



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

**CuO_x İNCE FİLM KALINLIĞININ $\text{CuO}_x/\text{n-Si}$ HETERO EKLEM YAPISININ ELEKTRİKSEL
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet DURMAZ

Danışman
Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

Haziran-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Ahmet DURMAZ tarafından hazırlanan “**Farklı kalınlıklarda sol jel yöntemi ile üretilen CuO_x ince filmlerinin $\text{CuO}_x/\text{n-Si}$ heteroeklem yapısının elektriksel özellikleri üzerine etkisi**” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Dr. Öğr. Üyesi Seval Aksoy PEHLİVANOĞLU

.....

Danışman

Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Enise ÖZERDEN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Osman PAKMA
Lisansüstü Eğitim Enstitü Müdür V.

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all materials and results that are not original to this work.

Ahmet DURMAZ
Tarih: 21/06/2023

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

CuO_x İNCE FİLM KALINLIĞININ CuO_x/n-Si HETERO EKLEM YAPISININ ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Ahmet DURMAZ

**BATMAN ÜNİVERSİTESİ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

Danışman: Doç. Dr. Şerif RÜZGAR

2023, 45 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Şerif RÜZGAR
Dr. Öğr. Üyesi Seval Aksoy PEHLİVANOĞLU
Dr. Öğr. Üyesi Enise ÖZERDEN**

Bu çalışmada CuO_x ince filmleri, sol jel döndürme kaplama yöntemi farklı kaplama sayılarına göre n-Si alttaşlar üzerine büyütülerek heteroeklem uygulamaları gerçekleştirilmiştir. İnce film kalınlığının heteroeklem yapıların elektriksel ve optoelektriksel özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Heteroeklem yapıların seri direnç (Rs), düzeltme oranı (RR), idealite faktörü (n) ve bariyer yüksekliği (Φ_B) gibi önemli bağlantı parametreleri I-V verileri analiz edilerek hesaplandı. Üretilen heteroeklem yapıların karanlık ve farklı aydınlatma şiddetleri altında akım-gerilim (I-V) karakteristikleri incelendi. Tüm yapıların ışığa duyarlı olduğu ve doğrultma davranışı sergilediği gösterildi. Diyotların idealite değerleri 3.05-5.08 arasında değişirken, bariyer yükseklikleri 0.64-0.71 arasında ve seri direnç değerleri 3-42Ω arasında değişmiştir. Üretilen cihazların elektriksel davranışları farklı frekanslarda kapasite-gerilim (C-V), iletkenlik-gerilim (G-V) ve Seri direnç (Rs-V) ölçümleri ile incelenmiştir. Artan frekansla kapasitenin, iletkenliğin ve seri direncin sırasıyla azaldığı, arttığı ve arttığı belirlendi. Bu davranış, üretilen numunelerin arayüz durumlarının varlığından kaynaklanmaktadır. Elektriksel karakterizasyon sonuçları, üretilen tüm cihazların optoelektronik alanlarda optik sensörler veya fotodiyotlar olarak çalıştırılabileceğini göstermiştir.

Anahtar kelimeler: Bakır Oksit, Heteroeklem Yapılar, İnce Film

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF CuO_x THIN FILM THICKNESS ON THE ELECTIRACAL PROPERTIES OF CuO_x/n-Si HETERO JUNCTION STRUCTURE

Ahmet DURMAZ

**INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES OF BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN PHYSICS**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR

2023, 45 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Şerif RÜZGAR
Asst. Prof. Dr. Seval Aksoy PEHLİVANOĞLU
Asst. Prof. Dr. Enise ÖZERDEN**

In this study, heterojunction structures were carried out by deposition of CuO_x thin films on n-Si substrates according to different coating times by sol gel spin coating method. The effect of thin film thickness on electrical and optoelectrical properties of heterojunction structures was investigated. The crucial electrical parameters such as series resistance (Rs), rectification ratio (RR), ideality factor (n) and barrier height (ΦB) of heterojunction structures were calculated by analyzing I-V data. All structures were shown to be light sensitive and exhibit a rectification behavior. While the ideality values of the diodes varied between 3.05 and 5.08, the barrier heights varied between 0.64-0.71 eV and the series resistance values between 3-42 Ω. The electrical behavior of the fabricated devices was investigated by measuring the capacitance-voltage (C-V), conductivity-voltage (G-V) and Series resistance (Rs-V) at different frequencies.

It was determined that the capacitance, conductivity and series resistance decreased, increased and increased, respectively, with increasing frequency. This behavior is due to the presence of interface states of the fabricated devices. The electrical characterization results showed that all fabricated devices can be operated as optical sensors or photodiodes in optoelectronic fields.

Keywords: Cobalt Oxide, Heterojunction Structures, Thin Film

ÖNSÖZ

Yüksek lisans eğitimime başladığım ilk günden itibaren desteğini esirgemeyen, deneylerin yapılması ve ölçüm sonuçlarının değerlendirilmesinde büyük emeği olan kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Şerif RÜZGAR'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca desteklerini esirgemeyen dostlarıma da teşekkürlerimi ifade etmek isterim.

Ahmet DURMAZ
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

TEZ BİLDİRİMİ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	viii
1.GİRİŞ	1
2.KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	6
3.MATERYAL VE YÖNTEM.....	9
3.1.Kuramsal Temeller.....	9
3.1.1. Diyotun yapısal özellikleri.....	9
3.1.2. Diyotun temel çalışma prensibi.....	11
3.1.3. CuO _x /n-Si enerji bant diyagramı.....	15
3.1.4. Bakır (II) oksidin (Cu ₂ O) ve kükrik oksidin (CuO) özellikleri.....	16
3.2. Deneysel Aşamalar.....	19
3.2.1. n-Si alttaşlar üzerine ince filmlerin üretimi	19
3.2.2. Cu _x O / n-Si/ Ag diyotların fabrikasyonu ve elektriksel ölçümü.....	21
4.ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	23
4.1. I-V Karakteristikleri Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması	23
4.2. Üretilen Diyotların Işığa Duyarlılık Karakteristikleri.....	25
4.3.Norde Modeli Yardımı ile Bariyer Yüksekliği ve Seri Direnç Hesaplanması.....	26
4.4.Üretilen Diyotların Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri.....	28
4.5.Üretilen Diyotun Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri	29
4.6.Üretilen Diyotların Direnç-Gerilim Karakteristikleri	31
4.7.Üretilen Diyotların Fotoakım-Zaman Karakteristikleri	32
5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER	34
5.1.Sonuçlar.....	34
5.2 Öneriler	35
KAYNAKLAR	36
ÖZGEÇMİŞ	45

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

E_G	: Bant aralığı
E_0	: Vakum enerjisi
E_F	: Fermi enerjisi
E_V	: Uzay yükü bölgesinin genişliği
E_C	: İletim bandı enerjisi
I_0	: Ters akım doygunluğu
V_A	: PN bağlantısı boyunca uygulanan öngerilim
V_T	: Termal voltaj
k_b	: Boltzmann sabiti
T	: Kelvin cinsinden sıcaklık
q	: Temel yük
A	: Enine kesit alanı
n_i	: İçsel taşıyıcı
W	: Tükenme bölgesinin genişliği
K_s	: Bağıl geçirgenlik
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik sabiti
N_A	: P tipi taraftaki katkılamad
N_D	: N tipi taraftaki katkılama
V_{bi}	: Yerleşik potansiyel
I_0	: Karanlık doyum akımı
Φ_B	: Bariyer yüksekliği
R_s	: Seri direnç
X	: Yarıiletkenin elektron ilgis
Ω	: Direnç birimi

Kısaltmalar

Cu ₂ O	: Küprik oksit
CuO	: Bakır (II) oksit
CdO	: Kadmiyum oksit
eV	: Elektronvolt
TCO	: Şeffaf iletken oksitler
TSO	: Şeffaf yarıiletken oksitler
ITO	: Kalay katkılı indium oksit
CBM	: İletken bantının minimumu
OLED	: Organik ışık yayan diyot
R _s - V	: Seri direnç-gerilim
C-F	: Kapasite-frekans
G-V	: Kondüktans-gerilim
C-V	: Kapasite-gerilim
I-V	: Akım-Voltaj
PV	: Fotovoltaik hücreler
DC	: Doğru akım
MOSFET	: Alan etkili transistör
JFET	: Bağlantı alanı etkili transistör
BJT	: Çift kutuplu bağlantı transistörleri
R-G	: Rekombinasyon oluşturma akımı

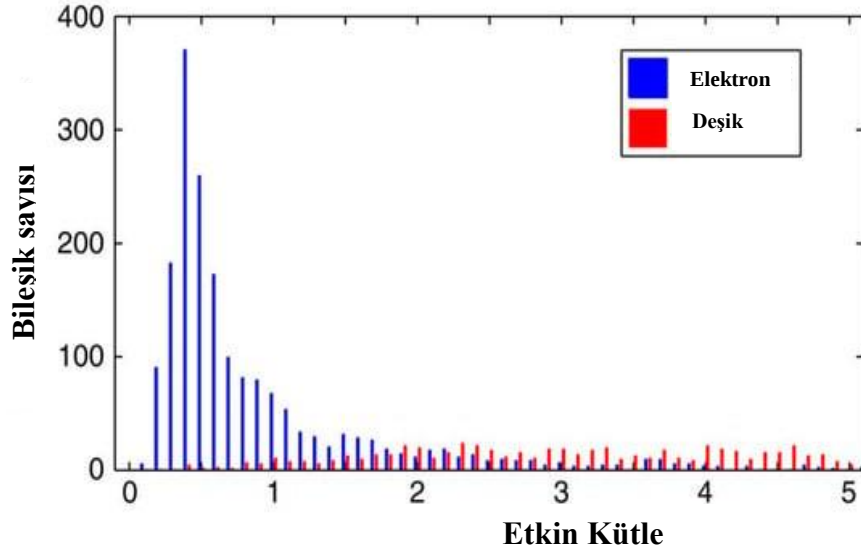
1.GİRİŞ

Son yıllarda şeffaf elektroniklerin gelişimi hızla artmış, yenilikçi ileri malzemeler için güncel araştırma konularından biri olarak kabul edilmektedir (Fortunato ve ark., 2012; Resende, 2017). Şeffaf aygıtların üretimi günlük aygıtlar için şeffaf ekranlar, şeffaf alt yüzeyler üzerinde pencereler, masalar veya sokak mobilyaları gibi akıllı yüzey aygıt uygulamasında kullanılabilecek potansiyele sahiptir. Şeffaf yarıiletken oksitler (TCO) üzerine ilk belgelenmiş çalışma 1907'de CdO ince film (Heasley ve ark., 2018) üretimi ile rapor edilmiş olsa da, 21. yüzyıla geçişte şeffaf elektronik araştırmalar ile ilgili önem gittikçe artmıştır. Günümüzde, entegre devrelerin daha fazla ölçeklendirilmesi, geleneksel metodolojiler (Jacop ve ark., 2017; Courtland, 2016) kullanılarak giderek daha zor hale gelmektedir.

Saydam İletken Oksitler (TCO), görünür ışık aralığında yüksek elektriksel iletkenliğe ve iyi optik şeffaflığa sahiptir ve son yıllarda fotovoltaik hücreler (PV hücreleri), dokunmatik ekranlar, katı hal sensörler, organik ışık yayan diyotlar (OLED'ler) ve sıvı kristal ekranlar dahil olmak üzere elektronik endüstrilerdeki önemli rolleri nedeniyle yoğun bir şekilde araştırılmaktadır (Fortunato ve ark., 2005; Lewis ve Paine, 2000). Elektronik endüstrisinde şu anda birçok farklı malzeme, özellikle kirlilikle doping edilmiş malzemeler Saydam İletken Oksit olarak kullanılmaktadır. TCO olarak üç ana malzeme sayarsak bunlar Sn ile doping edilmiş In_2O_3 (ITO), Al ile doping edilmiş ZnO (AZO), Flor kalay oksit veya $\text{SnO}_2\text{-F}$ (FTO) ve Sb ile doping edilmiş SnO_2 'dir (ATO) (Hoel ve ark., 2010). Bunların arasında, ITO elektriksel iletkenliği yaklaşık $1000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ve optik şeffaflığı %80'den daha yüksek olması ile %97'den daha yüksek bir pazar payına sahiptir (Chen ve ark., 2013; Niu, 2011).

Ancak, yukarıda bahsedilen tüm malzemeler n-tipi TCO'lara aittir, yani n-tipi iletkenlik gösterirler. N-tipi TCO'ların popülerliği, çok iyi elektronik özelliklere sahip olmalarından kaynaklanmaktadır (Tripathi ve Karppinen, 2017). N-tipi TCO'lar için, yük taşıyıcıları olarak elektronlar iletken bantın minimumunda (CBM) hareket ederler. CBM, uzamsal olarak yayılmış metal-s orbitaları tarafından büyük ölçüde oluşturulur, bu da iyi dağılmış bir CBM ve yüksek elektron hareketliliği ile sonuçlanır.

Bunların aksine, yüksek performanslı p-tipi TCO'ların geliştirilmesi çok zordur (Banerjee ve Chattopadhyay, 2005; Scanlon ve Watson, 2009) ve araştırmacıların çözmesi gereken büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir. Aslında, oksitlerdeki deliklerin doğası gereği düşük hareketliliği nedeniyle yüksek iletkenliğe sahip p-tipi TCO'yu bulmak çok zordur. Şekil 1.1'de görülebileceği gibi, bir deliğin etkin kütlesi bir elektronunkinden nispeten daha yüksektir (Hautier ve ark., 2013).



Şekil 1.1. Seçilen ikili ve üçlü oksitlerde hem elektronların hem de deliklerin etkili kütle dağılımı (Hautier ve ark., 2013)

Bunun nedeni, delik aktarımı için maksimum değerlik bandının (VBM), esas olarak yüksek düzeyde lokalize oksijen 2p orbitalleri tarafından oluşturulması ve düşük delik hareketliliğine yol açmasıdır. Ayrıca, içsel donör kusurunun düşük oluşum enerjisi ve nispeten yüksek alıcı oluşum enerjisi delik taşıyıcıların sayısını sınırlar (Banerjee ve Chattopadhyay, 2005)

Şeffaf elektronik, şeffaf iletken oksitlerin (TCO'lar) ve şeffaf yarı iletken oksitlerin (TSO'lar) ortaya çıkması ile birlikte mümkün olan 'görünmez' elektronik devrelerin ve optoelektronik cihazların üretimine odaklanan yeni ve gelişmekte olan bir bilim ve teknoloji alanıdır. Uygulamalar silikonla üretilenlerle aynı olabilir, üretim ve maliyetler açısından büyük avantajlara sahip olabilir, ancak daha da önemlisi bu teknoloji yeni ve fantastik ürün veya çözümlere olanak sağlayacaktır. Gelecekte sivil ve askeri amaçlar için tüketici elektroniği, yeni enerji kaynakları, ulaşım, telekomünikasyon

sistemleri vb. Alanlarda TCO'lar ve TSO'lar bulmak mümkün olacak. TCO'lar, güneş pilleri, düz panel ekranlar için ön elektrotlar, düşük emisyonlu pencere, “akıllı pencereler” için elektrokromik malzemeler, ışık yayan diyotlar, gaz sensörleri, biyo-sensörler, ince film transistörleri gibi birçok uygulamada pasif katman veya optik kaplama olarak zaten kullanılmıştır (Figueiredo, 2012).

Bununla birlikte, aktif katmanlarda (cihazın işlevsel parçası) bu tür malzemelerin kullanımı hala bir sorundur. İletken, dielektrik ve yarı iletken oksitler (TSO'lar) dâhil olmak üzere işlevsel şeffaf elektronikler için yeni aktif malzemeler geliştirmek için muazzam çabalar sarf edilmiştir. Bu çabalar sayesinde, ticari uygulamalar için iyi özelliklere sahip dielektrikler ve n-tipi TSO'lar zaten mevcuttur. N-tipi TCO'lar ve TSO'lar söz konusu olduğunda, bugünün araştırmaları, düşük bulunabilirliği ve yüksek fiyatı nedeniyle çoğunlukla indiyumun malzemesinin yerini alacak bir ürün bulmaya odaklanmıştır. Bu konu ile ilgili araştırmalar başladığından beri, tamamlayıcı elektroniğin temel parçalarından biri olan yeterince iyi özelliklere sahip p-tipi TSO'ların olmaması (n-tipi muadillerine benzer), elektroniğin bu heyecan verici “yeni çağının” gelişimindeki en büyük sınırlamalardan biridir. Bu çalışma için bir başka ilham kaynağı, TFT'lerde başarıyla uygulanan p tipi yarı iletken oksitler hakkında raporların olmamasıydı. Aslında, bir p-tipi TFT'nin ilk çalışmalarından biri, 2008'in ikinci yarısında, bir TFT kanalı olarak bakır ve kalay metal oksitlerini (Matsuzaki ve ark., 2008; Ogo ve ark., 2008) kullanarak ortaya çıktı.

