



**NANO YAPILI CuO VE Cu₂O GEÇİŞ METAL
OKSİTLERİN GÖRÜNÜR BÖLGEDE
FOTODEDEKTÖR UYGULAMASI**

FEVKANİ YILDIZ

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Doktora Tezi

Fizik Ana Bilim Dalı

2023

(Her Hakkı Saklıdır.)

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

**NANO YAPILI CuO VE Cu₂O GEÇİŞ METAL OKSİTLERİN GÖRÜNÜR BÖLGEDE
FOTODEDEKTÖR UYGULAMASI**

**(Photodetector Application of Nano-Structured CuO and Cu₂O Transitional Metal
Oxides in The Visible Region)**

DOKTORA TEZİ

Fevkani YILDIZ

Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Erzurum

Temmuz, 2023

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

NANO YAPILI CUO VE CU₂O GEÇİŞ METAL OKSİTLERİN GÖRÜNÜR BÖLGEDE
FOTODEDEKTÖR UYGULAMASI

Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında, Fevkani YILDIZ tarafından hazırlanan bu çalışma, 08/08/2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Fizik Anabilim Dalı Nanobilim ve Nanomühendislik Bilim Dalı'nda doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Danışman:	Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Tuba ÖZNÜLÜER ÖZER <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Emre GÜR <i>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Aykut ASTAM <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	Aslı Islak İmzalıdır

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

Prof.Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Aslı Islak İmzalıdır

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI danışmanlığında sunulan “Nano Yapılı CuO ve Cu₂O Geçiş Metal Oksitlerin Görünür Bölgede Fotodedektör Uygulaması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	5	30
Kuramsal Temeller	24	30
Materyal ve Metot	19	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	9	20
Sonuçlar	0	20
Tezin Geneli	15	25

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

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

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Fevkani YILDIZ	Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI
17.7.2023	17.7.2023
İmza: Aslı Islak İmzalıdır	İmza: Aslı Islak İmzalıdır

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

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

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

TEŞEKKÜR

Bu doktora tez çalışması Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'nın yöneticiliğinde yapılmıştır. Çalışmalar boyunca verdiği tüm destek ve katkılarından dolayı değerli hocam Sayın Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI'ya teşekkür ederim.

Ayrıca çalışmalarım boyunca engin görüş ve tecrübelerinden istifade ettiğim Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyelerinden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Emre GÜR'e teşekkür ederim.

Tez izleme komitesinde bulunan Sayın Prof. Dr. Muhammet YILDIRIM'a, Sayın Prof. Dr. Emre GÜR'e, Sayın Prof. Dr. Murat ALANYALIOĞLU'na, Sayın Prof. Dr. Tuba ÖZNÜLÜER ÖZER'e, tez çalışmalarım süresince değerli öneri ve desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım sırasında Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü laboratuvarlarında gerçekleştirdiğim kristal büyütme ve karakterizasyon işlemlerinde bana yardımını esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Sevdâ SARITAŞ'a, DAYTAM bünyesinde görev yapan ve laboratuvar çalışmalarım sırasında verdiği desteklerden dolayı Sayın Öğr. Gör. Ahmet Emre KASAPOĞLU'na teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca bana göstermiş olduğu sabır, anlayış, moral ve her türlü desteğinden dolayı çok değerli eşim Öğr. Gör. Betül Zeynep YILDIZ'a sonsuz teşekkür ederim.

Bu doktora tez çalışmamı çok değerli annem, babam, eşim ve çocuklarıma ithaf ediyorum.

Fevkani YILDIZ

ÖZET
DOKTORA TEZİ
NANO YAPILI CuO VE Cu₂O GEÇİŞ METAL OKSİTLERİN GÖRÜNÜR BÖLGEDE
FOTODEDEKTÖR UYGULAMASI
Fevkani YILDIZ
Danışman: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Amaç: Bu çalışmada ilk amacımız, cam ve n-tipi silisyum altlık üzerine nano parçacıklı CuO ve Cu₂O ince filmleri büyütmek, büyütülen ince filmlerin bazılarını sülfürlemek ve sülfürlemenin ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri üzerine etkisini belirlemektir. Daha sonra, büyütülen CuO ve Cu₂O ince filmleri kullanarak Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al yapıları metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörlerin fabrikasyonunu yapmak, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde opto-elektronik özelliklerini incelemek ve CuO ve Cu₂O katmanlarının MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri üzerine etkisini belirlemektir. Son olarak ise, sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmleri kullanarak Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al yapıları metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektör fabrikasyonu yapmak ve sülfürlemenin MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri üzerine etkisini belirlemektir.

Yöntem: Bu çalışmada, ince filmlerin büyütüleceği cam ve n-tipi silisyum altlıklar temiz odada bir dizi temizlik işleminden geçirildi. Temizlenen cam ve n-tipi silisyum altlık yüzeyine nano parçacıklı CuO ve Cu₂O ince filmlerin biriktirilmesinde, ince film biriktirme tekniklerinden fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemi olan, DC magnetron saçırma (DC Sputter) yöntemi kullanılmıştır. Cam ve n-tipi silisyum yüzeyine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerden bazılarını kimyasal buhar biriktirme yöntemiyle sülfürleme işlemi uygulanmıştır fabrikasyonu yapılan ince filmlerin yapısal analizi için XRD ölçüm tekniği, morfolojik özelliklerinin belirlenmesi için SEM ölçüm tekniği ve optik özelliklerinin belirlenmesi için soğurma ölçüm tekniği kullanılmıştır. Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al MSM yapılarının elde edilebilmesi için, sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince film yüzeyine, termal buharlaştırma tekniği kullanılarak bir maske yardımıyla tarak şeklinde alüminyum IDE kontaklar oluşturuldu. Fotodedektörlerin akım-gerilim ölçümleri Keithley 2400 Sourcemeter, foto akım-zaman ölçümleri Keithley 487 Picoammeter/Voltage Source, iki nokta prop istasyonu, ve 100 mW/cm² ışık yoğunluğuna sahip AM 1,5 Class A solar simulator kullanılarak karanlıkta ve ışık altında yapılmıştır. Fotodedektörlerin dalga boyuna karşı spectral tepkisi ölçümü için ise PTS-2-QE IPCE/Kuantum Verimi Ölçüm Sistemi kullanılmıştır.

Bulgular: CuO ve Cu₂O ince filmlerin ve sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin XRD verileri incelendiğinde, sülfürleme işleminin ince film kompozisyonunu değiştirdiği görülmüştür. Sülfürleme işlemiyle CuO ve Cu₂O ya ait piklerin FWHM değeri ve tane sınırı azalırken kristal tanecik boyutunun arttığı görülmüştür. Sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, ince filmlerin altlık yüzeyine homojen bir şekilde büyüdüğü, sülfürleme işlemiyle film yüzeyinde yeni yapıların oluştuğu ve sülfürlenmiş ince filmlerin daha büyük kristal tanecik yapıya sahip olduğu görülmüştür. Aynı zamanda, SEM görüntülerinin XRD verileriyle uyumlu olduğu da görülmüştür. Sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin optik soğurma ölçümleri incelendiğinde, sülfürleme işlemiyle daha büyük dalga boylarında soğurmanın başladığı ve dolayısıyla sülfürleme işlemiyle yasak enerji aralıklarının azaldığı görülmüştür. Sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş CuO ve Cu₂O ince filmler kullanılarak fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al yapıları metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörlerin elektriksel ve optik ölçümleri incelendiğinde, sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmler kullanılarak fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin elektriksel ve optik özelliklerinin daha iyi olduğu görülmüştür.

Sonuç: Sülfürleme işlemiyle ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri değiştirilerek kristal kaliteleri arttırılabilir ve yasak enerji aralıkları değiştirilebilir. Ayrıca, sülfürleme zamanı değiştirilerek daha kaliteli bir kristal yapıya sahip olunabilir. Sülfürleme zamanına bağlı olarak yasak enerji aralığının değişiminin de incelenmesine ihtiyaç vardır. Bununla birlikte sülfürlemenin fotodedektörlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine de olumlu etkileri vardır. Fotodedektörlerin elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesi için sülfürleme işleminin uygulanması yanında farklı kontak malzemeleri de kullanılabilir. Fabrikasyonunu yaptığımız fotodedektörlerin görünür ışık altında elde edilen elektriksel ve optik ölçüm sonuçları onları, optoelektronik cihaz uygulamaları için bir fotodiyot olarak elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde kullanılabilirliğine dair iyi bir aday yapar.

Anahtar Kelimeler: Geçiş metal oksit, CuO, Cu₂O, sülfürleme, nano yapı, RF/DC saçtırma, fotodedektör, MSM

Temmuz 2023, 134 sayfa



ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

PHOTODETECTOR APPLICATION OF NANO-STRUCTURED CuO AND Cu₂O TRANSITIONAL METAL OXIDES IN THE VISIBLE REGION

Fevkani YILDIZ

Supervisor: Prof. Dr. Mutlu KUNDAKÇI

Purpose: In this study, our first aim is to grow nanoparticles CuO and Cu₂O thin films on glass and n-type silicon substrate, to sulphurization some of the grown thin films and to determine the effect of sulphurization on the structural, morphological and optical properties of thin films. Next, fabricating Al/CuO/Al and Al/Cu₂O/Al metal-semiconductor-metal (MSM) photodetectors using grown CuO and Cu₂O thin films, examining their opto-electronic properties in the visible region of the electromagnetic spectrum, and studying CuO and Cu₂O layers on the opto-electronic properties of MSM photodetectors. Finally, fabrication of Al/CuO/Al and Al/Cu₂O/Al metal-semiconductor-metal (MSM) photodetectors using sulphurized CuO and Cu₂O thin films and determining the effect of sulphurization on the opto-electronic properties of MSM photodetectors.

Method: In this study, glass and n-type silicon substrates on which thin films will be grown were subjected to a series of cleaning processes in the clean room. In the deposition of nanoparticles CuO and Cu₂O thin films on the cleaned glass and n-type silicon substrate surface, DC magnetron sputtering (DC Sputter) method, which is one of the thin film deposition techniques, which is the physical vapor deposition (PVD) method, was used. Some of the CuO and Cu₂O thin films deposited on the glass and n-type silicon surface were sulphated by chemical vapor deposition method, XRD measurement technique for structural analysis of fabricated thin films, SEM measurement technique for determination of morphological properties and absorption for optical properties. measurement technique was used. In order to obtain Al/CuO/Al and Al/Cu₂O/Al MSM structures, CuO and Cu₂O thin film and sulphated CuO and Cu₂O thin film surfaces are applied to the surface of the thin film in the form of a comb using a thermal evaporation technique aluminum IDE contacts were created. Current-voltage and photocurrent-time measurements of the photodetectors were made in the dark and under light using a two-point probe station, Keithley 2400 Sourcemeeter, Keithley 487 Picoammeter/Voltage Source and AM 1.5 class A solar simulator with 100 mW/cm² light intensity. PTS-2-QE IPCE/Quantum Efficiency Measurement System was used to measure the spectral response of photodetectors against wavelength.

Findings: When XRD data of CuO and Cu₂O thin films and sulphurized CuO and Cu₂O thin films were examined, it was seen that the sulphurization process changed the thin film composition. It was observed that, while the FWHM value and grain boundary of the peaks of CuO and Cu₂O decreased with the sulphurization process, the crystal grain size increased. When the SEM images of sulphurized and unsulphurized CuO and Cu₂O thin films were examined, it was observed that the thin films grew homogeneously on the substrate surface. New structures were formed on the film surface and the sulphurized thin films had larger crystal grain structures by the sulphurization process. It was also seen that the SEM images were compatible with the XRD data. When the optical absorption measurements of the sulphated and unsulphurized CuO and Cu₂O thin films were examined, it was observed that the absorption started at larger wavelengths and thus the bandgap energy were reduced by the sulphurization process. When the electrical and optical measurements of Al/CuO/Al and Al/Cu₂O/Al metal-semiconductor-

metal (MSM) photodetectors were examined, it is seen that the photodetectors produced with sulphurized CuO and Cu₂O thin films had better electrical and optical properties.

Results: By changing the structural, morphological, and optical properties of thin films, crystal qualities can be increased, and bandgap energy ranges can be changed by sulphurization. In addition, a higher quality crystal structure can be obtained by changing the sulphurization time. Depending on the sulphurization time, the change of the bandgap energy also needs to be examined. However, sulphurization also has positive effects on the electrical and optical properties of photodetectors. In order to improve the electrical and optical properties of photodetectors, different contact materials can be used besides the application of the sulphurization process. The electrical and optical measurement results of the photodetectors, we fabricated under visible light, make them a good candidate for use in the visible region of the electromagnetic spectrum as a photodiode for optoelectronic device applications.

Keywords: Transition metal oxide, CuO, Cu₂O, sulphurisation, nanostructure, RF/DC sputtering, photodetector, MSM

July 2023, 134 pages



İÇİNDEKİLER

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TABLolar DİZİNİ.....	xi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER	12
Yarıiletkenler	12
Katkısız Yarıiletkenler	13
Katkılı Yarıiletkenler	14
Yarıiletkenlerde Taşıyıcı iletimi ve iletkenlik	17
Taşıyıcı Sürüklenmesi	18
İletkenlik.....	22
Taşıyıcı Difüzyonu	24
Toplam Akım Yoğunluğu	26
Aktivasyon Enerjisi	27
Heteroeklemler.....	27
p-n Eklemi	27
Metal / Yarıiletken Eklemler	33
Metal / Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları	35
Engel İçinden Kuantum Mekaniksel Tünelleme	38
Tükenim Bölgesinde Taşıyıcı Jenerasyonu ve Rekombinasyonu	38
Azınlık Taşıyıcı Enjeksiyonu	39
Schottky Diyot ile pn Eklem Diyotunun Karşılaştırılması	40
Termiyonik Emisyon Teorisi	42

Norde Fonksiyonları	43
Fotodedektörler	44
Kuantum Verimi (η)	44
Duyarlılık ya da Spektral Tepki (SR)	44
Kazanç (G)	45
Algılama Hassasiyeti ya da Dedektivite (D)	45
Bakır Oksit Yarıiletkenler	46
MATERYAL VE METOT	49
Kullanılan Malzemeler ve Alt Tabaka (alttaş)’ların Hazırlanması	49
CuO ve Cu₂O İnce Filmlerin Hazırlanması	50
İnce Film Karakterizasyon Teknikleri	54
X-Işını Kırınımı (XRD)	55
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	56
Optik Soğurma	58
Spektroskopik Elipsometre	59
Fotodedektör Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu	60
Fotodedektör Fabrikasyonu	60
Fotodedektörlerin Elektriksel ve Optoelektronik Karakterizasyonu	62
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	64
CuO ve Cu₂O İnce Filmler ile Sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyon	64
X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri	64
Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ölçümleri	78
Soğurma (UV-Vis) ve Yansıma (Reflectance) Ölçümleri	87
Al/CuO/Al ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörlerin Elektriksel Karakterizasyonları	96
Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri	96
Foto akım-Zaman (I-t) Ölçümleri ve Yükselme Süresi (Rise Time) ve Düşme Süresi (Fall Time)	115

Spektral Tepki (Spectral Response).....	121
Kuantum Verimliliği (η)	124
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
KAYNAKLAR.....	131



TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Bakır (I) Oksit (Cu_2O)’in Bazı Fiziksel Özellikleri.....	46
Tablo 2. Bakır (II) Oksit (CuO)’in Bazı Fiziksel Özellikleri.....	47
Tablo 3. CuO ve Cu_2O İnce Film Biriktirme Parametreleri	54
Tablo 4. Cam Altlık Üzerine Büyütülen CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri.....	66
Tablo 5. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri.....	67
Tablo 6. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri	69
Tablo 7. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri.....	70
Tablo 8. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri	72
Tablo 9. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri.....	73
Tablo 10. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri.....	75
Tablo 11. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri	77
Tablo 12. Al/CuO/Al Ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait Bazı Elektriksel Parametreler	104
Tablo 13. $\text{Al/Cu}_2\text{O/Al}$ Ve Sülfürlenmiş $\text{Al/Cu}_2\text{O/Al}$ MSM Schottky Fotodedektörlere Ait Bazı Elektriksel Parametreler	112
Tablo 14. Al/CuO/Al Ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait 100 mw/cm^2 Görünür Işık Şiddetinde Ve 1,5 V Ön Gerilimde Bazı Fotovoltaik Parametreler ...	118
Tablo 15. $\text{Al/Cu}_2\text{O/Al}$ Ve Sülfürlenmiş $\text{Al/Cu}_2\text{O/Al}$ MSM Schottky Fotodedektörlere Ait 100 mw/cm^2 Görünür Işık Şiddetinde Ve 1,5 V Gerilimde Bazı Fotovoltaik Parametreler	121

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji bant değişimleri	13
Şekil 2. Bir yarıiletkenin sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bantlarının şematik gösterimi.....	14
Şekil 3. Fermi dağılım fonksiyonu.	16
Şekil 4. Durum yoğunluğu fonksiyonu.	17
Şekil 5. Bir yarıiletkendeki holün tipik rastgele davranışı, (a) elektrik alansız, (b) elektrik alanın varlığında.	21
Şekil 6. Moleküler yoğunluğun fazla olan taraftan az olan tarafa doğru parçacık akısı.	25
Şekil 7. Metalurjik eklem, uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar.	28
Şekil 8. p-n heteroeklemde p ve n-tipi yarıiletkenlerin (a) kontakdan önceki ve (b) kontakdan sonraki bant yapısı.	29
Şekil 9. p-n diyodun (a) tükenim bölgesinin dengede, doğru beslemde, ters beslemde durumları, (b) enerji bant profilleri.	32
Şekil 10. Metal / p-tipi yarıiletken doğrultucu eklemde (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra enerji bant yapısı.....	34
Şekil 11. Metal / p-tipi yarıiletken omik eklemde (a) kontakdan önce, (b) kontakdan sonra enerji bant yapısı.....	35
Şekil 12. Düz beslem altındaki bir Metal / n-tipi yarıiletken Schottky engelli eklemnin farklı iletim mekanizmalarını gösteren enerji-bant diyagramı. (1) Engel üzerinden termiyonik emisyon, (2) Engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme, (3) Tükenim bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu veya jenerasyonu, (4) Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan yarıiletkenin nötral bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu.	36
Şekil 13. Teorideki ideal bir doğrultucu eklemnin lineer ölçekteki akım gerilim karakteristiği.	40
Şekil 14. İdeal olmayan iki farklı farazi doğrultucu eklemnin akım-gerilim karakteristiği.	41
Şekil 15. Bakır (I) oksit (Cu_2O)'in kristal yapısı.	46
Şekil 16. Bakır (II) oksit (CuO)'in kristal yapısı.....	47
Şekil 17. Vaksis Saçtırma sistemi. 1. Altlık ısıtıcı PID kontrolcüsü 2. Bilgisayar açma/kapama butonu 3. DC güç kaynağı 4. Ana şalter 5. Başlatma durdurma butonları 6. Acil durdurma butonu 7. Kontrol ünitesinin monitörü 8. Plazma izleme penceresi 9. Kaplama odası.....	51
Şekil 18. Saçtırma işleminin çalışma prensibi.....	53
Şekil 19. Farklı altlıklar üzerine biriktirilen CuO ve Cu_2O ince filmler.	54
Şekil 20. Paralel düzlemler tarafından ışığın kırınımı ve Bragg yasası.	56

Şekil 21. SEM cihazının yapısı.	57
Şekil 22. Bir yarıiletkendeki farklı soğurma mekanizmaları. (1) banttan banda direkt geçiş, (2,3) bant içi geçişler, (4) donör seviyesinden iletkenlik bandına geçiş, (5) Valans bandından akseptör seviyesine geçiş, (6) valans bandından donör seviyesine geçiş, (7) akseptör seviyesinden iletkenlik bandına geçiş, (8) akseptör seviyesinden donör seviyesine geçiş.	58
Şekil 23. Elipsometre ve bölümleri.	60
Şekil 24. Metal maskenin şematik diyagramı.	61
Şekil 25. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörler.	61
Şekil 26. I-V ölçüm sistemi.	62
Şekil 27. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği.	65
Şekil 28. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.	66
Şekil 29. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.	68
Şekil 30. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği.	68
Şekil 31. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.	69
Şekil 32. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.	71
Şekil 33. Cam altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	71
Şekil 34. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	72
Şekil 35. Cam üzerine büyütülen Cu ₂ O ve sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	74
Şekil 36. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	75
Şekil 37. n-tipi silisyum üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	76
Şekil 38. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ve sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin XRD grafiği.	78
Şekil 39. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü.	79
Şekil 40. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü.	80
Şekil 41. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü.	81
Şekil 42. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü.	82
Şekil 43. Cam altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ince filmin SEM görüntüsü.	83
Şekil 44. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin SEM görüntüsü.	84
Şekil 45. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ince filmin SEM görüntüsü.	85
Şekil 46. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin SEM görüntüsü.	86

Şekil 47. (a) Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.	88
Şekil 48. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin enerjiye (E) karşı ahv^2 grafiği.	89
Şekil 49. (a) Cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.	90
Şekil 50. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin enerjiye (E) karşı ahv^2 grafiği.	91
Şekil 51. (a) Cam altlık üzerine büyütülmüş Cu ₂ O ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülmüş Cu ₂ O ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.	92
Şekil 52. Cam altlık üzerine büyütülen Cu ₂ O ince filmin enerjiye (E) karşı ahv^2 grafiği.	93
Şekil 53. (a) Cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.	94
Şekil 54. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu ₂ O ince filmin enerjiye (E) karşı ahv^2 grafiği.	95
Şekil 55. n-tipi silisyum altlık üzerine Cu ₂ O biriktirilerek hazırlanan (a) Al/ Cu ₂ O /Al (b) Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektör.	98
Şekil 56. Al/ Cu ₂ O /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.	99
Şekil 57. Al/ Cu ₂ O /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.	99
Şekil 58. Sülfürlenmiş Al/ Cu ₂ O /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.	101
Şekil 59. Sülfürlenmiş Al/ Cu ₂ O /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.	101
Şekil 60. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri.	103
Şekil 61. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri. ..	103
Şekil 62. n-tipi silisyum altlık üzerine Cu ₂ O kaplanarak hazırlanan (a) Al/Cu ₂ O/Al (b) Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektör.	107
Şekil 63. Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.	107
Şekil 64. Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.	108
Şekil 65. Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.	109
Şekil 66. Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.	110
Şekil 67. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri. .	111

Şekil 68. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri.	112
Şekil 69. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği.	115
Şekil 70. Al/CuO/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.	116
Şekil 71. Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.	117
Şekil 72. Al/Cu ₂ O/Al sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği.	118
Şekil 73. Al/Cu ₂ O/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.	119
Şekil 74. Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.	120
Şekil 75. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün dalga boyuna karşı spektral duyarlılık grafiği.	122
Şekil 76. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörün dalga boyuna karşı spektral duyarlılık grafiği.	123
Şekil 77. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği.	125
Şekil 78. Al/Cu ₂ O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği.	126

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

MSM	: Metal Semiconductor Metal
GEG	: Gürültü eşdeğer gücü
RCA-1	: Amerika Radyo kurumu 1
RCA-2	: Amerika Radyo kurumu 2
DI	: Deiyonize
PVD	: Fiziksel buhar biriktirme
DAYTAM	: Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji uygulama ve Araştırma Merkezi
DC	: Doğru akım
FWHM	: Yarı yükseklik genişliği
n-Si	: n tipi silisyum
p-CuO	: P tipi cupric oksit
p-Cu ₂ O	: P tipi cuprous oksit
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
XRD	: X-ışını kırınımı
SCCM	: Dakikada kübik santimetreden geçen akış
IDE	: Interdigitated Electrode
PS	: Foto duyarlılık
A	: Fotodedektörün etkin bölgesinin alanı
A [*]	: Richardson sabiti
α	: Absorpsiyon katsayısı
Al	: Alüminyum
c	: Işık hızı
CuO	: Cupric oxide
Cu ₂ O	: Cuprous oxide
d	: Kristaldeki düzlemler arası mesafe
D	: Kristal tanecik büyüklüğü
e	: Elektronun yükü
E	: Elektrik alan
E _{FM}	: Metalin Fermi seviyesi
E _{FS}	: Yarıiletkenin Fermi seviyesi
E _g	: Yarıiletkenin bant aralığı
E _c	: Yarıiletkenin iletkenlik bandı minimumu
E _v	: Yarıiletkenin valans bandı maksimumu
ϵ_0	: Dielektrik sabiti
h	: Planck sabiti
I	: Akım
I ₀	: Doyma akımı
I _{foton}	: Fotoakım
I _{Karanlık}	: Karanlık akım
J	: Akım yoğunluğu
K	: Momentum vektörü
μ	: Mobilite
η	: Kuantum verimi
ϕ_m	: Metalin iş fonksiyonu
ϕ_s	: Yarıiletkenin iş fonksiyonu
ν	: Frekans
H _z	: Hertz
T	: Sıcaklık

E_f	: Fermi enerjisi
$D(E)$	: Durum yoğunluğu
m_e	: Elektronun etkin kütlesi
ρ	: Hacimsel yük yoğunluğu
v_d	: Ortalama sürüklenme hızı
J_{drf}	: Sürüklenme akım yoğunluğu
$J_{p/dr}$	: Hollerin sürüklenme akım yoğunluğu
v_{dp}	: Hollerin ortalama sürüklenme hızı
a	: İvme
m_p^*	: Holün etkin kütlesi
V_{bi}	: Yerleşik potansiyel engeli
ΔE_c	: İletkenlik bandı süreksizliği
ΔE_v	: Valans bandı süreksizliği
W	: Deplasyon (tükenim) bölgesi genişliği
χ	: Elektron ilgisi
n	: İdealite faktörü
γ	: İdealite faktöründen büyük olan en küçük tamsayı
R_s	: Seri direnç
λ	: Fotonun dalga boyu
P_{in}	: Işık gücü
SR	: Spektral duyarlılık
G	: Kazanç
D	: Dedektivite

GİRİŞ

Günümüzde neredeyse hayatımızın her alanında teknolojik cihazlar kullanılmaktadır. Hızlı gelişen teknoloji ile kullandığımız cihazların boyutları da küçülmeye başladı. Küçük boyuttaki bu teknolojik cihazlar aynı zamanda daha hızlı, daha hassas ve yüksek verimli hale geldiler. Yeni nesil cihazlar olarak da adlandırabileceğimiz cihazlar, sahip oldukları bu üstün özellikleri nanoteknolojiye borçludur.

Uluslararası birimler sisteminde “nano” ön eki milyarda bir demektir. Yani hangi ölçü biriminin başına gelirse onun milyarda biridir. Bunun ne kadar küçük olduğunu hayal etmemiz zordur. Örneğin bir kağıt yaprağı yaklaşık 100.000 nanometre kalınlığındadır. İnsan saçı yaklaşık 80.000 ile 100.000 nanometre kalınlığındadır.

Nanoteknolojinin amacı, oldukça küçük, akıllı, çok işlevli, son derece hassas ve düşük güç tüketimine sahip nano cihazlar üretmektir. Nanomalzemelerin ve nano fabrikasyon teknolojilerinin kullanılmasıyla üretilen bir nano cihazın çok küçük boyutta olması ve çok düşük enerji tüketmesi beklenir. Bu nedenle kendi gücünü kendinden alan nanoteknoloji, bağımsız, sürdürülebilir ve kendi kendine çalışan bir sistem oluşturmayı amaçlar.

Nanoteknoloji, birçok teknoloji ve endüstri sektörünün önemli ölçüde iyileştirilmesine, hatta bilgi teknolojisi, ülke güvenliği, tıp, ulaşım, enerji, gıda güvenliği ve çevre bilimi gibi birçok alanda devrim yaratmasına yardımcı olmuştur.

Nanoteknoloji kullanılarak malzemeler, diğer birçok özelliğin yanı sıra, daha güçlü, daha hafif, daha dayanıklı, daha hızlı ve daha verimli bir hale getirilebilir. Nanoteknolojinin bu faydaları, belirli özelliklere ulaşmak için malzemelerin yapılarını son derece küçük ölçeklerde uyarlamakla mümkündür. Günümüzde piyasada olan ve kullanılan pek çok ticari ürün nano ölçekli malzemelere ve süreçlere dayalı olarak üretilmektedir.

Nanoteknoloji, bilgi işlem ve elektronikteki büyük ilerlemelere katkıda bulunmuş ve giderek daha büyük miktarlarda bilgiyi yönetebilen ve depolayabilen daha hızlı, daha küçük ve kolay taşınabilir sistemlerin oluşturulmasına imkân sağlamıştır. Bunun yanında nanoteknoloji, geleneksel enerji kaynaklarının üretiminde uygulama alanı bulmakla kalmayıp dünyanın artan enerji talebini karşılamaya yardımcı olmak için kullanılan alternatif enerji yaklaşımını büyük ölçüde geliştirmiştir. Birçok bilim insanı temiz, ucuz ve toksik olmayan yenilenebilir enerji kaynakları geliştirmenin yollarını aramaktadır.

Nanoteknoloji ile ilgili araştırmalarda ışığı elektrik sinyaline dönüştürebilen fotodedektörler, günümüzde kullanılan en yaygın teknoloji türleri arasındadır. Bunlar, süpermarket kapılarını otomatik olarak açan basit cihazlardan, görüntüleme tekniklerine, ışık dalgası iletişimine ve güneş hücrelerine kadar birçok alanda geniş uygulama alanına sahiptir.

Fotodedektörler fotoelektrik etki kullanılarak geliştirilmiş optoelektronik cihazlardır. Bu cihazlar, üzerine düşen ışığı algılar ve algılanan bu ışığı elektrik sinyaline dönüştürür. Yarıiletken teknolojisiyle üretilen fotodedektörler, genellikle yüksek hassasiyet, düşük enerji tüketimi ve yüksek tepki hızı avantajlarını sundukları için fotonikte çok yaygın olarak kullanılır. Bu cihazlar tasarım şekillerine, üretim koşullarına ve içerdği yarıiletken malzemenin özelliklerine bağı olarak farklı spektrumdaki ışıkları algılayabilir. Son yıllarda, fotoiletkenler, fotodiyotlar, fototransistörler, çığ fotodedektörleri, kunatum kuyusu dedektörleri vb. gibi çeşitli fotodedektörlerin geliştirilmesine büyük ilgi olmuştur. Geniş yasak enerji aralığına sahip görünür ışık fotodedektörleri güneş hücreleri, görüntüleme, çevresel araştırma, kimyasal analiz ve optik iletişim gibi çeşitli optoelektronik uygulamalar için gereklidir (Zhan, Zheng et al. 2012, Xie and Shen 2015, Huo and Konstantatos 2018).

Bilgi işleme teknolojisinde en önemli husus, alınan bilginin algılanmasıdır. Elektronikte bilgiyi algılayan aygıtlar, alan etkili transistörler (FET-Field effect transistor), bipolar eklem transistor (BJT-Bipolar junction transistor) ve diyotlardır. Bu aygıtlar yüksek kazançlı, düşük gürültülüdür. Ancak $\nu > 10^{14}$ Hz frekansa sahip optik sinyalleri algılamak için uygun değildirler. Optik sinyalin algılanmasından sonra elektronik aygıt ve sistemlerde kullanılabilmesi için elektrik sinyaline dönüştürülmesi gerekir. Optik sinyali elektrik sinyaline dönüştüren aygıtlar fotodedektörler olup, genel anlamda foton dedektörleri ve termal dedektörler olarak iki gruba ayrılırlar.

Termal dedektörler, kızılötesi bölgesindeki radyasyonu dedekte eden veya sıcaklık değişimine bağı yayımlanan kızılötesi radyasyonunu yakalayan dedektörlerdir. Termal dedektör, soğurulan kızılötesi radyasyonlarla ısınır ve bu durum dedektörün sıcaklığını artırır. Sıcaklıktaki bu değişim voltaj veya direnç gibi sıcaklığa bağı mekanizmalar ile ölçülür.

Foton dedektörlerinde ise soğurma işlemi dalga boyuna bağıdır ve soğurmanın başlayacağı dalga boyu için bir eşik değeri vardır. Foton dedektörleri ışığa karşı çok hızlı yanıt verirler. Dedektör malzemesi olarak temelde yarıiletkenler kullanılır. Çok çeşitli yapılarda aygıt üretimine imkan verir. Ancak bu üstün özellikleri yanında dar optik bant genişliğine sahip olmaları dezavantaj olarak kabul edilebilir. Foton dedektörleri, fotoiletken (Asal, katkılı), fotovoltaik (p-n, pin, Schottky diyot ve heteroeklemler) ve fotosalıcı (Fotoelektrik olay, Metal/Metal ve Metal yarıiletken eklemler) olmak üzere üç gruba ayrılırlar.

Görünür bölge fotodedektörleri üretilirken, p-n homoeklem, p-n heteroeklem, Schottky eklem veya Metal-Yarıiletken-Metal (MSM, Metal Semiconductor Metal) eklem gibi çeşitli cihaz yapıları kullanılır. Son yıllarda araştırmacılar, kolay üretilebilir olmaları ve bazı üstün özelliklerinden dolayı, görünür bölge fotodedektör üretiminde p-n heteroeklem ve Metal-Yarıiletken-Metal yapılar üzerine yoğunlaşmıştır.

Si, SiC, InAs, InGaAs, InP, Ge, Ge:Cu vb. malzemeler fotodedektörlerde aktif malzeme olarak kullanılmaktadır. Geleneksel silisyum tabanlı görünür ışık fotodedektörleri, sessiz ve ışık algılama seviyesi yüksek olmasıyla birlikte sert silisyum malzemedan üretilmiştir (Lin, Armin et al. 2015). Fakat son yıllarda teknolojinin gelişimiyle birlikte ortaya çıkan şeffaf ve esnek elektronik cihaz uygulamaları için, hacimli ve kırılkan olma özelliğinin yanında maliyet verimsizliği nedeniyle silisyum tabanlı geleneksel görünür ışık fotodedektörleri yerine ucuz alternatif malzeme arayışı önem kazanmıştır. Bu nedenle, malzeme çeşitliliği ve yapısal değişikliklere dayalı olarak, kolay üretilebilir, düşük maliyetli ve yüksek performanslı fotodedektörler geliştirmek için son zamanlarda birçok çalışma yapılmıştır. Örneğin, metal oksitler (Hong, Cao et al. 2014, Liu, Du et al. 2014, Zheng, Gan et al. 2015, Abd-Alghafour, Ahmed et al. 2016), geçiş metali dikalkojenitler (Liu, Zheng et al. 2016, Lee, Ahn et al. 2018, Long, Wang et al. 2019) ve perovskitler (Feng, Yan et al. 2017, Lan, Dong et al. 2017, Chen, Zhang et al. 2018), yüksek hassasiyet ve hızlı tepki hızı elde etmek için fotodedektörlerde ışık emici malzeme olarak geliştirilmiştir.

Geçiş metal oksitler, benzersiz fiziksel ve kimyasal özellikleri nedeniyle araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Sahip oldukları üstün özelliklerden dolayı nano yapıları geçiş metal oksitleri, çeşitli yeni fonksiyonel ve akıllı malzemelerin geliştirilmesi için tartışılmaz bir ön koşul olmuştur (Zhang, Zhang et al. 2014). Geçiş metal oksitlerden bakır oksit, genellikle Bakır (II) oksit ya da cupric oksit (CuO) ve Bakır (I) oksit ya da cuprous oksit (Cu_2O) olarak adlandırılan iki fazda elde edilen, periyodik tablonun II-VI grubuna ait p- tipi bir yarıiletkenidir. Cu_2O kahverengi CuO ise siyaha yakın oldukça koyu bir renge sahiptir. Hazırlanma yöntemlerine ve koşullarına bağlı olarak, Cu_2O ve CuO sırasıyla yaklaşık olarak 2,1-2,61 eV (Kondo 1998, Mathew, Mathews et al. 2001, Ray and cells 2001, Nakaoka, Ueyama et al. 2004, Paracchino, Brauer et al. 2012) ve 1,3-2,1 eV (Nakaoka, Ueyama et al. 2004, Oral, Menşur et al. 2004, Izaki, Nagai et al. 2011, Chiang, Chang et al. 2012, Guo, Diao et al. 2014) değerinde doğrudan yasak enerji aralığına (E_g) sahiptir. Cu_2O ve CuO sahip oldukları yasak enerji aralığı sayesinde güneş spektrumunun büyük çoğunluğunu soğurur. Bununla birlikte doğrudan yasak enerji aralıkları bu iki okside optik spektrumun görünür bölgesinde büyük bir soğurma katsayısı ve oldukça iyi elektriksel özellikler sağlar.

Geniş bant aralığı, yaklaşık $100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ taşıyıcı mobilitesi, uzun difüzyon mesafesi ve tek eklemlili yapılar için 20%'lik teorik maksimum güç dönüşüm verimliliği gibi özellikleri Cu_2O 'yu güneş pili uygulamasında soğurucu katman için uygun bir aday yapar (Zheng, Huang et al. 2009, Wang, Ghanbaja et al. 2015). Ayrıca Cu_2O 'nın bant aralığı, geleneksel Si ve Cu(In,Ga)Se_2 güneş hücrelerine sahip tandem cihazlar için bir üst pencere hücresi için uygundur (Lee, Chua et al. 2014). CuO ise Schocley Queisser limiti için optimum özelliği ve 674 mAhg^{-1} teorik depolama kapasitesi nedeniyle güneş hücreleri ve Lityum iyon pil elektrodu için büyük ilgi görmüştür (Ko, Lee et al. 2012, Martin, Martinez et al. 2013). Bunun yanında bakır oksitler gaz sensörü olarak da kullanım alanı bulmuştur (Zhang, Liu et al. 2006, Meng, Di et al. 2013, Wang, Tao et al. 2022). Bakır oksitler doğal p-tipi yarıiletken olduklarından metal oksit p-n eklem cihazlar yapmak için oldukça uygun malzemelerdir.

Son on yılda, bakır oksit katmanına sahip optik ve elektronik cihazların üretimini ortaya koyan bir dizi araştırma rapor edilmiştir.

S. Noda ve arkadaşları, saçtırma yöntemini kullanarak Pt alttaş üzerine önce p-tipi Cu_2O (200 nm) tabakasını, sonra katkısız ZnO (30 nm) tabakasını ve daha sonra da n-tipi Al katkılı ZnO (100 nm) tabakasını oda sıcaklığında büyütürerek heteroeklemlili p-i-n diyot elde etmişlerdir. P-n eklem elde edebilmek için Cu_2O ve ZnO katmanları vakum ortamında art arda büyütülmüş ve ZnO katmanı 10 nm olduğunda büyütme durdurularak alttaşlar vakum odasından çıkarılmış ve hızlı termal tavlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Sonra ZnO/AZO tabakası maske kullanılarak yine saçtırma yöntemi ile oda sıcaklığında biriktirilmiş ve termal tavlama yapılmamıştır. Oluşturulan güneş hücresinin akım gerilim (I-V) özellikleri, dış kuantum verimliliği (EQE) ile fotovoltaiik performansları, yani kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), dönüşüm verimliliği (η), dolum faktörü (FF) 1,5 hava-kütlesi (AM) altında bir güneş simülatörü ile ölçüldüğü belirtilmiştir. Güneş hücresinin performansının hızlı termal tavlama ile arttığı, dönüşüm verimliliği, kısa devre akımı, açık devre gerilimi ve dolum faktörünün sırasıyla 0,24%, 1,2 mA/cm^2 , 0,69 V ve 0,28 olduğu rapor edilmiştir (Noda, Shima et al. 2013).

Hong, Cao ve arkadaşları tarafından çözelti sentezi yöntemiyle n-silisyum nanotel üzerine p- CuO nanoflakes tabakası büyütürerek altın temas noktalı, geniş bantlı bir p-n heteroeklemlili fotodedektör üretilmiştir. Cihazın, karanlıkta çok iyi bir doğrultma özelliği ve geniş bant ışık aydınlatması altında farklı fotovoltaiik davranış gösterdiği rapor edilmiştir. 405 nm, 532 nm ve 1064 nm dalga boylarında cihazın sırasıyla 0,389 mA/W , 0,105 mA/W ve 0,064 mA/W duyarlılık değerleri sergilediği, görünür ve yakın kızılötesi ışık aydınlatmalarına karşı oldukça hassas olduğu belirtilmiştir. Aynı zamanda cihazın sırasıyla 60 ve 80 μs 'lik hızlı yükselme ve düşme süresine sahip olduğu da belirtilmiştir. Ek olarak, geniş bantlı

fotodedektörün küçük bir ön gerilim altında aydınlatıldığında akımın pozitiften negatife değişmesiyle hızlı bir ikili yanıt sağlayabildiği ve bu ikili yanıtın, Cu/Si nanotel cihazın düşük açma geriliminden kaynaklandığı bildirilmiştir. CuO/Si nanotel cihazın yüksek yanıt hızları ve kendi kendine yeten işlevsellik gerektiren uygulamalar için uygun olduğu rapor edilmiştir (Hong, Cao et al. 2014).

G. Akgül ve arkadaşları, CuO ince filmleri spin kaplama yöntemini kullanarak n-tipi Si nanoteller üzerine sentezleyerek p-CuO/n-Si NW heteroeklem yapılı bir fotodedektör üretmişlerdir. Yapılan çalışmada, üretilen nanotelli cihazın optoelektronik performansının düzlemsel heteroeklem kontrol cihazından çok daha iyi olduğu belirtilmiştir. Cihazlara ait doğrultma oranları sırasıyla nanotel ve düzlemsel heteroeklemler için 10^5 ve 10^1 olarak bulunmuştur. Nanotelli heteroeklem diyodun düzlemsel diyota göre elektriksel özelliklerinin ve ışığa duyarlılığının arttığı gözlenmiş ve bunun nedeni olarak Si nanotelleri ve CuO filmi arasındaki arayüzün üç boyutlu doğasından kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre Si nanotel tabanlı heteroeklemlerin çeşitli optoelektronik cihazlar için uygun olduğu rapor edilmiştir (Akgul, Aksoy et al. 2014).

SK. Baek ve arkadaşları tarafından elektrodepozisyon yöntemi ile $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ heteroeklem bir fotovoltaiik cihaz üretilerek AM 1,5 hava kütlesi altında fotovoltaiik özellikleri incelenmiştir. Soğurucu katman olarak p-tipi Cu_2O kullanılan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ heteroeklem yapılı cihazın çok iyi fotovoltaiik özellikler gösterdiği bildirilmiştir. Cihaza ait güç dönüşüm veriminin 0,13%, kısa devre akımının $1,63 \text{ mA/cm}^2$, açık devre geriliminin 0,3 V ve dolum faktörünün 0,6% olduğu rapor edilmiştir (Baek, Shin et al. 2015).

A.Tombak ve arkadaşları, Cu hedef kullanarak 44 W DC güç altında saçtırma (Sputter) yöntemiyle n-tipi silisyum altlık üzerine 250°C sıcaklıkta CuO ince film büyütmüşlerdir. Büyütülen ince film 450°C sıcaklıkta tavllanmış ve daha sonra 10^{-6} Torr basınçta termal buharlaştırma yöntemiyle CuO üzerine gümüş (Ag) ön kontak, Silisyum üzerine de altın (Au) arka kontak yapılarak Ag/CuO/Si/Au diyot yapısı elde edilmiştir. Cihazda oluşan seri dirençten dolayı bir diyot olarak Ag/CuO/Si/Au ideal olmayan bir davranış sergilediği belirtilmiştir. Cihazın idealite faktörünün yaklaşık 3,5 olduğu, Norde yöntemi ile hesaplanan bariyer yüksekliği ve seri direncin ise sırasıyla 0,96 V ve $86,6 \Omega$ olduğu rapor edilmiştir. CuO tabanlı cihazın güneş hücreleri için iyi bir soğurucu tabaka olabileceği önerilmiştir (Tombak, Benhaliliba et al. 2015).

H. Kim ve arkadaşları tarafından, atomik katman biriktirme (ALD) yöntemiyle silisyum nanotel dizisi üzerine Cu_2O katmanı büyütülerek n-Si/p- Cu_2O fotodiyotu oluşturulmuştur. Oluşturulan fotodiyotun ultraviyole ışık aydınlatma altında düzlemsel yapılı diyotundan daha

hassas ışık algılama performansı gösterdiği ve doğru beslem altında daha iyi bir fotoakım yoğunluğu sergilediği rapor edilmiştir (Kim, Kim et al. 2016).

J. Sultana ve arkadaşları, p-CuO/n-Si heteroeklem diyotu üretmek için VLS (buhar-sıvı-katı) tekniğini kullanmışlardır. CuO tabakası üzerine termal buharlaştırma tekniği kullanılarak 100 nm kalınlığında ITO tabakası biriktirilmiştir. ITO tabakası üzerine elektrik kontağını almak için termal buharlaştırma tekniği kullanılarak 10 μ m yarıçaplı Al kontak noktası büyütülerek cihazın elektriksel karakterizasyonu yapılmıştır. Akım-gerilim grafiğinden cihazın doğrultucu özellik sergilediği görülmüş ve bariyer yüksekliğinin 0,583 V olduğu belirtilmiştir. Optik anahtarlama ölçümlerine göre cihazın yükselme ve düşme zamanının sırasıyla 3,02 s ve 3,8 s olduğu gösterilmiştir. Ayrıca, 1,02 mW/cm² giriş gücü altında açık devre gerilimi, kısa devre akım yoğunluğu, dolum faktörü ve verimin sırasıyla 70 mV, 0,16 mA/cm², 24,3% ve 0,27 olarak ölçüldüğü bildirilmiştir. Düşük maliyetli ve alternatif bir yöntem olan VLS tekniği ile üretilmiş ultra ince p-CuO (20nm) filmin, üstün performanslı fotovoltaiik cihazların geliştirilmesi için umut verici olduğu rapor edilmiştir (Sultana, Das et al. 2016).

K. Zhang ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada p-CuO/n-MoS₂ heteroeklemli, fotoakım ve algılama hassasiyetinde bir artışa sahip esnek bir fotodedektör geliştirdiklerini bildirmiştir. Tek katmanlı MoS₂'deki merkez-simetrik olamayan yapıdan dolayı, uygulanan gerilim tarafından indüklenen piezo-potansiyelin, heteroeklem arayüzündeki bant yapısını değiştirdiğini ve piezo-fototronik etkiye dayalı olarak deplasyon bölgesini genişlettiği ileri sürülmüştür. 532 nm lazerle aydınlatıldığında, heteroeklemin foto akımının, gerilimin olmadığı duruma kıyasla 0,65%'lik bir çekme gerilimi (Tensile strain) altında 27 kat arttırılabilir olduğu ve algılama hassasiyetinin 3,27x10⁸ Jones'a kadar ulaşabildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak araştırmanın, optoelektronik uygulamada 2D malzemeli heteroyapıların tasarımı ve performanslarının optimizasyonu için yeni bir strateji sunduğu rapor edilmiştir (Zhang, Peng et al. 2017).

KM. Chahrour ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, Si altlık üzerine önceden biriktirilmiş Al ince filmin altıgen şeklinde ince nanogözenekli anodik alümina (AAO) şablonu, nano yapıları malzemelerin büyümesi için iki aşamalı bir anodizasyon yoluyla kontrol edilebilir koşullar altında üretmişlerdir. AAO şablonunun bir alt bariyer tabakası, oda sıcaklığında birkaç dakika boyunca fosforik asit kullanılarak ıslak aşındırma yoluyla çıkarıldığı belirtilmiştir. Si altlıklı AAO şablonu üzerine elektrodepozisyon yoluyla Cu nanorod dizileri biriktirildiği, yüksek kaliteli CuO nanorod dizileri üretmek için optimize edilmiş geleneksel tavlama işlemiyle oksitlendiği bildirilmiştir. CuO nanorod dizilerinin ise AAO şablonunun kaldırılmasıyla elde edildiği ifade edilmiştir. MSM'ye dayalı yüksek performanslı CuO

nanorod dizileri ile hızlı IR fotodedektör, Al kontak elektrotlarla üretilerek optoelektronik özellikleri incelenmiştir. Cihazın elektrik performansı ve fotoelektrik yanıt performansı incelendiğinde, IR fotodedektörün 808 nm IR lazer ışığına karşı yüksek hassasiyet gösterdiği bildirilmiştir. Fotodedektörün yükselme ve düşme süreleri sırasıyla 0,19 ve 0,17 s olarak ölçülmüş ve bu sürelerin diğer IR fotodedektörlere kıyasla çok daha kısa süreler olduğu rapor edilmiştir (Chahrour, Ahmed et al. 2016).

A.M. Selam ve arkadaşları tarafından, radyo frekans reaktif magnetron saçtırma (RFMS) yöntemiyle cam ve n-Si(111) altlık üzerine Cu₂O nanokristal ince filmi büyütülerek yapısal ve optiksel karakterizasyonu yapılmıştır. Cam altlık üzerine sentezlenen Cu₂O ince filme ait optik bant aralığının 2,42 eV olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, hazırlanan Cu₂O nanokristal ince filmin görünür spektrumda düşük yansıtma değeri gösterdiği rapor edilmiştir. Bu çalışmada, Si (111) altlığa büyütülen Cu₂O ince film üzerine Alüminyum ve Platin metalleri kullanılarak İDE (İnterdigitate elctrode) kontaklar yapılarak bir Metal-Yarıiletken-Metal fotodedektör üretilmiştir. MSM fotodedektör 1 V gerilimde ve 490 nm dalga boyuna sahip 10 mV/cm² şiddetindeki ışık altında 126%'lık bir duyarlılık gösterdiği ve sırasıyla 90, 100 ms yükselme ve düşme sürelerine sahip olduğu belirtilmiştir. Bu bulgular neticesinde, Cu₂O katmanlı MSM fotodedektörün foto sensörler için uygun bir yapıya sahip olduğu araştırmacılar tarafından rapor edilmiştir (Selman, Mahdi et al. 2017).

R. Jana ve arkadaşları yaptıkları bu çalışmada, ITO altlık üzerine biri reflux yöntemiyle diğeri hidrotermal yöntemle büyütülen nano partiküllü ince filmlerle iki farklı Schottky bariyer diyotu (SBD) üretmişlerdir. Farklı yöntemlerle sentezlenen CuO nano partiküllü Schottky diyotların fotovoltaiik özelliklerini karşılaştırılmıştır. Karanlıkta CuO (H)'ın doğrultma oranının CuO (R)'ye göre 37%, ışığa karşı tepkisinin ise 93% gibi büyük bir oranda önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir. Empedans spektroskopisi ölçümleri, CuO (H)'ın CuO (R)'ye kıyasla daha iyi yük transferi ve düşük taşıyıcı rekombinasyonu gösterdiği belirtilmiştir. Hidrotermal yöntemle sentezlenmiş CuO tabanlı Schottky diyotun CuO (R) tabanlı diyota kıyasla gösterdiği üstün performansın, düşük örgü kusur yoğunluğuna ve sahip olduğu iyi ince film özelliklerinden kaynaklandığı rapor edilmiştir (Jana, Dey et al. 2018).

HJ. Song ve arkadaşları tarafından silisyum altlık üzerine fiziksel buhar biriktirme (PVD) yöntemiyle 80 nm kalınlığında Cu tabakası biriktirilmiştir. 400-700 °C de 1 saat tavlama işlemine tabii tutularak farklı tanecik boyutlarına sahip CuO fazlı ince filmler elde edildiği ve sonrasında PVD yöntemiyle bir maske kullanılarak altın IDE elektrotlar oluşturulduğu bildirilmiştir. 700 °C'de tavlanan CuO filmin, yaklaşık 236 nm'lik en büyük tanecik boyutuna sahip olduğu ve 400 °C'de tavlanan en küçük tanecikli nano filminden 18 ve 50 kat daha yüksek

olan 15,3 A/W'lık duyarlılık ve $1,08 \times 10^{11}$ Jones'luk dedektivite gösterdiği belirtilmiştir. Ek olarak, en hızlı yükselme zamanı 0,682 s ve düşme zamanı 1,7 s tepki süreleri 700 °C'de tavllanmış fotodedektörden elde edildiği rapor edilmiştir. Bu sonuçların sebebinin artan tanecik boyutunun karanlık akımı azaltması ve fotoakımı arttırması olduğu ileri sürülmüştür (Song, Seo et al. 2019).

C. de Melo ve arkadaşları, ITO/Cam altlık üzerine ZnO ve Cu₂O ince film katmanlarını sırasıyla reaktif magnetron saçtırma (RMS) ve atomik katman biriktirme (ALD) yöntemiyle biriktirerek nano ölçekli şeffaf p-n heteroeklemi elde etmişlerdir. Büyütülen katmanların yüksek kaliteli kristal özellikleri sergilediği bildirilmiştir. Cu₂O filmlerin sırasıyla 9-150 Ω cm ve 19 cm²/Vs gibi çok düşük özdirenç ve yüksek mobilite değerleri gösterdiği belirtilmiştir. Ek olarak, p-Cu₂O/n-ZnO heteroeklemin doğrusal olmayan doğrultucu karakteristiği sergilediği ve AM 1 güneş ışığı aydınlatmasında kendinden güçlü foto tepki ve elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde ortalama 73% geçirgenlik sergilediği rapor edilmiştir. Bu sonuçların tüm oksitli şeffaf elektronik cihazların, foto algılama ve fotovoltaiik uygulamalar için umut verici olduğu ileri sürülmüştür (de Melo, Jullien et al. 2019).

S. Gunasekaran ve arkadaşları tarafından n-Si altlık kullanılarak, p-CuO/n-Si heteroeklem yapılı ve SiO₂@CuO/n-Si yapılı fotodedektör üretilerek fotovoltaiik özellikleri karşılaştırılmıştır. Fabrikasyonu yapılan SiO₂@CuO/n-Si diyotun p-CuO/n-Si diyota kıyasla 3,96'lık daha iyi bir idealite faktörü ile daha iyi bir foto tepki gösterdiği belirtilmiştir. Geliştirilen her iki diyot için foto duyarlılık, responsivite, dış kuantum verimi ve dedektivite ölçümleri yapılmış ve SiO₂@CuO/n-Si için bu değerlerin sırasıyla 580, 471,4%, 259,7 mA/W, 100,7%, $1,715 \times 10^{12}$ Jones olduğu bildirilmiştir. Bu değerlerin p-CuO/n-Si'nin değerlerinden çok daha iyi olduğu ve SiO₂@CuO/n-Si diyotun gelişmiş foto algılama özelliklerinin, onu fotodedektör uygulamaları için uygun bir aday olduğu rapor edilmiştir (Gunasekaran, Thangaraju et al. 2020).

