

$\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ İnce Filmleri İçin Ohmic Ve Schottky
Kontaklar

Hilal Rüzgar

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Haziran 2010

Ohmic And Schottky
Contacts Of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films

Hilal Rüzgar

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department Of Physics

June 2010

$\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ İnce Filmleri İçin Ohmic Ve Schottky
Kontaklar

Hilal Rüzgar

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Fizik Anabilim Dalı
Katıhal Fiziği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Prof. Dr. M. Celalettin BAYKUL

Haziran 2010

ONAY

Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Hilal RÜZGAR'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “Cd_(1-x)Zn_xS İnce Filmleri için Ohmic ve Schottky Kontaklar” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. M. Celalettin BAYKUL

İkinci Danışman : -

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Prof. Dr. M. Celalettin BAYKUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol TAŞAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali ÇETİN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Suat PAT

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ercan UÇGUN

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Nimetullah BURNAK

Enstitü Müdürü

Cd_(1-x)Zn_xS İnce Filmleri İçin Ohmic Ve Schottky Kontaklar

HİLAL RÜZGAR

ÖZET

Bu çalışmada Ultrasonik Sprey Piroлиз (USP) yöntemi ile üretilen n-tipi Cd_(1-x)Zn_xS (x=0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0) yarıiletken ince filmlerinin elektriksel özellikleri incelenmiştir. Cd_(1-x)Zn_xS ince filmlerinin akım-voltaj karakteristikleri ölçülmüştür. Bu ölçümler oda sıcaklığında ve karanlıkta -35 ile +35 Volt arasında değişen voltaj değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen ince filmlerin I-V karakteristikleri gümüş kontaklar için lineerdir. Bu lineerlikten gümüş kontakların Cd_(1-x)Zn_xS yarıiletken ince filmleri için ohmic kontak olduğu anlaşılmıştır. Cd_(1-x)Zn_xS ince filmlerinin elektriksel öz dirençleri iki uç tekniği kullanılarak belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda Cd_(1-x)Zn_xS ince filmlerinin elektriksel öz direnç değerlerinin 4,7 ve 11,4 Ω.cm arasında değiştiği hesaplanmıştır.

n-tipi Cd_(1-x)Zn_xS ince filmlerinin yüzeyleri üzerinde Yüksek Termal Vakum Buharlaştırma Yöntemi (High Thermal Vacuum Evaporation Technique) kullanılarak altın (Au) ile kaplanmıştır. Yapılan altın kontaklar oluşturularak hazırlanan filmler oda sıcaklığında ve karanlıkta -0,50 ile +0,95 Volt arasındaki değişen değerlerde akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiştir. Bu akım- voltaj değerlerinden yararlanılarak, altın'ın -0,50 ile +0,95 Volt arasında Metal(Au)/Yarıiletken(Cd_{0,2}Zn_{0,8}S) kontağı için Schottky kontak olduğu belirlenmiştir. Akımın ln değeri alınarak, voltaj değerlerine karşı grafiği çizilmiştir ve çizmiş olduğumuz grafikten idealite faktörü (n) elde edilmiştir. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S kontaktı için kapasitans-voltaj (C-V) ölçümleride alınmıştır. (1/C²)'nin V'ye karşı grafiği çizilmiştir. Bu grafikten yararlanarak Schottky engelinin yüksekliği ve serbest taşıyıcı yük yoğunluğu hesaplanmıştır. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S yarıiletken ince filmi için, Schottky engel yüksekliği (E_{φM}) 1,3 eV, serbest taşıyıcı yük yoğunluğu (N_d) 8,21x10¹⁹ cm⁻³ olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Ag/Cd_(1-x)Zn_xS kontaklar, Au/Cd_(1-x)Zn_xS kontaklar, Schottky engel yüksekliği, I-V ölçümleri, C-V ölçümleri, Öz direnç.

Ohmic And Schottky Contacts Of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ Thin Films

HİLAL RÜZGAR

SUMMARY

In this work, the electrical properties of n-type $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ ($x=0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0$) thin films were produced by Ultrasonic Spray Pyrolysis (USP) method have been investigated. Current-Voltage characteristics of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films were measured. These measurements were performed by applying voltages between -35 and +35 Volts at room temperature in the dark. I-V characteristics of thin films were linear for silver contacts. Due to the linearity, silver contacts have been observed that they were ohmic contacts for $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films. Electrical resistivities of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films have been determined using the two-probe technique. Electrical resistivities of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films have been found to be between 4.7 and 11.4 $\Omega\cdot\text{cm}$.

Surfaces of n-type $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films were coated with gold (Au), by using High Thermal Vacuum Evaporation Technique. Current-voltage characteristics of Au/n-type $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ have been measured applying voltages between -0.50 and +0.95 volts at room temperature in the dark. By looking at current-voltage curves of Metal(Au)/Semiconductor($\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$) contact was a Schottky contact. From the plot of $\ln I$ versus Voltage (V), idealite factor (n) was obtained. In addition to that, Schottky barrier height was obtained from the plot of $(1/C^2)$ versus voltage (V). However, the number of free charge carriers was determined. The Schottky barrier height ($E\phi_M$), and the number of free charge carriers (N_d) were found to be 1.3 eV and $8.21 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$, respectively.

Keywords: Ag/ $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ contacts, Au/ $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ contacts, Schottky barrier height, I-V measurements, C-V measurements, Resistivity.

TEŞEKKÜR

Gerek derslerimde ve gerekse tez çalışmalarında, bana danışmanlık ederek, beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. M. Celalettin BAYKUL'a teşekkürlerimi sunarım.

Altın kontak oluşturulması için yardımcı olan Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim üyelerinden Doç. Dr. Metin KUL ve Doç. Dr. Şenol AYBEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam sırasında yardım, destek ve dostluklarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Nilgün ORHAN, Barış ALTIOKKA, Umut SARAÇ, Yadigar GÜLSEVEN SIDIR ve İsa SIDIR'a teşekkürlerimi sunarım.

Bugünlere ulaşmamı borçlu olduğum anne ve babama sonsuz hürmetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
 GİRİŞ	 1
1.YARIİLETKENLER	3
1.1. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı.....	5
1.2. Yarıiletken Tipleri	6
1.2.1. n-tipi Katkılı Yarıiletkenler.....	7
1.2.2. p-tipi Katkılı Yarıiletkenler.....	9
1.3. II-VI Grubu Bileşiklerinin Kristal Yapısı	11
1.4. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri	14
1.5. Yarıiletken İnce Filmler.....	18
1.6. II-VI Grubu Bileşikleri.....	19
1.6.1. Kadmiyum Sülfür (CdS)	20
1.6.2. Çinko Sülfür (ZnS).....	21
1.6.3. Kadmiyum Çinko Sülfür (Cd _{1-x} Zn _x S).....	22
 2. Cd_{1-x}Zn_xS FİMLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	 24
2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar.....	24
2.1.1. Schottky Kontaklar.....	25
2.1.2. Ohmic Kontaklar.....	28
2.2. Cd _{1-x} Zn _x S Filmlerinde Metal-Yarıiletken Yapılarının Oluşturulması.....	30

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.3. $Cd_{1-x}Zn_xS$ Yarıiletken Filmlerinin Özdirenç ve İletkenlikleri.....	31
2.4. $Cd_{1-x}Zn_xS$ Filmlerinin Akım –Voltaj Karakteristikleri	32
2.5. Ag / $Cd_{1-x}Zn_xS$ Filmlerinin Akım –Voltaj Karakteristikleri	33
2.6. Au / $Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ Filminin Akım –Voltaj Karakteristiği.....	39
2.7. Au / $Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ Filminin Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri.....	43
 3. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	 47
 4. KAYNAKLAR DİZİNİ.....	 49

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. a) İletkenlerin, b) yalıtkanların, c) yarıiletkenlerin enerji-bant diyagramı.....	4
1.2. a) $T=0$ °K, b) $T>0$ °K’de has yarıiletkenin iletkenlik ve valans bant yapısı....	6
1.3. IV ^A grubu elementi Ge’ye, V ^A grubu elementi As’nin katkılanmış halinin şematik gösterimi.....	8
1.4. n-tipi katkılı yarıiletkenlerde donör enerji seviyesi (E_d).....	9
1.5. IV ^A grubu elementi Ge’ye, III ^A grubu elementi olan In’nin katkılanmış halinin şematik gösterimi.....	10
1.6. p-tipi katkılı yarıiletkenlerde akseptör seviyesine (E_a) ait enerji seviyesinin bant şeması içinde gösterilmesi.....	11
1.7. Yüzey Merkezli Kübik yapı.....	12
1.8. Kübik Çinko Sülfür’in kristal yapısı.....	12
1.9. Hegzagonal sıkı paketlenmiş (hcp)kristal yapısı.....	14
1.10. Yarıiletken için öz direncin sıcaklığa göre değişim grafiği.....	16
2.1. n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapılmadan önceki n-tipi yarıiletken ve metalin enerji-bant diyagramı.....	26
2.2. n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı.....	27
2.3. n-tipi yarıiletken ile metalin kontak denge durumu enerji-bant diyagramı.....	28
2.4. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak oluşturmada önceki enerji-bant diyagramı.....	28
2.5. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı.....	29

