

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENERJİ SİSTEMLERİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FARKLI YÖNTEMLERLE OLUŞTURULMUŞ n-CdS/p-Cu₂S
GÜNEŞ PİLLERİNİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ

Melih MANIR

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU
JÜRİ ÜYELERİ
Prof. Dr. Murat TOMAKİN
Doç. Dr. İsmail POLAT

RİZE-2020
Her Hakkı Saklıdır

T.C.
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

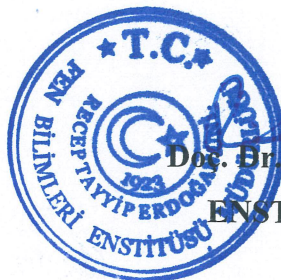
**FARKLI YÖNTEMLERLE OLUŞTURULMUŞ n-CdS/p-Cu₂S GÜNEŞ
PİLLERİNİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında, Melih MANIR tarafından hazırlanan bu çalışma Enstitü Yönetim Kurulu kararı ile oluşturulan jüri tarafından 26/03/2020 tarihinde Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı Soyadı
Başkan	: Prof. Dr. Murat TOMAKİN
Üye	: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU
Üye	: Doç. Dr. İsmail POLAT

İmza

U. Tomakin
H. Vagif
I. Ismail



Doç. Dr. Ferhat KALAYCI
ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, tek kristal CdS temelinde n-CdS/p-Cu₂S güneş pilleri, soğuk altlık yöntemi (200 K), klasik vakum buharlaştırma yöntemi (300 K) ve kimyasal yöntem olmak üzere üç farklı yöntem ile üretildi ve karakteristik özellikleri incelendi. Elde edilen güneş pili örneklerinin fotovoltaiik parametrelerindeki değişimler 12 hafta süre ile takip edildi. FESEM görüntüleri 200 K altlık sıcaklığında gerçekleşen buharlaşma sürecinde CdS yüzeyinin nano boyutlu Cu kümeleri ile kaplandığını gösterdi. Oluşturulan güneş pillerinin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumları incelendi ve 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin daha geniş dalga boylarında fotovoltaiik değerler ürettiği tespit edildi. Bununla birlikte n-CdS/p-Cu₂S güneş pili örneklerinin I-V ve C-V ölçümleri yapıldı ve elde edilen sonuçlar kıyaslandı.

Bu çalışmanın bu noktaya gelmesinde emeği geçen ve bana her konuda yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU'na en içten dileklerimle teşekkür ederim. Deneysel ve teorik olarak yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Prof. Dr. Murat TOMAKİN'e çok teşekkür ederim. Ayrıca bugüne kadar bana her türlü desteğini esirgemeyen anneme ve babama çok teşekkür ederim.

Melih MANIR

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan “Farklı Yöntemlerle Oluşturulmuş n-CdS/p-Cu₂S Güneş Pillerinin Karakteristik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu tezi, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim.

26/03/2020



Melih MANIR

***Uyarı:** Bu tezde kullanılan özgün ve/veya başka kaynaklardan sunulan içeriğin kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.*

ÖZET

FARKLI YÖNTEMLERLE OLUŞTURULMUŞ n-CdS/p-Cu₂S GÜNEŞ PİLLERİNİN KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Melih MANIR

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi
Danışmanı: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

Bu çalışmanın ilk aşamasında, güneş pilinde temel katman olarak kullanılan tek kristal CdS malzemesinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Daha sonra soğuk altlık yöntemi (200 K), klasik vakum buharlaştırma yöntemi (300 K) ve kimyasal daldırma yöntemi kullanılarak CdS/Cu ikili yapılar elde edildi. FESEM görüntüleri 200 K altlık sıcaklığında kaplanan CdS yüzeyinin eşit boyutlu Cu nano kümelerle kaplandığını gösterdi. CdS/Cu ikili yapılarda heteroeklem oluşumu hava ortamında 180 °C’de 10 dakika süreyle ısıtıl işlem uygulanarak gerçekleştirildi. İncelenen n-CdS/p-Cu₂S güneş pili örneklerinde çalışma alanının tespiti için dalga boyuna göre duyarlılık spektrumu ölçüldü. Elde edilen sonuçlar 200 K altlık sıcaklığında üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin daha geniş dalga boyu aralığında fotovoltaiik değerler ürettiğini gösterdi. 200 K altlık sıcaklığında Cu₂S fazının etkili oluşumunun tavlama ile Cu katmanında meydana gelen yüzey plazmon rezonans olayından kaynaklandığı düşünüldü. n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin haftalık olarak karanlık ve aydınlık ortamda (93 mW/cm²) I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. I-V ölçümlerinden açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç (P_{max}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) hesabı yapıldı. C-V ölçümlerinden ise verici yoğunluğu (N_d) ve eklem engel potansiyeli (V_{bi}) hesaplandı.

2020, 82 sayfa

Anahtar Kelimeler: CdS, Soğuk Altlık, Difüzyon, Güneş Pili.

ABSTRACT

THE INVESTIGATION OF CHARACTERISTIC PROPERTIES OF n-Cds/p-Cu₂S SOLAR CELLS CREATED BY DIFFERENT METHODS

Melih MANIR

**Recep Tayyip Erdogan University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Energy Systems Engineering
Master Thesis
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU**

In the first stage of this study, the structural, electrical and optical properties of the single crystal CdS material used as a base layer in the solar cell were examined. Then, CdS/Cu binary structures were obtained using the cold substrate method (200 K), classical vacuum evaporation method (300 K) and chemical immersion method. FESEM images showed that the CdS surface coated at a 200 K substrate temperature was coated with equal sized Cu nano clusters. Heterojunction formation in CdS/Cu binary structures was performed by heat treatment 180 °C for 10 minutes in the air ambient. For the detected n-CdS/p-Cu₂S solar cell samples, the sensitivity spectrum according to the wavelength was measured to determine the working area. The results obtained showed that the n-CdS/p-Cu₂S solar cell produced at 200 K substrate temperature produces photovoltaic values in the wider wavelength range. The effective formation of the Cu₂S phase at 200 K substrate temperature was thought to be caused by superficial plasmon resonance event occurring in Cu layer by annealing. I-V and C-V measurements of the n-CdS/p-Cu₂S solar cell were performed weekly in dark and illumination ambient (93 mW/cm²). Open circuit voltage (V_{OC}), short circuit current (I_{SC}), maximum power (P_{max}), filling factor (FF) and efficiency (η) were calculated from I-V measurements. From the C-V measurements, donor density (N_d) and junction barrier potential (V_{bi}) were calculated.

2020, 82 pages

Keywords: CdS, Cold Substrate, Diffusion, Solar Cell.

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
TABLolar DİZİNİ	IX
SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ	X
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Literatür Özeti.....	2
1.3. Kuramsal Temeller	8
1.3.1. Yarıiletkenler	8
1.3.1.1. Yarıiletken Türleri	9
1.3.1.1.1. Katkısız (Saf) Yarıiletkenler	9
1.3.1.1.2. Katkılı Yarıiletkenler	13
1.3.1.2. A_2B_6 Bileşik Yarıiletkenleri.....	16
1.3.1.3. Yarıiletkenlerin Band Yapısı	17
1.3.1.4. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik	18
1.3.2. Hall Olayı.....	19
1.3.3. Yarıiletken İnce Film Üretim Yöntemleri	22
1.3.3.1. Fiziksel Buhar Biriktirme	22
1.3.3.2. Vakumlu Termal Buharlaştırma Yöntemi	23
1.3.3.3. Soğuk Altık Yöntemi.....	23
1.3.4. CdS ve Cu_2S Yapılarının Özellikleri	26
1.3.5. CdS/ Cu_2S Güneş Pilleri	29
1.4. Analiz Sistemleri.....	31
1.4.1. X-Işını Kırınımı	31
1.4.2. Optik Spektrofotometre	32
1.4.3. Fotoluminesans Spektroskopisi	32
1.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Kimyasal Bileşim Analizi	33

1.4.5.	Van der Pauw Öz direnç Ölçme Yöntemi	33
1.4.6.	Hall Katsayısı Ölçümü	35
1.4.7.	p-n Eklem Kapasitansı	37
1.5.	Yüzey Plazmon Rezonans (SPR) Olayı	39
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	40
2.1.	CdS Altlıkların Hazırlanması	40
2.2.	Kimyasal Yöntem ile Cu Kaplama	44
2.3.	Soğuk Altlık ve Klasik Vakum Buharlaştırma Yöntemi ile Cu Kaplama	44
2.4.	n-CdS/p-Cu ₂ S Güneş Pillerinin Karakterizasyonu	48
3.	BULGULAR	49
3.1.	CdS Altlık Malzemesinin X-Işını Kırınımı (XRD) Analiz Sonuçları	49
3.2.	Optik Özelliklerin İncelenmesi	50
3.3.	Fotoluminesans Ölçümleri	51
3.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri ve Kimyasal Bileşim Analizi Sonuçları	52
3.5.	Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi	54
3.5.1.	Akım-Gerilim Ölçümleri	54
3.5.2.	Kapasitans-Gerilim Ölçümleri	66
4.	TARTIŞMA ve SONUÇLAR	71
5.	ÖNERİLER	74
	KAYNAKLAR	75
	ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.	Bir yarıiletkenin sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bandlarının şematik gösterimi	10
Şekil 2.	İki boyutta germanyum kristalinde artan sıcaklıktan dolayı kristalde hareket edebilen elektron oluşması	10
Şekil 3.	Germanyum kristalinde uygulanan bir dış elektrik alandan dolayı kristalde hareket edebilen elektron ve buna eşlik eden boşluğun oluşması	11
Şekil 4.	Katkısız bir yarıiletkenin iletkenlik ve valans bantlarında hal yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi	12
Şekil 5.	Silisyum kristalinde arsenik safsızlık atomu	14
Şekil 6.	Silisyumda bor safsızlık atomu	15
Şekil 7.	Bir E_d verici seviyesinden, iletkenlik bandına bir elektronun atlaması	15
Şekil 8.	Bir elektronun valans bandından bir E_a alıcı seviyesine atlaması	16
Şekil 9.	İletkenlik bandı, valans bandı ve enerji bandı aralığı	17
Şekil 10.	Hall olayının şematik gösterimi	21
Şekil 11.	Vakumlu termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi	23
Şekil 12.	Soğuk altlık düzeneğinin şematik görünümü	25
Şekil 13.	CdS'de iki çeşit yapı: (a) hekzagonal (wurtzite) kristal yapı; (b) kübik (zinc blende) yapı (kırmızı top: Cd ve yeşil top: S)	28
Şekil 14.	Cu_2S/CdS heteroeklem enerji band diyagramı	30
Şekil 15.	X-ışını kırınımını ve Bragg Yasasını gösteren şematik çizim	31
Şekil 16.	Van der Pauw öz direnç ölçüm düzeneği	34
Şekil 17.	R_A ve R_B karakterizasyonun belirlenmesinde kullanılan Van der Pauw konfigürasyonunun şeması	35
Şekil 18.	Hassas kesme makinası	40
Şekil 19.	Tek kristal CdS altlıkların hazırlanması	40
Şekil 20.	Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi	41
Şekil 21.	SpektraMax M5 UV-Vis. spektrofotometresi	42
Şekil 22.	DONGWOO OPTRON spektrofotometre deney düzeneği	43
Şekil 23.	JEOL marka JSM-6510 model taramalı elektron mikroskobu	43
Şekil 24.	Kullanılan kimyasal yöntem	44
Şekil 25.	Soğuk altlık yöntemi ve klasik vakum buharlaştırma yönteminde kullanılan cihaz	45
Şekil 26.	Cu kaplı cam ve CdS yüzeyinin görüntüsü	46

Şekil 27. Tavlama işleminde kullanılan ısıtıcı cihaz	46
Şekil 28. Üretilen n-CdS/p-Cu ₂ S güneş pilinin şematik modeli.....	47
Şekil 29. Omik kontak davranışının I-V grafiği ile tespiti	47
Şekil 30. Zeiss Sigma 300 FESEM cihazı	48
Şekil 31. Elektrokimyasal ölçüm cihazı ve güneş simülatörü	48
Şekil 32. Tek kristal CdS'in X-ışını kırınım deseni	49
Şekil 33. Tek kristal CdS'in optik geçirgenlik grafiği.....	50
Şekil 34. Tek kristal CdS için $(\alpha h\nu)^2$ nin foton enerjisine göre değişim grafiği.....	51
Şekil 35. Tek kristal CdS'in fotoluminesans grafiği	52
Şekil 36. Tek kristal CdS'in SEM görüntüsü	52
Şekil 37. Tek kristal CdS'in EDX analiz grafiği	53
Şekil 38. Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen Cu ince filmin FESEM görüntüsü a) 300 K ve b) 200 K.....	53
Şekil 39. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait karanlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	55
Şekil 40. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait doğru besleme yarı logaritmik I-V karakteristik grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	57
Şekil 41. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin idealite faktörünün haftalık değişimi a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	61
Şekil 42. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait aydınlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	62
Şekil 43. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin maksimum gücünün haftalık değişim grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	65
Şekil 44. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin veriminin haftalık değişim grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K.....	65
Şekil 45. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait C-V grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K. 66	66
Şekil 46. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait 1000 Hz sabit frekansta ölçülmüş $1/C^2$ -V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K	67
Şekil 47. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen 180°C'de 10 dakika tavlanmış n-CdS/p-Cu ₂ S güneş pillerinin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumları a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K	70

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin oda sıcaklığındaki özdirenç değerleri.....	8
Tablo 2. Yaygın olarak kullanılan yarıiletkenler için band aralığı değerleri	9
Tablo 3. Bazı A_2B_6 bileşikleri için band aralığı değerleri, kristal yapı (W=Wurtzite, ZB=Zincblende) ve sıcaklık katsayısı (sıcaklığın fonksiyonu olarak band aralığı enerjisinin değişim oranı).....	17
Tablo 4. İnce film üretim yöntemleri	22
Tablo 5. CdS'nin 300 K'deki bazı özelliklerinin değerleri	27
Tablo 6. Güneş pillerine ait n , ϕ_b ve I_0 değerleri	60
Tablo 7. Güneş pillerinin bazı elektriksel parametrelerinin değerleri.....	64
Tablo 8. Güneş pillerine ait V_{bi} ve N_d değerleri	69

SEMBOLLER ve KISALTMALAR DİZİNİ

A	Alan
C	Kapasitans
CdS	Kadmiyum Sülfür
Cu	Bakır
Cu ₂ S	Bakır (II) Sülfür
d	Kalınlık
D	Tane Boyutu
E _g	Enerji Bant Aralığı
E _c	İletim Bandı Alt Enerji Seviyesi
E _v	Değerlik Bandı Üst Enerji Seviyesi
E _F	Fermi Enerji Seviyesi
FF	Doldurma Faktörü
f	Frekans
FESEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
I	Akım
I _{sc}	Kısa Devre Akımı
I ₀	Ters Doyma Akımı
J	Akım Yoğunluğu
K	Boltzmann Sabiti
m_e^*	Elektron Etkin Kütlesi
m_h^*	Boşluk Etkin Kütlesi
n	Diyot İdealite Faktörü
N _d	Verici Yoğunluğu
N _a	Alıcı Yoğunluğu
N _{cv}	Kapasitans Ölçümlerinden Elde Edilen Katkı Yoğunluğu
PVD	Fiziksel Buhar Biriktirme
P _m	Maksimum Güç
P _{in}	Giriş Gücü
R	Direnç
R _s	Seri Direnç

SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SPR	Yüzey Plazmon Rezonans
V	Gerilim
V _{oc}	Açık Devre Gerilimi
V _{bi}	Eklem Engel Potansiyeli
q	Elektron Yüğü
XRD	X-Işını Kırınımı
χ	Elektron Çekiciliğı
λ	Dalga Boyu
θ	Bragg Açısı
α	Optik Soğurma Katsayısı
ρ	Özdirenç
ϵ	Dielektrik Sabiti

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Dünyamızda enerji talebi gün geçtikçe muazzam bir şekilde artmaktadır. Bu nedenle araştırmalar çevre dostu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımı konusuna yoğunlaşmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında güneş enerjisi önemli bir potansiyele sahiptir. Ülkemizde, Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlasına (GEPA) göre, yıllık toplam güneşlenme süresi 2741 saat (günlük ortalama 7,5 saat), yıllık dünyamıza gelen toplam güneş enerjisi 1527 kWh/m².yıl (günlük ortalama 4,18 kWh/m².gün) olduğu tespit edilmiştir. 2018 yılında işletmedeki güneş enerjisi santral sayısı 5868 adete ulaşmıştır. Bu santrallerin kurulu gücü, 4981,2 MW'ı lisanssız, 81,8 MW'da lisanslı olmak üzere toplamda 5063 MW'a ulaşmıştır (URL-1). Ülkemizde güneş enerjisinin toplam elektrik üretimi içerisindeki payı da 7477,3 GWh ile %2,5'a yükselmiştir. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de güneş enerjisine olan ilgi giderek artmaktadır. Bu bağlamda araştırmacılar güneş pilleri üzerine yoğunlaşmışlardır. Güneş pillerinde görülen en büyük sorun maliyetlerinin yanında zamanla verimlerinin düşmesidir.

Son 40 yıldır, güneş pillerinin geliştirilmesi konusundaki çabalar, p-n heteroeklem özelliğine sahip CdS/Cu₂S güneş pilleri üzerine daha fazla yoğunlaşmıştır. Kadmiyum sülfür-bakır (II) sülfür (n-CdS/p-Cu₂S) güneş pilleri ilk olarak 1954 yılında üretilmiştir. Ancak uzun ömürlü olmalarını engelleyen bazı sorunlar nedeniyle ticari olarak üretilenmemiştir. Bu sorunlar n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerindeki Cu₂S bileşiğindeki bakırın, bulunduğu ortamdaki oksijen ile reaksiyona girerek oksitlenmesi ve bakırın CdS katmanına difüzyonudur. Bu pillerin verimleri teorik olarak %24 olmasına karşılık, uygulamada %10 ile %15 arasında değişmektedir. Olumsuzluklarına rağmen geçtiğimiz 20 yılda, CdS/Cu₂S güneş pilleri, kolay üretim ve düşük maliyet nedeniyle en umut verici güneş enerjisi dönüşüm cihazlarından birisi olmuştur. CdS/Cu₂S güneş pillerinde CdS 2,42 eV enerji band aralığına ve Cu₂S 1,2 eV enerji band aralığına sahiptir. Güneş ışığının doğası göz önüne alındığında, Cu₂S katmanının, fotoakımının üretiminden sorumlu olduğu bilinmektedir (Boz, 2011).

Yapılan bu çalışmada ilk önce tek kristal CdS malzemesinin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri incelendi. Daha sonra kimyasal daldırma yöntemi, klasik vakum buharlaştırma yöntemi (300 K) ve soğuk altlık yöntemi (200 K) kullanılarak CdS/Cu ikili yapısı oluşturuldu. Elde edilen bu ikili yapılar hava ortamında 180 °C’de 10 dakika süre ile tavlansınarak n-CdS/p-Cu₂S heteroeklemi meydana getirildi. Üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin çalışma alanlarının tespiti için duyarlılık spektrumunun dalga boyuna göre dağılımı ölçüldü. n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin 12 hafta boyunca I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. I-V ölçümlerinden açık devre gerilimi (V_{oc}), kısa devre akımı (I_{sc}), maksimum güç (P_{max}), doldurma faktörü (FF) ve verim (η) hesabı yapıldı. C-V ölçümlerinden verici yoğunluğu (N_d) ve eklem engel potansiyeli (V_{bi}) hesaplandı.

1.2. Literatür Özeti

Gill ve Bube (1970), I-V karakteristikleri, eklem kapasitansı ve spektral tepki ölçümlerini kullanarak ısıtıl işleminden önce ve sonra CdS/Cu₂S heteroeklemlerin fotovoltaiik özelliklerini incelemiştir. Isıtıl işleminden sonra foto tepkideki yavaş geçişler ve ikincil aydınlatmanın etkileri gözlemlenmiştir. Zayıf özelliklere sahip birçok hücre, genel olarak, ısıtıl işleminden sonra gelişmiş I-V özellikleri göstermiştir. Bu ısıtıl işlem, CdS/Cu₂S heteroekleminde yüksek oranda dengelenmiş CdS’de dar bölgenin oluşumunu gösteren, eklem kapasitansının azalmasına yol açmıştır.

Lepley vd. (1979), vakum buharlaştırma yöntemi kullanılarak üretilen CdS/Cu₂S heteroeklem yapısında Cu’ın CdS katmanına difüzyon sürecini incelemiştir. 120 gün boyunca yaptıkları C-V ölçümlerinde verici yoğunluğunun azaldığını ve eklem engel potansiyelinin arttığını gözlemlemiştir.

Mukhopadhyay ve Saha (1981) yaptıkları çalışmada, sinterlenmiş CdS/Cu₂S güneş pilinin hem başlangıç performansının hem de bozulmasının, sinterlenmiş CdS katmanının kontrollü tavlansından sonra önemli ölçüde iyileştğini gözlemlemiştir. Tavlama sırasında hava, argon ve vakum (10^{-5} Torr) ortamlarının CdS tabakasının mikro yapısına, öz direnç değerine ve CdS/Cu₂S güneş pilinin ilk fotovoltaiik performansına ve bozulma hızına etkileri araştırılmıştır. Vakum ortamında tavlamanın en iyi sonuçları verdiği görülmüştür.

Islam ve Haque (1982) tarafından yapılan çalışmada, ince film CdS/Cu₂S heteroeklem güneş pilleri, altın kaplamalı cam altlıklar üzerinde vakum buharlaştırma

yöntemi ile üretilmiştir. Güneş pilleri, ilk önce bakır ve sülfürün buharlaştırılması ve daha sonra CdS'nin buharlaştırılması yoluyla altın kaplamalı cam altlıklar üzerinde üretilmiştir. Cu₂S katmanı ve kontaklar böylece cam altlık ve CdS katmanı arasında sandviç haline getirilmiş hava ve nem ile temas etmeleri engellenmiştir. Yapılan ölçümlerden açık devre gerilimleri 450-470 mV ve kısa devre akım yoğunlukları 14-16 mA.cm⁻² bulunmuştur. Hücre verimleri %4,8 ile %5 arasında bulunmuştur. Hücrelerin bozulması en aza indirilmiş ve hücrelerin stabil olduğu görülmüştür.

Bryant vd. (1983), yaptıkları çalışmada, CdS/Cu₂S ince film güneş pillerinin üretimi sonrası tavlama sırasında bakır difüzyonunu Auger elektron spektroskopisi ile incelemiştir. Konsantrasyonların derinlik profilleri, havada tavlama numuneleri için, kadmiyum sülfür tabakasına bakırın derin nüfuz etmesinin, belirgin bir kadmiyum difüzyonu ile birlikte meydana geldiğini göstermiştir. Buna karşılık, vakum veya hidrojen ortamında tavlama işleminde bakırın nüfuz etmesi önemli ölçüde azalmıştır.

Novruzov (1987), tarafından yapılan çalışmada tek kristal CdS'in Cu_{2-x}S fazı ile temas yüzeyini sodyum atomları ile katkılandırarak Cu₂S'ten CdS'e difüz etmiş düğümler arası pozitif yüklü bakır iyonları ile negatif yüklü Cd boşlukları arasında düşük hareketli [Cu_i⁺-V_{Cd}⁻] kusur yapıları elde edilmiştir. Bu kusur yapılarının bakır atomları için durdurucu elektriksel alan oluşturduğu görülmüştür. Heteroeklemin fotoelektrik parametreleri 60 günde %20 bozulurken kontrol örnekte %70 bozulduğu tespit edilmiştir.

Pathan vd. (2002) yaptıkları çalışmada, Cu₂S ince filmleri, oda sıcaklığında kimyasal yöntem kullanarak cam altlıklar üzerine oluşturmuşlardır. Yaklaşık 0,44 µm kalınlığında Cu₂S filmler elde edilmiştir. XRD, SEM ve HRTEM çalışmaları, filmlerin nanokristal olduğunu göstermiştir. Optik çalışmalardan doğrudan bant boşluğu 2,35 eV olarak bulunmuştur. Oda sıcaklığındaki elektriksel direnç değeri 102 Ω.cm olarak bulunmuştur. Filmlerin p tipi elektriksel iletkenlik gösterdiği görülmüştür.

Ashour (2006) tarafından, CdS/Cu₂S heteroeklem yapısı, cam altlık üzerinde vakum buharlaştırma tekniği kullanılarak üretilmiş ve karakterize edilmiştir. Cu₂S katmanı kuru yöntemle elde edilmiş ve ardından ısıtılma tabi tutulmuştur. CdS/Cu₂S heteroeklem hücrelerinin I-V karakteristiklerinden, kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), doldurma faktörü (FF) ve verimi (η) hesaplanmıştır. CdS filminin, alt-tabakaya dik c-ekseninin tercih edilen yönelimine sahip hekzagonal (wurtzite) yapıda olduğu görülmüştür. Film 0,5 µm'de optik bir absorpsiyon kenarı sergilemiş ve taşıyıcı konsantrasyonunun 10²¹ m⁻³ ve mobilitenin 5x10⁻⁴ m²v⁻¹s⁻¹ olduğu görülmüştür. Film,

1,22 eV'de bir absorpsiyon kenarı sergilemiştir. Güneş pili verimi %7,2 olarak bulunmuştur.

Sam vd. (2010) yaptıkları çalışmada, katmanlı CdS/Cu₂S fotovoltaiik p-n eklemleri basit ve tekrar üretilebilir bir yolla imal edebilmeyi başarmışlardır. CdS iç katmanı, ITO altlığı üzerinde farklı sürelerde kimyasal banyo biriktirme işlemi kullanılarak büyütülmüştür. Kullanılan banyo, sırasıyla 0,05 M ve 0,07 M'lik konsantrasyonlara sahip kadmiyum sülfür ve tiyoüre içermektedir. 600 dakika boyunca büyütülen CdS katmanının, yaklaşık 500 nm'lik bir kalınlığa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, CdS iç tabakalarının bant aralığı enerjisi, tabakanın kalınlığına bağlı olarak 2,4 eV olarak ölçülmüştür. Cu₂S dış tabakası, CdS üzerinde, iyon değişimli kimyasal yolla, bakır klorür sulu çözeltisinden oluşan bir banyoda oluşturulmuştur. p-n eklemlerin üretim aşamaları sırasında kadmiyum sülfür ve bakır sülfür fazlarının oluşumunu karakterize etmek için EDS, XRD ve XPS analizleri yapılmıştır. Nano katmanlı hücrede, her biri 200-250 nm kalınlığındaki her kat, 2,22 eV'lik bir görünür bant boşluğuna sahip olduğu görülmüştür. Hem iç hem de dış katmanların SEM görüntülemesi, CdS ve Cu₂S katmanlarının düzgünlüğünü ve homojenliğini doğrulamıştır.

Kassim vd. (2011) tarafından, Cu₂S ince filmler, 55 °C ile 75 °C arasındaki çeşitli banyo sıcaklıklarında kimyasal banyo biriktirme tekniği ile üretilmiştir. Kimyasal banyoda biriken ince filmler için, Cu²⁺ kaynağı olarak bakır sülfat çözeltisi kullanılırken, tiyoüre çözeltisi S²⁻ iyonlarını sağlamıştır. Morfolojik ve optik özellikler, taramalı elektron mikroskobu, enerji dağılımlı X-ışını analizi ve UV-görünür spektrofotometresi kullanılarak incelenmiştir. Banyo sıcaklığı 55 °C'den 75 °C'ye yükseltildiğinde tane büyüklüğü ve Cu/S ortalama atom oranı artmış ve Cu/S'nin ortalama atom oranı 2:1'e yükselmiştir. 75 °C'de biriktirilen filmler, diğer banyo sıcaklıklarına kıyasla yüksek absorbans göstermiştir.

Htun (2011), yaptığı çalışmada, Cu₂S/CdS güneş pili üretmek için buharlaştırma yöntemi ve elektro kaplama yöntemlerini kullanılmıştır. Cam altlık üzerinde düşük öz dirençli CdS filmi elde edilmiştir. Elektrolizle kaplanmış yüzeye gümüş kontak konulmuştur. CdS/Cu₂S heteroekleminin elektriksel ve optik özellikleri incelenmiştir. Fotovoltaiik etki, görülebilir bölgedeki farklı dalga boyları için çeşitli ışık şiddeti altında gözlemlenmiştir. Farklı ışık yoğunluklarına göre değişen fotogerilim ve fotoakım olduğu görülmüştür. Düşük dirençli bir CdS filmi ve Cu₂S tabakası oluşumunun, yüksek verimli bir hücre elde edilmesinde büyük rol oynadığı sonucuna varılmıştır. Maksimum

verimlilik %1,67 olarak bulunmuştur.

Rafea vd. (2012) tarafından yapılan çalışmada, Cu₂S nanokristal filmler kimyasal banyo tekniği kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan filmlerin yapısal özellikleri, sırasıyla enerji dağıtıcı X-ışını spektroskopisi (EDX) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Büyütülen Cu₂S filminin yüzey morfolojisi, hem taramalı elektron mikroskobu (SEM) hem de atomik kuvvet mikroskobu (AFM) kullanılarak incelenmiştir. SEM ve AFM görüntüleri, hazırlanan Cu₂S filmlerinin, nano ölçekte küre benzeri şekilli agregalar ile iyi dağılmış ve oldukça yoğun bir şekilde karakterize edildiğini göstermiştir. Optik absorpsiyon ölçümleri, Cu₂S nano parçacıklarının 2,92 eV'lik bir doğrudan bant boşluğuna sahip olduğunu göstermiştir. Karanlık ortamda elektriksel direnç ölçümleri 312-440 K aralığında farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilmiştir. Bu sonuçlar hazırlanan Cu₂S filmlerinin yarı iletken karakteristiği gösterdiğini doğrulamıştır. Ayrıca, bu sıcaklık aralıklarında iki egemen iletim mekanizmasının varlığını gösteren iki aktivasyon enerjisi elde edilmiştir. n-ZnCdS/p-Cu₂S heteroeklem yapısı iyi doğrultma özelliği göstermiştir.