Bu çalışmada HP. Lin ve arkadaşları tarafından p-Cu₂O/n-ZnO nanoçubuklu, heteroyapılı, UV'den görünür (570 nm) bölgeye kadar algılama yeteneğine sahip, hızlı ve kendi kendine çalışan bir fotodedektör sentezledikleri rapor edilmiştir. Fotodedektörün ortam ışığı algılama uygulamaları için uygun olan 380 nm ile 570 nm arasında bir spektral yanıt aralığı gösterdiği belirtilmiştir. Fotodedektör, düşük kısa devre akımı ve 0,3 V'lık düşük açma gerilimi ile iyi doğrultucu özellikler göstermiştir. Kendi kendine çalışan fotodedektörün foto yanıtlarının 380 ve 450 nm'de sırasıyla 0,24 A/W ve 0,06 A/W olduğu bildirilmiştir. Cihazın yükselme ve düşme sürelerinin ise 370 nm ve 450 nm için sırasıyla 0,02/0,03 s ve 0,01/0,02 s olduğu belirtilmiştir (Lin, Lin et al. 2020).

Bir başka çalışmada, A. Shariffar ve arkadaşları tarafından yüksek sıcaklıklarda tavlama işleminin fotodedektör performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmada, elektron ışını buharlaştırıcısı kullanılarak oda sıcaklığında kuartz altlık üzerine 80nm kalınlığında Cu ince film büyütülmüştür. Büyütülen filmler, CuO tabakası elde etmek için, sırasıyla 800, 850 ve 900 °C’lerde 1’er saat süreyle oksijen ortamında ısıtılma işleminden geçirilmiştir. Tavlama işleminden sonra filmlerin yapısal ve morfolojik özellikleri incelendiğinde, 900 °C’de tavlanan ince filmin bant aralığının 2,8 eV olduğu ve diğer ince filmlere kıyasla 15,1 A/W değerinde daha yüksek bir duyarlılık ve $4,52 \times 10^{12}$ cm/HzW maksimum dedektivite gösterdiği belirtilmiştir. Ek olarak, 900 °C’de tavlanan ince filmlerin ışığa duyarlılığının, 800 °C’de tavlanan ince filmlerinkinden on kat daha fazla olduğu bildirilmiştir. Üretilen cihazın, morötesi-görünür bölge dedektör olarak çalıştığı ve sekiz hafta boyunca yapılan testler sonucunda stabil ve istikrarlı bir performans sağladığı rapor edilmiştir (Shariffar, Salman et al. 2021).

M. Tariq ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada, saçtırma yöntemini kullanarak oluşturdukları CuO katmanlı ince filmin tavlama işleminden sonra foto algılama performansının arttığını rapor etmişlerdir. Bu çalışmada, CuO ince filmleri DC magnetron saçtırma yöntemiyle silisyum altlık üzerine biriktirilmiştir. Biriktirilen ince filmler 400 °C ve 500 °C’de ikişer saat tavlama işlemi uygulandığı belirtilmiştir. X-ışını kırınım desenleri tavlanan filmlerin kristal kalitelerinin tavlama sıcaklığının artışı ile arttığını göstermiştir. İnce filmler üzerine Al metali kullanılarak IDE kontaklar oluşturularak Al/CuO/Al yapılı MSM fotodedektörü üretildiği bildirilmiştir. Al kontaklı CuO filmin foto algılama performansı, görünür ışığa maruz bırakılarak incelenmiştir. Biriktirilmiş ve tavllanmış filmlerin akım-gerilim (I-V) grafikleri, alüminyumun CuO’ninkinden daha düşük bir iş fonksiyonu nedeniyle, metal ve yarıiletken arasında Schottky kontak özelliği gösterdiğini bildirmişlerdir. Cihazın foto-karanlık akım oranının, filmin tavlamasından sonra önemli ölçüde iyileştiği gözlenmiştir. 500 °C’de tavlanan film için 10 V ön gerilimde maksimum akım kazancı ve hassasiyet değerleri sırasıyla 66% ve 6500% olarak bulunduğu fakat, Al/CuO/Al fotodedektörünün yükselme ve düşme süresinin ise filmin tavlamasından sonra düştüğü rapor edilmiştir (Tariq, Afzal et al. 2021).

CY. Huang ve arkadaşları tarafından yapılan bu çalışmada, önceden ısıtılmış bir öncü filmi ultraviyole (UV) ışıkla ısıtarak bir polietilen tereftalat (PET) altlık üzerinde metal-yarıiletken-metal yapıya sahip bir p-tipi Cu₂O esnek fotodedektör üretilmiştir. Yüksek kaliteli Cu₂O kristalleri, oda sıcaklığında UV ışınması ile uyarılan yük transfer geçişi ile PET altlıklar üzerine biriktirilmiştir. Çözelti ile işlenmiş bir Cu₂O esnek fotodedektörün foto-karanlık akım oranının 1590’lık son derece yüksek bir değer gösterdiği belirtilmiştir. Bu esnek fotodedektörün

nispeten hızlı bir ışık tepkisi (0,2 s) sergilediği ve 500 kez tekrarlanan bükülmeden sonra bile tekrar üretilebilir olduğu ileri sürülmüştür. Çözelti işlemi, geleneksel yüksek sıcaklıkta termal tavlama gerektirmediği ve özellikle esnek elektronik uygulamalar için kullanılanlar olmak üzere diğer çözelti yöntemleriyle işlenmiş MOS yapılı cihazlara uygulanabilir olduğu rapor edilmiştir (Huang, Yuan et al. 2021).

S. Zhong ve arkadaşları, kendi kendine çalışan $\text{Cu}_2\text{O}/\text{ZnO}$ heteroeklemlili fotodedektörlerde foto taşıyıcının üretim ve taşıma davranışını deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada fonksiyonel tabaka kalınlığının, foto taşıyıcı üretimi ve taşınmasını belirlemede önemli bir faktör olduğunu kanıtladığı bildirilmiştir. Fonksiyonel tabaka kalınlığının artmasının, foto taşıyıcı sayısını arttırdığını, buna karşın iç kusurlardaki artışın ise artan foto taşıyıcının taşınmasını engellediğini rapor edilmiştir. Ayrıca fotodedektörün 30 gün hava ortamında kaldıktan sonra fotoakımının yalnızca 3%’lük bir bozulmaya uğradığı, 5,5 ms yükselme süresi, 5,9 ms düşme süresi gibi hızlı bir yanıt hızı sergilediği ve uzun vadeli kararlılık gösterdiği bildirilmiştir (Zhong, Xiong et al. 2022).

Başka bir çalışmada, görünür ışık metal-yarıiletken-metal fotodedektör uygulaması için elektrokimyasal dağlama, darbeli lazer biriktirme ve elektrokimyasal biriktirme teknikleri birleştirilerek gözenekli (PS) silisyum/bakır oksit (CuO) filmi, EY. Salih ve arkadaşları tarafından hazırlanmıştır. PS/ CuO filmleri üzerine Pt kontak elektrotları kullanılarak PS/ CuO fotodedektörü üretilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda tavlama işlemi yapılan fotodedektörlerin fotoakım ve foto duyarlılık değerlerinde önemli bir artış gözlemlendiği bildirilmiştir. T-350 °C’de tavllanmış fotodedektörün elde edilen fotoakım ve foto duyarlılık değerleri ile idealite faktörü ve bariyer yüksekliğinin sırasıyla, 5,6 μA , 36 mA/W, 1,6 ve 0,87 eV olduğu rapor edilmiştir. Bunun yanında optimum fotodedektör (T-350) 800 ms’lik bir yükselme ve düşme tepki hızı göstermiştir. EY. Salih ve arkadaşları bu çalışma sonucunda, fotodedektörün kararlı bir davranış sergilediğini ve üretim tekniğinin optoelektronik tasarım için kolay bir yol sunduğunu ileri sürmüşlerdir (Salih, Bashir et al. 2022).

Bu tez çalışmasında ilk olarak cam altlık ve n-tipi silisyum altlık üzerine fiziksel buhar biriktirme yöntemi olan saçtırma tekniği kullanılarak nano parçacıklı CuO ve Cu_2O ince filmleri üretilmiştir. Üretimi yapılan CuO ince filmlere 300 °C, 350 °C ve 450 °C’de 1’er saat tavlama işlemi uygulandı. Cu_2O ince filmlere ise herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadı. Daha sonra fabrikasyonu yapılan ince filmlerin yapısal morfolojik ve optik karakterizasyonu yapıldı. Karakterizasyonu yapılan ince filmlerden kristal kalitesi en iyi olanlar fotodedektör fabrikasyonu için seçildi. Seçilen CuO ve Cu_2O ince filmlerden bir kısmına 300 °C’de 3 dakika sülfürleme işlemi uygulandı. Daha sonra sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş CuO ve Cu_2O ince

film yüzeylerine, elektriksel ölçüm alabilmek amacıyla, termal buharlaştırma tekniğiyle alüminyum (Al) metali kullanılarak IDE (interdigitated electrode) elektriksel kontaklar, bir maske yardımı ile yapıldı.

Bu tez çalışmasındaki ilk amacımız, fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al yapılı metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörlerin görünür bölgede opto-elektronik özelliklerini incelemek ve CuO ve Cu₂O katmanlarının MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri üzerine etkisini belirlemektir. İkinci amacımız ise, sülfürleme işlemi uygulanan ince filmler kullanılarak fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al yapılı metal-yarıiletken-metal (MSM) fotodedektörlerin görünür bölgede opto-elektronik özelliklerini incelemek ve sülfürlemenin MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri üzerine etkisini belirlemektir.

Bu tez çalışması sayesinde, özellikle güneş hücresi yapılarında aktif soğurucu katman olarak kullanılan, CuO ve Cu₂O katmanlarının fotodedektörün performansını belirlemedeki rolünü MSM fotodedektörler üzerinde göstermiş olduk. Ayrıca, sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O katmanlarına sahip MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri ile sülfürlenmemiş CuO ve Cu₂O katmanlarına sahip MSM fotodedektörlerin opto-elektronik özellikleri karşılaştırmalı bir şekilde verilerek literatüre yeni ve faydalı bir çalışma kazandırılmıştır.

Yarıiletkenler

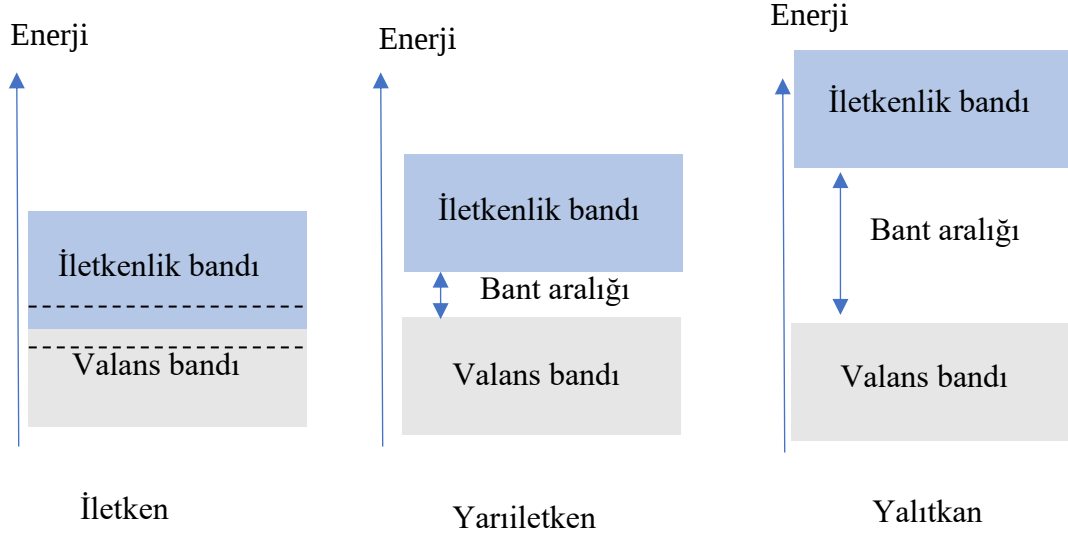
Bohr atom modeline göre, pozitif yüklü çekirdeği saran elektronlar kuantizasyon şartları ile tanımlanmış ve birbirlerinden ayırık olan belirli enerji seviyelerinde (izinli enerji seviyeleri) bulunabilirler. İzole bir atomdaki izinli ayırık enerji seviyeleri, katılarda enerji bantlarına dönüşür ve bu izinli bantlar yasak enerji aralıklarıyla ayrılırlar. Elektronların izinli olduğu bölgeler enerji bantları olarak adlandırılır. Katılar yasak bant aralığının büyüklüğüne göre elektriksel olarak metal (iletken), yarıiletken ve yalıtkan olarak sınıflandırılırlar.

$T = 0 \text{ K}$ 'de son enerji seviyesi elektronlar tarafından doldurulmuş ise buna valans bandı denir. Yine $T = 0 \text{ K}$ 'de ilk enerji seviyesi elektronlar tarafından doldurulmamış banda ise iletkenlik bandı denir. Valans bandı ile iletkenlik bandı arasında kalan bölgeye ise yasak enerji aralığı veya bant aralığı (E_g) denir.

İletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı iç içe geçmiş gibidir ve yasak enerji aralığı yoktur. Bu nedenle mutlak sıfırda en küçük bir uyarılma ile iletkenlerde üst üste binmiş valans ve iletkenlik bandındaki pek çok elektron serbest halde kinetik enerji kazanır.

$T = 0 \text{ K}$ 'de yarıiletkenlerde valans bandı ile iletkenlik bandı arasında bir miktar yasak enerji aralığı bulunur. Valans bandındaki elektronlar uyarıldıklarında ($T > 0$) bir kısmı yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerji kazanabilir ve iletkenlik bandına geçebilirler. Bu durumda yarıiletken iletken haline gelir.

Yalıtkanlarda ise valans bandı ile iletkenlik bandı arasındaki yasak enerji aralığı oldukça büyüktür. Bu yüzden bir yalıtkanın valans bandındaki elektronları iletkenlik bandına geçirebilmek için oldukça yüksek bir enerjiye ihtiyaç vardır. İletkenler, yarıiletkenler ve yalıtkanlara ait enerji bant değişimleri şekil 1.'de gösterilmiştir.



Şekil 1. İletken, yarıiletken ve yalıtkan için enerji bant değişimleri.

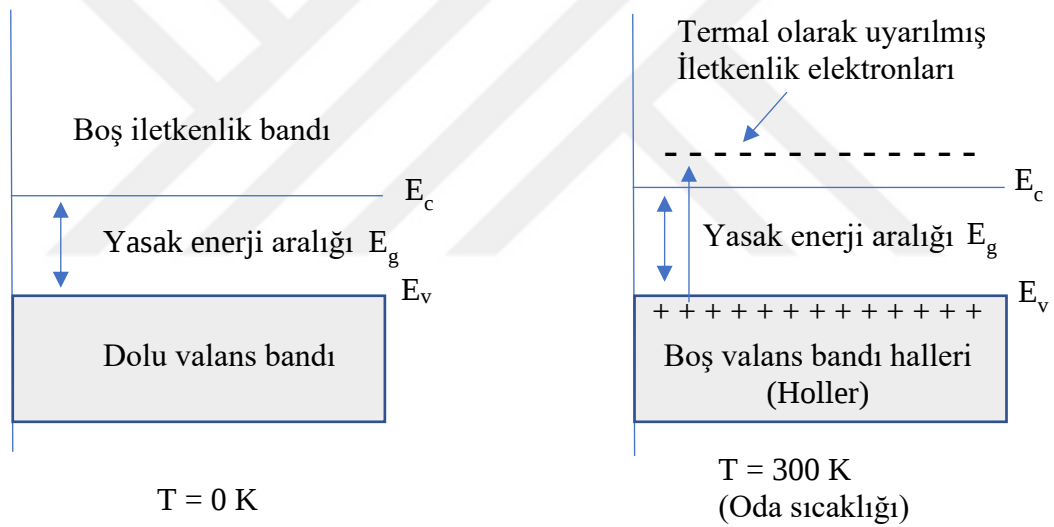
Katkısız Yarıiletkenler

Yarıiletkenler, mutlak sıfır sıcaklığında (0 K) tamamen dolu elektronik haller bandı (valans bandı) ve yine mutlak sıfır sıcaklığında dolu banttan dar bir enerji aralığı (yasak enerji aralığı) ile ayrılmış tamamen boş bir banda (iletkenlik bandı) sahip kristal malzemelerdir. Bir yarıiletkenin bant yapısı şekil 2’de gösterilmiştir. Mutlak sıfırda yarıiletkenler yalıtkan gibi davranır, çünkü iletkenlik bandı tamamen dolu veya tamamen boştur. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda bazı elektronlar, sıcaklığın artmasıyla yasak enerji aralığını aşabilecek kadar enerji kazandıklarında, valans bandından boş olan iletkenlik bandına çıkabilirler. Bu elektronlar yarıiletkenin elektriksel iletkenliğine katkıda bulunurlar. Yasak enerji aralığını aşabilecek kadar enerji kazanan elektronlar valans bandından iletkenlik bandına çıkarken arkalarında pozitif kabul edilen boşluklar (Hol) bırakır. Bu elektronların daha düşük enerji bandı olan valans bandında bıraktıkları holler de elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Sıcaklığın artmasıyla valans bandından iletkenlik bandına geçen elektronların ve dolayısıyla hollerin sayısı artacağından yarıiletkenin iletkenliği de artacaktır. Bu şekilde valans bandındaki hollerin sayısının iletkenlik bandındaki elektronların sayısına eşit olan yarı iletkenlere katkısız yarı iletkenler denir.

Bir elektronun valans bandından iletkenlik bandına termal olarak veya başka bir yolla uyarılması, fiziksel olarak bir örgüdeki kovalent bağ çiftinden bir elektronun uzaklaşması

anlamına gelir. Bu durumda elektron artık serbest elektron olur ve kristal boyunca bir yük taşıyıcısı rolü üstlenir.

Uyarıldığında, yasak enerji aralığını geçebilecek kadar enerjiye sahip olan bir elektron valans bandından iletkenlik bandına geçtiğinde valans bandında pozitif yüklü bir hol bırakır. Hem elektronlar hem de holler kristal yapıda hareket edebilme kabiliyetine sahiptir. Kristal yapı içerisindeki serbest elektronlar kristalden alacağı termal enerji ile kristal içerisinde rastgele hareket edebilir. Benzer olarak bir hol de kristal yapıda hareket edebilir. Çünkü iletkenlik bandına geçen elektronun arkasında bıraktığı boşluğa komşu elektronlardan biri geçebilir. İlk boşluğu dolduran elektron da arkasında bir boşluk (Hol) bırakır. Böylece hol de elektrona göre zıt yönde hareket etmiş olur. Bu hol hareketinin de nedeni kristal örgüdeki termal uyarılmalar olabilir. Bunun yanında, holler ve elektronlar elektrik alana tepki vererek de kristal yapı içerisinde hareket edebilirler ve böylece kristal boyunca makroskobik akım akışı artmış olur.



Şekil 2. Bir yarıiletkenin sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bantlarının şematik gösterimi.

Katkılı Yarıiletkenler

Asal bir yarıiletkenin taşıyıcı konsantrasyonu çok küçüktür ve oda sıcaklığında önemli bir iletkenliği yoktur. Bu tür yarıiletkenlerin iletkenliği, belli miktarda kirlilik atomunun yarıiletkene kontrollü olarak eklenmesiyle değiştirilebilir. Yarıiletkene kontrollü bir şekilde katılan kirlilik atomlarına katkı atomları, bu sürece ise katkılama denir. Katkı atomları elektriksel iletkenliğe ya iletkenlik bandına elektron vererek ya da valans bandından elektron alarak yani holler oluşturarak katkıda bulunurlar. İletkenliğe baskın katkı elektronlardan ise bu

yarıiletken n-tipi yarıiletken, hollerden ise p-tipi yarıiletken adı verilir. n-tipi yarıiletkenlerde çoğunluk taşıyıcı elektronlar, azınlık taşıyıcı ise hollerdir. p-tipi yarıiletkenlerde ise çoğunluk taşıyıcı boşluklar (holler), azınlık taşıyıcı ise elektronlardır.

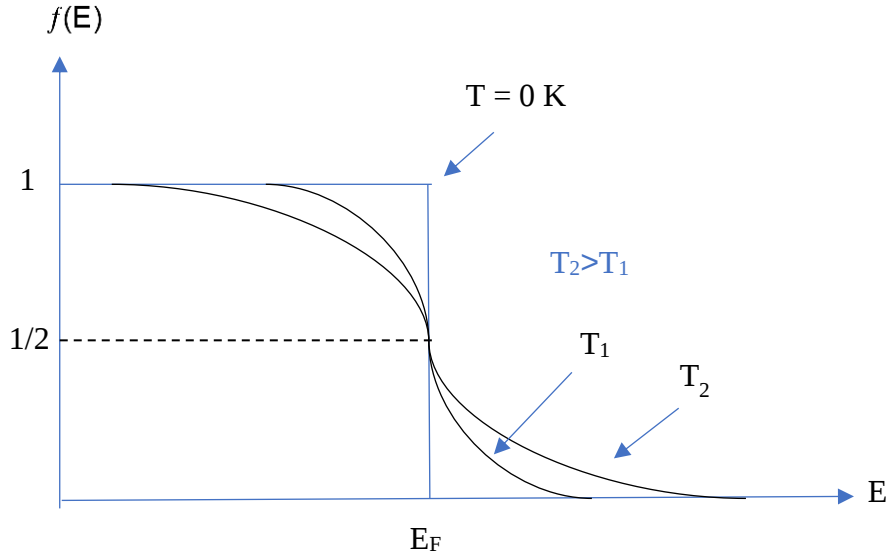
Eğer yarıiletken IV. grup elementi ise, n-tipi katkılı bir yarıiletkeni elde etmek için yarıiletken katılan katkı atomları V. grup elementleridir. Katkı olarak kullanılan V. grup elementi donör (verici) atomu olarak adlandırılır, çünkü yarıiletkende serbest elektron kaynağı olarak davranır. IV. grup elementlerinden oluşmuş bir yarıiletkeni p-tipi yapabilmek için III. Gruptan bir element yarıiletken katılmalıdır. Bu atoma akseptör (alıcı) atomu denir, çünkü yarıiletkenin valans bandından bir elektronu alır ve valans bandında bir boşluk oluşmasını sağlar.

Fermi Enerji Seviyesi

Mutlak sıcaklıkta ($T = 0 \text{ K}$) elektronun bulunabileceği en yüksek enerji seviyesine Fermi enerji seviyesi denir. Fermi enerji seviyesinin üstündeki enerji seviyelerinde elektron bulunmaz. Sıcaklıktaki artış ile dolu enerji seviyelerinden bir üst boş enerji seviyelerine elektron geçişleri olur. Valans bandında veya iletkenlik bandında bulunan elektronların sayısı Fermi-Direc dağılım fonksiyonu ($f(E)$) ile bulunur. Herhangi bir sıcaklıkta enerji seviyelerinin elektronlarla dolu olma olasılığı

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E-E_f)/kT}} \quad (1)$$

İle verilir. Fermi-Dirac dağılım fonksiyonunun enerjiye bağlı değişimi sıcaklığın fonksiyonu olarak şekil 3'te verilmiştir.



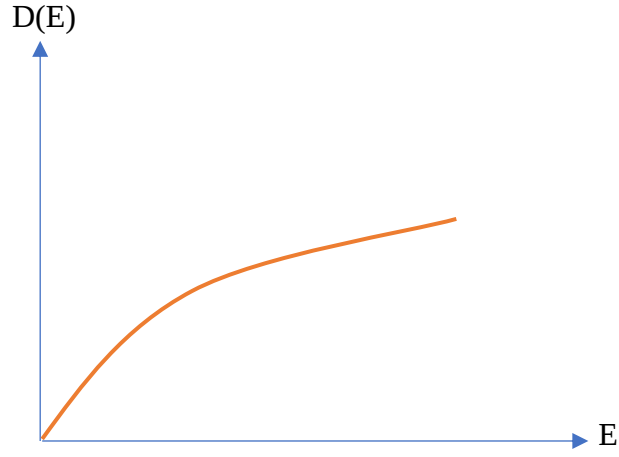
Şekil 3. Fermi dağılım fonksiyonu.

Şekil 3'te görüleceği üzere mutlak sıcaklığın sıfırdan farklı olduğu durumlarda elektronun enerjisi Fermi enerjisinden küçük olduğunda Fermi dağılım fonksiyonu 1'e, elektronun enerjisi Fermi enerjisine eşit olduğunda ise Fermi dağılım fonksiyonu 0,5'e eşittir. Elektronun enerjisi Fermi enerjisinden büyük olduğu durumda ise grafikte de görüldüğü üzere sıcaklığa göre Fermi fonksiyonu parabolik olarak azalıp sıfıra düşmektedir. $T = 0$ K durumunda ise Fermi dağılım fonksiyonunun basamak değerini aldığı görülmektedir.

Durum yoğunluğu $D(E)$, valans bandında ya da iletkenlik bandında bulunan enerji seviyelerinin sayısını ve bu enerji seviyelerinin ne kadarının elektronlarla dolu olduğunu belirlemek için kullanılır. Durum yoğunluğu

$$D(E) = \frac{4\pi}{h^3} (2m_e)^{3/2} \cdot E^{1/2} \quad (2)$$

denklemleriyle verilir.



Şekil 4. Durum yoğunluğu fonksiyonu.

Yarıiletkenlerde Taşıyıcı İletimi ve İletkenlik

Elektronik aygıtlar, katı içerisindeki elektronların ve hollerin taşınımıyla çalışırlar. Bu taşınım ya bir elektrik alanın varlığıyla ya da katı içerisindeki taşıyıcı yoğunluğu farkının etkisiyle gerçekleşir. Bir katıdaki serbest yük taşıyıcılar dış bir elektrik alan altında bir yerden başka bir yere taşınabilir. Aygıt içinde bir kontakten diğer bir kantağa gidebilir. Aygıt içerisinde hareket eden yük taşıyıcıları serbest yük taşıyıcılarıdır. Kristal örgüdeki lokalize yükler denge konumlarına göre çok az yer değiştirirler, dolayısıyla aygıt boyunca hareket etmeleri mümkün değildir. Yarıiletkenlerde hem elektronlar hem de holler önemli rol oynarlar. Diyot, transistör gibi elektronik aygıtlar ve dedektörler, lazer ve fotodiyot gibi optoelektronik aygıtların çalışma mekanizması serbest yük taşıyıcılarının taşınımına bağlıdır. Yarıiletken ve yalıtkanlar için serbest yük taşıyıcılar iletkenlik bandındaki elektronlar ve valans bandındaki hollerdir. Metallerde ise serbest yük taşıyıcılar sadece elektronlardır. Katı cisim içindeki lokalize yükler akıma katkıda bulunamazlar da aygıtların çalışmasında önemli bir rol oynarlar. Lokalize yüklerin denge konumlarına göre yer değiştirmeleri katıların dielektrik özelliklerinden ve ayrıca dedektör gibi aygıtlardaki polarizasyon etkilerinden sorumludur.

Serbest yük taşıyıcılar dış bir elektrik alan uygulanması ya da taşıyıcı yoğunluğu farkı nedeniyle katı içerisinde hareket eder ve iletkenliğe katkıda bulunurlar. Dış bir elektrik alan nedeniyle taşınım sürüklenme akımına, taşıyıcı yoğunluğu farkından kaynaklanan taşınım ise difüzyon akımına katkıda bulunur. Diyot ve transistör gibi aktif aygıtlarda hem difüzyon hem de sürüklenme mekanizmaları rol oynar ve toplam akım, sürüklenme ve difüzyon akımlarının katkılarını içerir.

Taşıyıcı Sürüklenmesi

Sürüklenme Akım Yoğunluğu

Eğer bir v_d ortalama sürüklenme hızı ile hareket eden bir pozitif hacimsel yük yoğunluğu (ρ) varsa, sürüklenme akım yoğunluğu

$$J_{drf} = \rho v_d \quad (3)$$

bağıntısıyla verilir. Eğer hacimsel yük yoğunluğunu pozitif yüklü holler oluşturuyorsa, o zaman

$$J_{p/dr} = (ep)v_{dp} \quad (4)$$

olur. Burada $J_{p/dr}$ hollerden dolayı sürüklenme akım yoğunluğu ve v_{dp} ise hollerin ortalama sürüklenme hızıdır.

Bir elektrik alan varlığında pozitif olarak yüklenmiş bir holün hareket denklemi

$$F = m_p^* a = eE \quad (5)$$

bağıntısıyla verilir. Burada e elektronun yüküdür, a ivme, E elektrik alan ve m_p^* holün etkin kütesidir. Eğer elektrik alan sabit ise hızın zamanla lineer olarak artması beklenir. Bununla birlikte bir yarıiletkendeki yüklü parçacıklar, termal olarak titreşen örgü atomlarıyla ve iyonize olmuş safsızlık atomlarıyla çarpışırlar. Bu çarpışmalar veya saçılma olayları parçacığın hızında değişikliklere neden olur.

Kristalde bulunan hol elektrik alandan dolayı ivmelendiğinden hızı artar. Yüklü parçacık kristal içinde bir atomla çarpıştığı zaman enerjisinin bir kısmını ya da hepsini kaybeder. Bu parçacık yeni bir saçılmaya uğrayıncaya kadar yeniden enerji kazanacak ve ivmelenmeye başlayacaktır. Bu olay tekrar tekrar devam edecektir. Bu olay boyunca parçacık düşük elektrik alanlar için elektrik alanla doğrudan orantılı olan bir ortalama sürüklenme hızı kazanacaktır. Bu nedenle

$$v_{dp} = \mu_p E \quad (6)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada μ_p orantılılık faktörüdür ve hol mobilitesi olarak adlandırılır. Mobilite, bir parçacığın elektrik alan içinde nasıl hareket ettiğini tanımladığından dolayı

yarıiletkenin önemli bir parametresidir. Mobilitenin birimi genellikle $cm^2/V - s$ olarak ifade edilir.

Holler için sürüklenme akım yoğunluğu (4) ve (6) denklemlerini birleştirerek

$$J_{p/dr f} = (eP)v_{dp} = e\mu_p pE \quad (7)$$

şeklinde yazılabilir. Holler için sürüklenme akımı uygulanan elektrik alanla aynı yöndedir.

Holler için yapılan sürüklenme akım yoğunluğu hesaplamalarının aynısı elektronlara da uygulanır. Elektronlar için

$$J_{n/dr f} = \rho v_{dn} = (-en)v_{dn} \quad (8)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada $J_{n/dr f}$ elektronlardan dolayı oluşan sürüklenme akım yoğunluğudur ve v_n elektronların ortalama sürüklenme hızıdır. Elektronların net yük yoğunluğu ise negatiftir.

Hollerde olduğu gibi bir elektronun ortalama sürüklenme hızı da küçük alanlar için alanla doğrudan orantılıdır. Bununla birlikte, elektron negatif yüklü olduğundan, elektronun net hareketi elektrik alan yönüne zıttır. Bu nedenle

$$v_{dn} = -\mu_n E \quad (9)$$

bağıntısı yazılabilir. Burada μ_n elektronun mobilitesidir ve pozitif bir niceliktir. Denklem (9) denklem (8)'de yerine yazılırsa

$$J_{n/dr f} = (-en)(-\mu_n E) = e\mu_n nE \quad (10)$$

bağıntısı elde edilir. Elektronlar için sürüklenme akımı, elektron hareketi zıt yönde olmasına rağmen, uygulanan elektrik alanla aynı yöndedir.

Hem elektronlar hem de holler sürüklenme akımına katkıda bulunduklarından, toplam sürüklenme akım yoğunluğu her bir elektron ve hol sürüklenme akım yoğunluklarının toplamıdır ve bunun için

$$J_{dr f} = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (11)$$

bağıntısı yazılabilir.

Mobilite Etkileri

Bir üst kesimde mobilitenin, elektrik alandaki bir taşıyıcının ortalama sürüklenme hızıyla ilgili olduğu belirtilmişti. Elektron ve hol mobiliteleri, denklem (11)'den de görüldüğü gibi, taşıyıcı sürüklenme karakterizasyonunda önemli yarıiletken parametreleridir.

Denklem (5) elektrik alan kuvvetinden dolayı bir holün kazandığı ivmeyle ilgilidir. Bu denklem

$$F = m_p^* \frac{dv}{dt} = eE \quad (12)$$

şeklinde yazılabilir. Burada v elektrik alandan dolayı parçacığın kazandığı hızdır ve rastgele termal hızı içermez. Eğer etkin kütle ile elektrik alanın sabit olduğu kabul edilirse, o zaman denklem (12)'nin integrali alınarak

$$v = \frac{eEt}{m_p^*} \quad (13)$$

bağıntısı elde edilir. Burada başlangıç sürüklenme hızının sıfır olduğu kabul edilmiştir.

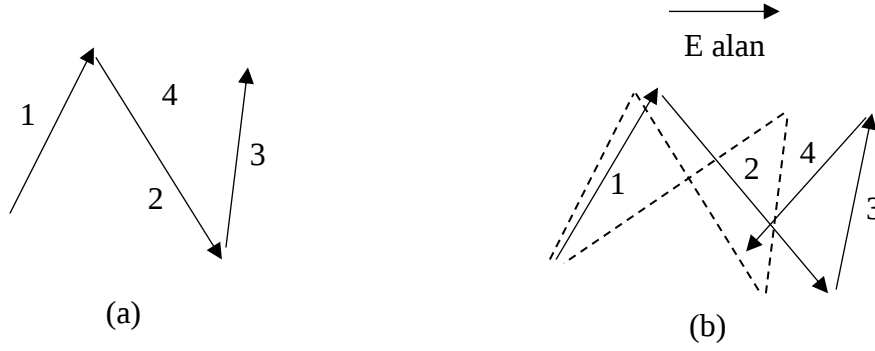
Şekil 5a, sıfır elektrik alanlı bir yarıiletkendeki holün mobilitelerinin ve rastgele termal hızının şematik modelinin göstermektedir. Çarpışmalar arasındaki ortalama zaman τ_{cp} ile gösterilebilir. Şekil 5b'de gösterildiği gibi küçük bir E elektrik alanı uygulanırsa, E alanının yönünde net bir hol sürüklenmesi olacaktır ve net sürüklenme hızında, rastgele termal hız üzerinde küçük bir bozulma olacaktır. Böylece çarpışmalar arası zaman önemli ölçüde değişmeyecektir. Eğer denklem (12)'de t zamanı yerine çarpışmalar arası ortalama zaman olan τ_{cp} kullanılırsa, o zaman bir çarpışmadan ya da saçılmadan hemen önceki ortalama pik hızı

$$v_{d/pik} = \left(\frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} \right) E \quad (14)$$

olarak yazılır. Ortalama sürüklenme hızı pik değerinin yarısıdır ve bu nedenle ortalama sürüklenme hızı için

$$\langle v_d \rangle = \frac{1}{2} \left(\frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} \right) E \quad (15)$$

bağıntısı yazılabilir.



Şekil 5. Bir yarıiletkendeki holün tipik rastgele davranışı, (a) elektrik alansız, (b) elektrik alanın varlığında.

Bunun yanında, çarpışma olayı bu modeldeki kadar basit olmayıp, istatistiksel tabiattadır. İstatistiksel dağılımın etkisini içeren daha doğru bir modelde denklem (15)'deki $1/2$ faktörü görünmez. Bu nedenle hol mobilitesi

$$\mu_p = \frac{v_{dp}}{E} = \frac{e\tau_{cp}}{m_p^*} \quad (16)$$

bağıntısıyla verilir. Aynı analiz elektronlar için de yapılır ve elektron mobilitesi

$$\mu_e = \frac{e\tau_{cn}}{m_n^*} \quad (17)$$

şeklinde yazılabilir. Burada τ_{cn} bir elektron için çarpışmalar arası ortalama zamandır.

Bir yarıiletken baskın olan veya taşıyıcı mobilitelerini etkileyen iki çarpışma veya saçılma mekanizması vardır. Bunlar fonon veya örgü saçılması ve iyonize olmuş safsızlık saçılmasıdır.

Bir yarıiletken kristaldeki atomlar, mutlak sıfırın üzerindeki sıcaklıklarda belirli bir termal enerjiye sahiptirler. Bu enerji nedeniyle kristal içinde örgü atomları örgü pozisyonu civarında rastgele titreşim hareketi yaparlar. Örgü titreşimleri kristalin mükemmel periyodik potansiyel fonksiyonunda bir bozulmaya sebep olur. Bir kristaldeki mükemmel periyodik potansiyel elektronların kristal boyunca engellenmeden veya saçılmaya uğramadan hareket etmesine müsaade eder. Fakat termal titreşimler, örgü atomlarının titreşmesine veya elektronlar ve holler arasında bir etkileşmeye neden olan potansiyel fonksiyonunun bozulmasına sebep olur. Bu örgü saçılması, fonon saçılması olarak da adlandırılır.

Örgü saçılması atomların termal hareketleriyle ilgili olduğundan, meydana gelen saçılma hızı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Eğer sadece örgü saçılmasının mevcut olduğu durumda gözlenen mobilite μ_L olarak gösterilirse, bu durumda saçılma teorisi

$$\mu_L \propto T^{-3/2} \quad (18)$$

olduğunu ifade eder.

Bu ifadeye göre sıcaklık azaldığında, bir saçılma olayının olma ihtimalinin de azalacağını ima eden örgü titreşimlerinin azalması ve bu nedenle mobilitenin artması beklenir.

Taşıyıcı mobilitelerini etkileyen ikinci etkileşim mekanizması iyonize olmuş safsızlık (kirlilik) saçılması olarak adlandırılır. Yarıiletkenlere ilave edilen safsızlık atomları yarıiletkenin karakteristik özelliklerini değiştirir veya kontrol eder. Bu safsızlıklar oda sıcaklığında iyonize olurlar ve böylece iyonize olmuş safsızlıklarla elektronlar veya holler arasında bir Coulomb etkileşmesi oluşur. Bu Coulomb etkileşme saçılmalara veya çarpışmalara yol açarak yük taşıyıcısının hız karakteristiklerini de değiştirir. Sadece iyonize olmuş safsızlık saçılmasının mevcut olduğu durumdaki mobilite μ_I ile gösterilirse, o zaman

$$\mu_I \propto \frac{T^{3/2}}{N_I} \quad (19)$$

denklemini yazılabilir. Burada $N_I = N_d^+ + N_a^-$ yarıiletkendeki toplam iyonize olmuş safsızlık konsantrasyonudur. Eğer sıcaklık artarsa, iyonize olmuş safsızlık merkezinin etrafında taşıyıcının geçirdiği zaman azaldığından, bir taşıyıcının rastgele termal hızı artar. Bir Coulomb kuvveti civarında daha az zaman harcandığında, saçılma etkisinin daha küçük ve μ_I 'nin değerinin daha büyük olması beklenir. Eğer iyonize olmuş safsızlık merkezlerinin sayısı artarsa, o zaman bir taşıyıcının iyonize olmuş bir safsızlık merkeziyle karşılaşma ihtimali artar ve bu da μ_I 'nin daha küçük bir değere sahip olmasını gerektirir.

İletkenlik

Denklem (11)'le verilen sürüklenme akım yoğunluğu

$$J_{arf} = e(\mu_n n + \mu_p p)E = \sigma E \quad (20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada σ yarıiletkenin iletkenliğidir. İletkenlik $(\Omega cm)^{-1}$ biriminde verilir ve mobilite, elektron ve hol konsantrasyonlarının bir fonksiyonudur. Mobilitenin safsızlık

konsantrasyonlarının fonksiyonu olduğu bir önceki kısımda gösterilmişti. Bu nedenle iletkenlik de safsızlık konsantrasyonunun karmaşık bir fonksiyonudur.

İletkenliğin tersi özdirençtir, ρ ile gösterilir ve Ωcm birimindedir. Özdirenç denklemi

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (21)$$

şeklinde yazılabilir.

Eğer yarıiletken malzeme bir çubuk şeklinde ise, bir voltaj uygulandığında I akımı oluşur ve o zaman

$$J = \frac{I}{A} \quad (22)$$

ve

$$E = \frac{V}{L} \quad (23)$$

yazılabilir.

Şimdi (20) denklemi yeniden

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{L} \right) \quad (24)$$

olarak veya

$$V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (25)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (25) bir yarıiletken için Ohm kanunudur. Direnç, yarıiletkenin geometrisi yanı sıra özdirencin veya iletkenliğin bir fonksiyonudur.

Eğer elektron ve hol mobiliteleri aynı büyüklükte olan bir p-tipi yarıiletken göz önüne alınacak olursa, bu durumda iletkenlik aşağıdaki ifadeyle verilir;

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \approx e\mu_p p \quad (26)$$

Eğer aynı şartlarda bir n-tipi yarıiletken göz önüne alınacak olursa, bu durumda iletkenlik

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p) \approx e\mu_n n \quad (27)$$

şeklinde ifade edilir.

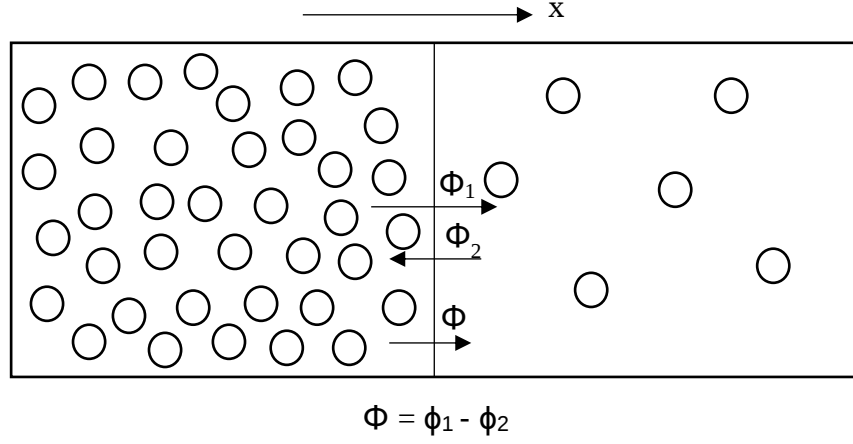
Bir asal yarıiletken için ise iletkenlik

$$\sigma_i = e(\mu_n + \mu_p)n_i \quad (28)$$

şeklinde yazılabilir. Elektron ve hollerin konsantrasyonu bir asal yarıiletkende eşittir. Bu nedenle asal iletkenlik hem elektron hem de hol mobilitelerini içerir. Genelde, elektron ve hol mobiliteleri eşit olmadığından, asal iletkenlik verilen bir sıcaklıkta minimum değerde olamaz.

Taşıyıcı Difüzyonu

Su dolu bir kabın içerisine bir damla mürekkep damlatıldığında, mürekkep zamanla su yüzeyinin her yerine yayılır ve yavaş yavaş daha geniş bir hacmi kaplar. Mürekkep molekülleri su içine yayılmıştır, yani difüzyon süreci gerçekleşmiştir. Difüzyon, parçacıkların yüksek konsantrasyonlu bölgeden düşük konsantrasyonlu bölgeye doğru akması işlemidir. Difüzyon sürecinde moleküllerin hareketleri, kinetik enerjileri nedeniyle rastgeledir. Şekil 6'daki gibi moleküler yoğunluğu $n(x)$ olan bir gazın kapladığı hacim içinde bir ara yüzey düşünelim ve bu yüzeyin bir tarafındaki yoğunluk diğer tarafından düşük olsun. Diğer bir ifadeyle bir yüzeyden diğer yüzeye doğru ilerlerken yoğunluk gradyenti ($dn(x)/dx$) olsun. Yüzeyin sol tarafında sağ tarafındakinden daha fazla molekül olduğundan ve hareketleri de rastgele olduğundan birim zamanda sol taraftan sağ tarafa daha fazla molekül geçecektir. Bu nedenle bu ara yüzeyin sol tarafından sağ tarafına net bir molekül akışı olacaktır. Buraya kadar kavramsal olarak söz edilenler Fick Yasası'nın kapsamını oluşturur. Gaz molekülleri için difüzyon akımı yalnızca parçacık akımıdır. Elektron gazı dikkate alındığında ise bu parçacık akımına eşlik eden yük akımı olacaktır.



Şekil 6. Moleküler yoğunluğun fazla olan taraftan az olan tarafa doğru parçacık akısı.

Fick Yasası

Şekil 6'daki ara yüzeyin birim zamanda birim alanından x doğrultusundaki net parçacık akısı ϕ olsun. Fick Yasası'na göre

$$\phi = -D \frac{dn(x)}{dx} \quad (29)$$

olur. Burada D difüzyon katsayısı olup, birimi cm^2/s 'dir.

Denklem 29'daki eksi işareti difüzyon akımının yoğunluk gradyentinin pozitif olduğu doğrultuya zıt doğrultuda aktığını gösterir. Yani hareketin yönü çok yoğunluktan az yoğunluğa doğrudur. Difüzyon akımı, parçacık yoğunluğu $n(x)$ 'ten ziyade yoğunluk gradyenti $dn(x)/dx$ ile ilişkilidir.

Difüzyon Akım Yoğunluğu

Denklem (29) akımın yani $+x$ doğrultusundaki difüzyon parçacık akım yoğunluğunun bir ifadesidir. Elektron ve holler difüzyon sürecine maruz kalan gaz molekülleri gibi düşünülebilir. Serbest elektron ya da hol yoğunluğu konuma göre değiştiği durumda, parçacık akımı $+x$ doğrultusundaki difüzyon akım yoğunluğunu ifade etmek için kullanılır.

$$J_n(dif) = -e\phi_n = eD_n \frac{dn}{dx} \quad (30)$$

$$J_p(dif) = e\phi_p = -eD_p \frac{dp}{dx} \quad (31)$$

n ve p sırasıyla elektron ve hol yoğunluğu, D_n ve D_p sırasıyla elektron ve holün difüzyon katsayılarıdır.

Difüzyon katsayıları da mobilité gibi malzemeye özgüdür ve taşıyıcı tipine göre farklılık gösterir. Difüzyon akımın yoğunluğu denklem (30) ve (31)'den görüldüğü gibi taşıyıcı yoğunluğu gradyentine (dn/dx) bağılı iken, sürüklenme akım yoğunluğu taşıyıcı yoğunluğu n ile belirlenir (Denklem (11)).

Hem elektronların hem de hollerin olduğu durumda, difüzyon ve sürüklenme akım yoğunluklarının belirlenmesi için her bir taşıyıcıya ait yoğunluklar ve konuma bağılı taşıyıcı yoğunluğu bilinmelidir. Şimdiye dek difüzyon akım yoğunluğunu belirlerken tek bir doğrultuda difüzyonun gerçekleştiği kabul edildi. Bu tamamen gerçek dışı bir varsayım değildir, çünkü gerçek yarıiletken aygıtlarda yalnızca tek doğrultudaki akım ile ilgilenilir.

Toplam Akım Yoğunluğu

Bir yarıiletkende dört mümkün bağımsız akım mekanizması vardır. Bunlar, elektron sürüklenme ve difüzyon akımları ile hol sürüklenme ve difüzyon akımlarıdır. Toplam akım yoğunluğu bu dört bileşenin toplamıdır ve

$$J_{toplam} = J_{sürüklenme} + J_{difüzyon} \quad (32)$$

olarak ifade edilir. Sürüklenme ve difüzyon akım yoğunlukları denklem (32)'de yerlerine yazılacak olursa

$$J_{toplam} = en\mu_n E + ep\mu_p E + eD_n \frac{dn}{dx} - eD_p \frac{dp}{dx} \quad (33)$$

elde edilir.

Denklem (33) toplam akım yoğunluğunun en genel ifadesidir ve şartlara bağılı olarak özelleştirilebilir. Örneğin yalnızca elektrik alan uygulanırsa sürüklenmeyle ilgili terimler akım yoğunluğuna katkıda bulunur. Difüzyon süreci ile ilgili terimler ise elektrik alanın varlığından bağımsızdır ve difüzyon akım yoğunlukları bir taşıyıcı yoğunluğu gradyenti olduğunda akım yoğunluğuna katkıda bulunacaktır.

Aktivasyon Enerjisi

Kimyasal bağlanmalarda reaksiyon, atomların değerlik elektronlarının alınıp verilmesiyle oluşur. Kimyasal bağlanma reaksiyonunun gerçekleşebilmesi için, reaksiyonu sağlayacak yeterli en küçük enerji miktarına aktivasyon enerjisi denir ve E_a ile gösterilir.

İletkenlik ve aktivasyon enerjisi arasındaki ilişki denklem (34) ile verilir.

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-E_a/kT) \quad (34)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve σ_0 ise polikristal bir katı için, D kristalite boyutu ve N serbest taşıyıcı yoğunluğu olmak üzere

$$\sigma_0 = Dq^2N\left(\frac{1}{2}\pi m^*kT\right)^{-1/2} \quad (35)$$

denklemini ile verilir.

Heteroeklemler

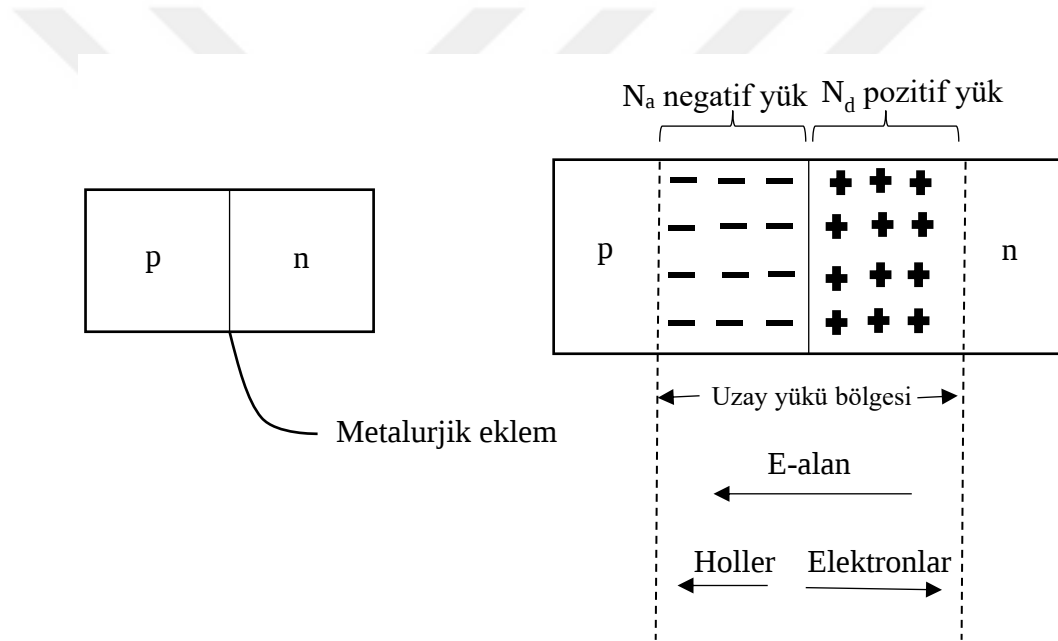
p-n Eklemi

Bir p-n eklemi, p-tipi bir yarıiletken ile n-tipi bir yarıiletkenin kontak haline getirilmesi ile oluşturulur. Burada eğer kontak haline getirilen p-tipi ve n-tipi materyaller aynı tür yarıiletkenden oluşuyorsa eklem homoeklem, farklı tür yarıiletkenden oluşuyorsa heteroeklem adını alır. Bir heteroeklem yapmak için farklı enerji band aralıklarına sahip iki materyal kullanıldığı için, enerji bandı eklem arayüzeyinde bir süreksizliğe sahip olacaktır. Dar band aralıklı materyalden geniş band aralıklı materyale yarıiletkenin ani olarak değiştiği ani bir eklem meydana gelir.

Faydalı bir heteroekleme sahip olmak için, iki materyalin örgü sabitleri arasında örgü uyumsuzluğu olmamalıdır. Herhangi bir örgü uyumsuzluğu arayüzey halleri ile sonuçlanan dislokasyonlar oluşturduğundan dolayı örgü uyumu önemlidir.