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.6. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak denge durumu enerji-bant diyagramı.....	30
2.7. Ag/Cd _{1-x} Zn _x S Metal-Yarıiletken-Metal yapılarının şematik görünüşü....	30
2.8. Au/Cd _{1-x} Zn _x S Metal-Yarıiletken-Metal yapılarının şematik görünüşü....	31
2.9. İki uç metodunda, öz direnci elde edilecek malzemenin şematik gösterimi.....	32
2.10. Ag/CdS filmine ait 9000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.....	33
2.11. Ag/Cd _{0,8} Zn _{0,2} S filmine ait 7000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	34
2.12. Ag/Cd _{0,6} Zn _{0,4} S filmine ait 8000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	35
2.13. Ag/Cd _{0,4} Zn _{0,6} S filmine ait 9000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	36
2.14. Ag/Cd _{0,2} Zn _{0,8} S filmine ait 8000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	37
2.15. Ag/ZnS filmine ait 7000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	38
2.16. Au/Cd _{0,2} Zn _{0,8} S filmine ait 5000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği	40
2.17. Au/Cd _{0,2} Zn _{0,8} S filmine ait ln I-V değişim karakteristiği	41
2.18. Au/Cd _{0,2} Zn _{0,8} S filmine ait C-V değişim karakteristiği	43
2.19. Au/Cd _{0,2} Zn _{0,8} S filmine ait 1/C ² -V değişim karakteristiği.....	45

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Bazı çok kullanılan malzemeler için yasak enerji aralığı değerleri.....	5
2.1. Ag/Cd _{1-x} Zn _x S filmlerinin hesaplanan öz direnç ve iletkenlik değerleri, kontaklar arası mesafeler ve film kalınlıkları.....	39

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Malzemenin kesit alanı
Å	Angstrom
C	Kapasitans
CBD	Kimyasal Banyoda Çöktürme (Chemical Bath Deposition)
C-V	Kapasitans-Voltaj
d	Düzlemler arası uzaklık
e	Elektrik yükü
ELD	Elektrolüminesant
$e\Phi$	İş fonksiyonu
$e\Phi_m$	Metalin iş fonksiyonu
$e\Phi_{yi}$	Yarıiletkenin iş fonksiyonu
eV	Elektron volt
E	Elektrik alan
E_c	İletkenlik bandı enerjisi
E_v	Valans bandı enerjisi
E_g	Enerji bant aralığı
E_A	Akseptör enerjisi
E_a	Akseptör enerji seviyesi
E_D	Donör enerjisi
E_d	Donör enerji seviyesi
E_f	Fermi düzeyi enerjisi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$e\Phi_B$	Schottky engel yüksekliği
ϵ_s	Yarıiletkenin dielektrik sabiti
fcc	Yüzey merkezli kübik yapı
FLD	Fotoluminesant
hcp	Sıkı paketlenmiş hegzagonal yapısı
HEMT	Yüksek elektron hareketli transistör
I	Akım
I-V	Akım-voltaj
J	Akım yoğunluğu
k	Boltzman sabiti
$\frac{kT}{e}$	Termal potansiyel
K	Kelvin
L	Kontakların arasındaki uzaklık
LED	Işık yayan diyot
MBE	Moleküler Demet Epitaksi (Molecular Beam Epitaxy)
MOCVD	Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme (Metalorganic Chemical Vapor Deposition)
MOSFET	Metal-yarıiletken alan etkili transistörler
n	Elektron yoğunluğu
n_i	Has taşıyıcı yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
nm	Nanometre
N_d	Taşıyıcı konsantrasyonu
(n)	İdealite faktörü
σ	Elektriksel iletkenlik
ρ	Özdirenç
p	Hol yoğunluğu
t	Numunenin kalınlığı
T	Mutlak sıcaklık
USP	Ultrasonik Sprey Piroliz
V	Gerilim
v	Elektrik yükünün hızı
VE	Vakumda Buharlaştırma (Vacuum Evaporation)
V_i	Doğru besleme voltajı
λ	Dalga boyu
x	Zn konsantrasyonu
μ	Mobilite
μ_n	Elektronların mobilitesi
μ_p	Hollerin mobilitesi
χ	Yarıiletken yüzeyinden bir elektron koparmak için verilmesi gereken enerji
W	Kontakların genişliği

GİRİŞ

Çağımız teknolojinin hızlı gelişmesi, sanayileşme, fosil enerji kaynaklarının giderek azalması, çevre kirliliği, artan nüfusla birlikte ihtiyaç duyulan enerji miktarı, gittikçe büyüyen bir enerji sorunu haline gelmiştir. Özellikle 1973-1974 petrol krizinden sonra petrol fiyatlarının aşırı yükselmesi petrol bağımlısı ülkelerde ekonomik krizlere ortam hazırlamıştır. Bu tür enerji sorunları bizi yeni enerji kaynaklarını bulmaya yöneltmiştir. Petrol, kömür ve doğalgaz gibi fosil yakıt olmayan, bilimsel terminolojide ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları’ olarak isimlendirilen, yeni enerji kaynakları geliştirilmiştir. Güneş, rüzgâr, jeotermal, hidrojen, biyokütle gibi enerji kaynakları ‘Yenilenebilir Enerji Kaynakları’dır.

Değişik enerji kaynakları araştırılırken, çevre faktörünü de düşünmek günümüz için önemli bir zorunluluk haline gelmiştir. Bu durum göz önünde bulundurulduğunda, alternatif enerji kaynaklarından birisi olan güneş enerjisinden yoğun olarak faydalanılmaktadır. Örneğin güneş enerjisinden yararlanılarak, güneş kollektörleri ile sıcak su sağlanması 20. yüzyılda yaygınlaşmıştır. Güneş enerjisinden doğrudan elektrik enerjisine dönüşüm güneş pilleriyle mümkündür. Güneş pilleri ince katı filmlerle oluşturulmaktadır. Ayrıca, ince katı filmler, diğer yüksek performanslı elektronik ve optoelektronik cihazlarda da kullanılmaktadır.

Güneş pilleri, en basit anlamda güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren elektronik aygıtlardır. İlk güneş pili, 1954 yılında Bell laboratuvarlarında elde edilmiştir (Goetzberger and Hebling, 2000). Güneş pillerinin ilk kullanımı uzay çalışmalarında olmuştur. İnce katı film güneş pilleri üç çeşittir. Bunlar tek kristal güneş pilleri, çok kristal güneş pilleri ve amorf yapıdaki güneş pilleridir.

Tek kristal güneş pillerinde laboratuvar koşullarında alınan en verimli sonuç %24,5’tir. Ticari modüller de bu verim %15-16 kadardır (Goetzberger and Hebling, 2000). Silisyum, tek kristal güneş pili yapımında en çok kullanılan malzemelerden birisidir. Kalite ve verimlilik açısından tek kristal güneş pilleri en iyileridir ama üretimi teknik ve zaman açısından uzun sürdüğü için pahalı bir yöntemdir.

Çok kristalli güneş pilleri laboratuvar koşullarında %18,6 verim sağlarlar. Ticari modüller de bu verim %15,2 kadardır (Elgamel and Gobrecht, 2001), (Oktik, 2001), (Estela Calixto et al., 2007). Kalite ve verimlilik açısından tek kristalli güneş pilleri ile karşılaştırdığımızda onlar kadar iyi olmasa da en fazla üretilen güneş pili türüdür. Nedeni ise maliyetin daha düşük ve verimlilik/maliyet oranının yüksek olmasıdır.

Amorf yapıdaki silisyum güneş pilleri de laboratuvar koşullarında % 14,7 verim sağlarlar. Modüllerdeki verimliliği ~ %10'dur. Amorf silisyum malzemesini kristalli silisyumdan ayıran özellik, silisyum atomlarının malzeme içindeki düzenlerinin, birinci derece komşu atomların ötesinde gelişigüzel sıralanmış olmasıdır. Malzeme içerisindeki amorf silisyumun içerisine %5-10 oranında hidrojen katılarak elde edilen (a-Si:H) ve mikrokristal yapılı (μ c-Si:H) amorf silisyum güneş pillerinde elektriksel özellikler, fotovoltaiik çevirime daha uygun hale getirilir (Oktik, 2001), (Lips et al., 2002). Amorf silisyum güneş pilleri, tek kristal silisyum güneş pillerine göre çok daha ucuzdur ve üretimi kolaydır.

Günümüzde, gelişmiş teknolojik imkânların sağlamış olduğu modern cihazlar kullanılarak çeşitli yöntemlerle, daha kaliteli, daha ucuz ince katı filmler elde edilmektedir.