Taur vd. (2012), tarafından nano yapıları CdS/Cu₂S heteroeklem güneş pilleri, CdS ince filmlerinin Cu iyon çözeltisine oda sıcaklığında batırılması ile basit kimyasal iyon değişim reaksiyonuyla büyütülmüştür. Nano yapıları ince filmler, heteroeklem ara yüzünü ve kristallliğini geliştirmek için hava ortamında 250 °C'de tavlansmıştır. 100 mW/cm² ışık kaynağı ile aydınlatılmış numunelerdeki dönüşüm verimliliği tavlansmış numunede $\eta=0,24$ iken tavlansmamış numunede ise $\eta=0,09$ elde edilmiştir. X-ışını kırınımı (XRD) deseni, tavlama işleminde kristalit büyüklüğünde 29 nm'den 32 nm'ye yükselen kristallikte iyileşme olduğunu göstermiştir. Tavlama işleminden sonra enerji bant aralığı değerleri $E_g=2,02-2,20$ eV arasında olduğu görülmüştür.

Saraf (2012), yaptığı çalışmada Cu₂S ve CdS nano parçacıkları kimyasal yöntemle hazırlamış, UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi ve X-ışını kırınımı analizini kullanılarak karakterize etmiştir. CdS/Cu₂S ince filmi Spin Coating tekniği kullanılarak üretilmiştir. 4,4 eV enerji band aralığına sahip CdS ve 2,65 eV enerji band aralığına sahip Cu₂S ile CdS/Cu₂S güneş pilleri oluşturulmuştur. CdS/Cu₂S ince film güneş pilinden %10,9 verim elde edilmiştir. Doldurma faktörü (FF) %73, açık devre gerilimi (V_{oc}) 0,58 V ve kısa devre akımı (I_{sc}) 5,8 mA olarak ölçülmüştür.

Kırmızıgül vd. (2013) tarafından, kimyasal banyo biriktirme tekniği kullanılarak Cu₂S ince filmler farklı biriktirme sıcaklıklarında ve farklı sürelerde üretilmiştir. X ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), enerji dağılımlı X ışını analizi

(EDX), Hall etkisi ölçümü ve UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi sonuçları hem biriktirme sıcaklığının hem de sürenin önemli olduğunu göstermiştir. XRD, polikristalin Cu₂S ince filmlerinin monoklinik yapıya sahip olduğunu göstermiştir. İnce filmin EDX analiz sonuçları Cu/S'in atom oranının 2:1'e yaklaştığını göstermiştir. Hall etkisi ölçümünden, dirençliliğin $4,59 \times 10^{-3}$ - $13,8 \times 10^{-3}$ ($\Omega \cdot \text{cm}$) arasında değiştiği tespit edilmiştir. p-tipi iletkenliğe sahip Cu₂S ince filmlerinin mobilite değerleri, $15,16 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ ile $134,6 \text{ cm}^2/\text{V.s.}$ arasında değişmiştir. Karanlık ortamda elektriksel direnç ölçümleri, 303-423 K sıcaklık aralığında yapılmıştır. UV-Vis absorpsiyon spektroskopisi (Ultraviyole/görünür) kullanılarak, doğrudan ve dolaylı olarak izin verilen optik bant aralığı değerlerinin sırasıyla 2,16 eV-2,37 eV ve 1,79 eV-1,99 eV arasında olduğu görülmüştür. 60 °C'de 180 dakikada elde edilen Cu₂S ince filmin, en iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür.

Ramya ve Ganesan (2013) tarafından, Cu₂S ince filmler, farklı kalınlıklarda ve tavlama sıcaklıklarında, vakumlu buharlaştırma yöntemiyle cam altlık üzerine biriktirilmiştir. XRD çalışması, Cu₂S filminin faz dönüşümünün daha fazla kalınlıkta gerçekleştiğini ortaya koymuştur. Optik ve rezistivite çalışması, yüksek sıcaklıkta tavlандıklarında filmin Cu₂S'den CuS'ye faz dönüşümünü göstermiştir. SEM görüntüleri, tavllanmış filmlerde büyük boyutlu taneciklerinin kaybolduğunu göstermiştir.

Gaubas vd. (2013), CdS/Cu₂S heteroeklem yapısının standart akım-gerilim (I-V), kapasitans-gerilim (C-V) ile doğrusal olarak artan darbeli gerilim tekniğini kullanarak bariyer incelemesini yapmışlardır. Kapasitans özelliklerinin ölçülmesi ile farklı katkı yoğunluklu ve taşıyıcı yakalama merkezli 3 farklı heteroeklem olduğu görülmüştür. Bu üç tip yapıda X-ışını kırınım analizi kullanılarak farklı Cu_xS çökeltileri tespit edilmiştir. Film biriktirme sıcaklığının ve süresinin, CdS katmanına bakır difüzyonunu önlemek, serbest taşıyıcı yoğunluğunu arttırmak ve derin rekombinasyon yoğunluğunu azaltmak için optimize edilmesi gerektiği görülmüştür. Karanlıkta ölçülen C-V karakteristikleri, uygulanan ters gerilimden neredeyse bağımsız olarak kapasitans değerini göstermiştir. Böyle bir C-V davranışı, birleşme bölgesi tabanının tamamen tükenmesine ve dolayısı ile düşük yoğunluklu taşıyıcılara işaret etmiştir. Sabit ortam aydınlatmasında, derin tuzakların foto-iyonlaşması ve buna bağlı olarak nötr bölgede serbest taşıyıcı yoğunluğunun arttığı görülmüştür. Film biriktirme süresinin ve altlık sıcaklığının artırılması ile Cu difüzyonunun arttığı görülmüştür.

Mohammed ve Al-Tikriti (2015) yaptıkları çalışmada, yüksek verimli CdS/Cu₂S güneş pillerinin geliştirilmesinde önemli ilerleme sağlamışlardır. CdS/Cu₂S güneş pili

dört ana katman şeklinde üretilmiş ve bir cam alt tabakaya yerleştirilmiştir. CdS filmi kızılötesi bölgede yüksek derecede geçirgenlik ve yaklaşık 0,5 μm dalga boyunda keskin absorpsiyon göstermiştir. Cu₂S filmlerinin geçirgenlik eğrileri, yakın kızılötesi bölgedeki iletimi azaltmış ve 0,7 μm dalga boyunda maksimum geçirgenlik değerine sahip olduğu görülmüştür. CdS/Cu₂S filmleri için spektral tepki ölçümleri ışığın temel olarak Cu₂S katmanı tarafından emildiğini kanıtlamıştır. 100 °C'de 20 dakika tavlanan örnek maksimum fotojenlenmiş akım vermiştir. Tavlama, numunelerin açık devre gerilimini (V_{oc}) iyileştirmiştir. Hücre verimliliğinin artmasının nedeni, çok ince bir bakır tabakasının biriktirilmesi ve ardından kalkosit fazının oluşumunun sağlanması için 200 °C'de 5 dakika boyunca ilave ısı işlem yapılmasıdır. Cu₂S katmanının kalınlığı değiştirilerek iyileştirmeler yapılmıştır. 0,5 ile 0,8 μm dalga boyları arasındaki kademeli geçişlerde en yüksek verime sahip olduğu görülmüştür. 5 μm kalınlıklarda %80'den fazla verimlilik tespit edilmiştir. Cu₂S katmanlarının birkaç mikron (2-5 μm) kalınlıkta seçiminin sebebi budur.

İsmail vd. (2019) tarafından, kimyasal banyo biriktirme tekniği kullanılarak Cu₂S/Si fotodetektör üretilmiştir. Biriktirme süresinin, nanoyapılı Cu₂S filminin yapısal, elektriksel ve optik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. XRD verileri, 30 dakikada biriktirilen filmin şekilsiz olduğunu, $t_d > 30$ dakikada büyütülen filmlerin doğada monoklinik kalosit fazı ile kristalli olduğunu göstermiştir. Kırılma tepe genişliği, biriktirme süresinin artmasıyla azalmıştır. Daha uzun sürede biriktirilen filmlerin daha düşük optik geçirgenliğe sahip olduğu görülmüştür. Birikme süresi 30 dakikadan 90 dakikaya yükseltildiğinde optik enerji aralığı 2,8'den 2,65 eV'a düşmüştür. 50 dakikada hazırlanan fotodetektörün karanlık I-V özelliklerinin en iyi özelliklere sahip olduğu görülmüştür. $t > 30$ dakika içinde biriktirilen fotodetektörler iyi doğrusalık özellikleri sergilemiştir. Karanlık ve aydınlatma koşullarında p-Cu₂S/n-Si fotodetektörlerin akım-gerilim özellikleri incelenmiştir. Üretilen fotodetektörler, 450 ve 850 nm'de bulunan iki tepkime tepesi ile (400-900) nm spektral tepkiye sahiptir. Maksimum duyarlılık 450 nm'de 0,43 AW^{-1} ve 800 nm'de 0,58 AW^{-1} olmuştur. Azınlık taşıyıcı ömrü ve fotodetektörün birikme süresi ile difüzyon uzunluğu arasındaki korelasyon gösterilmiştir.

Lu vd. (2019), yaptıkları çalışmada, Ga katkılı kadmiyum sülfür (CdS) nano çubukları kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile büyütmüştür. CdS nano çubukların taşıyıcı iletkenlikleri, Ga'nın dahil edilmesinden sonra artış göstermiştir. Ayrıca, CdS nano çubukların iletkenlikleri, Ga kaynağının miktarının artırılması üzerine artmıştır. En

iyi performans gösteren CdS/Cu₂S nano çubuk yapılı fotovoltaiik cihazın kısa devre akımı, açık devre gerilimi, doldurma faktörü ve güç dönüşüm verimliliği, güneş ışığı altında sırasıyla 0,152 nA, 0,245 V, %44,5 ve %0,405 olarak hesaplanmıştır.

1.3. Kuramsal Temeller

1.3.1. Yarıiletkenler

Katı cisimler elektriksel özellikleri açısından üçe ayrılmaktadır. Bunlar, iletkenler ($\rho = 10^{-6}$ - $10^{-4} \Omega.cm$), yalıtkanlar ($\rho \geq 10^{10} \Omega.cm$) ve yarıiletkenler ($\rho = 10^{-4}$ - $10^{10} \Omega.cm$)' dir. İletkenler elektriksel aygıtlarda akımın kolayca iletilmesinden sorumludur. Yalıtkanlar ise kullanıcıların bu aygıtlardan yararlanırken akıma kapılmaması için kullanılmaktadır. Yarıiletkenler ise elektronik teknolojisinde aygıt üretiminde kullanılmaktadır. Genelde yarıiletkenler düşük sıcaklıklarda ya da karanlıkta yalıtkan davranışı gösterip, sıcaklığın artmasıyla, üzerine belirli bir frekansta ışık düşürülmesi, bir elektrik alanına sokulması sonucunda iletkenine yakın davranan gereçlerdir (Akat, 2012). Yaygın olarak kullanılan malzemelerin oda sıcaklığındaki öz dirençleri Tablo 1 'de verildi.

Tablo 1. Yaygın olarak kullanılan malzemelerin oda sıcaklığındaki öz direnç değerleri (Köksal ve Köseoğlu, 2015)

Malzeme	Özdirenç ($\Omega.m$)
Kuartz	10^{13}
Cam	10^{12}
Elmas	10^{11}
Saf Silisyum	10^3
Saf Germanyum	10^{-1}
Kurşun, Demir	10^{-7}
Bakır, Gümüş	10^{-3}

Günümüzde Si ve Ge çok kullanılan elementsel yarıiletkenlerdir. Bunlar sp^3 bağları yaparlar. Birçok bileşik yarıiletkenler, Si ve Ge ile aynı elektronik yapıya sahip ve aynı tip bağlanma gösterir. IV. Grup elementlerini içeren SiC ve III. ile V. grup elementlerini içeren GaAs veya II. ve VI. grup elementlerini içeren CdSe bunun örnekleridir. Genel olarak kullanılan malzemenin band aralığı, 3 eV'den küçükse yarıiletken, 3 eV'den büyük ise yalıtkan olarak düşünülmektedir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yarıiletken ve yalıtkan malzemelerin band aralık değerleri Tablo 2'de verildi.

Tablo 2. Yaygın olarak kullanılan yarıiletkenler için band aralığı değerleri (Köksal ve Köseoğlu, 2015)

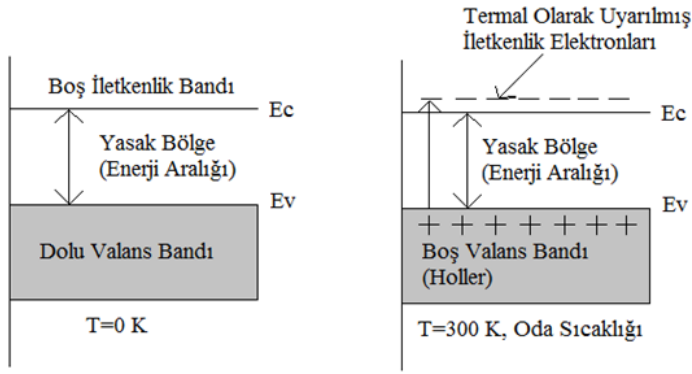
Malzeme	Band Aralığı (eV)
InSb	0,18
InAs	0,36
Ge	0,67
Si	1,11
GaAs	1,43
CdSe	1,74
SiC	2,30

1.3.1.1.Yarıiletken Türleri

Yarıiletkenler katkı durumuna göre katkısız (saf) yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Saf yarıiletkenlerde mutlak sıfırda (0 K) değerlik bandı tamamen dolu ve iletkenlik bandı ise tamamen boştur. Katkılı yarıiletkenler ise içlerine belirli oranlarda katkı maddesi (fosfor ve arsenik) eklenerek elde edilmektedir. Yarıiletkenlerin iletkenlikleri çok küçük miktardaki safsızlıklardan önemli derecede etkilenir. Bu safsızlıkların konsantrasyonun tam kontrolü, yarıiletken aygıtların üretiminde önemli rol oynamaktadır.

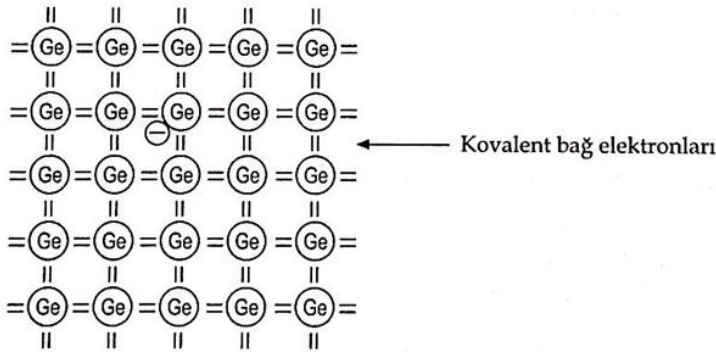
1.3.1.1.1. Katkısız (Saf) Yarıiletkenler

Bir yarıiletken, mutlak sıfırda (0 K) tamamen dolu değerlik bandı ve bu dolu banddan yasak enerji aralığı ile ayrılmış tamamen boş bir iletim bandına sahip kristal bir malzemedir. Bandların yapısı Şekil 1’de gösterildi. Mutlak sıfırda yarıiletken malzeme mükemmel bir yalıtkan gibi davranır, çünkü kısmen dolu bandlar yoktur. Bandlar ya tamamen dolu ya da tamamen boştur. Ancak daha yüksek sıcaklıklarda elektronların bazıları valans bandından yasak enerji aralığını aşabilecek kadar enerji kazanarak, boş olan iletkenlik bandına geçebilirler. Bu elektronlar elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Bu elektronların daha düşük enerji bandı olan valans bandında bıraktıkları boşluklar iletkenliğe katkıda bulunurlar. Elektronların ve boşlukların sayıları artan sıcaklıkla artacağı için sıcaklık arttıkça iletkenliğin de artacağı açıktır (Aydoğan, 2011).



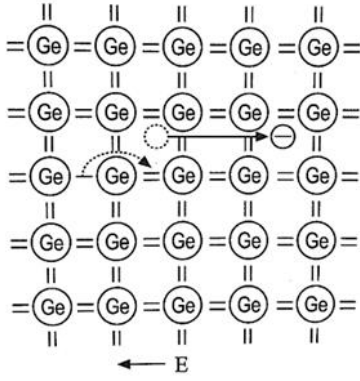
Şekil 1. Bir yarıiletkende sıfır Kelvin ve oda sıcaklığında valans ve iletkenlik bandlarının şematik gösterimi

Bir elektronun valans bandından iletkenlik bandına termal olarak uyarılması bir örgüdeki kovalent bağ çiftinden bir elektronun uzaklaşması anlamına gelir. Bu durumda elektron artık kovalent bağın dışında serbest bir elektron olur ve kristal boyunca bir yük taşıyıcısı rolü üstlenir. Kovalent bağ elektronlarının germanyum yarıiletkeninde iki boyutlu hali Şekil 2’de görülmektedir.



Şekil 2. İki boyutta germanyum kristalinde artan sıcaklıktan dolayı kristalde hareket edebilen elektron oluşması

Uyarılan bir elektron, kristalde kovalent bağda yerel bir kusur oluşmasına neden olur. Bu kusur bir elektronla doldurulabilir, ancak boştur. Hem elektronlar hem de boşluklar kristal yapıda hareket edebilme özelliğine sahiptir. Kristal yapıdaki serbest bir elektron kristalden alacağı termal enerji ile kristal içinde rastgele hareket edebilir. Benzer şekilde bir boşlukta kristalde hareket edebilir. Çünkü kovalent bağı terk eden elektronlardan birinin yerine komşu elektronlardan biri bağı tamamlamak için geçebilir. Bu durumda da son bahsettiğimiz elektronun boşalttığı yerde boşluk oluşur. Böylece boşlukta elektrona göre zıt yönde hareket etmiş olur. Bu durum Şekil 3’de gösterildi.



Şekil 3. Germanyum kristalinde uygulanan bir dış elektrik alandan dolayı kristalde hareket edebilen elektron ve buna eşlik eden boşluğun oluşması

Burada hem iletkenlik hem de valans bandındaki yani kristaldeki tüm elektronlar bir $-eE$ kuvvetine maruz kalırlar. Serbest elektronlar sağ tarafa doğru hareket ederek sola doğru akıma neden olurlar. Bundan başka bir boşluğa komşu olan kovalent bağ çiftindeki bir elektron sağdaki boş bir elektron boşluğuna hareket edebilir. Böylece boşlukta bu elektronun geldiği yere geçerek sola doğru hareket etmiş olur. Bu hareketler tekrarlanır. Sonuçta bir elektronun sağa, ona eşlik eden boşluğunda sola doğru hareketi gerçekleşir. Sağa doğru net elektron akışı tekrar sola doğru geleneksel akıma neden olur. Böylece geleneksel akım yönü pozitif yüklü parçacıklar yönünde olmuş olur. Böylece akım akışı hem serbest elektronların hareketinden hem de valans elektronlarının valans bandındaki boşluklara hareketinden kaynaklanır.

Katkısız bir yarıiletkende boşlukların ve elektronların sayıları istatistiki olarak Fermi-Dirac dağılım fonksiyonu ile belirlenir iken bandlardakiler ise hal yoğunluğu fonksiyonları kavramı ile belirlenir. İletkenlik bandının tabanı ve valans bandının tepesi enerjinin k' dalga vektörüne bağlılığı açısından parabolik bir değişim gösterdiği için bu bölgelerdeki elektronlar ve boşlukların davranışları uygun etkin kütle davranışlarına sahip serbest parçacıkların davranışına sahiptirler. Elektronlar ve boşluklar iletkenlik ve valans bandı içinde serbest parçacık davranışından farklı davranış gösterdiklerinde uyarılmaları çok nadirdir. Bu yüzden pratik amaçlar için bu tür uyarılmalar ihmal edilebilir. O zaman bu tür serbest parçacıklar için hal yoğunluğu fonksiyonları kullanılır (Aydoğan, 2011). İletkenlik bandındaki hal yoğunluğu;

$$N_C(E)dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m_n^{*3/2}}{h^3} \sqrt{E - E_C} dE \quad (E > E_C) \quad (1)$$

ile ifade edilir. Valans bandındaki hal yoğunluğu ise,

$$N_V(E)dE = \frac{8\sqrt{2}\pi m_p^{*3/2}}{h^3} \sqrt{E_V - E} dE \quad (E < E_V) \quad (2)$$

ile ifade edilir.

Burada m_n^* iletkenlik bandındaki elektronlar için etkin kütle, m_p^* ise valans bandındaki boşluklar için etkin kütledir. Doğal olarak $E_V < E < E_C$ yasak bölgesinde hal yoğunlukları sıfırdır (Aydoğan, 2011). Katkısız bir yarıiletken için hal yoğunluğu grafiği Şekil 4’de gösterildi.



Şekil 4. Katkısız bir yarıiletkende iletkenlik ve valans bantlarında hal yoğunluğunun enerjiye bağlı değişimi

m_n^* ve m_p^* birbirine eşit olduğunda Fermi enerji seviyesi yasak enerji aralığının tam ortasında olacaktır.

Bir yarıiletkende elektronların ve boşlukların çoğu yarıiletkenin kendi atomlarından kaynaklanıyor ise bu tür yarıiletkenlere asal yarıiletken denir. Bu durumda bir elektron valans bandından iletkenlik bandına geçebilecek kadar yeterli enerjiyi alırsa, bu elektron valans bandında bir boşluk bırakır. Böylece valans bandındaki her boşluk iletkenlik bandındaki bir elektrona eşlik eder ve iletkenlik bandındaki elektronların sayısı, valans bandındaki boşlukların sayısına tam olarak eşittir. Burada, $p = n = n_i$ şeklindedir. Buradaki n_i asal taşıyıcı sayısı olarak adlandırılır ve

$$n_i = N_C \exp \left[-\frac{E_C - E_i}{kT} \right] = N_V \exp \left[-\frac{E_F - E_V}{kT} \right] \quad (3)$$

denkleminde elde edilir. Burada N_C iletkenlik ve N_V valans bandındaki hal yoğunluğudur.

Diğer bir ifadeyle bir yarıiletkende boşluklar ve elektronlar sadece termal uyarılma ile oluşturuluyorsa bu yarıiletkenlere asal yarıiletkenler denir. Bu şekilde oluşan boşluklar ve elektronlar asal yük taşıyıcıları, bu tür taşıyıcılar ile oluşan iletkenlik ise bazen asal iletkenlik olarak adlandırılır. Katkısız bir yarıiletkende elektronların ve boşlukların sayıları daima eşittir. Çünkü ancak bir elektron termal olarak uyarılırsa bir boşluğun oluşmasına neden olur.

Fermi enerji seviyesi;

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} + \frac{3}{4} kT \ln \left(\frac{m_p^*}{m_n^*} \right) \equiv E_i \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir. Elektron ve boşluk etkin kütleleri birbirine eşit olursa,

$$E_F = \frac{E_C + E_V}{2} = E_i \quad (5)$$

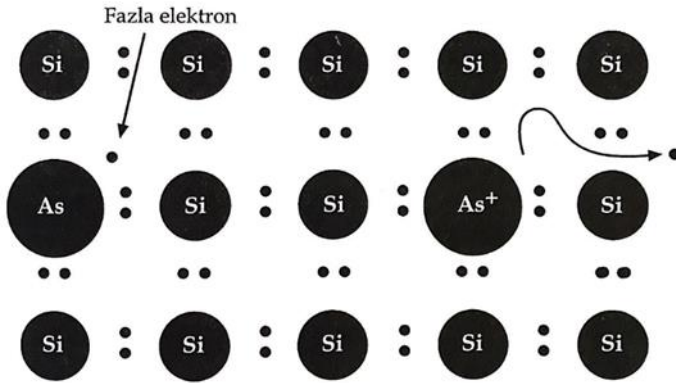
şeklinde ifade edilir.

Burada E_i katkısız enerji seviyesi olarak adlandırılır. 300 K sıcaklıkta silisyum için değeri $1,45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 'tür (Aydoğan, 2011).

1.3.1.1.2. Katkılı Yarıiletkenler

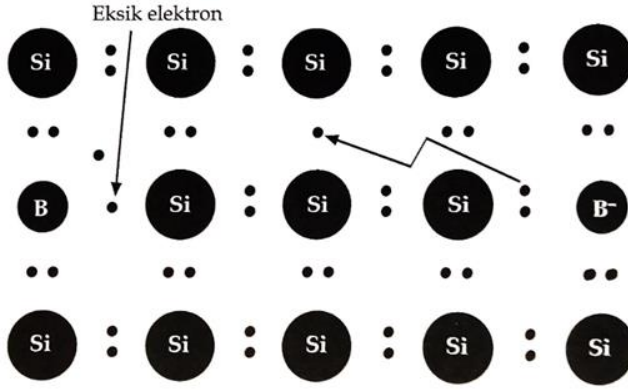
Yarıiletken aygıt teknolojisinde kullanılan silisyumun saflık seviyesi %99,99'dur. Ancak bilinçli olarak periyodik tabloda silisyuma yakın olan III. grup elementlerinden bor veya V. grup elementlerinden fosfor veya arsenik gibi elementlerden az miktarda katılabilir. Bu elementlerden arsenik katıldığında, bu atom örgüde bir tane silisyum atomunun yerini alır. Beş tane valans elektronuna sahip bu arsenik atomu dört tane elektronunu komşu silisyum atomu ile dörtlü bağ yapacak şekilde paylaşır. Oda sıcaklığında kristalin termal enerjisi arseniğin zayıfça bağlı beşinci elektronunu bu atomun elektron kabuğundan uzaklaştırmaya yeter. Dolayısı ile bu elektron kristalin iletkenlik bandına çıkarak hareket etmek için serbest olur. Silisyumdaki arsenik atomları

kristale elektron verdikleri için verici atomları olarak adlandırılır. Elektron ise elektriksel iletkenliğe katkıda bulunabilir. Verici atomlarının kristaldeki yerleşimi ve bağ yapısına etkisi Şekil 5’de gösterildi. Şekilde solda fazla kalan elektron ve sağda da kristalde serbestçe hareket edebilen katkı atomunun elektronu görülmektedir. Elektron hareket edebilir, ancak katkı atomu hareket edemez.



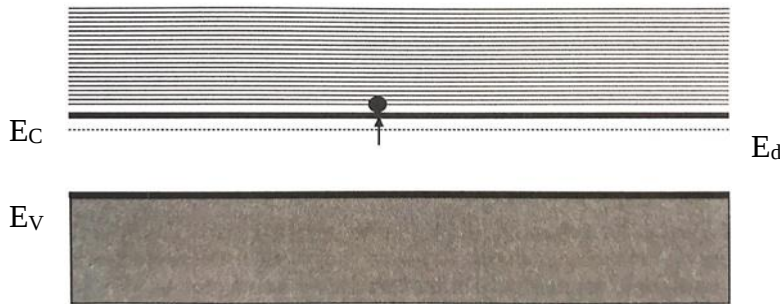
Şekil 5. Silisyum kristalinde arsenik safsızlık atomu

Silisyuma periyodik tablonun üçüncü grubundan bor gibi bir element katıldığında, bu kez de yapıya katılan üçüncü grup elementin atomu bir tane silisyum atomunun yerine geçecek ve kararlı yapı oluşabilmesi için komşu silisyumdan bir tane elektron alacaktır. Bu bor atomu negatif yüklü hareketsiz bir atom olacaktır. Bor atomu komşu silisyumlardan birinden elektron aldığı için asıl örgü atomu olan silisyumda da elektron boşluğu veya eksikliği meydana gelecektir. Bu durum kristalin valans bandında bir boşluk oluşturur. Bu boşlukta kristal içinde hareket etme kabiliyetine sahip olduğu için elektriksel iletkenliğe katkıda bulunur. Kristale katılarak asıl kristal atomlarından elektron alan atomlara alıcı atomları denilir. Bu katkılama miktarı oldukça düşüktür. Kristale katılarak elektron veren veya kristal atomlarından elektro alan atomlara katkı atomları veya safsızlık atomları adı verilir. III. grup elementinin kristaldeki etkisi Şekil 6’da gösterildi.



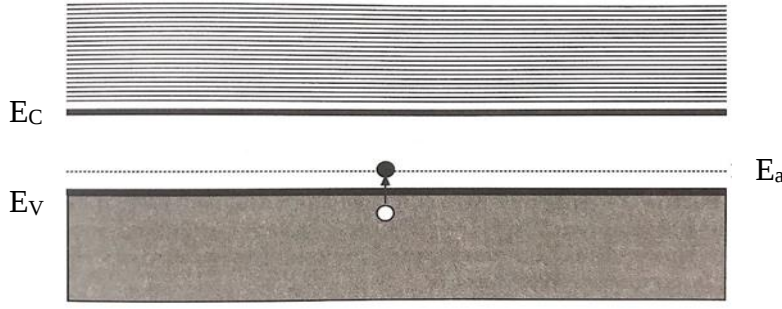
Şekil 6. Silisyumda bor safsızlık atomu

Kristal yapıya fosfor veya arsenik gibi verici atomlarının katılması, kristalin yasak enerji aralığında Şekil 7’de gösterilen tarzda bir enerji seviyesinin (E_d) oluşmasına neden olur. Bu seviye, iletkenlik bandının birkaç meV altında yer alır ve çok düşük sıcaklıklarda kristale yabancı veya safsızlık atomları tarafından verilebilen elektronları ihtiva eder. Oda sıcaklığında bu elektronlar safsızlık atomlarından kurtulabilmek için serbest olabilecek kadar termal enerjiye ($kT/q = 25,6$ meV) sahiptirler ve serbest kalabilirler.



Şekil 7. Bir E_d verici seviyesinden, iletkenlik bandına bir elektronun atlaması

Bor gibi alıcı atomların katılması silisyumun yasak enerji aralığında bir enerji seviyesinin oluşmasına neden olur. Bu seviye valans bandının birkaç meV üzerinde yer alır. Oda sıcaklığında valans bandının tepesinde yer alan elektronlar katkı veya safsızlık atomlarını oluşturduğu bu seviyeye çıkabilecek kadar termal enerjiye sahiptirler. Diğer bir ifade ile valans elektronları katkı atomları tarafından yakalanır. Bu durumun sonucunda valans bandında boşluk oluşur. Bu boşluklar kristalde serbestçe hareket edebilme kabiliyetine sahiptirler. Bir elektron bir alıcı atomu tarafından yakalandığında kristalde bir boşluk oluşur ve alıcı atomu (bor) negatif yüklü iyon olur ve negatif yük taşır. Bir elektronun valans bandından bir E_a alıcı seviyesine atlaması Şekil 8’de gösterildi.