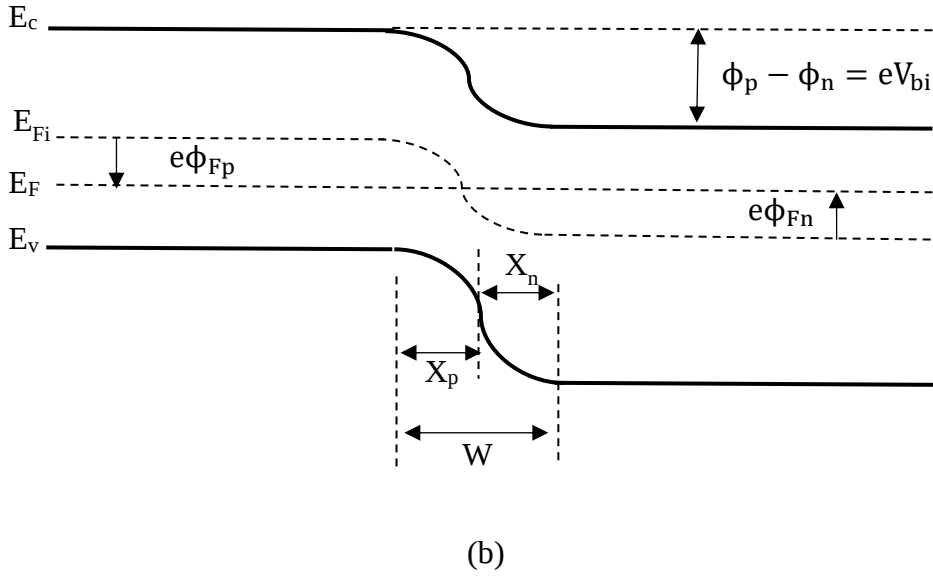
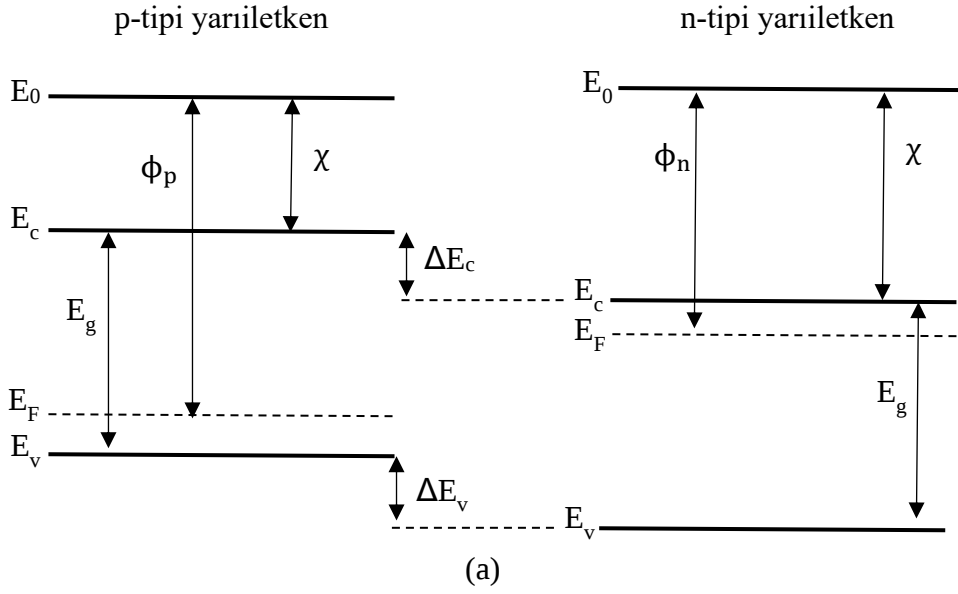
Elektron ve hol yoğunlukları farklı olan bu iki materyal kontak haline getirildiğinde, metalürjik eklemde hem elektron hem de hol konsantrasyonlarında çok büyük bir yoğunluk gradyenti olduğundan, n-bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan elektronlar p-bölgesine ve p-bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı olan holler de n-bölgesine difüze olmaya başlayacaklardır. Eğer yarıiletkene harici bir bağlantının olmadığı düşünülürse o zaman bu difüzyon işlemi sonsuza

kadar devam etmez. n-bölgesinden elektronlar difüze olduğu için geride pozitif olarak yüklenmiş donör atomları kalır. Benzer olarak, p-bölgesinden holler difüze olduğu için geride negatif olarak yüklenmiş akseptör atomları bırakırlar. n ve p-tipi bölgelerdeki net pozitif ve negatif yükler metalurjik ekleme yakın bölgede bir elektrik alan oluştururlar. Bu alanın yönü pozitif yükten negatif yüke doğrudur veya n-bölgesinden p-bölgesine doğrudur. Bu bölgelerdeki net pozitif ve negatif yük, şekil 7’de gösterilmiştir. Bu iki bölge uzay yükü bölgesi olarak adlandırılır. Oluşan dahili elektrik alan nedeniyle n-tipi yarıiletken p-tipi yarıiletken elektron geçişi ve buna zıt yönde de hol geçişi meydana gelir. Bu yük geçişi materyallerin Fermi enerji seviyeleri aynı hizaya gelene kadar sürer. Esasında bütün elektronlar ve holler elektrik alanın etkisiyle uzay yükü bölgesinin dışına çıkarlar. Uzay yükü bölgesinde hareketli yük tükendiğinden dolayı bu bölge tükenim bölgesi olarak da adlandırılır.



Şekil 7. Metalurjik ekleme, uzay yükü bölgesi, elektrik alan ve yüklü taşıyıcılar.

Heteroeklemlerde yasak enerji aralıkları, iş fonksiyonları ve elektron ilgileri farklıdır. Bir yarıiletkenin iş fonksiyonu, bir elektronu yerleştiği E_F Fermi seviyesinden uzaklaştırmak için gerekli enerji olarak tanımlanır. İş fonksiyonları farklı p-tipi ve n-tipi yarıiletkenlerin kontakta önceki ve kontak halindeki enerji band diyagramları şekil 8’de gösterilmiştir. Şekil 8’de görüldüğü üzere p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyüktür.



Şekil 8. p-n heteroeklemde p ve n-tipi yarıiletkenlerin (a) kontakta önceki ve (b) kontakta sonraki bant yapısı.

Burada E_0 vakum seviyesi, ϕ_p , p-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu, V_{bi} yerleşik (built-in) potansiyel engeli, ϕ_n , n-tipi yarıiletkenin iş fonksiyonu, E_g yasak enerji aralığı, E_F Fermi enerji seviyesi, E_c iletkenlik bandının minimumu, E_v valans bandının maksimumu, ΔE_c iletkenlik

bandı süreksizliği, ΔE_v valans bandı süreksizliği, W deplasyon (tükenim) bölgesi genişliği ve χ yarıiletkenin elektron ilgisini ifade etmektedir.

Dengede p-n Eklemi

pn eklemine voltaj uygulanmadığını farz edersek, bu durumda eklem termal dengede olur ve Fermi seviyesi bütün sistem boyunca sabit olur. Termal dengedeki pn eklem için enerji-bant diyagramı şekil 8.b’de görülmektedir. İletkenlik ve valans bantlarının göreceli konumları p ve n-bölgeleri arasındaki Fermi enerji değişimleri ile ilgili olduğundan, iletkenlik ve valans bant enerjileri uzay yükü bölgesi boyunca bükülmelidir. n-bölgesinin iletkenlik bandındaki elektronlar p-bölgesinin iletkenlik bandı içerisine yerleşmeye çalıştığında bir potansiyel engeli görür. Bu potansiyel engeli yerleşik potansiyel engeli olarak adlandırılır ve V_{bi} ile gösterilir.

Yerleşik potansiyel engeli n-bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı elektronları ile p-bölgesindeki azınlık taşıyıcı elektronları arasındaki dengeyi ve yine p-bölgesindeki çoğunluk taşıyıcı holleri ile n-bölgesindeki azınlık taşıyıcı holleri arasındaki dengeyi sağlar. Eklem üzerindeki bu potansiyel farkı, yarıiletken ve probler arasında yeni potansiyel engelleri oluşacağından dolayı değiştirir. V_{bi} potansiyeli dengeyi koruduğundan, bu voltajla akım üretilmez.

Asal Fermi seviyesi eklem boyunca iletkenlik bant kenarından eşit uzaklıktadır. Bu yüzden yerleşik potansiyel engeli, p ve n-bölgesindeki asal Fermi seviyeleri arasındaki fark olarak tarif edilebilir. Şekil 8.b’de gösterildiği gibi ϕ_{Fn} ve ϕ_{Fp} potansiyelleri belirlenerek;

$$V_{bi} = |\phi_{Fn}| + |\phi_{Fp}| \quad (36)$$

denklemi yazılabilir. n-bölgesinde iletkenlik bandındaki elektron konsantrasyonu

$$n_0 = N_c \exp \left[\frac{-(E_c - E_F)}{kT} \right] \quad (37)$$

bağıntısıyla verilir. Bu denklem şu şekilde de yazılabilir;

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{(E_F - E_{Fi})}{kT} \right] \quad (38)$$

burada n_i asal taşıyıcı konsantrasyonu ve E_{Fi} asal Fermi enerjisidir. n-bölgesindeki ϕ_{Fn} potansiyeli

$$e\phi_{Fn} = E_{Fi} - E_F \quad (39)$$

olarak tarif edilirse denklem (38)

$$n_0 = n_i \exp \left[\frac{-(e\phi_{Fn})}{kT} \right] \quad (40)$$

şeklinde yazılabilir. Denklem (40)'ın her iki tarafının tabii logaritması alınıp n_0 yerine N_d yazılarak ve potansiyel bu denklemden çekilirse

$$\phi_{Fn} = \frac{-kT}{e} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right) \quad (41)$$

bağıntısı elde edilir. Benzer şekilde p-bölgesindeki hol konsantrasyonu;

$$p_0 = N_a = n_i \exp \left[\frac{E_{Fi} - E_F}{kT} \right] \quad (42)$$

bağıntısıyla verilir. Burada N_a akseptör konsantrasyonudur. p-bölgesindeki ϕ_{Fp} potansiyeli

$$e\phi_{Fp} = E_{Fi} - E_F \quad (43)$$

olarak tarif edilir. Denklem (42) ve (43) birleştirilerek

$$\phi_{Fp} = + \frac{kT}{e} \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right) \quad (44)$$

denklemini elde edilir. Sonuç olarak pn eklem için yerleşik potansiyel engeli denklem (41) ve (44)'ün denklem (36)'da yerine konulması ile

$$V_{bi} = \frac{kt}{e} \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) = V_t \ln \left(\frac{N_a N_d}{n_i^2} \right) \quad (45)$$

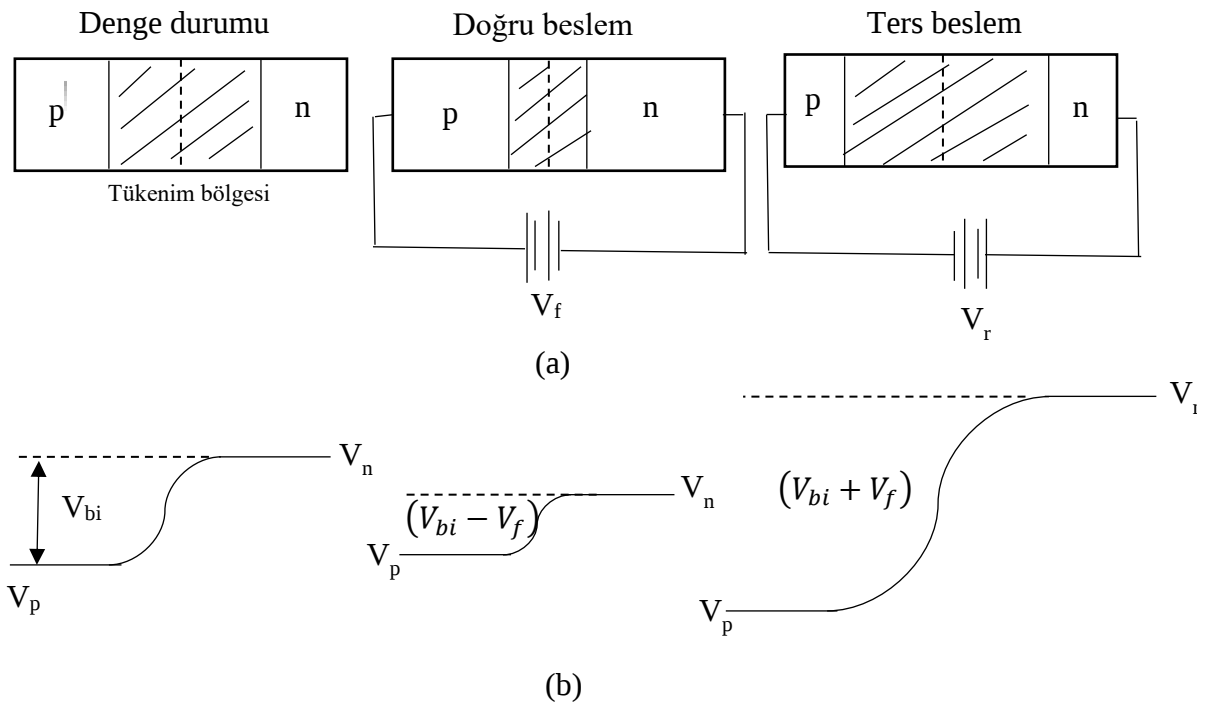
şeklinde elde edilir. Burada $V_t = kT/e$ 'dir ve termal voltaj olarak tarif edilir.

Elektrik Alan Altında p-n Eklemi

Herhangi bir dış elektrik alan uygulanmadığında bile p-n eklemde sürüklenme ve difüzyon akımları vardır, ancak net akım sıfırdır. Bir dış elektrik alan varlığında ise sürüklenme ve difüzyon akımları arasındaki denge bozulur ve p-n eklem diyotundan net bir akım geçmeye

başlar. Dış elektrik alan altında p-n diyotu artık dengede olmadığından Fermi seviyesi p- tarafından n- tarafına eşit değildir.

p-n diyotunun çalışmasında temel prensip diyota uygulanan alanın elektronlar ya da holler tarafından görülen yerleşik potansiyel engeli alçaltıp yükseltmesiyle ilgilidir. Şekil 9’da doğru ve ters beslem durumunda kontak potansiyelinin değişimi gösterilmiştir. Diyota doğru beslem (V_f) uygulandığında, p- tarafı n- tarafına göre pozitif potansiyeldeyken, ters beslem (V_r) uygulandığında p- tarafı n- tarafına göre negatif potansiyelde olacaktır.



Şekil 9. p-n diyotun (a) tükenim bölgesinin dengede, doğru beslemde, ters beslemde durumları, (b) enerji bant profilleri.

Dengedeki p-n diyotuna doğru beslem uygulandığında eklemdeki maksimum elektrik alan azalır, tükenim bölgesi daralır ve kontak potansiyeli uygulanan voltaj kadar azalır. Tükenim bölgesi dışındaki nötr bölgeler tükenim bölgesinden çok daha yüksek iletkenliğe sahip olduğundan, uygulanan voltajın hemen hepsi tükenim bölgesine düşer ve bu nedenle kontak potansiyeli, dolayısıyla termal dengede difüzyon sürecini engelleyen iç elektrik alan azalır. Böylece holler eklemde n- tarafına, elektronlar ise eklemde p- tarafına ilerleyebilir.

Ters beslemde ise kontak potansiyeli, uygulanan voltaj kadar artar, elektrik alan ve tükenim bölgesi genişliği de artar. Voltaj kaynağının negatif kutbu hollerin tükenim bölgesi

civarından uzaklaşıp, p-tipi nötr bölgeye doğru sürüklenmesine neden olur. Bu nedenle tükenim bölgesinde daha fazla iyonize akseptör atomu olur ve tükenim bölgesi genişler. Benzer şekilde pozitif kutup da elektronların tükenim bölgesi civarından uzağa sürüklenmesini sağlar, geride daha fazla iyonize donör atomu kalır. n-bölgesine doğru hareket eden elektronlar voltaj kaynağının pozitif kutbundan sağlanamaz, çünkü n- tarafında elektron kaynağı yoktur. Benzer durum boşluklar için de geçerlidir.

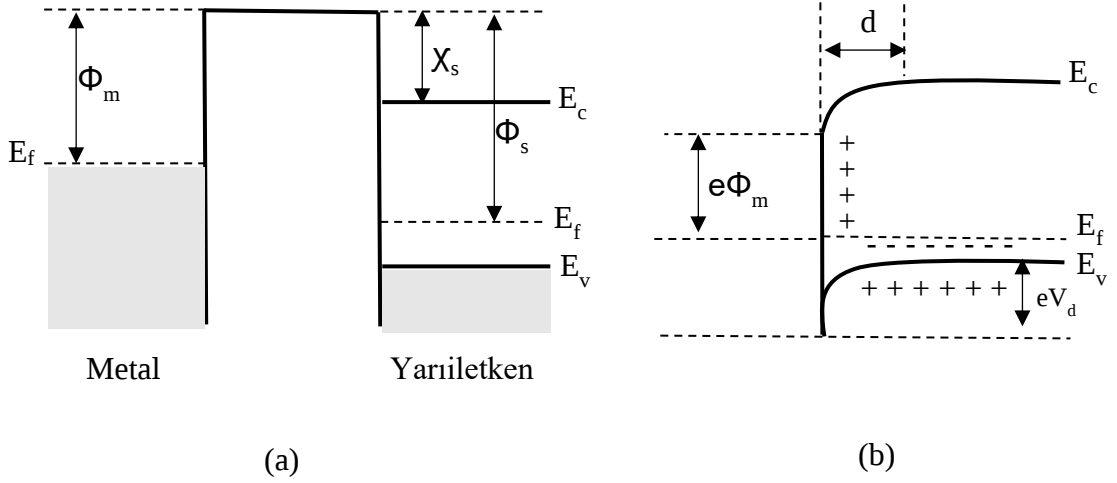
Metal / Yarıiletken Eklemler

Bir metal ile bir yarıiletken bir araya getirildiğinde metal ile yarıiletken arasında iki tip kontak oluşabilir. Birincisi, Schottky kontak olarak adlandırılan kontak ve lineer olmayan doğrultucu akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. İkincisi ise omik kontak olarak adlandırılır ve doğrultucu olmayan lineer akım-gerilim karakteristiğine sahiptir. Metal / n-tipi yarıiletken Schottky kontak veya Metal / n-tipi yarıiletken omik kontak oluşturulabileceği gibi, Metal / p-tipi yarıiletken Schottky kontak veya Metal / p-tipi omik kontak da oluşturulabilir. Bu tez çalışmasında Metal / yarıiletken eklemlerde p-tipi yarıiletken kullanıldığı için burada, Metal / p-tipi yarıiletken Schottky kontak ve Metal / p-tipi omik kontaklar incelenecektir.

Metal / p-tipi yarıiletken Schottky (doğrultucu) Kontak

Bir metal ile bir yarıiletken arasında doğrultucu kontak oluştuğunda bir Schottky kontak veya Schottky diyot oluşur. Kontakın doğrultucu özellikleri p-n eklem özelliklerine benzerdir. Metal-yarıiletken kontak diyotlarda doğrultma olayı 1874 yılında F. Braun tarafından keşfedilmiş ve 1938 yılında Schottky ve Mott tarafından izah edilmiştir.

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise ($\phi_m < \phi_s$), doğrultucu kontak oluşur. Kontakta önce (şekil 10(a)) yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden ($\phi_s - \phi_m$) kadar düşüktür. Kontakta sonra (şekil 10(b)) metalden yarıiletkene Fermi seviyeleri eşitleninceye kadar elektron akışı meydana gelir. Buna bağlı olarak kontakta yarıiletken tarafında negatif yüklü iyonize olmuş akseptörlerle d genişliğinde tükenim bölgesi oluşur.



Şekil 10. Metal / p-tipi yarıiletken doğrultucu eklemede (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant yapısı.

Enerji seviyesi yarıiletken tarafta $(\phi_s - \phi_m)$ kadar yükseldiğinden, yarıiletkendeki holler için potansiyel engeli

$$eV_d = \phi_s - \phi_m \quad (46)$$

olur. Kontakın metal tarafındaki holler için potansiyel engeli ise,

$$e\phi_b = E_s - \phi_m \quad (47)$$

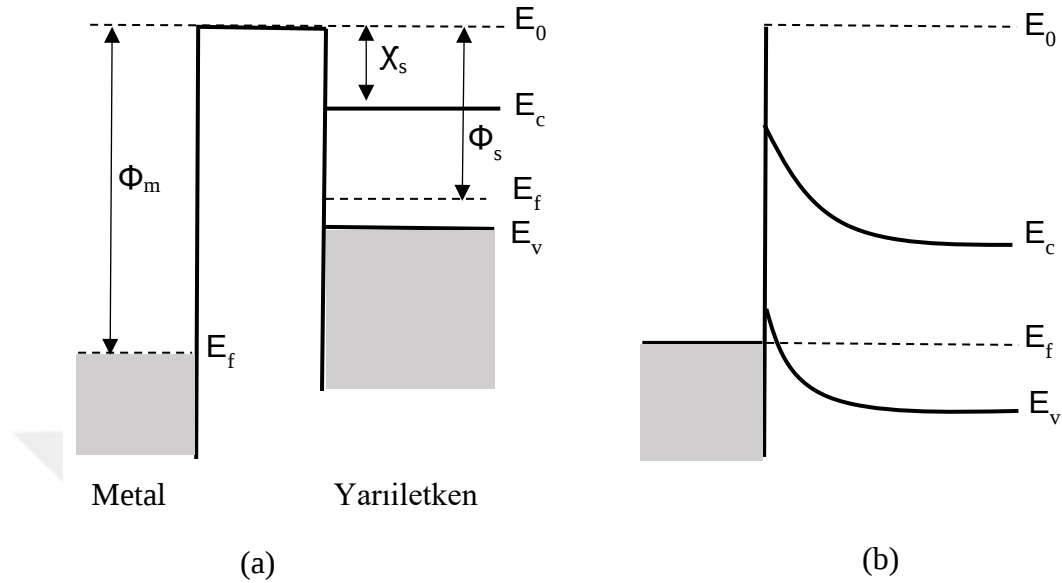
olarak verilir.

Yarıiletken tarafındaki bazı holler, termal uyarılma nedeniyle, kazandıkları enerji ile potansiyel engelini aşıp metalin içine geçerler. Aynı şekilde metal tarafındaki bazı elektronlar da termal uyarılma neticesinde kazandıkları enerjiyle potansiyel engeli aşıp yarıiletken içine geçerler. Böylece engeli geçen eşit ve zıt yönlü I_0 akımları oluşur.

Metal / p-tipi yarıiletken Omik Kontak

Metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyük ise $(\phi_m > \phi_s)$ kontak omiktir. Yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\phi_m - \phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontakta sonra metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelene kadar, yarıiletkenden metale doğru elektron geçişi olur. Fermi seviyeleri denge durumuna ulaştığında,

yarıiletkenin Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar alçalır. Bir Metal / p-tipi yarıiletken omik kontağın, kontakta önceki ve kontakta sonraki enerji bant diyagramı şekil 11.'de gösterilmiştir.

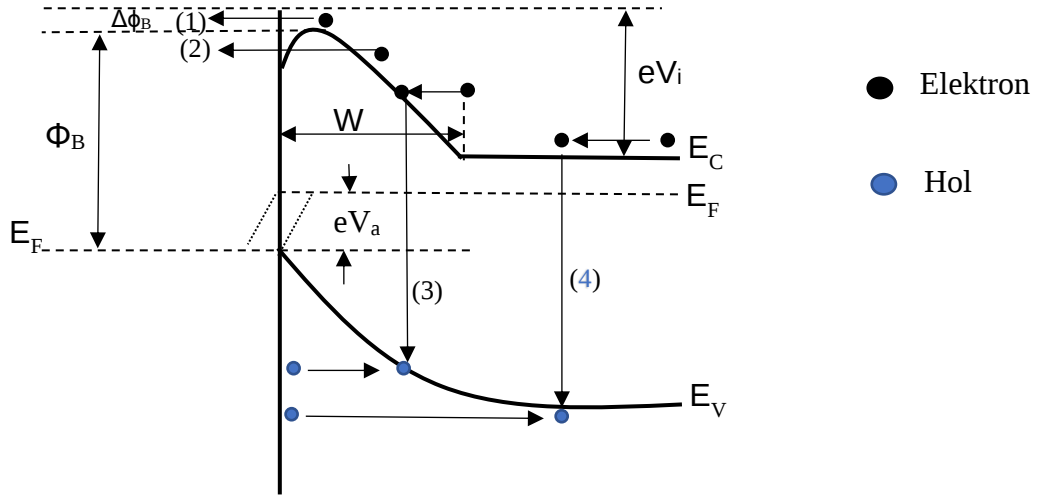


Şekil 11. Metal / p-tipi yarıiletken omik eklemden önce (a) kontakta önce, (b) kontakta sonra enerji bant yapısı.

Yarıiletken tarafındaki elektronlar arkalarında pozitif holler bırakarak metale geçerler. Bu geçişler metal yüzeyinde negatif, yarıiletken yüzeyinde ise pozitif yüzey yükünün oluşmasına neden olur. Böylece yarıiletkendeki Fermi seviyesi $\phi_m - \phi_s$ kadar düşer. Metal tarafı (+), yarıiletken tarafı (-) olacak şekilde bir voltaj uygulanırsa, ters beslem durumunda metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler yarıiletkenin içine doğru kolay bir şekilde hareket edebilirler. Bu şekilde akımı iki yönde de (yarıiletkenden metale ve metalden yarıiletkene) geçiren kontaklar, yani omik kontak oluşur.

Metal / Yarıiletken Doğrultucu (Schottky) Eklemlerde Akım İletim Mekanizmaları

Metal / yarıiletken ve p-n eklemlerde akım iletim mekanizmaları; engel üzerinden termiyonik emisyon, engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme, tükenim bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu (elektron ve holün birleşmesi) veya jenerasyonu (elektron ve hollerin oluşması), azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan, yarıiletkenin nötral (bant bükülmesinin olmadığı) bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu olarak sınıflandırılır. Bu akım iletim mekanizmaları şekil 12'de gösterilmiştir.



Şekil 12. Düz beslem altındaki bir Metal / n-tipi yarıiletken Schottky engelli eklemnin farklı iletim mekanizmalarını gösteren enerji-bant diyagramı. (1) Engel üzerinden termiyonik emisyon, (2) Engelin içinden kuantum mekaniksel tünelleme, (3) Tükenim bölgesi içinde taşıyıcıların rekombinasyonu veya jenerasyonu, (4) Azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna eşit olan yarıiletkenin nötral bölgesinde taşıyıcı rekombinasyonu.

Engel Üzerinden Termiyonik Emisyon ile Akım İletimi

İdeal diyotlarda baskın olan mekanizma şekil 12’de (1) ile gösterilen işlemdir. (2) ile (3) numaralı mekanizmalar ideal olmayan durumları ifade eder. Ekleme ters beslem uygulandığı zaman gösterilen bu işlemlerin ters yönlü olanları gerçekleşir.

Bir elektronun engel üzerinden yarıiletken metal geçişi tükenim bölgesindeki yüksek elektrik alan sayesinde gerçekleşir. Elektronun bu bölgeden karşıya geçişi sürüklenme ve difüzyon işlemleri ile olur. Elektronların metale geçişi metaldeki mevcut hal yoğunlukları ile kontrol edilir. Bu yüzden engel üzerinden emisyon ile tükenim bölgesindeki difüzyon ve sürüklenme işlemleri arka arkaya etkili olurlar ve daha yüksek direnç veren işlem akımı belirler.

Difüzyon teorisi ile termiyonik emisyon mekanizmaları arasındaki fark, tükenim bölgesindeki kuazi-Fermi seviyelerinin konumları ile gösterilmiştir. Difüzyon teorisine göre ekleme düz beslem gerilimi uygulansa bile elektronlar örgü ile dengedirlir. Bu şekilde şekil 12’de noktalı çizgilerle gösterildiği gibi arayüzeyde kuazi-Fermi seviyeleri metalin Fermi seviyesi ile uyumludur. Ancak termiyonik emisyon teorisinde metale geçen elektronlar metalin elektronlarından daha büyük enerjiye sahiptirler ve şekildeki kesikli çizgilerle gösterildiği gibi tükenim bölgesi boyunca Fermi enerji seviyeleri hemen hemen yataydır.

Termiyonik emisyon teorisi tükenim bölgesinde sürüklenme ile difüzyon etkilerini ihmal eder ve kT enerjisi ile karşılaştırıldığında engel yüksekliğinin daha büyük olduğunu

varsayar. Şekil 12'ye bakıldığında sadece kinetik enerjisi potansiyel engel yüksekliğini aşanların engelin tepesine çıkabileceği görülmektedir. Ekleme herhangi bir gerilim uygulanmasa bile metalden yarıiletkeneye veya yarıiletkenden metale az sayıda yük taşıyıcısının geçeceği istatistiki olarak bilinmektedir. Ancak karşılıklı olarak geçen taşıyıcıların sayısı ortalama birbirine eşit olduğu için uygulanan bir gerilim yoksa aygıttan geçen net akım sıfır olur.

Ekleme bir V gerilimi uygulandığı zaman metalden yarıiletkeneye geçmek isteyen elektronların gördüğü engel yüksekliği değişmez. Ancak yarıiletkenden metale doğru geçen akım uygulanan gerilimin polaritesine ve büyüklüğüne göre değişir. Akım (I) ile gerilim arasındaki ilişki

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (48)$$

ile verilir. Burada I_0 gerilim uygulanmadan ($V = 0$) önceki termal etki gibi nedenlerden var olan sızıntı akımı, k Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5} eV/K$) ve T de K cinsinden sıcaklıktır. I_0 akımı

$$I_0 = AA^* T^2 \exp\left(\frac{-e\phi_B}{kT}\right) \quad (49)$$

eşitliği ile verilir. Burada A eklemenin (diyotun) etkin alanı, A^* yarıiletkenin Richardson sabiti olarak bilinir ve

$$A^* = \frac{4\pi e m_n^* k^2}{h^3} \quad (50)$$

eşitliğiyle verilir. Eşitlikteki e elektronik yük, m_n^* elektronun etkin kütlesi ve h Planck sabitidir.

Termiyonik emisyon teorisinin sonucuna göre verilen (49) denklemi yüksek mobiliteli yarıiletkenlerde tükenim bölgesindeki elektron çarpışmaları ihmal edilerek yazılır. Denklem (48) ve (49) birleştirildiğinde akım ile uygulanan gerilim arasındaki eşitliğin genel hali;

$$I = \left[AA^* \exp\left(\frac{-e\phi_B}{kT}\right) \right] \left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right) - 1 \right] \quad (51)$$

olur.

Engel İçinden Kuantum Mekaniksel Tünelleme

Schottky engelli eklemlerde elektronların yarıiletkeniden metale geçişi aynı zamanda kuantum mekaniksel tünelleme ile de mümkün olmaktadır. Kuantum mekaniksel tünelleme olayı daha çok katkı konsantrasyonu yüksek olan yarıiletkenlerle metaller arasında oluşturulan kontaklarda meydana gelir. Çünkü katkı konsantrasyonu arttıkça Fermi seviyesi n-tipi yarıiletkenide iletkenlik bandının tabanına doğru yaklaşır. Katkı konsantrasyonu yarıiletkenin atomlarının konsantrasyonuna yaklaşıncaya Fermi seviyesi iletkenlik bandının içine doğru kaymaya başlar. Bu tür yarıiletkenler dejenere n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Bu tür yarıiletkenlerde difüzyon ve termiyonik emisyon mekanizmalarının yanı sıra elektronlar engelin dar olduğu kısımlarda kuantum mekaniksel tünelleme ile engelin içinden geçebilirler. Tükenim bölgesinin genişliği katkı konsantrasyonu ile ters orantılı olduğu için yüksek katkı durumunda enerjisi Fermi enerjisi civarında olan elektronlar bu bölgede engeli delemiş gibi tünelleme yolu ile yarıiletkeniden metale geçerler. Bu işlem alan emisyonu (FE) olarak bilinir. Burada alan ile kastedilen eklem bölgesindeki elektrik alanıdır. Bu olay özellikle yüksek katkı durumunda ve düşük sıcaklıklarda gerçekleşir. Daha yüksek sıcaklıklarda Fermi enerjisinden daha büyük bir enerjiye sahip olan elektronlar engelin tepesine doğru, daha dar engelli bir bölge ile karşılaşabilirler. Ama enerjileri engeli aşmaya yetmediğinden bu bölge içinden tünelleme yapabilirler. Elektronların termal olarak uyarılması ile enerjilerinin artırılmasından dolayı bu işlem termiyonik alan emisyonu (TFE) olarak adlandırılır. Sıcaklık daha da arttırılınca elektronların kinetik enerjileri daha da artacak ve engeli aşarak yarıiletkeniden metale termiyonik emisyon ile geçeceklerdir. İdeal Schottky diyotlarda ölçülen engel yüksekliğinin büyük olması istendiği için saf termiyonik emisyon ile iletim arzu edilen iletim mekanizmasıdır.

Tükenim Bölgesinde Taşıyıcı Jenerasyonu ve Rekombinasyonu

Bir metal / yarıiletken doğrultucu kontağa dışarıdan uygulanan bir gerilim yoksa, sistem denge durumunda demektir. Ancak atomik boyutta tamamen hareketsiz bir durum söz konusu olamaz. Çünkü, sonlu sıcaklıklarda bile devam eden birçok fiziksel olay vardır. Bunlardan biri elektron-hol çiftlerinin oluşması (jenerasyon) veya bu zıt işaretli parçacıkların birleşerek birbirlerini yok etme işlemi olan rekombinasyondur. Jenerasyon veya rekombinasyon durumlarında sıfırdan farklı olan sızıntı akımının değişmesi beklenir. Ancak yapılan çalışmalar ve hesaplamalar bu iki olayın oluşma oranlarının eşit olduklarını göstermektedir.

Denge durumunda elektron ile hollerin sayılarının çarpımı n_i^2 'dir (n_i asal taşıyıcı sayısı). Ancak ekleme uygulanan bir dış gerilim varsa, bu çarpım dengedeki değerinden farklı olur. Şöyle ki, uygulanan gerilimin polaritesine göre ya net bir jenerasyon ya da bir rekombinasyon akımı oluşur. Örneğin, bir metal / n-tipi yarıiletken den oluşan doğrultucu karakterdeki ekleme bir düz beslem gerilimi uygulanırsa elektronlar yarıiletkenden, holler de metalden tükenim bölgesine enjekte olurlar. Fazladan oluşan bu elektron-hol çiftleri tükenim bölgesinde rekombine olarak düz beslem rekombinasyon akımını artırırlar. Ters beslem durumunda ise tükenim bölgesinde dengedeki değerinden daha fazla elektron-hol çiftleri oluşur ve bu elektron-hol çiftleri engeldeki elektrik alan tarafından süpürülerek bir ters beslem akımına sebep olurlar.

Bir yarıiletkendeki rekombinasyon merkezi yasak enerji aralığının ortasına yakın olduğu zaman çok etkilidir ve bu yüzden aygıt performansı bu tür merkezlerden ciddi manada etkilenebilir. Bu tür merkezler derin tuzaklar olarak rol oynarlar. Bu rekombinasyon merkezlerindeki elektron ve hollerin birleşmesiyle oluşan olay dikkate alınarak tükenim bölgesindeki taşıyıcı oluşma ve rekombinasyonuna ait ifadeler de akım denklemlerinde dikkate alınır. Jenerasyon ve rekombinasyondan kaynaklanan akım şu şekilde verilir:

$$I_{JR} = \frac{qAn_iW}{2\tau_0} \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (52)$$

Denklemdaki τ_0 tükenim bölgesindeki azınlık taşıyıcıların ömrü, A ise diyotun etkin alanıdır. Diyottan geçen akım belirlenirken bu akım termiyonik emisyonlardan kaynaklanan akım ifadesine eklenir. İdealite faktörünün “bir”den büyük olmasının muhtemel nedenlerinden biri bazen bu akım olabilmektedir.

Kontak ters beslem altında iken akım jenerasyon akımı, düz beslemde iken rekombinasyon akımıdır denilebilir. Rekombinasyon sadece düz beslem geriliminin düşük değerlerinde önemlidir.

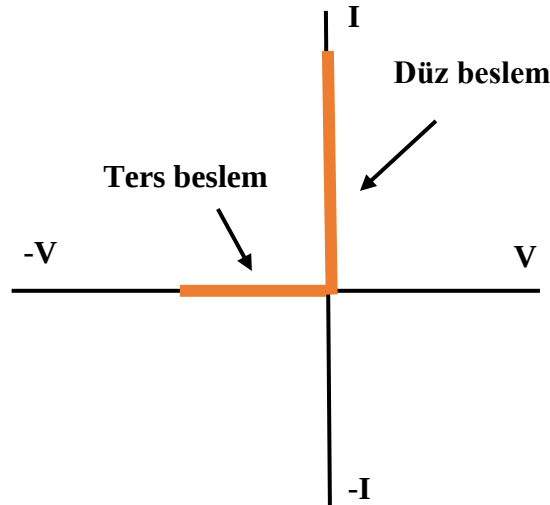
Azınlık Taşıyıcı Enjeksiyonu

p-n eklemlerinden farklı olarak Schottky diyotlarda asıl akım taşıyıcıları çoğunluk taşıyıcılarıdır. Çoğu zaman n-tipi yarıiletkenler üzerine yapılan Schottky engelli diyotlarda engel yüksekliği yasak enerji aralığının yarısından daha yüksektir. Bu durumda yarıiletkenin

metale bakan tarafı yüksek konsantrasyonda hol içerir ve böylece p-tipi gibi davranır. Konağa düz beslem gerilimi (yarıiletken tarafına negatif, metal tarafına pozitif gerilim) uygulandığı zaman elektronlar yarıiletkenenden metale doğru akarlar ve bazı holler de metalden yarıiletkenene hol enjeksiyonuna sebep olacak şekilde yarıiletkeninin nötral bölgesine difüze olurlar. Bu difüzyon sırasında holler bu bölgede çoğunluk taşıyıcı rolü oynayan elektronlarla rekombinasyona uğrayarak kademeli olarak yok olmaya başlarlar. Bu rekombinasyon işlemi şekil 12’de (4) nolu işlemde gösterilmiştir. Bu işlemde metalden yarıiletkenene doğru olan hol enjeksiyonu, yarıiletkeninin valans bandından metale geçen elektron akışına eşdeğerdir.

Schottky Diyot ile pn Eklem Diyotunun Karşılaştırılması

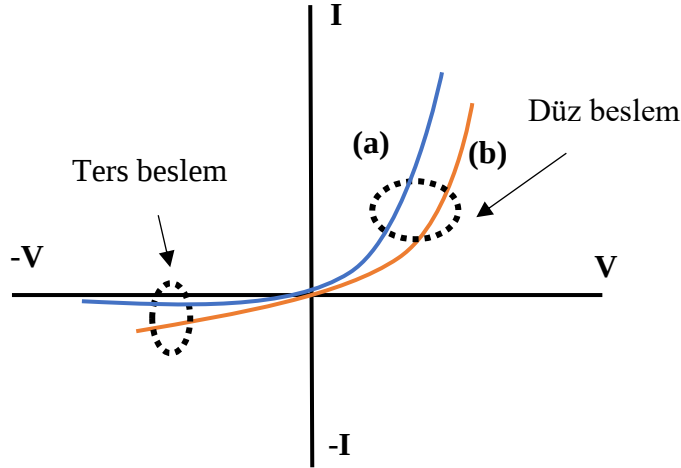
Schottky diyotlar ile pn eklemleri lineer olmayan akım-gerilim karakteristikleri verdiklerinden, her ikisi de doğrultma vazifesi görür. Ancak her iki aygıtın birbirine göre üstün olduğu hususlar vardır. Teorik olarak doğrultucu bir eklemnin ideal I-V (akım – gerilim) değişimi şekil 13’teki gibi olmalıdır.



Şekil 13. Teorideki ideal bir doğrultucu eklemnin lineer ölçekteki akım gerilim karakteristiği.

Şekil 13’te görüldüğü üzere ideal bir doğrultucu eklemde düz beslem durumunda $V = 0$ uygulama geriliminde (ileri yönlü iletim direnci sıfır olarak kabul edildiğinden) yüksek akım, ters beslem durumunda ise ($V = -V$) aygıttan hiç akım geçmemektedir. Ancak uygulamada durum farklıdır. Yani $V = 0$ uygulama geriliminde çok büyük akım elde etmek enerjinin korunumuna aykırıdır. Çünkü yükleri harekete geçirecek ve aygıtta net bir akıma sebep olacak bir enerjiye (gerilim kaynağına) ihtiyaç vardır.

Bu durumda ideal olmasa bile ideale yakın karakteristik; düz beslem için küçük bir gerilim ile yüksek akım ve ters beslem durumu için de uygulama gerilimi ile mümkün olduğu kadar düşük (sızıntı) ve uygulama gerilimi ile değişmeyen akım olmalıdır. İdeale kısmen yakın ve daha az yakın olan iki tane örnek akım-gerilim değişimi şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. İdeal olmayan iki farklı farazi doğrultucu eklemnin akım-gerilim karakteristiği.

Şekil 14'te (a) ile gösterilen karakteristikte düz beslem akımı aynı uygulama geriliminde (b)'dekenden daha büyük ve ters beslem akımı da daha küçük ve gerilimle değişimi de yok denecek kadar azdır. Bu durumda şekil 14'te (a) ile gösterilen karakteristik ((b)'dekine göre) ideale daha yakın bir aygıttır. Buna göre bir pn eklemi ile Schottky diyodun karşılaştırılması yapılırken performans açısından hangisinin daha üstün veya optimuma yakın özelliğe sahip olduğu aygıtın çalışma voltajı, hızı ve sızıntı akımı gibi parametrelerine bakarak yapılabilir.

Schottky diyotlarda engelden geçen akımın sıcaklığa bağlılığı pn eklemine göre daha zayıftır. Çünkü pn eklemine akım azınlık taşıyıcılarının difüzyonu ile gerçekleşir. Bu yüzden akım sıcaklığa kuvvetli bağlı olan azınlık taşıyıcı konsantrasyonuna bağlıdır. pn eklemlerinde sıcaklık arttıkça azınlık taşıyıcı konsantrasyonu artar.

Schottky diyotta akım (engel üzerinden) çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlandığı için aygıt hızı pn eklemine göre daha yüksektir. Aygıt için hızın yüksek olması çok önemli bir avantajdır. Çünkü anahtar ve benzeri özelliklere dış etkilere verilen hızlı tepki aygıtın performansı açısından artı bir avantaj olarak kabul edilmelidir.

Schottky diyotlarda esasen tükenim bölgesinde rekombinasyon olmaz. Uygun aygıtlar yapılarak idealite faktörü 1'e yaklaşan aygıtlar üretilebilmektedir. pn eklemlerinde ise tükenim

bölgesindeki rekombinasyondan dolayı idealite faktörü genellikle 1'den büyük çıkar. Bunun nedeni de her iki aygıtta gerçekleşen farklı akım iletim mekanizmalarının bir sonucudur.

pn eklemleri ile karşılaştırıldığında Schottky diyotların en önemli dezavantajlarından biri ters beslem akımlarının daha büyük olmasıdır. Bu durumda Schottky diyotlar düşük gerilim, yüksek akım doğrultucularda tercih edilen aygıtlardır.

Schottky engelin kalitesi aynı zamanda yüzeyin kalitesine de bağlıdır. Dolayısıyla fabrikasyon işlemlerinin titizliği önemlidir. Bu yüzden bazı malzemelere yüzeyde yüksek konsantrasyondaki kusur oluşumu ve homojensizliğe neden olan faktörlerden dolayı Schottky diyot yerine pn eklemi tercih edilir.

Genel olarak verilen bir yarıiletken için metal / yarıiletken arayüzeylerinden elde edilen engel yüksekliği pn eklemlerinden elde edilen engel yüksekliğinden oldukça küçük olmaktadır. Bu durum Schottky eklemler için bir başak dezavantajdır. Bu dezavantajlı durum metal ve yarıiletken arasında oluşturulan bir yalıtkan tabaka ile giderilebilir. Bu durumda uygun bir yalıtkan tabaka metal ile yarıiletken arasındaki kuplajı bozarak arayüzeydeki bant bükülmesi veya potansiyel engeli kaldırır. Böylece doğrultma özelliği iyileştirilmiş olur.

Termiyonik Emisyon Teorisi

Metal / yarıiletken (MS) doğru beslem akım-gerilim (I-V) karakteristik parametrelerinin hesaplanmasında termiyonik emisyon teorisi kullanılmıştır. Bu teoriye göre, ($V > 3kT/q$) yapı için ileri beslem gerilimi ve akım arasındaki ilişki

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{q(V - IR_s)}{nkT}\right) \quad (53)$$

şeklindedir. Eşitlik. 53'de q elektron yükünü, V diyot gerilimini, k Boltzman sabitini ve T Kelvin cinsinden sıcaklığı ifade etmektedir. IR_s seri direnç boyunca voltaj düşmesini temsil etmektedir. I_0 çoğunluk taşıyıcıları için ters doyum akımıdır. I_0 değeri, $\ln(I) - V$ grafiğinin lineer kısmının $V = 0$ V'deki akım eksenini ile kesişiminden hesaplanır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{nkT}\right) \quad (54)$$

Bu formülde A , A^* , ϕ_b ve n sırasıyla diyotun alanı, Richardson sabiti, engel yüksekliği ve idealite faktörüdür. A^* , p-CuO için $949,36 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir. İdealite faktörü (n) ara yüzey

durumlarına, uygulanan gerilime ve sıcaklığa bağlıdır, değeri 1'den büyüktür. Elde edilen yapıların ideallik faktörü yarı logaritmik I-V eğrisinin eğiminden aşağıda belirtilen formül ile hesaplanmıştır.

$$n = \left(\frac{q}{kT} \right) \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (55)$$

Engel yüksekliği ise,

$$q\phi_b = kT \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (56)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir.

Norde Fonksiyonları

Engel yüksekliği ve seri direnci hesaplamak için Norde, alternatif bir yöntem önermiştir. Norde fonksiyonu aşağıdaki şekilde ifade edilir (Norde 1979).

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (57)$$

Burada γ , idealite faktöründen büyük olan en küçük tamsayı değerini, $I(V)$ ise uygulanan gerilime bağlı akım değerini gösterir.

Norde fonksiyonu yardımıyla engel yüksekliği değeri aşağıdaki eşitlikten elde dileyebilir.

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (58)$$

Burada $F(V_0)$, $F(V) - V$ grafiğinde minimum voltaj değerine (V_0) karşılık gelen minimum $F(V)$ değeridir.

Norde fonksiyonundan seri direnç ise aşağıdaki eşitlikle elde edilir.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI_{min}} \quad (59)$$

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve q elektron yüküdür.

Fotodedektörler

Fotodedektörler ışığı kaydetmek için kullanılan elektronik aygıtlardır. Yarıiletkenlerde, yeterli enerjiye sahip foton yarıiletken yüzeyine düştüğünde foton soğurulabilir ve elektron hol çiftleri oluşturulabilir. Yarıiletkenin yüzeyine düşen fotonun enerjisinin, soğurmanın gerçekleşmesi ve valans bandındaki elektronun iletkenlik bandına geçebilmesi için yarıiletken malzemenin bant aralığına eşit veya bundan büyük olması gerekir. Fotonun enerjisi, ışığın frekansı ya da dalga boyu ile aşağıdaki gibi ilişkilendirilebilir:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (60)$$

Burada E fotonun enerjisi, h Planck sabiti, ν ışığın frekansı, c ışık hızı ve λ ise enerjisi yarıiletkenin yasak bant aralığına eşit olan ve en düşük enerjili fotonun tespit edilebildiği dalga boyudur.

Kuantum Verimi (η)

Kuantum verimi (η), bir fotodedektörün performansını belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Kuantum verimi, üretilen elektron sayısının dedektöre gelen foton sayısına oranıdır. Başka bir deyişle, bir fotonu elektrona dönüştürme verimliliği olarak tanımlanabilir ve normalde yüzde birimleriyle ifade edilir. İdeal bir fotodedektör için kuantum verimi 1'e eşittir. Gerçekte, tüm fotodedektörlerin kuantum verimi 1'den küçüktür. Bir fotodedektörün kuantum verimi şu ifade ile bulunur:

$$\eta = \left(\frac{I_{foton}/q}{P_{in}/h\nu} \right) \times \%100 = \left(\frac{I_{foton}}{P_{in}\lambda} \right) \times \%124 \quad (61)$$

Burada h Planck sabiti, q elektronik yük ve λ ise gelen fotonun dalga boyudur. Ayrıca I_{foton} , P_{in} giriş gücüne ve ν frekansına sahip bir ışık demeti fotodedektörün aktif bölgesi üzerine düştüğünde oluşan fotoakımdır.

Duyarlılık ya da Spektral Tepki (SR)

Spektral tepki ya da duyarlılık (SR), fotodedektörün kuantum verimi ile ilgili önemli bir parametredir ve fotoakımın giriş optik gücüne oranından yani;

$$SR = \left(\frac{I_{foton}}{p_{in}} \right) = \left(\frac{\eta \lambda (nm)}{1240} \right) \quad (62)$$

ile verilir. Birimi watt başına amper (A/W)'dir. Duyarlılık gelen fotonun dalga boyunun ve fotodedektörün yapıldığı malzemenin bant aralığının bir fonksiyonudur. Bu eşitliğe göre duyarlılık gelen fotonların dalga boyu ile lineer olarak değişmektedir.

Kazanç (G)

Fotoakım (I_{photon}), fotonların soğurulmasıyla üretilen akımdır. Karanlık akım ise, termal olarak veya fonon etkileşimi nedeniyle üretilen ve detektöre ışık gelmediğinde mevcut olan akımdır. Uygulanan gerilimin meydana getirdiği elektrik alanın etkisi altında, elektronlar ve holler yarıiletken boyunca süpürülerek bir elektrik akımına neden olur. Fotoakım, gelen optik güç ile doğru orantılıdır. Fotodedektör üzerine ışık düşürüldüğünde üretilen akımın (I_{foton}) karanlık akıma ($I_{karanlık}$) oranı fotodedektörün kazancını (Gain) verir ve,

$$G = \frac{I_{foton}}{I_{karanlık}} \quad (63)$$

ile ifade edilir. Burada I_{foton} , fotodedektör üzerine ışık düşürüldüğünde üretilen akım, $I_{karanlık}$ ise karanlık akımdır.

Algılama Hassasiyeti ya da Dedektivite (D)

Algılama hassasiyeti (detectivity) (D), herhangi bir fotodetektörün önemli performans değerlendirme parametrelerinden biridir. Dedektivite, cihazın ışığı algılamaya uygunluğu ve fotodetektörün hassasiyeti olarak ifade edilir ve,

$$D = \left(\frac{R A^{1/2}}{(2qI_d)^{1/2}} \right) \quad (64)$$

ile verilir. Birimi Jones'tır. Bu eşitlikte R spektral duyarlılık, A dedektörün etkin alanı, q elektron yükü, I_d ise karanlık akımdır.

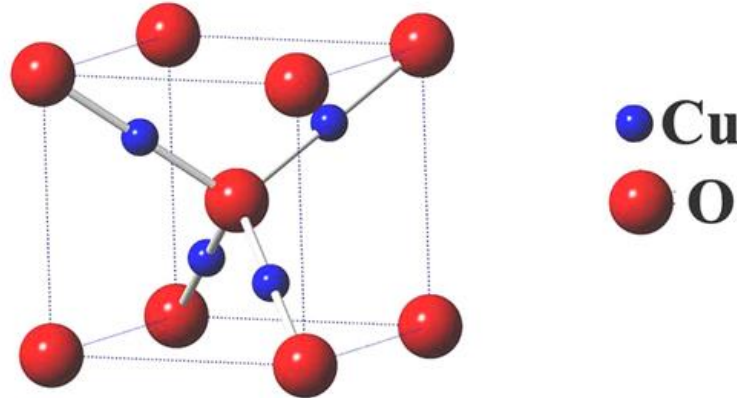
Bakır Oksit Yarıiletkenler

Bakır (I) oksit (Cu_2O) suda ve organik çözücülerde çözünmez. Cu_2O , bazı kırmızı renkli kayalarda bakır minerali olarak bulunur. Oksijene maruz kaldığında bakır, çok yavaş da olsa doğal olarak bakır (I) okside dönüşür. Daha fazla ısıtıldığında ise bakır (I) oksit, bakır (II) oksit (CuO) oluşturur. Bakır (I) oksitin bazı fiziksel özellikleri tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Bakır (I) Oksit (Cu_2O)’in Bazı Fiziksel Özellikleri

Molar kütle	143,09 g/mol
Dış görünüş	Kahverengimsi kırmızı - Katı
Yoğunluk	6,0 g/cm ³
Erime noktası	1235 °C, 1508 K
Buharlaşma noktası	1800 °C, 2073 K
Suda çözünübilirlik	Suda çözünmez, asitte çözünür

Bakır (I) oksit p-tipi bir yarıiletkendir. Kübik kristal yapıya sahiptir ve örgü parametresi $a = 0,427\text{nm}$ ’dir. Yasak enerji aralığı 2,1-2,61 eV aralığında değiştiği rapor edilmiştir (Paracchino, Brauer et al. 2012). Cu_2O , optik özellikleri sayesinde güneş pili yapılarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Cu_2O ’nun kübik kristal yapısı şekil 15’te gösterilmiştir.



Şekil 15. Bakır (I) oksit (Cu_2O)’in kristal yapısı.

Cu_2O ince filmler, 600 nm’nin üzerindeki dalga boylarında yüksek optik geçirgenliğe, hafif sarımsı bir görünüme ve 600 nm’nin altındaki dalga boylarında yüksek optik soğurma katsayısına sahiptir. İnce film formundaki Cu_2O , p-tipi yarı iletkenliği, yüksek soğurma katsayısı, bol bulunabilirliği, toksik olmayan doğası ve düşük üretim maliyeti nedeniyle birçok cihaz uygulaması için çekici bir malzemedir. Cu_2O ince filmler, oksijen ve nem sensörlerinde,

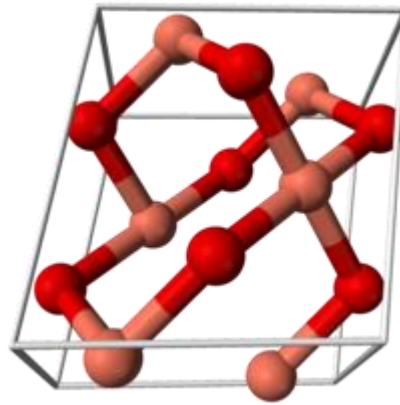
elektrokromik cihazlarda çeşitli uygulamalar bulur (Richardson, Slack et al. 2001). Ayrıca, Cu_2O ince filmler heteroeklem güneş hücreleri gibi fotovoltaik cihazlarda da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Izaki, Shinagawa et al. 2007).

Bakır (II) oksit veya kuprik oksit (CuO), bakırın daha yüksek oksitidir. Bir mineral olarak tenorit olarak bilinir. $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde bir miktar oksijen kaybıyla eriyen, iyonik yapıya sahip siyah bir katıdır. Bakırın hava ortamında ısıtılmasıyla oluşturulabilir. CuO 'nun bazı fiziksel özellikleri tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Bakır (II) Oksit (CuO)'in Bazı Fiziksel Özellikleri

Molar kütle	79,545 g/mol
Dış görünüş	Siyaha yakın kahverengi - Katı
Yoğunluk	6,315 g/cm ³
Erime noktası	1326 $^\circ\text{C}$, 1599 K
Buharlaşma noktası	2000 $^\circ\text{C}$, 2270 K
Suda çözünürlük	Suda çözünmez, asitte çözünür

Bakır (II) oksit (CuO), bant aralığı 1,3-2,1 eV (Guo, Diao et al. 2014) olup, yapısında Cu boşlukları bulunması nedeniyle p-tipi bir yarıiletkenidir. Görünüm olarak siyah ya da siyaha yakın kahverengi renge sahip olup parlak bir katıdır. Monoklinik kristal yapıya sahiptir ve birim hücresinde iki atom bulundurmaktadır. CuO 'nun monoklinik kristal yapısı şekil 16'da gösterilmiştir.