Bu malzemelerin cihazlarda sentezi ve uygulanması için dünya çapında yapılan büyük çabalara rağmen, p-tipi yarı iletken oksitlerin performansını n-tipi muadillerinin performansına yaklaştırmaya çalışmak için yeni malzeme kombinasyonları veya yeni biriktirme yöntemleri kullanılarak daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır.

Bu malzeme sınıflarının, TCO'ların ve TSO'ların (n ve p-tipi) önemine ilişkin en önemli kanıtlardan biri, halihazırda mevcut ürünlerin (esas olarak pasif uygulamalarla ilgili) pazar büyüklüğü ve yakın gelecek için tahminleridir. Geleneksel Si/III–V tabanlı elektronikler gibi uygulamaların çoğu için temel cihaz yapısı, yarı iletken bağlantıları ve transistörleri temel alır. Bu tür bir blok malzeme cihazı oluşturmak için, tüm bileşen katmanları: yarı iletken, elektrik kontakları ve dielektrik/pasivasyon katmanları, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde artık saydam olmalıdır. Bu gerçek bir zorluğu temsil ediyor ve daha önce de açıklandığı gibi, bunu mümkün kılmak için dünya

çapında bilim adamları ve mühendisler tarafından çeşitli araştırma grupları içinde büyük bir çaba sarf ediliyor.

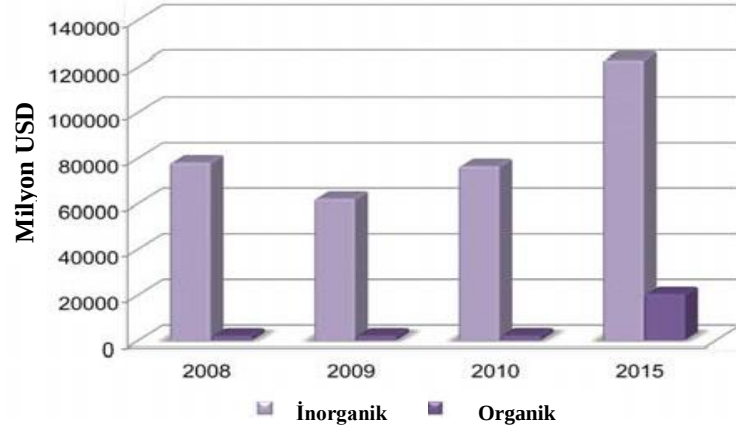
Bu teknolojiyi gerçeğe dönüştürmenin ilk adımı, yeni yüksek performanslı elektronik malzemelerin (TCO'lar ve TSO'lar) keşfi, anlaşılması ve uygulanmasıdır. İkinci adım, bu malzemelerin transistörlerin ve devrelerin geliştirilmesinde uygulanması ve değerlendirilmesi olacaktır. Son adım, satılabilir ürünlere entegre edilmiş ortak veya yeni çözümlere (cihazlara) uygulanmasına izin verecek kararlı özelliklerin ve uygulamaya özel malzemelerin elde edilmesidir.

Bu gelişmelerde kullanılan oksit malzemeler (iletkenler, yarı iletkenler ve dielektrikler) yerkabuğundaki bolluklarından dolayı SiO_2 , Al_2O_3 , CaO ve MgO gibi malzemeler eski çağlardan beri kullanılmaktadır (Hosono ve ark., 2006). TCO'lar ve TSO'lar hakkındaki bu araştırmanın asıl amacı silikonun yerini almak olmadığını anlamak kolaydır. Silikon yer kabuğunda en çok bulunan elementlerden biridir ve senteziyle ilgili yüksek sıcaklık süreçlerine rağmen, bu amaç için kullanılan teknolojinin olgunluğu ve kararlılığı onu, yerini alması zor yüksek güvenilir bir malzeme haline getirmektedir. Ancak TCO'lar ve TSO'lar olmadan şeffaf elektronik devreler üretmek çok zordur. Bugün, sıradan devrelerin çoğu, opak olduğu bilinen Si gibi geleneksel malzemelerden yapılmıştır. Şeffaf elektronik, daha önce bahsedildiği gibi, Si teknolojisinin yerini alabilir, ancak en önemli sonuç, yalnızca dikkate değer optik ve elektriksel özelliklerinin birleşimi nedeniyle mümkün olan yeni ve çarpıcı uygulamaların olasılığıdır.

Aslında, elektronik ekipmanlarda şeffaf malzemeler kullanan teknoloji, dokunmatik panellerde, LCD panellerde, güneş pillerinde ve diğerlerinde esas olarak şeffaf elektrotlar gibi cihazlarda uzun bir süredir kullanılmaktadır.

Bu açıdan, daha önce/yukarıda gözlemlendiği gibi, p tipi yarı iletkenler hala “sıcak bir konudur” ve bu ortaya çıkan ancak halihazırda büyük olan şeffaf elektronik pazarında yeni ürünlerin geliştirilmesinde anahtardır. Bu pazar 2010 yılında 76400 milyon ABD Doları değerindeydi ve önümüzdeki beş yıl içinde % 10 büyümesi beklenmektedir. 2010 yılında yalnızca inorganik malzemeler 74.000 milyon ABD Doları değerindeydi ve 2015 yılına kadar tahmini 103.000 milyon ABD Doları ile % 6,7 büyümesi beklenmektedir (Şekil 1.2) (Figueiredo, 2012).

Daha önce sunulan argümanlarla, p-tipi yarı iletken oksitlerin ekonomide, toplumda ve tabii ki günlük hayatımızda yüksek potansiyel etkisi olan öne çıkan bir alan olduğu açıktır. Bu tür materyallerin araştırılması gerçekten zordur. İlerleme yavaştır, ancak her küçük adımın yüksek bir etkisi vardır.



Şekil 1.2. Şeffaf Elektronik Bileşenler Pazar Büyüklüğü (2008-2015) (Figueiredo, 2012)

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Oksitlendiğinde, bakır üç tür oksit oluşturabilir: bakır oksit (Cu_2O , kuprit), bakır oksit (CuO , tenorit) ve Cu_4O_3 (paramelakonit)(Meyer vd. 2012). Bakır oksitlerin üç biçimi de yarı iletkenlerdir ve özellikle Cu_2O , cihaz uygulamaları için incelenen ilk yarı iletkenlerden biridir. 20. yüzyılın başlarında, Cu_2O Schottky bağlantıları, radyo alıcılarında doğrultucu olarak kullanılmak üzere yoğun bir şekilde araştırıldı (Riordan ve Hoddeson, 2007). 1950'de Brattain tarafından n-tipi katkılamının zorluğu da dahil olmak üzere bu dönemde yapılan araştırmanın bir incelemesi yazılmıştır (Brattain, 1951) . 1947'de nokta kontak transistörünün ve 1960'ta metal oksit yarı iletken alan etkili transistörün icadından sonra, katkılı ve p-tipi olabilen tek kristal silikon ve germanyumun mevcudiyeti nedeniyle Cu_2O 'ya olan ilgi azaldı. 1970'lerde, 1973'teki ilk petrol krizine yanıt olarak güneş enerjisi dönüşümü için karasal PV (fotovoltaik) cihazları geliştirme ihtiyacı nedeniyle PV için bir yarı iletken olarak Cu_2O 'ya olan ilgi yeniden canlandı. Bu dönemde araştırılan Cu_2O güneş pilleri, Schottky bağlantı PV cihazlarıydı (Drobny ve Pulfrey, 1979; Olsen ve ark., 2008). Birleşik Lisansüstü Çalışma Merkezi'nde ABD Ulusal Bilim Vakfı tarafından desteklenen bu cihazlarla ilgili iki araştırma projesi gerçekleştirildi (Olsen ve ark., 1982; Olsen ve ark., 2008).Schottky bağlantı yapısına bu odaklanma, Cu_2O 'da p-n homoeklemleri oluşturmanın zorluğundan kaynaklanıyordu. Püskürtme biriktirme sırasında Cu_2O yüzeyinin kimyasal olarak Cu'ya indirgenmesi nedeniyle, elde edilen en iyi η (fotovoltaik verim), biriken metalden bağımsız olarak yalnızca %1 mertebesindeydi (Olsen vd. 2008). Bununla birlikte, bir heteroeklem veya metal-yalıtkan- yarı iletken yapının Cu_2O PV cihazlarının performansını iyileştirmesi gerektiği kabul edildi. Bu Cu_2O PV cihazlarında elde edilebilecek düşük η , sonunda 1980'lerde başka bir ilginin azalmasına yol açtı. Bu dönemde Cu_2O Schottky bağlantı cihazlarıyla ilgili literatürün bir incelemesi'de (Rakhshani, 1986) bulunabilir. Buna rağmen, Cu_2O PV cihazlarıyla ilgili araştırmalar 1990'lardan sonra Japonya, İtalya ve başka yerlerde devam etti. Bu son dönemdeki Cu_2O PV araştırması, Cu_2O için daha yeni katkı maddeleri, heteroeklem oluşumu için uygun şeffaf n-tipi yarı iletkenler ve yüksek performans bağlantı oluşturma teknikleri arayışı ile ilgilidir. Sonuç olarak, Cu_2O PV cihazlarının bildirilen η değerinde önemli gelişmeler olmuştur (De Carvalho ve ark., 2017).

Bu çalışmaların yanında bakır oksit tabanlı heteroeklem yapılar son yıllarda yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu çalışmalardan Tombak ve ark. (Tombak ve ark., 2015) yapmış oldukları çalışmada doğru akım (DC) püskürtmeli p-tipi CuO filmi ve diyotun fiziksel özellikleri ve mikroelektronik parametreleri incelemişlerdir. Diyot olarak ürettikleri Ag/CuO/n-Si yapısının ideal olmayan bir davranış sergilediğini ve idealite faktörünü yaklaşık 3,5 olarak elde ettiklerini rapor etmişlerdir. Bununla birlikte Norde yöntemi ile bariyer yüksekliği ve seri direncini sırasıyla 0,96 eV ve 86,6 Ω olarak hesapladıklarını bildirmişlerdir.

Sultana ve ark. (Sultana ve ark., 2016) CuO nano tozunu kimyasal buhar biriktirme metodu kullanarak sentezlediler ve bu nano tozu kullanarak 20 nm kalınlığındaki ultra ince film halinde büyüttüler. Daha sonra doğrultma ve fotovoltaiik uygulamalar için CuO/n-Si eklemine ürettirler. Üretilen bu diyot $\sim 2 \times 10^4 / \pm 2$ V'lik bir düzeltme oranına ve 0,583 eV'luk bir bariyer yüksekliğine sahip olduğunu elde ettiler. 3.02 s ve 3.8 s'lik yükselme ve düşme süresi değerleri ile 1,02 mW/cm² ışık şiddeti altında açık devre gerilimi, kısa devre akım yoğunluğu, doldurma faktörü ve verim sırasıyla 70 mV, 0,16 mA/cm², %24,3 ve 0,27 olarak hesaplayıp rapor etmişlerdir.

Diğer bir çalışmada Özmenteş (Özmenteş, 2021) termal buharlaştırma tekniği kullanarak p-CuO/n-Si/Al hetero-bağlantılı diyotlar sentezlenmiş ve diyotun elektriksel özellikleri akım-voltaj (I-V) karakteristikleri kullanılarak incelemiştir. Diyotların I-V özellikleri, p-n heteroeklemlere özgü doğrultucu ve fotovoltaiik özellikler sergilediğini rapor etmiştir. Diyotların idealite faktörü ve bariyer yüksekliklerini sırasıyla 2.30-3.74 ve 0.70-0.76eV olarak elde etmiştir. Diyotların seri direncinin 232.13 Ω ile 65159 Ω arasında değiştiğini buldu. I-V ölçümlerinden elde edilen idealite faktörü ve Norde fonksiyonundan elde edilen seri direnç nispeten daha yüksek olduğunu bildirdi. İdeal olmayan davranıştan sapmayı seri direnç temeline bağladı.

Başka bir çalışmada Kim ve ark. (Kim ve ark., 2016) yüksek performanslı görünür/NIR fotodedektörü için ITO/Si cihazının arayüz katmanı olarak ince bir CuO katmanını kullandılar. İnce bir CuO filminin ara katmanı, kafes uyumsuzluklarını ve ITO ile Si bağlantısı arasındaki tuzak durumlarını azaltmada etkili olduğunu bildirdiler. CuO ara katmanı sayesinde, hızlı yükselme süresi ($\tau_r = 34,32$ ms) ve hızlı düşme süresi ($\tau_f = 31,68$ ms) ile ITO/CuO/Si fotodedektöründen iyi elektrik performansı sergilediğini

bildirdiler. CuO filminin ara katmanı, yüksek performanslı fotodetektörler ve güneş pili uygulamaları için umut verici bir malzeme olduğunu öngörmüşlerdir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Kuramsal Temeller

3.1.1. Diyotun yapısal özellikleri

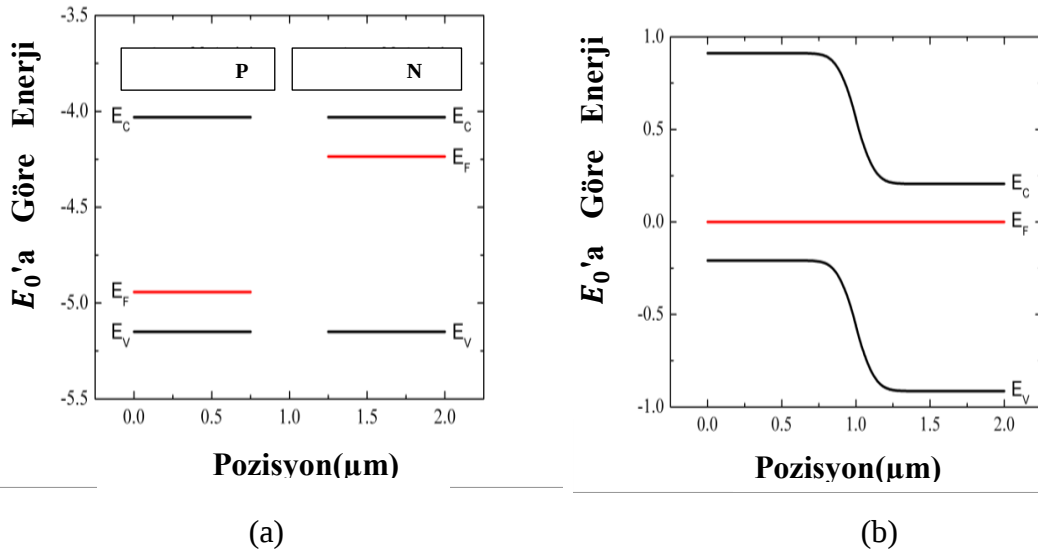
PN bağlantısı, yarı iletken cihazların temel yapı taşlarından biridir. Bir PN bağlantısının akım-voltaj tepkisinin temel teorisi 1949'da William Shockley tarafından yayınlandı (Shockley, 1949; Sze ve ark., 2021). I-V analizi, bağlantı alanı etkili transistörler (JFET'ler), çift kutuplu bağlantı transistörleri (BJT'ler) ve metal oksit yarı iletken alan etkili transistörler (MOSFET'ler) dahil olmak üzere daha komplike cihazların geliştirilmesi için temel oluşturdu. Shockley'in denklemleri, dopingle oluşturulan tek kristal silikon veya germanyum bağlantıları için geliştirilmiştir, ancak heteroeklem teorisinin de temelini oluşturmaktadır.

Bir PN bağlantısının temel fiziksel bölümleri, p-tipi bölge, n-tipi bölge ve ikisi arasındaki sınır olan metalurjik bağlantıdır. Birbirine bağlı olmayan bir malzemenin (bu durumda tek kristal Si) p ve n-tipi bölgeleri için bant yapıları, vakum enerjisine (E_0) göre enerjilerle Şekil 3.1a'da görülebilir. Bu durumda her iki bölge de aynı malzeme olduğu için elektron ilgisi (χ) ve bant aralığı (E_G) aynıdır, yalnızca Fermi enerjisi (E_F) değişir. Elektron ilgisi, E_0 ile iletim bandı enerjisi (E_C) arasındaki fark olarak tanımlanır ve bant aralığı (E_G), E_C ile valans bant enerjisi (E_V) arasındaki farktır. Deliklerin fazla olduğu p tipi yarıiletkenlerde E_F , E_V 'ye daha yakındır. Tersine, elektron fazlalığının olduğu n tipi malzeme için E_F , E_C 'ye daha yakındır (Sze ve ark., 2021).