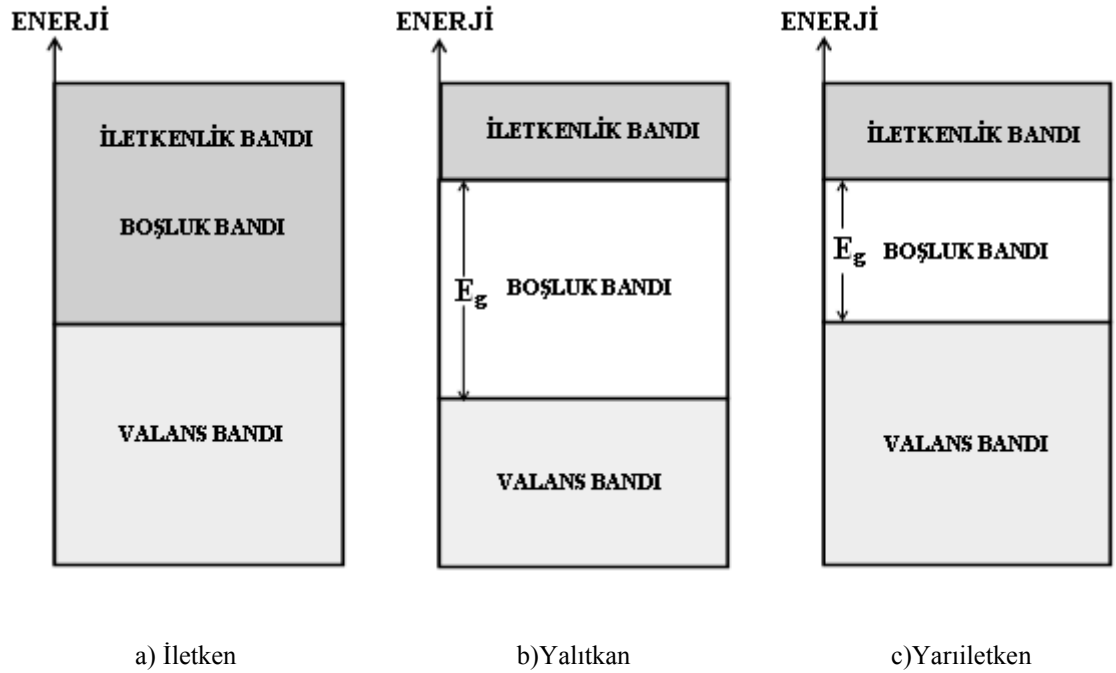
BÖLÜM 1

YARIİLETKENLER

Katılar, elektriksel iletkenlikleri bakımından iletkenler, yalıtkanlar ve yarıiletkenler olmak üzere üç gruba ayrılırlar. Bu gruplandırma işlemi, enerji-bant yapısına göre yapılır (Millman and Halkias, 1967).

İletkenleri, enerji bant yapısına göre açıklarsak, iletkenlerde valans ve iletkenlik bandı üst üste binmiştir. Dolayısıyla da şekil 1.1 a'da görüldüğü gibi yasak enerji bandı iletkenlerde yoktur (Millman and Halkias, 1967). Yasak enerji bandı olmadığından, birçok valans elektronu katının içinde dolaşır. İletkenlerde elektronlar Pauli dışarlama ilkesine göre enerji durumlarına yerleşirler. Bu elektronların, taban enerji durumuna göre en son elektronların yerleştiği enerji seviyesi, 0 °K'de Fermi enerji seviyesi olarak tanımlanır. Bir iletkende, genellikle atom başına bir veya iki serbest dolaşabilen elektron bulunur ve bunlara iletkenlik elektronları adı verilir. Bir atomun valans elektronu iletkenin iletkenlik elektronu olur. İletkenlerin öz dirençleri 10^{-2} - 10^{-6} ohm.cm arasında değişmektedir. Bir iletkenin düşük sıcaklıklarda elektriksel öz direnci 10^{-10} ohm.cm'ye kadar inebilir (Kittel, 1996).

Yalıtkanları enerji bant yapısına göre açıklarsak, yalıtkanların valans bandı tümüyle dolu, iletkenlik bandı ise tümüyle boştur. Bu iki bant arasındaki aralığa yasak enerji bandı denilmektedir ve bu yalıtkanlar için şekil 1.1 b'de görüldüğü gibi oldukça geniştir. Bu aralık yalıtkanlar için yaklaşık olarak 6 eV ve daha büyük bir değerdedir (Millman and Halkias, 1967). Yalıtkanlar bu yasak enerji bandının genişliği nedeniyle, ısı ve elektriği iletmezler. Öz direnci 10^{14} - 10^{22} ohm.cm olan maddeler yalıtkandır (Kittel, 1996). Yasak enerji aralıkları sırasıyla, $E_g > 7$ eV olan Sodyum Klorür (NaCl) (Boudine et al., 2004), $E_g \sim 6$ eV olan Karbon (C) (Millman and Halkias, 1967), ve $E_g \sim 14$ eV olan Lityum Florür (LiF) yalıtkanlara örnek olarak verilebilir (Baldacchini, 2002).



Şekil 1.1. a) İletkenlerin, b) yalıtkanların, c) yarıiletkenlerin enerji-bant diyagramı (Boylestad and Nashelsky, 2004).

Yarıiletkenleri de enerji bant yapısına göre açıklarsak, yarıiletkenler de şekil 1.1 c’de görüldüğü gibi metaller ile yalıtkanlar arasındaki bölgede yer alırlar. Yasak enerji aralıkları $E_g = 0,6 - \sim 4$ eV arasındaki malzemeler yarıiletken malzemelerdir. Çizelge 1.1’de bazı yarıiletken malzemelerin yasak enerji aralığı değerleri verilmiştir (Millman and Halkias, 1967), (Kittel, 1996).

Mutlak sıfırda yarıiletkenler yalıtkan gibi davranırlar, çünkü bu sıcaklık değerinde iletkenlik bandı boş olup valans bandı doludur. Bu iki bant E_g kadar bir enerji aralığı ile birbirinden ayrılmışlardır. İletkenlik ve valans bantları arasındaki yasak enerji bandı yalıtkanlardaki gibi geniş değildir.

Yarıiletkenlerin öz dirençleri oda sıcaklığında 10^{-2} ile 10^9 ohm.cm arasında değişmektedir. Çizelge 1.1’de gösterildiği gibi yasak enerji aralığı 0,66 eV olan ve periyodik cetvelin IV^A grubunda yer alan Germanyumu (Ge), II^B grubu elementlerinden olan Kadmiyum (Cd) ile VI^A grubu elementi olan Kükürt’ün (S) oluşturmuş olduğu 2,42 eV yasak enerji aralığına sahip olan CdS’ü ve III^A grubu elementlerinden olan Galyum (Ga) ile V^A grubu elementlerinden olan Arseniğin (As) oluşturmuş olduğu 1,43

eV yasak enerji aralığına sahip olan GaAs'ı yarıiletkenlere örnek olarak gösterebiliriz (Kittel, 1996), (Gezci, 1992), (Solymar and Walsh, 1988).

Çizelge 1.1. Bazı çok kullanılan malzemeler için yasak enerji aralığı değerleri (Kittel, 1996).

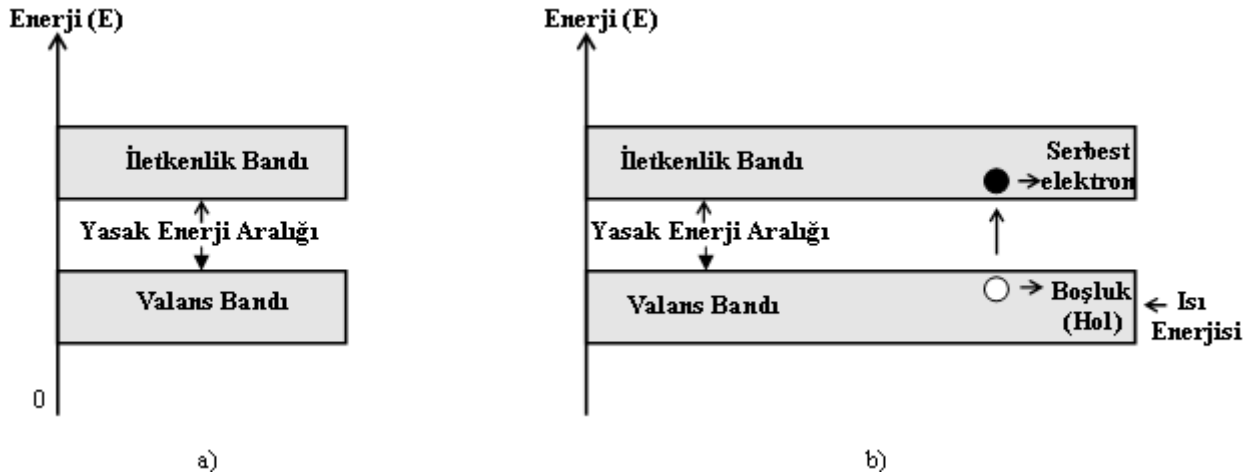
Malzeme	0 K de Yasak enerji aralığı(eV)	300 K de Yasak enerji aralığı(eV)
Ge	0,74	0,66
Si	1,17	1,11
CdS	2,58	2,42
InSb	0,23	0,17
GaSb	0,81	0,68
GaAs	1,52	1,43
ZnS	3,91	3,6
CdTe	1,60	1,44
CdSe	1,84	1,74
PbTe	0,19	0,29

1.1. Yarıiletkenlerin Bant Yapısı

Yarıiletkenlerin enerji-bant yapısında 0 °K sıcaklıkta, valans bandı tamamen dolu ve iletkenlik bandı tamamen boştur. Valans ve iletkenlik bandının arasında, elektron bulunmayan aralığa yasak enerji bandı veya yasak enerji aralığı (E_g) denir. Yalıtkanlarda yasak enerji aralığı 6 eV'tan büyüktür. Yarıiletkenlerde yasak enerji aralığı; 0,6 - ~ 4 eV değerleri arasındadır. Metallerde ise yasak enerji aralığı bulunmaz (Gezci, 1992), (Baykul and Orhan, 2009).

