

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**HİDROTERMAL METOD İLE NANO YARIİLETKEN MALZEME ESASLI  
FOTODİYOT ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper ÖZDERE**

**OCAK - 2021**

**T.C.  
KIRKLARELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
FİZİK ANABİLİM DALI**

**HİDROTERMAL METOD İLE NANO YARIİLETKEN MALZEME ESASLI  
FOTODİYOT ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Alper ÖZDERE**

**Tez Danışmanı: Doç. Dr. Burhan COŞKUN**

**Ocak – 2021**

## ETİK BEYAN

Kırkırelı Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez ve Proje Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum bilgileri, verileri ve dokümanları, değişik sonuç verebilecek şekilde araştırma araç gereçleri kullanmadan, işlem veya kayıt sonuçlarını değiştirmeden akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza  
Alper ÖZDERE  
...../...../.....

## ÖZET

### HİDROTERMAL METOD İLE NANO YARIİLETKEN MALZEME ESASLI FOTODİYOT ÜRETİMİ VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Alper ÖZDERE

Yüksek Lisans Tezi

Kırklareli Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Danışman: Doç. Dr. Burhan COŞKUN

Ocak 2021, 52 sayfa

Bu tez çalışmasında  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  nanomalzemesi, fotodiyotların üretiminde kullanılmak üzere hidrotermal yöntemi ile sentezlenmiştir. Numunelerin yapısal özellikleri SEM ve EDS teknikleri kullanılarak analiz edilmiştir. İncelemeler sonucunda nanoparçacıkların granüle yapıda olduğu görülmüştür. Elde edilen verilerden Enerji bant aralığı 1.22 eV olarak hesaplanmıştır. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al diyotunun elektriksel özelliklerinin incelenmesi amacıyla, Akım- Voltaj (I-V), Kapasitans- Voltaj (C-V) ve Akım-Zaman (I-t) ölçümleri farklı ışık şiddetleri altındaki aydınlatmalarda yapıldı ve numunelerin doğrultucu özellik gösterdiği belirlendi. İdealite faktörleri, bariyer yüksekliği, doyum akımı ve foto tepki değerleri I - V ve I - t grafikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar hazırlanan fotodiyotların optoelektronik uygulamalarda kullanılabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Sözcükler:**  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ , dört bileşenli fotodiyot, nanoyapı, infrared

## ABSTRACT

# FABRICATION OF NANO SEMICONDUCTOR BASED PHOTODIODES PRODUCED BY HYDROTHERMAL SYNTHESIS AND INVESTIGATION OF THEIR PROPERTIES

Alper ÖZDERE

MSc Thesis

Kirklareli University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Supervisor: Assoc. Prof. Burhan COŞKUN

January 2021, 52 pages

In this thesis,  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  nanomaterial was synthesized by hydrothermal method which was then used in the production of photodiodes. The structural properties of the samples were analyzed using SEM and EDS techniques. As a result of the investigations, it was seen that the nanoparticles were in a granular structure. Energy band gap is calculated as 1.22 eV regarding the UV-vis data. To assess the electrical properties of the Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al diodes Current – Voltage (I-V), Capacitance – Voltage (C-V), Current – Time (I-t) measurements were performed in different illumination intensities. It was also seen that samples show corrective properties. The photosensitivity and photoreaction properties of the diodes were analyzed. Ideality factors, barrier height, saturation current and photoreaction values were calculated using I - V and I - t graphs. The results showed that the our photodiodes can be used in optoelectronic applications.

**Keywords:**  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ , four component photodiode, nanostructure, infrared

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmalarında bana her türlü desteği veren danışman hocam, sayın Doç. Dr. Burhan COŞKUN'a sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam boyunca yardımlarını esirgemeyen ve zamanından çaldığım eşim Selen ÖZDERE'ye, desteğini her zaman hissettiğim ve her zaman yanımda olan Serkan-Havva UYAR'a sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.



## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>İV</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	<b>VI</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>Vii</b>
<b>ÇİZELGELERİN LİSTESİ</b> .....	<b>İX</b>
<b>ŞEKİLLERİN LİSTESİ</b> .....	<b>X</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>Xİ</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI</b> .....	<b>5</b>
2.1. Nanoteknoloji.....	5
2.2. Nanoteknolojinin Tarihçesi .....	5
2.3. Türkiye’de Nanoteknoloji.....	6
2.4. Nanoteknolojinin Uygulama Alanları .....	6
2.5. İnce Filmler.....	7
2.6. Hidrotermal Metot.....	8
2.7. İnorganik Yarıiletkenler .....	10
2.8. Dört Bileşikli Yarıiletken Malzemeler .....	11
2.8.1 Bakır(II) klorür (CuCl <sub>2</sub> ) .....	11
2.8.2. Kalay(II) klorür (SnCl <sub>2</sub> ) .....	12
2.8.3. Tiyoüre (CH <sub>4</sub> N <sub>2</sub> S).....	12
2.9. Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri.....	13
2.10. Yarı İletkenlerin Elektriksel Özellikleri .....	15
2.11. Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörler .....	16
2.11.1 Foto diyotlar .....	17
2.11.2 Foto diyotların akım-voltaj karakteristiği .....	18
2.11.3 Foto diyotların kapasitans - voltaj karakteristiği .....	20
2.12. Schottky Fotodedektörler .....	20
2.13. p-i-n Fotodedektörler.....	21
2.14. p-n Eklem Fotodedektörler .....	21
2.15. Fotoiletken Dedektörler .....	22

2.16. Kızılötesi Dedektörler .....	23
<b>3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM.....</b>	<b>25</b>
3.1. İnorganik Yarıiletken Malzemelerin Üretilmesi ve Hazırlanması .....	25
3.1.2. Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub> Nanoyapıların Sentezi.....	26
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>27</b>
4.1. Yapısal Karakterizasyonlar .....	27
4.1.1 Kullanılan cihazlar ve karakterizasyon teknikleri .....	27
4.1.2 Taramalı elektron mikroskobu(sem) gözlemleri .....	27
4.2. Optik Karakterizasyon.....	28
4.2.1 CuFeSnS <sub>4</sub> numunelerinin UV-vis spektroskopi sonuçları .....	28
4.2.2. Optoelektronik inceleme .....	31
4.2.3 Al/p-Si/CuFeSnS <sub>4</sub> /Al fotodiyotların I-V karakteristiği .....	31
4.2.4 Al/p-Si/CuFeSnS <sub>4</sub> /Al fotodiyotların I-t karakteristiği .....	34
4.2.5 Al/p-Si/CuFeSnS <sub>4</sub> /Al fotodiyotların C-t karakteristiği.....	36
4.2.6 Al/p-Si/CuFeSnS <sub>4</sub> /Al fotodiyotların C-V ve G-V karakteristiği.....	38
4.2.7 Al/p-Si/CuFeSnS <sub>4</sub> /Al fotodiyotların frekansa bağlı arayüz yoğunluğu.....	42
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>43</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>45</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>53</b>



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge 2.1 Hidrotermal Yöntemin Uygulama Alanları ..... 10

Çizelge 4.1 Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotlara ait ( $\phi_b$ ),n,doygunluk akımı,foto tepki .... 38



## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil 2.1. İnce Film Üretim Teknikleri .....	8
Şekil 2.2. Valans bant, direk bant ve dolaylı bandın şematik olarak gösterimi .....	11
Şekil 2.3. $\text{CuCl}_2$ ' nin kristal yapısı .....	11
Şekil 2.4. $\text{SnCl}_2$ ' nin kristal yapısı .....	12
Şekil 2.5. Tiyoüre'nin yapısı .....	12
Şekil 2.6. Yarı İletkenin Temel Soğurma Spektrumu .....	15
Şekil 2.7. MSM fotodedektörün görünümü .....	17
Şekil 2.8. Foto diyotun Sembölü, Yapısı, Karakteristik Eğrisi .....	18
Şekil 2.9. Foto diyotun Karanlık ve Aydınlatılmış durumda akım-voltaj Karakteristiği	19
Şekil 2.10. Schottky fotodedektörün şematik gösterimi .....	21
Şekil 2.11. p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi .....	22
Şekil 2.12. Fotoiletken dedektör .....	22
Şekil 3.1 Deney Numunelerinin Hazırlanmış Düzenek .....	26
Şekil 4.1. $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanoyapılara ait SEM görüntüleri ve EDS Spektrometre Sonuçları .....	28
Şekil 4.2. $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ İnce Filmlere ait Geçirgenlik ve Soğurma Spektrumu .....	29
Şekil 4.3. $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ İnce Filmlerin Soğurma- $h\nu$ Spektrumu .....	31
Şekil 4.4. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Nanoyapılara ait Gün Işığı Altında Elde Edilen I-V Grafiği .....	32
Şekil 4.5. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Nanoyapılara ait Kızılötesi Işık Altında Elde Edilen I-V Grafiği .....	33
Şekil 4.6. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotların Gün Işığı altında I-t Karakteristiği ....	34
Şekil 4.7. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotlara ait Kızılötesi Işık Altında İncelenen I-t Karakteristiği .....	35
Şekil 4.8. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotların C-t Karakteristiği .....	36
Şekil 4.9. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotların Kapasitans-Voltaj Grafiği .....	38
Şekil 4.10. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotlara ait İletkenlik-Voltaj Grafiği .....	39
Şekil 4.11. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotlara ait $C_{\text{adj}}$ -V Grafiği .....	40
Şekil 4.12. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotların $G_{\text{adj}}$ -V Grafiği .....	41
Şekil 4.13. Al/p-Si/ $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ /Al Fotodiyotların Frekansa Bağlı Arayüz Durum Yoğunluğu Karakteristiği .....	42

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

### Simgeler

### Açıklamalar

<b>nm</b>	Nanometre
<b>µm</b>	Mikrometre
<b><math>h(0)</math></b>	Gerilme titreşimi
<b>t</b>	Zaman
<b><math>\omega</math></b>	Açısal hız
<b><math>\eta</math></b>	Çözeltinin viskozitesi
<b><math>\rho</math></b>	Çözeltinin yoğunluğu
<b><math>\rho_A</math></b>	Birim hacimdeki uçucu maddenin kütlesi
<b><math>\rho^0_A</math></b>	Birim hacimdeki uçucu maddenin başlangıç değeri
<b>e</b>	Buharlaşma oranı
<b>k</b>	Kütle transfer katsayını
<b>eV</b>	Elektrovolt
<b>Eg</b>	Yasak enerji aralığı
<b>Å</b>	Angstrom
<b>d</b>	Yoğunluk
<b><math>S^o</math></b>	Entropi
<b><math>\Delta H^o_f</math></b>	Entalpi
<b><math>\Delta G^o_f</math></b>	Gibbs Serbest Enerjisi
<b><math>I_0</math></b>	Işığın Şiddeti
<b><math>\lambda</math></b>	Dalga Boyu
<b>h</b>	Planck sabiti
<b>c</b>	Işık hızı
<b>v</b>	Frekans

$\mu_e$	Elektron mobilitesi
$\mu_h$	Hol mobilitesi
$v_e$	Elektronların hızı
$v_h$	Hollerin hızı
$\vec{E}$	Elektrik alan
$\epsilon_0$	Boşluğun dielektrik geçirgenliği
$\epsilon_s$	Dielektrik sabiti
$q$	Yük
$V_{bi}$	Difüzyon voltajı
$G_{adj}$	Düzeltilmiş iletkenlik
$D_{it}$	Arayüzey durum yoğunluğu

#### **Kısaltmalar**

#### **Açıklamalar**

<b>AC</b>	Alternatif Akım
<b>DC</b>	Doğrusal Akım
<b>FBB</b>	Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>KBB</b>	Kimyasal Buhar Biriktirme
<b>RF</b>	Radyofrekans
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Silisyum dioksit
<b>Ti<sub>2</sub>O</b>	Titanyum dioksit
<b>ZnO</b>	Çinko Oksit

## 1. GİRİŞ

Nano kelimesini en basit ve genel anlamda milyarda bir anlamına gelmektedir. Daha basite indirirsek, metrenin milyarda biri diyebiliriz. Boyut olarak düşündüğümüzde ise 100 nm altındaki partiküller nanopartiküller olarak isimlendirebiliriz. Nano boyutlu malzemelerin amacı ise, fiziksel ve kimyasal özelliklerin incelenip, üst düzey özellikli ürünler elde etmek için üretim süreçlerinin geliştirilmesidir. Bu yöntemle daha hafif, daha dayanıklı malzeme üretimi sağlamak ve enerjiden tasarruf sağlamak için nanoteknoloji sayesinde manyetik, optik, kimyasal pek çok özelliklerde gelişim sağlanmıştır [1,2]. Nanoteknoloji beklenildiği gibi son yıllarda çok fazla ilgi odağı olmuş, interdisipliner çalışmalara dayalı, tıp, enerji, havacılık, fizik, kimya, biyoloji gibi pek çok farklı alanlarda da öneme sahip günümüzün en değerli teknolojilerinden biridir.

Metal oksitler fen, teknoloji, matematik ve mühendislik uygulamaları açısından üst düzey özellik gösteren ve kullanım alanları incelendiğinde pek çok dallarda da öneme sahip olan bileşiklerdir [3, 4]. Metal oksit nano partiküller mikroelektronik devrelerde, bataryalarda, yarı iletken cihazlarda, katalizör uygulamaları, dayanıklılık özelliklerin geliştirilmesi, kanser tedavisi gibi pek çok kullanım alanlarına sahiptir [5,6].

Işık mikroorganizmalardan memelilere kadar birçok canlı formu için hayati önem taşımaktadır. Işık kavramı çok geniş bir aralığı temsil etmektedir. Ancak gözümüz çok sınırlı bir alanı görebilmektedir. Gözümüzün gördüğü sınırlı alana ışığın görünür bölgesi denmektedir. Bu açıdan bakıldığında biz göremesek de farklı dalga boylarındaki ışıklar ile sürekli temas halindeyiz. Bu tür ışığı göremememize rağmen algılayabiliriz. Teknolojimiz günden güne gelişmektedir. Teknolojinin gelişmesinde nanoyapılar ve nanoparçacıklar büyük önem taşımaktadır. Nanoyapılar ve nanoparçacıklar ince filmleri oluşturabilirler. İnce filmleri ise teknolojik kullanılan transistör, mikroişlemci, ince ekranlar, fotodiyot ve fotodedektör teknolojilerinin temel bileşenidir [7–13]. Diyotlar ve fotodedektörler birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Örneğin fotodedektörler video kayıt cihazlarında, fotoğraf makinelerinde, güvenlik kameralarında, görüntüleme sistemlerinde, hareket sensörlerinde, optik iletişim sistemlerinde, biyomedikal görüntüleme

aletlerin de kullanılmaktadır. Fotodedektörlerin kızılötesi ışığı dedekte edebilme özelliği onlara yeni uygulama alanları kazandırabilir. Örneğin kızılötesi hassasiyete sahip bir fotodedektör roket takip sistemi, gece görüş kameraları gibi askeri teknolojilerde de kullanılabilir.

Fotodiyot üretiminde değişik tipte materyaller kullanılabilir. Her bir materyalin kendine has avantajları ve dezavantajları bulunabilir. Örnek vermek gerekirse organik materyaller doğada bolca bulunurlar ve ucuzdurlar. Tipine bakılmaksızın değişik şekillerdeki yüzeylere kolayca uygulanabilirler. Ancak, bu malzemelerin yapıları hidrokarbon bağlardan oluştuğu için sıcaklık ve nem gibi dış etkilere kolaylıkla etkilenebilirler. Bu yüzden özellikle organik tabanlı elektronik malzemeler sahip oldukları elektriksel ve fotodiyot karakteristikleri kolaylıkla kaybedebilirler. Diğer bir taraftan, metalik temelli malzemelerin görece daha uzun ömürlü oldukları ve aynı zamanda daha stabil malzemeler oldukları bilinmektedir. Bu malzemeler çizilme ve sıcaklığa karşı dayanıklıdır, mekanik dayanımları organik malzemelere göre daha yüksektir. Aynı zamanda bu malzemeler elektrik ve optik özelliklerini uzun zaman boyunca koruyabilirler. Dolayısıyla optoelektronik uygulamalar için oldukça elverişli malzemelerdir. Bu sebeple metalik ince filmler literatürde sıkça rapor edilmiştir [14–18]. Literatürde bu malzemelerin katalitik, elektrik, optik ve optoelektronik özellikleri birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir [14–18]. Araştırmalarda kullanılan metalik ince filmler farklı üretim yöntemleri kullanılarak üretilmişlerdir. Örnek vermek gerekirse literatürde moleküler hüzmeye epitaksisi (MBE), buhar kaplama, plazma kaplama, lazer kaplama, magnetron püskürtme ve spin kaplama vb. gibi teknikler kullanılarak üretilen ince filmleri rastlamak mümkündür [7, 19–22]. Yukarıda örneklendirilen ve metalik ince film üretiminde kullanılan birçok teknik oldukça pahalıdır. Bu teknikleri kurulum ve işletim maliyetleri oldukça yüksek olduğu gibi tekniğin kullanılmasını gerektiren sistemler de oldukça karmaşıktır. Ancak elektrokimyasal kaplama, spin kaplama, dip kaplama gibi ucuz ve güvenilir tekniklere de rastlamak mümkündür. Bu teknikler içerisinde spin kaplama yöntemi birçok araştırmacı tarafından ucuz, hızlı, düşük maliyetli ve güvenilir bir teknik olarak kabul görmüştür. Spin kaplama tekniği basit bir teknik olduğu gibi araştırmacılara kompozit ve alaşım yapıdaki ince filmleri üretmeye de imkân sağlamaktadır. Aynı zamanda bu teknik ile kimyasal yöntemle nano malzeme üretilebileceği için malzemeleri birbirine katılma mümkündür ve katılan malzeme istenilen herhangi bir yüzeye kaplanabilir [23-25].

ZnO, TiO<sub>2</sub> ve CdO malzemeleri ince film temelli fotodedektör ve fotodiyot uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır [13, 26–28]. Dört bileşenli malzemeler ise fotodedektör ve fotodiyot uygulamalarında yeni yeni araştırılmaya başlanan malzemelerin başında gelmektedir. Bu malzemelerin katalitik, sensör ve yarı iletken özelliklerine ait araştırmalara literatürde rastlanmaktadır [29-32]. Araştırmalarımız göstermiştir ki literatürde bu malzemeler ile ilgili sınırlı sayıda bilimsel araştırma bulunmaktadır. Bu alanda üretilecek çalışmaların yüksek etki değerine sahip olacağı düşünülmektedir. Daha önceki çalışmalarda Kobalt (Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub>) ve Nikel (Cu<sub>2</sub>NiSnS<sub>4</sub>) temelli 4 bileşenli diyotların optoelektronik özellikleri incelenmiştir [33–35]. Bilimsel incelemelerden anlaşılmıştır ki bu malzemelerden üretilen fotodiyot ve fotodedektörler iyi derecede fotodiyot ve fotodedektör özellik göstermektedirler. Bu sebeple birçok optoelektronik uygulamada kullanılmaya uygundur. Daha önceki araştırmalarda anlaşılmıştır ki dört bileşenli fotodiyotlar kızılötesi ışığa da tepki verebilmektedir. Literatürde genellikle Cıva Kadmiyum Tellür (HgCdTe) malzemesi kullanılarak üretilen kızılötesi test dedektörlere rastlanmaktadır. Bahsi geçen materyal latis uyumsuzluğu ya da stabilizasyon için tampon katman ihtiyacı gibi birçok dezavantajı uygulamalarda barındırmaktadır [20, 36–39]. Dört bileşenli fonksiyonel fotodedektörlerin Cıva Kadmiyum Tellür (HgCdTe) gibi kızılötesi dedektör uygulamalarında kullanılan malzemelere alternatif olabileceği düşünülmektedir.