İki malzeme birbiriyle fiziksel temas halinde olduğunda, p ve n tipi malzemelerin bant yapısı kavşaktan uzakta nispeten değişmeden kalır. Kavşakta, p-tipi taraftaki fazla boşluklar metalurjik bağlantı boyunca yayılır ve n-tipi tarafta bulunan fazla elektronlarla yeniden birleşir. Eşzamanlı olarak, n-tipi taraftaki fazla elektronlar, p-tipi taraftaki fazlalık boşluklar boyunca yayılır ve yeniden birleşir. Hareketli yükler, elektronlar ve boşluklar bağlantı noktasının yakınında yeniden birleşirken, geride bu difüzyona karşı çıkan yarı iletken içinde bir elektrik alanı oluşturan sabit iyon yükleri bırakırlar. Sonuç olarak, iki yarı iletken arasında hareketli yük konsantrasyonunun büyük ölçüde azaldığı bir tükenme bölgesi oluşur. Tükenme bölgesindeki elektrik alanı, eklem boyunca yerleşik bir elektrostatik potansiyelin (V_{bi}) var olmasına neden olur. Fermi enerjileri

hizalandığında dengeye ulaşılır ve ortaya çıkan bant yapısı Şekil 3.1b’de görülebilir. Bu durumda, Faz 0’a göre çizilen enerjiler, kavşağı geçerken E_C ile aynı şekilde bükülecektir (Sze ve ark., 2021).

İdeal bir PN bağlantısının denge durumu, difüzyona bağlı akım akışı ile sürüklenmeye bağlı akım akışı arasında bir denge kurar. Difüzyona bağlı parçacık akışı, yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyona doğru meydana gelir, yani elektronlar n-tipi bölgeden p-tipi bölgeye akarken, delikler p-tipi bölgeden n-tipi bölgeye akar. Bu akı, yalnızca bu potansiyelin üzerinde enerjiye sahip çoğunluk taşıyıcılarının yayılabilmesi için V_{bi} ile sınırlıdır. Şekil 3.1b’de V_{bi} , Şekil 3.1a’daki p- ve n-tipi bölgeler arasındaki E_F farkına eşittir. Sürüklenen parçacık akısı, azınlık taşıyıcıların, tükenme bölgesinde üretilen elektrik alan nedeniyle tükenme bölgesinin kenarından karşı tarafa doğru hızlanmasının sonucudur. Sürüklenme akısı, öncelikle tükenme bölgesi sınırına yakın azınlık taşıyıcı yoğunluğu ile sınırlıdır (La Rosa, 2014).



Şekil 3.1. (a) Ayrılmış n ve p tipi malzemeler için bir enerji bandı diyagramı simülasyonu ve (b) uygulanan öngerilim olmadan hizalamayı gösteren kararlı durum ideal tek kristal Si PN bağlantısı gösterilmektedir.

Aşağıdaki giriş parametrelerine sahip örnekler kullanılarak simüle edilmiştir: $K_S = 11.8$ (Sze vd. 2021), $E_G = 1.12$ eV (Figueiredo, 2012), $\chi = 4.03$ (Sze ve ark., 2021), $N_C = 2.86 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Green, 1990), $N_V = 3.1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (Green, 1990), $\mu_n = 1417 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Green, 1990), $\mu_p = 480 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (Brown, 1991), $N_D = N_A = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$.

İki farklı akım mekanizması önemlidir, çünkü akım akışı için yöne bağlı olarak iki farklı rejim oluştururlar. N-tipi taraftan p-tipi tarafa akan elektronlar ve p-tipi taraftan n-tipi tarafa akan boşluklar için, elektrik akımı zıt yüklerden dolayı aynı yönde yönlendirilir. Bu yöndeki akım ileri akım olarak adlandırılır ve difüzyon hakimdir. Taşıyıcı konsantrasyonu, bant kenarının üzerindeki enerjinin bir fonksiyonu olarak üstel olarak azaldığı için, difüzyon akımı, potansiyel bariyerdeki doğrusal değişikliklerle üstel olarak artar ve azalır. N-tipi taraftan p-tipi tarafa doğru olan akım, ideal bir diyotta sürüklenmenin hakim olduğu ters akım olarak bilinir. Sürüklenme akımı potansiyel bariyerden etkilenmez çünkü elektrik alanın gücüne değil, öncelikle tükenme genişliğine ulaşan 4 azınlık taşıyıcının sayısına bağlıdır. Bu, PN bağlantısına harici bir voltaj uygulandığında büyük bir eşitsizliğe neden olur.

3.1.2. Diyotun temel çalışma prensibi

P-n bağlantısının en temel kullanımı, diyot olarak bilinen doğrultucu bir devre elemanıdır. Bir diyot, ters yönde akım akışına direnirken, ileri yönde akım akışına izin veren bir I-V davranışı sergiler. P-tipi tarafına pozitif bir voltaj uygulanarak, çoğunluk taşıyıcılar için potansiyel bariyer azaltılır ve difüzyon akımı katlanarak artar ve ideal diyot Denklem (3.1) ve Denklem (3.2) (Sze ve ark., 2021) ile sonuçlanır:

$$I = I_o(e^{\frac{V_A}{V_T}} - 1) \quad (3.1)$$

$$V_T = \frac{k_b T}{q} \quad (3.2)$$

Burada;

I_o : Ters akım doygunluğu

V_A : PN bağlantısı boyunca uygulanan öngerilim

V_T : Termal voltaj

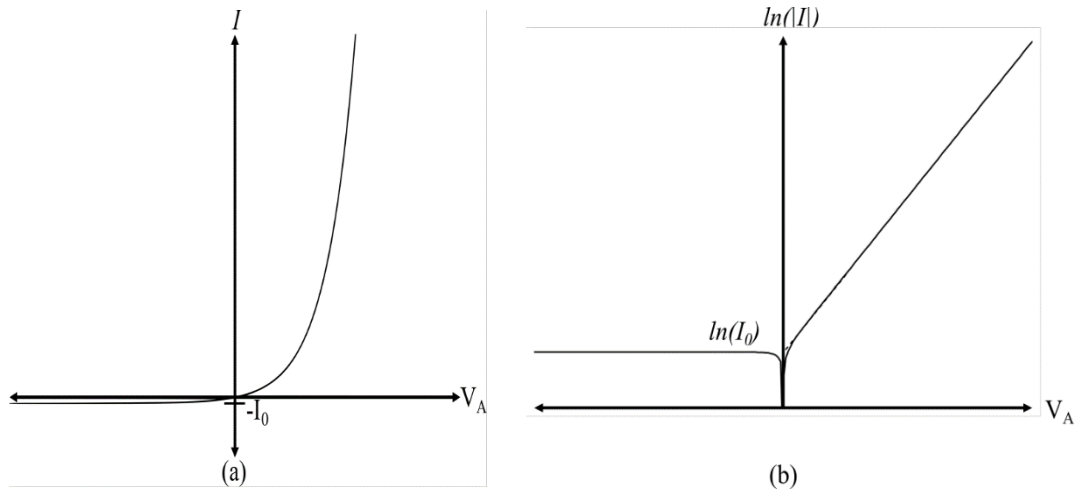
k_b : Boltzmann sabiti

T : Kelvin cinsinden sıcaklık

q: Temel yüküdür.

İdeal bir diyot için, potansiyel bariyerin artmasına neden olan p-tipi tarafa uygulanan negatif voltaj nedeniyle difüzyon akımı ihmal edilebilir hale geldiğinde, ters akım sürüklenme akımı değerinde doyuma ulaşır. Şekil 3.2, bu ideal diyotun I-V özelliklerini göstermektedir.

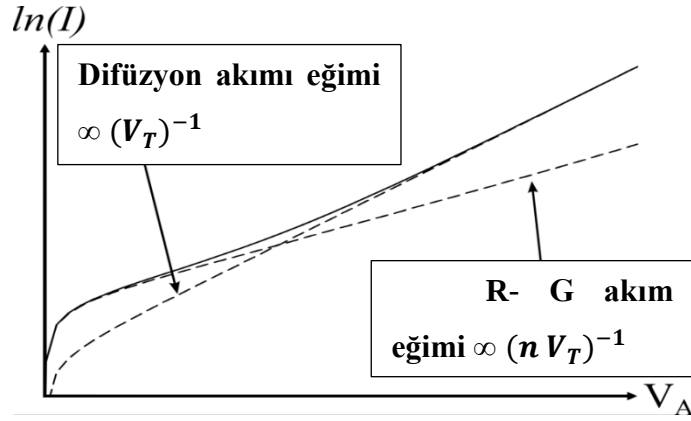
Gerçek diyotlarda bulunan ilk önemli ideal olmama durumu, rekombinasyon oluşturma (R-G) akımıdır. Büyük ileri öngerilim akımları için önemsizdir, ancak küçük ileri öngerilimde olduğu kadar ters öngerilimde de diyot üzerinde önemli bir etkisi vardır. Küçük ileri sapmada, tükenme bölgesindeki R-G merkezleri, tükenme genişliği boyunca tüm yolu yaymak için yeterli enerjiye sahip olmayan deliklerin ve elektronların bunun yerine tükenme bölgesi içinde yeniden birleşerek ileri yönde net bir akım akışıyla sonuçlanmasına izin verir.



Şekil 3.2. Denklem (1.1) kullanılarak ideal diyot IV davranışı, (a) doğrusal ölçeğe ileri ve geri sapma ve (b) semilog ölçeğinde ileri sapma ile gösterilir.

Bu akım hala üstel olarak uygulanan önyargıya bağlıdır, ancak V_A/V_T 'ye bağlı olarak üstel olarak değişmek yerine bunun yerine $1 \leq \eta \leq 2$ olan ve diyot idealite faktörü olarak bilinen $V_A/(\eta V_T)$ 'ye bağlıdır. R-G akım voltaj eğri Şekil 3.3'te görülebilir.

İleri akımın eğimindeki değişiklikler, R-G akımının göreceli önemini gösterebilir. Diyotun idealite faktörü Denklem (3.3) ve (3.4)'e (Schroder, 2015) dayalı olarak bu grafikten hesaplanabilir. Unutulmaması gereken önemli bir nokta, voltajın bir fonksiyonu olarak akımdaki üstel büyüme nedeniyle küçük voltaj adımlarının kullanılması gerektiğidir; tipik olarak 1 mV'den büyük değildir (Schroder, 2015).



Şekil 3.3. R-G akımının, aksi takdirde ideal bir diyotun ileri besleme I-V özellikleri üzerindeki etkisi, tipik bir $n=2$ (Sze ve ark., 2021) değeriyle gösterilir.

Yaklaşık $3V_T$ 'den daha büyük ters polarizasyonda, R-G akımı aşağıda gösterildiği gibi Denklem (3.5) temel alınarak yaklaşık olarak hesaplanabilir (Sze ve ark., 2021)

$$n = \frac{1}{\ln(10)mV_T} \quad (3.3)$$

$$m = \frac{d(\log I)}{dV} \quad (3.4)$$

$$I_{R-G} = -\frac{qAn_i}{2\tau_0} W \quad (3.5)$$

Burada A enine kesit alanıdır, n_i içsel taşıyıcı konsantrasyonudur, W tükenme bölgesinin genişliğidir ve τ_0 Denklem (3.6) ile tanımlanır (Sze ve ark., 2021).

$$\tau_0 = \frac{1}{2} \left(\tau_p e^{\frac{E_T - E_i}{kT}} + \tau_n e^{\frac{E_i - E_T}{kT}} \right) \quad (3.6)$$

Burada;

τ_p : n ilgili azınlık taşıyıcı ömürleri

E_T : R-G merkezinin enerji seviyesi

E_i : içsel enerji seviyesidir.

Unutulmaması gereken önemli bir husus, ters polarizasyondaki W'nin Denklem (3.7)'ye dayalı olarak uygulanan polarizasyona bağlı olmasıdır, böylece ters polarizasyon akımı arttıkça elde edilen IR-G sabit değildir (Sze ve ark., 2021).

$$W = \left[\frac{2K_s \epsilon_0}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.7)$$

Burada;

K_s : bağıl geçirgenlik

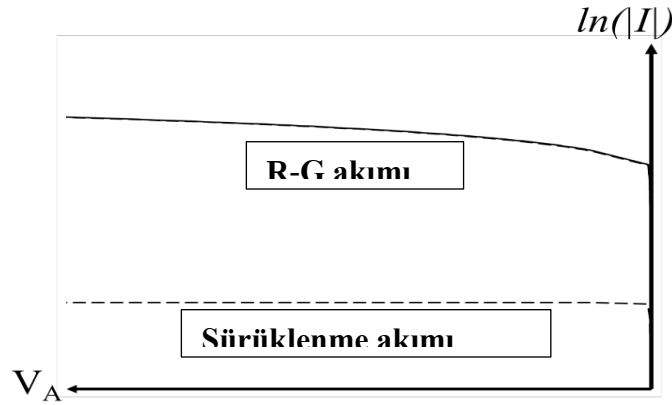
ϵ_0 : boş alanın geçirgenlik

N_A : p-tipi taraftaki katkılama

N_D : n-tipi taraftaki katkılama

V_{bi} : yerleşik potansiyeldir.

Negatif öngerilim arttıkça, tükenme bölgesinde daha fazla R-G merkezini elektrik alanına maruz bırakan tükenme genişliği artar. Sonuç olarak, RG akımı artar, ancak difüzyon akımında görüldüğü gibi üstel büyüme yerine V_A 'nın karekökünün bir fonksiyonu olarak. Eğrinin şekli Şekil 3.4'de görülebilir.



Şekil 3.4: R-G akımının, aksi takdirde ideal bir diyotun ters polarizasyon IV özellikleri üzerindeki etkisi, burada ters polarizasyon arttıkça ters akımın arttığı gösterilmiştir.

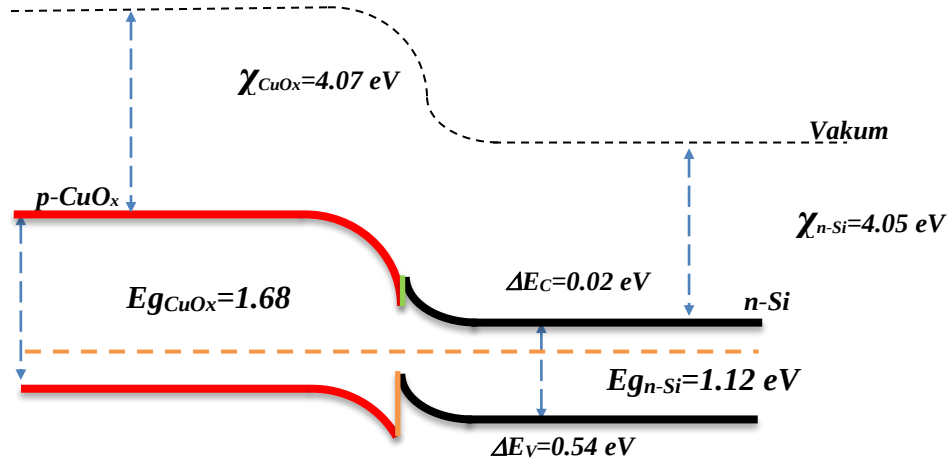
Gerçek diyotların performansı üzerinde önemli etkileri olan yüksek seviyeli enjeksiyon ve seri direnç gibi güçlü ileri eğilimde birkaç önemli ideal olmayan durum vardır. Bununla birlikte, bu tez için ele alınan cihazlarda önemli bir faktör değildir, çünkü

birincil odak noktası yalnızca küçük ileri sapma ve ters sapma değerleridir. Hem yüksek seviye 8 enjeksiyon hem de seri direncin ana eğilimi, V_{bi} 'ye yakın ve daha büyük uygulanan gerilimlerde açık akımın eğiminde bir azalmaya neden olmaktadır.

PN bağlantısının doğrultma davranışının basit diyot devre elemanının ötesinde kullanılabileceği bir dizi uygulama vardır. Sonraki bölümlerde, PN bağlantısının varyasyonlarıyla üretilen cihazlar açıklanmaktadır. Bağlantı noktasının elektriksel özelliklerini kontrol ederek ve çoklu bağlantı noktalarını kullanarak, radyasyonu algılamak ve sinyalleri yükseltmek mümkündür. Yüklü parçacık detektörleri, bağlantı alanı etkili transistörler, iki kutuplu bağlantı transistörleri ve erişim çığ fotodiyotları bu araştırma için birincil hedeflerdi.