Şekil 8. Bir elektronun valans bandından bir E_a alıcı seviyesine atlaması

Verici tipi safsızlık atomu ihtiva eden bir yarıiletken n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Çünkü bu tip yarıiletkenlerde yük taşıyıcılarının çoğu negatif yük taşırlar. Alıcı tipi safsızlık ihtiva eden yarıiletkenlerde ise yük taşıyıcılarının çoğu pozitif yük taşıdıkları için bu tip yarıiletkenlere de p-tipi yarıiletken denir. Verici ve alıcı atomlarının konsantrasyonları sırasıyla N_d ve N_a ile gösterilir. Genellikle birimi cm^{-3} tür.

1.3.1.2. A_2B_6 Bileşik Yarıiletkenleri

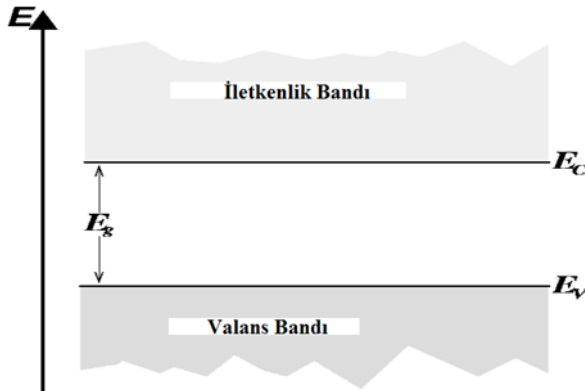
Optoelektronik aygıt teknolojilerinde en çok A_2B_6 yarıiletken grubuna ait malzemeler kullanılmaktadır. A_2B_6 bileşiklerinin ilginç özelliklerinden biri; optoelektronik uygulamalar için uygun olan direkt (doğrudan) enerji aralıklarının (HgTe ve HgSe yarı metalleri haricinde) olmasıdır. Bu aygıtlara örnek olarak foto diyotları, güneş pillerini, plazmon özellikli nano lazerleri ve kızılötesi fotodedektörleri verebiliriz. A_2B_6 grubu, aynı zamanda bir yarı-metalik bileşik çifti yarıiletkenleri de içerirler. Örneğin 1,6 eV'luk bir band aralığına sahip CdTe yarıiletken iken, HgTe bir yarı-metaldir. Tablo 3'de A_2B_6 bileşik yarıiletkenlerinden en çok kullanılanlara ait, enerji band aralığı değerleri, kristal yapıları ve sıcaklığın fonksiyonu olarak enerji band aralığı değerlerinin değişim oranları verildi.

Tablo 3. Bazı A_2B_6 bileşikleri için band aralığı değerleri, kristal yapı (W = Wurtzite, ZB = Zincblende) ve sıcaklık katsayısı (sıcaklığın fonksiyonu olarak band aralığı enerjisinin değişim oranı)

Bileşik	E_g (eV)/Kristal Yapı	dE_g/dt (10^{-4} eV/K)
ZnO	3,44/W	-9,5
ZnS	3,91/W,3,84/ZB	-8,5/-4,6
CdS	2,58/W	-5,2
HgS	2,10/ZB	-9,0
ZnSe	2,80/W,2,83/ZB	-8,0
CdSe	1,84/W	-4,6
ZnTe	2,39/ZB	-5,0
CdTe	1,60/ZB	-2,3

1.3.1.3. Yarıiletkenlerin Band Yapısı

Moraro (2016), enerji band aralığını (E_g), valans bandı (E_v) ile iletkenlik bandı (E_c) arasındaki enerji farkı olarak Şekil 9'da gösterildiği gibi tanımlamıştır.



Şekil 9. İletkenlik bandı, valans bandı ve enerji bandı aralığı (Moraro, 2016)

Yalıtkanlar, elektriği iletmek için serbest elektronlara sahip değildir. Çünkü tüm elektronlar komşu atomlar arasında güçlü bağlar oluşturur. Bununla birlikte, yarıiletkenler, ısıyla parçalanabilecek oldukça zayıf kovalent bağlara sahiptir. Bu bağlar koptuğunda, elektronlar valans bandından iletim bandına hareket eder, böylece valans bandında elektron yükü eksikliği kalır (Jain vd., 2006). Yarıiletkenler, negatif bir direnç katsayısına sahiptir. Dirençlilik, daha fazla ısı emdikleri için azalır. Dolayısıyla yarıiletkenin sıcaklığı arttıkça iletkenliği de artar. Oda sıcaklığında (300 K) ve normal atmosferik basınç altında, silikon ve galyum arsenit sırasıyla 1,12 eV ve 1,42 eV enerji band aralığına sahiptir.

1.3.1.4. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Taşıyıcıların elektrik ve manyetik alanlardaki hareketini açıklamak amacı ile; elektronlar için,

$$m_e \left(\frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{\vec{v}_e}{\tau_e} \right) = -e\vec{E} - e\vec{v}_e \times \vec{B} \quad (6)$$

ifadesi ve boşluklar için,

$$m_h \left(\frac{d\vec{v}_h}{dt} + \frac{\vec{v}_h}{\tau_h} \right) = +e\vec{E} + e\vec{v}_h \times \vec{B} \quad (7)$$

ifadesi kullanılır.

Sadece bir doğru akım elektrik alanı bulunduğu denklemler (6) ve (7)'nin çözümleri,

$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e} \vec{E} = -\mu_e \vec{E} \quad (8)$$

$$\vec{v}_h = -\frac{e\tau_h}{m_h} \vec{E} = -\mu_h \vec{E} \quad (9)$$

olur. Burada $\vec{v}_e$ ve $\vec{v}_h$ elektron ve boşlukların sürüklenme hızlarıdır. Burada elektron ve boşlukların hareketlilikleri,

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e}, \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad (10)$$

ifadeleri ile verilmektedir. Elektron ve boşluk katkılarının toplanmasıyla elde edilen elektrik akım yoğunluğu,

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = \left(\frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h} \right) \vec{E} \quad (11)$$

$$\vec{j} = (ne\mu_e + pe\mu_h) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (12)$$

denklemleri ile gösterilir. Bu bağıntı, σ elektriksel iletkenliği,

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad (13)$$

ile verilen Ohm yasasıdır. Elektron ve boşluk hareketlilikleri çoğunlukla karşılaştırılabilir olduklarından, bağıl taşıyıcı yoğunlukları, elektronların ve boşlukların iletkenliğe yaptıkları bağıl katkıları belirlerler. Özden yarıiletken olan sıcaklık bölgesinde, bu iki katkı, çoğunlukla birbirine yakın olup, katkılı yarıiletken olan sıcaklık bölgesinde ise normal olarak çoğunluk taşıyıcıları hakimdir (Bedir, 2015).

1.3.2. Hall Olayı

Bir metal $\vec{B}$ manyetik alanı içine yerleştirildiğinde ve içinden $\vec{j}$ akım yoğunluğu geçirildiğinde aşağıdaki bağıntı ile verilen enine bir $\vec{E}_H$ elektrik alanı meydana gelir:

$$\vec{E}_H = R_H \vec{B} \times \vec{j} \quad (14)$$

Bu Hall olayıdır ve R_H Hall sabiti olarak bilinir. Deneyin geometrisi Şekil 10'da gösterilmiştir. Olayın başlangıcı, manyetik alan içinde iletkenlik elektronlarına etkiyen $-e\vec{v} \times \vec{B}$ Lorentz kuvvetidir. Şekil 10, x yönünde $\vec{j}$ akımına karşılık gelen elektronların $\vec{v}$ sürüklenme hızının yönünü göstermektedir. Lorentz kuvveti elektronları -y yönünde saptırma eğilimi gösterir ve bu da metalin alt yüzünde negatif yük yoğunluğunun hızlı birikimine sebep olur. Sonuçta -y yönünde $\vec{E}_H$ elektrik alanı (Hall alanı) oluşur. Böylece, $v_y=0$ olan kararlı durumda, bu geometride (6) hareket denkleminin x ve y bileşenleri

$$\begin{aligned} m_e v_x / \tau &= -eE_x \\ 0 &= -e(E_y - v_x B) \end{aligned} \quad (15)$$

biçimindedir. Bu denklemlerin ilki, σ elektriksel iletkenliğinin manyetik alanın varlığından etkilenmediğini gösterir. İkinci denklemden

$$E_y = v_x B = j_x B / (-ne) \quad (16)$$

elde edilir. Bu, (14) denklemiyle karşılaştırılırsa

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (17)$$

sonucuna ulaşılır.

İki tip taşıyıcı bulunduran bir yarıiletkende, hesaplama daha karmaşıktır. Bununla birlikte, taşıyıcının bir tipinin yoğunluğu çoğunlukla ötekinden çok daha büyüktür ve böylece n-tipi yarıiletkende ($n \gg p$)

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (18)$$

ve p-tipi yarıiletkende ($p \gg n$)

$$R_H = +\frac{1}{pe} \quad (19)$$

ifadeleri kullanılabilir. Hall olayının işareti çoğunluk yük taşıyıcının işareti ile belirlenir ve R_H 'nin ölçülmesi taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesini mümkün kılar. Denklem (13), (18) ve (19) denklemleriyle birleştirilirse ve iletkenlikte çoğunluk taşıyıcılarının baskın olduğu varsayılırsa taşıyıcı hareketliliği için

$$\mu = |R_H|\sigma \quad (20)$$

ifadesine ulaşılır.

Kristalde hem elektronların hem de boşlukların önemli oranlarda var olduğu durumda Hall katsayısının hesaplanması daha karmaşıktır. Denklem (6) ve (7)'nin kararlı durum çözümleri

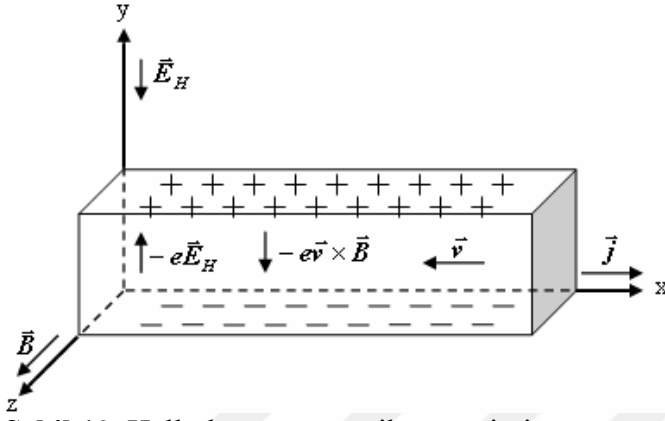
$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e}(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) = -\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \quad (21)$$

$$\vec{v}_h = \frac{e\tau_h}{m_h}(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) = \mu_h(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (22)$$

dir. Bu durumda $\vec{j}$ akım yoğunluğu,

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = ne\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + pe\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (23)$$

olur. Şekil 10'daki deneysel geometri dikkate alınır, bu geometri için sınır koşulları, $j_y=0$ olmasını gerektirir.



Şekil 10. Hall olayının şematik gösterimi

Taşıyıcı hızlarının y bileşenlerinin B 'ye göre lineer olduğu ve B 'ye göre sadece birinci mertebeye kadar terimlerin tutulduğu dikkate alınır, denklem (23)'den

$$j_x = eE_x(n\mu_e + p\mu_h) \quad (24)$$

$$j_y = 0 = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) + eB_z(n\mu_e v_{ex} + p\mu_h v_{hx}) \quad (25)$$

denklem (21) ve (22) kullanılırsa

$$j_y = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) + eB_z E_x (n\mu_e^2 - p\mu_h^2) \quad (26)$$

ifadeleri elde edilir. Bu iki denklem arasında E_x yok edilirse

$$E_y = -\frac{j_x B_z (n\mu_e^2 - p\mu_h^2)}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2} \quad (27)$$

ifadesi elde edilir. Hall katsayısının tanımından (denklem (14))

$$R_H = - \frac{p\mu_p^2 - n\mu_n^2}{e(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (28)$$

elde edilir. Böylece azınlık taşıyıcıları, hareketlilikleri yeterince yüksekse, Hall katsayısının işaretini belirleyebilirler.

1.3.3. Yarıiletken İnce Film Üretim Yöntemleri

İnce film, kalınlığı birkaç nanometre ile birkaç mikrometre arasında değişen, ince bir malzeme tabakası olarak tanımlanmaktadır. Tüm malzemelerde olduğu gibi, ince filmlerin yapısı, hazırlama koşullarına ve malzeme yapısına bağlı olarak amorf ve polikristal olmak üzere ikiye ayrılır. İnce filmler, tabaka ve filmlerin üzerinde biriktirildiği altlık olmak üzere iki kısımdan oluşur. Ayrıca, ince filmler, ince film güneş pilleri vb. gibi farklı katmanlardan oluşabilir. İyi kalitede ince filmler elde etmek için, iki yaygın biriktirme tekniği vardır. Bunlar, fiziksel ve kimyasal biriktirme yöntemidir. Tablo 4'de yarıiletken ince film üretim yöntemleri verildi.

Tablo 4. İnce film üretim yöntemleri

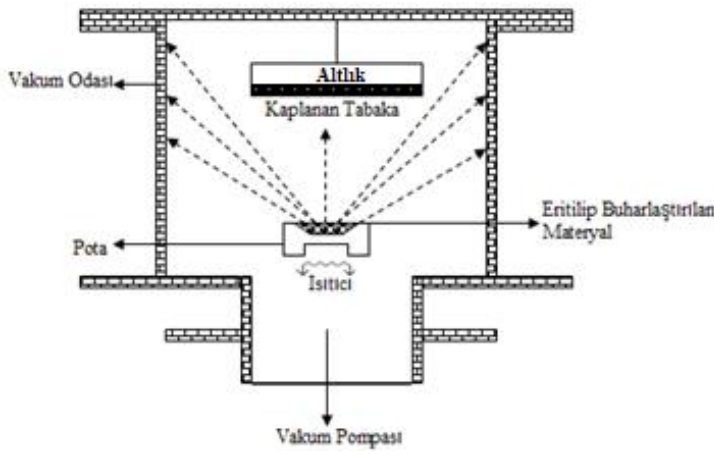
Fiziksel Biriktirme	Kimyasal Biriktirme
1. Buharlaştırma Teknikleri	1. Sol-gel tekniği
a. Vakumlu termal buharlaşma	2. Kimyasal banyo biriktirme
b. Elektron ışını buharlaşması	3. Kimyasal püskürtme tekniği
c. Lazer ışını buharlaşması	4. Kimyasal buhar biriktirme (CVD)
d. Ark buharlaşması	a. Düşük basınç (LPCVD)
e. Moleküler ışın epitaksisi	b. Plazma gelişmiş (PECVD)
f. İyon kaplama buharlaşması	c. Atomik katman birikimi (ALD)
2. Sputtering teknikleri	
a. Doğru akım püskürtme (DC püskürtme)	
b. Radyo frekansı püskürtme (RF püskürtme)	

1.3.3.1. Fiziksel Buhar Biriktirme

Bu yöntemlerin genel mekanizması, malzemenin fazının katı fazdan buhar fazına dönüştürülmesi ve özel altlık üzerinde tekrar katı faza dönüştürülmesi şeklindedir. Buharlaştırma teknikleri vakum altında veya atmosferik koşulda gerçekleştirilir. En yaygın kullanılan yöntem vakumlu termal buharlaştırma tekniğidir.

1.3.3.2. Vakumlu Termal Buharlaştırma Yöntemi

Vakumlu buharlaştırma tekniği, amorf ince filmleri, özellikle CdSe, MnS, Ge-Te-Ga ve benzeri kalkoloid filmleri hazırlamak için kullanılan en basit tekniktir. Termal buharlaştırma tekniği iki parametreye güçlü bir şekilde bağlıdır. Bunlardan ilki termal olarak buharlaştırılmış malzeme ve ikincisi 10^{-5} - 10^{-9} Torr arasında değişen orta veya daha yüksek vakum altında altlık yüzeyine potansiyel bir fark uygulanmasıdır. Termal buharlaşma için şematik diyagram Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Vakumlu termal buharlaştırma sisteminin şematik gösterimi

1.3.3.3. Soğuk Altlık Yöntemi

Düşük altlık sıcaklığında termal buharlaşma yani soğuk altlık yöntemi yeni ve iyi bilinen bir tekniktir. Bu yöntem yarı iletken ve bazı mikroçip üretimleri için kullanılmaktadır. Soğuk altlık yöntemi kullanılarak iyi kalitede ince film üretimi elde etmek mümkündür. Bu teknikte ayrıca yüzeyde daha az difüzyon ve çatlama, gerilme gibi daha az termal genleşme durumları meydana gelmektedir (Schmitz, 2018). Bu tekniğin en çok bilinen yönü, ince filmlerde partikül boyutunun, düşük altlık sıcaklığı ile azaltılmasıdır. Geleneksel ince film büyütme işleminde, film oluşumu yapısal bölge modeli ile açıklanmaktadır. Yapısal bölge modeli, buhar ortamından gelen parçacıkların altlık sıcaklığına bağlı olarak yüzey veya hacim difüzyonuna dayanmaktadır. Bu model ilk olarak Movchan ve Demchishin (Movchan ve Demchishin, 1969) tarafından tanımlanmış ve daha sonra farklı araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Yapısal bölge modeline dayanarak, kaplanmış malzemeler altlık sıcaklığına bağlı olarak farklı mikro

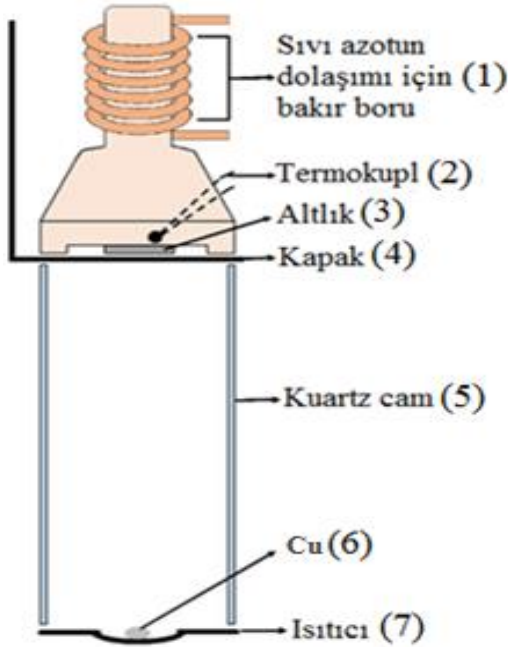
veya nano ölçekli yapılar gösterebilir. ($\theta = T_s/T_m$, T_s altlık sıcaklığı, T_m metalin erime sıcaklığı). Bu modele göre, film büyümesi dört farklı sıcaklık bölgesinden oluşur:

- 1.Bölge ($T_s/T_m < 0,2$)
- Geçiş Bölgesi ($0,2 < T_s/T_m < 0,3$)
- 2.Bölge ($0,3 < T_s/T_m < 0,5$)
- 3.Bölge ($T_s/T_m > 0,5$)

Cu için 200 K altlık sıcaklığında, parçacıkların büyüme mekanizması 1. bölge ile ilişkilidir. Taneciklerin yüzey ve hacim difüzyonu altlıkta çok küçük olmaktadır. Yapı, buhar ortamında parçacıkların birikmesiyle oluşur. Bu durum, film kalınlığı artarken gölgeleme etkisine neden olur. Gölgeleme etkisi, partiküllerin buhar ortamından geldiğinde alt tabakaya yapışmasını önler, gölgeleme etkisi ince filmler üzerinde gözenekliliğe ve pürüzlü yüzey yapılarına neden olur. Bununla birlikte, Belyaev ve Rubets (2001) yaptıkları çalışmada birinci bölge büyüme sıcaklıklarında hazırlanan bazı ince filmlerin yapısal bölge modelinden daha yüksek kalite gösterdiğini belirtmişlerdir. Bu durum sadece difüzyon işlemi ile değil, aynı zamanda ince film oluşumu ile de açıklanmaktadır. Bu bağlamda, başka bir model olan doğrusal olmayan Soliton dalga modeli, alt film arayüz bölgesinde oluşan dislokasyonlar ile düşük sıcaklıklarda yüzeyde büyütülen parçacıklar arasındaki etkileşimlerden kaynaklanan hareketlilik olarak tanımlanmaktadır. Soliton hareketliliği, dislokasyon kusurlarını temsil eden Burger vektörü yönünde gerçekleşir. Soliton dalgaları, kütle aktarım özellikleri nedeniyle parçacıkların enerji kaybı olmadan taşınmasına izin verir. Altlığın kristal yapısı, Burger vektörünün ayarlanmasına ve parçacıkların Soliton dalga etkisi nedeniyle aynı yönde taşınmasına neden olur. Bu, denge dışı büyüme koşulları ince filmler için homojen bir kaplama sağlar. Termal buharlaştırma işleminde, film oluşturma prosedürü aynı zamanda buhar üretilen ortama da bağlıdır. Kaplama prosedürü vakum ortamında kısmen kapalı doymuş buhar hacminde gerçekleştirilirse, çekirdeklenme işlemi, kontrol edilebilir olan altlık yüzeyinde gerçekleşir (Kukushkin, ve Osipov, 1994). Bu modelde, sadece kritik boyutlu parçacıklar Soliton dalgalarının oluşmasına neden olur. Bu, kaplanmış filmin homojen bir parçacık boyutu dağılımına ve yüksek yapısal niteliklere sahip olmasını sağlar. Bu, matematiksel olarak aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Belyaev vd., 2003).

$$\frac{a(T_r) - b(T_f)}{b(T_f)} > \left(\frac{2}{\pi}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{f}{\lambda} a(T_r)} \quad (29)$$

burada $a(T_r)$ ve $b(T_f)$, sırasıyla altlığın ve parçacığın birim hücre parametresidir. f ve λ , altlık ve parçacık arasındaki etkileşimi karakterize eden ifadelerdir. Bahsedilen eşitlik elde edilirse, uygun sıcaklıktaki ince filmler, Soliton dalga modeli için uygun büyüme özelliklerini gösterir. Bunun ince filmlerin yapısal, elektriksel ve manyetik özelliklerine olumlu bir katkı olduğu düşünülmektedir. Soğuk altlık tekniği ile buharlaştırma düzeneği, altlık soğutma sistemi ve doymuş buharı içeren reaktör olmak üzere iki ana parçadan oluşmaktadır. Soğuk altlık yöntemi düşük vakum ortamında (10^{-5} - 10^{-6} Torr) gerçekleştirilmektedir. Soğuk altlık sisteminde, altlığı soğutmak için sıvı azotun dolaşacağı bakır borudan oluşan bölüm, altlık tutucularının ve açılıp kapanabilir pencerenin bulunduğu bölüm, silindirik kuartz reaktör ve malzemeyi buharlaştırmak için kullanılan tungsten ısıtıcı yer almaktadır. Şekil 12’de soğuk altlık düzeneğinin şematik görünümü verildi.



Şekil 12. Soğuk altlık düzeneğinin şematik görünümü

Soğuk altlık düzeneğinde, açılıp kapanabilen pencere kontrol edilerek, malzeme buharlaşırken süreye bağlı olarak film büyümesi gerçekleştirilir. Sıvı azot ile soğutulan altlıklar reaktördeki doymuş buhar ile temas ettiğinde altlık yüzeyine doymuş buhar

ortamından farklı boyutlarda nano ölçekli kümeler taşınır. Bu kümeler kritik öncesi, kritik ve kritik ötesi boyutlar olarak sınıflandırılır. Kritik boyutlu kümeler; doymuş buhar ortamında bulunan atomların basıncı doymuş buhar basıncından biraz yüksektir ve bu nedenle bu atomlar serbestçe hareket edebilir. Buhar ortamında oluşan kümeler bu atomların yapışmasıyla büyümektedir. Bu süreçte buhar ortamında oluşan kümeler genellikle eşit boyutludur. Kritik öncesi boyutlu kümeler, ortamda bulunan atomların hepsi çok yüksek basınçları nedeniyle buhar ortamında oluşan kümelere yapışmış durumdadır ve ortamda serbest atom yoktur. Ortamdaki kümeler birbiri ile çarpışarak büyümektedir. Kritik ötesi boyutlu kümeler ise kritik ve kritik öncesi boyutlu kümelerin gerçekleşmediği durumlarda geçerlidir. Küme büyümesi küçük kümelerin atomlarının buharlaşarak büyük kümelere yapışmasıyla gerçekleşir.

Soğuk altlık yönteminin en büyük avantajı ve diğer yöntemlerden farkı; doymuş buhardan altlık yüzeyine taşınan ve buraya konumlanan kümelerin altlık atomlarıyla çarpışması esnasında soliton dalgası oluşturmaktır. Doğrusal olmayan özelliğe sahip soliton dalgaları kütle taşıma özelliği nedeniyle altlık yüzeyinde parçacıkların enerji kaybına uğramadan hareket etmesini sağlamaktadır. Bu modelde altlığın kristal yapıya sahip olması, tek yönde Burger vektörünün oluşmasına ve böylece soliton dalgası etkisiyle parçacıkların taşınımının aynı yönde gerçekleşmesine neden olur. Bu durum homojen bir kaplama sağlamaktadır. Soliton dalgasının oluşumu ile soliton büyüme mekanizmasını gerçekleştiren kümelere kritik boyutlu kümeler denir. Altlık yüzeyinin sıcaklığına bağlı olarak kritik boyutlu kümelerin boyutları 10-15 nanometre arasında değişmektedir. Altlık yüzeyinde soliton dalgası oluşturmamayan kritik öncesi ve kritik ötesi kümeler ise tekrar doymuş buhar ortamına dönüş yaparlar. Böylece altlık yüzeyi eşit boyutlu nano ölçekli kümelerle kaplanarak metalik filtre katmanları oluşturulmuş olur.

1.3.4. CdS ve Cu₂S Yapılarının Özellikleri

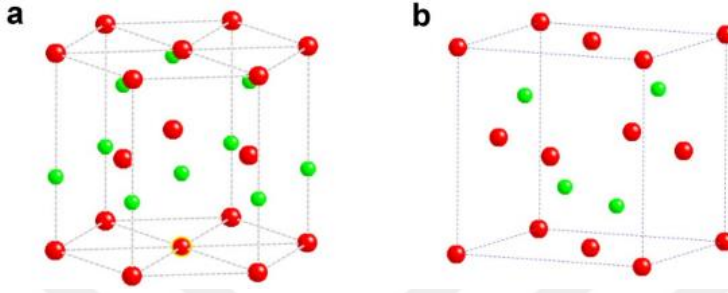
CdS oda sıcaklığında (≈ 300 K) 2,42 eV'lik enerji band genişliğine sahip n-tipi yarıiletken bir malzemedir. CdS, güneş ışığını büyük oranda geçiren bir yarıiletkendir. Bu özellik CdS'yi optik uygulamalar için önemli bir malzeme olarak değerlendirilmesini sağlamaktadır. CdS yarıiletkeni iyi bir lüminesans materyal olması ve iyi fotoelektrik özelliklere sahip olması nedeniyle üzerinde yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Yıllar geçtikçe CdS üzerine yapılan çalışmalar artmaktadır. Güneş pilleri için günümüzde en

çok çalışılan yarıiletkenlerden birisi nano kristal yapılı CdS yarıiletkenidir. Güneş pili için malzeme seçimi o malzemeden yapılacak olan cihazın verimine bağlıdır. Yüksek verime sahip cihaz için yaklaşık 1,5 eV değerinde yasak enerji aralığına sahip olan malzemelerin soğurma katmanları olarak kullanılması gerektiği bilinmektedir. Çünkü bu yasak enerji aralığına sahip malzemeler minimum kayıp ile güneş ışınlarını maksimum olarak soğurabilmektedir (Bozkaplan, 2015). Pek çok heteroeklem ince film güneş pilleri için kısmen geniş yasak enerji aralığına (2,42 eV) sahip olan CdS ideal bir cam malzemesidir. CdS geniş enerji aralığına sahip olduğundan dolayı, fotovoltaik hücre içerisindeki cam katmanları, optik filtreler, çok katmanlı ışık yayan diyotlar, fotoğraf detektörleri, ince film alan etkili transistörleri, gaz sensörleri, optoelektronik cihazlar için şeffaf yarıiletken uygulamalarında etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Bu geniş kullanım alanı nedeniyle elektronik teknolojisi alanında önemli bir malzeme olarak ortaya çıkmıştır. Büyütülme koşullarına bağlı olarak CdS iki farklı yapısal fazda büyütülebilir. Bunlar hekzagonal (wurzite) ve kübik (zinc blende) dir. CdS yüksek elektron tutumu ve yüksek mobilite gibi mükemmel optik ve elektriksel özellikler nedeniyle A_2B_6 grubunun en önemli malzemelerinden biridir. Kübik yapının kafes parametreleri $a = 0,5832$ nm olarak bildirilirken, hekzagonal yapının parametreleri $a = 0,413$ nm ve $c = 0,6730$ nm olarak verilir (Al-Bassam vd., 1994). CdS ince filmlerinin büyütülmesinde kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Bunlar, kimyasal banyo yöntemi, kimyasal buhar taşınımı, vakum buharlaştırma, sprey piroliz, elektrodepozisyon, darbeli lazer biriktirme ve püskürtme yöntemidir. CdS yarıiletkeninin bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri Tablo 5’de verildi.

Tablo 5. CdS’nin 300 K’deki bazı özelliklerinin değerleri

Özellikler	CdS Kristal Yapısı	
	Wurzite	Zinc blende
Yarıiletken Tipi		n
Bant Aralığı Tipi		Doğrudan
Yasak Bant Aralığı	2,42 eV	2,42 eV
Dielektrik Sabiti	8,9	-
Elektron Mobilitesi	$350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	-
Boşluk Mobilitesi	$40 \text{ cm}^2/\text{Vs}$	-
Mol Ağırlığı	144,48 g/mol	-
Yoğunluk	$4,82 \text{ g/cm}^3$	$4,87 \text{ g/cm}^3$
Erime Noktası	1750 °C	-
Termal İletkenlik	40,1 W/mK	-
Refraktif İndex	2,506	2,529

CdS'nin A_2B_6 bileşikleri, doğrudan bant aralıklarına sahiptir. Tek kristal CdS neredeyse her zaman n-tipi yarı iletkenidir (Seyhan, 2003). Şekil 13'de CdS'in zinc blende ve wurtzite kristal yapıları gösterildi. Wurtzite CdS, c eksenı boyunca istiflenmiş tetrahedral koordineli S^{2-} ve Cd^{2+} iyonlarından oluşan bir dizi alternatif düzlem olarak tanımlanabilir.



