

**T.C.**  
**RECEP TAYYIP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SODYUM KATKILI CdS İNCE FİMLERİNİN ve nCdS/pSi**  
**GÜNEŞ PİLLERİNİN BAZI KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**AHMET BEDİR**

**TEZ DANIŞMANI**  
**DOÇ. DR. VAGİF NEVRUZOĞLU**  
**TEZ JÜRİSİ**  
**PROF. DR. UĞUR ÇEVİK**  
**YRD. DOÇ. DR. EYÜP FAHRİ KESKENLER**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**



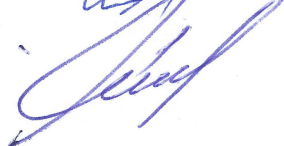
**RİZE-2015**

**Her Hakkı Saklıdır**

T.C.  
RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SODYUM KATKILI CdS İNCE FİLMLEİNİN ve nCdS/pSi GÜNEŞ  
PİLLERİNİN BAZI KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında, Ahmet BEDİR tarafından hazırlanan bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulu kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/08/2015 tarihinde Fizik Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

<b>Jüri Üyeleri</b>	<b>Unvanı Adı Soyadı</b>	<b>İmzası</b>
Başkan	: Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU	
Üye	: Prof. Dr. Uğur ÇEVİK	
Üye	: Yrd. Doç. Dr. Eyüp Fahri KESKENLER	



Prof. Dr. Selami SAŞMAZ ✓  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

## ÖNSÖZ

Bu çalışma, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden Doç.Dr. Vagif NEVRUZOĞLU danışmanlığında hazırlanarak Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsüne Yüksek Lisans Tezi olarak sunulmuştur.

Bu çalışmanın, birinci aşamasında cam altlıklar üzerinde, kimyasal banyo yöntemiyle üretilen CdS ince filmlerin bazı yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri incelendi. Çalışmanın ikinci aşamasında farklı yoğunluklarda sodyum içeren nCdS ince filmleri pSi tek kristal yüzeyine kimyasal banyo yöntemiyle çöktürülerek nCdS/pSi heteroepitleri üretildi. Deneysel çalışmalar Recep Tayyip ERDOĞAN Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği Araştırma Laboratuvarı'nda yapıldı.

Yüksek Lisans öğrenciliğimin her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU'na çalışmalarım süreci boyunca bilgi, öneri ve yardımlarıyla beni destekleyen Fizik Bölümü öğretim üyesi Doç. Dr. Murat TOMAKİN'e ve Arş. Gör. Sait Barış GÜNER'e teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Ayrıca bu zamana kadar maddi ve manevi her türlü desteğini esirgemeyen her zaman yanımda olan ANNEME ve BABAMA sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

**Ahmet BEDİR**

## TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Tarafımdan hazırlanan Sodyum katkılı CdS ince filmlerinin ve nCdS/pSi güneş pillerinin bazı karakteristik özelliklerinin incelenmesi başlıklı bu tezin, Yükseköğretim Kurulu Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesindeki hususlara uygun olarak hazırladığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal işlemi kabul ettiğimi beyan ederim. 31/08/2015

Ahmet BEDİR

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

## ÖZET

### SODYUM KATKILI CdS İNCE FİLMLERİNİN ve nCdS/pSi GÜNEŞ PİLLERİNİN BAZI KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

AHMET BEDİR

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

Bu çalışmada, II–VI yarıiletken grubuna ait CdS ince filmlerine ve nCdS/pSi güneş pillerine sodyum katkısının etkisi incelendi. İlk önce CdS ince filmleri kimyasal banyo yöntemiyle cam altlıklar üzerinde üretildi. Bu filmlerin yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri araştırıldı. CdS filmlerin kalınlığı yaklaşık olarak 140 nm olduğu belirlendi. X-ışını kırınım desenleri hegzagonal faza ait düzlemlerden yansımalar gösterdi. Artan sodyum katkısı ile örneklerin tane boyutunun 6,20 nm'den 4,09 nm'ye doğru azaldığı hesaplandı. Sodyum katkısı ile örneklerin optik geçirgenliğinde artışlar görüldü. Farklı sodyum yoğunluklarında üretilen CdS örneklerinin optik soğurma spektrumlarından elde edilen yasak band aralıklarının 2,62 eV'dan 2,88 eV'a doğru arttığı tespit edildi. Sodyum katkısı ile örneklerin özdirenci artarken taşıyıcı yoğunluğunun ve elektron hareketliliğinin azaldığı tespit edildi. Çalışmanın ikinci aşamasında farklı yoğunluklarda sodyum içeren nCdS ince filmleri pSi tek kristal yüzeyine kimyasal banyo yöntemiyle çöktürülerek nCdS/pSi ikili yapıları üretildi. Elde edilen ikili yapının fotovoltaiik parametreleri 93 mW/cm<sup>2</sup> aydınlatma gücünde olan yapay güneş ışını altında incelendi. Sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin temas bölgesinde oluşan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> fazı tespit edildi ve bu fazın akım mekanizmasına olan etkileri araştırıldı.

2015, 79 sayfa

**Anahtar Kelimeler:** Kimyasal Banyo Yöntemi; CdS İnce Filmleri; nCdS/pSi Güneş Pilleri

## ABSTRACT

### THE INVESTIGATION OF SOME CHARACTERISTIC PROPERTIES OF SODIUM DOPED CdS THIN FILMS AND nCdS/pSi SOLAR CELLS

AHMET BEDİR

Recep Tayyip Erdoğan University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics  
Master Thesis  
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Vagif NEVRUZOĞLU

In this study, the effect of the doping sodium on the CdS thin films, which are in II-VI group semiconductor, was investigated. CdS thin films were prepared on glass substrates by chemical bath deposition technique. The structural, electrical and optical properties of these thin films were investigated. The thickness of the CdS film was determined approximately 140 nm. X-ray diffraction pattern showed reflections in the plane of the hexagonal phase. The samples were calculated by increasing the particle size of sodium doping with reduce from 6,20 to 4,09 nm. It was observed that the optical transparency of the samples increases with sodium doping. It was detected that band gap energy which is obtained by the optical absorption spectra of CdS samples in different sodium density increases from 2,62 eV to 2,88 eV. It was found that resistivity of the samples increases with sodium contribution of decreased carrier density and electron mobility. In the second phase of the study, nCdS thin films containing different concentrations of sodium on single crystal surface by CBD method and the result of these nCdS/pSi solar cells were produced. The photovoltaic parameters of the resulting binary structure were investigated under 93 mW / cm<sup>2</sup> power lighting of artificial sun's ray It was detected Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> phase on contact region of sodium doping nCdS/pSi hetero structure and investigated their impact on current mechanisms.

2015, 79 pages

**Key Words:** CBD; CdS Thin Films; nCdS/pSi Solar Cells

## İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	II
ÖZET.....	III
ABSTRACT.....	IV
İÇİNDEKİLER .....	V
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	X
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi.....	2
1.2.1. Yarıiletken Türleri .....	7
1.2.1.1. Özden Yarıiletkenler.....	7
1.2.1.2. Katkılı Yarıiletkenler.....	10
1.2.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı.....	12
1.2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik.....	14
1.2.4. Hall Olayı .....	15
1.3. II–VI Bileşiklerinin Doğal Yapısı .....	19
1.3.1. Giriş.....	19
1.3.2. II–VI Bileşiklerinin Kristal Yapılar.....	20
1.3.2.1. Örgü Konumları.....	20
1.3.2.2. Kristal Yapılar .....	21
1.3.2.3. II–VI Bileşiklerinin Optik Özellikleri .....	22
1.4. Literatür Özeti.....	24
1.4.1. Katkı Atomlarının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi .....	24
1.4.2. nCdS/pSi Güneş Pilleri.....	26
1.5. Yarıiletken İnce Film Elde Etme Teknikleri .....	27
1.5.1. Kapalı Hacimde Çökeltme (Close-Space Sublimation) Yöntemi .....	27
1.5.2. Lazerle Buharlaştırma Yöntem.....	27
1.5.3. Fiziksel Buharda Çökeltme Yöntemi.....	28
1.5.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi.....	29

1.5.5.	Kimyasal Banyo Yöntemi .....	30
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	30
2.1.	Giriş.....	30
2.2.	CdS Filmlerinin Kimyasal Banyo Yöntemiyle Elde Edilmesi .....	31
2.3.	nCdS/pSi Heterogeçitlerin Elde Edilmesi .....	32
2.4.	Örneklerin Kalınlık Ölçümü.....	33
2.5.	X-Işını Kırınım Analizi .....	33
2.6.	Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri .....	34
2.7.	Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi .....	35
2.7.1.	Özdirenç Ölçümü.....	35
2.7.2.	Hall Katsayısı Ölçümü.....	37
2.8.	Optik Özelliklerin Ölçümü .....	39
2.8.1.	Optik Geçirgenlik Ölçümü .....	39
3.	TARTIŞMA VE SONUÇLAR.....	40
3.1.	Yapısal Özelliklerin İncelenmesi.....	40
3.2.	X Işını Kırınımı .....	40
3.3.	SEM Görüntüleri ve EDX Analizi.....	42
3.4.	Optik Özelliklerin İncelenmesi.....	47
3.5.	Optik Geçirgenlik .....	47
3.6.	Yasak Band Aralığı .....	47
3.7.	Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi .....	48
3.8.	Özdirenç .....	48
3.9.	Taşıyıcı Yoğunluğu .....	51
3.10.	Elektron Hareketliliği .....	52
3.11.	Farklı Oranlarda Sodyum Katkılı nCdS/pSi Heterogeçit Güneş Pilleri .....	54
4.	ÖNERİLER .....	63
	KAYNAKLAR .....	64
	ÖZGEÇMİŞ.....	68



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Değerlik bandının tepesine ve iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları .....	3
Şekil 2. Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntıları .....	4
Şekil 3. a) Temiz (özden) yarıiletkenin enerji bandlarının ve b) enerji band diyagramının şematik gösterimi .....	6
Şekil 4. Elmas tipli kristal örgü .....	8
Şekil 5. Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi a) $T = 0$ , b) $T > 0$ .....	9
Şekil 6. Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü .....	10
Şekil 7. a) Donör, b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları .....	11
Şekil 8. a) Bir yarıiletkenin bant yapısı b) a)'daki bandın şematik gösterimi .....	13
Şekil 9. Hall olayının geometrisi .....	18
Şekil 10. Tetrahedral örgü konumları .....	21
Şekil 11. a) Wurtzite yapısı, b) Çinko–blende yapısı .....	22
Şekil 12. Doğrudan ve dolaylı geçiş .....	23
Şekil 13. Kapalı hacimde buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi .....	27
Şekil 14. Lazerle buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi .....	28
Şekil 15. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi .....	29
Şekil 16. Kimyasal püskürtme yöntemi için kullanılan deneysel düzenek .....	29
Şekil 17. Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi .....	30
Şekil 18. Hazırlanan çözeltilerin pH grafiği .....	32
Şekil 19. Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi .....	34
Şekil 20. JEOL marka JSM–6610 taramalı elektron mikroskobu .....	35
Şekil 21. a) Hal katsısı ölçümü için kullanılan omik kontaklar b) Van der Pauw yöntemi için kullanılan omik kontak şematik gösterimi .....	35

Şekil 22. PerkinElmer UV/ VIS Spectrometer Lamda 35.....	40
Şekil 23. CdS ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri.....	41
Şekil 24. Saf CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu.....	43
Şekil 25. %1 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu.....	44
Şekil 26. %2 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu.....	45
Şekil 27. %3 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu.....	46
Şekil 28. Saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin optik geçirgenlik eğrileri.....	47
Şekil 29. Saf ve sodyum katkılı CdS ince film örneklerinin $h\nu$ 'ye karşı $(\alpha h\nu)^2$ grafikler.....	48
Şekil 30. Karanlık ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin özdirenç grafiği.....	49
Şekil 31. Aydınlık ( $93\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ortamda saf ve sodyum katkılı CdS örneklerin özdirenç grafiği.....	50
Şekil 32. Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü.....	51
Şekil 33. Saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin taşıyıcı yoğunluğu grafiği.....	52
Şekil 34. Karanlık ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin elektron hareketliliği grafiği.....	53
Şekil 35. Aydınlık ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin elektron hareketliliği grafiği.....	54
Şekil 36. Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1 c) % 2 ve d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heteroçitlerin amper volt eğrileri.....	55
Şekil 37. Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1 c) % 2 ve d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heteroçitlerin amper volt eğrileri.....	56
Şekil 38. Aydınlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1, c) % 2, d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heteroçitlerin akım voltaj yoğunluğu.....	58
Şekil 39. Aydınlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1, c) % 2, d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heteroçitlerin amper volt eğrileri.....	59
Şekil 40. a) nCdS/pSi ikili yapının, b) nCdS/Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> /pSi üçlü yapının şematik görünüm.....	61
Şekil 41. nCdS/pSi heteroçitlerinin dalga boyuna göre duyarlık spektrumları.....	62

## TABLULAR DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Ge, Si, GaAs ve CdS yarıiletkenlerinin bazı özellikleri .....	5
<b>Tablo 2.</b> Kullanılan kimyasalların gram cinsinden kütleleri.....	31
<b>Tablo 3.</b> CdS İnce Filmlerinin Tane Boyutu.....	42
<b>Tablo 4.</b> Saf CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri .....	43
<b>Tablo 5.</b> %1 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri.....	44
<b>Tablo 6.</b> %2 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri.....	45
<b>Tablo 7.</b> %3 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri.....	46
<b>Tablo 8.</b> Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1 c) % 2 ve d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin idealite faktörleri .....	56
<b>Tablo 9.</b> Aydınlik ortamda saf ve farklı oranlarda sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin fotovoltavik değerleri .....	59

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$B$	Manyetik alan
$E$	Elektrik alan
$E_i$	Alıcı enerji düzeyi
$E_{be}$	Eksiton bağlanma enerjisi
$E_d$	Verici enerji düzeyi
$E_g$	Bant aralığı enerjisi
$E_H$	Hall elektrik alanı
$\mu$	Taşıyıcı hareketliliği
$m_e$	Elektron etkin kütlesi
$m_h$	Delğin etkin kütlesi
$n$	Elektron konsantrasyonu
$p$	Delik konsantrasyonu
$h$	Plank sabiti
$j$	Akım yoğunluğu
$k$	Dalga vektörü
$k_B$	Boltzman sabiti
$R_H$	Hall sabiti
$v_e$	Elektronun hızı
$v_h$	Delğin hızı
$\sigma$	Elektriksel iletkenlik
$\nu$	Frekans
$\varepsilon$	Kristalin dielektrik katsayısı
$\alpha$	Soğurma katsayısı
$\tau$	Taşıyıcı ömrü
$\mu_e$	Elektron hareketliliği
$\tau_e$	Elektron sürüklenme zamanı
$\tau_h$	Delğin sürüklenme zamanı
$\mu_h$	Delik hareketliliği
$\rho$	Yoğunluk

$V_{oc}$  Açık devre gerilimi

$I_{sc}$  Kısa devre akımı

# 1. GENEL BİLGİLER

## 1.1. Giriş

Fosil yakıtlarının giderek tükenmesi, çevre kirliliği ve küresel ısınmaya sağladığı olumsuz katkılar yenilenebilir enerji kaynaklarının araştırılmasını ve üretilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bu yüzden bilim adamları rüzgâr enerjisi, nükleer enerji, güneş enerjisi ve güneş pilleri gibi alternatif enerji kaynakları üzerinde araştırmalar yapmaya yöneldiler. Bu enerji kaynakları arasında güneş pilleri önemli yere sahiptir. Enerji kaynağı olarak güneş mevcut olan enerji kaynaklarından daha uzun ve sabit olduğundan dolayı alternatif enerji üretiminde enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır.

1839 yılında Henri Becquerel, aynı elektrolitik çözelti içerisine daldırılmış olan iki elektrottan birinin üzerine foton düşürüldüğünde bu iki elektrot arasında bir potansiyel fark meydana geldiğini gözlemledi. Bu fotovoltajik olay güneş pilleri ile ilgili çalışmaların temelini oluşturdu. Güneş pili, aynı veya farklı kimyasal malzemelerden oluşan, fakat farklı iletkenlik türüne (n ve p-tipi) sahip iki yarıiletkenin bir araya gelmesiyle oluşur. Bu tür güneş pillerinde, foto-üretilmiş taşıyıcıların toplandığı ön ve geri kontak ve foto-üretilmiş taşıyıcıları kontaklara transfer eden bir iç elektrik alan vardır.

Günümüzde güneş pili uygulamalarında çok değişik malzemeler çalışılmaktadır. Güneş pili için malzeme seçimi o malzemeden yapılacak olan cihazın verimine bağlıdır. Yüksek verime sahip cihaz için 1,5 eV civarında 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. Bu nedenle yaklaşık 1,45 eV yasak enerji aralığına sahip CdTe güneş pilleri için uygun bir soğurma malzemesidir. Araştırmacılar günümüzde CdS/CdTe, CdS/InP, CdS/CuIn(Ga)Se<sub>2</sub> ve CdS/Cu<sub>2</sub>S gibi değişik güneş pilleri üzerinde çalışmalar yapmaktadır. Bu güneş pillerinin en önemli olumsuzlukları yaşam süreleri ve verimlerinin az olmasıdır. Bunun nedenlerinden bir tanesi optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS nin sürekli olarak dış radyasyona maruz kalması ve buna bağlı olarak

kristal yapısının değişiminden kaynaklanmaktadır. Bu olumsuzluğu önlemek için CdS ye farklı safsızlık atomları difuz ederek dayanıklı hale getirilmesi çalışmaları yürütölmektedir. Bu safsızlıklara örnek olarak In, Sn, Zn, Pb, vb kimyasalları gösterebiliriz.

Bu tez çalışmasında güneş pillerinde, optik pencere katmanı olarak kullanılan CdS ince filmlerine farklı oranlarda sodyum katkılanarak bazı karakteristik özelliklerinin incelenmesi amaçlandı.

## 1.2. Yarıiletkenler Hakkında Genel Bilgi

Silisyum ve germanyum gibi önemli yarıiletken malzemeler, elmas yapıda kovalent bağlı kristaller oluştururlar. GaAs ve InSb gibi yarıiletken bileşikler ise çinko sülfüre benzer yapı oluştururlar. Mutlak sıfır sıcaklığında en yüksek işgal edilmiş enerji bandı tümüyle doludur. Bu bant, kovalent bağlanmadan sorumlu elektronları içerdiği için, değerlik bandı olarak bilinir. En düşük işgal edilmemiş enerji bandı iletim bandı olarak bilinir ve değerlik bandından tipik olarak 1 eV (yarıiletkenler için;  $0 < E_g < 4$  eV) mertebesindeki bir aralık ile ayrılır. Yarıiletken davranış,  $\varepsilon(k)$  enerji dağılım bağıntıları Şekil 1'de gösterildiği gibi olmak üzere, değerlik bandının tepesine ve iletim bandının tabanına yakın durumlardaki elektronların hareketi ile açıklanır.

Enerjinin bir maksimumuna veya minimumuna yakın durumlar ile ilgilenildiği için dağılım eğrisi  $\varepsilon(k)$  iyi bir yaklaşıklıkla parabolik olarak alınabilir ve iletim bandı için;

$$\varepsilon = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e} \quad (1)$$

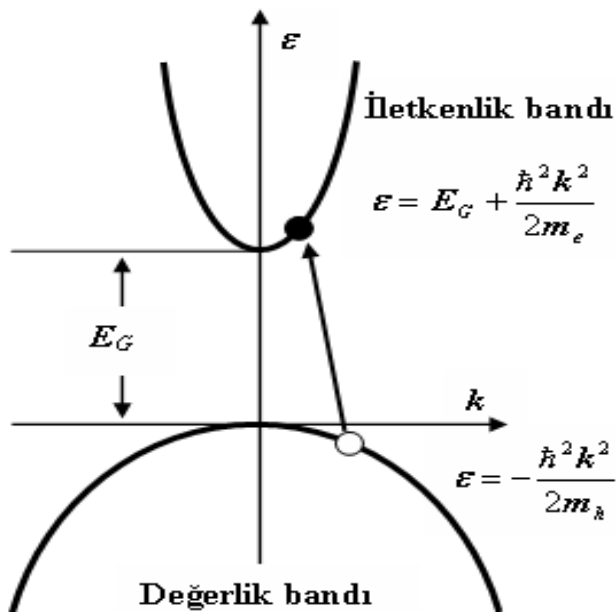
değerlik bandı için;

$$\varepsilon = -\frac{\hbar^2 k^2}{2m_h} \quad (2)$$

yazılabilir.

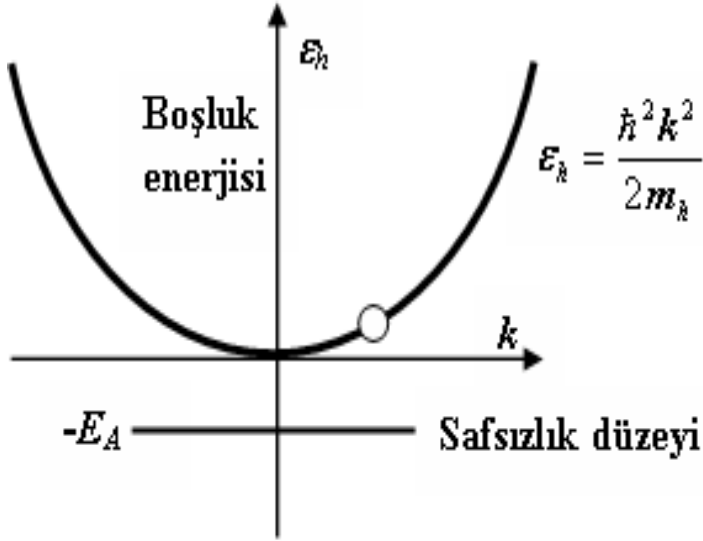
Burada, değerlik bandının tepesi potansiyel enerjinin sıfırı olmak üzere,  $E_g$  yasak enerji aralığı enerjisidir. İletkenlik bandının dibine yakın elektronlar, bu nedenle, pozitif  $m_e$  kütleli serbest parçacıklar gibi davranırlar. Bununla birlikte değerlik bandında daha aşağı durumlardaki elektronların pozitif etkin kütlelere sahip olmalarına karşın, değerlik bandının tepesine yakın durumda olanlar, negatif bir  $-m_h$  kütlelerine sahip gözüktürler. Yaklaşık dolu bir değerlik bandının davranışı, doldurulmuş durumları tamamen ihmal ederek ve her bir boş durumun pozitif yüklü  $|e|$ , pozitif kütleli  $m_h$  ve  $\hbar^2 k^2 / 2m_h$  enerjili bir parçacıkla işgal edilmiş olduğu göz önüne alınarak hesaplanabilir. Bu hayali parçacıklara boşluklar (hole) denir.

Bir dış elektrik ve manyetik alanda bu boşluklar sanki pozitif e yüklüymüş gibi davranırlar. Yarıiletkende toplam akım iletim bandındaki elektronlardan ve değerlik bandındaki boşluklardan ileri gelen katkıların toplamı olarak yazılabilir. Bu nedenle yarıiletkendeki elektron ve boşluklara yük taşıyıcıları denir.



Şekil 1. Değerlik bandının tepesine ve iletim bandının dibine yakın elektronlar için dağılım bağıntıları





Şekil 2. Değerlik bandındaki boşluklar için dağılım bağıntıları

Elektrik akımını geçiren iki tür iletken vardır: elektronik geçişli ve iyonik geçişli iletkenler. Metallerde elektrik akımı taşıyıcıları elektronlar olduğu için metaller elektron iletkenidir. İyonik iletkenlerde elektrik akımı malzemenin iyonları ile taşınır ve iyonik iletkenin kompozisyon akımın geçtiği zamanla değişmektedir. Elektrolitler iyon iletkenler grubunda olabilirler. Yarıiletken malzemeler hem elektron hem de iyon iletkenliğine sahip olabilirler. Yarıiletkenlerin çoğunluğu, silisyum Si, germanyum Ge, selenyum Se, telluryum Te ve bileşik yarıiletkenler GaAs, GaP, InSb, InP, CdS, CdSe, CdTe, ZnS, PbS, PbSe, SiC vb, elektron iletkenliğine sahiptirler. Tablo 1’de Ge, Si, GaAs ve CdS yarıiletkenlerinin bazı özellikleri verilmektedir.

Isı enerjisi etkisiyle yarıiletkenlerde serbest yük taşıyıcılarının (elektronların ve deliklerin) yoğunluğunu artmaktadır. Bu yöntemle meydana gelen yük taşıyıcılarına ısısal veya dengeleyici yük taşıyıcıları denir. Bundan başka, serbest yük taşıyıcıları ışık, elektrik alan, basınç,  $\gamma$ -ışınları, hızlı parçacıkların (elektronların, protonların, nötronların, iyonların vb bombardımanı) etkisiyle oluşabilir. Bu yöntemlerle meydana gelen yük taşıyıcıları denkleştirilmemiş yük taşıyıcıları olarak tanımlanırlar.