Bu çalışmamızda demir temelli dört bileşenli nanoparçacıklar (Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>) hidrotermal tekniği kullanılarak üretilmiştir. Üretilen nanoparçacıklar Silisyum alttaşlara spin kaplama yöntemi ile kaplanarak Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıda dört bileşenli fotodiyotlar elde edilmiştir. Üretilen malzemelerin yapısal ve kimyasal incelemeleri elektron mikroskobu SEM ve enerji spektroskopisi EDX yöntemleri kullanılarak incelenmiştir. Optik özellikler UV spektroskopisi yöntemi ile incelenmiştir. Optik özellikler kullanılarak bant enerjisi hesaplanmıştır. Güneş ışığı ve kızılötesi ışık altında fotodiyot özellikler kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üretilen nano yapıların ve ince filmlerin ışığa ve kızılötesi ışığa karşı tepki verdiğini ortaya koymuştur. Bu sebeple demir temelli dört bileşenli Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al foto diyotların kızılötesi ve fotodedektör uygulamalarında kullanılabilme potansiyelinin olduğu anlaşılmıştır. Diyotların elektriksel özelliği incelendiğinde malzemelerin elektriksel karakteristiğinin dışarıdan uygulanan alternatif akımın frekansına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Frekanstaki değişimin elektriksel özellikler üzerinde değişiklikler yaptığı gözlenmiştir.





## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Nanoteknoloji

Nano kelimesi Yunan kökenli bir kelime olarak ilk karşımıza çıkıyor. Sonuna eklenen “teknoloji” kelimesi ise yine aynı dil olan Yunancada *tekhné* ve *logia* kelimelerinin bir araya gelmesiyle, *tekhné* “sanat”, *logia* ise “var olan konunun üzerinde durulması ya da çalışma” anlamı olarak karşımıza çıkıyor. Bu kapsamda ve özelliklerde nanoteknolojiyi düşündüğümüzde boyutsal anlamda mikroaltı ve aynı zamanda diğer malzemelere nazaran üst düzey özellik gösteren üretim, tasarım, özellikleri geliştiren ve kullanıldığı alanları tanılayan bir bilim dalı gibi ifade etmek yanlış olmaz [1, 40].

Nanoteknoloji günümüze en yakın bulunan ve ortaya çıkan bir dalı gibi düşünülse de aslının öyle olmadığını geçmiş örneklere bakarak bunu görebiliriz. Doğal fotokimyasal ve volkanik ürünler, bunun yanı sıra egzoz dumanları içinde dahi nanoteknolojiye rastlanabilir [41]. Bununla beraber bu doğal yapıların yanında doğadan esinlenilerek üretilen ya da sentetik olarak nanoteknoloji kullanılarak yapılan pek çok malzeme de mevcuttur. Bu ürünler sayesinde keşfedilen değişik özellikler, farklı bilimsel uygulamada kendine yer etmiş ve pek çok gelişimin önünü açmıştır.

### 2.2. Nanoteknolojinin Tarihçesi

Nanoteknolojinin tarihsel gelişimini incelediğimizde karşımıza çıkan ilk isim Faraday oluyor. Faraday küçülen taneciklerin nasıl bir özellik gösterdiğini incelemiş ve ne gibi değişimler olduğunu incelemiştir. Faraday’ın bu çalışmalarının en ünlüsü altın çözeltileridir. Bu çalışmasıyla küçülen altın çözeltilerinin renk değişimi gösterdiğini incelemiştir. 19. yüzyılda yapmış olduğu bu çalışmaların takibinde 1959 yılınca Richard P. Feynman, teknolojik gelişiminde olan bilgisayarların boyutlarının küçültülmesinde, tek atomların hareket ettirilmesi ve küçük boyutların incelenmesi için üretilecek makinalar hakkında varsayımlarını sunmuştu. O yıllarda bu çalışmalarını ne kadar olağan dışı ve imkansız gibi niteleseler de, bu çalışmalar ilerleyen yıllara bir ışık

u tutacağıının göstergesiydi. 1974 yılında Tokyo Bilim Üniversitesi'nde çalışan Norio Tanuguchi "Temel Nano-Teknoloji Konseptleri" adlı yazısında ilk defa nanoteknoloji kelimesini kullandı ve günümüze kadar uzanan bu kelimeninde temelini atmış oldu [42].

### **2.3. Türkiye'de Nanoteknoloji**

Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 1960 yılında başlatılan "Planlı Dönem" çalışmaları günümüzde de halen bilinmektedir. Bu çalışmaların sonuncusu 2001 yılında başlanan ve 2003-2023 yılları arasında yapılacak olan bilimsel ve sanayi yatırımlarına öncü olması planlanan "VİZYON 2023" projesidir [43]. Türkiye'de bu projeye ulusal bilim, teknoloji ve yenilikçi politikalarının odak noktasında bulunması en önemli amaçlarından biridir.

"VİZYON 2023" projesi büyük bütçelerle destelenen nanoteknolojik uygulamaları kapsamaktadır. Türkiye bu projesiyle nano bilim ve nanoteknoloji gelişimine ne kadar önem verdiğini göstermektedir aslında. Bunu daha da ileriki adımlara taşımak adına devletin fikrini ve desteğini göstermek için pek çok alanda üniversitelere bağlı olarak tesisleşme faaliyetleri de başlamıştır [44].

### **2.4. Nanoteknolojinin Uygulama Alanları**

Nanoteknoloji tek bir bilim dalına bağlı kalmanın dışına çıkmıştır. Birçok bilim dalından faydalanarak ürün ortaya çıkarmış, birçok ürün çıkmasında da nanoteknolojiden faydalanılmıştır. Günlük hayatı kolaylaştıran, tıp, endüstri, bilgisayar/bilişim, havacılık gibi alanlarda pek çok ürün ortaya çıkararak ürünlerin oluşmasında öncülük edecektir.

- Enerji dönüşümleri ( Güneş, Hidrojen Depolama Üniteleri gibi )
- İlaç Tasarımı ( Nano kapsüller)
- Tıbbi görüntüleme (Kolesterol )
- İnşaat sektörü (Isıya dayanıklı malzeme, kirlenmez boya )
- Atık su ( Fotokatalitik nano yapılar)
- Hava kirliliği giderme (nano sensör)
- Zirai verimlilik
- Gıda üretimi ve depolama

- Haşere tespiti (nano sensor )

Nanoteknoloji yatırımları ile gelişim sürecini en hızlı yaşayan ülkelerde nanoteknolojinin gelişimine katkıda bulunacağı muhtemel ilk 10 uygulama alanı yukarıda sıralanmıştır [46].

## 2.5. İnce Filmler

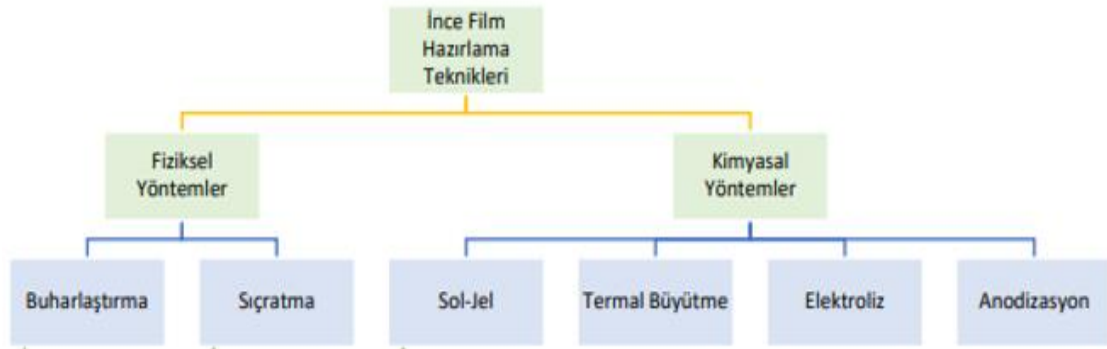
Günümüzde teknolojinin gelişimi ile beraber, malzemelerin yüzey alanlarını, boyutlarını değiştirerek ürünlere yeni özellikler kazandırması hız kazanmıştır. Bu ürünlerin ve malzemelerin yüzeylerini değiştirmek bizlere birçok avantaj kazandırmasına da yardımcı olmuştur. Kısacası birçok özelliğe sahip olan ürünlerin; olumlu, kullanışlı ve işe yarayan özelliklerin tek bir üründe toplanması çok büyük bir avantaj haline gelmektedir. Bu anlamda malzemelerin yüzey özelliklerini değiştirerek onları kaplama için kullanılan en önemli yöntem, ince film kaplama yöntemidir. İnce filmlerin kaplanması sayesinde malzemeye istediğimiz özellikleri kazandırmanın yanı sıra yüzey özelliklerinin de geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu geliştirme ve kaplama yöntemi sayesinde bizlere çok büyük avantajlar sağladığından söz etmek istiyorum. Bu yapılan yöntemler yarı iletken endüstrisi için çok değerlidir. İnce filmler, dekor, optik-elektrik, manyetik, elektriksel, ısısal, kimyasal ve korozyon ile oksidasyondan korunma amaçlıda kaplamalar halen yapılmaktadır.

Kaplama tekniği ve yöntemlerin farklılıkları malzemelere daha üstün özelliklerde kazandırmaktadır. Örneğin, ince filmlerin hacimsel malzemelere göre kaplamalarındaki avantajları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Hacimli malzemelere göre daha saf (arı) özellikte olmaları,
- Gözle göremeyecek kadar küçük şekillerde ve üç boyutta oluşturulabilmesi,
- Ardışık işlemlerde kolay bulunabilmesi,
- Kalın, kristal yönelim ve birden fazla katmanlı yapılardan kaynaklanan kuantum boyut etkileri ve bunların kontrol edilmesi,
- Büyütme sayesinde bu malzemelerin kontrolünün sağlanabilmesi
- Kaplama özelliği sayesinde, daha az malzeme kullanılması ve bunun sonucu malzemelerden tasarruf sağlanması,
- Ekonomik bir teknolojiden olması [47].

Hacimli malzemelerin tek başlarına sağlayamadığı birçok özellik nedeniyle, ince filmlerin bu malzemelerin dışına kaplanması sayesinde optik, elektronik, manyetik, kimyasal ve mekanik alanları ilgilendiren birçok teknolojide kullanılmaktadır. İnce film teknolojisi en çok da yarı iletken endüstrisinde kullanılmaktadır. Transistörler, cep telefonları, bilgisayarlar, koruyucu tabakalar gibi birçok teknolojide kullanılmaktadır [47].

İnce filmler, Fiziksel Buhar Biriktirme(FBB), (Physical Vapor Deposition (PVD)) ve Kimyasal Buhar Biriktirme (KBB) (Chemical Vapor Deposition (CVD)) yöntemleri ile hazırlanabilir. İnce film üretim teknik ve yöntemleri Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. İnce film üretim teknikleri

KBB yönteminde kaplama malzemesi olarak gaz halindeki moleküller kullanılırken, FBB yönteminde ise kaplama malzemelerinden en az biri, katı bir kaynaktan buharlaştırılır veya atom haline getirilir [48]. Metot seçerken fiziksel, kimyasal ve ekonomik özellikler göz önünde bulundurulmalıdır. Biz bu tez çalışmamızda Kimyasal yöntemler içinde yer alan termal yöntemini kullanacağız.

## 2.6. Hidrotermal Metot

Solvotermal ile hidrotermal birbirlerine çok benzeyen iki deneysel süreç olarak karşımıza çıkıyor. Bu anlamda hidrotermal yöntem, maddelerin suda çözülmüş halini yani sulu çözeltilerini kullanarak yüksek sıcaklık ve buhar basıncında bir maddenin kristalleştirme yöntemidir [49]. Genel olarak (100 °C) ve basınçta (<1 atm) sulu çözeltisi olmayan yani çözünmeyen maddeler için kristal sentezi olarak tanımlanabilir. Metot, kontrollü sıcaklık ve kontrollü basınç altında ve otoklavlarda yapılır. Organik çözelti (su) kaynama

noktasının(100°C) üzerindeki sıcaklıkların kullanması için izin verir. Bu yöntem çözünebilir bir maddede meydana gelen bir karışımın tepkisi olarak adlandırılabilir [50].

Bu yöntemde reaktif maddeler ve çözücü özellikteki maddeler kapalı bir kap içerisine alınır ve hedeflenen sıcaklık değerine kadar ısıtılır. Çözücü özellikteki madde eğer su ise bu yöntem hidrotermal yöntem, bir başka organik çözücü ise solvotermal yöntem olarak ifade edilir. Bu yöntemde maddelerin tamamının çözünmesinin sağlanması gerekir, eğer çözünmeme durumu olursa sıcaklık veya ph gibi değerlerin kontrolünün tekrar yapılması gerekir.

Hidrotermal yöntemin avantajları aşağıdaki gibidir.

- Kimyasal reaksiyon kontrol altına alınabilir,
- Homojenlik sağlanmış olur,
- Düşük sıcaklıklarda gerçekleşir,
- Kimyasal bir reaksiyon olduğu için yeni maddeler elde edilebilir.

Herhangi bir dış ürün, materyal ve mekanik bir işleme ihtiyaç duymadığı için son zamanlarda oldukça dikkat çeken bir yöntemdir. Hidrotermal yöntem ile sol-jel yöntemi arasındaki en önemli fark, sol-jel yönteminin oldukça pahalı olması diyebiliriz. Bunun yanı sıra sol-jel yöntemi çözücü özellikteki maddeleri tekrar kullanamaz ve çok yüksek basınçlı sistemlere ihtiyaç duyar. Bu yöntemde nano parçacıkların tamamı kapalı ortamda üretilmektedir. Çizelge 2.1’de hidrotermal metotun uygulama alanları verilmiştir [51].

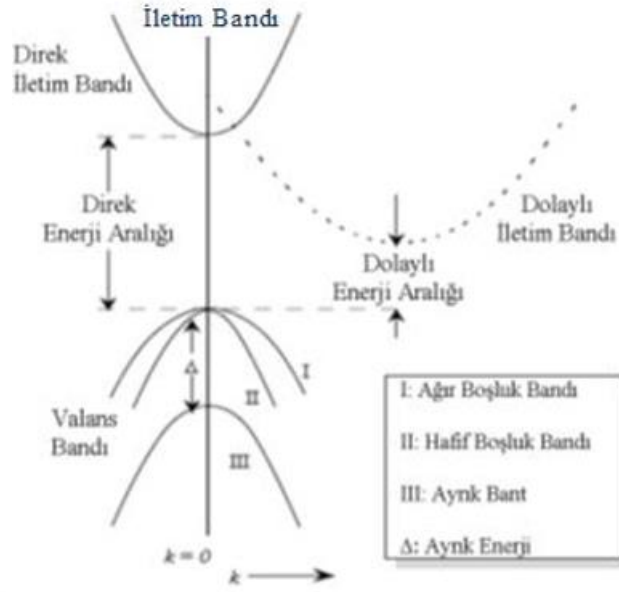
**Çizelge 2.1.** Hidrotermal metodun uygulama alanları [51]

Kullanım Alanı	Madde	Uygulama
Piezoelektrik	Pb (Zr, Ti)O <sub>3</sub> , α-SiO	Sensörler, güç çeviriciler
Yarıiletken	BaTiO <sub>3</sub> , ZnOBi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> geçiş metal oksitleri	Termistörler ve varyastörler
Kimyasal	ZnO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> zeolitler	Kimyasal sensör, katalizör, desikant, gaz adsorpsiyon/depolama
Yapısal	ZrO <sub>2</sub> (TZP), Al <sub>2</sub> TiO <sub>5</sub>	Otomotiv, ısıtma değiştiriciler, metal filtreler
Biyolojik	Hidroksiapatit	Yapay kemik

## 2.7. İnorganik Yarıiletkenler

Yarı iletkenler iletim bandının en alt noktası ile valans bandının tepe noktası arasındaki bölge, elektronların bulunma ihtimalinin olmadığı yasak enerji bandı olarak adlandırılır. Bu enerji bandı aralığı, valans bandında bulunan bir elektronu iletim bandına uyarabilmek için gerekli olan minimum enerji değerine eşittir. Bu enerji voltaj, ısı ve ışık formunda yarı iletkenlere verildiğinde valans bandındaki bir elektron, iletim bandını uyaracak ve valans bantta bir boşluk oluşturacak, yani yarı iletken artık iletkenlik özelliği kazanmış olacaktır. Bu boşluklar pozitif yüklü tanecikler gibi davranacak ve elektrik alan altında elektronların tersi yönünde hareket edeceklerdir. Böylece yarıiletkenler, elektronlar ve boşluklar olmak üzere iki taşıyıcıdan söz edilebilir. Bu yarı iletken bünyesinde ne kadar çok taşıyıcı yük bulunursa iletkenlikte o kadar fazla olur. Herhangi bir dış etki sonucu kazandırılan bu iletkenlik tabii ki geçicidir.

Bazı yarı iletkenler iletim bandının en alt noktası  $k=0$  noktasındadır. Bu yarı iletkenler optiksel olarak aktif olduklarından bant aralıklı malzeme olarak bilinir, GaAs, InP, InGaAs bunlara örnek verilebilir. Diğer yarıiletkenlerde ise  $k=0$  noktasında değildir. Bu yarıiletkenler (Si, Ge, Al vb.) dolaylı yarıiletkenler olarak adlandırılır. Bu yarıiletkenler ise optik aygıtların yapımında kullanılmamaktadır.



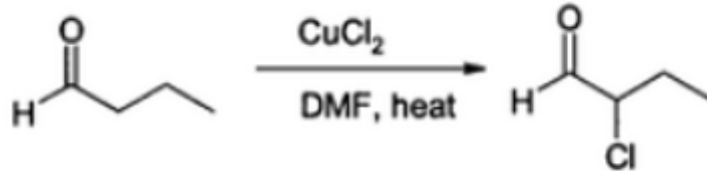
Şekil 2.2. Valans bant, direk bant ve dolaylı bantın şematik olarak gösterimi [83].

## 2.8. Dört Bileşikli Yarı iletken Malzemeler

### 2.8.1 Bakır (II) Klorür (CuCl<sub>2</sub>)

Bakır (II) Klorür kahverengi, sarı monoklinik kristaller şeklindedir. Nemli havada ise ışık ile etkileşime girerek dihidrat formuna dönüşür. Molekül ağırlığı 134,45 g/mol, yoğunluğu 3,39 g/cm<sup>3</sup> ve erime noktası 498°C civarında olan Bakır (II) Klorür sulu çözeltilerde çözünebilir iyonik yapıya sahip katı bir maddedir. Çözünme özelliğine sahip olsa da her sıvıda çözünmez. Suda, Etanolde ve Asetonda çözünebilir [84].

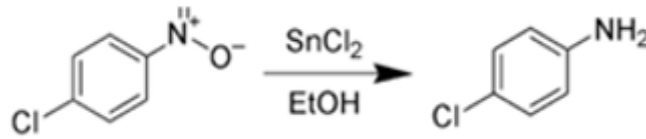
Bakır (II) Klorür organik olan sentezlerde oldukça fazla kullanılır [85]. Aromatik hidrokarbonların klorlanmasında oldukça etkilidir. CuCl<sub>2</sub> karbonik bileşiklerin alfa pozisyonlarında etkilidir [86]. Şekilde CuCl<sub>2</sub>'nin kristal yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.3. CuCl<sub>2</sub>'nin kristal yapısı [84].

