T.C.
DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE BİRİKTİRİLEN CdS VE ZnS İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU VE HETEROEKLEM ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

Cihat BOZKAPLAN

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

DİYARBAKIR
Haziran 2015

T.C

DİCLE UNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

DİYARBAKIR

Cihat BOZKAPLAN tarafından yapılan "RF Saçtırma Yöntemi ile Biriktirilen CdS ve ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu ve Heteroeklem Üretiminde Kullanılması" konulu bu çalışma, jürimiz tarafından Fizik Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyesinin

Ünvanı	Adı Soyadı
Başkan:	Prof. Dr. Engin TIRAŞ
Üye :	Prof. Dr. Kemal AKKILIÇ
Üye :	Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Mustafa Fatih GENİŞEL
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Cihat ÖZAYDIN

Tez Savunma Sınavı Tarihi: 10/06/2015

Yukarıdaki bilgilerin doğruluğunu onaylarım.

.../06/2015

Doç.Dr. Mehmet YILDIRIM

ENSTİTÜ MÜDÜRÜ

(MÜHÜR)

TEŞEKKÜR

Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne doktora tezi olarak sunduğum bu çalışma, Prof. Dr. Kemal AKKILIÇ'ın rehberliğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışmam boyunca yardımlarını ve desteğini hiçbir şekilde esirgemeyen Sayın Prof. Dr. Kemal AKKILIÇ'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarım sırasında hiçbir yardımı benden esirgemeyen, fikirlerinden istifade ettiğim ve çalışmam boyunca verdiği destek ve katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Yusuf Selim OCAK'a teşekkür ederim.

CdS ve ZnS ince filmlerin AFM görüntülerinin elde edilmesindeki katkılarından dolayı Ar. Gör. Ahmet TOMBAK'a da ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışma aynı zamanda Dicle Üniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatörlüğü tarafından 14–ZEF–18 nolu proje ile desteklenmiştir. Bu destekten ötürü Dicle Üniversitesi Bilimsel Projeler Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Bu süre zarfında hep yanımda oldukları için, çalışmalarım boyunca her türlü desteği veren, kendilerinden her türlü teşviği gördüğüm ve çoğu zaman kendilerini ihmal ettiğim eşime ve çocuklarıma sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

		Sayfa
TEŞEKKÜR……..……....		I
İÇİNDEKİLER…….…….....		II
ÖZET…….....		V
ABSTRACT…….....		VI
ÇİZELGE LİSTESİ……...……....		VII
RESİM LİSTESİ……....		VIII
ŞEKİL LİSTESİ……...……....		IX
KISALTMA VE SİMGELER……..……....		XII
1.	**GİRİŞ**……..……....	1
1.1.	CdS Bileşiğinin Özellikleri..……...…….…..	2
1.2.	ZnS Bileşiğinin Özellikleri..……...…….…..	4
2.	**KAYNAK ÖZETLERİ** …..……	9
3.	**MATERYAL VE METOT**……..……	25
3.1.	Metal–Yarıiletken Kontaklar ……..…….....	25
3.1.1.	Metal p–tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar ……....	26
3.1.2.	Metal p–tipi Yarıiletken Omik Kontaklar ……...……..….……...	28
3.1.3.	Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi ……..……....	29
3.1.4.	Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler ……...……....	31
3.1.5.	Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi……...…….....	33
3.1.6.	Norde Fonksiyonu Yardımıyla Schottky Diyot Karakteristiklerinin Tayin Edilmesi……...…….……....	34
3.1.7.	Metal–Yarıiletken Kontaklarda Isının Etkisi.....……....	35
3.1.8.	Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı …….....	36
3.1.9.	İdealite Faktörünün Gerilime ve Sıcaklığa Bağlılığı …….……	38
3.1.10.	Schottky Engel Diyotların Kapasitesi ……..…….…….....	39
3.2.	Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri.....……....	40
3.2.1.	Plazma Saçtırma Buharlaştırma Yöntemi…….....	41

3.2.1.1. Radyo Frekansı (RF) Saçtırma Tekniği..... 43
3.2.1.2. Radyo Frekansı (RF) Magnetron Saçtırma Tekniği ……..…….…… 43
3.2.1.3. Termal Buharlaştırma Yöntemi ……..… 44
3.3. Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri ……..…..... 45
3.3.1. Soğurma Olayı, Doğrudan ve Dolaylı Geçişler ……..… 45
3.3.2. Soğurma Yöntemiyle Yarıiletkenin Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi…… 47
3.3.3. Doğrudan Bant Geçişi ……...…….……..….. 48
3.3.4. Dolaylı Bant Geçişi ……..…..…….. 48
3.4. Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi …..... 49
3.4.1. Hava Kitlesi …….……... 49
3.4.2. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu …….……..... 51
3.5. UV–Visible (Morötesi ve Görünür Bölge) Spektrofotometresi…..…….. 54
3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)……... 56
3.7. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM) …….…..……... 59
3.8. Deneysel İşlemler ……..…….……... 61
3.8.1. Yarıiletkenlerin Temizlenmesi……..…….……... 61
3.8.2. İnce Filmlerin ve Diyotların Oluşturulması…….……... 62
3.8.3. Filmlerin Optik ve Yüzey Ölçümlerinin Alınması ……..……. 63
3.8.4. Diyotların Akım–Gerilim ve Kapasite–Gerilim Ölçümlerinin Alınması…..... 63
4. BULGULAR VE TARTIŞMA……..… 65
4.1. Giriş……..……... 65
4.2. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu …….……... 65
4.2.1. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi …….. 65
4.2.2. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi……. 72
4.3. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi …….. 77
4.3.1. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Akım–Gerilim Ölçümleri……. 78
4.3.2. Norde Fonksiyonu Yardımıyla Diyotların Seri Dirençlerinin Belirlenmesi…... 80

4.4. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Fotoelektriksel Özelliklerinin İncelenmesi……... 84

4.4.1. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Fotoelektriksel Özellikleri…….. 84

4.4.2. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Fotoelektriksel Özellikleri…….. 87

4.5. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Kapasite–Gerilim Ölçümlerinin İncelenmesi…… 90

4.5.1. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Kapasite–Gerilim Ölçümleri……... 92

4.5.2. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Kapasite–Gerilim Ölçümleri……... 95

4.6. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Sıcaklığa Bağlı Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi……... 101

4.7. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Sıcaklığa Bağlı Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi…….. 105

5. SONUÇ VE ÖNERİLER……..…….**.....** 113

6. KAYNAKLAR…….…..**....** 119

ÖZGEÇMİŞ …….. 135

ÖZET

RF SAÇTIRMA YÖNTEMİ İLE BİRİKTİRİLEN CdS VE ZnS İNCE FİLMLERİN KARAKTERİZASYONU VE HETEROEKLEM ÜRETİMİNDE KULLANILMASI

DOKTORA TEZİ

Cihat BOZKAPLAN

DİCLE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI

2015

II–VI grubu bileşiklerinden CdS ve ZnS oda sıcaklığında geniş ve doğrudan bant aralığına sahip olmasından dolayı güneş pilleri, optik sensörler ve kızılötesi pencereler gibi optoelektronik uygulamalarda oldukça önemli bir yer bulmaktadır.

Bu çalışmada RF saçtırma yöntemi ile biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerinin yüzey ve optik özelliklerine alttaş sıcaklığının etkisi incelendi. Yüksek saflıkta CdS ve ZnS hedefler kullanılarak 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında p–Si ve cam üzerine CdS ve ZnS ince filmleri oluşturuldu. Elde edilen filmlerin yüzey özellikleri AFM ve SEM yöntemleri ile araştırıldı. Ayrıca optik özellikleri de UV–Vis ölçümleri ile belirlendi. Alttaş sıcaklığının ince filmlerin fiziksel yapısı üzerine etkisi açık bir şekilde gözlendi.

Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si heteroeklem diyotları termal buharlaştırma yoluyla elde edildi. Yapıların karanlıkta ve güneş simülatörü altında alınan I–V ölçümleri ile elektriksel ve fotoelektriksel özellikleri araştırıldı. Üretilen heteroeklemlerin iyi doğrultucu kontak davranışı gösterdiği gözlendi. *I–V* ve *C–V* eğrilerinden idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç gibi elektriksel parametreler hesaplandı. Elde edilen sonuçlar literatürde mevcut bulunan CdS ve ZnS heteroeklem kontaklarla karşılaştırıldı.

Anahtar Kelimeler: CdS, ZnS, SEM, AFM, heteroeklem, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF CDS AND ZNS THIN FILMS DEPOSITED BY RF SPUTTERING METHOD AND USAGE IN THE FABRICATION HETEROJUNCTIONS

PhD THESIS

Cihat BOZKAPLAN

DEPARTMENT OF PHYSICS
INSTITUTE OF NATURAL SCIENCES
UNIVERSITY OF DICLE

2015

The CdS and ZnS II–VI compounds are of great importance in the optoelectronic applications, for example, in solar cells, optical sensors, infrared windows because of its direct and wide band gap at room temperature.

This study presents the effects of substrate temperature on morphological and optical properties of radio frequency (RF) sputtered CdS and ZnS thin films. The thin films were formed on p–Si wafer and soda lime glasses at 40, 150 and 275 ^{o}C using high purity CdS and ZnS targets. Morphological properties of CdS and ZnS thin films were analyzed by the help of atomic force microscopy (AFM) and scanning electron microscopy (SEM) methods. The optical properties of sputtered the thin films were determined using UV–vis data. It was seen that substrate temperature had strong effects on physical characteristics of thin films.

Ag/CdS/p–Si and Ag/ZnS/p–Si heterojunction diodes were fabricated by thermally evaporation. Electrical and photoelectrical properties of the heterojunctions were analyzed at room temperature by means of current–voltage (*I–V*) measurements of devices in dark and under a solar simulator with various illumination intensities. The heterojunctions were showed good rectifying behavior by the *I–V* curves at room temperature. The barrier height, ideality factor and series resistance parameters were investigated using its current–voltage (*I–V*) measurements. Obtained results have been compared with available results of CdS and ZnS heterjunction contacts in literature.

Key Words: CdS, ZnS, SEM, AFM, heterojunction, barrier height, ideality factor and series resistance.

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge No		Sayfa
Çizelge 1.1.	CdS ve ZnS'nin 300 K'deki bazı özellik ve değerleri	6
Çizelge 4.1.	Elde edilen CdS ve ZnS filmlerinin AFM görüntülerinden hesaplanan pürüzlülük değerleri	71
Çizelge 4.2.	Elde edilen CdS ve ZnS filmlerinin $(\alpha h\nu)^2$–*Enerji* grafiğinden hesaplanan bant aralığı değerleri	77
Çizelge 4.3.	Elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan diyot parametreleri	81
Çizelge 4.4.	Elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan diyot parametreleri	82
Çizelge 4.5.	Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarının fotovoltaik ölçümlerinden hesaplanan parametreler	86
Çizelge 4.6.	Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarının fotovoltaik ölçümlerinden hesaplanan parametreler	89
Çizelge 4.7.	Elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al ve Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait $1/C^2$–*V* grafiklerinden hesaplanan parametreler	99
Çizelge 4.8.	Elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ve *C–V* ölçümlerinden hesaplanan engel yükseklikleri	99
Çizelge 4.9.	150 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan sıcaklığa bağlı diyot parametreleri	103
Çizelge 4.10.	150 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan sıcaklığa bağlı diyot parametreleri	108

RESİM LİSTESİ

Resim No		Sayfa
Resim 4.1.	40 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	66
Resim 4.2.	150 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	66
Resim 4.3.	275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	67
Resim 4.4.	40 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	67
Resim 4.5.	150 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	68
Resim 4.6.	275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü	68
Resim 4.7.	40 ºC, 150 ºC ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan 1µmx1µm AFM görüntüleri	69
Resim 4.8.	40 ºC, 150 ºC ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan 3D AFM görüntüleri	69
Resim 4.9.	40 ºC, 150 ºC ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan 1µmx1µm AFM görüntüleri	70
Resim 4.10.	40 ºC, 150 ºC ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan 3D AFM görüntüleri	70

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil No		Sayfa
Şekil 1.1.	Wurtzite yapı	5
Şekil 1.2.	Zinc blende yapı	5
Şekil 3.1.	Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın (a) kontaktan önce ve (b) kontaktan sonra enerji bant diyagramı	27
Şekil 3.2.	Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın kontaktan sonra $V \neq 0$ olması durumunda	28
Şekil 3.3.	Metal p–tipi yarıiletken omik kontağın enerji–bant diyagramı a) Kontaktan önce, b) Kontaktan sonra ve termal dengede, c) $V \neq 0$ olması durumunda	29
Şekil 3.4.	Düz beslem altındaki metal–yarıiletken schottky kontakta görüntü azalma etkisine gösteren enerji–bant diyagramı	30
Şekil 3.5.	Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engeldeki bükülme	32
Şekil 3.6.	Seri direncin *I–V* karakteristiğine etkisi	34
Şekil 3.7.	DC saçtırma sisteminin şematize edilmiş hali	42
Şekil 3.8.	RF magnetron saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi	44
Şekil 3.9.	Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali	45
Şekil 3.10.	İnce bir filmdeki soğurma	46
Şekil 3.11.	Doğrudan geçişli ve dolaylı geçişli bant aralıklarının gösterimi	47
Şekil 3.12.	Hava kitlesi numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi	50
Şekil 3.13.	Siyah cisim ışıması, AM0 ve AM1.5 spektrumları	51
Şekil 3.14.	a) Bir güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi b) Bir güneş pili ve diyota ait akım gerilim eğrileri	52
Şekil 3.15.	Güneş pillerinde denklem 3.47'ye karşılık gelen akım–gerilim grafiği	53
Şekil 3.16.	Güneş pilinde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi	54
Şekil 3.17.	Taramalı elektron mikroskobunu oluşturan temel kısımlar	58
Şekil 3.18.	Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapısı	62
Şekil 4.1.	40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait Soğurma–Dalgaboyu grafikleri	74
Şekil 4.2.	40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait Soğurma–Dalgaboyu grafikleri	74

Şekil 4.3. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait Geçirgenlik–Dalgaboyu grafikleri 75

Şekil 4.4. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait Geçirgenlik–Dalgaboyu grafikleri 75

Şekil 4.5. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait bant aralığının bulunduğu $(\alpha h\nu)^2$–*Enerji* grafikleri 76

Şekil 4.6. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait bant aralığının bulunduğu $(\alpha h\nu)^2$–*Enerji* grafikleri 76

Şekil 4.7. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/CdS/p–Si diyotlarına ait *I–V* grafikleri 79

Şekil 4.8. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait *I–V* grafikleri 79

Şekil 4.9. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait *F(V)–V* grafikleri 81

Şekil 4.10. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *F(V)–V* grafikleri 82

Şekil 4.11. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 85

Şekil 4.12. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 85

Şekil 4.13. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 86

Şekil 4.14. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 87

Şekil 4.15. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 88

Şekil 4.16. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatör altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri 88

Şekil 4.17. MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma 91

Şekil 4.18. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği 92

Şekil 4.19. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği 93

Şekil 4.20. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği 93

Şekil 4.21. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$–*V* grafiği 94

Şekil 4.22. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2–V$ grafiği 94

Şekil 4.23. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2–V$ grafiği 95

Şekil 4.24. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $C–V$ grafiği 96

Şekil 4.25. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $C–V$ grafiği 96

Şekil 4.26. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $C–V$ grafiği 97

Şekil 4.27. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2–V$ grafiği 97

Şekil 4.28. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2–V$ grafiği 98

Şekil 4.29. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2–V$ grafiği 98

Şekil 4.30. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı $I–V$ grafiği 102

Şekil 4.31. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı $F(V)–V$ grafiği 102

Şekil 4.32. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi 104

Şekil 4.33. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi 104

Şekil 4.34. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi 105

Şekil 4.35. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı $I–V$ grafiği 107

Şekil 4.36. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı $F(V)–V$ grafiği 107

Şekil 4.37. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi 109

Şekil 4.38. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi 109

Şekil 4.39. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi 110

KISALTMA VE SİMGELER

A	:Diyotun etkin alanı
A^*	:Richardson sabiti
AC	:Alternatif akım
AES	:Auger elektron spektroskopisi
AFM	:Atomik kuvvet mikroskobu
AM1.5	:Hava kitlesi 1.5
C	:Kapasite
CBD	:Kimyasal banyo biriktirme
CdS	:Kadmiyum Sülfür
CSS	:Kapalı alanda süblimleştirme
C–V	:Kapasite–Gerilim
CVD	:Kimyasal buhar biriktirme
DC	:Doğru akım
DLTS	:Derin seviye geçiş spektroskopisi
DSSC	:Boya duyarlı güneş pili
e	:Elektronun yükü
E_c	:İletkenlik bandının tabanı
EDX	:Enerji ayırımlı X ışını analizi
E_f	:Fermi enerji seviyesi
E_g	:Yarıiletkenin yasak enerji aralığı
ε_s	:Yarıiletkenin dielektrik sabiti
E_v	:Değerlik bandının tavanı
eV	:Elektron volt
FTIR	:Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi
h	:Planck sabiti
I_0	:Ters beslem doyma akımı
I_{sc}	:Kısa devre akımı
ITO	:İndiyum kalay oksit
I–V	:Akım–Gerilim
J	:Akım yoğunluğu
k	:Boltzmann sabiti
LCD	:Sıvı kristal ekran
LED	:Işık yayan diyot

m^*	:Elektronun etkin kütlesi
MBE	:Moleküler demet epitaksi
MESFET	:Metal–yarıiletken alan etkili transisitör
MIS	:Metal–yalıtkan–yarıiletken
MS	:Metal–yarıiletken
n	:İdealite faktörü
N_a	:Alıcı konsantrasyonu
N_c	:Yarıiletkenin iletkenlik bandındaki durum yoğunluğu
N_d	:Verici konsantrasyonu
PL	:Fotolüminesans
PLD	:Atmalı lazer biriktirme
PV	:Fotovoltaik
PVD	:Fiziksel buhar biriktirme
QDLED	:Kuantum nokta tabanlı ışık yayan diyot
RF	:Radyo Frekans
R_s	:Seri direnç
SCLC	:Sınırlı uzay yükü akımı
SEM	:Taramalı elektron mikroskobu
SILAR	:Art arda iyonik tabakaların yüzeye tutunması ve reaksiyonu
SZO	:Yarıiletken katkılı çinko oksit
T	:Mutlak sıcaklık
TEM	:Geçirmeli elektron mikroskobu
TFT	:İnce film transistör
USP	:Ultrasonik sprey piroliz
UV–Vis	:Mor ötesi–Görünür ışık
V	:Uygulanan gerilim
V_d	:Difüzyon potansiyeli
V_n	:Yarıiletkenin iletkenlik bandı ile Fermi seviyesi arasındaki fark
V_{oc}	:Açık devre gerilimi
XRD	:X ışını kırınımı
ZnS	:Çinko Sülfür
Φ_b	:Schottky engel yüksekliği
Φ_m	:Metalin iş fonksiyonu
Φ_s	:Yarıiletkenin iş fonksiyonu
χ	:Yarıiletkenin elektron ilgisi

1. GİRİŞ

Günlük hayatımızda çok önemli bir konumda bulunan teknoloji gün geçtikçe geliştirilmekte ve bu teknolojiyi etkin kılmak için bilim insanları yoğun çalışmalar yapmaktadır.

Teknolojik uygulamalarda yarıiletkenlerin önemi görmezden gelinemez. Bu malzemelerin teknolojide geniş çapta kullanılması nedeniyle, birbirinden üstün yanlarının ve daha ucuz elde edilebilme yollarının araştırılması aralıksız devam etmektedir. Elektronik ve bilgisayar bilimindeki ilerlemeler yarıiletkenlerin kendine özgü niteliklerinin araştırılması ile gerçekleşmiş ve buna bağlı olarak teknolojik gelişmeler hız kazanmıştır. Son yıllarda geniş bant aralığına sahip yarıiletken malzemelerin, teknoloji ve elektronik biliminde kullanım alanları genişlemiştir. Bu bağlamda daha ucuz malzeme ve teknoloji geliştirmek için kapsamlı araştırmalar yapılmaktadır.

Yarıiletken malzemeler yasak enerji aralığı 0.1 eV ile 4 eV arasında olan malzemelerdir. İletken ile yalıtkan arasında bulunurlar. Yasak enerji aralıkları büyük olduğundan valans bandında bulunan elektronlar iletkenlik bandına dışarıdan ısı, ışık ve benzeri etkiler olmadan geçemezler. Isı, ışık ve manyetik etki ile valans bandında bulunan elektronlar yasak enerji aralığını geçmeye yetecek kadar enerjiyi aldıklarında iletkenlik bandına geçerek iletimi sağlarlar.

Yarıiletkenler elektronik ve optoelektronik devre teknolojisinin temelini oluşturmaktadır. Yeni tür yarıiletkenlerin elde edilmesi, fiziksel ve elektriksel özelliklerinin araştırılması ve devre teknolojisinde kullanılabilir hale getirilmesi büyük önem taşımaktadır. Bu araştırmaların bir bölümü yeni yarıiletkenlerin elde edilmesi için yapılırken diğer bir bölümü sentezlenen bileşiklerin fiziksel özelliklerinin ortaya çıkarılması ve fiziksel özelliklerinden faydalanarak yeni elektronik ve optoelektronik devre elemanı geliştirmeyi amaçlamaktadır (Ziel 1968). Yarıiletkenler güneş enerjisini kullanılabilir enerjiye dönüştüren fotovoltaik güneş pillerinin ve çeşitli cihazların vazgeçilmez materyalleridir. Güneş pillerinde ve diğer optik cihazlarda yaygın olarak kullanılan yarıiletkenler genelde ince film olarak üretilmektedir.

Yüksek iyoniklikleri ve geniş bant aralıklarının, direkt bant aralığı olması; soğurma ve lüminesans için yüksek optik geçirgenlik olasılığına sahip olmaları nedeniyle periyodik tablonun IIB ve VIA grubu elementlerinin birleşimi ile oluşan II–VI grubu bileşiklerine olan ilgi büyüktür. Bu bileşiklere CdS, CdZnS ve ZnS gibi bileşikler örnek olarak verilebilir. II–VI grubu ikili bileşikler 1.8 – 4 eV aralığında olmak üzere oldukça geniş enerji bant aralığına sahiptirler. Bu nedenle, geniş bant aralıklı yarıiletken materyaller olarak bilinirler ve farklı optiksel dalga boylarına sahip laserlerin yapımında kullanılırlar (Nag 1980). Bu grup materyaller iki önemli sebepten dolayı araştırmacılar için ilgi çekicidirler. Bu sebeplerden birincisi, gelişmiş optoelektronik aletlerin yapımında bu materyallere özgü özellikler iken diğeri ise elde edilmelerinde kullanılan hızlı ve gelişmiş tekniklerdir. Bu bileşikler kızılötesi dedektörler, güneş pilleri, lazerler ve çeşitli diyotların üretiminde oldukça yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Fahrenbruch 1977).

ZnO, ZnS, ZnSe, GaAs, GaN gibi yarıiletkenler, yüksek sıcaklık ve yüksek ışıma gücü gerektiren elektronik biliminde LED ve lazer diyotları gibi kısa dalga boylu (UV ve şiddetli mavi–yeşil) ışık yayan optik aletlerde kullanılmakta ve daha iyi sonuçların elde edilebilmesi için araştırılmaktadır (Kermani ve ark. 2013, Aboulaich ve ark. 2014, Son ve ark. 2014).

Bu bileşikler kullanılarak elde edilen ince filmler elektriksel iletkenliği ve optik geçirgenliğinden dolayı elektrolüminesans cihazlarda, fotoiletkenlerde, güneş pillerinde, ince film transistörlerinde (TFT), foto transistörlerde, kızılötesi ve morötesi dedektörlerde, gaz sensörlerinde, LCD ve LED görüntü panellerinde, yansıma önleyici kaplamalarda, görüntü sensörlerinde, lazerlerde, fotodirençlerde, çeşitli diyotlarda, katot ışını tüplerinde ve teknolojik açıdan daha pek çok elektronik ve optoelektronik uygulamalarda kullanılırlar.

1.1. CdS Bileşiğinin Özellikleri

Optik bant aralığı 2.42 eV olan CdS nano kristali doğrudan (direct) bant aralığına sahiptir ve güneş ışığını büyük oranda geçiren bir yarıiletkendir. Bu özelliği CdS'ye pek çok optik uygulamalar için avantaj sağlamaktadır. CdS yarıiletkeni iyi bir lüminensans materyal olması ve iyi fotoelektrik özelliklere sahip olması nedeniyle

önemli bir teknolojik uygulama malzemesidir. 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 yakaşık 1.5 eV değerinde yasak enerji aralığına sahip olan malzemelerin soğurma katmanı olarak kullanılması gerektiği bilinmektedir. Çünkü bu yasak enerji aralığına sahip malzemeler minimum kayıp ile güneş ışınlarını maksimum olarak soğurabilmektedir. Pek çok heteroeklem ince film güneş pilleri için kısmen geniş yasak enerji aralığına (2.42 eV) sahip olan CdS ideal bir pencere malzemesidir.

CdS bileşiğini kimyasal püskürtme yöntemi ile ilk olarak Chamberlin ve Skarman (1966) elde etmişlerdir. CdS, II–VI grubu bir yarıiletkendir; hem wurtzite (hegzagonal) hem de zinc blende (kübik) kristal yapısına sahip olabilir (Şekil 1.1. ve Şekil 1.2.). CdS yarıiletkeninin 300 K sıcaklığında doğal kararlı hali wurtzite kristal yapıdadır. Wurtzite kristal yapısı, biri Cd atomlarından oluşan diğeri S atomlarından oluşan iki hegzagonal sıkı paket yapının iç içe geçmesiyle oluşur ve ilkel hücrede 4 atom bulunur. Wurtzite yapıya benzer olarak, zinc blende yapıda da her bir atomun dört yakın komşusu vardır (Balkanski ve Wallis 2000).

Wurtzite (hegzagonal) kristal yapısına sahip materyallerin etkin kütleleri ve elektron mobiliteleri asimetrik atomik potansiyel dağılımı nedeniyle anizotropik özellik gösterir. Bu da kübik yapıya sahip materyaller ile aralarında gözlenen belirgin bir farklılıktır. Mobilitedeki bu anizotropik durum hem deneysel hem de teorik çalışmalar ile saptanmıştır (Nag 1980).

Hegzagonal kristal yapı için, CdS bileşiğinin oda sıcaklığında yasak enerji aralığı 2.42 eV, yoğunluğu ise 4.82 gr/cm^3 ve örgü sabitleri a=4.1348 Å ve c=6.477 Å'dür. Kübik yapıda oluşan CdS bileşiği için örgü sabiti a=5.832 Å ve yoğunluğu 4.826 gr/cm^3'tür (Kittel 1986, Lide 1998).

CdS bileşiğinin 300 K sıcaklığında öz direnci 10^7 ohm.cm ile 10^{-1} ohm.cm arasında değişmektedir. Enerji bant aralığı oda sıcaklığında 3.68 eV, elektron mobilitesi 340 cm^2/Vs, hol mobilitesi 50 cm^2/Vs (Sze, 1985).

CdS yarıiletkeninin bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

1.2. ZnS Bileşiğinin Özellikleri

II–VI grubu yarıiletken bileşiklerinden olan ZnS, yaklaşık olarak 3.67 eV yasak enerji aralığına sahip bir yarıiletkendir. Geniş ve doğrudan (direct) bant aralığına sahip olması (enerji aralığının ~2 eV veya daha büyük olması) ve güneş ışığını tamamen geçirmesi bu yarıiletkeni görünür bölgede şeffaf özellik gösteren uygun bir lüminesans materyal haline getirir.

ZnS filmleri de diğer sülfürlü bileşik yarıiletken filmler gibi fotoiletkendir ve güneş pilleri, ince film transistörleri ve elektrolüminesans aletleri gibi birçok yarıiletken cihazların yapımında kullanılmaktadır.

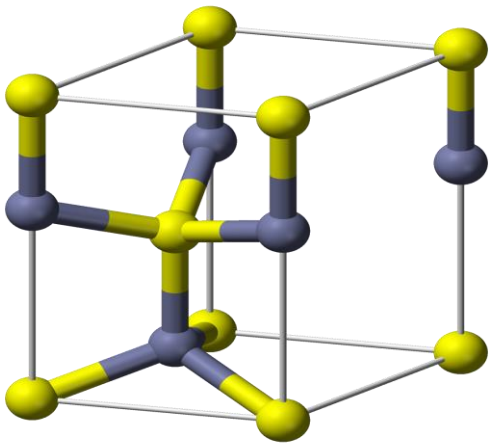
Diğer II–VI grubu bileşiklerde olduğu gibi ZnS de hem wurtzite (hegzagonal) yapıda hem de zinc blende yapıda kristalize olur. Her iki yapının da bant yapıları birbirlerine çok benzemektedir (Madelung 1996).

ZnS, ZnSe, ZnTe ve CdTe gibi II–VI grubu bileşikleri oda sıcaklığında zinc blende yapıda kristallenirler. Yapılan teorik ve deneysel çalışmalar sonucunda, bu materyallerin kristal yapılarının kübik olması nedeniyle etkin kütlelerinin ve bunun sonucu olarak da elektron mobilitelerinin izotropik olduğu gözlenmiştir (Nag 1980).

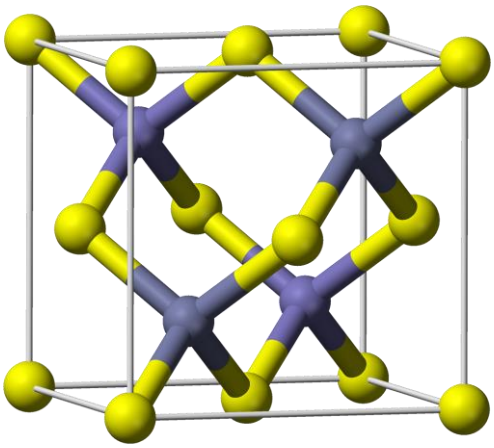
Wurtzite kristal yapıda atomların dizilişi sphalerite yapıya benzerlik gösterir. Bu kristal yapıda bir cins atom diğer ikinci tür dört atom tarafından tetrahedral olarak çevrilmektedir. Ancak tetrahedronlar öyle yönelmişlerdir ki atomların yerleşimi iç içe geçmiş iki sıkı paketlenmiş hegzagonal örgülere uygundur. Bu nedenle wurtzite yapı iki atomlu sıkı paketlenmiş hegzagonal yapı olarak tanımlanabilir (Nag 1980). Şekil 1.1.'de wurtzite yapı gösterilmektedir.

Wurtzite kristal yapıda, Zn atomları yarı tetrahedral durumları doldururken S atomları sıkı paketlenmiş hegzagonal düzende bulunmaktadır. Hegzagonal yapıda kristalize olan ZnS bileşiğinin oda sıcaklığında yasak enerji aralığı 3.67 eV, yoğunluğu ise 4.09 gr/cm^3 ve örgü sabitleri a=3.8140 Å ve c=6.2576 Å'dür. Kübik yapıdaki ZnS için yasak enerji aralığı oda sıcaklığında 3.68 eV, elektron mobilitesi 180 cm^2/Vs, hol mobilitesi 5 cm^2/Vs (400°C'de), örgü sabiti 5.4093 Å ve yoğunluğu 4.079 gr/cm^3'tür (Kittel 1986, Lide 1998).

Kübik ZnS yapıda, Pauling eşitliğine göre, Zn–S bağı %87 kovalent bağ karakterindedir ve böylece ZnS kristal yapısı tetrahedral kovalent bağ yapısına sahiptir. Atomlar tetrahedral olarak birbirine bağlanmışlardır. Kübik ZnS (zinc blende) yapıda bulunan iki yüzey merkezli kübik yapıların (face centered cubic, fcc) birisinde Zn atomları diğerinde ise S atomları bulunur. Zn ve S atomlarının koordinasyon sayısı dörttür, her atomun çevresinde karşı cinsten dört atom düzgün bir dörtgenin köşelerinde eşit uzaklıkta olacak şekilde bulunurlar. Şekil 1.2.'de zinc blende yapı gösterilmektedir.



Şekil 1.1. Wurtzite yapı



Şekil 1.2. Zinc blende yapı

Kübik ve hegzagonal kristal yapıları birbirlerine oldukça benzemektedirler. Her iki yapıda da örgü boşluğu hemen hemen aynı olmasına rağmen, özellikle piezoelektrik ve pyroelektrik özellikleri açısından farklılıklar vardır. Ancak hegzagonal ve kübik yapıların enerji bant yapıları benzer özellik gösterirler.

ZnS yarıiletkeninin bazı fiziksel ve elektriksel özellikleri Çizelge 1.1.'de gösterilmiştir.

Sonuç olarak elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde geçirgen olan geniş bant aralığına sahip yarıiletkenler, elektronik ve optoelektronik aygıtların üretiminde önemli rol oynamaktadır. Bütün bu özellikler düşünüldüğünde II–VI grubu bileşiklerinin ve bu grup içinde yer alan CdS ve ZnS ince filmlerin önemi daha kolay anlaşılmaktadır.

Çizelge 1.1. CdS ve ZnS'nin 300 K'deki bazı özellik ve değerleri

	CdS		**ZnS**	
	Kristal Yapısı		**Kristal Yapısı**	
	Wurzite	Zinc blende	Wurzite	Zinc blende
Yarıiletken Tipi	n		n	
Bant Aralığı Tipi	Doğrudan		Doğrudan	
Yasak Bant Aralığı	2.42 eV	2.42 eV	3.91 eV	3.67 eV
Dielektrik Sabiti	8.9	…	9.6	8.3
Elektron Mobilitesi	350 cm^2/Vs	…	…	165 cm^2/Vs
Boşluk Mobilitesi	40 cm^2/Vs	…	…	5 cm^2/Vs
Mol Ağırlığı	144.48 g/mol	…	97.474 g/mol	…
Yoğunluk	4.82 g/cm^3	4.87 g/cm^3	3.98 g/cm^3	4.09 g/cm^3
Erime Noktası	1750 ^oC	…	1850 ^oC	1830 ^oC
Termal İletkenlik	40.1 W/mK	…	…	…
Refraktif İndex	2.506	2.529	2.356	2.378

Özellikle son yıllarda CdS ve ZnS filmlerin farklı yöntemlerle farklı alttaşlar üzerine büyütülmesi ile ilgili çok sayıda çalışma yapılmıştır. CdS ve ZnS yarıiletken ince filmlerin büyütülmesi için vakum buharlaştırma (Kathirvel ve ark. 2011), kimyasal püskürtme (Spray Pyrolysis) (Adelifard ve ark. 2012, Rmili ve ark. 2013), moleküler demet epidaksi (MBE) (Dremel ve ark. 2003, Li ve ark. 2007), kapalı alanda süblimleştirme (CSS) (Kurbatov ve ark. 2013, Paudel ve ark. 2014), elektro depolama (Echendu ve Dharmadasa 2014, Lin ve ark. 2015), art arda iyonik tabakaların yüzeye tutunması ve reaksiyonu (SILAR) (Ozakin ve ark. 2012, Mukherjee ve ark 2015),

atmalı lazer biriktirme (pulsed laser deposition, PLD) (Orlianges ve ark. 2011, Kim ve ark. 2014), kimyasal banyo biriktirme (CBD) (Johnson ve ark. 2012, Gonzalez–Panzo ve ark. 2014), radyo frekans (RF) yöntemi ile saçtırma (Gaewdang ve ark. 2012, Wang ve ark. 2013), fiziksel buhar biriktirme (PVD) (Darga ve ark. 2009), kimyasal buhar biriktirme (CVD) (Ma ve ark. 2007, Colombara ve ark. 2013), ve termal buharlaştırma (Xu ve ark. 2013, Escorcia–Garcia ve ark. 2014) yöntemleri gibi çeşitli teknikler kullanılır. Bu büyütme yöntemlerinden Radyo frekans (RF) saçtırma yönteminin geniş endüstriyel uygulama alanları için faydalı olduğu ve düşük maliyetli basit bir süreç olduğu bilinmektedir. Radyo frekans (RF) saçtırma yöntemi ile minimum materyal israfı ve film kalınlığı kontrolü ile şekli farklı olan alt tabanlar üzerinde yüksek kaliteli ince filmler elde edilebilir.

Ayrıca II–VI grubu yarıiletkenlerinden CdS ve ZnS elektronik, optoelektronik ve fotovoltaik aygıtların üretimi ve karakterizasyonu için kullanışlı malzemelerdir. Bu çalışmalara ilgi artarak devam etmektedir.

Wu ve ark. (2014) ZnO nanorodların üzerine CdS ve ZnS ince filmleri kimyasal banyo depolama yöntemi ile biriktirerek ZnO/CdS/ZnS ve ZnO/ZnS/CdS fotoelektrotlarını imal ettiler. Son ve ark. (2014) düşük çalışma gerilimi altında kırmızı renk ışık yayan CdSe–ZnS kuantum nokta tabanlı ışık yayan diyotlar (QDLED) ürettiler. Geçirmeli elektron mikroskobu (TEM) ile yapısal özelliklerini araştırdılar. Park ve ark. (2014) gaz sensörleri olarak kullanılmak üzere Pd nanoparçaçıklar ile işlevi iyileştirilmiş ZnS nanrodlar hazırladılar. Üretilen ZnS gaz sensörlerinin UV ışıması altında NO_2 gazı algılama duyarlılığını detaylı olarak incelediler. Turgut ve ark. (2013) sol jel spin yöntemi ile büyüttükleri ZnS filmi ile Al/ZnS/p–Si/Al heteroeklem diyot üretimi yaptılar. Giberti ve ark. (2015) ekran baskı teknolojisi ile sentezlenen CdS kalın filmleri ile gaz sensörleri imal etmiş ve algılama özelliğini alkoller, aldehidler, ketonlar ve diğer gaz halindeki bileşikler ile test etmişlerdir. Zhang ve ark. (2014) CdS/ZnO ince film tabanlı fotodedektörleri (PET) termal buhar çöktürme ve hidrotermal bir metot kullanarak meydana getirmişlerdir. Yun ve ark. (2014) n–CdS/p–CdTe güneş pilleri üretmişlerdir. Güneş pilinin kısa devre akımını mavi dalga boyu bölgesinde artan akım kazancı nedeniyle önemli ölçüde arttırmışlardır.

Bu çalışmada, güneş pillerinde, optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerinin ve elektrolüminesans aygıtlarda geniş uygulamaları nedeniyle araştırmalarda oldukça ilgi çeken CdS ve ZnS yarıiletken filmlerinin yüzey, optik ve elektriksel özelliklerini iyileştirmek amaçlandı. Bu nedenle CdS ve ZnS ince filmleri 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarındaki p–Si yarıiletkeni üzerine RF saçtırma yöntemiyle üretildi ve alttaş sıcaklığının filmlerin yüzey ve optik özelliklerine etkisi incelendi.

Daha sonra bu yapılar üzerine Ag buharlaştırılarak Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapıları elde edildi. Bu yapılardan 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında üretilen filmden elde edilen Ag/ZnS/p–Si ve 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında üretilen filmden elde edilen Ag/CdS/p–Si yapılarının sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri incelendi. 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklığında üretilen filmler kullanılarak elde edilen Ag/ZnS/p–Si ve Ag/CdS/p–Si yapılarının elektriksel özellikleri karanlıkta alınan akım–gerilim ölçümleri kullanılarak tayin edildi. Alttaş sıcaklığının elde edilen heteroeklem yapıların elektriksel özellikleri üzerine etkisi irdelemek amacıyla tüm yapıların güneş simülatörü altında akım–gerilim ile kapasite–gerilim ölçümleri alınarak elektriksel parametreleri hesaplandı.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Metal–yarıiletken kontaklar elektronik ve optoelektronik devre elemanları teknolojisinde oldukça önemli bir yere sahiptir. Güneş pilleri, metal–yarıiletken alan etkili transistörler, Schottky diyotlar, mikrodalga devre elemanları ve yarıiletken fotodedektörler gibi birçok elektronik devre elemanı Schottky kontaklar kullanılarak yapılmaktadır.

Metal–yarıiletken (MS) kontakların geçmişi 1874 yılında Braun'un metal sülfat kristallerinde elektriksel iletkenliğin asimetrik olduğunu bulmasına dayanır. 1906 yılında Pickard, silisyum kullanarak geliştirdiği metal–yarıiletken dedektör patentini almıştır. Daha sonra 1907 yılında Pierce, metal teli ile yarıiletken yüzeyinde nokta kontak şeklinde oluşturduğu diyotların doğrultma karakteristiğinin olduğunu belirlemiştir (Neamen 2003). 1921 yılında ise Richardson, metal–vakum sistemlerinde termoiyonik emisyon olayını açıklamıştır.

MS kontaklarda doğrultma özelliğinin açıklanması ile ilgili ilk çalışma 1931 yılında Schottky, Störmer ve Waibel'in kontakta elektriksel akım aktığı esnada tüm kontak boyunca bir potansiyel düşüşünün gerçekleşmesini göstermelerine dayanır. Bu çalışmadan hemen sonra Wilson (1932) MS diyotlar için, kuantum mekaniksel tünelleme teorisini geliştirmiş ve doğrultma için ters polariteyi açıklamıştır.

1938 yılında Schottky ve Mott birbirinden bağımsız olarak doğrultma mekanizmasının, elektronların potansiyel engeli üzerinden sürüklenme ve difüzyon şeklinde geçişi ile açıklanabileceğini ileri sürmüşlerdir. Schottky–Mott teorisine göre, oluşan potansiyel engelin nedeni metal ve yarıiletkenin iş fonksiyonları arasındaki nicelik farkıdır. Potansiyel engelin büyüklüğü ise, yine bu modele göre metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron ilgisinin farkı alınarak elde edilir (Rhoderick ve Williams 1988). Ancak daha sonra yapılan deneyler, Schottky engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonundan ziyade metal–yarıiletken kontağın hazırlanma yöntemlerine bağlı olduğunu göstermiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre, bu teorinin eksikliği MS arayüzeyde bir tabakanın varlığını dikkate almamasıydı. Oysa bu tabaka pratikte her zaman mümkündür ve ancak kontağın hazırlanma şartlarına göre kalınlığı ve kimyasal yapısı değişebilir. Başka bir deyişle, çok ince de olsa MS arayüzeydeki bir tabakanın varlığı ve bu tabaka içinde bulunabilecek iyonlar nedeniyle oluşan elektronik arayüzey

hal yoğunlukları, yarıiletkene ait Fermi seviyesinin yasak enerji aralığındaki hareketini sınırlandırmaktadır. Schottky–Mott teorisinin yalnızca ideal durumlar için geçerli olacağı ancak daha sonra anlaşılabildi. Bu sonuç üzerine, Bardeen yeni bir model önererek, MS arayüzeyin yeterli sayıda yerel elektronik hallerin olması durumunda, potansiyel engel yüksekliğinin metalin iş fonksiyonundan bağımsız olacağını söylemiştir (Wilmsen 1985).

Schottky ve Bethe, 1940 yılında metal–vakum sistemlerindeki iletkenlik ile metal–yarıiletken diyotlardaki iletkenlik arasındaki benzerlikleri ortaya koymuş, iki yıl sonra aynı olayın metal–yarıiletken doğrultuculara da uygulanabileceği Bethe tarafından gösterilmiştir (Bethe 1942).

1947 yılında Bardeen, metal ile yarıiletken arayüzeyinde yalıtkan bir tabaka var olduğunda, bu yalıtkan tabakanın metal ile yarıiletken yüzeylerinde ki dipol tabakasının Fermi seviyesinin konumuna katkısını ortadan kaldırdığını ileri sürmüştür. İkinci Dünya Savaşı döneminde, mikrodalga radarların gelişmesiyle nokta kontak diyotlar tekrar önem kazanmış, daha çok frekans dönüştürücü ve mikrodalga dedektör diyotu olarak kullanılmıştır (Torrey ve Whitmer 1948).

Aynı yıl yükseltmelerinin düşük olması nedeniyle, vakum tüpleri yerlerini metal–yarıiletken doğrultuculara bırakmıştır. Bu yapılar uzun süre sadece mikrodalga ölçümlerinde kullanılmıştır (Bardeen 1947, Brattain ve Bardeen 1948).

1964 yılında Baird, Schottky engelini silisyum transistörle birleştirerek Schottky engel kapılı metal–yarıiletken alan etkili transistörü (MESFET) bulmuştur (Rideout 1978). Metal–yarıiletken doğrultucu kontakların teorik izahı, pratikteki uygulamalarından yıllar sonra anlaşılabilmiş, gelişmelerin birçoğu metal–vakum sistemleriyle çalışan araştırmacılar tarafından gerçekleştirilmiştir. Schottky etkisi olarak bilinen ve metal–vakum sistemlerinde uygulanan elektrik alandan doğan imaj–kuvvet etkisiyle engelin alçalması olayı, elli yıl kadar sonra Sze ve ark. (1964) tarafından metal–yarıiletken yapılarda doğrulanmıştır.

1966 yılında Crowell ve Sze tarafından Schottky'nin difüzyon ve Bethe'nin termoiyonik emisyon teorileri birleştirilerek tek bir teori halinde ortaya konulmuştur. Crowell ve Sze tarafından birleştirilen termoiyonik emisyon–difüzyon teorisi ideal Schottky diyotlardaki akım iletim olayında önemli bir yer tutmuştur. Turner ve

Rhoderick (1968) kimyasal metotlarla hazırlanan yüzeyler için, engel yüksekliğinin yüzeyin hazırlanma şartlarına bağımlı olup olmamasını araştırmış ve çok yüksek vakumda yarılmış silisyum üzerine metalin buharlaştırılmasıyla oluşan diyotlar için kullanılan metalin cinsinden bağımsız olarak engel yüksekliğinin yaşlanmadan etkilenmediğini bulmuşlardır.

Card ve Rhoderick (1971) arayüzey hal yoğunluğunu tayin edip arayüzey hal yoğunluğunun ve arayüzey tabakasının *I–V* özelliklerinin idealite faktörü üzerine etkilerini gözlemlemişlerdir. Chattopadhyay ve Kumar (1988) metal/SiO_2/p–Si Schottky engel diyotlarında, arayüzey tabakasının tuzak yoğunluğu ve uzay yük yoğunluğunun değerini farklı bir metot kullanarak hesaplamışlardır.

Seri direnç, Schottky engel diyotların elektriksel karakteristiklerini ideallikten uzaklaştıran önemli bir parametredir. Doğru beslem *I–V* karakteristikleri düşük sıcaklıklarda yarı logaritmik ölçümde doğrusaldır. Ancak, uygulama voltajı yeterince büyük ise seri direnç, arayüzey tabakası ve arayüzey halleri gibi parametrelerin etkisi nedeniyle ideallikten büyük ölçüde sapar. Seri direnç parametresi sadece doğru beslem *I–V* karakteristiklerinin doğrusal (lineer) olmayan bölgesinde etkilidir. Seri direncin uygulamalardaki etkisini azlatmak için pek çok araştırmacı farklı yollar ve yöntemler geliştirmişlerdir. Norde (1979), ideal bir Schottky diyotta (*n* idealite faktörünün 1'e eşit olduğu diyotlarda) seri direncin değerini doğru beslem *I–V* karakteristiklerinden elde etmek için bir metot açıklamıştır. Sato ve Yasamura (1985), Schottky kontakların yapısından dolayı Norde'nin elde ettiği yöntemin gerçek seri direnç değerlerini veremeyeceğinden, Norde metodunu modifiye ederek idealite faktörünün 1 ve 2 arasında bir değer alabildiğini ifade etmişlerdir. Metal–yarıiletken kontaklarda, idealite faktörünün ideallikten uzaklaşma nedenlerini araştıran Rhoderick ve Williams (1988), ideal olmayan bu durumun seri dirençten kaynaklanabileceğini ifade etmiştir. Lee ve ark. (1992), Norde fonksiyonunun yeniden düzenlenmesi ile akım değerlerinin değişimine bağlı olabilen yeni bir *F(V)* fonksiyonunu kullanarak seri direnç, engel yüksekliği ve idealite faktörü değerlerinin elde edilebileceğini bildirmişlerdir.

Engel yüksekliğinin homojensizliğinden dolayı idealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin diyottan diyota farklılık gösterebileceği, Mönch (1987) tarafından ortaya atılmıştır. Bu durum, Tung (2001) tarafından teorik sonuçlar üzerinde kurulan

homojen olmayan Schottky kontakların sayısal simülasyonları ile açıklanmıştır. MS kontakların homojen engel yükseklikleri, Schottky potansiyel engellerinin imaj–kuvvet alçalması da dahil edildiğinde idealite faktörünün (n) karakteristik değeri olan 1.01'e engel yüksekliklerinin doğrusal bir ekstrapolarizasyonu ile ifade edilmiştir.

Ardından ideal ve ideal olmayan diyotlar için Cheung ve Cheung (1986) tarafından, doğru beslem *I–V* eğrileri kullanılarak Schottky diyotlarda engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnci hesaplamak için farklı bir hesaplama modeli daha geliştirilmiştir. Bunların yanı sıra, MS yapılarda seri direnç üzerine birçok çalışma mevcuttur. Seri dirence ilave olarak paralel (shunt) direnç de bazı araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Kaminski ve ark. 1999, El–Adawi ve Al–Nuaim 2002).

Schottky engel diyotların oluşturulması ve engel yüksekliğinin istenilen değere ayarlanması büyük önem arz etmektedir. İstenilen Schottky engel diyotlarının oluşturulması ve engel yüksekliğinin değişiminin ayarlanmasındaki en büyük problem, arayüzey hallerinden dolayı Fermi seviyesinin çakılı kalmasıdır. Bu başlıbaşına bir mühendislik alanıdır (Eglash ve ark. 1987, Zahn ve ark. 2002). Doğru beslem *I–V* karakteristiklerden elde edilen idealite faktörünün büyüklüğüne bağlı olarak arayüzey hallerinin metalle mi yarıiletkenle mi dengede olduğu Card ve Rhoderick (1971) tarafından teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır. Deneuville ve ark. (1974), Card ve Rhoderick'in yaptıkları çalışmaları genişleterek doğru ve ters beslem *I–V* karakteristiklerinden arayüzey tabakasının kalınlığını ve arayüzey hallerinin enerji dağılımını elde etmişlerdir.