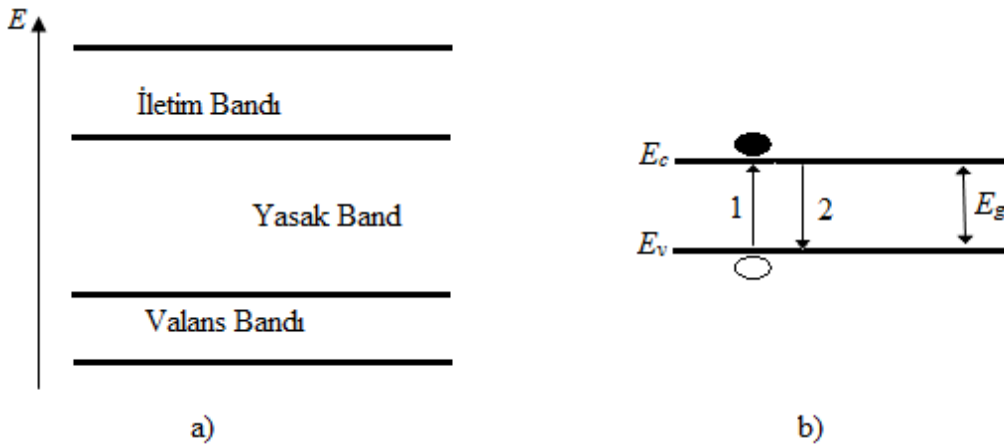
**Tablo 1.** Ge, Si, GaAs ve CdS yarıiletkenlerinin bazı özellikleri

Özellik	Ge	Si	GaAs	CdS
Erime noktası (°C)	936	1420	1238	1475
Örgü parametresi (nm)	0,565	0,543	0,565	0,583
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	5,33	233	5,32	4,82
Elektron mobilitesi	3800	1350	6700	400
Delik mobilitesi	1800	480	400	15
Taşıyıcı yoğunluğu	2,4x10 <sup>13</sup>	1,5x10 <sup>10</sup>	1,5x10 <sup>6</sup>	
Dielektrik katsayısı	16	12	10,9	9
Kırınım indisi	4	3,9	3,4	2,5
Yasak band aralığı (eV)	0,67	1,1	1,41	2,42

Yarıiletkenler özellikleri dış etkenlere karşı nasıl açıklayabiliriz? Metallerde atomlar tam olarak iyonlanmış durumdadır ve serbest elektronların yoğunluğu ( $n = 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ) atomların yoğunluğuna eşittir. Bu nedenle metallerin özellikleri dış etkilerle çok az değişmektedir. Katkısız yarıiletkenlerde ise serbest elektronların yoğunluğu ( $n = 10^{13}-10^{15} \text{ cm}^{-3}$ ) ana atomların yoğunluğundan ( $10^{22} \text{ cm}^{-3}$ ) çok azdır. Yarıiletken atomların dış etkilerle (ışık, elektrik alanı, basınç, hızlı parçacıklarla bombardıman vb.) iyonlaşması ve böylece serbest elektron yoğunluğunun keskin bir şekilde değişmesi mümkündür. Bunun neticesinde yarıiletken özellikleri de keskin değişebilmektedir.

Serbest yük taşıyıcıların oluşma yöntemleri yarıiletkenin kristal yapısına, kompozisyonuna ve katkı atomlarının bulunmasına bağlıdır. Çok az miktardaki ( $10^{-3}-10^{-8}$ ) katkı atomları yarıiletkenin iletkenliğini keskin ( $10^8$  kata kadar) değiştirebilir. Böylece, yarıiletkenin öz direnci oda sıcaklığında  $\rho = 10^{-4}-10^{10} \text{ } \Omega\text{-cm}$  (veya iletkenliği  $\sigma = 10^{-4}-10^{10} \text{ } \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ ) aralığında olabilir. Öz direncin katkı ile veya dış etkilerle (ısı, ışınlanma, elektrik ve manyetik alanlar, basınç,  $\gamma$ -ışınları, hızlı parçacıklarla bombardıman vb.) kuvvetli bağımlılığı yarıiletkenin esas niteliğidir.

Kuantum teorisine göre izole edilmiş atomda elektronların enerjisi kesikli olarak değişebilir. Pauli ilkesine göre atomun her enerji düzeyine en çok iki ters yönlendirilmiş spinlere sahip elektronlar yerleşebilir. Yarıiletken malzeme oluştuğunda yani atomlar birbirine çok yaklaştığında (yaklaşık  $10^{-8}$  cm), komşu atomların kuvvetli elektrik alanı etkisiyle valans elektronlarının enerji düzeyi bantta ayrılır. Valans elektronlarından oluşan enerji bantına valans bandı denir (Şekil 3.a). Atomlardaki valans elektronlarının uyarılma düzeylerinden oluşan bant serbest veya iletim bandı olarak adlandırılır. İletim ve valans bantları arasında yasak bant bulunmaktadır. Temiz (özden) yarıiletkenin enerji bant diyagramı Şekil 3.b'de gösterilmektedir. Burada  $E_c$  iletim bandındaki en küçük enerjisidir. Bu enerji düzeyine iletim bandının dibi denir.  $E_v$  valans bandındaki elektronların en büyük enerjisidir ve bu enerji düzeyi valans bandının tavanı olarak adlandırılır. İletim bandının dip ve valans bandının tavan aralarının farkı  $E_g = E_c - E_v$  yarıiletkenin yasak enerji bant genişliğini karakterize eder. Kusursuz ve katkısız yarıiletkenlerde elektronların enerjisi yasak bant enerjileri içinde olamaz. Yasak bant genişliği yarıiletkenlerin kimyasal bağ türü ve atomların türü ile belirlenir. Farklı yarıiletkenlerin yasak bant genişliği 0,1 eV'dan 5 eV'a kadar değişebilir.



**Şekil 3.** a) Temiz (özden) yarıiletkenin enerji bandlarının ve b) enerji band diyagramının şematik gösterimi

Yarıiletkenlerin yasak bant genişliği sıcaklık arttıkça değişir. Bu olayın nedenleri kristaldeki atomların ısısal titreşim genliğinin ve atomlar arası uzaklığın

sıcaklıkla değişmesine bağlıdır. Yarıiletkenlerin çoğunda sıcaklık arttıkça yasak bant genişliği küçülmektedir.

Isı enerjisinin etkisiyle kristaldeki atomlar arası bağlar kopabilir ve bu bağın elektronu serbest kalabilir. Atomlar arası bağdan kopan elektronun yerinde boşluk meydana gelir ve bu boşluğa delik denir. Bu olay elektron–delik çiftlerinin oluşması (veya jenerasyonu) olarak tanımlanır. Bu olayın sonucunda iletim bandında serbest elektron ve Valens bandında serbest delik meydana gelir. Aynı zamanda yarıiletkende bu olayın tersini de gözlemlemek mümkündür. Bu olaya da elektron–delik çiftlerinin birleşmesi (veya rekombinasyonu) denir. Şekil 3.b’de bu iki olay, elektron–delik çiftlerinin oluşması ve birleşmesi, şematik olarak 1 ve 2 geçişleriyle gösterilmektedir. Termodinamik denge durumunda yük taşıyıcılarının (elektronların ve deliklerin) oluşma ve birleşme olayları karşılıklı denkleştirilmiştir. Bu durumda yarıiletkende dengede elektronlar ( $n_o$  yoğunluklu) ve delikler ( $p_o$  yoğunluklu) gözlemlenmektedir. Isısal olmayan etkiyle de (ışık, elektrik alanı, basınç, hızlı iyonlar, protonlar ve elektronlarla bombardıman vb.) yarıiletkende yeni yük taşıyıcılar meydana getirilebilir. Bu durumda elektronların ( $n$ ) ve deliklerin ( $p$ ) dengede olmayan yoğunluğu, denge yoğunluklarından ( $n_o$  ve  $p_o$ ) daha fazladır. Yani  $\Delta n = n - n_o$  ve  $\Delta p = p - p_o$  dir

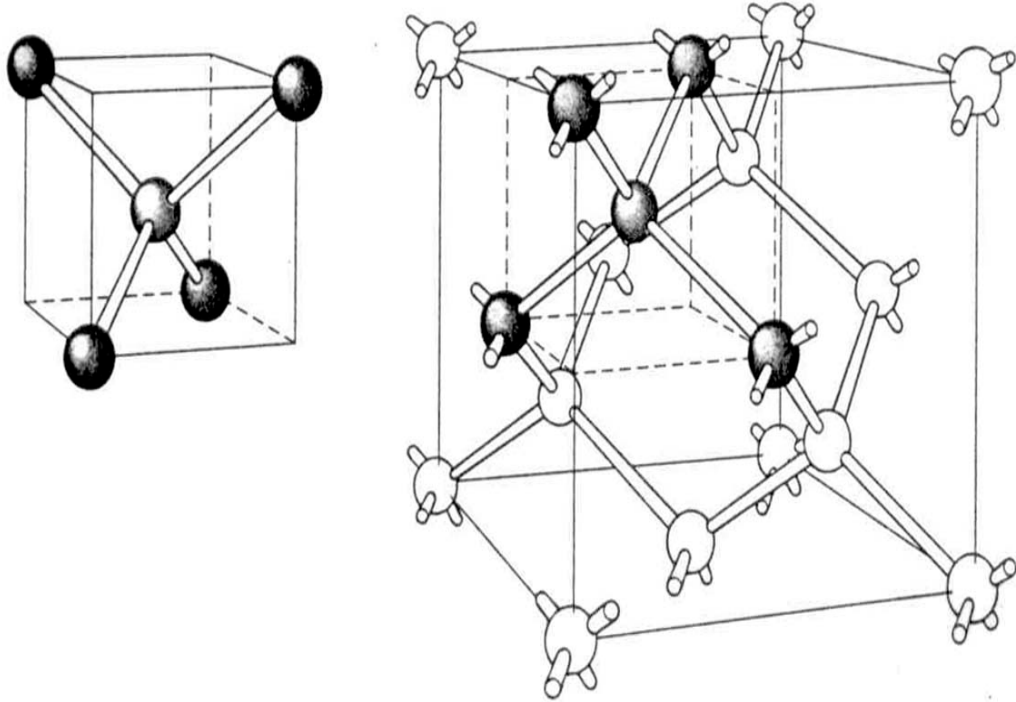
### 1.2.1. Yarıiletken Türleri

Yarıiletkenler katkı durumlarına göre iki başlık altında incelenmektedir: i) Özden yarıiletkenler ve ii) katkılı yarıiletkenler. Özden yarıiletkenlerde, iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu ile valans bandındaki serbest deliklerin yoğunluklarına eşittir. İçerisinde belirli oranlarda katkı içeren yarıiletkenlere de katkılı yarıiletkenler denir.

#### 1.2.1.1. Özden Yarıiletkenler

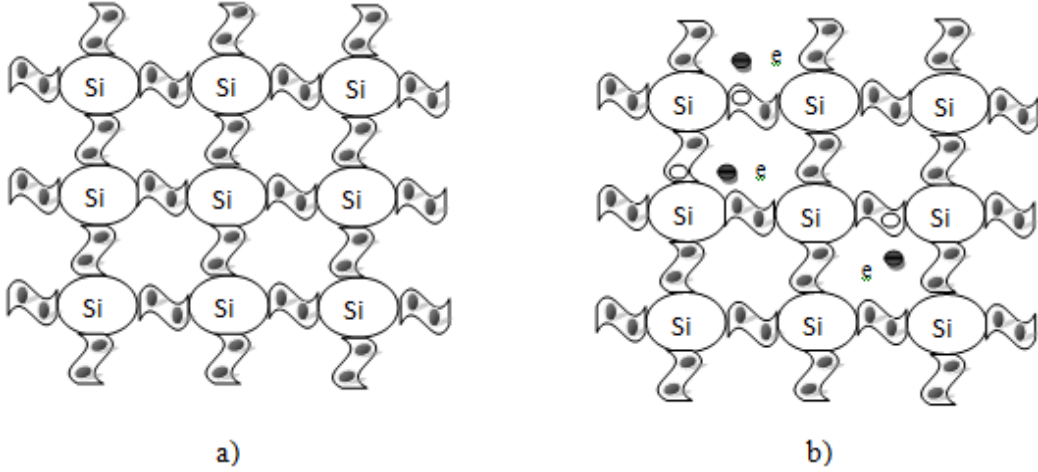
Temiz (yani katkısız ve kusursuz) silisyum yarıiletken örneğinde özden yük taşıyıcılarının üretimini göz önüne alalım. Silisyum atomu periyodik cetvelin dördüncü

grubunda bulunmaktadır ve atom kabuklarında elektron dağılımı şöyledir:  $_{14}\text{Si}$  ( $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$ ). Silisyum atomunun dış (veya valans) kabuğunda dört elektron ( $3s^2 3p^2$ ) yerleşmektedir. Silisyum kristali oluştuğunda, her silisyum atomunun dört valans elektronları ( $3s^2 3p^2$ ) durumundan ( $sp^3$ ) durumunda geçmektedirler. Silisyum örgüsünde her atom tetrahedron merkezinde yerleşmektedir ve etrafında dört komşu bulunmaktadır. Yarıiletken silisyum yapısı elmas (karbon) kristalin yapısına benzemektedir. Elmas yapıya benzer tipteki kristal örgüsü kübik yapıya sahiptir ve bu yapıda her silisyum atomunun dört valans elektronu komşu atomlarla kovalent bağla birleşirler (Şekil 4). Silisyumun her kovalent bağında iki elektron bulunmaktadır (Şekil 4'de kovalent bağlar çift çizgilerle işaretlenmektedir).



**Şekil 4.** Elmas tipli kristal örgü

Silisyum örgüsündeki kovalent bağların iki boyutta gösterimi Şekil 5'te verilmektedir. Burada örgü düğümlerinde pozitif yüklü dört silisyum iyonları yerleşmektedir. Her silisyum iyonu dört valans elektronuna sahiptir. Kovalent bağı oluşturan valans elektronları (her bağda iki elektron) Şekil 5'te koyu noktalarla gösterilmektedir.



**Şekil 5.** Silisyum örgüsünde atomlar arası bağların gösterimi a)  $T = 0$ , b)  $T > 0$

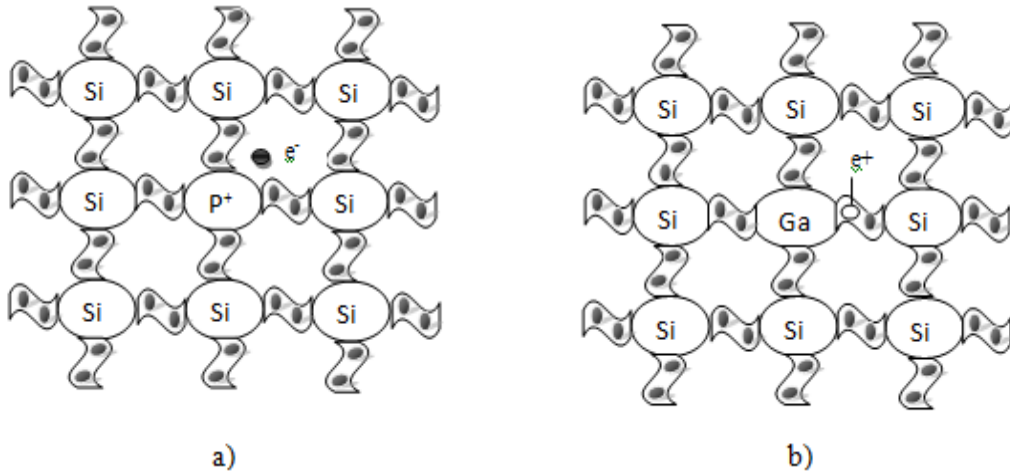
Mutlak sıfırda kovalent bağlarda hiçbir elektron eksikliği söz konusu değildir (Şekil 5.a). Isısal enerjinin etkisiyle bazı kovalent bağlarda kopma meydana gelebilir. Bunun sonucunda kopan elektron serbest kalır ve elektronun boş yerinde delik oluşur (Şekil 5.b). Böylece ısının etkisiyle silisyumda elektron ve delik çifti oluşur. Özden yarıiletkenler, valans bağlarının kopması nedeniyle, eşit sayıda serbest elektronlar ve delikler oluşması ile tanımlanır. Özden yarıiletkenlerde yasak bant enerjisi ( $E_g$ ) ana atomlar arası bağların kopma enerjisi veya elektron–delik çiftlerinin aktivasyon enerjisini karakterize eder. Dış elektrik alan özden yarıiletkene uygulandığında, elektrik akımı elektron ve delik hareketinden meydana gelir.

Özden yarıiletkende iletkenliğe katkı atomlarının etkisini ihmal edebiliriz. Mutlak sıfırda özden yarıiletkende serbest yük taşıyıcıları bulunmamaktadır yani valans bandı elektronlarla tam olarak doldurulmuştur (delikler yok) ve iletim bandında serbest elektronlar bulunmamaktadır. Sıcaklık arttıkça kırılmış valans bağların sayısı artar ve bu nedenle serbest elektronların ve deliklerin yoğunluğu artar. Özden yarıiletkenin band diyagramında serbest elektron ve deliklerin ısısal yöntemle oluşturulması, elektronların valans bandından iletim bandına geçişleri ve deliklerin valans bandında oluşması (Şekil 3. b) ile şematik olarak gösterilebilir.

### 1.2.1.2. Katkılı Yarıiletkenler

Yarıiletkenlerin çoğunluğunda oda sıcaklığında iletkenlik katkı atomlarının etkisiyle değişir. İletkenliği katkılarla belirlenen yarıiletkenlere katkılı yarıiletken denir.

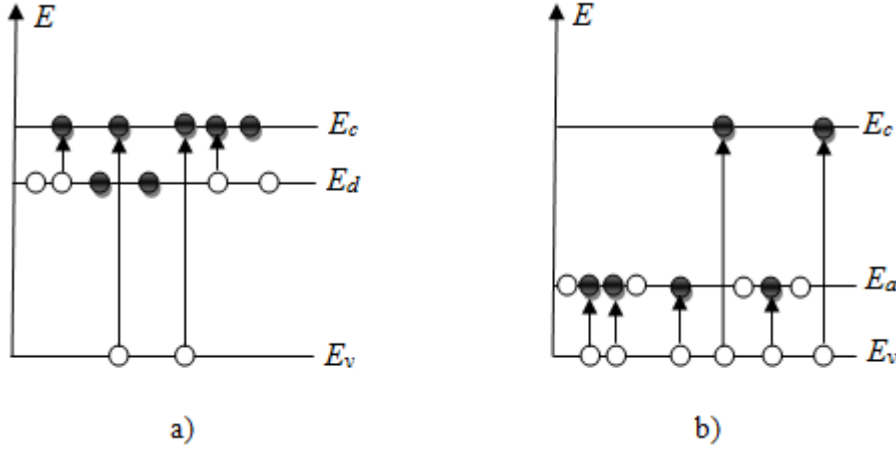
Silisyum yarıiletkeninde katkılı yarıiletkenliğin meydana gelme mekanizmasını göz önüne alalım. Silisyum örgüsünün bir düğümüne beşinci grup atomu olan fosforun P yerleştiğini kabul edelim. Fosforun elektron dağılımı ( $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^3$ ) şeklindedir ve dış (valans) kabuğunda beş elektron ( $3s^2 3p^3$ ) durumunda yerleşmektedir. Fosfor atomu silisyum örgüsünün bir düğümünü işgal ettiğinde, fosforun dört valans elektronu komşu dört silisyum atomlarıyla kovalent bağlar oluşturmaktadır (Şekil 6.a). Fosforun beşinci elektronunun kovalent bağ kurmaya imkanı yoktur. Çünkü komşu silisyum atomlarının tüm elektronları bağlara yerleşmiştir. Bu nedenle beşinci elektron fosfora zayıf bağlıdır, zira bu elektron komşu pozitif yüklü silisyum iyonlarının etkisi altındadır. Düşük sıcaklıklarda beşinci elektron fosfor atomunun etrafında bulunmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise bu elektron fosforun etkisinden ayrılabilir ve sonra kristalde serbest hareket edebilir.



Şekil 6. Silisyumdaki (a) donör, (b) akseptör tipli katkı atomunun şematik görünümü

Fosforun iyonlaşma süreci nedeniyle, fosfor atomu pozitif yüklü iyonla çevrilir. Yarıiletkende elektron veren katkı atomuna verici veya donör denir. İletkenliği donör katkısıyla karakterize olunan yarıiletkene elektron veya n-tipi yarıiletken denir. n-tipi

yarıiletkenlerde çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar ve azınlık yük taşıyıcıları deliklerdir.



Şekil 7. a) Donor, b) akseptör tipli yarıiletkenlerin bant diyagramları

Donor tipli katkı, yarıiletkenin yasağın içinde izin verilmiş enerji düzeyinin oluşmasına yol açar (Şekil 7.a). Bu enerji düzeyi iletim bandının dibinden biraz aşağıda yerleşmektedir. Ayrıca donör tipli fosfor atomunun iyonlaşma enerjisi ( $\Delta E_d$ ), yarıiletkenin ana silisyum atomları arası kovalent bağların kopma enerjisinden ( $E_g$ ) çok küçüktür. Şimdi periyodik cetvelin üçüncü grubunda bulunan galyum (Ga) atomunun silisyumdaki değişikliklerini göz önüne alalım. Galyum atom kabuklarında enerji dağılımı  $_{31}\text{Ga} (1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3d^1 4s^2 4p^1)$  şeklindedir ve valans kabuğunda üç elektron ( $4s^2 4p^1$ ) durumlarında yerleşmektedir. Dört değerlikli silisyum yarıiletkenine üç değerlikli galyum atomu girdiğinde, komşu silisyum atomlarının birinin bandı dolmamaktadır (Şekil 7.b). Galyum atomunun dolmamış bağına komşu silisyum atomundan bir elektron geçebilir. Bunun sonucunda, negatif yüklü galyum iyonu oluşur ve silisyum bağlarıyla hareket eden delik meydana gelir. Yarıiletkenlerde elektronları alan katkı atomlarına alıcı veya akseptör denir ve iletkenliği akseptör tipi katkıyla belirlenen yarıiletken, delik veya p-tipi yarıiletken olarak tanımlanır. p-tipi yarıiletkende çoğunluk yük taşıyıcıları deliklerdir ve azınlık yük taşıyıcıları elektronlardır.

Akseptör tipli katkı, yarıiletkenin yasağın içinde (valans bandının tavanın üstünde) enerji düzeyi ( $E_a$ ) oluşturur (Şekil 7.b) küçük oklarla gösterilmektedir. İyonlaşma sonucunda valans bandında serbest delikler oluşur (Caferov, 1998).



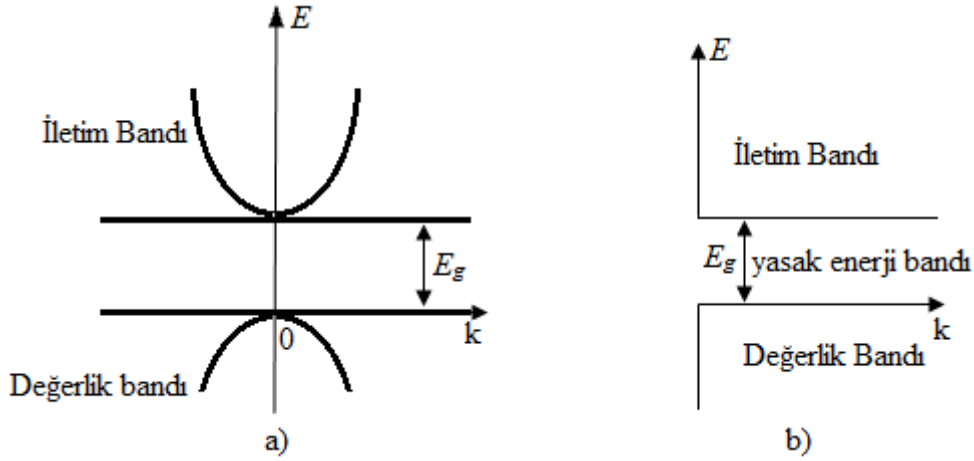
## 1.2.2. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

Katıların bant teorisi, yarıiletkenlerin elektriksel iletkenlik özelliklerini büyük bir başarı ile açıklar. Bant teorisine göre katılar sınıflandırılırken; işgal edilmiş en yüksek enerji bandının değerlik bandı olması, bu bandın  $T= 0$  K sıcaklığında tamamen dolu olması ve bu bandın üstündeki yasak enerji aralığının dar olması halinde, katının yarıiletken özelliği göstereceği ifade edilmiştir.