Şekil 13. CdS'de iki çeşit yapı: (a) hekzagonal (wurtzite) kristal yapı; (b) kübik (zinc blende) yapı (kırmızı top: Cd ve yeşil top: S)

Cu_2S ince filmler, bilim ve teknolojinin çeşitli alanlarında çok çeşitli uygulamalara sahiptir. Cu_2S , metale yakın elektrik iletkenliği, kimyasal algılama özelliği ve güneş enerjisi absorpsiyonu için ideal karakteristikleri ile ilginç bir malzemedir. Cu_2S ince filmi bir A_2B_6 bileşiğidir. Cu_2S bileşiğinin temel avantajı düşük maliyetli güneş pilleri yapmak için birkaç kristalografik ve stokiometrik formda mevcut olmasıdır. Ek olarak, çeşitli ince film üretim yöntemleri kullanılarak kaliteli filmlerin büyütülmesi ve oluşturulması kolaydır (Moraro, 2016).

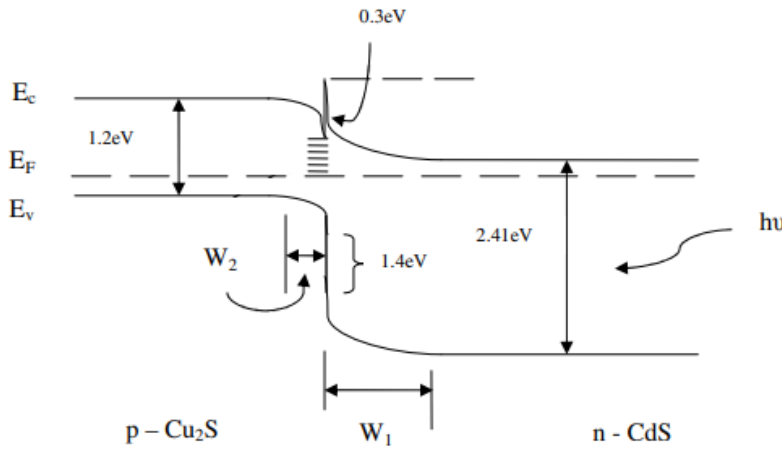
Oda sıcaklığında, farklı stokiometri ile birkaç bakır sülfür fazı vardır ($x = 2, 1,95, 1,8, 1,75$ ve 1). Bunlar arasında, Cu_2S , yüksek absorpsiyon katsayısı (10^4 cm^{-1}) ve dar bant aralığı (1.2 eV) nedeniyle fotovoltaik dönüşümlerde ideal bir soğurucu olarak kabul edilir (Liu vd., 2003). Bununla birlikte, bakır iyonlarının difüzyonu ile indüklenen Cu_2S dejenerasyonunun Cu_2S bazlı heteroeklem güneş pilleri için kaçınılmaz bir problem olduğu görülmüştür (Liu vd., 2003). Halen, Cu_2S ince filmlerin imalat yöntemlerinin ve fonksiyonel özelliklerinin geliştirilmesine yönelik birçok araştırma bulunmaktadır. Katı hal reaksiyonu (SSR), kimyasal buhar biriktirme (CVD), sprey piroliz (SP), kimyasal banyo biriktirme (CBD) ve ardışık iyonik tabaka adsorpsiyonu ve reaksiyonu (SILAR) gibi iyi bilinen biriktirme teknikleri vardır.

1.3.5. CdS/Cu₂S Güneş Pilleri

Son yıllarda, ince film güneş hücrelerinin geliştirilmesi konusundaki çabalar, p-n heteroeklem özelliğine sahip CdS/Cu₂S üzerinde daha fazla yoğunlaşmıştır. CdS/Cu₂S güneş pili, yaklaşık %10 dönüşüm verimliliği, kolay üretim ve düşük maliyet nedeniyle en umut verici güneş enerjisi dönüşüm (optoelektronik) cihazlarından birisidir. Bununla birlikte, genel olarak p-tipi CdS oluşumunun çok zor olduğu bilinmektedir. Güneş ışığının doğası göz önüne alındığında, Cu₂S katmanının fotoakım üretiminin çoğundan sorumlu olduğu açıktır (Ashour, 2006). Cu₂S filmlerinin üretimi için kuru işlem, vakumlu buharlaştırma, püskürtme ve püskürtme pirolizi, kimyasal yöntem gibi çeşitli teknikler kullanılmaktadır.

CdS/Cu₂S güneş pillerinin teorik verim değerleri %24 olmasına karşın deneysel verimleri %10 civarında olmaktadır (Habas vd., 2010). Deneysel verim değerlerinin düşük olmasının nedeni CdS ile Cu₂S örgü sabitleri arasındaki farkın sadece %4 olması ve bakır atomlarının CdS katmanına kolayca difüz olabilmesidir (Chopra vd., 1983). Bakırın hareketliliği sonucu Cu_{2-x}S fazındaki x değeri sürekli olarak değişmekte ve CdS yüzey bölgesinde farklı x değerlerinde CdS/Cu_{2-x}S heteroeklemlerinin oluşumuna neden olmaktadır. Bazı Cu_{2-x}S yapılarının alabileceği yasak band aralığı değerleri, Cu₂S için $E_g=1,2$ eV, Cu_{1,96}S için $E_g=1,4$ eV, Cu_{1,8}S için $E_g=1,5$ eV ve CuS için $E_g=2$ eV'dir (Habas vd., 2010). En yüksek verim ortorombik kalkosit yapıya sahip olan Cu₂S fazı ile CdS'in temasından elde edilmektedir (Moses, 1980). Bu olumsuzluklardan dolayı elde edilen CdS/Cu₂S güneş pillerinin ömürleri 30 gün civarında değişebilmektedir. Bakırın CdS'e hareketliliğini durdurmak ve daha uzun ömürlü CdS/Cu₂S güneş pillerinin hazırlanması için değişik yöntemler denenmiştir. Örneğin %1,6 verimle çalışan ve 4 ay aktivitesini koruyan CdS/Cu₂S fotovoltaiik yapılar, CdS nano çubuklar ve Cu₂S nano kristaller kullanılarak hazırlanabilmiştir (Wu vd., 2008). Yapılan başka bir çalışmada ise tek kristal CdS'in Cu_{2-x}S fazı ile temas yüzeyini sodyum atomları ile katkılandırarak Cu₂S'ten CdS'e difüz etmiş düğümler arası pozitif yüklü bakır iyonları ile negatif yüklü Cd boşlukları arasında düşük hareketli $[Cu_i^+ - V_{Cd}]$ kusur yapılar elde edilmiştir. Bu kusur yapıların bakır atomları için durdurucu elektriksel alan oluşturduğu görülmüştür. Ayrıca CdS/Cu₂S heteroekleminin fotoelektrik parametrelerinin 60 günde %20 bozulurken kontrol örnekte %70 bozulduğu rapor edilmiştir (Novruzov, 1987).

Cu_xS yüzeyinin oksijen gibi güçlü oksitleyiciye maruz bırakılması, cihaz performansında önemli bir bozulmaya neden olabilir. Cd atomlarının oda sıcaklığında havaya maruz kalmaları durumunda hem Cu_xS yüzeyine hem de $\text{CdS}/\text{Cu}_x\text{S}$ arayüzüne hızlı bir şekilde hareket ettiği bulunmuştur (Patain vd., 1985). Yüzeyde oksitlenmenin oluşumuyla $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$ hücrelerinin bozulması, ortam havasının argon ile değiştirilmesiyle önemli ölçüde önlenebileceği görülmüştür (Al-Dhafiri vd., 1991). $\text{CdS}/\text{Cu}_2\text{S}$ heteroekleminin enerji band diyagramı Şekil 14'de gösterildi.



Şekil 14. $\text{Cu}_2\text{S}/\text{CdS}$ heteroeklem enerji band diyagramı

Aydınlatma altında, ışığın çoğu p-tipi Cu_2S katmanı tarafından emilir. Böylece Cu_2S katmanı, ışık kaynaklı taşıyıcıların çoğunu oluşturur. Yeni hazırlanmış hücreler, dengelenmemiş CdS ve neredeyse stokiometrik Cu_2S 'den oluşur. Böylece uzay yükü daralabilir ve aydınlatmadaki geçit yakınındaki derin seviyelerin iyonlaşması daha da daralmaya neden olur. Arayüz durumlarında tünelleme meydana geldiğinde, etkili bariyer yüksekliğini ve dolayısıyla V_{oc} 'i azaltır. Hücrenin ısıtılması, oksijen ve/veya bakırın, CdS'de dengeleyici alıcılar oluşturarak, uzay yükü bölgesine ulaşmasını sağlar. Bu işlem, tünellemeyi kısıtlayan uzay yük bölgesini genişletmektedir. Artan engelle birlikte, V_{oc} 'de bir iyileşme beklenebilir. Cu_2S güneş hücrelerinde foto akımı etkileyen ana faktör, yüzeye yakın fotojenlenmiş taşıyıcıların çoğunda meydana gelen yüksek yüzey rekombinasyon hızıdır. Yüzey rekombinasyonu, azınlık taşıyıcı difüzyonunu yüzeye karşı koyacak bir sürüklenme alanı üretmek için yüzeye daha yakın bölgenin uygun şekilde katkılanmasıyla azaltılabilir (Jayaraman, 2005).

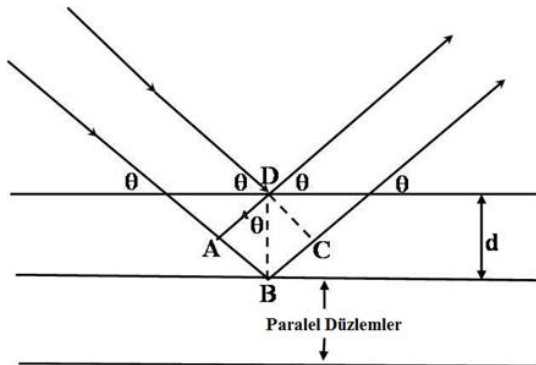
1.4. Analiz Sistemleri

1.4.1. X-Işını Kırınımı

X-ışını bölgesi, elektromanyetik spektrumun 0,1-100 Å dalga boyu aralığında yer almaktadır. Tüm elektromanyetik dalgalar gibi X-ışınları da foton partiküllerinin akışı ve bir enerji dalgası olarak görülebilir. X-ışını dalga boyları kısadır ve nispeten daha yüksek enerjiye sahiptirler. Sıcak bir filamentten (katot) yayılan yüksek enerjili elektronlar metalik bir hedefe (anot) çarptığında X-ışınları üretilebilir. X-ışınları, araştırılan materyalle etkileşime girer (daha kesin olarak materyal içindeki atomun etrafındaki elektronlarla). Düzenli kafeslerde (örneğin kristallerde), dağınık X-ışınlarının dalgaları, Bragg'ın kırınım kanununa göre belirli bir yönde birbirlerini güçlendirir. Bragg kırınım kanunu aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (30)$$

Burada, d kafes düzlemleri arasındaki mesafe, n bir tamsayı ve θ X-ışını yansıma açısıdır. Şekil 15'de elektromanyetik dalganın ve kristal düzlemlerin etkileşimi gösterildi. Bragg kanunu $AB + BC$ mesafelerinin $n\lambda$ 'ye eşit olması şartıyla elde edilir.



Şekil 15. X-ışını kırınımını ve Bragg Yasasını gösteren şematik çizim

X-ışını kırınım teknikleri, malzemelerin atomik yapısını tanımak için kullanılabilir ve X-ışınlarının, malzemedeki her bir atomun elektron bulutlarından elastik saçılmasına dayanır. Şiddet deseni sadece kristal yapının simetrisine ve birim hücre parametrelerine bağlıdır (İbrahim, 2011). X-ışını kırınım desenlerinden yararlanılarak, malzemenin kristal yapısı, örgü parametreleri ve parçacık boyutu hakkında bilgi sahibi olunabilir.

1.4.2. Optik Spektrofotometre

Optik spektrofotometre, malzemenin geçirme ve yansıma özelliklerinin dalga boyunun bir fonksiyonu olarak nicel ölçümünde kullanılır. Geçmişte spektrofotometreler analitik spektrumu üretmek için bir kırınım ızgarası içeren monokromatör kullanmaktaydılar, günümüzde ise çoğu modern orta-kızılötesi spektrofotometre, spektral bilgiyi elde etmek için bir Fourier dönüşüm tekniği kullanmaktadır. Ultraviyole görünür spektroskopi veya ultraviyole görünür spektrofotometri (UV/Vis), ultraviyole görünür spektral bölgede absorpsiyon spektroskopisi veya yansıtma spektroskopisi anlamına gelir. Yani bu cihaz görünür ve yakın aralıklarda ışığı kullanmaktadır.

Ultraviyole görünür spektroskopide kullanılan cihaza UV/Vis spektrofotometre denir. UV/Vis spektrofotometre numuneden geçen ışığın yoğunluğunu ölçer ve numuneden geçmeden önce ışığın yoğunluğuyla karşılaştırır. Spektrofotometre kullanımı, fizik, malzeme bilimi, kimya, biyokimya ve moleküler biyoloji gibi çeşitli bilimsel alanları kapsar.

1.4.3. Fotoluminesans Spektroskopisi

Fotoluminesans spektroskopisi, malzemelerin elektronik yapısını araştırmak için kullanılan temassız, tahribatsız bir yöntemdir. Işık numuneye yönlendirilirken absorbe edilir ve numuneye fazla enerji verilir. Bu aşırı enerjinin numuneden ayrılmasının yolu, ışık yayılması veya lüminesanstır. Işıkla uyarma sonucu olarak fotonun enerjisi, denge durumdaki bir elektrona transfer edilir ve elektron uyarılmış duruma geçer.

Bu elektronlar denge durumlarına döndüğünde, fazla enerji açığa çıkar ve ışık salınımını içerebilir veya içermeyebilir. Yayılan ışığın enerjisi hareket eden elektronun uyarılmış durumu ile denge durumu arasındaki enerji seviyelerindeki farkla ilgilidir. Enerjinin emilimini ve ardından ışık yayılmasını içeren olaylar genelde fotoluminesans terimi altında sınıflandırılır. Spektroskopi, ışık kaynağı, örnek tutucu ve detektör olmak üzere üç temel kısım içerir.

1.4.4. Taramalı Elektron Mikroskobu ve Kimyasal Bileşim Analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM, Scanning Electron Microscope), odaklanmış bir elektron demeti ile numune yüzeyini tarayarak görüntü elde eden bir elektron mikroskobu türüdür. Elektronlar numunedeki atomlarla etkileşerek numune yüzeyindeki topografi ve kompozisyon hakkında bilgiler içeren farklı sinyaller üretir. Elektron demeti raster tarama düzeni ile yüzeyi tarar ve demetin konumu, algılanan sinyal eşleştirilerek görüntü oluşturulur.

Alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM), 10x ila 300.000x arasındaki büyütmelerde topografi ve element bilgisi sağlar. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile karşılaştırıldığında, alan emisyonlu SEM (FESEM) uzaysal çözünürlüğü 1,5 nm'ye kadar olan üç ila altı kat daha iyi, daha net, daha az elektrostatik olarak bozulmuş görüntüler üretir.

Enerji dağıtıcı X-ışını (EDX) spektroskopisi analizi, malzemenin kimyasal bileşimini tahmin etmek için kullanılan önemli bir tekniktir. Bir EDX sistemi yüksek enerjili bir radyasyon kaynağı (genellikle elektronlar), numune, katı hal dedektörü (Si-Li) ve sinyal işleme ünitelerinden oluşur. Dedektör tarafından algılanan x ışınları sinyal haline dönüştürülerek belirli şiddetlere sahip piklerden oluşan x ışını enerji histogramı haline dönüştürülür. Bu X-ışını histogramı ile malzemedeki her bir elementin tipi ve miktarı belirlenebilir. EDX spektrometreleri genellikle elektron kolonuna sahip cihazlara bağlanmış şekilde bulunurlar.

1.4.5. Van der Pauw Özdirenc Ölçme Yöntemi

Yarıiletken malzemenin özdirenci genellikle dört noktalı prob tekniği kullanılarak belirlenir. Dört nokta tekniği ile noktalardan ikisi kaynak akımı sağlamak için kullanılırken, diğer iki nokta gerilim ölçmek için kullanılır. Dört prob kullanılması, prob direnci, her probun altındaki yayılma direnci ve her metal prob ile yarı iletken malzeme arasındaki temas direncinden kaynaklanan ölçüm hatalarını ortadan kaldırır.

Yarıiletken malzemelerin özdirencinin belirlenmesinde Van der Pauw (VDP) yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Van der Pauw metodu, düz, keyfi şekilli bir homojen kalınlıktaki numunenin çevresine dört küçük kontak kullanarak bir akım ve gerilimin ölçüm uygulamasını içerir. Bu yöntem özellikle çok küçük numuneleri ölçmek

için kullanışlıdır, çünkü kontakların geometrik aralığı önemsizdir.

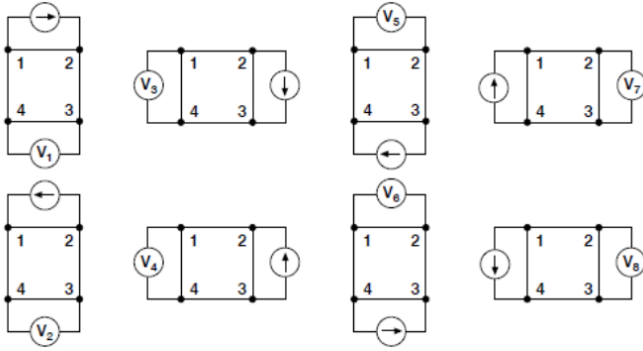
Bu yöntem kullanarak, öz direnç, Şekil 16'da gösterildiği gibi, numunenin çevresi etrafında yapılan toplam sekiz ölçümden elde edilir. Tüm gerilim ölçümleri alındıktan sonra, iki öz direnç değeri ρ_A ve ρ_B aşağıdaki gibi elde edilir:

$$\rho_A = \frac{\pi}{\ln 2} f_A t_s \frac{(V_1 - V_2 + V_3 - V_4)}{4I} \quad (31)$$

$$\rho_B = \frac{\pi}{\ln 2} f_B t_s \frac{(V_5 - V_6 + V_7 - V_8)}{4I} \quad (32)$$

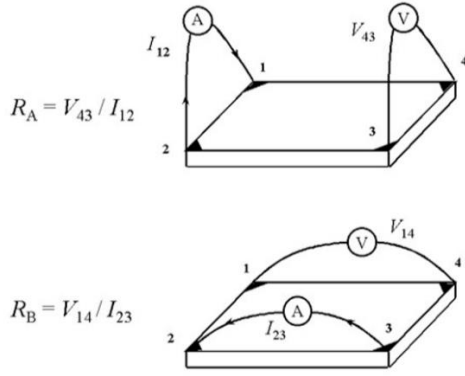
burada: ρ_A ve ρ_B , $\Omega \cdot \text{cm}$ 'deki yoğunluk öz dirençleridir, t_s , cm cinsinden numune kalınlığıdır; V_1-V_8 , voltmetre tarafından ölçülen gerilimleri temsil eder; I , numune içerisindeki amper cinsinden akım, f_A ve f_B , örnek simetrisine dayanan geometrik faktörlerdir (mükemmel simetri için $f_A = f_B = 1$). ρ_A ve ρ_B bilindikten sonra, ortalama direnç (ρ_{AVG}) aşağıdaki ifadeye göre belirlenebilir:

$$\rho_{AVG} = (\rho_A + \rho_B)/2 \quad (33)$$



Şekil 16. Van der Pauw öz direnç ölçüm düzeneği

Basit geometrilere sahip malzemeler için Van der Pauw yönteminin kullanımı Şekil 17'de gösterilmiştir (Patel vd., 2008).



Şekil 17. R_A ve R_B karakterizasyonun belirlenmesinde kullanılan Van der Pauw konfigürasyonunun şeması

Direnç ölçümlerini elde etmek için, 1 ve 2 kontak noktalarına bir dc akım (I) uygulanır ve Şekil 17’de gösterildiği gibi 3 ve 4 kontak noktalarının arasında V_{43} gerilimi ölçülür. Daha sonra 2 ve 3 kontak noktalarına bir dc akım I uygulanıp 1 ve 4 kontak noktalarının arasında V_{14} gerilimi ölçülür.

R_A ve R_B , aşağıdaki ifadelerle hesaplanır:

$$R_A = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad ve \quad R_B = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (34)$$

Direnç ölçümünün amacı, R_S levha direncini belirlemektir. Aşağıdaki Van der Pauw denkleminde göre R_A , R_B ve levha direnci (R_S) arasındaki ilişkiyi gösterir.

$$\exp(-\pi R_A / R_S) + \exp(-\pi R_B / R_S) = 1 \quad (35)$$

Kütlelel elektriksel direnç ρ aşağıdaki denkleme göre hesaplanır.

$$\rho = R_S \cdot d \quad (36)$$

1.4.6. Hall Katsayısı Ölçümü

Bir yarıiletken elektrik akımına dik olacak şekilde bir manyetik alan uygulandığında hem elektrik alana hem de manyetik alana dik olacak şekilde bir Hall alanı meydana gelir. Meydana gelen bu Hall alanı nedeniyle yarıiletken Hall gerilimi oluşur. Oluşan bu Hall gerilimi aşağıdaki denklem ile ifade edilir (Öncel, 2014).

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (37)$$

Burada R_H Hall sabiti, I uygulanan akım, B manyetik alan ve b örneğin manyetik alan yönündeki boyutudur. n-tipi yarı iletkeninde ($n \gg p$):

$$R_H = -\frac{1}{ne} \quad (38)$$

ile ifade edilmektedir. p-tipi yarı iletkeninde ($p \gg n$);

$$R_H = +\frac{1}{pe} \quad (39)$$

ile ifade edilmektedir.

Taşıyıcı tipi belli olan malzeme için Hall gerilimi ölçülerek taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilir.

$$n = 8 \times 10^{-8} \frac{IB}{qV_H d} \quad (40)$$

Burada n taşıyıcı yoğunluğu (cm^{-3}), V_H Hall gerilimi (V), I akım (A), B manyetik alan (Gauss), d yarıiletken malzemenin kalınlığıdır.

Hall ölçümlerinde bazı durumlarda parazit gerilimler meydana gelebilir. Hall geriliminin ölçüldüğü kontaklar eş potansiyelli noktalarda değillerse, numunenin homojenliği bozuk ise, numuneden akım geçirilen kontaklar arasında taşıyıcıların hareketi ile parazit gerilimleri oluşabilir. Parazit gerilimlerin çoğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır ve bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönü değiştirilerek parazit gerilimlerin Hall gerilimine etkisi ortadan kaldırılabilir. Bu çalışmada, Hall gerilimini doğru ölçebilmek için akımın ve manyetik alanın yönü dikkate alınarak toplam sekiz ölçüm yapıldı. Bunlar, V_{12P} , V_{13N} , V_{24P} , V_{24N} , V_{31P} , V_{31N} , V_{42P} ve V_{42N} gerilimleridir.

$$V_D = V_{42P} - V_{42N}, V_C = V_{24P} - V_{24N} \quad (41)$$

$$V_E = V_{13P} - V_{13}, V_F = V_{31P} - V_{31N} \quad (42)$$

Hall gerilimi aşağıdaki ifade kullanılarak hesaplanır.

$$V_H = V_C + V_D + V_E + V_F \quad (43)$$

1.4.7. p-n Eklem Kapasitansı

p-n eklemlerde iki çeşit kapasitans meydana gelmektedir. Bunlardan ilki yük depolanmasıyla akımın gerilimden geri kalması ile meydana gelen difüzyon kapasitansıdır. İkincisi ise deplesyon bölgesi ve kenarlarındaki yük dağılımdan kaynaklanan eklem kapasitansıdır. İleri besleme durumunda difüzyon kapasitansı etkin iken ters besleme durumunda eklem kapasitansı baskın hale gelir (Özden, 2015).

Deplesyon bölgesinin p tipi malzemeye ait kıyısında, buradan geçiş yapan boşlukların geride bıraktığı negatif yüklü iyonlar ve aynı şekilde n kıyısındaki pozitif yüklü iyonlar, paralel plakalı kapasitansa benzer bir yapı oluştururlar. Bu yapının kapasitansını ifade etmek için $C = Q/V$ ifadesinin en genel şekli olan,

$$C = \left| \frac{dQ}{dV} \right| \quad (44)$$

denklemini kullanmak gerekir. Bunun sebebi, p-n eklemlerde deplesyon bölgesinin kıyısındaki yüklerin (Q) uygulanan gerilimle (V) doğrusal değişim göstermemesidir.

Deplesyon bölgesinin ısıtılma durumunda genişliği (W),

$$W = \left[\frac{2\varepsilon V_{bi}}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (45)$$

denklemini ile ifade edilir.

Besleme gerilimi (V) uygulandığında deplesyon bölgesinin genişliği,

$$W = \left[\frac{2\varepsilon (V_{bi} - V)}{q} \left(\frac{N_a + N_d}{N_a N_d} \right) \right]^{1/2} \quad (46)$$

denklemden görüldüğü üzere uygulanan gerilimle değişecektir. Deplesyon bölgesi genişliği ters besleme durumunda artarken ileri yönde uygulanan besleme gerilimleri için azalmaktadır.

Yük yoğunluğu (Q) ifadesi, n ve p taraflarındaki deplesyon bölge genişlikleri ve katkı yoğunlukları şeklinde düzenlenirse,

$$|Q| = qAx_{n0}N_d = qAx_{p0}N_a \quad (47)$$

eşitliği elde edilir. Toplam deplesyon bölge genişliği ifadesini (W) her iki taraftaki x_{n0} , x_{p0} ifadelerine bağlayan eşitlikler kullanılırsa,

$$x_{n0} = \frac{N_a}{N_a + N_d} W \quad (48)$$

$$x_{p0} = \frac{N_d}{N_a + N_d} W \quad (49)$$

denklemleri elde edilir. Yük yoğunluğu (Q),

$$|Q| = qA \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} W = A \left[2q\varepsilon(V_{bi} - V) \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} \quad (50)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eklem kapasitansı;

$$C = \left| \frac{dQ}{d(V_{bi} - V)} \right| = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\varepsilon}{(V_{bi} - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} \quad (51)$$

şeklinde ifade edilir. Bu denklem düzenlenirse,

$$C = A\varepsilon \left[\frac{q}{2\varepsilon(V_{bi} - V)} \frac{N_a N_d}{N_a + N_d} \right]^{1/2} = \frac{\varepsilon A}{W} \quad (52)$$

elde edilir.

n-CdS/p-Cu₂S heteroekleminde enerji band diyagramından bilindiği üzere boşluk tarafında engel yüksekliği daha fazladır ve elektronlar akım taşıyıcısıdır. Bu nedenle C-V ölçümlerinden elde edilen taşıyıcı yoğunluğu değerleri CdS'e ait verici yoğunluğu (N_d) değerleridir. Bu durumda kapasitans ifadesi,

$$C = \frac{A}{2} \left[\frac{2q\epsilon}{(V_{bi} - V)} N_d \right]^{1/2} \quad (53)$$

denklemleri ile ifade edilir. Bu denklem kullanılarak gerilim bağımlı kapasitans ölçümleri yapılarak eklem engel potansiyeli (V_{bi}) ve az katkılı bölümün katkı yoğunluğu (N_{CV}) değerleri hesaplanır. Burada C ara yüzey kapasitansı, ϵ yarı iletken malzemenin dielektrik sabiti, N_d verici yoğunluğu, V uygulanan gerilimi ve V_{bi} eklem engel potansiyelini ifade etmektedir.

1.5. Yüzey Plazmon Rezonans (SPR) Olayı

1902 yılında Wood ilk kez yüzey plazmon olayını ortaya koyarken, polarize ışığın bir kırılım düzenleyici yüzeyinden bir aynaya yansıttığı zaman aynada karanlık ve aydınlık bantlar oluştuğunu tespit etmiştir. Bu çalışmanın ardından Lord Rayleigh ve Fano bu teoremin gelişimine katkıda bulunsalar da yüzey plazmon rezonans olgusu tam olarak 1968 yılında anlaşılmıştır. Yüzey plazmon yönteminde geçirgen ve farklı kırılma indisli iki ortam arasında ince bir metal film kullanılır. Kritik bir açının üzerinde düzlem polarize ışık, yüksek kırılma indisli bir ortama girdiğinde toplam iç yansımaya uğrar. Bu koşullarda kendiliğinden sönümlü dalga adı verilen ışık, metal filmin içine nüfuz eder. Belli bir kırılma açısında bu dalga, metal yüzeydeki serbest elektronların yüzey plazmonları oluşturmaya sebep olur ve yansıyan ışığın yoğunluğu düşer. Bu olaya yüzey plazmon rezonans denir. Bu olay metal iyonlarının belli bir frekans değerinde kolektif titreşimi olarak tanımlanır. Ayrıca parçacık boyutu ayarlanarak titreşim frekansının rezonans değeri ayarlanabilmektedir. Işık fotonları ve metal yüzeyindeki elektronlar arasında bir eşleşme ve/veya rezonans yakalandığında enerji transferi gerçekleşir. Bu enerji transferi, metal filmin alt yüzeyinden yansıyan ışığın miktarının ölçülmesiyle belirlenebilir (Szentirmay, 1991).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1. CdS Altlıkların Hazırlanması

Bu çalışmanın ilk aşamasında tek kristal CdS altlıklar Şekil 18’de gösterilen Metkon marka micracut 150 model hassas kesme makinası ile 2,5 mm kalınlığında kesilerek 3 adet altlık elde edildi. Elde edilen bu tek kristal CdS altlıkların yüzeyleri 3000’lik ince zımpara ile düzgünleştirildi ve parlatma macunu ile parlatıldı. Hazırlanan altlıklar etil alkol ile temizlendi. Şekil 19’da CdS malzemesinin temizlenme ve parlatma aşamaları gösterildi.