### 2.8.2. Kalay (II) Klorür (SnCl<sub>2</sub>)

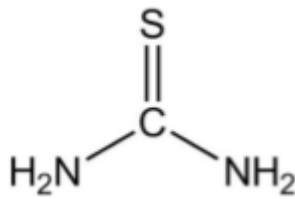
Molekül ağırlığı 189,6 g/mol, yoğunluğu 3,95 g/cm<sup>3</sup>, erime sıcaklığı 247 °C ve kaynama sıcaklığı 623 °C'dir. Bazı araştırmacılar Kalay Oksit (SnO<sub>2</sub>) filmi elde etmek için uçucu özelliği az olmasına rağmen bu bileşiği kullanmaktadır. SnCl<sub>2</sub> ile yapılan kalay oksit kaplamalarda ortam sıcaklığı 500 °C civarında olmalıdır. Bu sıcaklıkta Oksijen ve SnCl<sub>2</sub> ortama koyulmalıdır. Burada oluşan oksitlenme reaksiyonu düşük aktivasyon enerjisine (58 kJ/mol) sahiptir. ClSnCl bağın ayrışabilmesi için ise 320 kJ/mol enerji gerekmektedir. Şekil 2.4'te SnCl<sub>2</sub>'nin kristal yapısı gösterilmiştir [87].



Şekil 2.4. SnCl<sub>2</sub>'nin kristal yapısı [87]

### 2.8.3. Tiyöüre (CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>S)

Yapısında C, N, S atomları bulunduran ve CSN<sub>2</sub>H<sub>4</sub> genel formülüyle gösterilen yapılar Tiyöüre denmektedir. Molekül ağırlığı 76,12 g/mol, yoğunluğu 1,4 g/cm<sup>3</sup> olup erime sıcaklığı 182 °C'dir. Tiyöüre'nin yapısı Şekil 2'de verilmiştir. Tiyöürelerde C=S bağı uzunluğu 160 Å dur. Yapılarında S ihtiva ettiğinden dolayı birçok kalitatif ve kantitatif analiz için kullanılmaktadırlar [88].



Şekil 2.5. Tiyöüre'nin yapısı [88].

Tiyöüreler yapılarında bulunan S ve N atomlarında H bağı oluşturma özelliğine sahiptir. Bu özelliği sayesinde çözücüler içerisinde davranışlarını etkiler ve reaksiyonlar üzerinde etkili olurlar [89, 92].



## 2.9. Yarı İletkenlerin Optiksel Özellikleri

Yarı iletkenlerin bant yapılarını, malzemenin elektron ve boşlukları ile ilgili bilgi edinmek istiyorsak optiksel özelliklerini inceleyebiliriz.

Yarı iletken üzerine değişik frekanslarda ışın demetleri gönderirsek; yansıma, soğurma, kırılma ve geçirgenlik gibi optiksel olaylar, elektronlar ile fotonlar arasındaki etkileşimleri inceleyebiliriz [52, 53].

Eğer fotonların enerjileri düşük ise herhangi bir soğurulmaya uğramaz. Saydamsa ışığı geçirir, yüzeyi düzgünse yansır [52]. Belirli bir kalınlıktaki yarı iletken üzerine  $I_0$  şiddetindeki bir foton gönderildiğinde üç şekilde davranır. Fotonun bir miktarı yansır, bir miktarı soğurulur, bir miktarı ile malzemedeki geçer. Bu nedenle yansıyan ( $I_R$ ), soğurulan ( $I_A$ ) ve geçen ( $I_T$ ) ışık şiddetlerinin toplamı başta gönderilen  $I_0$  ışık şiddetine eşittir.

$$I_0 = (I_R) + (I_A) + (I_T) \quad (2.4)$$

Bu ifade de R yansıma katsayısını, A soğurmayı, T geçirgenliği belirtir. Bu üç ifadenin toplamı 1 olur [79,80].

$$R + A + T = 1 \quad (2.5)$$

Bir yarı iletken üzerine gönderilen ışın demetleri yarı iletkende bulunan elektriksel yüklerle etkileşime girer. Etkileşim sonucunda ışın demeti enerji kaybeder. Kaybedilen bu enerji atom tarafından kullanılır. Bu olaya soğurulma denir. Işın demetinden soğurulan enerji sayesinde temel yük taşıyıcıları bir üst enerji seviyesine uyarılır [54, 55].

Yarı iletkenlerin soğurma ölçümleri geniş bir dalga boyu aralığında yapılırsa, geçen ışınların bağıl şiddetleri ile dalga boyları arasında bir bağıntı oluşur. Bu bağıntı bize soğurma spektrumunu verir. Malzemelerin kendi özelliklerinden dolayı soğuracağı dalga boyları farklıdır. Bu özellik sayesinde yarı iletkenin band yapısı incelenerek yasak enerji aralığı hesaplanabilir. Buna optik metot denir. Optik soğurma spektrumu sayesinde diyalektrik sabiti, kırılma indisi, geçirgenlik gibi optik verilere de ulaşılabilir [54, 56]. Yarı iletken gelen ışık farklı etkilerin oluşmasına neden olabilir. Yük taşıyıcının bantlar arası geçişlerini incelersek optiksel bant aralığını bulabiliriz. Yarı iletken üzerine yasak enerji aralığına eşit ya da büyük enerjili bir foton gönderilirse malzemedeki bir elektron bu enerjiyi soğurur ve valans bandında bulunan bu elektron iletim bandına geçer. Buna temel soğurma olayı adı verilir. Valans bandından iletim bandına geçen elektronun

yerinde bir hol oluşur. Yarı iletken üzerine ne kadar çok foton gönderilirse o kadar çok elektron valans bandından iletim bandına geçer. Bu sayede malzemenin iletkenliği artar. Bu işleme fotoiletkenlik olarak adlandırılır [53, 54]. Bu olay soğurma spektrumunda ani bir artışa sebep olur. Bu ani artış gösteren bölgeye temel soğurma bölgesi denir. Bu temel soğurma bölgesi de yarı iletkenin yasak enerji aralığını bulmak için kullanılır [54].

Uzun dalga boyunda olan fotonların enerjileri düşüktür. Bu nedenle malzeme üzerine gönderilen uzun dalga boylu fotonların enerjileri yasak enerji aralığında küçük olduğu için soğurulma diğerlerinden çok daha küçüktür ( $h\nu < E_g$ ). Eğer yarı iletken üzerine kısa dalga boylu yani yüksek enerjili foton gönderilirse soğurma özelliği artar ve malzeme opak bir madde gibi davranır. Saydamlıktan opaklığa geçtiği bu bölge temel soğurulma bölgesidir [56].

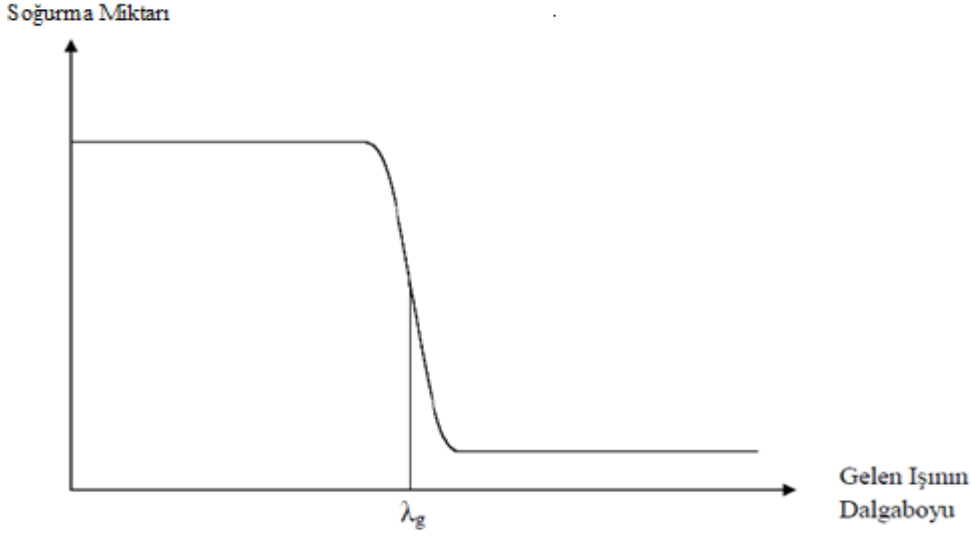
Yarı iletken üzerine gönderilen fotonun enerjisi yasak enerji aralığından büyük olması gerektiğinden yola çıkarak gönderilmesi gereken fotonun dalga boyu hesaplanabilir.

$$h\nu \geq E_g \quad (2.6)$$

$$\nu \geq \frac{E_g}{h} \quad (2.7)$$

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g} \quad (2.8)$$

Bu denklemlerde  $h$ ; Planck sabitini  $c$ ; ışık hızını gösterir. Bu denklemler sayesinde temel soğurulma olayının olabilmesi için gönderilen fotonun frekansının ve enerjisinin olması gereken minimum değerleri, dalga boyunun maksimum değerini gösterir. Frekans, dalga boyu ve enerjinin olması gereken sınır değerlerine soğurma sınırı adı verilir. Yarı iletkenin temel soğurma spektrumu Şekil 2.6'da verilmiştir.



**Şekil 2.6.** Yarı iletkenin temel soğurma spektrumu

Şekil 2.6'da gösterilen grafik soğurma-dalga boyu grafiğidir. Bu grafiğe göre yarı iletkene gönderilen foton  $\lambda_g$  dalga boyundan büyük ise soğurma yapamamış yani fotonu geçirmiştir. Fakat  $\lambda_g$  dalga boyundan daha küçük dalga boylarında gönderilirse fotonların enerjileri malzeme tarafından soğurulur. Soğurulma maksimum değere ulaştıktan sonra  $\lambda_g$  değeri küçültülse bile valans bandından iletim bandına geçen elektron sayısı değişmez. Bu nedenle grafikte de görüleceği gibi soğurma, maksimum değerden sonra sabit kalır [54, 57].

İncelediğimiz yarı iletkenin soğurma spektrumunu çizebilmek için bütün dalga boylarında ölçüm yapmak gerekir. Bu nedenle kullanacağımız ışığın dalga boyunu dikkatli seçmeliyiz. Bunu ayarlamanın en iyi yolu soğurma filtreleri kullanmaktır. Işık malzeme üzerine gönderilmesi için tek demet ya da çift demet yöntemleri kullanılabilir. Tek demet yönteminde ışık malzeme üzerinden geçirilir ve detektöre gönderilir. Çift demet yönteminde ise iki paralel ışık malzeme odasına gönderilir. Birinci demet malzemeden yansdıktan sonra detektöre gider. İkinci demet odada yansır ve detektöre gider. İkinci demet referans olarak kullanılır. UV-görünür spektrofotometrelerinde dedektör olarak fotomultiplikatör (ışık çoğaltıcı) tüpler ya da fotodiyotlar (ışık sensörleri) kullanılır [58].

## 2.10. Yarı İletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Malzemenin elektriksel iletkenliği o malzemeyi oluşturan bağlarla açıklanabilir. Eğer malzeme metalik bağlarla bağlıysa elektronlar daha kolay hareket edebilirler. Yani metalik bağlı malzemelerin elektriksel iletkenlikleri yüksektir. Yalıtkan olan

malzemelerde bulunan valans elektronları çiftler halinde atom ya da iyonlara sıkı bir şekilde bağlıdır. Elmas ve Silisyum her ikisi de kovalent bağlı ve benzer kristal yapıları sahip olmalarına rağmen yüksek sıcaklıkta elmas yalıtkan, Silisyum iyi bir iletkenidir. Bunun nedeni farklı band yapılarına sahip olmalarıdır [53].

Yarı iletkenlerde iletkenlik incelenirken, holler ve iletim elektronları beraber değerlendirilmelidir. Holler pozitif yüklü gibi davranır. Hollerin ve elektronların yük miktarları eşittir. Bu sebeple hollerin varlığı malzeme iletkenliğini etkiler [53].

Yarı iletkenlere elektrik alan uygulanırsa elektronlar elektrik alanına ters yönde, holler ise aynı yöne yönelirler. Elektronların ve hollerin yarı iletken içindeki hızları elektrik alan arttıkça artar. Bunların oranı sabittir. Bu sabite Mobilite ( $\mu$ ) denir. Yarı iletkenlerdeki elektron ve hollerin elektrik alan etkisindeki mobiliteleri;

$$\mu_e = \frac{v_e}{\vec{E}} \quad (2.9)$$

$$\mu_h = \frac{v_h}{\vec{E}} \quad (2.10)$$

şeklinde olur. Yarı iletkenin toplam mobilitesi ( $\mu$ ), elektron mobilitesi ( $\mu_e$ ) ve hollerin mobilitelerinin ( $\mu_h$ ) toplamına eşittir.

$$\mu = \mu_e + \mu_h = \frac{v_e}{\vec{E}} + \frac{v_h}{\vec{E}} \quad (2.11)$$

Bu bağıntılarda;

$\mu_e$ ; elektron mobilitesi

$\mu_h$ ; hol mobilitesi

$v_e$ ; elektronların hızı

$v_h$ ; hollerin hızı

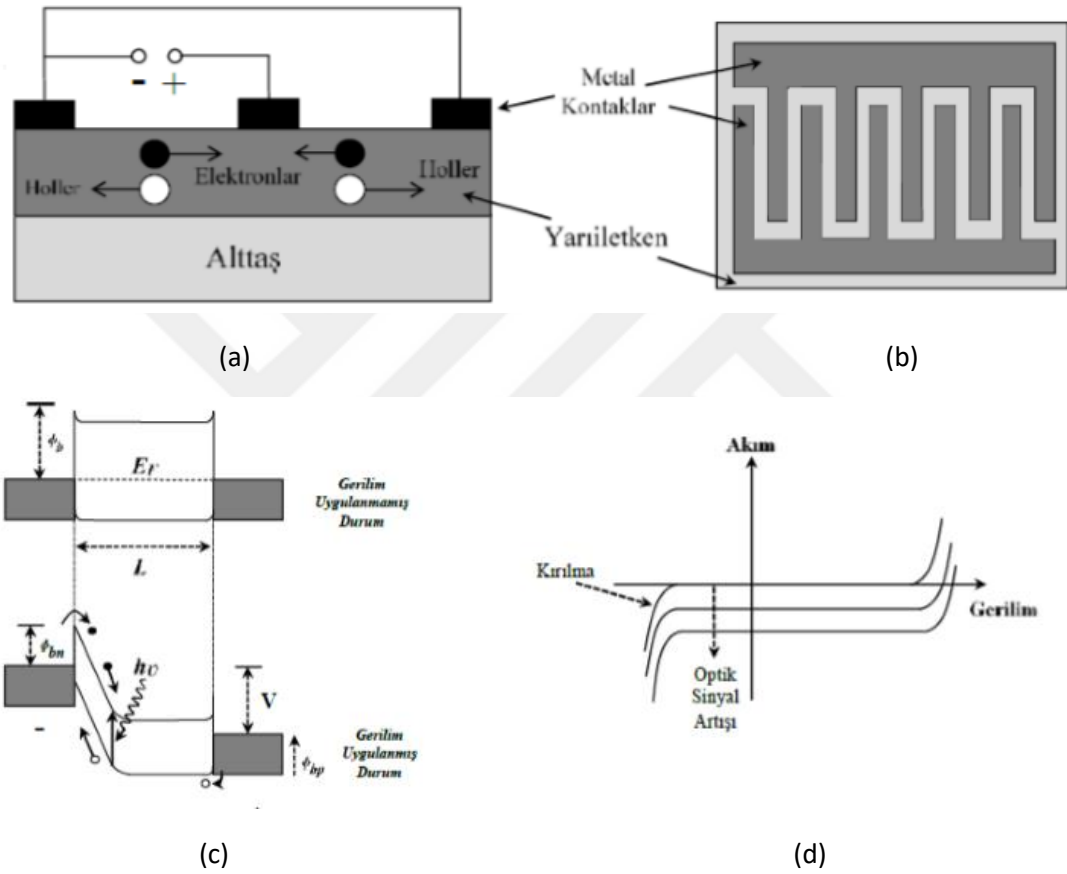
$\vec{E}$ ; elektrik alanı ifade eder [78].

## 2.11. Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörler

Birbirine kenetlenmiş fotoiletken fotodedektörler ile benzer yapıları sahiptir. Farkı ise metal-yarıiletken ve yarıiletken-metal yapıları ohmik kontak yerine, Schottky kontak yapılıdır. Düzlemsel bir yapıya sahiptirler. Tek parça entegrasyona uygun olup, transisör

yapımı için gerekli olan işlemlerin hemen hemen aynıları kullanılarak üretilebilir [93]. Şekilde 2.7’de gösterilmiştir.

MSM fotodedektörler, arka arkaya bağlı Schottky diyottan oluşur ve düşük karanlık bir akım sağlar. Diğer fotodedektörlere benzer şekilde elektron boşluk çifti oluştururlar. Elektronlar verilen elektrik alan sayesinde artı elektrota geçerken, boşluklar ise eksi elektrota geçer.



Şekil 2.7. MSM fotodedektörün yandan görünümü (a), üstten görünümü (b), enerji bant yapısı (c), akım-gerilim karakteristikleri (d) [94]

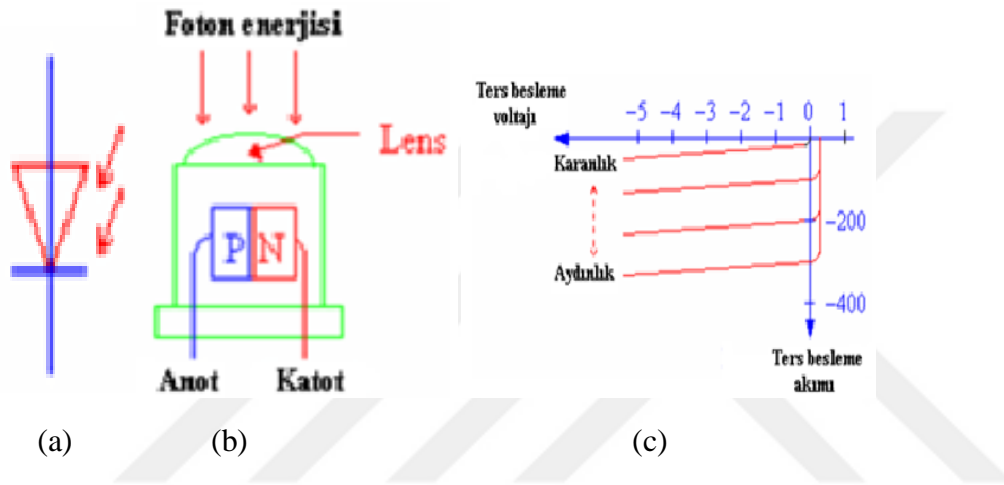
### 2.11.1 Foto diyotlar

Besleme voltajı ve ters besleme uyguladıktan sonra üzerine ışık düşürüldüğünde iletken hale gelerek katot ucundan anot ucuna doğru akım geçiren devre elemanlarına foto diyotlar denir. Anot ve katot olmak üzere iki kutbu vardır [59].

Eğer doğru besleme yapılırsa normal diyot gibi çalışır. Foto diyota ulaşan fotonlar mercekten geçer ve p ve n tipi malzemelerin birleştiği bölge üzerine odaklanması sağlanır.