Şekil 16. Bakır (II) oksit (CuO)'in kristal yapısı.

CuO'nun Örgü parametreleri, $a = 0,468nm$, $b = 0,342nm$, $c = 0,512nm$ şeklindedir (Gao, Liu et al. 2012). Bakır (II) oksitin bant aralığı güneş hücreleri için ideal enerji aralığına yakındır ve doğrudan bant yapısı ile elektromanyetik spektrumun geniş bir kısmında soğurum sağlar. CuO dar bant aralığı sayesinde heteroeklem güneş pillerinde kullanılmaktadır.



MATERYAL VE METOT

Kullanılan Malzemeler ve Alt Tabaka (alttaş)'ların Hazırlanması

Bu araştırmada, bakır oksit (CuO ve Cu_2O) ince filmlerin biriktirilmesi için alt tabaka olarak, tek tarafı parlatılmış n-tipi silisyum ve soda kireç camı (soda lime glass) olarak adlandırılan mikroskop camı kullanıldı. Hedef (target) malzeme olarak 99,9% saflıkta, 2 inç çapında ve 1,25 inç kalınlıkta CuO kullanılmıştır. İnce film biriktirme işleminden önce silisyum altlıklar farklı ebatlarda, cam altlıklar ise $1 \times 1 \text{ cm}$ ebatlarında elmas kesici kalem ile elle kesildi. Silisyum altlıklar RCA-1 ve RCA-2 olarak bilinen temizlik prosedürüne uygun olarak temizlendi. RCA-1 prosedürü silisyum altlık yüzeyindeki organik kalıntıları temizlemek için, RCA-2 prosedürü ise daha ileri kirliliklerin temizlenmesi için kullanılır. Bu temizlik prosedürlerinin aşamaları aşağıda belirtilmiştir.

RCA-1 prosedürü:

1. Cam beher içerisine 365 ml deiyonize (DI) su eklenir.
2. DI su eklendikten sonra 65 ml amonyum hidroksit (NH_4OH) eklenir ve 70°C de 5 dakika beklenir.
3. Daha sonra 65 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) eklenir ve 1-2 dakika bekledikten sonra silisyum altlıklar solüsyon içine bırakılır ve 15 dakika bekletilir.
4. Altlıklar solüsyondan çıkartılır ve DI su ile yıkanır.
5. Azot gazıyla kurutulur ve RCA-2 prosedürüne geçilir.

RCA-2 prosedürü:

1. Cam beher içerisine 300 ml DI su eklenir.
2. DI su eklendikten sonra 50 ml hidrojen klorür (HCl) eklenir ve 70°C de 15 dakika bekletilir.
3. Daha sonra 50 ml hidrojen peroksit (H_2O_2) eklenir ve 1-2 dakika beklenir.
4. Silisyum altlıklar solüsyon içine bırakılır ve 10 dakika bekletilir.
5. Altlıklar solüsyondan çıkartılır ve DI su ile yıkanır.
6. Azot gazı ile kurutulur ve altlıklar biriktirme işlemi için hazır hale gelmiş olur.

Bu işlemler temiz odada, çeker ocak sisteminde, gerekli güvenlik önlemleri (gözlük, eldiven ve maske gibi) alınarak yapılmıştır.

Cam altlıklar için ise aşağıda verilen temizlik prosedürü uygulandı;

1. Cam altlıklar sıvı sabun ile ovalanarak yıkandı.
2. Daha sonra çeşme suyunda yıkandı.
3. Cam beher içerisine bir miktar aseton koyularak cam altlıklar Aseton içerisine bırakıldı ve ultrasonik titreşim altında 5 dakika bekletildi.
4. Aseton içerisinden alınan cam altlıklar DI su içerisine bırakılarak 5 dakika boyunca ultrasonik titreşim altında bekletildi.
5. DI su içerisinden alınan cam altlıklar Metanol içerisine bırakılarak 5 dakika boyunca ultrasonik titreşim altında bekletildi.
6. Metanol içerisinden alınan cam altlıklar DI su içerisine bırakılarak 5 dakika boyunca ultrasonik titreşim altında bekletildi.
7. Cam altlıklar Azot gazı ile kurutularak biriktirme işlemine hazır hale getirildi.

CuO ve Cu₂O İnce Filmlerin Hazırlanması

Bu çalışmada, nano parçacıklı CuO ve Cu₂O ince filmlerin biriktirilmesinde, ince film biriktirme tekniklerinden fiziksel buhar biriktirme (PVD) tekniği olan, DC magnetron saçtırma (DC Magnetron Sputter) yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi (DAYTAM)'ndeki temiz odada (ISO 7 sınıfı) bulunan Vaksis mühendislik şirketinden satın alınan PVD MİDAS 3M markalı saçtırma (sputter) sistemi ile yapılmıştır. Kullanılan sisteme ait görsel şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 17. Vaksis Saçtırma sistemi. 1. Altlık ısıtıcı PID kontrolcüsü 2. Bilgisayar açma/kapama butonu 3. DC güç kaynağı 4. Ana şalter 5. Başlatma durdurma butonları 6. Acil durdurma butonu 7. Kontrol ünitesinin monitörü 8. Plazma izleme penceresi 9. Kaplama odası.

Kullanılan sistemin teknik özellikleri şu şekildedir verilmektedir:

- En Düşük Basınç $\leq 5 \times 10^{-8}$ Torr,
- Alttaş Boyutu 10,16–20,32 cm çap,
- Alttaş Isıtma maksimum 800°C,
- Alttaş Döndürme 3–30 rpm (dakikadaki tur sayısı),
- Kontrol tam otomatik,
- Gerektiğinde soğutma sistemi,
- 2 adet RF güç kaynağı ve 1 adet DC güç kaynağı toplamda 3 adet hedef malzeme koyma imkânı vardır. Kaplama yukarıya doğrudur ve hedef malzeme tutucu istenilen açıya ayarlanabilmektedir.

Saçtırma sistemi, çeşitli mekanik parçalardan ve sistemlerden oluşmaktadır. Saçtırma sisteminin içerisine direkt bağlı vakum sistemi mevcuttur. Bu sistemde iki tip pompa vardır, bir tanesi mekanik pompa diğeri ise turbo moleküler pompadır. Sistem bir bilgisayar yazılımı ile tamamen otomatik olarak kontrol edilmektedir. Bu yazılım sayesinde büyüme anında tüm parametreler takip edilebilmekte ve tüm değerlere anında müdahale edilebilir. Bu sistemde ilk

olarak mekanik pompa devreye alınır. Mekanik pompa basınç değeri yaklaşık 10^{-3} Torr olana kadar çalışmaya devam eder. Daha düşük basınç değerlerine ulaşabilmek için ise turbo moleküler pompa devreye girer. Kazan basıncı turbo moleküler pompanın devreye girmesiyle birlikte yaklaşık 150 dakika sonra 10^{-6} Torr değerine ulaşır. Daha düşük basınç değerlerine ulaşmak istenirse biraz daha beklenmelidir. Kazan basıncı istenilen seviyeye ulaştıktan sonra içeriye çalışma gazı verilir. İçeriye verilecek gaz miktarı sccm (dakikadaki kübik santimetreden geçen akış) cinsinden yazılım sayesinde kontrol edilebilir. Bu sistemde plazma yönlendiricinin sağ üst köşesinde kalınlık sensörü bulunur. Sisteme bağlı bilgisayar yazılımı sayesinde film kalınlığı anlık olarak görülebilir ve istenilen kalınlığa ulaşıldığında büyütme durdurulabilir.

PVD tekniğinde, üzerine biriktirme yapılacak altlık malzeme vakumlu bir kabine yerleştirilir ve yüksek enerji ile iyonlaştırılmış ve reaktif gazlarla oluşturulmuş plazma ile kaplanır. PVD tekniği, katı haldeki hedef (target) maddenin yüksek enerji ile plazma haline getirilerek, kontrollü olarak, kaplanacak malzemenin üzerine yapıştırılması işlemi olarak özetlenebilir. Yarı iletken endüstrisinin gelişimi ile kendine endüstride yer bulabilen PVD tekniği, günümüzde pek çok farklı alanda kullanılmaktadır. Mikroelektronik, tıp, dekoratif amaçlı, korozyona karşı direnç gerektiren uygulamalar vb. alanlarında kullanılmaktadır.

PVD tekniğinin diğer ince film biriktirme tekniklerine göre pek çok avantajı vardır. Özellikle, basit ve birçok materyale uygulanabilmesi, düşük altlık sıcaklıklarında yapılabilmesi, homojen biriktirme ve elde edilen ince filmlerin kristalografik özellikler göstermesi bunlardan bazılarıdır. Diğer tekniklere göre tek dezavantaj olarak, biriktirme işleminin yavaş olması gösterilebilir.

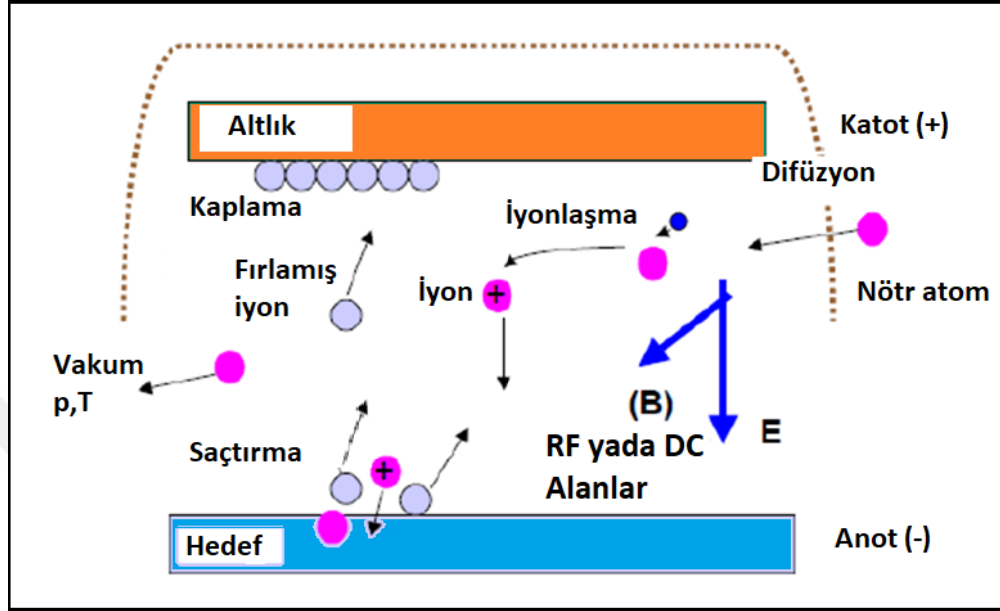
Saçtırmanın oluşabilmesi için, herhangi bir parçacığın hedef yüzeyden bir atomu koparabilecek bir enerjiyle yüzeye çarpması gerekir. Saçtırma tekniğinde saçtırmanın verimi hedef malzemeden kopan parçacık sayısının hedefe çarpan iyon sayısına oranı olarak tanımlanır (Thornton 1978).

$$\mu = \frac{\text{hedefte kopan parçacık sayısı}}{\text{hedefe çarpan iyon sayısı}} \quad (65)$$

Saçtırma verimi, hedef yüzeyine çarpan iyonların kütle numarasına, enerjisine, hedefe çarpma açısına, hedef malzemenin cinsine ve ortam sıcaklığına bağlıdır. Saçtırma işlemi için genellikle Ar^+ ve Kr^+ gibi inert gaz iyonları ya da N_2^+ , O_2^+ gibi küçük moleküler iyonlar kullanılır.

Saçtırma işleminin çalışma prensibi şekil 18'de gösterilmiştir. Bu çalışmada saçtırma işlemi için Ar (Argon) gazı kullanıldı. Asal gaz olarak Argon gazının kullanılmasının nedeni, Ar moleküllerinin büyük olması, sistemden kolayca atılabilmesi ve tehlikeli bir gaz olmamasıdır.

Ar gazı iyonize edilmiş ve hedef malzemeye doğru hızlandırılmış olduğundan hedef malzemenin atomlarına çarparak enerji ve momentum transferi sonrasında hedeften atomları koparır ve böylece saçtırma gerçekleşir.

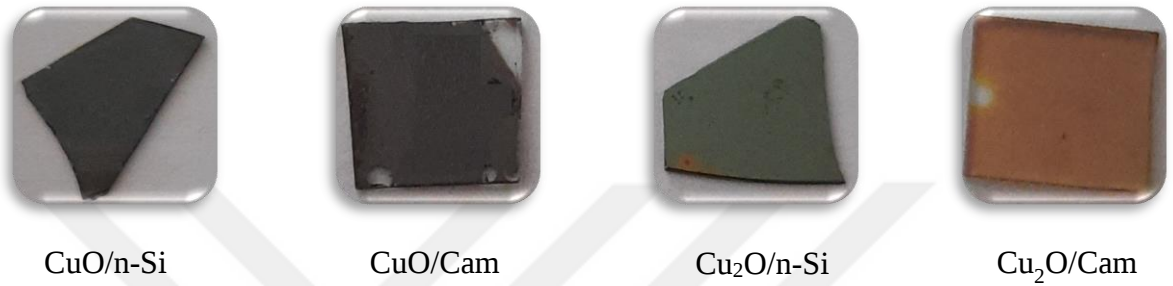


Şekil 18. Saçtırma işleminin çalışma prensibi.

DC saçtırma tekniği ile n-tipi silisyum ve cam altlıklar üzerine biriktirilen nano parçacıklı CuO ve Cu₂O ince filmlere ait biriktirme parametrelerinden bazıları tablo 3'te verilmiştir. CuO ve Cu₂O fazları, çalışma basıncı, büyütme süresi, reaktif gaz cinsi ve dakikadaki kübik santimetreden akan akış (sccm) miktarı değiştirilerek kontrol edilmiştir. Nano parçacıklı CuO ince filmlerin elde edilmesinde reaktif gaz olarak argon ve oksijen kullanıldı. Biriktirme işlemi sırasında argon miktarı 30 sccm ve oksijen miktarı 1 sccm'de sabit tutuldu. CuO ince film biriktirme işleminden önce 5 dakika boyunca ön saçtırma yapıldı. Altlık tutucu hızı ise 7 Rpm'de saçtırma işlemi boyunca sabit tutuldu. Ön saçtırma işleminden sonra altlık önündeki perde açıldıktan 30 dakika sonra biriktirme işlemi sonlandırıldı. Nano parçacıklı Cu₂O ince filmlerin biriktirilmesinde ise reaktif gaz olarak argon ve azot kullanıldı. Biriktirme işlemi sırasında argon miktarı 30 sccm ve azot miktarı 20 sccm'de sabit tutuldu. Cu₂O ince film biriktirme işleminden önce 5 dakika boyunca ön saçtırma yapıldı. Altlık tutucu hızı ise 5 Rpm'de saçtırma işlemi boyunca sabit tutuldu. Ön saçtırma işleminden sonra altlık önündeki perde açıldıktan 10 dakika sonra biriktirme işlemi sonlandırıldı. Cam ve n-Si altlıklar üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlere ait görseller Şekil 19'da verilmiştir.

Tablo 3. CuO ve Cu₂O İnce Film Biriktirme Parametreleri

İnce Film	Hedef Malzeme	Altlık	Kazan Basıncı (Torr)	Çalışma Basıncı (Torr)	DC Gücü (W)	Altlık Sıcaklığı (°C)	Biriktirme Süresi (dk)	İnce Film Kalınlığı (nm)
CuO	CuO	Cam ve n-Si	8x10 ⁻⁵	8,3x10 ⁻³	130	24	30	394
Cu ₂ O				1,2x10 ⁻²			10	119

**Şekil 19.** Farklı altlıklar üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmler.

İnce Film Karakterizasyon Teknikleri

İnce film karakterizasyon teknikleri üç başlık altında gruplandırılabilir. Bunlar; yapısal, optik ve elektriksel karakterizasyon teknikleridir. İnce film karakterizasyonuna başlamadan önce cam ve silisyum altlıklara biriktirilen CuO ince filmlerin kristal kalitesini arttırmak için 1'er saat sırasıyla 300 °C, 400 °C ve 450 °C'de hava ortamında tavlandılar. Cu₂O ince filmler hava ortamında tavlandıkları zaman CuO'ya dönüştükleri için bunlara herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadı.

Aynı ortamda cam ve n-Si altlık üzerine biriktirilen diğer CuO ve Cu₂O ince film yüzeylerine sülfürleme işlemi uygulandı. Sülfürleme işlemi için kimyasal buhar biriktirme (CVD) fırın kullanıldı. Sülfürleme için cihaz 20 dakikada 300 °C'ye gelecek şekilde ayarlandı. Cihaz 300 °C'de 5 dakika bekletildi. Sonrasında sülfür numunelerin olduğu kısma alındı ve 3 dakika boyunca sülfürleme işlemi yapıldı. Buradaki amaç, sülfürlemenin ince filmlerin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri üzerindeki etkisini belirlemektir. Bununla birlikte, sülfürlenmiş ince filmler kullanılarak üretilen Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al metal-yarıiletken-metal fotodedektörlerin opto-elektronik özelliklerinin sülfürleme ile nasıl değiştiği de incelenmiştir.

CuO ince filmler daha önce tavlандıkları için sülfürleme işleminden sonra tavlانmadı. Sülfürlenmiş Cu₂O ince filmler de tavlama işlemine tabi tutulmadı.

X-Işını Kırınımı (XRD)

Bu çalışmada, biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerin ve sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin yapısal analizi için Atatürk üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan D-2 Phaser Bruker (CuK α = 1,5406 Å) markalı X-ışını Kırınımı (XRD) ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ölçümler için 2 θ değeri 10° – 80° aralığında alınmıştır.

Malzemelerin yapısal karakterizasyonunda kullanılan en etkili teknik XRD (X-Işını kırınımı)'dir. XRD ile malzemenin içerdığı fazları, tanecik boyutunu, tanecik yönelimini, kimyasal kompozisyonu ve örgü sabitini belirlemek mümkündür.

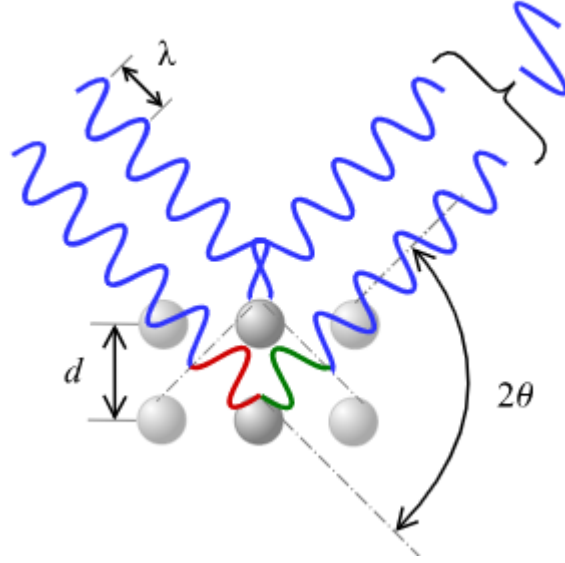
XRD tekniğinde, ince filmler bir kolimatörden geçirilmiş dalga boyu 0,5-2 Å aralığında değişen bir x-ışını demetine maruz bırakılır. X-ışınlarının dalga boyu atomlar arası mertebede olduğu için ve ince filmlere yapısal bir zarar vermediği için ince filmlerin yapısal karakterizasyonunda kullanılır. Bu işlemin sonucunda saçılan x-ışınları bir dedektör aracılığıyla kaydedilir. Dedektörün konumu ile ince film kristalinin yönelimine, ince filmin özel kristal yapısına bağlı olarak XRD deseni kaydedilebilir.

İnce filmlerin yapısal karakterizasyonunda XRD tekniğinin kullanılmasının asıl nedeni, ortam şartlarında analiz yapılabilmesi, malzemeye zarar vermemesi ve büyük alanlı numuneleri analiz etme imkanı sağlamasıdır.

Bragg yasasına göre; bir kristaldeki ardışık düzlemlerde saçılan dalgalar yapıcı girişim oluşturur. Dalga vektörü k olan bir gelen ışın θ açısı ile bir takım düzlem üstüne düştüğünde düzlemlerle θ açısı yaparak k' dalga vektörü ile yansır (Şekil 20). Bu yüzden;

$$k = k' \quad (66)$$

yazılabilir. Gelen ve yansıyan ışınlar arasındaki açı $\phi = 2\theta$ 'dır. Ardışık düzlemler arasındaki mesafe ise d 'dir. Gelen ışının dalga boyu ise λ 'dır.



Şekil 20. Paralel düzlemler tarafından ışığın kırınımı ve Bragg yasası.

Şekilde gösterilen yol farkı gelen ışının dalga boyunun tam katları olduğu zaman ardışık yollar arasında yapıcı girişim oluşur. Bu durumda yapıcı girişim şartı (Bragg yasası);

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (67)$$

olur.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

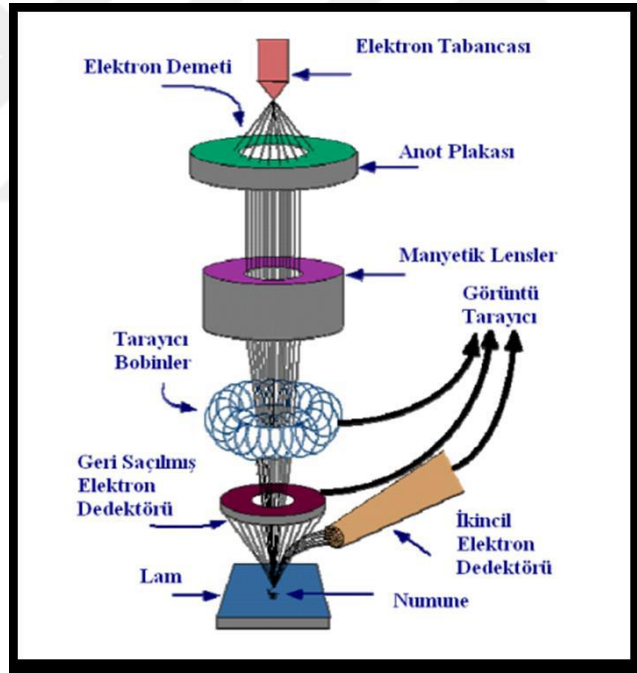
Bu çalışmada, üretilen CuO ve Cu₂O ile sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin morfolojik analizleri için Atatürk Üniversitesi'ndeki Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma Merkezi (DAYTAM) bünyesinde bulunan Sigma 300 Model Zeiss Gemini marka FEG-SEM cihazı ile SEM görüntüleri alınmıştır. Cam ve n-Si altlıklar üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerin ve sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin SEM görüntüleri inlens dedektör ile 8.1 mm çalışma mesafesinde, 50.000 büyütmede ve 2 µm ölçekte alınmıştır.

Taramalı elektron mikroskopunda yüzeyin daha büyük görüntüsünü veya çözünürlüğü arttırmak için elektron demeti kullanılır. Uygun bir görüntü elde etmek için SEM'in kullanılması uygun elektron demet enerjisi, şiddeti ve çalışılacak numunenin görüntü için hazır hale getirilmesini gerektirir.

SEM tekniğinde, odaklanmış yüksek enerjili bir elektron demeti katı numune yüzeyine gönderilir ve elektron demeti ile numune arasındaki etkileşimler neticesinde oluşan ışınlar

veya geri yansıyan elektronların sayılması ile görüntü oluşur. Numune yüzeyi ile elektron demeti arasındaki etkileşimlerle ortaya çıkan sinyal değişimleri yüzeyin kimyasal bileşimi, yüzeyin haritası, kristal yapı ve malzemedeki yönelimler gibi önemli bilgiler verir. Genellikle bu veriler, numune yüzeyi üzerinde geniş bir alan taraması yapılarak toplanır. Bu veriler yardımıyla iki boyutlu görüntü oluşturulur. SEM’de incelenecek malzeme katı olmalıdır. 10^{-5} - 10^{-7} Torr değerindeki yüksek vakum değerlerinde oldukça kaliteli görüntüler elde edilebilir. SEM ile elde edilen görüntüler siyah-beyaz’dır.

Taramalı elektron mikroskobu, elektron demeti kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, elektron demetini numune üzerinde yoğunlaştırmak için objektif mercek, bu merceğe bağlı çeşitli çapta apatürler ve elektron demetinin numune yüzeyini taraması için tarama bobinleri kısımlarından oluşmaktadır (Şekil 21).



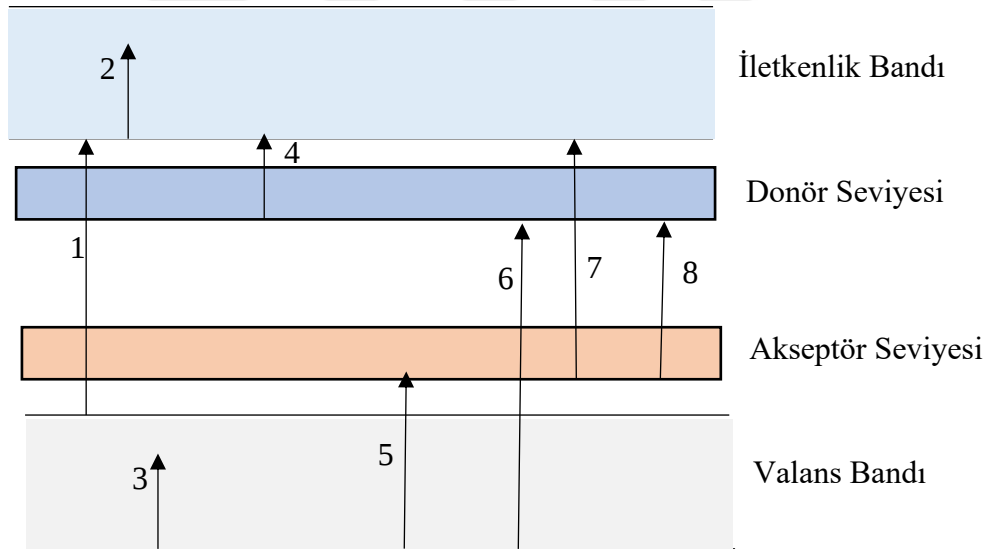
Şekil 21. SEM cihazının yapısı.

Taramalı elektron mikroskobunda yer alan mercek sistemleri elektromanyetik alan sayesinde elektron demetini inceltmekte veya demeti numune üzerine odaklamaktadır. SEM’de elektron demeti ile numune etkileşimi sonucunda çeşitli ışıma ve elektronları toplayan dedektörler, sinyal çoğaltıcılar ve numune yüzeyinde elektron demetini görüntü ekranıyla senkronize tarayan manyetik bobinler yer almaktadır.

Optik Soğurma

Fabrikasyonu yapılan CuO ve Cu₂O ile sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O ince filmlerin optik analizleri için Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan Perkin-Elmer Lambda 2S UV/VIS Spektrometresi kullanılarak, 300-1100 nm dalga boyu aralığında ölçümler alınmıştır.

Optik soğurma, geçirgenlik ve yansıma materyallerin bant yapılarını belirlemek için kullanılan ölçüm teknikleridir. Optik soğurma, fotonlarla uyarılan elektronların düşük enerji seviyesinden yüksek enerji seviyesine geçmesi olayıdır. Bir yarıiletkenin bant yapısı göz önüne alınacak olursa mümkün elektronik geçişler, banttan banda direkt geçişler, bant içi geçişler (iletkenlik bandı içinde ve valans bandı içinde), donör seviyesinden iletkenlik bandına, Valans bandından akseptör seviyesine, valans bandından donör seviyesine, akseptör seviyesinden iletkenlik bandına ve akseptör seviyesinden donör seviyesine geçişler gibi çoklu mekanizmalar gerçekleşebilir. Bu geçişler şekil 22’de gösterilmiştir.



Şekil 22. Bir yarıiletkenin farklı soğurma mekanizmaları. (1) banttan banda direkt geçiş, (2,3) bant içi geçişler, (4) donör seviyesinden iletkenlik bandına geçiş, (5) Valans bandından akseptör seviyesine geçiş, (6) valans bandından donör seviyesine geçiş, (7) akseptör seviyesinden iletkenlik bandına geçiş, (8) akseptör seviyesinden donör seviyesine geçiş.

Bir yarıiletkenin bant tipi ve yasak enerji aralığı optik soğurma ölçümü ile elde edilebilir. Bu çalışmada cam altlık üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri Tauc denklemi kullanılarak hesaplanmıştır. Tauc yasasına göre, foton enerjisine bağlı absorpsiyon katsayısı şu şekilde verilir (Tauc, Grigorovici et al. 1966):

$$\alpha(h\nu) = B(h\nu - E_g)^n \quad (68)$$

Burada E_g yasak enerji aralığı (eV), h Planck sabiti (J.s), B soğurma sabiti, ν ışığın frekansı (s^{-1}) ve α soğurma katsayısıdır.

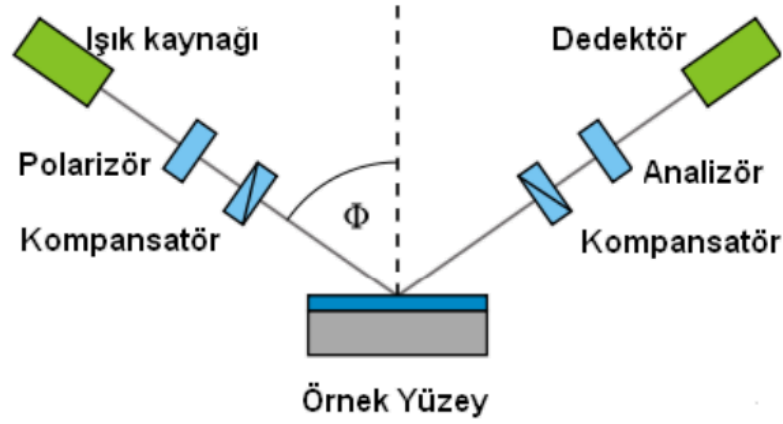
Bir yarıiletkenin yasak enerji aralığı, temel soğurma spektrumu kullanılarak çizilen $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$ değişim grafiğiyle hesaplanabilir. Bu grafiğin doğrusal kısmının doğrultusunun $h\nu$ eksenini $(\alpha h\nu)^2 = 0$ 'da kestiği noktanın enerji değeri yarıiletkenin yasak enerji aralığını verir.

Yarıiletken üzerine düşen fotonun enerjisi ($h\nu$) yarıiletkenin yasak enerji aralığı (E_g)'ndan küçük ise soğurma gerçekleşmez. Eğer $h\nu \geq E_g$ ise $\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^{1/n}$ durumu için, yasak enerji aralığı bu eşitlikten hesaplanır. Eğer yarıiletken doğrudan bir yasak enerji aralığına sahipse $n = 1/2$, dolaylı bir yasak enerji aralığına sahip ise $n = 2$ alınır.

Spektroskopik Elipsometre

Bu çalışmada, farklı altlıklar üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerin kalınlıklarının belirlenmesi için Erzincan Binali YILDIRIM Üniversitesi Temel Bilimler Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan Spectroscopy marka TT-90 model spektroskopik elipsometre cihazı kullanılmıştır.

Spektroskopik elipsometre, ışığın bir malzemeden geçmesi veya yansımaları sırasında polarizasyonundaki değişimi ölçerek yüzey özellikleri hakkında bilgi verir. Tüm katı maddelerde (metaller, yarıiletkenler, yalıtkanlar) kullanılır. Cihaz film kalınlığı ve bulk malzemelerin ve ince filmlerin optik sabitlerini belirler. Şekil 23'te Elipsometre ve bölümleri gösterilmiştir.



Şekil 23. Elipsometre ve bölümleri.

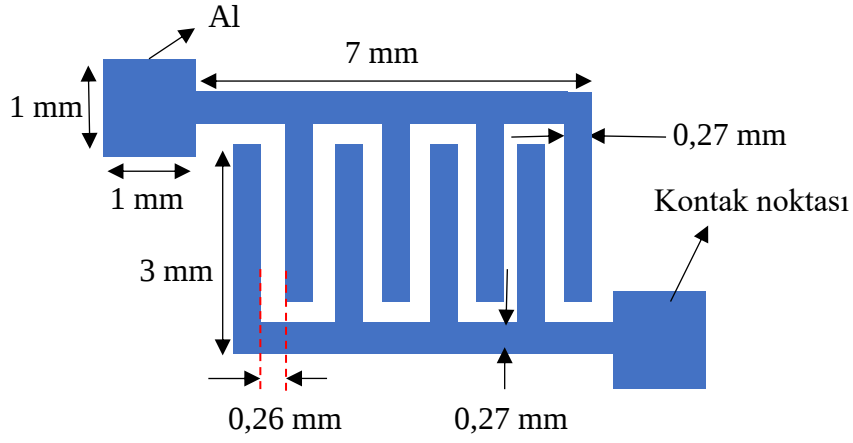
Sistemin temelinde ışık kaynağından çıkan kutuplanmamış ışık önce bir çizgisel kutuplayıcıdan (polarizör) geçirilerek çizgisel kutuplanmış ışık elde edilir. Daha sonra bir çeyrek dalga geciktiricisinden (kompansatör) geçirilerek eliptik kutuplanır. Numune üzerine gelen eliptik kutuplu ışık örnek üzerinden yansıdıktan sonra yine bir çizgisel kutuplayıcıdan geçirilerek analizör üzerinden detektöre düşürülür. Buradaki kutuplayıcının optik geçirgenlik eksenini ile ışığın gelme düzlemi arasındaki açı bir prizma yardımı ile hassas bir şekilde ayarlanabilir.

Elipsometre, özellikle ince film yapılarının büyütülmesi sırasında, film kalınlığının yanı sıra yüzey kalitesinin ve dielektrik özelliklerinin eş zamanlı olarak kontrol edilmesine olanak sağlar.

Fotodedektör Fabrikasyonu ve Karakterizasyonu

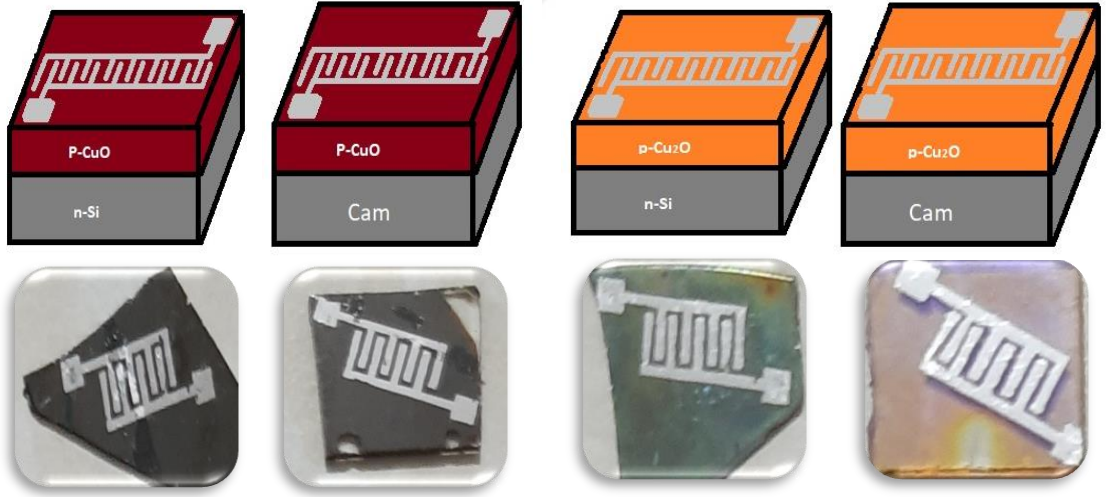
Fotodedektör Fabrikasyonu

Bu çalışmada, termal buharlaştırma yöntemi kullanılarak CuO ve Cu₂O fotodedektör üretmek için, p-CuO/n-si ve p-Cu₂O/n-Si yapılarının p yüzeyi üzerine bir metal maske yardımıyla Alüminyum (Al) IDE (İnterdigitated Electrode) kontaklar oluşturulmuştur. Kullanılan metal maskenin şematik diyagramı şekil 24’te gösterilmiştir.



Şekil 24. Metal maskenin şematik diyagramı.

Üretim ve dış elektronik sistemlere entegrasyon kolaylığı nedeniyle üstten aydınlatmalı fotodedektör yapısı tercih edilmiştir. Üretilen fotodedektörlerden akım-gerilim ölçümlerinin kolay alınabilmesi için kontak noktaları kare şeklinde tasarlanmıştır. Üretimi gerçekleştirilen fotodedektörlere ait görseller ve şematik diyagramları şekil 25’te verilmiştir.



Şekil 25. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörler.

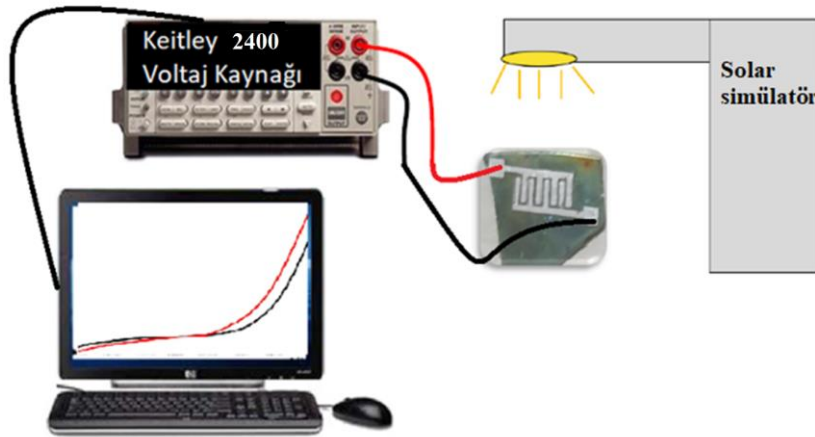
Fotodedektörlerin Elektriksel ve Optoelektronik Karakterizasyonu

Akım-Voltaj (I-V) Ölçümü

Akım-Voltaj karakteristiği, elektronik veya optoelektronik cihazlar üretildiğinde ilk olarak incelenen grafiklerdir. Akım-Voltaj grafikleri üretilen cihazın performansı hakkında bilgi verir. Aynı zamanda cihazın davranışı hakkında (omik ya da doğrultucu) da bilgi edinilir. Bu çalışmada üretilen cihazların Akım-Voltaj ölçümleri iki nokta ölçüm tekniği kullanılarak karanlıkta ve 100 mW/cm^2 aydınlatma gücünde, AM 1,5, class A, HelioSim CL60 solar simülatör ile gerçekleştirilmiştir. Cihazların iki kontağı arasına $-1,5 \text{ V}$ ve $+1,5 \text{ V}$ aralığında voltaj uygulanarak kontaklar arasından geçen akım karanlıkta ve ışık altında ölçüldü.

Fotodedektörler gibi ışığa tepki veren optoelektronik cihazlar ışık altında ve karanlıkta farklı elektriksel özellikler gösterir. Bu nedenle cihazların iki farklı ortamda I-V ölçümleri alınmaktadır. Karanlık ortamda alınan I-V ölçümleri karanlık akım ölçümleridir. Fotodedektör üzerine cevap verebileceği bir dalga boyunda ışık düşürülerek alınan I-V ölçümleri ise ışık altındaki I-V ölçümüdür. Bu tez çalışmasında örneklerin I-V ölçümleri için kullanılan sistem şekil 26'da verilmiştir.

Fotodedektörlerin, I-V grafiklerinden yararlanarak, doğrultma oranı (RR), doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 26. I-V ölçüm sistemi.

Akım-Zaman (I-t) Ölçümü

Şekil 26’da gösterilen sistemde Keithley 2400 voltaj kaynağı yerine Keithley 487 Picoammeter/Voltage Source kullanarak, fotodedektörlerin ışığa tepkisini (photoresponse) belirlemek için, 100 mW/cm² ışık gücü altında 0,5 V’lik aralıklarla -1,5 V den 1,5 V’ye kadar ölçümler alınmıştır. Her bir voltaj değeri için fotodedektörlerin yanıt zamanı (response time) ışık kaynağının 5 saniyede bir, 100 saniye boyunca manuel olarak açıp kapatılmasıyla ölçülmüştür. Alınan ölçümler neticesinde fotodedektörlere ait yükselme zamanı (rise time) ve düşme zamanı (fall time) origin programı yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan yanıt zamanları fotodedektörlerin hızları hakkında bilgi verir. Daha kısa yanıt zamanı üretilen fotodedektörün kaliteli olduğunu gösterir.

Foto duyarlılık (PS), fotodetektörden geçen karanlık akıma göre fotoakımdaki artış yüzdesini belirleyen bir parametredir. Foto duyarlılık aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır.

$$PS = \frac{I_{aydınlık} - I_{karanlık}}{I_{karanlık}} \times 100\% \quad (69)$$

Burada $I_{aydınlık}$ ve $I_{karanlık}$, sırasıyla aydınlık ve karanlıktaki akım değerleridir.

Spektral Duyarlılık ve Kuantum Verimi

Fotodedektörlerin spektral duyarlılığı (SR) ve kuantum verimi (η), Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü’nde bulunan Sciencetech firmasından satın alınmış PTS-2-QE model kuantum verimi ölçüm sistemi ile ölçülmüştür.

Spektral duyarlılık ve kuantum verimi, fotodedektörün optoelektronik uygulamalar için duyarlılığı belirlemesini sağlamak için dikkate alınması gereken iki önemli parametredir. Spektral duyarlılık, fotodedektörün ışığın hangi dalga boylarında çalıştığını belirlemesi açısından fotodedektörler için önemli bir parametredir.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

CuO ve Cu₂O İnce Filmler ile Sülfürlenmiş CuO ve Cu₂O İnce Filmlerin Yapısal Karakterizasyon

X-Işını Kırınımı (XRD) Ölçümleri

Bu çalışmada CuO ve Cu₂O ince filmler DC Magnetron saçırma yöntemi kullanılarak cam ve n- tipi silisyum altlıklar üzerine büyütülmüştür. CuO ve Cu₂O ince filmlerin elde edilebilmesi için farklı büyütme parametreleri denenerek bir dizi büyütme yapılmıştır. Cam ve n- tipi silisyum altlıklar üzerine büyütülen CuO ince filmler tavlama fırınında, 300 °C, 400 °C ve 450 °C’de, 1 saat boyunca hava ortamında tavlansmıştır. Büyütülen ince filmlerin yapısal analizi D-2 Phaser Bruker (CuK_α = 1,5406 Å) markalı X-ışını kırınımı (XRD) ölçüm cihazı ile yapılmıştır. XRD analizleri sonucunda en iyi kristal yapıya sahip ince filmler belirlenmiştir. En iyi kristal yapıya sahip CuO ve Cu₂O ince filmlerin büyütme parametreleri tablo 3’te verilmiştir.

Numunelerin her birinin tanecik boyutunu hesaplamak için Scherrer formülü kullanılmıştır (Patterson 1939).

$$D = \frac{k\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (70)$$

Burada D kristalin tanecik boyutu, λ kullanılan x-ışını dalga boyu, β yarı yükseklik genişliği, θ Bragg’ın kırınım açısı ve $k = 0,9$ olarak verilen bir sabittir.

Kristal düzlemler arasındaki mesafe (d-değeri) Bragg eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (71)$$

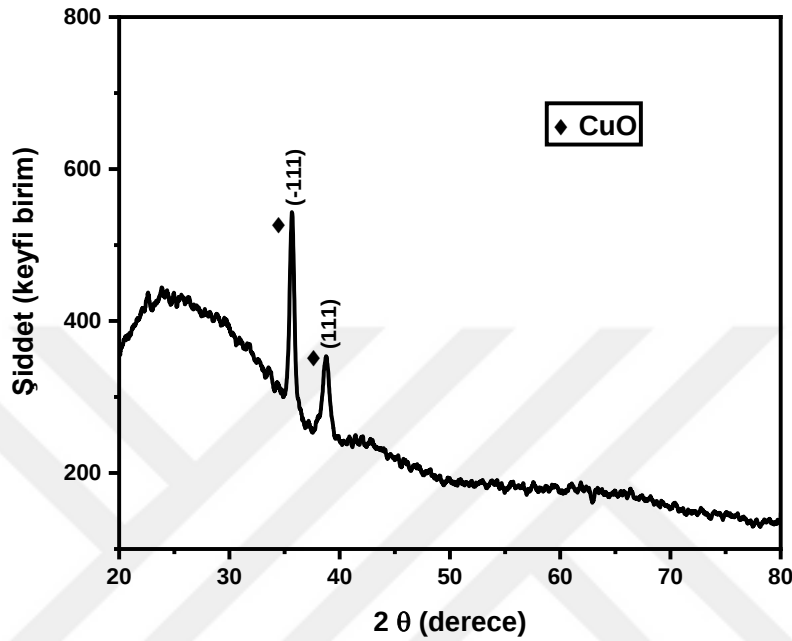
ya da

$$d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (72)$$

Burada d kristal düzlemler arasındaki mesafe, n kırınım sırası, λ gelen x-ışınının dalga boyu ($\lambda = 1,5406 \text{ Å}$), θ ise radyan cinsinden gelen ve yansıyan ışının düzlemle yaptığı açıdır.

Büyütülen numunelerin kalınlıkları spektroskopik elipsometre cihazı kullanılarak ölçülmüştür. Ölçüm sonuçlarına göre CuO ince filmlerin kalınlığı 394 nm, Cu₂O ince filmlerin kalınlığı ise 119 nm olarak belirlenmiştir.

Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği şekil 27’de verilmiştir.



Şekil 27. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği.

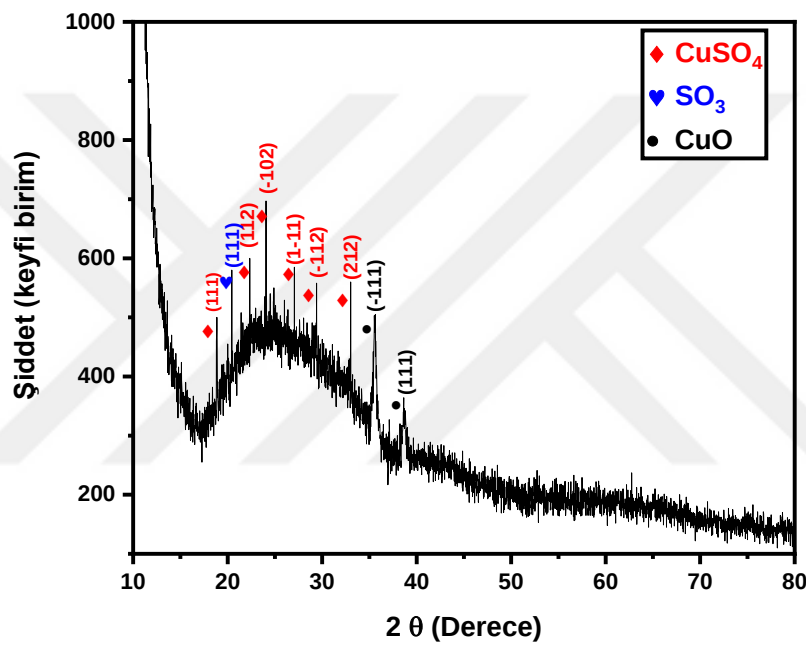
Şekil 27’de CuO’nun cam altlık yüzeyine başarılı bir şekilde büyüdüğü açıkça görülmektedir. CuO ince filmin XRD analizi sonucunda 35.56°’de ve 38.77°’de CuO’ya ait iki belirgin pik görülmüştür ve bu pikler sırasıyla (-111) ve (111) yönelimine sahip karakteristik piklerdir (COD database code 9019105). Cam altlık yüzeyine büyütülen CuO’nun monoklinik yapıda kristalize olduğu XRD analizi sonucunda görülmüştür. Ek olarak, XRD analizinde tek bir CuO fazı oluşumu tespit edilmiş ve bunun dışında hiçbir pike rastlanmamıştır. Tablo 4’te görüleceği üzere ölçülen bazı pik değerlerinde literatürdeki pik değerinden kaymalar olmuştur. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların neden olduğu düşünülmektedir.

Denklem 70 ve 72’den yararlanılarak cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 4. Cam Altlık Üzerine Büyütülen CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen 2 θ (°)	Literatür 2 θ (°)	d-değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
Cam	CuO	(-111)	0,315	35,83	35.56	2,50	27,2	Monoklinik
		(111)	0,472	38,86	38.77	2,31	18,2	Monoklinik

Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği şekil 28’de verilmiştir.

**Şekil 28.** Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.

Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince film 300 °C’de 3 dakika sülfürlendi. Sülfürleme işleminin CuO ince filmin yapısal özelliklerine etkisini belirlemek için XRD ölçümü yapıldı. Sülfürleme ile ince filmde CuO’ya ait $2\theta = 35,56^\circ$ ve $38,63^\circ$ derecelerde sırasıyla (-111) ve (111) yönelimli piklere ek olarak, sülfürlemeyle birlikte film yüzeyinde, CuSO₄ yapısının oluştuğunu gösteren $2\theta = 18,85^\circ$, $22,34^\circ$, $24,07^\circ$, $29,41^\circ$, $27,06^\circ$ ve $33,02^\circ$ ’de sırasıyla (111), (112), (-102), (-112) ve (212) yönelimli pikler elde edilmiştir (COD database code 1010527). Aynı zamanda $2\theta = 20,43^\circ$ ’de (111) yönelimine sahip SO₃ yapısına işaret eden belirgin bir pik de görülmektedir (COD database code 9011060).

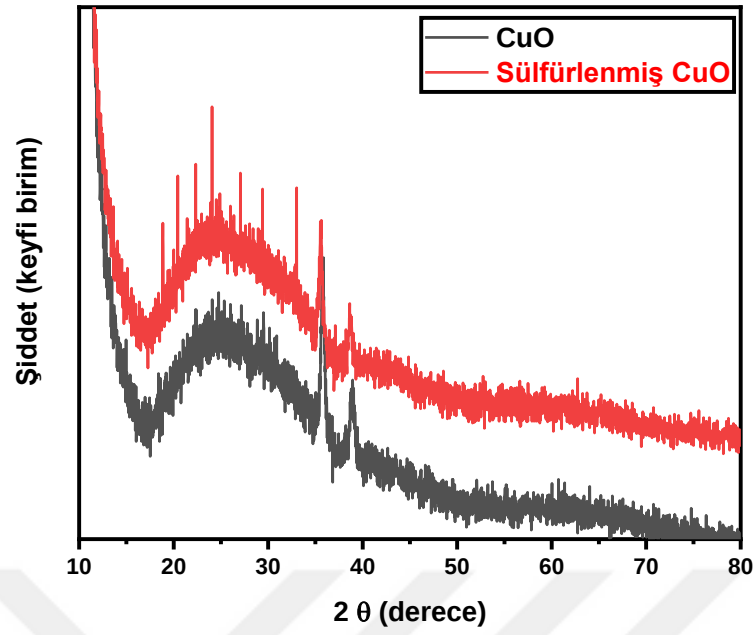
Denklem 70 ve 72’den yararlanılarak cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen 2 θ (°)	Literatür 2 θ (°)	d-değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
Cam	CuSO ₄	(111)	0,138	18,85	18,73	4,70	61,9	Triklinik
		(112)	0,118	22,34	22,38	3,97	73,6	Triklinik
		(-102)	0,118	24,07	24,00	3,69	73,8	Triklinik
		(1-11)	0,394	27,06	26,97	3,30	21,2	Triklinik
		(-112)	0,394	29,41	29,30	3,03	21,3	Triklinik
		(212)	0,059	33,02	32,79	2,71	162,5	Triklinik
	SO ₃	(111)	0,090	20,43	20,43	4,34	98,4	Ortorombik
	CuO	(-111)	0,197	35,56	35,56	2,52	44,1	Monoklinik
		(111)	0,315	38,68	38,77	2,32	27,4	Monoklinik

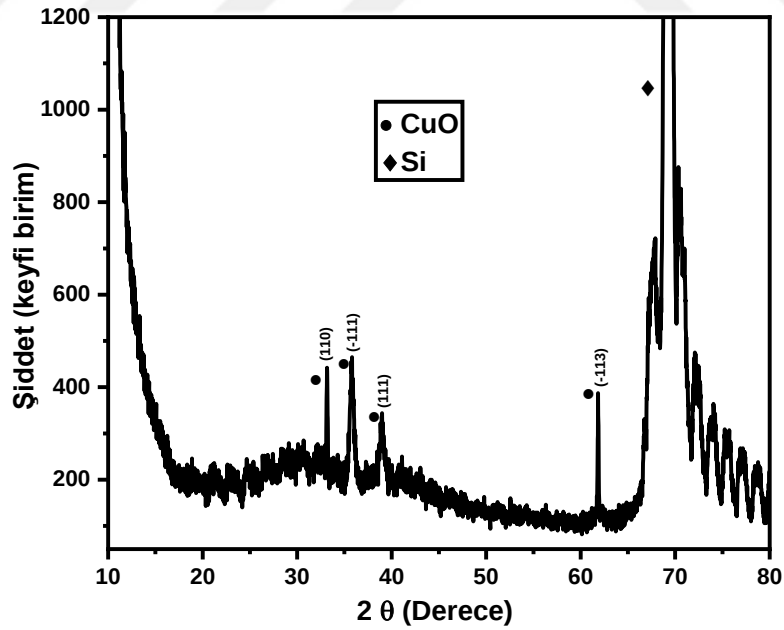
Cam altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin yapısal parametreleri incelendiğinde sülfürlemeyle birlikte CuO'ya ait (-111) ve (111) yönelimli piklerin FWHM değerinin azalırken tanecik boyutunun arttığı görülmektedir. FWHM değerindeki azalma ve kristal tanecik boyutundaki artış ince filmdeki stresin azaldığı anlamına gelir ki bu da bize, CuO ince filmin kristal kalitesinin sülfürleme ile arttırılabileceğini gösterir. Sülfürleme işlemi neticesinde, ince film yüzeyinde CuSO₄ ve SO₃ kristallerinin oluşumuyla birlikte ortalama kristal tanecik boyutu da artmıştır. Sülfürleme sonrasında CuO'ya ait pik değerlerinde kaymalar meydana gelmiştir. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların, kristal taneciklerinin boyutundaki değişikliğin ve ince film kompozisyonundaki değişikliğin neden olduğu düşünülmektedir.