Yarıiletkenlerin bant yapısı Şekil 1.2 a'da şematik olarak gösterilmektedir. Mutlak sıfırda (0 °K) yarıiletken iyi bir yalıtkandır ve yarıiletken malzemelerin bütün elektronları valans bandında bulunur. İletkenlik bandında elektron bulunmaz. Bundan

dolayı da herhangi bir akım gözlenmez. Şekil 1.2 b’de gösterildiği gibi elektronlar, yasak enerji aralığına eşit ya da daha büyük bir enerjiyle uyarıldığında, valans bandından iletkenlik bandına geçerler. İletkenlik bandına geçen bu elektronlara iletkenlik elektronları denir. Bu elektronlar elektriksel iletkenliğe katkıda bulunurlar. Elektronlar valans bandından ayrılırken geride elektronların oluşturdukları boşluklar (holler) meydana gelir. Bu boşluklar, valans bandında bulunan elektronlarla doldurulurlar. Bu durumda valans bandında oluşan boş durumlar pozitif taşıyıcı gibi davranırlar. Valans bandındaki elektronların hareketine imkân verdiklerinden, bu boşluklar iletkenliğe katkıda bulunurlar. Böylelikle yarıiletkenlerde elektriksel iletim, valans bandındaki holler ve iletkenlik bandındaki elektronlar sayesinde gerçekleşir (Kittel, 1996), (Boylestad and Nashelsky, 2004), (Wilson and Hawkes, 2000).



Şekil 1.2. a) $T=0$ °K’de b) $T>0$ °K’de has yarıiletkenin iletkenlik ve valans bant yapısı (Kittel, 1996).

1.2. Yarıiletken Tipleri

Yarıiletkenler katılama durumlarına göre katkısız (has) yarıiletkenler ve katkılı yarıiletkenler diye iki grupta incelenirler. Yabancı atom katkısı bulunmayan yarıiletken has yarıiletken olarak adlandırılır. Böyle bir malzemede mutlak sıfır sıcaklığında yük taşıyıcıları yoktur. Has yarıiletkenlerde iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğu ile valans bandındaki hol yoğunluğu birbirine eşittir (Wilson and Hawkes, 2000).

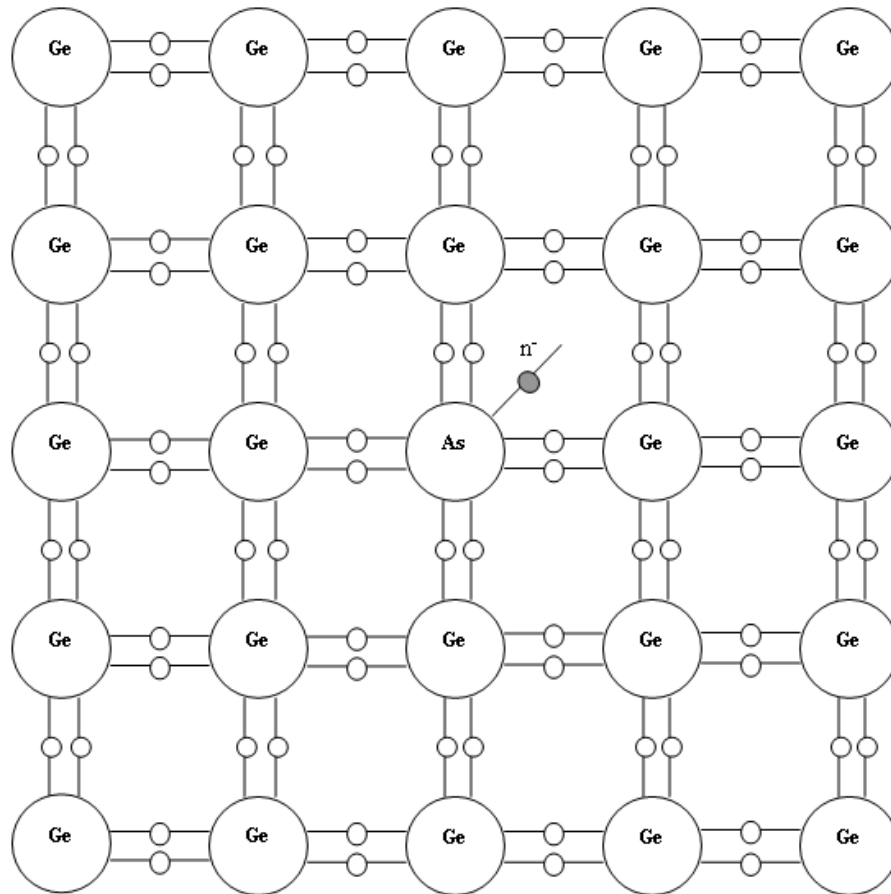
Yarıiletken malzemelerin özellikleri, has yarıiletken malzemeye bazı katkı atomları eklenerek büyük ölçüde değiştirilebilir. Yarıiletkene yerleştirilen bu yabancı atom ekleme işlemine katkılama denir. Bu katkılama işlemi yapılan yarıiletken malzemeye de katkılı yarıiletkenler adı verilir. Katkılı yarıiletkenlerde serbest elektron ve hol yoğunlukları birbirinden farklıdır (Boylestad and Nashelsky, 2004).

Eğer IV^A grubu elementlerinden Silisyum (Si) veya Germanyuma (Ge), V^A grubu elementlerinden biri katılanırsa n-tipi yarıiletken elde edilir. IV^A grubu elementlerinden Si veya Ge'ye, III^A grubu elementlerinden biri katılanırsa p-tipi yarıiletken elde edilir. Serbest elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyükse n-tipi, hol yoğunluğu serbest elektron yoğunluğundan büyükse p-tipi yarıiletken elde edilir. Bu has yarıiletkene yapılan katkılar, on milyonda 1 oranında olmasına karşın malzemenin bant yapısını ve elektriksel özelliklerini değiştirir. Örneğin silisyum içine $1/10^5$ oranında bor katıldığında saf silisyumun oda sıcaklığındaki elektriksel iletkenliği 10^3 katı kadar artar. Katkılama yoluyla iletkenlikleri artırılan yarıiletkenler, elektronik endüstrisinde büyük önem taşır (Boylestad and Nashelsky, 2004), (Kittel, 1996).

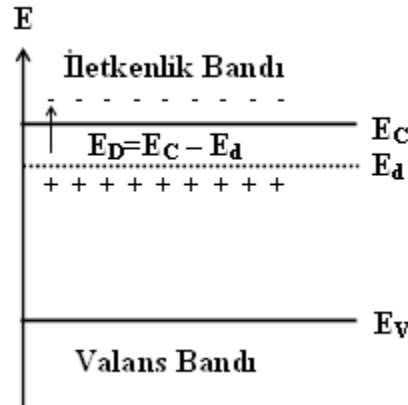
1.2.1. n -tipi Katkılı Yarıiletkenler

IV^A grubu elementi olan Germanyuma (Ge) veya Silisyuma (Si), periyodik tablonun V^A grubu elementlerinden Fosfor (P), Arsenik (As) veya Antimon (Sb) gibi beş valans elektronuna sahip elementlerden birisiyle katkılanırıldığında kristal n-tipi yarıiletken olarak elde edilir. Şekil 1.3'te V^A grubu elementi olan arseniğin, IV^A grubu elementlerinden olan germanyuma katkılanmış hali görülmektedir. Şekil 1.3'te gösterildiği gibi Ge atomlarının dört valans elektronu olduğundan, beş valans elektronu olan As atomlarının sadece dört tanesi kovalent bağları oluşturmada kullanılır ve geriye bir valans elektronu kalır. Bu kalan elektron bağ yapmaz ve zayıf bir kuvvetle As atomuna bağlıdır. Bu zayıf bağlı As elektronu çok küçük enerjiyle iletkenlik bandına uyarılabilir. Böylece çok küçük enerjilerle donör iyonlaşabildiğinden ve iyonlaşma sonucunda kristal bir elektron kazandığından dolayı bu katkılı yarıiletken n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır. Kristale katkılanan katkı atomlarına verici anlamına gelen donör atomları adı verilir. Katkılanan atomların yer aldığı ve buradan kolayca

enerji kazanarak iletkenlik bandına çıktığı enerji seviyelerine de donör enerji seviyesi adı verilir. Bu enerji seviyeleri şekil 1.4'te enerji bant modelinde gösterilmiştir. Donör enerji seviyesi, yasak enerji bandının içerisinde iletkenlik bandının hemen altında E_d noktasında bulunur. Bir elektronu donör seviyesinden iletkenlik bandına uyarmak için gerekli olan enerji, E_c iletkenlik bandının dibini göstermek üzere, $E_c - E_d$ kadardır ve bu değere donör enerjisi (E_D) değeri denir. E_v , valans bandı enerji düzeyini göstermektedir. Mutlak sıfır sıcaklığında E_D çok küçük olduğundan donör seviyeleri doludur. Bu durumda düşük sıcaklıklarda bile elektronların çoğu iletkenlik bandına uyarılırlar ve serbest elektron yoğunluğu ile malzemenin iletkenliğini artırır (Wilson and Hawkes, 2000), (Kittel, 1996), (Boylestad and Nashelsky, 2004), (Solymar and Walsh, 1988), (McKelvey, 1996).