Bu sayede fotonların enerjilerinin soğurulması sayesinde valans bandında bulunan elektronlar iletim bandına geçer ve foto diyottan akım geçmesi sağlanır [60].

Foto diyot üzerine gönderilen fotonun ışık şiddeti ne kadar fazla olursa o kadar fazla akım geçmesi, sağlanır. Gönderilen fotonun ışık şiddetini arttırsak p-n yüzey birleşimindeki direncin azalmasına ve foto diyottan geçen akım şiddetinin artmasına neden oluruz. Foto diyot üzerine gönderilen ışık şiddeti ile p-n yüzey birleşimdeki direnç ters orantılıdır [59, 60].



Şekil 2.8. Foto diyotun sembolü (a), yapısı (b) ve karakteristik eğrisi (c) [59].

Foto diyotlar ışığa karşı yüksek duyarlı olduğu için detektörlerde, elektronik alarmlarda, ışık ölçüm cihazlarında, transistörlerde, iletişim araçlarında, elektronik aletlerin uzaktan kumanda alıcılarında olmak üzere birçok alanda kullanılır [61, 62].

### 2.11.2 Foto diyotların akım-voltaj karakteristiği

Foto diyotların eklemlerindeki akım taşıma mekanizmalarının çeşidi ile akım-voltaj karakteristikleri oluşur. Bu mekanizmalar p-n eklemleri ve metal-yarıiletken eklemleri (Schottky, MSM foto diyotları) sayesinde farklı mekanizmalar oluşmasını sağlar [63].

Normal bir diyot ile foto diyotun akım-voltaj karakteristiği birbirine çok benzerdir. Şekil 2.12'de foto diyotların karanlık ve aydınlatılmış akım-voltaj karakteristiği gösterilmiştir. Eğer foto diyotun duyarlı olan yüzeyine ışık düşmezse foto diyot üzerindeki akım termal yoldan azınlık taşıyıcıları ile oluşan akımdır. Buna da karanlık akım adı verilir [64].



**Şekil 2.9.** Foto diyotun karanlık ve aydınlatılmış durumlardaki akım - voltaj karakteristiği [64].

Şekil 2.9'da akım-voltaj karakteristikleri; karanlık durumda A eğrisi, aydınlık durumlar ise B ve C eğrileri ile gösterilmiştir. Akım-voltaj değeri birinci bölgede pozitifdir. Bu bölgede foto diyot normal diyot gibi çalıştığı için foto diyot uygulamalarına uygun değildir. İkinci bölge foto diyota herhangi bir cevap vermez. Üçüncü bölgede küçük bir  $I_s$  akımı oluşur [89]. Bu bölgede ışık şiddeti arttıkça negatif akım yönünde aşağı doğru değişir.  $V=0$  ekseninde eğrilerin akım eksenini kestiği yerde kısa devre akımı  $I_{sc}$  değeri oluşur. Ters polarlama, çok yüksek voltajlarında akım hızlı bir şekilde artar. Bu bölgeye ters bozulma bölgesi denir ve ışığı algılamak için uygun olan bölgedir. Dördüncü bölge ise foto voltaik bölgedir [65].

Akım-Voltaj karakteristiği, band genişliği (çalışma hızı) ve kuantum verimi karakteristiği foto diyotların üç ana karakteristiğini oluşturur. Bu üç karakteristik foto diyotun performansını gösterir. Diyotların eklem niteliklerini, yüksek bozulma voltajı ve düşük karanlık akımları gösterir. Düşük karanlık akımı, foto diyota ışık gelmediği andaki polarlama sırasında diyottan geçen akımdır ve bu da diyotun hassasiyetini gösterir [66]. Buradaki ters polarlama voltajının değeri bozulma voltajını gösterir. Bu da ters polarlama

voltajı sınırını belirtir. Bu sınırdan sonra kazanç ve çarpma mekanizmaları diyotun çalışmasını gerçekleştirmeye başlar [67].

Foto diyotlar yeterince ışık aldığıında çalışmaya başlar ve bir akım kaynağıdır. Foto diyota gelen ışık zayıf bir akım oluşmasına neden olur. Foto diyota bir voltaj uygulandığında yük direnci nedeniyle fotoakım oluşur. Bu yük dış devre direncinin toplamını oluşturur. Fotoakımın etkinliğinin büyük çoğunluğu dış devre, küçük bir kısmı ise iç direnç üzerinde oluşur. Bu sayede foto diyot bir akım kaynağı ya da voltaj kaynağı olarak kullanılabilir. Bir schottky foto diyotun doğru akımını incelersek seri direnç, engel yüksekliği, idealite faktörü gibi parametrelere ulaşabiliriz [67].

### 2.11.3 Foto Diyotların Kapasitans - Voltaj Karakteristiği

Schottky diyotların Kapasitans-Voltaj (C-V) karakteristiği en önemli özelliklerindedir. Schottky diyotların C-V karakteristiği buldukları cihazların elektriksel özellikleri üzerinde önemli bir etkisi vardır ve ara yüzey durumlarına karşı son derece duyarlıdır. Düşük frekanslarda kapasitenin artması AC sinyalinin yük taşıyıcılar tarafından takip edilmesine bağlıdır. C-V ölçümleri çok yüksek frekanslarda yapılırsa ara yüzeyde bulunan yükler AC sinyallerini takip edemez. P tipi bir yarıiletkeni oluşturan kontağın kapasitesi denklem 2.12 ile bulunur.

$$\frac{1}{c^2} = \left[ \frac{2}{\epsilon_0 \epsilon_s q N d A^2} \right] \left[ V_{bi} - \frac{V - kT}{q} \right] \quad (2.12)$$

$\epsilon_0$ ; Boşluğun dielektrik geçirgenliği

$\epsilon_s$ ; Dielektrik sabiti

q; yük

d; donör konsantrasyonu

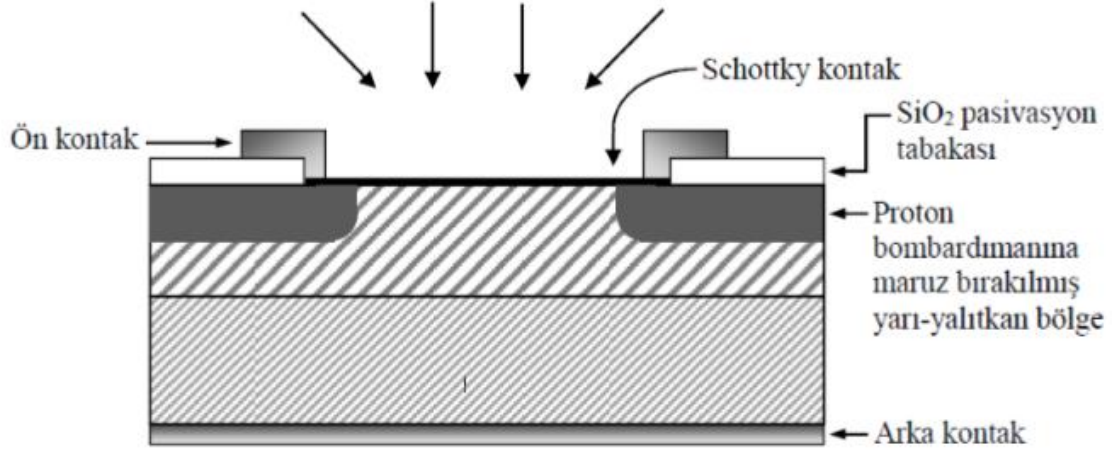
$V_{bi}$ ; difüzyon voltajıdır [68].

### 2.12. Schottky Fotodedektörler

Schottky fotodedektörler katılanan yarıiletkenlerin üzerini kaplayan ince metalden oluşur [95]. Yarıiletkenin bir metal ile teması sağlanır, iki temas eden madde de yarıiletkenin fermi enerji düzeyi ile metalin fermi enerji düzeyi aynı hizaya gelir ve metal-yarı iletken yüzeyinde bir potansiyel bariyer oluşur. Gönderilen ışınlar metal katman



üzerinde soğurular ve elektron delik çifti oluşur. Uyarılan elektronlar, metal yüzeye ulaşınca kadar taşınır, sadece yeterli enerjiye sahip olanlar bariyeri geçer ve yarıiletkenine ulaşır. Böylece elektriksel sinyale çevrilir.



Şekil 2.10. Schottky fotodedektörün şematik gösterimi [94].

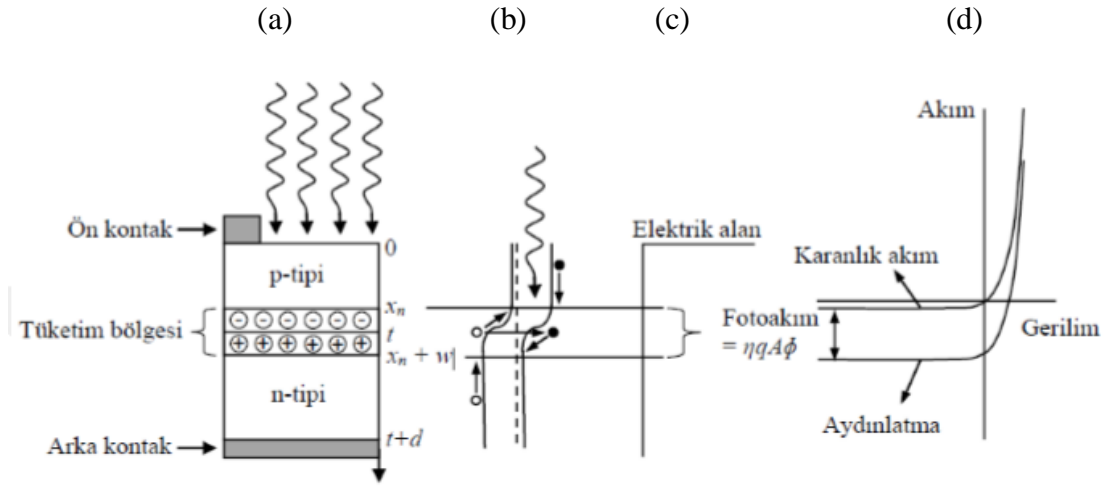
### 2.13. p-i-n Fotodedektörler

Bu fotodedektörler, optik iletişimde p-n eklemlerine göre daha fazla tercih edilir. p-n fotodedektörlerden farklı olarak p ve n tipi katkılı yarı iletkenler arasında katkısız bir yarıiletken koyulur. Katkısız bu yarı iletken düşük taşıyıcı yoğunluğu ve yüksek direnç özelliği sayesinde detektöre uygulanan gerilimi tamamen bu bölgeye düşürür [94]. Bu nedenle katkısız bölgenin kalınlığının iyi ayarlanması oldukça önemli bir etkidir. Çünkü bu kalınlık kızılötesi dedektörün hangi dalga boyunda çalışması gerektiğinin belirlenmesinde rol oynar. Ancak alınacak dönüt ve kuantum verimi bu kalınlık ile farklılık göstermektedir. Alacağımız dönütün hızlı olmasını istiyorsak kalınlığı az, kuantum veriminin yüksek olması isteniyorsa tabaka kalınlığının oldukça fazla olması gerekir. Bunun yanı sıra p-i-n dedektörlerin cevap hızı devre parametrelerine de bağlı olduğunu söylemek gerekir.

### 2.14. p-n Eklem Fotodedektörler

Fotovoltaik dedektörlerin en yaygın kullanılanlarından birisidir. Yasak enerji bant aralığından daha büyük enerjiye sahip fotonlar, bu eklem her iki tarafında da elektron için boşluk oluştururlar ve güçlü elektrik alan sayesinde birbirlerinden ayırarak, uzay-yük bölgesinden difüzyon derinlikleri kadar uzaklaşırlar [96].

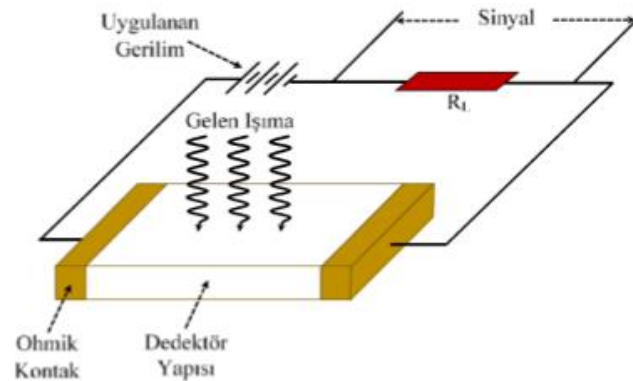
Şekilde p-n fotodedektörün eklem yapısı, enerji bant diyagramı, elektrik alanı ve akım-gerilim karakteristikleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.11. p-n eklem fotodedektörün şematik gösterimi, (a) p-n eklem yapısı, (b) enerji bant diyagramı, (c) elektrik alanı, (d) akım-gerilim karakteristikleri [96].

## 2.15. Fotoiletken Dedektörler

Fotoiletken dedektörler ışığa karşı duyarlılık gösteren fotodedektörlerdir. Şekilde gösterilen fotoiletken dedektörüne, yasak bant enerji aralığından daha büyük bir enerjili foton geldiğinde, fotonlar soğurulur ve elektron-boşluk oluşturur. Soğurulma ile valans bandındaki elektronlar iletim bandına geçiş yapar ve serbest taşıyıcı sayılarında da artış gözlemlenir. Bu artış fotoiletken dedektörün elektriksel iletkenliğini değiştirir ve gelen ışığın şiddetinin değişim miktarı algılanmış olur.



Şekil 2.12. Fotoiletken dedektör [94].

## 2.16. Kızılötesi Dedektörler

Foton dedektörü olarak da bilinen bu dedektörler üzerine düşen ışınlarla oldukça hassas olan cihazlardır. Soğurdukları bu ışınları elektronik devreler yardımıyla elektrik akımına dönüştürürler. Fotodedektörler yüksek frekans değerlerinde çalıştırılabilirler. Kızılötesi fotodedektörlerde kızılötesi ışınlar; banttan banda ve katkı seviyelerinden uyarılma olarak, iki farklı uyarılma işlemiyle soğurur. Bu fotodedektörün tepkisi, üzerine düşen ışının dalga boyu ve gücüne bağlı değişkenlik gösterir. Yük taşıyıcılarının üretilmesini engellemek için soğutulması gerekir. Çünkü termal uyarımla oluşan yük taşıyıcıları karanlık akım değerini yükseltmektedir. Bununla beraber elektrik alan, harici yük devresine bağlı olarak, yük taşıyıcılarının farklı yönlerde dağılmasına neden olur [97].



### 3. MATERYAL VE DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1. İnorganik Yarı iletken Malzemelerin Üretilmesi ve Hazırlanması

##### 3.1.1. Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapısında Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> Çözeltinin Hazırlanması

Dört bileşenli foto diyotların yapısında kullanılan Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> çözelti hidrotermal tekniği kullanılarak üretilmiştir. Diyotlar Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapısında üretilmişlerdir. Üretime başlamadan önce Silisyum alttaşları temizleme işlemi uygulanmıştır. Diyot üretiminde p-tipi Silisyum alttaş kullanılmıştır. Temizleme işlemi Silisyum alt taşların yüzeylerinin kirden ve tozdan arınmasına yardımcı olur. Temizleme işlemine başlamadan önce Silisyum alttaşlar saf su ile yıkanır. Yıkanan alt taşlar 5 dakika boyunca aseton içerisinde sonik titreştiricide titreştirilir. Daha sonra tekrar saf su ile yıkanır ve hemen ardından etil alkol içerisine atılarak 5 dakika daha sonik titreştirme işlemine tabii olur. Silisyumlar asit çözeltisi içerisinde (HF:H<sub>2</sub>O (1:10ml)) 30 saniye boyunca bekletilir [39]. Daha sonra tekrar saf su içerisine atılarak 5 dakika boyunca sonik titreşim işlemine tabi tutulur. Temizlik işleminin tamamlanmasının ardından Silisyum tabakanın bir tarafı alüminyum ile termal evaporatör kullanılarak kaplanır. Bu kaplama işlemi sonucunda tahmini olarak 100 nanometre kalınlığında alüminyum ince filmi elde edilir. Bu film tabakası kontak olarak kullanılır. Alüminyum kaplama işleminin ardından alüminyum kaplanmış Silisyum tabaka 570 °C 5 dakika boyunca tavllanır. Sonuç olarak Al/p-Si yapı elde edilir. Elde edilen yapı saf su içerisinde 3 dakika boyunca sonik titreştirme işlemine tabi tutulur.



**Şekil 3.1.** Deney numunelerin hazırlandığı düzenek [68].

### 3.1.2. $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$ Nanoyapıların Sentezi

$\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  nanoyapıların sentezinde 2 mol  $\text{CuCl}_2$ , 1 mol  $\text{SnCl}_2$ , 5 mol  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$  (tiyüre) ve 1 mol  $\text{FeCl}_2$  w 80 ml Dimetilformamid (DMF) içerisine eklenerek bir beher içerisinde çözüldü. Karışım manyetik karıştırıcı kullanılarak tuzlar tamamen çözünene kadar karıştırıldı. Elde edilen çözelti teflon otoklav içerisine aktarıldı.  $250^\circ\text{C}$  24 saat boyunca ısı işlemine tabi tutuldu ve ısı işlemi sonucunda süspansiyon elde edildi. Çökeltiyi sıvıdan ayırmak için sıvı santrifüj işlemine tabi tutuldu ve bu işlem sonucunda çökelti sıvıdan ayrıldı. Çökelti  $90^\circ\text{C}$  5 saat boyunca sıcak bir tabaka üzerinde kurutuldu. Bu işlem sonucunda nano toz elde edildi. 0.02 gram nanotoz 10 ml klorobenzen içerisine tamamen çözülmeye kadar ultrasonik titreştirme işlemine tabi tutuldu. Elde edilen sıvı alüminyum kaplı silikon tabakalar üzerine damlatıldı ve 3500 devirde 40 saniye boyunca spin kaplama işlemine tabi tutuldu. Çözelti ile kaplanmış silikon tabakalar  $55^\circ\text{C}$  derecede fırına yerleştirildi ve çözelti tamamen kuruyana kadar orada bekletildi. Çözelti kaplanmış Silisyum tabakaların diğer yüzüne de alüminyum kontaklama işlemi uygulandı. Bu işlem sonucunda  $\text{Al/p-Si/Cu}_2\text{FeSnS}_4/\text{Al}$  formdaki yapılar elde edildi.

İnce filmlerin mikroskopik ve spektroskopik incelemeleri Karl Zeiss SEM gerçekleştirilmiştir. XRD fırının patenleri Bruker D8 Advanced difraktometre ile yapılmıştır. Elektrik optoelektronik incelemeler ise Gün Işığı hem de kızılötesi Işık altında FYTRONIX IR solar simülatör yardımı ile gerçekleştirilmiştir. UV spektrometre incelemeleri Shimadzu 3600 spektrometre ile tamamlanmıştır.