Tung (2001), Schottky diyotlarla yaptığı çalışmalarda, Schottky engelli diyotlarda deneysel olarak elde edilen *I–V* karakteristiklerinin bazen termoiyonik emisyon teorisi ile uyuşmayabileceğini ifade etmiştir. İdealite faktörünün yaklaşık 1.10'dan büyük olması durumunun, termoiyonik emisyon modeli ile direkt olarak açıklanamayacağını ve Schottky engel yüksekliğinin genellikle uygulanan gerilime bağlı olduğunu açıklamıştır. Ayrıca idealite faktörünün birden büyük çıkmasını; imaj kuvvetinin etkisiyle engelin azalması, jenerasyon–rekombinasyon akımları, arayüzey halleri ve tünelleme gibi olası mekanizmalara da atfetmişlerdir.

Çok itinalı bir üretim yapılmadıkça, metal ve yarıiletken arasında ince arayüzey doğal oksit tabakasının oluşması kaçınılmazdır. Böyle yalıtkan bir tabaka Schottky diyotunu metal–yalıtkan–yarıiletken (MIS) diyotuna çevirir ve bu aratabakanın diyot karakteristikleri üzerinde kuvvetli bir etkisi olabilir. Schottky diyotların arayüzey durumları üzerine ilk çalışma, engel yüksekliğinin, metalin iş fonksiyonu, arayüzey durumları ve aratabaka kalınlığına bağlılığını inceleyen Cowley ve Sze (Szatkowski ve Sieranski 1992) tarafından yapılmıştır. Daha sonra Card ve Rhoderick (1971) arayüzey durumlarının doğru beslem *I–V* verilerinden elde edilen idealite faktörüne etkisini incelemişlerdir. Tseng ve Wu (1987) ise arayüzey durumlarının Schottky kontakların elektriksel davranışları üzerine etkilerini incelemişlerdir. Onlardan bağımsız olarak Horvath (1988) Card ve Rhoderick'in çalışmalarını genişletmiş ve arayüzey durum enerji dağılımı ve arayüzey tabaka kalınlığının ters ve düz beslem *I–V* karakteristiğinden elde edilebileceğini göstermiştir.

Metal–yarıiletken arayüzeyinde akım iletimi sıcaklığa bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda elektronlar küçük engel yüksekliği ile karşılaştıklarından akım kolaylıkla sağlanır ve idealite faktörü artar (Tung 1991). Sıcaklık daha da arttırılırsa elektronlar daha büyük bir engeli aşmaya yetecek kadar bir enerji kazanırlar ve engel yüksekliği, sıcaklık ve doğru beslem voltajına bağlı olarak değişmeye başlar. Ayrıca sıcaklık artışı ile taşıyıcıların termal hızları arttığından dolayı iletim bandındaki taşıyıcı sayısı artmakta ve yarıiletkendeki genleşmeden dolayı yarıiletkenin yasak enerji aralığı da azalmaktadır. Buna bağlı olarak seri direnç değerinin de azalması beklenir. Yani sıcaklık artışı ile seri direnç değerinin azalması, düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı yoğunluğunun azalmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir (Chand ve Kumar 1996).

Sıcaklık artışı ile idealite faktörünün azalması ve engel yüksekliğinin artması metal yarıiletken arayüzeyinde atomik boyutlardaki inhomojenliğin bir fonksiyonu olarak açıklanabilir. Schottky engel homojensizliklerine uzay yükü bölgesinde oluşan tekrardan birleşim ve tekrardan oluşum akımları (Wittmer 1991), yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımları (Padovani ve Stratton 1966, Crowell ve Rideout 1969, Rhoderick ve Williams 1988), ara yüzey tabakasının kalınlık ve kompozisyonu (Rhoderick ve Williams 1988), görüntü–yük etkisi (Crowell ve Sze 1966, Rideout ve Crowell 1970, Rhoderick ve Williams 1988) ve seri direnç gibi çok çeşitli

mekanizmaların neden olduğu belirlenmiştir. Arayüzey hallerinin varlığı böyle anormalliklerin en popüler açıklamasıdır (Tung 1991).

Sıcaklığın artmasıyla seri direnç değerlerinin düşmesi, düşük sıcaklıklarda serbest taşıyıcı yoğunluğunun azalmasının bir sonucu olarak yorumlanabilir. Çünkü artan sıcaklıkla yarıiletken kristaldeki genleşmeden dolayı yasak enerji aralığı azalmakta ve aynı zamanda taşıyıcılar da daha yüksek termal hıza ulaşacaklarından dolayı iletim bandındaki taşıyıcı sayısı daha fazla olacaktır ve buna bağlı olarak direnç azalacaktır (Chand ve Kumar 1995).

Yine *I–V* çalışmalarında, Schottky engel homojensizliklerinin; sıcaklıkla idealite faktörünün artmasına, engel yüksekliğinin azalmasına ve Richardson grafiğinin sapmasına neden olduğu tespit edilmiştir (Rhoderick ve Williams 1988, Chand ve Kumar 1995, Chand ve Kumar 1996).

Türüt ve arkadaşları (1992) arayüzey oksit katmanlı ve arayüzey katmansız Al/p–Si Schottky diyotlarında arayüzey halleri ve arayüzeyde bulunan sabit yükleri de hesaba katarak, *I–V* ve *C–V* karakteristiklerini inceleyip, engel yüksekliği, idealite faktörü ve arayüzey durum yoğunluklarını tespit etmişlerdir. Arayüzey hallerinin, metal–yarıiletken kontaklarda ters besleme karşı ölçülen $1/C^2$–*V* grafiğinde bükülmeye sebep olup, *C–V* karakteristiklerini etkileyebileceği Szatkowski ve Sieranski (1992), tarafından deneysel sonuçlarla gösterilmiştir. Türüt ve Sağlam (1992), metal–yarıiletken kontaklarda arayüzey hal yoğunluğunu ve bunun sebep olduğu artık sığayı deneysel olarak incelemişler ve bu sığanın frekansın artmasıyla azaldığını, yani arayüzey hal yoğunluğunun artan frekansla azaldığını izah etmişlerdir.

Akkılıç ve ark. (2003) arayüzey tabakalı ve arayüzey tabakasız olarak elde ettikleri Sn/n–Si Schottky diyotlarının *I–V* özelliklerini incelemişlerdir. Hem teorik hem deneysel olarak idealite faktörünün uygulanan gerilim ile ve aktif engel yüksekliğinin de idealite faktörü ile nasıl değiştiğini açıklamaya çalışmışlardır.

Ocak ve ark. (2010), Sn/MnHA/n–Si organik–inorganik heteroeklem diyotun elektriksel özelliklerini 300 K – 380 K sıcaklıklarında 10 K aralıklarla sıcaklığa bağlı olarak belirlemişlerdir. Elektriksel karakteristiklerden yapının iyi doğrultma özelliği gösterdiğini rapor etmişlerdir. Ters beslemde sıcaklık arttıkça diyot akımının ciddi

şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklık arttıkça idealite faktörünün azaldığını engel yüksekliğinin ise arttığını tespit etmişlerdir.

CdS ve ZnS materyalleri yüksek elektriksel ve optik geçirgenliğe, geniş bant aralığına sahip olması nedeniyle gaz sensörleri, LED (Light Emitting Diode), foto direnç, güneş pilleri gibi optoelektronik cihazların yapımında tercih edilen malzemeler olmuşlardır. Bu özelliklerinden dolayı CdS ve ZnS üzerinde çalışıldığı ilk zamandan bu yana çeşitli üretim yöntemleri kullanılarak kullanım amaçlarına hizmet edecek biçimde, en kaliteli ve en ucuz olacak şekilde üretilmeye çalışılmıştır.

CdS ve ZnS filmlerinin karakterizasyonu ve bu filmler kullanılarak yapılan elektronik ve optik aygıtlar üzerine çalışmalar özellikle son 10 yılda hızlı bir şekilde artmaya başlamış ve son birkaç yılda birçok çalışmanın ilgi odağı olmuştur.

Lindroos ve ark. (1997) ZnS ince filmleri SILAR yöntemi ile polyester tabanlar üzerine büyütmüşlerdir. Polyester tabanlar, ZnS ve taban yüzeyi arasında iyi bir adezyon sağlamak için etanol ile yıkandıktan sonra 12 saat $SnCl_2$ çözeltisi içinde tutulmuştur. SILAR yöntemi ile polyester üzerine ZnS büyüme oranı; cam, GaAs ve ITO (indiyum tin oksit) tabanlar üzerine büyüme oranından daha yüksek olduğunu gözlemişlerdir. Filmlerin yasak enerji aralığını 3.44 eV (361 nm) olarak hesaplamışlardır. Bu değer yasak enerji aralığı 3.54 eV olan kübik yapıdaki ZnS ile uyuşmaktadır. ZnS ince filmler kalınlıklarının 250 nm'ye kadar amorf, 250 nm'yi aştıktan sonra kristal özellik gösterdiğini XRD ölçümleri ile belirlemişlerdir. Bunun sebebi, polimer tabanların yüzeylerinin düzgün ve homojen olmayışıdır. Kristal özellik kazandıktan sonra filmlerin pürüzsüz ve homojen oldukları gözlenmiştir. SILAR yöntemi ile polimer yüzeyler üzerine büyüyen ZnS ince filmlerin kristalliğinin; cam, ITO ve GaAs tabanlar üzerine büyüyen filmlerin kristalliği kadar iyi olmadığını gözlemlemişlerdir.

Ximello–Quiebras (2004) ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; kimyasal banyo biriktirme yöntemi ile cam alt taban üzerinde CdS ince filmleri oluşturmuşlardır. Filmlerin XRD sonuçlarından (002) doğrultusu boyunca hegzagonal fazda büyüdüğünü görmüşlerdir. Kalınlığı 1138 Å olan CdS ince filmlerinin karanlık ortamdaki özdirencini 7.34 Ωcm, ışıklı ortamdaki özdirencini ise 24.31 Ωcm olarak bulmuşlardır. Aynı

kalınlığa sahip CdS ince filmlerin yasak bant aralığını 2.5 eV ve tanecik büyüklüğünü 0.065 μm olarak bulmuşlardır.

Sağlam ve ark. (2008) n–Si alttaş üzerine SILAR metoduyla büyütülmüş CdS arayüzey tabakalı Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının düz beslemdeki *I–V* ve ters beslemdeki $1/C^2$–*V* eğrilerinden engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi elektriksel parametrelerini hesaplamışlardır. Oda sıcaklığındaki akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerinden Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısı doğrultucu kontak özelliği göstermiştir. Termoiyonik emisyon teorisini uygulayarak diyotun idealite faktörünü 2.06 ve engel yüksekliğini 0.92 eV olarak tanımlamışlardır. Diyotun ideal olmayan *I–V* davranışı ve 1'den büyük idealite faktörünü arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve seri dirence bağlamışlardır. Doğru gerilim altında yüksek akımlarda, seri direnç (R_s) etkisini gözlemlemişlerdir. d*V*/d*(lnI)–I* ve H*(I)–I* eğrilerinden seri direnç değerlerini sırasıyla 182.24 Ω ve 186.04 Ω olarak elde etmişlerdir. Bu durum Cheung yaklaşımı ile tutarlılık göstermiştir. Aynı şekilde $1/C^2$–*V* karakteristiklerinden hesaplanan engel yüksekliğini de 0.698 eV ile 0.743 eV arasında değişen değerler bulmuşlardır. Ayrıca aygıtın arayüzey durumları (N_{ss}) yoğunluk dağılımını doğru beslem *I–V* karakteristiklerinden elde etmişler ve N_{ss}'nin bant ortasından iletkenlik bandının tabanına doğru değişim gösterdiğini açıklamışlardır.

Gupta ve ark. (2009) termal buharlaştırma yöntemi kullanarak polietilen tereftalat (PET) üzerine Al/n–CdS ince filmini büyüterek eklem davranışını incelemişlerdir. Yapının *I–V* karakteristiklerinin eklemin Schottky kontak davranışını gösterdiğini belirlemişlerdir. Doyma akımı, engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi parametreleri *I–V* karakteristiklerinden hesaplamışlardır. İletimi termoiyonik emisyon difüzyon mekanizmasından dolayı baskın olarak gözlemlemişlerdir.

Farag ve ark. (2009) termal buharlaştırma tekniği ile oluşturulan CdS ince filmlerin yapısal ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Hazırladıkları Al/n–CdS Schottky yapısının akım–gerilim (*I–V*) ve kapasite–gerilim (*C–V*) ölçümleri gibi elektriksel özelliklerini 303 – 403 K aralığında farklı sıcaklıklarda analiz etmişlerdir. Ek olarak farklı aydınlatma şiddetlerinin akım mekanizması üzerine etkisine bakmışlardır. Ters beslemde düz besleme göre ışığa karşı yüksek duyarlılık gözlemlemişlerdir. Akım–gerilim *I–V* ölçümü sonuçlarından iki farklı iletim mekanizması tespit

etmişlerdir. Bunları doğru beslemin düşük değerlerinde termoiyonik emisyon (TE) ve doğru beslemin yüksek değerlerinde sınırlı uzay yükü iletimi (SCLC) mekanizması ile açıklamışlardır. Ayrıca, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı gibi fotovoltaik parametreler elde etmişlerdir. Fotovoltaik ölçümlerden yararlanarak Al/n–CdS diyotunun, ışığa karşı duyarlı olmasından dolayı bir fotodiyot aygıtı olarak kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Yıldırm ve ark. (2009) CuS, Cu(0.6)Zn(0.4)S ve ZnS ince filmleri oda sıcaklığında, cam yüzeyler üzerine SILAR yöntemiyle büyütmüşlerdir. Kristal yapı, optik bant aralığı ve bu filmlerin elektriksel özellikleri üzerine ışık etkisi ile tavlamanın sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X–ışını kırınımı (XRD) tekniklerini filmin yapısal özelliklerini tayin etmek için kullanmışlardır. SEM ve XRD sonuçları filmlerin cam yüzeylere iyi kaplandığını ve polikristal özelliğe sahip olduğunu göstermiştir. Oda sıcaklığında CuS, Cu(0.6)Zn(0.4)S ve ZnS enerji bant aralığı değerlerini sırasıyla 2.03, 2.14 ve 3.92 eV olarak bulmuşlardır. İki nokta uç yöntemini filmlerin elektriksel özelliklerini araştırmak için kullanmış ve ışık yoğunluğunun artmasıyla akımın arttığını görmüşlerdir. SILAR yöntemi ile CuZnS ince filmlerin elde edildiği bu çalışma literatürde rastlanan ilk çalışma olmuştur.

Tomakin ve ark. (2011) polikristal CdS örneklerini SnO_2 kaplı cam üzerine yüksek alttaş sıcaklıklarda yaygın olarak kullanılan vakum buharlaştırma (T_s > 300 K) yerine, düşük alttaş sıcaklıklarında (T_s = 200 ve 300 K) vakum buharlaştırma yöntemi ile elde etmişlerdir. X–ışını kırınımı sonuçları ile filmlerin tercihi (002) yönelime sahip hegzagonal yapıda olduğunu tespit etmişlerdir. Cu metalini kontak oluşturmak için vakum buharlaştırma ile 200 K'de CdS ince filmin üst yüzeyi üzerine biriktirmişlerdir. Düşük alttaş sıcaklığının Cu/CdS/SnO_2 yapısının akım–gerilim (*I–V*) karakteristikleri üzerine etkilerini 100 K ile 300 K sıcaklık aralığında incelemişlerdir. 300 K'de Cu/CdS/SnO_2 yapısının akım–gerilim grafiğinin üstel olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Ancak 200 K'de Cu/CdS/SnO_2 yapısının *I–V* karakteristiklerindeki üstel davranışının yüksek seri direnç etkisinden dolayı saptığını belirlemişlerdir. Diyotların idealite faktörünün 1'den daha büyük olduğunu ve *I–V* karakteristiklerinin ideal olmayan davranış gösterdiğini söylemişlerdir.

Huang ve ark. (2011) ZnS filmleri radyo frekans (RF) magnetron püskürtme yöntemi ile silikon (Si) ve cam yüzeylere biriktirmişlerdir. ZnS filmlerinin yapısal ve optik özellikleri üzerine ısısal tavlama etkisini araştırmışlardır. Sonuçlar tavlamanın ZnS filmlerinin kristal kalitesini geliştirdiğini göstermiştir. Enerji bant aralığı değerlerini tavlanan filmler için 3.61 eV ve tavlanmayan filmler için 3.49 eV olarak bulmuşlardır. ZnS/Si heteroeklem diyotunu p–tipi tek kristal Si yüzeylere ZnS filmleri büyüterek başarıyla ürettiklerini açıklamışlardır.

Huang ve ark. (2011) n–ZnS/p–Si heteroeklem diyotunu RF magnetron saçtırma yöntemi kullanarak imal etmişlerdir. ZnS filminin bant aralığını yaklaşık 3.63 eV bulmuşlardır. ZnS/Si heteroeklemin akım–gerilim (*I–V*) karakteristikleri incelemiş ve diyotun doğrultucu kontak özelliği gösterdiğini gözlemlemişlerdir. UV ve görünür ışık bölgesinde heteroeklemin ışığa duyarlılığını inceleyip, her iki bölgede de ışığa karşı duyarlılık gösterdiğini belirlemişlerdir.

Ateş ve ark. (2011) Zn/ZnS/n–Si/Au–Sb sandviç yapısını elde etmek için ZnS ince filmi SILAR yöntemini kullanarak n–Si alttaş üzerine büyütmüşlerdir. Yapısal özellikleri için, XRD ve SEM ölçümlerini almış ve ZnS filmlerin polikristal davranış sergilediğini tespit etmişlerdir. Optik soğurma ölçümlerinden ZnS ince film enerji bant aralığı değerini 3.77 eV olarak bulmuş ve oda sıcaklığında alınan akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerinden sandviç yapının doğrultucu davranış gösterdiğini belirlemişlerdir. Yapısal, optik ve elektriksel özelliklere termal tavlamanın etkisini incelemişlerdir. Oda sıcaklığında idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini sırasıyla 2.60, 0.71 eV ve 3.8 kΩ olarak hesaplamışlardır. 400 ^{o}C tavlanan filmler için bu değerleri, sırasıyla 1.68, 0.62 eV ve 1.5 kΩ olarak bulmuşlardır. *C–V* ölçümlerinden yapının taşıyıcı madde konsantrasyonu, Fermi enerjisi ve engel yüksekliği değerlerini tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplamışlardır.

Özakın ve ark. (2012) ZnS ince filmleri oda sıcaklığında SILAR yöntemi kullanarak cam alttaşlar üzerine depolamışlardır. Refraktif endeks ve enerji bant aralığı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. ZnS ince filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özelliklerine film kalınlığının etkisini incelemişlerdir. Filmlerin kristal ve yüzey özellikleri artan film kalınlığı ile iyileşmiştir. Enerji bant aralığı değerlerinin artan film kalınlığı ile 3.58 eV ve 3.87 eV arasında değiştiğini görmüşlerdir. Kırılma indisi (*n*) ve

yüksek frekanslı dielektrik sabitini film kalınlığının bir fonksiyonu olan enerji bant aralığı değerlerini kullanarak hesaplamışlardır. Oda sıcaklığında Zn/ZnS/n–GaAs/In sandviç yapısının elde edilmesi için n–GaAs alttaş üzerine ZnS ince filmi doğrudan büyütmüş ve sandviç yapısının oda sıcaklığında akım–gerilim (*I–V*) eğrilerinden doğrultucu kontak davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. *I–V* karakteristiklerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini sırasıyla 1.894 ile 0.632 eV olarak bulmuşlardır.

Turgut ve ark. (2013) sol jel spin yöntemi ile oluşturdukları ZnS filminin yapısal ve optik özelliklerini ve ZnS film ile ürettikleri Al/ZnS/p–Si/Al heteroeklem diyotunun elektriksel özelliklerini ve aygıt performansını araştırmışlardır. Elde edilen AFM görüntüleri ile filmin yüzey morfolojisinin neredeyse homojen ve pürüzsüz olduğunu gözlemişlerdir. ZnS filmin optik bant aralığı değerini 3.83 eV olarak bulmuşlardır. Elektriksel ölçümlerden Al/ZnS/p–Si/Al heteroeklem diyotunun doğrultucu kontak davranışı gösterdiğini belirlemişlerdir. İdealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini sırasıyla 2.34, 0.77 eV ve 12.3–12.5 kΩ olarak hesaplamışlardır.

Sharma ve Tripathi (2013) kimyasal yöntem ile polimer kaplı CdSe/CdS çekirdek/kabuk yapısını oluşturmuşlardır. CdSe/CdS çekirdek/kabuk yapısını TEM, UV/Vis ve PL spektroskopisi ile karakterize etmişlerdir. Optik çalışmalarda, CdSe/CdS yapısının UV/Vis PL spektrumlarının CdSe ile karşılaştırıldığında kırmızıya kaydığını görmüşlerdir. Heteroeklem diyotun çeşitli sıcaklıklarda düz ve ters beslem altında akım gerilim karakteristiklerini incelemişlerdir. Sıcaklığa bağlı seri direnç (R_s), idealite faktörü (n), engel yüksekliği (Φ) ve Richardson sabitini (A^*) incelemişlerdir. Düz beslemde iletim mekanizmasının termoiyonik emisyon ve sınırlı uzay yükü mekanizmasına bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Sağlam ve ark. (2013) Cd/CdS/n–GaAs/In sandviç yapısını (SILAR) tekniği ile oluşturmuş ve yapının sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Yapısal özellikleri için, XRD ve SEM analizlerini almış ve filmlerin polikristal davranış sergilediğini görmüşlerdir. Oluşturulan yapının oda sıcaklığında *I–V* eğrilerinden elde edilen veriye göre açık bir şekilde doğrultucu kontak davranışı gösterdiğini görmüşlerdir. Sıcaklığın engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç parametreleri üzerine etkisini 80–320 K sıcaklık aralığında incelemişlerdir. Engel yüksekliği ve

idealite faktörünün deneysel değerlerini sırasıyla, 320 K'de 0.738 eV ve 1.263 ve 80 K'de 0.234 eV ve 4.776 olarak hesaplamışlardır. İdealite faktörü sıcaklığın azalması ile artarken, engel yüksekliği azalmıştır. Sıcaklık ile engel yüksekliği ve idealite faktörünün değişimini, CdS/n–GaAs arayüzeyindeki nanometre ölçekli uzunluklarda engel yüksekliğinin homojensizlikleri ile açıklamışlardır.

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte, yarı iletken ultraviyole detektörüne her geçen gün talep artmaktadır. Geleneksel kızılötesi dedektör ile karşılaştırıldığında, ultraviyole–kızılötesi dedektör çift renk algılama sistemi antiparazit yeteneğini artırabilir. Ding ve ark. (2013) radyo frekans magnetron saçtırma teknolojisini kullanarak Pt ince film tabakasını Schottky kontak oluşturmak için CdS altlık üzerine büyütmüşlerdir. Daha sonra termal buharlaştırma yöntemi ile indiyumu Pt/CdS yapısına omik kontaklayarak Pt/CdS/In Schottky diyotunu elde etmişlerdir. Cihazın *I–V* karakteristiğini, oda sıcaklığında test etmiş, düz beslemde minimum akımı ve açık devre gerilimini sırasıyla, 0.578 nA ve 130 mV olarak hesaplamışlardır. Test sonuçları ile yapının doğrutucu özellik gösterdiğini görmüşlerdir. Termoiyonik emisyon teorisine göre, aygıtın idealite faktörü ve Schottky engel yüksekliğini sırasıyla 1.89 ve 0.61 eV bulmuşlardır.

Luque ve ark. (2013) ZnS ince filmleri bir alkalin çözeltisi içinde kimyasal banyo biriktirme yöntemini kullanarak cam ve SiO_2 yüzeylere büyütmüşlerdir. 30, 60 ve 90 dakika farklı çökelme süreleri ile oluşturulan ZnS ince filmlerinden elde edilen yüzey morfolojisi sonuçlara göre, filmlerin her biri için farklı büyüme oranlarının gözlenmesini alttaş tipinin etkisine bağlamışlardır. ZnS filmlerin optik geçirgenliğini yaklaşık %80 ve optik bant aralığını 3.62 eV olarak hesaplamışlardır.

Yu ve ark. (2014) görünür ışık altında fotoelektrokimyasal aktivite ile gelişmiş ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ çekirdek–kabuk nanotel dizileri iyon değişimi ve hidrotermal yöntemle hazırlamışlardır. Örneği X–ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM), geçirmeli elektron mikroskopisi (TEM), UV–Vis, X–ışını fotoemisyon spektroskopisi ve fotoelektrokimyasal yanıt ile karakterize etmişlerdir. Bir pn eklem fotoanodu olarak ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ heteroyapısının görünür ışık bölgesinde ZnO/ZnS/CdS ve ZnO/ZnS filmlerinden çok daha yüksek fotoelektrokatalitik faaliyet gösterdiğini bulmuşlardır. ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$

heteroyapıların içinde bulunan CdS ve ZnS filmlerinin önemli davranışlarını araştırmışlardır. ZnS'nin oksit ve $CuInS_2$ arayüzeyinde ışıkla etkilenen yük taşıyıcıların tekrar birleşimini engelediğini açıklamışlardır. CdS'nin ise görünür ışık bölgesinde soğurmayı arttırdığını, yük taşıyıcıların iletimini tetiklediğini ve elektron ile boşluk birleşimini geciktirerek ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ heteroyapıların fotoelektrokimyasal performansının arttığını gözlemişlerdir.

Sivaraman ve ark. (2014) Mg katkılı CdS (CdS:Mg) ince filmleri sprey piroliz yöntemi ile 400 ^{o}C sıcaklıkta uygun cam yüzeylere büyütmüşlerdir. CdS ince filmlerin yapısal, yüzey, optik ve elektriksel özellikleri üzerine Mg katkısının etkisini incelemişlerdir. Filmlerin kristal yapılarını X–ışını kırınımı tekniği ile belirlemiş; elde edilen tüm filmlerin hegzagonal yapı sergilediğini göstermişlerdir. Mg katkısı arttıkça optik bant aralığı enerjisi 2.48 ve 2.29 eV arasında azalarak değiştiğini gözlemlemişlerdir.

Parameshwari ve Naik (2014) kadmiyum sülfür ince filmleri farklı Cd/S molar oranlarında sprey piroliz yöntemi ile cam yüzeylere büyütmüşlerdir. XRD tekniği ile CdS ince filmin hegzagonal yapıda büyüdüğünü tayin etmişlerdir. Film yüzey morfolojisini FESEM ve film içindeki temel bileşikleri EDX ölçümleriyle tespit etmişlerdir. Filmlerin geçirgenlik oranının %80'nin üzerinde olduğunu belirlemişlerdir. Cd/S molar oranı 0.5'e eşit olarak yetiştirlen CdS ince filmlerin heteroeklem güneş gözeleri için uygun bir pencere katmanı olduğunu açıklamışlardır.

Deepa ve ark. (2014) ZnS ince filmleri kimyasal banyo biriktirme tekniği ile cam yüzeyler üzerine sentezlemişlerdir. Hidrazin hidrat (HH), trietanolamin (TEA) ve trisodyum sitrat (TSC) gibi üç farklı kompleksin ZnS filmlerin büyümesine ve fiziksel özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar ile kompleks maddelerin ZnS filmlerinin yapısını, örgü gerginliğini, yüzey morfolojisini ve optoelektronik özelliklerini etkilediğini belirtmişlerdir. X–ışını difraksiyon tekniği ile ZnS'nin hegzagonal şeklide kristalize olduğunu gözlemişlerdir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile filmlerin yüzey yapısını ve pürüzlülük değişimini ortaya koymuşlardır. Optik bant aralığı değerlerini sırasıyla 3.73, 3.64 ve 3.57 eV olarak bulmuşlardır. Tüm örneklerin oda sıcaklığında alınan fotolüminesans emisyonu spektrumlarından parlak mavi ışık yaydıklarını açıklamışlardır.

Alamri (2014) CdS ince filmleri elektron demeti biriktirme yöntemi kullanarak elde etmiştir. Filmlerin yapısını, morfolojisini ve optik özelliklerini incelemiş ve kulandığı malzemeler ile oluşturduğu filmlerin hegzagonal yapıya sahip olduğunu tayin etmiştir. Yığın ve tozdan biriktirdiği CdS filmlerin optik bant aralıklarını sırasıyla 2.4 ve 2.45 eV olarak bulmuştur.

Rodriguez ve ark. (2014) bu çalışmada, toksik olmayan alkalin çözelti içinde kimyasal banyo tekniği ile oluşturulan ZnS ince filmlerin karakterizasyonunu rapor etmişlerdir. Filmlerin optik geçirgenliğini %80 gibi yüksek bir oran olarak tanımlamışlardır. Çökelme süresi arttıkça enerji bant aralığı değerlerinde 3.83 eV'dan 3.71 eV'a kadar azalma görmüşlerdir. X–ışını kırınım desenlerinden (103) düzlemine karşılık gelen tepe değeri ZnS'nin hegzagonal yapıya sahip olduğunu göstermiştir. Morfolojik çalışmalardan, yüzeyin homojen, iyi tanımlanmış parçacıklardan ve düşük sertlikte kompakt örneklerden oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre ZnS'nin güneş pillerinde pencere katmanı olarak kullanılmasının uygun olduğunu açıklamışlardır.

Mukherjee ve ark. (2015) CdS ince filmini anyonik ön madde olarak amonyum sülfit kullanarak SILAR tekniği ile elde etmişlerdir. Filmleri incelemek için XRD, SEM, TEM, FTIR ve EDX karakterizasyonu tekniklerini kullanmış ve X–ışını difraksiyonu ile filmlerin yapısal karakterizasyonunu ve polikristal doğasını ortaya koymuşlardır. X–ışını hat genişlemesi yöntemini kullanarak parçacık büyüklüğünü yaklaşık 7 nm bulmuşlardır. TEM ile CdS nanoparçaçıklarının büyüklüğünü 5–15 nm aralığında ölçmüşlerdir. EFTEM kullanarak CdS filminin iyi stokiyometrik bir yapıda oluştuğunu belirlemişlerdir. FTIR ile elde edilen soğurma spektrumu analizlerinden optik enerji bant aralığı değerini yaklaşık 2.56 eV bulmuş ve belirgin bir maviye kayma gözlemişlerdir.

Güzeldir ve Sağlam (2015) Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerini 80–300 K sıcaklık aralığında alınan akım–gerilim (*I–V*), kapasite–gerilim (*C–V*) ve iletkenlik–gerilim (*G/W–V*) ölçümleri ile incelemişlerdir. Sıcaklığa bağlı *I–V* karakteristiklerinden artan sıcaklıkla idealite faktörünün (*n*) azaldığını ve engel yüksekliğinin (Φ) arttığını belirlemişlerdir. Bu durumu metal–yarıiletken arayüzeyindeki baskın engel homojensizliğine ve engel yüksekliğinin

Gauss dağılımı varsayımına atfetmişlerdir. Özellikle tükenim bölgesinde yüksek sıcaklıklarda *C–V* eğrilerinin bir pik (tepe) verdiğini ve sıcaklık arttırıldığı zaman *C* ve *G/w* değerlerinin her ikisinin de azaldığını tespit etmişlerdir. Genel olarak bu davranışları arayüzey durumlarının ve seri direncin yeniden moleküler olarak yapılanmasına atfetmişlerdir. *C–V* ve *G/w–V* verilerinden seri direnç (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğu dağılımını (N_{ss}) belirlemişlerdir. Sıcaklığa bağlı R_s değişimini serbest yük taşıyıcılarının eksikliği ile açıklamışlardır. Ayrıca, 500 kHz frekansta sıcaklık bağlı $1/C^2–V$ ölçümlerinden engel yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonununu hesaplamışlardır.

Yücel ve Yücel (2015) çinko sülfür (ZnS) ince filmleri kimyasal banyo biriktirme yöntemi kullanarak oda sıcaklığında cam yüzeyler üzerine büyütmüşlerdir. Numuneleri X ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskobu ve UV–Vis spektroskopisi ölçümlerini kullanarak karakterize etmişlerdir. ZnS ince filmler için deneysel bant aralığını 3.95 eV bulmuşlardır. Bulunan bu değerin daha önce belirlenen literatür değerine (3.97 eV) oldukça yakın olduğunu söylemişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında radyo frekans (RF) saçtırma yöntemi ile biriktirilen CdS ve ZnS ince filmleri kullanılarak metal–metal sülfür–yarıiletken heteroeklem yapıları elde edildi. 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında elde edilen CdS ve ZnS ince filmlerin yüzey ve optik özelliklerinin yanı sıra; Ag metali ile oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarının elektriksel ve fotovoltaik karakterizasyonu incelendi.

Bu yapıların elektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için radyo frekans (RF) saçtırma yöntemi kullanılarak CdS ve ZnS ince filmleri p–Si yarıiletken üzerine biriktirildi ve elde edilen CdS/p–Si ve ZnS/p–Si üzerine Ag metali buharlaştırılarak Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapıları oluşturuldu. Elde edilen yapıların elektriksel ve fotoelektriksel karakterizasyonu akım–gerilim ve kapasite–gerilim ölçümleri ile gerçekleştirildi. Ayrıca elde edilen CdS ve ZnS filmlerin optik karakterizasyonu ile yüzey analizleri hakkında SEM ve AFM cihazları ile bilgi elde edilmeye çalışıldı.

Bu bölümde, önce metal–yarıiletken kontakların fiziğinden, metal–yarıiletken kontaklardaki termoiyonik iletim mekanizmasından ve seri direnç etkisinden, ayrıca bu kontakların fiziksel parametrelerini etkileyen faktörlerden ve bu yapıların kapasite özelliklerinden bahsedildi.

Devamında, yapıların elde edilmesinde kullanılan fiziksel buharlaştırma yöntemleri, ince filmlerin optik özelliklerinin tayin edilmesinde kullanılan optik soğurma olayı, ince filmlerin yüzey özelliklerinin tayin edilmesinde kullanılan SEM ve AFM cihazlarının temel özellikleri ele alındı.

Bölüm sonunda ise gerçekleştirilen tüm deney basamakları sırasıyla anlatıldı.

3.1. Metal–Yarıiletken Kontaklar

İki farklı madde bir araya (kontak) getirildiğinde maddeler arasında ortaya çıkan yük alışverişiyle yeni bir yük dağılımı meydana gelir. Bu yük alışverişi, iki madde arasındaki termal dengenin doğal bir sonucu olarak her iki maddenin Fermi enerjisi seviyeleri aynı düzeye gelinceye kadar sürer (Ziel 1968). Bu durum metal–metal

arasında olduğu gibi, metal ile n–tipi veya p–tipi yarıiletkenler arasındaki kontaklarda da geçerlidir. Metal–yarıiletken kontaklar, metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonlarına ($\Phi_m - \Phi_s$) bağlı olarak omik kontak ve Schottky (doğrultucu) kontak olmak üzere iki kısımda incelenir ve bütün yarıiletken tabanlı devre elemanlarının oluşumunda yer aldıkları için büyük bir öneme sahiptirler. Bu bölümde metal–yarıiletken yapıların oluşumu, bu yapılarda gerçekleşebilecek yük taşınım mekanizmaları ve bunlara bağlı olarak bu yapıların elektriksel karakterizasyonlarının nasıl yapılacağı incelenecektir.

Bir metal ile bir yarıiletken, aralarında başka bir madde olmaksızın kontak durumuna getirildiklerinde meydana gelen yeni sistem, metal–yarıiletken kontak diye adlandırılır. Teorik olarak p–tipi yarıiletken kontaklarda $\Phi_m < \Phi_s$ ise, doğrultucu kontak eğer $\Phi_m > \Phi_s$ ise, omik kontak oluşur. n–tipi yarıiletken kontaklarda ise $\Phi_m > \Phi_s$ durumunda doğrultucu kontak ve eğer $\Phi_m < \Phi_s$ durumunda ise omik kontak oluşur. Şekil 3.1.'de bir metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın enerji bant diyagramı gösterilmektedir.

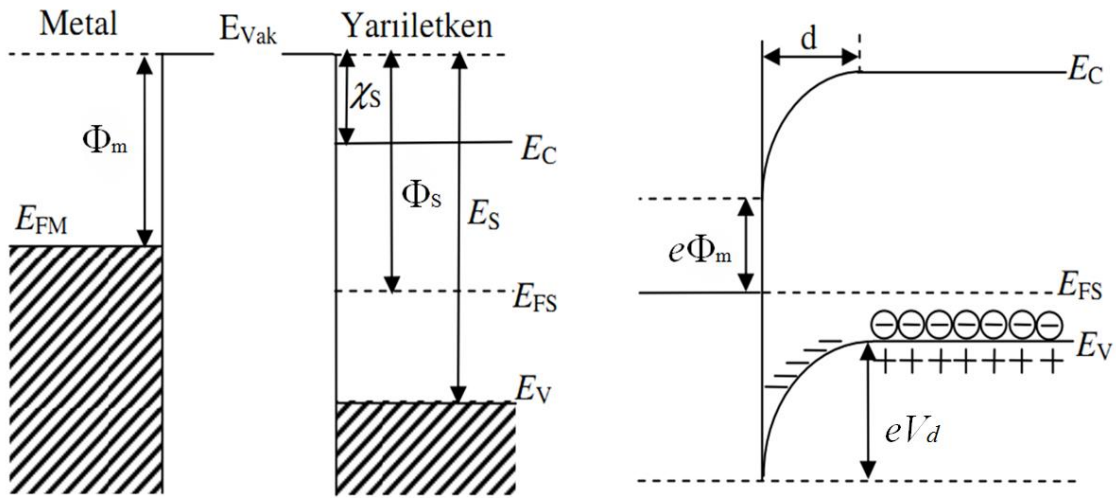
3.1.1. Metal p–tipi Yarıiletken Doğrultucu Kontaklar

Bir metal, bir yarıiletken ile kontak haline getirildiğinde, bu iki madde arasında yüklerin yeniden dağılımı vuku bulur. Yük dağılımı, her iki maddenin Fermi seviyeleri (elektrokimyasal enerji) aynı düzeye varıncaya dek sürer ve denge durumuna ulaşılır. Bir metal yarıiletken kontakta yük taşıyıcıları (boşluk ve elektronlar) bir doğrultudan diğer doğrultuya göre daha kolay geçebiliyorsa, bu bir doğrultucu kontaktır. Bu da doğrultucu kontakta bir doğrultudaki akımın diğer doğrultuya göre daha rahat geçtiğini göstermektedir. Φ_m metalin iş fonksiyonu, Φ_s yarıiletkenin iş fonksiyonu ve E_s ise valans bandının tepesi ile vakum seviyesinin tabanı arasındaki fark olsun. Eğer $\Phi_m < \Phi_s$ ise kontak doğrultucu, $\Phi_m > \Phi_s$ ise kontak omik olacaktır.

Şimdi birinci durumu göz önüne alalım. Yani $\Phi_m < \Phi_s$ olsun ve oda sıcaklığında akseptörlerin hepsi iyonize olmuş olsun. Kontaktan önce, (Şekil 3.1.a) yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi metalin Fermi enerji seviyesinden $\Phi_s - \Phi_m$ kadar küçüktür. Kontaktan sonra, metal ve yarıiletkenin Fermi seviyeleri aynı hizaya gelinceye kadar (Şekil 3.1.b) metalden yarıiletkene elektron akışı meydana gelir. Bunun neticesinde yarıiletken tarafındaki holler, bu elektronlardan dolayı iyonize olurlar. Yarıiletkenin yüzey tabakasındaki bu negatif yüklü iyonize olmuş akseptörler *d* kalınlığındaki bir

uzay yük tabakası içerisinde dağılırlar. Yarıiletken gövdedeki enerji seviyeleri $\Phi_s - \Phi_m$ kadar yükseldiğinden, yarıiletken tarafındaki holler için yüzey engeli;

$$eV_d = \Phi_s - \Phi_m \tag{3.1}$$



Şekil 3.1. Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın (a) kontaktan önce ve (b) kontaktan sonra enerji bant diyagramı

olur. Burada V_d difüzyon potansiyelidir. Yarıiletken içerisindeki bu potansiyel, metalin yüzeyine göre alınır. Kontağın metal tarafındaki holler için engel yüksekliği;

$$e\Phi_b = E_s - \Phi_m \tag{3.2}$$

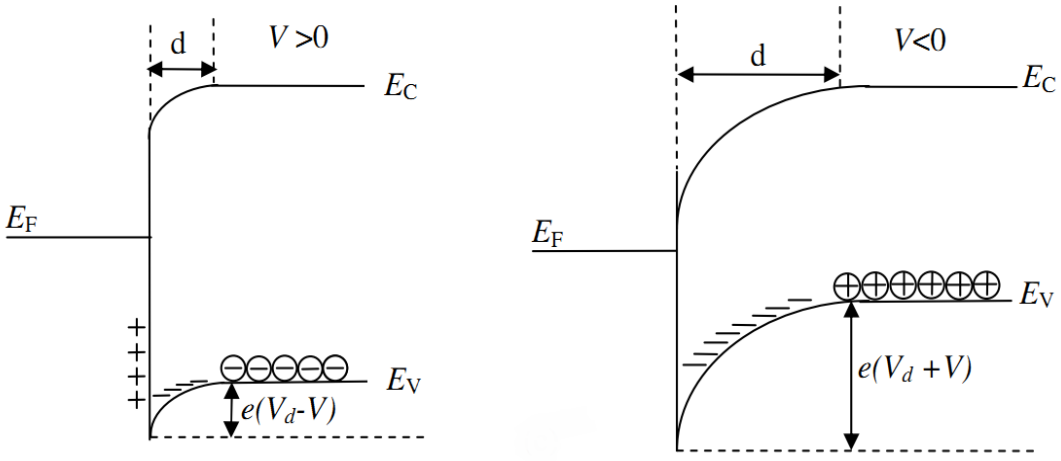
olur.

Termal uyarılmadan dolayı, yarıiletkendeki bazı holler potansiyel engelini aşacak kadar enerji kazanıp, metalin içine geçebilirler. Aynı şekilde metalde termal olarak oluşan bazı holler de engeli aşacak kadar enerji kazanıp yarıiletken içine geçebilirler. Böylece kontakta engelden geçen zıt yönlü iki I_0 akımı oluşur. Eğer yarıiletkene bir V gerilimi uygulanırsa (Şekil 3.2.) soldan sağa akan hol akımı değişmez, fakat sağdan sola akan hol akımı $\exp(eV/kT)$ çarpanı kadar değişir. Bundan dolayı yarıiletkendeki enerji seviyelerinin tümü eV kadar düşer ve buna bağlı olarak sağdan sola (yarıiletkenden metale) geçen holler için engel yüksekliği eV kadar azalır. Netice

olarak sağdan sola akım doğrultusu (yarıiletkenden metale doğru geçen hollerin oluşturduğu akım) pozitif olarak kabul edilirse, karakteristik akım;

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{eV}{kT}\right)-1\right] \tag{3.3}$$

şeklinde olacaktır. Bu da bir doğrultucu kontaktır.



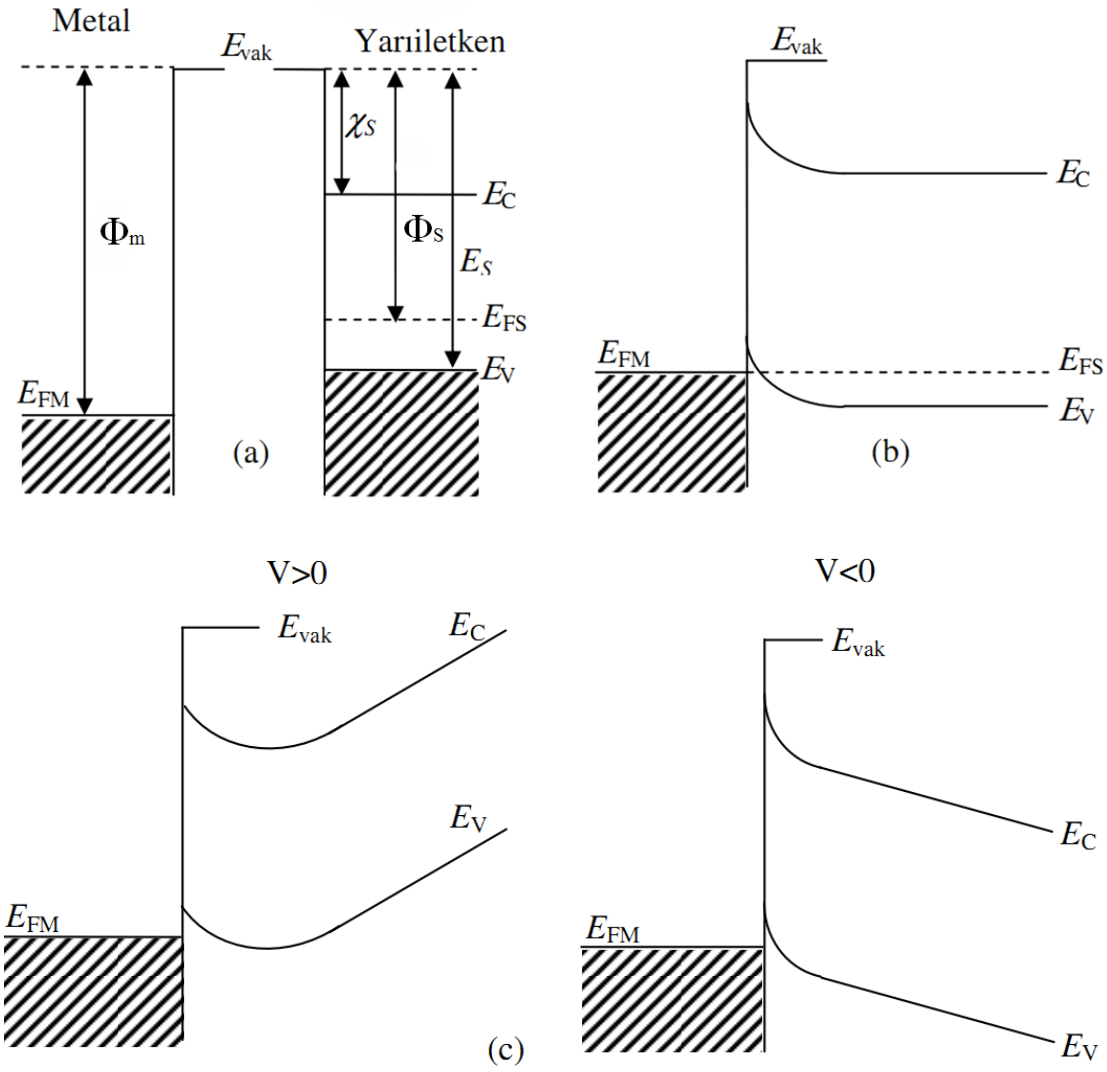
Şekil 3.2. Metal ve p–tipi yarıiletken ile oluşturulan doğrultucu kontağın kontaktan sonra $V \neq 0$ olması durumunda

3.1.2. Metal p–tipi Yarıiletken Omik Kontaklar

$\Phi_m > \Phi_s$ durumunu dikkate alalım. Şekil 3.3.a'da görüldüğü gibi yarıiletkenin Fermi seviyesi metalin Fermi seviyesinden $\Phi_m - \Phi_s$ kadar yukarıdadır. Kontaktan sonra bir yük alışverişi olacaktır. Yarıiletkendeki elektronlar, geride bir pozitif yüzey yükü (hollerden dolayı) bırakarak ve metal tarafında bir negatif yüzey yükü oluşturarak metal tarafına akarlar buna bağlı olarak yarıiletkendeki Fermi seviyesi Şekil 3.3.b'de görüldüğü gibi $\Phi_m - \Phi_s$ kadar aşağı düşer.

Hol konsantrasyonunun artmasından dolayı, yarıiletken yüzeyi daha fazla p–tipi olur. Elektronlar, metalden yarıiletken içindeki boş durumlara kolayca geçebilirler. Bu yük hareketi, hollerin yarıiletkenden metale akışına karşılık gelir. Metal tarafına geçen holler (yüksek elektron konsantrasyonundan dolayı) hemen nötralize olurlar. Ters beslem durumunda, metalin iletkenlik bandında termal olarak oluşan holler de kolay bir

şekilde yarıiletken tarafına geçebilirler. Böyle her iki doğrultuda akımı kolayca geçirebilen kontaklar, omik kontaklar olarak bilinirler.