Cam altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği şekil 29'da karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 29. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin XRD grafiği.

Şekil 30’da CuO’nun n-tipi silisyum altlık yüzeyine başarılı bir şekilde büyüdüğü açıkça görülmektedir. CuO ince filmin XRD analizi sonucunda 33.16°, 35.77°, 38.96° ve 61.84°’de

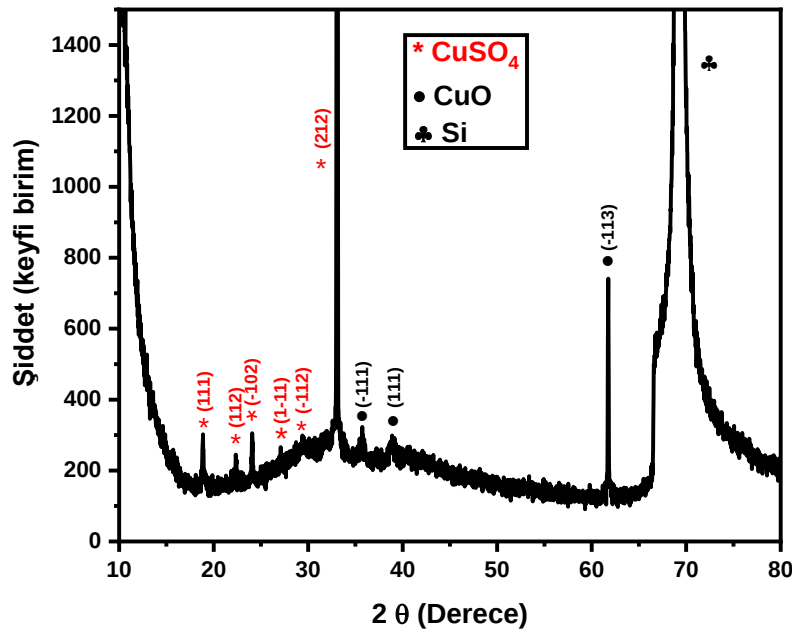
CuO'ya ait pikler belirgin bir şekilde gözlenmiştir. CuO'ya ait bu pikler sırasıyla (110), (-111), (111) ve (-113) yönelimine sahip karakteristik piklerdir (COD database code 9008961). n-tipi silisyum altlık yüzeyine büyütülen CuO'nun monoklinik yapıda kristalize olduğu XRD analizi sonucunda görülmüştür. Ek olarak, XRD analizinde tek bir CuO fazı oluşumu tespit edilmiştir. Tablo 6'da görüleceği üzere ölçülen bazı pik değerleri literatürdeki pik değerinden kaymalar olmuştur. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların neden olduğu düşünülmektedir.

Denklem 70 ve 72'den yararlanılarak n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen 2 θ (°)	Literatür 2 θ (°)	d-değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
n-tipi silisyum	CuO	(110)	0,157	33,16	32,69	2,70	55,6	Monoklinik
		(-111)	0,394	35,77	35,73	2,50	21,6	Monoklinik
		(111)	0,945	38,96	38,92	2,31	9	Monoklinik
		(-113)	0,098	61,84	61,86	1,50	102,9	Monoklinik

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince film 300 °C’de 3 dakika sülfürlendi. Sülfürleme işleminin CuO ince filmin yapısal özelliklerine etkisini belirlemek için XRD ölçümü yapıldı. Sülfürleme ile ince filmde CuO’ya ait (110) yönelimli pikin kaybolduğu, (-111) ve (111) yönelimli piklerin ise şiddetinin azalırken (-113) yönelimli pikin şiddetinin arttığı görülmüştür. Ek olarak sülfürlemeyle birlikte film yüzeyinde, CuSO₄ yapısının oluştuğunu gösteren $2\theta = 18,85^\circ, 22,34^\circ, 24,07^\circ, 27,06^\circ, 29,53^\circ$ ve $33,02^\circ$ ’de sırasıyla (111), (112), (-102), (1-11) (-112) ve (212) yönelimli pikler elde edilmiştir (COD database code 1010527).

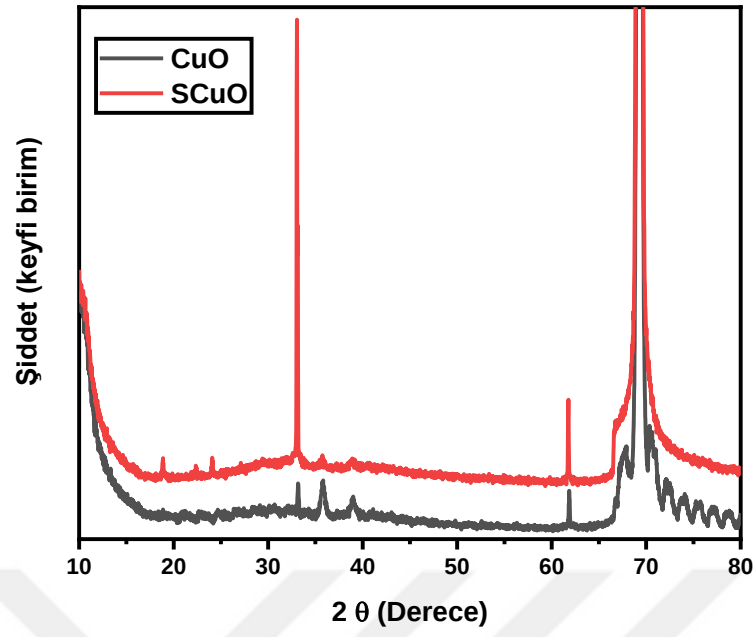
Denklem 70 ve 72’den yararlanılarak n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 7’de verilmiştir.

Tablo 7. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş CuO İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	d- değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
n-tipi silisyum	CuO	(-111)	0,118	35,71	35,73	2,51	75,9	Monoklinik
		(111)	0,629	38,92	38,92	2,31	13,6	Monoklinik
		(-113)	0,098	61,75	61,86	1,50	102,9	Monoklinik
	CuSO ₄	(111)	0,137	18,85	18,73	4,70	62,4	Triklinik
		(112)	0,118	22,34	22,38	3,97	73,6	Triklinik
		(-102)	0,118	24,07	24,00	3,69	73,8	Triklinik
		(1-11)	0,393	27,06	26,96	3,29	21,2	Triklinik
		(-112)	0,275	29,53	29,29	3,02	30,8	Triklinik
		(212)	0,059	33,02	32,79	2,71	162,5	Triklinik

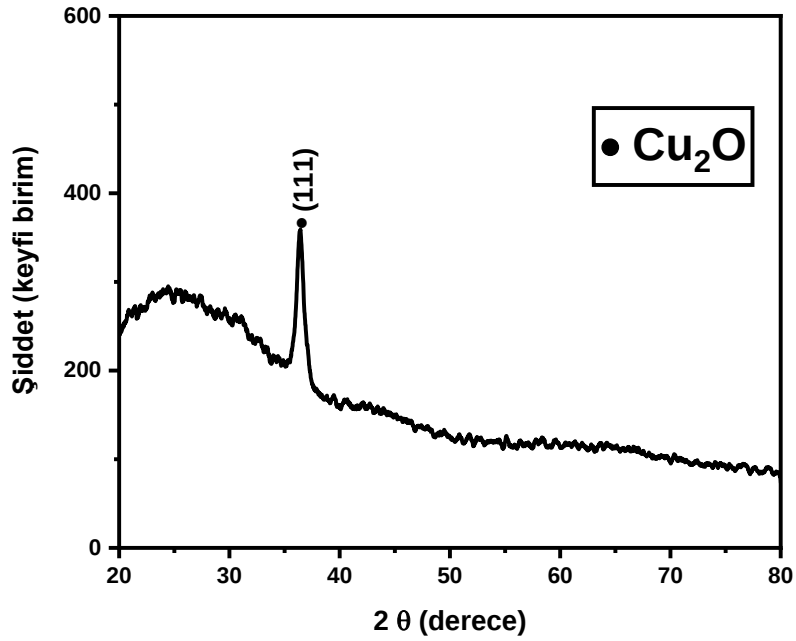
Tablo 7’deki verilerden anlaşılaçağı üzere, sülfürleme işlemi neticesinde CuO nano parçacıkların (-111), (111) ve (-113) yönelimli piklerin FWHM değeri azalırken kristal tanecik boyutları artmıştır. FWHM değerindeki azalma ve kristal tanecik boyutundaki artış ince filmdeki stresin azaldığı anlamına gelir ki bu da bize, CuO ince filmin kristal kalitesinin sülfürleme ile artırılabilceğini gösterir. Bununla birlikte sülfürleme işlemiyle birlikte CuO ince film yüzeyinde oluşan CuSO₄ yapısı da ince filmin ortalama kristal tanecik boyutunun artmasına neden olmuştur. Sülfürleme sonrasında CuO’ya ait pik değerlerinde kaymalar meydana gelmiştir. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların, kristal taneciklerinin boyutundaki değişikliğin ve ince film kompozisyonundaki değişikliğin neden olduğu düşünülmektedir.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiğı karşılaştırmalı olarak şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ve sülfürlenmiş CuO ince filmin XRD grafiği.

Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin XRD grafiği şekil 33'te verilmiştir.



Şekil 33. Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin XRD grafiği.

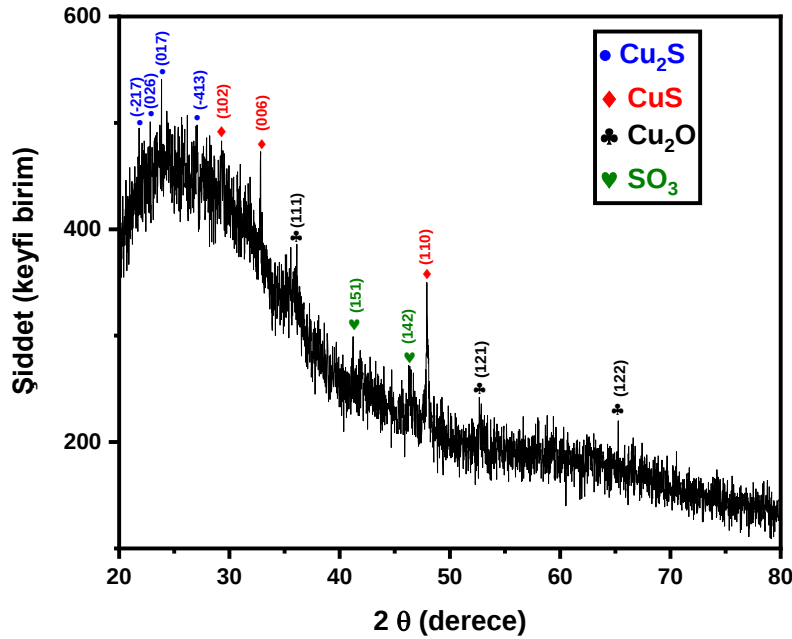
Şekil 33'te Cu_2O 'nun cam altlık yüzeyine başarılı bir şekilde büyüdüğü açıkça görülmektedir. Cu_2O ince filmin XRD analizi sonucunda $36,42^\circ$ 'de Cu_2O 'ya ait belirgin bir pik görülmüştür ve bu pik (111) yönelimine sahip karakteristik piktir (COD database code 9007497). Cam altlık yüzeyine büyütülen Cu_2O 'nun kübik yapıda kristalize olduğu XRD analizi sonucunda görülmüştür. Ek olarak, XRD analizinde tek bir Cu_2O fazı oluşumu tespit edilmiş ve bunun dışında hiçbir pike rastlanmamıştır.

Denklem 70 ve 72'den yararlanılarak cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	d-değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
Cam	Cu_2O	(111)	0,472	36,42	36,42	2,49	18,0	Kübik

Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 34. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği.

Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince film $300\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 3 dakika sülfürlendi. Sülfürleme işleminin Cu_2O ince filmin yapısal özelliklerine etkisini belirlemek için XRD ölçümü yapıldı. Sülfürleme ile ince filmde Cu_2O ait $2\theta = 36,35^\circ$, $52,64^\circ$ ve $65,25^\circ$ derecelerde sırasıyla (111), (121) ve (122) yönelimli piklere ek olarak, sülfürlemeyle birlikte film yüzeyinde, Cu_2S yapısının oluştuğunu gösteren $2\theta = 21,85^\circ$, $22,82^\circ$, $23,85^\circ$, $27,08^\circ$ 'de sırasıyla (-217), (026), (017), (-413) yönelimli pikler elde edilmiştir (COD database code 9016504). Aynı zamanda $2\theta = 41,21^\circ$ ve $46,34^\circ$ 'de (151), (142) yönelimine sahip SO_3 yapılarına işaret eden belirgin pikler de görülmektedir (COD database code 9011060). Dahası, $2\theta = 29,27^\circ$, $32,83^\circ$ ve $47,91^\circ$ 'de sırasıyla (102), (006) ve (110) yönelimine sahip CuS yapısına ait pikler de görülmektedir (COD database code 9000524).

Denklem 70 ve 72'den yararlanılarak cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 9'da verilmiştir.

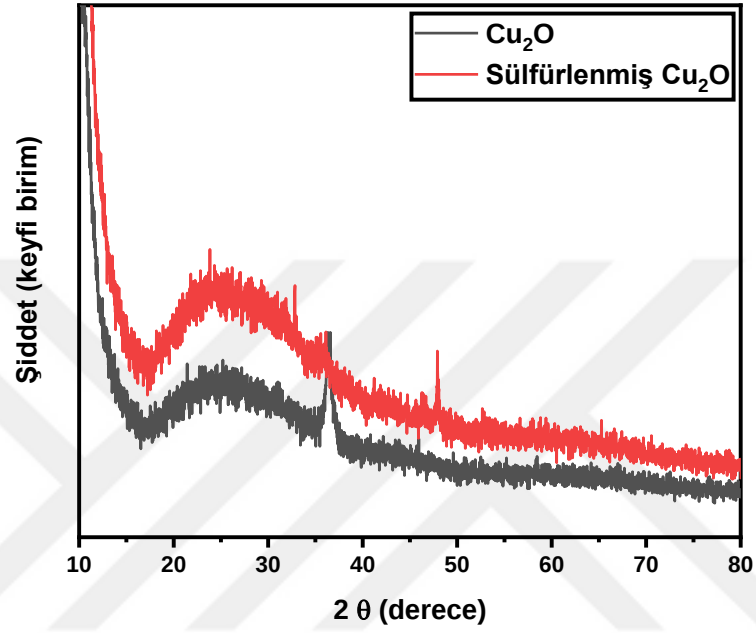
Tablo 9. Cam Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^\circ)$	Literatür $2\theta(^\circ)$	d-değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
Cam	Cu_2O	(111)	0,157	36,35	36,42	2,47	56,1	Kübik
		(121)	0,078	52,64	52,44	1,73	126,6	Kübik
		(122)	0,090	65,25	65,53	1,42	115	Kübik
	Cu_2S	(-217)	0,944	21,85	21,84	4,06	8,6	Monoklinik
		(026)	0,090	22,82	22,81	3,89	98,8	Monoklinik
		(071)	0,944	23,83	23,82	3,73	8,7	Monoklinik
		(-413)	0,078	27,08	27,07	3,29	116,7	Monoklinik
	SO_3	(151)	0,090	41,21	41,25	2,18	103,5	Ortorombik
		(142)	0,236	46,34	46,68	1,95	37,9	Ortorombik
	CuS	(102)	0,059	29,27	29,27	3,05	161	Hegzagonal
		(006)	0,059	32,83	32,85	2,72	162,4	Hegzagonal
		(110)	0,059	47,91	47,91	1,89	170,5	Hegzagonal

Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filme ait tablo 9'da verilen yapısal parametreler incelendiğinde, sülfürleme neticesinde Cu_2O 'ya ait (111) yönelimine sahip pikin FWHM değeri azalırken kristal tanecik boyutun arttığı görülmektedir. FWHM değerindeki azalma ve kristal tanecik boyutundaki artış ince filmdeki stresin azaldığı anlamına gelir ki bu da bize, Cu_2O ince filmin kristal kalitesinin sülfürleme ile artırılabilceğini gösterir. Sülfürlemeyle birlikte Cu_2O 'nun yanında Cu_2S , SO_3 ve CuS yapılarının oluşmasının, ince film yüzeyindeki ortalama tanecik boyutunu arttırdığı açıktır. Sülfürleme sonrasında Cu_2O 'ya ait

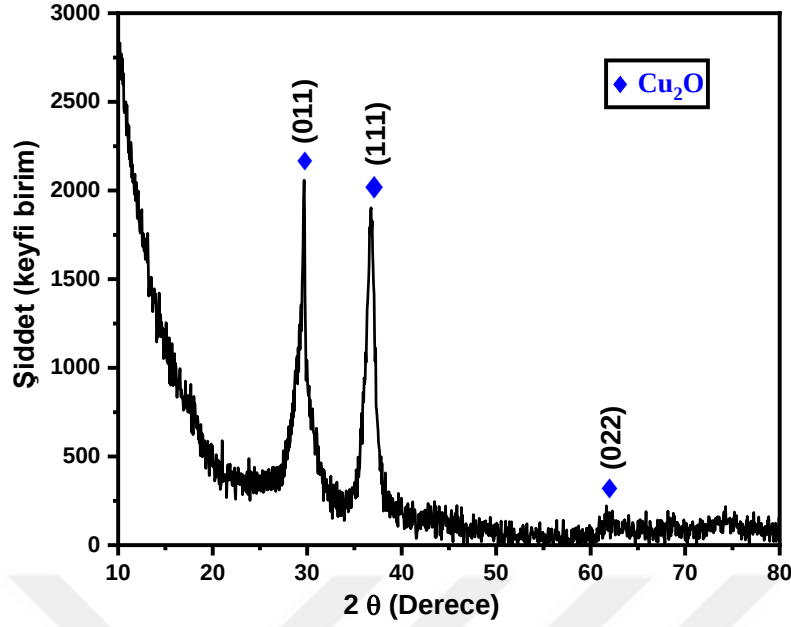
pik değerlerinde kaymalar meydana gelmiştir. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların, kristal taneciklerinin boyutundaki değişikliğin ve ince film kompozisyonundaki değişikliğin neden olduğu düşünülmektedir.

Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ve sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği karşılaştırmalı olarak şekil 35'te verilmiştir.



şekil 35. Cam  zerine büyütülen Cu_2O ve sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin XRD grafiği şekil 36'da verilmiştir.



Şekil 36. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin XRD grafiği.

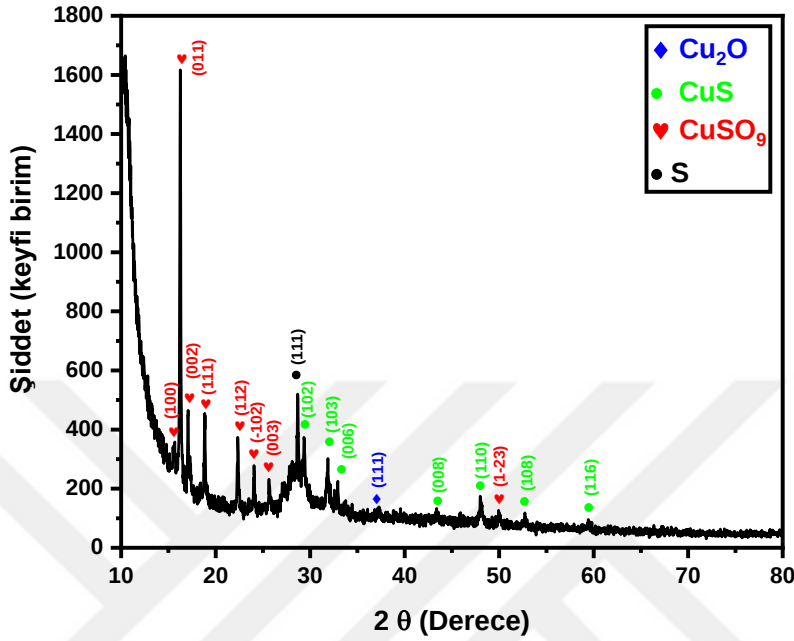
Şekil 36’da Cu_2O ’nun n-tipi silisyum altlık yüzeyine başarılı bir şekilde büyüdüğü açıkça görülmektedir. Cu_2O ince filmin XRD analizi sonucunda $2\theta = 29,74^\circ, 36,69^\circ$ ve $61,67^\circ$ ’de Cu_2O ’ya ait belirgin pikler görülmüştür ve bu pikler sırasıyla (011), (111) ve (022) yönelimine sahip karakteristik piklerdir (COD database code 1000064). n-tipi silisyum altlık yüzeyine büyütülen Cu_2O ’nun kübik yapıda kristalize olduğu XRD analizi sonucunda görülmüştür. Ek olarak, XRD analizinde tek bir Cu_2O fazı oluşumu tespit edilmiş ve bunun dışında hiçbir pike rastlanmamıştır. Tablo 10’da görüleceği üzere ölçülen bazı pik değerleri literatürdeki pik değerinden kaymalar olmuştur. Bu kaymalara büyütme esnasında numuneye bulaşan kirlilikler ve safsızlıkların neden olduğu düşünülmektedir.

Denklem 70 ve 72’den yararlanılarak n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	d- değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
n-tipi silisyum	Cu_2O	(011)	0,156	29,74	29,69	3,00	55,5	Kübik
		(111)	0,312	36,69	36,57	2,44	27,5	Kübik
		(022)	0,312	61,67	61,64	1,50	82,6	Kübik

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği şekil 37’de verilmiştir.



Şekil 37. n-tipi silisyum üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince film $300\text{ }^\circ\text{C}$ ’de 3 dakika sülfürlendi. Sülfürleme işleminin Cu_2O ince filmin yapısal özelliklerine etkisini belirlemek için XRD ölçümü yapıldı. Sülfürleme ile ince filmde Cu_2O ’ya ait (011) ve (022) yönelimli piklerin kaybolduğu, (111) yönelimli pikin şiddetinin ise oldukça azaldığı görülmüştür. Bunun nedeni olarak ince film yüzeyinde oluşan yeni yapıların Cu_2O partiküllerinin üzerini tamamen örtmesi gösterilebilir. Ek olarak sülfürlemeyle birlikte film yüzeyinde, CuS yapısının oluştuğunu gösteren $2\theta = 29,35^\circ, 31,85^\circ, 32,91^\circ, 43,38^\circ, 48,01^\circ, 52,79^\circ$ ve $59,39^\circ$ de sırasıyla (102), (103), (006), (008), (110), (108) ve (116) yönelimli belirgin pikler gözlenmiştir (COD database code 9008390). Ayrıca $2\theta = 28,68^\circ$ ’de (111) yönelimine sahip S yapısına ait belirgin bir pik gözlenmiştir (COD database code 1538550). Dahası, CuSO_4 yapısına ait olduğu anlaşılan $2\theta = 15,60^\circ, 16,25^\circ, 17,06^\circ, 18,84^\circ, 22,66^\circ, 24,07^\circ, 25,64^\circ$ ve $49,96^\circ$ ’de sırasıyla (100), (011), (002), (111), (112), (-102), (003) ve (1-23) yönelimine sahip belirgin pikler gözlenmiştir (COD database code 9014406).

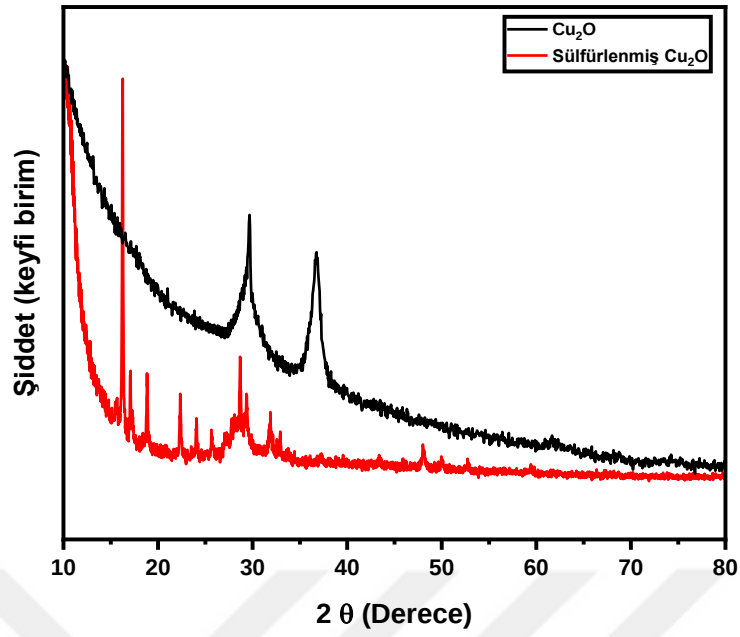
Denklem 70 ve 72'den yararlanılarak n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin yapısal parametreleri hesaplanmış ve bunlar tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11. n-Tipi Silisyum Altlık Üzerine Büyütülen Sülfürlenmiş Cu_2O İnce Filmin Bazı Yapısal Parametreleri

Altlık	Kristal	(hkl)	Yarı yükseklik genişliği (FWHM)	Gözlenen $2\theta(^{\circ})$	Literatür $2\theta(^{\circ})$	d- değeri (Å)	Kristal tanecik boyutu (D) (nm)	Kristal sistemi
n-tipi silisyum	Cu_2O	(111)	0,312	36,69	36,57	2,44	27,5	Kübik
		(102)	0,137	29,35	29,36	3,04	63,7	Hegzagonal
		(103)	0,196	31,85	31,88	2,80	43,9	Hegzagonal
		(006)	0,078	32,91	32,96	2,72	118,3	Hegzagonal
	CuS	(008)	0,314	43,38	44,45	2,08	27,9	Hegzagonal
		(110)	0,078	48,01	48,07	1,89	124,2	Hegzagonal
		(108)	0,314	52,79	52,90	1,73	29	Hegzagonal
		(116)	0,196	59,39	59,52	1,55	48,6	Hegzagonal
	S	(111)	0,137	28,68	28,63	3,11	63,6	Tetragonal
		(100)	0,157	15,60	15,58	5,67	53,8	Triklinik
		(011)	0,098	16,25	16,12	5,45	90,6	Triklinik
		(002)	0,078	17,06	17,02	5,19	114,8	Triklinik
	CuSO_9	(111)	0,098	18,84	18,73	4,70	89,5	Triklinik
		(112)	0,098	22,36	22,38	3,97	90	Triklinik
		(-102)	0,098	24,07	24,00	3,69	90,3	Triklinik
		(003)	0,098	25,64	25,64	3,47	90,5	Triklinik
		(1-23)	0,236	49,96	49,96	1,82	38,4	Triklinik

Tablo 11'deki veriler incelendiğinde, sülfürleme ile Cu_2O ince film yüzeyinde oluşan sülfür nano parçacıklı farklı yapıların kristal tanecik boyutlarının birbirlerinden oldukça farklı oldukları anlaşılmaktadır. Yine tablodaki verilerden ince filmin ortalama tanecik boyutunun arttığı da anlaşılmaktadır.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ve sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin XRD grafiği karşılaştırmalı olarak şekil 38'de verilmiştir.

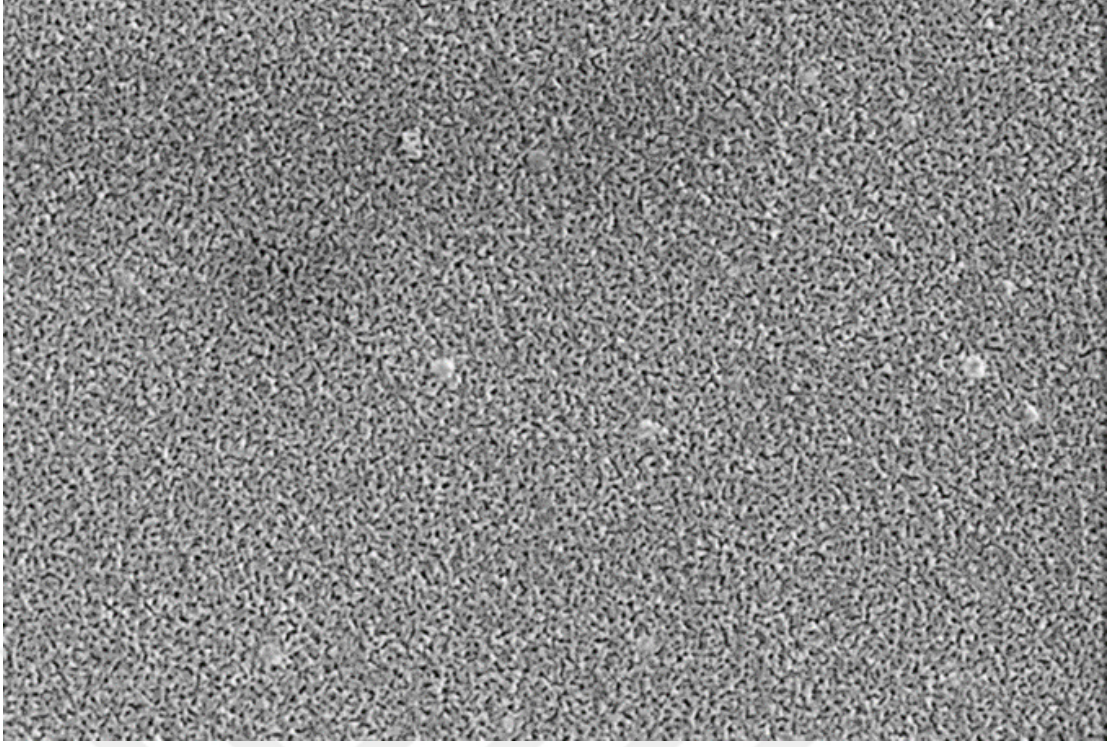


Şekil 38. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu₂O ve sülfürlenmiş Cu₂O ince filmin XRD grafiği.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ölçümleri

X-ışını kırınımı (XRD) ölçümleri alınan ince filmlerin morfolojik özelliklerini incelemek için, Doğu Anadolu Yüksek Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (DAYTAM) ileri spektroskopi laboratuvarındaki Zeiss marka Sigma 300 modeli SEM cihazı kullanılmıştır. İnce filmlerin SEM görüntüleri inlens dedektör ile 50.000 büyütmede 2 µm ölçekte alınmıştır.

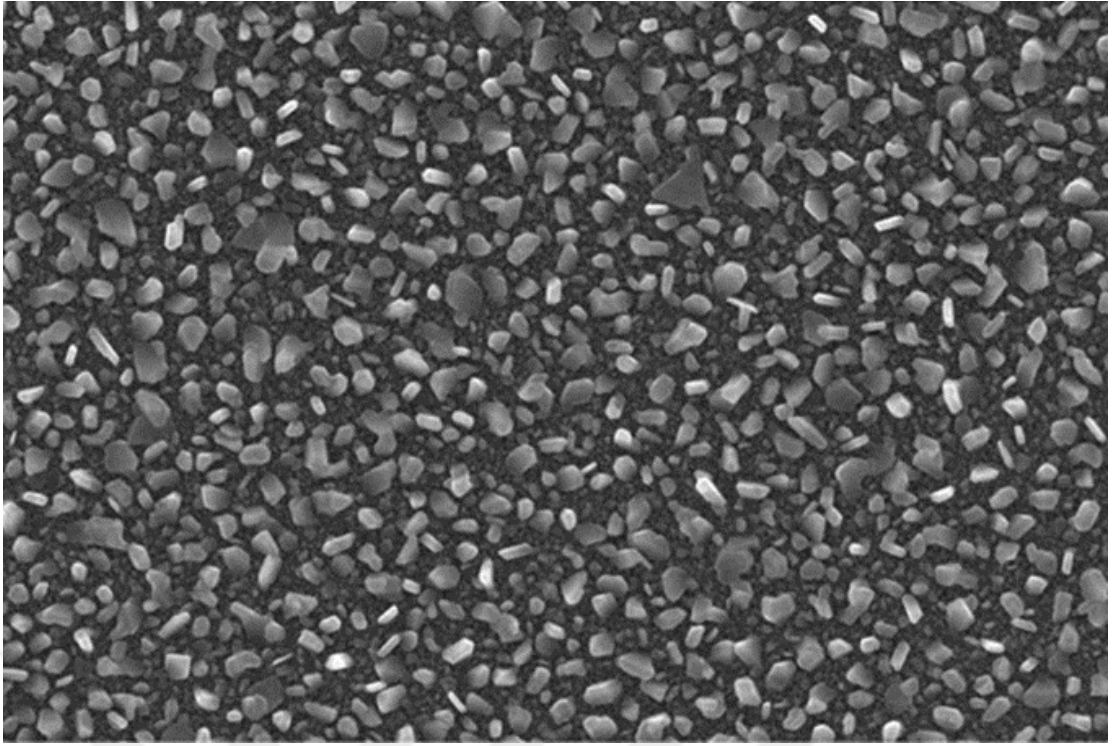
Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü şekil 39’da verilmiştir.



Şekil 39. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 39’da verilen SEM görüntüsü incelendiğinde, CuO kristallerinin cam altlık yüzeyine homojen bir şekilde biriktiği görülmektedir. Aynı zamanda CuO ince film yüzeyinde belirgin bir kusur görülmemektedir. SEM görüntüsünden, cam altlık yüzeyinde periyodik ve nano tanecikli yapıda büyümenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. CuO ince filmin bazı bölgelerinde az da olsa topaklanma şeklinde büyümeler olduğu görülmektedir. Ayrıca, farklı tanecik boyutlarında kristalleşmenin gerçekleştiği de SEM görüntüsünde görülmektedir. Cam altlık üzerine biriktirilen CuO nano kristallerinin kristal tane sınırları SEM görüntüsünden görülmektedir. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar. Bunun yanında, SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal taneciklerinin nano ölçekte ve boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır.

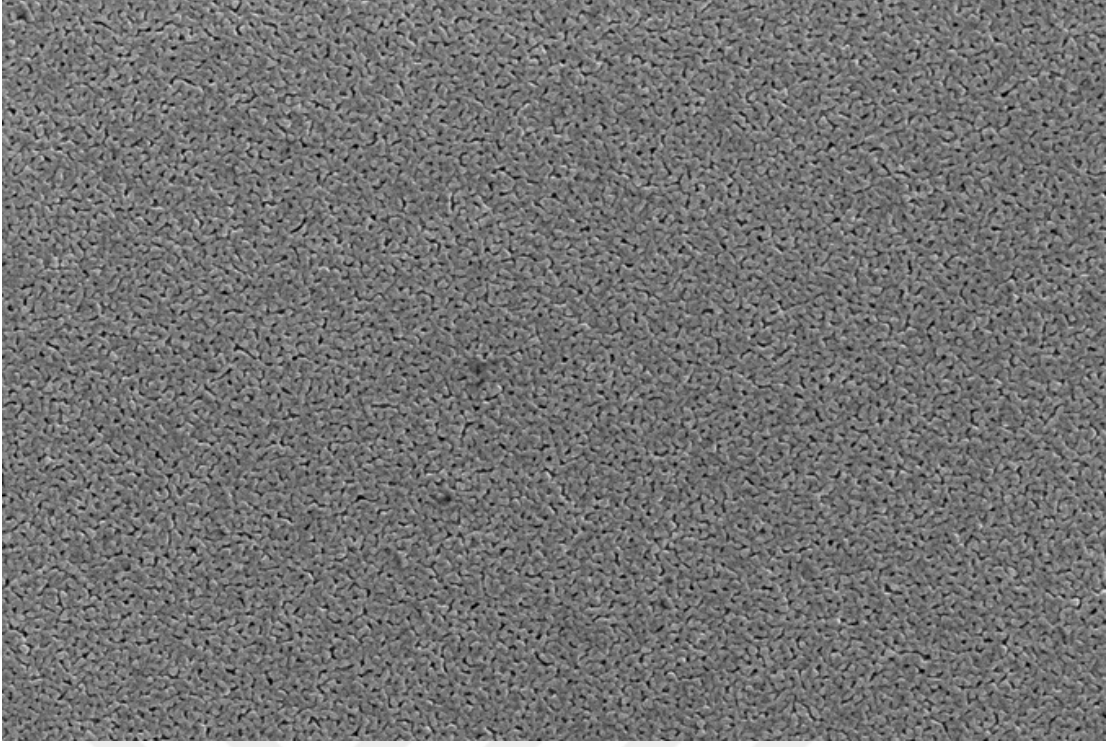
Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü şekil 40’ta verilmiştir.



Şekil 40. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 40'ta verilen SEM görüntüsü incelendiğinde büyük boyutlu sülfür kristallerinin CuO ince filmin üzerine homojen bir şekilde biriktiği net olarak görülmektedir. Sülfür kristallerinin, CuO nano kristal taneciklerinden boyut olarak büyük olduğu ve farklı tanecik boyutlarında olduğu da yine SEM görüntüsünden açık bir şekilde görülebilmektedir. SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal tanecik boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. Ayrıca, sülfürleme işlemiyle CuO nano kristallerin tanecik boyutunda artış olduğu SEM görüntüsünün yanında XRD sonuçlarından elde edilen verilerden de anlaşılmaktadır. Sülfürlemeyle birlikte CuO kristal taneciklerinin büyümesi tane sınırlarını da azaltmıştır. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar. Sülfürleme neticesinde tane sınırlarının küçülmesi malzemenin kusurlarının azaldığı anlamına gelir. SEM ve XRD sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak sülfürleme işleminin cam yüzeyine büyütülen CuO ince filmin ortalama kristal tanecik boyutunu arttırdığı söylenebilir. Sülfür kristalleri arasındaki belirgin olarak görülebilen boşlukların sülfürleme işleminin süresine bağlı olduğu da düşünülmektedir.

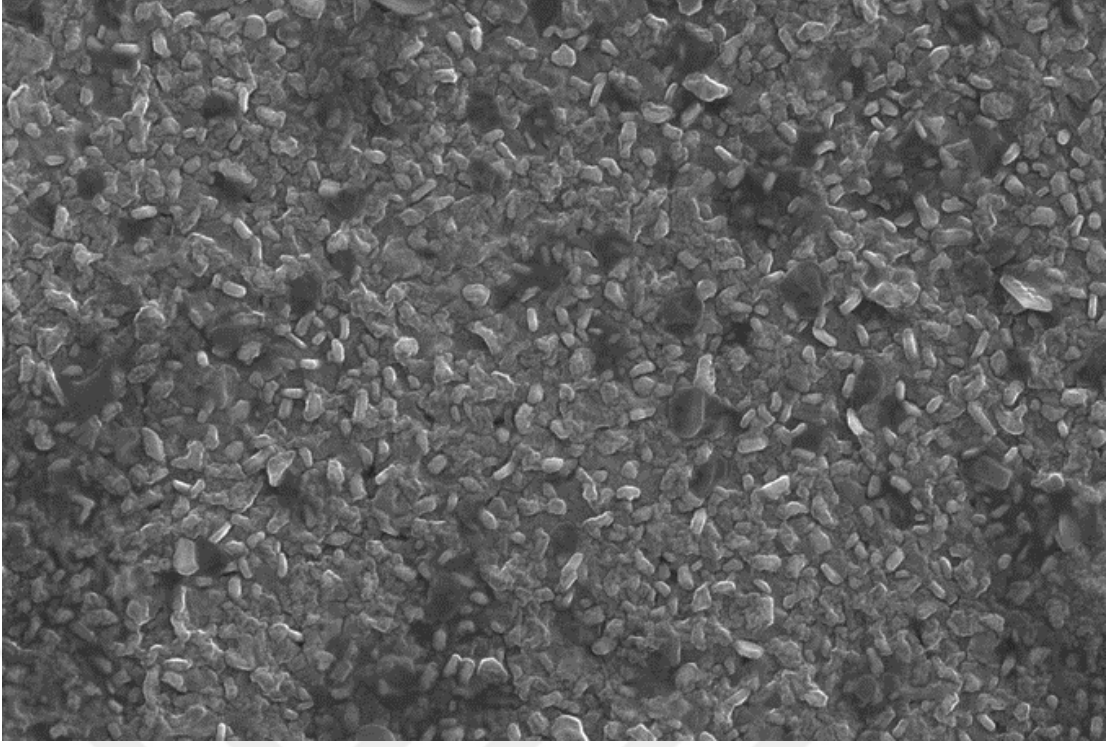
n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü şekil 41'de verilmiştir.



Şekil 41. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 41’de verilen SEM görüntüsü incelendiğinde, CuO kristallerinin n-tipi silisyum altlık yüzeyine homojen bir şekilde biriktiği görülmektedir. Aynı zamanda CuO ince film yüzeyinde belirgin bir kusur da görülmemektedir. SEM görüntüsünden, n-tipi silisyum altlık yüzeyinde periyodik ve nano tanecikli yapıda büyümenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. n-tipi silisyum altlık üzerine biriktirilen CuO ince film yüzeyinde cam altlıktakinin aksine topaklanma şeklinde herhangi bir büyüme görülmemektedir. Ayrıca, farklı tanecik boyutlarında kristalleşmenin gerçekleştiği de SEM görüntüsünde görülmektedir. Bunun yanında, SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal taneciklerinin nano ölçekte ve boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. n-tipi silisyum altlık üzerine biriktirilen CuO nano kristallerinin belirgin tane sınırları SEM görüntüsünden görülmektedir. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar.

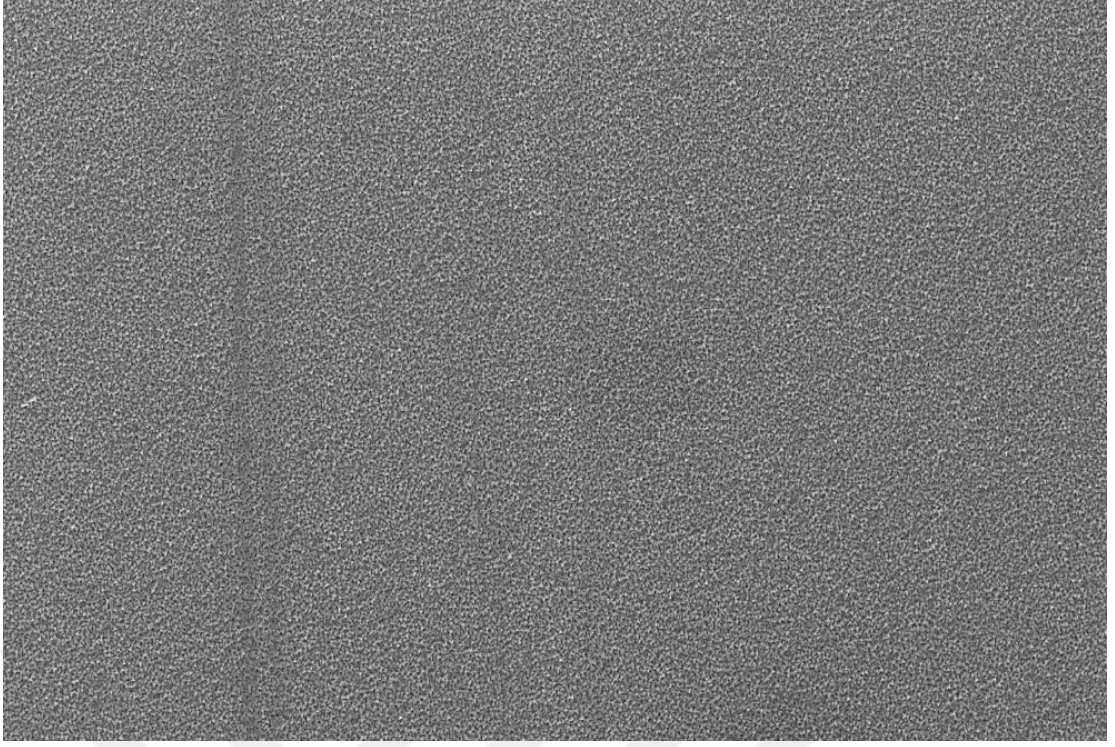
n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü şekil 42’de verilmiştir.



Şekil 42. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 42’de verilen SEM görüntüsü incelendiğinde büyük boyutlu sülfür kristallerinin CuO ince filmin üzerine, bazı bölgelerde daha yoğun bir şekilde biriktiği net olarak görülmektedir. Sülfür kristallerinin, CuO nano kristal taneciklerinden boyut olarak büyük olduğu ve farklı tanecik boyutlarında olduğu da yine SEM görüntüsünden açık bir şekilde görülebilmektedir. SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal tanecik boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. Ayrıca, sülfürleme işlemiyle CuO nano kristallerin tanecik boyutunda artış olduğu SEM görüntüsünün yanında XRD sonuçlarından elde edilen verilerden de anlaşılmaktadır. Sülfürlemeyle birlikte CuO kristal taneciklerinin büyümesi tane sınırlarını da azaltmıştır. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar. Sülfürleme neticesinde tane sınırlarının küçülmesi malzemenin kusurlarının azaldığı anlamına gelir. SEM ve XRD sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak sülfürleme işleminin, cam altlık üzerine yapılan büyütmede olduğu gibi, n-tipi silisyum altlık yüzeyine büyütülen CuO ince filmin ortalama kristal tanecik boyutunu arttırdığı söylenebilir.

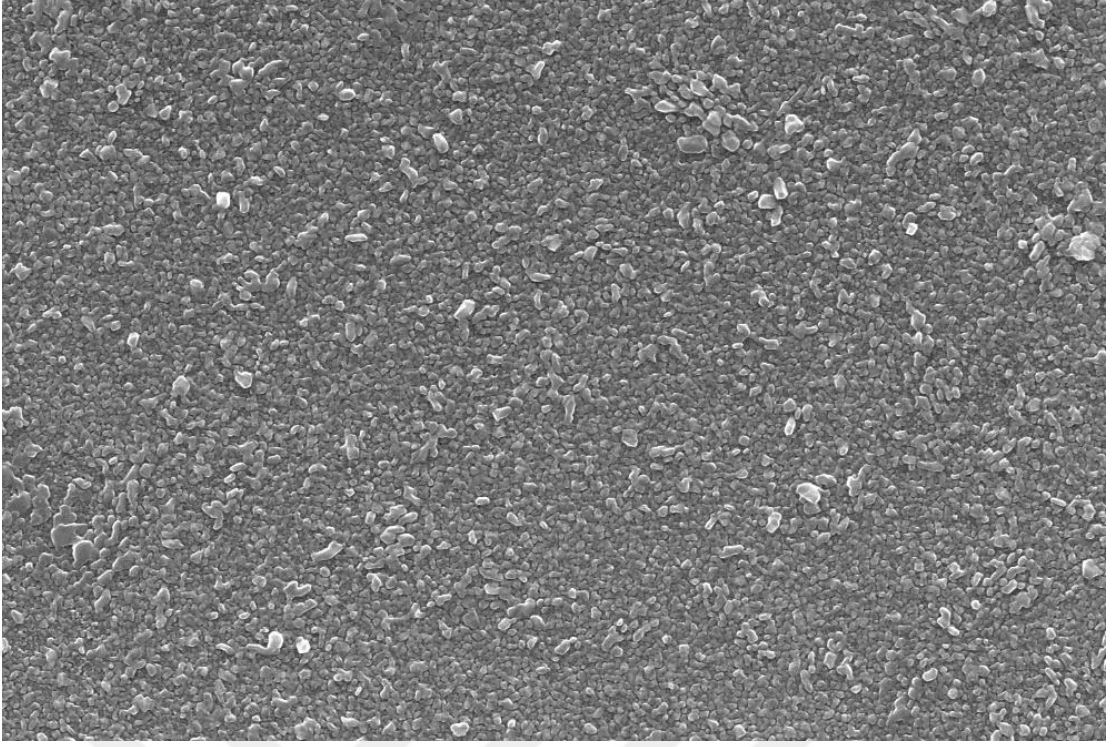
Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü şekil 43’te verilmiştir.



Şekil 43. Cam altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 43'te verilen SEM görüntüsü incelendiğinde, Cu_2O kristallerinin cam altlık yüzeyine homojen bir şekilde biriktiği görülmektedir. Bunun yanında, Cu_2O ince film yüzeyinde bazı bölgelerde çizgisel kusurların varlığı görülmektedir. SEM görüntüsünden, cam altlık yüzeyinde periyodik ve nano tanecikli yapıda büyümenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Cu_2O ince filmin yüzeyinde topaklanma şeklinde herhangi bir büyüme görülmemektedir. Ayrıca, farklı tanecik boyutlarında kristalleşmenin gerçekleştiği de SEM görüntüsünde görülmektedir. Bunun yanında, SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal taneciklerinin nano ölçekte ve boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. Cam altlık üzerine biriktirilen Cu_2O nano kristallerinin çok belirgin olmamakla birlikte kristal tane sınırları bulunmaktadır. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar.

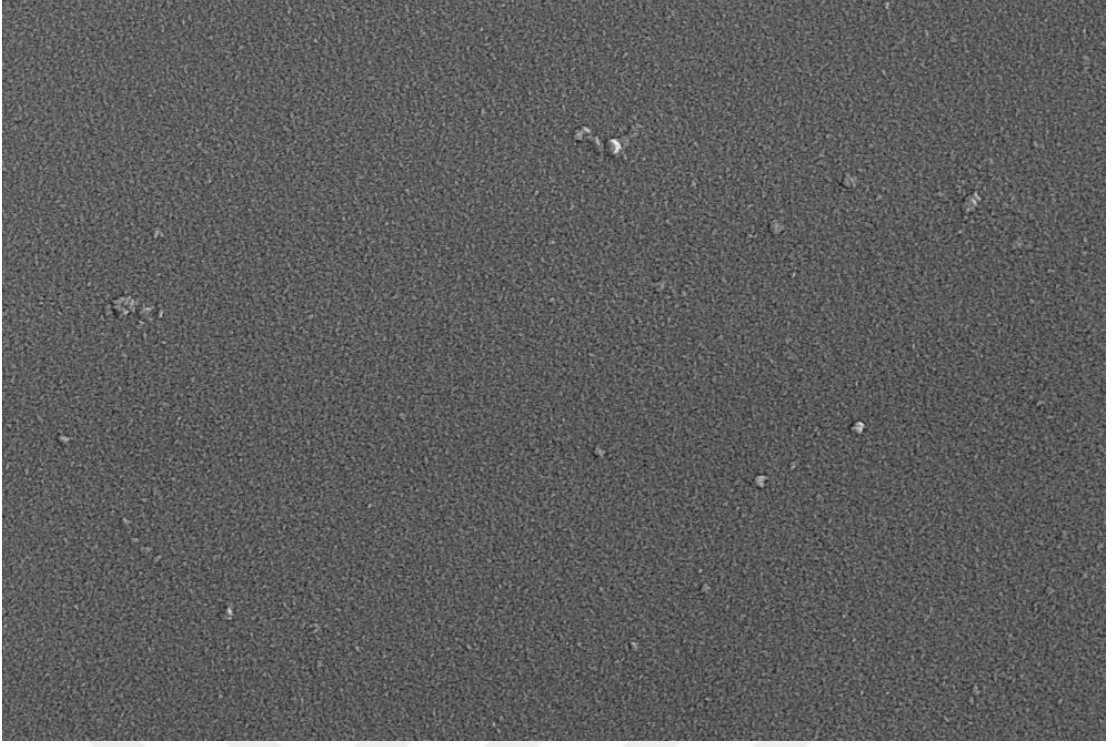
Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü şekil 44'te verilmiştir.



Şekil 44. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu₂O ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 44'te verilen SEM görüntüsü incelendiğinde büyük boyutlu sülfür kristallerinin Cu₂O ince filmin üzerine homojen olmayan bir şekilde ve az miktarda biriktiği net olarak görülmektedir. Sülfür kristallerinin, Cu₂O nano kristal taneciklerinden boyut olarak büyük olduğu ve farklı tanecik boyutlarında olduğu da yine SEM görüntüsünden açık bir şekilde görülebilmektedir. SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal tanecik boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. Ayrıca, sülfürleme işlemiyle Cu₂O nano kristallerin tanecik boyutunda artış olduğu SEM görüntüsünün yanında XRD sonuçlarından elde edilen verilerden de anlaşılmaktadır. Sülfürlemeyle birlikte Cu₂O kristal taneciklerinin büyümesi tane sınırlarını da azaltmıştır. Sülfürleme neticesinde tane sınırlarının küçülmesi malzemenin kusurlarının azaldığı anlamına gelir. Tane sınırlarının azalması malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini arttıran etkenlerdendir. Dolayısıyla sülfürleme işleminden sonra malzemenin elektriksel iletkenliğinin artması beklenmektedir. SEM ve XRD sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak sülfürleme işleminin cam altlık yüzeyine büyütülen Cu₂O ince filmin ortalama kristal tanecik boyutunu arttırdığı söylenebilir. Sülfür kristalleri arasındaki belirgin olarak görülebilen boşlukların sülfürleme işleminin süresine bağlı olduğu da düşünülmektedir.