Şekil 1.3. IV^A grubu elementi Ge'ye, V^A grubu elementi As'nin katkılanmış halinin şematik gösterimi (Boylestad and Nashelsky, 2004).



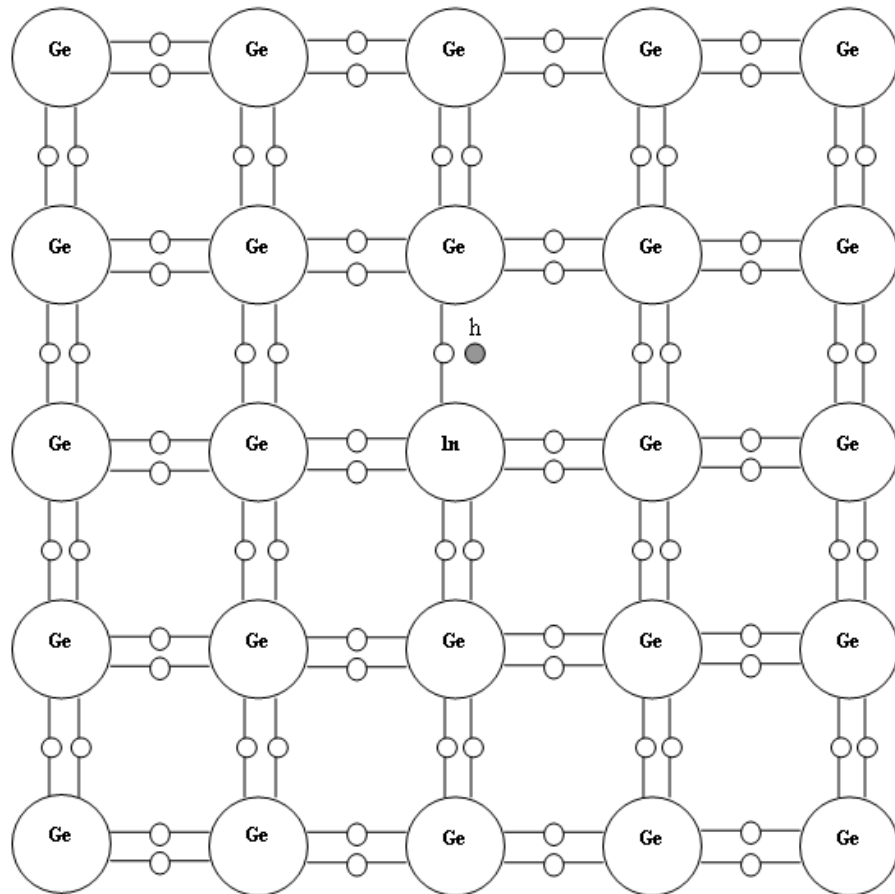
Şekil 1.4. n-tipi katkılı yarıiletkenlerde donör enerji seviyesi (E_d) (Kittel, 1996).

1.2.2. p -tipi Katkılı Yarıiletkenler

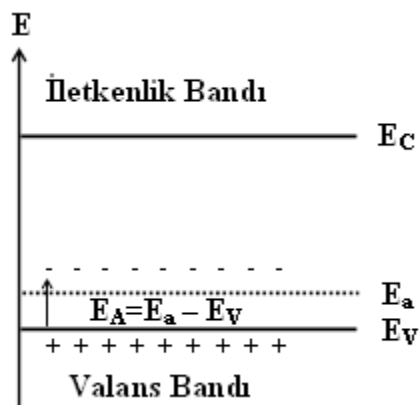
p-tipi katkılı yarıiletken malzeme, IV^A grubu elementi olan Germanyuma (Ge) veya Silisyuma (Si) periyodik tablonun III^A grubu elementlerinden olan İndiyum (In), Bor (B) veya Alüminyum (Al) gibi üç valans elektronuna sahip elementlerden birisiyle katkılandırılarak elde edilir. Şekil 1.5'te III^A grubu elementi olan indiyumun, IV^A grup elementi olan germanyuma katkılanmış hali gösterilmiştir. Burada Ge atomları dört değerlikli olduğundan ve In atomları üç değerlikli olduğundan her In atomu dört Ge atomuyla kovalent bağ yapar. Bağlardan yalnızca üç tanesi bağ yapmada kullanılacağından kristalde bir boşluk (hol) oluşur. Bu boşluk, diğer bağlardan gelen bir elektronla doldurulabilir. Böylece boşluk, kristal içerisinde hareket etmiş olur. Bu boşluklar kristalde pozitif yük taşıyıcısı olarak davranırlar. Bu şekilde, çoğunluk taşıyıcılar boşluklar (holler) olduğundan bu tür malzemeler p-tipi yarıiletken malzemelerdir.

Katkı atomlarına alıcı anlamına gelen akseptör atomları adı verilir ve bulundukları enerji seviyesi de (E_a) akseptör enerji seviyeleri olarak adlandırılır. Bu enerji seviyeleri, valans bandının üzerindedir. Akseptör enerjisi (E_A), $E_a - E_V$ kadardır. p-tipi katkılı yarıiletkenlerde E_a akseptör seviyelerine ait enerji düzeylerinin bant şeması Şekil 1.6'da verilmiştir. Akseptör atomları da donör atomları gibi düşük bir enerjiyle iyonlaşırlar. Burada E_a enerjisi valans bandındaki bir elektron tarafından soğurulur ve elektron enerji aldığı anda akseptör enerji seviyesine çıkar ve valans bandında boşluk

oluşur (Kittel, 1996), (Boylestad and Nashelsky, 2004), (Wilson and Hawkes, 2000), (McKelvey, 1996).



Şekil 1.5. IV^A grubu elementi Ge'ye, III^A grubu elementi In'nin katkılanmış halinin şematik gösterimi (Boylestad and Nashelsky, 2004).



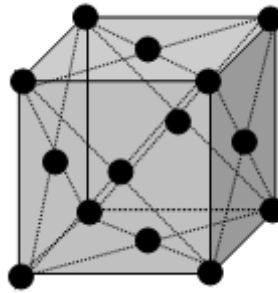
Şekil 1.6. p-tipi katkılı yarıiletkenlerde akseptör seviyesi (E_a) (Kittel, 1996).

1.3. Yarıiletken II-VI Grubu Bileşiklerinin Kristal Yapısı

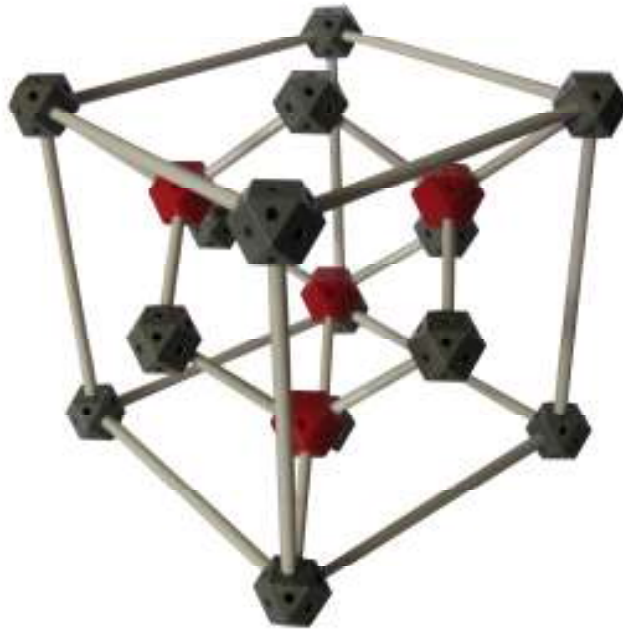
Bir kristalin en küçük birimine birim hücre denir. Bir kristal, birbirine özdeş bu birim hücrelerinin birbirine art arda eklenmesiyle oluşur. Kristal atomları düzgündür, birbirine simetrik ve bazı geometrik şekilleri belirleyecek şekilde dizilmişlerdir.