Şekil 18. Hassas kesme makinası



Şekil 19. Tek kristal CdS altlıkların hazırlanması

Hazırlanan tek kristal CdS altlıkların X-ışını kırınım analizi yapıldı. Analizler Şekil 20’de gösterilen Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi kullanılarak gerçekleştirildi. Analiz sırasında 40 keV’luk bir gerilim ve 30 mA’lık bir akım uygulanarak elde edilen $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda = 1,5408 \text{ \AA}$) X-ışını kullanıldı. Analiz oda sıcaklığında, $20^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$ aralığı boyunca $0,02^\circ$ ’lik adımlar ile gerçekleştirildi. Analiz sonucunda elde edilen veriler kullanılarak X-ışını kırınım deseni grafiği çizildi.



Şekil 20. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi

En temel şekilde örgü parametreleri X-ışını kırınım desenlerindeki en yüksek pikler kullanılarak hesaplanabilir. CdS kübik veya hekzagonal yapıya sahip olabilir. Bu çalışmada kullanılan CdS hekzagonal yapıya sahiptir. Hekzagonal yapıda bulunan CdS için;

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (54)$$

ifadesi kullanılır. Bu ifade yardımıyla a ve c örgü parametreleri hesaplanır. Bu ifadede d düzlemler arası mesafeyi ve h, k, l ise miller indislerini göstermektedir.

Örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde (002) düzlemine ait tek bir baskın pik görülmektedir. Bu nedenle örnekler için sadece c örgü parametresi hesaplandı.

Tek kristal CdS malzemesinin tanecik boyutu Scherrer formülü kullanılarak hesaplandı (Kareem vd., 2019).

$$D = \frac{0,9\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (55)$$

Burada β kırınım genişlemesinden elde edilen radyan cinsinden yarı maksimumdaki tam genişlik, θ Bragg açısı, D tanecik boyutu ve λ ise X-ışınları dalga boyudur.

Yarıiletken malzemelerin bant yapılarının belirlenmesinde optik ölçümler kullanılmaktadır. Optik ölçümler ile yarı iletken malzemelerin yasak enerji aralığı bulunur.

Bu çalışmada tek kristal CdS altlık malzemesinin optik özellikleri oda sıcaklığında 450-850 nm aralıklı UV-Vis. spektrofotometre (SpektraMax M5) cihazı kullanılarak elde edildi. Şekil 21’de optik ölçümlerde kullanılan spektrofotometre cihazı gösterildi.



Şekil 21. SpektraMax M5 UV-Vis. spektrofotometresi

Optik geçirgenlik ölçümlerinden elde edilen veriler ile $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiği çizilerek tek kristal CdS malzemesinin enerji band aralığı değeri hesaplandı. Enerji band aralığının hesaplanmasında kullanılan soğurma değeri aşağıdaki denklem kullanılarak bulundu (Işık vd., 2019).

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (56)$$

Burada α soğurma katsayısı, d ölçülen malzeme kalınlığı ve T geçirgenlik değeridir. Tek kristal CdS’in enerji bant aralığı değeri, Tauc eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^p \quad (57)$$

Burada A malzemenin kırılma endeksine bağlı bir parametre ve p doğrudan geçiş için $\frac{1}{2}$ dolaylı geçiş için 2 olarak alınır. Elde edilen veriler kullanılarak çizilen $h\nu-(\alpha h\nu)^2$ grafiğinin geçiş bölgesinin olduğu kısımdaki doğrusal kısım belirlenerek enerji ekseninin kestiği nokta yardımı ile örneklerin enerji band aralığı değeri belirlenir.

n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumu ölçümünde Şekil 22’de gösterilen DONGWOO OPTRON marka spektrofotometre deney düzeneği kullanıldı.



Şekil 22. DONGWOO OPTRON spektrofotometre deney düzeneği

Tek kristal CdS malzemesinin SEM görüntüleri JEOL marka JSM-6510 model taramalı elektron mikroskobu kullanılarak elde edildi. Şekil 23’de SEM sonuçlarının alındığı cihaz görülmektedir.

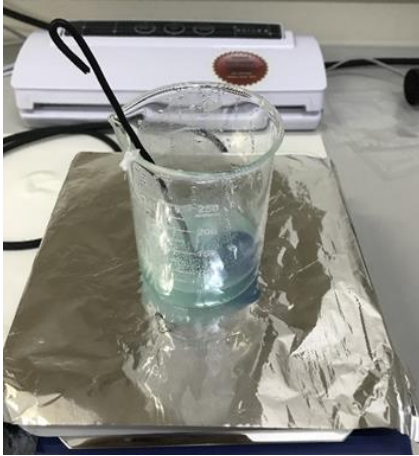
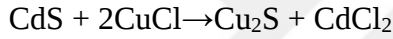


Şekil 23. JEOL marka JSM-6510 model taramalı elektron mikroskobu

Tek kristal CdS malzemesinin öz direnç değeri Van der Pauw yöntemi kullanılarak elde edildi. Hal ölçümlerinden ise taşıyıcı yoğunluğu hesaplandı.

2.2. Kimyasal Yöntem ile Cu Kaplama

50 ml saf su kullanılarak 0,1 M CuCl çözeltisi hazırlandı. Çözelti ısıtıcılı manyetik karıştırıcıda karıştırıldı ve 100 °C'ye kadar ısıtıldı. Bir yüzeyine indiyum kontak konulan tek kristal CdS'in diğer yüzeyinde 3 mm çapında bir alan bırakılarak maskeleme yapıldı. Örnek 100 °C'de doymuş CuCl çözeltisine 10 saniye daldırılıp çıkarıldı ve ardından saf suya 10 saniye daldırıldı. Aynı işlem 2 defa tekrarlandı. Bu işlem ile CdS/Cu ikili yapısı oluşturuldu. Heteroeklemin son oluşumunu sağlamak için ise bu ikili yapılar 180 °C'de 10 dk süresince hava ortamında tavlandı. Oluşturulan n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin fotovoltaiik ölçümlerinde 93 mW/cm² gücünde Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü kullanıldı. Şekil 24'de kullanılan kimyasal yöntem gösterildi. Cu₂S faz oluşumu, yüzeyde beliren gri renkle onaylandı. İyon değişimi sırasında takip edilen reaksiyon mekanizması aşağıdaki gibidir.



Şekil 24. Kullanılan kimyasal yöntem

2.3. Soğuk Altlık ve Klasik Vakum Buharlaştırma Yöntemi ile Cu Kaplama

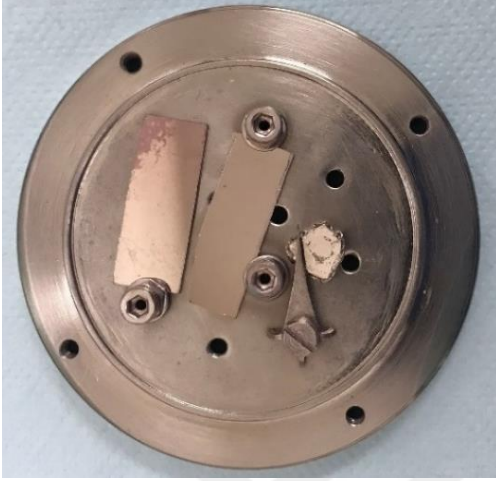
Bu çalışmada, soğuk altlık yöntemi ve klasik vakum buharlaştırma yöntemi ile tek kristal CdS altlık yüzeyine Cu buharlaştırılmasında kullanılan fiziksel buhar biriktirme ince film üretim cihazı (Vaksis PVD handy/1DLE-LN) Şekil 25'de verildi.



Şekil 25. Soğuk altlık yöntemi ve klasik vakum buharlaştırma yönteminde kullanılan cihaz

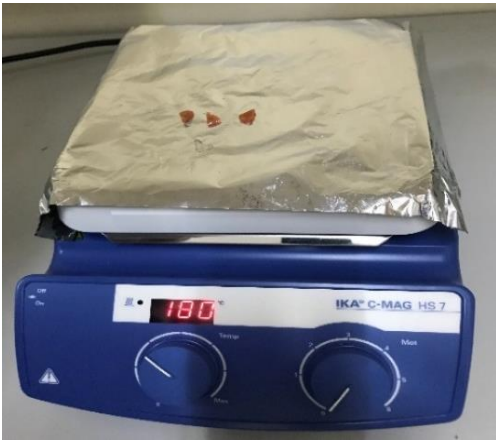
İnce film üretim aşamasında vakum kazanındaki tungsten kayıkçığa buharlaştırılacak malzeme (Cu) ve altlık tutucuya bir yüzeyine indiyum kontak konulan tek kristal CdS yerleştirildi. Buharlaştırma kaynağına takılı Tungsten kayıkçığa 0,650 gram %99,90 saflıkta (Sigma-Aldrich marka) Cu tartılarak konuldu. Sistemi vakuma alma işlemine geçilerek vakum kazan basıncının 1×10^{-5} Torr seviyesine ulaşması beklendi. Kazan basıncı 1×10^{-5} Torr seviyesine ulaştıktan sonra altlık malzemesinin soğutulması için sıvı azot haznesine sıvı azot doldurulmaya başlandı. Sıcaklık 200 K'e ulaşınca kadar azot ekleme işlemine devam edildi. 200 K altlık sıcaklığı ulaşıldıktan sonra termal güç kontrol PID'den güç değeri yavaş bir şekilde yükseltilerek tungsten kayıkçık üzerinden akım geçmeye başladı. PID 8,3'e ve akım değeri 56,4 A'e geldiğinde tungsten kayıkçığın kızarmaya ve yüksek akımla oluşan ısıdan dolayı Cu'ın eriyip buharlaşmaya başladığı görüldü. Doymuş buhar ortamı oluşuktan sonra kaplama işleminin başlaması için altlık kapama perdesi açıldı. Buharlaşan Cu'ın altlık malzemesini kaplaması 18 dakika sürdü. Kaplanan örneklerin düşük sıcaklıktaki vakum kazanından çıkartılması için sistem sıcaklığının oda sıcaklığına yükselmesi beklendi. Klasik vakum buharlaştırma yönteminde ise 300 K altlık sıcaklığında Cu ince film

üretildiği için azot ile soğutma yapılmadan yukarıda açıklanan adımlar takip edilerek doğrudan buharlaştırma işlemine geçilmiştir. Oluşturulan CdS/Cu ikili yapısı hava ortamında 180 °C’de 10 dakika süre ile tavlanaarak CdS/Cu₂S heteroeklemi oluşturuldu. Şekil 26’da Cu kaplı cam ve CdS yüzeyinin görüntüsü verildi.



Şekil 26. Cu kaplı cam ve CdS yüzeyinin görüntüsü

Kimyasal, soğuk altlık ve klasik vakum buharlaştırma yöntemleri ile elde edilen CdS/Cu ikili yapılarının tavlama sırasında kullanılan ısıtıcı cihaz Şekil 27’de gösterildi. Tavlama işlemi 180 °C’de 10 dakika süresince gerçekleştirildi. Tavlama sonucunda CdS/Cu₂S heteroeklem yapısı oluşturuldu.

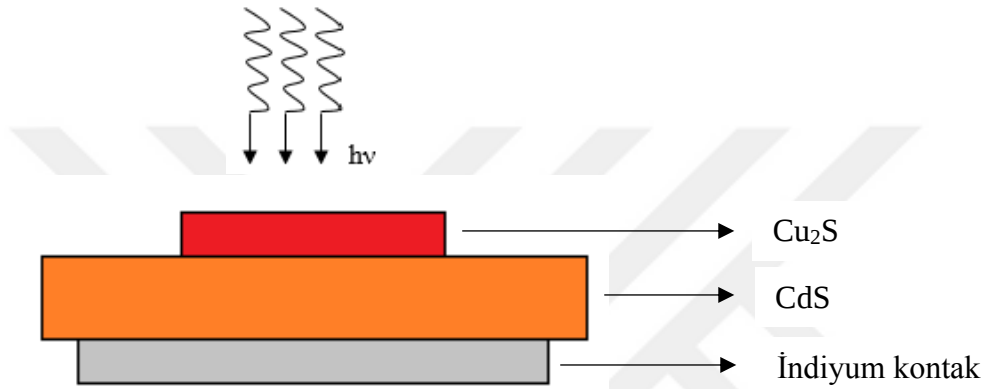


Şekil 27. Tavlama işleminde kullanılan ısıtıcı cihaz

Bilindiği üzere p-tipi CdS elde etmek çok zor bir süreçtir (Ashour, 2006). Bunun başlıca nedeni S boşluklarından kaynaklanmaktadır. S boşlukları verici özellikli bir kusurdur ve S atomları yüksek buhar basıncına sahiptir (Meyer, 1975). Bununla birlikte

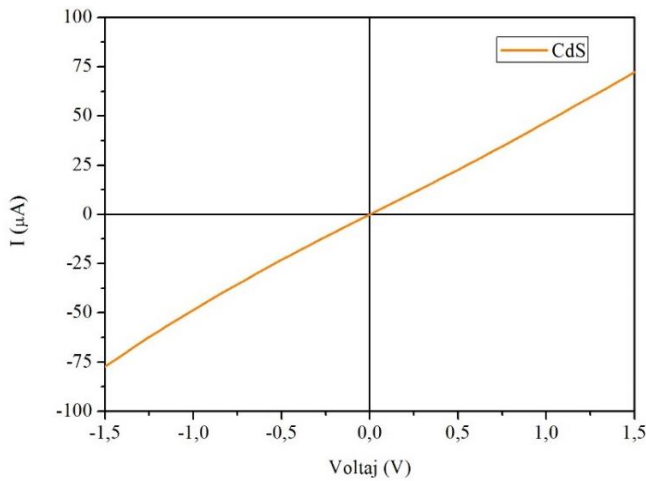
Cu atomlarının yüksek difüzyon katsayısına sahip olduğu bilinmektedir (Kuper vd., 1954). Cu_2S fazının oluşumu Cu atomlarının Cd boşluklarına yerleşmesi ile gerçekleşmektedir. Yapılan bu çalışmada uygulanan ısısal rejim ile Cu atomları ile S atomlarının birleşme olasılığının yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca güneş pillerinin çalışma alanı tespitinde 600 nm dalga boyundan sonra ışığa duyarlılığın Cu_2S fazından kaynaklandığı bilinmektedir (Islam ve Haque, 1982).

Üretilen güneş pillerinin şematik görünümü Şekil 28’de verildi.



Şekil 28. Üretilen n-CdS/p- Cu_2S güneş pilinin şematik modeli

Örneklerde omik kontak olarak kullanılan İndiyum metalinin omik kontak davranışının tespiti I-V ölçümleri ile yapıldı. Bilindiği üzere omik kontak yapımında kullanılan metalin iş fonksiyonunun yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçük olması gerekmektedir. Şekil 29’da görüldüğü üzere CdS’e omik kontak olarak uygulanan indiyum metali bu şartları sağlamaktadır.



Şekil 29. Omik kontak davranışının I-V grafiği ile tespiti

2.4. n-CdS/p-Cu₂S Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

200 K ve 300 K altlık sıcaklıklarında kaplanan Cu ince filmin FESEM görüntüleri Zeiss Sigma 300 model cihaz ile elde edildi. Şekil 30'da FESEM analiz cihazı görülmektedir.



Şekil 30. Zeiss Sigma 300 FESEM cihazı

n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin I-V ve C-V ölçümleri İvium CompactStat.h10800 elektrokimyasal ölçüm cihazı (galvonastat/potansiyostat) ile yapıldı. Aydınlık ortam ölçümlerinde ise 93 mW/cm² gücünde olan Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü kullanıldı. Şekil 31'de I-V ve C-V ölçümlerinde kullanılan elektrokimyasal ölçüm cihazı ve aydınlık ortam ölçümlerinde kullanılan güneş simülatörü gösterildi.

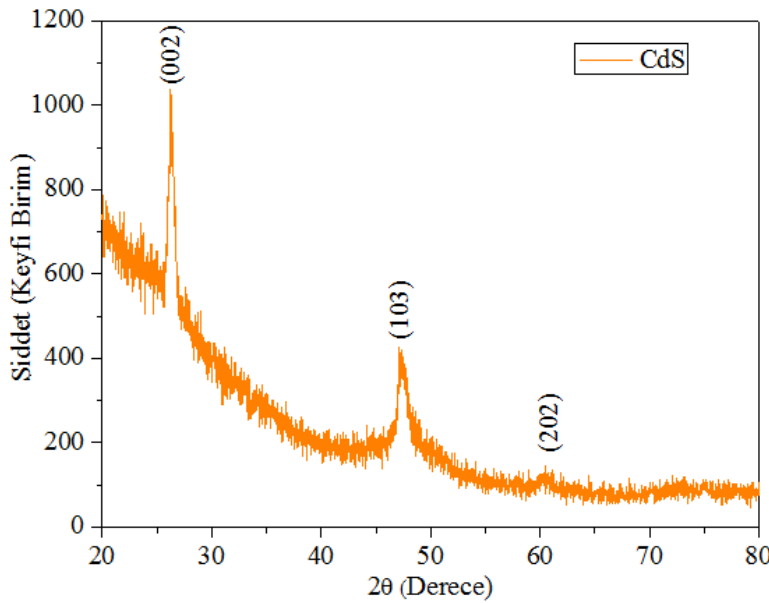


Şekil 31. Elektrokimyasal ölçüm cihazı ve güneş simülatörü

3. BULGULAR

3.1. CdS Altlık Malzemesinin X-Işını Kırınımı (XRD) Analiz Sonuçları

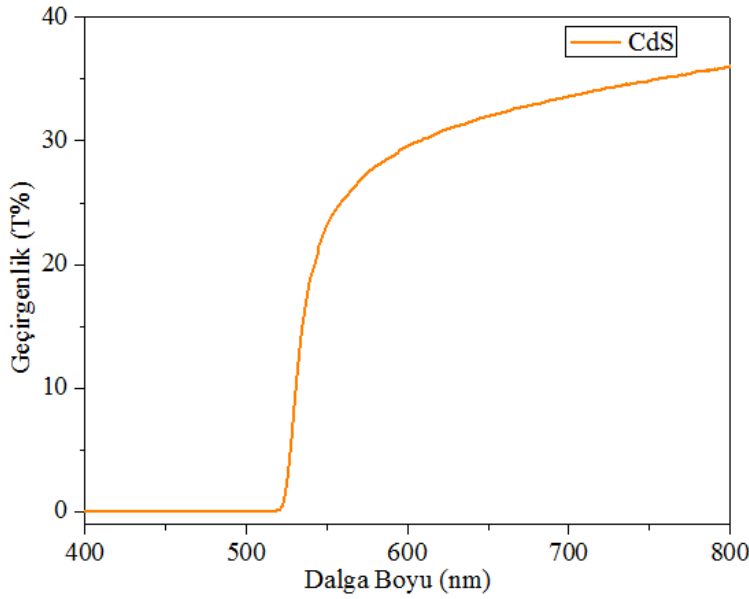
Tek kristal CdS'in X-ışını kırınımı analiz sonucu Şekil 32'de verildi. Şekilde X-ışını kırınım deseninde $2\theta = 26,61^\circ$ 'de pik şiddetinin aniden arttığı görüldü. Ayrıca $2\theta = 47,54^\circ$ ve $2\theta = 60,96^\circ$ 'de ortalananmış geniş ve düşük şiddetli yansıma pikleri görüldü. $2\theta = 26,61^\circ$ pikinin (002) düzleminde yansıdığı, $2\theta = 47,54^\circ$ pikinin (103) düzlemine yansıdığı ve $2\theta = 60,96^\circ$ pikinin (202) düzlemine yansıdığı görüldü. Bu bilgiler ışığında tek kristal CdS'in standart verilere göre (ICCD, PDF-4, 00-001-0783) hekzagonal yapıya sahip olduğu anlaşıldı. $2\theta = 26,61^\circ$ yüksek kırınım şiddetli piki referans alınarak Denklem (54) ile d düzlemler arası mesafe ve c örgü parametresi hesaplandı. Hesaplanan $c = 6,70$ Å ve $d = 3,35$ Å değerlerinin hekzagonal CdS için (ICCD, PDF-4, 00-001-0783) kartta verilen $c = 6,71$ Å ve $d = 3,36$ Å değerleri ile uyum içinde olduğu görüldü (Mahdi vd., 2013). Ayrıca tek kristal CdS'in $2\theta = 26,61^\circ$ 'de pik referans alınarak β değeri 0,21 derece (0,0037 radyan) olarak bulundu. Tanecik boyutu ise Denklem (55) kullanılarak $D = 38,49$ nm olarak hesaplandı. Bu değer Kareem vd. (2019) tarafından tek kristal CdS için hesaplanan 40,66 nm değeri ile benzerdir.



Şekil 32. Tek kristal CdS'in X-ışını kırınım deseni

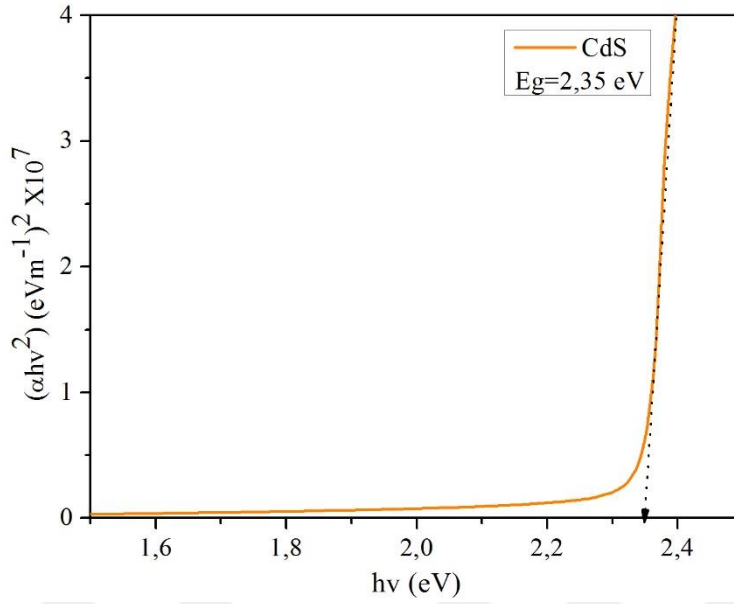
3.2. Optik Özelliklerin İncelenmesi

Şekil 33’de, 2,5 mm kalınlığındaki tek kristal CdS’in 400-800 nm dalga boyu aralığında elde edilen geçirgenlik spektrumu verildi. Spektrum, 550 nm’nin üzerinde yüksek optik geçirgenlik değerleri ortaya koymaktadır. Tek kristal CdS için elde edilen geçirgenlik spektrumunun Kareem vd. (2019) tarafından yapılan çalışmadaki sonuçlar ile benzer olduğu görüldü.



Şekil 33. Tek kristal CdS’in optik geçirgenlik grafiği

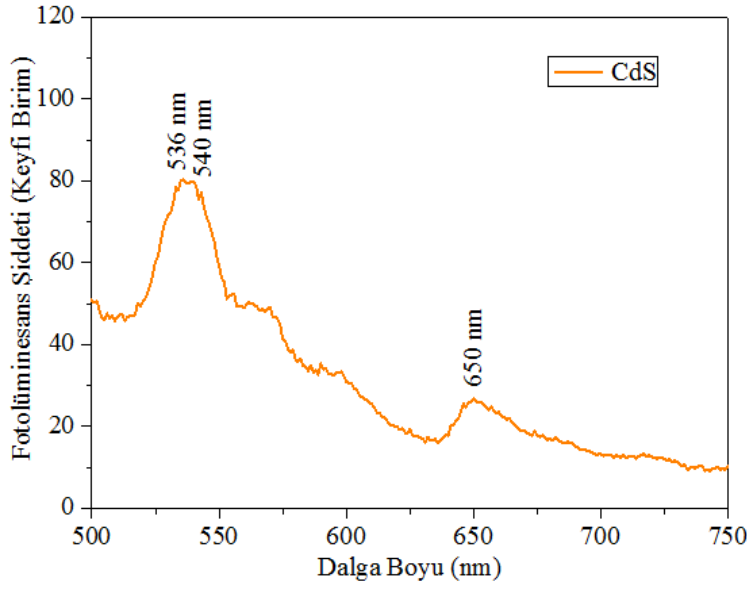
Şekil 34’de $(\alpha h\nu)^2$ ’nin foton enerjisine göre değişimi gösterildi. Tek kristal CdS’in enerji band aralığı değeri, grafiğin doğrusal kısmının x eksenini $(h\nu)$ ile kesiştirilmesi sonucu elde edildi. CdS enerji band değeri $E_g = 2,35$ eV olarak bulundu. Bu tek kristal CdS’in bant boşluğunun doğrudan olduğunu göstermektedir. Kareem vd. (2019) yaptıkları çalışmada tek kristal CdS’in enerji band aralığı değerini 2,36 eV olarak bulmuşlardır.



Şekil 34. Tek kristal CdS için $(\alpha hv)^2$ 'nin foton enerjisine göre değişim grafiği

3.3. Fotolüminesans Ölçümleri

Fotolüminesans ölçümleri, kristal yapıda bulunan kusurların (boşluk, arayer ve kirlilikler) tespit edilmesini sağlar. Bu bağlamda tek kristal CdS, 280 nm dalga boylu UV ışığı ile uyarılarak fotolüminesans ölçümleri oda sıcaklığında (300K) yapıldı. Şekil 35’de tek kristal CdS’e ait fotolüminesans spektrum grafiği verildi. Şekilde görüldüğü gibi tek kristal CdS malzemesinin 2 farklı dalga boyunda emisyon piki görülmektedir. Bunlar 536 nm ve 650 nm dir. 536 nm’deki pik sülfür boşluğunun ikinci iyonlaşma durumlarına bağlanmaktadır (Vs^+/Vs^{2+}) (Oualid vd., 1979). 650 nm’deki pik Cd boşluklarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca $\lambda=540$ nm’de zayıf bir emisyon olduğunu ve bunun da yüzey lokalize durumlarıyla rekombinasyona atfedildiği görüldü (Comparelli vd., 2003; Nogriya vd., 2008).

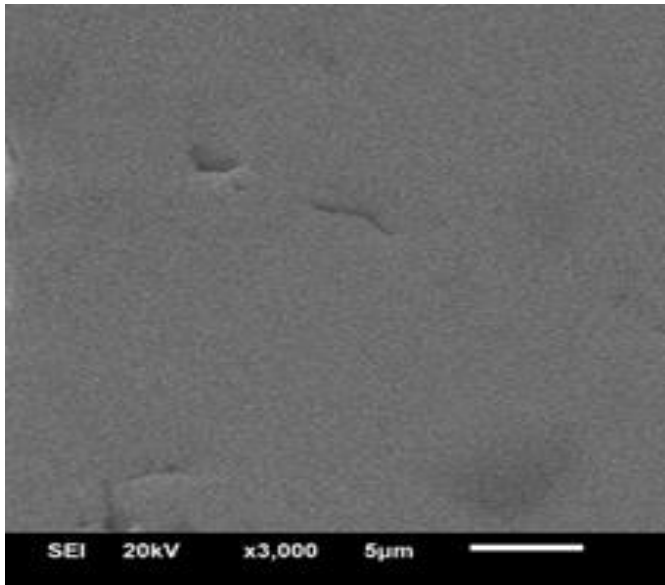


Şekil 35. Tek kristal CdS'in fotoluminesans grafiği

3.4. Taramalı Elektron Mikroskobu Ölçümleri ve Kimyasal Bileşim Analizi

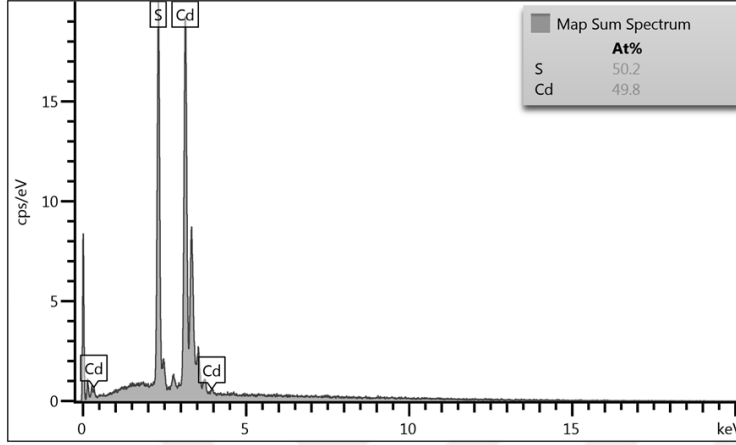
Sonuçları

Şekil 36'da temizlenmiş ve parlatılmış tek kristal CdS'in 3000 büyütölmüş SEM mikrogramı görölmektedir. Şekilden göröldüğü üzere tek kristal CdS oldukça yoğun ve homojen bir yapıya sahiptir. Ayrıca az sayıda hata ve çatlak bulunmaktadır. Tek kristal CdS'in SEM görüntüsünün literatür ile uyumlu olduğu göröldü (Kulkarni vd., 2018; Kadash vd., 2014).



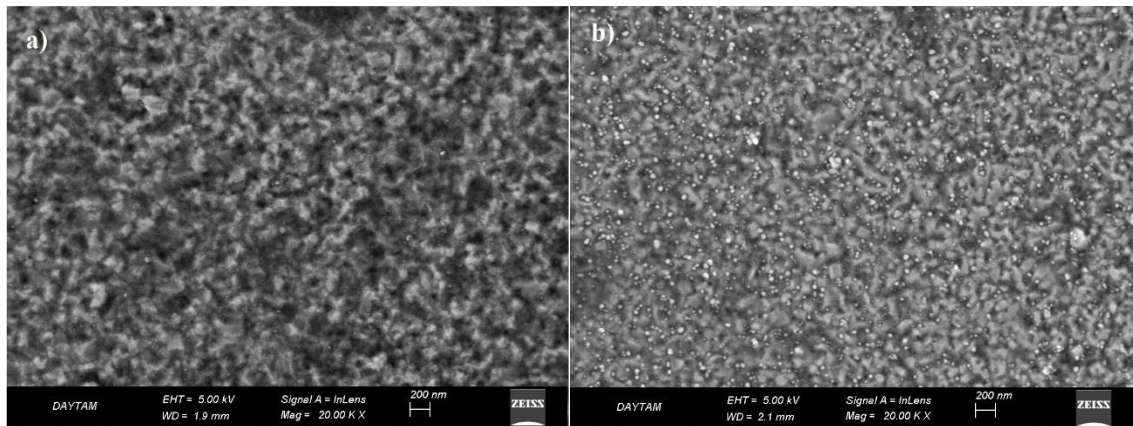
Şekil 36. Tek kristal CdS'in SEM görüntüsü

Şekil 37’de tek kristal CdS’in EDX spektrumu görülmektedir. Sonuçlar, kendi konsantrasyonlarına orantılı yoğunlukta Cd ve S piklerinin varlığını göstermektedir. EDX veri analizi, Cd:S atom oranının yüksek kalitede stokiyometrik CdS’in oluşumunu doğrulayan ~ 1: 1 olduğunu ortaya koymaktadır (Kulkarni vd., 2018).