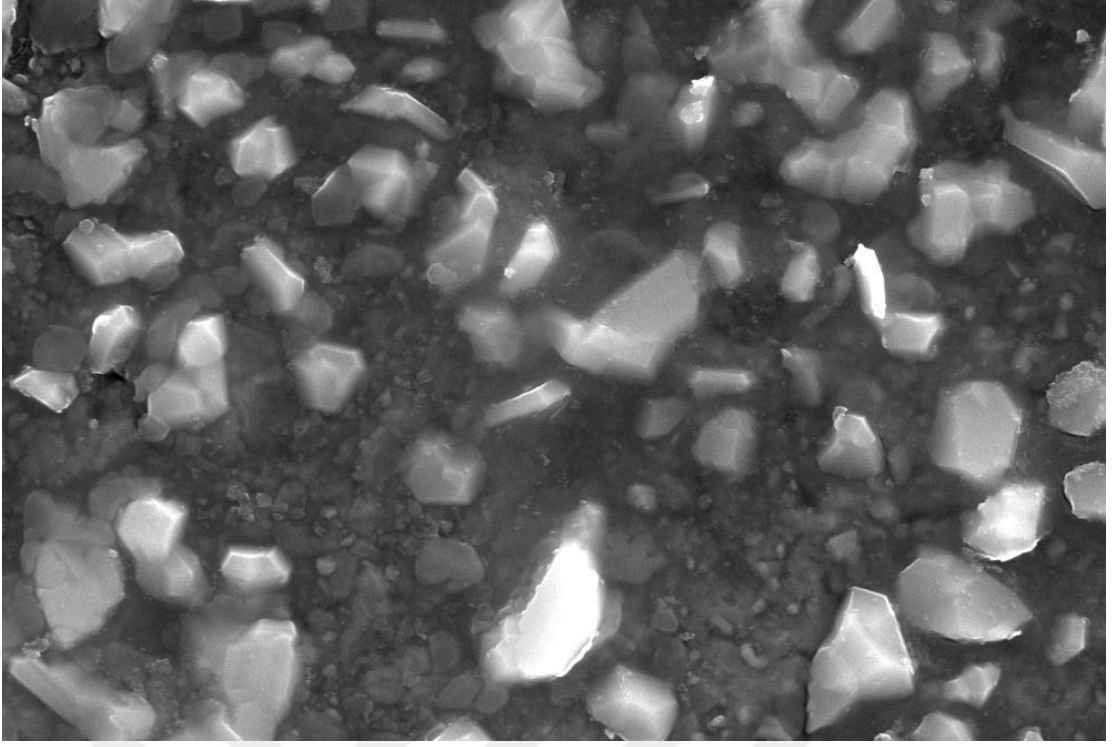
n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu₂O ince filmin SEM görüntüsü şekil 45'te verilmiştir.



Şekil 45. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 45'te verilen SEM görüntüsü incelendiğinde, Cu_2O kristallerinin n-tipi silisyum altlık yüzeyine homojen bir şekilde biriktiği görülmektedir. Aynı zamanda Cu_2O ince film yüzeyinde belirgin bir kusur da görülmemektedir. SEM görüntüsünden, n-tipi silisyum altlık yüzeyinde periyodik ve nano tanecikli yapıda büyümenin gerçekleştiği anlaşılmaktadır. n-tipi silisyum altlık üzerine biriktirilen Cu_2O ince film yüzeyinde çok az miktarda topaklanma şeklinde büyümeler görülmektedir. Ayrıca, farklı tanecik boyutlarında kristalleşmenin gerçekleştiği de SEM görüntüsünde görülmektedir. Bunun yanında, SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal taneciklerinin nano ölçekte ve boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. n-tipi silisyum altlık üzerine biriktirilen Cu_2O nano kristallerinin çok belirgin olmamakla birlikte kristal tane sınırları bulunmaktadır. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar.

n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü şekil 46'da verilmiştir.



Şekil 46. n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin SEM görüntüsü.

Şekil 46’da verilen SEM görüntüsü incelendiğinde oldukça büyük boyutlu sülfür kristallerinin Cu_2O ince filmin üzerine rastgele bir şekilde biriktiği net olarak görülmektedir. Sülfür kristallerinin, Cu_2O nano kristal taneciklerinden boyut olarak oldukça büyük olduğu ve farklı tanecik boyutlarında olduğu da yine SEM görüntüsünden açık bir şekilde görülebilmektedir. SEM görüntüsü, XRD ölçüm sonuçları kullanılarak hesaplanan kristal tanecik boyutlarının farklı olduğu sonucunu da doğrulamaktadır. Ayrıca, sülfürleme işlemiyle Cu_2O nano kristallerin tanecik boyutunda artış olduğu SEM görüntüsünün yanında XRD sonuçlarından elde edilen verilerden de anlaşılmaktadır. Sülfürlemeyle birlikte Cu_2O kristal taneciklerinin büyümesi tane sınırlarını da azaltmıştır. Sülfürleme neticesinde tane sınırlarının küçülmesi malzemenin kusurlarının azaldığı anlamına gelir. Tane sınırlarının azalması malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini arttıran etkenlerdendir. Dolayısıyla sülfürleme işleminden sonra malzemenin elektriksel iletkenliğinin artması beklenmektedir. SEM ve XRD sonuçlarından elde edilen verilere dayanarak sülfürleme işleminin n-tipi silisyum yüzeyine büyütülen Cu_2O ince filmin ortalama kristal tanecik boyutunu arttırdığı söylenebilir. Sülfür kristalleri arasındaki belirgin olarak görülebilen boşlukların sülfürleme işleminin süresine bağlı olduğu da düşünülmektedir.

Soğurma (UV-Vis) ve Yansıma (Reflectance) Ölçümleri

Bu tez çalışmasında soğurma ölçümleri Atatürk Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü bünyesinde bulunan, LAMBDA 2S UV/Vis/NIR modeli spektrofotometre cihazı ile, yansıma ölçümleri ise DAYTAM ileri spektroskopi laboratuvarındaki LAMBDA 1050 Uv/Vis/NIR spektrofotometre cihazı ile oda sıcaklığında ve 300 nm ile 1100 nm dalga boyu değeri arasında alınmıştır.

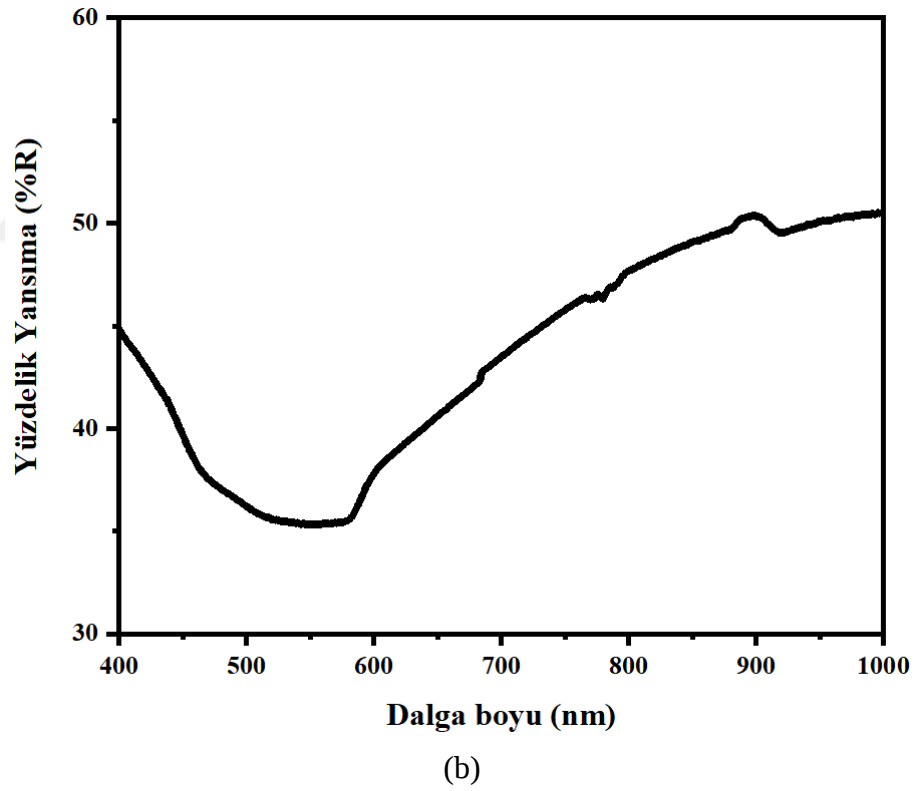
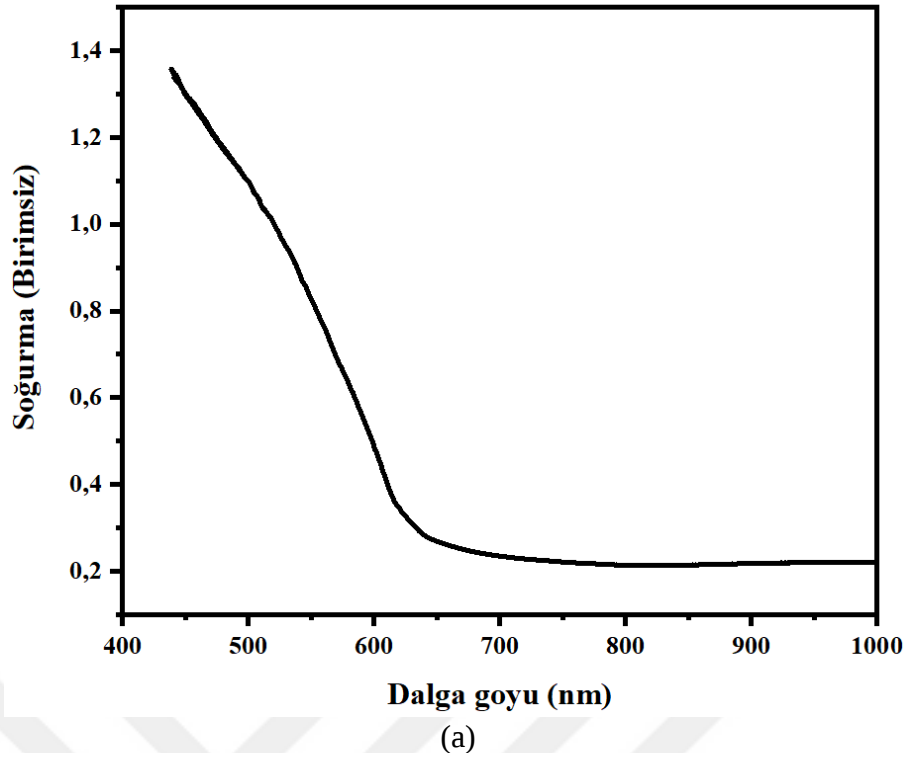
Yarıiletkenlerin optik soğurma aralığı ve yasak enerji aralığını belirlemede en çok kullanılan yöntemlerden birisi soğurma ölçüm metodudur. Bununla birlikte altlık tipine göre yasak enerji aralığını belirlemede yansıma ölçüm metodu da kullanılır.

Sentezlenen CuO nano parçacıkların optik özelliklerini incelemek için optik absorpsiyon spektrumu kullanıldı ve böylece bant aralığı ve elektronik geçişlerin türü belirlendi.

Bir yarıiletken, yarıiletkenin yasak bant aralığından daha büyük enerjili fotonları soğurduğunda valans bandından iletkenlik bandına bir elektron aktarılır. Yüksek enerjili fotonların yarıiletken tarafından soğurulmasında bant aralığı enerjisine karşılık gelen dalga boyunda ani bir artış olur. Absorpsiyon katsayısının (α) yarıiletken tarafından soğurulan foton enerjisiyle ilişkisi elektronik geçişlerin türüne bağlıdır. Valans bandından iletkenlik bandına geçişte elektronun momentumu korunuyor ise bu geçiş doğrudan geçiştir. Ancak bu geçişte elektronun momentumu korunmuyorsa, elektrona bir foton eşlik ediyor demektir, bu geçiş dolaylı elektronik geçiştir (Willardson and Beer 1967, Dressel and Grüner 2002).

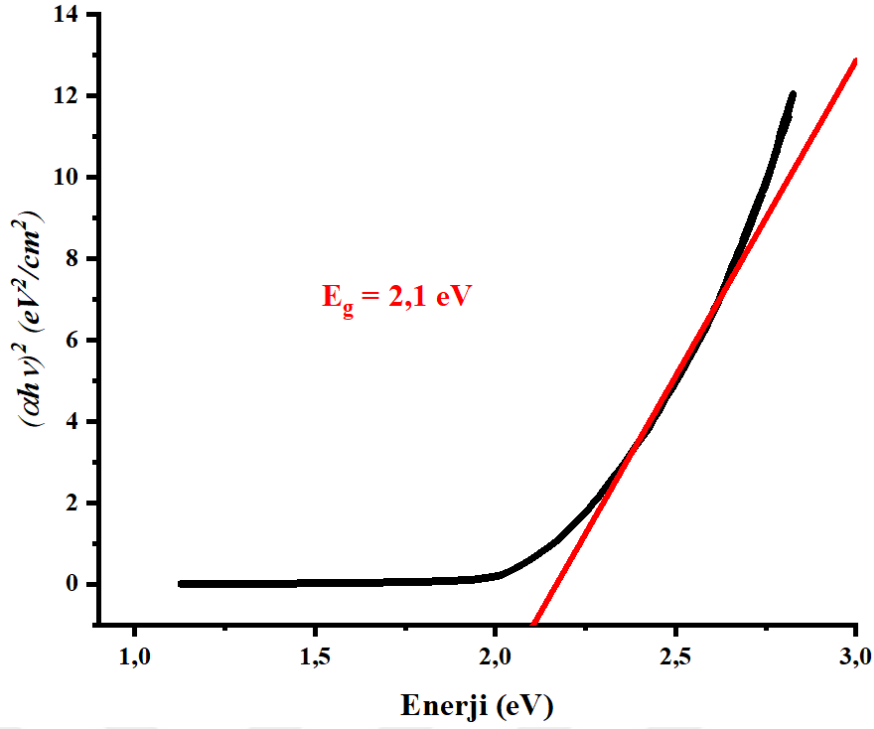
Bu çalışmada cam altlık üzerine biriktirilen CuO ve Cu₂O ince filmlerin yasak enerji aralığı değerleri eşitlik 70'te verilen Tauc denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

Şekil 47'de cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin soğurma grafiği ve n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülmüş CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği verilmiştir.



Şekil 47. (a) Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.

Şekil 48, CuO nano parçacıklarının doğrudan elektronik geçişleri için enerjiye (E) karşı $(ahv)^2$ grafiğini göstermektedir.

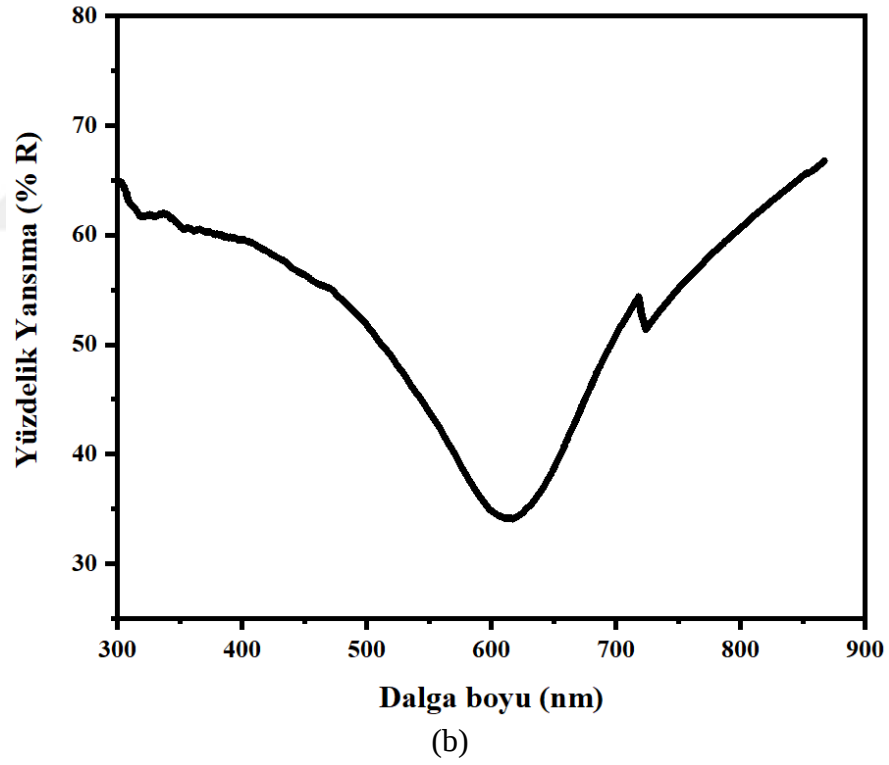
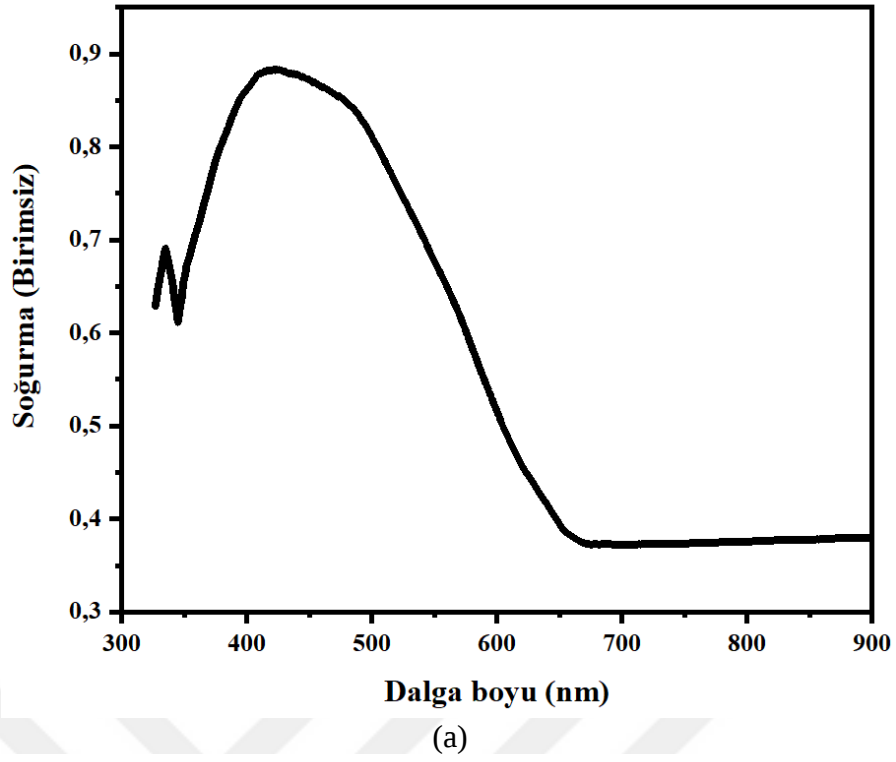


Şekil 48. Cam altlık üzerine büyütülen CuO ince filmin enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

Sentezlenen CuO nano parçacıkların 2,1 eV'lik doğrudan bant aralığı bulk değerine (1,8 eV) kıyasla maviye kaymıştır. Bant aralığındaki bu maviye kayma kuantum sınırlama etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Radhakrishnan and Beena 2014). Bir kristalde tane boyutu $\sim 100 \text{ nm}$ 'nin altına düştüğünde kuantum etkileri kendini gösterir. Küçük taneler kuantum kuyuları gibi çalışır ve dolayısıyla tane büyüklüğü bant aralığını etkiler. Tane boyutu, bir malzemenin elektronik ve optik özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerini de etkileyebilir. Genel olarak, bir malzemenin tane boyutu küçüldükçe, malzemenin bant aralığı enerjisi artar. Bunun nedeni, bant aralığı enerjisinin kristalin boyutundan ve kristaldeki kusur sayısından etkilenmesidir. Daha küçük tanelerin kusur sayısı daha fazladır ve bu da bant aralığı enerjisini artırır.

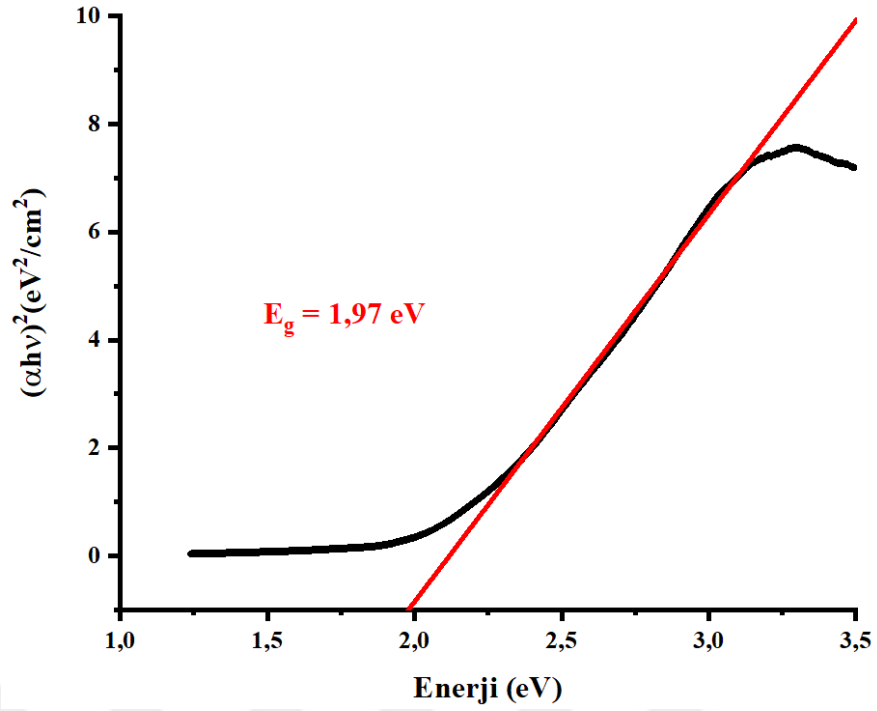
Sentezlenen CuO nanopartikülleri, Kuantum sınırlama etkisi ile sonuçlanan küçük boyutundan dolayı nispeten büyük bant aralığına sahiptir. Bu nedenle, bu nano malzeme geniş bant aralıklı bir yarı iletken olarak kullanılabilir.

Şekil 49'da cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin soğurma grafiği ve n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği verilmiştir.



Şekil 49. (a) Cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş CuO ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.

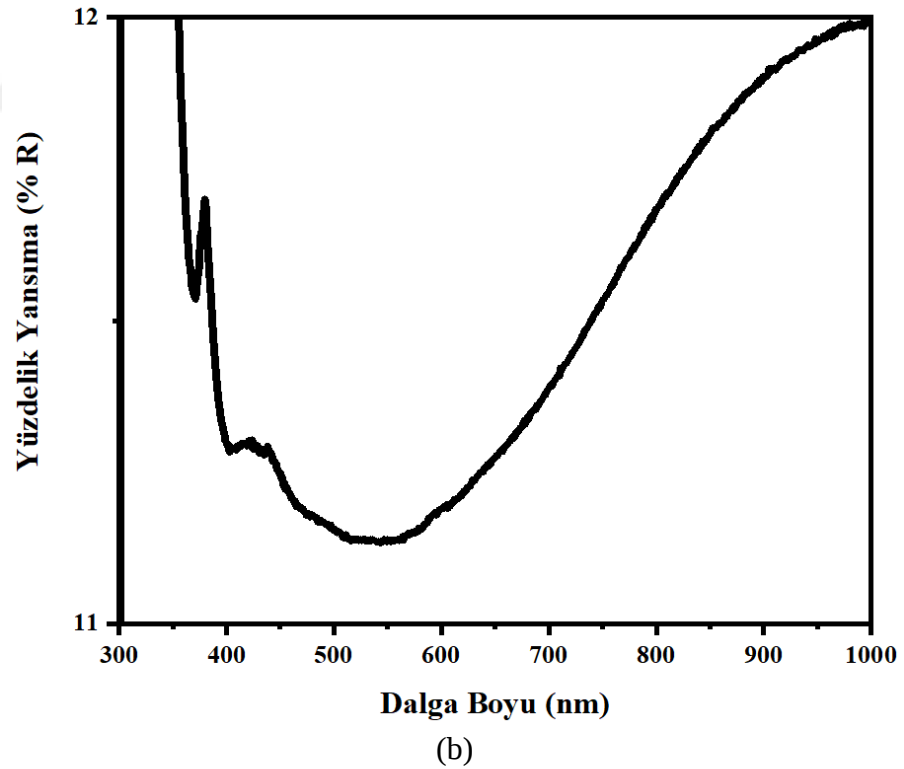
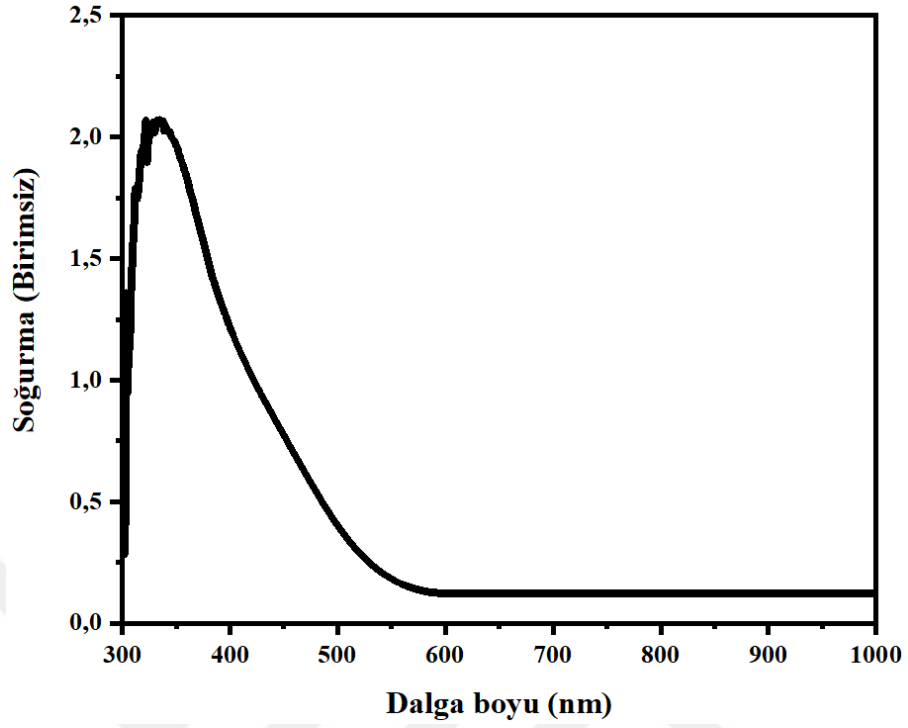
Şekil 50, sülfürlenmiş CuO nano parçacıklarının doğrudan elektronik geçişleri için enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiğini göstermektedir.



Şekil 50. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO ince filmin enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

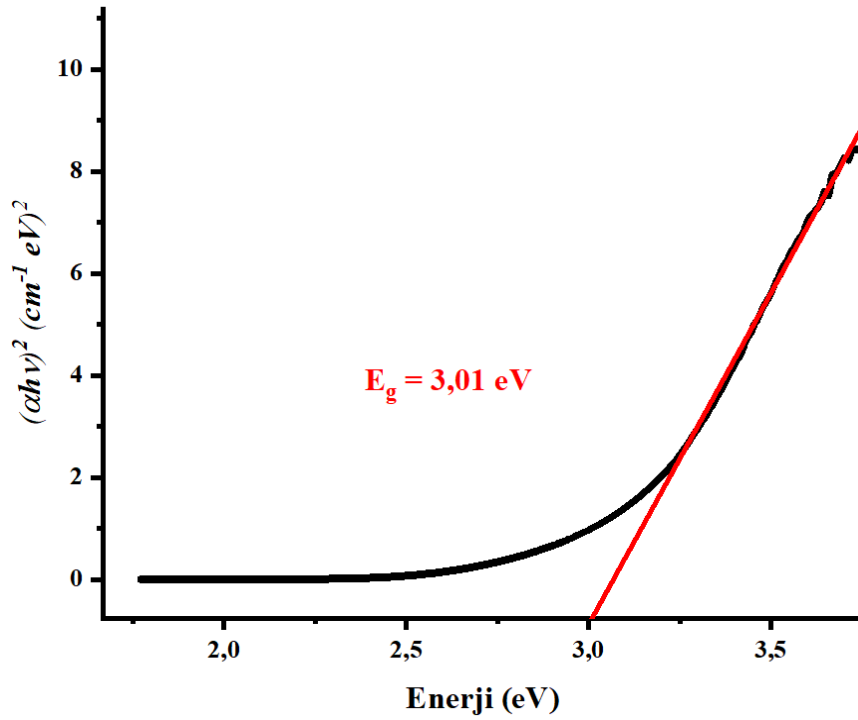
Sentezlenen CuO ince filmin sülfürlenmesi neticesinde 2,1 eV’lik doğrudan bant aralığının azalarak 1,97 eV’ değerine düştüğü görülmüştür. Sülfürleme işleminin CuO ince filmin film kalınlığını bir miktar arttırdığını söyleyebiliriz. İnce filmin kalınlığındaki bu artış filmin kompozisyonunu değiştirmiştir. Şekil 28’deki XRD modeline bakıldığında CuO’nun yanında CuSO_4 ve SO_3 yapılarının varlığı ince filmin kompozisyonunda değişiklik olduğunu göstermektedir. Sülfürleme ile bant aralığındaki azalmanın, ince filmin kalınlığındaki artışla birlikte film kompozisyonundaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. CuSO_4 ve SO_3 yapılarının varlığı daha fazla kusur durumu ortaya çıkarır ve optik bant aralığını küçültür. Bunun yanında tablo 3 ve tablo 4 karşılaştırıldığında sülfürleme sonrasında tane boyutunda artış olduğu görülmektedir. Tane boyutu, bir malzemenin elektronik ve optik özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerini de etkileyebilir. Genel olarak, bir malzemenin tane boyutu küçüldükçe, malzemenin bant aralığı enerjisi artar. Bunun nedeni, bant aralığı enerjisinin kristalin boyutundan ve kristaldeki kusur sayısından etkilenmesidir. Daha küçük tanelerin tane sınırı daha fazladır ve bu da bant aralığı enerjisini artırır. Tane boyutunun artması kristaldeki tane sınırını azaltır ve bu da bant aralığı enerjisini düşürür. Bu nedenle, sülfürleme ile ince filmin bant aralığındaki azalmanın diğer bir nedeni olarak tanecik boyutundaki artış olduğu düşünülmektedir.

Şekil 51’de cam altlık üzerine büyütülmüş Cu_2O ince filmin soğurma grafiği ve n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülmüş Cu_2O ince filmin yüzdelik yansıma grafiği verilmiştir.



Şekil 51. (a) Cam altlık üzerine büyütülmüş Cu_2O ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülmüş Cu_2O ince filmin yüzdelik yansıma grafiği.

Şekil 52, Cu₂O nano parçacıklarının doğrudan elektronik geçişleri için enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiğini göstermektedir.

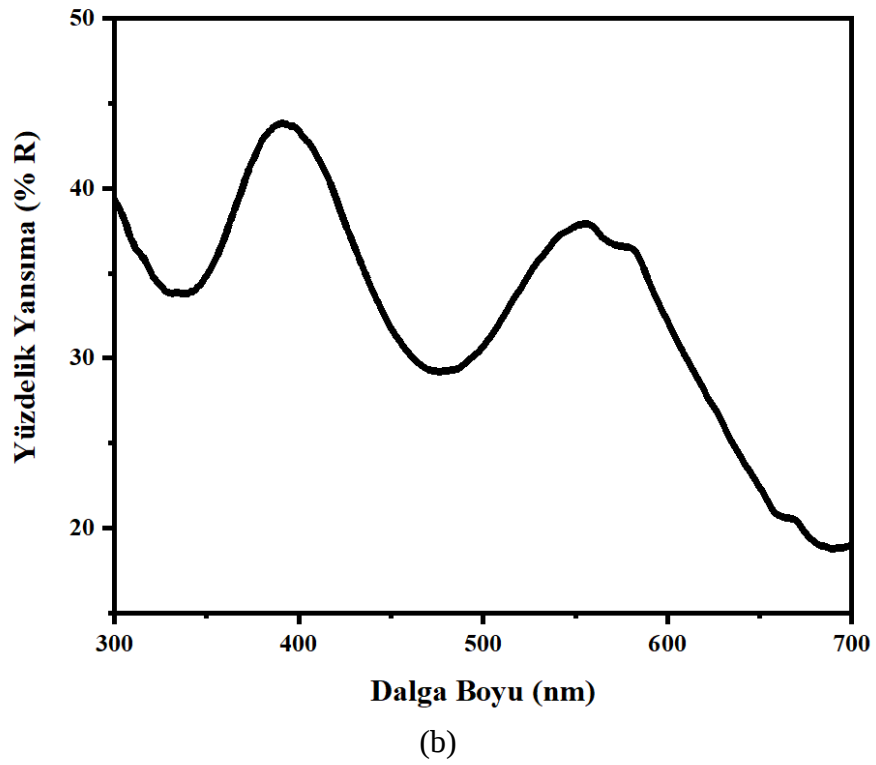
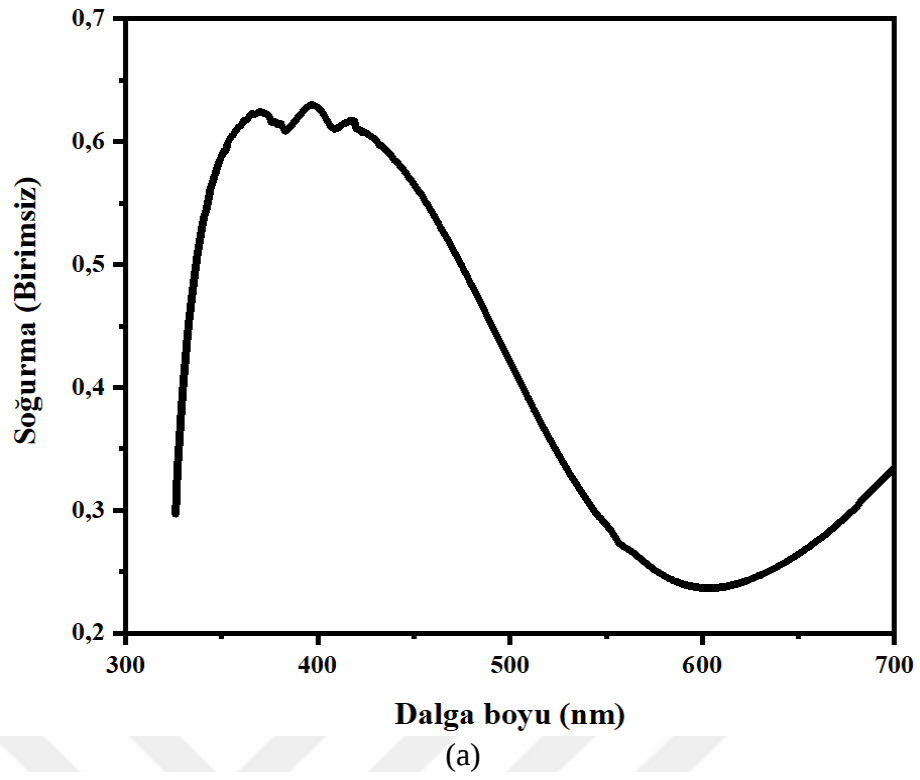


Şekil 52. Cam altlık üzerine büyütülen Cu₂O ince filmin enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

Sentezlenen Cu₂O nano parçacıkların 3,01 eV’lik doğrudan bant aralığı yığın değerine (2,17 eV) kıyasla mora kaymıştır. Bant aralığındaki bu mora kayma kuantum sınırlama etkisinden kaynaklanmaktadır (Radhakrishnan and Beena 2014). Bir kristalde tane boyutu ~ 100 nm’nin altına düştüğünde kuantum etkileri kendini gösterir. Küçük taneler kuantum kuyuları gibi çalışır ve dolayısıyla tane büyüklüğü bant aralığını etkiler. Tane boyutu, bir malzemenin elektronik ve optik özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerini de etkileyebilir. Genel olarak, bir malzemenin tane boyutu küçüldükçe, malzemenin bant aralığı enerjisi artar. Bunun nedeni, bant aralığı enerjisinin kristalin boyutundan ve kristaldeki tane sınırından etkilenmesidir. Daha küçük tanelerin tane sınırı daha fazladır ve bu da bant aralığı enerjisini artırır.

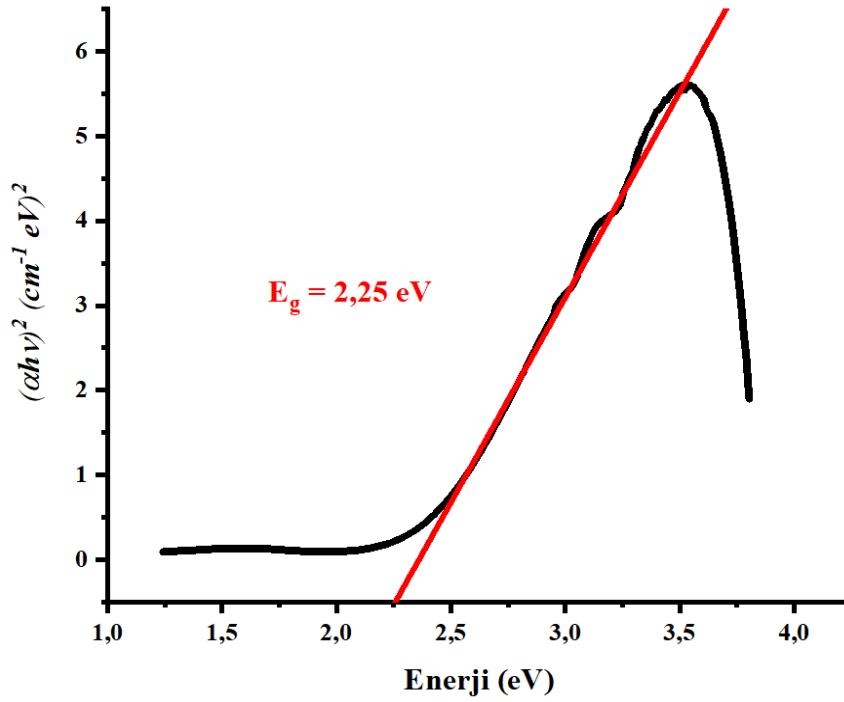
Sentezlenen Cu₂O nanopartikülleri, Kuantum sınırlama etkisi ile sonuçlanan küçük boyutundan dolayı nispeten büyük bant aralığına sahiptir. Bu nedenle, bu nano malzeme geniş bant aralıklı bir yarı iletken olarak kullanılabilir.

Şekil 53’te cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu₂O ince filmin soğurma grafiği ve n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu₂O ince filmin yüzdelik yansımaya grafiği verilmiştir.



Şekil 53. (a) Cam altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin soğurma grafiği, (b) n-tipi silisyum altlık üzerine büyütülerek sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin yüzdelik yansım grafiği.

Şekil 54, sülfürlenmiş Cu_2O nano parçacıklarının doğrudan elektronik geçişleri için enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiğini göstermektedir.



Şekil 54. Cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu_2O ince filmin enerjiye (E) karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafiği.

Sentezlenen Cu_2O ince filmin sülfürlenmesi neticesinde 3,01 eV’lik doğrudan bant aralığı 2,25 eV’ değerine düşmüştür. Sülfürleme işlemi Cu_2O ince filmin film kalınlığını bir miktar arttırdığını söyleyebiliriz. İnce filmin kalınlığındaki bu artış filmin kompozisyonunu değiştirmiştir. Şekil 34’teki XRD modeline bakıldığında Cu_2O ’nun yanında Cu_2S , CuS ve SO_3 yapılarının varlığı ince filmin kompozisyonunda değişiklik göstermektedir. Sülfürleme ile bant aralığındaki azalmanın, ince filmin kalınlığındaki artışla birlikte film kompozisyonundaki değişimden kaynaklandığı düşünülmektedir. Cu_2S , CuS ve SO_3 yapılarının varlığı daha fazla kusur durumu ortaya çıkarır ve optik bant aralığını küçültür. Bunun yanında tablo 8 ve tablo 9 karşılaştırıldığında sülfürleme sonrasında tane boyutunda artış olduğu görülmektedir. Tane boyutu, bir malzemenin elektronik ve optik özelliklerinin yanı sıra mekanik özelliklerini de etkileyebilir. Genel olarak, bir malzemenin tane boyutu küçüldükçe, malzemenin bant aralığı enerjisi artar. Bunun nedeni, bant aralığı enerjisinin kristalin boyutundan ve kristaldeki tane sınırından etkilenmesidir. Daha küçük tanelerin tane sınırı daha fazladır ve bu da bant aralığı enerjisini artırır. Tane boyutunun artması kristaldeki tane sınırını azaltır ve bu da bant aralığı enerjisini düşürür. Sülfürleme ile ince filmin bant aralığındaki azalmanın diğer bir nedeni olarak tanecik boyutundaki artış olduğu düşünülmektedir.

Al/CuO/Al ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al Metal-Yarıiletken-Metal (MSM) Fotodedektörlerin Elektriksel Karakterizasyonları

Akım-Gerilim (I-V) Ölçümleri

Akım-gerilim ölçümü ve analizi eklem davranışını anlamak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bunun yanında I-V ölçümleri akım iletim mekanizmaları hakkında da bilgi verir. Optoelektronik cihazların doğrultma özellikleri bazı anahtar parametrelerle karakterize edilir. I-V ölçümlerinden, doyma akımı I_0 , idealite faktörü n , engel yüksekliği ϕ_{bi} ve doğrultma oranı $RR (I_{düz}/I_{ters})$ parametreleri genel diyot denklemleri kullanılarak belirlenir.

Bu tez çalışmasında fabrikasyonu yapılan MSM foto dedektörlerin elektriksel karakterizasyonu için termiyonik emisyon (TE) teorisi kullanılmıştır. Bu teoriye göre ideal bir Schottky diyodun düz (doğru, ileri) beslem I-V karakteristiği $V > 3kT/q$ sınırında azınlık taşıyıcı etkileri ihmal edilerek düz beslem ve akım arasındaki ilişki

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV_D}{kT}\right) - 1 \right] \quad (73)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada q elektron yükünü, V_D diyot üzerine düşen gerilimi, k Boltzmann sabitini ve T mutlak sıcaklığı ifade eder. Burada I_0 ise doyma akımıdır ve $\ln(I)$ - V grafiğinin lineer kısmının $V = 0$ V'deki akım eksenine ile kesişiminden hesaplanır ve aşağıdaki denklem ile verilir.

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{q\phi_b}{kT}\right) \quad (74)$$

Burada AA^* ve ϕ_b sırasıyla diyotun alanı, Richardson sabiti ve engel yüksekliğidir. p-tipi bakır oksit için A^* değeri $949,36 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$ 'dir.

Denklem 73'te $qV \gg 3kT$ olması durumunda 1 ihmal edilebilir. Eşitliğin her iki tarafının logaritması ve V 'ye göre türevi alınırsa, (n) idealite faktörü için,

$$n = \left(\frac{q}{kT}\right) \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (75)$$

denklemleri elde edilir. Denklemdeki $dV/d(\ln I)$ terimi $\ln(I)$ - V grafiğinden belirlenir. Buna göre fabrikasyonu yapılan Schottky diyotun $\ln(I)$ - V grafiğinin lineer kesiminin eğimi denklem 75'te yerine yazılarak idealite faktörü (n) ve düşey eksenine kestiği noktadan doyma akımı hesaplanabilir.

Engel yüksekliği ise,

$$q\phi_b = kT \ln \left(\frac{AA^*T^2}{I_0} \right) \quad (76)$$

denklemleri yardımıyla bulunabilir.

Bir diyotun engel yüksekliği ve seri direnci Norde (1979) fonksiyonları yardımı ile de hesaplanabilir. Modifiye edilmiş Norde fonksiyonu şu şekildedir;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \left(\frac{I(V)}{AA^*T^2} \right) \quad (77)$$

Buradaki γ değeri, idealite faktörü (n) değerinden büyük olan ilk tamsayıdır. Norde metodunda engel yüksekliği,

$$\phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \quad (78)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada $F(V_0)$ ifadesi $F(V)$ grafiğinin minimum $F(V)$ değeridir. V_0 ise bu değere karşılık gelen gerilim değeridir.

Norde metoduna göre seri direnç değeri ise aşağıdaki denklem yardımı ile bulunur.

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{qI} \quad (79)$$

Bir Schottky diyot için doğrultma oranı (RR) akım-gerilim grafiğinden elde edilen verilerle denklem (80) kullanılarak elde edilir.

$$RR = \frac{I_d}{I_t} \quad (80)$$

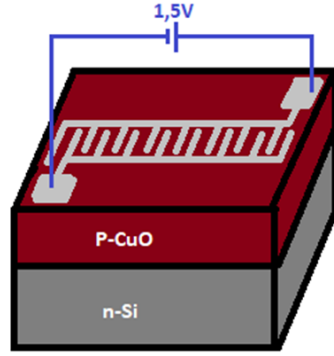
Denklemlerde, sabit bir gerilim değerindeki I_d düz beslem akımı I_t ise ters beslem yönündeki akımdır.

I-V ölçümleri için kullanılan sistem şekil 26'da gösterilmiştir.

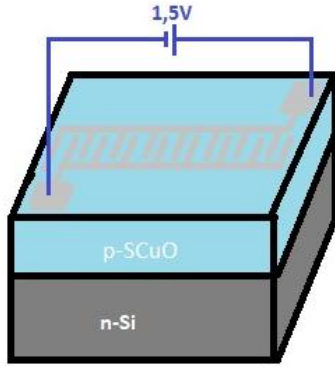
Oda sıcaklığında n-tipi silisyum altlık üzerine CuO biriktirilerek hazırlanan, sırasıyla şekil 55 (a) ve (b)'de şematik diyagramı ve görseli verilen Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodetektörlerin I-V ölçümleri, yine oda sıcaklığında iki nokta ölçüm tekniği kullanılarak yapılmıştır. Keithley 2400 ölçüm kaynağı kullanılarak -1,5 V-1,5 V gerilim

aralığında, karanlıkta ve ışık altında akım-gerilim ölçümü yapılmış ve I-V ve lnI-V grafikleri origin programında çizdirilmiştir.

Al/CuO/Al yapısına ait I-V grafiği şekil 56’da ve lnI-V grafiği şekil 57’de verilmiştir.

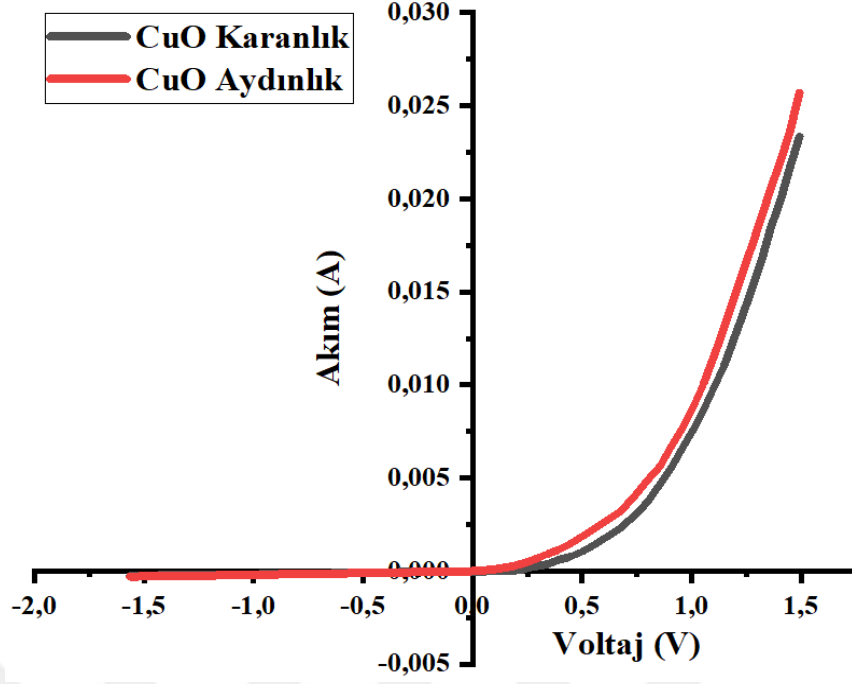


(a)

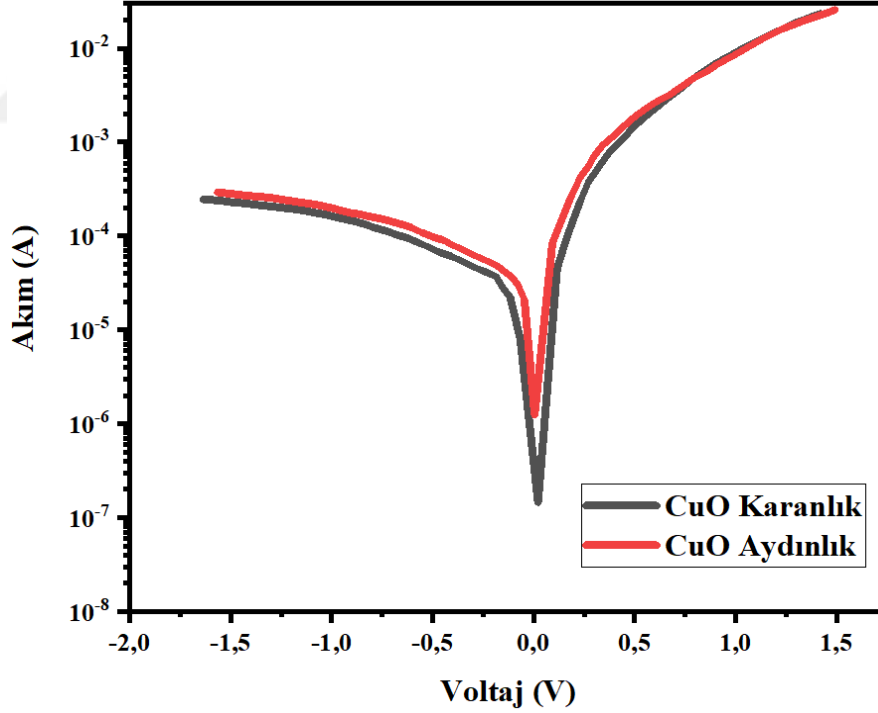


(b)

Şekil 55. n-tipi silisyum altlık üzerine CuO biriktirilerek hazırlanan (a) Al/ CuO /Al (b) Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektör.



Şekil 56. Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.



Şekil 57. Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.

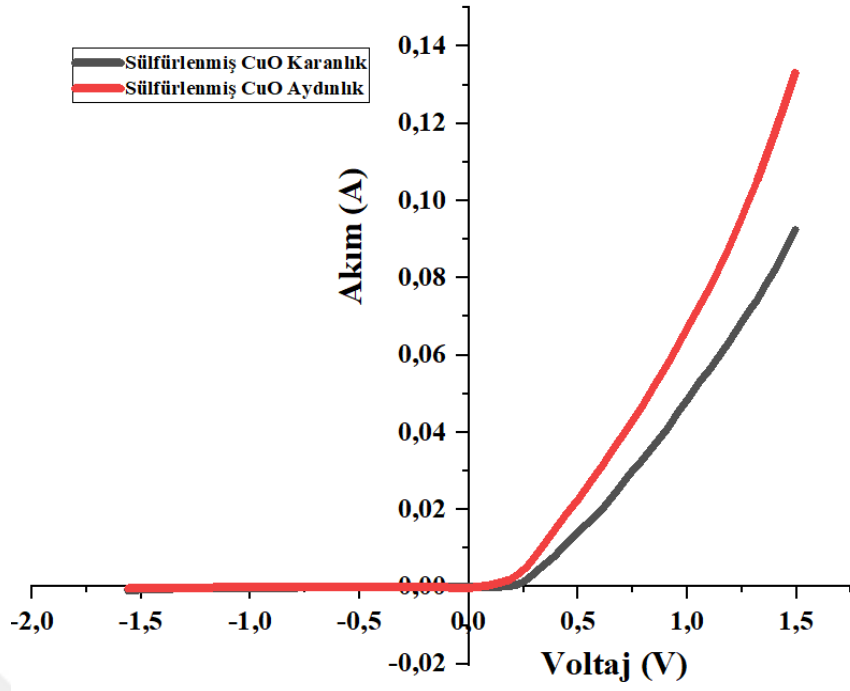
Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edilen veriler ve diğer sabit değerler denklem (75) ve (76)'da yerlerine yazılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde Al/ CuO /Al MSM

fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 4,0, 0,67 eV ve 3,94, 0,67 eV olarak bulunmuştur.

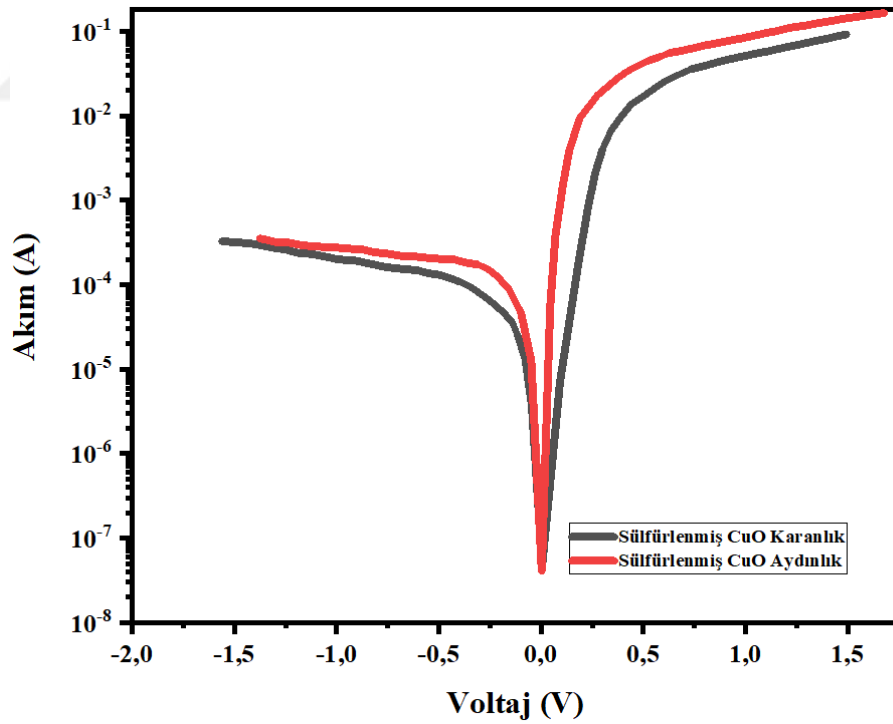
Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar küçük olursa I-V karakteristikleri o kadar lineer olur. Seri dirence bağlı olarak diyot kalitesi de aynı oranda artar. Dolayısıyla seri direnci küçük olan doğrultucu kontakların diyot kalitesi yüksek olur. Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün oda sıcaklığında seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonu kullanılarak hesaplandı. Karanlıkta I-V ölçümünden idealite faktörü 4,00 bulunduğu için γ değeri 5 olarak alındı. Yapılan hesaplamalar sonucunda Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün F(V)-V grafiğinden V_0 değeri ve denklem (79) kullanılarak seri direnç yaklaşık $5,62 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega$ olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonundan denklem (78) kullanılarak engel yüksekliği oda sıcaklığında 0,78 eV olarak hesaplanmıştır. Işık altında I-V ölçümünden elde edilen verilerle idealite faktörü 3,94 bulunduğu için γ değeri 4 olarak alındı. Norde fonksiyonları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda fotodedektörün ışık altında seri direnci $5,22 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği ise 0,82 eV olarak bulunmuştur.