Genel olarak malzemeler, (i) sodyum klorür yapı (NaCl, PbS), (ii) sezyum klorür yapı (CsCl, BeCu), (iii) hegzagonal yapı (CdS, ZnS), (iv) elmas yapı (C, Si), ve (v) kübik çinko sülfür (ZnS, CdS, ZnSe) olmak üzere, bu yapılarından birine sahiptir. Bu tez çalışmasında yer alan $Cd_{1-x}Zn_xS$ bileşiklerinin yer aldığı II-VI grubu yarıiletken bileşikler hem kübik çinko sülfür hem de hegzagonal (wurtzite) yapıda kristallenirler ve çok kristalli bir şekle sahiptirler (Kittel, 1996), (Grün et al., 1999) (Benkabou et al., 2000) (Gezci, 1992).

Kübik çinko sülfür yapısının örgü yapısı yüzey merkezli kübiktir. Şekil 1.7’de yüzey merkezli kübik (fcc) yapı görülmektedir. Kübik çinko sülfür kristal yapısında birbirinden çeyrek cisim köşegeni uzunluğu kadar ötelenmiş iki fcc yapısı olarak görülür. Bu fcc örgülerinden birinde çinko atomları (Zn), diğerinde ise sülfür atomları (S) yerleşmiştir. Çinko atomları küpün köşe ve yüz merkezlerinde, sülfür atomları da cisim köşegeninde bulunurlar. Çinko atomlarının koordinatları 000, $0\frac{1}{2}\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}0\frac{1}{2}\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ ve sülfür atomlarının koordinatları $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}$, $\frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$, $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ ’tür. Her S atomu, kendine eşit uzaklıktaki köşeleri oluşturan çinko atomuna bağlıdır. Örgüyü oluşturan iki atom farklı olduğu için kristal yapı kübik çinko sülfür yapı olarak adlandırılır (Kittel, 1996), (Gezci, 1992), (Orhan, 2006). Şekil 1.8’de kübik çinko sülfür yapısı verilmiştir.



Şekil 1.7. Yüzey Merkezli Kübik yapı (Kittel, 1996).



Şekil 1.8. Kübik Çinko Sülfür'ün kristal yapısı (Singh, 2003).

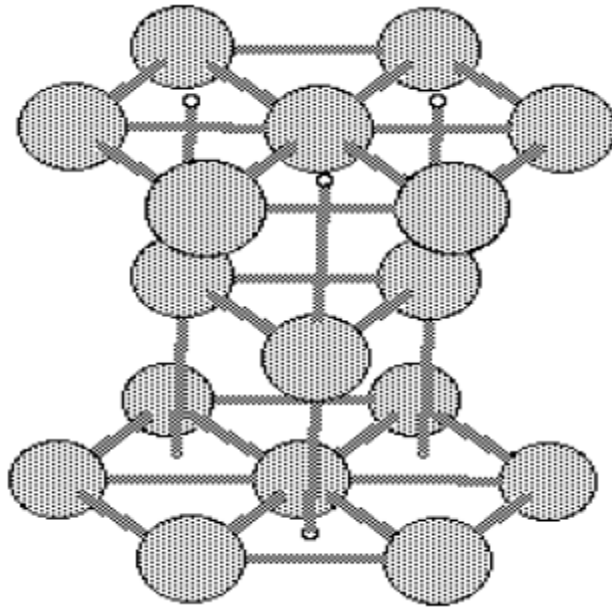
Hegzagonal (wurtzite) yapıda önce bir düzlemde, her küre komşu altı küreye değecek şekilde sıkı paketlenmiş bir A tabakasına yerleştirilir. Bu tabaka hem sıkı paketlenmiş hegzagonal yapısının (hcp) taban düzlemine ve hem de fcc yapısının (111) düzlemine karşılık gelir. İkinci bir B tabakası, A tabakasındaki boşlukların üstüne gelecek şekilde yerleştirilir. Üçüncü C tabakası ise bu B tabakasının üstüne yerleştirilir ve iki farklı şekilde konabilir. Eğer C tabakasının küreleri, A tabakasının bıraktığı boşlukların üzerine ve B tabakasındaki boş bırakılan yerlere geliyorsa fcc

yapısı elde edilir. Ya da C tabakasının küreleri, A tabakasındaki kürelerin tam üstüne gelecek şekilde yerleştirilirse hcp yapısı elde edilir (Kittel, 1996). Şekil 1.9’da (hcp) hegzaonal kristal yapı görülmektedir.

CdS, hem hegzaonal hem de kübik çinko sülfür yapısında kristallenmektedir. CdS, kübik çinko sülfür yapısında olduğu zaman optoelektronik aygıtlarda daha kullanışlıdır. Yüksek kalitedeki CdS, (100) doğrultusunda kristalize olur (Kim et. al, 2008). Kimyasal Banyoda Çöktürme (CBD) yoluyla elde edilen CdS; (111), (220), (311) yönelimlerinde kübik yapıda kristallenirken, (002), (110), (112) yönelimlerinde hegzaonal yapıda kristallendiği görülmüştür. Vakumda buharlaştırma (VE) yöntemiyle elde edilen CdS; (002), (101), (110) yönelimlerinde hegzaonal yapıda kristallenmiştir (Lee, 2005), (Enríquez and Mathew, 2003), (Lee et al., 2003).

ZnS, kübik çinko sülfür ve hegzaonal yapıda kristalleşir (Moore and Wang, 2006). Kimyasal banyoda çöktürme yoluyla elde edilen ZnS; (002), (110), (201) yönelimlerinde hegzaonal yapıda kristallendiği gözlenmiştir (Oladeji and Chow, 2005).

Vakumda Buharlaştırma (VE), dip-coating ve spray piroliz (SP) metotlarıyla üretilen $Cd_{1-x}Zn_xS$; (002), (101), (110) yönelimlerinde hegzaonal yapıda kristallenir (Baykul and Orhan, 2009), (Lee et al., 2003), (Rafea et al., 2009).



Şekil 1.9. Hegzagonal sıkı paketlenmiş (hcp) kristal yapı (Nag, 1980).

1.4. Yarıiletkenlerin Elektriksel Özellikleri

Bir malzemenin elektriksel iletkenliği, o madde de atom başına düşen serbest elektrik yük sayısı ile ilgilidir. İletkenlerde elektriksel iletkenlik elektronlarla sağlanırken, yarıiletkenlerde elektronlarla ve hollerle sağlanır. Malzemenin öz direnci, iletkenliği ve mobilitesi bize o malzemenin elektriksel özelliği hakkında bilgi verir. Mobilite, birim elektrik alan başına sürüklenme hızının büyüklüğüdür. Serbest elektrik alan (E) içinde hareket eden elektrik yükünün hızı v ile gösterilirse, mobilite matematiksel olarak;

$$\mu = \frac{v}{E} \quad (1.1)$$

şeklinde ifade edilir ve birimi (m^2/Vs)'dir. Bu ifadeye göre bir yarıiletkenindeki elektron mobilitesini (μ_n) yazarsak;

$$\mu_n = \frac{v_n}{E} \quad (1.2)$$

şeklinde olur. Yarıiletkenin hol mobilitesi (μ_p) ise;

$$\mu_p = \frac{V_p}{E} \quad (1.3)$$

olarak ifade edilir.

Yarıiletkendeki serbest elektron yükleri bir elektrik alan içinde hareket ederek J akım yoğunluğunu oluşturur. Elektrik alanın (E), akım yoğunluğuna (J) oranı bize maddenin öz direncini (ρ) verir. Buna göre öz direnç,

$$\rho = \frac{E}{J} (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (1.4)$$

olarak verilir. Elektriksel iletkenlik ise $\rho = \frac{1}{\sigma}$ olduğundan,

$$\sigma = \frac{J}{E} (\Omega \cdot \text{cm})^{-1} \quad (1.5)$$

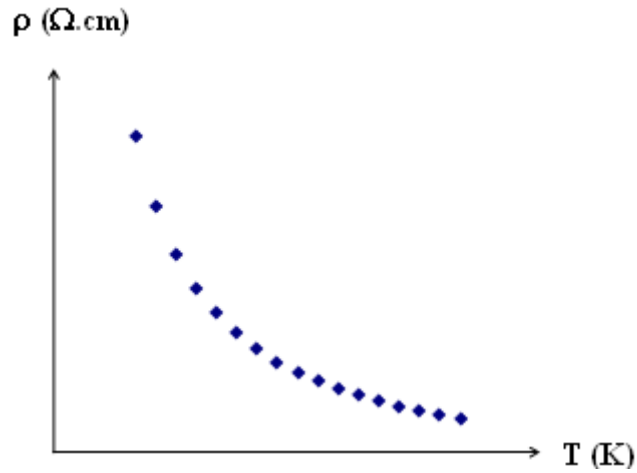
ifadesi ile verilir.