3.1.3. $\text{CuO}_x/\text{n-Si}$ enerji bant diyagramı

CuO_x ve n-Si'nin bant aralığına (E_g) ve elektron ilgisine (χ) göre, heteroeklem diyodunun enerji bant diyagramı çizildi ve termal denge durumunda Şekil 3.5'de gösterildi. CuO_x ve n-Si için E_g ve χ değerleri sırasıyla $E_{g,\text{CuO}_x}=1,682$ eV ve $\chi_{\text{CuO}_x}=4,07$ eV (Balaram ve ark., 2018) ve $E_{g,\text{n-Si}}=1,12$ eV ve $\chi_{\text{n-Si}}=4,05$ eV şeklindedir (Tuan ve ark., 2017:105). $\Delta E_c(\chi(\text{n-Si}) - [-\chi]\text{CuO}_x)$ ve $\Delta E_v ([E_g]_{\text{CuO}_x} - [E_g](\text{n-Si}) + \Delta E_c)$ sırasıyla iletim bandı uzantısı ve valans bandı uzantısıdır. Sonuçlar, ΔE_v değerinin (0,54 eV) ΔE_c (0,02 eV) değerinden yüksek olduğunu göstermektedir. Bu, n-Si'den p- CuO_x 'ya elektron enjeksiyonunun, p- CuO_x 'dan n-Si'ye delik enjeksiyonundan daha kolay olduğunu ve iletim bandı yoluyla yük aktarımının baskın olduğunu gösterir. Heteroeklem cihazlarındaki bu baskın iletim türü, genellikle büyük bir fotoakım değerine neden olur (Annathurai ve ark., 2019).



Şekil 3.5. Heteroeklem diyodunun enerji bant diyagramı

3.1.4. Bakır (II) oksidin (CuO) ve küprik oksidin (Cu₂O) özellikleri

Bakır oksitler üç biçimde mevcuttur: Cu (I) oksit (Cu₂O, bakır oksit), Cu (II) oksit (CuO, bakır oksit) ve Cu₄O₃ (Forcade ve ark., 2015), Cu₂O, germanyum ve silikondan önce keşfedildi (Abdu ve Musa, 2009). Cu₂O ve CuO yarı iletkenleri, katı hal gaz sensörü heterokontakları, heterojen katalizörler ve mikrodalga dielektrik malzemeleri için potansiyel uygulamalarla birlikte güneş pilleri (Mittiga ve ark., 2006) için yararlı olan birçok ilginç özellik sergiler (Chaudhary ve ark., 2004; Yoon ve ark., 2000). Yarı iletkenler ayrıca özellikle Cu₂O olmak üzere fotokatalitik (Xu ve Schoonen, 2000) hidrojen üretimi için umut vaat eden malzemelerdir (Hara ve ark., 1998; Pavan ve ark., 2015). Cu₂O'nun güneş pillerinde kullanım potansiyeli ilk olarak 1920'de kabul edildi (Abdu ve Musa, 2009), Çizelge 3.1, bakır oksitlerin ayrıntılı parametrelerini göstermektedir.

Çizelge 3.1. Yaygın bakır oksitlerin parametreleri

Parametre	Cu ₂ O	Referanslar	CuO	Referanslar
Faz	Kübik, a = 4.27 Å	Korzhavyi ve Johansson, 2011	Monoklinik, a= 4.6837 Å, b=3.4226 Å, c= 5.1288 Å	Korzhavyi ve Johansson, 2011
Bant aralığı enerjisi (eV)	2.0–2.6	Ichimura ve Kato, 2013	1.0, 1.2, 2.1	Hussain ve ark., 2014; Padrón ve ark., 2018; Rokhmat ve ark., 2017; Tung, 2001
Elektron ilgisi (eV)	3.20	Nguyen ve ark., 2015; Khan, 2000	4.07, 3.23, 3.80	Chiang ve ark., 2012; Zhu t.y.
Dielektrik geçirgenlik (bağıl)	7.11	Khan, 2000; Morales ve ark., 2005	18.10	Zhu t.y.
CB (iletim bandı) durumların etkin yoğunluğu (1/cm ³)	$2,02 \times 10^{17}$	Deng ve ark., 2017; Khan, 2000	3.0×10^{19}	Zhu t.y.
VB (değerlik bandı) durumların etkin yoğunluğu (1 cm ³)	1.1×10^{19}	Deng ve ark., 2017; Khan, 2000	$5,5 \times 10^{20}$	Zhu t.y.
İletim değerlik bantları (eV)			-4,27 ila -2,70	Forcade ve ark., 2017
Değerlik bandı kenarı (eV)	-4,32 ila -4,0	Xu ve Schoonen, 2000	-5.34 to -4.80	Chiang ve ark., 2012; Forcade ve ark., 2017; Sawicka-Chudy ve ark., 2020
Elektron hareketliliği (cm ² /Vs)	200	Deng ve ark., 2017; Khan, 2000	0.1	Zhu t.y.
Delik hareketliliği (cm ² /Vs)	80	Khan, 2000; Morales ve ark., 2005	10.0	Zhu t.y.
Delik etkili kütle	0.69m ₀	Koffyberg ve Benko, 1982	0,54m ₀ –3,72m ₀	Ching ve ark., 1989; Sawicka-Chudy ve ark., 2020
elektron etkili kütle	0.99m ₀	Koffyberg ve Benko, 1982	0,14m ₀ –0,17m ₀ 0,16m ₀ –0,46m ₀	Akaltun, 2015; Sawicka-Chudy ve ark., 2020
Sığ üniform donör yoğunluğu (cm ⁻³)	0	Zhu t.y	0	Zhu t.y.
Sığ düzgün alıcı yoğunluğu (cm ⁻³)	1×10^{18}	Khan, 2000; Sawicka-Chudy ve ark., 2018	1×10^{16}	Zhu t.y.
İletkenlik (Ω cm) ⁻¹	$10^{-6} - 10^{-8}$	Wright, 1966	$1,05 \times 10^{-2}$, $6,3 \times 10^{-2}$	Sawicka-Chudy ve ark., 2020
Delik konsantrasyonu (cm ⁻³)	10^{16}	Li ve ark., 2014	$6,69 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$, $4,0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	Sawicka-Chudy ve ark., 2020
Salon hareketliliği (V cm ⁻¹ s ⁻¹)	30, 100, 53	Kita ve ark., 1994; Li ve ark., 2014	0,98, 0,1	Koffyberg ve Benko, 1982; Sawicka-Chudy ve ark., 2020

Bakır oksitler, CuO (Yu ve ark., 2000; Padrón ve ark., 2018; Viet Pham ve ark., 2013) için 1,0 ila 2,1 eV ve Cu₂O (Yu ve ark., 2000, Johan ve ark., 2011) için 2,0 ila 2,6 eV arasında değişen bant boşluklarına sahip p-tipi yarı iletkenlerdir (Xosrovashvili ve Gorji, 2013). CuO, Cu₂O'dan daha küçük bir bant aralığına sahiptir ve bu nedenle daha fazla foton soğurur. Bakır oksitler düşük maliyetlidir ve toksik değildir, iyi elektron hareketliliği sergiler, ancak oldukça yüksek bir azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğuna (Rokhmat ve ark., 2017) ve zayıf veya yetersiz fotostabiliteye sahiptir. Ek olarak, bakır (I) oksitler, organik bileşikleri parçalamak için bakır (II) oksitlerden daha yüksek fotokatalitik aktiviteye sahiptir (Brattain, 1951; Ichimura ve Kato, 2013; Janczarek ve Kowalska, 2017). Bakır oksit filmler birçok teknikle elde edilebilir.

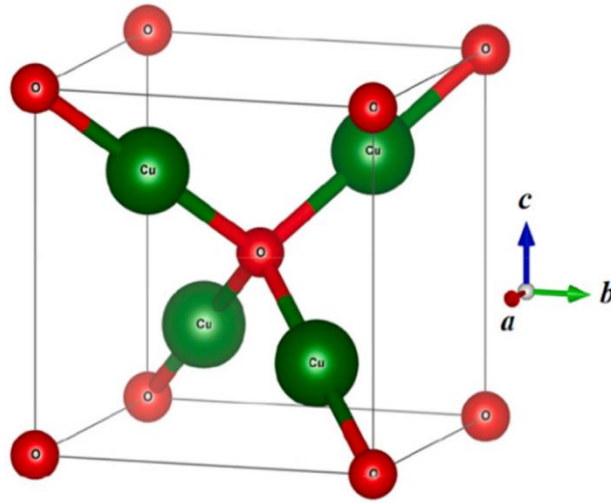
Çizelge 3.2, farklı üretim yöntemleriyle hazırlanan bakır oksit örneklerinin bazı özelliklerini (bant aralığı tipi, boşluk, kristalit boyutu ve nanokristal şekli) göstermektedir. Bakır oksitlerin parametreleri kontrol edilebilir. Optik bant aralığı ve kristal boyutu hazırlama yöntemine bağlıdır. Örneğin, yapının kalınlığı arttıkça bant aralığı enerjisi 2,48 eV'den 2,31 eV'ye düşer (Mageshwari ve Sathyamoorthy, 2013) ve oksijen basıncındaki artışla tane boyutu 31 nm'den 42 nm'ye çıkar (Chen ve ark., 2009). Nanokristal boyutunun küçültülmesi, iç yüzey ve arayüz alanlarında (TiO₂'de eşit CuO konsantrasyonu için) bir artışa yol açar ve arayüz kusurlarına ve artan rekombinasyon kayıplarına neden olur.

Çizelge 3.2. Farklı yöntemlerle hazırlanan bakır oksit filmlerin özellikleri

Hazırlık metodu	Optik bant aralığı (eV)	kristal boyutu (nm)	Referans
Piroliz tekniği		20–170	(Morales ve ark., 2005)
SILAR yöntemi	2,31–2,48	7.0–8.0	(Mageshwari ve Sathyamoorthy, 2013)
Termal buharlaşma	1,50–1,85	27–39	(Akkari ve ark., 2007)
Kimyasal buhar birikimi		500	(Markworth ve ark., 2001)
Darbeli lazer biriktirme	2,52, 2,42, 2,12	31–42	(Chen ve ark., 2009)
Sol-jel	2,1, 1,9		(Ray, 2001)
Magnetron püskürtme	1.58	120, 220	(P. Sawicka-Chudy ve ark., 2018)

Cu₂O basit bir kübik yapıda kristalleşir ve bu iki alt kafes olarak yorumlanabilir: Cu katyonları yüz merkezli kübik alt kafesi oluştururken, O anyonları gövde merkezli

kübik alt kafesi oluşturur (Şekil 3.6) (Kirfel ve Eichhorn, 1990; Meher ve ark., 2021). Karşılık gelen yapı, Pn_3m uzay grubuna aittir. Cu_2O 'nun birim hücresi altı atom içerir. O atomları, dört Cu atomu tarafından tetrahedral olarak koordine edilir ve Cu atomları, iki O atomu ile doğrusal olarak koordine edilir. Koordinat sisteminin orijini olarak merkezi O atomunun konumunu seçersek, Cu atomları $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$, $(\frac{1}{4}, \frac{3}{4}, \frac{3}{4})$, $(\frac{3}{4}, \frac{1}{4}, \frac{3}{4})$ ve $(\frac{3}{4}, \frac{3}{4}, \frac{1}{4})$ 'a' kafes parametresinin birimleri cinsinden. Kütle Cu_2O için deneysel kafes parametresinin $4.2696 \text{ \AA}$ (Meyer ve ark., 2012) olduğu bildirilmiştir.

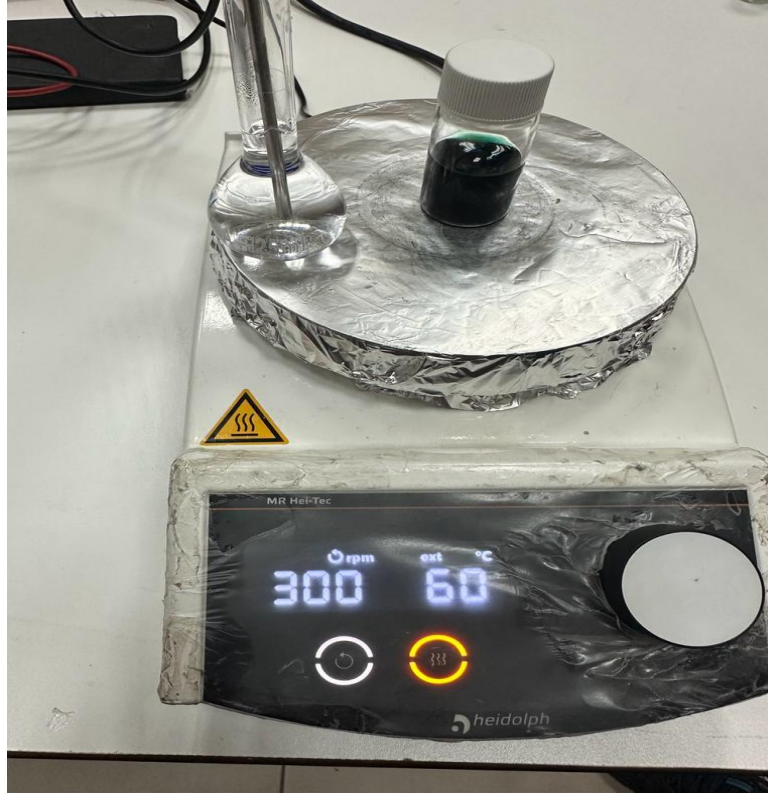


Şekil 3.6. Cu_2O 'nun kristal yapısı (Meher ve ark., 2021)

3.2. Deneysel Aşama

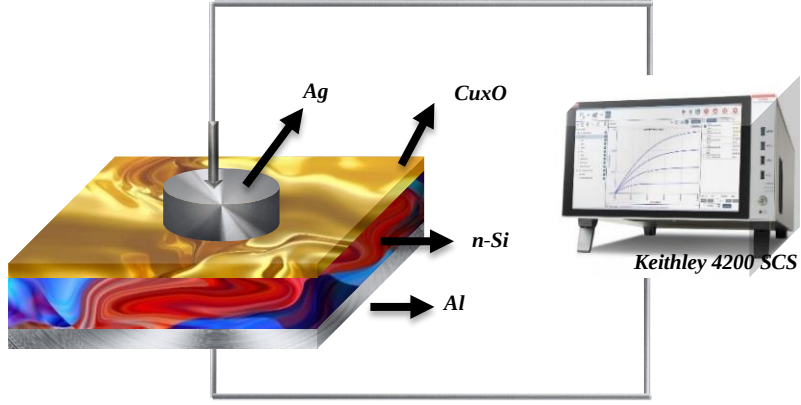
3.2.1. n-Si alttaşlar üzerine ince filmlerin üretimi

Bu çalışmada, Cu_xO ince filmleri n-Si üzerine döndürerek kaplama yöntemiyle kalınlığın bir fonksiyonu olarak biriktirildi. Cu_xO ince filmleri hazırlamak için başlangıç malzemesi olarak sırasıyla bakır (II) asetat kaynağı, 2-metoksietanol ve monoetanolamin ise çözücü ve stabilizatör olarak kullanıldı. 0,1 M olarak hazırlanan katkısız Cu_xO çözeltisi manyetik karıştırıcıda $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat karıştırıldı. Hazırlanan çözelti Şekil 3.7'de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Manyetik karıştırıcı ile hazırlanan Cu_xO çözeltisi

Heteroeklem imalatında kullanılan n-Si substratların organik ve mekanik kirlilikten temizlenmesi diyot performansı açısından önemlidir. Bu nedenle, n-tipi silikon substratlar, doğal oksit tabakalarını çıkarmak için önce seyreltilmiş hidroflorik asit içine daldırıldı. Daha sonra, tüm substratlar sırasıyla 10 dakika boyunca etanol, aseton ve deiyonize suda ultrasonik olarak temizlendi ve azot gazı ile kurutuldu. Hazırlanan Cu_xO çözeltileri, 3000 rpm'de 30 saniye süreyle döndürerek kaplama yöntemi ile n-tipi silikon altlıklar üzerine kaplandı. Filmler, havada her katman için 300 °C'de 10 dakika ön tavlandı. Kalınlık durumları kaplama işleminin 2 kat (2x), 4 kat (4x), 6 kat (6x), 8 kat (8x) ve 10 kat (10x) olarak tekrarlanması ile ayarlandı. Daha sonra, tüm numuneler 500 °C'de 2 saat havada tavlandı.