Al/ CuO /Al MSM fotodedektör için -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı denklem (80) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı sırasıyla 23,7 ve 22,7 olarak bulunmuştur.

Sülfürlenmiş Al/CuO/Al yapısına ait I-V grafiği şekil 58’de ve lnI-V grafiği şekil 59’da verilmiştir.



Şekil 58. Sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.



Şekil 59. Sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.

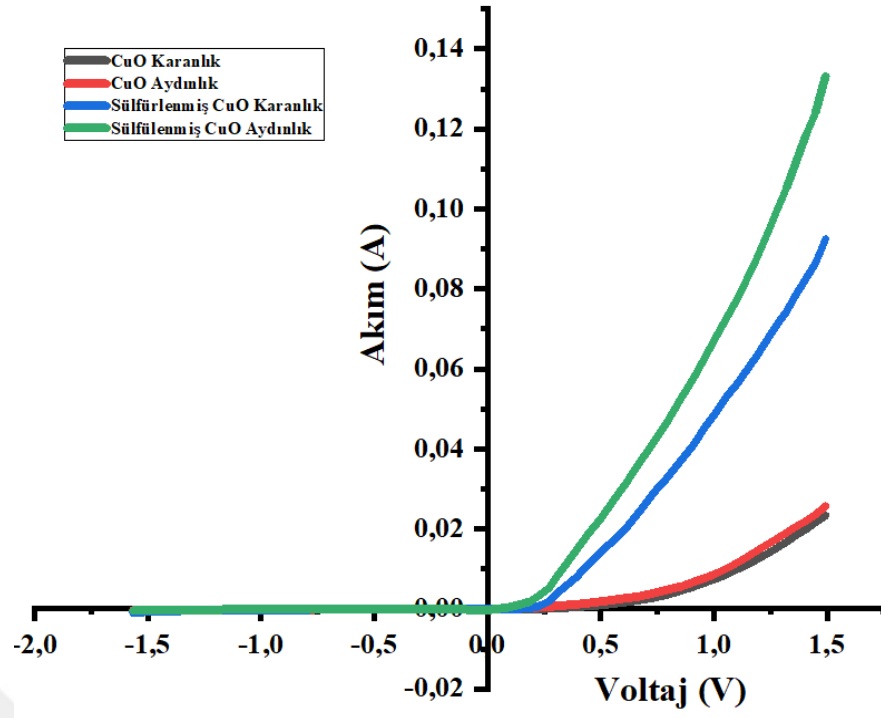
Sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edilen veriler ve diğer sabit değerler denklem (75) ve (76)'da yerlerine

yazılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 3,13, 0,65 eV ve 5,30, 0,66 eV olarak bulunmuştur.

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar küçük olursa I-V karakteristikleri o kadar lineer olur. Seri dirence bağlı olarak diyot kalitesi de aynı oranda artar. Dolayısıyla seri direnci küçük olan doğrultucu kontakların diyot kalitesi yüksek olur. Sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün oda sıcaklığında seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonu kullanılarak hesaplandı. I-V ölçümünden idealite faktörü 3,13 bulunduğu için γ değeri 4 olarak alındı. Yapılan hesaplamalar sonucunda sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün $F(V)$ -V grafiğinden V_0 değeri ve denklem (79) kullanılarak seri direnç yaklaşık $2,25 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega$ olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonundan denklem (78) kullanılarak engel yüksekliği oda sıcaklığında 0,70 eV olarak hesaplanmıştır. Işık altında I-V ölçümünden elde edilen verilerle idealite faktörü 5,30 bulunduğu için γ değeri 6 olarak alındı. Norde fonksiyonları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda fotodedektörün ışık altında seri direnci $1,44 \times 10^{-3} \text{ k}\Omega$, engel yüksekliği ise 0,63 eV olarak bulunmuştur.

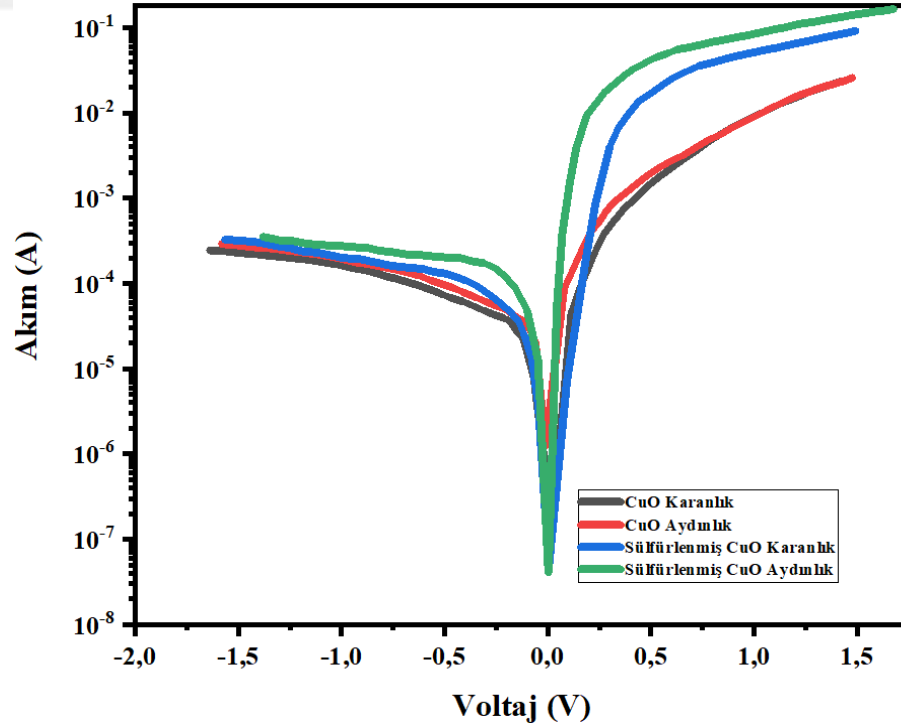
Sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektör için -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta doğrultma oranı denklem (80) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda sülfürlenmiş Al/ CuO /Al MSM fotodedektörün -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı sırasıyla 96,2 ve 299 olarak bulunmuştur.

Şekil 60'ta Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 60. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri.

Şekil 61’de Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 61. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri.

Tablo 12’de Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky fotodedektörlere ait hesaplanan bazı elektriksel parametreler verilmiştir.

Tablo 12. Al/CuO/Al Ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait Bazı Elektriksel Parametreler

		Yöntem	n	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)	RR
Fotodedektörler	Al/CuO/Al	Karanlıkta	TE	4,00	0,67	-
			Norde	-	0,78	5,62x10 ⁻³
		Işık altında	TE	3,94	0,67	-
			Norde	-	0,82	5,22x10 ⁻³
	Sülfürlenmiş Al/CuO/Al	Karanlıkta	TE	3,13	0,65	-
			Norde	-	0,70	2,25x10 ⁻³
		Işık altında	TE	5,30	0,66	-
			Norde	-	0,63	1,44x10 ⁻³

Karşılaştırma amacıyla, Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al metal-yarıiletken-metal fotodedektörlerine ait -1,5 V ve 1,5V gerilim altında lineer ve logaritmik akım-voltaj eğrileri sırasıyla şekil 60 ve 61’de gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında elektriksel kontak malzemesi olarak Alüminyum metali kullanılmıştır. Yarıiletken olarak ise p-tipi CuO kullanılmıştır. Metal/yarıiletken/Metal kontaklarda metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse omik kontak oluşur. Eğer metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise bu durumda doğrultucu (Schottky) kontak oluşur. Alüminyum metalinin iş fonksiyonu 4,2 eV, p-tipi CuO yarıiletkenin iş fonksiyonu ise 4,7 eV ‘dir (Deuermeier, Liu et al. 2018) (Morasch, Wardenga et al. 2016). Elde edilen I-V eğrileri, heteroeklem geometri oluşumu nedeniyle Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin doğrultucu özellikte olduğunu göstermiştir. Schottky kontakların oluşumu, metal-yarıiletken arayüzündeki Fermi seviyesi eşitlenmesine atfedilir (Liu, Guo et al. 2018). Al metali CuO yarıiletkeni ile temas ettiğinde yarıiletken bant boşluğu içinde yüksek yoğunluklu metal halleri oluşur. Bu durumların çoğu Fermi seviyesinin altında bulunur ve yarıiletkenden metale aktarılan yüksek yoğunluklu serbest yük taşıyıcıları içerir. Sonuç olarak Fermi seviyesi metal-yarıiletken arayüzeyinde sabitlenerek dengelenir ve bir Schottky kontağı oluşur. Al/CuO/Al MSM cihazın karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği incelendiğinde, ters beslem bölgesinde akım değerinin 10⁻⁴ A seviyesinde olduğu ve cihaza doğru beslem uygulandığında akımın 100 kat artarak 10⁻² A

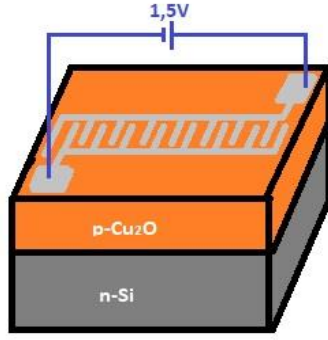
seviyelerine kadar çıktığı gözlenmiştir. İdeal bir diyotta akım iletimi sadece yük taşıyıcılarının engel üzerinden termiyonik emisyonu ile gerçekleşir (Ramizy 2021). Bu yüzden ideal bir diyotta idealite faktörü $n=1$ değerini alır. Şayet tükenim bölgesinde ve arayüzeyde rekombinasyon ve jenerasyon merkezleri varsa akım iletiminde rekombinasyon ve jenerasyon akımları baskın olur ki, bu da idealite faktörünün 1'den büyük olmasına yol açar (Faraz, Ashraf et al. 2010). Fabrikasyonunu yaptığımız bu cihazlarda idealite faktörünün 1'den büyük çıkması tükenim bölgesinde ve arayüzde rekombinasyon ve jenerasyon merkezlerinin varlığını gösterir.

Uygulanan ön gerilim voltajının artışı, taşıyıcıların hızının ve termiyonik emisyonun artmasına neden olmuştur. Logaritmik I-V grafiğinden görülebileceği üzere artan ön gerilim voltajında elde edilen akım hafifçe doygun hale gelmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek seri direnç gösterilebilir. Yüksek seri direnç değerleri $\ln(I)$ -V grafiğinde özellikle yüksek düz beslem uygulama gerilimlerinde eğimi azaltır bu da idealite faktörünün 1'den uzaklaşarak daha yüksek değer almasına yol açar. $\ln(I)$ -V grafiğinde görülebileceği üzere eğim azalırken akım artma eğilimindedir. Bu durum aygıtta tünelleme akımının varlığını gösterir ve bu da idealite faktörünü artırır. Cihaz üzerine solar simülatör kullanılarak 100 mW/cm^2 şiddetinde beyaz ışık düşürüldüğünde karanlık akıma göre az da olsa akımda bir miktar artış gözlenmiştir. Akımdaki artışın bu kadar az olmasının cihaz üzerine düşen fotonlarla üretilen elektron ve hollerin rekombinasyon hızının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Rekombinasyon hızı arttıkça fotoaktivite düşmektedir. Fotoaktivitenin artırılması için bant aralığı enerjisinin düşürülmesi önemli rol oynamaktadır. Tablo 12'ye göre, Al/CuO/Al MSM fotodedektörün yarıiletken tarafından metale geçmek isteyen hollerin ve metal tarafından yarıiletkenine geçmek isteyen elektronların karşılaştığı potansiyel engel yüksekliği değerinin karanlıkta ve ışık altında değişmediği görülmektedir. Bunun yanında cihazın seri direncinde bir miktar azalma olduğu da yapılan hesaplamalardan görülmüştür. Seri direncin azalmasına ve potansiyel engel yüksekliğinin değişmemesine rağmen ışık altında akım artışının tükenim bölgesinde ve arayüzeyde bulunan rekombinasyon merkezlerinin çokluğundan ve rekombinasyon hızının yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

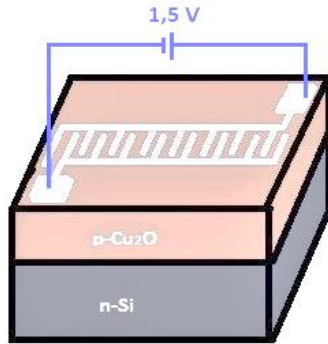
Bu tez çalışmasında, sülfürleme işleminin fotodedektörün elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, CuO ince filmi 300°C 'de 3 dakika boyunca sülfürlenmiştir. Sülfürleme işleminden sonra elektriksel ölçüm alınabilmesi için ince film yüzeyine Alüminyum IDE Schottky kontaklar oluşturulmuştur. Cihaz üzerine aynı ters beslem ve doğru beslem voltajı ($-1,5 \text{ V} - +1,5 \text{ V}$) uygulandığında akımın belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Sülfürleme işleminden sonra karanlıkta ters beslem akımının sülfürlenmemiş Al/CuO/Al MSM cihaza göre artış göstererek 10^{-4} A seviyelerinde olduğu gözlenmiştir.

Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM cihazın düşük ön gerilim voltajında karanlık akımının sülfürlenmemiş cihaza göre daha hızlı artış göstererek 10^{-2} A seviyelerine çıktığı logaritmik akım-voltaj eğrisinden anlaşılmaktadır (Şekil 61). Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektör üzerine ışık düşürüldüğünde ters beslem ve doğru beslemde akımın karanlık ortamdakine göre biraz daha arttığı görülmüştür. Akımdaki bu artışın, XRD ve SEM analizlerinden elde edildiği gibi sülfürleme işleminden sonra kristal kalitesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kristal kalitesindeki artış yük taşıyıcılarının sayısını ve mobilitasını arttırmıştır ve dolayısıyla da akımı arttırmıştır. Bununla birlikte, tablo 12'deki hesaplamalara göre sülfürleme işleminden sonra Al/CuO/Al MSM fotodedektörde elektron ve hollerin karşılaştığı potansiyel engel yüksekliklerinin çok fazla değişmediği görülmüştür. Aynı zamanda sülfürleme işlemiyle birlikte cihazın seri direncinde de azalma olduğu yine yapılan hesaplamalardan görülmüştür. Sülfürleme işlemi sonucunda, yukarıda belirtildiği nedenlerden dolayı idealite faktörü 1'den büyük çıkmıştır. Bu da sülfürleme işlemi sonucunda yine aygıtın arayüzeyinde ve tükenim bölgesinde rekombinasyon ve jenerasyon merkezlerinin varlığını göstermektedir. Sülfürleme sonrasında aygıtın karanlıkta ve ışık altındaki akımda belirgin bir artış olmuştur. Sülfürleme sonrasında meydana gelen akımdaki bu artışın, sülfürleme öncesi aygıtın tükenim bölgesindeki mevcut rekombinasyon merkezlerinin ve rekombinasyon hızının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bununla birlikte sülfürlenen aygıtın $\ln(I)$ -V grafiğinden görülebileceği üzere, düz beslemdeki akım artma meylindeyken eğim de azalma meylindeyken. Bu da sülfürleme sonrasında aygıtta akım iletimim tünelleme ile de gerçekleştiğini gösterir. Tablo 12'ye göre, sülfürleme işlemiyle cihazın doğrultma oranının da belirgin bir şekilde arttığı yapılan hesaplamalar neticesinde görülmüştür.

Oda sıcaklığında n-tipi silisyum altlık üzerine Cu_2O kaplanarak hazırlanan, sırasıyla şekil 62 (a) ve (b)'de şematik diyagramı ve görseli verilen Al/ Cu_2O /Al ve sülfürlenmiş Al/ Cu_2O /Al fotodedektörlerin, yine oda sıcaklığında ve -1,5 V-1,5 V gerilim aralığında, karanlıkta ve ışık altında akım-gerilim ölçümü yapılarak I-V ve $\ln I$ -V grafikleri origin programında çizdirilmiştir.



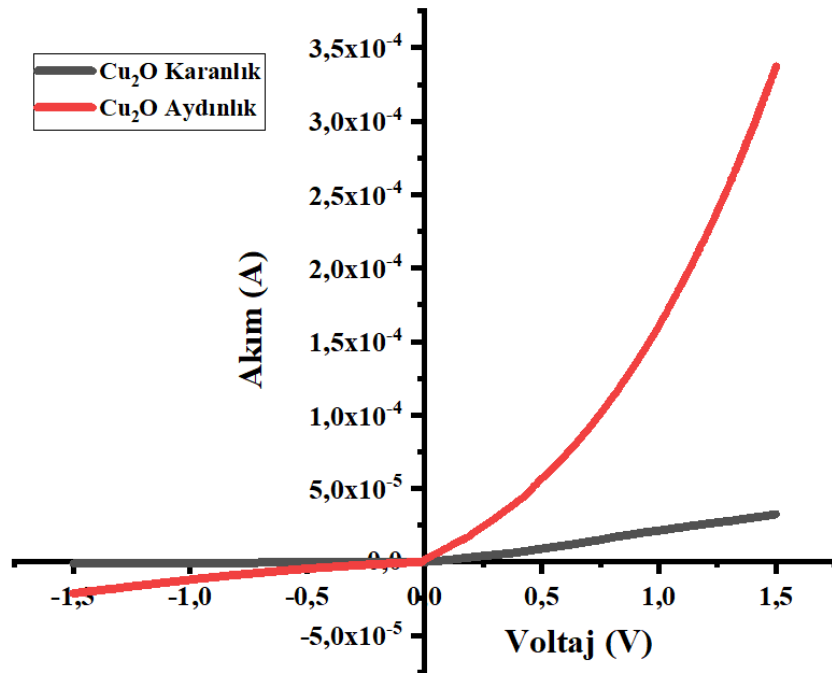
(a)



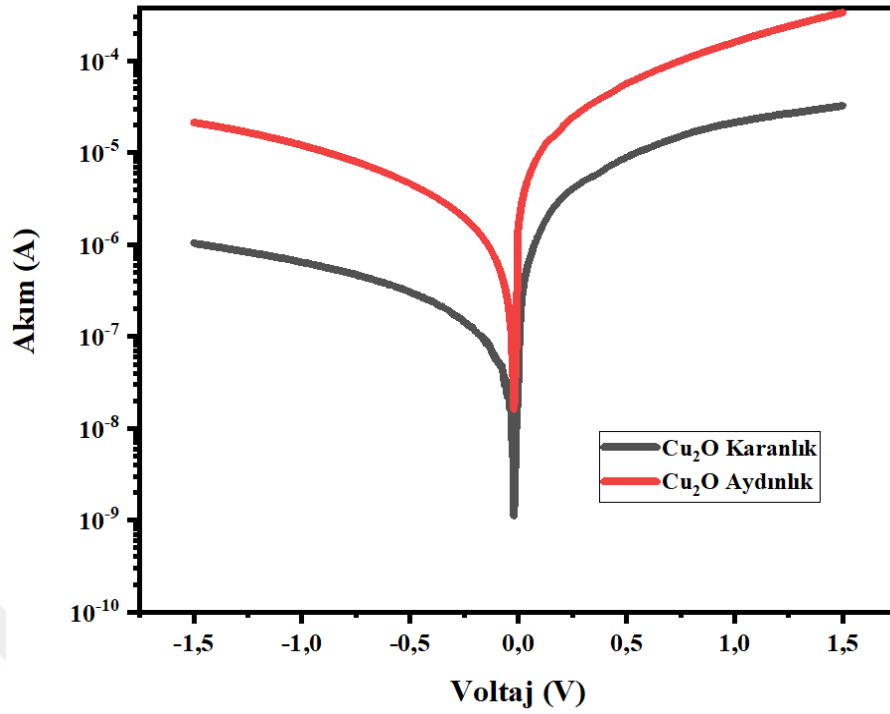
(b)

Şekil 62. n-tipi silisyum altlık üzerine Cu_2O kaplanarak hazırlanan (a) $\text{Al}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Al}$ (b) Sülfürlenmiş $\text{Al}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Al}$ MSM fotodedektör.

$\text{Al}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Al}$ yapısına ait I-V grafiği şekil 63'te ve $\ln I$ -V grafiği şekil 64'te verilmiştir.



Şekil 63. $\text{Al}/\text{Cu}_2\text{O}/\text{Al}$ MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.



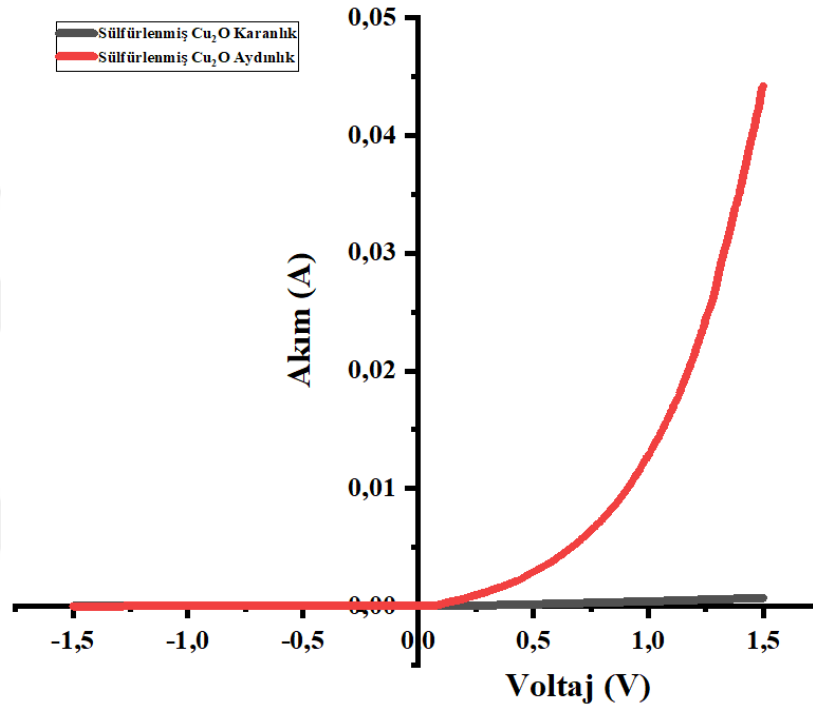
Şekil 64. Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.

Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında Akım-Gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edilen veriler ve diğer sabit değerler denklem (75) ve (76)'da yerlerine yazılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün idealite faktörü ve engel yüksekliği karanlıkta ve ışık altında sırasıyla 2,40, 0,83 eV ve 2,10, 0,78 eV olarak bulunmuştur.

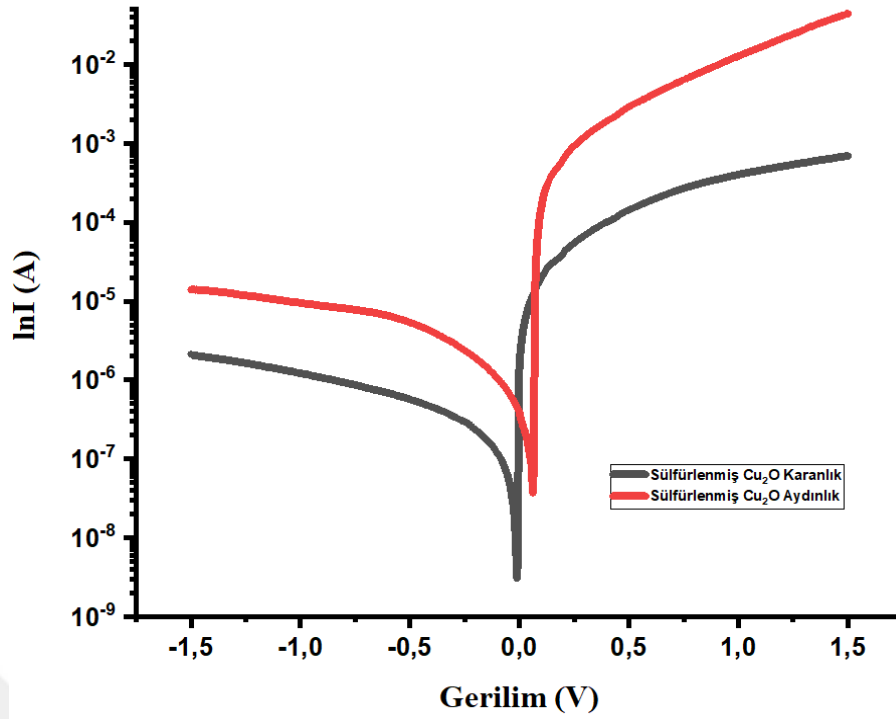
Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar küçük olursa I-V karakteristikleri o kadar lineer olur. Seri dirence bağlı olarak diyot kalitesi de aynı oranda artar. Dolayısıyla seri direnci küçük olan doğrultucu kontakların diyor kalitesi yüksek olur. Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün oda sıcaklığında karanlıkta ve ışık altında seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonu kullanılarak hesaplandı. Karanlıkta I-V ölçümünden idealite faktörü 2,40 bulunduğu için γ değeri 3 olarak alındı. Yapılan hesaplamalar sonucunda Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün F(V)-V grafiğinden V_0 değeri ve denklem (79) kullanılarak karanlıkta seri direnç yaklaşık 5,34 k Ω olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonundan denklem (78) kullanılarak engel yüksekliği karanlıkta oda sıcaklığında 0,90 eV olarak hesaplanmıştır. Işık altında I-V ölçümünden idealite faktörü 2,10 bulunduğu için γ değeri 3 olarak alındı. Norde fonksiyonları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda fotodedektörün ışık altında seri direnci $9,8 \times 10^{-1}$ k Ω , engel yüksekliği ise 0,85 eV olarak bulunmuştur.

Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektör için -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı denklem (80) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı sırasıyla 31,3 ve 15,8 olarak bulunmuştur.

Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al yapısına ait I-V grafiği şekil 65'te ve lnI-V grafiği şekil 66'da verilmiştir.



Şekil 65. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği.



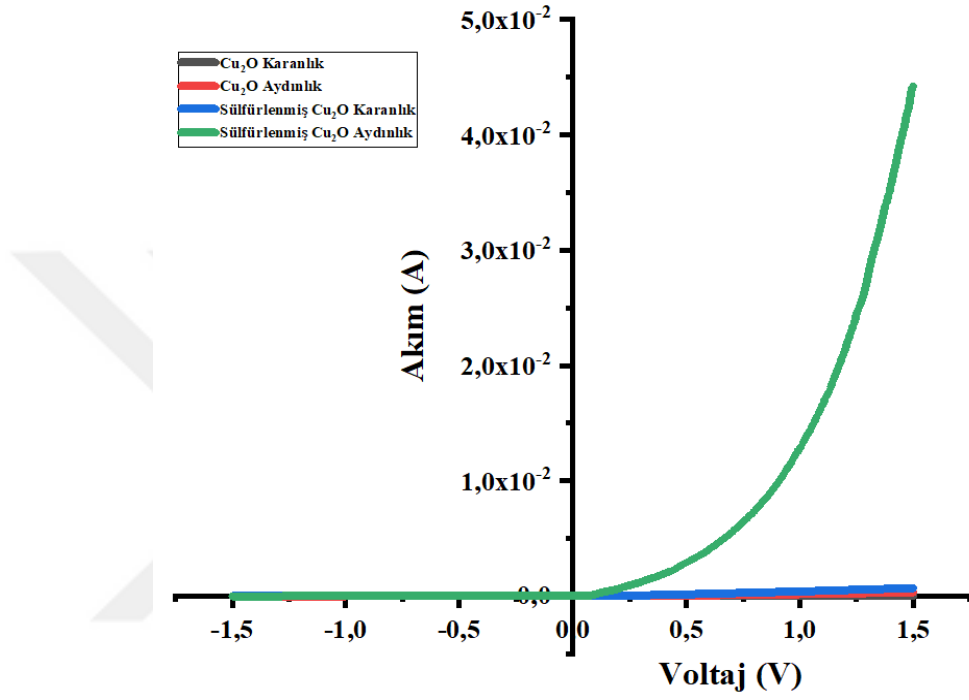
Şekil 66. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında lnI-V grafiği.

Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında akım-gerilim (I-V) ölçümlerinden elde edilen veriler ve diğer sabit değerler denklem (75) ve (76)'da yerlerine yazılarak idealite faktörü ve engel yüksekliği hesaplanmıştır. Yapılan hesaplamalar neticesinde sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlıkta ve ışık altında idealite faktörü ve engel yüksekliği sırasıyla 2,32, 0,76 eV ve 3,99, 0,66 eV olarak bulunmuştur.

Metal-yarıiletken doğrultucu kontakların seri dirençleri ne kadar küçük olursa I-V karakteristikleri o kadar lineer olur. Seri dirence bağlı olarak diyot kalitesi de aynı oranda artar. Dolayısıyla seri direnci küçük olan doğrultucu kontakların diyor kalitesi yüksek olur. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün oda sıcaklığında karanlıkta ve ışık altında seri direnç ve engel yüksekliği değerleri Norde Fonksiyonu kullanılarak hesaplandı. Karanlıkta I-V ölçümünden idealite faktörü 2,32 bulunduğu için γ değeri 3 olarak alındı. Yapılan hesaplamalar sonucunda sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün F(V)-V grafiğinden V_0 değeri ve denklem (79) kullanılarak karanlıkta seri direnç yaklaşık $2,90 \times 10^{-1}$ k Ω olarak bulunmuştur. Norde fonksiyonundan denklem (78) kullanılarak karanlıkta engel yüksekliği oda sıcaklığında 0,85 eV olarak hesaplanmıştır. Işık altında I-V ölçümünden idealite faktörü 3,99 bulunduğu için γ değeri 4 olarak alındı. Norde fonksiyonları kullanılarak yapılan hesaplamalar sonucunda fotodedektörün seri direnci $1,39 \times 10^{-2}$ k Ω , engel yüksekliği ise 0,75 eV olarak bulunmuştur.

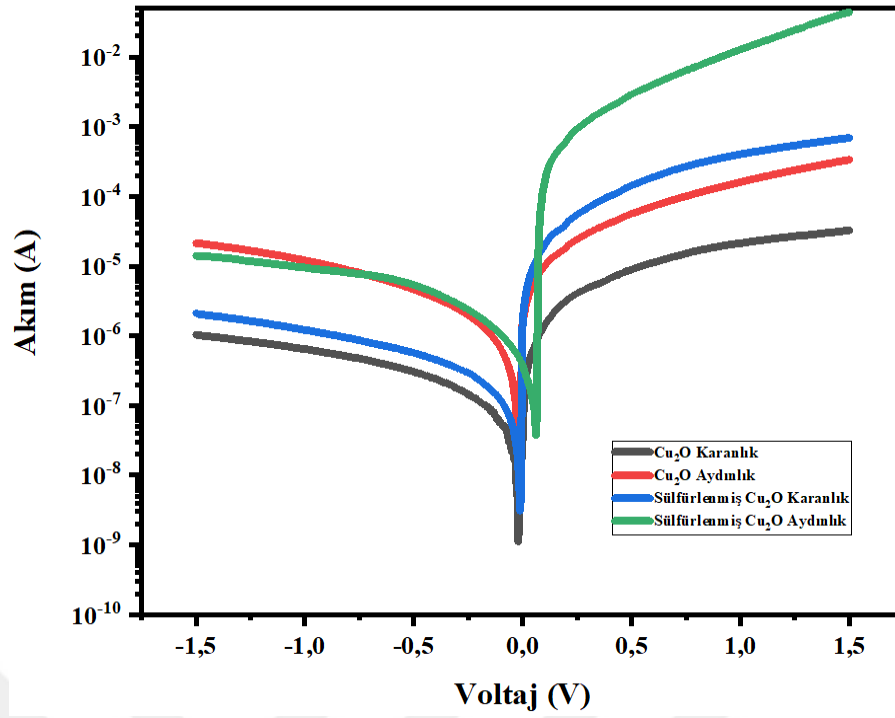
Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektör için -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı denklem (80) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar sonucunda Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün -1,5 V ve +1,5 V değerleri için karanlıkta ve ışık altında doğrultma oranı 326 ve 3160 olarak bulunmuştur.

Şekil 67’de Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 67. Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin I-V grafikleri.

Şekil 68’de Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri bir arada verilmiştir.



Şekil 68. Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin lnI-V grafikleri.

Tablo 13'te Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM Schottky fotodedektörlere ait hesaplanan bazı elektriksel parametreler verilmiştir.

Tablo 13. Al/Cu₂O/Al Ve Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait Bazı Elektriksel Parametreler

		Yöntem	n	ϕ_b (eV)	R_s (k Ω)	RR
Fotodedektörler	Al/Cu ₂ O/Al	Karanlıkta	TE	2,40	0,83	-
			Norde	-	0,90	5,34
		Işık altında	TE	2,10	0,78	-
			Norde	-	0,85	9,8x10 ⁻¹
	Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al	Karanlıkta	TE	2,32	0,76	-
			Norde	-	0,85	2,90x10 ⁻¹
		Işık altında	TE	3,99	0,66	-
			Norde	-	0,75	1,39x10 ⁻²

Karşılaştırma amacıyla, Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al metal-yarıiletken-metal fotodedektörlerine ait -1,5 V ve 1,5V gerilim altında lineer ve logaritmik akım-voltaj

eğrileri sırasıyla şekil 67 ve 68’de gösterilmiştir. Bu tez çalışmasında elektriksel kontak malzemesi olarak Alüminyum metali kullanılmıştır. Yarıiletken olarak ise p-tipi Cu_2O kullanılmıştır. Metal/yarıiletken/Metal kontaklarda metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan büyükse omik kontak oluşur. Eğer metalin iş fonksiyonu yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük ise bu durumda doğrultucu (Schottky) kontak oluşur. Alüminyum metalinin iş fonksiyonu 4,2 eV, p-tipi Cu_2O yarıiletkenin iş fonksiyonu ise 5,0 eV ‘dir (Deuermeier, Liu et al. 2018) (Morasch, Wardenga et al. 2016). Elde edilen I-V eğrileri, heteroeklem geometri oluşumu nedeniyle Al/ Cu_2O /Al ve sülfürlenmiş Al/ Cu_2O /Al MSM fotodedektörlerin doğrultucu özellik göstermiştir. Omik kontaklar yerine (teorik olarak tahmin edildiği gibi) Schottky kontakların oluşumu, metal-yarıiletken arayüzündeki Fermi seviyesi eşitlenmesine atfedilir (Liu, Guo et al. 2018). Al metali Cu_2O yarıiletkeni ile temas ettiğinde yarıiletken bant boşluğu içinde yüksek yoğunluklu metal halleri oluşur. Bu durumların çoğu Fermi seviyesinin altında bulunur ve yarıiletkenden metale aktarılan yüksek yoğunluklu serbest yük taşıyıcıları içerir. Sonuç olarak Fermi seviyesi metal-yarıiletken arayüzeyinde sabitlenerek dengelenir ve bir Schottky kontağı oluşur. Al/ Cu_2O /Al MSM cihazın karanlıkta ve ışık altında I-V grafiği incelendiğinde, ters beslem bölgesinde akım değerinin 10^{-6} A seviyesinde olduğu ve cihaza doğru beslem uygulandığında akımın 10 kat artarak 10^{-5} A seviyelerine kadar çıktığı gözlenmiştir. Düşük ön gerilimde elde edilen akıma termiyonik emisyon akımı neden olur (Ramizy 2021). Uygulanan ön gerilim voltajının artışı, taşıyıcıların hızını ve termiyonik emisyonun artmasına neden olmuştur. Logaritmik I-V grafiğinden görülebileceği üzere artan ön gerilim voltajında elde edilen akım hafifçe doygun hale gelmiştir. Cihaz üzerine solar simülatör kullanılarak 100 mW/cm^2 şiddetinde beyaz ışık düşürüldüğünde karanlık akıma göre akımda 10 kat artış gözlenmiştir. Akımdaki artışın cihaz üzerine düşen fotonlarla üretilen elektron ve hollerin sayısının artmasından ve rekombinasyon hızlarının düşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Rekombinasyon hızı arttıkça fotoaktivite düşer, rekombinasyon hızı azaldıkça fotoaktivite artar. Fotoaktivitenin artırılması için bant aralığı enerjisinin düşürülmesi de önemli rol oynamaktadır. Tablo 13’e göre, Al/ Cu_2O /Al MSM fotodedektörün yarıiletken tarafından metale geçmek isteyen hollerin karşılaştığı potansiyel engel yüksekliği değerinin cihaz üzerine ışık düşürüldüğünde azaldığı görülmektedir. Bunun yanında cihazın seri direncinde büyük oranda azaldığı da yapılan hesaplamalardan görülmüştür. Seri dirençteki ve potansiyel engel yüksekliğindeki azalma ışık altında akım değerinin artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, sülfürleme işleminin fotodedektörün elektriksel ve fotovoltaiik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmak için, Cu_2O ince filmi 300°C ’de 3 dakika boyunca

sülfürlenmiştir. Sülfürleme işleminden sonra elektriksel ölçüm alınabilmesi için ince film yüzeyine Alüminyum IDE Schottky kontaklar oluşturulmuştur. Cihaz üzerine aynı ters beslem ve doğru beslem voltajı (-1,5 V - +1,5 V) uygulandığında akımın belirgin bir şekilde arttığı görülmüştür. Sülfürleme işleminden sonra karanlıkta ters beslem akımının sülfürlenmemiş Al/Cu₂O/Al MSM cihaza göre artış göstererek 10⁻⁶ A seviyelerinde olduğu gözlenmiştir. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM cihazın düşük ön gerilim voltajında karanlık akımının sülfürlenmemiş cihaza göre daha hızlı artış göstererek 10⁻⁴ A seviyelerine çıktığı logaritmik akım-voltaj eğrisinden anlaşılmaktadır (Şekil 68). Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektör üzerine ışık düşürüldüğünde ters beslem ve doğru beslemde akımın karanlık ortamdakine göre daha çok arttığı görülmüştür. Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün sülfürlenmesinden sonra karanlıkta ve ışık altında ters beslem ve doğru beslem voltajlarında akım artışı gözlenmiştir. Akımdaki bu artışın, XRD ve SEM analizlerinden elde edildiği gibi sülfürleme işleminden sonra kristal kalitesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Fotoaktivitenin artırılması için bant aralığı enerjisinin düşürülmesi de önemli rol oynamaktadır. Sülfürlemeyle birlikte bant aralığının azaldığı soğurma ölçümlerinden görülmüştü. Yarıiletkenin bant aralığının düşmesi daha düşük enerjili fotonların da soğurulması anlamına gelir. Daha fazla foton soğurulması da daha fazla serbest elektron ve hol oluşumu demektir. Bu da akımda artışa neden olur. Bununla birlikte, tablo 13'teki hesaplamalara göre sülfürleme işleminden sonra Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörde elektron ve hollerin karşılaştığı potansiyel engel yükseklikleri oldukça azalmıştır. Aynı zamanda sülfürleme işlemiyle birlikte cihazın seri direncinde de azalma olduğu yine yapılan hesaplamalardan görülmüştür. Sülfürleme işlemi sonucunda, potansiyel engel yüksekliği ve seri direnç değerindeki azalmalar nedeniyle karanlıkta ve ışık altındaki akımda belirgin bir artış olmuştur. Tablo 13'e göre, sülfürleme işlemiyle cihazın doğrultma oranının da belirgin bir şekilde arttığı yapılan hesaplamalar neticesinde görülmüştür. Elde edilen idealite değerlerine gelince, idealite değeri 1'den sapmalar olduğu görülmüştür. Bu idealiteden sapmalar hetero yapıları cihazlar için doğaldır. Bu sapmaların seri direnç, arayüz durumları, doğal oksit tabakası, kusurlar ve bariyer homojensizliğinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Faraz, Ashraf et al. 2010).

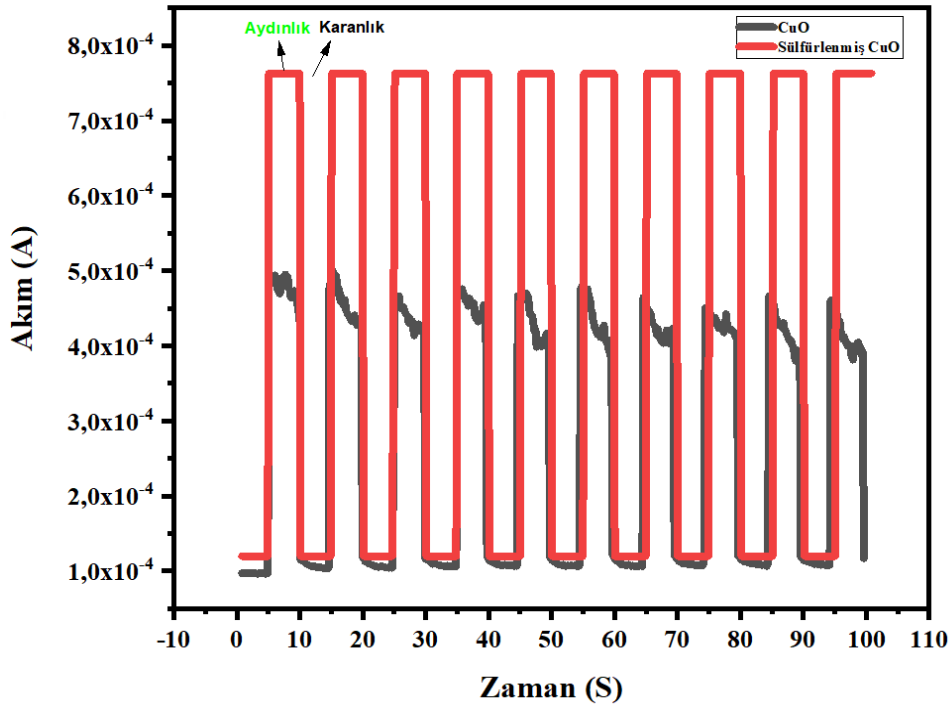
Foto akım-Zaman (I-t) Ölçümleri ve Yükselme Süresi (Rise Time) ve Düşme Süresi (Fall Time)

Fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al, sülfürlenmiş Al/CuO/Al, Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin tepki/geri kazanım süresini, anahtarlanma davranışını ve tekrarlanabilirlik performansını gözlemlemek için dedektörlerin I-t ölçümleri yapıldı.

Bir fotodedektörün tepki/geri kazanım süresinin hesaplanması, dedektörün hızı hakkında bir fikir verir. Dedektörün tepki/geri kazanım süresinin kısılması ya da üzerine ışık düşürüldüğünde çok kısa bir zamanda tepki vermesi üretilen dedektörün yüksek kaliteli olduğu anlamına gelir.

Cihazların I-t ölçümleri oda sıcaklığında, 1,5 V ön gerilim altında, 100 mW/cm²'lik ışık şiddetine sahip görünür ışığın düzenli olarak her 5 saniyede bir açılıp kapatılmasıyla 100 saniye süreyle kaydedildi.

Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği şekil 69'da verilmiştir.

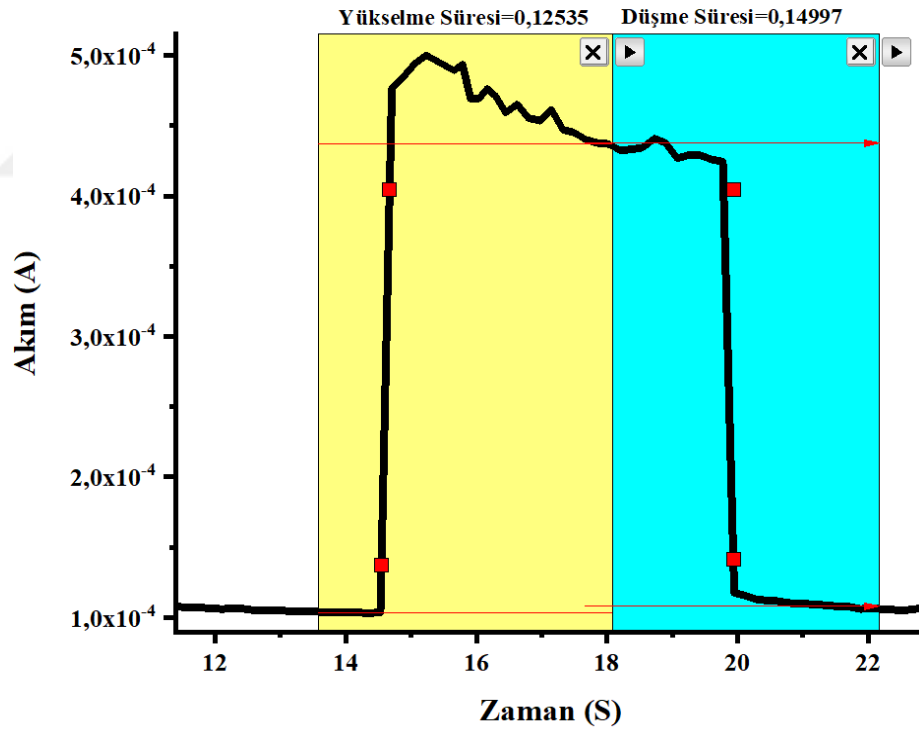


Şekil 69. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği.

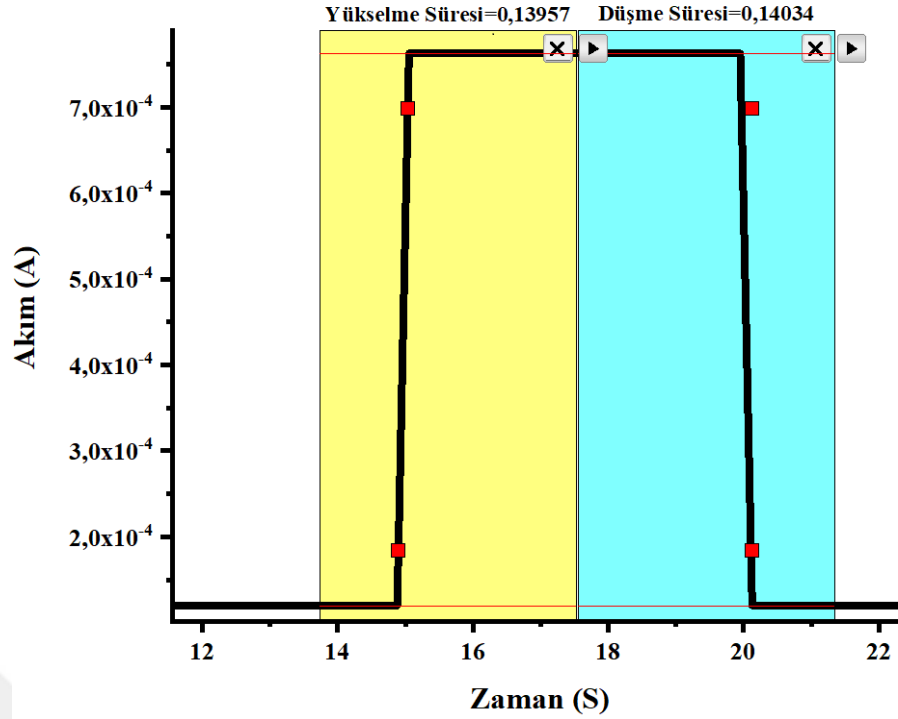
Numune aydınlatıldığında foto akımın doyma değerine yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıç düzeyine geldiği I-t ölçümüyle elde edilen grafikten açıkça

görülmektedir. Bu, fotodedektörün sürekli olarak ışığa maruz kaldığında çalıştığı anlamına gelir. Sülfürleme işlemiyle birlikte Al/CuO/Al MSM fotodedektörün hem karanlık hem de fotoakım değerleri artmıştır. Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün akım değerlerinin yüksek olması, sülfürleme işleminin CuO ince filmin kristal kalitesini arttırmasından ve yasak enerji aralığını azaltmasına atfedilmiştir. Sülfürlenmiş Numune aydınlatıldığında foto akımın doyma değerine yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıç düzeyine geldiği I-t ölçümüyle elde edilen grafikten açıkça görülmektedir. Bu bulgu, sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün tutarlılığını ve sağlamlığını gösterir.

Fotodedektörlerdeki önemli parametrelerden biri de fototepki (photoresponse) hızıdır. Yükselme süresi, fotoakımı doygunluk değerinin %10'undan %90'ına çıkarma zamanıdır, düşme süresi ise fotoakımı doyma değerinin %90'ından %10'una düşürme zamanıdır. Şekil 70 ve 71'de Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün tepki/geri kazanım süreleri gösterilmiştir.



Şekil 70. Al/CuO/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.



Şekil 71. Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.

Cihazların tepki/geri kazanım sürelerinin 1 saniyeden daha az olduğu (120-140 ms) bulundu. Fotodedektörler için bu değerlerin oldukça iyi olduğu söylenebilir. Tepki/geri kazanım sürelerinin çok kısa olması, yapısal kusurların azlığının, serbest yük taşıyıcıların malzeme içinde daha hızlı hareket etmesine izin verdiğini ve dolayısıyla bunların ilgili elektrotlarına ulaşmalarının daha kısa sürdüğünü gösterir. Sülfürleme işlemiyle tepki/geri kazanım sürelerinin değişmediği stabil olduğu görüldü.

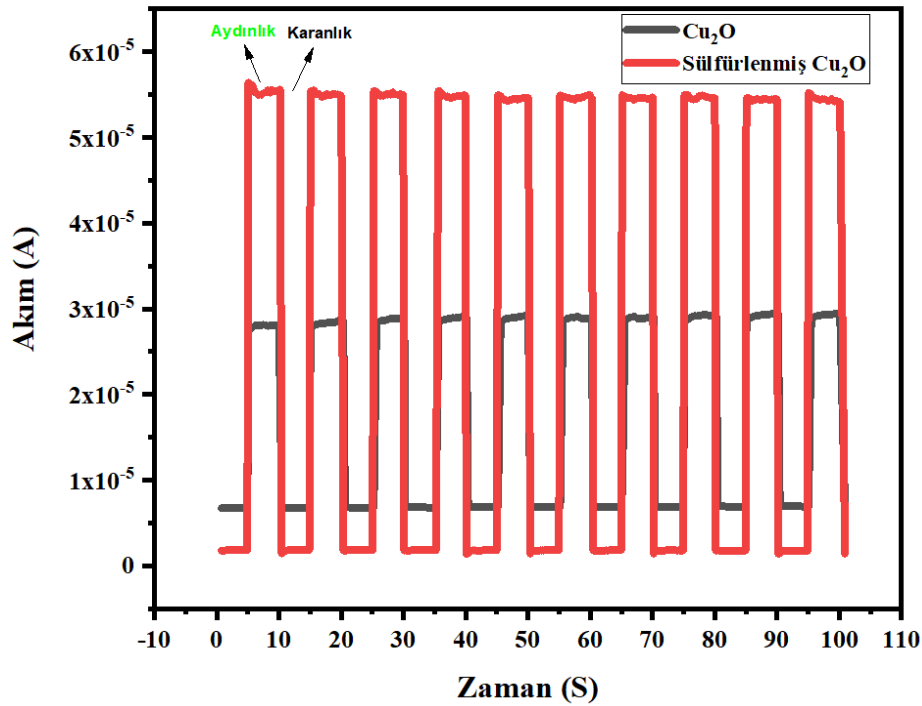
Al/CuO/Al ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin kazanç (G), dedektivite (D) ve ışığı algılama hassasiyeti (PS) gibi bazı fotovoltaiik özellikleri 100 mW/cm² görünür ışık şiddetine sahip solar simülatör kullanılmak suretiyle 1,5 V ön gerilimde ölçümler alınarak hesaplanmıştır. Fotodedektörlerin kazanç (G) değeri denklem (63), dedektivite (D) değeri denklem (64) ve ışığı algılama hassasiyeti (PS) değerleri ise denklem (69) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde bulunan değerler tablo 14'te verilmiştir.

Tablo 14. Al/CuO/Al Ve Sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait 100 mw/cm² Görünür Işık Şiddetinde Ve 1,5 V Ön Gerilimde Bazı Fotovoltaik Parametreler

	Fotodedektörler	
	Al/CuO/Al	Sülfürlenmiş Al/CuO/Al
Yükselme Süresi (S)	0,12	0,13
Düşme Süresi (S)	0,14	0,14
PS (Foto duyarlılık) (%)	296	540
D (Dedektivite) (Jones)	$2,86 \times 10^{10}$	$2,88 \times 10^{10}$
G (Kazanç)	3,96	6,40

Tablo 14 incelendiğinde, sülfürleme işleminden sonra Al/CuO/Al MSM cihazın ışığı algılama hassasiyetinin arttığı görülmektedir. Denklem (79)'da verildiği üzere, foto duyarlılık (Photosensitivity), fotodedektöre ışık düşürüldüğünde akımda meydana gelen artış miktarının karanlık akıma oranı olarak ifade edilir. Yani, fotodetektörden geçen karanlık akıma göre fotoakımdaki artış yüzdesini belirleyen bir parametredir. Fabrikasyonu yapılan cihazların akım-gerilim eğrilerinin incelendiği kısımda belirttiğimiz akımdaki artışa neden olan etkenler aynı zamanda cihazın foto duyarlılığının artmasına da neden olmuştur.