Yarıiletken katılarda, yukarıda ifade edildiği gibi, dolu banda değerlik bandı ve onun üstündeki banda iletim bandı denir. Metallerde değerlik bandı ve iletim bandı aynı olduğu halde, yarıiletkenlerde bu iki bant yasak enerji aralığı ile birbirinden ayrılır. Değerlik bandındaki bir elektrona, onu iletim bandına çıkarmaya yetecek kadar enerji verilmezse, elektriksel iletkenlik sağlanamaz, yani, katı yalıtkan olarak davranır. Bu yüzden, gerekli uyarma enerjisi, yasak enerji aralığının bir ölçüsüdür. Bu enerji termal, optik ve mekanik yoldan sağlanabilir. Yarıiletkenlerde  $E_g$  yasak enerji aralığı genel olarak 2 eV'dan küçük olduğundan, oda sıcaklığında uyarılan elektronların sayısı yeterli düzeye çıkmakta ve cisim yarıiletken olmaktadır.

Yasak enerji aralığını aşacak şekilde uyarılan elektronlar, değerlik bandının (DB'nin) tepesi civarında boşluklar bırakarak iletim bandının (İB'nin) tabanına geçerler ve burada Bloch elektronu olarak davranırlar. Boşluk ve elektron; dışarıdan uygulanacak bir elektrik alandan etkileneceği için, bunlar Bloch elektronlarının ve boşlukların sayıları hızla artar ve bu, yarıiletkenlerin önemli özelliklerinden biri olan elektriksel iletkenliğin sıcaklıkla artması özelliğini açıklar. Yarıiletkenlerin elektrik iletkenlikleri, metallerinki ile karşılaştırıldığında küçük olmakla beraber, pratik amaçlara yetecek kadar da büyüktür.

Katkısız yani saf yarıiletkenlerle uğraşırken sadece değerlik bandı (DB) ve iletim bandı (İB) ile ilgilenilir. Çünkü sadece bu iki band önemli ölçüde akıma katkıda bulunur. Değerlik bandından daha düşük enerjili olan bandlar tamamen doludurlar ve iletim bandından daha yüksek enerjili bandlar ise tamamen boştur. Bu yüzden elektriksel iletme katkıda bulunmazlar.



Şekil 8. a) Bir yarıiletkenin bant yapısı b) a)'daki bandın şematik gösterimi

Band uçları, birinci Brillouin bölgesinin merkezinde olan bir yarıiletkenin en basit yapısı yukarıdaki şekilde gösterilmektedir. İletim elektrolarının çoğu, iletim bandının tabanı civarında bulunacağından, bu bandı bu bölgede küresel yapıda almak mümkündür. Bu yapıldığında Şekil 8'deki iletim bandının enerjisi

$$E_i(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{(2m_e)} \quad (3)$$

ile ifade edilebilir. Burada  $m_e$  elektronun etkin kütesidir ve enerjinin sıfırı değerlik bandının tepesinde seçilmiştir. Değerlik bandının enerjisi ise

$$E_d(\vec{k}) = -\frac{\hbar^2 k^2}{(2m_h)} \quad (4)$$

'dir. Burada  $m_h$ , boşluğun etkin kütesidir. Değerlik bandının şekli ters dönmüş parabol olması nedeniyle, bu bandın tepesindeki bir elektronun etkin kütesi eksi işaretli, yani,  $m_e = -m_h$  'dir. Fakat boşluğun etkin kütesi artı işaretlidir.

Yarıiletkenlerin yasak enerji aralığı sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir fakat bu değişme büyük değildir. Değişmenin sebebi ise, ısınma sonucu kristalin örgü sabitinin

değişmesidir.  $E_g$ , uygulanan basınçla da değişir. Bu yüzden, özelliklerinin bazıları yüksek basınç altında incelenir (Dikici., 2012).

### 1.2.3. Yarıiletkenlerde Elektriksel İletkenlik

Taşıyıcıların elektrik ve manyetik alanlardaki hareketini açıklamak için; elektronlar için

$$m_e \left( \frac{d\vec{v}_e}{dt} + \frac{\vec{v}_e}{\tau_e} \right) = -e\vec{E} - e\vec{v}_e \times \vec{B} \quad (5)$$

ifadesi ve delikler için

$$m_h \left( \frac{d\vec{v}_h}{dt} + \frac{\vec{v}_h}{\tau_h} \right) = +e\vec{E} + e\vec{v}_h \times \vec{B} \quad (6)$$

ifadesi kullanılır.

Sadece bir doğru akım elektrik alanı bulunduğu denklemler (5) ve (6)'nın çözümleri,

$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e} \vec{E} = -\mu_e \vec{E} \quad (7)$$

$$\vec{v}_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \vec{E} = \mu_h \vec{E} \quad (8)$$

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

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e}, \mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h} \quad (9)$$

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

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = \left( \frac{ne^2\tau_e}{m_e} + \frac{pe^2\tau_h}{m_h} \right) \vec{E} \quad (10)$$

$$\vec{j} = (ne\mu_e + pe\mu_h) \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (11)$$

'dir. Bu bağıntı,  $\sigma$  elektriksel iletkenliği

$$\sigma = ne\mu_e + pe\mu_h \quad (12)$$

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

#### 1.2.4. Hall Olayı

Taşıyıcıların elektrik ve manyetik alanlardaki hareketini açıklamak için denklem (5) ve (6) kullanılmaktadır.

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

$$\vec{E}_H = R_H \vec{B} \times \vec{j} \quad (13)$$

Bu Hall olayıdır ve  $R_H$  Hall sabiti olarak bilinir. Deneyin geometrisi Şekil 9'da gösterilmiştir. Olayın başlangıcı manyetik alan içinde iletim elektronlarına etkiyen  $-e\vec{v} \times \vec{B}$  Lorentz kuvvetidir. x yönünde  $\vec{j}$  akımına karşılık gelen elektronların  $\vec{v}$  sürüklenme hızının yönünü göstermektedir. Şekil 9 Lorentz kuvveti elektronları aşağıya doğru saptırma eğilimi gösterir ve bu da metalin alt yüzünde negatif yük yoğunluğunun hızlı birikimine sebep olur. Sonuçta -y yönünde meydana gelen  $\vec{E}_H$  elektrik alanı, uçlarında elektriksel bağlantıları olan uzun bir çubukta olduğu gibi, akımın x yönünde akmasının devamına neden olur.

Böylece,  $v_y = 0$  olan kararlı durumda, bu geometride (5) hareket denkleminin x ve y bileşenleri,

$$m_e v_x / \tau = -eE_x \quad (14)$$

biçimindedir. Bu denklemlerin ilki,  $\sigma$  elektriksel iletkenliğinin manyetik alanın varlığından etkilenmediğini gösterir. İkinci denklemden

$$E_y = v_x B = j_x B / (-ne) \quad (15)$$

elde edilir. Bu denklem, denklem (14) ile karşılaştırılırsa,

$$R_H = -1/ne \quad (16)$$

sonucuna ulaşılır.

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

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

ve p-tipi yarıiletken ( $p \gg n$ )

$$R_H = +\frac{1}{pe} \quad (18)$$

ifadeleri kullanılabilir. Hall olayının işareti çoğunluk yük taşıyıcının işareti ile belirlenir ve  $R_H$ 'in ölçülmesi taşıyıcı yoğunluğunun belirlenmesini mümkün kılar. Denklem (12), (8) ve (9) denklemleriyle birleştirilirse ve iletkenlikte çoğunluk taşıyıcılarının baskın olduğu varsayılırsa taşıyıcı hareketliliği için,

$$\mu = |R_H| \sigma \quad (19)$$

ifadesine ulaşılır.

Kristalde hem elektronların ve hem de deliklerin önemli oranlarda var olduğu durumda Hall katsayısının hesaplanması daha karmaşıktır. Denklem (11) ve (12)'in kararlı durum çözümleri,

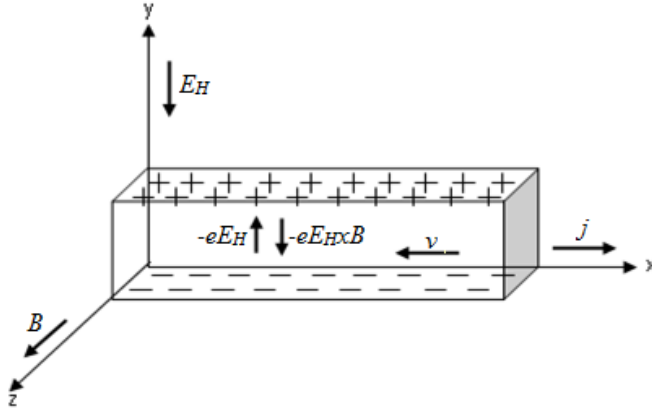
$$\vec{v}_e = -\frac{e\tau_e}{m_e} (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) = -\mu_e (\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) \quad (20)$$

$$\vec{v}_h = \frac{e\tau_h}{m_h} (\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) = \mu_h (\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (21)$$

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

$$\vec{j} = -ne\vec{v}_e + pe\vec{v}_h = ne\mu_e(\vec{E} + \vec{v}_e \times \vec{B}) + pe\mu_h(\vec{E} + \vec{v}_h \times \vec{B}) \quad (22)$$

olur. Şekil 9'daki deneysel geometri ele alınırsa, bu geometri için sınır koşulları,  $j_y = 0$  olmasını gerektirir.



Şekil 9. Hall olayının geometrisi

Taşıyıcı hızlarının y bileşenlerinin  $B$ 'ye göre lineer olduğu ve  $B$ 'ye göre sadece birinci mertebeye kadar terimlerin tutulduğu dikkate alınırsa,

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

$$j_y = 0 = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) - eB_z(n\mu_e v_{ex} + p\mu_h v_{hx}) \quad (23)$$

denklem (22) ve (23) kullanılırsa

$$j_y = eE_y(n\mu_e + p\mu_h) + eB_z E_x (n\mu_e^2 - p\mu_h^2) \quad (24)$$

ifadeleri elde edilir. Bu iki denklem arasında  $E_x$  yok edilirse

$$E_y = -\frac{j_x B_z (n\mu_e^2 - p\mu_h^2)}{e(n\mu_e + p\mu_h)^2} \quad (25)$$

ifadesi elde edilir. Hall katsayısının tanımından (denklem (13))

$$R_H = \frac{(p\mu_h^2 - n\mu_e^2)}{e(p\mu_h + n\mu_e)^2} \quad (26)$$

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

### 1.3. II–VI Bileşiklerinin Doğal Yapısı

#### 1.3.1. Giriş

II–VI grubu bileşikleri hala önemli bir araştırma konusudur. III–V grubu bileşikleri yanında, II–VI grubu bileşikleri, IV. Grup element türü yarıiletkenlere alternatif bir çalışma konusu olarak sunulmuştur. 1950’li yılların başlarında yarıiletken teknolojisindeki büyüme, silisyum ve germanyumun sınırlı kullanım alanlarını ortaya çıkardı. Bu sınırlama, daha çok bu element türü yarıiletkenlerin yasak enerji aralıklarının büyüklüğü ve karakteri açısından sahip olduğu dezavantajlardan kaynaklanıyordu. Yasak enerji aralığının genişletilmesi ile ilgili ilk çalışmalar III–V grubu bileşiklerinde yapılmıştır. Bunlar arasında InSb ve GaAs, sırasıyla küçük ve büyük enerji aralığına karşılık gelen, yarıiletken bileşikler olarak gösterilebilirler. III–V grubu bileşiklerindeki bu gelişmelere paralel olarak II–VI grubu bileşiklerinde de sistematik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmaların sonuçları, daha çok II–VI bileşiklerinin genel doğası ve oda sıcaklığında geniş bant aralığına sahip malzemelerin kimyasal kararlılığı hakkında bilgiler verdi. Doğrudan enerji aralığının (direct energy



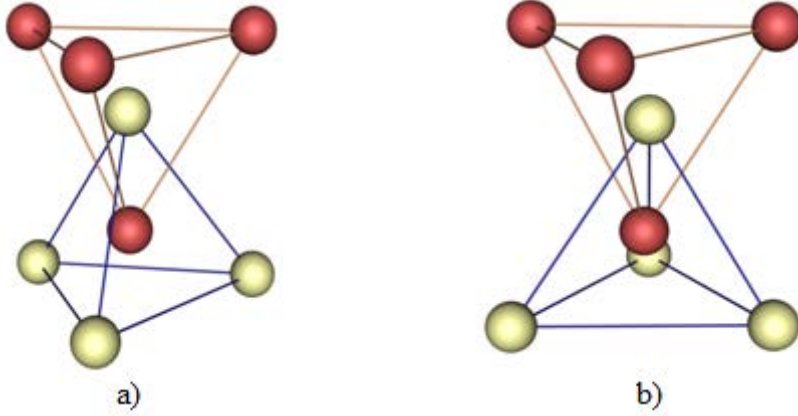
gap), II–VI bileşiklerinin genel bir karakteri olduğu anlaşılmaktadır. HgTe'in yarı–metalik, CdS ve CdSe'in yüksek fotoiletkenlik ve ZnS'in ise güçlü bir lümünansas özellik göstermeleri, II–VI grubu bileşiklerinin çeşitli alanlarda yararlı olabileceklerini göstermektedir.

II–VI grubu bileşiklerinin bazıları iki tür kristal yapısından birini tercih ederler. Bu kristal yapıları çinko blende (kübik örgülü) ve wurtzite yapılarıdır. Bu yapıların her ikisi de tetrahedral örgü konumları ile karakterize edilirler.

### **1.3.2. II–VI Bileşiklerinin Kristal Yapılar**

#### **1.3.2.1. Örgü Konumları**

II. ve VI. grup elementlerin bir araya gelmeleri, ortalama olarak atom başına dört değerlik elektronunun ortaya çıkmasına neden olurlar. Burada atomlar arasında, elektron transferinden ziyade, elektron paylaşılması eğiliminin olduğu, tetrahedral örgü konumlarının oluşumuna yol açılır. AB bileşiğindeki tetrahedral bir örgü konumu, öyle bir konumdur ki, her bir A atomu simetrik olarak dört tane en yakın B atomları tarafından çevrelenmiştir. Bu durumun oluşması için B atomları bir tetrahedron (dört–yüzlü)'ün köşelerine, A atomu ise bu dört yüzünün geometrik merkezine konulmalıdır. A ve B konumları, bunların dörtlü bağlanma doğası dikkate alındığında, birbirine eşdeğerdir. Bu dörtlü konumların birleşimi, ilgilendiğimiz bileşiklerle ilişkili olan, olası iki biçim ortaya çıkarır. Şekil 10.a, iç içe giren iki tane dört–yüzlünün taban üçgenlerinin birbirine paralel ve düşey olarak aynı hizada oldukları andaki durumu göstermektedir. Şekil 10.b, taban üçgenlerinin yine paralel fakat dikey çizgiye göre 60° dönmüş hali göstermektedir.

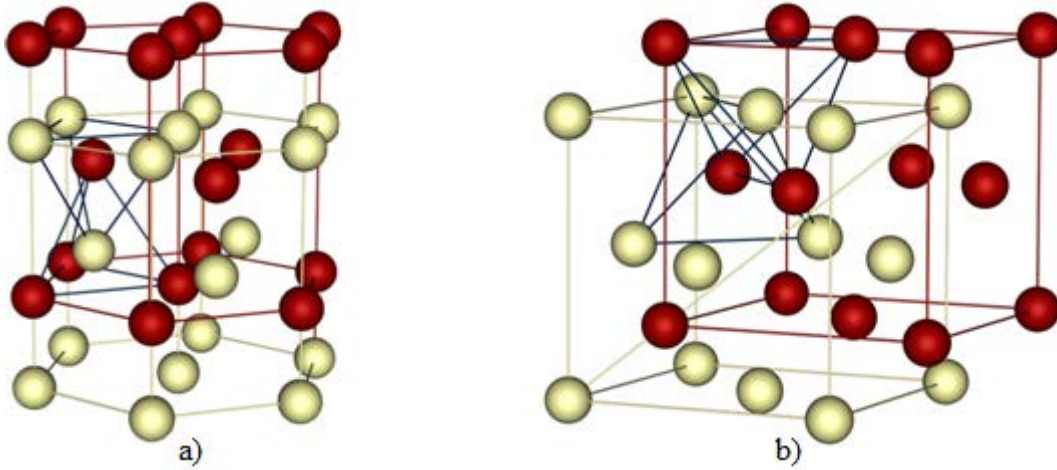


Şekil 10. Tetrahedral örgü konumları

### 1.3.2.2. Kristal Yapılar

Dörtlü örgü konumlarının bu iki tür birleşimi, wurtzite ve çinko-blende gibi iki tane kristal yapıya yol açar.

**a) Wurtzite:** Hekzagonal kristal sınıfında olan wurtzite yapısı, Şekil 10.a'da görülen tetrahedron konumlarının birleşimine sahiptir. Bu yapı, Şekil 10.a'da görüldüğü gibi, hekzagonal  $c$  eksenini boyunca  $(3/8)c$  mesafesi kadar birbirinden kaydırılmış iç içe geçmiş iki tane hekzagonal örgüyü içerir. İdeal tetrahedral konumlara sahip wurtzite yapısında en yakın komşu mesafesi  $(3/8)c$  veya  $\sqrt{\frac{3}{8}}a$  dır; bu da  $c/a$  oranı için  $\sqrt{\frac{8}{3}} = 1,632$  değerini verir. BeO, ZnO, ZnS, CdS, ZnSe, CdSe ve MgTe gibi malzemelerin tümünün wurtzite yapıda kristalleştikleri gözlenmiştir.



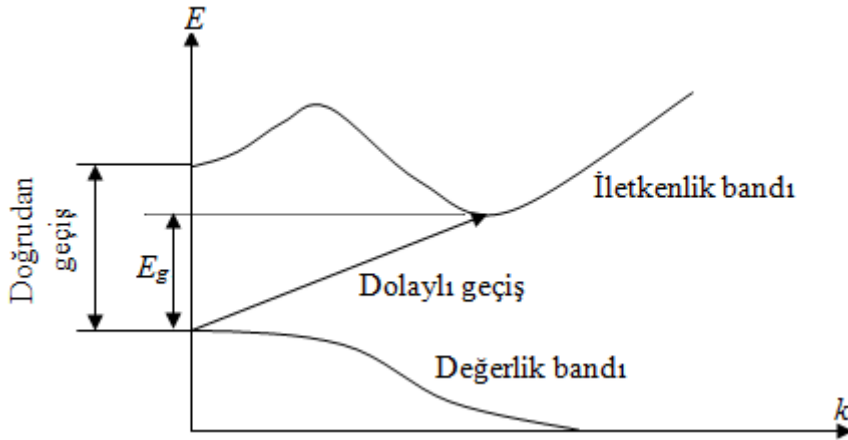
Şekil 11. a) Wurtzite yapısı, b) Çinko–blende yapısı

**b) Çinko–blende:** Kübik kristal sınıfında olan çinko–blende yapısı Şekil 10.b’de görüldüğü gibi, tetrahedron konumların birleşimine sahiptir. Bu yapı, elmas yapısından türetilmiş olup, Şekil 11.b’de görüldüğü gibi, hacim köşegeni boyunca, hacim köşegeninin  $1/4$ ’ü kadar ötelenerek iç içe geçmiş olan iki tane sıkı–paket kübik örgünün birleşiminden oluşmuştur. Bu durumda en yakın komşu mesafesi  $\sqrt{3}a/4$ ’tür. Berilyum, çinko, kadmiyum ve civanın sülfürleri, selenürleri ve tellürlerinin tümü çinko–blende yapısında kristalleşmişlerdir. Bu iki yapı, çinko–blende’nin  $[111]$  üç–katlı eksen ve wurtzite yapının  $[001]$  altı–katlı ekseninden karşılaştırılabilir. Çinko–blende’deki iç içe geçmiş iki dört–yüzlü,  $[111]$  eksen etrafında döndürülürse, yapı, wurtzite yapısına dönüşür ve simetri eksen  $[001]$  eksen olur. Bir bileşiği oluşturan iki cins atomun elektronegativite farklarının karşılaştırılması, atomik elektronegativite farkları büyüdükçe, wurtzite yapının daha uygun olduğunu göstermektedir.

### 1.3.2.3. II–VI Bileşiklerinin Optik Özellikleri

Spektrum soğurma kenarı bölgesi araştırılan malzemeler hakkında önemli bilgiler sağlar. II–VI grubu bileşiklerinin incelenmesinde meydana gelen diğer bir özellik eksiton durumlarının varlığı şeklinde ortaya çıkar. Bunlar, absorpsiyon kenarının uzun dalga boyu tarafında pikler olarak görünür. Bu seviyeler,  $E_c$ ’nin altında kesikli parabolik bantların bir serisini oluştururlar. İletkenlik bandının dibi olan bu  $E_c$ , II–VI grubu bileşiklerinde  $\vec{k} = 0$ ’a yerleşmiştir.

Işınım absorpsiyonu, iletkenlik ve değerlik bantları arasında elektronik geçişlere neden olur ve bu geçişler doğrudan ve dolaylı olmak üzere iki şekilde oluşur. Doğrudan geçiş, elektronların  $\vec{k}$  değerinde (momentumunda) bir değişim olmayan uyarma sürecidir. Dolaylı geçişte elektronun kristal içindeki momentumu (değeri) değişir. Doğrudan geçiş, değerlik ve iletim bantlarının ekstrem noktaları (maksimum ve minimum) Brillouin bölgesinde aynı noktaya yerleştiği zaman gerçekleşir. Dolaylı geçiş ise bant ekstrem noktaları  $\vec{k}$  uzayında farklı konumlardayken meydana gelir. Şekil 12, her iki tip geçişi göstermektedir. Dolaylı geçiş süreci, kristal momentumunu dengelemek için, fononların oluşmasını veya yok olmasını gerektirir. Deneysel olarak doğrudan ve dolaylı süreçler arasındaki farkı, absorpsiyon sabitinin aldığı değerlere göre belirlemek mümkündür. Doğrudan geçişlerde absorpsiyon sabiti  $\alpha$ ,  $10^4-10^5 \text{ cm}^{-1}$  arasında değerler alabilir. Dolaylı geçişte ise absorpsiyon sabiti,  $10-10^3 \text{ cm}^{-1}$  arasında değerler alabilir. Bunun ötesinde doğrudan geçişte  $\alpha$ ,  $E^{1/2}$  şeklinde, dolaylı geçişte ise  $E^2$  şeklinde enerjiye bağlıdır.



Şekil 12. Doğrudan ve dolaylı geçiş

Eksiton durumlarının kenar spektrumunda oluşturduğu değişiklik, düşük sıcaklık çalışmalarında kendini gösterir. Absorpsiyon kenarının uzun dalga boyu sınırında gözlenen bu pikler, eksiton durumunun bağlanma enerjisinin bir göstere midir. Çinko-blende yapısı için küresel enerji yüzeylerinin varlığı kabul edilmiştir ve eksiton bağlanma enerjisi  $E_{be}$ , iletim bandının altındaki farklı eksiton durumlarının derinliklerine  $E_n = -E_{be}/n^2$  ile bağlıdır; burada  $n$ , taban ve değişik uyarılmış durumlar için 1, 2, 3, ... değerlerini alır. Eksiton enerjisinin kristal momentumuna bağlılığı

paraboliktir ve eksitonun momentumu, elektron ve deliklerin etkin kütlelerinin toplamından faydalanarak belirlenir. Eksiton durumlarına olan geçişler için soğurma katsayısının enerjiye bağıllığı, bant–bant geçişlerindeki bağıllığa benzerdir.

Serbest taşıyıcılar, kenar spektrumunun biçimi üzerinde ilave bir etkiye sahiptir. İletkenlik ve değerlik bantlarındaki serbest taşıyıcıların yoğunluğu önemli bir değerde ise soğurmanın genel düzeyi artar. Bu da genel olarak  $10 \text{ cm}^{-1}$  değerinde bir soğurma katsayısı üzerine dayanan kenar yerleşimi hakkında bazı güçlükler ortaya çıkarır. Dejenere malzemelerde, iletim bandının en düşük enerji durumları doludur ve böylece elektronları uyarmak için gerekli olan enerji artmış olur yani soğurma kenarı daha kısa dalga boylarına doğru kayar. Saf olmayan HgSe ve HgTe'in ikisinde de bu olay gözlenir ve bunların etkin elektron kütleleri küçük olduğu için bunlara ait iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu küçüktür. Bunun sonucu olarak bu iki bileşik hakkında elde edilen daha önceki çalışmalar, bunların bant aralığı enerjileri hakkında yanıltıcı değerlerin verilmesine yol açtı (Öncel, 2014).

## **1.4. Literatür Özeti**

### **1.4.1. Katkı Atomlarının CdS İnce Filmlerin Karakteristik Özelliklerine Etkisi**

Yellaiah ve arkadaşları birlikte çökeltme yöntemiyle CdS ince film örneklerine %0,03–0,3 aralığında Na katkısı yaptılar. X-ışını kırınım desenlerinde faydalanarak örneklerin tane boyutunun 29-55 nm arasında ortalama bir kristal boyutuna sahip olduğunu gözlemediler. Bununla birlikte Na katkısıyla yasak enerji aralığının 2,58 eV'tan 3,18 eV'a arttığını tespit ettiler (Yellaiah, 2013).