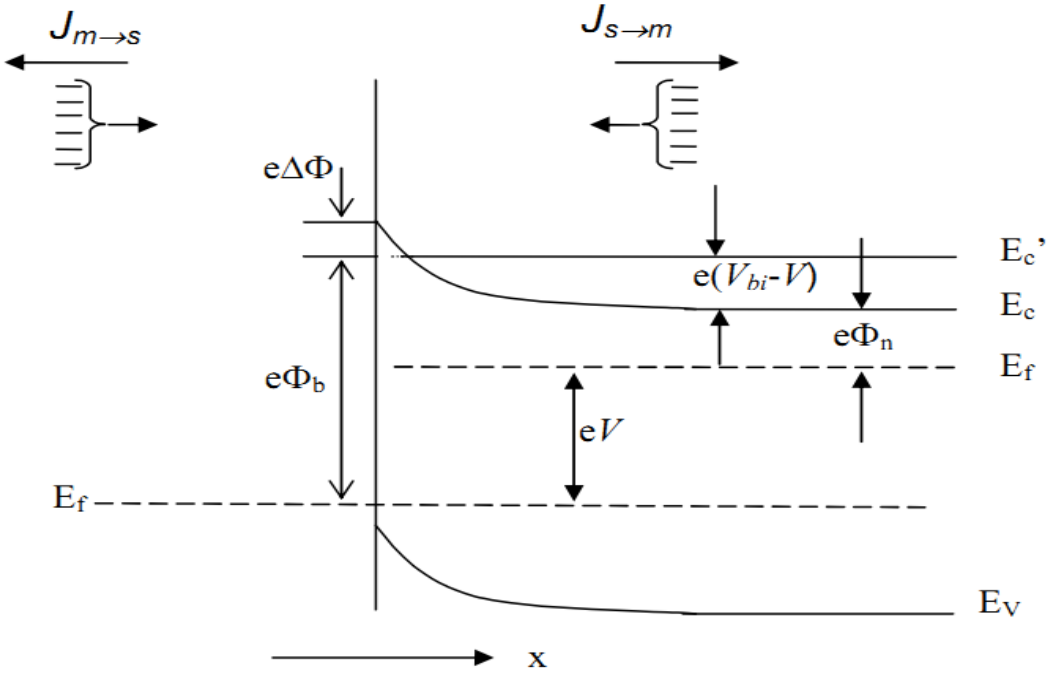


Şekil 3.3. Metal p–tipi yarıiletken omik kontağın enerji–bant diyagramı a) Kontaktan önce, b) kontaktan sonra ve termal dengede, c) *V≠0* olması durumunda

3.1.3. Schottky Diyotlarda Termoiyonik Emisyonla Akım İletimi

Schottky kontaklarda bir potansiyel engeli üzerinden elektron taşınması işlemi termoiyonik alan emisyon teorisi ile açıklanmaktadır. Sıcak bir yüzeyden termal enerjileri nedeniyle taşıyıcıların salınması olayı termoiyonik emisyon olarak bilinir. Metal–yarıiletken Schottky diyotlarda termoiyonik emisyon teorisi; taşıyıcıların termal

enerjileri nedeniyle potansiyel engelini aşarak yarıiletkenden metale veya metalden yarıiletkene geçmesidir.



Şekil 3.4. Düz beslem altında metal–yarıiletken Schottky kontakta görüntü azalma etkisini gösteren enerji–bant diyagramı

Schottky diyotlarda akım çoğunluk taşıyıcıları tarafından sağlanır. Metal/n–tipi yarıiletken Schottky diyotlarda elektronlar, metal/p–tipi yarıiletken Schottky diyotlarda ise holler akımı sağlar. Termoiyonik emisyon teorisi oluşturulurken, Maxwell–Boltzman yaklaşımının uygulanabilmesi ve termal denge durumunun olaydan etkilenmemesi için, doğrultucu kontağa ait potansiyel engelinin, *kT* enerjisinden daha büyük olduğu ve tükenim bölgesindeki taşıyıcı çarpışmaların çok küçük olduğu kabul edilmektedir. Şekil 3.4.'te *V* büyüklüğünde düz beslem gerilimi uygulanmış bir Schottky kontak görülmektedir.

Metal–yarıiletken kontaklardaki akım mekanizmaları ilk kez Bethe tarafından ve sonra daha ayrıntılı olarak da Cowley ve Sze (1965) tarafından açıklanmıştır. Bu akım aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$I = I_0\left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)-1\right] \tag{3.4}$$

Bu ifadedeki, *e* elektron yükü, *k* Boltzmann sabiti, *T* mutlak sıcaklık, *V* uygulanan gerilim ve *n* idealite faktörüdür. Yukarıdaki denklemde yer alan I_0 ters beslem doyma akımı olarak ifade edilip

$$I_0 = AA^{*}T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \tag{3.5}$$

ile verilir (Rhoderick ve Williams 1988). Bu ifadede bulunan *A* diyotun alanı, Φ_b Schottky engel yüksekliği ve A^* Richardson sabitidir. Adı geçen bu sabit

$$A^{*} = \frac{4\pi æ m_n^{*} k^2}{h^3} \tag{3.6}$$

ile verilir (Rhoderick ve Williams 1988). Burada *e* elektron yükü, *h* Planck sabiti ve m_n^* elektronun iletkenlik bandı içindeki etkin kütlesidir.

3.1.4. Schottky Engel Yüksekliği Üzerine Etkiler

İdeal bir metal–yarıiletken kontakta engel yüksekliği

$$\Phi_b = \Phi_m - \chi_s \tag{3.7}$$

ile verilir. Bu ifadede Φ_m kontak metalin iş fonksiyonu, χ_s yarıiletkenin elektron ilgisidir (iletkenlik bandının tabanı ile vakum seviyesi arasındaki enerji farkı). Bazı etkiler 3.7 eşitliği ile verilen Schottky engel yüksekliğinde sapma meydana getirebilir. Bunlardan birisi katotta emisyon akımının, artan alan kuvvetiyle artmasıdır. Bu etki, Schottky etkisi olarak bilinir ve katodun iş fonksiyonunun, yüzey alan kuvvetine bağlı olduğunu ifade eder. Metalden *x* uzaklığında, dielektrikteki bir elektron, elektrik alanı oluşturacaktır. Alan çizgileri, metal yüzeyine dik ve metal yüzeyinden içeriye doğru *x* mesafede lokalize olan +e imaj yükü ile aynı olacaktır. İmaj yükü ile Coulomb etkileşmesinden dolayı elektron üzerine etkiyen kuvvete imaj kuvveti denir ve

$$F = \frac{-e^2}{4\pi\varepsilon_s (2x)^2} = -eE \tag{3.8}$$

olarak ifade edilir. Potansiyel ise

$$-\Phi(x) = +\int_x^{\infty} E dx = \int_x^{\infty} \frac{e}{4\pi\varepsilon_s 4(x)^2} dx = \frac{-e}{16\pi\varepsilon_s x} \tag{3.9}$$

olarak bulunabilir. Burada x, integral değişkeni ve $x=\infty$ için potansiyeli sıfır kabul ettik. Dış elektrik alan sıfır iken potansiyel, 3.9 ifadesiyle verilmiştir. Eğer dış alan sıfırdan farklı ise, o zaman ilave bir terim gelir ve 3.9 ifadesi şöyle olur:

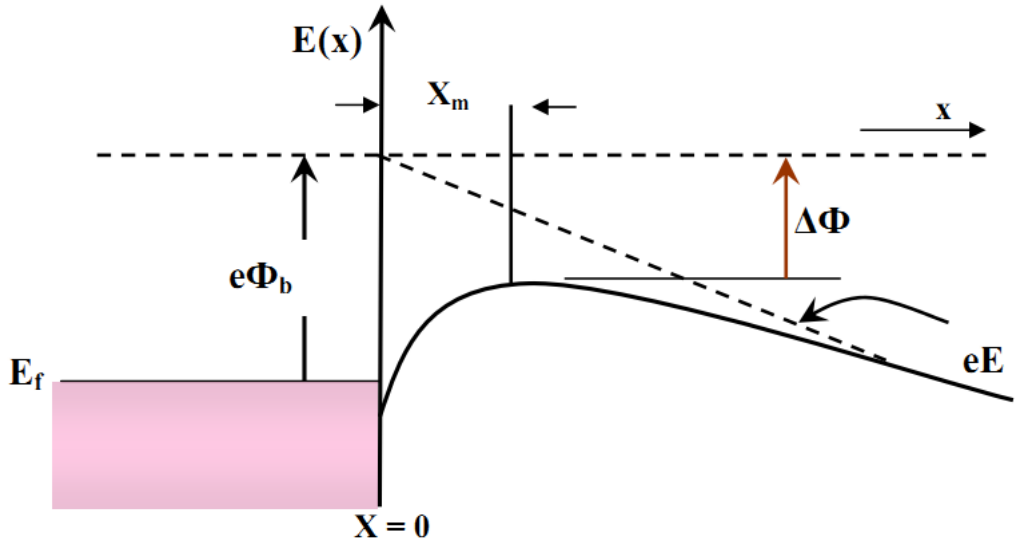
$$-\Phi(x)=\frac{-e}{16\pi\varepsilon_s x}-Ex \tag{3.10}$$

3.9 eşitliği x'in küçük değerleri için geçerliliğini kaybeder ve x sıfıra giderken $\Phi(x)\to\infty$ 'a yaklaşır. Eşitlikteki ikinci terim dış alandan dolayı potansiyel engelindeki düşme miktarını ifade eder. Potansiyel engelindeki bu düşme, Schottky etkisi ya da imaj kuvveti etkisiyle meydana gelen düşmedir. Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engelindeki bükülme Şekil 3.5.'te verilmiştir. Schottky engel düşmesini $\Delta\Phi$

$$\frac{d\left[e\Phi(x)\right]}{dx}=0 \tag{3.11}$$

şartından maksimum engelin konumu, X_m' i şu şekilde elde ederiz:

$$X_m=\sqrt{\frac{e}{16\pi\varepsilon_s E}} \tag{3.12}$$



Şekil 3.5. Görüntü (imaj) kuvvetinden dolayı potansiyel engeldeki bükülme

3.1.5. Schottky Diyotlarda Seri Direnç Etkisi

Metal–yarıiletken doğrultucu kontaklarda, yarıiletken tarafında oluşan tükenim bölgesi dışında kalan nötral bölgenin diyot akımına karşı gösterdiği direnç seri direnç olarak ifade edilir ve R_s ile gösterilir. Bu seri direnç etkisi, büyük gerilim değerlerinde baskın olmaya başlar ve diyot akımının azalmasına sebep olur. Şekil 3.6. bir Schottky diyotta büyük gerilim değerlerinde seri direnç etkisi ile oluşan diyot akımındaki azalışı göstermektedir (Rhoderick ve Williams 1988).

Metal–yarıiletken yapıların düz beslem *I–V* karakteristiklerinden elde edilen Schottky diyotların elektriksel parametrelerinin hesaplanmasında Cheung ve Cheung (1986) tarafından bir yöntem geliştirilmiştir. Termoiyonik emisyon teorisi göz önüne alındığında bir diyottan geçen akım denklemi

$$I = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{eV}{nkT}\right)\right] \tag{3.13}$$

şeklinde ifade edilir. Seri direnç etkisi düşünülecek olursa uygulanan potansiyelin IR_s kadarlık gerilimi nötral bölge üzerine düşüreceği göz önüne alınırsa $(V–IR_s)$ olarak yazılır ve denklem

$$I = AA^{*}T^{2}\exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{e(V-IR_s)}{nkT}\right)\right] \tag{3.14}$$

halini alır. Son eşitlik kullanılarak potansiyel fark

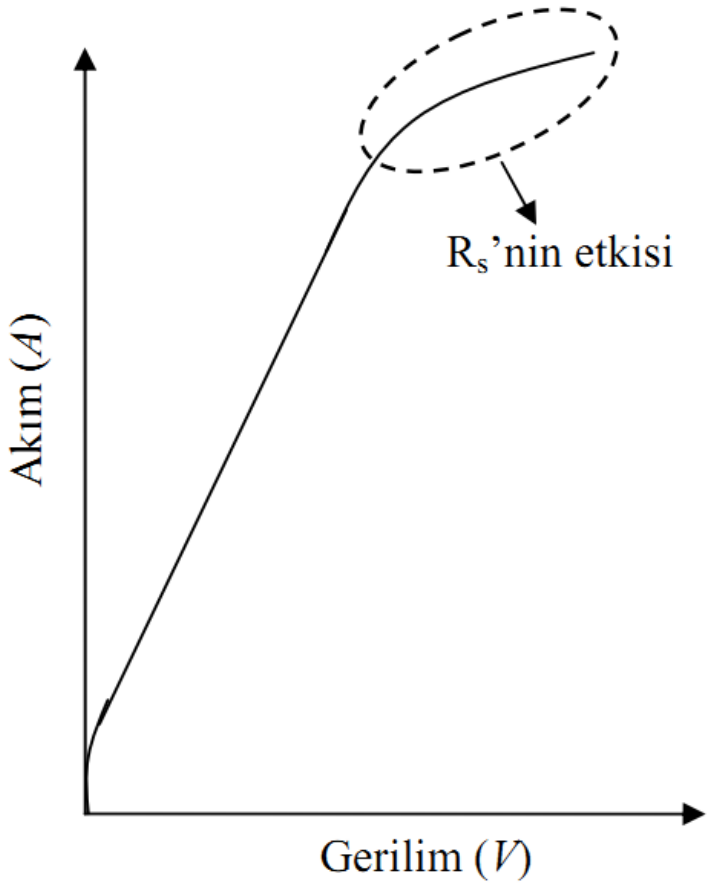
$$V = \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) + n\Phi_b + IR_S \tag{3.15}$$

olarak elde edilir. Denklem 3.15'in ln*I*'ya göre türevi alındığında

$$\frac{dV}{d(\ln I)} = \frac{nkT}{e} + IR_S \tag{3.16}$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre $dV/d(\ln I)$'nın *I*'ya göre grafiği bir doğru verecektir ve bu doğrunun eğimi seri direnç değerini verecektir. Bu doğrunun $dV/d(\ln I)$ eksenini kesiştiği noktadan idealite faktörü değeri bulunabilir. Engel yüksekliğini hesaplamak için

$$H(I) = V - \left(\frac{nkT}{e}\right)\ln\left(\frac{I}{AA^{*}T^{2}}\right) \tag{3.17}$$



Şekil 3.6. Seri direncin *I–V* karakteristiğine etkisi

şeklinde bir *H(I)* fonksiyonu ifade edilmiştir. 3.15 ve 3.17 eşitlikleri kullanılarak

$$H(I) = n\Phi_b + IR_S \tag{3.18}$$

yazılabilir. Bu eşitlik kullanılarak *H(I)–I* grafiği çizildiğinde yine bir doğru elde edilecektir. Bu doğrunun eğimi, seri direnci verecektir. Bu doğrunun *H(I)* eksenini kestiği noktadan da engel yüksekliği hesaplanabilir.

3.1.6. Norde Fonksiyonu Yardımıyla Schottky Diyot Karakteristiklerinin Tayin Edilmesi

Norde engel yüksekliği ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir. Yeniden düzenlenmiş Norde fonksiyonu;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e}\left(\frac{I(V)}{AA^*T^2}\right) \tag{3.19}$$

şeklinde yazılmaktadır. Burada γ ifadesi *n* değerinden büyük olan ilk tam sayıdır ve *I(V)* ifadesi, *I–V* eğiminden bulunan akım değeridir. Bu metotta engel yüksekliği;

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \tag{3.20}$$

olarak verilir. Burada *F (V0)* ifadesi, *F–V* grafiğinin minimum *F(V)* değeridir ve *V0* ise; bu değere karşılık gelen gerilim değeridir. Norde metodunda seri direnç değerleri;

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{eI} \tag{3.21}$$

formülü ile bulunur. Burada *I* değeri, *V0* değerine karşılık gelen akım değeridir (Ocak 2010).

3.1.7. Metal –Yarıiletken Kontaklarda Isının Etkisi

Aydoğan (2004) tarafından bildirildiğine göre; yarıiletken devre elemanlarında kullanılan kontakların çoğu ısıya maruz kalmaktadır. Metalin yarıiletkene adezyonunu artırmak için bu durum kaçınılmaz olabilir. Çünkü metalin kaplanmasından sonra oluşan diğer işlem basamakları için yüksek sıcaklığa ihtiyaç duyulabilir. Yapılan bu işlem ısı sinterleme veya ateşleme olarak adlandırılır. Doğrultucu kontağın eriyebileceği sıcaklıktan kaçınmak çok önemlidir. Çünkü arayüzey yarıiletkenin içinde keskin metalik sivri bir çıkıntıya sahip düzlemsel olmayan yapıya sahip olmaya başlar. Bu durum oluştuğunda, çıkıntının ucundaki yüksek alan bölgesi elektriksel karakteristikleri nispeten küçültebilir (Andrews 1974). Kontağın alaşım hali istenmedikçe (omik kontak oluşumundaki gibi) sıcaklıkları metal–yarıiletken sisteminin ötektik sıcaklığının altında kontağın oluşacağı değerde tutmak gerekir. Örneğin, Silisyum'un Au, Al ve Ag ile yapılan alaşımlarının ötektik sıcaklıkları sırasıyla 370, 577 ve 840 ºC'dir.

Esasen ötektik sıcaklığın altındaki sıcaklıklarda bile yarıiletkenin içine metal göçü oluşabilir. Bu metalürjik değişimler son zamanlarda yeni geliştirilmiş olan Rutherford'un backscattering (geri saçılma), Auger Electron Spectroscopy ve Secondary Ion Mass Spectroscopy (SIMS) teknikleri kullanılarak yaygın olarak çalışılmıştır. Örneğin, Hiraki ve ark. (1971) 200 ºC'ye kadarki sıcaklıklarda Rutherford'un geri saçılma tekniği kullanılarak bir altın film içine silisyumun taşındığını göstermişlerdir. Buharlaştırmadan önce bu göçün veya taşınmanın

genişlemesi silisyumun yüzeyinin durumuna oldukça duyarlıdır ve arayüzeyde ince bir oksit tabakasının varlığı ile tamamen engellenebilir. Bu durum basitçe tek tip difüzyonla açıklanamayabilir, muhtemelen buna ek olarak tane sınırı difüzyonunu da gerektirir. Göçün etkisi mükemmel bir silisyum–metal ekleminde çok farklı bir arayüzey oluşturur ve elektriksel karakteristikler de ideal olmaz. Hiraki ve ark. (1977) düşük sıcaklıklardan oda sıcaklığına kadar geniş bir sıcaklık aralığında yarıiletkenlerin birçoğu için benzer karakteristiklerin var olduklarını göstermişlerdir. Genel olarak, silisyumun arayüzeyindeki difüzyonunun ihmal edilebilmesi için bir metaldeki silisyumun difüzyon sabitinin silisyum içindeki aynı metalin difüzyon sabitinden defalarca büyük olması gerekir (Mc Caldin 1974).

Devre elemanı uygulamalarında diyotta akım akışı ile oluşan ısının bir sonucu olarak bir düzensizlik oluşabilir. Gözlenen metalürjik değişimler için *I–V* karakteristiklerinin bozulmasını açıklamak oldukça zordur. *I–V* karakteristiklerindeki değişim her zaman engel yüksekliğindeki bir değişimle basitçe açıklanamayabilir. Bazen karakteristikler donor veya akseptör olarak davranan atomların yarıiletkene difüze oldukları kabul edilerek yorumlanabilir veya yarıiletkende katkı atomlarının etkin yoğunluğunun değiştirilmesi için elektriksel olarak aktif merkezler oluşturulur. Katkı yoğunluğu arttıkça engel daralır ve termoiyonik alan emisyonu oluşabilir. Yarıiletken içine giren atomlar veya kusurlar asıl katkı atomlarıyla zıt polaritede iseler etkin hal yoğunluğu azalır ve bazen p–n ekleminin oluşabileceği durum elde edilir. Bunun en iyi örneği Al/Si kontaklardır ve teknolojik öneminden dolayı yaygınca çalışılmaktadır (Rhoderick ve Williams 1988).

3.1.8. Engel Yüksekliğinin Sıcaklığa Bağlılığı

Aydoğan (2004) tarafından bildirildiğine göre; inhomojen engele sahip bir Schottky diyot modeli için aşağıdaki temel ifadeler kullanılmaktadır:

$$\Phi_b^j = \overline{\Phi}_b - \frac{\sigma_s^2}{\left(\frac{2kT}{e}\right)} \qquad \text{ve} \qquad \Phi_b^c = \overline{\Phi}_b \tag{3.22}$$

Burada Φ_b^j, düz beslem gerilimine bağlı olarak *I–V* ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, Φ_b^c, kapasite–gerilim ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği, $\overline{\Phi}_b$,

ortalama engel yüksekliği ve σ_s standart sapmadır. Yukarıdaki son iki ifade inhomojen Schottky engeli için sıcaklık ve bahsedilen parametreler arasındaki ilişkiyi vermektedir. Bu ifadeler, *I–V* ve *C–V* eğrilerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin farklı olması anlamına da gelmektedir. Ayrıca, gerilim altında engel dağılımının değiştiği dikkate alınırsa, idealite faktörünün de açıklanması bu ifadelerle mümkün olur. 3.22 ifadesi potansiyel engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişimi hakkında bilgi vermektedir. Her sıcaklık için *I–V* karakteristiğinin sıfır uygulama gerilimine fit edilmesiyle bulunan I_0 doyma akımlarından hesaplanan engel yüksekliklerinin, $1/T$ 'ye karşı değişim karakteristiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi $\left(\frac{e\sigma_s^2}{2k}\right)$ olur ve bu değerlerden standart sapma bulunur. Bu lineer doğrunun potansiyel engel yüksekliğini kestiği nokta ise ortalama engel yüksekliğini verir. Bu standart sapma (σ_s) ve ortalama potansiyel engel yüksekliği $(\overline{\Phi}_b)$ değerleri 3.22 eşitliğinde yerine yazılırsa, uzaysal inhomojen potansiyel engelleri için Gauss dağılımı elde edilir. Standart sapmanın (σ_s) sıcaklığa bağlı ifadesi;

$$\sigma_s^2(T) = \sigma_s^2(T=0) + \alpha_\sigma(T) \tag{3.23}$$

şeklinde verilir. Burada α_σ, standart sapmanın sıcaklığa bağlılığı olarak ifade edilir.

Sıfır beslemdeki standart sapmayı ve bir ortalama değere sahip engel yüksekliklerinin Gauss dağılımını göz önüne alarak, deneysel doğru beslem *I–V* grafiğinden bulunan engel yüksekliği (Φ_b^j), $\overline{\Phi}_b = \overline{\Phi}_b^c$ engel yüksekliği ile de ilgilidir. Kapasite sadece ortalama bant bükülmesine bağlı olup engel yüksekliğinin standart sapmasından (σ_0) bağımsızdır. Deneysel engel yüksekliği (Φ_b^j) ile C^{-2}–*V* grafiğinden elde edilen ortalama engel yüksekliği ($\overline{\Phi}_b$) arasındaki bağıntı;

$$\overline{\Phi}_b - \Phi_b^j = -\frac{e\sigma_0^2}{2kT} + \frac{e\alpha_\sigma}{2k} \tag{3.24}$$

ile verilir (Karataş ve ark 2003). Kapasite–gerilim ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği $\left(\Phi_b^c\right)$ ile doğru beslem altında akım–gerilim ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliği $\left(\Phi_b^j\right)$ arasındaki farkın $\left((\Phi_b^c)-(\Phi_b^j)\right)$ 1/2kT'ye göre değişimi lineer bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi $q\sigma_0^2$'ye eşit olup, y eksenini kestiği nokta $\left(\frac{e\sigma_0^2}{2k}\right)$'dır. Aynı zamanda ortalama Schottky engel yüksekliğinin $\left(\overline{\Phi}_b\right)$ sıcaklığa bağlı değişimi;

$$\overline{\Phi}_b(T)=\overline{\Phi}_b(T=0)+\alpha T \tag{3.25}$$

şeklinde verilir. 3.25 eşitliğinde $\overline{\Phi}_b(T=0),\ T=0$ için ortalama engel yüksekliği olup α ise sıcaklık katsayısıdır.

3.1.9. İdealite Faktörünün Gerilime ve Sıcaklığa Bağlılığı

Termoiyonik emisyon teorisine göre, yarı logaritmik akım–gerilim eğrilerinin eğiminden hesaplanan idealite faktörleri genelde 1'den büyüktür. Dolayısıyla termoiyonik emisyon teorisine göre hesaplanan potansiyel engel yüksekliği, artan sıcaklıkla artar. Bu durum silisyum (Si) için negatif sıcaklıkla değişim katsayısına aykırıdır. Yani termoiyonik emisyon teorisinden sapmanın da bir göstergesidir. İdealite faktörlerinin 1'den büyük olmasının birkaç nedeni vardır. Bunlardan birincisi: metal ve yarıiletken arasındaki ince oksit tabakasının varlığıdır. İkincisi: yüksek katkılı yarıiletkenlerde ya da yeterince düşük sıcaklıklarda tünelleme akımlarıdır (termoiyonik alan emisyonu ve alan emisyonu). Üçüncüsü: arayüzeyde elektrik alandan dolayı, hayali Schottky engel yüksekliğinin alçalmasıdır ($\Delta\Phi_b$). Dördüncüsü ise: uzay yükü bölgesinde taşıyıcı oluşumu/yeniden birleşme (generation/recombination) akımlarıdır. Bu dört neden Schottky kontaklarının, aşırı durumlarını (arayüzey tabaka, yüksek katkılanma, yüksek elektrik alan, uzay yükü bölgesindeki tuzaklar), metal/yarıiletken arasındaki arayüzeyin atomik olarak düzgün olmadığını ve genelde uzaysal bir homojensizliğe sahip olduğunu gösterir.

3.1.10. Schottky Engel Diyotların Kapasitesi

Kapasite–gerilim *(C–V)* karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların *C–V* karakteristiği ara yüzey durumlarından oldukça etkilenmektedir ve aygıtların elektriksel özellikleri üzerine kuvvetli bir etkisi söz konusudur. Düşük frekanslarda kapasite değerlerinin artması, uygulanan AC sinyalinin yük taşıyıcıları tarafından takip edilebilme eğilimi ile ilgilidir. Yeterince yüksek frekansta kapasite–gerilim ölçümleri alınabilirse ara yüzeydeki yükler AC sinyallerini izleyemez.

p–tipi bir yarıiletken ile oluşturulan kontağın kapasitesi denklem 3.26 ile verilir.

$$C = A\left(\frac{\varepsilon_s \varepsilon_0 e N_d}{2}\right)^{\frac{1}{2}}\left(V_d - \frac{kT}{e}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.26}$$

Bu denklemde ε_s, yarıiletkenin dielektrik sabiti (Silisyum için ε_s=11.9), ε_0 boşluğun dielektrik sabiti (ε_0 = 8,85×10^{-14} F/cm), e elektronun yükü, V_d difüzyon potansiyeli, k Boltzmann sabiti, N_d iyonize olmuş donor konsantrasyonu ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır. 3.26 ifadesi tekrar düzenlenirse;

$$C^{-2} = \frac{2(V_d + V)}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \tag{3.27}$$

olarak yazılır (Rhoderick ve Williams 1988). Burada V uygulanan gerilimdir. C^{-2}–V grafiği çizildiğinde uygulanacak lineer fit ile C^{-2}=0 için V_d=V olarak difüzyon potansiyeli elde edilir. 3.27 bağıntısının V'ye göre türevi alınırsa;

$$\frac{d\left(C^{-2}\right)}{dV} = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 N_d} \tag{3.28}$$

şeklinde bulunur. Bu ifade N_d için baştan düzenlenecek olursa;

$$N_d = \frac{2}{\varepsilon_s \varepsilon_0 e A^2 \dfrac{d\left(C^{-2}\right)}{dV}} \tag{3.29}$$

ifadesi elde edilir. Termal dengede p–tipi bir yarıiletkendeki elektron konsantrasyonu;

$$n_0 = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \tag{3.30}$$

şeklinde verilmektedir. Burada N_c, termal dengede iletkenlik bandındaki hal yoğunluğudur. p–tipi bir yarıiletken için $N_d >> n_i$ olacağı için $n_0 \cong N_d$ olur. Burada n_i, katkısız (intrinsic) elektron konsantrasyonudur. Bu durum göz önüne alındığında, 3.30 bağıntısı;

$$N_d = N_c \exp\left(\frac{E_f - E_c}{kT}\right) \tag{3.31}$$

olarak bulunur. Bu son bağıntının doğal logaritması alınır ve iletkenlik bandı referans seviye olarak (E_c=0) kabul edilirse, Fermi enerji seviyesi;

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_d}{N_c}\right) \tag{3.32}$$

olarak bulunmuş olur. *C–V* verilerinden engel yükseklikleri ifadesi

$$\Phi_b(C-V) = E_f + V_d \tag{3.33}$$

ile elde edilebilir (Rhoderick ve Williams 1988).

3.2. Fiziksel Buhar Biriktirme Yöntemleri

İnce filmlerin özellikleri, filmlerin kullanım alanları, kaynak ve alttaş malzemelerin sıcaklık optimizasyonu, düzensellik, kalınlığın homojenliği, biriktirme hızı ve ticari maliyetler; ince film oluşturmada uygun kaplama tekniğinin belirlenmesini doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bundan dolayı, ince filmlerin arzulanan bileşimi ve mikro yapısı, kaynak ve alttaş malzemelerden kaynaklanan sınırlamalar dikkate alınarak uygun biriktirme tekniğinin seçilmesi ile elde edilebilir.

İnce filmin kaliteli oluşturulabilmesi için, vakum ortamında gerçekleştirilmesi gereklidir. Vakum ortamında gerçekleştirilen en eski ve en çok kullanılan yöntem, fiziksel buhar biriktirme tekniğidir. Fiziksel buhar biriktirme (PVD) metodu malzemelerin buharlaştırılarak çeşitli yüzeyler üzerine biriktirilmesinde kullanılan bir çok vakum biriktirme yöntemini kapsayan genel bir tekniktir.

Bu kaplama yöntemi yüksek sıcaklık vakum biriktirme veya plazma püskürtme bombardımanı gibi yüzeyde kimyasal reaksiyon içermeyen bir kaplama yöntemidir. Bu yöntemin kullanımı 1838 yılında Michael Faraday'ın çalışmalarına kadar uzanmasına

rağmen fiziksel buhar biriktirme terimi ilk defa 1966 yılında C.F. Powell'in yazdığı "Buhar Biriktirme" kitabında kullanılmıştır.

PVD yöntemleri sıralayacak olursak

1. Buharlaştırarak biriktirme
2. Elektron ışın fiziksel buhar biriktirme
3. Püskürterek biriktirme
4. Katodik ark biriktirme
5. Atmalı lazer biriktirme

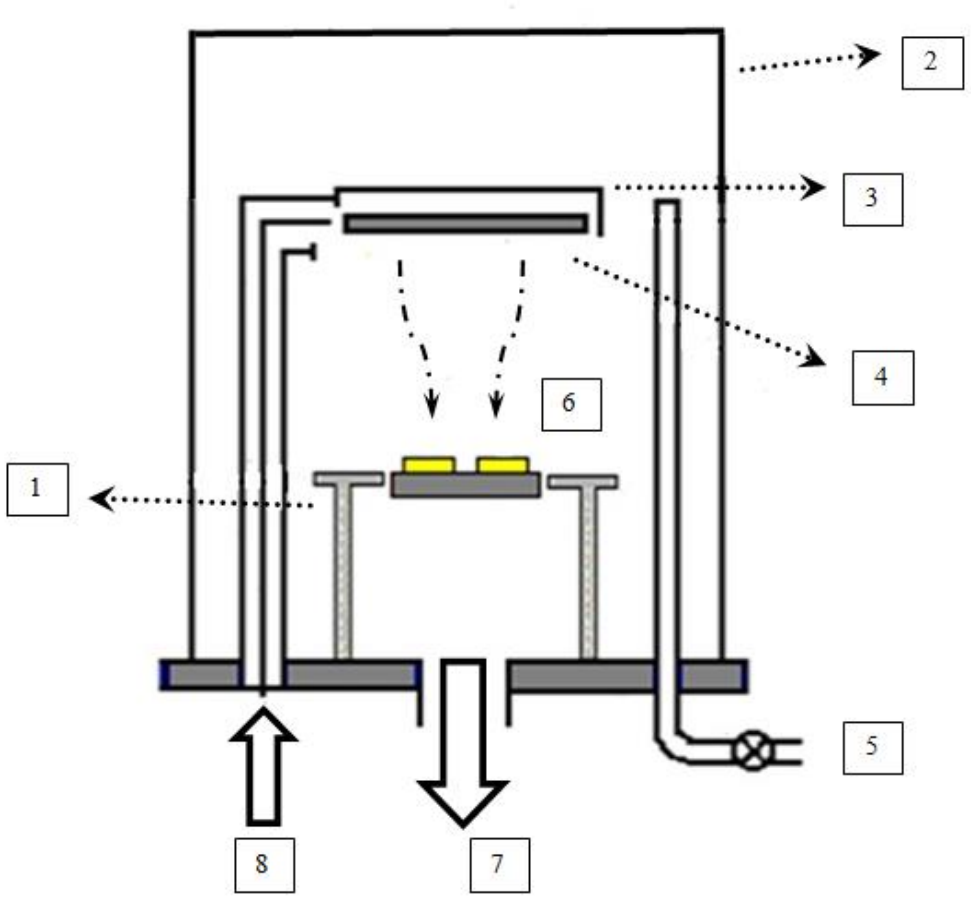
Bu çalışmada yukarıda sıralanan yöntemlerden fiziksel buhar biriktirme ve püskürterek biriktirme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemler aşağıda sırasıyla açıklanmıştır.

3.2.1. Plazma Saçtırma Buharlaştırma Yöntemi

PVD teknolojisinde en önemli dallardan biride plazma saçtırma yöntemidir. 1852 yılında Grove tarafından geliştirilen bir yöntemdir. Bu güne kadar bu yöntem büyük ölçüde geliştirildi ve 160 yıl boyunca endüstride kullanıldı (Ocak 2010).

Bu yöntemin çalışma prensibi şöyledir. Vakum odasında vakum oluşturulur ve ardından oda Argon gazı ile doldurulur. Yüksek gerilim uygulanması ile Argon gazı plazma durumuna geçer. Argon iyonları (Ar^+) katoda yüksek bir hızla çarpar ve hedef malzemeyi saçtırır. Burada hedef katot olarak kullanılmalıdır. Hedef atom ve molekül alttaş (numune) yüzeyine çarpar ve yoğun bir film tabakası oluşturur. Buharlaştırma yöntemindeki ısısal eritme yerine, Ar^+ plazma iyonları hedefe çarpar ve hedefi saçtırır. Bu olay saçtırma yönteminin temel mekanizmasıdır. Hedef atom Ar^+ iyonu ile hedeften sökülür. Burada iyonların çarpma hızı çok yüksektir ve hedef atomu yüksek hızlara ivmelendirebilir. Bu hızla, hedef atom alttaş yüzeye yoğun bir şekilde çarpar ve bağlanır. Film yoğunluğu buharlaştırmadan daha yoğundur.

En çok kullanılan iki çeşit saçtırma yöntemi vardır. Bunlar doğru akım (DC) ve radyo frekans (RF) saçtırma yöntemleridir.



Şekil 3.7. DC saçtırma sisteminin şematize edilmiş hali. 1. Anot 2. Vakum odası 3. Katot koruması 4. Hedef 5. Argon girişi 6. İnce filmlerin büyütüldüğü yüzeyler 7. Argon gazı çıkışı 8.Yüksek potansiyel fark

DC saçtırma yönteminde hedef katot ve kaplanacak malzeme anot olarak kullanılır. Vakum odası 10^{-3} Torr basınca düşürülür, Argon gazı ile doldurulur ve 1000 V civarında bir potansiyel fark uygulanır. Plazma içindeki iyonlar katoda ivmelendirilir, hedefe çarptırılır ve böylece enerji transferi ile hedef atomları istenilen yüzeye saçtırılır. Bu yöntemde hedef katot olarak kullanılır. Burada hedef iletken malzeme olmalıdır. İkinci önemli saçtırma yöntemi RF saçtırma yöntemidir. DC sistemlerde pozitif yük katot üzerinde birikir ve yalıtkan hedeflerin saçtırılması için çok yüksek gerilime ihtiyaç vardır. Yüksek gerilimlerde kolayca atlama olur ve hedef kaynağa ve üretilen malzemeye zarar verir. 1955 yılında G. K. Wehner tarafından geliştirilen yöntemde, 13.5 MHz radyo frekansına sahip alternatif bir akım DC sisteme uygulandı. Alternatif karakteristik ile, pozitif yük plazma bölgesinde kalır ve katotta

birikmez. Böylece, katot yüksek gerilime maruz kalabilir ve saçtırma işlemi devam edebilir.

3.2.1.1. Radyo Frekans (RF) Saçtırma Tekniği

Bu tekniğin önemli olan tarafı saçtırma işleminde RF güç kaynağının kullanılmasıdır. Ayrıca sistemde kullanılan elektrotlar dielektrik malzemeden olabilir. RF saçtırma sistemi; vakum odası, vakum pompası, radyo frekansı güç kaynağı, eşleştirme ünitesi olmak üzere dört ana kısımdan oluşur (Grill 1993, Johnson 2005).

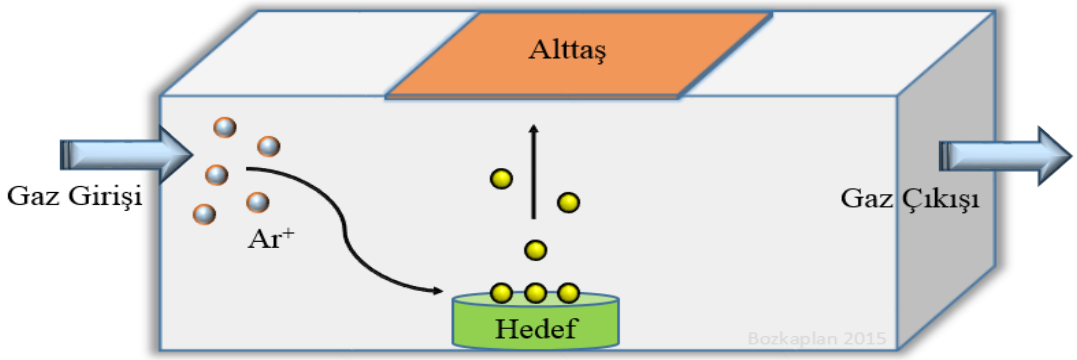
Vakum pompası, vakum odasının basıncını düşürmek amacıyla kullanılmaktadır. Basıncın düşürülmesinin nedeni, vakum odasını havadaki diğer gazlardan temizlemek ve iyonize olmuş parçacıkların yüksek enerjili çarpışmalar yapmasını sağlamaktır. Böylece plazması oluşturmak istenen materyalin saflığını ve kalitesi arttırılabilir (Grill 1993).

Radyo frekansı güç kaynağı ile elektromanyetik dalgalar oluşturulur. Bu dalgalar eşleştirme ünitesi sayesinde vakum odası içinde titreşim frekansı oluşturarak hedef materyalin iyonize olmasını sağlar. Frekansın yüksek olması plazma deşarjını sürekli hale getirir (Grill 1993, Johnson 2005, Bunshah 2001).

3.2.1.2. Radyo Frekans (RF) Magnetron Saçtırma Tekniği

Bu yöntemde, iyonlaşmış soygaz (örneğin argon) atomlarını hızlandırmak için kullanılan elektriksel alana ek olarak bu alana dik doğrultuda bir de manyetik alan uygulanır. Manyetik alan sayesinde elektronlar sarmal yörünge boyunca hareket ederler. Elektronların bu sarmal yörüngesi nedeniyle yolları uzadığı için hareketleri boyunca daha çok sayıda nötr soygaz atomlarıyla çarpışma yaparak hedef üzerinde iyon konsantrasyonunu arttırırlar. Bu sayede hedeften atom koparma işlemi daha yoğun bir şekilde gerçekleşir ve aynı zamanda daha düşük basınçlarda plazma oluşturulabilir.

Bu yöntemle ayrıca hedeften kopan elektronların alttaşa ulaşması manyetik alan sayesinde önlendiğinden alttaş üzerindeki filmin ısınması da bir dereceye kadar önlenmiş olur. Isıya duyarlı örnekler için bu yöntem özellikle tercih edilmektedir (Johnson 2005, Bunshah 2001). RF magnetron saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi Şekil 3.8.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.8. RF magnetron saçtırma sistemiyle film oluşumunun şematik gösterimi

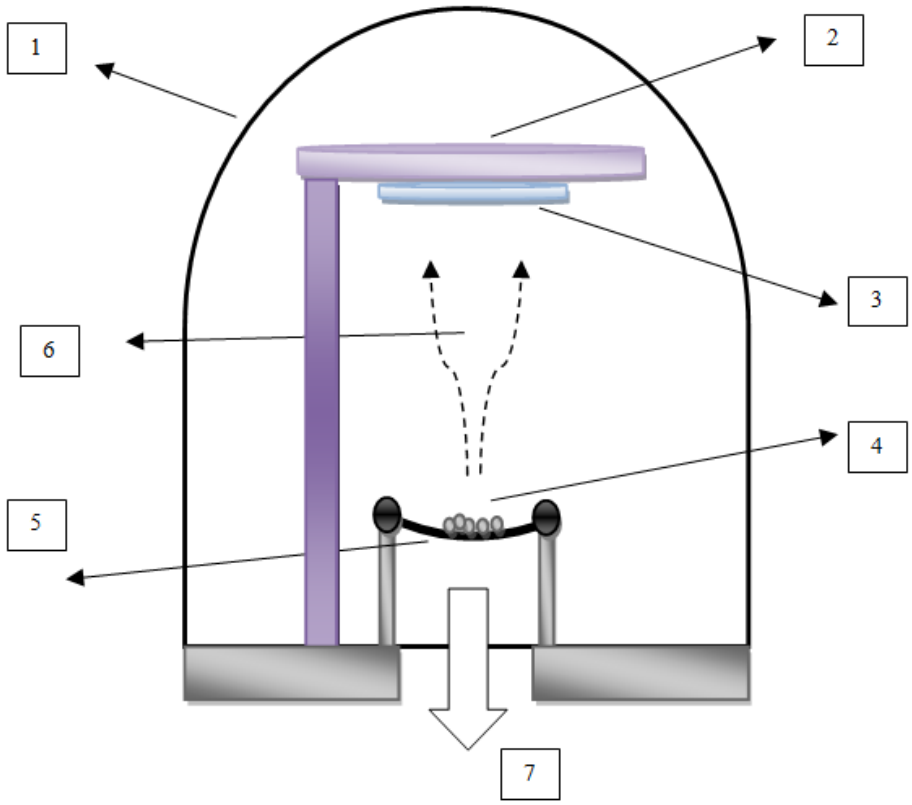
3.2.1.3. Termal Buharlaştırma Yöntemi

Vakum ortamında rezistif ısıtıcı ile yapılan termal buharlaştırma tekniği, yarıiletken yüzeylerine ince metal filmleri kaplamak için en yaygın şekilde kullanılan tekniklerden biridir. Kaplanacak olan malzemeler, W, Mo ve Ta gibi ısıya dayanıklı, ergime noktası çok yüksek olan metallerden imal edilmiş potaların içinde veya direkt olarak ısıtılmış rezistans üzerinden buharlaştırılır. Kuartz, grafit, alüminyum, berilyum, boron–nitrit ve zirkonyumdan imal edilmiş potalar direkt ısıtmada kullanılmaktadır.

Bu teknik diğer yöntemlere göre daha ucuzdur fakat bazı dezavantajları vardır. Geometrik faktörler nedeniyle büyük çaplı üretimler yapmak çok zordur veya mümkün değildir. Düşük erime sıcaklığına sahip olan (1500 °C'den küçük) materyaller için kullanılabilir. Bazı durumlarda, pota da sıcaklığın etkisi ile buharlaşır ve kaplama bozulabilir.

Archibald ve Parent (1976), termal buharlaştırma için kullanılan çeşitli kaynak buharlaştırıcıların kaplama özelliklerini, yararlarını ve sınırlamalarını tartışmışlardır. Bu teknikte buharlaşma oranları, belli bir sıcaklık ve vakum altında tutulan buharlaşıcının buhar basıncı ile kontrol edildiğinden başlangıç materyalinin içeriğinin aynısına sahip alaşım ve karışımlarla kaplamak oldukça zor olmaktadır. Bunun yanı sıra flaş buharlaştırma tekniği kullanılarak bu problemin üstesinden gelinebilir. Bu teknikte

alaşımın veya metalin oldukça küçük boyutlu tozları kontrollü bir şekilde sıcak tutulan buharlaştırma potasına yerleştirilerek buharlaştırma yapılır. Böylece alaşımdaki oranın hemen hemen aynısı yüzeye biriktirilmiş olur.



Şekil 3.9. Termal buharlaştırma sisteminin şematize edilmiş hali. 1.Vakum odası 2. Altlık tablası 3. Numune tutucu 4. Buharlaştırılacak metal 5. Isıtıcı filaman 6. Metal Buharı 7. Vakum pompası (Bozkaplan 2011)

3.3.Yarıiletkenlerin Optik Özellikleri

3.3.1. Soğurma Olayı, Doğrudan ve Dolaylı Geçişler

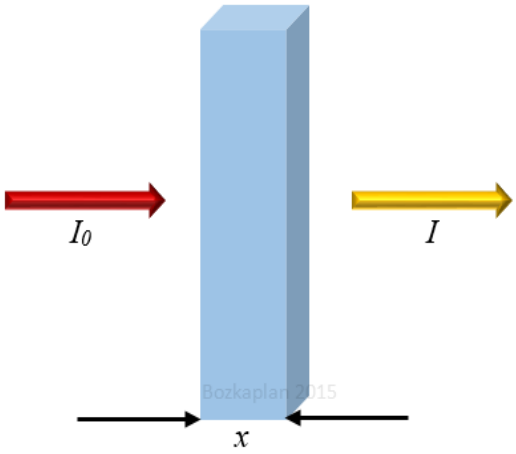
Bir kristal düzlemine gelen elektromanyetik dalganın kristalde bulunan elektriksel yüklerle etkileşmesi sonucu enerji kaybına uğraması soğurma olarak adlandırılır (Pankove 1975). Yarıiletkenlerin yasak enerji bant aralıklarını belirlemede en çok kullanılan yöntem optik soğurma metodudur. Soğurma işleminde yarıiletken malzeme üzerine düşürülen bir foton, yarıiletkendeki bir elektronu düşük bir enerji

seviyesinden daha yüksek bir enerji seviyesine uyarır. x kalınlığına sahip bir ince film üzerine düşürülen ve malzemeyi geçen ışın şiddeti arasındaki bağıntı

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \tag{3.34}$$

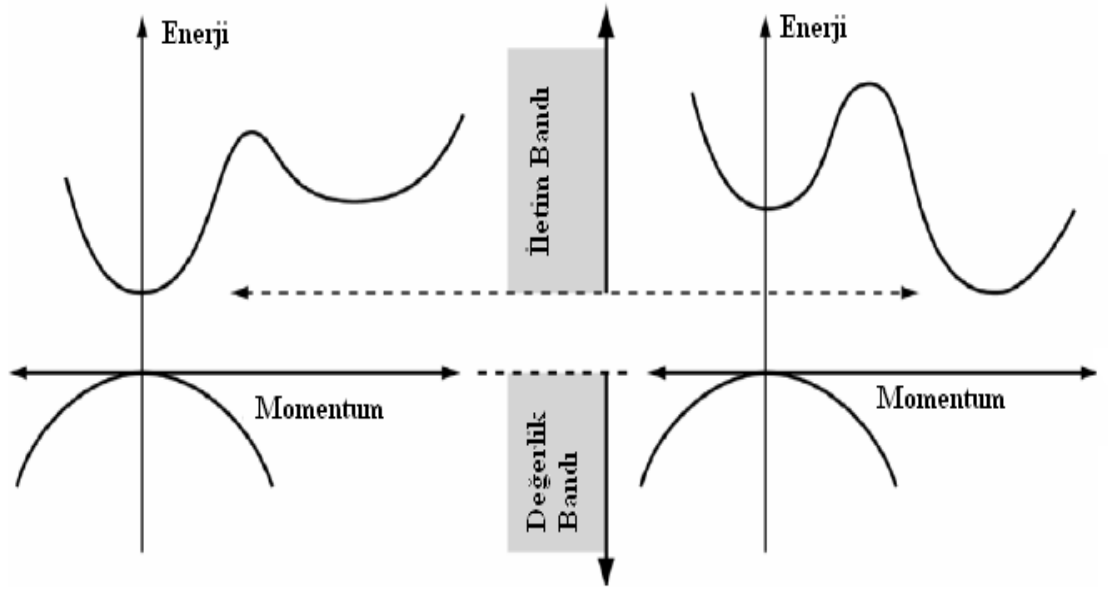
olarak yazılabilir. Burada I_0 ince film üzerine düşürülen ışığın yoğunluğu, I ince filmi geçen ışığın yoğunluğu, x ışığın ince film içerisinde aldığı yolu (ince film kalınlığını) ve α ise kullanılan malzemenin (yarıiletkenin) soğurma katsayısıdır (Meyer 1972).

Kristal ve amorf yarıiletkenlerde iki çeşit bant geçişi söz konusudur. Bunlar Şekil 3.11.'de gösterilen doğrudan ve dolaylı bant geçişlerdir. Doğrudan geçiş durumu, malzemenin değerlik bandının maksimumu ile iletim bandının minimumunun aynı momentuma sahip olması durumunda görülür. Şekil 3.11.'de değerlik bandındaki bir elektron momentum değerinde değişme olmadan bir foton soğurur ve fotondan aldığı enerji ile iletim bandına geçer.



Şekil 3.10. İnce bir filmdeki soğurma

Dolaylı bant aralığına sahip malzemelerin iletim bandının minimumu değerlik bandının maksimumunkinden farklıdır. İletim bandındaki elektronlar hızlı bir şekilde minimum bant enerjisine inerler. Aynı ölçüde hollerde değerlik bandının maksimumuna ulaşırlar. Bundan dolayı, doğrudan geçişli bir yarıiletkenin elektron ve deşiklerin momentumları eşit iken, dolaylı geçişli yarıiletkenlerin bu momentumları eşit değildir.



Şekil 3.11. Doğrudan geçişli ve dolaylı geçişli bant aralıklarının gösterimi

Bu sonuç azınlık taşıyıcıların ömürleri ve yarıiletkenlerin optik özelliklerinin sonucudur.