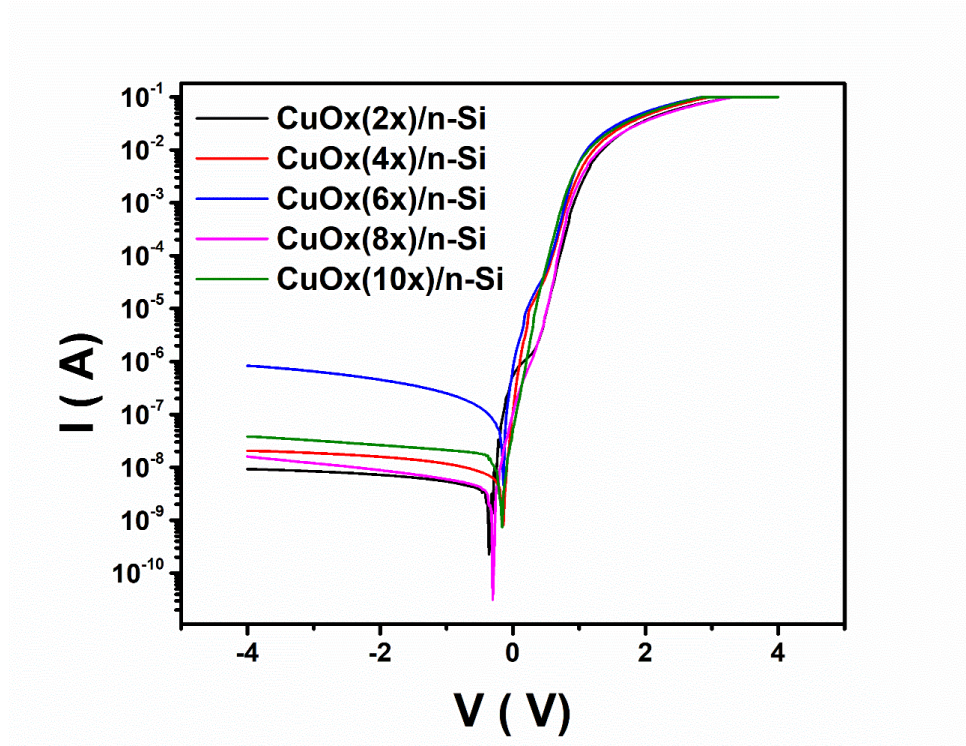


Şekil 3.9. Cu_xO tabanlı diyotların şematik yapısı

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. I-V Karakteristikleri Yardımıyla Elektriksel Parametrelerin Hesaplanması

Farklı kalınlıklara göre üretilen heteroeklem yapıların karanlık koşullarda ve oda sıcaklığında ölçülen I-V karakteristikleri, Şekil 4.1'de gösterilmektedir. Akımın ters beslem bölgesinde düşük olup ileri beslem bölgesinde artması tüm yapıların doğrultma davranışı sergilediğini göstermektedir. CuO(2x)/n-Si heteroeklem yapısında ters beslem akımı en düşük iken kat sayısı artışı ile beraber ters beslem akımın da bir miktar artışın olduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Üretilen heteroeklem yapıların karanlık I-V grafiği

Ters beslem bölgesindeki bu artış beraberinde doğrultma oranlarında düşüşü meydana getirir. Bu çalışmada en yüksek doğrultma oranı $1,14 \times 10^7$ ile CuO(2x)/n-Si yapısından elde edilirken en düşük RR oranı $1,61 \times 10^5$ ile CuO(6x)/n-Si diyotundan elde edilmiştir. Üretilen diyotlarının idealite faktörü, aşağıdaki Denklem kullanılarak hesaplanabilir;

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{qV}{nKT} \right) - 1 \right) \quad (4.1)$$

Burada;

I :Diyottan geçen akım

V: Diyot boyunca voltaj

I_0 :Karanlık doyum akım

n: idealite faktörü

T: Kelvin cinsinden sıcaklık

q: Elementer yük

K : Boltzmann sabitidir.

Gerilim ($V \geq 3 KT/q$) ile metal/yarı iletken (M/S) arayüzündeki bir bariyerden geçen akım arasındaki ilişki Denklem (4.2) ve Denklem (4.3) ile ifade edilebilir.

$$I = I_0 \exp \left(\frac{qv}{nKT} \right) \quad (4.2)$$

Veya

$$\ln(I) = \ln(I_0) + \left(\frac{q}{nKT} \right) V \quad (4.3)$$

İdealite faktörü, ileri beslem bölgesinin doğrusal kısmının eğiminden belirlendi. Üretilen diyotlar için idealite faktörü ve bariyer yüksekliği gibi temel parametreler hesaplanarak Çizelge 4.1’de verilmiştir. İdealite faktörü değerleri 3,05 ve 5,08 arasında değişmekte olup, en düşük idealite faktörü değeri CuO(10x)/n-Si yapısından elde edilmiştir. İdeal diyot davranışında idealite değeri bire eşittir, birden büyük değerler diyotların ideallikten saptığını göstermektedir. Bu durum genellikle imaj kuvvet düşüşüne, bariyer homojensizliğine, üretim-rekombinasyon miktarına, doğal oksit tabakasına ve arayüzey kirliliklerine atfedilmektedir (Kamruzzaman ve ark., 2017).

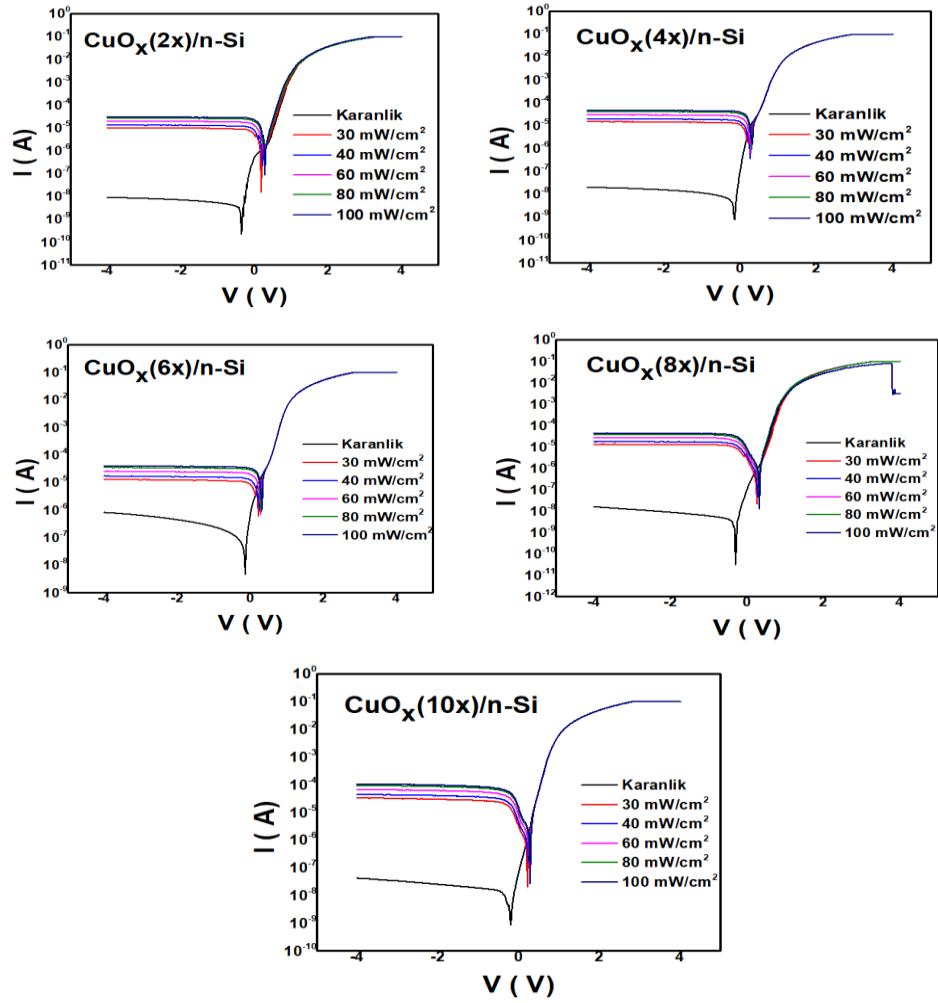
Çizelge 4.1. Diyotların termoiyonik emisyon teorisine göre hesaplanan elektriksel parametreleri

Diyotlar	I_o	RR	n	Φ_B (eV)
CuOx(2x)/n-Si	$2,5 \times 10^{-7}$	$1,14 \times 10^7$	4,68	0,67
CuOx(4x)/n-Si	$1,2 \times 10^{-6}$	$5,37 \times 10^6$	5,08	0,64
CuOx(6x)/n-Si	$1,1 \times 10^{-6}$	$1,61 \times 10^5$	4,67	0,64
CuOx(8x)/n-Si	$7,21311 \times 10^{-8}$	$7,61 \times 10^6$	3,81	0,71
CuOx(10x)/n-Si	$6,43043 \times 10^{-8}$	$3,19 \times 10^6$	3,05	0,71

4.2. Üretilen Diyotların Işığa Duyarlılık karakteristikleri

Temel olarak, fotodiyotlar p-tipi ve n-tipi yarı iletkenlerden oluşur. N-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları elektronlar iken, p-tipi yarı iletkenlerde çoğunluk taşıyıcıları deliklerdir. p-tipi ve n-tipi malzemeler birleştiğinde, elektronlar ve delikler, tükenme bölgesi adı verilen eklem bölgesinin zıt taraflarına çekilir. Birleşim bölgesi aydınlatıldığında değerlik bandındaki elektronlar uyarılarak iletim bandına geçer ve elektron-boşluk çiftleri oluşur. Elektronların ve deliklerin zıt yönlerde hareketi birleşme bölgesindeki potansiyel nedeniyle bir akım oluşturur. Özetle, bir fotodiyot, fotonları elektrik akımına dönüştüren cihazlardır. Bu çalışmada üretilen fotodiyotların karanlık ve çeşitli aydınlatma yoğunlukları altındaki I - V özellikleri Şekil 4.2'de gösterilmektedir.

Şekil 4.2'den üretilen diyotların ışığa duyarlı olduğu görülmektedir. Bu diyotlar aydınlatıldığında ileri polarma bölgesinde önemli bir değişiklik gözlenmezken, ters polarma bölgesinde akım değeri artmıştır. Gelen ışık elektron deliği çiftleri oluşturduğundan ve ters gerilim bölgesinde fotojenerasyon elektron-delik çiftlerinin ayrılması ileri gerilim bölgesine göre daha etkili olduğu için ters gerilim bölgesinde akımın arttığı söylenebilir. Yani, aydınlatma altında, yük taşıyıcıları karanlık akıma katkıda bulunmaktadır bu da diyotların fotoiletken davranış sergilediğini göstermektedir. Fotodiyotlar için önemli bir parametre olan fotohassasiyet değerleri ($I_{ışık}/I_{karanlık}$) CuO(2x)/n-Si, CuO(4x)/n-Si, CuO(6x)/n-Si, CuO(8x)/n-Si ve CuO(10x)/n-Si fotodiyotları için -4 V ve 100 mW/cm² için sırasıyla 3.35×10^3 , 2.34×10^3 , 4.84×10^1 , 2.76×10^3 ve 2.48×10^3 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.2. Fotodiyotların farklı ışık şiddetleri altında ölçülen Akım-Gerilim grafikleri

4.3. Norde Modeli Yardımı ile Bariyer Yüksekliği ve Seri Direncin Hesaplanması

Üretilen heteroeklem yapıların seri dirençler ve bariyer yükseklikleri Norde yöntemi ile belirlenebilir. Norde fonksiyonu aşağıdaki denklem (Tataroglu ve ark., 2018) ile yazılır:

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \quad (4.4)$$

γ , termiyonik emisyon teorisinden elde edilen n'den büyük en yakın tamsayı değeri (boyutsuz) ve $I(V)$ deneysel olarak uygulanan gerilime bağlı akımdır. Norde fonksiyonu yeniden düzenlenirse Φ_b ve R_s aşağıdaki denklemler ile ifade edilebilir:

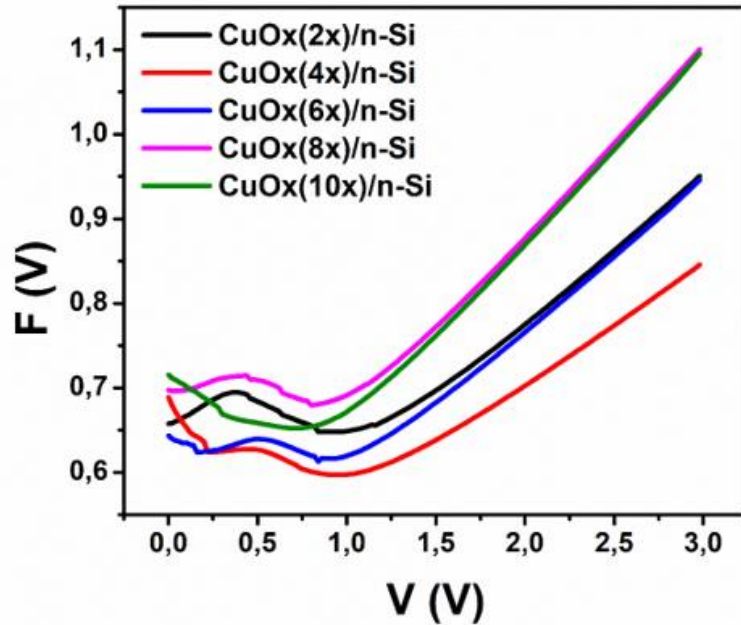
$$\Phi_b = F(V_0) + \left[\frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{q} \right] \quad (4.5)$$

$$R_s = \frac{\gamma - n}{I} \frac{kT}{q} \quad (4.6)$$

Burada V_0 , $F(V)$ ye karşılık gelen minimum voltaj değeridir. Şekil 4.3 farklı CuO kalınlıkları için CuO/n-Si heteroeklemlerinin $F(V)$ - V grafiklerini göstermektedir. Belirlenen Φ_b ve R_s değerleri Norde fonksiyonlarından elde edilerek Çizelge 4.2’de gösterilmiştir. Minimum R_s değeri 3Ω ile CuO(6x)/n-Si fotodiyotundan elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Üretilen diyotların hesaplanan temel elektriksel parametreleri

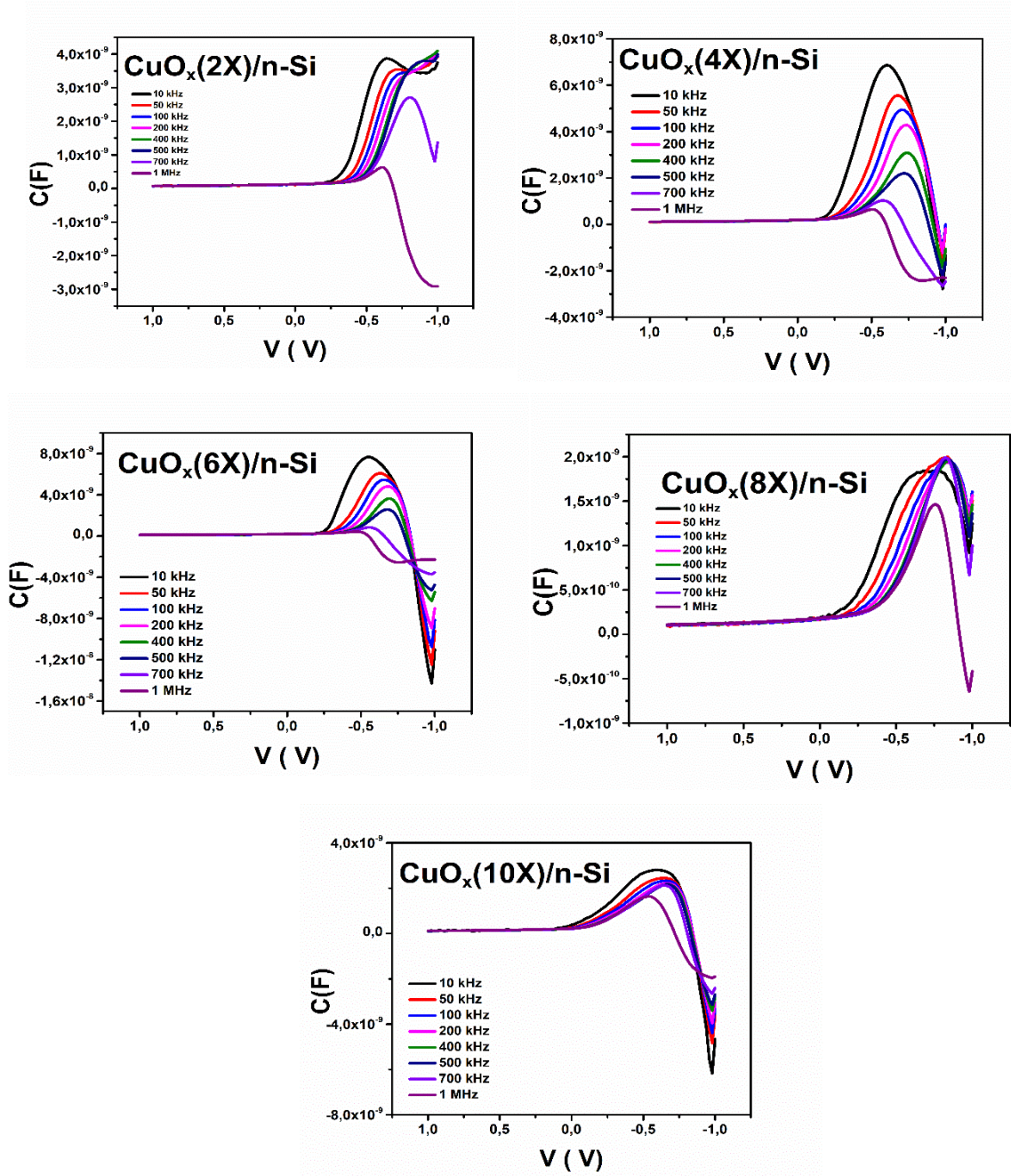
Diyotlar	Φ_b (Bariyer yüksekliği)	R_s (Ω)(Seri Direnç)
CuOx(2x)/n-Si	0,8	10
CuOx(4x)/n-Si	0.73	10
CuOx(6x)/n-Si	0.77	3
CuOx(8x)/n-Si	0.85	11
CuOx(10x)/n-Si	0.8	42



Şekil 4.3. Üretilen diyotların $F(V)$ - V grafiği

4.4. Üretilen Diyotların Kapasitans-Gerilim Karakteristikleri

CuO/n-Si cihazlarının C-V grafikleri, Şekil 4.4'de farklı CuO kalınlıkları için 10 kHz'den 1 MHz'e artan frekans değerleri için gösterilmiştir. Tüm cihazlar için kapasitans değerleri artan frekans ile azalmış ve birikim bölgesinde pikler göstermiş ve bu piklerin konumu tükenme bölgesine doğru kaymıştır. Pikler, arayüz durumlarına ve seri dirence bağlı olabilirken, daha yüksek frekanslar için piklerdeki azalma, daha yüksek frekanslardaki seri direnç etkisine bağlanabilir çünkü arayüz durumları ac sinyali takip edememektedir (Doğan ve ark., 2015; Korucu ve ark., 2013; Şafak-Asar ve ark., 2015). Ek olarak, cihazlar ayrıca daha yüksek ileri sapmalar ve daha yüksek frekanslar için negatif kapasitanslara sahiptir ve negatif kapasitansların kaynağı, polarizasyonlara azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna bağlı olabilir (Gökçen ve ark., 2012; Yıldırım ve Kocyigit, 2018).