Klyuev ve arkadaşları kimyasal püskürtme yöntemiyle elde ettikleri katkısız ve klor, sodyum, potasyum atomlarıyla katkılı CdS ince filmlerini incelediler. Katkılı ve katkısız CdS filmlerini kıyasladıklarında katkı ile görünür spektrum aralığında (650-850 nm) lüminans şiddetinde on kat artış olduğunu gözlemediler. Filmler bir saat UV

ışınlarına maruz bırakıldıktan sonra lümünans şiddetinde gözle görülür bir değişiklik gözlenmedi (Klyuev, 2010).

Mageswari ve arkadaşları kimyasal banyo yöntemiyle yaptıkları bir çalışmada katkısız, sodyum katkılı, potasyum katkılı, sodyum ve potasyum çift katkılı CdS filmlerini cam altlıklar üzerine çöktüler. XRD analizi filmlerin kübik faza ait olduğunu gösterdi. Katkısız, sodyum katkılı, potasyum katkılı, sodyum potasyum çift katkılı filmlerin sırasıyla tane boyutu (35, 44, 25, 37 nm) ve yasak enerji aralığı (2.31, 2.35, 2.38, 2.34 eV ) sahip oldukları görüldü (Mageswari, 2012).

Liu ve arkadaşları 55-85°C aralığında değişen sıcaklıklarda kimyasal banyo yöntemiyle cam altlıklar üzerinde CdS filmlerini elde ettiler. Elektriksel ve Optiksel özelliklerinin sıcaklıkla nasıl değiştiğini incelediler. 75°C elde edilen filmlerin yüzeyinin daha pürüzsüz olduğunu ve görünür ışık aralığında iletimin daha iyi olduğunu tespit ettiler. Ayrıca sıcaklık arttıkça yasak enerji bandı aralığının (2.56 eV - 2.38 eV) azaldığını gözlemladiler. Tüm CdS filmlerinin n tipi iletkenliğe sahip olduğu ve taşıyıcı yoğunluğunun  $10^5 - 10^6 \text{cm}^{-3}$  ile  $10^{12} - 10^{13} \text{cm}^{-3}$  düzeyinde olduğunu tespit ettiler. En düşük direnç ve elde edilen en yüksek elektron hareketliliği 85°C üretilen filmlerde olduğunu gözlemladiler (Liu, 2010).

Abdullah M.A ve arkadaşları kimyasal banyo yöntemiyle yaptıkları bir çalışmada farklı yoğunluklarda cam altlıklar üzerinde CdS filmlerini elde ettiler. X ışını kırınım desenleri filmin kübik yapıya nano boyutlu olduğunu gösterdi. X ışını kırınım desenlerinden faydalanarak tane boyutunun 3.826 nm ile 8 nm aralığında olduğunu tespit ettiler (Abdulla, 2012).

Khallaf ve arkadaşları kimyasal banyo yöntemiyle yaptıkları bir çalışmada dört farklı kimyasal içeriğe sahip kadmiyum kaynağı kullanarak (kadmiyum asetat, kadmiyum sülfat, kadmiyum klor, kadmiyum iyodür) CdS filmlerini elde ettiler. Kadmiyum kaynaklarının filmin özelliklerine etkisini araştırdılar. Film kalınlığının sırasıyla kadmiyum sülfat, kadmiyum klor, kadmiyum asetat, kadmiyum iyodür katkısı ile azaldığı tespit edildi (Khallaf, 2008).

### 1.4.2. nCdS/pSi Güneş Pilleri

Song ve arkadaşları kimyasal banyo yöntemiyle yaptıkları bir çalışmada Si temel katmanlı heteroçitlerinin XRD incelemeleri sonucunda a ve c kristal örgü parametrelerini sırası ile 4,137 Å ve 6,714 Å olarak buldular (Song, 2015).

Manna ve arkadaşları yaptığı çalışmada Si temel katmanlı heteroçitlerinin CdS ikili yapıların bant genişliğini 1,77 eV olarak buldular. Fotoluminsans ölçümlerinde ise 300 K band genişliğini 2,55 eV olarak buldular ve sıcaklığın azalmasıyla pik yoğunluğundaki artış mavi ışığa doğru kaymalar gösterdi (Manna, 2012).

Mirsagatov ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada nCdS/pSi heteroçitlerinde akım mekanizması incelenmiştir. Kısmen kapalı ortamda vakum buharlaştırma yöntemi kullanarak Si tek kristali yüzeyine CdS tozu buharlaştırılarak nCdS/pSi heteroçitler elde edilmiştir. Bu yöntemle elde edilen güneş pillerinde heteroçidin temas bölgesinde durum yoğunluğunun az olması fotovoltaik parametrelerin yüksek olmasına neden olduğu rapor edilmiştir (Mirsagatov, 2014).

Yan ve arkadaşları tek kristal Si kullanarak Si-NPA tabanlı CdS heteroçitlerinin elde ettiler. CdAc<sub>2</sub>, tiyore, amonyak ve amonyak asetattan sırası ile 0,03, 0,1, 2,0 ve 0,1 molar katarak çözelti oluşturdular. Bu çözeltilere farklı oranda bor ve Cd kattılar. XRD sonuçlarını ve elektriksel özelliklerini incelediler. Saf CdS ince filmlerine göre katkılı ince filmlerinin pik değerlerinin sola doğru kaydığını gözlemladiler. Elektriksel ölçüm incelemelerinde ise katkılı örneklerin öz direnç değerlerinin saf örneklere göre daha düşük olduğunu belirlediler (Yan, 2015).

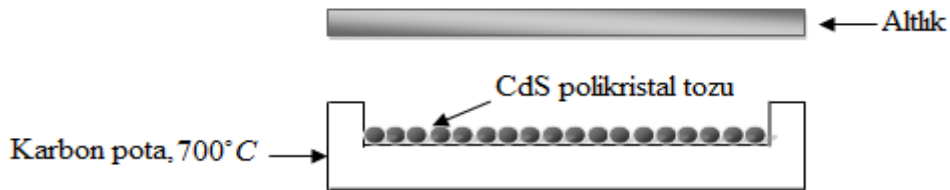
Başka bir çalışmada ise sodyum katkılı tek kristal CdS yüzeyine CuCl tuzu çöktürülerek CdS/Cu<sub>2-x</sub>S elde edilmiştir ve fotovoltaik parametrelerin zamanla değişimi incelenmiştir. Heteroçit oluşumunda uygulana tavlama işleminde (200 C) çit bölgesinde düşük hareketli [Cu<sub>i</sub><sup>+</sup> - V<sub>Cd</sub>] kusur yapılar meydana geldiği rapor edilmiştir. Bu kusur yapıların bakır atomları için durdurucu elektriksel alan oluşturduğu

ve Cu<sub>2</sub>S-CdS heterogeçidinin fotoelektrik parametrelerinin 60 günde %20 bozulurken kontrol örnekte %70 bozunduğu rapor edilmiştir (Novruzov, 1987).

## 1.5. Yarıiletken İnce Film Elde Etme Teknikleri

### 1.5.1. Kapalı Hacimde Çökeltme (Close-Space Sublimation) Yöntemi

Bu yöntemde Şekil 13’de gösterildiği gibi, altlıklar kaynaktan yaklaşık 0,5–2 cm uzaklığa yerleştirilir ve yüksek sıcaklıklarda (kaynak sıcaklığından düşük sıcaklıklarda) tutulurlar. Isıtıcı olarak genellikle tungsten lamba kullanılır. Bu yöntemle CdS ince film örnekleri üretilirken altlığa yapışmanın iyi olması için altlık sıcaklığı 500°C kadar yüksek seçilir (Romeo vd, 2004). Bununla birlikte yüksek altlık sıcaklığı kristal yapının kalitesini de artırır. Bu yöntemde örnekler genellikle Ar, He, Ar/O<sub>2</sub> veya He/O<sub>2</sub> gibi asal gaz ortamlarında üretilir (Ferekides, vd., 2000)



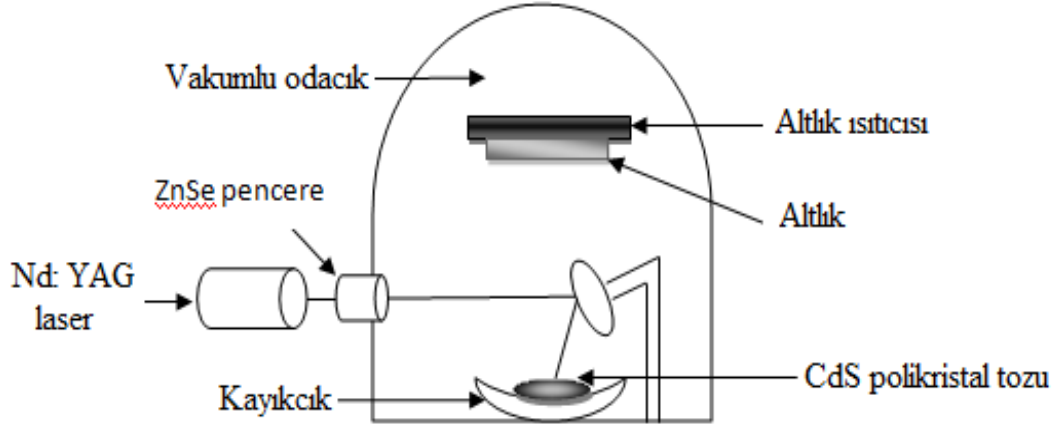
Şekil 13. Kapalı hacimde buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

### 1.5.2. Lazerle Buharlaştırma Yöntem

Lazerle buharlaştırma yöntemi optik olarak düzgün ve yüksek yönelime sahip CdS ince filmler üretmek için çok kullanışlı bir tekniktir (Kwok vd, 1988). Lazerle buharlaştırma yönteminde film özellikleri, lazer dalga boyu, darbe süresi, enerji yoğunluğu ve sistem geometrisi gibi bazı üretim parametrelerine bağlıdır (Ullrich vd, 1998). Örneğin CdS ince filmlerin geçirgenlik ve öz dirençleri lazer demetinin enerji yoğunluğu ve darbe süresi ile değiştirilebilir (Ezumi ve Keitoku, 1993). Bu yöntemde kullanılan altlıkların film stokiometrisine etkisi vardır. Lazerle buharlaştırma yönteminde, lazer ışın demeti, vakum



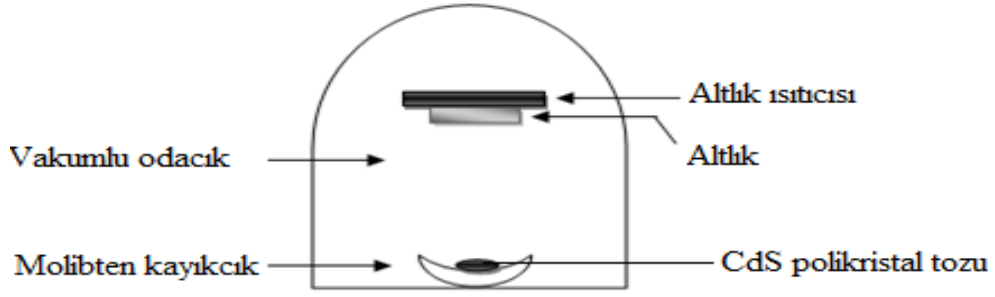
odacığına bir ZnSe pencereden girilerek buharlaştırılacak malzemenin üzerine odaklanır (Şekil 14).



**Şekil 14.** Lazerle buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

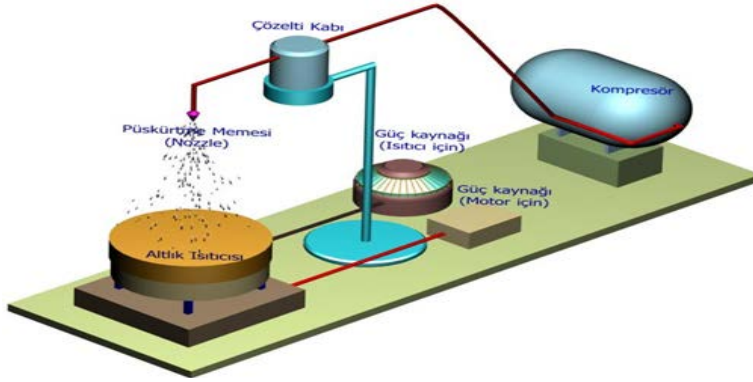
### 1.5.3. Fiziksel Buharda Çökme Yöntemi

İnce filmlerin vakumda altlık yüzeyine kaplanması üç süreçten oluşur: 1) Kaplanan malzeme atomlarının üretimi ve altlığa doğru akışın yönlendirilmesi, 2) atomların vakum ortamında altlığa kadar geçişi, 3) atomların altlık yüzeyine çökmesi ve ince film tabakasını oluşması. Şekil 15, vakumda buharlaştırma yöntemini şematik olarak göstermektedir. Buharlaştırılacak olan malzeme ısıtılarak atom ve moleküllerden oluşmuş gaz haline getirilir. Gaz halindeki malzeme altlık yüzeyine çökerek ince film halinde kaplanır. Vakum ortamında hazırlanan filmlerin büyüme hızı, vakum şartlarına sıkı bağlıdır. Orta ve düşük vakumda, kaynaktan kopan atom ve moleküller, ortamdaki hava molekülleri ile sık sık çarpışırlar. Bunun sonucu olarak film büyüme hızı azalır. Bundan başka, fanusun içinde kalan hava molekülleri, büyütülen film ile kimyasal tepkimeye girebilir ve neticede filmin özelliklerinde istenmeyen değişimler meydana gelebilir.



Şekil 15. Vakumda buharlaştırma yönteminin şematik gösterimi

#### 1.5.4. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

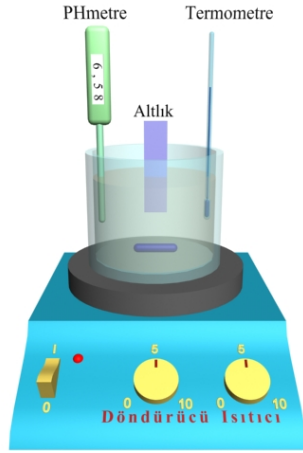


Şekil 16. Kimyasal püskürtme yöntemi için kullanılan deneysel düzenek

Kimyasal püskürtme yönteminde (Şekil.16), elde edilecek malzemenin elementlerini içeren çözelti ısıtılmış altlıklar üzerine basınçlı azot veya hava gazı yardımıyla belirli bir süre püskürtülür. Kimyasal püskürtme yöntemi ince film elde etme yöntemleri arasında en kolay ve ucuz olan yöntemdir. Püskürtme işlemi esnasında filmlerin özelliklerini değiştiren bazı parametreler vardır. Bunlar taban sıcaklığı, taban ile püskürtme başlığı arasındaki uzaklık, katkının cinsi ve miktarı, çözelti miktarı ve molaritesi, püskürtme hızı ve zamanı gibidir. Bu parametrelere uyulamaması ya da değiştirilmesi durumunda filmin kalınlığı, elde edilen materyalin yasak enerji aralığı, elektrik ve optik özellikleri istenen özellikleri taşımayabilir (Tomakin, 2003).

### 1.5.5. Kimyasal Banyo Yöntemi

Kimyasal banyo yönteminde (chemical bath deposition, CBD), Şekil 17’de gösterildiği gibi elde edilecek malzemenin elementlerini içeren çözelti bir kap içine konularak manyetik karıştırıcılı ısıtıcı üzerine yerleştirilir. İnce film üretimine başlamadan önce çözelti belli bir sıcaklığa kadar (40-50 °C ) ısıtılır ve o sıcaklıkta sabit tutulur. Daha sonra ince film kaplanacak olan altlıklar çözelti içerisine daldırılır ve film kaplanması için belli bir süre (60-90 dakika) bekletilir. Bekleme süresini ayarlayarak film kalınlığı değiştirilebilir. Bu yöntemde çözeltinin pH’ı ve sıcaklığı, üretilen ince filmin özelliklerini etkilemektedir. Fotovoltaik uygulamalar için CBD yöntemiyle CdS üretmenin avantajlarından biri düşük sıcaklıklarda çok ince tabakaların (< 50 nm) oluşturulmasıdır (Tomakin, 2003).



Şekil 17. Kimyasal banyo yönteminin şematik gösterimi

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu çalışmada sodyum katkılı CdS ince filmleri kimyasal banyo yöntemi kullanılarak cam altlıklar üzerinde hazırlandı. Sodyum katkı oranı kadmiyum kaynağına oranla saf ,%1 ,%2 ,%3 olarak seçildi. Altlık olarak 75×25 mm boyutlarında mikroskop

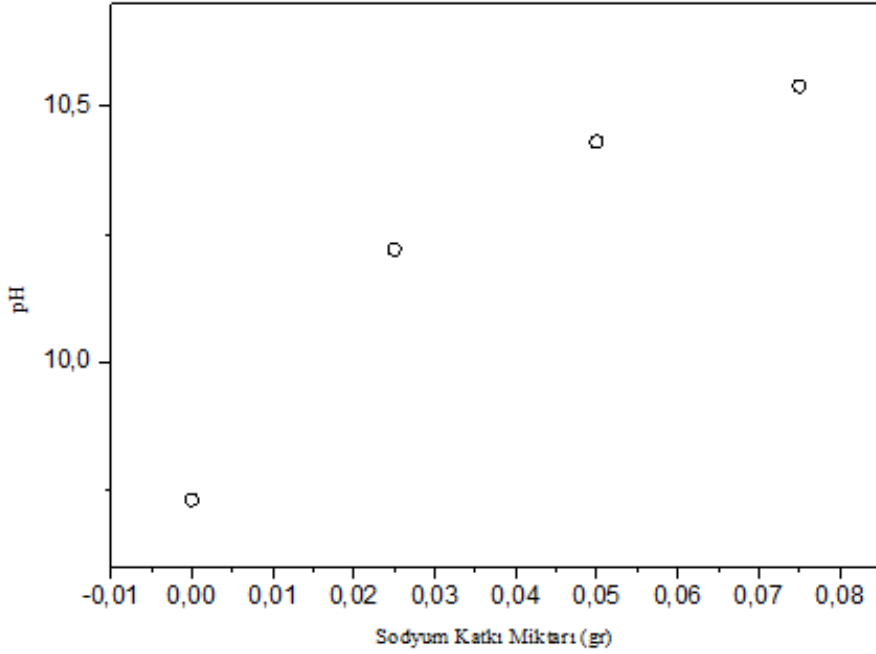
cam lamaları kullanıldı. Altlıklar saf su ve alkol ile temizlenerek üzerindeki istenmeyen maddelerden arındırıldı. Elde edilen örneklerin yapısal, elektriksel ve optiksel özellikleri incelendi.

## 2.2. CdS Filmlerinin Kimyasal Banyo Yöntemiyle Elde Edilmesi

CdS ince filmlerini kimyasal banyo yöntemiyle elde etmek için,  $\text{CdAc}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Ac}$  ve  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  tuzları kullanılarak çözeltiler hazırlandı. Kullanılan tuzların gram cinsinden miktarları Tablo 2’de verilmiştir.  $\text{CdAc}_2$ ,  $\text{NH}_4\text{Ac}$  ve  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  kimyasallarının Tablo 2’de verilen gram değerleri kullanılarak 250 ml saf su ile çözeltiler hazırlandı. Hazırlanan çözeltiler 1 saat süreyle manyetik karıştırıcı ile karıştırıldı. Behere 515 ml saf su konuldu ve sıcaklık 50 °C ayarlandı. Sıcaklık 50 °C olduktan sonra hazırlanan altlıklar beherin içine yerleştirildi ve sıcaklık 85 oC ayarlandı. Sıcaklık 85 oC ulaştığında 8 ml  $\text{CdAc}_2$ , 4,7 ml  $\text{NH}_4\text{Ac}$  ve 15 ml  $\text{NH}_4$  alınarak 515 ml saf su ile karıştırıldı ve sıcaklık 92 °C ayarlandı. Sıcaklık 92 °C ulaştığında çözeltilere beşer dakika aralıklarla 2 ml olacak şekilde toplamda 8 ml  $\text{CS}(\text{NH}_2)_2$  eklendi. Tablo 2’de verilen  $\text{CdAc}_2$  gram ağırlığı referans alınarak  $\text{CdAc}_2/\text{NaCl}$  oranının %1 , %2 , %3 değerlerinde farklı değerlerde sodyum yoğunlukları içeren CdS ince filmleri üretildi. CdS ince film çözeltilerinin pH değerlerinin Sodyum katkı miktarına göre değişim grafiği Şekil 18’de gösterildi.

**Tablo 2.** Kullanılan kimyasalların gram cinsinden kütleleri

Kimyasal	Moleküler Ağırlık	Stok Molaritesi (250 ml’lik suda)	Gram Ağırlığı
$\text{CdAc}_2$	266,53	0,0333	2,221
$\text{NH}_4\text{Ac}$	77,08	1,0	19,27
$\text{CS}(\text{NH}_2)_2$	76,12	0,0667	1,269



Şekil 18. Hazırlanan çözeltilerin pH grafiği

### 2.3. nCdS/pSi Heterogeçitlerin Elde Edilmesi

Bu çalışmanın ikinci aşamasında karakteristik özellikleri incelenen sodyum katkılı CdS filmleri optik pencere olarak tek kristal Si üzerine CBD yöntemiyle çöktürülerek fotovoltaik parametreleri incelendi. nCdS/pSi heterogeçitlerinin elde edilmesinde temel katman olarak öz direnci  $1 \Omega\text{-cm}$  ve kalınlığı 100 mikron olan Si tek kristalleri kullanıldı.  $1\text{cm}^2$  alanlı dikdörtgen şeklinde kesilen Si plakalar  $90^\circ\text{C}$  çözeltiye daldırılarak yüzeyinde kalınlıkları yaklaşık 100 nm olan ve farklı sodyum yoğunluğu içeren dört farklı optik pencere katmanları (CdS) oluşturuldu. Katman oluşumu bir saat süreyle gerçekleştirdi. Daha sonra elde edilen ikili yapılar %10 değerinde HCl çözeltisine daldırılarak yüzeyde biriken ve yapıya girmeyen birleşiklerden arındırıldı ve saf su ile yıkandı. Omik kontak olarak metalik In kullanıldı. Heterogeçit oluşumu  $450^\circ\text{C}$  15 dakika süreyle oda ortamında gerçekleştirildi.  $93 \text{ mW/cm}^2$  gücünde olan yapay güneş ışın kaynağı kullanılarak farklı yoğunluk da sodyum içeren nCdS/pSi heterogeçitlerin fotovoltaik parametreleri incelendi.

## 2.4. Örneklerin Kalınlık Ölçüm

Üretilen CdS yarıiletken ince filmlerin kalınlıkları mikro tartma yöntemiyle belirlendi. Film altlığa kaplandıktan sonra altlık kütesinin artması, mikro tartma yönteminin temelini oluşturur. Filmin ortalama kalınlığı,

$$d = \frac{\Delta m}{\rho \times s} \quad (27)$$

ifadesi ile verilir (Stoessel, vd., 1993). Burada  $\Delta m$ , altlık ve altlığın üzerinde biriken film kütesinin toplamı ile temiz altlık kütesinin farkı,  $s$  film yüzeyinin alanı,  $\rho$  filmin yoğunluğu ve  $d$  filmin kalınlığıdır. Mikro tartma yöntemiyle film kalınlığının ölçümünde film yoğunluğunun hacimsel malzemenin yoğunluğuna eşit olduğu kabul edilir.

## 2.5. X-Işını Kırınım Analizi

X-ışınları kırınım desenlerinde faydalanılarak bir malzemenin kristal yapısı ve örgü parametreleri hakkında bilgi edinilebilir. Kimyasal banyo yöntemiyle elde edilen ince filmlerin X-ışını kırınım analizi yapıldı. Bu işlem için Şekil 19'da gösterilen Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi kullanıldı. Ölçümler esansında difraktometredeki bakır hedefe 36 keV'luk gerilim ve 28 mA'lik akım uygulanarak elde edilen  $\text{CuK}_\alpha$  ( $\lambda = 1,5408\text{\AA}$ ) X-ışınları kullanıldı.

Herhangi bir ekstrapolasyon veya iyi bir deneysel teknik olmaksızın, en basit şekilde örgü parametreleri X-ışını kırınım desenlerindeki en yüksek açıdaki pikler yardımıyla bulunabilir. CdS hem kübik hem de hegzagonal yapıda kristalleşebilmektedir. Kübik yapıda kristalleşen numuneler için

$$\frac{1}{d^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (28)$$

ifadesi kullanılarak  $a$  örgü parametresi bulunabilir. Hekzagonal yapıda kristalleşen numuneler için ise

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (29)$$

ifadesi kullanılarak  $a$  ve  $c$  örgü parametreleri bulunabilir. Burada,  $d$  düzlemler arası mesafeyi,  $h$ ,  $k$ ,  $l$  ise Miller indislerini göstermektedir.