3.3.2. Soğurma Yöntemiyle Yarıiletkenin Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Soğurma ölçümleri bir yarıiletkenin yasak enerji aralığını belirlemek için en çok kullanılan metotlardan birisidir. Yapılan bu ölçümler neticesinde numune zarar görmediği için oldukça tercih edilmektedir. Bu yöntemde soğurma katsayısı ile yasak enerji aralığı arasındaki,

$$(\alpha h\nu)^n \approx (h\nu - E_g) \tag{3.35}$$

ifadesinden yararlanılır. Bu eşitlikte α soğurma katsayısı, h Planck sabiti, ν frekans, n kırılma indisi ve E_g yasak enerji aralığıdır. Bu yöntemde $(\alpha h\nu)^n$'nin $h\nu$'ye (enerji) karşı grafiği çizilir ve bu değişimin lineer kısmı için çizilen doğrunun $h\nu$ (enerji) eksenini kestiği noktadaki $(\alpha h\nu)^n = 0$'daki enerji değeri incelenen malzemenin yasak enerji aralığı değerini verir. Eşitlik 3.35'te n=2 ise malzeme direkt bant aralığına, n=1/2 ise indirekt bant aralığına sahiptir.

3.3.3. Doğrudan Bant Geçişi

hv enerjiye sahip bir foton doğrudan bant geçişli bir yarıiletkene geldiğinde, bir elektronu değerlik bandından iletim bandına geçirir. E_i yarıiletkende ilk durum, E_s son durum enerjisi olmak üzere enerji farkı;

$$h\nu = E_s - E_i \tag{3.36}$$

denklemi ile verilmektedir (Pankove 1975). Parabolik bandlarda ise

$$E_s - E_g = \frac{p^2}{2m_e^*} \tag{3.37}$$

ve

$$E_i = \frac{p^2}{2m_h^*} \tag{3.38}$$

ifadeleri ile belirlenir. Burada m_e^*, elektronun etkin kütlesi, m_h* holün etkin kütlesini göstermektedir. Denklem 3.36, 3.37 ve 3.38 düzenlendiğinde

$$h\nu - Eg = \frac{p^2}{2}\left(\frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}\right) \tag{3.39}$$

bağıntısı ile elde edilir. Doğrudan bant geçişinde α ile *hv* arasındaki bağıntı

$$\alpha h\nu \approx B(h\nu - Eg)^m \tag{3.40}$$

denklemi ile verilir. Burada B sabit sayı, *m* izinli geçiş için 1/2 veya yasaklı geçiş için 3/2 değerlerini alabilen bir sabittir. Ayrıca denklem 3.40'ta αhv değerini sıfır yapan değer yarıiletkenin yasak enerji aralığı değerini vermektedir (Mott ve Davis 1971).

3.3.4. Dolaylı Bant Geçişi

Değerlik bandının maksimumu ile iletkenlik bandının minimumunun momentumlarının farklı olduğundan elektron momentumunun korunması için, foton soğurma olayı ilave bir parçacık içermelidir. Bu durumda momentum korunumu için bir fononun emisyonu veya soğurulması gereklidir.

Fonon soğurulmasında, soğurulma katsayısı

$$\alpha_s(h\nu) = \frac{B\left(h\nu - E_g + E_{ph}\right)^m}{\exp(E_{ph}/kT) - 1} \tag{3.41}$$

ve

$$\alpha_e(h\nu) = \frac{B\left(h\nu - E_g + E_{ph}\right)^m}{1 - \exp(-E_{ph}/kT} \tag{3.42}$$

olarak yazılabilir. Burada α_s soğurma katsayısı ve α_e emisyon katsayısı, E_{ph} fonon enerjisidir. Her iki olasılığın da gerçekleşmesi mümkün olduğu için

$$\alpha(h\nu) = \alpha_s(h\nu) + \alpha_e(h\nu) \tag{3.43}$$

olarak yazılabilir. Açık bir şekilde yazıldığında

$$\alpha(h\nu) = \frac{B\left(h\nu - E_g + E_{ph}\right)^m}{\exp(E_{ph}/kT) - 1} + \frac{B\left(h\nu - E_g + E_{ph}\right)^m}{1 - \exp(-E_{ph}/kT)} \tag{3.44}$$

halinde yazılır. Burada *m* dolaylı bant geçişine sahip bir yarıiletkende izinli geçiş için 2 veya yasaklı geçiş için 3 değerlerini alabilen bir sabiti göstermektedir (Gaffar ve ark. 2003).

3.4. Fotovoltaik Özelliklerin Belirlenmesi

3.4.1 Hava Kitlesi

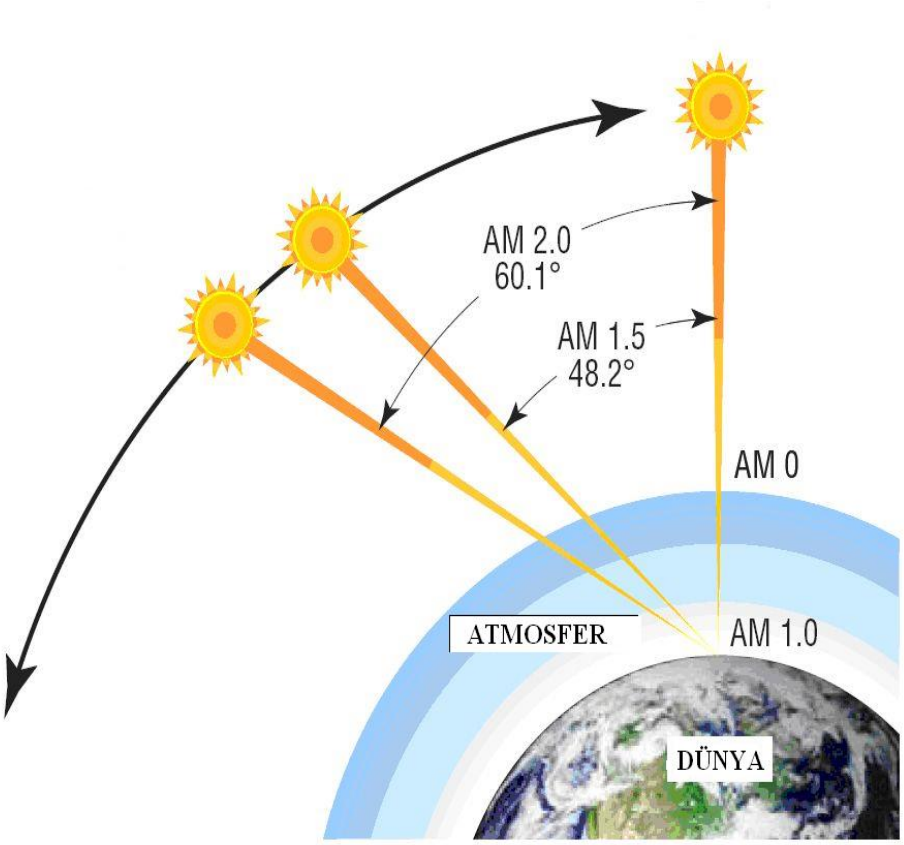
Güneş yüzeyi 5762 K sıcaklığa sahiptir ve ışınım spektrumu bu sıcaklıktaki bir kara cisim ışımasının spektrumuna benzer. Güneş dünyadan oldukça uzaktadır ve bundan dolayı dünya tarafından emilime uğrayan ışınların paralel geldiği kabul edilebilir. Atmosfer üzerinde ışınım yoğunluğu yaklaşık 1353 W/m^2 dir ve bu ışınımın spektral dağılımı sıfır hava kitlesi (AM0) olarak nitelendirilir. Hava kitlesi dünya yüzeyine ulaşan ışınların spektrumunun ve yoğunluğunun atmosfer tarafından ne kadar etkilendiğini gösteren bir ölçüdür. Hava kitlesi (Air Mass)

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos\theta} \tag{3.45}$$

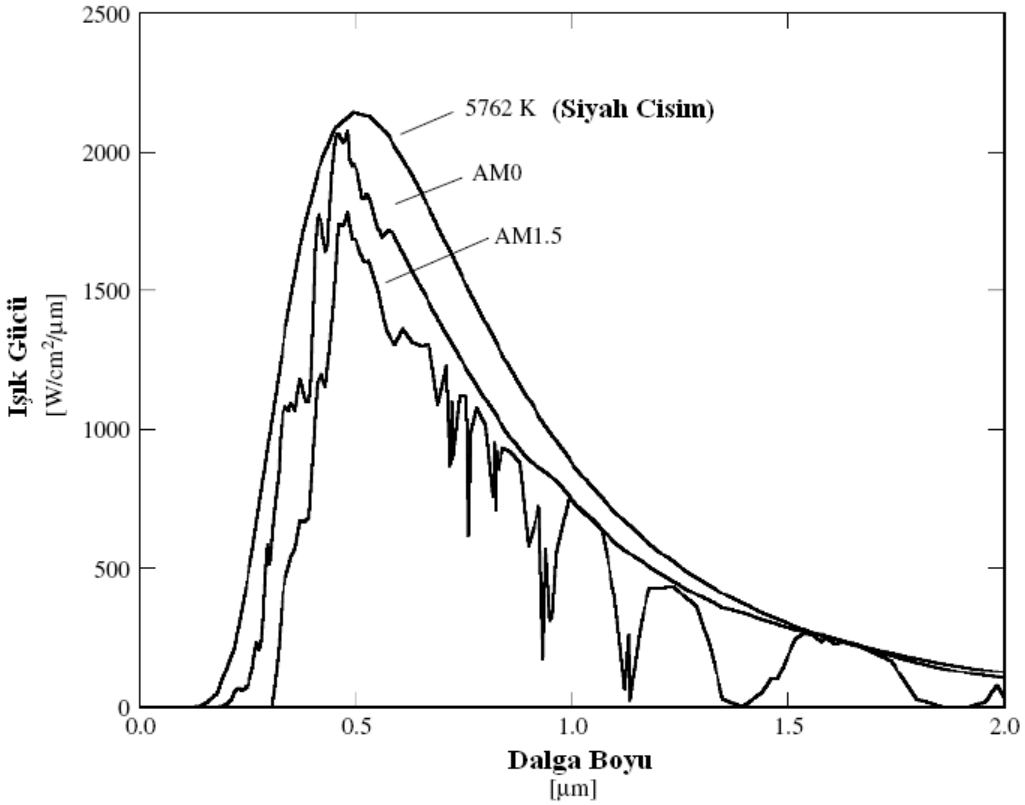
ile ifade edilir. Burada θ ışığın geliş açısıdır. Green hava kitlesinin kolay yoldan bulunması için aşağıdaki formülü geliştirmiştir (Green 1992).

$$\text{Air Mass} = \sqrt{1+(S/H)^2} \qquad (3.46)$$

Burada H cismin boyu ve S gölge boyudur. Güneş pillerinin performanslarının karşılaştırılmasında standart olarak AM1.5 spektrumu ve toplam 1000 W/m^2 güce sahip ışık kullanılmaktadır. Şekil 3.12. hava kitlesi numaralarına göre güneş ışınlarının dünyaya gelişini ve Şekil 3.13. kara cisim ışımasını, AM0 ve AM1.5 spektrumlarını göstermektedir.



Şekil 3.12. Hava kitlesi numarasına göre ışınların dünyaya geliş açılarının gösterimi



Şekil 3.13. Siyah cisim ışıması, AM0 ve AM1.5 spektrumları

3.4.2. Güneş Pillerinin Karakterizasyonu

Güneş pillerinde fotovoltaik enerji dönüşümünde iki basamak mevcuttur. Bunlar sırasıyla, soğurulan ışık tarafından elektron boşluk çiftlerinin oluşması ve elektronların güneş pilinin negatif terminaline ve boşlukların pozitif terminale gitmeleridir. Böylece elektriksel güç elde edilir. Bir güneş pili Şekil 3.14.a'da gösterildiği gibi doğrultucu bir diyota bağlanmış bir akım kaynağı ile tasvir edilebilir. Şekil 3.14.b'de ayrıca diyot ve güneş piline ait akım gerilim grafiklerinin üst üste binmesi modellenmiştir.

Bir pilin akım gerilim karakteristiği Shockley tarafından

$$I = I_{ph} - I_0\left[\exp\left(eV/kT\right)-1\right] \tag{3.47}$$

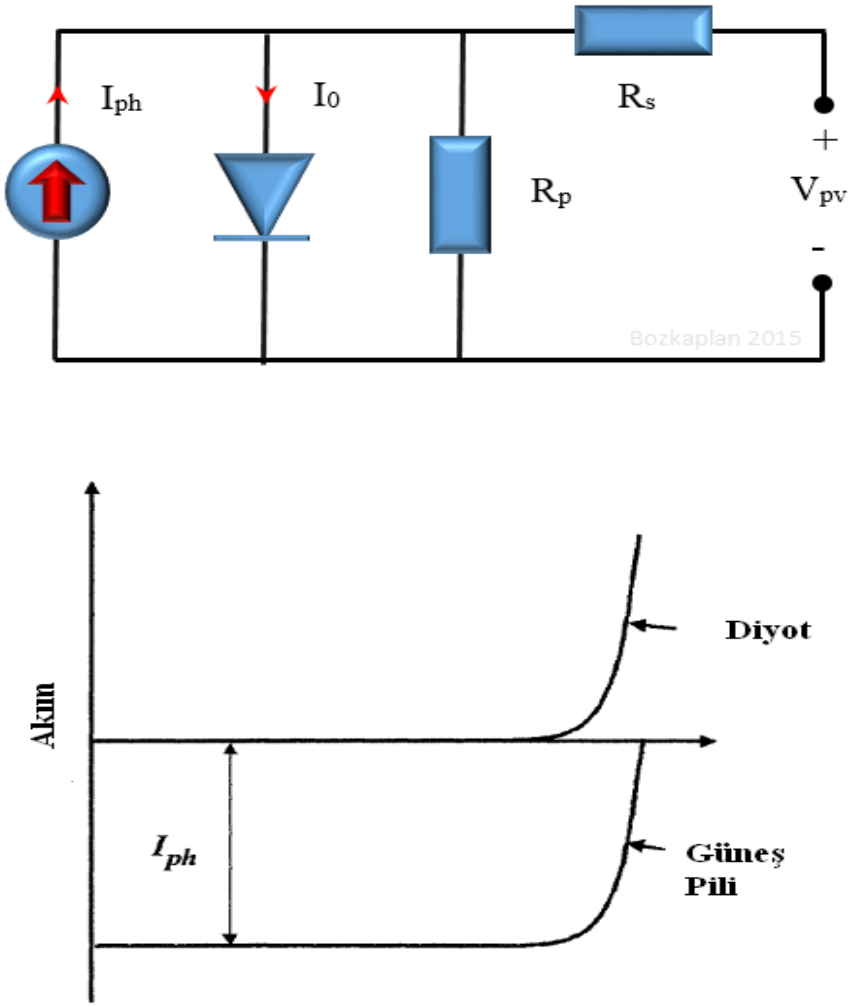
olarak ifade edilmiştir (Shockley 1950).

Burada k Boltzmann sabiti, T mutlak sıcaklık, e elektron yükü ve V pilin iki ucu arasına uygulanan gerilimidir. I_0 doyma akımıdır ve karanlık altında güneş pilinin klasik

doğrultucu kontak gibi davrandığını ifade eder. I_{ph} ışık tarafından oluşturulan akımdır ve pil üzerine düşürülen foton akışı ile ilişkilidir. Şekil 3.15. denklem 3.47'e karşılık gelen akım–gerilim ifadesini temsil etmektedir. Burada, I_{sc} kısa devre akımıdır ve ışık tarafından oluşturulan I_{ph} değerine eşittir. V_{oc} ise açık devre gerilimidir ve

$$V_{OC} = \frac{kT}{e}\ln\left(1+\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \tag{3.48}$$

ile ifade edilir. Grafikte ifade edilen I_m ve V_m ifadeleri sırasıyla maksimum gücün elde edildiği akım ve gerilim değerleridir. Pil tarafından üretilen güç Şekil 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.14. a) Bir güneş piline ait eşdeğer devrenin gösterimi b) Bir güneş pili ve diyota ait akım gerilim eğrileri

Pilden elde edilen maksimum güç

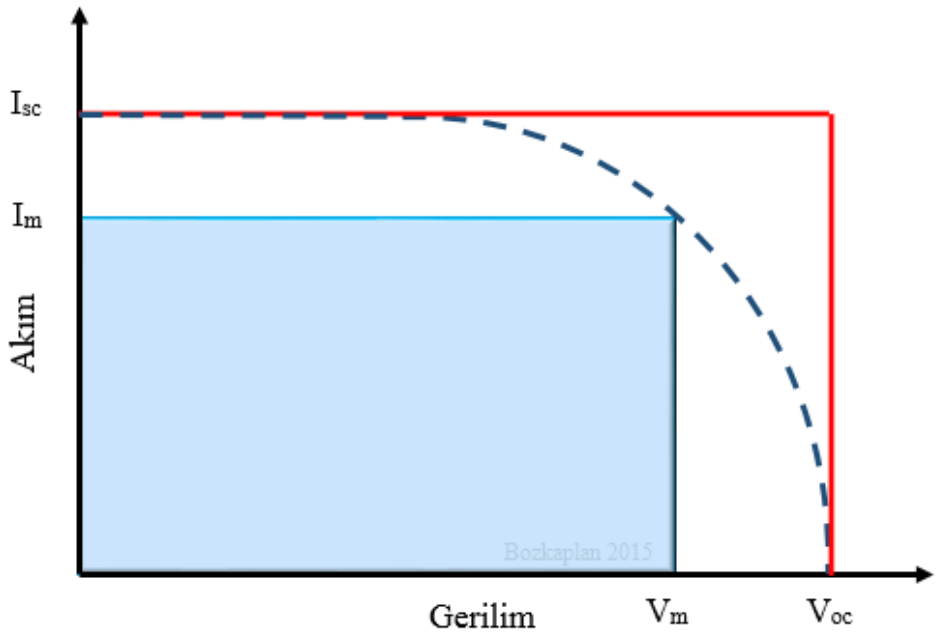
$$P_{\max} = I_m x V_m \tag{3.49}$$

olarak yazılır. Güneş pilinin enerji dönüşüm verimi (η), pil devreye bağlandığında soğurulan ışık enerjisinin elektrik enerjisine çevrilme yüzdesidir. Bu ifade pilden elde edilen maksimum gücün pil üzerine düşürülen ışığın gücüne oranıdır. Güneş pilinin verimi

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in} x S} \tag{3.50}$$

şeklinde yazılır. Burada P_{in} pil yüzeyine düşürülen ışığın gücü ve S pilin etkin alanıdır. Bundan dolayı ölçümlerde kullanılan simülatörün ışık gücü ile pilin etkin alanının çarpılması ile net güç bulunur.

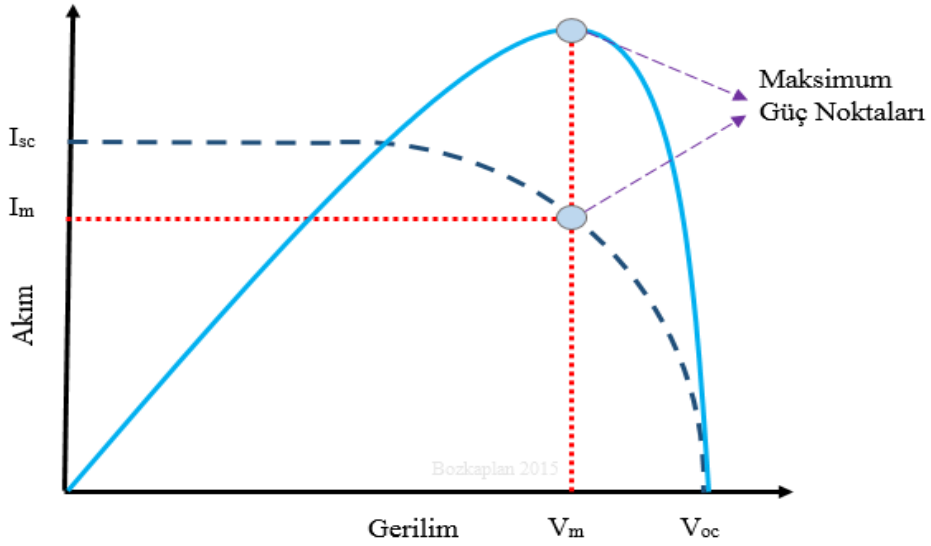
Güneş pillerinin karakterizasyonunda kullanılan diğer bir parametre doluluk oranıdır. Bu terim elde edilen maksimum gücün açık devre gerilimi ile kısa devre akımlarının çarpımına oranıdır ve 3.51 formülü ifade edilir (Gray 2003).



Şekil 3.15. Güneş pillerinde denklem 3.47'ye karşılık gelen akım–gerilim grafiği

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{OC} x I_{SC}} = \frac{\eta x P_{in}}{V_{OC} x I_{SC}} \quad (3.51)$$

Güneş pillerinde maksimum gücün elde edildiği V_m ve I_m noktalarının gösterimi Şekil 3.15.'de gösterilmiştir. Bir güneş pilin doluluk oranı bu pilin seri ve paralel direncinden doğrudan etkilenir. Paralel direncin arttırılması ve seri direncin düşürülmesi doluluk oranını arttırır ve dolayısıyla pilin verimini arttırır.



Şekil 3.16. Güneş pilinde maksimum gücün elde edildiği noktaların gösterimi

3.5. UV–Visible (Morötesi ve Görünür Bölge) Spektrofotometresi

Bir maddenin rengi, o maddeden gözümüze ulaşan görünür bölgedeki elektromanyetik ışınlardır. Bu ışınlar, saydam maddeler için maddenin içinden geçip gelen, saydam olmayan maddeler için ise; yansıyan ışınlardır. Elektromanyetik ışınların en çok karşılaşılan türleri, gözle algıladığımız görünür ışık ve ısı şeklinde algıladığımız infrared (kızılötesi–IR) ışınlardır. İnsan gözü, dalgaboyu yaklaşık olarak 380–750 nm arasında olan elektromanyetik ışın enerjilerine karşı duyarlıdır.

UV–görünür spektrofotometresi, elektromanyetik spektrumun morötesi ve görünür bölgelerinde moleküler bileşiklerin ve karmaşık iyonların nitel ve nicel

analizlerinde kullanışlı bir tekniktir. Bu yöntemle malzeme tanımlanabilir ve safsızlık belirlenebilir. UV–görünür spektrumu malzemede gerçekleşen elektronik geçişten kaynaklanır (Rojas ve Ojeda 2009).

Morötesi ve görünür ışık (UV–Vis) soğurma (absorbsiyon) spektroskopisi, bir ışın demetinin *x* yolunu alarak hücreden geçtikten veya bir örnek yüzeyinden yansıtıldıktan sonra ışık şiddetindeki azalmanın ölçülmesidir. Işığın şiddetinin azalması absorblamanın (*A*) arttığını gösterir

Bir çözeltiden geçen ışık miktarı, ışığın çözelti içinde kat ettiği yol ve çözelti konsantrasyonu ile logaritmik olarak ters orantılı, emilen ışık miktarı ise; doğru orantılıdır. Saydam bir madde veya çözeltiden UV–görünür bölge ışınları geçerse, madde bu ışınların bir kısmını seçimli olarak soğurur (absorbsiyon), diğerlerini ise çok az soğurur veya olduğu gibi geçirir (transmitans). Saydam maddeden çıkan ışık şiddeti (*I*), maddeye giren ışık şiddetinden (I_0) daha küçüktür. Çıkan ışık şiddetinin, giren ışık şiddetine oranı (I/I_0) geçirgenlik (transmitans, *T*) olarak tanımlanır. Transmitans genellikle *%T* olarak ifade edilir.

$$T = \frac{I}{I_0} \tag{3.52}$$

$$\%T = \frac{I}{I_0} \times 100 \tag{3.53}$$

Transmitansın tersinin logaritması absorbans (optik yoğunluk, *A*) olarak tanımlanır ki; bu maddenin içinden geçen ışığın ne kadarının soğurulduğunun ifadesidir.

$$A = \log\frac{1}{T} = -\log T = -\log\frac{I}{I_0} \tag{3.54}$$

Bir maddenin absorbans (*A*) ve transmitansı (*%T*) arasında doğrusal olmayan azalan bir ilişki vardır.

Bir UV–görünür bölge ölçümü için ışık kaynağı ve dedektör gereklidir. Kullanılan spektrum bölgesinde kaliteli ışın elde etmek için D_2, W, H_2 ve Xe gibi sürekli ışık kaynakları kullanılır. Absorbansın ölçülmesi sırasında, ışık kaynağından gelen polikromatik ışıktan tek bir dalgaboyunda ışık seçilerek, analizi yapılacak numuneye (örneğe) gönderilir. Polikromatik ışıktan, monokromatik ışık elde edilmesini

gerçekleştiren düzeneğe monokromatör (dalgaboyu seçici) adı verilir. Monokromatör olarak prizmalar veya optik ağ adını alan parçalar kullanılır. Maddenin ışığı absorblayıp absorblamadığını anlamak için, ışık kaynağından gelen ışığın şiddetinin ölçülmesi amacıyla spektrofotometrelerde kullanılan bileşene dedektör adı verilir. Bir dedektörün ışığa karşı duyarlı olması, ışık şiddeti ile doğru orantılı bir sinyal üretmesi, üzerine düşen ışığa cevap vermesi yani; sinyal üretme süresinin kısa olması, kararlı olması ve üretilen elektriksel sinyalin yardımcı devrelerle çoğaltılabilmesi istenir.

Morötesi (UV) ve görünür bölgede kullanılabilen üç tür dedektör vardır. Bunlar: fotovoltaik (veya fotoiletken), fototüp ve fotoçoğaltıcı tüp dedektörleridir. Absorbsiyon spektrofotometresinde dedektörde elektrik sinyaline çevrilen optik sinyal, bir kaydedici veya bir galvanometre ile ölçülür. Bu ana bileşenlere ek olarak; spektrofotometrelerde ışığı toplamak, odaklamak, yansıtmak, iki demete bölmek ve örnek üzerine belli bir şiddette göndermek amacıyla mercekler, aynalar, ışık bölücüleri, giriş ve çıkış aralıkları vardır. Analizi yapılacak numune ise, kullanılan dalgaboyu bölgesinde ışığı geçiren maddeden yapılmış örnek kaplarına konularak, ışık yoluna yerleştirilir. UV–görünür spektrofotometrelerinde dedektör olarak fotomultiplikatör (ışık çoğaltıcı) tüpler veya fotodiyotlar (ışık sensörleri) kullanılır (Diffey 2002).

3.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Organik, inorganik, seramik, metal vb. birçok malzemenin yüzey yapısının görüntülenmesi ve analizi için kullanılan tekniklerden birisi SEM tekniğidir. SEM kullanışlı ve farklı uygulama alanlarına sahiptir.

Taramalı Elektron Mikroskobu veya SEM (Scanning Electron Microscope), yüksek gerilim altında hızlandırılmış elektronların çok küçük bir alan üzerine odaklanması, bu elektronlarla numune yüzeyinin taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında gerçekleşen etkileşimlerin algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerden geçirildikten sonra ekrana aktarılması prensibiyle çalışır. Manfred von Ardenne öncülüğünde 1930'lı yıllarda geliştirilmiş ve daha sonra dünyanın farklı yerlerinde 1939 yılından itibaren çeşitli elektron mikroskopları kullanılmaya başlanmıştır.

SEM'in en sık kullanıldığı biçimi, malzeme yüzeyden yayılan ~10 eV'luk düşük enerjili ikincil (secondary) elektronlarla yapılan ölçümdür. Bu ölçüm yüzeyin engebeli

(topoğrafik) yapısıyla ilgili görüntü oluşturarak, bizi bilgilendirir. Bu teknikte incelenecek olan alan veya analiz edilecek mikro hacim, bir kafes içinde numune yüzeyi boyunca süpürülen iyi odaklanmış elektronlarla aydınlatılır. Bir elektron demeti numune yüzeyine çarptığında oluşan sinyaller: ikincil elektronlar, geri saçılan elektronlar, saçılmayan elektronlar, Auger elektronları, karakteristik X–ışınları ve çeşitli enerjilerde fotonlardır. Her bir sinyal, numuneye gelen elektronlar ve numune arasındaki bazı önemli etkileşimlerin sonucudur ve numune hakkında bize farklı bilgiler sağlar (Arabacı 2001, Aydoğan 2011).

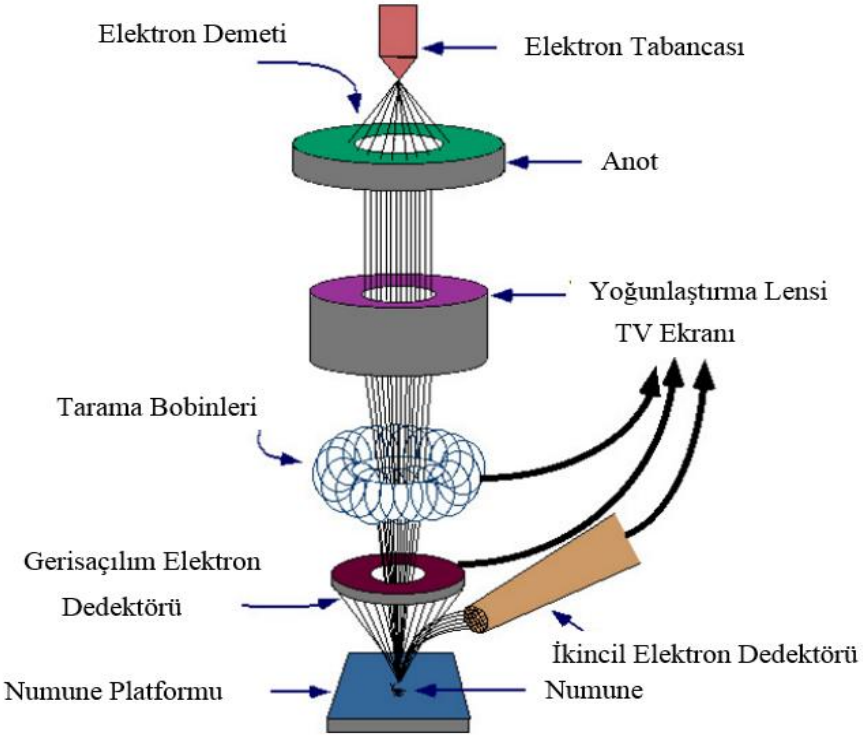
Elektron demeti atom etkileşmesi iki türlüdür. Elektronlar ya atomun elektronlarıyla esnek olmayan çarpışma yaparlar ya da atomun çekirdeğinden esnek olarak saçılırlar. Elektron elektron etkileşmesinde gelen elektronun enerjisinin bir kısmı diğer elektrona aktarılır. Aktarılan enerji malzemenin iş fonksiyonundan büyükse elektron malzemeden kopar. Kopan elektronun enerjisi 50 eV'dan büyükse bunlara geri saçılan (back scattered) elektronlar denir. Geri saçılan elektronların çoğunun enerjisi gönderilen elektron demetindeki elektronların enerjisiyle kıyaslanabilir ölçüdedir. Kopan elektronun enerjisi 50 eV'dan küçükse bunlara ikincil elektronlar denir. İkincil elektronların çoğu yüzeyin ilk birkaç nm içerisinde üretilir.

Yüksek enerjili demet elektronları numune atomlarının dış yörünge elektronları ile esnek olmayan girişimi sonucu düşük enerjili Auger elektronlarını oluşturur. Bu elektronlar numune yüzeyi hakkında bilgi taşır ve Auger Spektroskopisinin çalışma prensibini oluşturur. Yine yörünge elektronları ile olan girişimler sonucunda yörüngelerinden atılan veya enerjisi azalan demet elektronları numune yüzeyine doğru hareket ederek yüzeyde toplanırlar. Bu elektronlar ikincil elektron olarak tanımlanır. İkincil elektronlar numune odasında bulunan sintilatörde toplanarak ikincil elektron görüntüsü sinyaline çevrilir. İkincil elektronlar numune yüzeyinin 10 nm veya daha düşük derinlikten geldiği için numunenin yüksek çözünürlüğe sahip yüzey görüntüsünün elde edilmesinde kullanılır.

Taramalı elektron mikroskobu optik kolon, numune hücresi ve görüntüleme sistemi olmak üzere üç temel kısımdan oluşmaktadır (Şekil 3.14). Optik kolon kısmında; elektron demetinin kaynağı olan elektron tabancası, elektronları numuneye doğru hızlandırmak için yüksek gerilimin uygulandığı anot plakası, ince elektron demeti

elde etmek için yoğunlaştırıcı mercekler, demeti numune üzerinde odaklamak için objektif merceği yer almaktadır. Mercek sistemleri elektromanyetik alan ile elektron demetini inceltmekte veya numune üzerine odaklamaktadır. Tüm optik kolon ve numune 10^{-4} Pa gibi bir vakumda tutulmaktadır.

SEM'in belirli alanlarda diğer mikroskoplardan üstün olduğu bazı özellikleri vardır. Bunlardan en önemlisi odak derinliğidir. İyi ayırma gücü ve yüksek alan derinliğine sahip olması sebebiyle, özellikle pürüzlü yüzeylerin incelenmesinde ve ayrıntıların görüntülenmesinde oldukça kullanışlıdır. SEM tekniği ile sadece yüzey görüntüsü elde edilmez, aynı zamanda numune döndürülerek yapı içindeki farklı tabakaların kalınlıkları (kesit alanı) hakkında bilgi de elde edilebilir.



Şekil 3.17. Taramalı elektron mikroskobunu oluşturan temel kısımlar

SEM cihazının ayırma gücü (resolution), odak derinliği ve görüntü ile analizi birleştirebilme özelliği, bu cihazın kullanım alanını genişletmektedir. SEM'in başlıca kullanım alanları; disk yüzeylerindeki ve ferromanyetik malzemelerdeki manyetik spin bölgelerinin (domainlerin) elde edilmesi, elektron demetlerinin oluşturduğu termal ve akustik sinyallerle malzemenin mekanik özelliklerinin belirlenmesi, yarıiletkenlerin ve

oksitlerin morötesi–görünür bölge ve kızılötesi bölgede oluşturduğu fotonların analiziyle malzemelerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi olarak sıralanabilir (Brundle ve Evans 1992).

Katı nesnelerin mikroyapı karakteristiklerinin belirlenmesinde ve analizinde yaygın bir kullanıma sahip olan SEM tekniğinin ayırma gücü, elektron mikroskobunun ayırma gücünden daha iyi olmasına rağmen geçirimli elektron mikroskobunun (Transmission Electron Microscope, TEM) ayırma gücünden daha azdır. SEM'in ayırma gücü 4 nm ve TEM'in ayırma gücü ise, 0.2–0.4 nm aralığındadır. TEM tekniği ile elektronlar numunenin daha da iç kısımlarına girerek ince detayları da görmemizi sağlar. Ancak TEM'de malzemenin kalınlığı sınırlı bir şekilde incelenir. Bu değer, 0.2 μm'den (2000 Å) daha az olmalıdır. SEM'de böyle bir sınırlama yoktur (Williams ve Carter 1996, Arabacı 2001).

Elektron tabancası yaklaşık 1 keV ile 40 keV arasında enerjilere sahip elektronlar üretir. Elektron tabancası ile direkt olarak oluşturulan elektron demeti çapı, yüksek kalitede belirgin olarak büyütülmüş görüntü elde edebilmek için oldukça büyüktür. Bu nedenle, elektron kaynağının çapını küçültmek için yani; numune üzerine odaklanacak şekilde bir elektron demeti elde edebilmek amacıyla elektron mercekleri kullanılır. Birçok SEM yönteminde, numune yüzeyinde 10 nm'den (100 Å) daha küçük bir nokta boyutunda elektron demeti oluşturulabilir (Williams ve Carter 1996).

Taramalı elektron mikroskobu için numune hazırlama diğer elektron mikroskoplarına göre oldukça kolaydır. Öncelikle incelenecek numune vakuma dayanıklı olmalıdır. Taramalı elektron mikroskobunda iletken malzemeler doğrudan incelenebilir. Yalıtkan malzemeler ise numuneyi ince iletken karbon filmiyle, altın ya da benzer metal malzemelerle kaplanarak incelenebilir. Kaplanmamış yalıtkan malzemeler ise gönderilen elektron demetinin düşük gerilimde hızlandırılmasıyla incelenebilir.

3.7. Atomik Kuvvet Mikroskobu (AFM)

Atomik kuvvet mikroskobu (Atomic Force Microscope, AFM) çok yüksek çözünürlüklü bir taramalı kuvvet mikroskobudur. Atomik boyutlara kadar sivriltilmiş bir iğne ucu yardımıyla, yüzeyin yüksek çözünürlükte, üç boyutlu görüntülenmesini

sağlar. Görüntüleme, iğne ucunun yüzey ile etkileşiminin incelenmesi sonucunda gerçekleştirilir. Değişik amaçlar için farklı iğne uçları kullanılır.

AFM farklı uygulama ve amaçlar için kullanılabilmektedir. İnce film kaplamaların yüzey incelemeleri, organik ve inorganik malzemelerin yüzey incelemeleri, yüzey düzgünlüğü, faz farklılıkları, elektrik iletkenlik farklılıkları ve manyetik alan yönü farklılıkları konularında yapılan analizler için AFM'den yararlanılır.

Ulaşılmış çözünürlük birkaç nanometre olup optik tekniklerden en az 1000 kat fazladır. AFM'nin öncüsü olan taramalı tünelleme mikroskobu 1980'lerin başında Gerd Binnig ve Heinrich Rohrer IBM Research–Zürih'te geliştirilmiş, adı geçen araştırmacılara 1986 Nobel Ödülü'nü kazandırmıştır. Sonrasında Binnig, Quate ve Gerber 1986'da ilk atomik kuvvet mikroskobunu geliştirdiler. İlk ticari AFM 1989'da piyasaya sürüldü. AFM, nano boyutta görüntüleme, ölçme ve malzeme işleme konusunda en gelişmiş araçlardan biridir.

AFM esnek bir maniveladan ve buna bağlı (yüzeyi taramak için kullanılan) sivri bir uçtan oluşur. Manivela genellikle silikon ya da silikon nitrürdür. Nanometre ölçeğinde eğrilik yarıçapı bulunan bir uç taşır. Bilgi, bu mekanik ucun yüzeyi algılamasıyla toplanır. Uç, numune yüzeyine yakın bir mesafeye getirilince, uç ile yüzey arasındaki kuvvetler (Hooke kanunu) manivelanın bükülmesine yol açar. AFM, uç ile örnek arasında oluşan itme ve çekme kuvvetlerini ölçer. Duruma bağlı olarak AFM'de ölçülen kuvvetler mekanik temas kuvveti, Van der Waals kuvveti, kılcallık kuvveti, kimyasal bağ, elektrostatik kuvvet, manyetik kuvvet, çözünme kuvveti, vb. olabilir. Kuvvetler ile birlikte, diğer başka özellikler eşzamanlı olarak özel tip algılama teknikleri ile ölçülebilir (taramalı ısıl mikroskopi, taramalı joule genleşme mikroskopisi, fotoısıl mikrospektroskopi, vs.). Genellikle maniveladaki bükülme, manivelanin bir ucundan dedektöre (bir dizi fotodiyot) yansıtılan bir lazer ışını sayesinde ölçülür. Cihazın daha yeni ve gelişmiş sürümlerinde, elektriksel iletkenliği ya da yüzeydeki elektron iletimini algılamak için uçtan akım geçirilmektedir.

Eğer uç sabit bir yükseklikte tarama yaparsa, yüzeye çarpıp hasar oluşturma riski doğar. Bu nedenle genellikle uç ile yüzey arasındaki kuvveti sabit tutmak ve uzaklığı ayarlamak amacıyla bir negatif geri besleme mekanizması kullanılır. Tipik olarak

numune, z yönünde hareket edip yüksekliği ayarlayan, x ve y yönünde hareket edip taramayı sağlayan bir dizi piezoelektrik düzenek aracılığıyla taranır. Elektronik kumanda üzerinde bulunan, küçük fakat hassas hareketleri sağlayan piezoelektrik öğeler, doğruluğu kesin ve hassas bir tarama sağlar. Buna alternatif olarak, her biri x,y,z yönlerine karşılık gelen üç piezokristalin üç ayaklı düzeneği sayesinde tarama yapılabilir. Bu düzenek tüp tarayıcılarda görülen bozulmaları da ortadan kaldırır. Daha yeni düzeneklerde, tarama ucu dikey piezotarayıcıya monte edilirken, incelenen örnek başka bir piezogrup kullanılarak x ve y doğrultularında taranır. Yükseklik bilgisi bilgisayara gönderilip x ve y pozisyonuna karşı kaydedilir. Acığa çıkan üç boyutlu veri yüzeyin topoğrafyasını temsil eder.

AFM uygulamaya bağlı olarak çeşitli modlarda kullanılabilir. Bu görüntüleme modları statik (temaslı) ya da dinamik (temassız) olabilir. Dinamik modlar manivelanın akustik ya da manyetik yollarla titreştirilmesini gerektirir ve yumuşak yüzeyler için daha yaygın olarak kullanılır.

AFM'nin en büyük avantajı örneğin iletken olmasını gerektirmemesidir. Bu yüzden biyolojik örneklerin incelenmesinde rahatça kullanılabilir. AFM'de çok çeşitli maddeler incelenebilmektedir. Örnek verecek olursak, ince ve kalın kaplamalar, seramikler, kompozitler, camlar, sentetik ve biyolojik membranlar, metaller, polimerler ve yarıiletkenler. AFM yüzey işleme ve malzeme problemlerinin çözülmesinde geniş kullanım alanı bulmaktadır. 10 pm çözünürlükte çalışır ve elektron mikroskoplarının aksine hava ve sıvı içinde de örneklere bakabilir.

3.8. Deneysel İşlemler

3.8.1. Yarıiletkenlerin Temizlenmesi

Bu çalışmada University Wafers firmasından alınan, 1–10 Ωcm özdirence ve (100) yönelimine sahip 3 inçlik bir p–Si yarıiletken kullanıldı. Yarıiletkeni yağlarından arındırmak için önce trikloroetilende 10 dakika kaynatıldı, sonra sırasıyla aseton ve metanolde ultrasonik olarak yıkandı. Ardından 30 saniye seyreltik HF:H_2O (1:10) çözeltisine daldırıldı. Her basamak sonunda yarıiletken 18 MΩ dirençli deionize suda yıkandı. Deionize sudan geçirilen yarıiletken, azot (N_2) ortamında kurutuldu ve vakum odasına yerleştirildi.

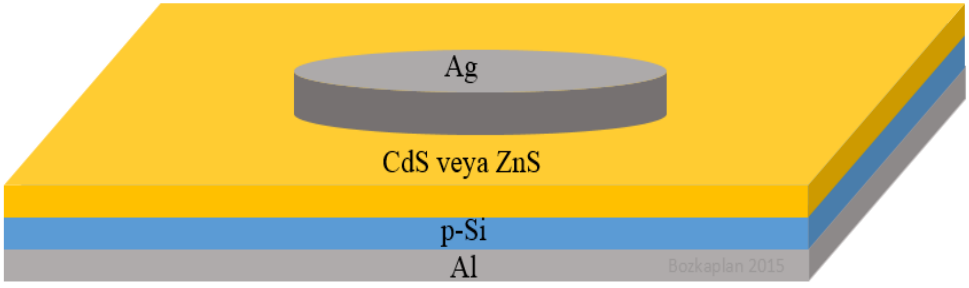
3.8.2. İnce Filmlerin ve Diyotların Oluşturulması

Önce diyotların oluşturulması için gerekli olan omik kontak işlemi gerçekleştirildi. Bu işlem için Nanovak firmasının ürettiği NVTS–400 termal ve saçtırma kombine sistemi kullanıldı. Vakum odasına yarıiletken konulduktan sonra önce vakum sistemi 10^{-6} Torr mertebesine düşürüldü. Daha sonra vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek vakum seviyesi 5×10^{-3} Torr mertebesine getirildi ve DC güç uygulanarak 200 nm kalınlığında Al ince filmi oluşturuldu. Saçtırma işleminden sonra yarıiletken 450 °C'ye ayarlanmış fırın içerisine konuldu ve azot ortamında 15 dakika tavlandı. Böylece omik kontaklı p–Si yapısı elde edildi.

Omik kontakların oluşturulmasından sonra yarıiletkenin yaklaşık 1cm×1cm ebatlarına ayrılan parçalardan biri seyreltik HF:H_2O (1:10) çözeltisi ile temizlendi, 18 MΩ dirençli deionize suda yıkandı ve azot (N_2) ortamında kurutuldu.

Daha sonra p–Si/Al yapısı tekrar aynı vakum odasına alındı. Önce vakum sistemi 10^{-6} Torr mertebesine düşürüldü ve vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek vakum seviyesi 5×10^{-3} Torr mertebesine getirildi. Hedef ile alttaş arasına 40 W RF güç uygulanıp 0.8 Å/s hızla p–Si/Al yapısı üzerine 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında CdS ve 70 W RF güç uygulanıp 0.2 Å/s hızla p–Si/Al yapısı üzerine 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında ZnS ince filmleri biriktirildi. Bu çalışmada hedef olarak 2 inç çapında CdS ve ZnS hedefleri kullanıldı.

CdS ve ZnS filmlerinin oluşturulmasından sonra, yapılar üzerine doğrultucu kontaklar elde etmek için Ag metalinin ince filmi oluşturuldu. NANOVAK firmasından satın alınan Termal Sistem içine yerleştirilen CdS/p–Si/Al ve ZnS/p–Si/Al



Şekil 3.18. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapısı

yapılarının üzerine 10^{-6} Torr mertebesine düşüldükten sonra gölge maske yardımı ile termal buharlaştırma tekniği kullanılarak Ag metal kontakları oluşturuldu. Elde edilen yapının çizimi Şekil 3.15.'te görülmektedir.

3.8.3. Filmlerin Optik ve Yüzey Ölçümlerinin Alınması

40, 150 ve 275 ^{o}C sıcaklıkta elde edilen CdS ve ZnS filmlerinin optik özelliklerini belirlemek için Schimadzu UV–3600–UV–VIS–NIR spektrometresi kullanıldı. Yine bu yapıların yüzey özelliklerini incelemek için SEM ve AFM görüntüleri elde edildi.

3.8.4. Diyotların Akım–Gerilim ve Kapasite–Gerilim Ölçümlerinin Alınması

40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında elde edilen CdS/p–Si/Al ve ZnS/p–Si/Al yapılarının elektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilmesi için önce bu yapılara ait akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri alındı. Bu ölçümler Keithley 2400 sourcemetre kullanılarak, bilgisayar kontrollü olarak gerçekleştirildi. Yapıda doğrultma özelliği görüldü ve elektriksel özelliğinin belirlenmesi için akım–gerilim (*I–V)* ölçümleri alındı.

Ayrıca 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al ve 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al yapılarının elektriksel karakteristikleri için gerekli sıcaklığa bağlı akım–gerilim *(I–V)* ölçümleri KEITHLEY 2400 SourceMeter akım–gerilim cihazında bilgisayar kontrollü olarak 120 K ve 480 K sıcaklık aralığında 40 K aralıklarla alındı. Numunelerin sıcaklığa bağlı akım–gerilim *(I–V)* ölçümleri; kriostat içinde yaklaşık 10^{-3} Torr basınç altında, bakır tutucuda konumlandırılarak dijital sıcaklık kontrol sistemi aracılığı ile bilgisayar kontrollü olarak ters ve doğru beslem gerilimlerinde gerçekleştirildi.

40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al yapılarının ışığa karşı tepkilerini incelemek için Newport Oriel 9600 Güneş Simülatörü kullanıldı. Bunun için diyotların akım–gerilim *(I–V)* ölçümleri AM1.5 global filtreye sahip güneş simülatörü altında 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 yoğunluklu ışıklar kullanılarak alındı.

Daha sonra diyotların kapasite–gerilim (*C–V*) ölçümleri Agilent HP 4294A Impedans Analizörü kullanılarak alındı. Yapıların $1/C^2–V$ grafiği kullanılarak elektriksel parametreleri elde edildi. 1 kHz ile 10 MHz frekans aralıklarında 0.5 V sabit gerilim altında yapıların arayüzey durumlarının AC sinyallerini takip edip edemedikleri incelendi.

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

4.1. Giriş

Bu bölümde farklı alttaş sıcaklıklarında büyütülen CdS ve ZnS ince filmlerin yüzey ve optik özelliklerinin yanı sıra Ag metali ile oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarının elektriksel ve fotovoltaik karakterizasyonu incelendi.

4.2. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Karakterizasyonu

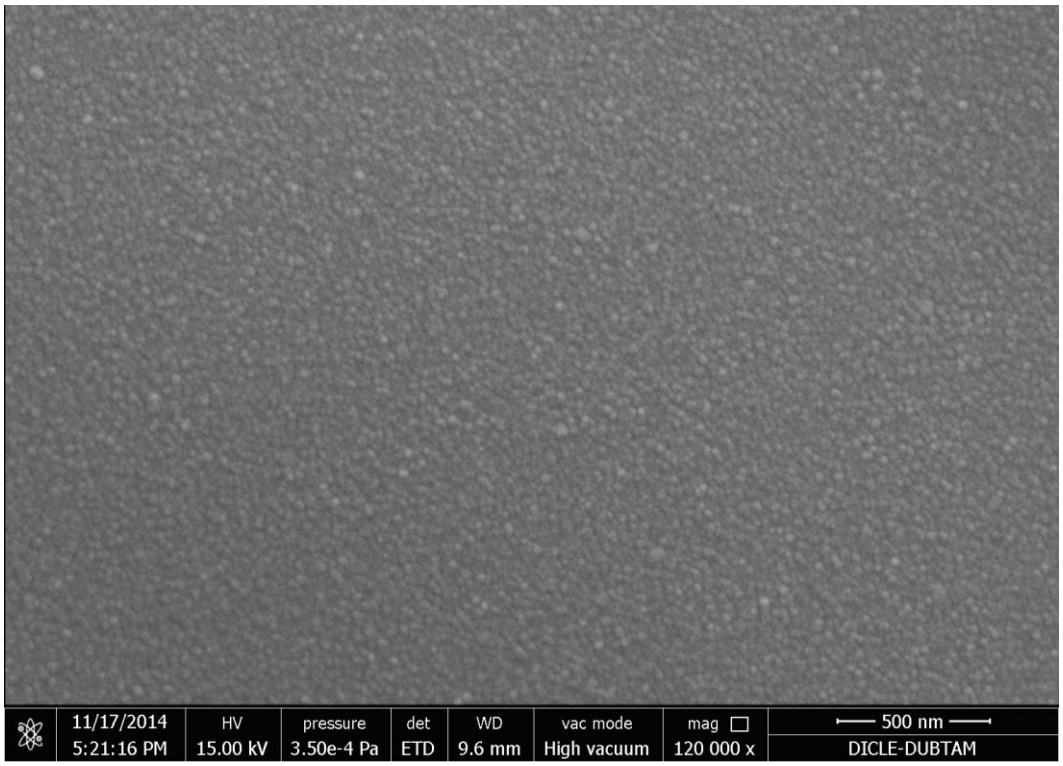
4.2.1. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Yüzey Özelliklerinin İncelenmesi

Yarıiletken film şeklinde elde edilen bir malzemenin yüzey özellikleri ince filmin elektriksel ve optik parametrelerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin, filmlerin yüzey pürüzlülüğündeki artış fotovoltaik güneş pillerinin veriminde bir azalmaya neden olacaktır. Öyleyse elde edilen filmlerin yüzey özellikleri, filmin pürüzlülüğü, tabana tutunması, homojenliği ve yüzey kusurları ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir.