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

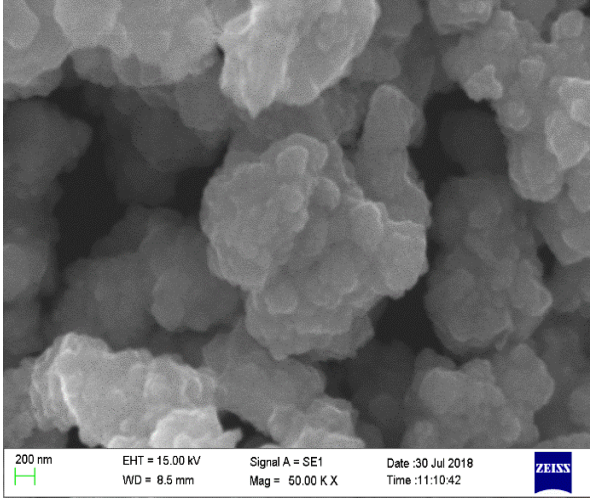
### 4.1. Yapısal Karakterizasyonlar

#### 4.1.1 Kullanılan Cihazlar Ve Karakterizasyon Teknikleri

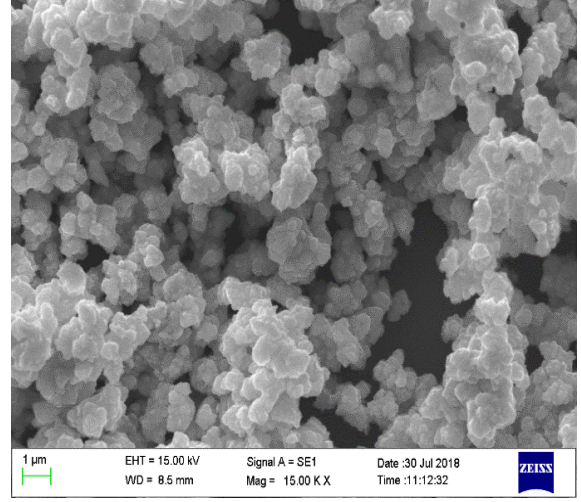
$\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  malzemelerine ait yapısal karakterizasyon işlemlerinde mikroskopik ve spektroskopik yöntemler kullanılmıştır; bunlar için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisinden (EDX) faydalanılmıştır.

#### 4.1.2 Taramalı Elektron Mikroskobu(SEM) Gözlemleri

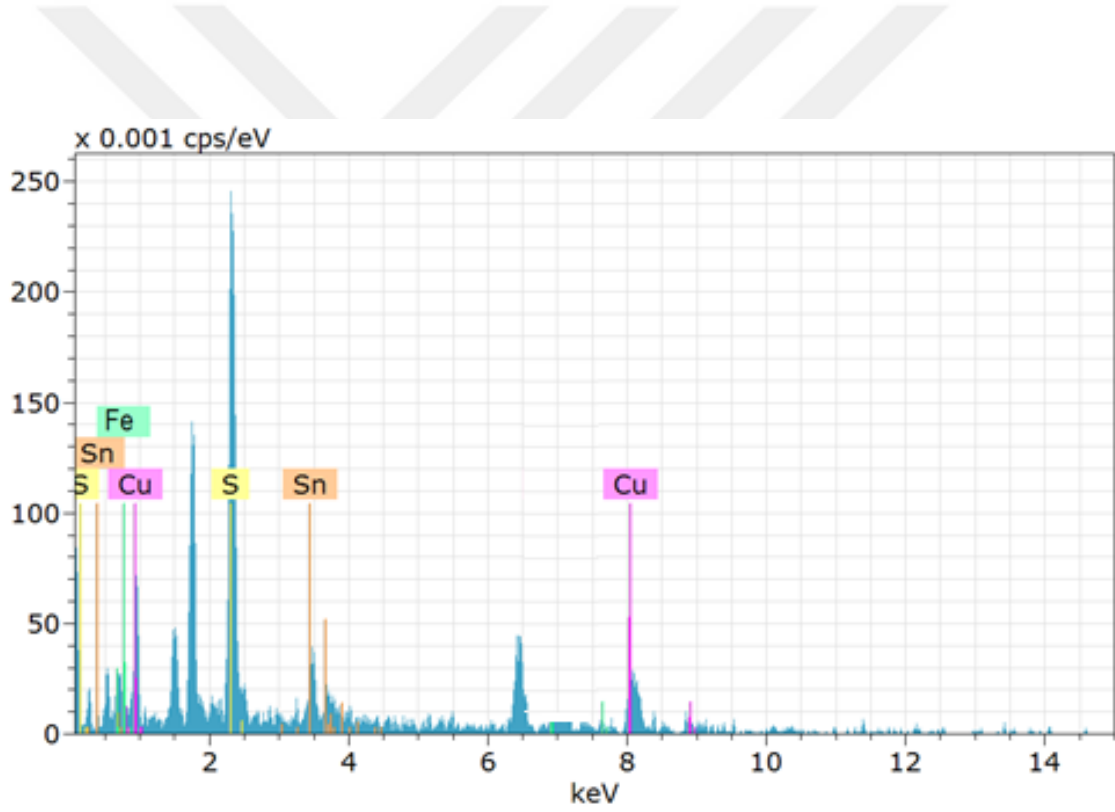
Şekil 4.1’de nano yapılara ait taramalı elektron mikroskop görüntülerini göstermektedir. Bu görüntüler sırasıyla 15k ve 50k büyütme oranlarında elde edilmiştir. Görüntülerde ilk bakışta nano parçacıklar yaklaşık 1 Mikron büyüklüğünde gözükse de görüntüler detaylı incelendiğinde nanoparçacıkların 100 nm’den daha küçük olduğu görülmektedir. Görüntülerde nanoparçacıkların bir araya gelerek büyük yapılar oluşturduğu gözlenmektedir. Bu yapıların boyu 1 mikrometreye kadar ulaşabilmektedir; aynı zamanda nanoparçacıklar granüler formdadır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri parçacıkların yaklaşık aynı boyda olduğunu göstermektedir. Bu da nanoparçacıkların çok dar bir boyut dağılımına sahip olduğuna işaret etmektedir. Şekil 1c enerji dağılım spektroskopisi ait spektrumu göstermektedir. Spektrumda Cu, Fe, S ve Sn elementlerine ait tepeler (*peak*) gözlenmektedir. Bu durum nanoparçacıkların 4 bileşenden oluştuğunu ve nanoparçacıklar içerisinde bir kontaminasyona yer olmadığını göstermektedir. Elde edilen görüntüler literatürdeki görüntülerle uyum sağlamaktadır [69- 74].



(a)



(b)



(c)

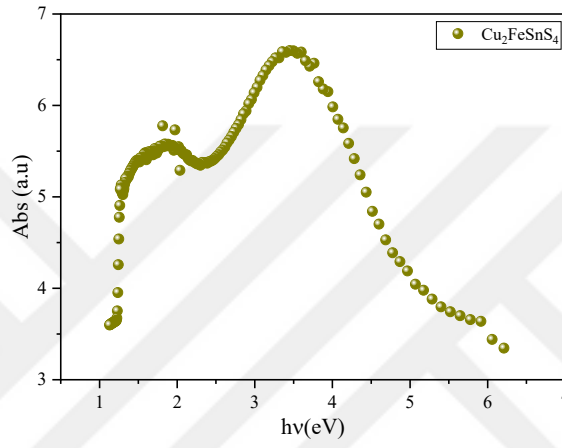
Şekil 4.1:  $\text{Cu}_2\text{FeSnS}_4$  nano yapılarına ait 15K (a), 50K (b) büyütme değerinde elde edilen SEM görüntüleri ve EDS spektrometresi sonuçları (c).



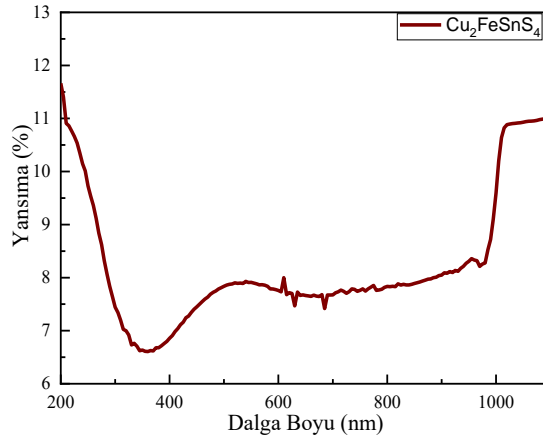
## 4.2. Optik Karakterizasyon

### 4.2.1 Cufesns<sub>4</sub> Numunelerinin UV-Vis Spektroskopisi Sonuçları

Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> malzemesi nanotoz şeklinde üretilmiştir. Bu nanoparçacıklardan üretilecek elektronik yapıların optoelektronik özelliklerinin belirlenebilmesi için nanoparçacıkların optik özelliklerinin aydınlatılması gerekmektedir. Bu sebeple yansımaya ve soğurma grafikleri UV-vis spektroskopisi vasıtasıyla incelenmiştir. Yansımaya- dalga boyu grafiği şekil 4.2'de 200 nm ile 1100 nm arasında incelenmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 4.2:** Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> ince filmlere ait geçirgenlik (a) ve soğurma (b) spektrumu.

Şekil 4.2’de görüldüğü gibi numunenin yansıma dalga boyuna bağlı olarak değişmiştir. Numune yaklaşık olarak 350 nm civarından bir yansıma sınırı göstermektedir. Yansıma sınırı nano yapıya bağlı olarak daha yüksek dalga boylarına kaymaktadır. Numunelerin yansımaları yani reflektansları %8- %8,5 civarına kaymaktadır. Reflektanslarının düşük olması, soğurma özelliklerinin yüksek olmasındandır. Nanoparçacık, geçirgenlik spektroskopisi özellikle görünür bölgede sabit bir karakteristik çizmiştir ve %55 ile %60 geçirgenlik değerleri arasında kaldığı görülmüştür. Şekil 4.2’de Soğurma – dalga boyu grafiği 200 nm ile 1100 nm arasında incelenmiştir ve yansıma grafiğine paralel bir karakteristik sergilediği görülmüştür. Görünür bölgede sabit bir trend izlediği anlaşılmıştır. Soğurma grafiğinin kızılötesi bölgede hafif artış gösterdiği görülmektedir. Bu durum nanoparçacıkların kızılötesi dalgaları iyi bir şekilde soğurabildiğine işaret etmektedir. Şekil 4.2’de incelenen UV-vis spektroskopisi sonuçları kullanılarak nanoparçacıklara ait enerji bant aralıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada Kubelka – Munk fonksiyonundan yararlanılmıştır [75, 76].

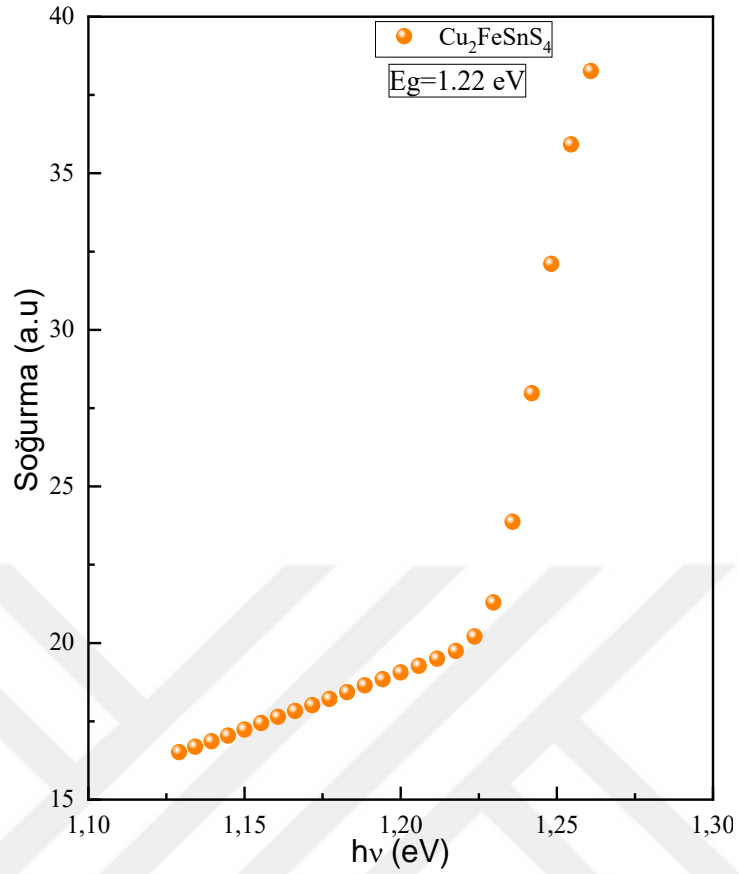
Kubelka -Munk fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanmaktadır

$$F(R)= \frac{(1-R)^2}{2R} \quad (1)$$

Formülde  $F(R)$  is Kubelka- Munk fonksiyona bağlı soğurma, R ise reflektansdır. Şekil 4 de, soğurma – foton enerjisi davranışı incelenmiştir. Buradan Hesaplamalar esnasında aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$\alpha hv = A(hv-E_g)^n \quad (1)$$

formülde  $\alpha=F(R)/d$ , d ince film kalınlığı, A sabit,  $E_g$  bant aralığı enerjisi, n ise optik geçişlerin belirlenmesinde kullanılan sabittir. Direk geçişlerde  $n=1, 2, 3...$  indirek geçişlerde ise  $n=1/2, 3/2, 5/2...$   $(\alpha hv)^2 - hv$  grafiği kullanılarak hesaplanan bant enerjisi  $Cu_2FeSnS_4$  nanomalzeme için 1.22 eV olarak bulunmuştur. Huang ve arkadaşları  $Cu_2FeSnS_4$  nanoapılar için bant aralığı enerjisini 1.25 ve 1.51 arasına hesaplarken lli bu değeri 1.33 eV olarak bulmuştur. İlhan ve ekibi  $Cu_2NiSnS_4$  için bandgap enerjisini 1.20 eV hesaplarken yine aynı grup kobalt temelli  $Cu_2CoSnS_4$  için bandgap enerjisini 1.19 eV olarak hesaplamıştır. Chen  $Cu_2NiSnS_4$  için bant enerjisini 1.20 eV hesaplamıştır. Literatürde hesaplanan değerler incelendiğinde araştırmalarımızda bulunan değerler literatürde bulunan değerler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır [33, 35, 77- 79].



Şekil 4.3: Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> ince filmlerin soğurma – hv spektrumu.

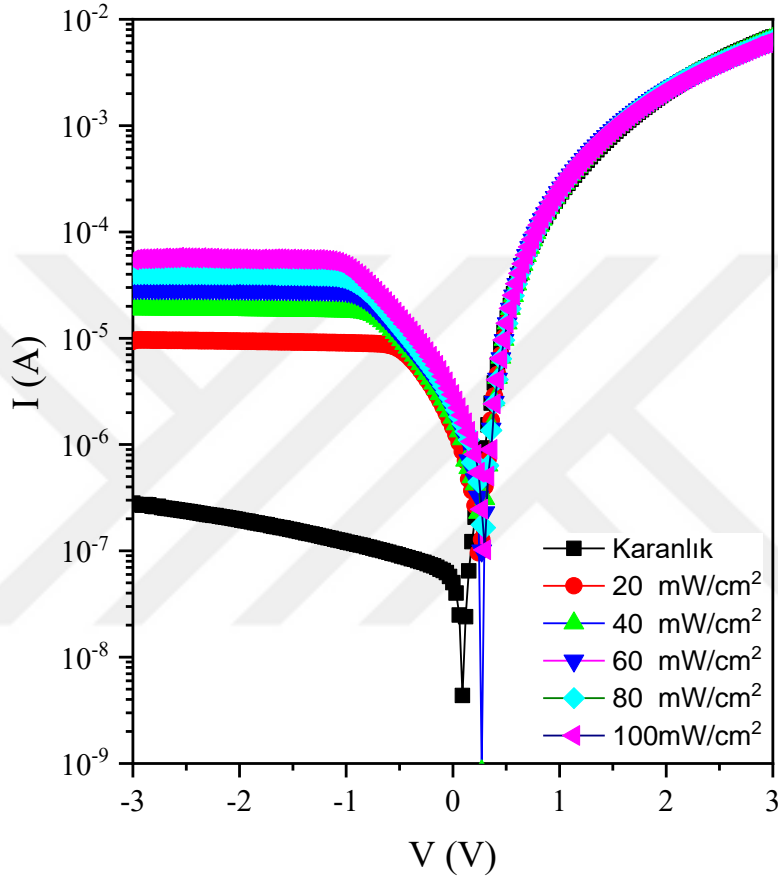
#### 4.2.2. Optoelektronik İnceleme

Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların fotodiyot davranış gösterip göstermediğinin anlaşılması için birçok teste tabi tutulmuştur. Bunun için Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapısının diyot karakteristik gösterip göstermediğinin anlaşılması gerekmektedir. Bu sebeple Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların -3V ve +3V arasında akım-voltaj (I – V) davranışları incelenmiştir.

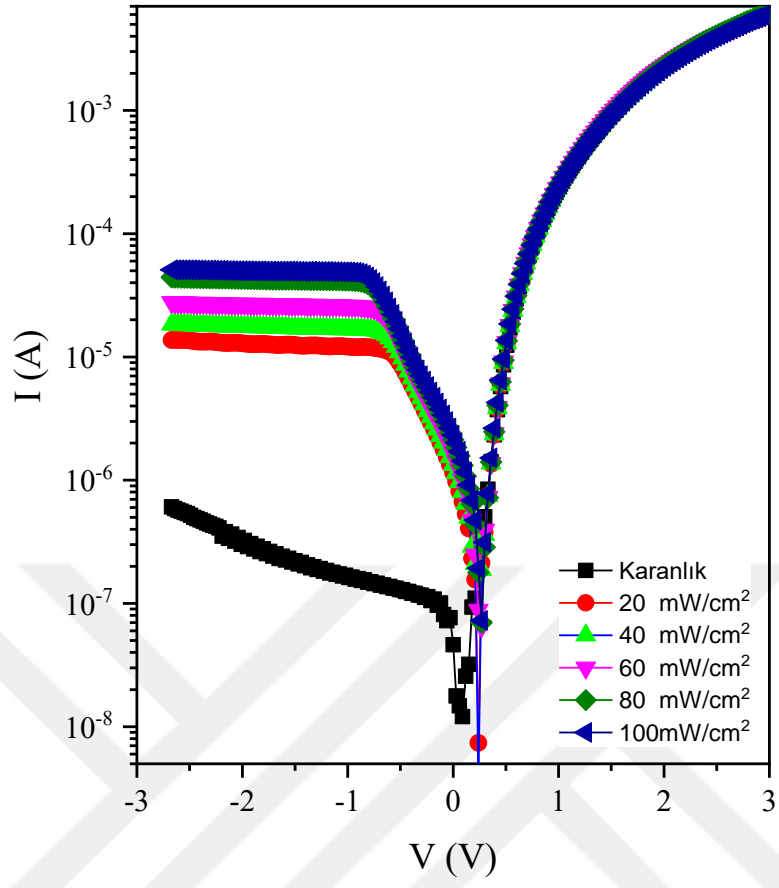
#### 4.2.3 Al/p-Si/CuFeSnS<sub>4</sub>/Al Fotodiyotların I-V Karakteristiği

Yapılan inceleme sonucunda diyotların negatif denetleme bölgesinde akımı düzeltbildiği görülmüştü. Bu durum Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların diyot karakteristiği gösterdiğine işaret etmektedir. Aynı inceleme değişik aydınlatma şiddetleri altında da tekrar edilmiştir. Değişik aydınlatma şiddetleri altında I – V karakteristiğinin incelenmesindeki amaç diyotların ışığa karşı bir tepki oluşturup oluşturmadığının anlaşılmasını sağlamasıdır.

Şekil 4.4 ve şekil 4.5'te değişik aydınlatma şiddetleri altında sergilenen I – V grafiklerinde ışık uygulandığı zaman özellikle negatif denetleme bölgesinde gözle görünür bir akım artışı olduğu anlaşılmıştır. Bu artış diyotların ışığa karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Aynı inceleme kızılötesi ışık verilerek de tekrarlanmıştır. Elde edilen veriler Şekil 4.5'te gösterilmektedir.