**Şekil 19.** Rigaku marka SmartLab X-ışını difraktometresi

Yapılan çalışmada üretilen örnekler hekzagonal yapıya sahip oldukları için denklem 29'daki ifade kullanılarak örneklerin örgü parametreleri hesaplandı. Ayrıca tüm örneklerin X-ışını kırınım desenlerinde genellikle (002) yansıma düzlemine ait tek bir pik görüldüğünden bu örnekler için sadece  $c$  örgü parametreleri hesaplandı.

## **2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu İncelemeleri**

Şekilde 20'de verilen elektron mikroskobu yardımı ile üretilen ince film malzemelerin, yüzey morfolojisi, tane boyutları ve kimyasal bileşenleri hakkında bilgiler elde edilir.

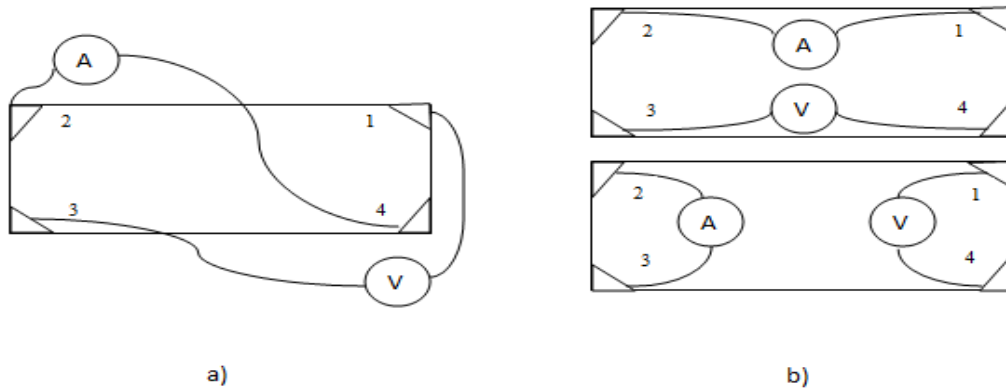


Şekil 20. JEOL marka JSM-6610 taramalı elektron mikroskobu

## 2.7. Elektriksel Özelliklerinin Ölçülmesi

### 2.7.1. Özdirenç Ölçümü

Yarıiletken malzemelerin, özdirenç ölçümlerinden yararlanarak elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinilmektedir. Bu çalışmada üretilen filmlerin özdirenç ölçümleri Van Der Pauw yöntemiyle yapıldı. Özdirenç ölçümleri 300 K sıcaklığında aydınlık ( $93\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ve karanlık ortamda gerçekleştirildi. Ölçümler için kullanılan kontaklar Şekil 21’de gösterilmiştir.



Şekil 21. a) Hal katsıısı ölçümü için kullanılan omik kontaklar b) Van der Pauw yöntemi için kullanılan omik kontak şematik gösterimi



Van der Pauw yöntemi serbest formlu düzlemsel plaka şeklindeki örneklerin öz direnç ölçümlerinde geniş olarak kullanılmaktadır. Bu ölçümler için, örneklerin dört noktasına indiyum ile omik kontaklar yapıldı (genelde örneklerin köşeleri tercih edilir). Yapılan işlemler aşağıda verilmiştir:

- i. 1 ve 4 numaralı kontaklar arasında akım uygulanarak ( $I_{14}$ ), 2 ve 3 numaralı kontaklar arasındaki gerilim ( $V_{23}$ ) ölçüldü.
- ii. 4 ve 3 numaralı kontaklar arasında akım uygulanarak ( $I_{43}$ ), 1 ve 2 numaralı kontaklar arasındaki gerilim ( $V_{12}$ ) ölçüldü.
- iii. 3 ve 2 numaralı kontaklar arasında akım uygulanarak ( $I_{32}$ ), 4 ve 1 numaralı kontaklar arasındaki gerilim ( $V_{41}$ ) ölçüldü.
- iv. 2 ve 1 numaralı kontaklar arasında akım uygulanarak ( $I_{21}$ ), 3 ve 4 numaralı kontaklar arasındaki gerilim ( $V_{34}$ ) ölçüldü.

Daha sonra bu işlemler ters besleme altında tekrar edildi. Alınan ölçümler sonucunda sekiz tane direnç değeri elde edilir:

$$R_{21,34} = \frac{V_{34}}{I_{21}}, R_{12,43} = \frac{V_{43}}{I_{12}} \quad (31)$$

$$R_{32,41} = \frac{V_{41}}{I_{32}}, R_{23,14} = \frac{V_{14}}{I_{23}} \quad (32)$$

$$R_{43,12} = \frac{V_{12}}{I_{43}}, R_{21,34} = \frac{V_{21}}{I_{34}} \quad (33)$$

$$R_{14,23} = \frac{V_{23}}{I_{14}}, R_{41,32} = \frac{V_{32}}{I_{41}} \quad (34)$$

Doğru ve ters besleme durumları için hesaplanan direnç değerleri birbirine eşit olmalıdır. Aradaki fark en çok %5 olmalıdır. Elde edilen sekiz direnç değerlerinden faydalanılarak aşağıdaki gibi  $R_A$  ve  $R_B$  değerleri belirlenir.

$$R_A = \frac{(R_{21,34} + R_{12,43} + R_{43,12} + R_{34,21})}{4} \quad (35)$$

$$R_B = \frac{(R_{32,41} + R_{23,14} + R_{14,23} + R_{41,23})}{4} \quad (36)$$

Van der Pauw teoremine göre direncin bu iki değeri ile örneğin öz direnci arasındaki bağıntı (denklem (37)) kullanılarak öz direnç değerleri belirlendi.

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[ \frac{R_A + R_B}{2} \right] f \left( \frac{R_A}{R_B} \right) (\Omega cm) \quad (37)$$

Burada  $f(R_A, R_B)$  düzeltme fonksiyonudur.

$$f \left( \frac{R_A}{R_B} \right) = 1 - \left[ \frac{R_A - R_B}{R_A + R_B} \right]^2 \left( \frac{\ln 2}{2} \right) - \left[ \frac{R_A - R_B}{R_A + R_B} \right]^4 \left[ \left( \frac{\ln 2}{2} \right)^2 - \frac{(\ln 2)^3}{12} \right] \quad (36)$$

### 2.7.2. Hall Katsayısı Ölçümü

Bir yarıiletkende elektrik akımına dik olacak şekilde manyetik alan uygulandığında hem elektrik alan hem de manyetik alana dik olacak şekilde bir Hall alanı oluşmaktadır. Bu Hall alanı nedeniyle yarıiletkende,

$$V_H = R_H \frac{IB}{b} \quad (38)$$

ile verilen bir Hall voltajı oluşur. Burada  $R_H$  Hall sabiti,  $B$  manyetik alan,  $I$  uygulanan akım ve  $b$  örneğin manyetik alan yönündeki boyutudur. n-tipi yarı iletken ( $n \gg p$ );

$$R_H = -\frac{1}{ne}, \text{ p-tipi yarı iletken ( $p \gg n$ ); } R_H = +\frac{1}{pe} \text{ ile verilmektedir. Taşıyıcı tipi belli}$$

olan malzeme için Hall voltajı ölçülerek taşıyıcı yoğunluğu hesaplanabilir.

$$n = 8 \times 10^{-8} \frac{IB}{qV_H d} \quad (39)$$

Burada  $n$  taşıyıcı yoğunluğu ( $\text{cm}^{-3}$ ),  $V_H$  Hall voltajı (V),  $I$  akım (A),  $B$  manyetik alan (Gauss),  $d$  yarıiletken ince filmin kalınlığıdır.

Hall voltajındaki hatayı küçültmek için Hall voltajının ölçüldüğü kontaklar arasındaki parazit gerilimleri ortadan kaldırmak gerekir. Bu parazit gerilimler farklı nedenlerden meydana gelebilir. Hall voltajının ölçüldüğü kontaklar eş potansiyelli noktalarda değilse parazit gerilimler oluşabilir. Numunenin homojenliği bozuk ise yine parazit gerilimler oluşabilir. Numuneden akım geçirilen kontaklar arasında taşıyıcıların hareketi ile ilgili parazit gerilimleri oluşabilir. Parazit gerilimlerin yoğunluğu elektrik akımının ve manyetik alanın yönüne bağlıdır ve bu nedenle akımın ve manyetik alanın yönü değiştirilerek parazit gerilimlerin Hall gerilimine etkisi ortadan kaldırılabilir. Bu çalışmada, Hall gerilimini doğru ölçebilmek için akımın ve manyetik alanın yönü dikkate alınarak toplam sekiz ölçüm alındı. Bunlar,  $V_{13P}$ ,  $V_{13N}$ ,  $V_{24P}$ ,  $V_{24N}$ ,  $V_{31P}$ ,  $V_{31N}$ ,  $V_{42P}$  ve  $V_{42N}$  voltajlarıdır.

$$\begin{aligned} V_D &= V_{42P} - V_{42N}, & V_C &= V_{24P} - V_{24N} \\ V_E &= V_{13P} - V_{13N}, & V_F &= V_{31P} - V_{31N} \end{aligned} \quad (40)$$

Hall voltajı,

$$V_H = V_C + V_D + V_E + V_F \quad (41)$$

ile hesaplanır. Bu tezde Hall gerilimi ölçümleri oda sıcaklığında ve karanlıkta gerçekleştirildi.

## 2.8. Optik Özelliklerin Ölçümü

### 2.8.1. Optik Geçirgenlik Ölçümü

Optik ölçüm, yarıiletken malzemelerinin bant yapılarını tayin etme yollarının en önemlisini oluşturur. Yarıiletken malzemeler fotonlar ile uyarıldıkları zaman, değerlik bandı ile iletim bandı arasında elektronik geçişler olur. Bu geçişler vasıtasıyla yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı belirlenir. Yarıiletken malzemelerde optik özellikler hem geçirgenlik eğrilerinden hem de foto iletkenlik ölçümlerinden belirlenir. Üretilen CdS yarıiletken ince filmlerin optik özellikleri oda sıcaklığında geçirgenlik ölçümleriyle belirlendi.

Elde edilen ince filmlerin optik geçirgenlik ölçümleri PerkinElmer UV/VIS Lambda 35 spektrofotometre (Şekil 22) cihazı kullanılarak 300–1000 nm bölgesinde gerçekleştirildi.

Üretilen yarıiletken ince filmlerin yasak enerji aralığını belirlemek için geçirgenlik ölçümleri ve  $\alpha = -\ln\left(\frac{1}{T}\right)\frac{1}{d}$  ifadesi kullanılarak soğurma katsayısı hesaplandı. Burada  $\alpha$  soğurma katsayısını,  $d$  ince filmin kalınlığını göstermektedir. Doğrudan bant aralıklı yarıiletkenler için soğurma katsayısı ile yasak enerji aralığındaki bağıntı

$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (42)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $A$  sabit,  $h\nu$  gelen fotonun enerjisi ve  $E_g$  yasak enerji aralığıdır. Örneklerin yasak enerji aralığını belirlemek için  $(\alpha h\nu)^2$ 'nin  $h\nu$ 'ye karşı grafiği çizildi. Bu grafikte geçiş bölgesinin olduğu kısımdaki doğrusal kısma ekstrapolasyon yapıldı ve bu ekstrapolasyonun enerji eksenini kestiği nokta yardımıyla örneklerin yasak enerji aralığı belirlendi.



Şekil 22. PerkinElmer UV/ VIS Spectrometer Lamda 35

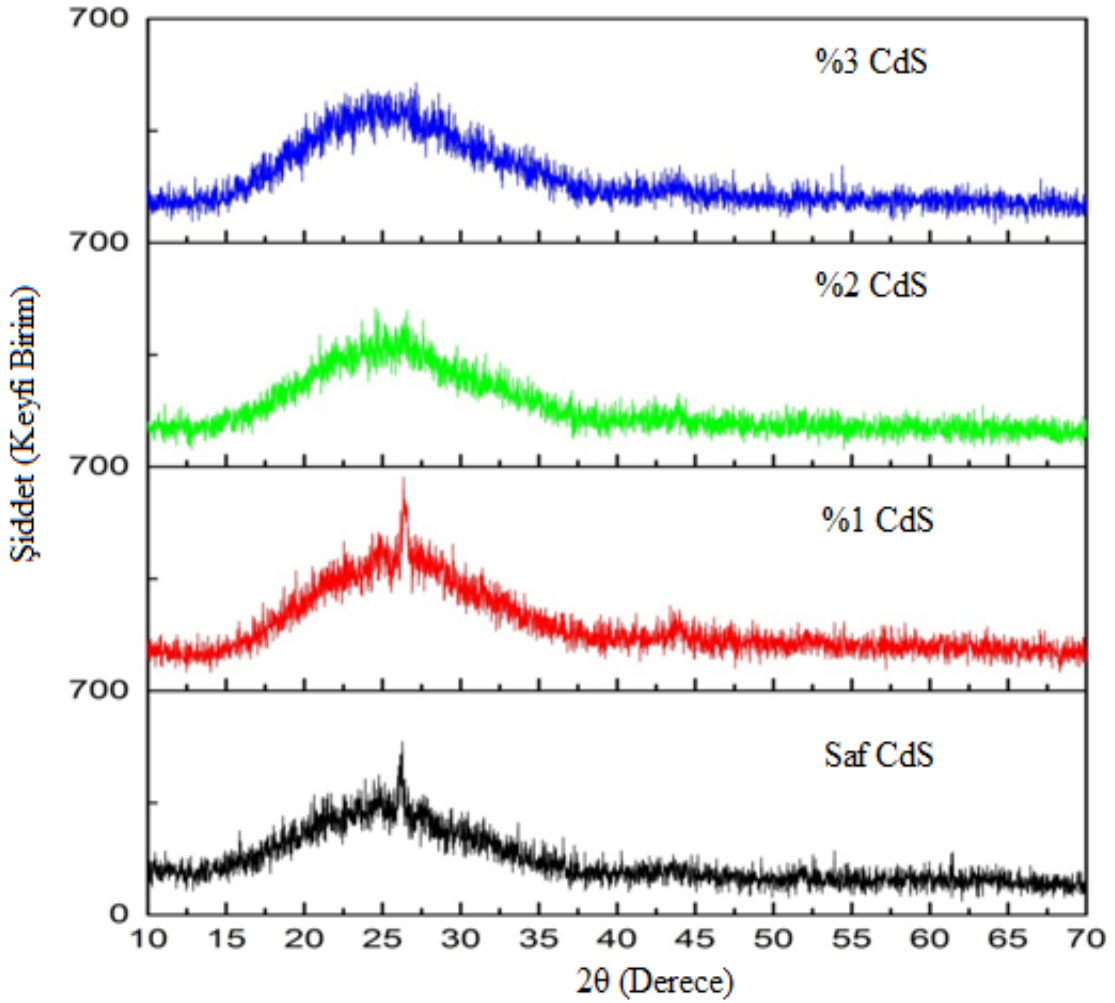
### 3. TARTIŞMA VE SONUÇLAR

#### 3.1. Yapısal Özelliklerin İncelenmesi

#### 3.2. X Işını Kırınımı

Farklı sodyum katkı oranlarında hazırlanan CdS ince filmlerinin X-ışını kırınım desenleri Şekil 23'de verildi. Görüldüğü gibi tüm CdS ince filmleri amorf yapıya benzer geniş yansıma dağılımı göstermektedir. Ayrıca  $2\theta=26.6^\circ$  acısındaki zayıf yansıma pikinin katkı oranı ile yok oluşu bu olguyu daha da ön plana çıkarmaktadır. Nano yapıli örneklerin benzer yansıma dağılımı sergilediği bilinmektedir (Obaid, vd., 2013). Kırınım deseninde gözükten bu geniş yapıli yansımalar CdS ince filmlerinde bazı amorf veya nano yapıli bileşenlerin olduğunu göstermektedir (Jaber vd., 2012; Liu vd., 2010). CdS ince filmlerinde hekzagonal ve kübik fazlar görülebileceği gibi, bu iki fazın karışımı aynı anda görülebilmektedir (Jaber vd., 2012). Literatürde  $2\theta=26.6^\circ$  pikin %65

hekzagonal, %35 ise kübik yapıdan kaynaklandığı rapor edilmektedir. Yukarıda belirtilen oranlardan %5-10 sapmalar olabileceği ve yansıma spektrumunda kübik ve hekzagonal fazlara ait yarılmaların olduğu vurgulanmaktadır. Literatür çalışmalarda bu spektrumun hekzagonal faza ait olduğu daha ağırlıklı olarak rapor edilmiştir



**Şekil 23.** CdS ince filmlerin X-ışını kırınım desenleri

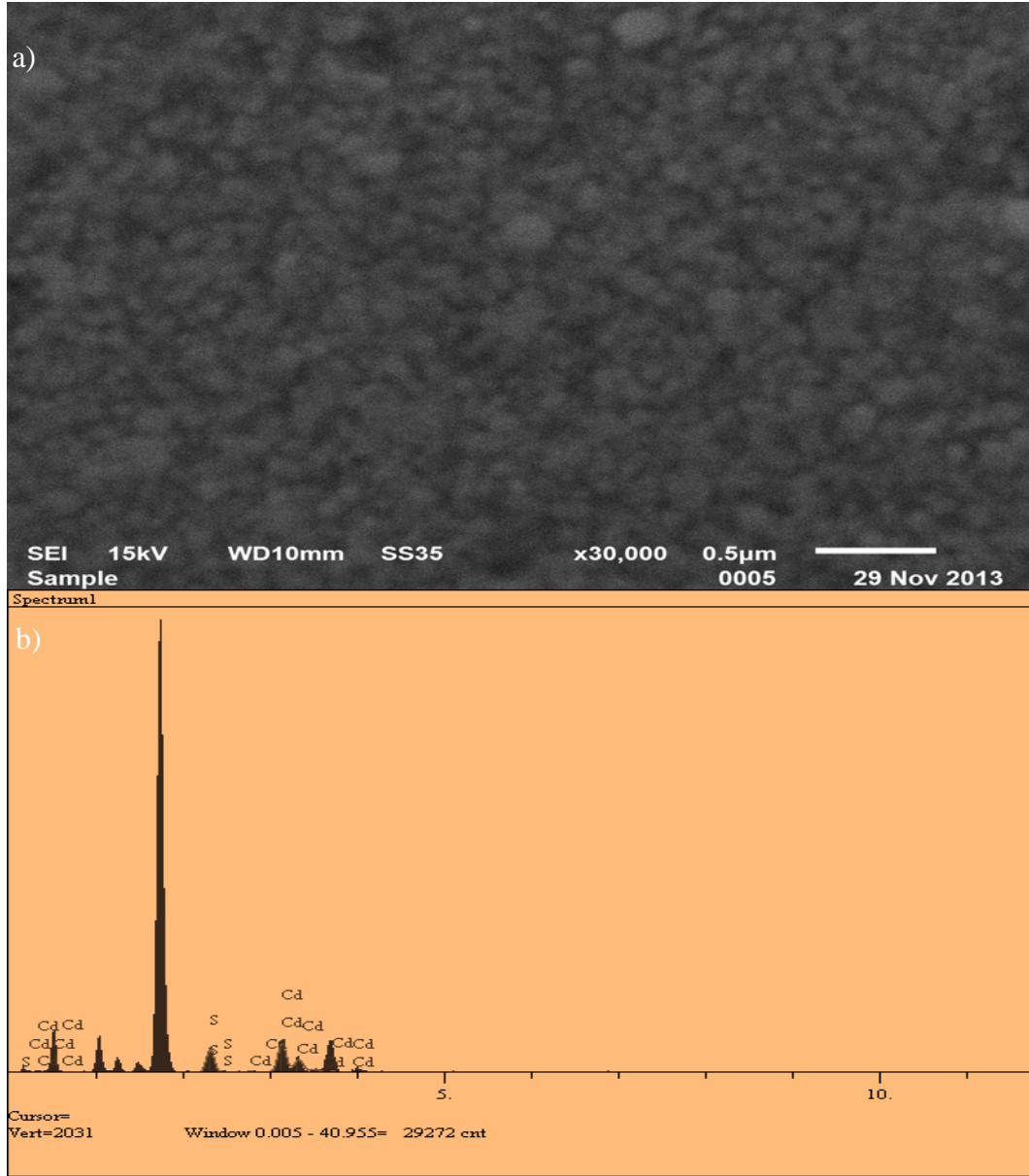
Bu bilgiler ışığında ürettiğimiz CdS ince filmlerin hekzagonal fazda büyüdüğünü ve  $2\theta=26,6^\circ$  pikinin (002) düzleminden yansıdığını kabul ettik. Katkısız ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin kristal boyutları teorik olarak hesaplandı. Üretilen tüm CdS ince filmleri için  $2\theta=26,6^\circ$  pik referans alınarak c örgü sabiti hesaplandı. Hesaplamalar sonucu c örgü sabitinin  $5,86 \text{ \AA}$  değerinde olduğu tespit edildi. Mageswari ve arkadaşları tarafından kimyasal banyo yöntemiyle yapılan bir çalışmada sodyum katkılı ince filminin c örgü sabiti  $5,80 \text{ \AA}$  olduğu rapor edilmiştir (Mageswari, 2012).

### 3.3. SEM Görüntüleri ve EDX Analizi

CdS ince film örneklerinin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskobu ile incelendi. Şekil 24.a'da sodyum katkısız CdS ince filmine ait SEM görüntüsü, Şekil 23.b'de ise bu yapıya ait EDX analizi verildi. Şekil 24, 25 ve 26 'da ise sırasıyla %1, %2, %3 sodyum katkılı CdS ince filmlerine ait SEM görüntüleri ve bu yapılara ait EDX analiz sonuçları verildi. EDX analiz sonuçları incelendiğinde en yüksek pikin cam altlıkta var olan Si atomlarından kaynaklandığı anlaşılmaktadır. Tablo 2'de saf CdS ince filmine ait atomik yüzdeler ve Tablo 3,4,5' de ise sırası ile %1, %2, %3, sodyum katkılı CdS ince filmlerine ait kimyasalların atomik yüzdeler verildi. Tablodaki değerler incelendiğinde sodyumun katkı oranı arttıkça Na yüzdelik oranı artmakta ve buna ek olarak Cd ve S yüzdelik oranlarının ise azaldığı görülmektedir. Sodyum katkılı örneklerin SEM görüntüleri incelendiğinde katkı oranına bağlı olarak filmlerin daha sıkı paket şeklinde büyüdüğü ve buna bağlı olarak film yüzeyinin daha homojen bir görüntü sergilediği görülmektedir. Bu olumlu sürecin nedenlerinden bir tanesi sodyum atomlarının iyonik yarıçapının (0,97 Å), Cd (1,71 Å) atomlarının iyonik yarıçapından daha küçük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Diğer bir nedeni ise sodyum atomlarının doğasından yani amfoter özelliklerinden meydana gelmektedir. CdS ince filmlerin tane boyutları ise  $D = h(8 \cdot \mu \cdot \Delta E)^{-\frac{1}{2}}$  formülünden yararlanılarak hesaplandı. Burada  $\mu = m_e^* \cdot m_h^* / m_e^* + m_h^*$  ifadesine eşittir. h Planck sabiti  $m_e^*$  elektronun ve  $m_h^*$  boşluğun etkin kütesidir.  $\Delta E$  ise iletim bandı ile valans bandı arasındaki yasak enerji band aralığının farkını ifade etmektedir. Hesaplamalar tane boyutlarının sodyum katkısıyla azaldığını gösterdi ve tablo.3'deki değerler elde edildi.