Yarıiletkenlerde yük taşıyıcıları iletkenlere göre daha az olduğundan, iletkenlikleri de azdır. Yalıtkanlarla karşılaştırsak daha iyi iletkenlerdir. Yarıiletkenlerde iletkenlik sıcaklıkla artar. Sıcaklık arttıkça iyi bir iletkenin öz direnci lineer (doğrusal) olarak artarken yarıiletkenin öz direnci şekil 1.10'da görüldüğü üzere exponansiyel olarak azalır ve,

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (1.6)$$

ifadesi ile verilir. Burada ρ öz direnç, ρ_0 oda sıcaklığındaki öz direnç, E_g yasak enerji aralığı ve k Boltzman sabitidir (Solymar and Walsh, 1988).

Sıcaklık mutlak sifıra yaklaşırken yarıiletkenin öz direnç yüksek bir değere ulaşır ve bu sıcaklıkta artık bir yalıtkan gibi davranır. Yarıiletkenlerin öz dirençleri, oda sıcaklığında 10^{-2} ile 10^9 ohm.cm aralığında sıcaklıkla ters orantılıdır. Bir yarıiletkenin elektriksel öz direnci sıcaklığa bağlı olduğundan, bu özelliğinden yararlanılarak transistörler, termistörler, modülatörler, doğrultucular, fotoseller ve dedektörler yapılmıştır (Kittel, 1996) (Gezci, 1992).



Şekil 1.10. Yarıiletken için öz direncin sıcaklığa göre değişim grafiği.

Bir yarıiletkene elektrik alan uygulandığında elektrik yüklerinin oluşturduğu toplam J akım yoğunluğunun büyüklüğü,

$$J = env \text{ (amper/m}^2\text{)} \quad (1.7)$$

bağıntısı ile verilir. Burada e elektrik yükü olup değeri ise $1,6 \times 10^{-19}$ Coulomb'dur. n birim hacimdeki elektronların sayısı, v elektrik yükünün hızıdır.

Elektronlardan kaynaklanan akım yoğunluğu, denklem (1.1)'de ki elektrik yükünün hız ifadesinin μE şeklinde yazılmasıyla ve n birim hacimdeki elektronların sayısı şeklinde yazılmasıyla,

$$J_n = ne\mu_n E \quad (1.8)$$

olmak üzere iken, hollerden kaynaklanan akım yoğunluğu da,

$$J_p = pe\mu_p E \quad (1.9)$$

olarak ifade edilir. Burada p birim hacimdeki serbest hollerin sayısıdır.

Toplam sürüklenme akım yoğunluğu ise bu elektronlardan kaynaklanan akım yoğunluğu ve hollerin oluşturduğu akım yoğunluklarının toplamıdır ve aşağıdaki matematiksel ifadeyle verilmiştir.

$$J = ne\mu_n E + pe\mu_p E = (ne\mu_n + pe\mu_p) E \quad (1.10)$$

Elektriksel iletkenlik, mobilite cinsinden,

$$\sigma = en\mu \quad (1.11)$$

biçiminde ifade edilir. Has bir yarıiletkendeki elektriksel iletkenlikte serbest elektron ve hol sayısı birbirine eşittir. İletkenlik, elektronlar ve holler tarafından sağlanır. Bu durumda bir has yarıiletkende elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_i = n_i e (\mu_n + \mu_p) \quad (1.12)$$

bağıntısıyla verilir. Burada σ_i has elektriksel iletkenlik, n_i has taşıyıcı sayısı, μ_n ve μ_p de sırasıyla elektron ve hollerin mobilitesi, e elektrik yükünü gösterir. Katkılı bir yarıiletkendeki elektriksel iletkenlik ise,

$$\sigma = ne\mu_n + pe\mu_p \quad (1.13)$$

bağıntısıyla gösterilir. Katkılı yarıiletkende serbest elektron ve hol sayıları birbirine eşit değildir ($n \neq p$). Katkılı bir yarıiletkenin öz direnci de,

$$\rho = \frac{1}{e(n\mu_n + p\mu_p)} \quad (1.14)$$

şeklinde olur. Yarıiletken n-tipi olduğunda yukarıdaki denklem $ne\mu_n \gg pe\mu_p$ 'dir. Bu yüzden n-tipi yarıiletkende öz direnç ifadesi de;

$$\rho_n \cong \frac{1}{ne\mu_n} \quad (1.15)$$

olarak ifade edilir ve n-tipi yarıiletkenin iletkenlik değeri de,

$$\sigma_n \cong ne\mu_n \quad (1.16)$$

şeklinde verilir. p-tipi yarıiletken için ise bu durum $p\mu_p \gg n\mu_n$ olduğunda, p-tipi yarıiletkenin öz direnç ifadesi,

$$\rho_p \cong \frac{1}{pe\mu_p} \quad (1.17)$$

şeklinde yazılır. p-tipi yarıiletkenin iletkenlik değeri ise,

$$\sigma_p \cong pe\mu_p \quad (1.18)$$

olarak ifade edilir (Sze, 1981).

1.5. Yarıiletken İnce Filmler

Saf yarıiletkenler periyodik tablonun IV^A grubunda yer alan elementlerdir. Son yörüngelerinde 4 tane elektron bulundurulur. Günümüzde en çok kullanılan yarıiletkenler periyodik cetvelde dördüncü grupta bulunan Silisyum (Si) ve Germanyum (Ge) elementleridir. Ayrıca yarıiletkenler III^A–V^A grubu ve II^B–VI^A grubu elementlerinin ikili, üçlü, dörtlü ve beşli bileşiklerinden oluşmaktadır. III^A–V^A grubu yarıiletken bileşiklerine InSb, GaSb, GaAs, II^B–VI^A yarıiletken bileşiklerine CdTe, CdSe’yi örnek olarak verebiliriz. Yarıiletken maddelerden yapılabilecek aygıtlara örnek olarak transistör, diyot, fotovoltaiik pil, detektör ve termistörleri sayabiliriz (Kittel, 1996) (Yacobi, 2003).

III^A–V^A grubu ve II^B–VI^A grubu yarıiletken bileşikleri kullanılarak çeşitli alt tabanlar üzerine yarıiletken ince film sentezi yapılabilmektedir. Yarıiletken teknolojisinin gelişmesiyle birlikte çeşitli yöntemlerle kaliteli, ucuz ince filmler elde etmek mümkündür. Bu yöntemlere Kimyasal Buhar Çöktürme (CVD), Yüksek Vakumda Buharlaştırma (HVE), Elektrodepozisyon, Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme (MOCVD), Moleküler Demet Epitaksi (MBE), Kimyasal Banyoda Çöktürme (CBD), Saçtırma (Sputtering) ve Ultrasonik Sprey Piroilizasyonu (USP) örnek olarak gösterilebilir. Yapmış olduğumuz bu çalışmada USP yöntemiyle elde edilen, Cd_{1-x}Zn_xS filmleri kullanılmıştır. Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin üzerine altın kaplamak için de HVE yöntemi kullanılmıştır.

Ultrasonik Sprey Piroлиз metodunda kısa zamanda ince filmlerin geniş yüzeylere hazırlanmasını sağlayan bir tekniktir. Bu metotta önce istenilen malzemenin çözeltisi hazırlandıktan sonra çözeltinin homojen dağılımı meydana gelinceye kadar karıştırılır. Sonra bu çözelti önceden ısıtılmış tabanlar üzerine püskürtülür. Taşıyıcı gaz olarak hava veya azot gazı kullanılır. Sık kullanılan bir tekniktir (Orhan, 2006).

Vakumda buharlaştırma yönteminde ince filmi oluşturacak olan materyalin tozları belirli sıcaklık altında buharlaştırılarak, daha önceden ısıtılmış olan cam tabanlar üzerine 10^{-5} veya 10^{-7} torr düşük basınç altında çöktürülmesiyle elde edilir. Filmler yüksek vakum altında üretildiklerinden dolayı ortamdaki yabancı atomlarla etkileşimleri azdır. Bu nedenden dolayı kaliteli filmler üretilir (Orhan, 2006).

1.6. II-VI Grubu Bileşikleri

II-VI grup bileşikleri periyodik tablonun II^B ve VI^A grubu elementlerinden elde edilir. II^B grubu elementlerine örnek olarak Zn, Cd ve Hg örnek olarak verilebilir. VI^A grubu elementlerine O, S, Se ve Te örnek gösterilebilir. Bu II^B ve VI^A grubu elementleri kullanılarak, daha önce bahsedildiği gibi yarı iletken ince film elde etmek mümkündür. Bu elde edilen bileşikler kendi aralarında, örneğin (CdS, ZnS) gibi ikili (binary), (Cd_{1-x}Zn_xS, ve ZnS_xSe_{1-x}) gibi üçlü (ternary) ve (Zn_{1-x}Cd_xS_ySe_{1-y}) gibi dördü (quaternary) bileşik oluşturabilirler. Bu bileşikler elde ederken, elementler çeşitli oranlarda karıştırılarak kolay bir şekilde elde edilebilir. Bu tür bileşiklerde kovalent bağlanma kadar kuvvetli iyonik bağlanma da görülmektedir. II-VI yarıiletken bileşikler kübik (zincblende) ve hegzagonal (wurtzite) yapıda kristallenirler (Enríquez and Mathew, 2003), (Kittel, 1996).