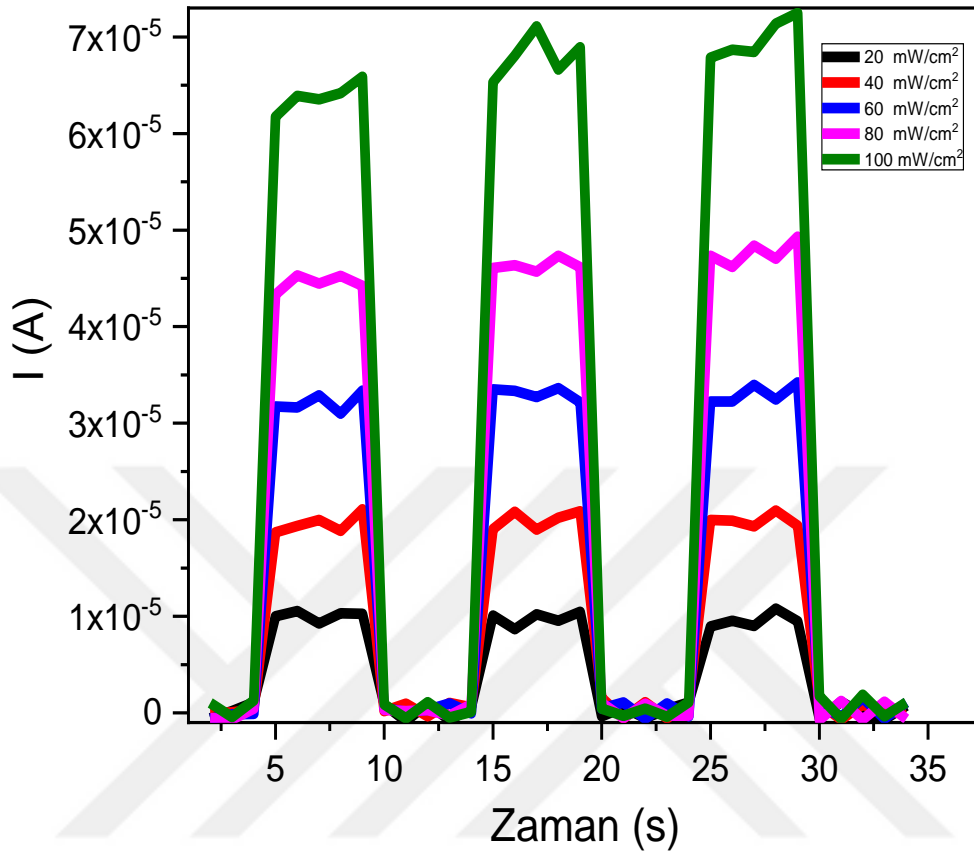
Şekil 4.4: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al nanoyapılara ait gün ışığı altında elde edilen I – V grafiği.



**Şekil 4.5.** Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al nanoyapılara ait kızılötesi ışık altında elde edilen I – V grafiği.

Şekil 4.5'te elde edilen grafiğe bakıldığında Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların gün ışığındaki diyotlara paralel olarak kızılötesi ışık altında da fotoakım oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların kızılötesi ışığa karşı duyarlı olduğunu kanıtlamaktadır.

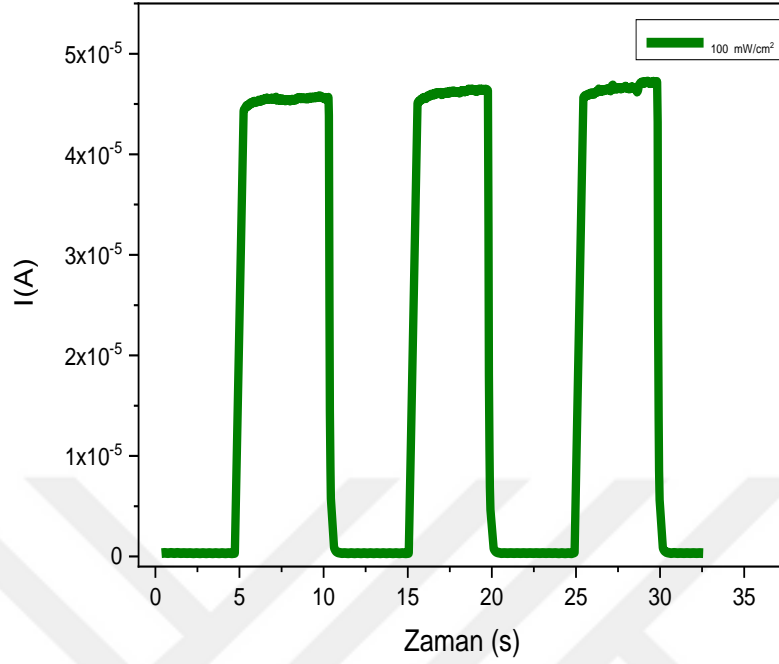
#### 4.2.4 Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların I-t karakteristiği



Şekil 4.6: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların günışığı altında I – t karakteristiği

Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların fototepki ve fotoduyarlılıklarının anlaşılması için akım zaman (I – t) davranışları incelenmiştir.

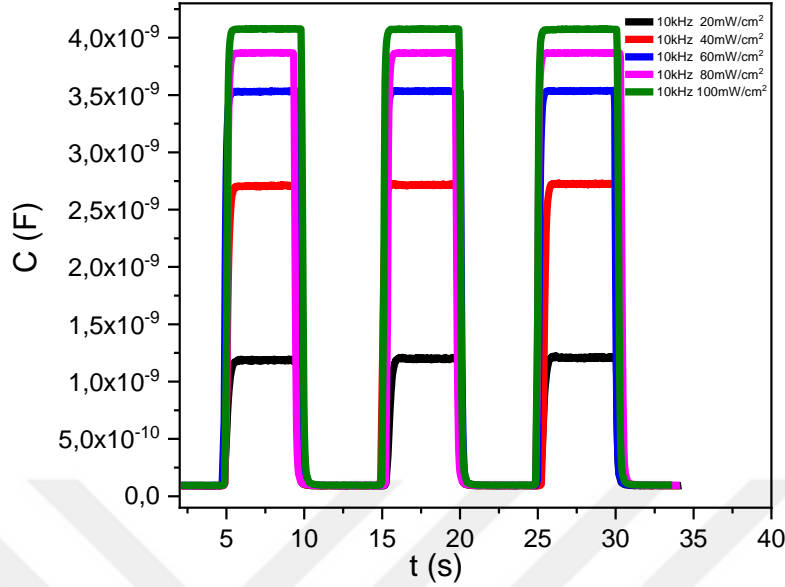
Şekil 4.6’da günışığı altında Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıdaki fotodiyotların Akım – zaman grafikleri gösterilmektedir. İncelemeler esnasında ışık beşer saniye aralıklarla art arda açılıp kapatılmıştır. Işığın açılması esnasında fotoakımın arttığı gözlemlenmiştir, ışık açık kaldığı beş saniye süresince ölçülen fotoakımın stabil bir şekilde korunduğu görülmüştür. Işığın kapanması ile ölçülen fotoakım sıfıra doğru dramatik bir düşüş göstermiştir. Aynı ölçüm 20, 40, 40, 80 ve 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetleri ile gerçekleştirilmiştir. Minimum foto akım 20 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetinde maksimum foto akım 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetinde elde edilmiştir.



**Şekil 4.7:** Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların kızılötesi ışık altında I – t karakteristiği

Gün ışığına benzer şekilde kızılötesi ışık ile de akım – zaman grafiği ölçümü yapılmıştır. İncelemeler esnasında kızılötesi ışık beşer saniye aralıklarla art arda açılıp kapatılmıştır. Işığın açılması esnasında fotoakımın arttığı gözlemlenmiştir; kızılötesi ışık açık kaldığı beş saniye süresince ölçülen foto akımın stabil bir şekilde korunduğu görülmüştür. Işığın kapanması ile ölçülen fotoakım sıfıra doğru dramatik bir düşüş göstermiştir. Ölçümler 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetleri ile gerçekleştirilmiştir. Güneş ışığı aydınlatmasında ve kızılötesi aydınlatmada ölçülen maksimum foto akım  $7.2 \times 10^{-5}$  A ve  $4.9 \times 10^{-5}$  A olarak hesaplanmıştır. Akım zaman ölçümleri Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların gün ışığını ve kızılötesi ışığı dedekte edebilme kabiliyeti olduğunu göstermiştir.

#### 4.2.5 Al/p-Si/CuFeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların C-t karakteristiği



Şekil 4.8: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların C – t karakteristik grafiği

Kapasitans - zaman (C – t) grafikleri fotodiyotların fototepki karakteristiklerinin anlaşılması amacıyla incelenmiştir ve şekil 4.8’de sergilenmektedir. Kapasitans- zaman grafikleri incelenirken gün ışığından faydalanılmıştır. Gün ışığı aydınlatması 5'er saniyelik aralıklarla fotodiyotun üzerine uygulanmıştır. Aydınlatmalar açıldığında ölçülen fotokapasitans değerinde hızlı bir artış olduğu gözlenmiştir. Işık açık olduğu 5 saniye süresince fotokapasitans değerinin neredeyse sabit kaldığı görülmüştür. 5 saniye sonunda ışık söndürüldüğünde ölçülen foto kapasitansı değerinde hızlı bir düşüş olduğu ve sıfıra yaklaştığı gözlenmiştir. Ölçüm değişik aydınlatma şiddetleri altında yapılmıştır. Işık şiddetinin ölçülen fotokapasitans değerini arttırdığı gözlenmiştir. Minimum fotokapasitans 20 mW/cm<sup>2</sup> de ölçülürken maksimum foto kapasitans 100 mW/cm<sup>2</sup> de ölçülmüştür ve bu değerler için 4.1 nF ,1.2 nF değerleri elde edilmiştir.

I – v grafikleri kullanılarak diyotların idealite faktörleri (n) bariyer yükseklikleri ( $\phi_b$ ), doyum akımları ( $I_o$ ) ve foto hassasiyet değerleri (R) hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda termiyonik salınım teorisi kullanılmıştır [80]. Kullanılan formül

$$I=I_o \left[ \exp \left( \frac{q(V-IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (2)$$



burada “n” idealite faktörü “q” is elektron yükü, k is Boltzman sabiti, “T” mutlak sıcaklık, “I<sub>o</sub>” geri denetim akımı , “V” uygulanan voltaj ve “R<sub>s</sub>” seri dirençtir. I<sub>o</sub> Aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$I_o = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (3)$$

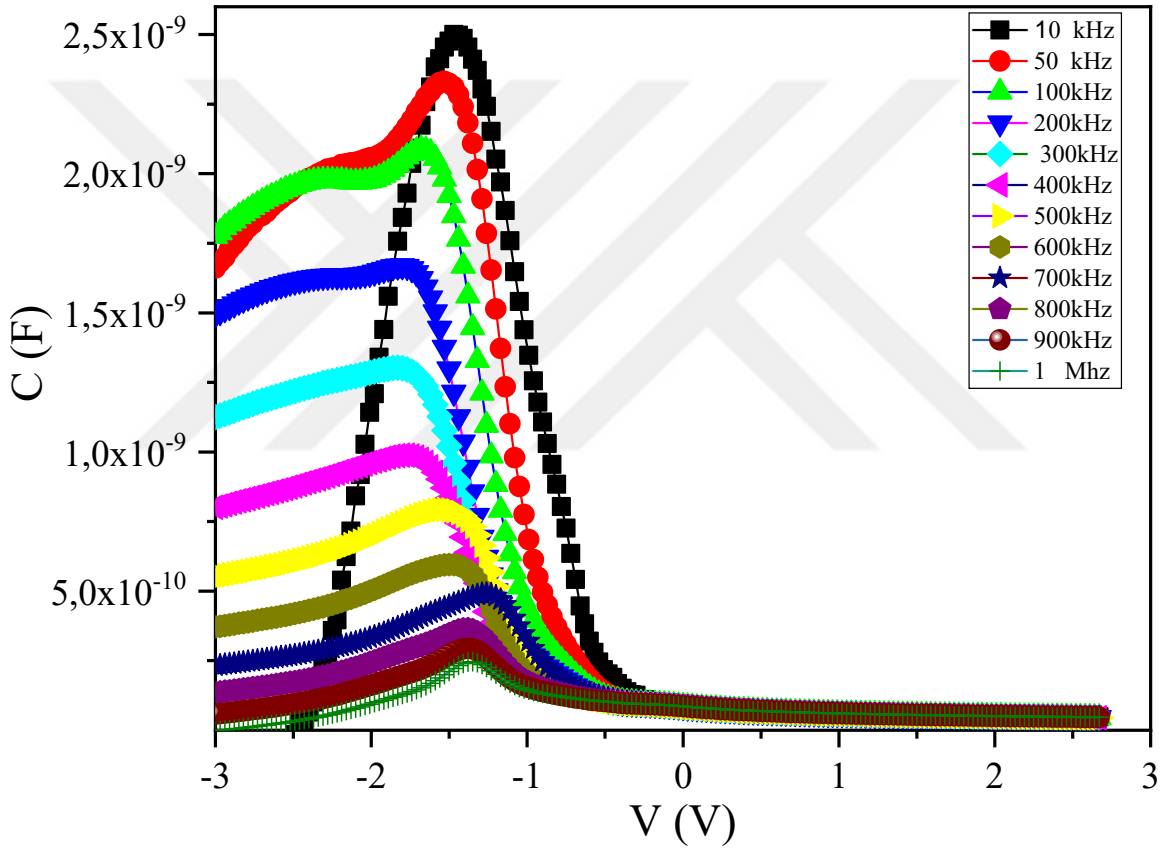
Formülde A diyotun yüzey alanı, “φ<sub>b</sub>” is the bariyer yüksekliği, “A\*” ise Richardson sabitini ifade eder, bu sabit literatürde p-tipi yarı iletken için 32 A/cm<sup>2</sup>K<sup>2</sup> , n tip yarı iletken için ise olarak bilinmektedir.

Hesaplamalardan elde edilen değerler Tablo 1’de listelenmiştir. Teorik olarak bir diyot için idealite faktörünün 1 olması beklenmektedir, ancak realistik sonuçlar bunun böyle olmadığını göstermiştir. Bizim çalışmamızda da gün ışığı aydınlatması için idealite faktörü 5.14 ve kızılötesi ışık aydınlatması için idealite faktörü 5.65 olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan değerlerin teorik beklenti uymadığı düşünülebilir, ancak elde edilen değerler literatürde daha önceden de rapor edilmiş değerler ile uyumludur. Örneğin, İlhan ve grubu nikel temelli 4 bileşenli Cu<sub>2</sub>NiSnS<sub>4</sub> diyotlar için idealite faktörünü gün ışığı aydınlatması için 5.23, kızılötesi aydınlatma için ise 5.16 olarak hesaplamıştır [35]. Aynı zamanda İlhan ve arkadaşları Kobalt Temelli 4 bileşenli Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub> fotodiyotlar için idealite faktörünü gün ışığı aydınlatması için 5.31 kızılötesi aydınlatma için ise 3.97 olarak hesaplanmıştır [33, 34].

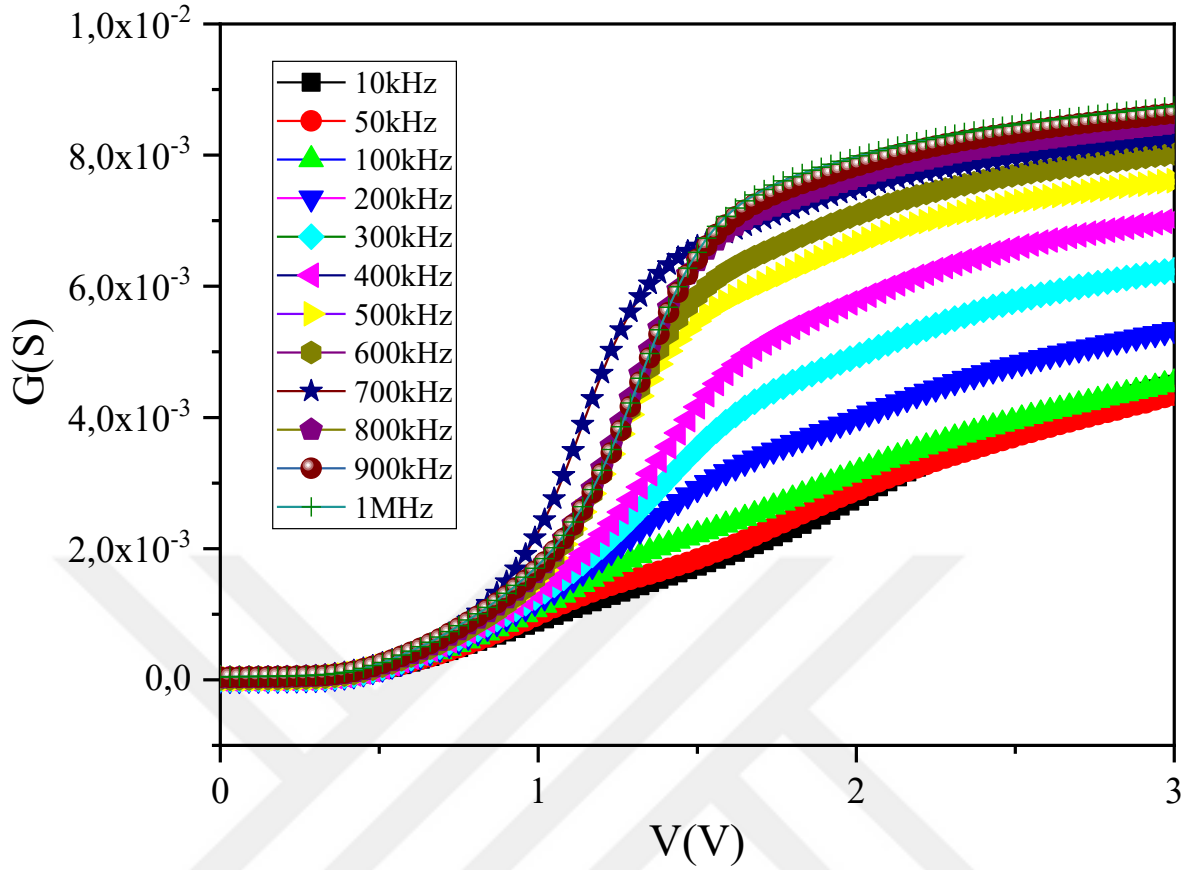
**Çizelge 4.1:** Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotlara ait idealite faktörü( $\phi_b$ ), bariyer yüksekliği  $n$ , doygunluk akımı, foto tepki çizelgesi

Diode Tipi / (Aydınlatma Tipi)	$n$	$\phi_b$ (eV)	$I_0$ (A)	$R$ (A/W)
Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub> / (Gün Işığı)	5.14	0.328	$2.28 \times 10^{-4}$	$5.6 \times 10^{-5}$
Cu <sub>2</sub> FeSnS <sub>4</sub> / (Kızılötesi)	5.61	0.326	$2.30 \times 10^{-4}$	$1.39 \times 10^{-4}$