**Tablo 3.** CdS İnce Filmlerinin Tane Boyutu

Sodyum Katkı Oranı	Tane Boyutu (nm)
Saf	6,20
%1	5,00
%2	4,33
%3	4,09

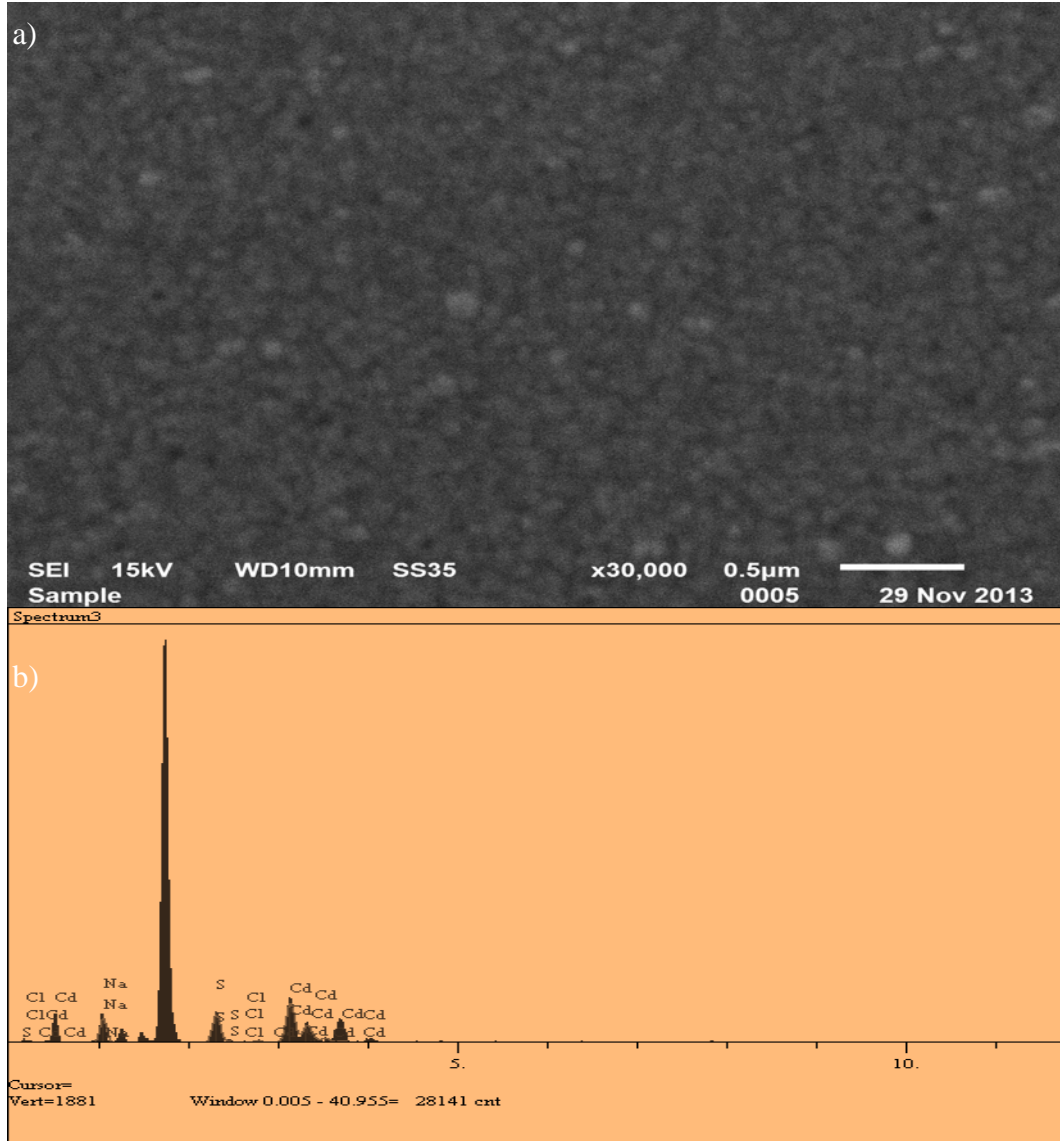


Şekil 24. Saf CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu

Tablo 4. Saf CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri

Elt.	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	Hata2-sig	Oran	Birim
S	Ka	28,10	1,676	15,108	wt.%
Cd	La	39,79	1,995	84,892	wt.%
				100,000	wt.%

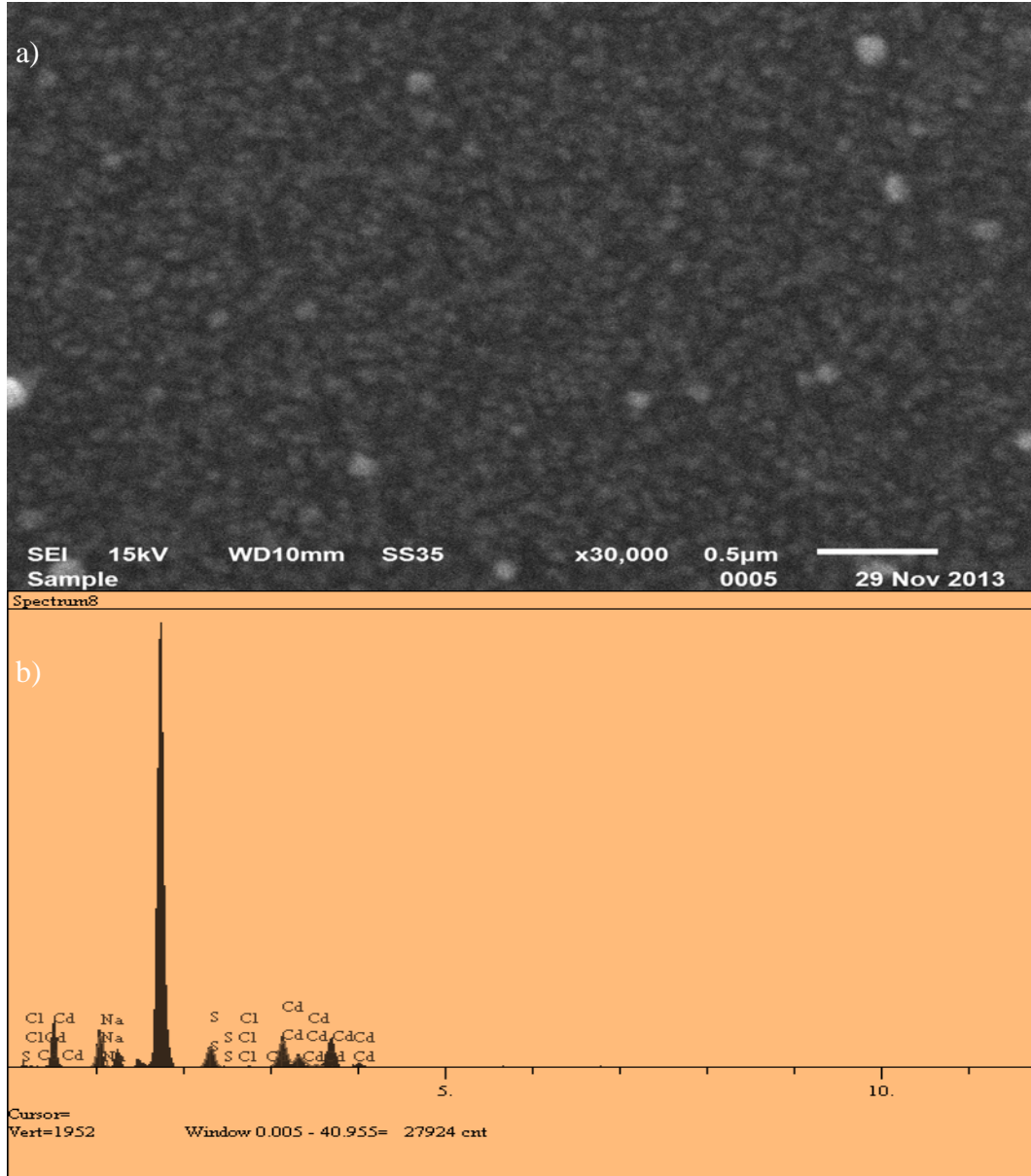




Şekil 25. %1 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu

**Tablo 5.** %1 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri

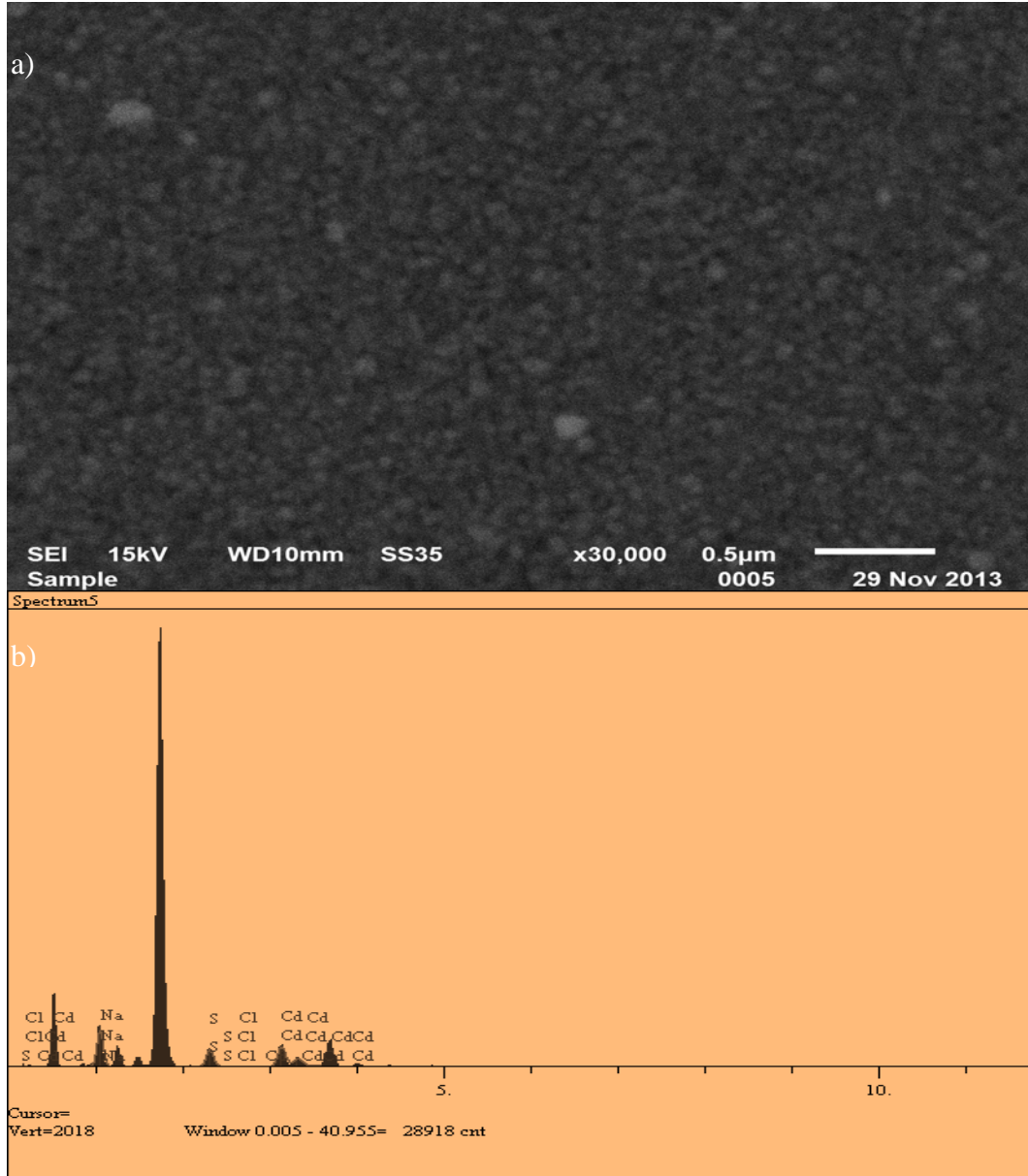
Elt.	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	Hata2-sig	Oran	Birim
Na	Ka	26,01	1,613	17,877	wt. %
S	Ka	34,88	1,867	11,712	wt. %
Cl	Ka	0,26	0,162	0,094	wt. %
Cd	La	53,91	2,322	70,317	wt. %
				100,000	wt. %



**Şekil 26.** %2 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu

**Tablo 6.** %2 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri

Elt.	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	Hata2-sig	Oran	Birim
Na	Ka	31,75	1,782	27,534	wt. %
S	Ka	23,99	1,549	11,134	wt. %
Cl	Ka	0,16	0,125	0,077	wt. %
Cd	La	34,15	1,848	61,255	wt. %
				100,000	wt. %



Şekil 27. %3 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin a) SEM görüntüsü b) EDX spektrumu

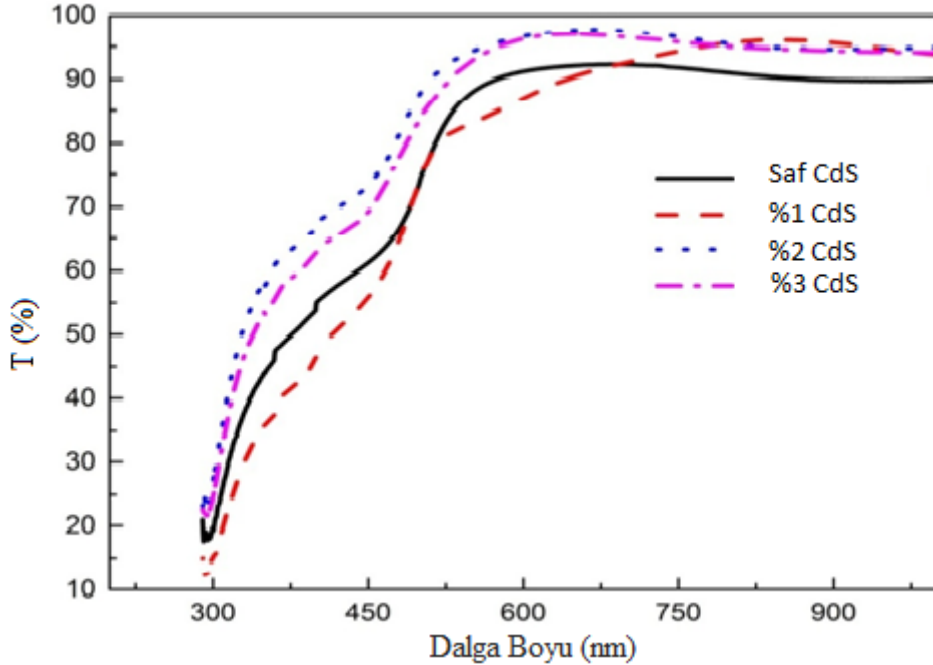
**Tablo 7.** %3 NaCl Katkılı CdS İnce Filminin atomik yüzdeleri

Elt.	Çizgi	Yoğunluk(c/s)	Hata2-sig	Oran	Birim
Na	Ka	37,75	1,943	34,630	wt.%
S	Ka	20,35	1,426	10,746	wt.%
Cl	Ka	0,15	0,123	0,084	wt.%
Cd	La	26,81	1,637	54,540	wt.%
				100,000	wt.%

### 3.4. Optik Özelliklerin İncelenmesi

### 3.5. Optik Geçirgenlik

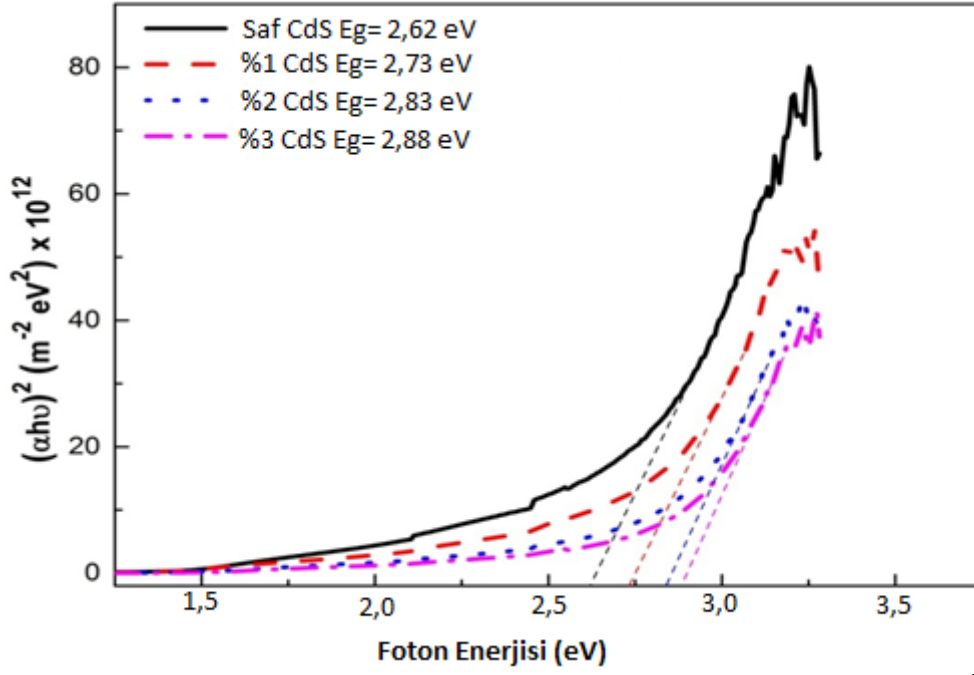
Şekil 28’de saf ve sodyum katkılı CdS ince film örneklerinin oda ortamında (300K) 300-1000 nm dalga boyu aralığında alınan optik geçirgenlik eğrileri verildi. Şekilden görüldüğü üzere tüm örnekler yüksek optik şeffaflık göstermektedirler. Fakat artan sodyum katkısıyla CdS örneklerinin optik şeffaflığı daha da artmaktadır.



Şekil 28. Saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin optik geçirgenlik eğrileri

### 3.6. Yasak Band Aralığı

Şekil 29’da saf ve farklı oranlarda sodyum katkılı CdS ince film örneklerinin optik geçirgenlik verilerinden yararlanılarak  $(\alpha h\nu)^2$ ’nin foton enerjisine göre değişim spektrumlarının görüntüleri verildi. Bu spektrumlar yardımıyla örneklerin yasak enerji bant aralıkları ( $E_g$ ) belirlendi. Şekilden görüldüğü gibi sodyum katkı oranı arttıkça örneklerin yasak enerji bant aralıkları artmaktadır. Yasak bant aralığındaki değişimlerin başlıca nedeni olarak sodyum katkısı ile kristal yapıda tane çaplarının küçülmesini gösterebiliriz.

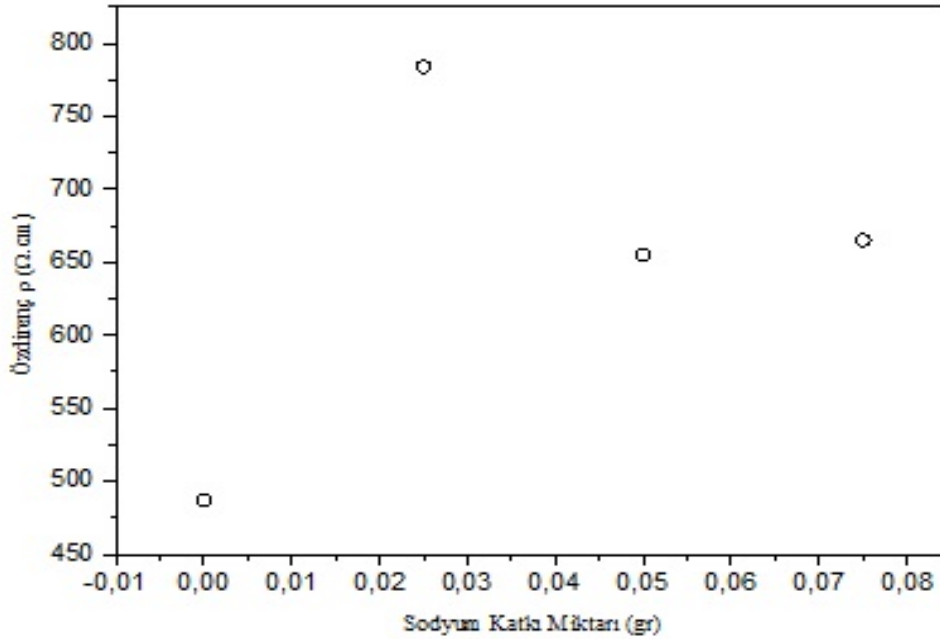


Şekil 29. Saf ve sodyum katkılı CdS ince film örneklerinin  $h\nu$ 'ye karşı  $(\alpha h\nu)^2$  grafikler

### 3.7. Elektriksel Özelliklerin İncelenmesi

### 3.8. Özdirenç

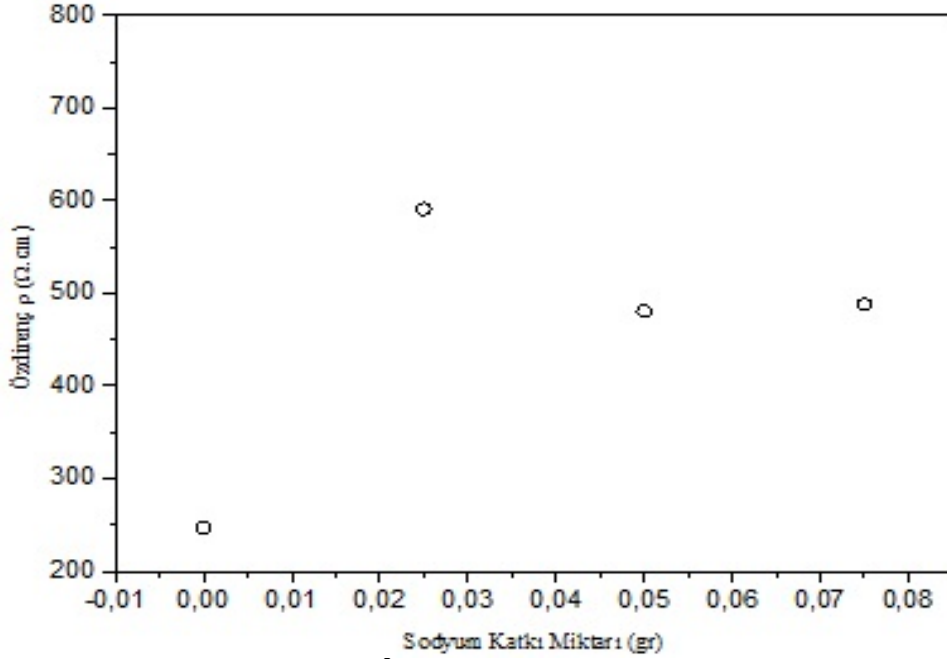
CdS ince film örneklerinin elektriksel (özdirenç ve Hall olayı) ölçümleri oda sıcaklığında karanlık ve aydınlık ortamlarda gerçekleştirildi. Aydınlık ortamdaki ölçümlerde  $93 \text{ mWatt/cm}^2$  gücünde olan Sciencetech marka SF150Cmodel güneş simülatörü kullanıldı.



**Şekil 30.** Karanlık ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin özdirenç grafiği

Şekil 30'da farklı sodyum yoğunlukları içeren CdS ince filmlerinin karanlık ortamda ölçülen özdirenç değerleri verildi. Şekil 30'dan da görüldüğü gibi karanlık ortamda katkısız CdS ince filminin özdirenç değerinin  $4,87 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  olduğu %1 oranında sodyum katkılı CdS ince filmlerinde ise  $7,84 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  değerine kadar arttığı görülmektedir. Ayrıca %3 sodyum katkı oranında üretilen CdS ince filmlerin özdirenç değerinin ise  $6,65 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ 'ye kadar azaldığı görülmektedir. Şekil 31'de ise aydınlık ortamında elde edilmiş özdirenç değerleri verildi. Şekil 31'de görüldüğü gibi aydınlık ortamda saf CdS ince filminin özdirenç değerinin  $2,47 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ , %1 oranında sodyum katkılı CdS ince filmlerinde ise özdirenç değerinin  $5,91 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$  değerine arttığı görülmektedir. %3 sodyum katkı oranında üretilen CdS ince filmlerin özdirenç değerinin  $4,88 \times 10^3 \Omega\text{-cm}$ 'ye kadar azaldığı görülmektedir. Karanlık ve aydınlık ortamda elde edilen özdirenç değerlerinin sodyum katkı oranı ile değişim mekanizmaları benzerlik taşımaktadır. Fakat aydınlık ortamda elde edilen değerlerin karanlık ortamda elde edilen değerlerden çok daha küçük olduğu görülmektedir. Literatürde kimyasal banyo yöntemi ile hazırlanan CdS ince film örneklerinin elektriksel özellikleri (özdirenç, taşıyıcı yoğunluğu, elektron hareketliliği), üretilen filmlerdeki kadmiyum ve kükürt (Cd/S) oranına (Cruz vd, 2010), kullanılan kimyasalların miktarına (Khallaf vd, 2008), çözelti sıcaklığına (Liu vd, 2010), katkı atomlarının özelliklerine (Altosaar vd, 2005), atomların kristal yapıdaki hareketliliklerine (Sasikala vd, 2000), bağlı olduğu

rapor edilmektedir. İnce film kalınlığındaki azalmaların özdirenci arttırdığı bilinmektedir (Enriquez ve Mathew, 2003; Oumous ve Hadiri, 2001). Özdirenç ile ilgili bir başka mekanizma ise nano boyutlu örneklerde tane sınırlarından saçılmaları gösterebiliriz. Kristal yapıda tane boyutlarının artması veya azalması tane sınırları arası mesafeyi değiştirerek özdirenç değerlerini etkilemektedir (Tomakin, 2011).