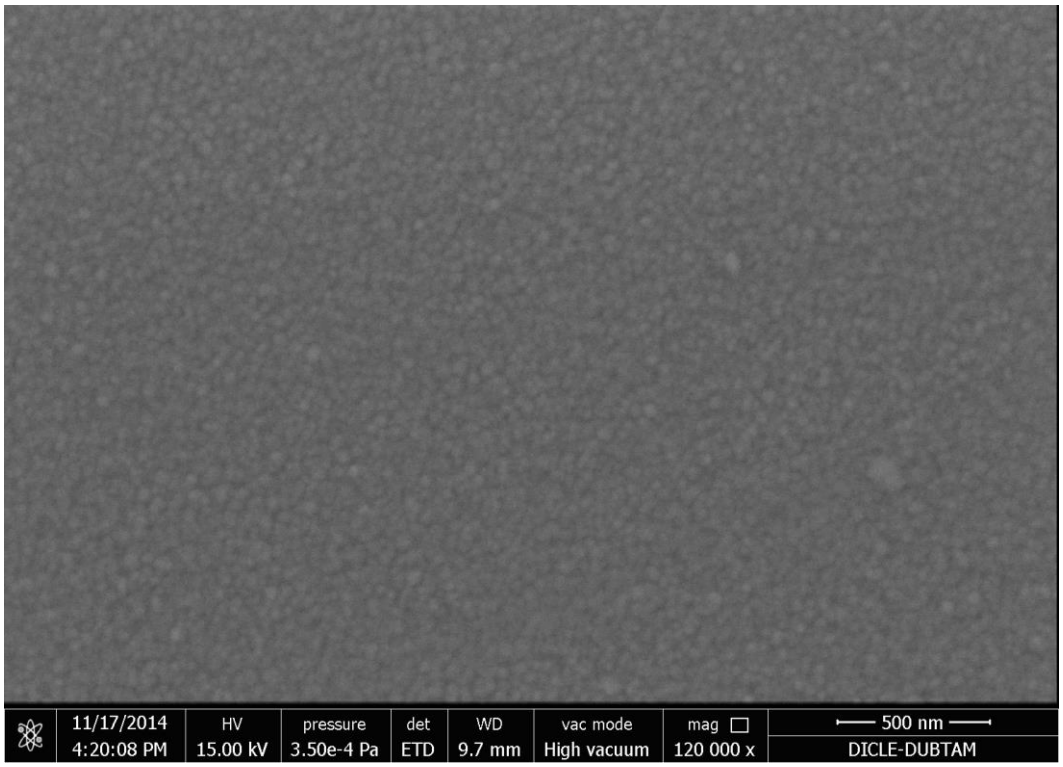
RF saçtırma metoduyla doğrudan p–Si yarıiletkenleri üzerine 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıklarında biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerinin görüntüleri Dicle Üniversitesi DUBTAM'da bulunan SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) ve AFM (Atomik Kuvvet Mikroskobu) yardımıyla alındı, filmlerin nanoboyutlarda büyütülebilmeleri, homojensizlikleri, kaliteleri ve fabrikasyonları konusunda bilgi elde edildi.

Elde edilen filmlerin SEM görüntüleri incelendiğinde, filmlerin yarıiletken yüzeyini tamamen kapladığı ve alttaş sıcaklığı arttıkça filmlerin daha farklı yüzey yapılara sahip olduğu ve homojenliğin bozulduğu gözlendi. Alttaş sıcaklığı arttıkça filmin yüzey üzerinde kümeler halinde büyüdüğü, tane büyüklüklerinin arttığı ve yer yer boşluklar bulunduğu görüldü.

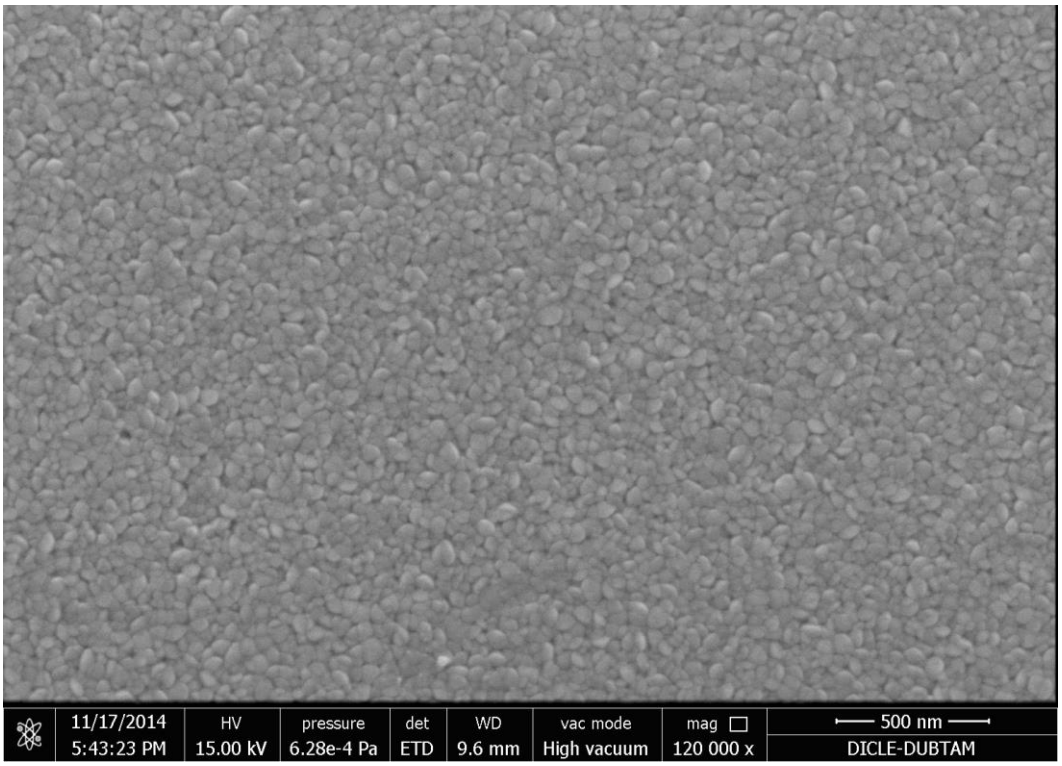
AFM görüntüleri incelendiğinde, tüm filmlerin yüzey yapılarında bazı bölgelerde farklı yükseklik ve büyüklüklerde yığılmaların olduğuna rastlandı. Yüzeylerde gözlenen beyaz bölgeler atomların büyümeyi tercih ettiği yerleri koyu renkli bölgeler ise daha az film oluşumunun olduğu yerlerdir.



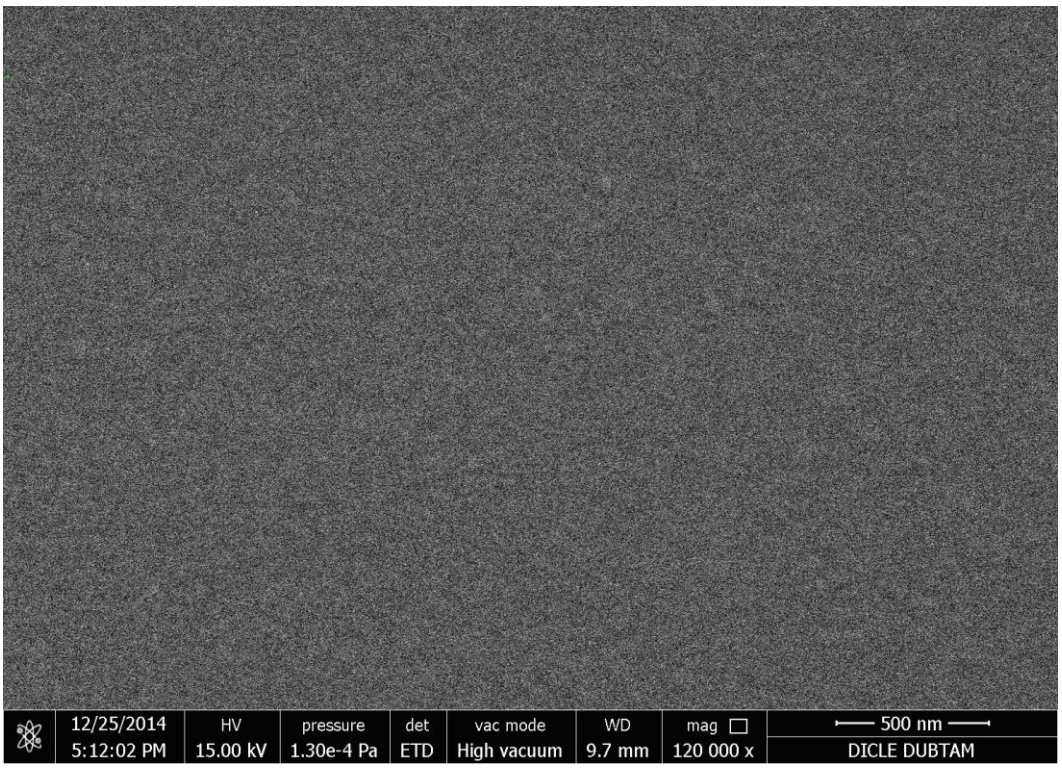
Resim 4.1. 40 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



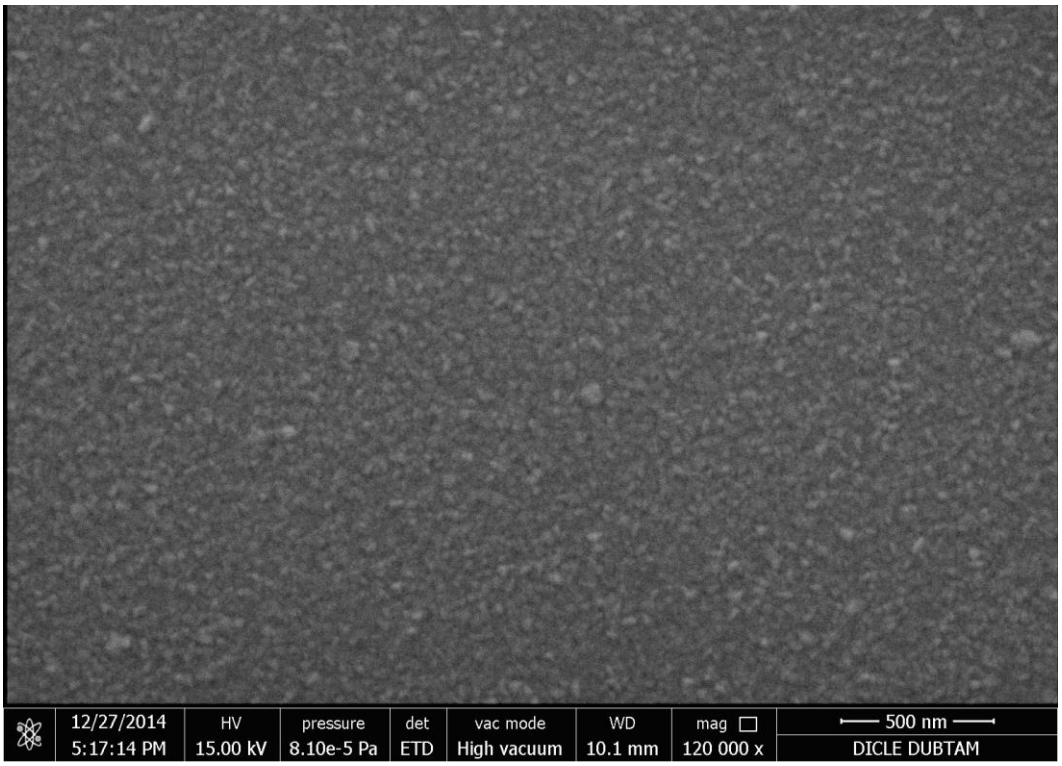
Resim 4.2. 150 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



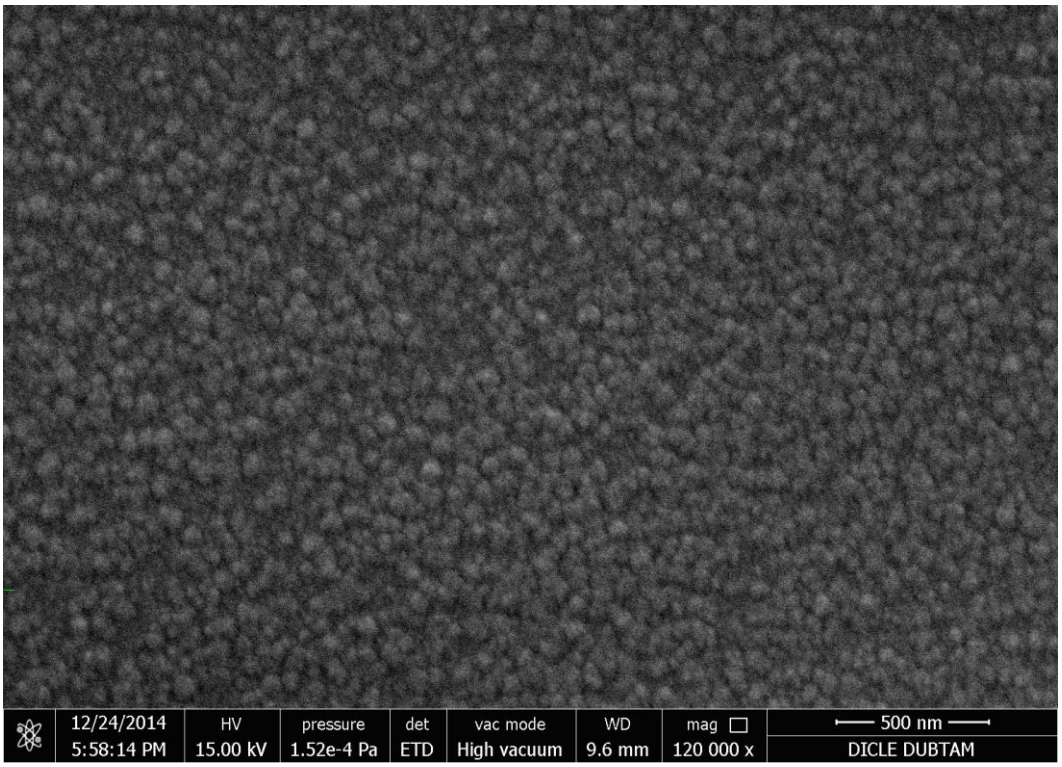
Resim 4.3. 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



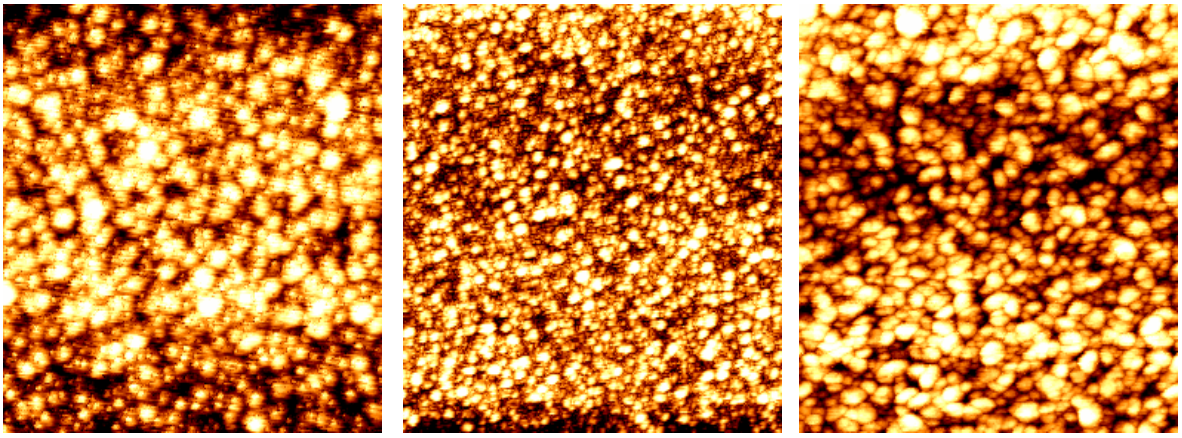
Resim 4.4. 40 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



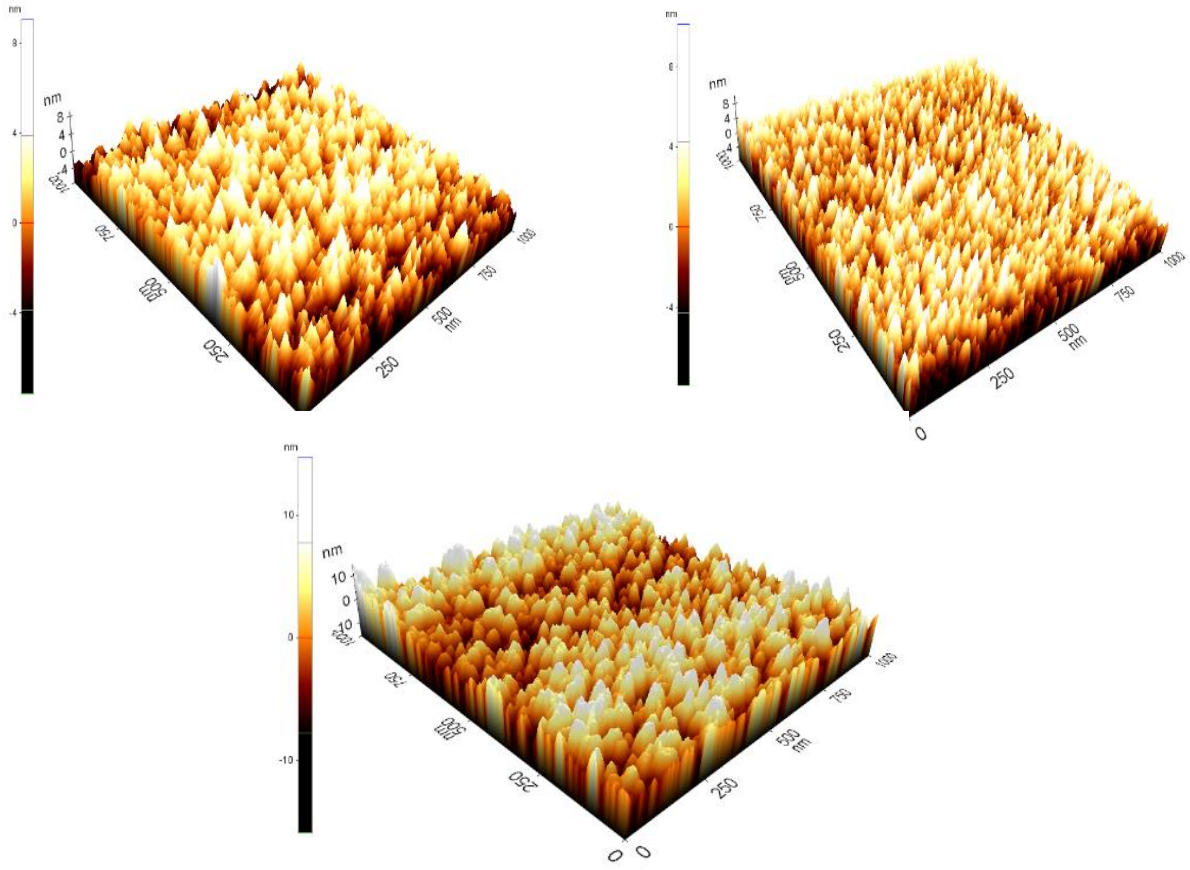
Resim 4.5. 150 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



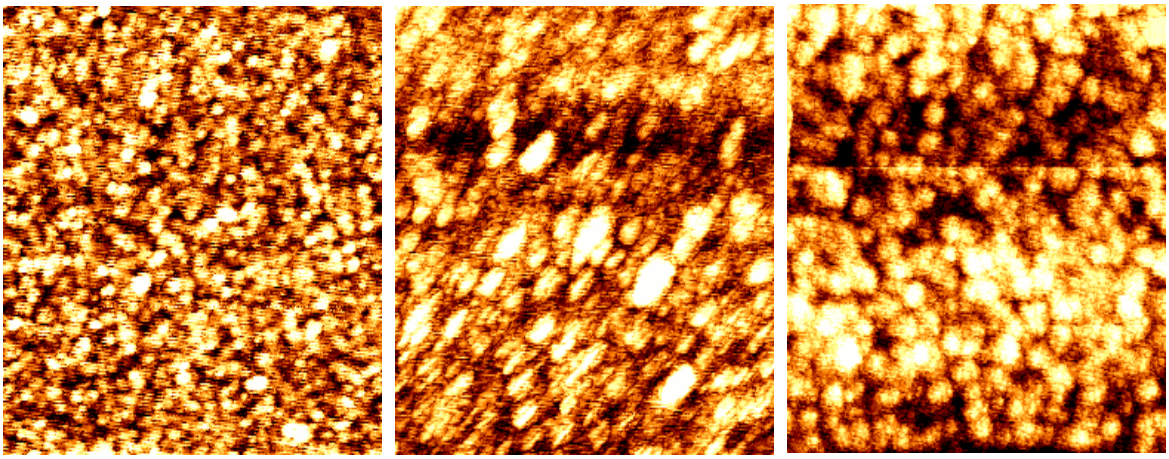
Resim 4.6. 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan SEM görüntüsü



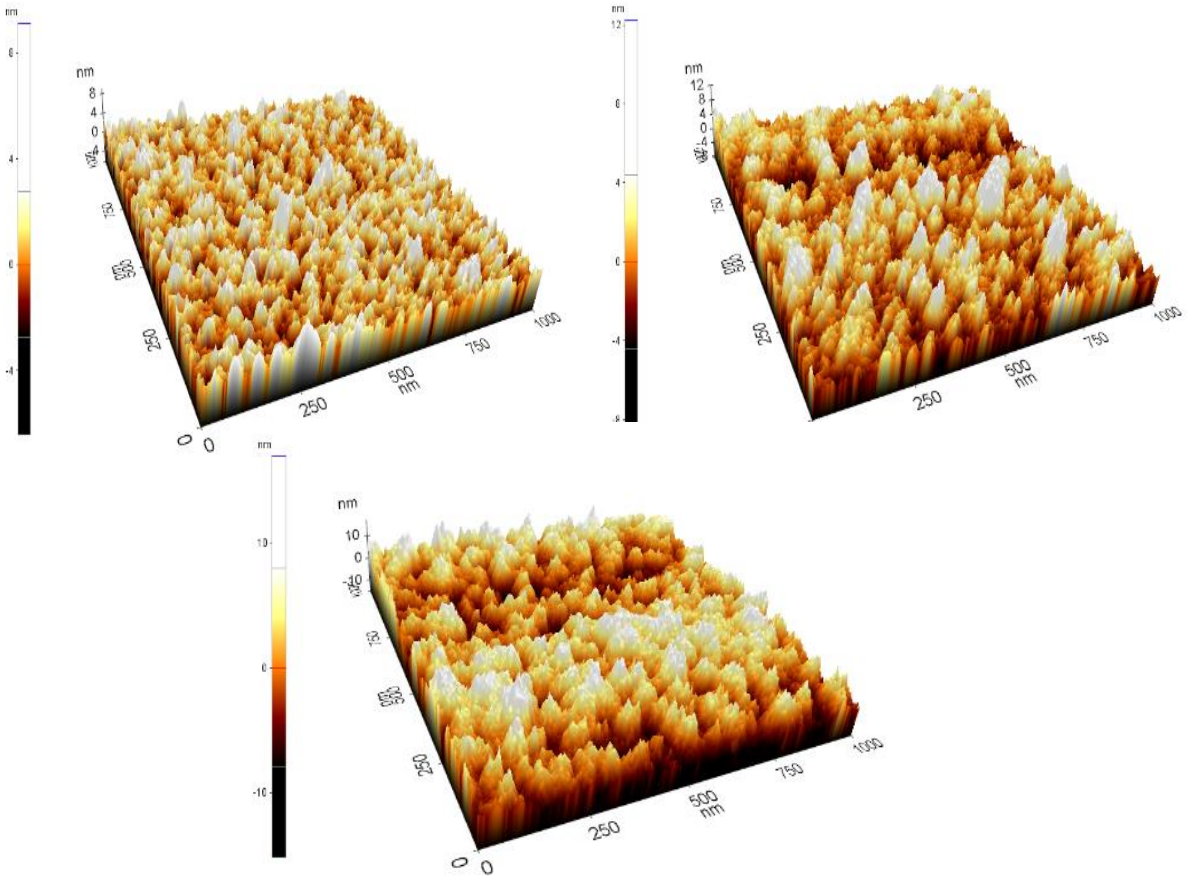
Resim 4.7. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan 1µmx1µm AFM görüntüleri



Resim 4.8. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS filmine ait oda sıcaklığında alınan 3D AFM görüntüleri



Resim 4.9. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan 1µmx1µm AFM görüntüleri



Resim 4.10. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS filmine ait oda sıcaklığında alınan 3D AFM görüntüleri

Çizelge 4.1. Elde edilen CdS ve ZnS filmlerinin AFM görüntülerinden hesaplanan pürüzlülük değerleri

AFM	**CdS**			**ZnS**		
Alttaş sıcaklığı	**40 ºC**	**150 ºC**	**275 ºC**	**40 ºC**	**150 ºC**	**275 ºC**
Pürüzlülük (nm)	1.984	2.179	3.953	1.464	2.270	3.306

Film oluşumu sırasında farklı bölgelerde yığılmanın sebebi, kullanılan alttaşların yüzey özelliklerine ve alttaş ile film arasındaki ısıl farklılıklara bağlanabilir. Ayrıca alttaş sıcaklığı arttıkça filmlerin yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı ve kristalleşmenin belirginleştiği izlendi.

Farklı araştırmacılar da benzer sonuçlarla karşılaşmışlardır. Park ve ark. (2013) elde etmiş oldukları AZO filmlerin 2B AFM ölçümleri sonucunda filmlerin yüzeylerinin küçük, yoğun taneler ile çok düzgün kaplandığını görmüşlerdir. Alttaş sıcaklığının artması ile tanelerin büyüklüğünün arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün belirgin bir artış gösterdiğini gözlemiş ve bu sonuçları kristalleşme özelliğinin gelişmesine bağlamışlardır.

Mariappan ve ark. (2014) 300, 400 ve 500 °C alttaş sıcaklıklarında elde ettikleri Na–katkılı ZnO filmlerin yüksek çözünürlüklü SEM görüntüleri ile alttaş sıcaklığının 170 ºC'den 270 ºC'ye arttıkça ZnO nano çubukların yarıçaplarının azaldığını görmüşlerdir. 270 ºC'den sonraki sıcaklık değerlerinde ise nano çubukların yarıçapında hafif artışa rastlamış ve filmlerin yüzey özelliklerinin alttaş sıcaklığına sıkı bir şekilde bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Sıcaklık arttıkça tanecikli ve gözenekli bir yapı gözlemlemişlerdir. Yüksek sıcaklıklarda kristalleşmenin hızlı ve hatasız olmasını Zn atomlarının oksitlenmesine atfetmişlerdir. Alttaş sıcaklığının artması ile birlikte yüzeye iyi yapışma özelliğine sahip düzgün, yoğun ve homojen olmayan mikroyapılar oluştuğunu görmüşlerdir.

Mashaiekhy ve ark. (2012) gümüş (Ag) filmleri farklı alttaş sıcaklıklarında (25–450 °C) DC magnetron saçtırma yöntemi ile elde etmişlerdir. Atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile ince filmlerin yüzey topoğrafisini incelemişlerdir. Filmlerin tane boyutunun ve yüzey pürüzlülüğünün alttaş sıcaklığına ve film kalınlığına güçlü bir şekilde bağlı olduğunu görmüşlerdir.

Song ve ark. (2012) Al:ZnO (AZO) ince filmleri RF magnetron sıçratma ile kuvars yüzeyler üzerine biriktirmişlerdir. AZO filmlerin atomik kuvvet mikroskobu (AFM) ile yapısal özelliklerine kalınlığın ve alttaş sıcaklığının etkilerini araştırmışlardır. Oda sıcaklığı ve 450 °C arasında değişen farklı alttaş sıcaklıklarda biriktirilen filmler arasında 250 °C alttaş sıcaklığında oluşturulan filmin iyi bir kristal kalitesi ve elektriksel özellik gösterdiğini görmüşlerdir.

Lin ve ark. (2010) Si ince filmleri elektron demeti buharlaştırma yöntemi ile 500 ve 600 ^{o}C alttaş sıcaklığı aralığında kuvars yüzeyler üzerine üretmişlerdir. Taramalı elektron mikroskobundan (SEM) elde edilen sonuçlar yardımı ile filmlerin büyüme özelliklerinin alttaş sıcaklığına önemli ölçüde bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Si ince filmlerin 560 °C'den küçük sıcaklıklarda amorf büyük sıcaklıklarda polikristal olduğunu gözlemlemişlerdir.

4.2.2. CdS ve ZnS İnce Filmlerin Optik Özelliklerinin İncelenmesi

Cam taban malzemesi üzerine büyütülen CdS ve ZnS ince filmlerin optik soğurma ölçümleri Schimadzu UV–Vis fotospektrometresi kullanılarak incelendi. CdS ve ZnS ince filmlerinin bant aralığı hakkında bilgi edinmek için, optik geçirgenlik ölçümleri 200 nm ile 2600 nm aralığında yapıldı. Elde edilen CdS ince filmlerin maksimum geçirgenliğinin %98 civarında ve ZnS ince filmlerin maksimum geçirgenliğinin %95 – %98 civarında olduğu görüldü.

CdS ve ZnS ince filmlerinin optik bant aralığı (E_g)

$$\alpha h\nu = B(h\nu - E_g)^m \qquad (4.1)$$

denklemi ile hesaplanabilir. Burada α soğurma katsayısı, B sabit sayı, h Planck sabiti ve m doğrudan bant aralığı için ½ olarak alınır. 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında büyütülen CdS ve ZnS ince filmlerinin optik doğrudan bant aralıkları $(\alpha h\nu)^2$–$h\nu$ (Enerji) grafiğinin lineer kısmının foton enerjisi eksenini kestiği noktadan hesaplandı. 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ve ZnS ince filmlerine ait bant aralığının bulunduğu $(\alpha h\nu)^2$–*Enerji* grafikleri sırasıyla Şekil 4.5. ve Şekil 4.6.'da verilmiştir.

Önceki çalışmalarla uyumlu bant aralığı değerleri elde edilmiştir. Lindroos ve ark. (1997) ZnS ince filmleri SILAR yöntemi ile polyester tabanlar üzerine büyütmüşlerdir. Filmlerin yasak enerji aralığını 3.44 eV (361 nm) olarak

hesaplamışlardır. Bu değer yasak enerji aralığı 3.54 eV olan kübik yapıdaki ZnS ile uyuşmaktadır.

Yıldırım ve ark. (2009) CuS, Cu(0.6)Zn(0.4)S ve ZnS ince filmleri oda sıcaklığında, cam yüzeyler üzerine SILAR yöntemiyle büyütmüşlerdir. Kristal yapı, optik bant aralığı ve bu filmlerin elektriksel özellikleri üzerine ışık etkisi ile tavlamanın sıcaklık etkisini araştırmışlardır. Oda sıcaklığında ZnS enerji bant aralığı değerini 3.92 eV olarak bulmuşlardır.

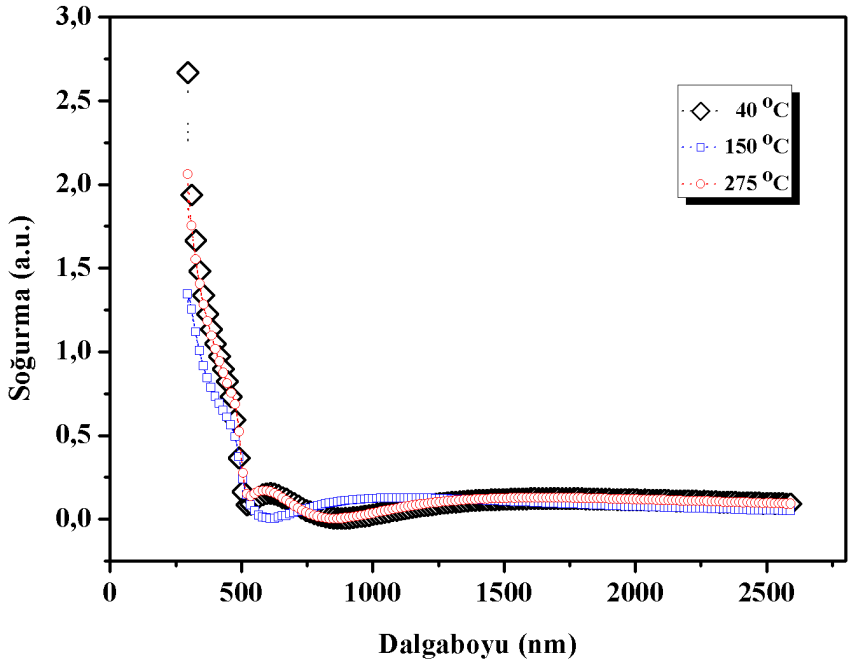
Huang ve ark. (2011) ZnS filmleri radyo frekans (RF) magnetron püskürtme yöntemi ile silikon (Si) ve cam yüzeylere büyütmüşlerdir. Enerji bant aralığı değerini tavlanmayan filmler için 3.49 eV olarak bulmuşlardır.

Ximello–Quiebras ve ark. (2004) yaptıkları çalışmada kimyasal banyo biriktirme yöntemi ile cam alt taban üzerine CdS ince filmleri üretmişlerdir. Kalınlığı 1138Å olan CdS ince filmlerinin bant aralığını 2.5 eV ve tanecik büyüklüğünü 0.065 μm olarak bulmuşlardır.

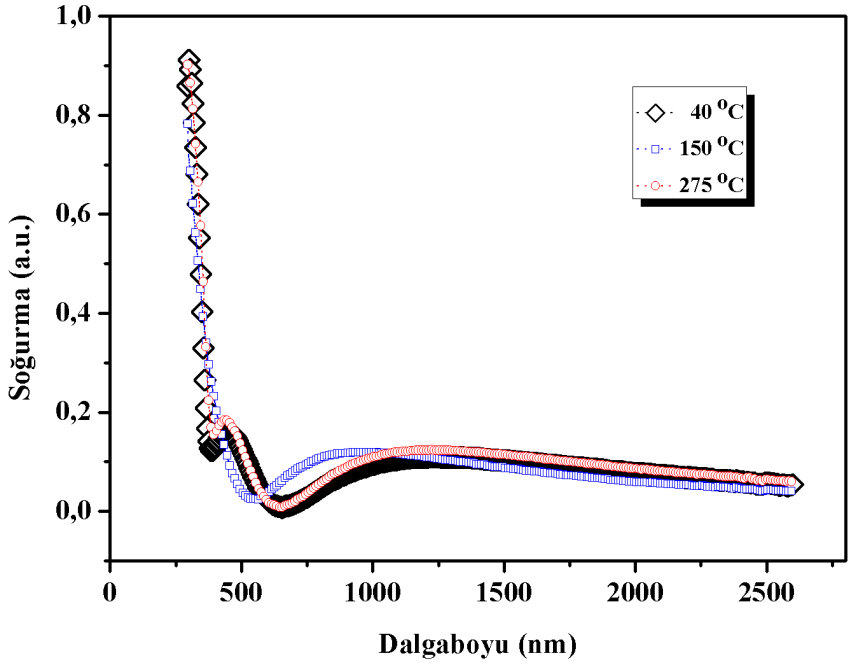
Alamri (2014) kadmiyum sülfür (CdS) ince filmleri elektron demeti biriktirme yöntemi kullanarak elde etmiştir. Filmlerin yapısını, morfolojisini ve optik özelliklerini incelemiş ve kullandığı malzemeler ile oluşturduğu filmlerin hegzagonal yapıya sahip olduğunu tayin etmiştir. Yığın ve tozdan biriktirdiği CdS filmlerin optik bant aralıklarını sırasıyla 2.4 ve 2.45 eV olarak bulmuştur.

Bedir ve ark. (2013) Bor katkılı CdS filmleri 350 – 450 ^{o}C alttaş sıcaklığı aralığında sprey piroliz yöntemi ile cam yüzeyler üzerine oluşturmuşlardır. Elde ettikleri filmlerin optik özellikleri üzerine alttaş sıcaklığının etkisini araştırmışlardır. Optik parametrelerden bulunan 2.08 – 2.44 eV doğrudan bant aralığı değerlerindeki kaymayı alttaş sıcaklıklarının farklı olmasına bağlamışlardır.

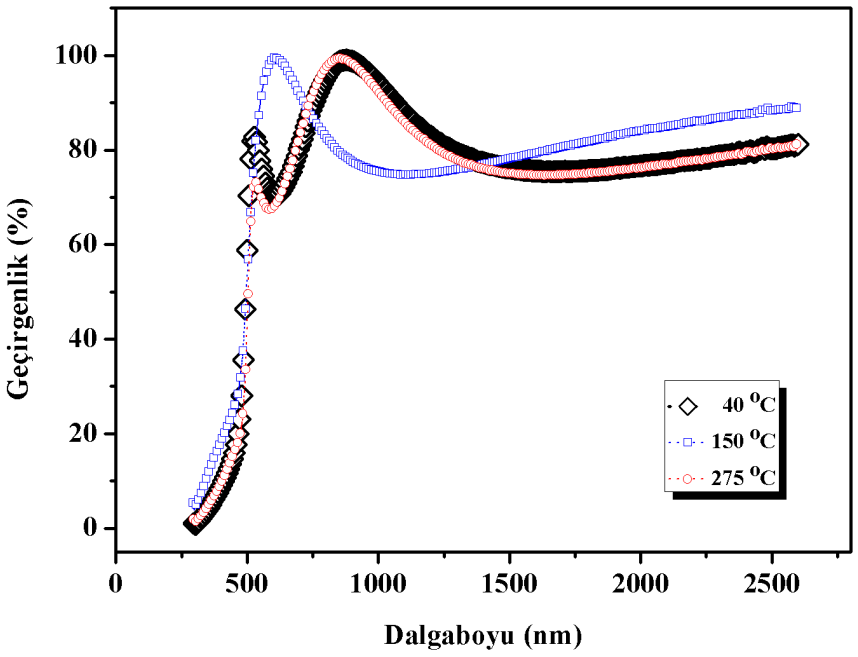
40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında elde edilen CdS ve ZnS ince filmlerin doğrudan bant aralığı değerleri Çizelge 4.2.'de görülmektedir. Bulunan bant aralığı değerleri ile CdS ve ZnS ince filmlerinin birer yarıiletken olduğu ve elektriksel ve optik devre elemanı üretiminde kullanılabileceğine karar verildi.



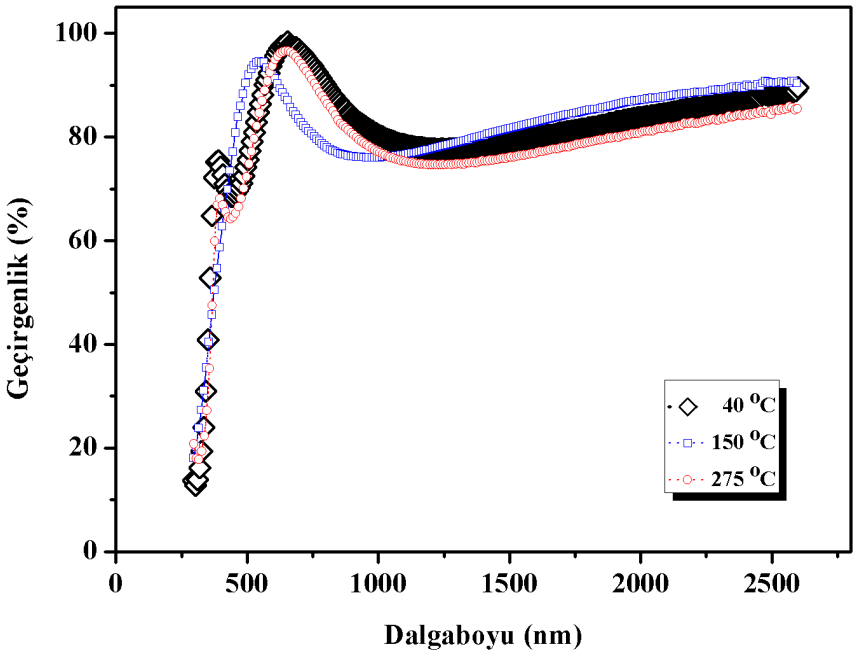
Şekil 4.1. 40, 150 ve 275 °C alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait Soğurma–Dalgaboyu grafikleri



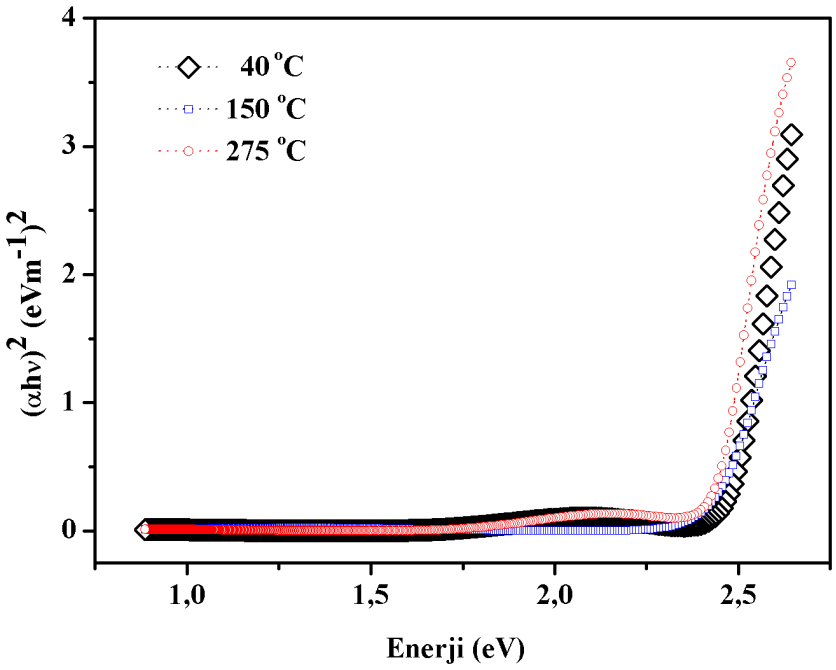
Şekil 4.2. 40, 150 ve 275 °C alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait Soğurma–Dalgaboyu grafikleri



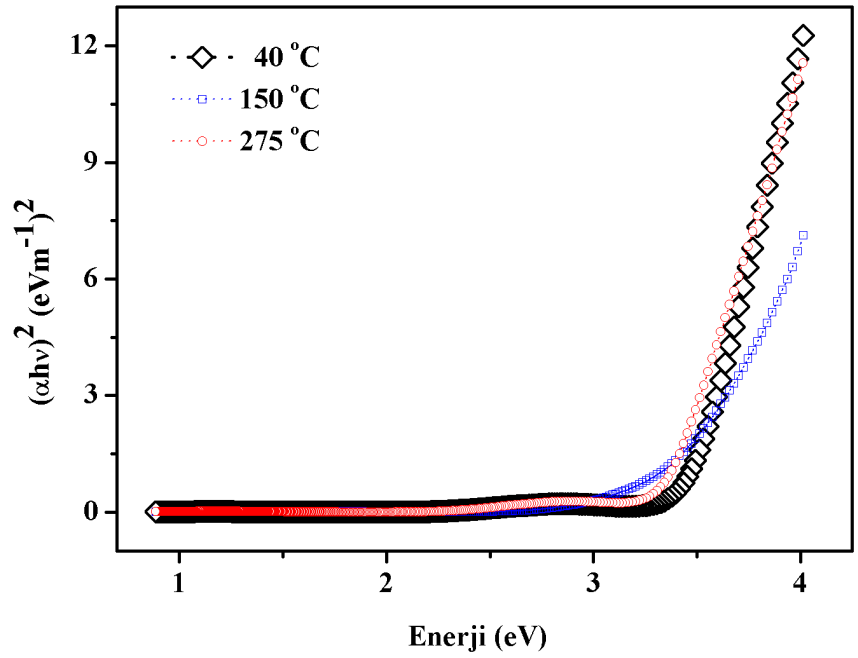
Şekil 4.3. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait Geçirgenlik–Dalgaboyu grafikleri



Şekil 4.4. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait Geçirgenlik–Dalgaboyu grafikleri



Şekil 4.5. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen CdS ince filmlerine ait bant aralığının bulunduğu *(αhν)*^{2} *–Enerji* grafikleri



Şekil 4.6. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen ZnS ince filmlerine ait bant aralığının bulunduğu *(αhν)*^{2} *–Enerji* grafikleri

Çizelge 4.2. Elde edilen CdS ve ZnS filmlerinin *(αhν)²–Enerji* grafiğinden hesaplanan bant aralığı değerleri

	(αhν)²–Enerji					
	Ag/CdS/p–Si/Al			**Ag/ZnS/p–Si/Al**		
Alttaş sıcaklığı	**40 ºC**	**150 ºC**	**275 ºC**	**40 ºC**	**150 ºC**	**275 ºC**
Bant Aralığı (eV)	2.46	2.43	2.43	3.65	3.46	3.46

4.3. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi

40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıklarında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarının akım–gerilim *(I–V)* ölçümleri KEITHLEY 2400 Source Meter cihazında bilgisayar kontrollü olarak ± 3 Volt aralığında oda sıcaklığında alındı.

Elde edilen Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait akım–gerilim grafiklerinden de görülebileceği gibi yapılarının doğrultucu özelliğe sahip olduğu anlaşılmıştır. Yapılara ait doğrultma oranları hesaplanmış ve Çizelge 4.3.'de verilmiştir. Doğrultucu yapıya sahip bu diyotlar için termoiyonik emisyon teorisi kullanılabilir. Teoriye göre belli bir *V* potansiyel altında bulundurulan bir diyottan geçen akım;

$$I = I_0 \exp\left(\frac{e(V - IR_s)}{nkT}\right) \tag{4.2}$$

denklemi ile ifade edilmektedir (Rhoderick ve Williams 1988). Burada *e* elektron yükü, *V* uygulanan gerilim, R_s seri direnç, *n* boyutsuz idealite faktörü, *k* Boltzmann sabiti, *T* mutlak sıcaklık ve I_0 doyma akım değeridir ve

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(-\frac{e\Phi_b}{kT}\right) \tag{4.3}$$

ile ifade edilir. Burada *A* diyot alanı (A = 0.0176174 cm^2), A^* Richardson sabiti olup n–Si için $A^* = 110\ A/K^2cm^2$ ve p–Si için $A^* = 32\ A/K^2cm^2$'dir ve Φ_b diyotun engel yüksekliğidir. Bir diyotun idealite faktörü değeri ln*I–V* grafiğinin lineer bölgesinin eğiminden

$$n = \frac{e}{kT}\frac{dV}{d(\ln I)} \tag{4.4}$$

yardımı ile ve diyotun engel yüksekliği ln*I*–*V* grafiklerinin akım eksenini kestiği noktadaki doyma akım değeri olan I_0 değeri kullanılarak

$$\Phi_b = \frac{kT}{e}\ln\left(\frac{AA^*T^2}{I_0}\right) \tag{4.5}$$

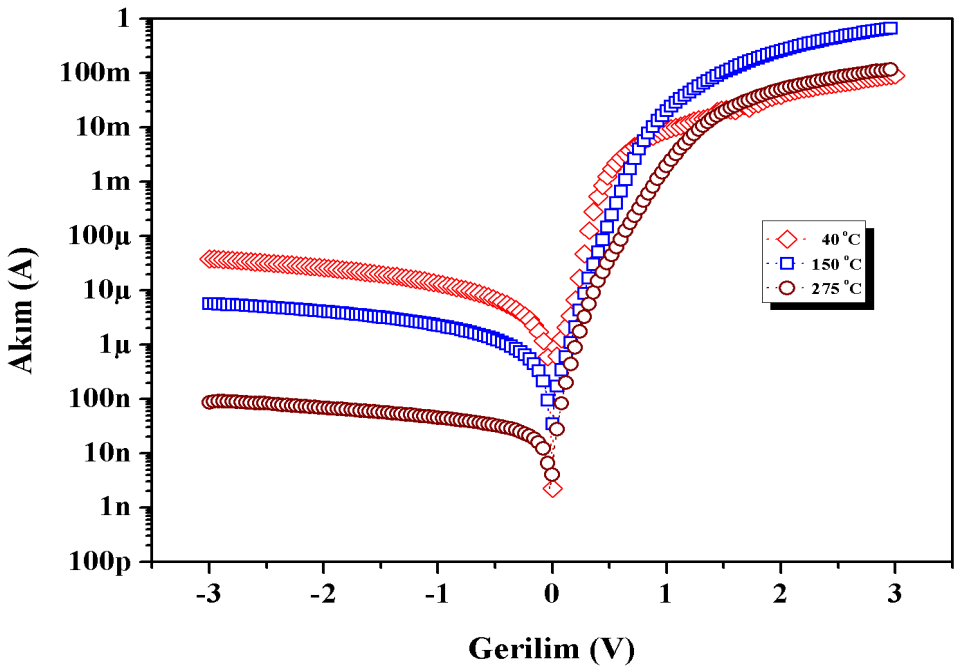
formülü ile hesaplanabilir.