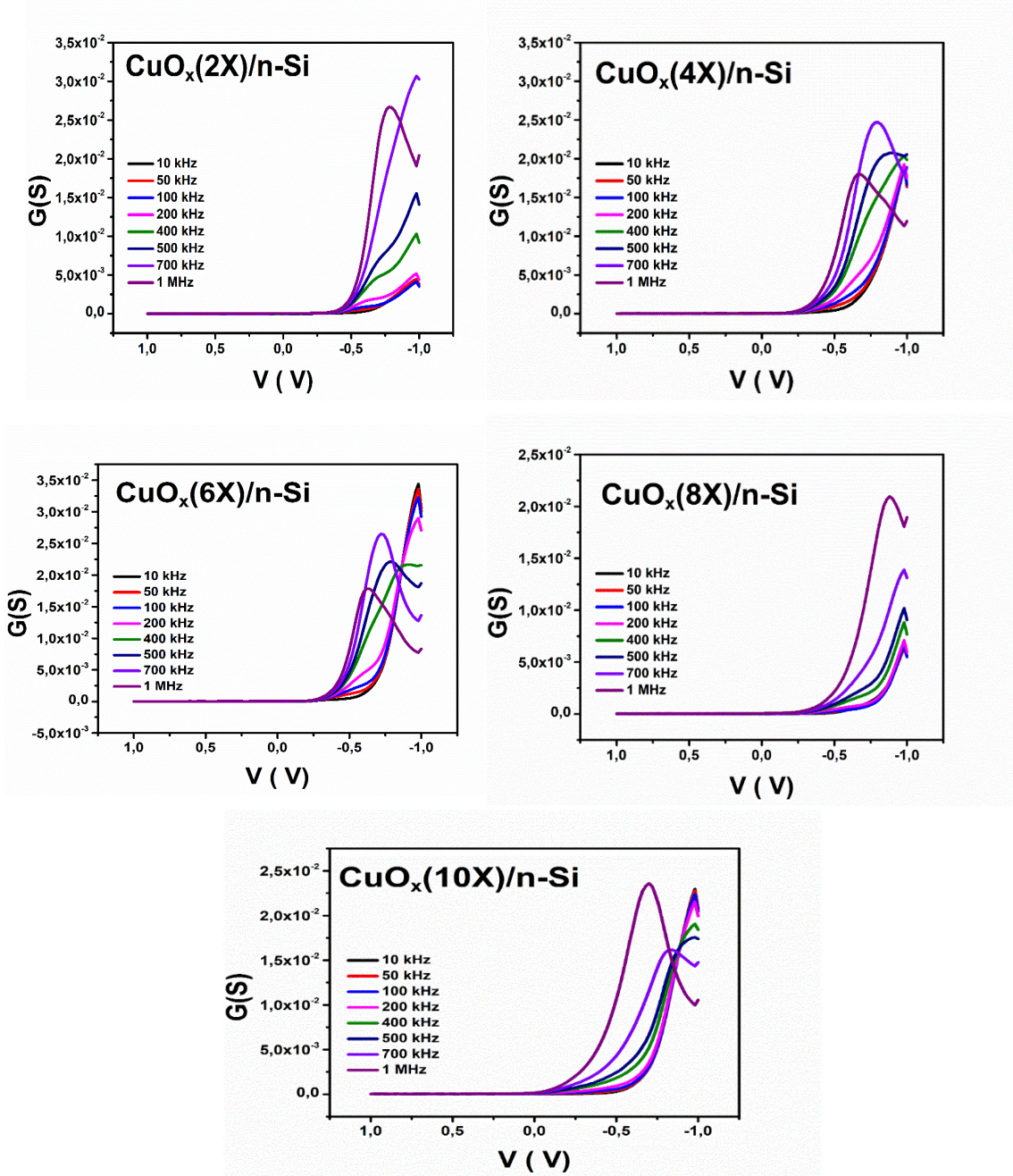


Şekil 4.4. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kapasitans-Gerilim (C-V) grafikleri

4.5. Üretilen Diyotun Kondüktans-Gerilim Karakteristikleri

CuO/n-Si cihazlarının cihazlarının G-V grafikleri Şekil 4.5'de farklı CuO kalınlıkları için 10 kHz'den 1 MHz'e artan frekans değerleri için gösterilmiştir. İletim değerleri, 10 kHz, 50 kHz ve 100 kHz frekansları dışında, belirli bir frekansta, tükenme

bölgesindeki hemen hemen tüm cihazlar için artan frekansla aniden artmış ve inversiyon ve birikim bölgesinde azalmıştır.



Şekil 4.5. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Kondüktans-Gerilim (G-V) grafikleri

İleri öngerilim bölgesinde, iletkenlik değerleri, arayüz durumlarının varlığından dolayı genellikle artan frekansla artar (Al Orainy ve Hendi, 2014). Yüksek iletkenlik değerleri, arayüz durumu ve seri direncin varlığına atfedilebilir çünkü arayüz durumları,

tercih edilen frekans aralığı için hemen hemen her frekansı ac sinyali takip edebilir (Bilkan ve ark.,2017).

4.6. Üretilen Diyotların Direnç-Gerilim Karakteristikleri

Yarı iletken cihazlarda seri direnç (R_s), hem kapasitansın yüksek frekansta bozulmasına hem de iletkenliğin azalmasına neden olan önemli parametrelerden biridir. R_s aşağıdaki Denklem (4.7) kullanılarak hesaplanabilir.

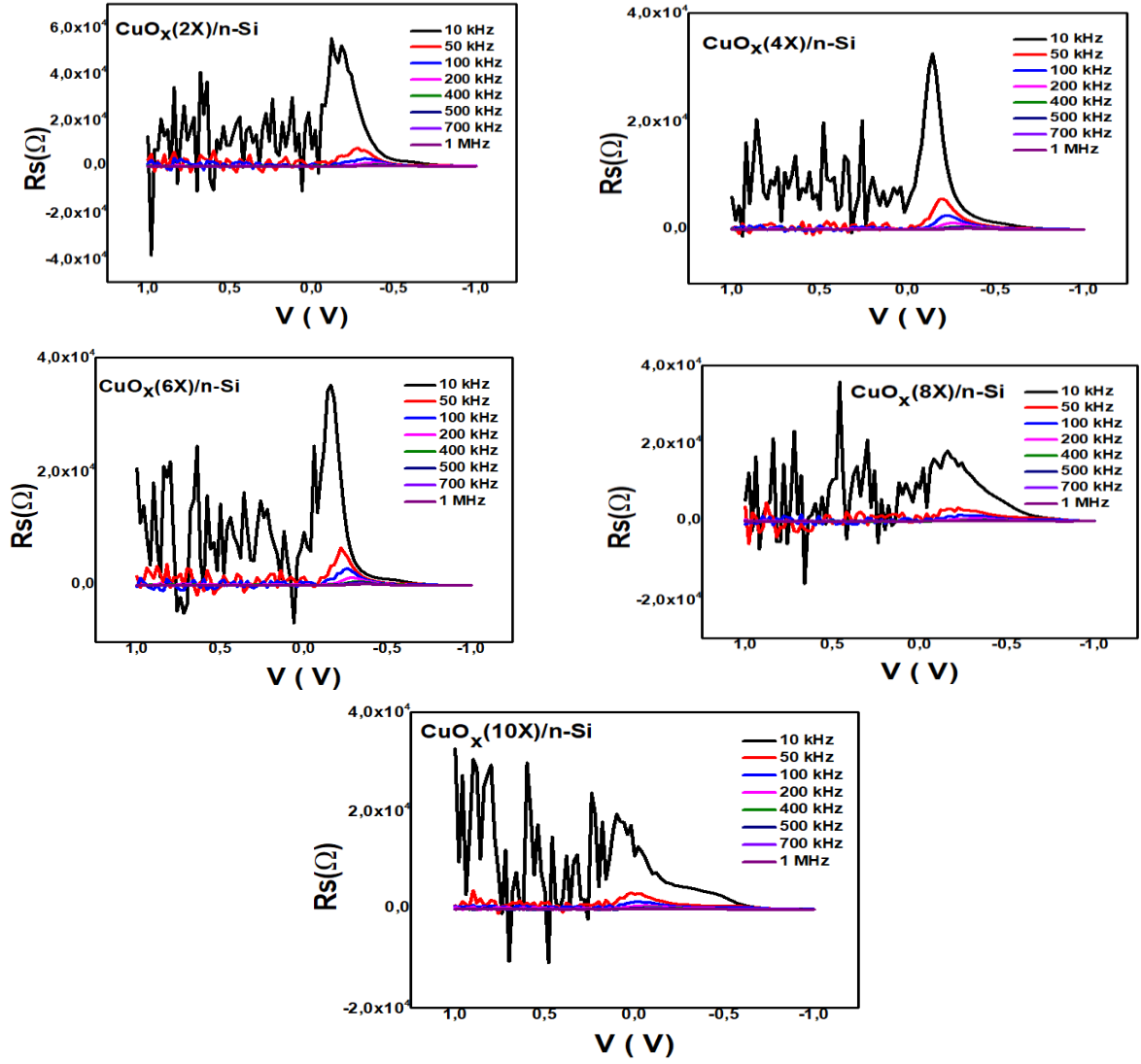
$$R_s = \frac{G_{ms}}{G_{ma}^2 + (\omega C_{ma})^2} \quad (4.7)$$

Burada;

C_{ma} : Ölçülen kapasitans

G_{ma} : ölçülen iletkenliktir.

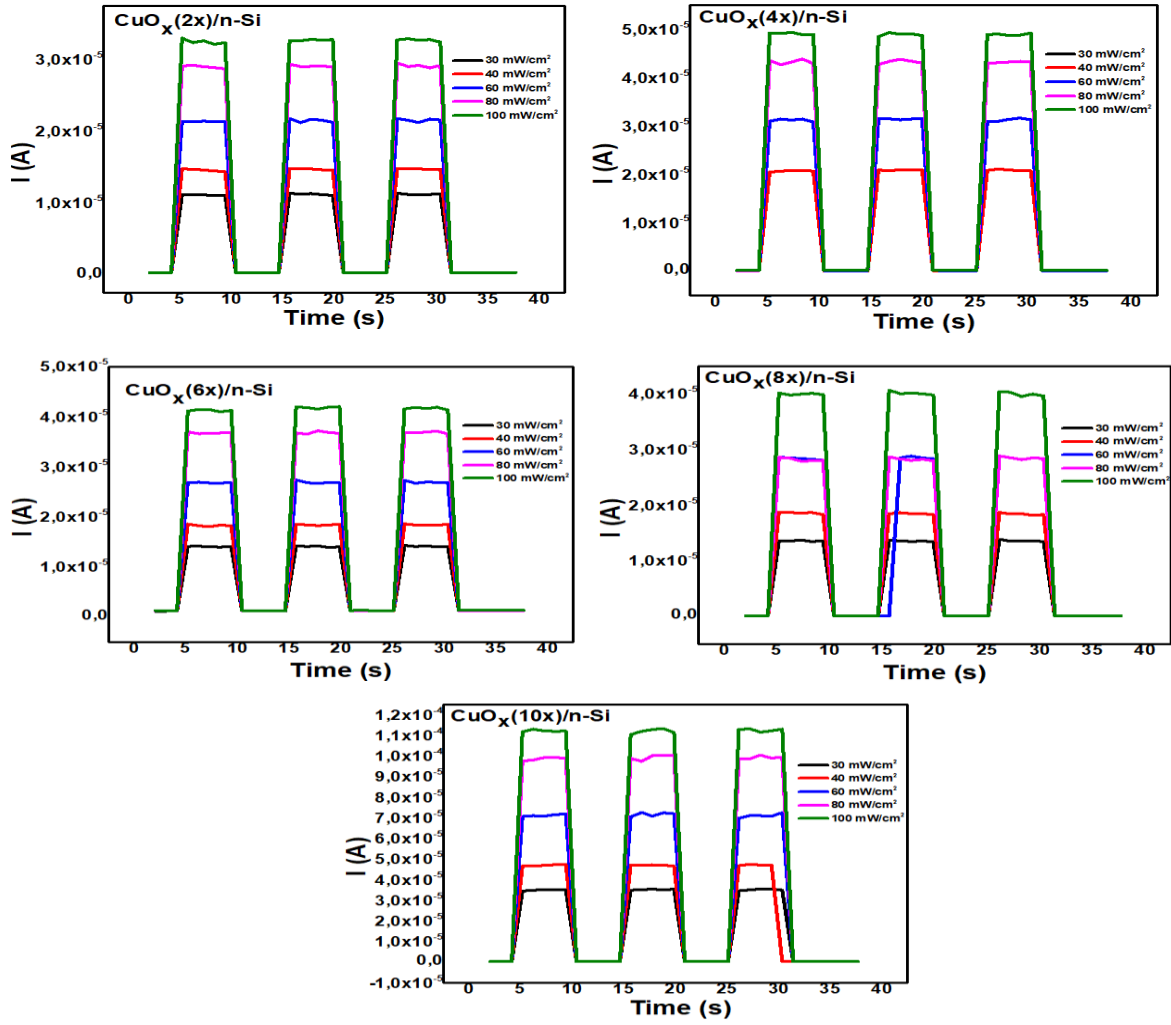
Şekil 4.6'da fotodiyotun seri direncinin uygulanan öngerilim ile değişimini göstermektedir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi, artan frekansla R_s değeri azalmaktadır. R_s 'nin bu davranışı, arayüz yüklerinin frekans bağımlılığından kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.6. Üretilen diyotların, 10kHz-1MHz frekans aralığındaki Direnç-Gerilim (R_s -V) grafikleri

4.7. Üretilen Diyotların Fotoakım-Zaman Karakteristikleri

Geçici fotoakım ölçümleri, fotoiletkenlik mekanizmasını analiz etmek için kullanılır. Şekil 4.7’de fotodiyodun zaman ile fotoakımındaki değişiklikleri görülmektedir. Fotodiyot, fotoakımdaki ani değişim nedeniyle iyi bir fotoiletkenlik davranışı sergiler.