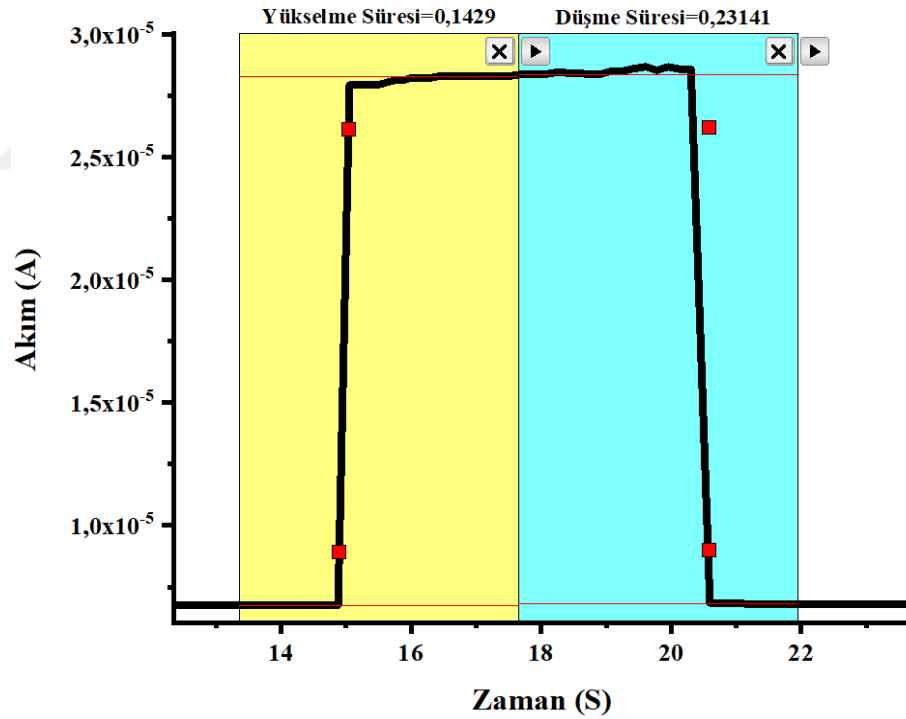
Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği şekil 72'de verilmiştir.



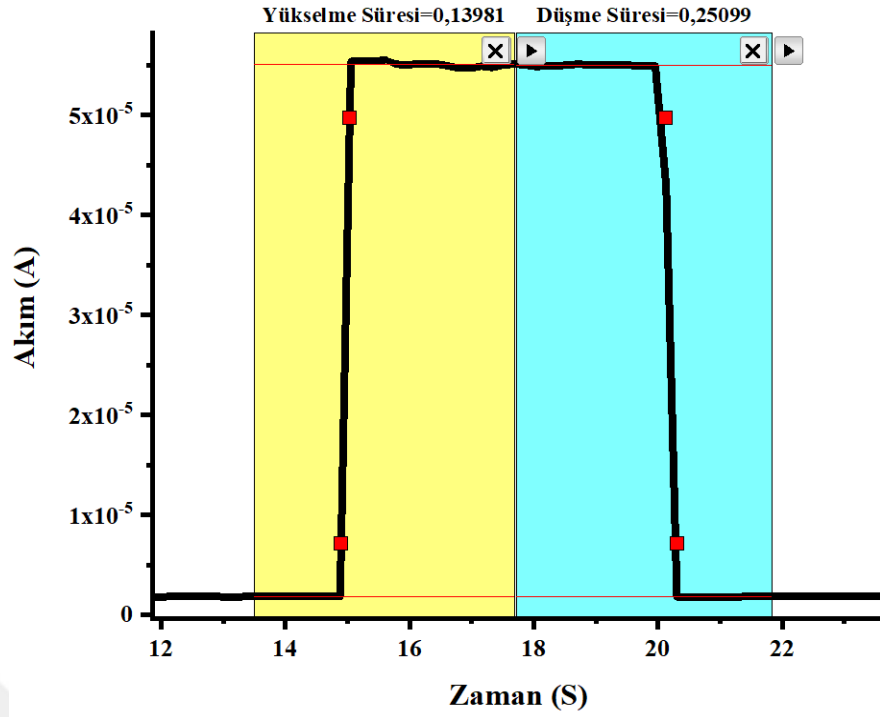
Şekil 72. Al/Cu₂O/Al sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün 1,5 V ön gerilim altında akım-zaman grafiği.

Numune aydınlatıldığında foto akımın doyma değerine yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıç düzeyine geldiği I-t ölçümüyle elde edilen grafikten açıkça görülmektedir. Bu, fotodedektörün sürekli olarak ışığa maruz kaldığında çalıştığı anlamına gelir. Sülfürleme işlemiyle birlikte Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün karanlık akım değeri azalırken fotoakım değerleri artmıştır. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün akım değerlerinin yüksek olması, sülfürleme işleminin Cu₂O ince filmin kristal kalitesini arttırmasından ve yasak enerji aralığını azaltmasına atfedilmiştir. Sülfürlenmiş Numune aydınlatıldığında foto akımın doyma değerine yükseldiği ve ışık kapatıldığında akımın tekrar başlangıç düzeyine geldiği I-t ölçümüyle elde edilen grafikten açıkça görülmektedir. Bu bulgu, sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün tutarlılığını ve sağlamlığını gösterir.

Şekil 73 ve 74'te Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün tepki/geri kazanım süreleri gösterilmiştir.



Şekil 73. Al/Cu₂O/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.



Şekil 74. Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM Schottky fotodedektörün yükselme ve düşme süresi.

Cihazların tepki/geri kazanım sürelerinin 1 saniyeden daha az olduğu (130-250 ms) bulundu. Fotodedektörler için bu değerlerin oldukça iyi olduğu söylenebilir. Tepki/geri kazanım sürelerinin çok kısa olması, yapısal kusurların azlığının, serbest yük taşıyıcıların malzeme içinde daha hızlı hareket etmesine izin verdiğini ve dolayısıyla bunların ilgili elektrotlarına ulaşmalarının daha kısa sürdüğünü gösterir. Sülfürleme işlemiyle tepki/geri kazanım sürelerinin çok fazla değişmediği, stabil olduğu görüldü.

Al/Cu₂O/Al ve Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin kazanç (G), dedektivite (D) ve ışığa karşı Hassasiyet (PS) gibi bazı fotovoltajik özellikleri 100 mW/cm² görünür ışık şiddeti altında ve 1,5 V gerilimde ölçümler alınarak hesaplanmıştır. Fotodedektörlerin kazanç (G) değeri denklem (63), dedektivite (D) değeri denklem (64) ve ışığa karşı duyarlılık (PS) değerleri ise denklem (69) kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalar neticesinde bulunan değerler tablo 15’te verilmiştir.

Tablo 15. Al/Cu₂O/Al ve Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM Schottky Fotodedektörlere Ait 100 mw/cm² Görünür Işık Şiddetinde Ve 1,5 V Gerilimde Bazı Fotovoltaik Parametreler

	Fotodedektörler	
	Al/Cu ₂ O/Al	Sülfürlenmiş Al/Cu ₂ O/Al
Yükselme Süresi (S)	0,14	0,13
Düşme Süresi (S)	0,23	0,25
PS (Foto duyarlılık) (%)	311	3020
D (Dedektivite)	$6,05 \times 10^{10}$	$1,40 \times 10^{11}$
G (Kazanç)	4,11	31,2

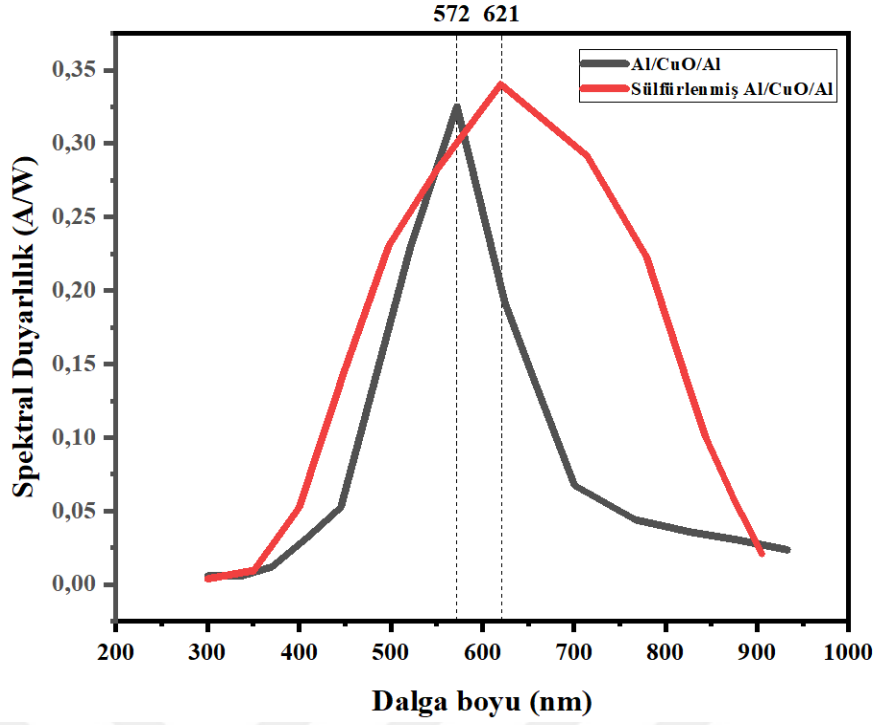
Tablo 15 incelendiğinde, sülfürleme işleminden sonra Al/Cu₂O/Al MSM cihazın ışığı algılama hassasiyetinin arttığı görülmektedir. Denklem (73)'te verildiği üzere, foto duyarlılık (Photosensitivity), fotodedektöre ışık düşürüldüğünde akımda meydana gelen artış miktarının karanlık akıma oranı olarak ifade edilir. Yani, fotodetektörden geçen karanlık akıma göre fotoakımdaki artış yüzdesini belirleyen bir parametredir. Fabrikasyonu yapılan cihazların akım-gerilim eğrilerinin incelendiği kısımda belirttiğimiz akımdaki artışa neden olan etkenler aynı zamanda cihazın foto duyarlılığının artmasına da neden olmuştur.

Spektral Tepki (Spectral Response)

Fotodedektör genellikle belirli bir dalga boyunu veya dalga boyları aralığını algılamak üzere tasarlandığından, fotodedektörün ışık tepkisini araştırmak, dedektörün tepki tepe noktasını belirlemek için çok yararlıdır. Spektral tepki fotodedektörün, ışığın hangi dalga boylarında çalıştığını belirlemede önemli bilgiler verir. Watt başına amper (A/W) birimiyle ifade edilir yani, belirli bir güçte gelen ışık huzmesi için cihazdan ne kadar akım çıktığının bir göstergesidir.

Fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin dalga boyu tepkisini araştırmak için 5.0 V gerilim altında 300 ila 900 nm arasında değişen dalga boyuna karşı ışık tepkisi ölçümünü gerçekleştirilmiştir.

Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün 5 V gerilim altında 300 ila 900 nm arasında değişen dalga boyuna karşı ışık tepkisi ölçümü şekil 75'te karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 75. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün dalga boyuna karşı spektral duyarlılık grafiği.

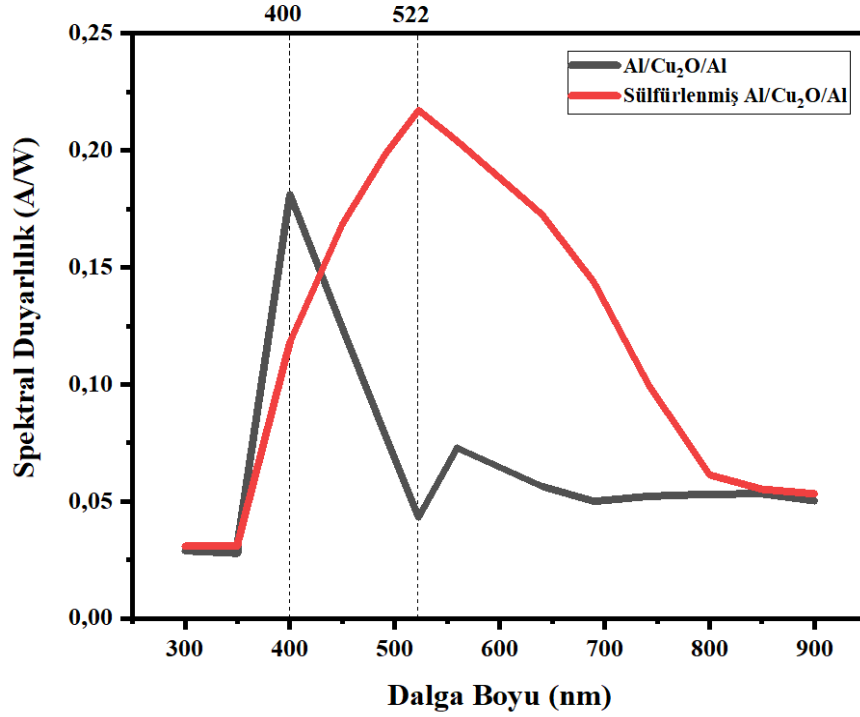
Al/CuO/Al MSM fotodedektör üzerine farklı dalga boylarında ışık düşürerek aygıtın spektral tepkisi ölçülmüştür. Şekil 75'ten görüldüğü üzere, 450 nm dalga boyu civarında aygıtın spektral tepkisi artmaya başlamış ve yaklaşık 572 nm dalga boyunda maksimuma ulaşmıştır. Daha sonra spektral tepki, dalga boyunun artmasıyla azalmıştır. Aygıtın spektral duyarlılığının arttığı bu tepe noktasının cam altlık üzerine büyütülen CuO nano parçacıklı ince filmin optik bant aralığına yakın olduğu görülmüştür. Bu, fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al MSM fotodedektörün elektromanyetik spektrumun yaklaşık 450 nm ile 650 nm aralığındaki ışığı tanımlamada uygun olduğunu göstermektedir.

Sülfürleme işlemi sonrasında ise Al/CuO/Al MSM fotodedektörün daha küçük dalga boylarında (yaklaşık 400 nm) spektral tepkisi artmaya başlamış ve 621 nm dalga boyu civarında maksimum olmuştur. Daha sonra spektral tepki, dalga boyunun artmasıyla azalmaya başlamıştır. Aygıtın spektral duyarlılığının arttığı bu tepe noktasının cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş CuO nano parçacıklı ince filmin optik bant aralığına yakın olduğu görülmüştür. Bu, fabrikasyonu yapılan sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörün elektromanyetik spektrumun yaklaşık 400-850 nm aralığındaki ışığı tanımlamada uygun olduğunu göstermektedir.

Fotodedektörün duyarlılığı, gelen ışığın dalga boyuna ve malzemenin optik bant aralığına bağlıdır.

Duyarlılıktaki artışın ve spektrumdaki algılama aralığındaki genişlemenin, Al/CuO/Al MSM fotodedektörün sülfürleme işlemi sonrasında soğurma kalitesindeki iyileşmeden ve dolayısıyla optik bant aralığının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün 5 V gerilim altında 300 ila 900 nm arasında değişen dalga boyuna karşı ışık tepkisi ölçümü şekil 76’da karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 76. Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün dalga boyuna karşı spektral duyarlılık grafiği.

Al/CuO/Al MSM fotodedektördekine benzer şekilde, Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörü üzerine farklı dalga boylarında ışık düşürüldüğünde aygıtın spektral tepkisi yaklaşık 350 nm dalga boyunda artmaya başlamış ve 400 nm civarında maksimuma ulaşmıştır. Daha sonra spektral tepki, dalga boyunun artmasıyla azalmıştır. Aygıtın spektral duyarlılığının arttığı bu tepe noktasının cam altlık üzerine büyütülen Cu₂O nano parçacıklı ince filmin optik bant aralığına yakın olduğu görülmüştür. Bu, fabrikasyonu yapılan Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün elektromanyetik spektrumun yaklaşık 350 nm ile 500 nm aralığındaki ışığı tanımlamada uygun olduğunu göstermektedir.

Sülfürleme işlemi sonrasında ise Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün 350 nm dalga boyunda spektral tepkisi artmaya başlamış ve yaklaşık 522 nm dalga boyunda maksimum

olmuştur. Daha sonra spektral tepki, dalga boyunun artmasıyla azalmaya başlamıştır. Aygıtın spektral duyarlılığının arttığı bu tepe noktasının cam altlık üzerine büyütülen sülfürlenmiş Cu₂O nano parçacıklı ince filmin optik bant aralığına yakın olduğu görülmüştür. Bu, fabrikasyonu yapılan Sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörün elektromanyetik spektrumun daha geniş bir alanında (350-800 nm) ışığı tanımlamada uygun olduğunu göstermektedir. Duyarlılıktaki artışın ve spektrumdaki algılama aralığındaki genişlemenin, Al/CuO/Al MSM fotodedektörde olduğu gibi, sülfürleme işlemi sonrasında soğurma kalitesindeki iyileşmeden ve dolayısıyla optik bant aralığının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Kuantum Verimliliği (η)

Hem spektral yanıt hem de kuantum verimliliği diyot karakterizasyonunda kullanılan önemli parametrelerdendir. Spektral yanıt, her dalga boyundaki ışığın gücünü kullanırken, kuantum verimliliği foton akısını kullanır. Kuantum verimliliği ile spektral yanıt arasındaki ilişki aşağıdaki denklem ile verilir.

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} \eta \quad (81)$$

ya da daha basit haliyle,

$$SR = \frac{\eta \lambda (nm)}{1240} \quad (82)$$

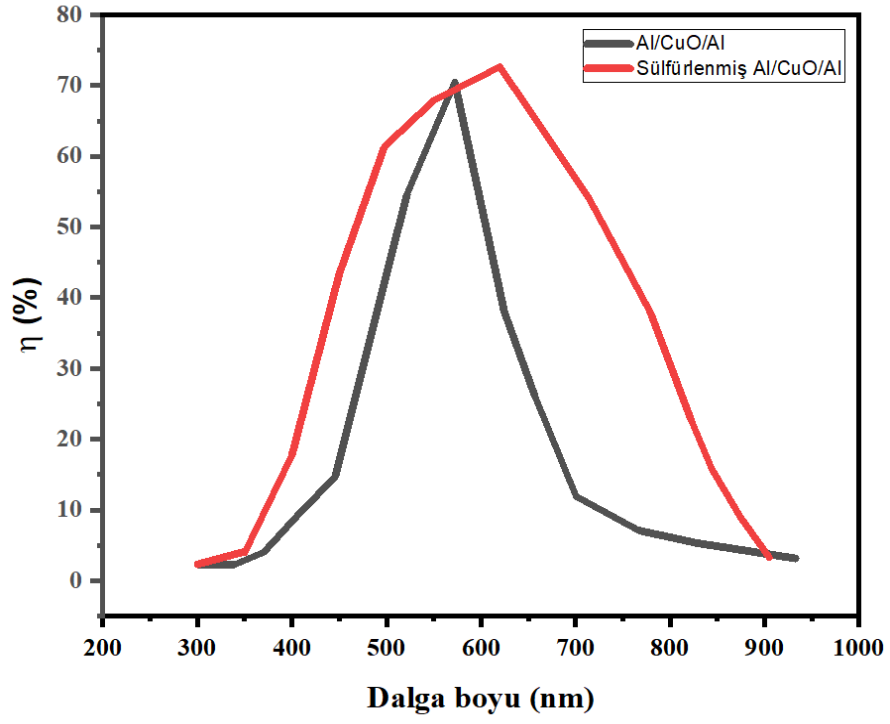
kuantum verimliliği ile spektral yanıt arasındaki ilişki eşitlik (82) ile ifade edilir. Bu eşitlikten faydalanarak kuantum verimliliği,

$$\eta = \frac{SR \cdot 1240}{\lambda (nm)} \quad (83)$$

şeklinde ifade edilebilir.

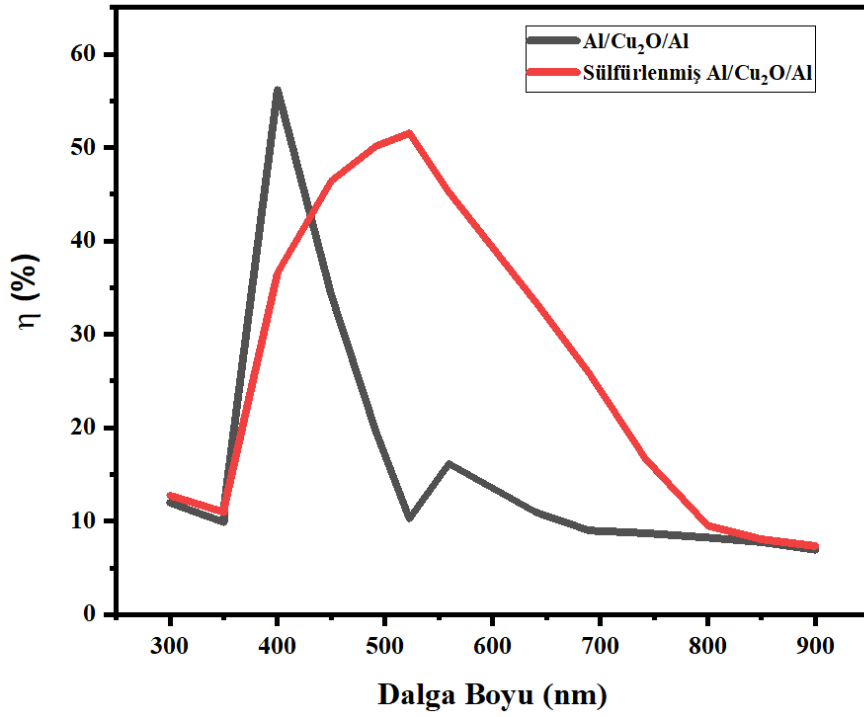
Fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin kuantum verimliliği eşitlik (83) kullanılarak hesaplandı ve dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafikleri çizildi.

Şekil 77’de, fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği verilmiştir.



Şekil 77. Al/CuO/Al ve sülfürlenmiş Al/CuO/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği.

Şekil 78’de, fabrikasyonu yapılan Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği verilmiştir.



Şekil 78. Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin dalga boyuna karşı kuantum verimliliği grafiği.

Kuantum verimliliği ideal olarak kare şekle sahipken, çoğu fotodedektör ve güneş pili gibi optoelektronik aygıtlar için kuantum verimliliği rekombinasyon etkileri nedeniyle azalır. Böyle bir etki fabrikasyonunu yaptığımız cihazlarda da görülmektedir (şekil 77 ve 78). Sülfürleme işlemi sonrasında cihazların kuantum verimlerinde genel olarak bir iyileşme olduğunu söyleyebiliriz. Grafikler incelendiğinde sülfürleme etkisiyle, dalga boyuna karşı kuantum verimliliği eğrisi ideal olan kare şekline yaklaşmıştır. Buna göre, sülfürleme işlemiyle cihaz arayüzeyinde tükenim bölgesindeki rekombinasyon merkezlerinin azaldığını ve dolayısıyla kristal kalitesinin arttığını söyleyebiliriz.



SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında nano yapılı CuO ve Cu₂O geçiş metal oksitlerin görünür bölgede fotodedektör uygulamaları yapılmış ve sülfürlemenin ince film ve fotodedektör özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu tez çalışmasında ilk olarak cam altlık ve n-tipi silisyum altlık üzerine fiziksel buhar biriktirme yöntemi olan saçtırma tekniği kullanılarak oda sıcaklığında CuO ve Cu₂O ince filmleri üretilmiştir. Üretimi yapılan CuO ince filmlere 300 °C, 350 °C ve 400 °C’de 1’er saat tavlama işlemi uygulandı. Cu₂O ince filmlere ise herhangi bir tavlama işlemi uygulanmadı. Daha sonra fabrikasyonu yapılan ince filmlerin yapısal analizi için XRD ölçüm tekniği, morfolojik özellikleri için SEM ölçüm tekniği ve optik özellikleri için soğurma ölçüm tekniği kullanılmıştır. Karakterizasyonu yapılan ince filmlerden kristal kalitesi en iyi olanlar fotodedektör fabrikasyonu için seçildi. Seçilen CuO ve Cu₂O ince filmlerden bir kısmına 300 °C’de 3 dakika sülfürleme işlemi uygulandı. Daha sonra sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş CuO ve Cu₂O ince film yüzeylerine, elektriksel ölçüm alabilmek amacıyla, termal buharlaştırma tekniğiyle alüminyum (Al) metali kullanılarak IDE (interdigitated electrode) elektriksel kontaklar, bir maske yardımı ile yapıldı. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin akım-gerilim ölçümleri karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık gücü altında AM 1,5 solar simülatör kullanılarak yapılmıştır. Fotodedektörlerin ışığa karşı duyarlılıklarını ve tepki/geri kazanım sürelerini belirlemek için akım-zaman ölçümleri, ışık kaynağı 5 saniyede bir kapatılıp açılmak suretiyle 100 saniye boyunca, yapıldı. Bununla birlikte fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin güneş spektrumun hangi bölgesinde çalıştıklarını belirlemek için, üzerlerine 300 ile 900 nm arasında farklı dalga boylarında ışık düşürülerek spektral duyarlılıkları PTS-2-QE IPCE/Kuantum Verimi Ölçüm Sistemi kullanılarak yapılmıştır. Fotodedektörlerin kuantum verimleri ise spektral duyarlılık kullanılarak hesaplanmıştır.

XRD grafikleri incelendiğinde cam ve n-tipi silisyum altlık yüzeyine CuO ve Cu₂O ince filmlerin başarılı bir şekilde büyüdüğü görülmüştür. Sülfürleme işlemi sonrasında yapılan XRD analizinde CuO ve Cu₂O’ya ait piklere ek olarak, ince film yüzeyinde, sülfür içerikli yeni yapıların oluştuğunu gösteren pikler tespit edilmiştir. XRD grafiklerinden sülfürleme sonrasında film kompozisyonunda değişiklik olduğunu söyleyebiliriz. Buna ek olarak, sülfürleme öncesinde ve sonrasında yapılan kristal tanecik boyutu hesaplamalarından elde edilen sonuçlara göre, sülfürleme işlemiyle CuO ve Cu₂O’ya ait piklerin FWHM değeri azalırken kristal tanecik boyutlarında 1,5 ile 3 kata varan artış meydana gelmiştir. FWHM’deki azalma ve kristal tanecik boyutundaki artış ince filmdeki stresin azaldığı anlamına gelir. Bu verilere dayanarak, sülfürleme işlemiyle ince filmlerin kristal kompozisyonunda ve kristal tanecik boyutunda değişiklikler yapılarak kristal kalitesinin arttırılabileceğini söyleyebiliriz.

CuO ve Cu₂O ince filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde cam ve n-tipi silisyum altlık yüzeyine homojen bir şekilde biriktirmenin gerçekleştiği görülmüştür. Her iki altlık yüzeyine biriktirilen CuO ve Cu₂O kristalleri arasındaki tane sınırları mevcuttur. Tane sınırları kristal yapıdaki iki boyutlu kusurlardır ve malzemenin elektriksel ve termal iletkenliğini azaltma eğilimindedir. Yüksek verimli cihazların daha küçük tane sınırlarına sahip soğurucuları içermesi çok önemlidir. Çünkü büyük tane sınırlarına sahip küçük taneler rekombinasyona yol açar. Sülfürleme işleminden sonra alınan SEM görüntülerinde CuO ve Cu₂O ince film yüzeyinde büyük boyutlu kristal taneciklerinin bulunduğu görülmüştür. Bu SEM görüntüleri XRD verilerini destekler niteliktedir. Bu sonuçlara dayanarak, sülfürleme işlemiyle ince filmlerin kristal kompozisyonunda ve kristal tanecik boyutunda değişiklikler yapılarak CuO ve Cu₂O kristalleri arasındaki tane sınırlarının küçültülebileceğini ve kristal kalitesinin arttırılabileceğini söyleyebiliriz.

Fabrikasyonu yapılan ince filmlerin yasak enerji aralıklarını belirlemek için optik soğurma ölçümleri alınmıştır. CuO ve Cu₂O ince filmlerin yasak enerji aralıklarının sülfürleme işlemi sonrasında azaldığı görülmüştür. Yasak enerji aralığındaki azalmada, sülfürleme işlemi sonrasında ince filmlerin kalınlığındaki artışın, film kompozisyonundaki değişimin ve kristal tane boyutundaki artışın etkili olduğunu söyleyebiliriz. Sülfürleme işlemiyle ince filmde oluşan yeni yapılar ince filmde daha fazla kusur durumu ortaya çıkarır ve yasak enerji aralığını düşürür. Bununla birlikte, tane boyutu bir malzemenin elektronik ve optik özelliklerini etkileyebilir. Genel olarak, bir malzemenin tane boyutu küçüldükçe, malzemenin bant aralığı enerjisi artar. Bunun nedeni, bant aralığı enerjisinin kristalin boyutundan ve kristaldeki kusur sayısından etkilenmesidir. Daha küçük tanelerin tane sınırı daha fazladır ve bu da bant aralığı enerjisini artırır. Tane boyutunun artması kristaldeki tane sınırını azaltır ve bu da bant aralığı enerjisini düşürür. Bu nedenle, sülfürleme ile ince filmin bant aralığındaki azalmanın diğer bir nedeni olarak tanecik boyutundaki artış olduğu düşünülmektedir. İnce filmlere ait XRD grafikleri ve SEM görüntüleri ince film kompozisyonundaki değişimi ve kristal taneciklerinin boyutundaki artışı destekler niteliktedir. Sonuç olarak, sülfürleme işlemiyle ince filmlerin yasak enerji aralıklarında değişiklik yapılabileceğini söyleyebiliriz.

İnce filmlerin yüzeyine, termal buharlaştırma yöntemiyle alüminyum (Al) IDE (Interdigitated electrode) kontaklar oluşturularak Al/CuO/Al, sülfürlenmiş Al/CuO/Al, Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al fotodedektörlerin fabrikasyonu gerçekleştirildi. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin eklem davranışını anlamak ve iletim mekanizmaları hakkında bilgi almak için karanlıkta ve 100 mW/cm² ışık altında, -1,5 V ve 1,5 V aralığında akım-gerilim ölçümleri alındı. I-V ölçümlerinden cihazlara ait idealite faktörü, engel

yüksekliği, doğrultma oranı ve seri direnç gibi bazı anahtar parametreler hesaplandı. I-V ölçümleri sonucunda elde edilen grafiklerde Al metali ile yarı iletken arasında Schottky doğrultucu kontak oluştuğu görülmüştür. Fabrikasyonu yapılan tüm fotodedektörler doğrultucu özellik göstermiştir. I-V grafikleri incelendiğinde ters beslemde cihaz üzerinden çok küçük bir akım geçerken cihaza doğru beslem uygulandığında cihazdan geçen akımın arttığı görülmüştür. Sülfürlenmiş ince film kullanılarak üretilen fotodedektörlerin I-V grafikleri incelendiğinde ise ters beslem ve doğru beslem akımlarının sülfürlenmemiş ince filmlerden üretilen fotodedektörlerinkinden daha büyük olduğu görülmüştür. Sülfürlemeyle birlikte akımdaki bu artışın, XRD ve SEM analizlerinden elde edildiği gibi sülfürleme işleminden sonra kristal kalitesinin artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kristal kalitesindeki artış yük taşıyıcılarının sayısını ve mobilitesini arttırmıştır ve dolayısıyla da akımı arttırmıştır. Bununla birlikte yapılan hesaplamalar neticesinde sülfürlenmiş ince filmlerle üretilen Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al fotodedektörlerin potansiyel engel yükseklikleri ve seri dirençleri, sülfürlenmemiş ince filmlerle üretilen Al/CuO/Al ve Al/Cu₂O/Al fotodedektörlerin potansiyel engel yükseklikleri ve seri dirençlerinden daha küçük çıkmıştır. Bu da akımdaki artışa bir sebeptir. Yine yapılan hesaplamalardan doğrultma oranının sülfürlü ince filmlerle oluşturulan fotodedektörlerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Fotodedektörler için hesaplanan bu değerlerin, literatürle karşılaştırıldığında, oldukça iyi olduğu düşünülmektedir (Raghavendra, Bhat et al. 2018) (FARRUKH, Afzal et al. 2021) (Büyükbay Uluşan, Tataroğlu et al. 2018).

Fabrikasyonu yapılan Al/CuO/Al, sülfürlenmiş Al/CuO/Al, Al/Cu₂O/Al ve sülfürlenmiş Al/Cu₂O/Al MSM fotodedektörlerin tepki/geri kazanım süresini, anahtarlanma davranışını ve tekrarlanabilirlik performansını gözlemlemek için dedektörlerin I-t ölçümleri yapıldı. Bir fotodedektörün tepki/geri kazanım süresinin hesaplanması, dedektörün hızı hakkında bir fikir verir. Dedektörün tepki/geri kazanım süresinin kısalması ya da üzerine ışık düşürüldüğünde çok kısa bir zamanda tepki vermesi üretilen dedektörün yüksek kaliteli olduğu anlamına gelir. Yapılan ölçümlerden sülfürlenmiş ve sülfürlenmemiş ince filmlerden üretilen fotodedektörlerin tepki/geri kazanım sürelerinin 1 saniyeden daha az ve hemen hemen aynı mertebede olduğu görülmüştür. Fotodedektörlere ait ışığa duyarlılık, dedektivite ve kazanç değerlerinin sülfürlenmiş ince filmlerle oluşturulan dedektörlerde daha yüksek olduğu görülmüştür. Hesaplanan bu parametreler (tepki/geri kazanım süreleri, ışığa duyarlılık, dedektivite ve kazanç) literatürle karşılaştırıldığında bir fotodedektör için yeterli bulunmuştur (Liao, Yan et al. 2009) (Noda, Shima et al. 2013) (Selman, Mahdi et al. 2017) (Tariq, Afzal et al. 2021) (Marathe, Khanna et al. 2022). Bu sonuçlara göre sülfürleme işleminin fotodedektörün kalitesini arttırdığını söyleyebiliriz.

Fotodedektör genellikle belirli bir dalga boyunu veya dalga boyları aralığını algılamak üzere tasarlandığından, fotodedektörün ışık tepkisini araştırmak, dedektörün tepki tepe noktasını belirlemek için çok yararlıdır. Spektral tepki fotodedektörün, ışığın hangi dalga boylarında çalıştığını belirlemede önemli bilgiler verir. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin dalga boyu tepkisini araştırmak için 5.0 V gerilim altında 300 ila 900 nm arasında değişen dalga boyuna karşı ışık tepkisi ölçümünü gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümlere göre, sülfürlenmiş ince filmlerle üretilen fotodedektörler diğerlerine göre elektromanyetik spektrumun daha geniş bölgesinde daha iyi duyarlılık göstermiştir. Bunun nedeni olarak sülfürleme işleminin ince filmlerdeki yapısal kusurları azalttığı ve dolayısıyla soğurma kalitesini iyileştirdiği gösterilebilir. Spektral tepki grafiklerinden dedektörlerin tepki tepe noktaları belirlenmiş ve fabrikasyonu yapılan tüm fotodedektörlerin en iyi tepkiyi görünür bölgede verdiği görülmüştür. Bu sonuç fabrikasyonu yapılan fotodedektörlerin elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde çalıştığını gösterir.

Fabrikasyonu yapılan cihazların kuantum verimliliği spektral yanıt ve kuantum verimliliği arasındaki matematiksel ilişki kullanılarak hesaplandı. İdeal bir dedektörde kuantum verimliliği kare şekle sahiptir. Fakat uygulamada rekombinasyon etkileri nedeniyle idealden sapmalar meydana gelir. Fabrikasyonu yapılan fotodedektörlere ait kuantum verimliliği-dalga boyu grafikleri incelendiğinde sülfürlenmiş ince filmlerle yapılan fotodedektörlerin kuantum verimliliği eğrisinin ideal olan kare şekline yaklaştığı görülmüştür. Bu da bize, sülfürleme işlemiyle cihaz arayüzeyinde tükenim bölgesindeki rekombinasyon merkezlerinin azaldığını ve dolayısıyla kristal kalitesinin arttığını gösterir.

Sonuç olarak sülfürleme işlemiyle ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri değiştirilerek kristal kaliteleri arttırılabilir ve yasak enerji aralıkları değiştirilebilir. Ayrıca, sülfürleme zamanı değiştirilerek daha kaliteli bir kristal yapıya sahip olunabilir. Sülfürleme zamanına bağlı olarak yasak enerji aralığının değişiminin de incelenmesine ihtiyaç vardır. Bununla birlikte sülfürlemenin fotodedektörlerin elektriksel ve optik özellikleri üzerine de olumlu etkileri vardır. Fotodedektörlerin elektriksel ve optik özelliklerinin iyileştirilmesi için sülfürleme işleminin uygulanması yanında farklı kontak malzemeleri de kullanılabilir. Fabrikasyonunu yaptığımız fotodedektörlerin görünür ışık altında elde edilen elektriksel ve optik ölçüm sonuçları onları, optoelektronik cihaz uygulamaları için bir fotodiyot olarak elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde kullanılabilirliğine dair iyi bir aday yapar.

KAYNAKLAR

- Abd-Alghafour, N., N. M. Ahmed, Z. J. S. Hassan and A. A. Physical (2016). "Fabrication and characterization of V₂O₅ nanorods based metal–semiconductor–metal photodetector." **250**: 250-257.
- Akgul, F. Aksoy, E. Mulazimoglu, H. E. Unalan and R. J. J. o. P. D. A. P. Turan (2014). "Fabrication and characterization of copper oxide-silicon nanowire heterojunction photodiodes." **47**(6): 065106.
- Baek, S. K., J. H. Shin, S. W. Cho, H. K. J. J. o. V. S. Cho, N. Technology B, P. Microelectronics: Materials, Measurement, and Phenomena (2015). "Electrodeposition of p-type cuprous oxide layers on n-type zinc oxide layers with different electrical resistivities." **33**(2): 02B104.
- Büyükbay Uluşan, A., A. Tataroğlu, Y. Azizian-Kalandaragh and Ş. J. J. o. M. S. M. i. E. Altındal (2018). "On the conduction mechanisms of Au/(Cu₂O–CuO–PVA)/n-Si (MPS) Schottky barrier diodes (SBDs) using current–voltage–temperature (I–V–T) characteristics." **29**: 159-170.
- Chahrour, K. M., N. M. Ahmed, M. Hashim, N. G. Elfadill, M. J. S. Bououdina and A. A. Physical (2016). "Self-assembly of aligned CuO nanorod arrays using nanoporous anodic alumina template by electrodeposition on Si substrate for IR photodetectors." **239**: 209-219.
- Chen, Y., J. Zhang, J. Zhou, Y. Chu, B. Zhou, X. Wu and J. J. A. O. M. Huang (2018). "Long-term stable and tunable high-performance photodetectors based on perovskite microwires." **6**(22): 1800469.
- Chiang, C.-Y., M.-H. Chang, H.-S. Liu, C. Y. Tai, S. J. I. Ehrman and e. c. research (2012). "Process intensification in the production of photocatalysts for solar hydrogen generation." **51**(14): 5207-5215.
- de Melo, C., M. Jullien, Y. Battie, A. En Naciri, J. Ghanbaja, F. Montaigne, J.-F. Pierson, F. Rigoni, N. Almqvist and A. J. A. A. N. M. Vomiero (2019). "Semi-transparent p-Cu₂O/n-ZnO nanoscale-film heterojunctions for photodetection and photovoltaic applications." **2**(7): 4358-4366.
- Deuermeier, J., H. Liu, L. Rapenne, T. Calmeiro, G. Renou, R. Martins, D. Munoz-Rojas and E. J. A. M. Fortunato (2018). "Visualization of nanocrystalline CuO in the grain boundaries of Cu₂O thin films and effect on band bending and film resistivity." **6**(9): 096103.
- Dressel, M. and G. Grüner (2002). Electrodynamics of solids: optical properties of electrons in matter, American Association of Physics Teachers.
- Faraz, S. M., H. Ashraf, M. I. Arshad, P. Hageman, M. Asghar, Q. J. S. s. Wahab and technology (2010). "Interface state density of free-standing GaN Schottky diodes." **25**(9): 095008.
- FARRUKH, S., N. Afzal, A. A. Ahmed, M. Rafique, M. A. J. J. o. O. Raza and A. Materials (2021). "Fabrication and characterization of MSM photodetector based on DC sputtered CuO film." **23**(11-12): 530-537.
- Feng, J., X. Yan, Y. Liu, H. Gao, Y. Wu, B. Su and L. J. A. M. Jiang (2017). "Crystallographically aligned Perovskite structures for high-performance polarization-sensitive Photodetectors." **29**(16): 1605993.
- Gao, F., X.-J. Liu, J.-S. Zhang, M.-Z. Song and N. J. J. o. a. p. Li (2012). "Photovoltaic properties of the p-CuO/n-Si heterojunction prepared through reactive magnetron sputtering." **111**(8): 084507.
- Gunasekaran, S., D. Thangaraju, R. Marnadu, J. Chandrasekaran, T. Alshahrani, M. Shkir, A. Durairajan, M. Graça, M. J. S. Elango and Interfaces (2020). "Fabrication of high-performance SiO₂@ p-CuO/n-Si core-shell structure based photosensitive diode for photodetection application." **20**: 100622.

Guo, X., P. Diao, D. Xu, S. Huang, Y. Yang, T. Jin, Q. Wu, M. Xiang and M. J. i. j. o. h. e. Zhang (2014). "CuO/Pd composite photocathodes for photoelectrochemical hydrogen evolution reaction." **39**(15): 7686-7696.

Hong, Q., Y. Cao, J. Xu, H. Lu, J. He, J.-L. J. A. a. m. Sun and interfaces (2014). "Self-powered ultrafast broadband photodetector based on p–n heterojunctions of CuO/Si nanowire array." **6**(23): 20887-20894.

Huang, C.-Y., S.-H. Yuan, T.-C. Li and W.-C. J. O. Tu (2021). "High-performance solution-processed flexible Cu₂O photodetector via UV-irradiation." **247**: 167949.

Huo, N. and G. J. A. M. Konstantatos (2018). "Recent progress and future prospects of 2D-based photodetectors." **30**(51): 1801164.

Izaki, M., M. Nagai, K. Maeda, F. B. Mohamad, K. Motomura, J. Sasano, T. Shinagawa and S. J. J. o. T. E. S. Watase (2011). "Electrodeposition of 1.4-eV-bandgap p-copper (II) oxide film with excellent photoactivity." **158**(9): D578.

Izaki, M., T. Shinagawa, K.-T. Mizuno, Y. Ida, M. Inaba and A. J. J. o. P. D. A. P. Tasaka (2007). "Electrochemically constructed p-Cu₂O/n-ZnO heterojunction diode for photovoltaic device." **40**(11): 3326.

Jana, R., A. Dey, M. Das, J. Datta, P. Das and P. P. J. A. S. S. Ray (2018). "Improving performance of device made up of CuO nanoparticles synthesized by hydrothermal over the reflux method." **452**: 155-164.

Kim, H., S.-H. Kim, K. Y. Ko, H. Kim, J. Kim, J. Oh and H.-B.-R. J. E. M. L. Lee (2016). "High efficiency n-Si/p-Cu₂O core-shell nanowires photodiode prepared by atomic layer deposition of Cu₂O on well-ordered Si nanowires array." **12**: 404-410.

Ko, S., J. I. Lee, H. S. Yang, S. Park and U. J. A. m. Jeong (2012). "Mesoporous CuO particles threaded with CNTs for high-performance lithium-ion battery anodes." **24**(32): 4451-4456.

Kondo, J. J. C. c. (1998). "Cu₂O as a photocatalyst for overall water splitting under visible light irradiation." (3): 357-358.

Lan, C., R. Dong, Z. Zhou, L. Shu, D. Li, S. Yip and J. C. J. A. M. Ho (2017). "Photodetectors: Large-Scale Synthesis of Freestanding Layer-Structured PbI₂ and MAPbI₃ Nanosheets for High-Performance Photodetection (Adv. Mater. 39/2017)." **29**(39).

Lee, H., J. Ahn, S. Im, J. Kim and W. J. S. r. Choi (2018). "High-responsivity multilayer MoSe₂ phototransistors with fast response time." **8**(1): 1-7.

Lee, Y. S., D. Chua, R. E. Brandt, S. C. Siah, J. V. Li, J. P. Mailoa, S. W. Lee, R. G. Gordon and T. J. A. M. Buonassisi (2014). "Atomic layer deposited gallium oxide buffer layer enables 1.2 V open-circuit voltage in cuprous oxide solar cells." **26**(27): 4704-4710.

Liao, L., B. Yan, Y. Hao, G. Xing, J. Liu, B. Zhao, Z. Shen, T. Wu, L. Wang and J. J. A. P. L. Thong (2009). "P-type electrical, photoconductive, and anomalous ferromagnetic properties of Cu₂O nanowires." **94**(11).

Lin, H.-P., P.-Y. Lin and D.-C. J. J. o. T. E. S. Perng (2020). "Fast-response and self-powered Cu₂O/ZnO nanorods heterojunction UV-visible (570 nm) photodetectors." **167**(6): 067507.

Lin, Q., A. Armin, D. M. Lyons, P. L. Burn and P. J. A. M. Meredith (2015). "Photodiodes: Low Noise, IR-Blind Organohalide Perovskite Photodiodes for Visible Light Detection and Imaging (Adv. Mater. 12/2015)." **27**(12): 1969-1969.

Liu, F., S. Zheng, X. He, A. Chaturvedi, J. He, W. L. Chow, T. R. Mion, X. Wang, J. Zhou and Q. J. A. F. M. Fu (2016). "Highly sensitive detection of polarized light using anisotropic 2D ReS₂." **26**(8): 1169-1177.

Liu, X., H. Du, P. Wang, T.-T. Lim and X. W. J. J. o. M. C. C. Sun (2014). "A high-performance UV/visible photodetector of Cu₂O/ZnO hybrid nanofilms on SWNT-based flexible conducting substrates." **2**(44): 9536-9542.

Liu, Y., J. Guo, E. Zhu, L. Liao, S.-J. Lee, M. Ding, I. Shakir, V. Gambin, Y. Huang and X. J. N. Duan (2018). "Approaching the Schottky–Mott limit in van der Waals metal–semiconductor junctions." **557**(7707): 696-700.

Long, M., P. Wang, H. Fang and W. J. A. F. M. Hu (2019). "Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors." **29**(19): 1803807.

Marathe, P., S. Khanna, S. Paneliya and A. J. M. T. P. Vanpariya (2022). "Fabrication of copper oxide nanostructures for visible-light photodetector." **50**: 129-133.

Martin, L., H. Martinez, D. Poinot, B. Pecquenard and F. J. T. J. o. P. C. C. Le Cras (2013). "Comprehensive X-ray photoelectron spectroscopy study of the conversion reaction mechanism of CuO in lithiated thin film electrodes." **117**(9): 4421-4430.

Mathew, X., N. Mathews, P. J. S. e. m. Sebastian and s. cells (2001). "Temperature dependence of the optical transitions in electrodeposited Cu₂O thin films." **70**(3): 277-286.

Meng, F.-N., X.-P. Di, H.-W. Dong, Y. Zhang, C.-L. Zhu, C. Li, Y.-J. J. S. Chen and A. B. Chemical (2013). "Ppb H₂S gas sensing characteristics of Cu₂O/CuO sub-microspheres at low-temperature." **182**: 197-204.

Morasch, J., H. F. Wardenga, W. Jaegermann and A. J. p. s. s. Klein (2016). "Influence of grain boundaries and interfaces on the electronic structure of polycrystalline CuO thin films." **213**(6): 1615-1624.

Nakaoka, K., J. Ueyama and K. J. J. o. t. E. S. Ogura (2004). "Photoelectrochemical behavior of electrodeposited CuO and Cu₂O thin films on conducting substrates." **151**(10): C661.

Noda, S., H. Shima and H. Akinaga (2013). Cu₂O/ZnO heterojunction solar cells fabricated by magnetron-sputter deposition method films using sintered ceramics targets. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing.

Norde, H. J. J. o. a. p. (1979). "A modified forward I-V plot for Schottky diodes with high series resistance." **50**(7): 5052-5053.

Oral, A., E. Menşur, M. Aslan, E. J. M. c. Başaran and physics (2004). "The preparation of copper (II) oxide thin films and the study of their microstructures and optical properties." **83**(1): 140-144.

Paracchino, A., J. C. Brauer, J.-E. Moser, E. Thimsen and M. J. T. J. o. P. C. C. Graetzel (2012). "Synthesis and characterization of high-photoactivity electrodeposited Cu₂O solar absorber by photoelectrochemistry and ultrafast spectroscopy." **116**(13): 7341-7350.

Patterson, A. J. P. r. (1939). "The Scherrer formula for X-ray particle size determination." **56**(10): 978.

Radhakrishnan, A. A. and B. B. J. I. J. A. C. S. Beena (2014). "Structural and optical absorption analysis of CuO nanoparticles." **2**(2): 158-161.

Raghavendra, P., J. Bhat, N. J. S. Deshpande and Microstructures (2018). "Visible light sensitive cupric oxide metal-semiconductor-metal photodetectors." **113**: 754-760.

Ramizy, A. (2021). "Formation and photoluminescence properties OF porous silicon/copper oxide nanocomposites fabricated via electrochemical deposition technique for photodetector application."

Ray, S. C. J. S. e. m. and s. cells (2001). "Preparation of copper oxide thin film by the sol-gel-like dip technique and study of their structural and optical properties." **68**(3-4): 307-312.

Richardson, T. J., J. L. Slack and M. D. J. E. A. Rubin (2001). "Electrochromism in copper oxide thin films." **46**(13-14): 2281-2284.

Salih, E. Y., M. B. A. Bashir, A. H. Rajpar and I. A. J. C. I. Badruddin (2022). "Fabrication and characterization of porous Si/CuO film for visible light MSM photodetector: The effect of post-processing temperature." **48**(7): 9965-9972.

Selman, A. M., M. Mahdi, Z. J. P. E. L.-d. s. Hassan and nanostructures (2017). "Fabrication of Cu₂O nanocrystalline thin films photosensor prepared by RF sputtering technique." **94**: 132-138.

Shariffar, A., H. Salman, T. A. Siddique and M. O. J. A. P. A. Manasreh (2021). "Effects of high-temperature annealing on the performance of copper oxide photodetectors." **127**: 1-5.

Song, H.-J., M.-H. Seo, K.-W. Choi, M.-S. Jo, J.-Y. Yoo and J.-B. J. S. r. Yoon (2019). "High-performance copper oxide visible-light photodetector via grain-structure model." **9**(1): 7334.

Sultana, J., A. Das, A. Das, N. R. Saha, A. Karmakar and S. J. T. S. F. Chattopadhyay (2016). "Characterization of nano-powder grown ultra-thin film p-CuO/n-Si hetero-junctions by employing vapour-liquid-solid method for photovoltaic applications." **612**: 331-336.

Tariq, M., N. Afzal, M. J. O. Rafique and Q. Electronics (2021). "Enhanced photodetection performance of sputtered cupric oxide thin film through annealing process." **53**: 1-16.

Tauc, J., R. Grigorovici and A. J. p. s. s. Vancu (1966). "Optical properties and electronic structure of amorphous germanium." **15**(2): 627-637.

Thornton, J. A. J. T. s. f. (1978). "Substrate heating in cylindrical magnetron sputtering sources." **54**(1): 23-31.

Tombak, A., M. Benhaliliba, Y. Ocak and T. J. R. i. P. Kiliçoglu (2015). "The novel transparent sputtered p-type CuO thin films and Ag/p-CuO/n-Si Schottky diode applications." **5**: 314-321.

Wang, N., W. Tao, X. Gong, L. Zhao, T. Wang, L. Zhao, F. Liu, X. Liu, P. Sun, G. J. S. Lu and A. B. Chemical (2022). "Highly sensitive and selective NO₂ gas sensor fabricated from Cu₂O-CuO microflowers." **362**: 131803.

Wang, Y., J. Ghanbaja, F. Soldera, S. Migot, P. Boulet, D. Horwat, F. Mücklich and J. J. A. S. S. Pierson (2015). "Tuning the structure and preferred orientation in reactively sputtered copper oxide thin films." **335**: 85-91.

Willardson, R. K. and A. C. J. Beer (1967). "Optical properties of III-V compounds."

Xie, X. and G. J. N. Shen (2015). "Single-crystalline In₂S₃ nanowire-based flexible visible-light photodetectors with an ultra-high photoresponse." **7**(11): 5046-5052.

Zhan, Z., L. Zheng, Y. Pan, G. Sun and L. J. J. o. M. C. Li (2012). "Self-powered, visible-light photodetector based on thermally reduced graphene oxide-ZnO (rGO-ZnO) hybrid nanostructure." **22**(6): 2589-2595.

Zhang, J., J. Liu, Q. Peng, X. Wang and Y. J. C. o. m. Li (2006). "Nearly monodisperse Cu₂O and CuO nanospheres: preparation and applications for sensitive gas sensors." **18**(4): 867-871.

Zhang, K., M. Peng, W. Wu, J. Guo, G. Gao, Y. Liu, J. Kou, R. Wen, Y. Lei and A. J. M. H. Yu (2017). "A flexible p-CuO/n-MoS₂ heterojunction photodetector with enhanced photoresponse by the piezo-phototronic effect." **4**(2): 274-280.

Zhang, Q., K. Zhang, D. Xu, G. Yang, H. Huang, F. Nie, C. Liu and S. J. P. i. M. S. Yang (2014). "CuO nanostructures: synthesis, characterization, growth mechanisms, fundamental properties, and applications." **60**: 208-337.

Zheng, Z., L. Gan, H. Li, Y. Ma, Y. Bando, D. Golberg and T. J. A. F. M. Zhai (2015). "A fully transparent and flexible ultraviolet-visible photodetector based on controlled electrospun ZnO-CdO heterojunction nanofiber arrays." **25**(37): 5885-5894.

Zheng, Z., B. Huang, Z. Wang, M. Guo, X. Qin, X. Zhang, P. Wang and Y. J. T. J. o. P. C. C. Dai (2009). "Crystal faces of Cu₂O and their stabilities in photocatalytic reactions." **113**(32): 14448-14453.

Zhong, S., D. Xiong, B. Zhang, X. Yang, T. Yang, G. Tian, H. Zhang, W. Yang and W. J. A. P. Deng (2022). "Structurally unraveling the photocarrier behavior of Cu₂O/ZnO heterojunction photodetectors." **9**(1): 268-274.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Fevkani YILDIZ
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
Tel:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Isparta Anadolu İmam Hatip Lisesi
Lisans:	Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik
Yüksek lisans:	Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalı (2014)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Yayınlar	