4.3.1. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Akım–Gerilim Ölçümleri

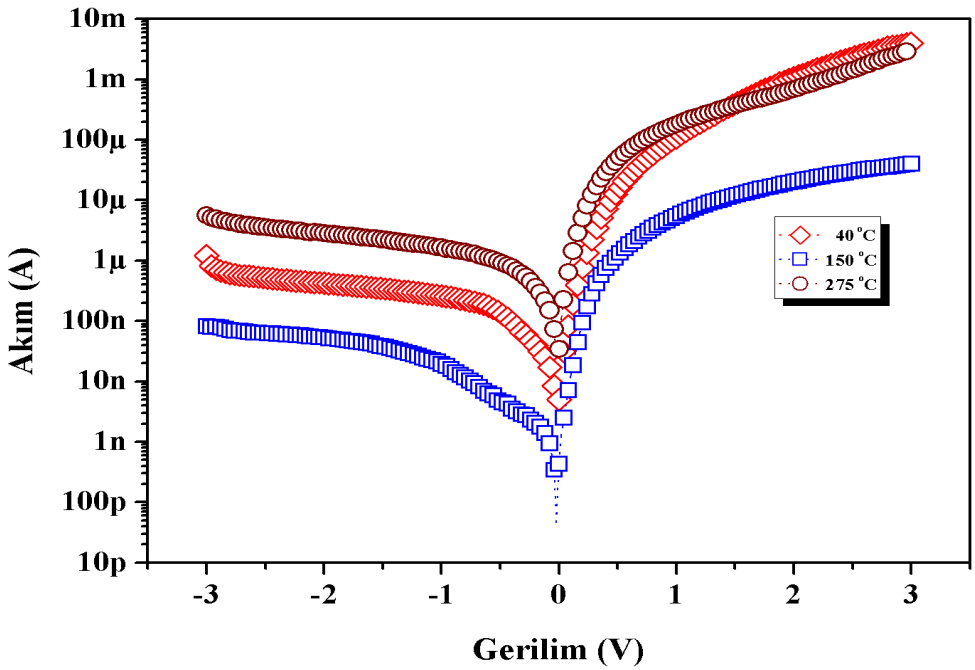
Şekil 4.7. Ag/CdS/p–Si diyotlarına ait oda sıcaklığında ve karanlıkta elde edilen akım–gerilim grafikleri göstermektedir. Akım–gerilim grafiklerinden Ag/CdS/p–Si yapılarına ait doğrultma oranı, idealite faktörü ve engel yüksekliği değerleri hesaplandı. Şekil 4.8.'de ise Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait akım–gerilim grafikleri göstermektedir. Görüldüğü gibi elde edilen yapılar doğrultucu özelliğe sahiptir. Akım–gerilim grafiklerinden yapılan hesaplamalar sonrası Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait elde edilen elektriksel parametreler Çizelge 4.3. ile verildi.

İdeal bir diyot için idealite faktörü 1 olmalıdır. Birden büyük idealite faktörü değerleri ideallikten sapmayı ifade eder.

İdealite faktöründeki bu sapmalar öncelikle örgü uyumsuzluğuna sonra da azınlık taşıyıcılarının hareketi ve tekrar birleşimi ile termoiyonik emisyon teorisine, arayüzey durumlarının varlığına atfedilebilir. Ayrıca sınırlı uzay yükü iletimine, derin seviyedeki tünelleme, arayüzeyde elektrik alan etkisiyle imaj kuvvet etkisinin düşmesi ve eklemin parazitik etkisine de bağlanabilir (Card ve Rhoderick 1971).



Şekil 4.7. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/CdS/p–Si diyotlarına ait *I–V* grafikleri



Şekil 4.8. 40, 150 ve 275 ºC alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait *I–V* grafikleri

4.3.2. Norde Fonksiyonu Yardımıyla Diyotların Seri Dirençlerinin Belirlenmesi

Norde engel yüksekliği ve seri direncin hesaplanmasında yeni bir metot önermiştir (Norde 1979). Geliştirilmiş ve yeniden düzenlenmiş Norde fonksiyonu;

$$F(V) = \frac{V}{\gamma} - \frac{kT}{e}\left(\frac{I(V)}{AA^{*}T^{2}}\right) \tag{4.6}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada γ ifadesi *n* değerinden büyük olan ilk tam sayıdır ve *I(V)* ifadesi, *I–V* eğiminden elde edilen akım değeridir. Bu metotta engel yüksekliği;

$$\Phi_b = F(V_0) + \frac{V_0}{\gamma} - \frac{kT}{e} \tag{4.7}$$

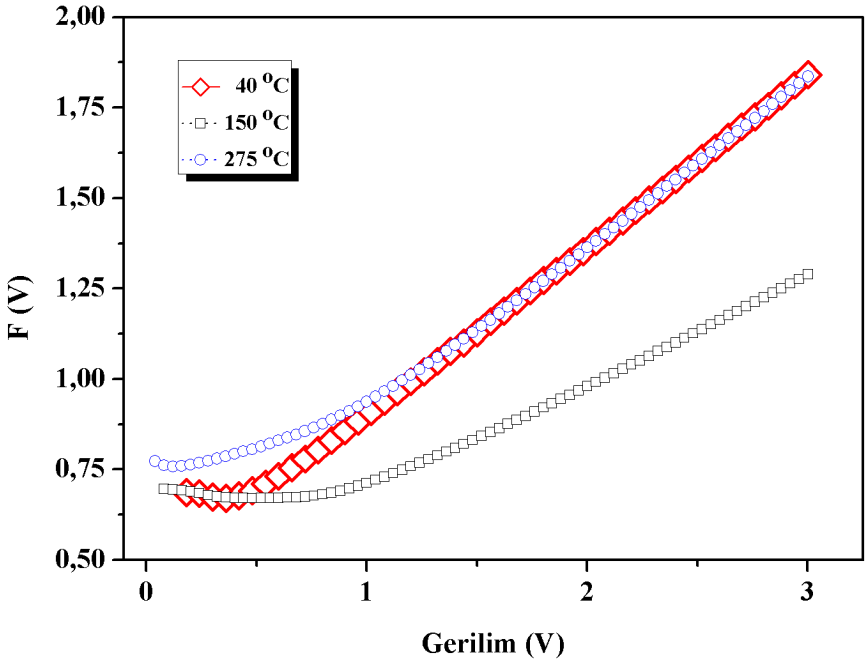
olarak verilir. Burada *F* (V_0) ifadesi, *F–V* grafiğinin minimum *F(V)* değeridir ve V_0 ise; bu değere karşılık gelen gerilim değeridir. Norde metodunda seri direnç değerleri;

$$R_s = \frac{kT(\gamma - n)}{eI} \tag{4.8}$$

formülü ile bulunur. Burada *I* değeri, V_0 değerine karşılık gelen akım değeridir (Ocak 2010).

Çizelge 4.3. ve 4.4. tüm diyotların Norde fonksiyonları tarafından elde edilen engel yüksekliği ve seri direnç sonuçlarını göstermektedir. Norde fonksiyonları ile seri direnç elde edilen tüm doğru beslem değerleri üzerinden hesaplanırken, Cheung fonksiyonları ile yalnızca seri direnç bölgesi değerleri üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır.

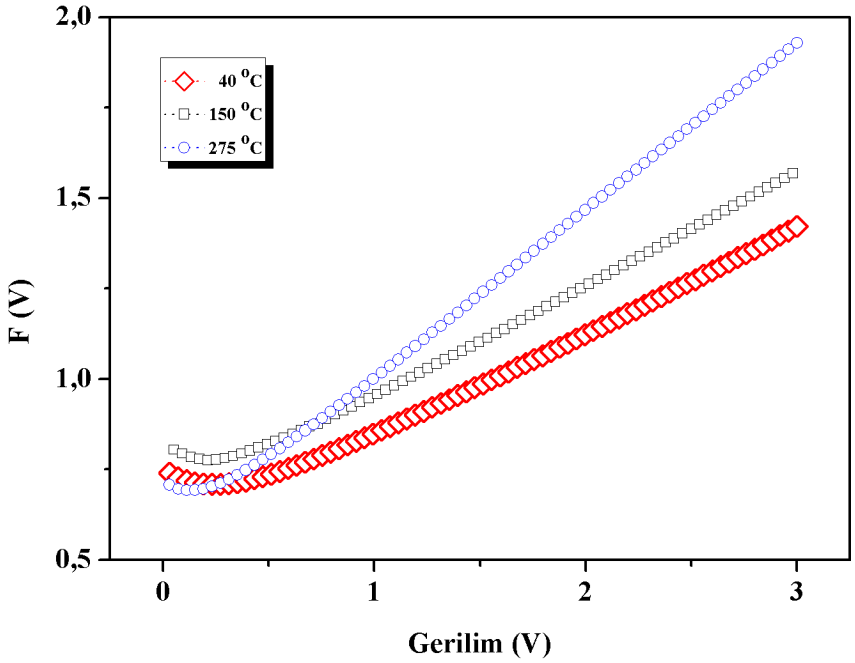
Çizelgelerden de görüldüğü üzere elde edilen diyotların seri direnç değerleri birbirine yakın değerler bulundu. Diyotun *F(V)–V* grafiğinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin, *I–V* grafiğinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinden büyük olduğu olduğu görüldü. Daha önce de bazı araştırmacılar da benzer sonuçlara ulaşmışlardır.



Şekil 4.9. 40, 150 ve 275 °C alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait *F(V) –V* grafikleri

Çizelge 4.3. Elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan diyot parametreleri

Ag/CdS/p–Si/Al					
Alttaş Sıcaklığı	***I–V***			***F(V)–V***	
	n	**Φ_b (eV)**	***Doğrultma Oranı***	**Φ_b (eV)**	**R_s (Ω)**
40 °C	1.612	0.714	2405	0.806	79.6
150 °C	1.620	0.760	10523	0.771	6.4×10^4
275 °C	1.664	0.778	929352	0.793	9.5×10^5



Şekil 4.10. 40, 150 ve 275 °C alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *F(V) –V* grafikleri

Çizelge 4.4. Elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan diyot parametreleri

Ag/ZnS/p–Si/Al					
Alttaş Sıcaklığı	***I–V***			***F(V)–V***	
	n	**Φ_b (eV)**	***Doğrultma Oranı***	**Φ_b (eV)**	**R_s (Ω)**
40 °C	1.975	0.694	751	0.732	449.2
150 °C	2.018	0.743	3278	0.770	1.4×10^4
275 °C	2.378	0.797	171	0.821	2.3×10^5

Daha önceki araştırmacılar da buna benzer sonuçlar elde etmişlerdir. Sağlam ve ark. (2008) SILAR metoduyla büyütülmüş CdS arayüzey tabakalı Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının düz beslemdeki *I–V* eğrilerinden elektriksel parametrelerini hesaplamışlardır. Oda sıcaklığındaki akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerinden Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısı doğrultucu kontak özelliği göstermiştir. Termoiyonik emisyon teorisini uygulayarak diyotun idealite faktörünü 2.06 ve engel yüksekliğini 0.92 eV olarak tanımlamışlardır. Diyotun ideal olmayan *I–V* davranışı ve 1'den büyük idealite faktörünü arayüzey tabakası, arayüzey durumları ve seri direnç etkisine bağlamışlardır.

Ateş ve ark. (2011) Zn/ZnS/n–Si/Au–Sb sandviç yapısının oda sıcaklığında alınan akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerinden yapının doğrultucu davranış gösterdiğini belirlemişlerdir. Oda sıcaklığında idealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini sırasıyla 2.60, 0.71 eV ve 3.8 kΩ olarak hesaplamışlardır.

Özakın ve ark. (2012) oda sıcaklığında Zn/ZnS/n–GaAs/In sandviç yapısının elde edilmesi için n–GaAs alttaş üzerine ZnS ince filmi doğrudan büyütmüş ve sandviç yapısının oda sıcaklığında akım–gerilim (*I–V*) eğrilerinden doğrultucu kontak davranışı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. *I–V* karakteristiklerinden idealite faktörü ve engel yüksekliği değerlerini sırasıyla 1.894 ile 0.632 eV olarak bulmuşlardır.

Turgut ve ark. (2013) Al/ZnS/p–Si/Al heteroeklem diyotunun elektriksel özelliklerini ve aygıt performansını araştırmışlardır. Elektriksel analizler sonucu Al/ZnS/p–Si/Al heteroeklem diyotunun doğrultucu kontak özelliğini gösterdiğini bulmuşlardır. İdealite faktörü, engel yüksekliği ve seri direnç değerlerini sırasıyla 2.34, 0.77 eV ve 12.3–12.5 kΩ olarak hesaplamışlardır.

Tüm bu çalışmalar arayüzeylerin sarp ve tepkisiz gibi görünse de CdS ve ZnS tabakalarının heteroeklem yapılarda çok önemli modifikasyonlara sebep olduğunu göstermiştir.

Birçok araştırmacı tarafından farklı maddelerle yapılan çalışmalarda benzer sonuçlar bulunmuştur. Engel yükseklikleri arasındaki farklılıklar üretim koşullarının farklı olmasına, oluşturulan ara yüzeylerin kalınlıklarının farklı olmasına ve ara yüzeyin homojen olmamasına atfedilebilir (Aydın ve ark. 2007, Okur ve ark 2009).

Seri dirençler arasındaki farklılıklar, diyotlar oluşturulurken ara yüzeyde istenmediği halde oluşmuş olduğu düşünülen oksit tabakalara, ara yüzey durumlarının

etkisine ve yüzeylerin homojen olmamasına atfedilebilir. Bu durum seri direncin var oluşuna, arayüzey durumlarının etkisine ve arayüzey tabakası boyunca gerilimin azalmasına atfedilebilir (Kılıçoğlu 2008).

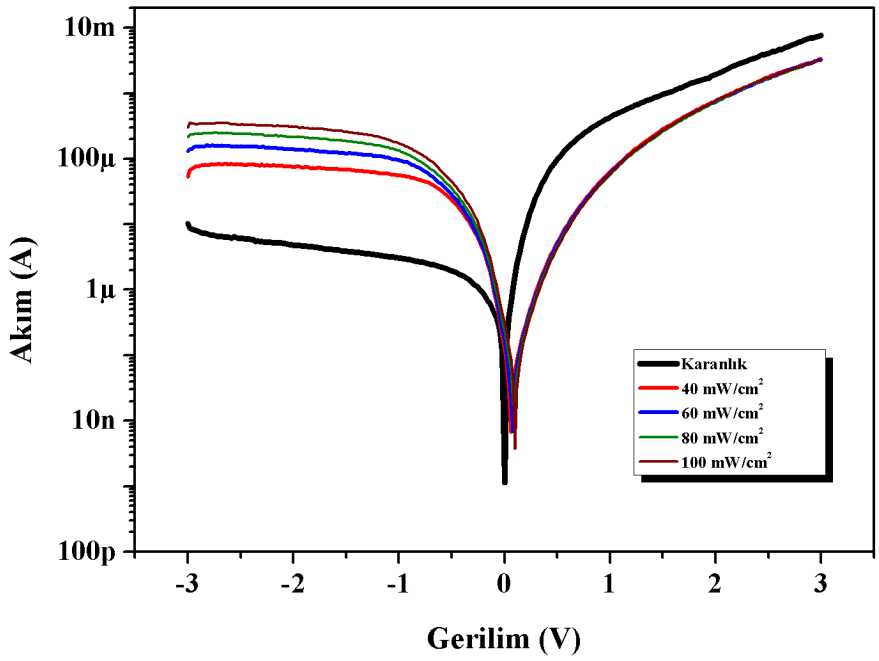
4.4. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Fotoelektriksel Özelliklerinin İncelenmesi

40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıkta elde edilen Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarının fotoelektriksel karakterizasyonunun gerçekleştirilebilmesi için yapıların tamamının *I–V* ölçümleri AM1.5 global filtreye sahip Newport Oriel 9600 model güneş simülatörü altında 40, 60, 80 ve 100 mW/cm^2 şiddetindeki ışıklar kullanılarak gerçekleştirildi. Yapıların akım–gerilim (*I–V*) grafiklerinden, her iki diyot yapılarının da ışığa karşı tepki verdiği belirlendi. Fakat diyotların ışığa karşı olan hassasiyetleri, grafiklerden de görüleceği gibi diyottan diyota farklılık göstermektedir.

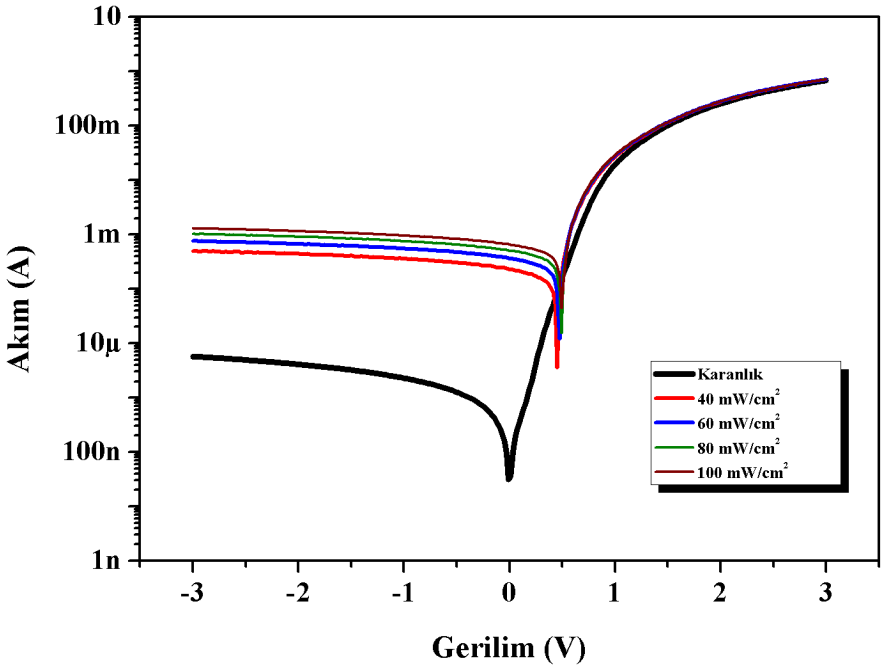
Elde edilen tüm diyot yapılarının ışığa karşı duyarlılıkları; ±3 V 'ta her bir ışık şiddeti altındaki akım değerlerinin, karanlık ortamdaki akım değerine oranlanarak ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}$) elde edildi ve Çizelge 4.5. ile Çizelge 4.6.'da verildi. Çizelgelerden de görüldüğü gibi; ışığın şiddeti arttırıldığında, her iki diyot için de ters beslem bölgesindeki her bir ters beslem akımının arttığı görülmektedir. Diyotlar, güneş pillerinden ziyade fotodiyot özelliği gösterdiğinden, ters beslemde belirgin bir akım artışı olup, düz beslemde ise akımda belirgin bir değişiklik olmamaktadır. Bu sonuçlar bize, elde edilen tüm diyot yapılarının optoelektronik uygulamalarda yer alabileceğini ve ışık sensörü olarak kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca 40 ve 100 mW/cm^2 ışık şiddetleri için Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait hesaplanan kısa devre akımı (I_{sc}) ve açık devre gerilimi (V_{oc}) değerleri de Çizelge 4.6. ile Çizelge 4.7.'de gösterildi.

4.4.1. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Fotoelektriksel Özellikleri

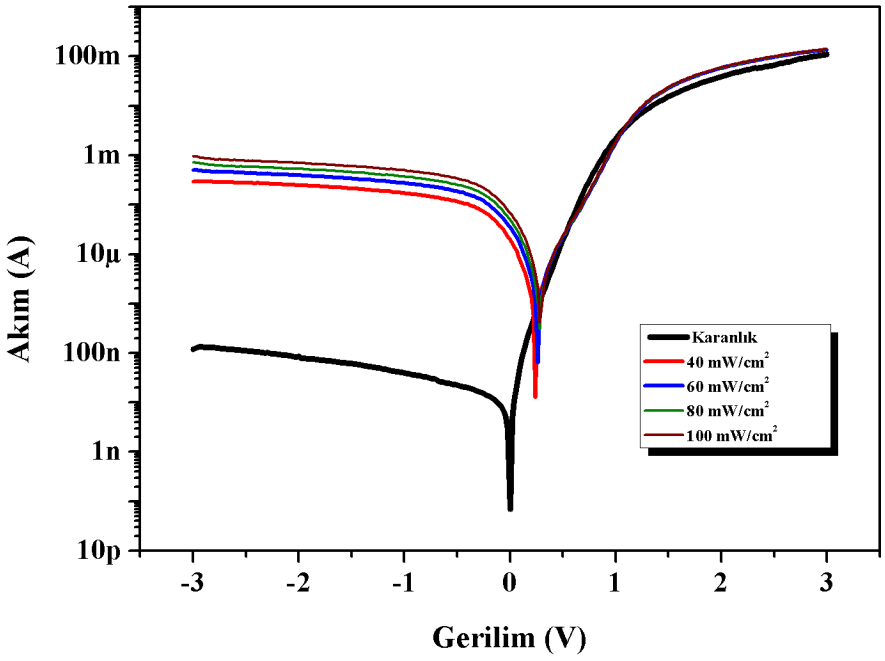
40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al yapılarına ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta yapılan ölçümlerle elde edilen *I–V* grafikleri Şekil 4.11., Şekil 4.12. ve Şekil 4.13.'te görülmektedir. Bütün grafiklerden de anlaşıldığı gibi ters beslemde düz besleme göre ışığa karşı daha yüksek duyarlılık ile karşılaşıldı.



Şekil 4.11. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri



Şekil 4.12. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri



Şekil 4.13. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri

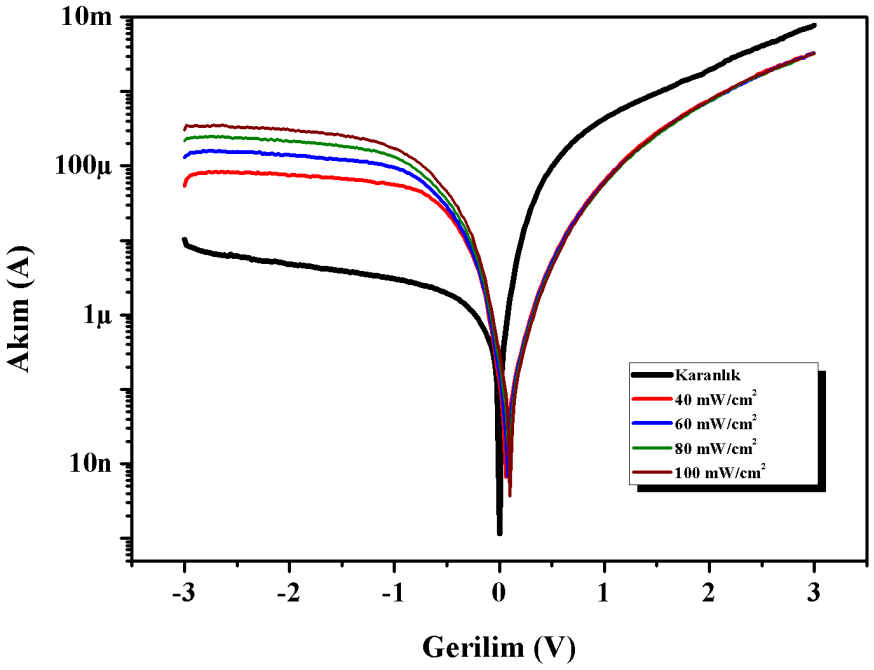
Çizelge 4.5. Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarının fotovoltaik ölçümlerinden hesaplanan parametreler

Ag/CdS/p–Si/Al						
Alttaş sıcaklığı	**Işık Şiddeti**					
	40 mW/cm²			**100 mW/cm²**		
	Duyarlılık	**I_{sc} (µA)**	**V_{oc} (mV)**	**Duyarlılık**	**I_{sc} (µA)**	**V_{oc} (mV)**
40 ºC	3.484	8.7	300.8	4.037	10.4	320.8
150 ºC	87.742	226.3	452.3	228.232	651	492
275 ºC	2497.174	19.7	240.8	8200.945	68.8	280.9

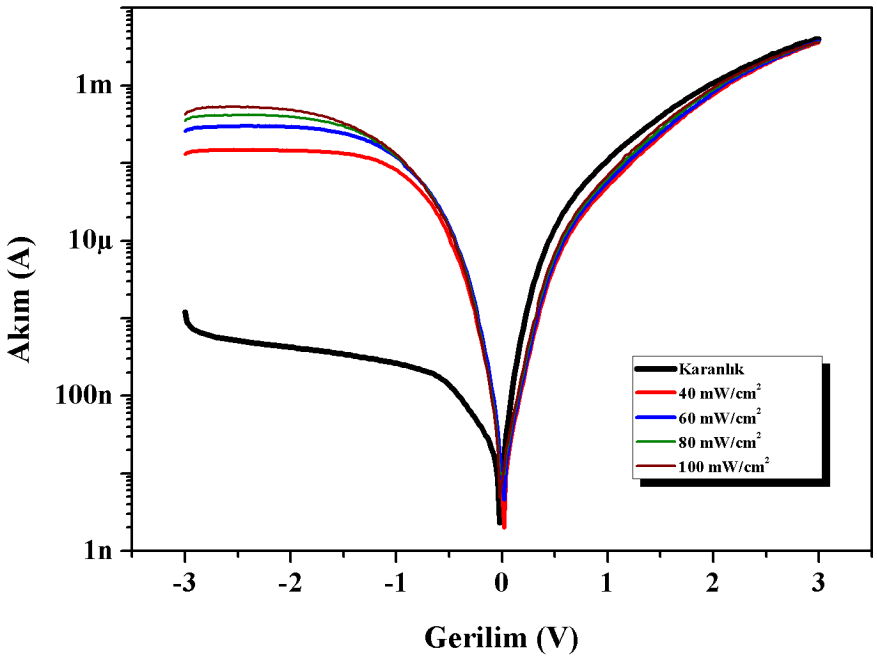
Fotovoltaik ölçümlerden çıkan bu sonuçlar elde edilen diyotların, ters beslemde ışığa karşı duyarlı olmasından dolayı fotodiyot aygıtı olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.4.2. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Fotoelektriksel Özellikleri

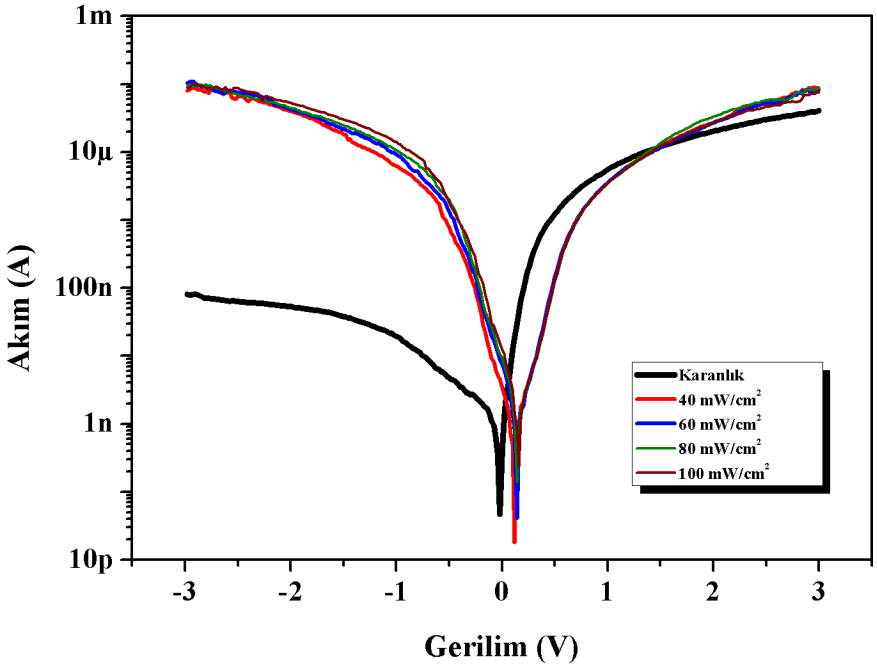
40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al yapılarına ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta *I–V* grafikleri Şekil 4.14., Şekil 4.15. ve Şekil 4.16.'da görülmektedir. Elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında *I*'nın *V*'ye karşı değişiminden hesaplanan parametreler Çizelge 4.6.'da gösterilmektedir.



Şekil 4.14. 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri



Şekil 4.15. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* eğrileri



Şekil 4.16. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait güneş simülatörü altında ve karanlıkta elde edilen *I–V* grafiği eğrileri

Çizelge 4.6. Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarının fotovoltaik ölçümlerinden hesaplanan parametreler

Ag/ZnS/p–Si/Al						
Alttaş sıcaklığı	**Işık Şiddeti**					
	40 mW/cm^2			**100 mW/cm^2**		
	Duyarlılık	**I_{sc} (µA)**	**V_{oc} (mV)**	**Duyarlılık**	**I_{sc} (µA)**	**V_{oc} (mV)**
40 ºC	5.222	0.122	60.8	29.342	0.306	101.1
150 ºC	107.221	0.006	21	351.296	0.004	0.1
275 ºC	616.702	0.002	91.5	885.538	0.017	151.5

Akkılıç ve Yakuphanoğlu (2008) Ag/Chitosan/n–Si diyotunun idealite faktörü ve engel yüksekliğini sırasıyla 1.91 ve 0.88 eV olarak hesapladıktan sonra bu diyotun fotoelektriksel özelliklerini 3500 lux ışık altında incelemişler ve bu diyotun açık devre potansiyelini 0.23 V ve açık devre akımın yoğunluğunu 0.1 mA/cm^2 olarak bulmuşlardır.

Farag ve ark. (2009) Al/n–CdS Schottky yapısı üzerine farklı aydınlatma şiddetlerinin etkisine bakmışlardır. Ters beslemde düz besleme göre ışığa karşı yüksek duyarlılık gözlemlemişlerdir. Ayrıca, açık devre gerilimi ve kısa devre akımı gibi fotovoltaik parametreler elde etmişlerdir. Fotovoltaik ölçümlerden yararlanarak Al/n–CdS diyotunun, ışığa karşı duyarlı olmasından dolayı bir fotodiyot aygıtı olarak kullanılabileceğini rapor etmişlerdir.

Huang ve ark. (2011) n–ZnS/p–Si heteroeklem diyotunu RF magnetron saçtırma yöntemi kullanarak imal etmişlerdir. UV ve görünür ışık bölgesinde heteroeklemin ışığa duyarlılığını inceleyip, her iki bölgede de ışığa karşı duyarlılık gösterdiğini belirlemişlerdir.

Yu ve ark. (2014) bir pn eklem fotoanodu olarak ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ heteroyapısının görünür ışık bölgesinde ZnO/ZnS/CdS ve ZnO/ZnS filmlerinden çok daha yüksek fotoelektrokatalitik faaliyet gösterdiğini bulmuşlardır. ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ heteroyapıların içinde bulunan CdS ve ZnS filmlerinin önemli

davranışlarını araştırmışlardır. ZnS'nin oksit ve $CuInS_2$ arayüzeyinde ışıkla etkilenen yük taşıyıcıların tekrar birleşimini engelediğini açıklamışlardır. CdS'nin ise görünür ışık bölgesinde soğurmayı arttırdığını, yük taşıyıcıların iletimini tetiklediğini ve elektron ile boşluk birleşimini geciktirerek ZnO/ZnS/CdS/$CuInS_2$ heteroyapıların fotoelektrokimyasal performansının arttığını gözlemişlerdir.

Üretilen tüm diyotların fotovoltaik ölçümlerden çıkan bu sonuçlar, diyotların ters beslemde ışığa karşı duyarlı olmasından dolayı fotodiyot olarak kullanılabileceğini göstermektedir.

4.5. Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapılarının Kapasite–Gerilim Ölçümlerinin İncelenmesi

Schottky engel diyotlarının kapsitesi idealde frekanstan bağımsızdır. Metal ve yarıiletken arasında bir oksit tabakasının oluşması, arayüzey durumlarının oluşması ve seri direnç etkisinin tayin edilmesi durumlarında diyot ideallikten sapar. Diyota bir *V* gerilimi uygulandığında, bu gerilim oksit tabakası, yarıiletken uzay yükü bölgesi ve seri direnç arasında paylaşılır.

Bir Schottky diyotun uzay yükü bölgesine ait kapasitesi, metal–yarıiletken arayüzeyin oluşumu hakkında önemli bilgiler verir. Kapasitenin ters beslem gerilimine bağlı olarak ölçülmesi durumunda, doğrultucu kontağa ait engel yüksekliği, yarıiletkendeki taşıyıcı konsantrasyonu, difüzyon potansiyeli ve Fermi enerji seviyesi hesaplanabilir (Wilmsen 1985).

Kapasite–gerilim (*C–V*) karakteristiği Schottky diyotların en önemli özelliklerinden biridir. Schottky diyotların *C–V* karakteristiği ara yüzey durumlarından fazlasıyla etkilenmektedir ve arayüzey durumlarının devre elamanlarının elektriksel özellikleri üzerine etkisi söz konusudur.

Diyotların karakteristik parametreleri ayrıca ters beslem $1/C^2–V$ eğrilerinden de hesaplanabilir. Artan ters beslem gerilimi ile yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar geriye doğru çekilir ve tükenim bölgesinin genişliği $w+\Delta w$ kadar artar. Tükenim bölgesindeki yükte meydana gelen değişim, kapasitede bir değişime neden olur.

Doğrultucu kontaklarda arayüzey bölgesi kapasitesi

$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_d + V)}{e\varepsilon_s A^2 N_d} \tag{4.9}$$

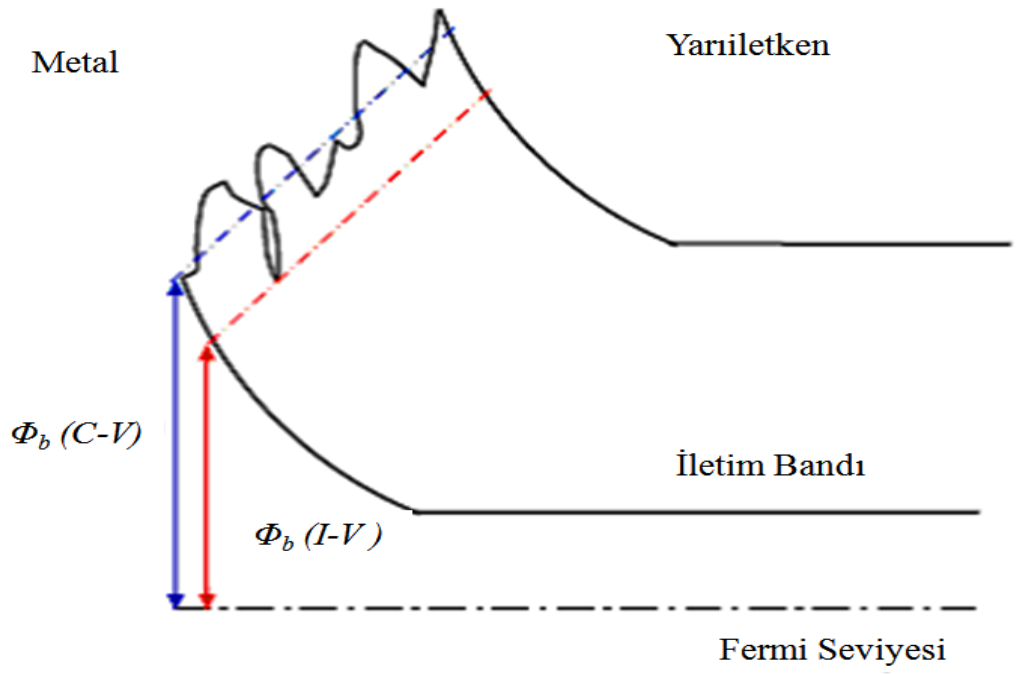
olarak verilir (Rhoderick ve Williams 1988). Burada A diyotun etkin alanı, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabiti, V_d ise $1/C^2$–V eğrisinin V eksenin kestiği yerden hesaplanan sıfır beslem difüzyon potansiyeli ve N_d ise iyonize olmuş diyotların konsantrasyonudur. Diyota ait engel yüksekliği denklem 4.10 ile hesaplanabilir.

$$\Phi_b(C-V) = V_d + E_f \tag{4.10}$$

Burada E_f değeri p–tipi yarıiletkenin nötral bölgesindeki iletim bandının en düşük değeri ile Fermi seviyesi arasındaki potansiyel farktır. E_f hesabı

$$E_f = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_d}\right) \tag{4.11}$$

ile yapılır. Burada N_c ifadesi termal dengede iletkenlik bandındaki hal (durum) yoğunluğudur.

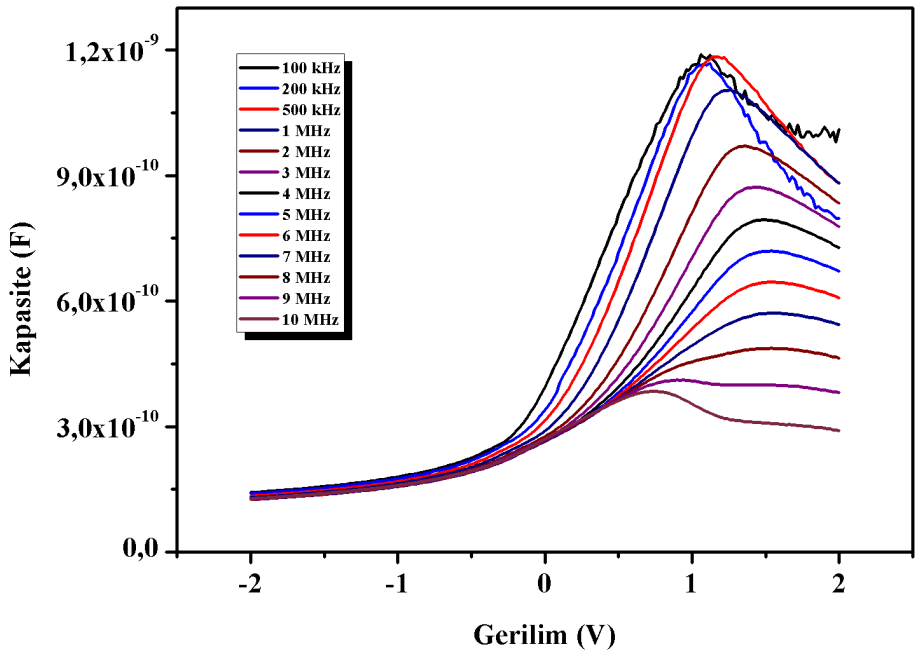


Şekil 4.17. MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma (Güllü ve ark. 2008)

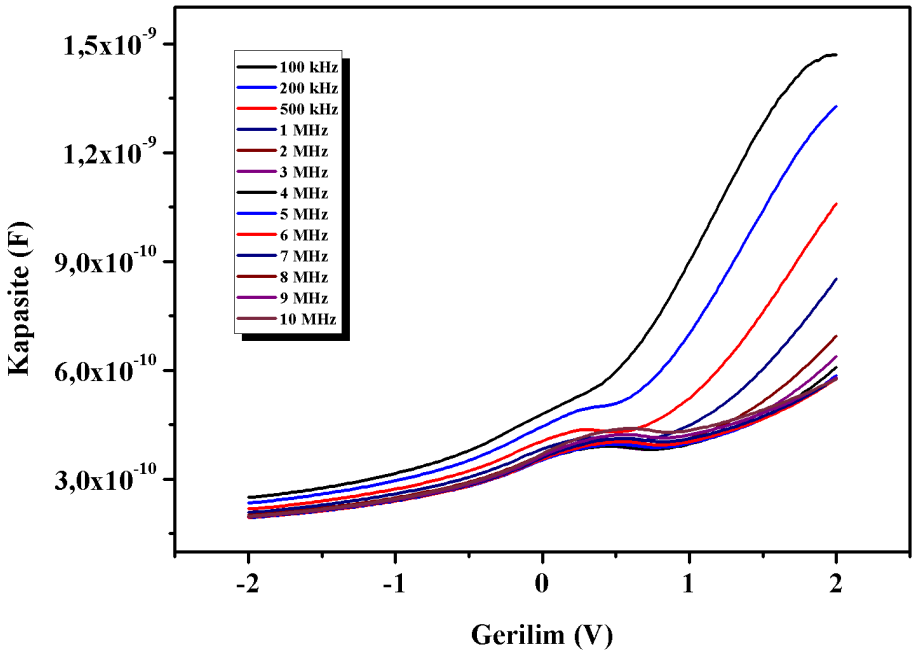
MS veya metal–yalıtkan–yarıiletken (MIS) için homojen olmayan engel yüksekliği modeline göre *I–V* ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği genellikle *C–V* ölçümlerinden bulunan engel yüksekliği değerinden daha küçüktür. *I–V* ve *C–V* ölçümlerinde kullanılan yöntemlerin farklılığından dolayı aynı sonuçlar elde edilemez. Kapasite (*C*) tükenim bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı hassas değildir ve hesaplanan engel yüksekliği engel yüksekliği dağılımının ortalama değeridir. Fakat ara yüzeyden geçen akım engel yüksekliğine üstel olarak bağlıdır ve ara yüzey dağılımına karşı hassastır (Güllü ve ark. 2010). Şekil 4.17. MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanmayı göstermektedir.

4.5.1. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Kapasite–Gerilim Ölçümleri

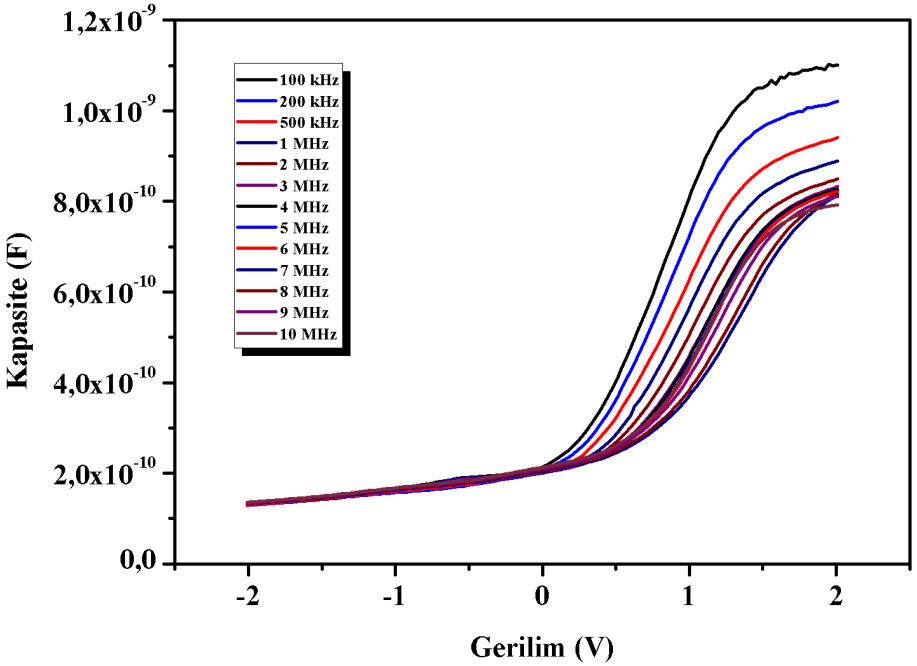
Şekil 4.18., Şekil 4.19. ve Şekil 4.20. Ag/CdS/p–Si diyotlarına ait 100, 200, 500 kHz, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 MHz frekanslarda –2 ile 2 volt arasında *C–V* grafiklerini göstermektedir. Ag/CdS/p–Si diyotlarının 100 kHz frekans altında $1/C^2$–*V* eğrileri Şekil 4.21., Şekil 4.22. ve Şekil 4.23.'te gösterilmektedir.



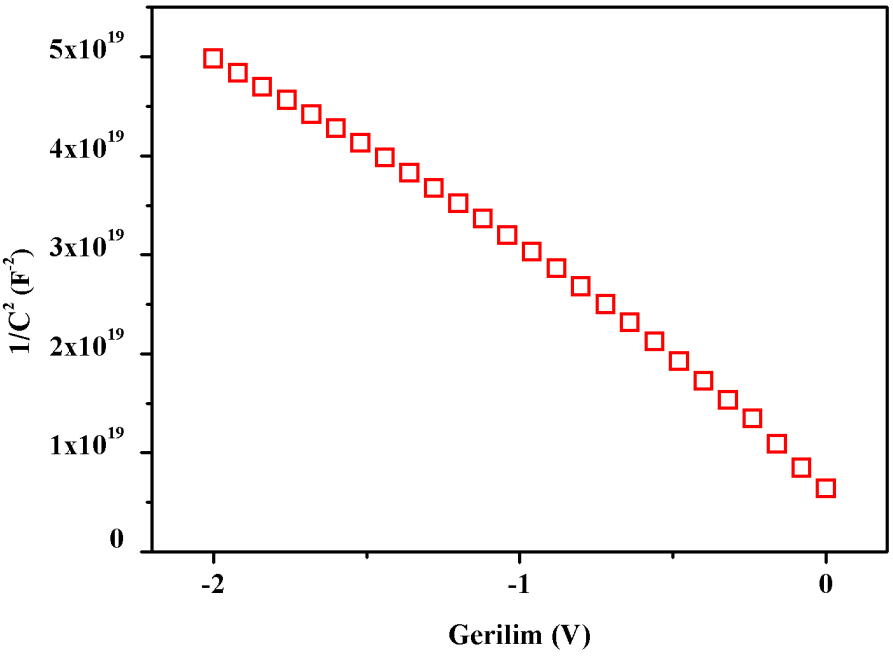
Şekil 4.18. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



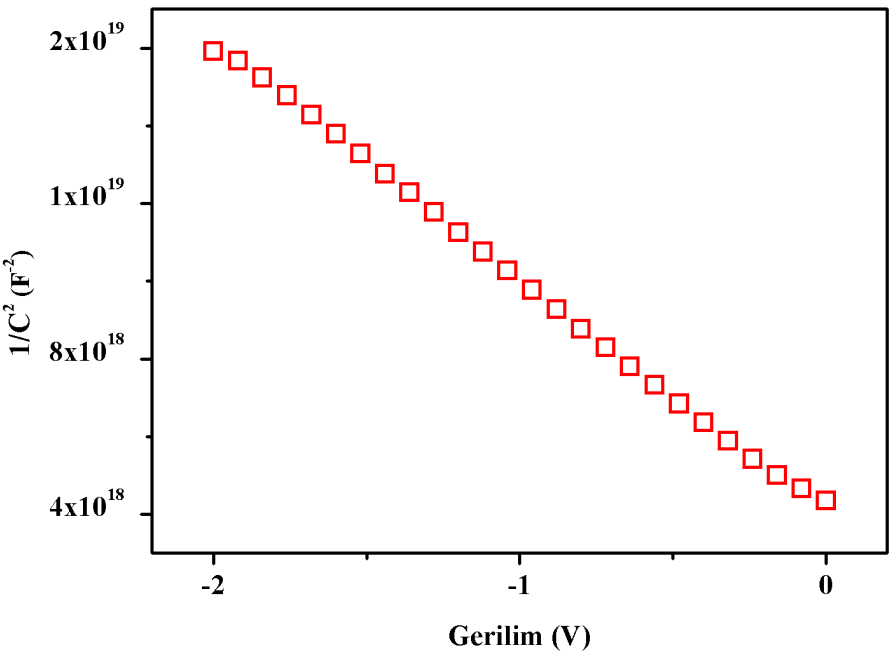
Şekil 4.19. 150 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



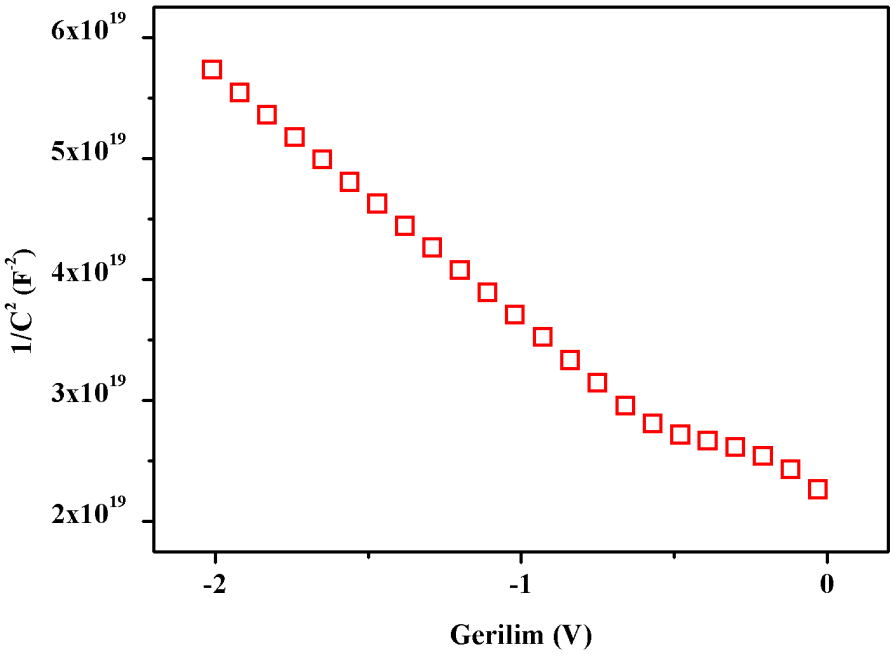
Şekil 4.20. 275 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



Şekil 4.21. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ –V grafiği



Şekil 4.22. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ –V grafiği

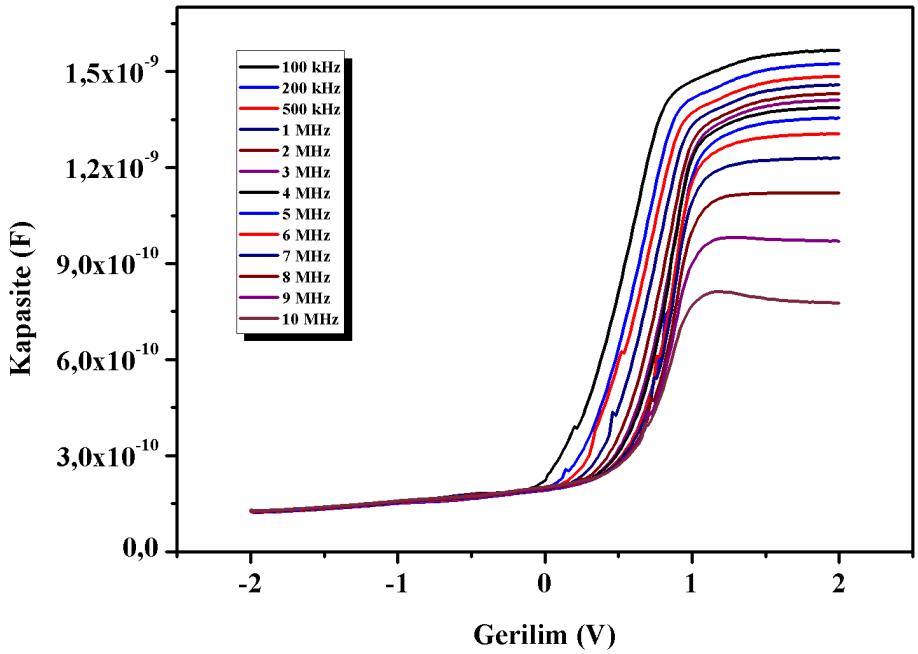


Şekil 4.23. 275 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ –V grafiği

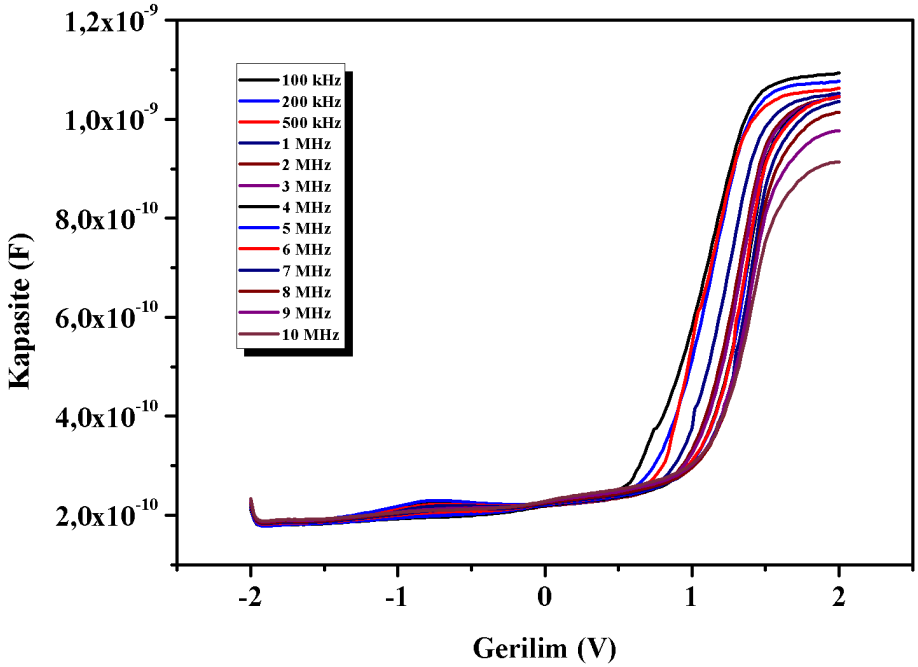
4.5.2. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Kapasite–Gerilim Ölçümleri

Şekil 4.24., Şekil 4.25. ve Şekil 4.26. Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait 100, 200, 500 kHz, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 MHz frekanslarda –2 ile 2 volt arasında C–V grafiklerini göstermektedir. Ag/ZnS/p–Si diyotlarının 10 MHz frekans altında $1/C^2$–V eğrileri Şekil 4.27., Şekil 4.28. ve Şekil 4.29'da gösterilmektedir.