Şekil 4.7. Farklı aydınlatma güçleri altında $\text{CuO} / \text{n-si}$ heteroeklem diyotlarının zamana bağlı foto tepkisi

Aydınlatma açıldıktan sonra fotoakım doygunluk düzeyine ulaşana kadar hızla artmış ve daha sonra sabit kalmıştır. Bu artış, akıma katkıda bulunan serbest yük taşıyıcıları sayısındaki artıştan kaynaklanmaktadır. Aydınlatma kapatıldıktan sonra, fotoakım başlangıç değerine düşmüştür. Bu azalma, yük taşıyıcıların derin seviyelerde hapsolmesinden kaynaklanmaktadır (Dere ve ark., 2017; Moore ve Thompson, 2013; Tataroğlu ve ark., 2016; Yakuphanoglu, 2008).

5.SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1.Sonuçlar

Bu tezin ana amacı farklı kalınlıklara sahip CuO/n-Si heteroeklem yapılarının elektriksel karakterizasyonudur. Bu çalışmada sol jel spin kaplama yöntemi ile bakır oksit ince filmleri n-Si alttaşlar üzerine 2 kat, 4 kat, 6 kat, 8 kat ve 10 kat olacak şekilde kaplandı. Kaplanan bu filmler ile üretilen heteroeklem yapılar karanlık ve farklı ışık şiddetleri altında elektriksel parametreleri incelendi.

Diyotların karanlık ve oda sıcaklığında ± 4 V aralığında akım-gerilim karakteristiklerinin incelenmesi ile bu yapılar için idealite faktörü, bariyer yüksekliği, doyum akımı ve doğrultma oranı gibi temel parametreler hesaplandı. Hesapladığımız bu değerlerin karşılaştırılması ile en iyi kaplama parametrelerini belirlemeyi amaçladık. İdeal diyot davranışının sergilenmesi için idealite faktörünün bir olması gerekirken, üretilen heteroeklem yapıların bu değerden daha yüksek idealite faktörüne sahip olduğunu ve diyotların ideal davranıştan saptığını gösterdi. Bu durum genellikle imaj kuvvet düşüşüne, bariyer homojensizliğine, üretim-rekombinasyon miktarına, doğal oksit tabakasına ve arayüzey kirliliklerine atfedilmektedir. Minimum idealite faktörü 3,05 değeri ise CuO(10x)/n-Si yapısından elde edildi. Farklı ışık şiddetleri altında CuO/n-Si yapıların I-V karakteristikleri incelendi ve tüm yapıların ışığa duyarlı olduğu gözlemlendi. En yüksek fotohassasiyet değeri 3.35×10^3 ile CuO(2x)/n-Si fotodiyotundan elde edildi.

Diyotların diğer önemli bir parametresi olan seri direnç değerleri geleneksel Norde metodu kullanılarak hesaplanmıştır. Norde yöntemi ile karanlık şartlar altında CuO(2x)/n-Si, CuO(4x)/n-Si, CuO(6x)/n-Si, CuO(8x)/n-Si ve CuO(10x)/n-Si heteroeklem yapıları için seri direnç değerleri sırasıyla 10Ω , 10Ω , 3Ω , 11Ω ve 42Ω olarak hesaplanmıştır. I-V grafiklerinde, yüksek gerilim bölgelerinde eğrilerin bükülmesi seri direnç etkisinden kaynaklanmaktadır. Bununla birlikte, diyotların, seri dirençleri ne kadar düşük olursa kalitesi o oranda artmaktadır.

Üretilen heteroeklem yapıların C-V, G-V ve Rs-V ölçümleri 10 kHz'den 1 MHz'e artan frekans aralığında ölçülmüştür. Tüm cihazlar için kapasitans değerleri artan frekans ile azalmıştır. Grafiklerde meydana gelen pikler, arayüz durumlarına ve seri dirence bağlı

olabilirken, daha yüksek frekanslar için piklerdeki azalma, daha yüksek frekanslardaki seri direnç etkisine bağlanabilir çünkü arayüz durumları ac sinyali takip edememektedir. Bununla birlikte yüksek frekanslarda negatif kapasitans değerleri elde edilmiş olup bu durum polarizasyonlara azınlık taşıyıcı enjeksiyonuna atfedilmiştir. Heteroeklem yapıların R_s -V ölçümlerinin artan frekansla azaldığı gözlemlendi. Bu durum hareketli ve sabit oksit yükler gibi sınırlandırılmış arayüz yüklerine atfedildi. Geçici fotoakım ölçümleri, heteroeklem yapıların fotoiletkenlik mekanizmalarını analiz etmek için kullanılmıştır. Tüm fotodiyotların fotoiletkenlik davranışı sergilediği ve ışıqla fotoakımın doygunluk düzeyine ulaşana kadar hızla arttığı ve ışıqlın kapanması ile eski konumuna geri döndüğü gözlemlendi.

5.2. Öneriler

Elde edilen sonuçlar, ürettiğimiz ince filmlerin performanslarının farklı kalınlıktaki CuO ince filmleri ile kontrol edilebileceğini göstererek, üretilen diyotlar elektronik başta olmak üzere birçok alanda kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılacak çalışmalarda hazırlanan çözelti farklı katkı maddeleri kullanılarak elektriksel ve optoelektriksel parametreleri geliştirilebilir. Böylece daha yüksek performanslı cihazlar elde edilebilir.

KAYNAKLAR

- Abdu, Y., ve A. O. Musa. 2009, "Copper (I) Oxide (Cu₂) Based Solar Cells - a Review". *Bayero Journal of Pure and Applied Sciences* 2(2):8-12. doi: 10.4314/bajopas.v2i2.63717
- Akaltun, Yunus. 2015, "Effect of Thickness on the Structural and Optical Properties of CuO Thin Films Grown by Successive Ionic Layer Adsorption and Reaction". *Thin Solid Films* 594:30-34. doi: 10.1016/j.tsf.2015.10.003
- Akkari, F. C., Kanzari, M., & Rezig, B. 2007, Preparation and characterization of obliquely deposited copper oxide thin films. *The European Physical Journal-Applied Physics*, 40(1), 49-54
- Al Orainy, R. H., ve A. A. Hendi. 2014, "Fabrication and Electrical Characterization of CdO/p-Si Photosensors". *Microelectronic Engineering* 127:14-20. doi: 10.1016/j.mee.2014.02.014
- Annathurai, Sridevi, Siva Chidambaram, Balraj Baskaran, ve G. K. D. Prasanna Venkatesan. 2019, "Green Synthesis and Electrical Properties of P-CuO/n-ZnO Heterojunction Diodes". *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials* 29(2):535-40. doi: 10.1007/s10904-018-1026-1
- Balaram, N., V. Rajagopal Reddy, P. R. Sekhar Reddy, V. Janardhanam, ve Chel-Jong Choi. 2018, "Microstructural, Chemical States and Electrical Properties of Au/CuO/n-InP Heterojunction with a Cupric Oxide Interlayer". *Vacuum* 152:15-24. doi: 10.1016/j.vacuum.2018.02.041
- Banerjee, A. N., ve K. K. Chattopadhyay. 2005, "Recent Developments in the Emerging Field of Crystalline P-Type Transparent Conducting Oxide Thin Films". *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials* 50(1):52-105. doi: 10.1016/j.pcrysgrow.2005.10.001
- Bilkan, Çiğdem, Şemsettin Altındal, ve Yashar Azizian-Kalandaragh. 2017, "Investigation of Frequency and Voltage Dependence Surface States and Series Resistance Profiles Using Admittance Measurements in Al/p-Si with Co₃O₄-PVA Interlayer Structures". *Physica B: Condensed Matter* 515:28-33. doi: 10.1016/j.physb.2017.04.002
- Brattain, Walter H. 1951. "The Copper Oxide Rectifier". *Reviews of Modern Physics* 23(3):203-12. doi: 10.1103/RevModPhys.23.203
- Brown, D. B., & Saks, N. S. 1991, Time dependence of radiation-induced interface trap formation in metal-oxide-semiconductor devices as a function of oxide thickness and applied field. *Journal of applied physics*, 70(7), 3734-3747

- Chaudhary, Yatendra S., Anshul Agrawal, Rohit Shrivastav, Vibha R. Satsangi, ve Sahab Dass. 2004, "A Study on the Photoelectrochemical Properties of Copper Oxide Thin Films". *International Journal of Hydrogen Energy* 29(2):131-34. doi: 10.1016/S0360-3199(03)00109-5
- Chen, Aiping, Hua Long, Xiangcheng Li, Yuhua Li, Guang Yang, ve Peixiang Lu. 2009, "Controlled Growth and Characteristics of Single-Phase Cu₂O and CuO Films by Pulsed Laser Deposition". *Vacuum* 83(6):927-30. doi: 10.1016/j.vacuum.2008.10.003
- Chen, Zhangxian, Wanchao Li, Ran Li, Yunfeng Zhang, Guoqin Xu, ve Hansong Cheng. 2013, "Fabrication of Highly Transparent and Conductive Indium–Tin Oxide Thin Films with a High Figure of Merit via Solution Processing". *Langmuir* 29(45):13836-42. doi: 10.1021/la4033282
- Chiang, Chia-Ying, Ming-Hui Chang, Hwai-Shen Liu, Clifford Y. Tai, ve Sheryl Ehrman. 2012, "Process Intensification in the Production of Photocatalysts for Solar Hydrogen Generation". *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51(14):5207-15. doi: 10.1021/ie202522g
- Ching, W. Y., Yong-Nian Xu, ve K. W. Wong. 1989, "Ground-state and optical properties of $\{\mathrm{Cu}\}_2\mathrm{O}$ and CuO crystals". *Physical Review B* 40(11):7684-95. doi: 10.1103/PhysRevB.40.7684
- Courtland, Rachel. 2016, "Transistors could stop shrinking in 2021". *IEEE Spectrum* 53(9):9-11. doi: 10.1109/MSPEC.2016.7551335
- De Carvalho, Adrieli Cristina Vieira, Ariovaldo Denis Granja, ve Vanessa Gomes Da Silva. 2017, "A Systematic Literature Review on Integrative Lean and Sustainability Synergies over a Building's Lifecycle". *Sustainability* 9(7):1156. doi: 10.3390/su9071156
- Deng, Xiaolong, Chenggang Wang, Minghui Shao, Xijin Xu, ve Jinzhao Huang. 2017, "Low-Temperature Solution Synthesis of CuO/Cu₂O Nanostructures for Enhanced Photocatalytic Activity with Added H₂O₂: Synergistic Effect and Mechanism Insight". *RSC Advances* 7(8):4329-38. doi: 10.1039/C6RA27634B
- Dere, A., A. Tataroğlu, Abdullah G. Al-Sehemi, Ahmed A. Al-Ghamdi, F. Farid El-Tantawy, W. A. Farooq, ve F. Yakuphanoglu. 2017, "A Functional Material Based Photodiode for Solar Tracking Systems". *Physica B: Condensed Matter* 520:76-81. doi: 10.1016/j.physb.2017.04.013
- Doğan, Hulya, Nezir Yıldırım, İkrâm Orak, Sezai Elagöz, ve Abdulmecit Turut. 2015, "Capacitance-Conductance-Frequency Characteristics of Au/Ni/n-GaN/Undoped GaN Structures". *Physica B: Condensed Matter* 457:48-53. doi: 10.1016/j.physb.2014.09.033
- Drobny, V. F., ve L. Pulfrey. 1979, "Properties of Reactively-Sputtered Copper Oxide Thin Films". *Thin Solid Films* 61(1):89-98. doi: 10.1016/0040-6090(79)90504-2

- Figueiredo, V. M. L. 2012, Development of copper and nickel based oxide thin-films: Design and fabrication of thin-film transistors (Doctoral dissertation, Universidade NOVA de Lisboa (Portugal))
- Forcade, F., González, B., Snyders, R., Guisbiers, G., Santana, S., & Vigil, E. 2015, CuO/TiO₂ Composite Obtained Using a New and Simple Technique. *Revista Cubana de Física*, 32(2), 90-95
- Forcade, Fresnel, Rony Snyders, Xavier Noirfalise, Bernardo González, Camila Laza, ve Elena Vigil. 2017, “A Simple Technology for CuO/TiO₂ 3D Interface Fabrication Using Nanocrystalline Oxide Powders”. *Semiconductor Science and Technology* 32(3):035019. doi: 10.1088/1361-6641/aa58d4
- Fortunato, E. M. C., P. M. C. Barquinha, A. C. M. B. G. Pimentel, A. M. F. Gonçalves, A. J. S. Marques, L. M. N. Pereira, ve R. F. P. Martins. 2005, “Fully Transparent ZnO Thin-Film Transistor Produced at Room Temperature”. *Advanced Materials* 17(5):590-94. doi: 10.1002/adma.200400368
- Fortunato, E., P. Barquinha, ve R. Martins. 2012, “Oxide Semiconductor Thin-Film Transistors: A Review of Recent Advances”. *Advanced Materials* 24(22):2945-86. doi: 10.1002/adma.201103228
- Gökçen, M., H. Altuntaş, Ş. Altındal, ve S. Özçelik. 2012, “Frequency and Voltage Dependence of Negative Capacitance in Au/SiO₂/n-GaAs Structures”. *Materials Science in Semiconductor Processing* 15(1):41-46. doi: 10.1016/j.mssp.2011.08.001
- Green, Martin A. 1990, “Intrinsic concentration, effective densities of states, and effective mass in silicon”. *Journal of Applied Physics* 67(6):2944-54. doi: 10.1063/1.345414
- Hara, Michikazu, Takeshi Kondo, Mutsuko Komoda, Sigeru Ikeda, Junko N. Kondo, Kazunari Domen, Michikazu Hara, Kiyoaki Shinohara, ve Akira Tanaka. 1998, “Cu₂O as a Photocatalyst for Overall Water Splitting under Visible Light Irradiation”. *Chemical Communications* 0(3):357-58. doi: 10.1039/A707440I
- Hautier, Geoffroy, Anna Miglio, Gerbrand Ceder, Gian-Marco Rignanese, ve Xavier Gonze. 2013, “Identification and Design Principles of Low Hole Effective Mass P-Type Transparent Conducting Oxides”. *Nature Communications* 4(1):2292. doi: 10.1038/ncomms3292
- Heasley, Rachel, Luke M. Davis, Danny Chua, Christina M. Chang, ve Roy G. Gordon. 2018, “Vapor Deposition of Transparent, p-Type Cuprous Iodide Via a Two-Step Conversion Process”. *ACS Applied Energy Materials* 1(12):6953-63. doi: 10.1021/acsam.8b01363
- Hoel, Cathleen A., Thomas O. Mason, Jean-François Gaillard, ve Kenneth R. Poeppelmeier. 2010, “Transparent Conducting Oxides in the ZnO-In₂O₃-SnO₂ System”. *Chemistry of Materials* 22(12):3569-79. doi: 10.1021/cm1004592

- Hosono, Hideo, Toshio Kamiya, ve Masahiro Hirano. 2006, "Function Cultivation of Transparent Oxides Utilizing Built-In Nanostructure". *Bulletin of the Chemical Society of Japan* 79(1):1-24. doi: 10.1246/bcsj.79.1
- Hussain, Sajad, Chuanbao Cao, Waheed S. Khan, Ghulam Nabi, Zahid Usman, Abdul Majid, Thamer Alharbi, Zulfiqar Ali, Faheem K. Butt, Muhammad Tahir, Muhammad Tanveer, ve Faryal Idress. 2014, "Cu₂O/TiO₂ Nanoporous Thin-Film Heterojunctions: Fabrication and Electrical Characterization". *Materials Science in Semiconductor Processing* 25:181-85. doi: 10.1016/j.mssp.2013.11.018
- Ichimura, Masaya, ve Yoshihito Kato. 2013 "Fabrication of TiO₂/Cu₂O Heterojunction Solar Cells by Electrophoretic Deposition and Electrodeposition". *Materials Science in Semiconductor Processing* 16(6):1538-41. doi: 10.1016/j.mssp.2013.05.004
- Jacob, A. P., Xie, R., Sung, M. G., Liebmann, L., Lee, R. T., & Taylor, B. 2017, Scaling challenges for advanced CMOS devices. *International Journal of High Speed Electronics and Systems*, 26(01n02), 1740001
- Janczarek, Marcin, ve Ewa Kowalska. 2017, "On the Origin of Enhanced Photocatalytic Activity of Copper-Modified Titania in the Oxidative Reaction Systems". *Catalysts* 7(11):317. doi: 10.3390/catal7110317
- Johan, M. R., Suan, M. S. M., Hawari, N. L., & Ching, H. A. 2011, Annealing effects on the properties of copper oxide thin films prepared by chemical deposition. *Int. J. Electrochem. Sci*, 6(12), 6094-6104
- Kamruzzaman, M., & Zapien, J. A. 2017, Reduction of schottky barrier height, turn on voltage, leakage current and high responsivity of li doped ZnO nanorod arrays based schottky diode. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 17(7), 5061-5072
- Khan, K. A. 2000, "Stability of a Cu₂O Photoelectrode in an Electrochemical Cell and the Performances of the Photoelectrode Coated with Au and SiO Thin Films". *Applied Energy* 65(1):59-66. doi: 10.1016/S0306-2619(99)00060-4
- Kim, Hong-Sik, Melvin David Kumar, Malkeshkumar Patel, ve Joondong Kim. 2016, "High-Performing ITO/CuO/n-Si Photodetector with Ultrafast Photoresponse". *Sensors and Actuators A: Physical* 252:35-41. doi: 10.1016/j.sna.2016.11.014
- Kirfel, A., ve K. Eichhorn. 1990, "Accurate Structure Analysis with Synchrotron Radiation. The Electron Density in Al₂O₃ and Cu₂O". *Acta Crystallographica Section A: Foundations of Crystallography* 46(4):271-84. doi: 10.1107/S0108767389012596