#### 4.2.6 Al/p-Si/CuFeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların C-V ve G-V karakteristiği



**Şekil 4.9:** Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotlara ait kapasitans – voltaj grafiği



**Şekil 4.10:** Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotlara ait iletkenlik – voltaj grafiği

Kapasitans - Voltaj (C - V) ve İletkenlik - Voltaj (G – V) sırasıyla Şekil 4.9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Diyotların elektriksel özellikleri -3 V ve +3V aralığında değişik AC sinyal frekanslarıyla ölçülmüştür. Elektriksel özelliklerin incelenmesi sırasında AC sinyal frekansının diyotların kapasitans - voltaj ve iletkenlik - voltaj karakteristiklerinde önemli derecede değişikliklere yol açtığı anlaşılmıştır. Kapasitans - voltaj grafiğinde düşük AC frekansında yüksek kapasitans değeri elde edildiği gözlenmiştir. Frekans değerinin artması kapasitans değerinde düşüğe neden olmuştur. Benzer bir davranış şekli iletkenlik - voltaj grafiği için de geçerlidir. Özellikle ileri denetlemeye bölgesinde artan frekans değeri iletkenliğin artmasına sebep vermiştir. Artan kapasitans ölçülen bölgede yüklerin biriktiğine işaret etmektedir. Düşük frekanslarda kapasite artışı yüklerin düşük frekanslarda hareket edemediğini ancak yüksek frekansın yükleri hareket ettirebildiğini göstermektedir. Buna paralel olarak yüksek frekanslarda iletkenliğin artması da bahsi geçen mekanizmanın doğruluğunu ortaya maktadır. Bu mekanizmaların oluşmasında

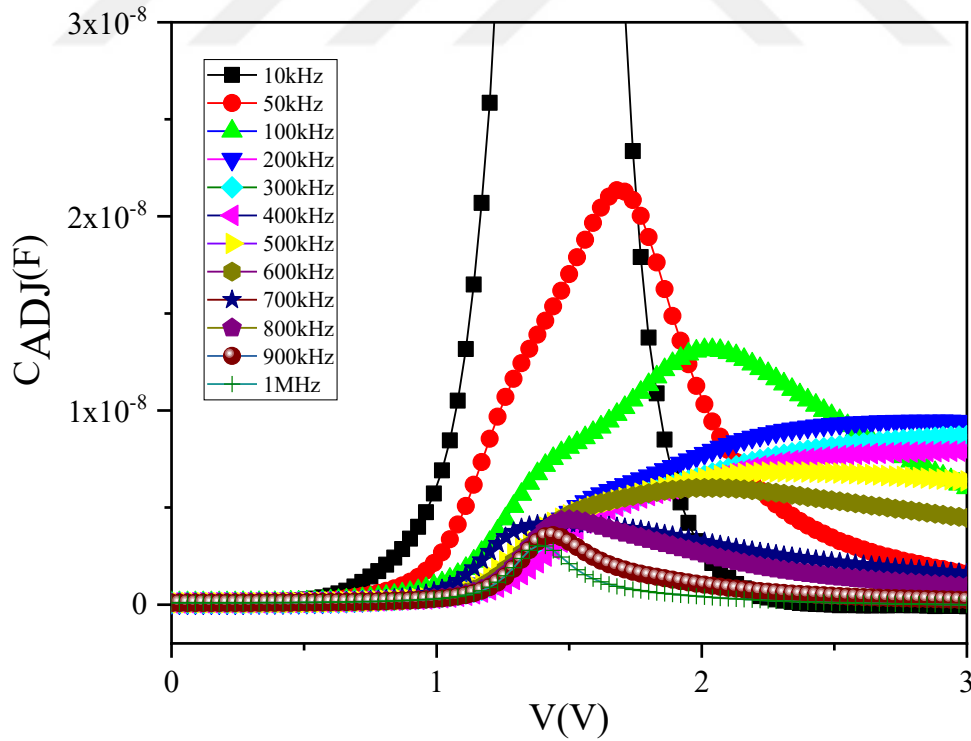
değişik faktörler rol oynamaktadır. Bunlar arayüz durumları, seri dirençler, yüklerin sıçramaları vb gibi etkenler olabilir.

C-V ve G-V grafikleri frekansa bağlı davranış sergilediğinden dolayı düzeltilmiş kapasitans- voltaj ( $C_{adj} - V$ ) ve düzeltilmiş iletkenlik – voltaj ( $G_{adj} - V$ ) değerleri hesaplanmıştır. Düzeltilmiş kapasitans- voltaj ( $C_{adj} - V$ ) ve düzeltilmiş iletkenlik – voltaj ( $G_{adj} - V$ ) değerleri aşağıdaki formül kullanılarak hesaplanmıştır:

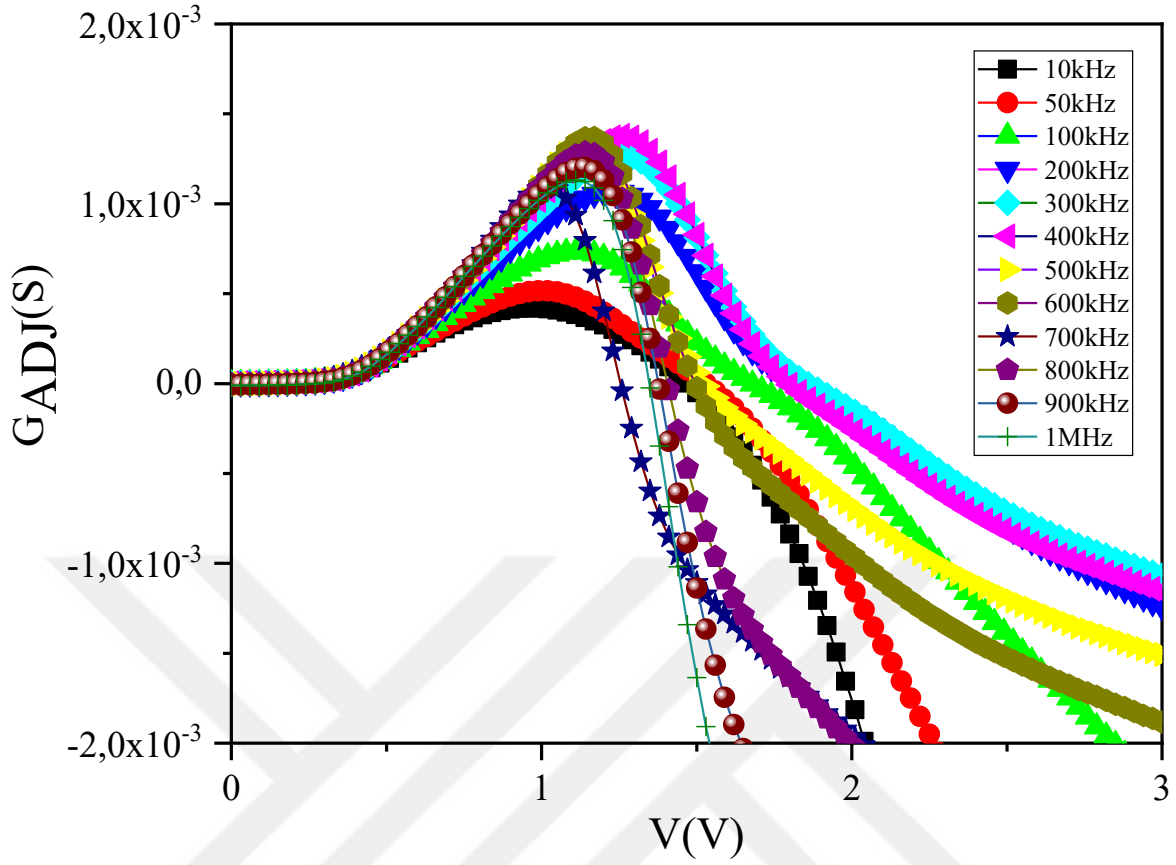
$$C_{adj} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] C_m}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (4)$$

$$G_{adj} = \frac{[G_m^2 + (\omega C_m)^2] a}{a^2 + (\omega C_m)^2} \quad (5)$$

burada " $C_m$ " ve " $G_m$ " değerleri ölçülen kapasitans ve ölçülen iletkenlik değerlerini temsil eder," $\omega$ " açısal frekans ve " $a$ " ise değişken parametredir [81].



Şekil 4.11: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotuna ait  $C_{adj} - V$  grafiği



Şekil 4.12: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotuna ait  $G_{adj}$  - V grafiği

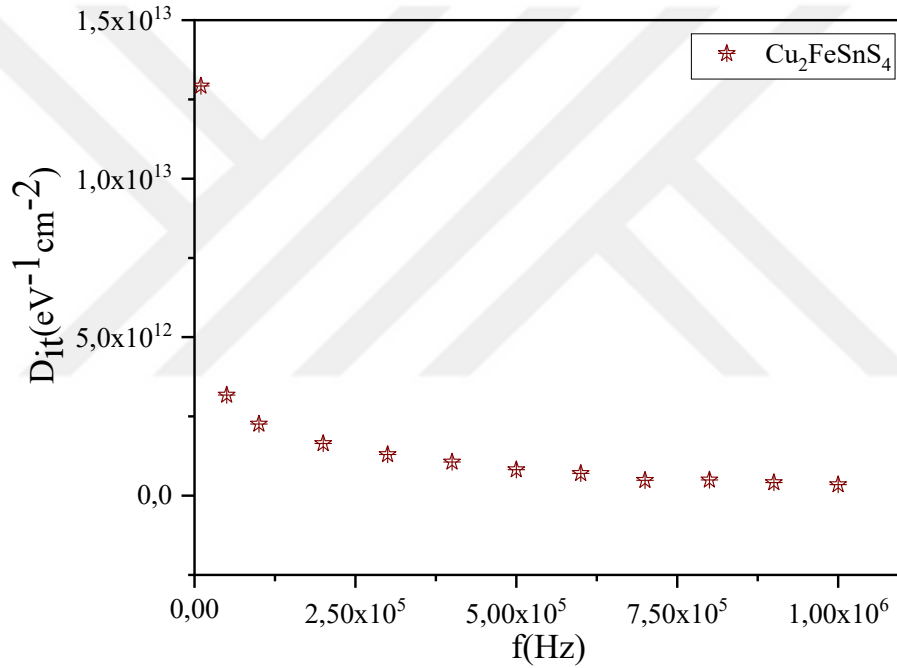
Dört bileşenli Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotlara ait düzeltilmiş kapasitans- voltaj ve düzeltilmiş iletkenlik-voltaj grafikleri sırasıyla şekil 4.11 ve şekil 4.12’de gösterilmiştir. Düzeltilmiş kapasitans ve düzeltilmiş iletkenlik grafiklerinde pozitif denetleme bölgesinde belirgin pikler gözlemlenmektedir. Düzeltilmiş kapasitans ve düzeltilmiş iletkenlik grafikleri frekansa bağlı karakteristik sergilemektedir. Düzeltilmiş kapasitans grafiğinde 1.5 V çevresinde bir pik belirgindir. Aynı şekilde düzeltilmiş iletkenlik grafiğinde 1.25 V civarında bir pik gözlenmektedir. Pikin şiddetinin frekansa bağlı olduğu görülmektedir. Bu durum frekansa bağlı davranışların ara yüzlerden kaynaklanabileceğini işaret etmektedir. Bu sebeple kapasitans-voltaj ve iletkenlik-voltaj grafikleri kullanılarak dört bileşenli Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların ara yüz durum yoğunluğu hesaplanmıştır. Hesaplamalarda aşağıdaki formül kullanılmıştır.

$$D_{it} = \left( \frac{2}{qA} \right) \left[ \frac{(G_{max}/w)}{[(G_{max}/w C_{ox})^2 + (1 - C_m/C_{ox})^2]} \right] \quad (9)$$

Burada  $C_m$  ölçülen kapasitans A fotodiyot alanı,  $G_m$  ölçülen iletkenlik  $C_{ox}$  yalıtkan tabakanın kapasitans değeri,  $\omega$  ise açısal frekans ( $2\pi f$ ) tır [82].

#### 4.2.7 Al/p-Si/CuFeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların frekansa bağlı arayüz yoğunluğu

Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların fekansa bağlı davranışını gösteren  $D_{it} - f$  grafikleri şekil 4.13'te sergilenmektedir. Şekil 14'teki grafik Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyot'un hesaplanan durum yoğunluklarının frekansa bağlı olarak değişim gösterdiğini kanıtlamaktadır. Grafik incelendiğinde artan AC sinyal frekansının ara yüz durum yoğunluklarını azalttığını göstermektedir.



Şekil 4.13: Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al<sub>4</sub> fotodiyotların frekansa bağlı arayüz yoğunluğu

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada Demir temelli 4 bileşenli Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların elektriksel, yapısal ve optiksel özellikleri incelenmiştir. Dört bileşenli foto diyotların yapısında kullanılan Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> çözelti hidrotermal tekniği kullanılarak üretilmiştir. Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> malzemelerine ait yapısal karakterizasyon işlemlerinde mikroskobik ve spektroskopik yöntemler kullanılmıştır; bunlar için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılım spektroskopisinden (EDX) faydalanılmıştır. Taramalı elektron mikroskobu görüntüleri parçacıkların yaklaşık aynı boyda olduğunu göstermektedir. Bu da nanoparçacıkların çok dar bir boyut dağılımına sahip olduğuna işaret etmektedir. Enerji dağılım spektroskopisine ait spektruma bakıldığında Cu, Fe, S ve Sn elementlerine ait tepeler (*peak*) gözlenmektedir. Bu durum nanoparçacıkların 4 bileşenden oluştuğunu ve nanoparçacıklar içerisinde yabancı atomun var olmadığını göstermektedir.

Mikroskobik incelemelerde diyotu oluşturan nanoparçacıkların Cu, Fe, Sn ve S elementlerinden oluştuğu görülmüştür. Taramalı elektron mikroskobu 4 bileşenli Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> yapıyı oluşturan malzemenin nanoparçacıklardan oluştuğunu göstermiştir. Parçacıklar granüler yapıda ve birbirine yapışmış halde bulunmaktadır.

Soğurma – dalga boyu grafiği 200 nm ile 1100 nm arasında incelenmiş ve geçirgenlik grafiğine paralel bir karakteristik sergilediği görülmüştür. Görünür bölgede sabit bir trend izlediği anlaşılmıştır. Soğurma grafiğinin kızılötesi bölgede hafif artış gösterdiği görülmüştür. Bu durum nanoparçacıkların kızılötesi dalgaları iyi bir şekilde soğurabildiğine işaret etmektedir. İncelenen UV-vis spektroskopisi sonuçları kullanılarak nanoparçacıklara ait enerji bant aralıkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamada Kubelka – Munk fonksiyonundan yararlanılmıştır. Hesaplanan bant enerjisi Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> nanomalzeme için 1.22 eV olarak bulunmuştur. Literatürde hesaplanan değerler incelendiğinde araştırmalarımızda bulunan değerlerin literatürde bulunan değerler ile uyumlu olduğu anlaşılmaktadır.

Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların -3V ve +3V arasında akım–voltaj (I – V) davranışları incelenmiştir. Değişik aydınlatma şiddetleri altında sergilenen I – V grafiklerinde ışık uygulandığı zaman özellikle negatif denetleme bölgesinde gözle görünür bir akım artışı olduğu anlaşılmıştır. Bu artış diyotların ışığa karşı duyarlı olduğunu göstermektedir. Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların gün ışığındaki diyotlara paralel olarak kızılötesi ışık altında

da fotoakım oluşturduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların kızılötesi ışığa karşı duyarlı olduğunu kanıtlamaktadır.

Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al yapıların fotoduyarlılıklarının anlaşılması için akım zaman (I – t) davranışları incelenmiştir. Ölçümler 100 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma şiddetleri ile gerçekleştirilmiştir. Günışığı aydınlatmasında ve kızılötesi aydınlatmada ölçülen maksimum foto akım 7.2 x 10<sup>-5</sup> A ve 4.9 x 10<sup>-5</sup> A olarak hesaplanmıştır. Akım zaman ölçümleri Al/p-Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların gün ışığını ve kızılötesi ışığı dedekte edebilme kabiliyeti olduğunu göstermiştir.

Kapasitans - zaman (C – t) grafikleri fotodiyotların fototepki karakteristiklerinin anlaşılması amacıyla incelenmiştir. Teorik olarak bir diyot için idealite faktörünün 1 olması beklenmektedir; ancak gerçek sonuçlar bunun böyle olmadığını göstermiştir. Bizim çalışmamızda da gün ışığı aydınlatması için idealite faktörü 5.14 ve kızılötesi ışık aydınlatması için idealite faktörü 5.65 olarak hesaplanmıştır. Aradaki bu farkın ara yüzey durumlarından kaynaklandığı görülmüştür.

Diyotların elektriksel özellikleri -3 V ve +3V aralığında değişik AC sinyal frekanslarıyla ölçülmüştür. Elektriksel özelliklerin incelenmesi sırasında AC sinyal frekansının diyotların kapasitans - voltaj ve iletkenlik - voltaj karakteristiklerinde önemli derecede değişikliklere yol açtığı anlaşılmıştır. Kapasitans - voltaj grafiğinde düşük AC frekansında yüksek kapasitans değeri elde edildiği gözlenmiştir.

Optik incelemeler nanoparçacıkların iyi geçirgenlik özelliğine sahip olduğunu göstermiştir. Parçacıklardan yapılacak optoelektronik aletlerin solar takip uygulamalarında kullanılabilme potansiyeli olduğunu göstermektedir. Çalışmamızda ayrıca fotodiyotların fototepkisel özellikleri de incelenmiştir. Işık şiddetinin foto akımı arttırdığı görülmüştür. Yine aynı incelemelerde diyotların kızılötesi ışığa tepki verdikleri görülmüştür. Bu durum Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al fotodiyotların kızılötesi sensör ve dedektör uygulamalarında kullanılabilme potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Dört bileşenli Si/Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>/Al diyotların elektriksel özellikleri incelendiğinde diyotların uygulanan AC sinyal frekansına bağlı olduğu anlaşılmıştır. Frekansa bağlı özelliklerin temelinde ara yüz durumlarının olduğu yapılan hesaplamalarla gösterilmiştir.