Şekil 37. Tek kristal CdS’in EDX analiz grafiği

Şekil 38’de 200 K ve 300 K altlık sıcaklığında cam yüzeyinde üretilen Cu ince filmin FESEM görüntüsü verildi. 300 K altlık sıcaklığında cam yüzeyinin homojen olmayan farklı büyüklüklerde Cu taneleri ile kaplandığı ve adacık büyüme mekanizmasının gerçekleştiği görüldü. 200 K altlık sıcaklığında ise cam yüzeyi daha küçük boyutlu Cu taneleri ile kaplandı ve yüzeyin daha pürüzsüz ve homojen olduğu görüldü. Ayrıca 200 K altlık sıcaklığında cam yüzeyinde çok sayıda beyaz nano boyutlu taneler görüldü. Bu durum 200 K altlık sıcaklığında üretilen Cu katmanının farklı büyüme mekanizması (soliton) ile gerçekleştiğinin göstergesidir (Tomakin vd., 2011).



Şekil 38. Farklı altlık sıcaklıklarında üretilen Cu ince filmin FESEM görüntüsü
a) 300 K ve b) 200 K

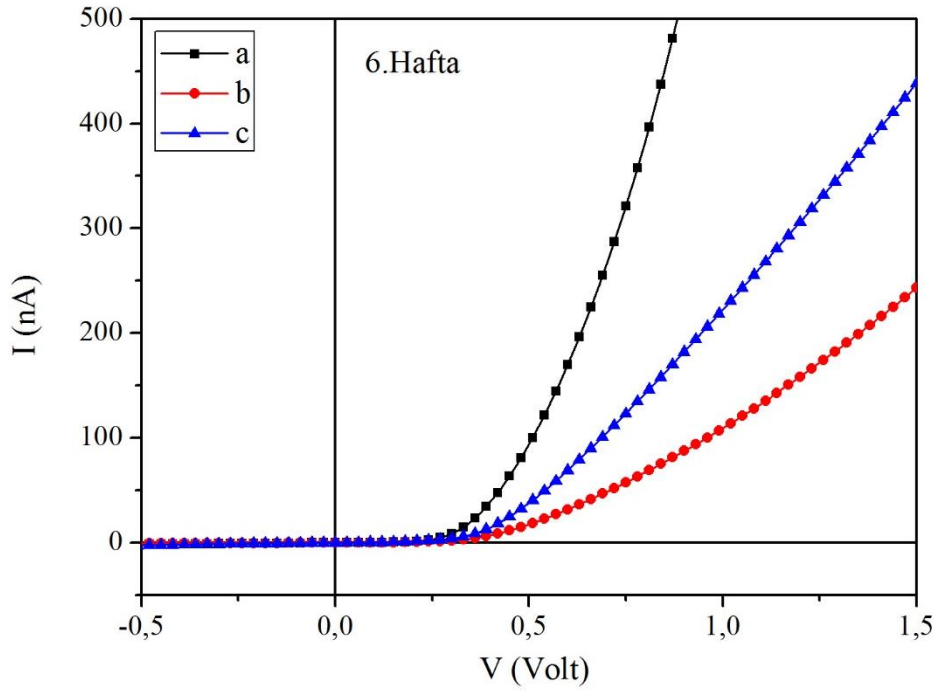
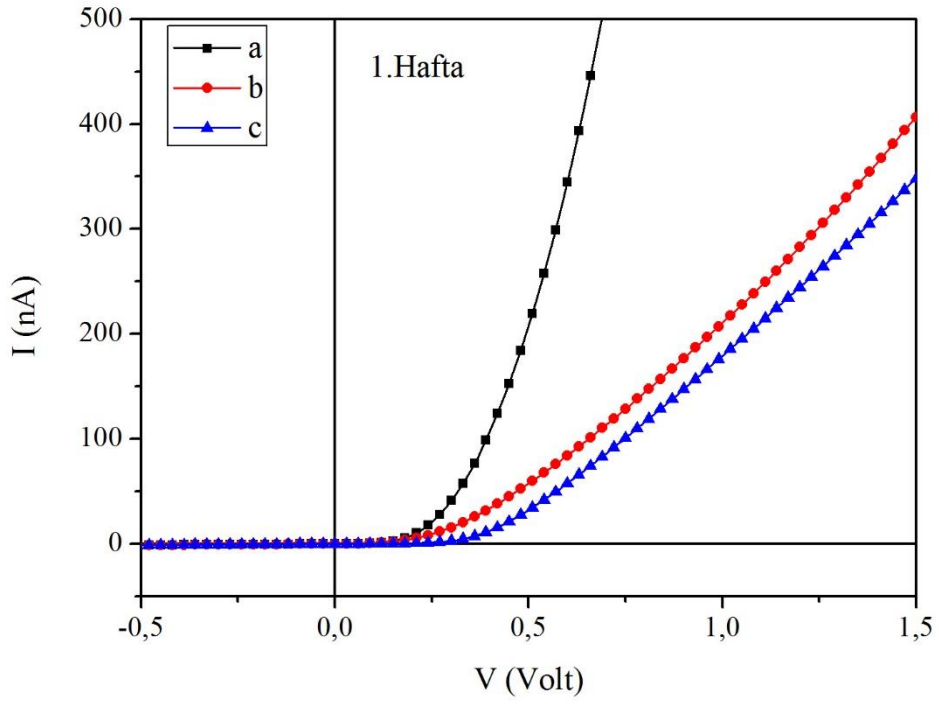
3.5. Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

Elektriksel özelliklerinde incelenmesinde ilk olarak tek kristal CdS malzemesinin hall ölçümlerinden taşıyıcı yoğunluğu $1,62 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Sankar vd. (2002) tarafından yapılan çalışmada ise CdS taşıyıcı yoğunluğu $1,86 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Tek kristal CdS malzemesinin Van der Pauw yöntemi ile ölçülen öz direnç değeri Denklem (36) ile $10,84 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak hesaplandı. Sankar vd. (2002) CdS için benzer öz direnç değerleri hesaplamışlardır.

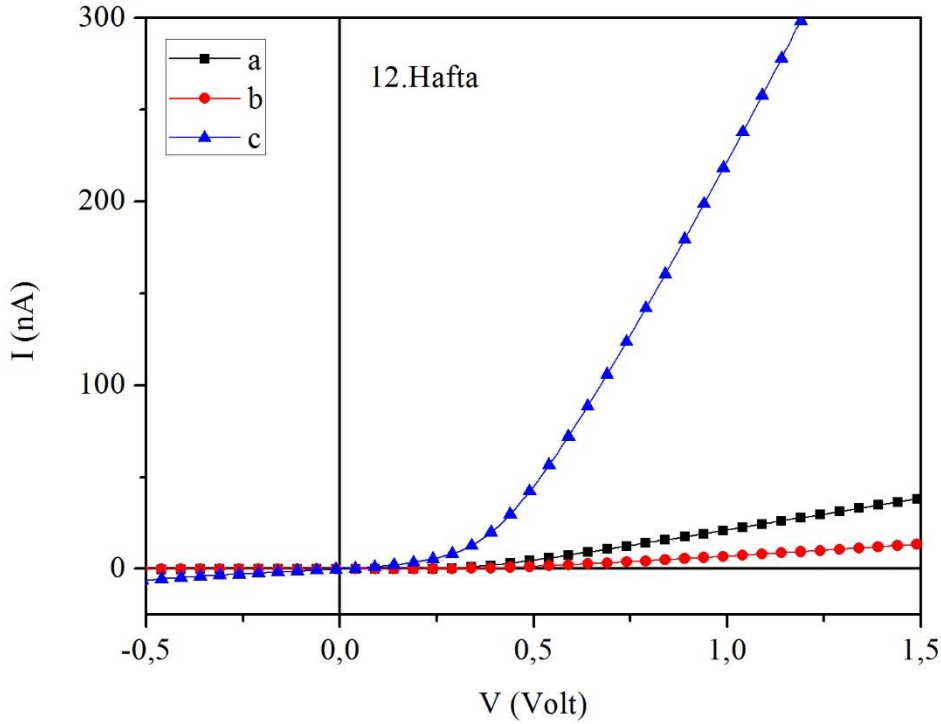
3.5.1. Akım-Gerilim Ölçümleri

Üretilen güneş pillerinin elektriksel özelliklerin ölçülmesi ile yöntemler arasındaki farklılıkların görülmesini sağlandı. Soğuk altlık yöntemi (200 K), klasik vakum buharlaştırma yöntemi (300 K) ve kimyasal yöntem kullanılarak üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin 12 hafta boyunca karanlık ve aydınlık (93 mW/cm^2) ortamda I-V ölçümleri yapıldı. I-V karakteristik eğrisi ile üretilen güneş pilleri için uygulanan gerilim değerlerine bağlı olarak üretilen akım değerleri ölçüldü. Bu ölçüm ile elde edilen fotovoltaiik parametreler sayesinde üç farklı yöntem kullanılarak üretilen güneş pillerinin bozulma süreci takip edildi. Ayrıca bu ölçüm, bir güneş hücresinin, diğerleriyle seri veya paralel olarak bağlanması ile istenen güç ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir devreye entegre etmek için gerekli tüm bilgileri sağlar.

Şekil 39’da 1., 6. ve 12. haftalara ait karanlık ortamda ölçülen I-V grafikleri verildi. Grafikler incelendiğinde I-V karakteristik eğrisi, artan gerilimle yavaşça artmaktadır. Üç farklı yöntem ile üretilen güneş pillerinin hepsi doğrultucu özellik göstermektedir. 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin daha iyi doğrultucu özellik gösterdiği Şekil 39’dan görülmektedir. Bu durum 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin daha düşük idealite faktörüne sahip olacağını göstermektedir.



Şekil 39. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait karanlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K



Şekil 39 (devamı). Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait karanlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

Güneş pillerinin karanlık ortamda ölçülen I-V grafikleri diyot özelliği göstermektedir. Heteroeklemdeki akım-gerilim ilişkisi genellikle difüzyon modeli, emisyon modeli veya rekombinasyon modellerinden standart diyot denklemi ile tanımlanır (Sze, 2007; Neville, 1995).

$$I_d = I_0 [\exp (eV/nkT) - 1] \quad (58)$$

Burada, e elektrik yükü, n idealite faktörü, k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akımıdır. Denklemden her iki tarafın logaritması alınır ve V ' ye göre türevi alınırsa " n " idealite faktörü aşağıdaki ifade ile hesaplanır;

$$n = \frac{q}{kT} \frac{dV}{d(\ln I)} \quad (59)$$

$\ln(I)$ -V grafiğinin doğru besleme durumunda lineer kısmın eğimi kullanılarak $dV/d(\ln I)$ değeri bulunur. Denklem 59'da q elektron yükü ($1,6 \times 10^{-19}$ C), k Boltzmann sabiti ($8,625 \times 10^{-5}$ eV/K) ve T Kelvin cinsinden sıcaklık değerlerini ifade etmektedir. I_0

doyma akımı değeri ise $\ln(I)$ -V grafiğinin doğru beslemedeki lineer kısmının eğiminden geçen eğrinin eksenini kestiği noktadan bulunur. Doyma akımı,

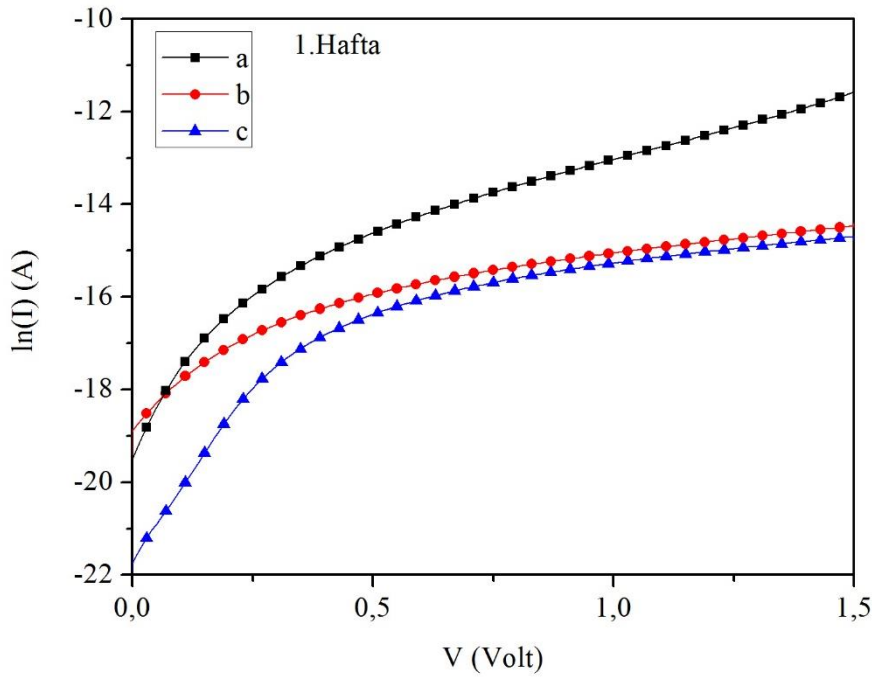
$$I_o = AA^*T^2 \exp(-q\phi_b/kT) \quad (60)$$

denklemini ile ifade edilir. Denklemin logaritması alınarak ϕ_b 'ye göre çözülürse,

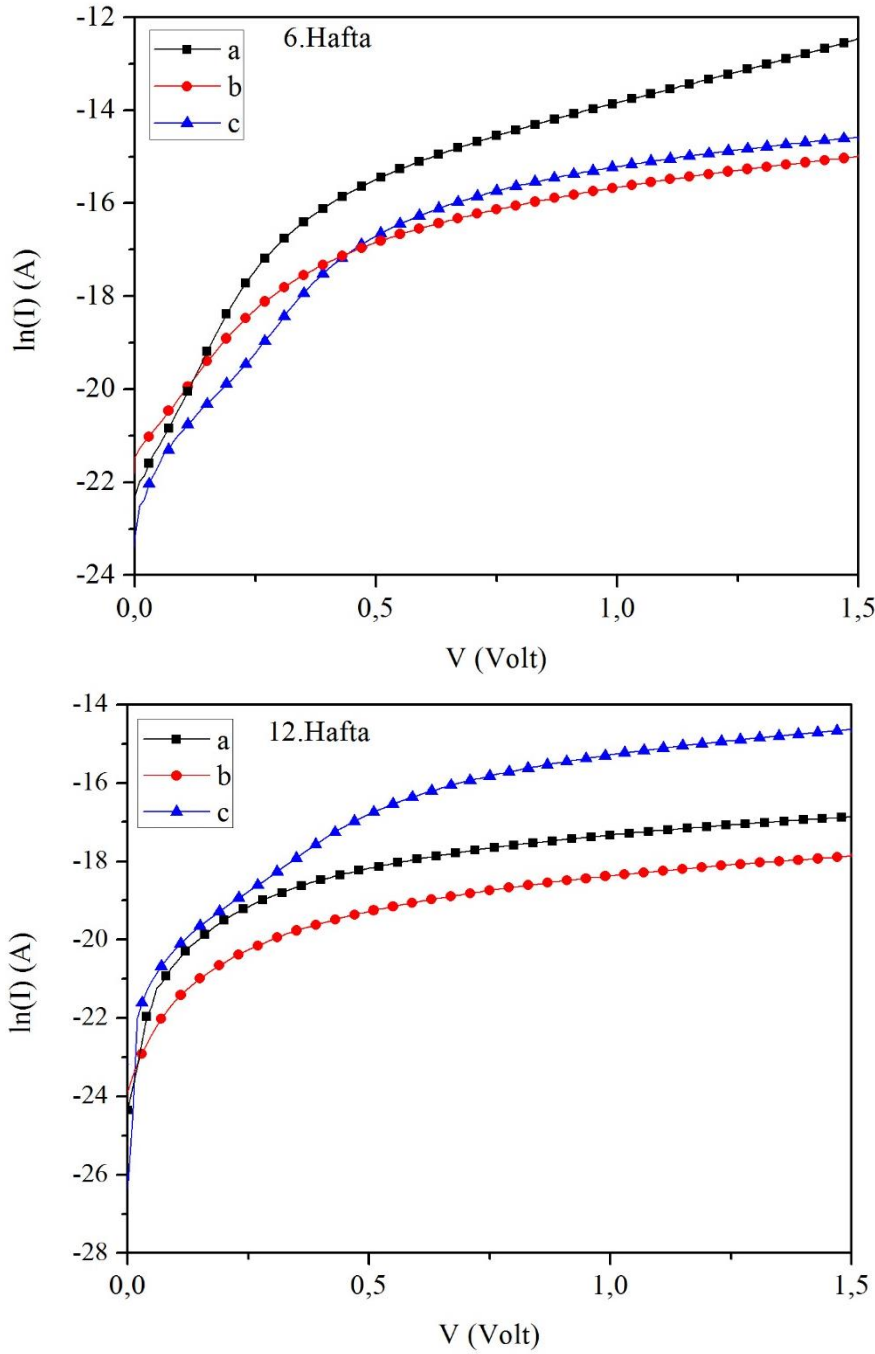
$$\phi_b = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_o}\right) \quad (61)$$

engel yüksekliği denklemini bulunur. Denkleminde A güneş pilinin etkin alanı ($A = 0,07 \text{ cm}^2$), A^* Richardson sabiti (CdS için $A^* = 23 \text{ A/cm}^2\text{K}^2$) ifade etmektedir (Wu vd., 2012).

Şekil 40'da 1., 6. ve 12. haftalara ait 200 K, 300 K altlık sıcaklıklarında ve kimyasal yöntem ile üretilmiş güneş pillerinin doğru besleme yarı logaritmik I-V karakteristik grafikleri verildi.



Şekil 40. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait doğru besleme yarı logaritmik I-V karakteristik grafikleri
a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K



Şekil 40 (devamı). Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait doğru besleme yarı logaritmik I-V karakteristik grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

Tablo 6’da üç farklı yöntem ile üretilmiş güneş pillerinin idealite faktörü (n), engel yüksekliği (ϕ_b) ve doyma akımı (I_0) değerleri verildi. 200 K altlık sıcaklığında üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinde ideal değere daha yakın idealite değerleri elde edilirken 300 K altlık sıcaklığında ideal değerden oldukça yüksek değerler elde edildi. Literatürdeki çalışmalarda benzer sonuçlar görülmektedir (Ashour, 1989; Bube vd., 1977). n

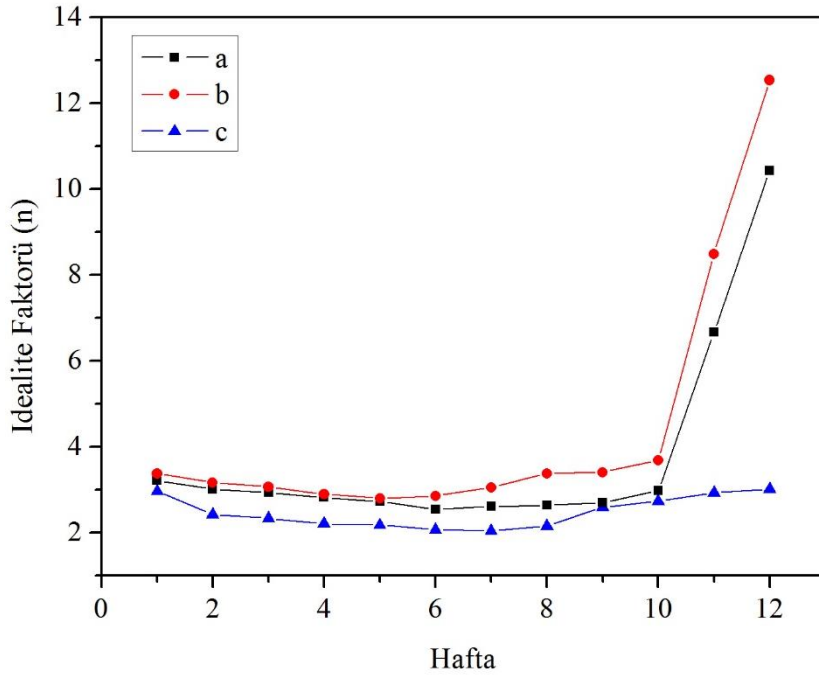
değerlerindeki artış hücrelerin ideal olmadığını ve taşıyıcıların (elektronlar ve delikler) çoğunun birleşme (tükenme) bölgesinde rekombinasyona uğradığını gösterir (Prasad vd., 1986; Darwish vd., 1995). Bu nedenle, gerilim arttıkça akım, taşıyıcı rekombinasyonu ile sınırlanır. Bu, n-CdS/p-Cu₂S heteroekleminin örgü uyumsuzluğundan kaynaklanabilir ve bu da çok sayıda arayüzey durumuna neden olabilir (Prasad vd., 1986). Ayrıca Ashour (1995) ve Ashour vd. (2005) CdTe/CdS ve CuInSe₂/CdTe cihazları için daha yüksek n değerleri elde etmiş ve üretim rekombinasyon süreçleri nedeniyle bunu belirtmişlerdir. İdealite değerleri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili için 7. haftaya kadar azalırken 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili için 5.haftaya kadar azalmaktadır. Daha sonra ise hızla artmaktadır. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pilinde idealite değeri 6.haftaya kadar azalırken daha sonra hızla artmaktadır. Bu durum heteroeklemin bozulma süreci ile ilgilidir ve CdS yüzeyindeki bakırın difüzyonuna bağlanabilir.

Engel yüksekliği değerlerine bakıldığında 200 K altlık sıcaklığında üretilen heteroeklemin en yüksek değere sahip olduğu görüldü. En düşük engel yüksekliği değerinin ise 300 K altlık sıcaklığın da üretilen heteroekleme ait olduğu görüldü. Heteroekleminde, yüzey durumları var ise engel yüksekliğinin arttığı bilinmektedir (Goodman, 1963; Cowley ve Sze, 1965). Yüzey durumları ise engel yüksekliğinde artışa neden olmaktadır. 200 K altlık sıcaklığında üretilen örneğin 300 K altlık sıcaklığında üretilen örneğe göre daha küçük parçacık boyutuna sahip olması, tane sınırlarının ve dolayısıyla yüzey durumlarının daha fazla olmasına neden olmaktadır. Bu durum ise engel yüksekliğini arttırmaktadır. Lepley vd. (1979) tarafından vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS/Cu₂S heteroekleminde engel yüksekliği 0,51-0,92 eV arasında bulunmuştur. Doyma akımı değerlerinin ise 200 K altlık sıcaklığında üretilen heteroekleminde en düşük olduğu görüldü. En yüksek doyma akımı değeri ise 300 K altlık sıcaklığında üretilen heteroekleminde görüldü.

Tablo 6. Güneş pillerine ait n , ϕ_b ve I_0 değerleri

Ölçümler		n	ϕ_b (eV)	I_0 (A)
1. Hafta	K.Y.	3,22	0,812	$3,364 \times 10^{-9}$
	300 K	3,38	0,799	$5,603 \times 10^{-9}$
	200 K	2,97	0,869	$3,627 \times 10^{-10}$
2. Hafta	K.Y.	3,01	0,858	$5,674 \times 10^{-10}$
	300 K	3,17	0,819	$2,511 \times 10^{-9}$
	200 K	2,43	0,878	$2,575 \times 10^{-10}$
3. Hafta	K.Y.	2,94	0,870	$3,582 \times 10^{-10}$
	300 K	3,07	0,834	$1,412 \times 10^{-9}$
	200 K	2,34	0,896	$1,285 \times 10^{-10}$
4. Hafta	K.Y.	2,82	0,870	$3,496 \times 10^{-10}$
	300 K	2,90	0,848	$8,261 \times 10^{-10}$
	200 K	2,21	0,902	$1,012 \times 10^{-10}$
5. Hafta	K.Y.	2,73	0,873	$3,165 \times 10^{-10}$
	300 K	2,80	0,859	$5,479 \times 10^{-10}$
	200 K	2,18	0,904	$9,544 \times 10^{-11}$
6. Hafta	K.Y.	2,55	0,884	$2,053 \times 10^{-10}$
	300 K	2,86	0,860	$5,297 \times 10^{-10}$
	200 K	2,08	0,908	$8,176 \times 10^{-11}$
7. Hafta	K.Y.	2,61	0,897	$1,230 \times 10^{-10}$
	300 K	3,05	0,862	$4,751 \times 10^{-10}$
	200 K	2,05	0,918	$5,459 \times 10^{-11}$
8. Hafta	K.Y.	2,64	0,903	$9,889 \times 10^{-11}$
	300 K	3,38	0,878	$2,634 \times 10^{-10}$
	200 K	2,16	0,932	$3,240 \times 10^{-11}$
9. Hafta	K.Y.	2,70	0,909	$7,783 \times 10^{-11}$
	300 K	3,41	0,899	$1,151 \times 10^{-10}$
	200 K	2,59	0,935	$2,872 \times 10^{-11}$
10. Hafta	K.Y.	2,98	0,919	$5,348 \times 10^{-11}$
	300 K	3,69	0,906	$8,627 \times 10^{-11}$
	200 K	2,74	0,966	$8,544 \times 10^{-12}$
11. Hafta	K.Y.	6,67	0,928	$3,718 \times 10^{-11}$
	300 K	8,49	0,911	$7,351 \times 10^{-11}$
	200 K	2,93	0,978	$5,475 \times 10^{-12}$
12. Hafta	K.Y.	10,43	0,936	$2,795 \times 10^{-11}$
	300 K	12,54	0,924	$4,360 \times 10^{-11}$
	200 K	3,02	1,000	$2,196 \times 10^{-12}$

Şekil 41’de üç farklı yöntem ile üretilmiş güneş pillerinin idealite faktörünün haftalık değişimi grafiği verildi.



Şekil 41. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin idealite faktörünün haftalık değişimi a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

Şekil 42’de 1., 6. ve 12. haftalara ait 200 K, 300 K altlık sıcaklıklarında ve kimyasal yöntem ile üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin aydınlık ortamda (93 mW/cm²) ölçülen I-V grafikleri verildi. 12 hafta boyunca aydınlıkta yapılan I-V ölçümlerinden kısa devre akımı (I_{sc}), açık devre gerilimi (V_{oc}), doldurma faktörü (FF), maksimum güç (P_{max}), hücre verimi (η) ve akım yoğunluğu (J_{sc}) değerleri hesaplandı. Açık devre gerilimi (V_{oc}), sıfır akımda meydana gelen maksimum gerilimdir. Kısa devre akımı (I_{sc}) ise sıfır gerilimde hücreden elde edilen akımdır. Güneş pilindeki toplam akım,

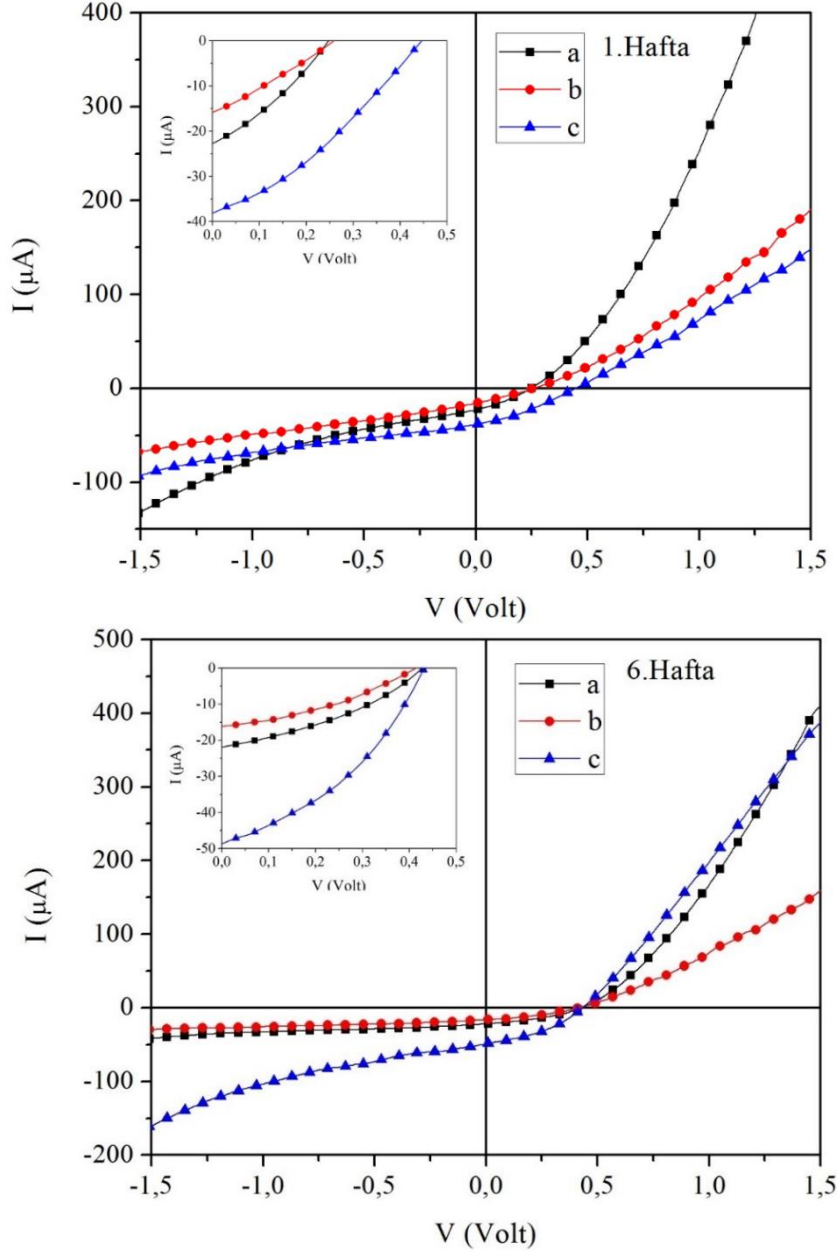
$$I = -I_{ph} + I_0[\exp(eV/nkT) - 1] \quad (62)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada I_0 doyma akımı, n idealite faktörü, k Boltzman sabiti, T mutlak sıcaklık ve I_{ph} foto akımdır.