- Kita, Ryusuke, Kenichi Kawaguchi, Takashi Hase, Takeshi Koga, Rittaporn Itti, ve Tadataka Morishita. 1994, "Effects of Oxygen Ion Energy on the Growth of CuO Films by Molecular Beam Epitaxy Using Mass-Separated Low-Energy O⁺ Beams". *Journal of Materials Research* 9(5):1280-83. doi: 10.1557/JMR.1994.1280
- Koffyberg, F. P., ve F. A. Benko. 1982, "A photoelectrochemical determination of the position of the conduction and valence band edges of p-type CuO". *Journal of Applied Physics* 53(2):1173-77. doi: 10.1063/1.330567
- Korucu, D., A. Turut, R. Turan, ve Ş. Altındal. 2013, "Origin of Forward Bias Capacitance Peak and Intersection Behavior of C and G/w of Ag/p-InP Schottky Barrier Diodes". *Materials Science in Semiconductor Processing* 16(2):344-51. doi: 10.1016/j.mssp.2012.09.015
- Korzhavyi, P. A., ve B. Johansson. 2011, "Literature Review on the Properties of Cuprous Oxide Cu₂O and the Process of Copper Oxidation"
- La Rosa, K. C. 2014, PN heterojunctions for thin film devices. The University of Texas at Dallas
- Lewis, Brian G., ve David C. Paine. 2000. "Applications and Processing of Transparent Conducting Oxides". *MRS Bulletin* 25(8):22-27. doi: 10.1557/mrs2000, 147
- Li, Junqiang, Zengxia Mei, Lishu Liu, Huili Liang, Alexander Azarov, Andrej Kuznetsov, Yaoping Liu, Ailing Ji, Qingbo Meng, ve Xiaolong Du. 2014, "Probing Defects in Nitrogen-Doped Cu₂O". *Scientific Reports* 4(1):7240. doi: 10.1038/srep07240
- Mageshwari, K., ve R. Sathyamoorthy. 2013, "Physical Properties of Nanocrystalline CuO Thin Films Prepared by the SILAR Method". *Materials Science in Semiconductor Processing* 16(2):337-43. doi: 10.1016/j.mssp.2012.09.016
- Markworth, P. R., X. Liu, J. Y. Dai, W. Fan, T. J. Marks, ve R. P. H. Chang. 2001, "Coherent Island Formation of Cu₂O Films Grown by Chemical Vapor Deposition on MgO(110)". *Journal of Materials Research* 16(8):2408-14. doi: 10.1557/JMR.2001.0330
- Matsuzaki, Kosuke, Kenji Nomura, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, ve Hideo Hosono. 2008, "Epitaxial growth of high mobility Cu₂O thin films and application to p-channel thin film transistor". *Applied Physics Letters* 93(20):202107. doi: 10.1063/1.3026539
- Meher, S. R., A. Lakshmanan, Dhritiman Gupta, ve Z. C. Alex. 2021, "N-Type Doping Feasibility of Cu₂O with In and Al for Cost-Effective Photovoltaics: An Ab Initio Investigation". *Materials Today Communications* 26:102015. doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102015

- Meyer, B. K., A. Polity, D. Reppin, M. Becker, P. Hering, P. J. Klar, Th. Sander, C. Reindl, J. Benz, M. Eickhoff, C. Heiliger, M. Heinemann, J. Bläsing, A. Krost, S. Shokovets, C. Müller, ve C. Ronning. 2012, “Binary Copper Oxide Semiconductors: From Materials towards Devices”. *Physica Status Solidi (b)* 249(8):1487-1509. doi: 10.1002/pssb.201248128
- Mittiga, Alberto, Enrico Salza, Francesca Sarto, Mario Tucci, ve Rajaraman Vasanthi. 2006, “Heterojunction solar cell with 2% efficiency based on a Cu₂O substrate”. *Applied Physics Letters* 88(16):163502. doi: 10.1063/1.2194315
- Moore, James C., ve Cody V. Thompson. 2013, “A Phenomenological Model for the Photocurrent Transient Relaxation Observed in ZnO-Based Photodetector Devices”. *Sensors* 13(8):9921-40. doi: 10.3390/s130809921
- Morales, J., L. Sánchez, F. Martín, J. R. Ramos-Barrado, ve M. Sánchez. 2005, “Use of Low-Temperature Nanostructured CuO Thin Films Deposited by Spray-Pyrolysis in Lithium Cells”. *Thin Solid Films* 474(1):133-40. doi: 10.1016/j.tsf.2004.08.071
- Nguyen, M. A., Bedford, N. M., Ren, Y., Zahran, E. M., Goodin, R. C., Chagani, F. F., ... & Knecht, M. R. 2015, Direct synthetic control over the size, composition, and photocatalytic activity of octahedral copper oxide materials: correlation between surface structure and catalytic functionality. *ACS applied materials & interfaces*, 7(24), 13238-13250
- Niu, Chunming. 2011, “Carbon Nanotube Transparent Conducting Films”. *MRS Bulletin* 36(10):766-73. doi: 10.1557/mrs.2011.213
- Ogo, Yoichi, Hidenori Hiramatsu, Kenji Nomura, Hiroshi Yanagi, Toshio Kamiya, Masahiro Hirano, ve Hideo Hosono. 2008, “p-channel thin-film transistor using p-type oxide semiconductor, SnO”. *Applied Physics Letters* 93(3):032113. doi: 10.1063/1.2964197
- Olsen, L. C., F. W. Addis, ve W. Miller. 1982, “Experimental and Theoretical Studies of Cu₂O Solar Cells”. *Solar Cells* 7(3):247-79. doi: 10.1016/0379-6787(82)90050-3
- Olsen, L. C., R. C. Bohara, ve M. W. Urie. 2008, “Explanation for low-efficiency Cu₂O Schottky-barrier solar cells”. *Applied Physics Letters* 93(1):47-49. doi: 10.1063/1.90593
- Özmenteş, Reşit. 2021, “Current-Voltage Characteristics of p-CuO/n-Si Heterojunction for Solar Cell Application”. *Materials Today: Proceedings* 46:7010-14. doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.281
- Padrón, Kenny, Emilio J. Juárez-Pérez, Fresnel Forcade, Rony Snyders, Xavier Noirfalise, Camila Laza, Juan Jiménez, ve Elena Vigil. 2018, “Nanostructured CuO Films Deposited on Fluorine Doped Tin Oxide Conducting Glass with a Facile Technology”. *Thin Solid Films* 660:386-90. doi: 10.1016/j.tsf.2018.06.035

- Pavan, Michele, Sven Rühle, Adam Ginsburg, David A. Keller, Hannah-Noa Barad, Paolo M. Sberna, Daniela Nunes, Rodrigo Martins, Assaf Y. Anderson, Arie Zaban, ve Elvira Fortunato. 2015, "TiO₂/Cu₂O All-Oxide Heterojunction Solar Cells Produced by Spray Pyrolysis". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 132:549-56. doi: 10.1016/j.solmat.2014.10.005
- Rakhshani, A. E. 1986, "Preparation, Characteristics and Photovoltaic Properties of Cuprous Oxide—a Review". *Solid-State Electronics* 29(1):7-17. doi: 10.1016/0038-1101(86)90191-7
- Ray, Sekhar C. 2001, "Preparation of Copper Oxide Thin Film by the Sol–Gel-like Dip Technique and Study of Their Structural and Optical Properties". *Solar Energy Materials and Solar Cells* 68(3):307-12. doi: 10.1016/S0927-0248(00)00364-0
- Resende, Joao Avelas. 2017, "Copper-Based p-Type Semiconducting Oxides : From Materials to Devices". phdthesis, Université Grenoble Alpes ; Université de Liège
- Riordan, Michael, ve Lillian Hoddeson. 2007, "Crystal fire: the invention, development and impact of the transistor". *IEEE Solid-State Circuits Society Newsletter* 12(2):24-29. doi: 10.1109/N-SSC.2007.4785574
- Rokhmat, Mamat, Edy Wibowo, Sutisna, Khairurrijal, ve Mikrajuddin Abdullah. 2017, "Performance Improvement of TiO₂/CuO Solar Cell by Growing Copper Particle Using Fix Current Electroplating Method". *Procedia Engineering* 170:72-77. doi: 10.1016/j.proeng.2017.03.014
- Sawicka-Chudy, P., Ł. Głowa, SZ. Górny, G. Wisz, M. Sibiński, E. Rybak-Wilusz, M. Cholewa, ve P. Potera. 2018, "Numerical Simulation and Analysis of Experimental TiO₂/Cu₂O Thin Film for Photovoltaic Structures". *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* 13(5):715-21. doi: 10.1166/jno.2018.2266
- Sawicka-Chudy, Paulina, Maciej Sibiński, Elżbieta Rybak-Wilusz, Marian Cholewa, Grzegorz Wisz, ve Rostyslav Yavorskyi. 2020, "Review of the development of copper oxides with titanium dioxide thin-film solar cells". *AIP Advances* 10(1):010701. doi: 10.1063/1.5125433
- Sawicka-Chudy, Paulina, Maciej Sibiński, Grzegorz Wisz, Elżbieta Rybak-Wilusz, ve Marian Cholewa. 2018, "Numerical Analysis and Optimization of Cu₂O/TiO₂, CuO/TiO₂, Heterojunction Solar Cells Using SCAPS". *Journal of Physics: Conference Series* 1033(1):012002. doi: 10.1088/1742-6596/1033/1/012002
- Scanlon, David O., ve Graeme W. Watson. 2009, "(Cu₂S₂)(Sr₃Sc₂O₅)—A Layered, Direct Band Gap, p-Type Transparent Conducting Oxychalcogenide: A Theoretical Analysis." *Chemistry of Materials* 21(22):5435-42. doi: 10.1021/cm902260b
- Schroder, Dieter K. 2015, *Semiconductor Material and Device Characterization*. John Wiley & Sons

- Shockley, W. 1949, "The Theory of P-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors". *Bell System Technical Journal* 28(3):435-89. doi: 10.1002/j.1538-7305.1949.tb03645.x
- Sultana, Jenifar, Anindita Das, Avishek Das, Nayan Ranjan Saha, Anupam Karmakar, ve Sanatan 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". *Thin Solid Films* 612:331-36. doi: 10.1016/j.tsf.2016.06.022
- Sze, Simon M., Yiming Li, ve Kwok K. Ng. 2021, *Physics of Semiconductor Devices*. John Wiley & Sons
- Şafak-Asar, Yasemin, Tarık Asar, Şemsettin Altındal, ve Süleyman Özçelik. 2015, "Investigation of Dielectric Relaxation and Ac Electrical Conductivity Using Impedance Spectroscopy Method in (AuZn)/TiO₂/p-GaAs(110) Schottky Barrier Diodes". *Journal of Alloys and Compounds* 628:442-49. doi: 10.1016/j.jallcom.2014.12.170
- Tataroglu, A., R. Ocaya, A. Dere, O. Dayan, Z. Serbetci, Abdullah G. Al-Sehemi, M. Soylu, Ahmed A. Al-Ghamdi, ve F. Yakuphanoglu. 2018, "Ruthenium(II) Complex Based Photodiode for Organic Electronic Applications". *Journal of Electronic Materials* 47(1):828-33. doi: 10.1007/s11664-017-5882-1
- Tataroğlu, A., O. Dayan, N. Özdemir, Z. Serbetci, Ahmed A. Al-Ghamdi, A. Dere, Farid El-Tantawy, ve F. Yakuphanoglu. 2016, "Single Crystal Ruthenium(II) Complex Dye Based Photodiode". *Dyes and Pigments* 132:64-71. doi: 10.1016/j.dyepig.2016.04.044
- Tombak, A., M. Benhaliliba, Y. S. Ocak, ve T. Kiliçoğlu. 2015, "The Novel Transparent Sputtered P-Type CuO Thin Films and Ag/p-CuO/n-Si Schottky Diode Applications". *Results in Physics* 5:314-21. doi: 10.1016/j.rinp.2015.11.001
- Tripathi, Tripurari Sharan, ve Maarit Karppinen. 2017, "Atomic Layer Deposition of P-Type Semiconducting Thin Films: A Review". *Advanced Materials Interfaces* 4(24):1700300. doi: 10.1002/admi.201700300
- Tuan, Thi Tran Anh, Dong-Hau Kuo, Albert Daniel Saragih, ve Guan-Zhang Li. 2017, "Electrical Properties of RF-Sputtered Zn-Doped GaN Films and p-Zn-GaN/n-Si Hetero Junction Diode with Low Leakage Current of 10⁻⁹A and a High Rectification Ratio above 10⁵". *Materials Science and Engineering: B* 222:18-25. doi: 10.1016/j.mseb.2017.04.008

- Tung, Raymond T. 2001, "Recent Advances in Schottky Barrier Concepts". *Materials Science and Engineering: R: Reports* 35(1):1-138. doi: 10.1016/S0927-796X(01)00037-7
- Viet Pham, Thien, Manohar Rao, P. Andreasson, Yuan Peng, Junling Wang, ve K. B. Jinesh. 2013, "Photocarrier generation in Cu_2O thin films deposited by radio frequency sputtering". *Applied Physics Letters* 102(3):032101. doi: 10.1063/1.4788680
- Wright, M. 1966, quoted by FORTIN E. and WEICHMAN FL. *Can. J. Phys*, 44, 1551
- Xosrovashvili, G., & Gorji, N. E. 2013, Numerical analysis of $\text{TiO}_2/\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ nanostructured PV using SCAPS-1D. *Journal of Modern Optics*, 60(11), 936-940
- Xu, Y., & Schoonen, M. A. 2000, The absolute energy positions of conduction and valence bands of selected semiconducting minerals. *American mineralogist*, 85(3-4), 543-556
- Yakuphanoglu, Fahrettin. 2008, "Photovoltaic Properties of the Organic-Inorganic Photodiode Based on Polymer and Fullerene Blend for Optical Sensors". *Sensors and Actuators A: Physical* 141(2):383-89. doi: 10.1016/j.sna.2007.10.023
- Yıldırım, Murat, ve Adem Kocyigit. 2018, "Characterization of $\text{Al}/\text{In}:\text{ZnO}/\text{p-Si}$ Photodiodes for Various In Doped Level to ZnO Interfacial Layers". *Journal of Alloys and Compounds* 768:1064-75. doi: 10.1016/j.jallcom.2018.07.295
- Yoon, Ki Hyun, Woo Jin Choi, ve Dong Heon Kang. 2000, "Photoelectrochemical Properties of Copper Oxide Thin Films Coated on an N-Si Substrate". *Thin Solid Films* 372(1):250-56. doi: 10.1016/S0040-6090(00)01058-0
- Yu, H., Yu, J., Liu, S., & Mann, S. 2007, Template-free hydrothermal synthesis of $\text{CuO}/\text{Cu}_2\text{O}$ composite hollow microspheres. *Chemistry of materials*, 19(17), 4327-4334
- Zhu, Le. t.y. "Development of Metal Oxide Solar Cells through Numerical Modelling"

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ahmet DURMAZ
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

<u>Derece Adı</u>	<u>İl</u>	<u>Okul</u>	<u>Fakülte/Yüksekokul</u>	<u>Bitirme Yılı</u>
Lise	Adana	Turgut Özal Anadolu Lisesi		2004
Üniversite	Mersin	Mersin Üniversitesi	Fen ve Edebiyat/Fizik Bölümü	2014
Yüksek Lisans	Batman	Batman Üniversitesi	Fen Bilimleri Enstitüsü/Fizik Ana Bilim Dalı	Devam ediyor

İŞ DENEYİMLERİ

<u>Yıl</u>	<u>Kurum</u>	<u>Görev</u>
2018-2022	Batman Kozluk Şehit Soner Fazlıoğlu Çok Programlı Anadolu Lisesi	Fizik Öğretmeni
2017-2020	Batman Merkez Mehmet Şimşek Anadolu Lisesi	Fizik Öğretmeni