## KAYNAKLAR

- [1] Çıracı, S., Süzer, Ş. Erdemir, A., Dağ, Ö., Bengü, E., Bayındır, M., İlday, Ö., Senger, T., Dana, A., Aydınlı, A., Gemici, Z., Yılğör, İ., Özgür, H., Yeşilyurt, Ö., Durgun, E., Kocabaş, A., Köylü Ö., Gürsen, İ. (2006). Türkiye'de nanoteknoloji, Bilim ve Teknik Dergisi - Yeni Ufuklara, 469, 1-23
- [2] Gürmen, S., Stopic, S., Friedrich, B. (2006). Synthesis of nanosized spherical cobalt powder by ultrasonic spray pyrolysis, Materials Research Bulletin, 41, 1882-1890
- [3] Noguero, C. (1997). Physics and chemistry at oxide surfaces, Acta Crystallographica Section A, 6, 855-856.
- [4] Fernandez-Garcia, M., Martinez-Arias, A., Hanson, J. C., Rodriguez, J. A. (2004). Nanostructured oxides in chemistry: Characterization and properties, Chemical Reviews, 104, 4063-4104.
- [5] Fernandez-Garcia, M., Rodriguez, J. A. (2007). Metal oxide nanoparticles, Nanomaterials: Inorganic and Bioinorganic Perspectives.
- [6] Makhluf, S., Dror, D., Nitzan, Y., Abramovich, A., Jelinek, R., Gedanken, A. (2005). Microwave-assisted synthesis of nanocrystalline MgO and its use as a bactericide, Advanced Functional Materials, 15, 1708-1715.
- [7] Dugan S, Koç MM, Coşkun B (2019) Structural, electrical and optical characterization of Mn doped CdO photodiodes, J Mol Struct 1205:127235. <https://doi.org/10.1016/J.MOLSTRUC.2019.127235>
- [8] Farag AAM, Cavas M, Yakuphanoglu F (2012) Electrical performance and interface states studies of undoped and Zn-doped CdO/p-Si heterojunction devices. Mater Chem Phys 132:550–558. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2011.11.068>
- [9] Rajput JK, Pathak TK, Kumar V, Purohit LP (2017) Influence of sol concentration on CdO nanostructure with gas sensing application. Appl Surf Sci 409:8–16. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2017.03.019>
- [10] Basman N, Aslan N, Uzun O, et al (2015) Electrical characterization of metal/diamond-like carbon/inorganic semiconductor MIS Schottky barrier diodes. Microelectron Eng 140:18–22. <https://doi.org/10.1016/J.MEE.2015.05.001>
- [11] Takaoka Y, Sakamoto T, Tsukiji S, et al (2009) Self-assembling nanoprobe that display off/on <sup>19</sup>F nuclear magnetic resonance signals for protein detection and imaging. Nat Chem 1:557–561. <https://doi.org/10.1038/nchem.365>

- [12] **Sivalingam D, Gopalakrishnan JB, Rayappan JBB** (2012) Nanostructured mixed ZnO and CdO thin film for selective ethanol sensing. *Mater Lett* 77:117–120. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2012.03.009>
- [13] **Aslan N, Koç MM, Dere A, et al** (2018) Ti doped amorphous carbon (Al/Ti-a:C/p-Si/Al) photodiodes for optoelectronic applications. *J Mol Struct* 1155:813–818. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2017.11.050>
- [14] **Rack PD, Holloway PH** (1998) The structure, device physics, and material properties of thin film electroluminescent displays. *Mater. Sci. Eng. R Reports* 21:171–219
- [15] **Yakuphanoglu F** (2016) Transparent metal oxide films based sensors for solar tracking applications. *Compos Part B Eng* 92:151–159. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.039>
- [16] **Kösemen A, Alpaslan Kösemen Z, Canimkubey B, et al** (2016) Fe doped TiO<sub>2</sub> thin film as electron selective layer for inverted solar cells. *Sol Energy* 132:511–517. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.049>
- [17] **Kurnaz Yetim N, Aslan N, Sarıoğlu A, et al** (2020) Structural, electrochemical and optical properties of hydrothermally synthesized transition metal oxide (Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, NiO, CuO) nanoflowers. *J Mater Sci Mater Electron* 31:12238–12248. <https://doi.org/10.1007/s10854-020-03769-x>
- [18] **Hao L, Xue Q, Gao X, et al** (2007) Abnormal I-V characteristics and metal-insulator transition of Fe-doped amorphous carbon/silicon p-n junction. *J Appl Phys* 101:053718. <https://doi.org/10.1063/1.2710760>
- [19] **Yakuphanoglu F, Okutan M, Korkmaz K** (2008) The electrical conductivity and microstructure properties of Ni-doped TiO<sub>2</sub> ceramic. *J Alloys Compd* 450:39–43. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2006.10.117>
- [20] **Özden S, Koc MM** (2018) Spectroscopic and microscopic investigation of MBE-grown CdTe (211)B epitaxial thin films on GaAs (211)B substrates. *Appl Nanosci* 8:891–903. <https://doi.org/10.1007/s13204-018-0727-7>
- [21] **Gupta RK, Ghosh K, Patel R, et al** (2008) Highly conducting and transparent tin-doped CdO thin films for optoelectronic applications. *Mater Lett* 62:4103–4105. <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2008.06.008>
- [22] **Cheng X, Zhang M, Chen X, Chen C** (2007) Fabrication and performance of optoelectronic devices with metal/diamond-like carbon Schottky contact. *Solid State Electron* 51:423–427. <https://doi.org/10.1016/J.SSE.2006.11.017>
- [23] **Kurnaz Yetim N, Aslan N, Koç MM** (2020) Structural and catalytic properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> doped Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> novel magnetic nanocomposites: P-Nitrophenol case. *J Environ Chem Eng* 8:. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104258>

- [24] **Coskun B (2019)** Capacitance and Dielectric Properties of Mn Doped CdO Photodetectors. *J Mater Electron DEVICES* 1:65–71
- [25] **Coşkun B, Mensah-Darkwa K, Soylu M, et al (2018)** Optoelectrical properties of Al/p-Si/Fe:N doped ZnO/Al diodes. *Thin Solid Films* 653:236–248. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.03.033>
- [26] **Ameen BAH, Yildiz A, Farooq WA, Yakuphanoglu F (2019)** Solar Light Photodetectors Based on Nanocrystalline Zinc Oxide Cadmium Doped/p-Si Heterojunctions. *Silicon* 11:563–571. <https://doi.org/10.1007/s12633-017-9656-4>
- [27] **Koç M, Aslan N, Erkovan M, et al (2019)** Electrical characterization of solar sensitive zinc oxide doped-amorphous carbon photodiode. *Optik (Stuttg)* 178:316–326. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.10.008>
- [28] **Yahia IS, Salem GF, Abd El-sadek MS, Yakuphanoglu F (2013)** Optical properties of Al-CdO nano-clusters thin films. *Superlattices Microstruct* 64:178–184. <https://doi.org/10.1016/J.SPMI.2013.09.024>
- [29] **Adelifard M (2016)** Preparation and characterization of Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> quaternary semiconductor thin films via the spray pyrolysis technique for photovoltaic applications. *J Anal Appl Pyrolysis* 122:209–215. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.09.022>
- [30] **Bai J, Ji J, Hao L, et al (2020)** DFT Investigation on the Electronic, Magnetic, Mechanical Properties and Strain Effects of the Quaternary Compound Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub>. *Crystals* 10:509. <https://doi.org/10.3390/cryst10060509>
- [31] **Nefzi C, Souli M, Cuminal Y, Kamoun-Turki N (2020)** Effect of substrate temperature on physical properties of Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> thin films for photocatalysis applications. *Mater Sci Eng B Solid-State Mater Adv Technol* 254:114509. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2020.114509>
- [32] **Park JY, Noh JH, Mandal TN, et al (2013)** Quaternary semiconductor Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> nanoparticles as an alternative to Pt catalysts. *RSC Adv* 3:24918–24921. <https://doi.org/10.1039/c3ra43331e>
- [33] **İlhan M, Koç MM, Coşkun B, et al (2020)** Structural and optoelectronic characterization of Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub> quaternary functional photodetectors. *Optik (Stuttg)* 212:164724. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164724>
- [34] **Mustafa İlhan MMK (2020)** Infrared Sensing Properties of Quaternary Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub> Photodetectors. *J Mater Electron DEVICES* 1:19–24
- [35] **İlhan M, Koç MM, Coşkun B, Yakuphanoglu F (2020)** Optical, Electrical and Photoresponsive Properties of Cu<sub>2</sub>NiSnS<sub>4</sub> Solar Detectors. *J Electron Mater* 49:4457–4465. <https://doi.org/10.1007/s11664-020-08197-5>
- [36] **Benson JD, Bubulac LO, Smith PJ, et al (2012)** Growth and analysis of HgCdTe on alternate substrates. In: *Journal of Electronic Materials*. pp 2971–2974

- [37] **Johnson SM, de Lyon TJ, Cockrum CA, et al** (1995) Direct growth of CdZnTe/Si substrates for large-area HgCdTe infrared focal plane arrays. *J Electron Mater* 24:467–473. <https://doi.org/10.1007/BF02657949>
- [38] **Bilgilişoy E, Özden S, Bakali E, et al** (2015) Characterization of CdTe Growth on GaAs Using Different Etching Techniques. *J Electron Mater* 44:3124–3133. <https://doi.org/10.1007/s11664-015-3830-5>
- [39] **Özden S, Koç MM** (2019) Wet-chemical etching of GaAs(211)B wafers for controlling the surface properties. *Int J Surf Sci Eng* 13:79. <https://doi.org/10.1504/IJSURFSE.2019.102359>
- [40] **Rao, C. N.** (2005). *Chemistry of Nanomaterials Volume 1*. Weinheim: WILEYVCH Verlag GmbH & Co. KgaA.
- [41] **Enderby, J., Dowling, A.** (2004). *Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties*. London: The Royal Society & The Royal Academy of Engineering Report.
- [42] **Url:** A Short History of Nanotechnology. (t.y.). Foresight Nanotech Institute. <<http://www.foresight.org/nano/history.html>>
- [43] **Strateji, Vizyon 2023 Projesi Nanoteknoloji** (2004). Nanobilim ve Nanoteknoloji. Ankara.
- [44] **Çıracı, S., Özbay, E., Gülseren, Ö., Demir, H. V., Bayındır, M., Oral, A., Senger, T., Aydın, A., Dana, A.** (2005). Türkiye'de nanoteknoloji. *Bilim ve Teknik Dergisi - Yeni Ufuklara*, 453, 1-23.
- [45] **Kahraman, D.** (t.y.). *Nanoteknoloji Alanında Türkiye'de Yürütülen Çalışmalar*.
- [46] **Shong, C. W., Haur, S. C., Wee, A. T. S.** (2010). *Science at Nanoscale: An Introductory Textbook*. Singapore: Pan Stanford Publishing.
- [47] **Aksoy S.**, 2006, Kalay Katkılı ZnO İnce Filmlerin Bazı Fiziksel Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [48] **Panda D., and Tseng T. Y.**, 2013, Growth, dielectric properties, and memory device applications of ZrO<sub>2</sub> thin films, *Thin Solid Films* 531, 1-20.
- [49] **Korcan FIRAT**, Kompozit malzemeler, sunumu
- [50] **A Review Pardon Nyamukamba, Omobola Okoh**, 2018, Synthetic Methods for Titanium Dioxide Nanoparticles, 10.5772/intechopen.75425
- [51] **Burak AY**, 2011, Dikarbosilik Asit Grupları İçeren Geçiş Metal Komplekslerinin Hidrotermal Sentezi, UV Etkileşimlerinin Ve Katalitik Aktivitelerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana.
- [52] **Askeland, D.R.**, 2002, *Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri*, Çeviri: Erdogan M., Nobel Yayınları, Ankara.
- [53] **Turton, R.**, 2005, *Katıların Fiziği*, Çeviri: Yoğurtcu Y.K., Aktif Yayınevi, İstanbul.

- [54] **Pankove, J.I.**, 1971, Optical processes in semiconductors, Solid State Physical Electronics Series, Prentice-Hall, New Jersey.
- [55] **Tang, Z.K., Wong, G.K.L., Yu, P., Kawasaki, M., Ohtomo, A., Koinuma, H., Segawa, Y.**, 1998, *Appl. Phys. Lett.* **72**, 3270.
- [56] **Akyüz, İ.**, 2005, CdO Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri Üzerine Al Katkılama ve Tavlama İşlemlerinin Etkileri, *Doktora Tezi*, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- [57] **Ilıcan, S., Çağlar, Y., Çağlar, M.**, 2005, CdZnS ve ZnO Yarıiletken Filmlerinin Yasak Enerji Aralıkları, SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 9.Cilt, 1.Sayı.
- [58] **Diffey, B. L.**, 2002 ,“Sources and measurement of ultraviolet radiation”, *Methods*, 28:4-13
- [59] **Bütün, S.**, 2006. The Growth fabrication and characterization of high performance Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N metal-semiconductor-metal photodiodes, *Yüksek Lisans Tezi*, Bilkent Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [60] **S.M.,Sze, Kwok K. Ng.**, 2007. Physics of Semiconductor Device, Wiley Interscience, New Jersey.
- [61] **Boylestad, R., Nashelsky, L.**, 1994 Elektronik Elemanlar ve Devre Teorisi, Ankara.
- [62] **Gürdal, O.**, 2000. Algılayıcılar ve Dönüştürücüler, Ankara.
- [63] **Bıyıklı, N.**, 2004. High-Performance Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>N-Based UV Photodetectors for Visible/Solar-Blind Applications, *Doktora Tezi*, Bilkent Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [64] **Gündüz, B.**, 2007. Organik yarıiletken foto diyotların hazırlanması ve opto Elektronik özelliklerinin araştırılması, *Yüksek Lisans Tezi*, Fırat Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- [65] **Johnson, Mark.**, 2003. Photodetection and Measurement. Blacklick, OH, USA: Mc Graw-Hill Professiona Publishing, p. 14, 15.
- [66] **Wang, R., Hashimoto, K., Fujishima, A., Chikuni, M., Kojima, E., Kitamura, A., Shimohigoshi, M. and Watanabe, T.**, 1997, Light-Induced Amphiphilic Surfaces, *Nature*, 388, 431-432.
- [67] **Sze, S.M., Gibbons, G.**, 1966. Avalanche breakdown voltages of abrupt and linearly graded p-n junctions in Ge, Si, GaAs and GaP, *Appl. Phys. Lett.* **8**,111.
- [68] **Dugan, S.**, 2019. “CdO/p-Si Heteroeklem Fotodedektörlerin Üretilmesi ve Elektriksel Karakterizasyonu” *Yüksek Lisans Tezi*, Kırklareli Ün. Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırklareli
- [69] **Zhong J, Wang Q, Cai W** (2015) Rapid synthesis of flower-like Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub> microspheres with nanoplates using a biomolecule-assisted method. *Mater Lett* 150:69–72. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.03.006>
- [70] **Huang C, Chan Y, Liu F, et al** (2013) Synthesis and characterization of multicomponent Cu<sub>2</sub>(Fe<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>)SnS<sub>4</sub> nanocrystals with tunable

- band gap and structure. *J Mater Chem A* 1:5402–5407. <https://doi.org/10.1039/c3ta00191a>
- [71] **Chane-Ching JY, Gillorin A, Zaberca O, et al** (2011) Highly-crystallized quaternary chalcopyrite nanocrystals via a high-temperature dissolution-reprecipitation route. *Chem Commun* 47:5229–5231. <https://doi.org/10.1039/c1cc10749f>
- [72] **Podsiadlo S, Bialoglowski M, Fadaghi M, et al** (2015) Synthesis of magnetic doped kesterite single crystals. *Cryst Res Technol* 50:690–694. <https://doi.org/10.1002/crat.201400435>
- [73] **González JC, Fernandes PA, Ribeiro GM, et al** (2014) Influence of the sulphurization time on the morphological, chemical, structural and electrical properties of Cu<sub>2</sub>ZnSnS<sub>4</sub> polycrystalline thin films. *Sol Energy Mater Sol Cells* 123:58–64. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.01.005>
- [74] **Zhang D, Yang J, Jiang Q, et al** (2017) Multi-cations compound Cu<sub>2</sub>CoSnS<sub>4</sub>: DFT calculating, band engineering and thermoelectric performance regulation. *Nano Energy* 36:156–165. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.027>
- [75] **Wu R, Wu J, Xie C, et al** (2002) Morphological characteristic of Zn/ZnO nanopowders and the optical properties. *Mater Sci Eng A* 328:196–200. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01685-9](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01685-9)
- [76] **Mikhail SS, Azer SS, Johnston WM** (2012) Accuracy of Kubelka-Munk reflectance theory for dental resin composite material. *Dent Mater* 28:729–735. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.03.006>
- [77] **Chen HJ, Fu SW, Tsai TC, Shih CF** (2016) Quaternary Cu<sub>2</sub>NiSnS<sub>4</sub> thin films as a solar material prepared through electrodeposition. *Mater Lett* 166:215–218. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.12.082>
- [78] **Huang C, Chan Y, Liu F, et al** (2013) Synthesis and characterization of multicomponent Cu<sub>2</sub>(Fe<sub>x</sub>Zn<sub>1-x</sub>)SnS<sub>4</sub> nanocrystals with tunable band gap and structure. *J Mater Chem A* 1:5402–5407. <https://doi.org/10.1039/c3ta00191a>
- [79] **Li L, Liu X, Huang J, et al** (2012) Solution-based synthesis and characterization of Cu<sub>2</sub>FeSnS<sub>4</sub> nanocrystals. *Mater Chem Phys* 133:688–691. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.01.057>
- [80] **Turut A, Karabulut A, Ejderha K, Biyikli N** (2015) Capacitance-conductance-current-voltage characteristics of atomic layer deposited Au/Ti/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaAs MIS structures. *Mater Sci Semicond Process* 39:400–407. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2015.05.025>
- [81] **Nicollian EH, Goetzberger A** (1967) The Si-SiO<sub>2</sub> Interface - Electrical Properties as Determined by the Metal-Insulator-Silicon Conductance Technique. *Bell Syst Tech J* 46:1055–1133. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1967.tb01727.x>
- [82] **Yakuphanoglu F, Aslam Farooq W** (2011) Photoresponse and electrical characterization of photodiode based nanofibers ZnO and Si. *Mater*

- [83] **Fox M. 2001**, Optical Properties of Solids, Oxford University Press, Newyork, 305 s
- [84] **Greenwood N.N.; Earnshaw A., 1997**, Chemistry of the Elements, 2nd. Edition, Oxford, Butterword-Heineman
- [85] **Patnaik, Pradyot, 2002**, Handbook of Inorganic Chemicals, McGraw-Hill, Two Penn Plaza, New York, pp. 262-263
- [86] **March J., 1992**, Advanced Organic Chemistry, 4 th, Wiley, New York, pp. 723.
- [87] **Mol, A.M.B. V., Chemical vapour deposition of tin oxide thin films / by Antonius M.B. van Mol. – Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2003.** Proefschrift. – ISBN 90-386-2715-7 NUR 913.
- [88] **LĠ, J., 2004.** Reaction Kinetics of Gold Dissolution in Acid Thiourea Solution, Üniversity of Utah, Phd Thesis United State.
- [89] **Weiqun, Z., Wen, Y., Lihua, Q., 2005.** Structure and stability of thiourea with water, DFT and MP2 calculations Journal of Molecular Structure, Theochem 730:131–139.
- [90] **Ullmann S., Encyclopedia of Industrial Chemistry 5th Edition, 1990, Vol A13, 446.**
- [91] **Orvis, Jeffery A. Journal of Chemical Education 2003;80, 803-805.**
- [92] **AniĠ,P,:** Poliester Pamuk KarıĠımlarının Boyanması Uygulamalar ve Yeni 121 YaklaĠımlar. UludaĠ Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 8,Sayı1 (2003)
- [93] **A. Aissat, M.El Besseghi, D.Decoster.,** Optimization of photoswitch constituted of a coplanar line introducing an interdigitated MSM photodetector. Superlattices and Microstructures Volume 72, August 2014, Pages 245-252
- [94] **Rogalski, A., Infrared Detectors, Second Edition, CRC Press, 87-641 (2011).**

- [95] **Sung-Ho Park, Joondong Kim.**, The properties of transparent TiO<sub>2</sub> films for Schottky photodetector. Data in Brief Volume 13, August 2017, Pages 171-174
- [96] **Pengpeng Zhao, Shaohui Cui.**, An improved weak light detector used for infrared Imaging guidance system. Optik .Volume 127, Issue 4, February 2016, Pages 23162318
- [97] **David Z.-Y.Ting, Yia-ChungChang, Sir B.Rafol, John K.Liu, Cory J.Hill, Sam A.Keo, Jason Mumolo, Sarath D.Gunapala, Sumith V.Bandara.**, The submonolayer quantum dot infrared photodetector revisited. Infrared Physics & Technology Volume 70, May 2015, Pages 20-24