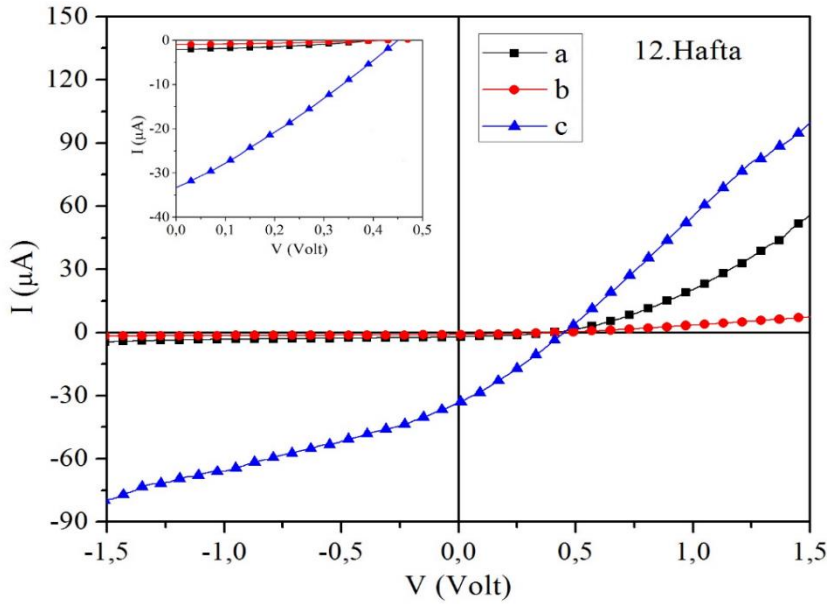
Güneş pillerinde aydınlık ortamda ölçülen I-V karakteristik eğrileri kullanılarak fotovoltaiik parametreler hesaplandı. Doldurma faktörü (FF), 0 ile 1 arasında değişen ve bir hücrenin V_{oc} ve I_{sc} 'ye göre performansını ifade eden bir değerdir. Doldurma faktörü (FF) ve foto dönüşüm verimliliği (% η) aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplandı (Savariraj vd., 2014).

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (63)$$

$$\eta(\%) = \frac{I_{max} \times V_{max}}{P_{in}} \times 100 \quad (64)$$



Şekil 42. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait aydınlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K



Şekil 42 (devamı). Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait aydınlık ortam I-V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

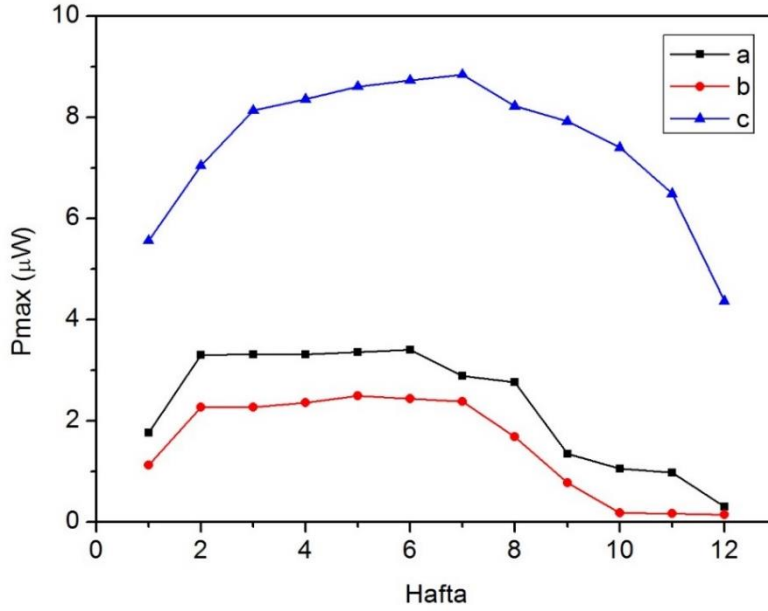
Tablo 7’de ışık altında I-V ölçümlerinden hesaplanan kısa devre akımı (I_{sc}), akım yoğunluğu (J_{sc}) açık devre gerilimi (V_{oc}), maksimum güç (P_{max}), doldurma faktörü (FF) ve hücre dönüşüm verimliliği (η) değerleri verildi. Tablodan görüldüğü üzere en yüksek I_{sc} , J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF ve η değerleri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aitken en düşük değerler 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aittir. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pili en yüksek verim ve güç değerlerine 6. haftada ulaşırken 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili 5. haftada ulaştı. 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili ise 7.haftada en yüksek verim ve güç değerlerine ulaştı. Güneş pilleri incelendiğinde en hızlı bozulma sürecinin 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde meydana geldiği görüldü. En yavaş bozulma sürecinin ise 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline ait olduğu görüldü. Kimyasal yöntemde bozulma sürecinin 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline göre yüksek olmasının nedeni olarak CuCl çözeltisinin CdS yüzeyindeki mikro çatlaklardan difüze olması sonucu gerçekleştiği düşünülmektedir. 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde ise Cu katmanının farklı boyutlu adacıklar ile kaplanması ve taneciklerin hareketliliğinin fazla olması sonucu difüzyonun daha hızlı gerçekleşmesi bozulma sürecini hızlandırdığı düşünülmektedir. Islam ve Haque, (1982) vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinde açık devre gerilimlerini 0,45-0,47 V ve kısa devre akım yoğunluklarını 14-16 mA.cm⁻² ve hücre verimleri %4,8 ile %5 arasında bulmuştur. Taur

vd. (2012) kimyasal yöntem ile üretilen CdS/Cu₂S güneş pilinin dönüşüm verimliliğini tavllanmış numunede $\eta=0,24$ tavlınmamış numunede ise $\eta=0,09$ olarak bulmuştur. Lu vd. (2019), kimyasal buhar biriktirme yöntemi ile üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pilinin kısa devre akımı, açık devre gerilimi, doldurma faktörü ve güç dönüşüm verimliliğini, sırasıyla 0,152 nA, 0,245 V, 0,445 ve %0,405 olarak hesaplamıştır.

Tablo 7. Güneş pillerinin bazı elektriksel parametrelerinin değerleri

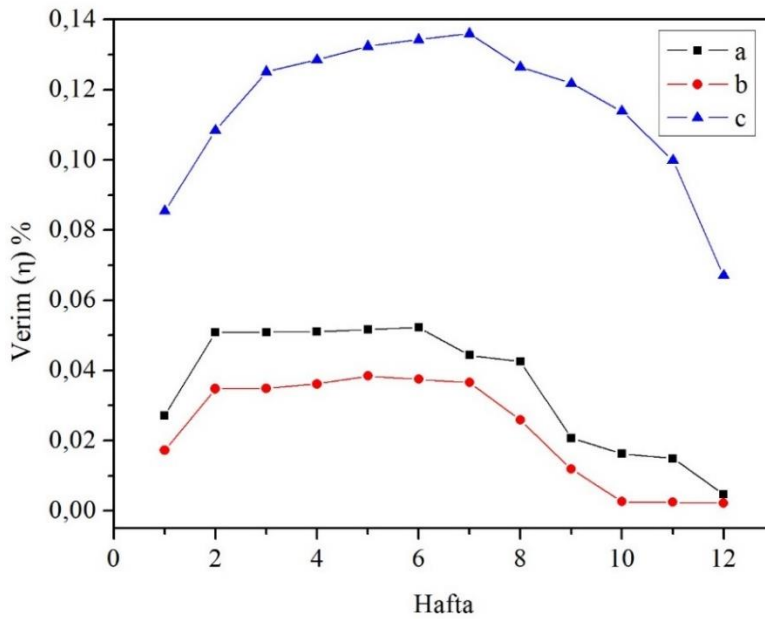
Ölçümler		I _{sc} (A)	J _{sc} (A/m ²)	V _{oc} (V)	P _{max} (W)	FF	η (%)
1. Hafta	K.Y.	2,273x10 ⁻⁵	3,247	0,24	1,763x10 ⁻⁶	0,3232	0,0271
	300 K	1,584x10 ⁻⁵	2,263	0,25	1,124x10 ⁻⁶	0,2840	0,0173
	200 K	3,818x10 ⁻⁵	5,455	0,44	5,559x10 ⁻⁶	0,3309	0,0855
2. Hafta	K.Y.	2,168x10 ⁻⁵	3,098	0,40	3,299x10 ⁻⁶	0,3804	0,0508
	300 K	2,097x10 ⁻⁵	2,995	0,35	2,265x10 ⁻⁶	0,3087	0,0348
	200 K	3,869x10 ⁻⁵	5,527	0,42	7,046x10 ⁻⁶	0,4336	0,1084
3. Hafta	K.Y.	2,469x10 ⁻⁵	3,527	0,37	3,308x10 ⁻⁶	0,3622	0,0509
	300 K	2,098x10 ⁻⁵	2,997	0,35	2,267x10 ⁻⁶	0,3087	0,0349
	200 K	4,448x10 ⁻⁵	6,355	0,45	8,133x10 ⁻⁶	0,4063	0,1251
4. Hafta	K.Y.	2,088x10 ⁻⁵	2,982	0,41	3,317x10 ⁻⁶	0,3875	0,0510
	300 K	1,663x10 ⁻⁵	2,376	0,41	2,354x10 ⁻⁶	0,3452	0,0362
	200 K	4,629x10 ⁻⁵	6,613	0,44	8,355x10 ⁻⁶	0,4102	0,1285
5. Hafta	K.Y.	2,169x10 ⁻⁵	3,099	0,42	3,353x10 ⁻⁶	0,3680	0,0516
	300 K	1,725x10 ⁻⁵	2,465	0,40	2,494x10 ⁻⁶	0,3615	0,0384
	200 K	4,742x10 ⁻⁵	6,774	0,44	8,605x10 ⁻⁶	0,4124	0,1324
6. Hafta	K.Y.	2,188x10 ⁻⁵	3,126	0,42	3,402x10 ⁻⁶	0,3702	0,0523
	300 K	1,617x10 ⁻⁵	2,310	0,41	2,438x10 ⁻⁶	0,3677	0,0375
	200 K	4,924x10 ⁻⁵	7,034	0,43	8,732x10 ⁻⁶	0,4124	0,1343
7. Hafta	K.Y.	1,883x10 ⁻⁵	2,691	0,42	2,884x10 ⁻⁶	0,3647	0,0444
	300 K	1,612x10 ⁻⁵	2,303	0,41	2,382x10 ⁻⁶	0,3604	0,0366
	200 K	5,524x10 ⁻⁵	7,891	0,44	8,840x10 ⁻⁶	0,3637	0,1360
8. Hafta	K.Y.	1,841x10 ⁻⁵	2,630	0,42	2,762x10 ⁻⁶	0,3572	0,0425
	300 K	1,172x10 ⁻⁵	1,674	0,41	1,682x10 ⁻⁶	0,3500	0,0259
	200 K	4,780x10 ⁻⁵	6,828	0,44	8,221x10 ⁻⁶	0,3909	0,1265
9. Hafta	K.Y.	0,906x10 ⁻⁵	1,294	0,41	1,345x10 ⁻⁶	0,3620	0,0207
	300 K	0,518x10 ⁻⁵	0,740	0,41	0,774x10 ⁻⁶	0,3645	0,0119
	200 K	5,102x10 ⁻⁵	7,289	0,43	7,914x10 ⁻⁶	0,3607	0,1218
10. Hafta	K.Y.	0,714x10 ⁻⁵	1,020	0,42	1,057x10 ⁻⁶	0,3523	0,0163
	300 K	0,113x10 ⁻⁵	0,161	0,42	0,172x10 ⁻⁶	0,3628	0,0026
	200 K	4,602x10 ⁻⁵	6,574	0,43	7,401x10 ⁻⁶	0,3740	0,1139
11. Hafta	K.Y.	0,654x10 ⁻⁵	0,934	0,41	0,972x10 ⁻⁶	0,3625	0,0150
	300 K	0,105x10 ⁻⁵	0,150	0,41	0,166x10 ⁻⁶	0,3864	0,0025
	200 K	4,240x10 ⁻⁵	6,057	0,42	6,491x10 ⁻⁶	0,3645	0,0999
12. Hafta	K.Y.	0,210x10 ⁻⁵	0,300	0,40	0,306x10 ⁻⁶	0,3640	0,0047
	300 K	0,098x10 ⁻⁵	0,140	0,42	0,141x10 ⁻⁶	0,3428	0,0022
	200 K	3,302x10 ⁻⁵	4,717	0,44	4,363x10 ⁻⁶	0,3003	0,0671

Şekil 43’de üç farklı yöntem kullanılarak üretilen güneş pillerinden elde edilen maksimum gücün haftalık değişim grafiği verildi.



Şekil 43. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin maksimum gücünün haftalık değişim grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

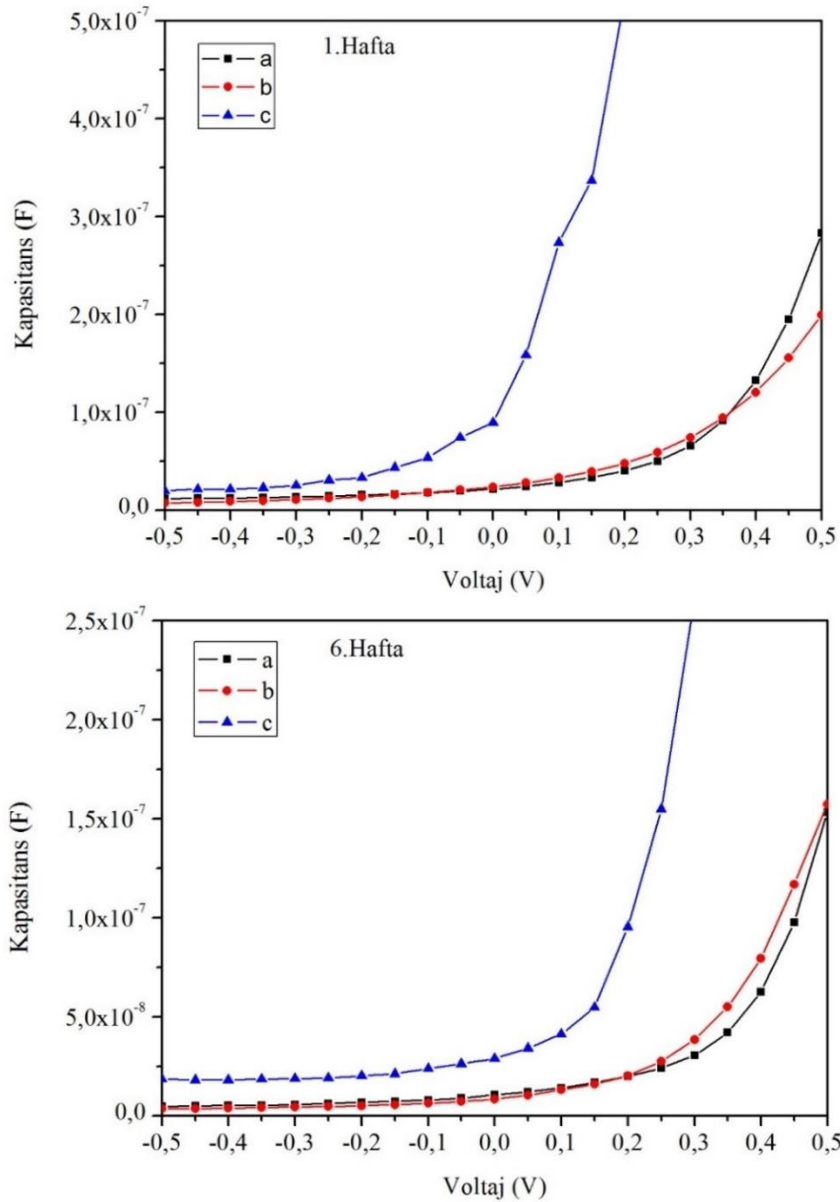
Şekil 44’de üç farklı yöntem ile üretilen güneş pillerinin verim değerlerinin haftalık değişim grafiği verildi.



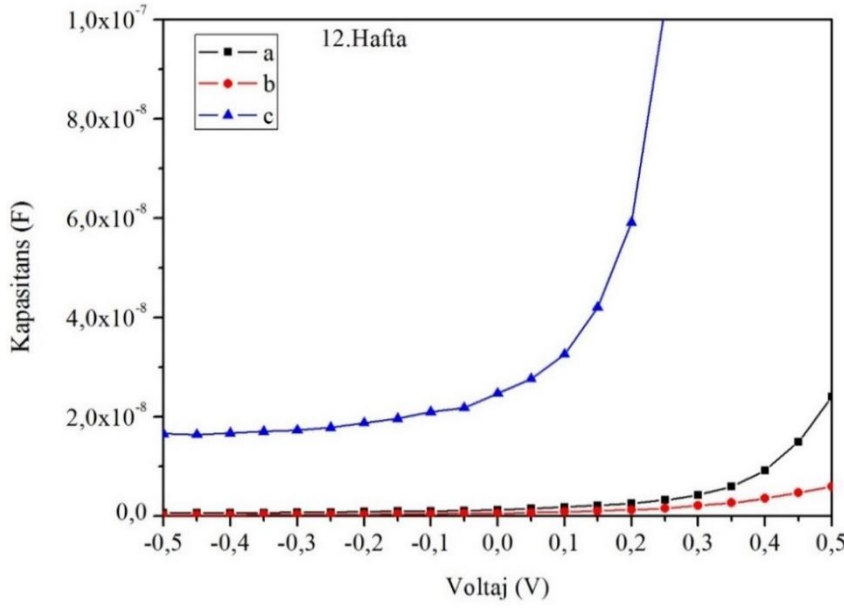
Şekil 44. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin veriminin haftalık değişim grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

3.5.2. Kapasitans-Gerilim Ölçümleri

3 farklı yöntem ile üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin C-V ölçümleri, -0,5 V ve +0,5 V aralığında 1000 Hz frekansta oda sıcaklığında yapıldı. Ölçüm süresince genlik değeri 20 mV olarak ayarlandı. C-V ölçümleri ile eklem engel potansiyeli (V_{bi}) ve katkı yoğunluğu (N_{cv}) değerleri hesaplandı. Şekil 45'de 1., 6. ve 12. haftalara ait C-V ölçümlerinden elde edilen grafikler verildi. Üç farklı yöntem kullanılarak üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pilleri için ileri besleme gerilimlerine doğru bilinen eklem davranışı görüldü (Rothwarf, 1982).

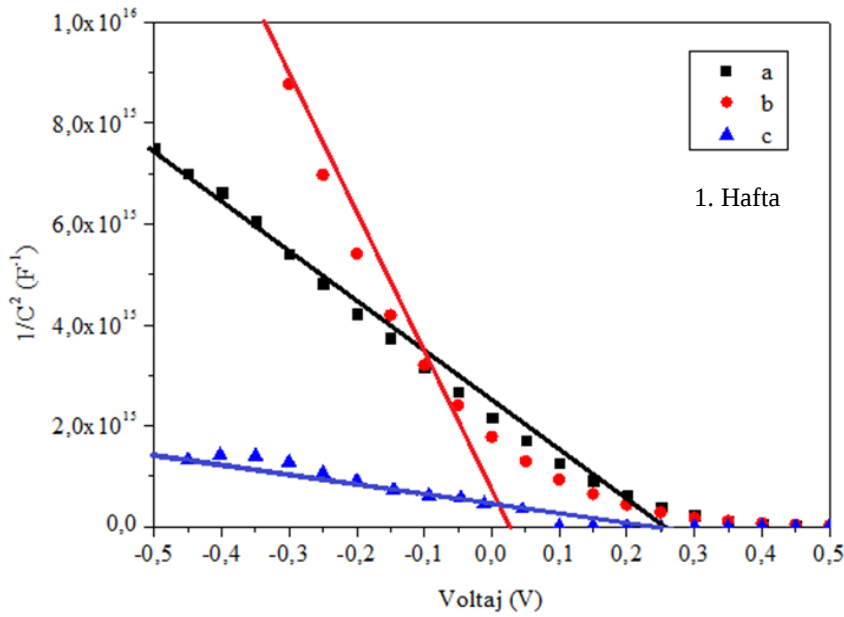


Şekil 45. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait C-V grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

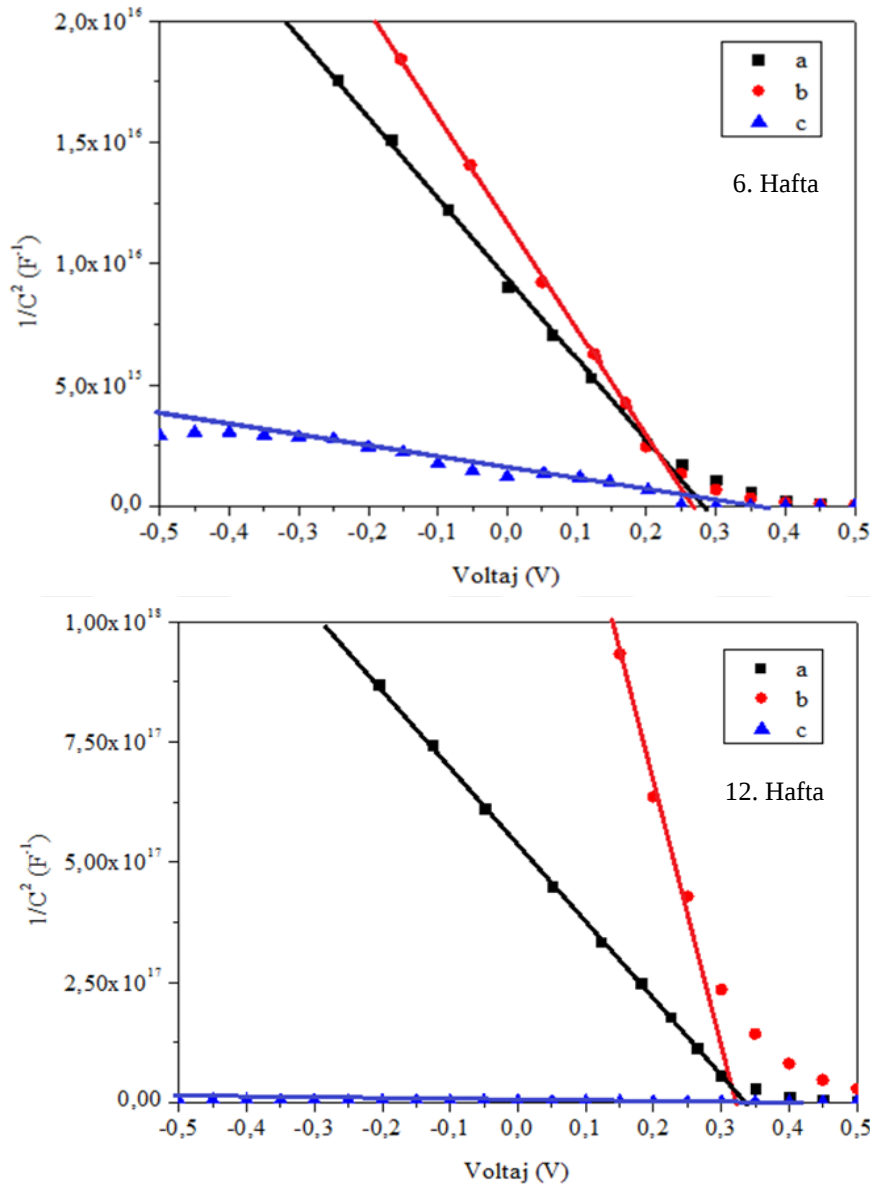


Şekil 45 (devamı). Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait C-V grafiği a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

Eklem engel potansiyeli (V_{bi}) ve yük yoğunluğu değerleri hesabı $1/C^2$ -V grafiğindeki değişimin doğrusal olduğu düşük besleme gerilimi değerlerinde yapıldı. Şekil 46'da n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin kapasitans-gerilim ölçümlerinden elde edilen 1., 6. ve 12. haftalara ait $1/C^2$ -V grafikleri verildi.



Şekil 46. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait 1000 Hz sabit frekansta ölçülmüş $1/C^2$ -V grafikleri a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K



Şekil 46 (devamı). Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen güneş pillerinin 1., 6. ve 12. haftalara ait 1000 Hz sabit frekansta ölçülmüş $1/C^2$ -V grafikleri
a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

Grafikte $1/C^2=0$ eğrisinin doğrusal kısmının x ekseninde kestiği nokta eklem engel potansiyelini vermektedir. Üretilen güneş pillerine ait hesaplanan eklem engel potansiyeli ve verici yoğunluğu değerleri Tablo 8’de verildi. Tabloda görüldüğü üzere en yüksek verici yoğunluğu değeri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aittken en düşük değer ise 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aittir. Eklem engel potansiyeli değerleri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde en yüksek iken 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde en düşük değerdedir. 12 haftalık süre takip edildiğinde verici yoğunluğu değerleri azalırken eklem engel potansiyeli değerleri artmaktadır.

Lepley vd. (1979) tarafından vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS/Cu₂S heteroekleminde yapılan C-V ölçümleri ile başlangıç verici yoğunluğu $1,8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Ölçümler 120 gün boyunca devam etmiş ve verici yoğunluğunun azaldığı görülmüştür. Vericilerin alıcılar tarafından aşırı derecede kompanse edilmesi sonucu engel potansiyelinin artacağı belirtilmiştir (Lepley vd., 1979).

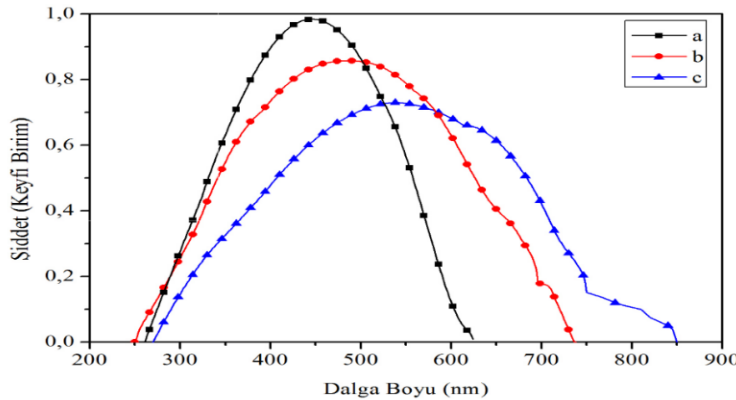
Tablo 8. Güneş pillerine ait V_{bi} ve N_d değerleri

	Ölçümler	Verici Yoğunluğu (cm^{-3})	Eklem Engel Potansiyeli (V)
	K.Y.	$1,46 \times 10^{16}$	0,226
1. Hafta	300 K	$5,30 \times 10^{15}$	0,025
	200 K	$5,59 \times 10^{16}$	0,232
	K.Y.	$6,43 \times 10^{15}$	0,250
2. Hafta	300 K	$2,50 \times 10^{15}$	0,182
	200 K	$4,85 \times 10^{16}$	0,280
	K.Y.	$5,44 \times 10^{15}$	0,275
3. Hafta	300 K	$1,90 \times 10^{15}$	0,186
	200 K	$4,44 \times 10^{16}$	0,342
	K.Y.	$5,34 \times 10^{15}$	0,276
4. Hafta	300 K	$1,77 \times 10^{15}$	0,221
	200 K	$4,40 \times 10^{16}$	0,363
	K.Y.	$4,93 \times 10^{15}$	0,280
5. Hafta	300 K	$1,76 \times 10^{15}$	0,248
	200 K	$4,22 \times 10^{16}$	0,367
	K.Y.	$3,02 \times 10^{15}$	0,290
6. Hafta	300 K	$1,69 \times 10^{15}$	0,265
	200 K	$3,80 \times 10^{16}$	0,385
	K.Y.	$2,16 \times 10^{15}$	0,295
7. Hafta	300 K	$7,35 \times 10^{14}$	0,279
	200 K	$3,71 \times 10^{16}$	0,388
	K.Y.	$6,88 \times 10^{14}$	0,307
8. Hafta	300 K	$1,13 \times 10^{14}$	0,282
	200 K	$3,59 \times 10^{16}$	0,393
	K.Y.	$5,03 \times 10^{14}$	0,310
9. Hafta	300 K	$2,69 \times 10^{13}$	0,284
	200 K	$3,06 \times 10^{16}$	0,396
	K.Y.	$4,89 \times 10^{13}$	0,311
10. Hafta	300 K	$6,97 \times 10^{12}$	0,285
	200 K	$3,04 \times 10^{16}$	0,403
	K.Y.	$3,57 \times 10^{13}$	0,319
11. Hafta	300 K	$4,45 \times 10^{11}$	0,312
	200 K	$3,02 \times 10^{16}$	0,404
	K.Y.	$3,55 \times 10^{13}$	0,321
12. Hafta	300 K	$3,81 \times 10^{11}$	0,315
	200 K	$2,99 \times 10^{16}$	0,411

Şekil 47’de 3 farklı yöntem ile üretilmiş ve 180 °C’de 10 dakika süre ile tavllanmış n-CdS/p-Cu₂S heteroeklemlerin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumları verildi. Şekilden görüldüğü gibi 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili en geniş çalışma alanına sahiptir. Literatürden bilindiği üzere nano boyutlu Cu kümeleri THz frekans mertebesinde plazmon rezonans etkisi göstermektedir (Hu vd., 2012; Hirai ve Kumar, 2006). 180 °C’de ısı uygulamanın elektromanyetik dalga olarak oluşturduğu frekans,

$$E = m \times c^2 = k \times T = \frac{h \times c}{\lambda} = h \times \nu \quad (65)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada E enerji, k Boltzman sabiti ($1,380649 \times 10^{-23}$ J/K), T Kelvin cinsinden sıcaklık, c ışık hızı ($c = 299792458$ m/s), λ dalga boyu, ν frekans ve h Planck sabiti ($h = 6,62607015 \times 10^{-34}$ J s) dir. 180 °C’de ısı uygulamanın elektromanyetik dalga olarak oluşturduğu frekans 9,44 THz olarak hesaplandı. CdS yapısında Cu₂S fazının oluşumu Cu atomlarının Cd boşluklarına yerleşmesi ile gerçekleşmektedir. 200 K altlık sıcaklığında kaplanan Cu kümelerinde SPR olayının gerçekleşmesi Cu₂S fazının daha hızlı oluşumuna neden olmuştur. Buna bağlı olarak 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili daha geniş çalışma alanına sahip olmuştur. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pili en düşük çalışma alanına sahiptir. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pili çalışma alanı dar olmasına rağmen güneş spektrumunun maksimum değerinde (450-500 nm) maksimum duyarlılık göstermektedir. 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili ise 200 K altlık sıcaklığından daha küçük çalışma alanına sahiptir.