**Şekil 31.** Aydınlik ( $93\text{mW}/\text{cm}^2$ ) ortamında saf ve sodyum katkıli CdS örneklerin özdirenç grafiği

Bu çalışmada özdirenç ölçümlerindeki gözükten değişimler ilk önce sodyumun CdS'de doğal davranışına ve tane boyutlarındaki azalmaya hitap edilebilir. Sodyum atomları CdS yapısında amfoter özelliğe sahiptirler ve bu yapıda farklı mekanizmalar ile hareket ederler. Yani sodyum atomların CdS yapısında hareketliliği iki mekanizma ile gerçekteşebilmektedir. Bunlardan bir tanesi düğüm noktaları ile hareketlilik bir diğerisi ise düğümler arası bölgelerle hareketliliktir. Ayrıca sodyum atomları örgü noktalarında akseptör özelliği taşımakta düğümler arası bölgelerde ise donör özelliği taşımaktadırlar. Aydınlik ve karanlık ortamdaki özdirenç değerleri Şekil 30 ve 31'den görüldüğu gibi sodyum atomlarının belirli yoğunluğunda özdirenç artırırken daha yüksek sodyum yoğunluklarda özdirenç değerleri azalmaktadır. İnce filmlerin üretimi sürecinde kristal yapıda kusurlar meydana gelmektedir. Düşük sodyum yoğunluklarında atomlar ağırlıklı olarak düğüm noktalarına yani kadmiyum boşluklarına ( $V_{\text{Cd}}$ ) yerleşerek akseptör



özelliğine sahip olurlar. Bundan dolayı öz direnç değeri yükseltmektedir. Sodyum yoğunluğu artığında ise tam tersi mekanizma gerçekleşmektedir. Yani sodyum atomları ağırlıklı olarak ara bölgelere yerleşmekte ve donar özelliği kazanarak öz direnç değerlerini düşürmektedir. Karanlık ve aydınlık ortamlarında elde edilen öz direnç değerlerindeki değişimler örneklerin ışığa duyarlı oluşunun bir göstergesidir. Işığa duyarlılıktaki artış sodyum atomlarının CdS yapısında hızlı rekanbinasyon kanallarının bloke etmesinden kaynaklanmaktadır (Novruzov, V.D., 2013).

Sekil 32’de ölçümlerde aydınlık ortamı oluşturmak için kullanılan Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü verildi.

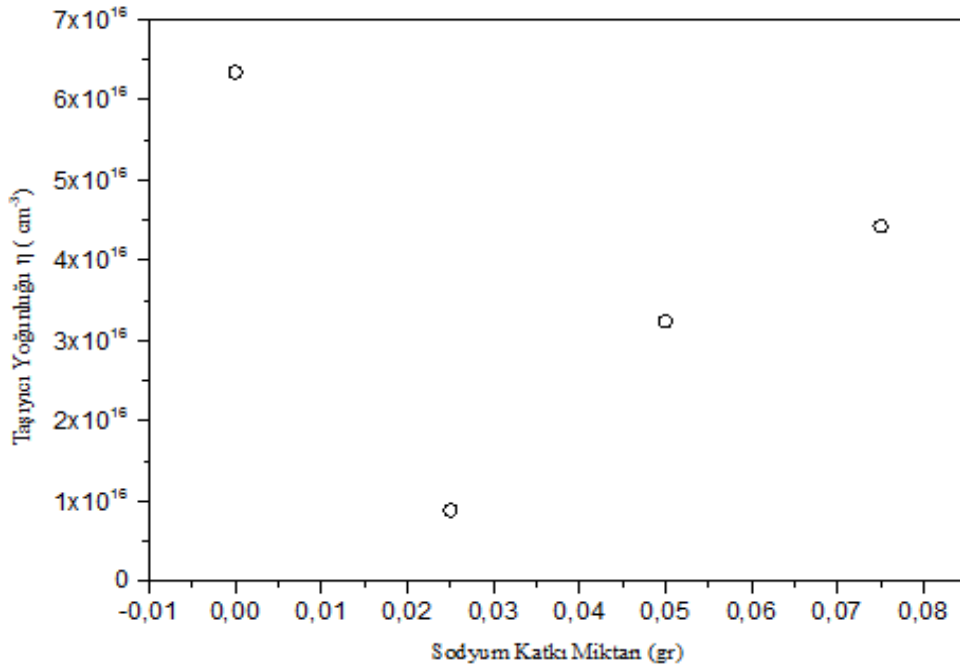


**Şekil 32.** Sciencetech marka SF150C model güneş simülatörü

### **3.9. Taşıyıcı Yoğunluğu**

Şekil 33’de CdS ince film örneklerinin taşıyıcı yoğunluğunun sodyumun katkı miktarına göre değişimi verilmiştir. Taşıyıcı yoğunluğu saf örnekler için  $6,3 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  değerinde iken %1 sodyum katkılı örneklerde  $8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$  değerinde olduğu tespit edildi. Sodyum katkı miktarının artmasıyla taşıyıcı yoğunluğunun  $4,4 \times 10^{16}$  değerine artışı tespit edildi.



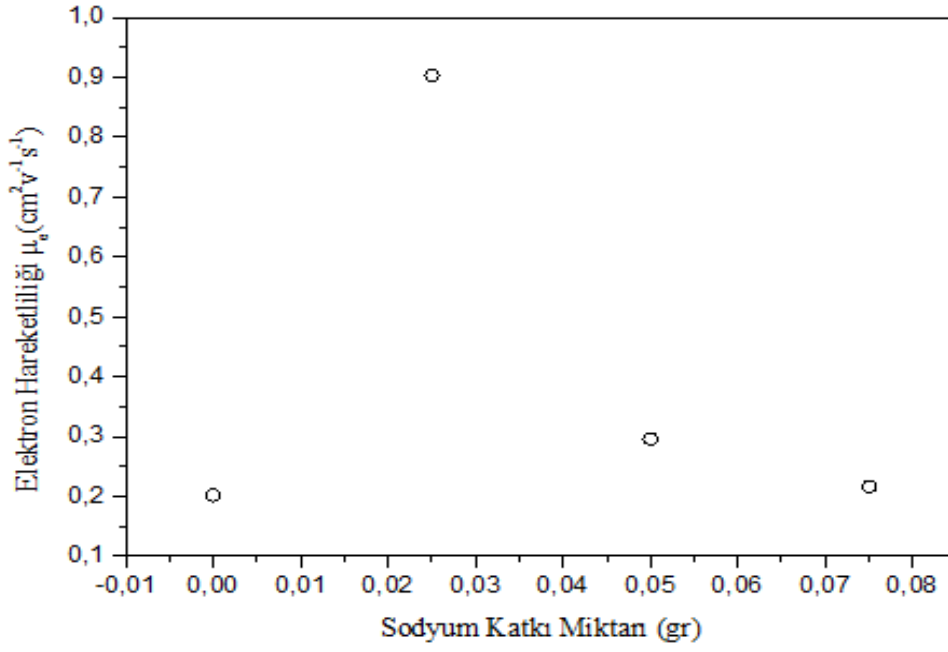


Şekil 33. Saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin taşıyıcı yoğunluğu grafiği

### 3.10. Elektron Hareketliliği

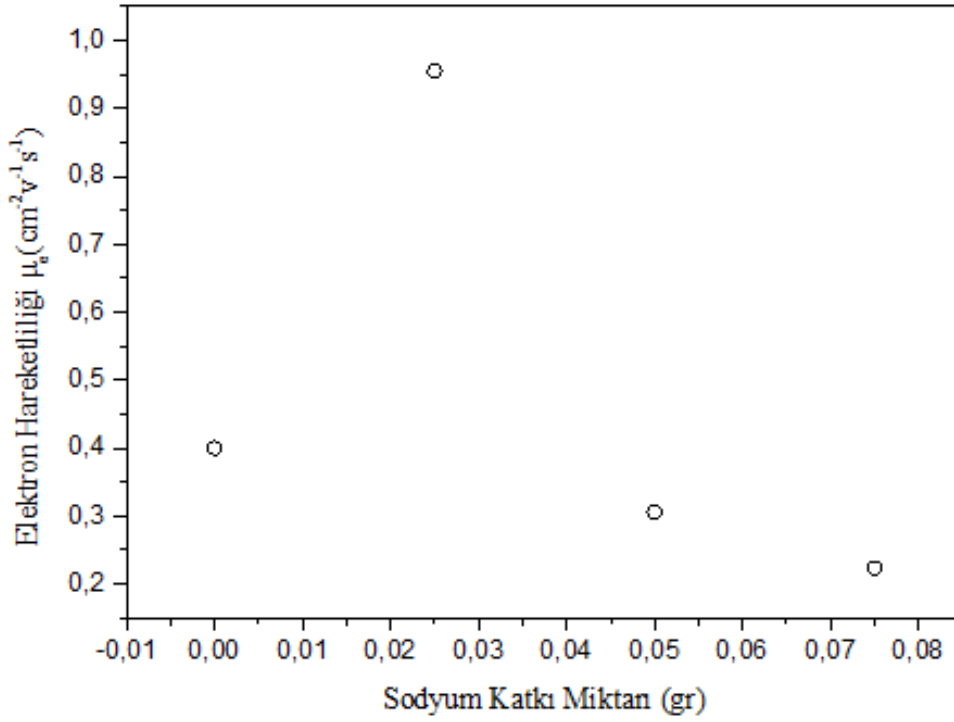
Karanlık ve aydınlık ortamda örneklerin elektron hareketliliği  $\mu_e = \frac{1}{\rho n e}$  ifadesi

kullanılarak belirlendi. Karanlık ve aydınlık ortamlara ait farklı oranlarda sodyum katkılı CdS ince filmlerinin elektron hareketlikleri Şekil 34 ve 35’de verildi. Formülden de görüldüğü üzere elektron hareketliliği öz dirence ve taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir. Şekil 34 ve Şekil 35 incelendiğinde karanlık ve aydınlık ortamlarında saf ve sodyum katkılı CdS örneklerinden elde edilen elektron hareketliliği değerleri doğrusal olmayan bir değişim süreci sergilemektedir. Bunun bir nedeni olarak sodyum atomlarının CdS yapısındaki davranışlardan kaynaklandığı düşünülmektedir. Üretim esnasında kristal yapıda oluşan kadmiyum boşluklarının var oluşu sodyum atomlarının kristal yapıdaki dağılımını etkilemekte ve elde edilen sonuçları doğrusal değişimden saptırmaktadır.



**Şekil 34.** Karanlık ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin elektron hareketliliği grafiği

Şekil 34’de karanlık ortamda elde edilen elektron hareketliliği saf CdS örneğinde  $0,202 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde, %1 katkı oranında  $0,903 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde, %3 katkı oranında ise  $0,216 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde olduğu görülmektedir.



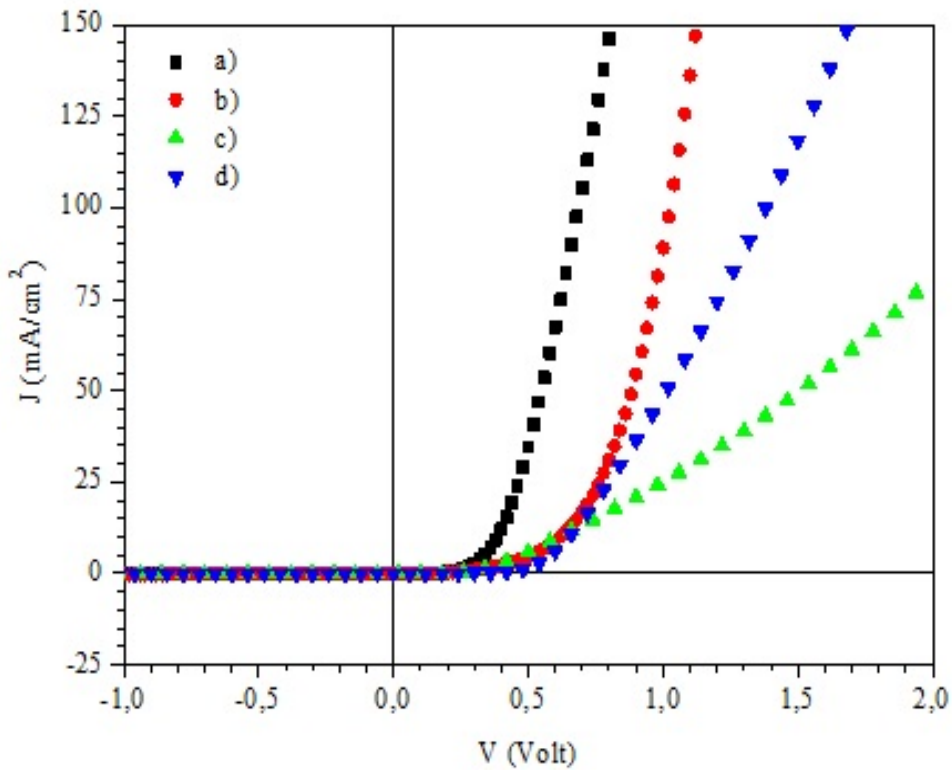
**Şekil 35.** Aydınlik ortamda saf ve sodyum katkılı CdS ince filmlerin elektron hareketliliği grafiği

Şekil 35’de verilen aydınlık ortamdaki ölçümlerde ise saf CdS örneğinde elektron hareketliliğinin  $0,400 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde, %1 katkı oranında ise  $0,955 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerinde olduğu görülmektedir. Fakat sodyumun %3 katkı oranında elektron hareketliliğinin  $0,223 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$  değerine kadar azaldığı tespit edildi. Belirtmek gerekiyor ki CdS ince filmlerin büyümesi esnasında kristal yapıda meydana gelen noktasal kusurlar ( $V_{\text{Cd}}$ ,  $\text{Cd}_i$ ,  $V_{\text{S}}$ , ve  $\text{S}_i$ ) ve bu noktasal kusurların oluşturduğu kusur komplekslerinin yanında tane boyutlarının ve kalınlığın azalması elektron hareketliliğini olumsuz yönde etkilemektedir (Tomakin, vd., 2012). Elektron hareketliliğini etkileyen fiziksel sürecin öz direnç ve taşıyıcı yoğunluğunu etkileyen süreçle benzerlik gösterdiği bilinmektedir.

### 3.11. Farklı Oranlarda Sodyum Katkılı nCdS/pSi Heteroçerit Güneş Pilleri

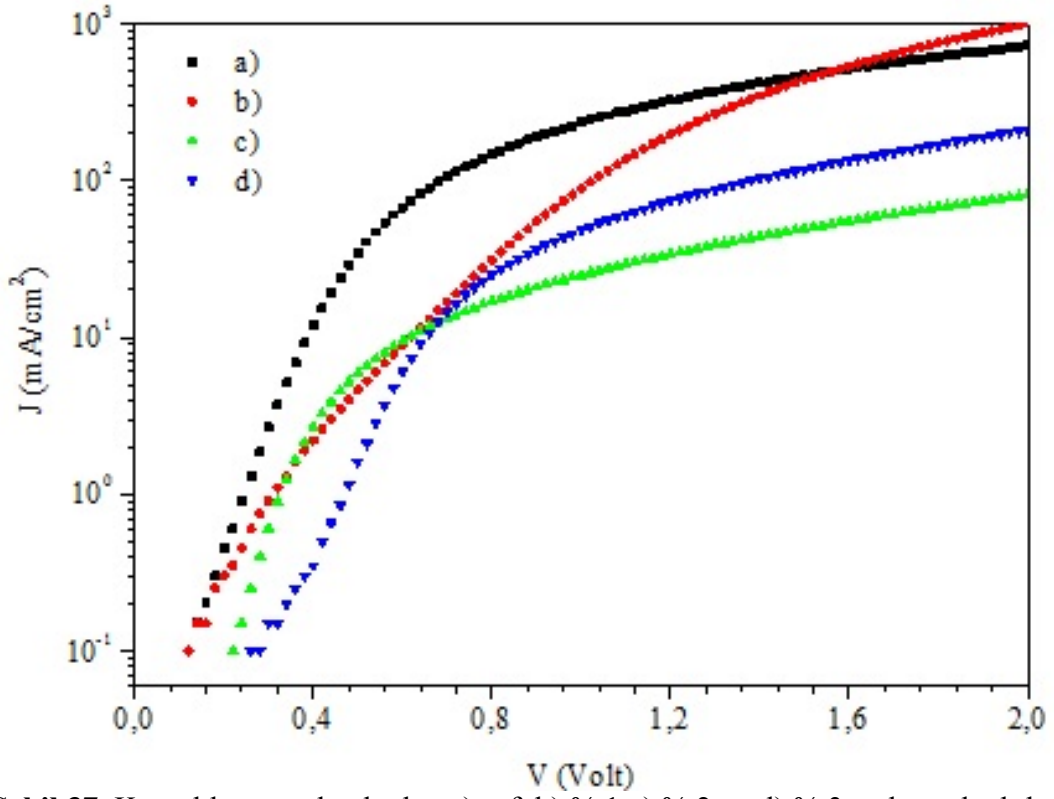
Bu çalışmanın ikinci aşamasında farklı sodyum yoğunluğu içeren CdS ince filmleri kimyasal banyo yöntemiyle pSi tek kristal yüzeyine çöktürüldü. Elde edilen nCdS/pSi ikili yapılar karanlık ve ( $93\text{mWatt}/\text{cm}^2$ ) aydınlık ortamda incelendi. İkili yapılarda omik kontak olarak metalik indiyum kullanıldı. CdS ve Si yüzeylerinde indiyum kontaklar vakum buharlaştırma yöntemiyle oluşturuldu. İkili yapı oda

ortamında 450 °C'de 15 dakika süreyle tavlandı ve nCdS/pSi heterogeçitin oluşumu sağlandı. Daha sonra sodyum katkısına bağlı olarak elde edilen heterogeçitlerin fotovoltmik değęrlerinin ( $V_{oc}$  ve  $I_{sc}$ ) değışimine neden olan fiziksel süreçler incelendi. Şekil 36'da karanlık ortamda saf, %1, %2 ve %3 oranlarında sodyum içeren nCdS/pSi heterogeçitlerin amper volt eğrileri verildi. Şekil 36'da incelendiğinde tüm örneklerin amper volt eğrileri nCdS/pSi heterogeçitine uygun olan doğrultucu bir özellik sergilemekte ve sodyum katkısına bağlı olarak eşik gerilim değęrleri artmaktadır.



**Şekil 36.** Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) %1 c) %2 ve d) %3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin amper volt eğrileri

Şekil 37'de karanlık ortamda ölçülmüş amper volt eğrilerinin logaritmik ölçekte çizilmiş görüntüsü verildi. Bu eğrilerden yararlanılarak heterogeçitler için idealite faktörü ve akım mekanizmaları tespit edildi. Tablo 8'de idalite faktörlerine ait değęrler verilmiştir. Görüldüğü gibi sodyum katkısına bağlı olarak idealite faktörü doğrusal olmayan bir değışim sergilemektedir.



**Şekil 37.** Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1 c) % 2 ve d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin amper volt eğrileri

**Tablo 8.** Karanlık ortamda ölçülen a) saf, b) % 1 c) % 2 ve d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin idealite faktörleri

Sodyum katkı oranı	n	$J_s(\text{mA/cm}^2)$	n	$J_s(\text{mA/cm}^2)$
saf	5,02	0,0074		
%1	7,24	0,0099	13,8	0,0237
%2	3,98	0,0022		
%3	9,29	0,0060	6,08	0,0025

Literatürde bir p-n geçidin idealite faktörünün seri dirence bağlı olduğu rapor edilmektedir (Mohammed, vd., 2014). nCdS/pSi ikili yapıların tavlama işleminde kontak olarak kullanılan In atomlarının Si'a difüzyonu gerçekleşmekte ve yasak band aralığında akseptör seviyesi oluşturmaktadır. Buna ek olarak tavlama esnasında Cd ve S atomlarının pSi difüzyonu gerçekleşebilmektedir. Bu hareketlilikte pSi kristal yapısında kadmiyum atomlarından kaynaklanan derin akseptör özellikli ( $E_v + 0,45$ ,  $E_v + 0,55$  eV) ve kükürt atomlarından kaynaklanan derin donör özellikli ( $E_c - 0,18$ ,  $E_c - 0,37$  eV) kusur rekombinasyon merkezleri oluşmaktadır. Yasak band aralığında oluşan akseptör

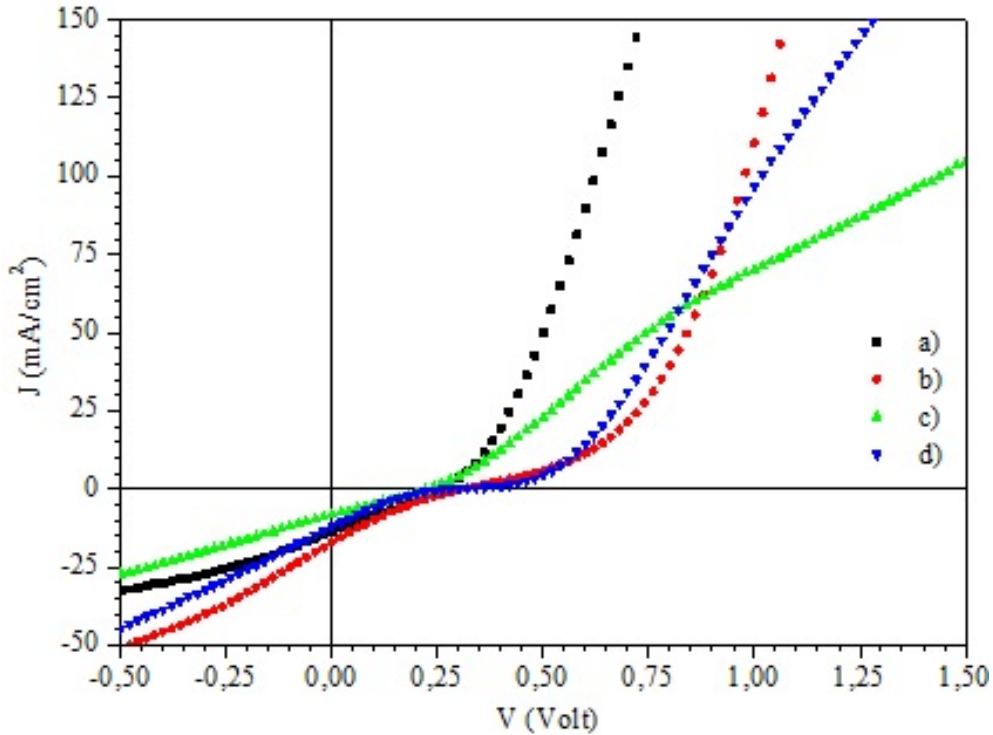
ve donör özellikli rekombinasyon merkezleri özdirenç değerlerini etkilemektedir (Caferov, 1998). Bir heteroçeçitte özdirençin yükselmesi fotovoltaiik değeri de olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada sodyum atomlarının Si yapısına difüzyonu ve bu süreç esnasında Si kristal yapısında meydana gelen yeni faz oluşumları tespit edilerek fotovoltaiik değere olan etkileri araştırıldı. Literatürde sodyum katkı nCdS/pSi heteroçeçitlerine ait çok az sayıda çalışma bulunmaktadır. Buna ek olarak sodyum atomlarının Si kristal yapısında karmaşık bir davranışa sahip oldukları literatürde rapor edilmektedir. Sodyumun oksijensiz bir ortamında 450-850 °C'de Si'a termo difüzyonu yeni bir enerji düzeyi oluşturmazken darbeli lazer yöntemiyle difüzyon yapıldığında Si'un yasak band aralığında derin donör seviyelerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Oluşan derin donör seviyelerinin aktivasyon enerjisi  $E_d=0,035-0,037$  eV değerinde hesaplanmıştır. Ayrıca bol oksijenli bir ortamda sodyumun Si'a 450-850 °C derecede termo difüzyonunda aynı donör seviyelerinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu difüzyon sürecinde difüzyon katsayısı  $D[\text{cm}^2/\text{s}] = 0,024 \exp(-1,29 \text{ eV}/kT)$  değerinde hesaplanmıştır. Belirtmek gerekiyor ki hesaplanan bu difüzyon katsayı değerinin manyetik alan altında gerçekleşen difüzyon katsayı değerinden  $D[\text{cm}^2/\text{s}] = 1.12 \exp(-1,64 \text{ eV}/kT)$  daha küçük olduğu tespit edilmiştir (Brunett, vd., 1981). Farklı teknolojik uygulamalardan elde edilen değerler arasındaki uyumsuzluğun başlıca nedeni bol oksijenli ortamda sodyumun termo difüzyonu Si kristal yapısında  $\text{Na}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_4\text{O}$  gibi karmaşık fazları oluşturmasıdır. Si kristal yapısında oluşan bu yeni fazlar sodyumun hareketliliğini kısıtlamakta ve difüzyon katsayısını düşürmektedir.