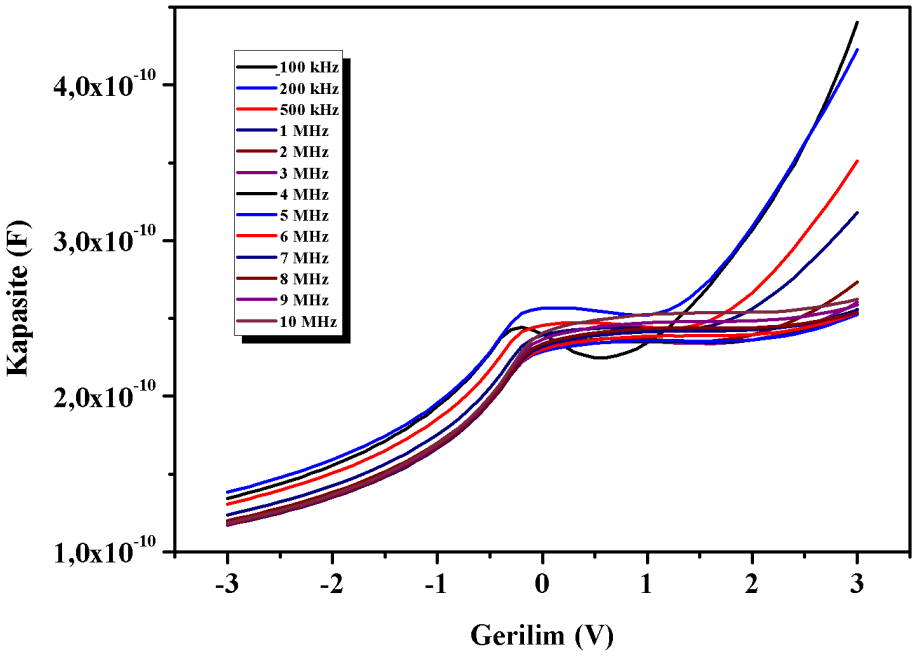
Grafiklerden de çok net bir şekilde anlaşılacağı gibi elde edilen Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotların ters beslemde kapasite değerleri daha küçük değerler olarak gözlenirken düz beslemde gerilim arttıkça kapasitenin arttığı gözlenmiştir. Tüm diyotlarda düşük frekanslarda kapasite değerleri frekans artarken artmaktadır. Bu durum düşük frekanslarda AC sinyalinin elektronlar tarafından takip edilebildiğini ortaya koymaktadır. Yeterince yüksek frekansta alınan kapasite–gerilim ölçümleri ara yüzeydeki yüklerin AC sinyallerini izleyemediğini göstermektedir.



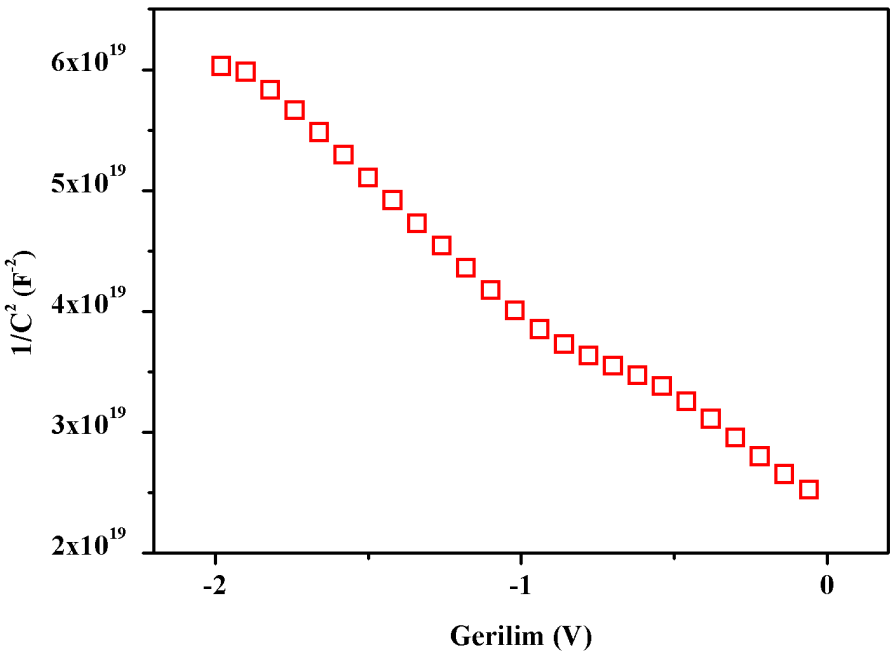
Şekil 4.24. 40 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



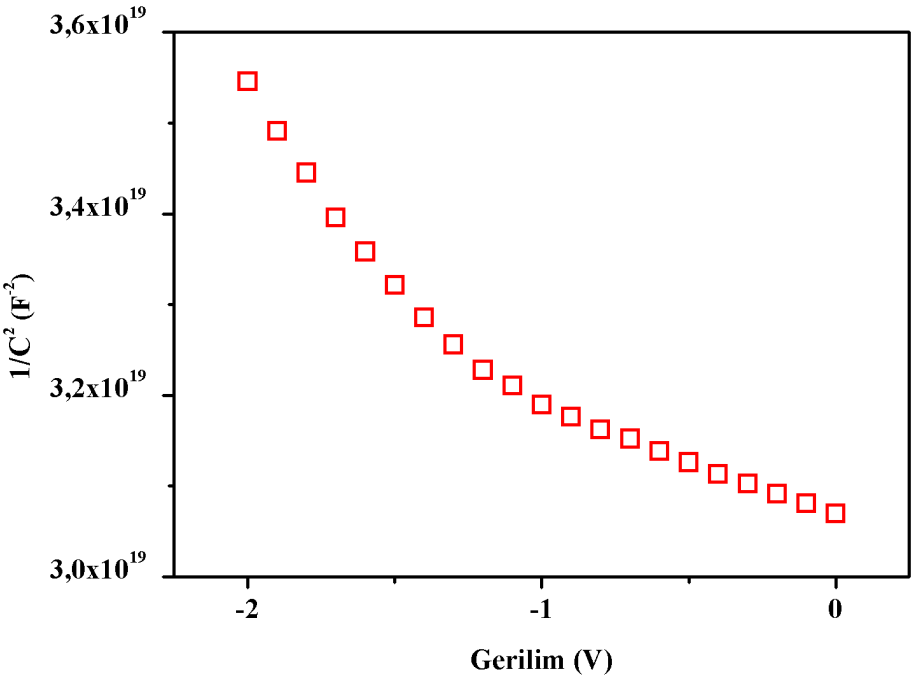
Şekil 4.25. 150 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



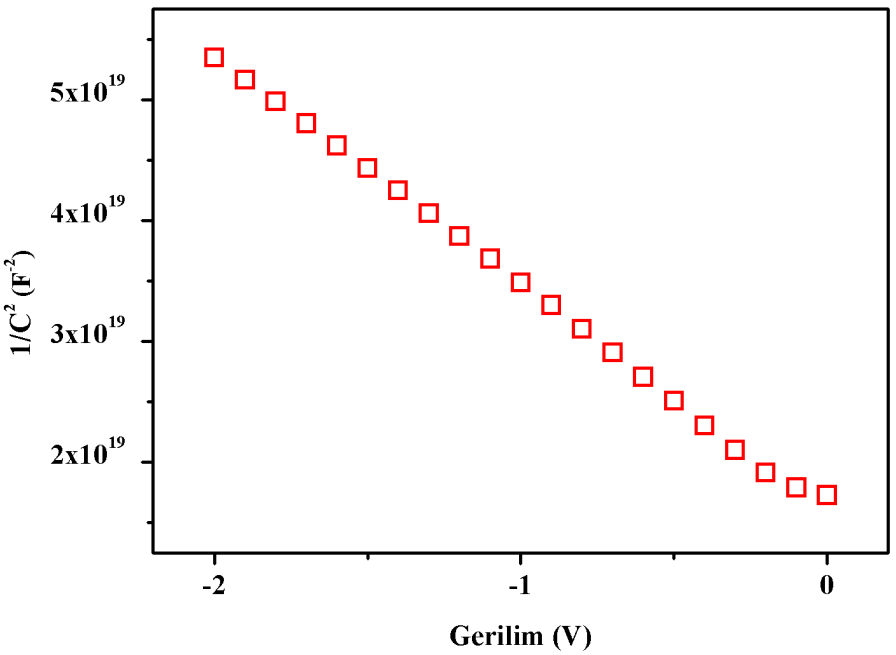
Şekil 4.26. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında *C–V* grafiği



Şekil 4.27. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ *–V* grafiği



Şekil 4.28. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ –V grafiği



Şekil 4.29. 275 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait oda sıcaklığında $1/C^2$ –V grafiği

Çizelge 4.7. Elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al ve Ag/CdS/p–Si/Al diyotlarına ait $1/C^2$–V grafiklerinden hesaplanan parametreler

	Ag/CdS/p–Si/Al				**Ag/ZnS/p–Si/Al**			
Alttaş sıcaklığı	V_d	Φ_{bc}	N_d	E_f	V_d	Φ_{bc}	N_d	E_f
40 ºC	0.489	0.723	1.854×10^{15}	0.234	0.684	0.922	1.633×10^{15}	0.238
150 ºC	0.61	0.813	6.128×10^{15}	0.203	1.266	1.483	3.727×1015	0.217
275 ºC	0.659	0.895	1.775×10^{15}	0.236	0.905	1.136	2.092×10^{15}	0.214

Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait Fermi enerji seviyesi değerleri ve (*C–V* ölçümlerinden bulunan) engel yüksekliği değerleri, Çizelge 4.7.'de verilmiştir. E_f değerleri; 0.203 ile 0.238 eV arasında almaktadır. Engel yüksekliği değerleri ise Ag/CdS/p–Si/Al için 0.723 ile 0.895 eV arasında; Ag/ZnS/p–Si/Al için ise 0.922 ile 1.483 eV arasında değişmektedir.

Çizelge 4.8. Elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ve *C–V* ölçümlerinden hesaplanan engel yükseklikleri

	Ag/CdS/p–Si/Al			**Ag/ZnS/p–Si/Al**		
Alttaş sıcaklığı	**40 ºC**	**150 ºC**	**275ºC**	**40 ºC**	**150 ºC**	**275 ºC**
Φ_b	0.714	0.760	0.778	0.694	0.743	0.797
Φ_{bc}	0.723	0.813	0.895	0.922	1.483	1.136

Çizelge 4.8. hem *I–V* hem de *C–V* ölçümlerinden hesaplanan engel yüksekliklerini göstermektedir. Çizelgede de görüldüğü gibi her bir diyot için $1/C^2$–V eğrisinden hesaplanan engel yüksekliği değeri, *I–V* eğrisiden elde edilen değerden daha büyüktür. *I–V* ve *C–V* ölçümlerinde kullanılan yöntemlerin farklılığından dolayı aynı sonuçlar elde edilemez. Aradaki bu fark $1/C^2$–V ölçümlerinden elde edilen sonucun *I–V* ölçümlerinden bulunan sonuçla uyumlu olduğunu gösterir.

C–V değişimlerinden bulunan engel yükseklikleri *I–V* grafiklerinden bulunan engel yükseklikleri ile karşılaştırıldığında engel yüksekliklerinin farklı değerlere sahip olduğu görülmektedir. Bu durum arayüzey tabakasının varlığı ve yarıiletkendeki tuzak seviyeleri ile açıklanabileceği gibi, engelin homojensizliğine de atfedilebilir (Rhoderick ve ark. 1988).

Bulduğumuz sonuçlar daha önce bazı araştırmacıların bulduğu sonuçlarla uyum içerisindedir. Benzer şekilde Werner ve ark. (1988) düşük frekanslarda kapasitenin büyük olmasını, arayüzey durumlarının metal ile dengelenmesinden çok yarıiletkendeki azınlık taşıyıcılarına bağlamışlardır. Omik kontak direncinin düşük olması ve arayüzey tabakasının olmaması durumunda da artık kapasite gözlemleyememişlerdir.

Aynı şekilde Batı ve ark. (2000) düşük frekanslarda arayüzey durumlarının AC sinyalini takip ettiğini ve artık kapasite verdiğini görmüşlerdir. Yüksek frekanslarda, arayüzey durumlarının AC sinyalini takip edemediklerinden dolayı etkilerinin azaldığını gözlemişlerdir. Dolayısıyla toplam kapasite frekansla azalmış ve arayüzey durumlarının AC sinyalini takip etmesinin seri direnç ile ters orantılı olduğunu görmüşlerdir. Akım yoğunluğu arttığında seri direnç etkisi daha artmakta ve buna bağlı olarak kapasitenin azalmakta olduğunu tespit etmişlerdir.

Sağlam ve ark. (2008) Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının düz beslemdeki *I–V* ve ters beslemdeki $1/C^2–V$ eğrilerinden engel yüksekliği, idealite faktörü ve seri direnç gibi elektriksel parametrelerini hesaplamışlardır. $1/C^2–V$ karakteristiklerinden frekans arttıkça hesaplanan engel yüksekliklerini de 0.698 – 0.743 eV arasında azalan değerler bulmuşlardır. Bu durumu seri direnç etkisine ve arayüzey durumlarına bağlamışlardır.

Ateş ve ark. (2011) Zn/ZnS/n–Si/Au–Sb sandviç yapısını elde etmek için ZnS ince filmi SILAR yöntemini kullanarak n–Si alttaş üzerine büyütmüşlerdir. *C–V* ölçümlerinden yapının taşıyıcı madde konsantrasyonu, Fermi enerjisi ve engel yüksekliği değerlerini tavlama sıcaklığının bir fonksiyonu olarak hesaplamışlardır.

Güzeldir ve Sağlam (2015) Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının sıcaklığa bağlı kapasite–gerilim (*C–V*) ve iletkenlik–gerilim (*G/w–V*) ölçümleri ile incelemişlerdir. *C–V* ve *G/w–V* verilerinden seri direnç (R_s) ve arayüzey durum yoğunluğu dağılımını (N_{ss}) belirlemişlerdir. Sıcaklığa bağlı R_s değişimini serbest yük taşıyıcılarının eksikliği

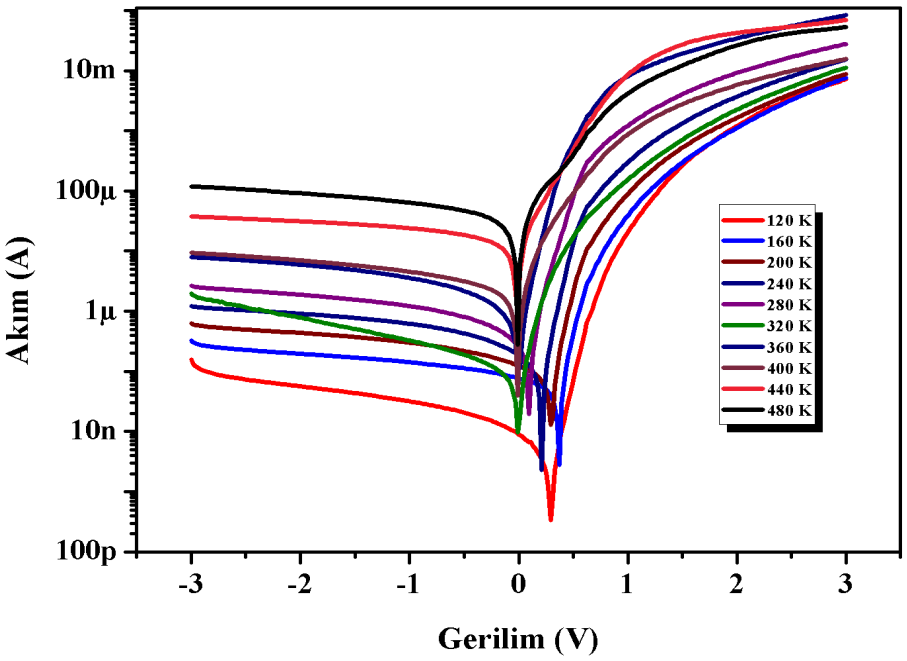
ile açıklamışlardır. Ayrıca, 500 kHz frekansta sıcaklık bağlı $1/C^2$–V ölçümlerinden engel yüksekliği ve taşıyıcı konsantrasyonununu hesaplamışlardır.

Uygulanan frekans değerinin 1000 kHz'den büyük olduğu durumlarda, arayüzey durumları AC sinyalini izleyemediğinden dolayı, arayüzey durumları eklem kapasitesine herhangi bir katkıda bulunmaz (Singh 1985, Chattopadyay ve RayChaudhuri 1993). Bu yüzden yüksek frekanslarda eklem kapasitesi, uzay yükü kapasitesine eşit olur. Yüksek frekanslarda, arayüzey durumları AC sinyalini takip edemediklerinden etkileri azalmaktadır. Seri direnç etkisi artan frekans ile daha belirgin bir şekilde kendisini hissettirmektedir. Düşük frekanslardaki artık kapasitenin varlığı diyotun arayüzey durumlarına ve omik kontak direncinin yüksek olmasına, düşük frekanslarda AC sinyalinin takip edilebilmesine atfedildi.

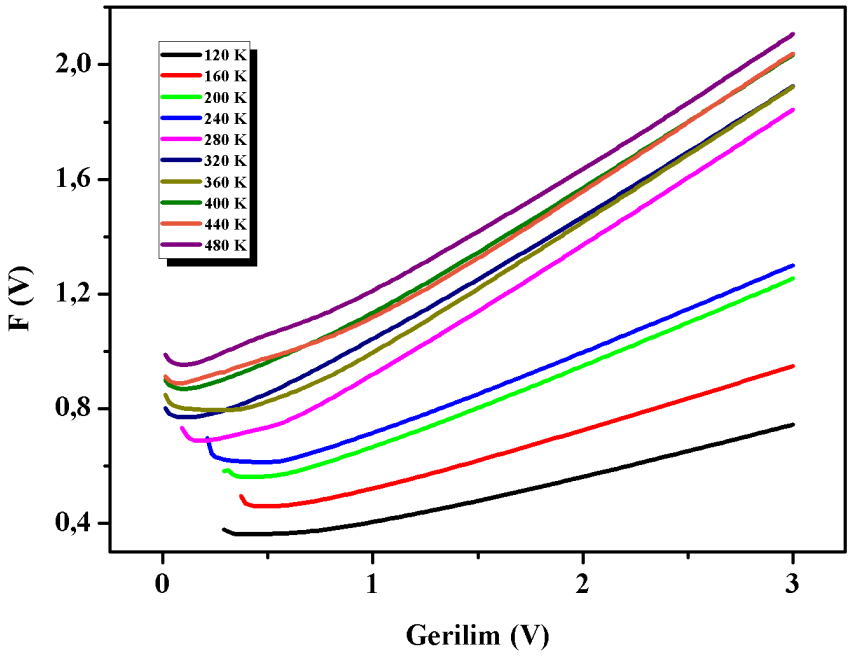
4.6. Ag/CdS/p–Si Heteroeklem Yapısının Sıcaklığa Bağlı Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi

150 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı Akım–gerilim (I–V) ölçümleri KEITHLEY 2400 Source Meter akım–gerilim cihazında bilgisayar kontrollü olarak ±3 Volt aralığında, 120 K'den 480 K'ne 40 K'lik adımlarla alındı. Ayrıca numunelerin akım–gerilim (I–V) ölçümleri; kriyostat içinde yaklaşık 10^{-3} Torr basınç altında, bakır tutucuda konumlandırılmış bir şekilde ve bilgisayar kontrollü olarak, dijital sıcaklık kontrol sistemi kullanılarak ters ve doğru beslem gerilimlerde gerçekleştirildi.

150 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak akım–gerilim (I–V) grafiği Şekil 4.30.'da ve sıcaklığa bağlı $F(V)$ –V grafiği Şekil 4.31.'de verilmiştir. Sıcaklığa bağlı olarak akım–gerilim (I–V) grafiklerden elde edilen doğrultma oranı, idealite faktörleri (n) ve engel yükseklikleri (Φ_b) değerleri Çizelge 4.9.'da görülmektedir.



Şekil 4.30. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı *I –V* grafiği



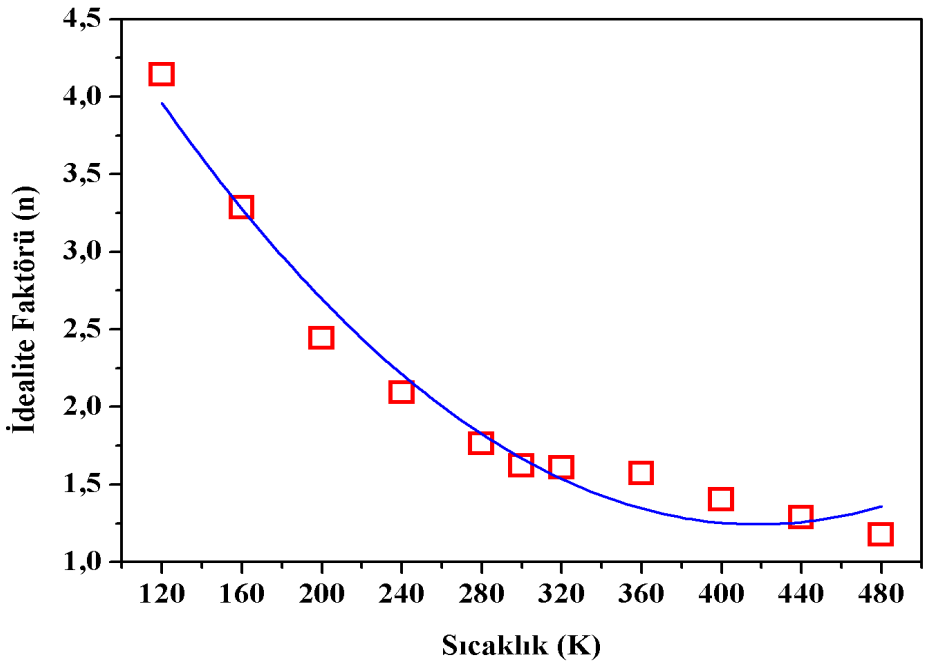
Şekil 4.31. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı *F(V)–V* grafiği

Çizelge 4.9'dan da görüldüğü üzere Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı *I–V* grafiğinden elde edilen engel yükseklikleri 0.366 eV ile 0.973 eV ve idealite faktörleri ise 4.140 ile 1.175 arasında değerler almaktadır.

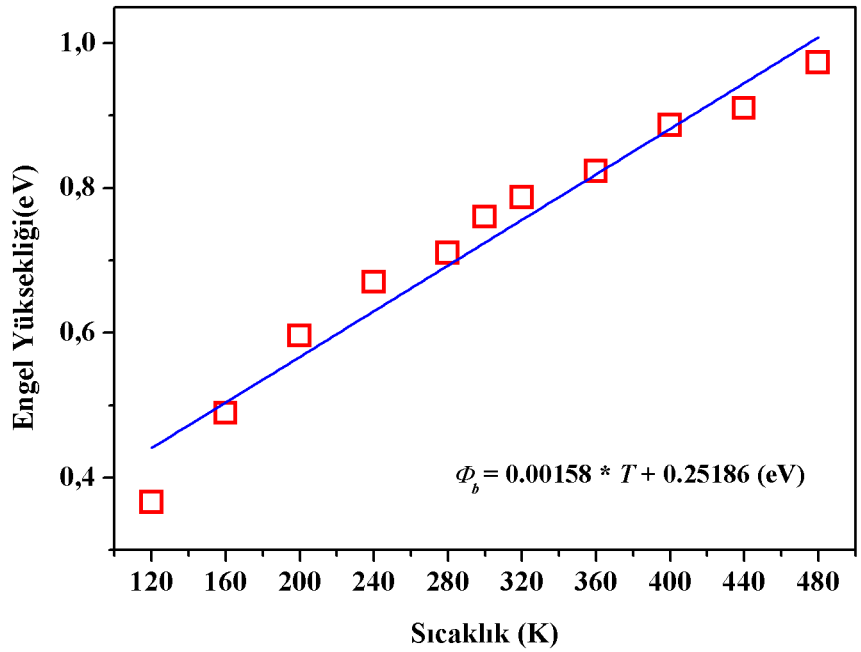
Ayrıca sıcaklığa bağlı *F(V)–V* eğrilerinden yararlanılarak Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) parametreleri Çizelge 4.9.'daki belirlenebilir. Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı *F(V) –V* eğrilerinden bulunan engel yükseklikleri 0.369 eV ile 0.967 eV ve seri direnç değerleri ise 2.6×10^6 ile 580.8 Ω arasında değerler almaktadır.

Çizelge 4.9. 150 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotuna ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan sıcaklığa bağlı diyot parametreleri

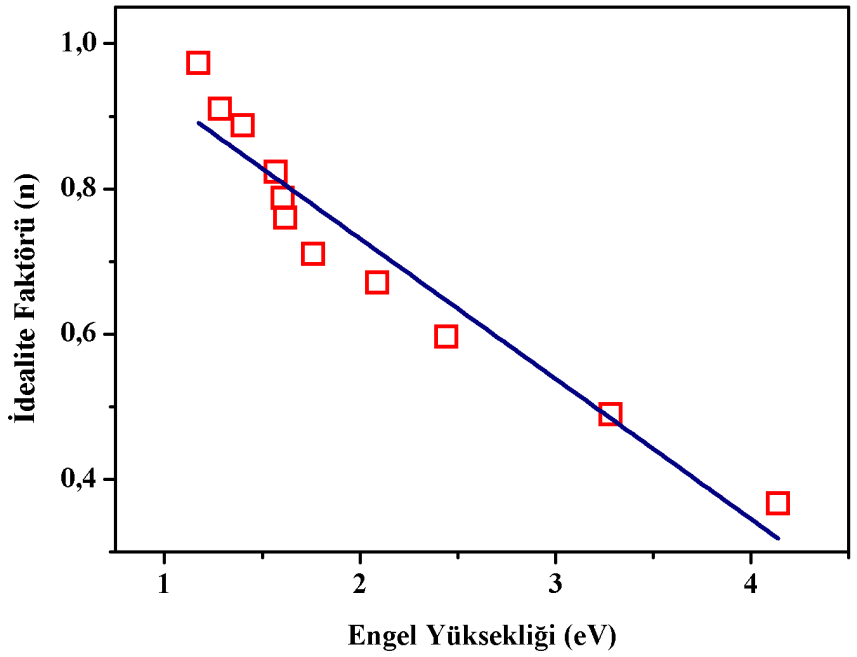
Ag/CdS/p–Si/Al					
Sıcaklık (K)	***I–V***			***F(V)–V***	
	Doğrultma Oranı	***n***	**Φ_b (eV)**	**R_s (Ω)**	**Φ_b (eV)**
120	45414.55	4.140	0.366	2.6×10^6	0.369
160	23192.26	3.285	0.489	1.7×10^5	0.465
200	13959.58	2.442	0.596	1.6×10^5	0.596
240	12524.64	2.092	0.670	4.4×10^5	0.699
280	10535.58	1.763	0.710	9×10^3	0.749
320	5634.67	1.608	0.787	4.9×10^4	0.788
360	10566.23	1.571	0.823	4.9×10^3	0.825
400	1659.54	1.401	0.887	5.6×10^3	0.880
440	1832.50	1.287	0.910	953.27	0.909
480	451.19	1.175	0.973	598.80	0.967



Şekil 4.32. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.33. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.34. 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi

150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.32., sıcaklığa bağlı olarak elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.33. ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi Şekil 4.34.'te verildi.

Şekil 4.32.'deki değişimde idealite faktörü artan sıcaklıkla azalmakta iken, Şekil 4.33.'te ise; *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri de artan sıcaklıkla artmaktadır. Şekil 4.34.'te görüldüğü gibi artan sıcaklıkla idealite faktörü değerleri azalırken engel yüksekliği değerleri artmıştır.

4.7. Ag/ZnS/p–Si Heteroeklem Yapısının Sıcaklığa Bağlı Akım–Gerilim Özelliklerinin İncelenmesi

40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı Akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri KEITHLEY 2400 Source Meter akım–gerilim cihazında bilgisayar kontrollü olarak ±3 Volt aralığında, 120 K'den 480 K'ne 40 K'lik adımlarla

alındı. Ayrıca numunelerin akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri; kriyostat içinde yaklaşık 10^{-3} Torr basınç altında, bakır tutucuda konumlandırılmış halde ve bilgisayar kontrollü olarak, dijital sıcaklık kontrol sistemi kullanılarak ters ve doğru beslem gerilimlerinde gerçekleştirildi.

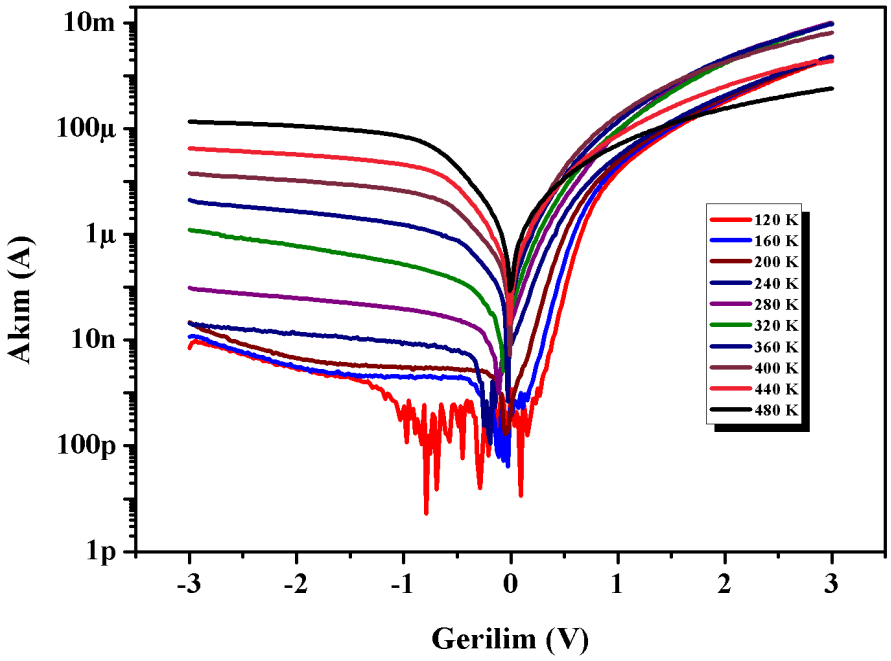
40 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak akım gerilim (*I–V*) grafiği Şekil 4.35.'de ve sıcaklığa bağlı *F(V)–V* grafiği Şekil 4.36.'da verilmektedir. Sıcaklığa bağlı olarak akım gerilim (*I–V*) grafiğinden doğrultma oranları, idealite faktörleri ve engel yükseklikleri bulundu. Bu grafiklerden elde edilen doğrultma oranı, idealite faktörleri (*n*) ve engel yükseklikleri (Φ_b) değerleri Çizelge 4.10.'da görülmektedir. Çizelge 4.10'da da görüldüğü üzere Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı *I–V* grafiğinden elde edilen engel yükseklikleri 0.360 eV ile 1.129 eV ve idealite faktörleri ise 5.110 ile 1.336 arasında değerler almaktadır.

Ayrıca sıcaklığa bağlı *F(V)–V* eğrilerinden yararlanılarak Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliği (Φ_b) ve seri direnç (R_s) parametreleri Çizelge 4.10.'daki gibi belirlenebilir. Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı *F(V)–V* eğrilerinden bulunan engel yükseklikleri 0.426 eV ile 1.123 eV ve seri direnç değerleri ise 4.37×10^{4} ile 2.52×10^{4} Ω arasında değerler almaktadır.

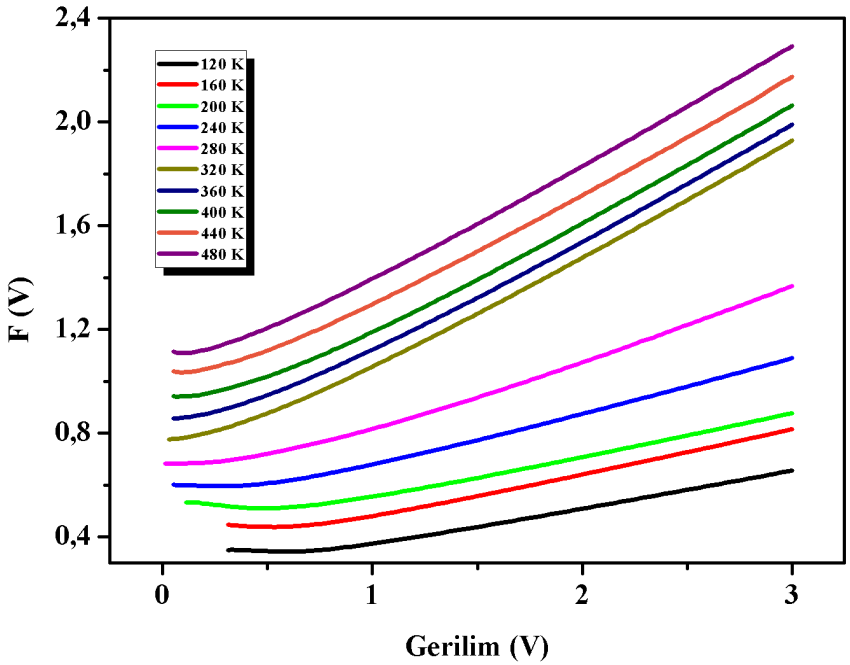
Şekil 4.35.'den de görüldüğü gibi, oda sıcaklığından daha düşük sıcaklıklara doğru gidildikçe aynı akım değerine ulaşabilmek için gerekli olan uygulama gerilimi artmaktadır.

40 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi Şekil 4.37., sıcaklığa bağlı olarak elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.38. ve sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi Şekil 4.39.'da verilmiştir.

Şekil 4.37.'de idealite faktörü artan sıcaklıkla azalmakta iken Şekil 4.38.'de ise; *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliği değerlerinin de artan sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Şekil 4.39.'dan da görüldüğü gibi artan sıcaklıkla idealite faktörü değerleri azalırken engel yüksekliği değerleri artmıştır.



Şekil 4.35. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı *I –V* grafiği



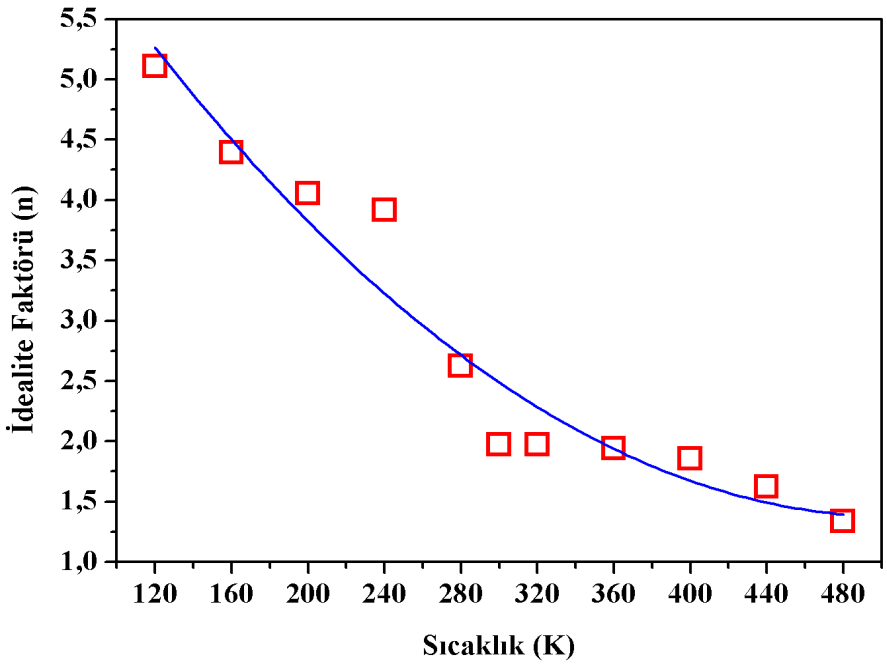
Şekil 4.36. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait sıcaklığa bağlı *F(V)–V* grafiği

Çizelge 4.10. 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotuna ait *I–V* ölçümlerinden ve Norde yönteminden hesaplanan sıcaklığa bağlı diyot parametreleri

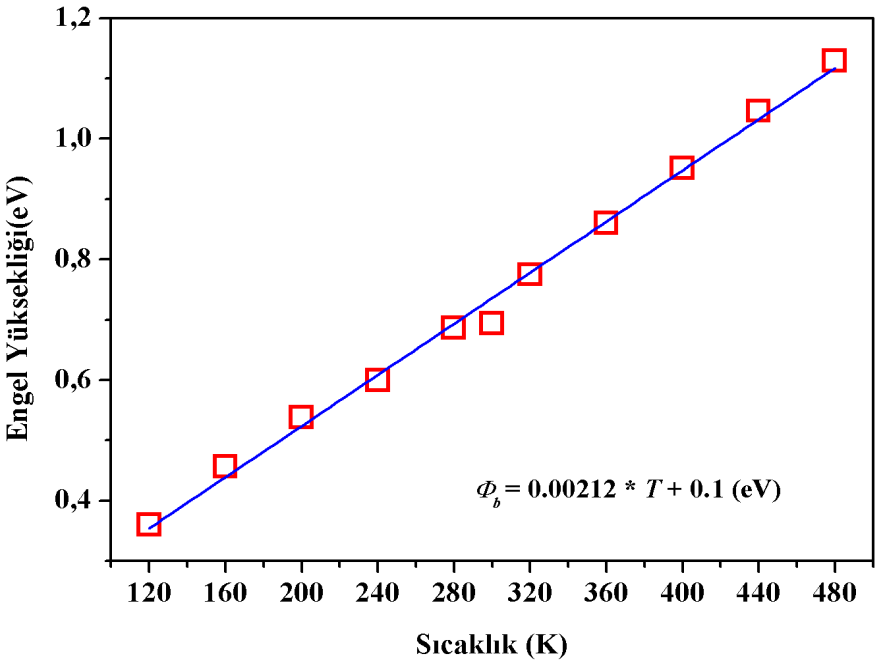
Ag/ZnS/p–Si/Al					
Sıcaklık (K)	***I–V***			***F(V)–V***	
	Doğrultma Oranı	***n***	**Φ_b (eV)**	**R_s (Ω)**	**Φ_b (eV)**
120	201675.81	5.110	0.360	4.37×10^4	0.426
160	201675.81	4.392	0.456	3.14×10^4	0.523
200	102895.25	4.055	0.538	5.01×10^4	0.577
240	113098.47	3.915	0.599	1.12×10^4	0.633
280	103901.38	2.623	0.686	1.19×10^5	0.690
320	8053.55	1.973	0.775	2.98×10^3	0.824
360	2156.18	1.940	0.860	4.9×10^3	0.885
400	458.53	1.858	0.951	1.09×10^4	0.953
440	44.69	1.622	1.046	7.28×10^4	1.042
480	4.27	1.336	1.129	2.52×10^4	1.123

Akımın, uygulanan ters beslem gerilimi ile yavaşça arttığı ve her bir sıcaklık için doyuma ulaşmadığı görüldü. Ters beslemede akımın doyuma ulaşmaması, genelde engel yüksekliğindeki imaj kuvvetinin düşüşü ve metal–yarıiletken arasında doğal ya da çökelmiş ara yüzey tabakasının oluşumu ile açıklanabilir (Sze 1985, Rhoderick ve Williams 1988).

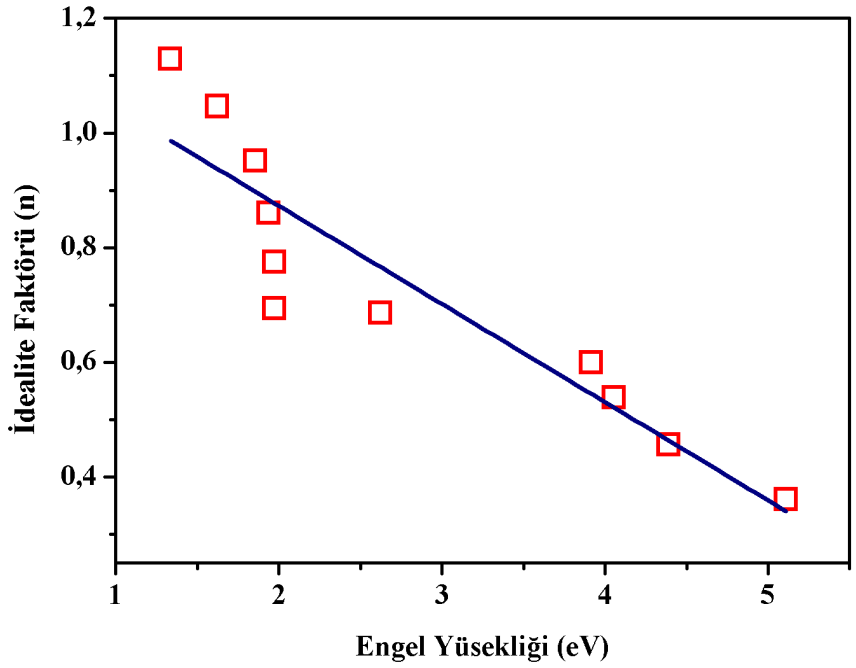
İdealite faktörü *n*, bazı diyotlarda sıcaklıktan bağımsız bir sabit iken, bazılarında ise sıcaklıkla değişir. Diyotlarda alan emisyonu, termoiyonik emisyonu veya arınma bölgesindeki taşıyıcı rekombinasyonundan dolayı termoiyonik emisyon akımlarının karşılaşmış olduğu durumlarda *n* doğal olarak sıcaklıkla değişir (Sharma 1984).



Şekil 4.37. 40 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun idealite faktörünün sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.38. 40 °C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun engel yüksekliğinin sıcaklıkla değişimi



Şekil 4.39. 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotunun sıcaklığa bağlı olarak elde edilen idealite faktörlerinin engel yüksekliğine karşı değişimi

Ölçüm sıcaklığının artması ile idealite faktörünün küçüldüğü ve engel yüksekliğinin arttığı anlaşılmaktadır. İdealite faktörünün ve engel yüksekliğinin bu davranışının termoiyonik akım mekanizmasındaki sapmalardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir (Mead ve Spitzer, 1964).

Metal–yarıiletken arayüzeyde akım iletimi sıcaklığa bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda elektronlar küçük engel yüksekliği ile karşılaştıklarından akım kolaylıkla sağlanır. Bu durum büyük idealite faktörüne ve düşük engel yüksekliğine neden olur. Sıcaklık arttığında daha fazla elektron daha yüksek engellerini aşmak için yeterli enerjiye sahip olur. Bunun sonucu olarak da engel yüksekliği sıcaklık ve doğru beslem gerilimi ile artarken idealite faktörü azalır (Sullivan ve ark. 1991, Tung 1991).

Bu durumdan da görüldüğü gibi; artan sıcaklıkla engel yüksekliği artarken, idealite faktörü azalmaktadır. Schottky diyotlarda engel yüksekliği ve idealite faktörü arasındaki bu lineer ilişki metal–yarıiletken arayüzeyindeki atomik inhomojen engelin bir fonksiyonu olarak açıklanabilir (Horvath 1988, Mönch 1999).

Engel homojensizliği uzay yükü bölgesinde oluşan tekrardan birleşim ve tekrardan oluşum akımları (Hernandez ve ark. 1988; Wittmer 1991), yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımları (Padovani ve Stratton 1966; Crowell ve Rideout 1969; Rhoderick ve Williams 1988), ara yüzey tabakasının kalınlık ve kompozisyonu (Rhoderick ve Williams 1988), görüntü yük etkisi (Crowell ve Sze 1966, Rideout ve Crowell 1970, Rhoderick ve Williams 1988) ve seri direnç (Khan ve ark. 1997) gibi çok çeşitli mekanizmaların etkisinden dolayı ortaya çıkabilir. Arayüzey hallerinin varlığı bu tür normal olmayan durumların en çok tekrar edilen açıklamasıdır (Tung 1991).

Ocak ve ark. (2010), Sn/MnHA/n–Si organik–inorganik heteroeklem diyotun elektriksel özelliklerini 300 K – 380 K sıcaklıklarında 10 K aralıklarla sıcaklığa bağlı olarak belirlemişlerdir. Ters beslemde sıcaklık arttıkça diyot akımının ciddi şekilde arttığını gözlemlemişlerdir. Sıcaklık arttıkça idealite faktörünün azaldığını engel yüksekliğinin ise arttığını tespit etmişlerdir.

Bacaksız ve ark. (2010) ZnO/SnO_2 yapısının 150 K ve 300 K sıcaklıkları arasında *I–V* ölçümlerini incelemişlerdir. Genellikle sıfır beslemde sıcaklığın artması ile engel yüksekliği (Φ_b) azalırken idealite faktörü *(n)* arttığını görmüşlerdir. İdealite faktörü değerlerini 5.10 ve 4.00 ve engel yüksekliğinin sıfır beslemde 150 K ve 300 K sıcaklıkları arasında 0.367 eV'den 0.613 eV'ye kadar değiştiğini gözlemlemişlerdir. Engel yüksekliğinin artmasının nedenini, arayüzeydeki azınlık yük taşıyıcılarının birikmesiyle oluşan tükenim bölgesinin genişliğinin artmasına atfetmişlerdir.