Şekil 47. Farklı yöntem ve farklı altlık sıcaklıklarında üretilen 180°C’de 10 dakika tavllanmış n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumları a) Kimyasal yöntem, b) 300 K ve c) 200 K

4. TARTIŞMA ve SONUÇLAR

CdS/Cu₂S güneş pilleri 1950’li yıllardan günümüze çeşitli yöntemler kullanılarak üretilmektedir. Yapılan bu çalışmada 3 farklı yöntem kullanılarak üretilen CdS/Cu₂S güneş pillerinin bozulma süreci 12 hafta boyunca takip edildi. Termal buharlaştırma yöntemi ile 200 K, 300 K altlık sıcaklıklarında ve kimyasal yöntem kullanılarak üretilen güneş pillerinin 12 hafta süresince I-V ve C-V ölçümleri yapıldı. Güneş pillerinin çalışma alanları belirlendi. 200 K ve 300 K altlık sıcaklıklarında üretilen Cu ince filmin FESEM analizi yapıldı. Tek kristal CdS’in XRD, SEM, EDS, öz direnç, hall ölçümü, fotoluminesans ölçümü ve optik ölçümleri gerçekleştirildi.

Bu çalışmada kullanılan tek kristal CdS’in X-ışını kırınımı desenlerinde hekzagonal kristal yapıda olduğu ve (002) doğrultusuna sahip olduğu görüldü. Hesaplanan $c = 6,70$ Å ve $d = 3,35$ Å değerlerinin hekzagonal CdS için (ICCD, PDF-4, 00-001-0783) kartta verilen $c = 6,71$ Å ve $d = 3,36$ Å değerleri ile benzer olduğu görüldü (Mahdi vd., 2013). Ayrıca tek kristal CdS’in $2\theta = 26,61^\circ$ ’de pik referans alınarak β değeri 0,21 derece olarak bulundu. Tanecik boyutu ise $D = 38,92$ nm olarak hesaplandı. Bu değer Kareem vd. (2019) tarafından tek kristal CdS için hesaplanan 40,66 nm değeri ile benzer olduğu görüldü. CdS’in 400-800 nm dalga boyu aralığında elde edilen geçirgenlik spektrumunda 550 nm’nin üzerinde yüksek optik geçirgenlik değerleri gösterdiği görüldü. Kareem vd. (2019) tek kristal CdS için 550-600 nm üzerinde yüksek optik geçirgenlik değerleri tespit etmiştir. CdS’in optik geçirgenlik spektrumundan enerji band aralığı değeri (E_g) 2,35 eV olarak bulundu. Kareem vd. (2019) tek kristal CdS’in enerji band aralığı değerini 2,36 eV olarak bulmuşlardır. Tek kristal CdS için hesaplanan enerji band aralığı değeri literatür ile uyumludur.

Tek kristal CdS’in fotoluminesans ölçümlerinden 536 nm ve 650 nm dalga boylarında emisyon piki görüldü. 536 nm’deki pik sülfür boşluğunun ikinci iyonlaşma durumlarından kaynaklandığı görüldü (V_s^+/V_s^{2+}). 650 nm’deki pikin Cd boşluklarından kaynaklandığı görüldü. Ayrıca $\lambda=540$ nm’de zayıf bir emisyon olduğu ve bunun da yüzey lokalize durumlarıyla rekombinasyondan kaynaklandığı görüldü. Literatüre bakıldığında CdS için benzer sonuçlar görülmektedir (Oualid vd., 1979; Comparelli vd., 2003; Nogriya vd., 2008). SEM görüntülerinden tek kristal CdS’in oldukça yoğun ve homojen bir yapıda olduğu ayrıca az sayıda hata ve çatlak bulunduğu görüldü. Kadash vd. (2014) hekzagonal yapıya sahip CdS kristali için benzer SEM görüntüleri elde etmiştir. EDX veri analizi,

Cd:S atom oranının $\sim 1:1$ olduğunu gösterdi. Bu durum yüksek kalitede stokiometrik CdS malzemesinin oluşumunu göstermektedir.

200 K ve 300 K altlık sıcaklığında cam yüzeyinde üretilen Cu ince filmin FESEM analizinde 300 K altlık sıcaklığında üretilen Cu katmanların adacık büyüme mekanizması ile gerçekleştiği görüldü. 200 K altlık sıcaklığında ise cam yüzeyi daha küçük boyutlu Cu taneleri ile kaplandığı ve yüzeyin daha pürüzsüz olduğu görüldü. Ayrıca 200 K altlık sıcaklığında cam yüzeyinde çok sayıda beyaz nano boyutlu taneler görüldü. Bu durum 200 K altlık sıcaklığında üretilen Cu katmanının farklı büyüme mekanizması ile gerçekleştiğinin göstergesidir. Literatürden bilindiği üzere soliton büyüme mekanizması eşit nano boyutlu kümelerin birleşimi ile gerçekleşmektedir (Tomakin vd., 2011).

Üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerin 12 hafta boyunca karanlık ortamda yapılan I-V ölçümlerinden 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin ideal değere daha yakın idealite değerleri elde edildiği görüldü. 300 K altlık sıcaklığında ise ideal değerden daha yüksek değerler elde edildi. n değerlerindeki artış taşıyıcıların çoğunun birleşme bölgesinde rekombinasyona uğradığını gösterdi. Bu, CdS/Cu₂S heteroekleminin kafes uyumsuzluğundan kaynaklanabilir ve bu da çok sayıda arayüzey durumuna neden olabilir. Engel yüksekliği değerlerine bakıldığında 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin en yüksek değere sahip olduğu görüldü. En düşük engel yüksekliği değerinin ise 300 K altlık sıcaklığın da üretilen güneş piline ait olduğu görüldü. Heteroeklemden, yüzey durumları var ise engel yüksekliğinin artacağı bilinmektedir (Goodman, 1963; Cowley ve Sze, 1965). Yüzey durumları ise engel yüksekliğinde artışa neden olmaktadır. Lepley vd. (1979) tarafından vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS/Cu₂S heteroekleminde engel yüksekliği 0,51-0,92 eV arasında bulunmuştur. Hesaplanan engel yüksekliği değerleri Lepley vd. (1979) tarafından yapılan çalışmadaki değerlere benzerdir.

Aydınlık ortamda (93 mW/cm²) yapılan I-V ölçümlerinden en yüksek I_{sc} , J_{sc} , V_{oc} , P_{max} , FF ve η değerleri 200 K altlık sıcaklığında üretilmiş güneş piline aitken en düşük değer 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline ait olduğu görüldü. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pili en yüksek verim ve güç değerlerine 6. haftada ulaşırken 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili 5.haftada ulaşmıştır. 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili ise 7.haftada en yüksek verim ve güç değerlerine ulaşmıştır. Güneş pilleri incelendiğinde en hızlı bozulma sürecinin 300 K altlık sıcaklığında üretilen heteroeklemden meydana geldiği görüldü. En yavaş bozulma süreci ise 200 K altlık

sıcaklığında üretilen güneş pilinde meydana geldi. Kimyasal yöntemde bozulma sürecinin 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline göre yüksek olmasının nedeni olarak CuCl çözeltisinin CdS yüzeyindeki mikro çatlaklardan difüze olduğu düşünülmektedir. 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pillinde ise Cu katmanının farklı boyutlu adacıklar ile kaplanması ve tanecik hareketlerinin fazla olması sonucu bozulmanın daha hızlı gerçekleştiği düşünüldü.

3 farklı yöntem ile üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin 12 hafta boyunca yapılan C-V ölçümlerinden güneş pilleri için ileri besleme gerilimlerine doğru bilinen eklem davranışı görüldü. En yüksek verici yoğunluğu değeri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aitken en düşük değer ise 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş piline aittir. Eklem engel potansiyeli değerleri 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde en yüksek iken 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinde en düşük değerdedir. 12 haftalık süre takip edildiğinde verici yoğunluğu değerleri azalırken eklem engel potansiyeli değerleri artmaktadır. Alıcılar tarafından vericiler aşırı derecede kompanse edilirse engel potansiyelinin artacağı bilinmektedir (Lepley vd., 1979). Cu'nun difüzyonu sonucu 300 K altlık sıcaklığında ve kimyasal yöntem ile üretilen güneş pillerinde verici yoğunluğu değerleri önemli ölçüde azaldı. Lepley vd. (1979) tarafından vakum buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS/Cu₂S heteroekleminde yapılan C-V ölçümleri ile başlangıç verici yoğunluğu $1,8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Ölçümler 120 gün boyunca devam etmiş ve verici yoğunluğunun azaldığı görülmüştür.

3 farklı yöntem ile üretilen ve 180°C'de 10 dakika süre ile tavlanan n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumu ölçümünden 200 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pilinin en geniş çalışma alanına sahip olduğu görüldü. CdS yapısında Cu₂S fazının oluşumu Cu atomlarının Cd boşluklarına yerleşmesi ile gerçekleşmektedir. 200 K altlık sıcaklığında kaplanan Cu kümelerinde SPR olayının gerçekleşmesi Cu₂S fazının daha hızlı oluşumuna neden olmuştur. Kimyasal yöntem ile üretilen güneş pilinin çalışma alanı dar olmasına rağmen güneş spektrumunun maksimum değerinde (450-500 nm) maksimum geçirgenlik göstermektedir. 300 K altlık sıcaklığında üretilen güneş pili ise 200 K altlık sıcaklığından daha dar çalışma alanına sahiptir.

5. ÖNERİLER

Soğuk altlık tekniği kullanılarak yapılan bu çalışmada 200 K altlık sıcaklığında üretilen n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinde Cu atomlarının diffüzyon katsayı değerlerinin deneysel olarak hesaplaması yapılabilir.

Soğuk altlık yöntemi ile üretilen nano boyutlu Cu kümelerinde yüzeysel plazmon rezonans (SPR) frekansının tespitinin yapılması düşünülebilir.

Farklı altlık sıcaklıklarında (175 K, 150 K, 125 K ve 100 K) CdS yüzeyinde oluşturulmuş n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinin fotovoltatik parametrelerin incelenmesi düşünülebilir.

Üretilen güneş pillerinin çalışma aralığının I-V ve C-V ölçümleri ile beraber takip edilerek Cu'ın CdS malzemesine difüzyon sürecinin güneş pillerinin çalışma aralığına olan etkisinin tespiti yapılabilir.

n-CdS/p-Cu₂S güneş pillerinde C-V ölçümlerinin daha geniş frekans aralığında yapılması düşünülebilir.

KAYNAKLAR

- Al-Dhafiri, A.M., Russell, G.J. and Woods, J. (1991). Electrochemical control of the Cu_xS phase in Cu_xS -CdS photovoltaic cells. *Semiconductor Science and Technology*, 6(10), 983-988.
- Al-Bassam, A.A.I., Al-Juffali, A.A. and Al-Dhafiri, A.M. (1994). Structure and lattice parameters of cadmium sulphide selenide ($\text{CdS}_x\text{Se}_{1-x}$) mixed crystals. *Journal of Crystal Growth*, 135(3), 476-480.
- Ashour, A., El-Kadry, N. and Mahmoud, S.A. (1995). On the electrical and optical properties of CdS films thermally deposited by a modified source. *Thin Solid Films*, 269(1), 117-120.
- Ashfold, M.N.R., Claeysens, F., Fuge, G.M. and Henley, S.J. (2004). Pulsed laser ablation and deposition of thin films. *Chemical Society Reviews*, 33(1), 23-31.
- Ashour, A. (2006). The physical characteristics of Cu_2S /CdS thin-film solar cell. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 8(4), 1447-1451.
- Aydoğan, ř. (2011). Katıhal Fiziği. Nobel Yayın, 1. Baskı, ISBN: 978-605-395-431-6, 615s., 221-230.
- Akat, E. (2012). Katıhal Fiziği Temelleri. Papatya Yayıncılık, 2. Baskı, ISBN: 978-605-4220-16-8, 574s., 328-332.
- Abbas, N.K. and Ghdeeb N.J. (2015). The effect of thickness on the optical properties of Cu_2S thin films. *Iraqi Journal of Physics*, 13(26), 121-127.
- Alyaz, B. (2017). Kimyasal banyo depolama metodu ile elde edilen CdS yarıiletken filmlerinin bazı fiziksel özellikleri üzerine tavlama işleminin etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye, 97 s.
- Bube, R.H., Buch, F., Fahrenbruch, A.L., Ma, Y.Y. and Mitchell, K.W. (1977). Photovoltaic energy conversion with n-CdS-p-CdTe heterojunctions and other II-VI junctions. *IEEE: Transactions on Electron Devices*, 24(4), 487-492.
- Bryant, F.J., Hariri, A.K., Salkalachen, S. and Scott, C.G. (1983). Annealing and diffusion processes in thin film CdS/ Cu_2S solar cells. *Thin Solid Films*, 105(4), 343-351.
- Belyaev, A.P. and Rubets, V.P. (2001). Heteroepitaxy of II-VI compound semiconductors on cooled substrates. *Atomic Structure and Nonelectronic Properties of Semiconductors*, 35(3), 294-297.
- Belyaev, A.P., Rubets, V.P. and Kalinkin, I.P. (2003). Soliton heteroepitaxy in the formation of epitaxial films of II-VI compounds under highly nonequilibrium conditions. *Materials Physics and Mechanics*, 6(1), 58-62.

- Bilgin, V., Kose, S., Atay, F. and Akyuz, I. (2005). The effect of substrate temperature on the structural and some physical properties of ultrasonically sprayed CdS films. *Materials Chemistry and Physics*, 94(1), 103-108.
- Boz, O.G. (2011). Günümüzün alternatif enerji kaynağı: Fotovoltaik güneş pilleri. Yüksek Lisans Tezi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 104 s.
- Bedir A. (2015). Sodyum katkılı CdS ince filmlerinin ve nCdS/pSi güneş pillerinin bazı karakteristik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 68 s.
- Bozkaplan, C. (2015). RF saçırma yöntemi ile biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerin karakterizasyonu ve heteroeklem üretiminde kullanılması. Doktora Tezi. Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır, Türkiye, 135 s.
- Barranco, A., Borras, A., Elise, A.R.G. and Palmero, A. (2015). Perspectives on oblique angle deposition of thin films: From fundamentals to devices. *Progress in Materials Science*, 76(1), 59–153.
- Buldu, İ. (2019). TiO₂-Ag yapıların soğuk altlık yöntemiyle üretilmesi ve incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye. 97 s.
- Cowley, A.M. and Sze, S.M. (1965). Surface states and barrier height of metal-semiconductor systems. *Journal of Applied Physics*, 36(10), 74-82.
- Chopra, K.L. and Das, S.R. (1983). Thin film solar cells. Plenum Press, ISBN: 978-0306411410, 607s., 203-300.
- Caferov, T. (1984). Photostimulated atomic processes in semiconductors. Energoatomizdat publication, Moscow, 136 s.
- Comparelli, R., Zezza, F., Striccoli, M., Curri, M.L., Tommasi, R. and Agostiano, A. (2003). Improved optical properties of CdS quantum dots by ligand Exchange. *Materials Science and Engineering: C*, 23(6), 1083-1086.
- Darwish, S. Soliman, H.S. and Riad, A.S. (1995). Transport properties of n-CdS_{0.5}Se_{0.5}/p-InP heterojunction cells. *Thin Solid Films*, 259(1), 248-252.
- Goodman, A.M. (1963). Metal-semiconductor barrier height measurement by the differential capacitance method-one carrier system. *Journal of Applied Physics*, 34, 329-338.
- Gill, W.D and Bube, R.H. (1970). Photovoltaic Properties of Cu₂S-CdS Heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 41, 3731-3737.
- Gaubas, E., Brytavskiy, I., Čeponis, T., Kusakovskij, J. and Tamulaitis, G. (2013). Barrier capacitance characteristics of CdS–Cu₂S junction structures. *Thin Solid Films*,

531(1), 131–136.

- Gevorgyan, V.A., Hakhoyan, L.A., Mangasaryan, N.R. and Gladyshev, P.P. (2016). Substrate temperature and annealing effects on the structural and optical properties of nano-CdS Films deposited by vacuum flash evaporation technique. *Chalcogenide Letters*, 13(1), 331-338.
- Hirai, M. and Kumar, A. (2006). Wavelength tuning of surface plasmon resonance by annealing silver-copper nanoparticles. *Journal of Applied Physics*, 100, 1-4.
- Habas, S.E., Platt, H.A.S., van Hest, M.F.A.M. and Ginley, D.S. (2010). Low-cost inorganic solar cells: from ink to printed device. *Chemical Reviews*, 110(1), 6571-6594.
- Htun, N.N., (2011). Study on characteristics of CdS/Cu₂S photovoltaic cell. *The Third International Conference on Science and Engineering*, Yangon (Myanmar), 1-2 December, 327-330.
- Hu, J., Liu, P. and Chen, L. (2012). Comparison of surface plasmon resonance responses to dry/wet air for Ag, Cu, and Au/SiO₂. *Applied Optics*, 51(9), 1357-1360.
- Islam, M.N. and Haque, M.A. (1982). Thin film CdS/Cu₂S heterojunction solar cell fabricated by co-evaporation of copper and sulphur. *Thin Solid Films*, 94(1), 15-22.
- Ibrahim, A.A and Ashour, A. (2006). ZnO/Si solar cell fabricated by spray pyrolysis technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 17(10), 835-839.
- Işık, M., Gullu, H.H., Delice, S., Parlak, M. and Gasanly, N.M. (2019). Structural and temperature-dependent optical properties of thermally evaporated CdS thin films. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 93(1), 148-152.
- Ismail, R.A., Al-Samarai, A.M.E. and Muhammed, A.M. (2019). High-performance nanostructured p-Cu₂S/n-Si photodetector prepared by chemical bath deposition technique. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30(2019), 11807-11818.
- İbrahim, H. (2011). Solar energy conversion by photoelectrochemical processes. Doktora Tezi. University of Bath, Awarding institution, Bath, UK, 183 s.
- Jayaraman, V. (2005). Fabrication and characterization of CIS/CdS and Cu₂S/CdS devices for applications in nano structured solar cells. Yüksek Lisans Tezi. University of Kentucky, College of Engineering, Kentucky, Lexington, 104 s.
- Jain, A., Sagar, P. and Mehra, R.M. (2006). Band gap widening and narrowing in moderately and heavily doped n-ZnO films. *Solid-State Electronics*, 50(1), 1420-1424.
- Kuper, A., Letaw, H., Slifkin, Jr.L., Sonder, E. and Tomizuka, C.T. (1954). Self-diffusion in copper. *Physical Review*, 96(5), 1224-1225.

- Kavcar, N., Carter, M.J. and Hill, R. (1992). Characterization of CuInSe₂ thin films produced by thermal annealing of stacked elemental layers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 27(1), 13-23.
- Kukushkin, S.A. and Osipov, A.V. (1994). Soliton model of island migration along a substrate during thin-film growth. *Physics of the Solid State*, 36(5), 799-803.
- Kassim, A., Min, H S., Siang, L.K. and Nagalingam, S. (2011). SEM, EDAX and UV-visible studies on the properties of Cu₂S thin films. *Chalcogenide Letters*, 8(7), 405-410.
- Kırmızıgül, F., Güneri, E. and Gümüş, C. (2013). Effects of different deposition conditions on the properties of Cu₂S thin films. *Philosophical Magazine*, 93(5), 511-523.
- Kadash, E.A., AL Hattami, A.A., Rathod, J.R., Patel, K.D. and Pathak, V.M. (2014). Synthesis and characterization of cadmium sulfide crystals grown by DVT technique. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 22(1), 18-26.
- Köksal, F. ve Köseoğlu, R. (2015). Katıhal Fiziği. Nobel Akademik Yayıncılık, 1. Baskı, ISBN:978-605-320-186-1, 376 s., 163-167.
- Kulkarni, R., Pawbake, A., Waykar, R., Jadhawar, A., Borate, H., Aher, R., Bhorde, A., Nair, S., Sharma, P. and Jadkar, S. (2018). Single crystal, high band gap CdS thin films grown by RF magnetron sputtering in argon atmosphere for solar cell applications. *Journal of Nano and Electronic Physics*, 10(3), 1-6.
- Kareem, M.M., Mezher, S.J. and Beddal, A.A. (2019). Single crystal cadmium sulfide thin films prepared by thermal evaporation technique. *Journal of Non-Oxide Glasses*, 11(2), 27-31.
- Lepley, B., Nguyen, P.H., Boutrit, C. and Ravelet, S.J. (1979). Printed in great britain copper diffusion and photovoltaic mechanisms at Cu-CdS contact. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12(1), 1917-1928.
- Livage, J., Sanchez, C., Henry, M. and Doeuff, S. (1989). The chemistry of sol-gel process. *Solid State Ionics*, 32(2), 633-638.
- Lowndes, D.H., Geohegan, D.B., Puretzky, A.A. and Rouleau, C.M. (1996). Synthesis of novel thin film materials by pulsed laser deposition. *Science*. 273(5277), 898-903.
- Liu, G.M., Schulmeyer, T., Brotz, J., Klein, A. and Jaegermann, W. (2003). Interface properties and band alignment of Cu₂S/CdS thin film solar cells. *Thin Solid Films*, 431(1), 477-482.
- Lokhande, A.C., Chalapathy, R.B.V., He, M., Jo, E., Gang, M., Pawar, S.A., Lokhande, C.D. and Hyeok J.K. (2016). Development of Cu₂SnS₃ (CTS) thin film solar cells by physical techniques: A status review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*,

153(1), 84-107.

- Lu, M.Y., Hong, M.H., Ruanc, M.Y and Lu, M.P. (2019). Probing the photovoltaic properties of Ga-doped CdS–Cu₂S core–shell heterostructured nanowire devices. *Chemical Communications*, 55(37), 5351-5354.
- Movchan, B.A. and Demchishin, A.V. (1969). Structure and properties of thick condensates of nickel, titanium, tungsten, aluminum oxides, and zirconium dioxide in vacuum. *Fizika Metallov Metalloved*, 28(1), 653-660.
- Meyer, B. (1975). Elemental Sulfur. *Chemical Reviews*, 76(3), 367-388.
- Moses, C. and Wasserman, D.J. (1980). Electron diffusion lengths in the CdS/Cu/x/S cell from spectral response measurements. *Solar Cells*, 1(2), 218-221.
- Mukhopadhyay, K. and Saha, H. (1981). Effect of Annealing Cds on a Sintered CdS/Cu₂S Solar Cell. *Solar Cells*, 4(2), 135-146.
- Mane, R.S. and Lokhande, C.D. (2000). Chemical deposition method for metal chalcogenide thin films. *Materials Chemistry and Physics*, 65(1), 1-31.
- Mahdi, M.A., Hassan, J.J., Ahmed, N.M., Ng, S.S. and Hassan, Z. (2013). Growth and characterization of CdS single-crystalline micro-rod photodetector. *Superlattices and Microstructures*, 54(1), 137-145.
- Mohammed, W.F. and Al-Tikriti, M. (2015). Novel electronic approach for efficient energy harvesting from Cu₂S/CdS solarcell. *12th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices*, Tunisia, 16-19 March, 1-8.
- Moraro, M.C. (2016). Optical and electrical characterization of CdxSe_{1-x}S and Cu₂S thin films for solar cell application. Yüksek Lisans Tezi. Kenyatta Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Nairobi, Kenya, 74 s.
- Novruzov, V.D. (1987). Yüksek Verimli CdS/Cu₂S Güneş Pillerinin Üretilmesi, USSR Moskova, Patent USSR No:1371460, 1987.
- Neville, R.C. (1995). Solar Energy Conversion. *Elsevier Science*, 2. Baskı, ISBN: 978-0444-898-180, 426s., 325-378.
- Nogriya, V., Dongre, J.K., Ramrakhiani, M. and Chandra, B.P. (2008). Electro and photoluminescence studies of CdS nanocrystals prepared by organometallic precursor. *Chalcogenide Letters*, 5(12), 365-373.
- Oualid, J., Sarti, D., Gervais, J. and Martinuzzi, S. (1979). Characterisation of electron traps in Cu₂S-CdS polycrystalline cells by capacitance transient measurements. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 12(1), 2313-2321.
- Öncel, Y. (2014). Kimyasal banyo yöntemiyle elde edilen Cd_{1-x}Cox S filmlerin bazı yapısal, elektriksel ve optik özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep

Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 76 s.

- Özden, Ş. (2015). Farklı sürelerle CdCl_2 ortamında ısıtılma işlemi görmüş ince film CdTe/CdS güneş pillerinin elektriksel karakterizasyon yöntemleriyle incelenmesi. Doktora Tezi. Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Muğla, Türkiye, 170 s.
- Patain, L.D., Schneider, R.A., Donaghey, L.F. and McLond, P.S. (1985). Surface chemistry of Cu_xS and $\text{Cu}_x\text{S/CdS}$ determined from x-ray photoelectron spectroscopy. *Journal of Applied Physics*, 57(11), 5056-5065.
- Prasad, J.J.B., Rao, D.K. and Sobhanadri, J. (1986). Studies on $n\text{-CdTe/p-CuInSe}_2$ heterojunctions. *Journal of Applied Physics*, 59(8), 2866-2869.
- Pathan, H.M., Desai, J.D. and Lokhande, C.D. (2002). Modified chemical deposition and physico-chemical properties of copper sulphide (Cu_2S) thin films. *Applied Surface Science*, 202(1), 47-56.
- Patel, K.D., Sumesh, C.K., Mathai, A.J., Pathak, V.M. and Srivastava, R. (2008). Low temperature transport properties of $n\text{-WSe}_2$ single crystals. *Journal of Pure and Applied Sciences*, 16(1), 101-109.
- Rafea, M.A., Farag, A.A.M. and Roushdy, N. (2012). Controlling the crystallite size and influence of the film thickness on the optical and electrical characteristics of nanocrystalline Cu_2S films. *Materials Research Bulletin*, 47(2), 257-266.
- Ramya, M. and Ganesan, S. (2013). Influence of thickness and temperature on the properties of Cu_2S thin films. *Iranian Journal of Science & Technology*, 37(3), 293-300.
- Szentirmay, Z. (1991). Surface plasmon spectroscopy of metal/dielectric structures. *Spectrochimica Acta*, 48, 9-17.
- Sankar, N., Sanjeeviraja, C. and Ramachandran, K. (2002). Growth and characterization of CdS and doped CdS single crystals. *Journal of Crystal Growth*, 243(1), 117-123.
- Seyhan, A. (2003). Photoluminescence spectroscopy of CdS and GaSe . Yüksek Lisans Tezi. The Middle East Technical University, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara, Türkiye, 88 s.
- Sze, S.M. (2007). Physics of Semiconductor Devices. Wiley, 3. Baskı, ISBN: 978-0-471-14323-9, 815s., 79-134.
- Sam, M., Bayati, M.R., Mojtahedi, M. and Janghorban, K. (2010). Growth of $\text{Cu}_2\text{S/CdS}$ nano-layered photovoltaic junctions for solar cell applications. *Applied Surface Science*, 257(5), 1449-1453.

- Saraf, R. (2012). High efficiency and cost effective Cu₂S/CdS thin-film solar cell. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2(4), 47-51.
- Savariraj, A.D. Viswanathan, K.K. and Prabakar, K. (2014). CuS nano flakes and nano platelets as counter electrode for quantum dots sensitized solar cells. *Electrochimica Acta*, 149(1), 364-369.
- Schmitz, J. (2018). Low temperature thin films for next-generation microelectronics (invited). *Surface and Coatings Technology*, 343(1), 83-88.
- Tomakin, M., Altunbaş, M. and Bacaksız, E. (2011). The influence of substrate temperature on electrical properties of Cu/Cds/SnO₂ Schottky diode. *Physica B: Condensed Matter*, 406(23), 4355-4360.
- Taur, V.S., Joshi, R.A., Ghule, A.V. and Sharma, R. (2012). Effect of annealing on photovoltaic characteristics of nanostructured p-Cu₂S/n-CdS thin film. *Renewable Energy*, 38(1), 219-223.
- URL-1, (2019). <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Gunes> (03 Eylül 2019).
- Zhang, S., Shi, R. and Tan, Y. (2017). Corrosion behavior of the oxide films modified with zincizing treatment on AISI 1020 steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 15(711), 155-161.
- Wu, Y., Wadia, C., Ma, W., Sadtler, B. and Alivisatos, A.P. (2008). Synthesis and photovoltaic application of copper (1) sulfide nanocrystals. *Nano Letters*, 8(8), 2551-2555.
- Wu, D., Jiang, Y., Zhang, Y., Yu, Y., Zhu, Z., Lan, X., Li, F., Wu, C., Wang, L. and Luo, L. (2012). Self-powered and fast-speed photodetectors based on CdS:Ga nanoribbon/Au Schottky diodes. *Journal of Materials Chemistry*, 22(43), 23272-23276.

ÖZGEÇMİŞ

Melih MANIR, 20/04/1994 tarihinde Eskişehir’de doğdu. İlköğretimini 2008 yılında Eskişehir ilinde Pilot Binbaşı Ali Tekin İlköğretim Okulu’nda ve Ortaöğretimini 2012 yılında Eskişehir ilinde Şehit Murat Tuzsuz Anadolu Teknik Lisesi’nde tamamladı. 07/09/2012 tarihinde başladığı lisans eğitimini 30/06/2017 tarihinde Süleyman Demirel Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü’nde Fakülte 1. olarak tamamladı. 23/09/2014 tarihinde başladığı çift anadal lisans eğitimini 17/09/2018 tarihinde Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü’nde tamamladı. 2017 yılında Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başladığı yüksek lisans öğrenimine 2019 yılında yatay geçiş yaptığı Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Enerji Sistemleri Mühendisliği Anabilim Dalı’nda halen devam etmektedir. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesinde Araştırma Görevlisi olarak 2019 yılı itibariyle görev yapmaktadır. İyi seviyede İngilizce bilmektedir.