Şekil 37'den görüldüğü üzere saf, %3 sodyum katkı nCdS/pSi heteroçeçitlerin logaritmik ölçekte çizilen amper volt eğrileri ağırlıklı olarak iki eğim bölgesi sergilemektedirler. Sodyum içerikli heteroçeçitlere ait eğrilerin birinci bölgesinde akım, temas bölgesinde var olan yüzeysel durum yoğunluklarından kaynaklanan termo emisyon mekanizmasıyla gerçekleşirken ikinci eğim bölgesinde akım, tünelleme mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Birinci bölgede gerçekleşen akım mekanizması  $I = I_0 \exp(qV/nKT)$  denkleminde uygun olduğu Şekil 37'de görülmektedir. Burada n idealite faktörünü, K Boltzmann sabitini, q ise elektronun yükünü göstermektedir. Yüksek gerilim değerlerinde yani ikinci bölgede ise akım, tünelleme mekanizması ile gerçekleşmektedir. Ayrıca ikinci bölgedeki eğrilerin Fowler- Nordheim  $[\ln(I/V^2)-1/V]$  ve B.Ables  $\ln(I/V-1/V)$  koordinatlarında çizildiğinde benzer görüntüler sergilemesi bu

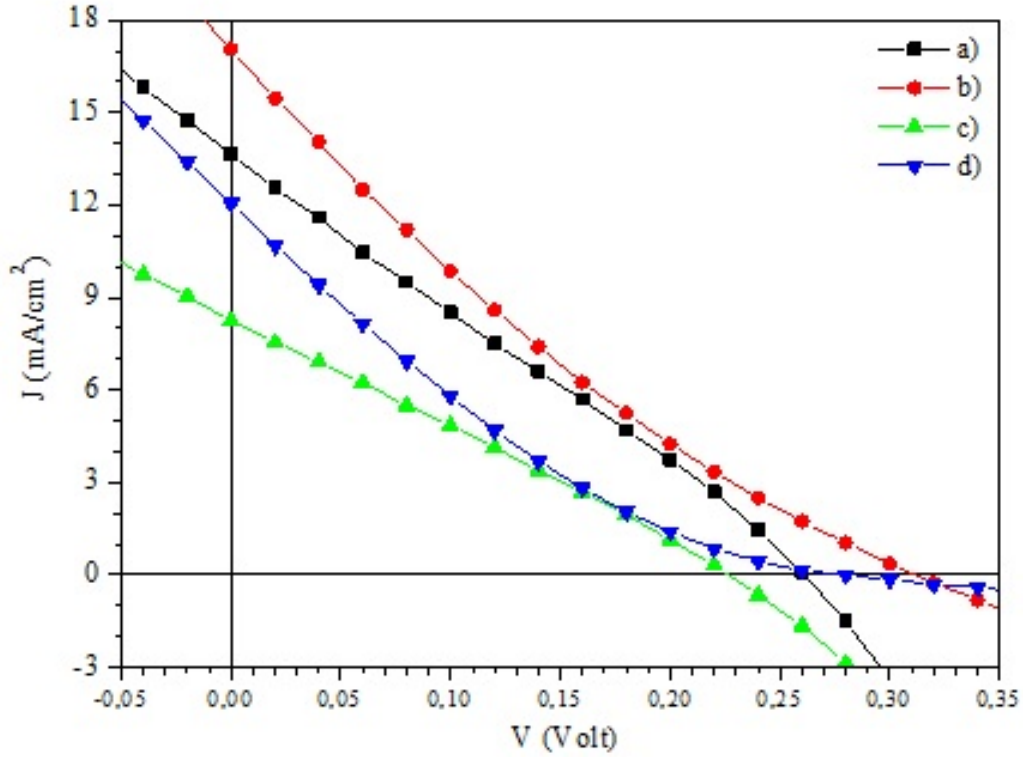
bölgedeki akım mekanizmasının tünelleme mekanizmasına ait olduğunun bir göstergesidir (Maserjian, 1982).

Şekil 37'den de görüldüğü gibi %3 oranında tünelleme mekanizmasıyla oluşan akım değeri %2 oranında tünelleme mekanizmasıyla oluşan akım değerinden daha yüksektir. Genelde tünelleme mekanizmasıyla oluşan akım değerleri heterogeçitin enerji spektrumundaki yarılmalara bağlıdır. Yani yarılma genişliği büyüdüğünde tünelleme akımı büyümekte küçüldüğünde ise tam tersi süreç gerçekleşmektedir. Bu bilgiler ışığında %3 oranında sodyum katkılı örnek tavlandığında heterogeçitin temas bölgesinde yeni bir faz oluşumunun gerçekleştiğini söyleyebiliriz. Bu bölgede akım azınlık yük taşıyıcılarının yani boşlukların oluşturduğu difüzyon akım mekanizması ile gerçekleşmektedir. Heterogeçitin boşaltılmış bölgesinde azınlık akımının oluşumu bu bölgeye enjekte olunmuş elektronların elektro nötrlüğünü sağlamaktadır.

Şekil 38'de saf ve farklı sodyum yoğunluklarında üretilen nCdS/pSi heterogeçitlerin  $93\text{mW/cm}^2$  aydınlatma altında elde edilen amper volt spektrumları verildi.



Şekil 38. Aydınlatma ortamında ölçülen a) saf, b) % 1, c) % 2, d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin akım voltaj yoğunluğu



**Şekil 39.** Aydınlik ortamda ölçülen a) saf, b) % 1, c) % 2, d) % 3 sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin amper volt eğrileri

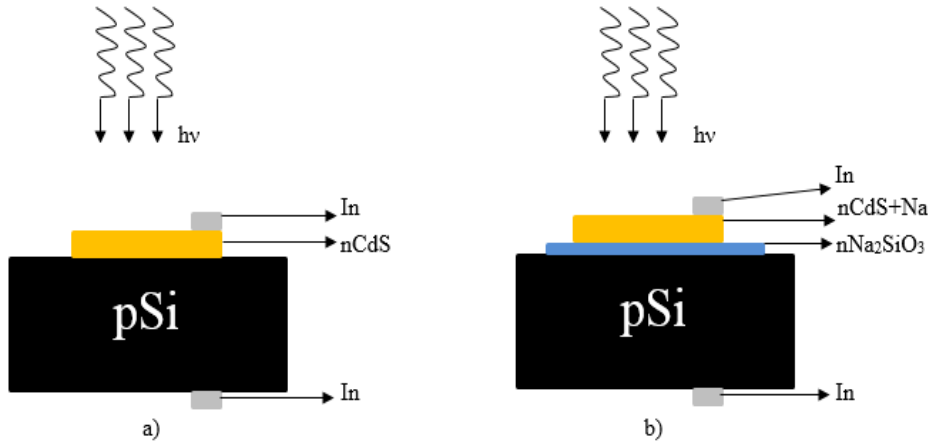
Tablo 9’da saf ve farklı yoğunluklarda sodyumla katkılandırılmış nCdS/pSi heterogeçitlerin aydınlık ortamda ölçülmüş fotovoltaiik parametrelerinin değerleri verilmiştir.

**Tablo 9.** Aydınlik ortamda saf ve farklı oranlarda sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin fotovoltavik değerleri

Örnekler	$I_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	$P_{max}$ (mW/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
CdS	13,65	0,26	0,924	0,26	0,99
% 1 Na+ CdS	17,05	0,31	1,036	0,20	1,11
% 2 Na+ CdS	8,25	0,23	0,498	0,26	0,54
% 3 Na+CdS	12,05	0,27	0,580	0,18	0,62

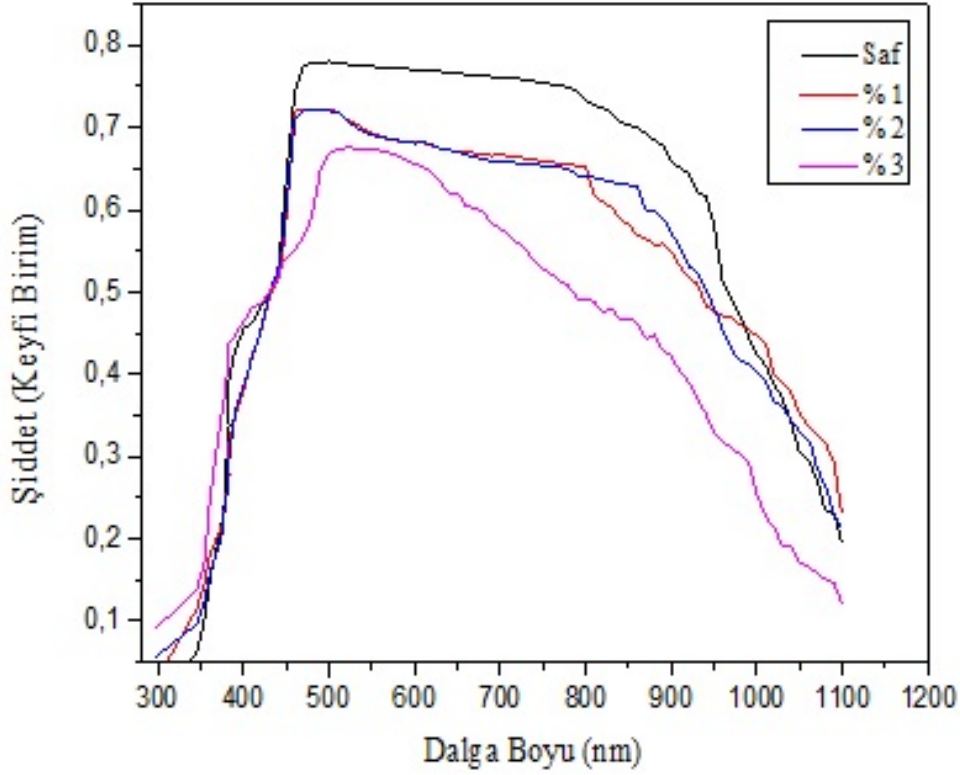


Tablo 9'dan görüldüğü gibi açık devre gerilimi ( $V_{oc}$ ) ve kısa devre akımı ( $I_{sc}$ ) sodyum katkısıyla doğrusal olmayan bir değişim göstermektedir. Genelde  $V_{oc}$  değerindeki düşüşler hetero geçitin temas bölgesinde meydana gelen potansiyel engelin azalması ile izah edilmektedir. Ayrıca ele alınan hetero geçitlerde temel katman olarak kullanılan Si kristal yapısında derin rekombinasyon merkezlerinin var oluşu açık devre gerilim değerlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bilindiği üzere bir hetero geçitin temas bölgesindeki potansiyel engelin değeri n ve p yarıiletken bölgelerinde oluşan potansiyel engellerin toplamına eşittir ( $E_{toplam}=nE_1+pE_2$ ). Hetero geçitin kısa devre akım değeri ( $I_{sc}$ ), temas bölgesinde var olan yüzey durum yoğunluğundan etkilenmektedir. Yüzey durum yoğunluğunun azaltılması için hetero geçite farklı teknolojik işlemler uygulanmaktadır. Bunlardan bir tanesi hetero geçitin farklı frekanslarda ses dalgalarına maruz bırakılmasıdır. Bu uygulamada yüzey durum yoğunluğundaki %17'lik bir düşüş kısa devre akım değerinde %17'lik bir artışa neden olmuştur (Mirsakatov, vd., 2014). Bu teknolojik uygulama yönteminin en önemli avantajı hetero geçitin ek olarak ısıtılmamasıdır. Si kristalinin yüzeyinde her zaman  $SiO_2$  fazının varlığı bilinmektedir. Öte yandan Na, Si ve O içerikli bir sistemin 450-500 °C derecede tavlınması optiksel cam olarak adlandırılan yarıiletken özellikli  $Na_2SiO_3$  fazının meydana gelmesini sağlamaktadır (Gedeon, vd., 2008). Literatürde bu fazın optik soğurma kenarının  $\lambda=589,3$  nm, optik yasak band aralığının ise  $E_g = 2,1$  eV değerlerinde olduğu vurgulanmaktadır. Sodyum katkısı ile potansiyel engelin azalması veya yükselmesi muhtemelen teknolojik işlemler esnasında sodyum katkılı CdS/Si hetero geçitin temas bölgesinde meydana gelen  $Na_2SiO_3$  fazının oluşumundan kaynaklanmaktadır (Shakhmatkin, vd., 2001). Şekil 40 a'da sodyum katkısız saf nCdS/pSi hetero geçitin, Şekil 40 b'de ise sodyum katkısız nCdS/pSi hetero geçitin şematik modeli verilmiştir.



**Şekil 40.** a) nCdS/pSi ikili yapının, b) nCdS/Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>/pSi üçlü yapının şematik görünümü

Bilindiği üzere bir güneş pilinin verimini etkileyen hususlardan bir tanesi temasta bulunan yarıiletkenlerin örgü parametrelerindeki uyumsuzluktur. İyi verimli bir güneş pilinin elde edilmesi için örgü parametreleri arasındaki farkın %4'den küçük olması istenmektedir. Fakat CdS ( $a=4,15\text{\AA}$ ) ile Si ( $a=5,43\text{\AA}$ ) örgü parametreleri arasındaki uyumsuzluk %7 civarındadır (Dzhafarov, vd., 2009). Bu bilgiler ışığında temas bölgesinde oluşan Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> fazının örgü parametresi ( $a=6,07\text{\AA}$ ) göz önüne alındığında Şekil 39'da verilen aydınlık ölçümlerdeki sodyum katkısıyla nCdS/pSi heteroçitlerinin kısa devre akım değerlerindeki düşüşler anlaşılabilir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> fazının oluşumu örgü parametreleri arasındaki uyumsuzluk farkını daha da yükseltmekte ve yüzey durum yoğunluğunu artırarak heteroçitin akımını olumsuz yönde etkilemektedir. Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> fazının yasak band aralığının ( $E_g=2,1\text{eV}$ ) Si'nin yasak band aralığından ( $E_g=1,2\text{eV}$ ) daha büyük olduğu göz önüne alındığında  $V_{oc}$  değerindeki azalmalar anlaşılabilir. Bu azalmalar Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> katmanlı nCdS/pSi heteroçitin potansiyel engel değerinin Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> katmansız nCdS/pSi heteroçitin potansiyel engel değerinden daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Tablo 9'dan görüldüğü üzere sodyumun %3 katkı oranında açık devre gerilim ( $V_{oc}$ ) değeri tekrar artmaktadır. Bu sonuç Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> fazının sodyum yoğunluğuna bağlı olarak bu fazın yeni türevlerinin meydana gelmesinden kaynaklanabilir. Şekil 40'da saf ve sodyum katkılı nCdS/pSi heteroçitlerin dalga boyuna göre duyarlılık spektrumları verilmiştir.



**Şekil 41.** nCdS/pSi heterogeçitlerinin dalga boyuna göre duyarlık spektrumları

Şekil 41 incelendiğinde saf, %1 ve %2 sodyum katkılı heterogeçitlerin daha geniş dalga boylarında duyarlılık gösterdiği görülmektedir. Bunun nedeni bu heterogeçitlerin temas bölgesinde kusur yoğunluğunun az olmasıdır. Ayrıca düşük hızla değişen en geniş sabit ışığa duyarlı alan 450-900 nm dalga boyu aralığının da %2 oranında sodyumla katkılandırılmış nCdS/pSi heterogeçiti sergilemektedir. %1 oranında sodyumla katkılandırılmış heterogeçitte bu değişim 400-820 nm aralığında, sodyum katkısız saf heterogeçitte ise 450-800 nm dalga boyu aralığında gerçekleşmektedir. Fakat %3 sodyum katkılı heterogeçitin ışığa duyarlılığı diğer örneklerden daha küçük değerler göstermekte ve bu duyarlılık alanının 500-900 nm dalga boyu aralığında hızlı bir düşüş göstermektedir. Bu sonuç %3 oranında sodyumla katkılandırılmış heterogeçitin temas bölgesi çevresinde çok sayıda kusurların olduğunu göstermektedir. %2 oranında sodyumla katkılandırılmış nCdS/pSi heterogeçitin dalga boyu optimum genişliktedir.

#### 4. ÖNERİLER

1. Sodyum katkılı nCdS/pSi heterogeçitlerin vakum ortamında üretilerek tekrar incelenmesi.
2. Sodyumun Si'a difüzyonu sonucu oluşan  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  fazının daha ayrıntılı incelenmesi.
3. Kontak malzeme olarak kullanılan In yerine alüminyum veya altın kullanılarak nCdS/pSi heterogeçitlerin tekrar incelenmesi.

## KAYNAKLAR

- Abdullah M.A., Al H., Salah A., and Jabber j., 2012.** Synthesis, structure, and optical properties of CdS thin films nanoparticles prepared by chemical bath technique. Journal of the Association of Arab Universitiesfor Basic and Applied Sciences, 11,27-31.
- Altosaar, M., Ernits, K., Krustok, J., Varema, T., Raudoja, J. and Mellikov, E., 2005.** Comparison of CdS films deposited from chemical baths containing different doping impurities. Thin Solid Films, 480–481, 147–150.
- Brunetti, R., Jacoboni, C., Nava, F., Reggiani, L., Bosman, L. and Zijlstra, R.J.J., 1981.** Diffusion coefficient of electrons in silicon. Journal of Applied Physics, 52, 6713-6722.
- Caferov, 1998.** Yarı iletken fiziği-1. Yıldız Teknik Üniversitesi. YTÜ. FE. DK yayın no:-98.0365/ Fakülte yayın no: FE.FZL-98.004. 200 s.
- Cruz, J.S., Pérez, R.C., Delgado, G.T. and Angel, O.Z., 2010.** CdS thin films doped with metal–organic salts using chemical bath deposition. Thin Solid Films, 518, 7, 1791–1795.
- Dikici, M., Mayıs 2012.** Enerji Bandları. 307310 s. Katıhal Fiziği. Mayıs 2012 (2. Baskı), Serkan Yayıncılık San. Ve Tic. A.Ş., ISBN: 9789750219191, 424 s.
- Dzhafarov, T.D., Ongul, F. and Yuksel, S.A., 2009.** Effect of Indium Diffusion on Characteristics of CdS Films and nCdS/pSi Heterojunctions. Vacuum, 84, 310-314.
- Enriquez, J.P. and Mathew, X., 2003.** Influence of the thickness on structural, optical and electrical properties of chemical bath deposited CdS thin films. Sol Energy Mater. Sol. Cells, 76, 3, 313–322.
- Ezumi, H. and Keitoku, S., 1993.** Influence of pulse width on CdS film Pprepared by YAG laser ablation.Japanese Journal of Applied Physics, 32, 1783–1786.
- Fangyang L., Yanqing L., Jun L., Bo Wang,, Sanshuang K., Zhian Z., Jie L. and Yexiang L., 2010.** Characterization of chemical bath deposited CdS thin films at different deposition temperature. Journal of Alloys and Compounds, 493, 1–2, 305–308.
- Ferekides, C.S., Marinskiy, D., Viswanathan, V., Tetali, B., Palekis, V., Selvaraj, P. and Morel, D.L., 2000.** High efficiency CSS CdTe solar cells.Thin Solid Films, 361–362, 520–526.
- Gedeon, O., Liska, M. And Machacek. J., 2008.** Connectivity of Q-Species In binary Sodium-Silcate glasses. Journal of Non-Crystalline Solids, 354, 1133-1136.

- Hani K., Isaiah O O., Guangyu C, and Lee C., 2008.** Characterization of CdS thin films by chemical bath deposition using four different cadmium sources Science Direct, 516, 1–2, 7306–7312.
- Jaber, A.Y., Alamri, S.N. and Aida, M.S., 2012.** CdS thin films growth by ammonia free chemical bath deposition technique. Thin Solid Films, 520, 9, 3485–3489.
- Khallaf, H., Oladeji, I.O., Chai, G. and Chow, L., 2008.** Characterization of CdS thin films grown by chemical bath deposition using four different cadmium sources. Thin Solid Films, 516, 7306–7312.
- Klyuev. V.G., Mairova. T.L., Naumov, A.V. and Semevo, M.N., 2005.** Luminescence and electrical properties of CdS films doped with potassium and sodium. Journal of Applied Spectroscopy, 72, 509-513.
- Kwok, H.S., Zheng, J.P., Witanachchi, S., Mattoks, P., Shi, L., Ying, Q.Y., Wang, X.W. and Shaw, D.T., 1988.** Growth of highly oriented CdS thin films by laser-evaporation deposition. Applied Physics Letters, 52, 13, 1095–1097.
- Mageswari, S., Dhivya, L., Balan P. and Ramaswamy M., 2012.** Structural morphological and optical properties of Na and K dual doped CdS thin film. Journal of Alloys and Compounds, 545, 41–45.
- Mageswari. S., Dhivya. L., Balan P., and Ramaswamy M., 2012.** Structural morphological and optical properties of Na and K dual doped CdS thin film. Journal of Alloys and Compounds, 545, 41–45.
- Manna, S., Das, S., Suvra P. Mondal, S.P., Singha, R. and Ray, S.K., 2012.** High Efficiency Si/CdS Radial Nanowire Heterojunction Photodetectors Using Etched Si Nanowire Templates. The Journal of Physical Chemistry C. 116, 7126-7133.
- Maserjian, J. and Zamani, N., 1982.** Behavior of the Si/SiO<sub>2</sub> interface observed by Fowler-Nordheim tunneling. Journal of Applied Physics. 559-567, 10.1063/1.329919.
- Mirsagatov, S.A. and Sapayev, I.B., 2014.** Injection Photodiode Based on a p-Si-n-CdS-n+-CdS Structure. Physics of Semiconductor Devices. 48, 1398-1404.
- Mohammed, M., Li, Z., Cui, J. and 2014.** Acid-doped multi-wall carbon nanotube/n-Si heterojunctions for enhanced light harvesting. Solar Energy. 106, 171-176.
- Novruzov, V.D., Keskenler, E.F., Tomakin, M., Kahraman, S. and Gorur, O., 2013.** Effects of ultraviolet light on B-doped CdS thin films prepared by spray pyrolysis method using perfume atomizer, Applied Surface Science, 280, 18-324.
- Novruzov, V.D.** Yüksek verimli CdS/Cu<sub>2</sub>S güneş pillerinin üretilmesi, Patent USSR No:1371460, USSR Moskova, 1987. 27
- Obaid, A., Mahdi, M., Yusof, Y., Bououdina, M. And Hassan, Z., 2013.** Structural and optical properties of nano crystalline lead sulfide thin films prepared by

microwave-assisted chemical bath deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 16, 971-979.

**Oumous, H. and Hadiri, H., 2001.** Optical and electrical properties of annealed CdS thin films obtained from a chemical solution. *Thin Solid Films*, 386, 1, 87–90.

**Öncel, Y., 2014.** Kimyasal Banyo Yöntemiyle Elde Edilen Cd<sub>1-x</sub>Cox S Filmlerin Bazı Yapısal, Elektriksel Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 76 s, 19-23.

**Romeo, N., Bosio, A., Canevari, V. and Podesta, A., 2004.** Recent progress on CdTe/CdS thin film. solar cells. *Solar Energy*, 77, 795–801.

**Sasikala, G., Thilakan, P. and Subramanian, C., 2000.** Modification in the chemical bath deposition apparatus, growth and characterization of CdS semiconducting thin Films for photovoltaic applications. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 62, 3, 275–293.

**Shakhmatkin, B.A., Vedishcheva, N.M. and Wright, A.C., 2011.** Can thermodynamic relate properties of melts and glasses to their structure. *Journal of Non-Crystalline Solids*, 293, 220-226.

**Song, Bion, H.Y., Li, Y., Ji, P.F., Yuan, S.Q., Zhou, F.Q. and Li, X.J., 2015.** Synthesis, structures and optical properties of CdS:Cd/Si multi-interface nano heterojunction. *Journal of Alloys and Compounds*, 637, 133-136.

**Stoessel, C.H., (Stoessel, C.H., Bunshah, R.F. Prakash, S. and Fetterman, H.R., 1993.** Thin Film Processing of High-Tc Superconductors. *J. Superconductivity*, 6, 1–15.

**Tomakin, M., 2003.** Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen Cd<sub>1-x</sub>ZnxS İnce Filmlerinin Bazı Yapısal Elektriksel Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi., Karadeniz teknik üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, 68 sayfa, 26-29.

**Tomakin, M., 2003.** Kimyasal Püskürtme Yöntemiyle Elde Edilen Cd<sub>1-x</sub>ZnxS İnce Filmlerinin Bazı Yapısal Elektriksel Ve Optik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi., Karadeniz teknik üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, Türkiye, XI+68 sayfa,40-43

**Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksız, E. and Polat, İ., 2011.** Preparation and characterization of new window material CdS thin films at low substrate temperature (<300 K) with vacuum deposition. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 14, 2, 120–127.

**Tomakin, M., Altunbaş, M., Bacaksız, E. and Çelik, Ş., 2012.** Current transport mechanism in CdS thin films prepared by vacuum evaporation method at substrate temperatures below room temperature. *Thin Solid Films*, 520, 7, 2532–2536.

- Ullrich, B., Sakai, H., Dushkina, N.M., Ezumi, H., Keitoku, S. and Kobayashi, T., 1998.** The Influence of the laser fluence on the transmission features of thin CdS films formed by laser ablation. *Microelectronic Engineering*, 43–44, 695–700.
- Yan, L.L., Wang, X.B., Cai, X.J. and Li, X.J., 2015.** Effect of boron-doping on the luminescent and electrical properties of a CdS/Si heterostructure based on Si nanoporous pillar array. *Journal of Alloys and Compounds*, 632, 450-455.
- Yellaiah. G., Hadasa. K. and Nagabhushanam. M., 2013.** Structural optical and vibrational studies of Na<sup>+</sup> doped Cd<sub>0.8</sub>Zn<sub>0.2</sub>S semiconductor compounds. *Journal of Alloys and Compounds*, 581, 805–811.



## ÖZGEÇMİŞ

01.05.1988 yılında Erzincan'ın Tercan ilçesinde doğdu. İlk, Orta ve Lise öğrenimini Tercan ilçesinde tamamladı. 2007 yılında Rize Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans eğitimine başladı ve halen yüksek lisansına devam etmektedir.