Güzeldir ve Sağlam (2015) Cd/CdS/n–Si/Au–Sb yapısının sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerini 80–300 K sıcaklık aralığında alınan akım–gerilim (*I–V*), kapasite gerilim (*C–V*) ve iletkenlik gerilim (*G/w–V*) ölçümleri ile incelemişlerdir. Sıcaklığa bağlı *I–V* karakteristiklerinden artan sıcaklıkla idealite faktörünün (*n*) azaldığını ve engel yüksekliğinin (Φ) arttığını belirlemişlerdir. Bu durumu metal–yarıiletken arayüzeyindeki baskın engel homojensizliğine ve engel yüksekliğinin Gauss dağılımı varsayımına atfetmişlerdir. Genel olarak bu davranışları arayüzey durumlarının ve seri direncin yeniden moleküler olarak yapılanmasına atfetmişlerdir.

Saf termoiyonik emisyon teorisine göre ideal durumun ($n = 1$) pratikte elde edilmesine literatürde hemen hemen hiç rastlanmamıştır. Çünkü engel yüksekliği,

uygulanan gerilime bağlıdır. Bunun sebebi, ideale en yakın olan Schottky yapılarda bile metal ile yarıiletken arasında bir doğal oksit tabakasının oluşmasıdır. Bu durum *I–V* ölçümlerini etkiler ve idealite faktörünün 1'den büyük olmasına neden olur.

Görüldüğü gibi değişik sıcaklıklarda *F*(*V*) eğrisinden elde edilen engel yüksekliği değerleri artan sıcaklıkla artmaktadır. Bunun yanı sıra sıcaklığın artması ile yarıiletkendeki serbest taşıyıcı yoğunluğu artacak ve buna bağlı olarak seri direnç değerleri de azalacaktır (Chand ve Kumar 1995).

I–V ve Norde metotlarından elde edilen engel yüksekliğinin sıcaklığa bağlı değişiminden de görüldüğü gibi her iki metotta da sıcaklık artışı ile engel yüksekliği artmakta ve hemen hemen aynı tarzda bir değişim gözlenmektedir.

Sonuçta idealite faktörü ve engel yüksekliği parametrelerinin sıcaklığa kuvvetle bağlı olduğu tespit edildi.

Şekil 4.33. ve Şekil 4.38.'de verilen grafikler, 150 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/CdS/p–Si/Al ve 40 ºC alttaş sıcaklığında elde edilen Ag/ZnS/p–Si/Al diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimini göstermektedir. Şekil 4.33. ve Şekil 4.38.'den de görüldüğü gibi engel yüksekliği ile sıcaklık arasında lineer bir ilişki vardır. Bu grafiklere fit edilerek, elde edilen fit denklemlerinden hareketle aşağıdaki denklemden faydalanarak, her iki diyot için taşıyıcı tünelleme faktörü hesaplandı.

$$e\Phi_b(T) = e\Phi_{b0}(T=0) + (a\chi^{1/2}\delta)kT \qquad (4.11)$$

4.11 eşitliğindeki $(a\chi^{1/2}\delta)$ ifadesi, taşıyıcı tünelleme faktörüdür. Burada $a = (2/\hbar)(2m^*)^{1/2}$ olup, elektronun etkin tünelleme kütlesine (*m**) ve Planck sabitine (*h*) bağlı bir sabittir. χ arayüzey tabakasının gösterdiği tünelleme engel yüksekliği ve δ ise arayüzey tabakasının kalınlığıdır. Ayrıca Φ_b (*T*) , deneysel sıfır beslem engel yüksekliği ve Φ_{b0} (*T = 0*) ise; *T=0* K'deki engel yüksekliğidir. (4.8) denklemi kullanılarak, Ag/CdS/p–Si/Al ve Ag/ZnS/p–Si/Al diyotları için taşıyıcı tünelleme faktörünün değeri sırasıyla 18.319 ve 24.58 olarak elde edildi.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

MS ve MIS yapılar ile ilgili inceleme ve araştırmalar son yıllarda yoğun ilgi görmektedir. Araştırmaların bir kısmı yeni yarıiletken malzemelerin geliştirilmesi yönünde hız kazanırken diğer bir kısmı da elde edilen bu yarıiletkenlerin elektronik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerden yararlanılarak yeni metal–yarıiletken devre elamanları geliştirmeyi amaçlamaktadır.

Bu çalışma ile alttaş sıcaklığının RF saçtırma tekniği ile doğrudan p–Si yarıiletkeni ve cam üzerine biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerinin yüzey ve optik özelliklerine etkisi ile Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si heteroeklem yapılarının elektriksel ve fotovoltaik özelliklerine etkisini incelemek amaçlandı.

Bu tezde (100) yöneliminde, oda sıcaklığında 1–10 Ω.cm özdirence sahip ve bir yüzü parlatılmış p–Si yarıiletkeni kullanıldı. Önce elektriksel devre elemanlarının yapımında kullanılmak amacıyla, diyotların oluşturulması için gerekli olan omik kontak işlemi gerçekleştirildi. Bu işlem için DC saçtırma sistemi kullanıldı. Ardından vakum sisteminden Argon gazı geçirilerek p–Si yarıiletkeni üzerine Al ince filmi oluşturuldu. Saçtırma işleminden sonra yarıiletken, fırın içerisine konuldu ve azot ortamında tavlandı ve omik kontaklı p–Si yapısı elde edildi. Daha sonra p–Si/Al yapısı tekrar aynı vakum odasına alındı ve p–Si/Al yapısı üzerine RF saçtırma metoduyla p–Si alttaşlar üzerine 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında CdS ve ZnS ince filmleri biriktirildi. Oluşturulan tüm filmlerin SEM ve AFM görüntüleri alınarak yüzey özellikleri ile optik soğurma ölçümleri ve optik geçirgenlik ölçümleri fotospektrometre ile alınarak optik özellikleri incelendi.

Filmlerin oluşturulmasından sonra, yapılar üzerine doğrultucu kontak elde etmek için Ag metalinin ince filmleri oluşturuldu. Vakum odasına konulan CdS/p–Si/Al ve ZnS/p–Si/Al yapıları üzerine gölge maske yardımı ile termal buharlaştırma tekniği kullanılarak Ag kontak oluşturuldu. Böylece üç adet Ag/CdS/p–Si ve üç adet Ag/ZnS/p–Si diyotları elde edildi. Elde edilen bu Schottky diyotların önce oda sıcaklığında karanlıkta ve ışık altında akım–gerilim (*I–V*) ile kapasite–gerilim (*C–V*) ölçümleri elde edildi. Daha sonra 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS ince filmi ile elde edilen Ag/ZnS/p–Si ve 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS ince filmi ile elde edilen Ag/CdS/p–Si diyotlarının geniş bir sıcaklık aralığında 120 K'den başlayarak 480

K'e kadar 40 K'lik adımlarla her bir sıcaklıkta akım–gerilim (*I–V*) ölçümleri alındı. Sıcaklığa bağlı *I–V* ölçümleri için sıvı azot kriyostatı kullanıldı.

Bu çalışmanın ilk basamağında elektriksel ve optik devre elemanlarının üretiminde kullanılmak amacıyla 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerin molekülün görünür bölge absorbansı alındı ve filmlere ait $(\alpha hv)^2$*–Enerji* grafiği yardımı ile optik bant aralıkları belirlendi. Bu çalışmalardan sonra elde edilen ince filmlerin optik ve elektriksel devre elemanlarının üretiminde kullanılabileceği belirlendi.

RF saçtırma metodu ile doğrudan p–Si üzerine biriktirilen CdS ve ZnS ince filmlerin yüzey ve morfolojik özelliklerini incelemek amacıyla filmlerin SEM ve AFM görüntüleri alındı. Elde edilen SEM görüntülerinde parlak bölgelerle birlikte karanlık bölgeler de gözlemlendi. Filmin daha karanlık bölgelerindeki kısımlar daha küçük tanelerden ya da boşluklardan oluşmakta, daha kalın olan parlak bölgelerin ise daha büyük tanelerden oluştuğu görüldü. Bu da ince filmlerin kalınlık olarak çok homojen olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda p–Si üzerinde yoğun bir tabakalaşmanın olduğu ve filmlerin p–Si yarıiletken yüzeylerin bütününü kapladığı görüldü.

Yapıların elektriksel özelliklerini analiz etmek için karanlıkta *I–V* ölçümleri alındı. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen bütün yapıların doğrultma özelliğine sahip olduğu görüldü. Daha sonra 40, 150 ve 275 ^{o}C alttaş sıcaklıklarında elde edilen CdS ve ZnS ince filmleri ile oluşturulan üç adet Ag/CdS/p–Si ve üç adet Ag/ZnS/p–Si diyotlarının idealite faktörleri *I–V* grafiklerinden hesaplandı. İdeal bir diyotun idealite faktörü 1'dir ve idealite faktörünün 1'den büyük olması, diyotlarda ideallikten sapmayı gösterir. Daha önce yapılan çalışmalarda da elde ettiğimiz sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Üretilen diyotlardaki bu ideallikten sapma genelde kullanılan ara tabakanın varlığına, arayüzey durumlarına ve seri direncin etkisine bağlandı. Ayrıca CdS ve ZnS tabakaları ile ikinci bir mekanizmanın arayüzeyde oluşmasına, tükenim bölgesinde elektron ve boşlukların tekrar birleşmesi ya da uygulanan gerilim ile difüzyon akımının artmasına bağlandı.

Ayrıca farklı alttaş sıcaklıklarında üretilen Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarının *I–V* grafiklerinden hesaplanan engel yüksekliği değerlerinin farklı olduğu görüldü. Engel yükseklikleri arasındaki bu farklılıklar üretim koşullarının farklı

olmasına, alttaş sıcaklığına, oluşturulan arayüzeylerin kalınlıklarının farklı olmasına ve arayüzeyin homojen olmamasına atfedildi.

Tüm yapıların *I–V* eğrilerinin yüksek gerilimler altında lineerlikten saptıkları gözlendi. Bu sapmalar diyotlarda mevcut bulunan seri direnç etkilerini göstermektedir. Diyotlara ait seri direnç değerleri ve engel yükseklikleri Norde tarafından bildirilen yöntem ile hesaplandı. Bu metotla hesaplanan tüm değerler Çizelge 4.2.'de verildi. Çizelgede de görüldüğü gibi Norde yöntemi ile hesaplanan idealite faktörlerinin *I–V* grafiklerinden elde edilen değerlerden daha büyük olduğu görüldü. Bu sonuç seri direnç varlığına, arayüzey durumlarının etkisine ve arayüzey tabakası boyunca gerilim düşmesine atfedilebildi.

Ayrıca oluşturulan tüm yapıların *I–V* ölçümleri AM1.5 filtreye sahip güneş simülatörü kullanılarak 40–100 W/cm^2 arasındaki ışık şiddetine sahip ışıklar altında ölçüldü ve akım gerilim grafiklerinden tüm yapıların ışığa karşı tepki verdiği gözlemlendi. Bütün diyot yapılarının ışığa karşı duyarlılıkları; 40 ve 100 W/cm^2 şiddeti altındaki akım değerlerinin, karanlık ortamdaki akım değerine oranlanarak ($I_{aydınlık}/I_{karanlık}$) elde edildi. Yapılan ölçümler ışığa karşı en duyarlı yapının 275 ^oC alttaş sıcaklığında elde edilen CdS ince filmle elde edilen Ag/CdS/p–Si diyotu olduğunu gösterdi. Işığın şiddeti arttırıldığında 40, 150 ve 275 ^oC alttaş sıcaklıklarında elde edilen filmlerle oluşturulan üç adet Ag/CdS/p–Si ve üç adet Ag/ZnS/p–Si diyotları için ters beslem bölgesindeki her bir ters beslem akımının arttığı, düz beslemde ise akımda belirgin bir değişikliğin olmadığı görüldü. Bu da diyotların güneş pillerinden ziyade fotodiyot özelliği gösterdiğini ve diyotların optoelektronik uygulamalarda yer alabileceğini ve ışık sensörü olarak kullanılabileceğini gösterdi.

Daha sonra oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapılarına ait *C–V* ölçümü 100, 200, 500 kHz, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 ve 10 MHz frekanslarda –2 ile 2 volt arasında yapıldı. Diyotların kapasite değerlerinin düz beslemde gerilim artarken arttığı gözlendi. Ters beslemde ise kapasite daha düşük değerler olarak gözlendi. Elde edilen yapıların düşük frekanslarda AC sinyallerini takip edemediği görüldü. Diyotların engel yüksekliği ayrıca ters beslem $1/C^2–V$ eğrilerinden de hesaplandı. Yapılan hesaplamalar neticesinde ters beslem $1/C^2–V$ eğrilerinden bulunan değerlerin *I–V* eğrilerinden bulunan değerlerden daha büyük olduğu gözlendi. Bu durum kapasitenin tükenim

bölgesindeki potansiyel dalgalanmaya karşı duyarlı olmamasına ve hesaplanan engel yüksekliği değerinin engel yüksekliği dağılımının ortalama değeri olmasına, bunun tersine ara yüzeyden geçen akımın engel yüksekliğine üstel olarak bağlı olmasına ve ara yüzey dağılımına karşı duyarlı olmasına atfedildi. Şekil 4.17.'de MS yapılarda *I–V* ve *C–V* ölçümleri için potansiyel dalgalanma gösterilmiştir.

Son olarak, 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS ince filmi ve 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS ince filmi ile oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotları için sıcaklığa bağlı akım–gerilim (*I–V*) ölçümlerinden elde edilen temel diyot parametrelerinden, artan sıcaklıkla idealite faktörünün azaldığı ve artan sıcaklıkla engel yüksekliğinin arttığı tespit edildi. Artan sıcaklık ile idealite faktörünün azalması ve engel yüksekliğinin artması metal–yarıiletken arayüzeyindeki atomik boyutlarda homojen olmayan engelin bir fonksiyonu olarak açıklanabilir. Schottky engel homojensizliklerine uzay yükü bölgesinde oluşan tekrardan birleşim ve tekrardan oluşum akımları, yüksek katkılı yarıiletkenlerde tünelleme akımları, arayüzey tabakasının kalınlık ve oluşumu, görüntü–yük etkisi ve seri direnç gibi çok çeşitli durumların ve parametrelerin neden olduğu belirlendi. Arayüzey durumlarının varlığı da bu tür durumlara çok gösterilen sebeplerden biridir. İdealite faktörü ve engel yüksekliği arasındaki ters ve lineer ilişki, engel yüksekliğinin yanal (lateral) inhomojenliğine atfedildi.

Şekil 4.33. ve Şekil 4.38.'de verilen grafikler 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS ince filmi ile ve 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS ince filmi ile oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait *I–V* ölçümlerinden elde edilen engel yüksekliklerinin sıcaklığa karşı değişimini göstermektedir. Şekil 4.33. ve Şekil 4.38.'den de görüldüğü gibi engel yüksekliği ile sıcaklık arasında lineer bir ilişki bulunmaktadır. Bu grafiklere yapılan fitlerden elde edilen fit denklemlerinden hareketle her iki diyot için (3.25) denklemi kullanılarak taşıyıcı tünelleme faktörleri Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si yapıları için sırasıyla 18.319 ve 24.58 olarak elde edildi. Bu durum, tünelleme faktörünün engel yüksekliğinde dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

Norde fonksiyonları yardımıyla, her bir sıcaklık için 150 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen CdS ince filmi ile ve 40 ^{o}C alttaş sıcaklığında biriktirilen ZnS ince filmi ile oluşturulan Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarının engel yüksekliği ve seri direnç

değerleri elde edildi. Elde edilen bu değerler Çizelge 4.9. ve Çizelge 4.10.'da görülmektedir. Şekil 4.31. ve Şekil 4.36., Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si diyotlarına ait sıcaklığa bağlı $F(V)$–V grafiklerini göstermektedir. Her iki diyot için de $F(V)$–V grafiklerinden elde edilen engel yüksekliği değerleri sıcaklıkla artarken, seri direnç değerleri ise; sıcaklıkla düzgün olarak azalmaktadır. Bir farklılık olarak Ag/ZnS/p–Si diyotunun seri direnç değerlerin 360 K'e kadar azalmakta iken sonraki sıcaklıklarda bir miktar artmakta olduğu belirlendi.

Sonuç olarak RF saçtırma yöntemi ile biriktirilen CdS ve ZnS filmlerin p–Si yarıiletkenlerin yüzeyini tamamen kapladığı, hemen hemen homojen olduğu ve metal–yarıiletken kontak yapılarında kullanılabileceği görüldü. Bundan dolayı ayrıntıları daha önce anlatılan termal buharlaştırma yöntemi ile CdS ve ZnS filmleri üzerine Ag metali buharlaştırılarak doğrultucu özelliklere sahip Ag/CdS/p–Si ve Ag/ZnS/p–Si heteroeklem yapıları elde edildi.

Bu tez çalışması ile son zamanlarda ilgi odağı haline gelen CdS ve ZnS ile ilgili çalışmalara bir alternatif sunuldu. Şimdiye kadar yapılan araştırmalardan farklı olarak alttaş sıcaklığının CdS ve ZnS ince filmlerinin yüzey ve optik özellikleri üzerine etkileri gözlemlendi. Yanı sıra RF yöntemi ile biriktirilen CdS ve ZnS ince filmleri kullanılarak devre elemanı üretiminde kullanılmak amacı ile heteroeklem yapılar oluşturuldu ve farklı alttaş sıcaklıklarının bu yapıların elektriksel ve fotovoltaik özellikleri üzerine etkisi incelendi.

6. KAYNAKLAR

Aboulaich, A., Michalska, M., Schneider, R., Potdevin, A., Deschamps, J., Deloncle, R., Chadeyron, G., Mahiou, R. 2014. Ce–Doped YAG Nanophosphor and Red Emitting CuInS2/ZnS Core/Shell Quantum Dots for Warm White Light–Emitting Diode with High Color Rendering Index. Acs Applied Materials & Interfaces, 6(1): 252–258.

Adelifard, M., Eshghi, H., Mohagheghi, M. M. B. 2012. Synthesis and characterization of nanostructural CuS–ZnS binary compound thin films prepared by spray pyrolysis. Optics Communications, 285(21–22): 4400–4404.

Akkılıç K., Yakuphanoğlu, F. 2008. Electrical and photovoltaic properties of a n-Si/chitosan/Ag photodiode. Microelectronic Engineering, 85, 1826–1830.

Akkılıç, K., Kılıçoğlu, T., Türüt, A., 2003. Linear Correlation Between Barrier Heights and Ideality Factors of Sn/n–Si Schottky Diodes With and Without the Interfacial Native Oxide Layer. Physica B, 337: 388–393.

Alamri, S. N. 2014. Structure and optical properties of chunk and powder CdS film prepared by electron beam deposition. Indian Journal of Physics, 88(3): 259–264.

Andrews, J. M., 1974. The role of metal–semiconductor interface in silicon integrated circuit technology. J.Vac. Sci. Technol., 11: 972–984.

Arabacı, E., 2001. ZnS yarıiletken bileşiğinin spray pyrolysis yöntemi ile elde edilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir. 44–48.

Archibald, P., Parent, E. 1976. Solid State Technology, 19: 32–40.

Ates A., Guzeldir B., Saglam M. 2011. ZnS thin film and Zn/ZnS/n–Si/Au–Sb sandwich structure grown with SILAR method and defining the characteristic parameters. Materials Science in Semiconductor Processing, 14:28–36.

Aydın, M. E., Yıldırım, N., Türüt, A. 2007. Temparature–dependent behavior of Ni/4HnSiC Schottky contacts, J. Appl. Phys., 102, 043701.

Aydoğan, Ş. 2011. Katıhal Fiziği. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara. 442.

Aydoğan, Ş., 2004. Sn/PPy/n–Si/Au–Sb yapının bazı karakteristik parametrelerinin sıcaklığa bağlı akım–voltaj, kapasite–voltaj ve kapasite–frekans ölçümlerinden tayin edilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum. 27–56.

Bacaksız, E., Çankaya, G., Polat, İ., Yılmaz, S., Duran, C., Altunbaş, M. 2010. Structural and Electrical characterization of ZnO-based homojunctions. Journal of Alloys and Compounds, 496: 560-565.

Balkanski, M., Wallis, R. F., 2000. Semiconductor Physics and Applications. Oxford University Press, New York, 10–68.

Bardeen, J., 1947. Surface States and Rectification at a Metal–Semiconductor Contact. Phys. Rev., 71: 717–727.

Batı, B., Nuhoğlu, Ç., Sağlam, N., Türüt, A. 2000. On The Forward Bias Excess Capacitance at Intimate and MIS Schottky Barrier Diodes With Perfect Ohmic Back Contact. Physıca Scripta, 53: 209–212.

Bedir, M., Oztas, M., Kara, H. 2013. Effect of the substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of spray–deposited CdS:B films. Journal of Materials Science–Materials in Electronics, 24(2): 499–506.

Bethe, H.A. 1942. Theory of The Boundry Layer of Crystal Rectifiers. Mass. Inst. Techol. Radiat. Lap. Rep, 43.

Binnig, G., Quate, C. F., Gerber. C. 1986. Atomic force microscope. In: Physical Review Letters, 56: S. 930–933.

Bozkaplan, C. 2011. Ag/ZnO/p–Si Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Dicle Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Brattain, W.H., Bardeen J. 1948. Nature of The Forward Current in Germanium Point Contacts. Physical Rev.,74: 231–232.

Brundle, C. R., Evans, C. A. 1992. Encyclopedia of materials characterization. Butterworth–Heinemann, USA, 70–99, 371–401.

Bunshah, R. F., 2001. Handbook of Hard Coatings. Published in the United States of America by Noyes Publications/William Andrew Publishing, LLC Norwich, NewYork, U.S.A., p.549

Card, H. C., Rhoderick, E. H., 1971. Studies of tunnel MOS diodes I. İnterface effects in silicon Schottky diodes. J.Phys. D: Appl. Phys., 4 (10): 1589–1601.

Chamberlin, J.S., Skarman, J. 1966. Electrochem. Soc. 113 p.86, J.F. Jordan Proc.

Chand, S. ve Kumar, J. 1995. Current–voltage characteristics and barrier parameters of Pd_2Si/p–Si (111) Schottky diodes in a wide temperature range. Semiconductor Science and Technology, 10, 1680–1688.

Chand, S. ve Kumar, J. 1996. Evidence for the double distribution of the barrier 168 heights in Pd2Si/n–Si Schottky diodes from I–V–T measurements. Semiconductor Science and Technology, 11, 1203–1208.

Chattopadhyay, P., Kumar,V. 1988. Experimental investigation of barrier height versus metal work function of metal–SiO_2–p–Si (MIS) Schottky barrier diode in presence of inversion. Solid–State Electronics, 3: 143.

Chattopadhyay, P., Raychaudhuri, B., 1993. Frequency Dependnce of Forwerd Capaticance–Voltage Characteristics of Schottky Barrier Diodes. Solid–State Electron, 36 (4): 605–610.

Cheung, S.K., Cheung, N.W., 1986. Extraction of schotky diode parameters From I–V characteristics. Appl. Phys. Lett., 49 (2): 85–87.

Colombara, D., Delsante, S., Borzone, G., Mitchels, J. M., Molloy, K. C., Thomas, L. H., Mendis, B. G., Cummings, C. Y., Marken, F., Peter, L. M. 2013. Crystal growth of Cu2ZnSnS4 solar cell absorber by chemical vapor transport with I–2. Journal of Crystal Growth, 364: 101–110.

Cowley, A. M., Sze, S. M. 1965. Surface states and barrier height of metal–semiconductor systems. J. Appl. Phys., 96: 3212.

Crowell, A.M. ve Sze S. M. 1966. Current Transport in Metal–Semicondoctor Barriers, Solide State Electron., 9, 1035–1042.

Crowell, C.R. ve Rideout, V. L. 1969. Normalized thermoionic–field (T–F) emission in metal–semiconductor (Schottky) barriers. Solid State Electronics, 12, 89–105.

Crowell, C.R. ve Sze, S.M. 1966. Current Transport in Metal–Semiconductor Barriers. Solid–State Electronics, 9: 1035.

Darga, A., Mencaraglia D., Djebbour, Z., Dubois, A. M., Chouffot, R., Serhan, J., Couzinie–Devy, F., Barreau, N., Kessler, J. 2009. Comparative study of Cu(In, Ga)Se–2/(PVD)In2S3 and Cu(In,Ga)Se–2/(CBD)CdS heterojunction based solar cells by admittance spectroscopy, current–voltage and spectral response measurements. Thin Solid Films 517(7): 2423–2426.

Deepa, K., Preetha, K. C., Murali, K. V., Dhanya, A. C., Ragina, A. J., Remadevi, T. L. 2014. The effect of various complexing agents on the morphology and optoelectronic properties of chemically deposited ZnS thin films: A comparative study. Optik 125 (19): 5727–5732.

Deneuville, A., Keradec, J.P., Gerard, P., Mini, A., 1974. D.C. electrial, optical and photoelectrical properties of Ge_xT_{1-x} amorphous thin films. Solid State Communications, 14 (4): 341–346.

Diffey, B. L., 2002. Sources and measurement of ultraviolet radiation. Methods, 28:4–13.

Ding, J. X., Zhang, X. F., Yao, G. S. 2013. Research on the electrical characteristics of the Pt/CdS Schottky diode. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging, Imaging Sensors and Applications, 8908.

Dremel, M., Priller, H., Grun, M., Klingshirn, C., Kazukauskas, V. 2003. Optical and electrical properties of the CdS quantum wells of CdS/ZnSe heterostructures. Advanced Organic and Inorganic Optical Materials 5122: 392–399.

Echendu, O. K. ve Dharmadasa, I. M. 2014. Effects of Thickness and Annealing on Optoelectronic Properties of Electrodeposited ZnS Thin Films for Photonic Device Applications. Journal of Electronic Materials 43(3): 791–801.

Eglash S. J., Newman N., Pan, S., Mo, D., Shenai, K., Spincer, W. E., Ponce, F.A. Ve Collins, D. M., 1987. Engineered Schottky barrier diodes for the modification and control of Schottky barrier heights. J. Appl. Phys., 61: 5159–5169.

El–Adawi, M. K., Al–Nuaim, I. A., 2002. A method to determine the solar cell series curve considering its shunt resistance–new approach. Vacuum, 64: 33–36.

Escorcia–Garcia, J., Becerra, D., Nair, M. T. S., Nair, P. K. 2014. Heterojunction CdS/Sb2S3 solar cells using antimony sulfide thin films prepared by thermal evaporation. Thin Solid Films, 569: 28–34.

Fahrenbruch A.L., 1977. II–VI Compounds in Solar Energy Conversion, J. Cryst. Growth, 39: 73–91.

Farag, A. A. M., Yahia, I. S., Fadel, M. 2009. Electrical and photovoltaic characteristics of Al/n–CdS Schottky diode. International Journal of Hydrogen Energy, 34(11): 4906–4913.

Gaewdang, T., Wongcharoen, N., Wongcharoen, T. 2012. Characterisation of CdS/CdTe Heterojunction Solar Cells by Current–Voltage Measurements at Various Temperatures under Illumination. International Conference on Materials for Advanced Technologies 2011, Symposium O 15: 299–304.

Gaffar, M.A., El–Fadl, A.A., Anooz, S.B. 2003. Electron irradiation–induced effects on optical spectra of $(NH_4)_2ZnCl_4:xSr^{+2}$ single crystals, Crystal Resorce Technology.

Giberti, A., Casotti, D., Cruciani, G., Fabbri, B., Gaiardo, A., Guidi, V., Malagu, C., Zonta, G., Gherardi, S. 2015. Electrical conductivity of CdS films for gas sensing: Selectivity roperties to alcoholic chains. Sensors and Actuators B–Chemical, 207: 504–510.

Gonzalez–Panzo, I. J., Martin–Varguez, P. E., Oliva, A. I., 2014. Physicochemical Conditions for ZnS Films Deposited by Chemical Bath. Journal of the Electrochemical Society 161(4): D181–D189.

Gray J.L. 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Luque A.; Hegedus, S. John Wiley & Sons, Ltd.

Green, Daniel W. E. 1992. Magnitude Corrections for Atmospheric Extinction. International Comet Quarterly.

Gril, A., 1993. Cold plasma in materials fabrications (from Fundamentals to applications). The institute of electrical and electronics engineers, NewYork.

Gupta, S., Patidar, D., Saxena, N. S., t, K. 2009. Electrical Study of Thin Film Al/N–Cds Schottky Junction. Chalcogenide Letters 6(12): 723–731.

Guzeldir, B. ve Saglam, M. 2015. Temperature dependent electrical properties of Cd/CdS/n–Si/Au–Sb structures. Materials Science in Semiconductor Processing 30: 658–664.

Güllü, Ö., Asubay, S., Biber, M., Kılıçoğlu, T., Türüt, A. 2010. Electrical characteristics of the Safranine T/p–Si Organic/Inorganic semiconductor devices. Eur. Phys. J. Appl. Phys., 50: 10401.

Hernandez, M. P., Alonso, C. F., Pena, J. L. 2001. Barrier height determination inhomogeneous nonideal Schottky contacts. Journal of Physics D: Applied Physics, 34, 1157–1161.

Hiraki, A., Shuto, K., Kim, S., Kamamura, W., Iwami, M., 1977. Room temperature interfacial reaction in Au–semiconductor systems. Appl. Phys. Lett., 31:611.

Horvath, Zs. J. 1988. Evaluation of the interface state energy distribution from. Schottky I–V Characteristics. J. Appl. Phys., 63: 976–978.

Huang, J., Wang, L. J., Tang, K., Zhang, J. J., Xu, R., Xia, Y. B., Lu, X. G. 2011. Preparation and properties of n–ZnS film/p–Si heterojunction. Advanced Materials and Processes, Pts 1–3 311–313: 1277–1280.

Huang, J., Wang, L. J., Tang, K., Xu, R., Zhang, J. J., Lu, X. G., Xia, Y. B. 2011. Photoresponse Properties of an n–ZnS/p–Si Heterojunction. Chinese Physics Letters, 28(12).

Johnson, B., Klaer, J., Vollmer, A., Lauermann, I. 2012. Electronic effects of Cd on the formation of the CdS/CuInS2 heterojunction. Journal of Vacuum Science & Technology A, 30(4).

Johnson, R. L., 2005. Characterization of piezoelectric ZnO thin films and the fabrication of piezoelectric micro–cantilevers. Master Thesis, Electrical Engineering. Iowa State University, Ames, Iowa, 98 p.

Kaminski, A., Marchand, J. J., Laugier, A. 1999. I–V methods to extract junction parameters with specialemphasis on low series resistance. Solid State Electron, 43: 741–745.

Karataş, Ş., 2003. Sn/p–Si Schottky kontakların elektriksel karakteristiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında incelenmesi. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. 35.

Kathirvel, D., Suriyanarayanan, N., Prabahar, S., Srikanth, S. 2011. Structural, Electrical and Optical Properties of Cds Thin Films by Vacuum Evaporation Deposition. Journal of Ovonic Research, 7(4): 83–92.

Kermani, H., Fallah H. R., Hajimahmoodzadeh, M., Tabatabaei, S. V. 2013. Very low resistance ZnS/Ag/ZnS/Ag/ZnS nano–multilayer anode for organic light emitting diodes applications. Applied Optics, 52(4): 780–785.

Khan, M. R. H., Nakayama, H., Detchprohm, T. Hiramatsu, K. and Sawaki, N. 1997. A study on barrier height of Au–$Al_xGa_{1-x}N$ Schottky diodes in the range $0 \leq x \leq 0.20$. Solid State Electronics, 41, 287–294.

Kılıçoğlu, T. 2008. Effect of an organic compound (Methyl Red) interfacial layer on the calculation of characteristic parameters of an Al/Methyl Red/p-Si sandwich Schottky barrier diode. Thin Solid Films, 516, 967-970.

Kim, J., Hiramatsu, H., Hosono, H., Kamiya, T. 2014. Fabrication and characterization of ZnS:(Cu,Al) thin film phosphors on glass substrates by pulsed laser deposition. Thin Solid Films, 559: 18–22.

Kittel, C. 1986. Introduction Solid State Physics. 6th Edition. Wiley, New York.

Kurbatov, D. I., Kosyak, V. V., Kolesnyk, M. M., Opanasyuk, A. S., Danilchenko, S. N., Gnatenko, Y. P. 2013. Structural and electrical properties of ZnS/CdTe and ZnTe/CdTe heterostructures. Materials Chemistry and Physics, 138(2–3): 731–736.

Lee, T. C., Fung, S., Beling, C. D. ve Au, H. L. 1992. A systematic approach to the measurement of ideality factor, series resistance and barrier height for Schottky diodes. J. Appl. Phys., 72 (10), 4739–4741.

Li, B. K., Wang, C., Sou, I. K., Ge, W. K., Wang, J. N. 2007. Anomalous photocurrent observed in an Fe–ZnS: Fe schottky diode. Applied Physics Letters, 91(17).

Lide, D. R. Handbook Chemistry and Physics. 87th Edition. Boca Raton. FL:CRC Press, 1998

Lin, L. Z., Zhang, H. J., Jiang, S. J. 2010. Dependence of silicon thin–film growth characteristics on substrate temperature. 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optoelectronic Materials and Devices for Detector, Imager, Display, and Energy Conversion Technology, 7658.

Lin, Y. J., You, C. F., Chang, H. C., Liu, C. J., Wu, C. A. 2015. Effects of sulfide treatment on the photoluminescent and structural properties of electrodeposited CdS films. Journal of Luminescence 158: 407–411.

Lindroos, S., Kanniainen, T., Leskela, M., 1997. Growth of ZnS thin films by the SILAR method on polyester substrates, Mater. Res. Bull., Vol 32, No.12, 1631–1636.

Luque, P. A., Quevedo–Lopez, M. A., Olivas, A. 2013. Influence of deposition time on ZnS thin film growth over SiO2 and glass substrates. Materials Letters 106: 49–51.

Ma, R. M., Wei, X. L., Dai, L., Huo, H. B., Qin, G. G. 2007. Synthesis of CdS nanowire networks and their optical and electrical properties. Nanotechnology, 18(20).

Madelung, O. 1996. Semiconductors–Basic Data. Springer–Verlag, Berlin, Almanya.

Mariappan, R. Ponnuswamy, V. Suresh, R. Suresh, P. Chandra Bose, A. Ragavendar M. 2014. Role of substrate temperature on the properties of Na–doped ZnO thin film nanorods and performance of ammonia gas sensors using nebulizer spray pyrolysis technique. Journal of Alloys and Compounds, 582: 387–391.

Mashaiekhy, J., Shafieizadeh, Z., Nahidi, H. 2012. Effect of substrate temperature and film thickness on the characteristics of silver thin films deposited by DC magnetron sputtering. European Physical Journal–Applied Physics, 60 (2).

Mc Caldin, J. O., 1974. Effective barrier heights of mixed phase contacts. J. Vac. Sci. Technol., 11: 990.

Mead, C.A., ve Spitzer, W.G., 1964. Fermi Level Position at Metal–Semiconductor Interfaces, Phys. Rev. 134, A713–A716.

Meyer, R. J. 1972. Introduction to Classical and Modern Optics. Prentice–Hall.

Mott, N.F. ve Davıs E.A. 1971. Electonic Processes in Non Crystalline Materials. Clarendon Pres, London.

Mönch, W. 1987. Role of virtual gap states and defects in metal–semiconductor contacts. The American Physical Society, 58 (12) 1260–1263.

Mönch, W., 1999. Barrier heights of realSchottky contacts explained by metalinduced gap states and lateral inhomogeneties. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures, 17 (4): 1867–1876.

Mukherjee, A., Satpati, B., Bhattacharyya, S. R., Ghosh, R., Mitra, P. 2015. Synthesis of nanocrystalline CdS thin film by SILAR and their characterization. Physica E–Low–Dimensional Systems & Nanostructures, 65: 51–55.

Nag, B.R. 1980. Electron transport in compound semiconductors, Springer–Verlag, Berlin, Almanya.

Neamen, D. A. 2003. Semiconductor Physics And Devices Basic Principles, Third. Edition. McGraw Hill, New York.

Norde, H. A. 1979. A Modified Forward I–V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. J. Appl. Phys., 50: 5052–5053.

Ocak, Y. S. 2010. Organik–İnorganik Hibrit Yapıların Elektriksel ve Fotoelektriksel Karakterizasyonu. Doktora Tezi, Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Ocak, Y. S., Ebeoglu, M. A., Topal, G., Kilicoglu, T. 2010. Temperature dependent electrical characteristics of an organic–inorganic heterojunction obtained

from a novel organometal Mn complex. Physica B–Condensed Matter, 405(9): 2329–2333.

Okur, S., Yakuphanoğlu, F., Özsöz, M., Kadayıfçılar, P.K., 2009. Electrical and interface properties of Au/DNA/n–Si organic–on–inorganic structures. Microelectronic Engineering, 86:2305–2311.

Orlianges, J. C., Champeaux C., Dutheil, P.,Catherinot, A.,Mejean, T. M. 2011. Structural, electrical and optical properties of carbon–doped CdS thin films prepared by pulsed–laser deposition. Thin Solid Films, 519(21): 7611–7614.

Ozakin, O., Guzeldir, B., Yildirim, M. A., Saglam, M., Ates, A. 2012. Influence of film thickness on structural and optical properties of ZnS thin films obtained by SILAR method and analysis of Zn/ZnS/n–GaAs/In sandwich structure. Physica Status Solidi a–Applications and Materials Science, 209(4): 687–693.

Padovani, F. A. ve Stratton, R. 1966. Field and thermoionic–field emission in Schottky barriers. Solid State Electronics, 9, 695–707.

Pankove, J., 1975. Optical Process in Semiconductors. Dover Publications, Inc. New York.

Parameshwari, P. M. ve K. G. Naik 2014. Effect of Cd/S molar ratio on the optical and electrical properties of spray deposited CdS thin films. Physics of Semiconductor Devices, 347–349.

Park, Y. S. Seo, M. S. Kim, J. S. Lee, J. 2013. The effect of substrate temperature on Al–doped ZnO characteristics for organic thin film transistor applications. Materials Research Bulletin, 48: 5136–5140.

Park, S., An, S., Mun, Y., Lee, C. 2014. UV–activated gas sensing properties of ZnS nanorods functionalized with Pd. Current Applied Physics, 14:57–62.

Paudel, N. R., Xiao, C. X., Yan, Y. F. 2014. Close–space sublimation grown CdS window layers for CdS/CdTe thin–film solar cells. Journal of Materials Science–Materials in Electronics, 25(4): 1991–1998.

Rhoderick, E. H., Williams, R. H. 1988. Metal–Semiconductor Contacts, Claredon Pres, Second Edition, Oxford.

Rideout, V. L. ve Crowell, C. R. 1970. Effects of image force and tunneling on current transport in metal–semiconductor (Schottky barrier) contacts. Solid State Electronics, 13, 993–1009.

Rideout, V. L., 1978. A Review of The Theory, Technology and Application of Metal–Semiconductor Rectifiers. Thin Solid Films, 48: 261–266.

Rmili, A., Ouachtari, F., Bouaoud, A., Louardi, A., Chtouki, T., Elidrissi, B., Erguig, H. 2013. Structural, optical and electrical properties of Ni–doped CdS thin films prepared by spray pyrolysis. Journal of Alloys and Compounds, 557: 53–59.

Rodriguez, C. A., Sandoval–Paz, M. G., Cabello, G., Flores, M., Fernandez, H., Carrasco, C. 2014. Characterization of ZnS thin films Synthesized through a non–toxic precursors chemical bath. Materials Research Bulletin, 60: 313–321.

Rojas, F. S., ve Ojeda, C. B. 2009. Recent development in derivative ultraviolet/visible absorption spectrophotometry:2004–2008. Analytica Chimica Acta, 635:22–44.

Saglam, M., Ates, A., Guzeldir, B., Yildirim, M. A., Astam, A. 2008. Calculation from the current–voltage and capacitance–voltage measurements of characteristics parameters of Cd/CdS/n–Si/Au–Sb structure with CdS interface layer grown on n–Si substrate by SILAR method. Microelectronic Engineering 85(8):1831–1835.

Saglam, M., Guzeldir, B., Ates, A., Bugur, E. 2013. Temperature dependence of current–voltage characteristics of the Cd/CdS/n–GaAs/In sandwich structure. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 74(2): 370–376.

Sato, K. ve Yasamura, Y. 1985. Study of Forward I–V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance. J. Appl. Phys., 58(9), 3655–3657.

Sharma, B.L., 1984. Metal–Semiconductor Schottky Barrier Junctions and Their Applications, New York and London.

Sharma, M. ve Tripathi S. K. 2013. Electrical Conduction Mechanism of Polymer Dispersed CdSe/CdS Core/Shell Heterojunction Diode. Science of Advanced Materials, 5(6): 699–708.

Shockley, W. 1950. Electrons and Holes in Semiconductors. D. Van Nostrand, Princeton, New Jersey.

Singh, A. 1985. Characterization of interface states at Ni/nCdF2 Schottky barrier type diodes and the effect of CdF_2 surface preparation. Solid State Electron., 28(3): 223–232.

Sivaraman, T., Balu, A. R., Nagarethinam, V. S. 2014. Effect of magnesium incorporation on the structural, morphological, optical and electrical properties of CdS thin films. Materials Science in Semiconductor Processing, 27: 915–923.

Son, D. I., Kim, H. H., Hwang, D. K., Kwon, S., Choi, W. K. 2014. Inverted CdSe–ZnS quantum dots light–emitting diode using low–work function organic material polyethylenimine ethoxylated. Journal of Materials Chemistry C, 2(3): 510–514.

Song, N., Hao, X., Huang, J., Liu, Z., Liu, X., Huang, S., Green, M. 2012. Film Thickness and Substrate Temperature Effects on Sputtered Al:ZnO Window Layer for Cu2ZnSnS4 Thin Film Solar Cells. Conference on Optoelectronic and Microelectronic Materials and Devices, 153–154.

Sullivan, J. P., Tung, R. T., Pinto, M. R. and Graham, W.R., 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers: A numerical study. J. Appl. Phys., 70 (12): 7403-7423.

Szatkowski, J., Sieranski, K. 1992. Simple interface layer model for the nonideal characteristics of the Schottky diode. Solid–State Electronics, 35: 1013–1015.

Sze, S.M., 1981. Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., Willey, New York, 245–300.

Tomakin, M., Altunbas, M., Bacaksiz, E. 2011. The influence of substrate temperature on electrical properties of Cu/CdS/SnO2 Schottky diode. Physica B, Condensed Matter, 406(23): 4355–4360.

Torrey, H.C., Whitmer C.A. 1948. Crystal Rectifiers, Mc Graw Hill Inc., New York.

Tseng, H. H., Wu, C. Y. 1987. Solid State. Electron., New York, McGraw–Hill, 30: 383–390.

Tung R. T. 1991. Electron transport of inhomogeneous Schottky barriers. Appl. Phys. Lett. 58, (24), 2821–2823.

Tung, T. R. 2001. Recent advances in Schottky barrier concepts. Materials Science and Engineering R–Reports. Materials Science and Engineering, 35: 1–138.

Turgut, G., Keskenler, E. F., Aydin, S., Dogan, S., Duman, S., Sonmez, E., Esen, B., Duzgun, B. 2013. A study on characterization of Al/ZnS/p–Si/Al heterojunction diode synthesized by sol–gel technique. Materials Letters, 102: 106–108.

Turner, M. J., Rhoderick, E. H., 1968. Metal–Silicon Schottky Barriers. Solid State Elect., 11: 291–300.

Türüt, A., Yalçin, N., Sağlam, M., 1992. Parameter extraction from non–ideal C–V characteristics of a Schottky diode with and without interfacial layer. Solid–State Electronics, 35 (6) 835–841.

Türüt, A.; Sağlam, M. 1992. Determination of the density of Si–metal interface state and excess capacitance caused by them. Physica B: Condensed Matter, 179: 285–294.

Vikipedi Özgür Ansiklopedi. Taramalı Elektron Mikroskop. Erişim:[http://tr.wikipedia.org/wiki/Taramal%C4%B1_elektron_mikroskobu]. Erişim Tarihi: 05.05.2015.

Wang, J. S., Li, S., Cai, J. J., Shen, B., Ren, Y. P., Qin, G. W. 2013. Cu2ZnSnS4 thin films: Facile and cost–effective preparation by RF–magnetron sputtering and texture control. Journal of Alloys and Compounds, 552: 418–422.

Werner, J., Tung, R.T., Levi, A. F.J., Anzlovar, M., Pinto, M. 1988. Origin of Excess Capacitance at Intimate Schottky Contacts. Phys. Review Lett, 60 (1): 53–56.

Williams, D. B., Carter, C. B., 1996. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. Plenum Press, New York.

Wilmsen, C. W. 1985. Physics and Chemistry of III–V Compound Semiconductor Interfaces. Plenum Press, New York.

Wilson, A. H. 1932. A Note on the Theory of Rectification. Proc. Roy. Soc. London, Series A, 136: 487.

Wittmer, M. 1991. Conduction Mechanism in PTSI/SI Schottky Diodes. Physical Review B, 43, 4385–4395.

Wu, L. P., Zhang, Y. L., Long, L. Z., Cen, C. P., Li, X. J. 2014. Effect of ZnS buffer layers in ZnO/ZnS/CdS nanorod array photoelectrode on the photoelectrochemical performance. Rsc Advances, 4(40): 20716–20721.

Ximello–Quiebras, J. N., Contreras–Puete, G., Aguilar–Hernandez, J., Santana Rodriguez, G., Arias–Carbajal Readigos, A. 2004. Physical Properties of Chemical Bath Deposited CdS Thin Films. Solar Energy Meterials & Solar Cells, 82:263–268.

Xu, P. X., Xu, G. Q., Chu, K. H., Wang, N. L., Zhou, Q., Tang, Y. D., Zhang, K. F., Li, X. Y. 2013. Properties study of ZnS thin films deposited on HgCdTe substrate by different methods. International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging. Infrared Imaging and Applications, 8907.

Yıldırım, N., Korkut, H. ve Turut, A., 2009. Temperature–Dependent Schottky Barrier Inhomogeneity of Ni/n–GaAs Diodes, Eur. Phys. J. Appl. Phys. 45, 10302–10306.

Yildirim, M. A., Ates, A., Astam, A. 2009. Annealing and light effect on structural, optical and electrical properties of CuS, CuZnS and ZnS thin films grown by the SILAR method. Physica E–Low–Dimensional Systems & Nanostructures, 41(8): 1365–1372.

Yu, Y. X., Ouyang, W. X., Liao, Z. T., Du, B. B., Zhang, W. D. 2014. Construction of ZnO/ZnS/CdS/CuInS2 Core–Shell Nanowire Arrays via Ion Exchange: p–n Junction Photoanode with Enhanced Photoelectrochemical Activity under Visible Light. Acs Applied Materials & Interfaces, 6(11): 8467–8474.

Yucel, E. ve Yucel, Y. 2015. Optimization of zinc sulfide thin film coating process using response surface methodology. Journal of Materials Science–Materials in Electronics 26(1): 196–203.

Yun, J. H., Cha, E. S., Ahn, B. T., Kwon, H., Al–Ammar, E. A. 2014. Performance improvement in CdTe solar cells by modifying the CdS/CdTe interface with a Cd treatment. Current Applied Physics, 14(4): 630–635.

Zahn, D. R. T., Park, S. ve Kampen, T. U. 2002. Tuning Schottky barrier heights by organic modification of metal–semiconductor contacts. Vacuum, 67: 101–113.

Zhang, C., Tian, W., Xu, Z., Wang, X., Liu, J. W., Li, S. L., Tang, D. M., Liu, D. Q., Liao, M. Y., Bando, Y., Golberg, D. 2014. Photosensing performance of branched CdS/ZnO heterostructures as revealed by in situ TEM and photodetector tests. Nanoscale, 6(14): 8084–8090.

Ziel, A., 1968. Solid–state physical electronics. Prentice–Hall, Inc., 7: 136–144, New Jersey.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı	:Cihat BOZKAPLAN
Doğum Yeri	:Çermik/DİYARBAKIR
Doğum Tarihi	:03.05.1976
Medeni Hali	:Evli
Yabancı Dili	:İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise	:Diyarbakır Birlik Lisesi	1993
Lisans	:Harran Üni. Fen Edebiyat Fak. Fizik Bölümü	1998
Yüksek Lisans	:Dicle Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü	2011
Doktora	:Dicle Üni. Fen Bilimleri Enstitüsü	2015

Yayın ve Çalışmalar

1- Ag/ZnO/p–Si Yapısının Elektriksel Karakterizasyonu; Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü; Haziran 2011; Yüksek Lisans Tezi

2- Determination of Electrical Properties of Ag/ZnO/p─Si Rectifiying Contact , C. Bozkaplan, K. Akkılıç, Y.S. Ocak; 28. Uluslararası Fizik Kongresi; Poster Sunumu; S. 693, Eylül 2011.

3- Magnetron sputtered MoS_2 thin films for MoS_2/p–Si heterojunction, Cihat Bozkaplan, Ahmet Tombak, Kemal Akkilic, Yusuf Selim Ocak, Ömer Çelik, TUCr2014 4th National Crystallographic Meeting With International Participation, P.089, Mayıs 2014.

4- Subtrate Temperature Effects On RF Sputtered ZnS Thın Fılms, Cihat BOZKAPLAN, Yusuf Selim OCAK, Mustafa Fatih GENİŞEL, Ahmet TOMBAK, Tahsin KILIÇOĞLU, Kemal AKKILIÇ, 3rd Turkish Solar Electricity Conference and Exhibition, Presentation Poster. Nisan 2015.

5- Photoelectrical Characterization Of RF Sputtered MoS_2/n-Si heterojunction, Cihat BOZKAPLAN, Yusuf Selim OCAK, Mustafa Fatih GENİŞEL, Murat AYDEMİR, 3rd Turkish Solar Electricity Conference and Exhibition, Presentation Poster. Nisan 2015.