolysis. *Thin Solid Films*, 1622–1625.
- Honsberg, C., & Bowden, S. (2019). *Solar Cell Structure*. PV Education Org: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/solar-cell-structure> adresinden alındı
- Ilenikhena, P. A. (2008). Comparative Studies of Improved Chemical Bath Deposited Copper Sulphide (CuS) and Zinc Sulphide (ZnS) Thin Films at 320K and Possible Applications. *African Physical Review*, 59-67.
- Kissinger, P. T. (1983). *Cyclic Voltammetry*. *J. Chem. Educ*, 702 – 706.
- Kittel, C. (1996). *Katılal Fiziğine Giriş (Çev. Bekir Karaoğlu)*. Ankara: Güven Yayıncılık.
- Limei, Z., & ark. (2009). Study on ZnS thin films prepared by chemical bath deposition. *Journal of Environmental Sciences*, 76-79.
- Lokhande, C. D., & ark. (1989). Electrodeposition of ZnS Films from an Alkaline Bath. *J Electrochem Soc.* , 2756–2757.
- Macdonald, D. D., & Schmuki, P. (2007). *Encyclopedia of Electrochemistry: Electrochemical Engineering v. 5*. New Jersey: Wiley VCH.

- Niira, K., & ark. (2001). Thin film poly-Si formation by Cat-CVD method and its application for solar cells. *Thin Solid Films*, (395) 315-319.
- Pankove, J. (1971). *Absorption: Process in Semiconductors*. USA: Dover Publications.
- Perrin, F. (2014). 63rd Edition of the BP Statistical Review of World Energy. BP Statistical review of world energy.
- Poortmans, J., & Arkhipov, A. (2006). *Thin Film Solar Cells Fabrication, Characterization and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Pudov, A., & ark. (2002). Performance and Loss Analyses of High-Efficiency Chemical Bath Deposition (CBD)-ZnS/Cu(In<sub>1-x</sub>Gax)Se<sub>2</sub> Thin-Film Solar Cells. *Japanese Journal of Applied Physics*, 672.
- Sharma, B. L. (1984). *Metal-Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications*. New York: Plenum Press.
- Streetman, B. J. (1980). *Solid State Electronic Devices*. 2nd Edition. New Jersey: Prentice Hall.
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*. New York: John Wiley & Sons.
- Sze, S. M. (1981). *Physics of Semiconductor Devices*, 2nd Edition. John Wiley & Sons, Ltd.
- Tec-Yam, S., & ark. (2012). High quality antireflective ZnS thin films prepared by chemical bath deposition. *Materials Chemistry and Physics*, 386-393.
- Tsuda, S., & ark. (1997). Recent progress in a-Si solar cells. *Applied Surface Science*, 734-740.
- Turan, R. (2011). Güneş Enerjisi. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 44.
- Tyagi, M. S. (1991). *Introduction to Semiconductor Materials and Devices*. New York: John Wiley & Sons.
- Vauche, L. (2016). Process development and scale-up for low-cost high-efficiency kesterite thin film. PhD Thesis: Université d'Aix Marseille.
- Wells, A. F. (1984). *Structural Inorganic Chemistry* (5th ed.). Oxford: Clarendon Press.
- Yasuda, T., & ark. (1986). Low resistivity Al-doped ZnS grown by MOVPE. *Journal of crystal growth*, 485-489.
- Yıldırım, H. (2017). CuIn<sub>1-x</sub>GaxSe<sub>2</sub> Tabanlı Fotovoltaik İnce Filmlerinin Üretilmesi Ve Karakterizasyonu, Doktora Tezi. Bursa: Bursa Uludağ Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü.
- Zakerian, F., & Kafashan, H. (2018). Investigation the effect of annealing parameters on the physical properties of electrodeposited ZnS thin films. *Superlattices and Microstructures*, 92-106.
- Zhou, W., & Wang, Z. L. (2007). *Scanning Microscopy for Nanotechnology*. Berlin: Springer.

## **ÖZGEÇMİŞ**

Esra ERTÜRK 23.03.1977 yılında Aydın'da doğdu. İlkokulu Aydın Zafer İlkokulunda, ortaokulu Gazi paşa Ortaokulunda ve liseyi Denizli Lisesinde tamamlamıştır. 1995 yılında Uludağ Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde lisans eğitimine başlamıştır. Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen-Bilimleri Enstitüsü Elektronik ve Haberleşme Anabilim dalında Yüksek Lisans öğrenimini tamamlamıştır.