II-VI grubu bileşiklerinden Cd, Hg ve Zn ile bunların O, S, Se ve Te ile oluşturduğu bileşikler geniş enerji bant aralığına sahiptir. Örneğin CdS'nin yasak enerji aralığı (E_g) ~2,42; ZnS'nin E_g 'si ~3,7 ve CdSe'nin E_g 'si ~1,74'tür. II-VI grubu bileşikler genellikle n-tipi iletkenlik gösterirler. Bu gruba ait bileşikler bazı ticari uygulamalarda kullanılabilir. Bunlardan CdS güneş pillerinde, ZnS güneş pillerinde, elektrolüminesant (ELD) ve fotolüminesant (FLD) aygıtlarda, CdTe hem güneş

pillerinde hem de nükleer radyasyon detektörlerinde ve $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ yarıiletken bileşiği de ışık dedektörü olarak kullanılmaktadır (Yacobi, 2003).

1.6.1. Kadmiyum Sülfür (CdS)

Kadmiyum sülfür (CdS) bileşiği, $\text{II}^{\text{B}}\text{-VI}^{\text{A}}$ türü yarıiletken bileşiği olup sarı turuncu renktedir ve son elli yılın en çok kullanılan yarıiletken malzemesidir (Enríquez and Mathew, 2003), (Pradhan et al., 2007), (Kim et al., 2008), (Gezci, 1992). CdS yarıiletken bileşiği dedektörlerde, transistörlerde, diyotlarda, fotosellerde, doğrultucularda ve özellikle güneş pillerinde kullanılmaktadır (Baykul and Balcioglu, 2000), (Frag et al., 2009).

CdS, yaygın olarak heteroeklem güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılmaktadır (Baykul and Balcioglu, 2000), (Lee, 2005), (Kim et al., 2008), (Frag et al., 2009).

Pencere materyalinin temel iki özelliği vardır. Bu özellikleri düşük özdirenç ve yüksek geçirgenliktir. CdS yarıiletken bileşiği, yüksek özdirence sahiptir. Bu yüzden de CdS içerisinde; Zn, Sn, Ni, Cu, B ve In gibi elementler katkılanarak özdirenç değerleri düşürülmektedir (Lee et al., 2003).

CdS nanopartikülleri birçok farklı yöntemle üretilebilmekte olup ayrıca polimerlerde de sentezlenebilmektedir (Baykul et al., 2009), (Chen et al., 2008), (Baykul and Balcioglu, 2000), (Alvarez et al., 1997), (Lee, 2005), (Pradhan et al., 2007), (Ximello-Quiebras et al., 2005), (Pal et al., 1997). Bu teknikler içinde CBD yöntemi oldukça basit ve ucuz olup, elde edilen filmler düzgündür. HVE yöntemi ise, filmler için uygun ve kolay bir metot olup, geniş yüzeylerde filmler üretilebilir (Lee, 2005). Bunlardan CBD, HVE, SP yöntemlerinden birisi kullanılarak üretilen ince filmler polikristaldır ve güneş pillerinde kullanıldıklarında iyi sonuçlar elde edilir. Filmlerin elektriksel ve optiksel özellikleri üretildiği tekniğe bağlı olarak değişir. HVE yöntemi ile üretilen CdS filminin E_g 'si 2,45 eV iken, CBD yöntemiyle üretilen filmin E_g 'si 2,37 eV; SP yöntemi ile üretilen filmin E_g 'si 2,47 eV'tur. Özdirençleri bakımından karşılaştırıldığında, HVE-CdS filmleri, CBD-CdS filmlerine göre daha

düşük özdirence sahiptir (Lee, 2005), (Baykul and Balcioglu, 2000). Ayrıca CdS filmlerinin kalınlığı arttıkça, grain büyüklükleri artmıştır ve filmlerin optik bant aralıklarında düşme görülmüştür (Enríquez and Mathew, 2003), (Ximello-Quiebras et al., 2005).

CdS ince filmleri 300 ⁰K'de 2,42 eV'luk, 0 ⁰K'de ise 2,56 eV'luk direkt bant aralığına sahip n-tipi bir yarıiletken malzemedir (Enríquez and Mathew, 2003), (Baykul and Balcioglu, 2000). CdS'ün bant aralığı $E_g \sim 2,42$ eV olduğundan dolayı, bu bant aralığı değeri yayımlanan fotonun $\lambda = 513$ nm'lik dalga boyuna karşılık gelir. Böylece görünür bölge spektrumunda yeşil renge (495-570nm) sahiptir (Orhan, 2006), (Naumov et al., 2001).

1.6.2. Çinko Sülfür (ZnS)

Çinko Sülfür (ZnS) bileşiği de bir II^B-VI^A grubu yarıiletken bileşiğidir. ZnS diğer II^B-VI^A türü yarıiletken bileşikler gibi, ışık veren diyotlar (LED) ve güneş pilleri gibi optoelektronik aygıtlarda kullanılmaktadır. Güneş pillerinde pencere materyali olarak görev yapar (Ren et al., 2006), (Daranfed et al., 2009), (Oladeji and Chow, 2005).

Kübik ZnS oda sıcaklığında, 3,5-3,7 eV bant aralığına sahipken, hegzagonal yapıda bant aralığı 3,7-3,8 eV'tur (Yoo et al., 2002). ZnS ince filmleri geniş bant aralığına sahip olduklarından ve yüksek kırılma indisi (2,35) ile görünür bölgede yüksek geçirgenlik özellik göstermesinden dolayı reflektör (optik alanda yansıtıcı) ve dielektrik filtre olarak kullanılabilirler (Daranfed et al., 2009). Ayrıca elektrolüminesant (ELD) ve fotolüminesant (FLD) aygıtlarda kullanım alanlarına sahiptirler. ZnS'ün bant aralığı $E_g \sim 3,7$ eV olduğundan dolayı, bu bant aralığı değeri yayımlanan fotonun $\lambda \sim 325$ nm'lik dalga boyuna karşılık gelir. Böylece görünür bölge spektrumunda transparan bir malzeme olurlar. ZnS ince filmleri de CdS ince filmlerinin üretiminde kullanılan tekniklerle elde edilmektedir. Bu tekniklerle elde edilen filmler çok kristallidir, düşük özdirence ve yüksek geçirgenliğe sahiptir. Ayrıca filmlerin kalınlığı arttıkça,

nanokristallerin boyutlarında artış gözlenmiştir, grain boyutlarının artışıyla da E_g değerinde azalma meydana gelir (Daranfed et al., 2009), (Goudarzi et al., 2008).

1.6.3. Kadmiyum Çinko Sülfür ($Cd_{1-x}Zn_xS$)

II^B-VI^A grubu yarıiletken üçlü bileşiklerinden olan $Cd_{1-x}Zn_xS$, CdS ikili bileşiğine Zn'nin belli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Burada x, malzeme içerisindeki çinko konsantrasyonunu göstermektedir ve x'in değişimi ile birlikte malzeme içindeki Zn ve Cd oranları da değişim gösterir. Bu değişimle birlikte malzemenin özellikleri de değişir. Bu $Cd_{1-x}Zn_xS$ yarıiletken bileşiği, CdS ve ZnS bileşiklerinin arasındaki özelliklere sahiptir. CdZnS yarıiletken filmleri, yarıiletkenlerin ve yarıiletken aygıtların üretiminde oldukça önemli bir yere sahiptir. Fotodedektörlerde, güneş pillerinde, lazer diyotlarda kullanılırlar (Rafea et al., 2009), (Kwok, 1980), (Borse et al., 2007).

CdZnS ince filmleri de, aynı CdS ve ZnS yarıiletken malzemelerin üretiminde kullanılan yöntemlerin birisiyle elde edilirler. Bu kullanılan yöntemlerle kaliteli filmler üretilmektedir (Lee et al., 2003), (Bacaksız and Cevik, 2006), (Chavhan et al., 2008), (Valkonen et al., 1998), (Baykul and Orhan, 2009).

CdZnS'nin yasak enerji aralığı, CdS (~2,4 eV) ile ZnS (~3,7 eV)'nin arasındaki bir değere sahiptir. Bu değer Cd:Zn oranına göre değişir. Örneğin $Cd_{0,8}Zn_{0,2}S$ filminin bant aralığı 2,61 eV iken, $Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ filminin bant aralığı 3,22 eV bulunmuştur. Çinko elementinin filmlerdeki konsantrasyonu arttıkça, bant aralığında artış görülmüştür (Rafea et al., 2009), (Baykul and Orhan, 2009). CdZnS ince filmleri de direkt geniş bant aralığına sahip olduğu için heteroeklem güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılmaktadır. CdZnS'nin optik bant aralığının CdS'ye göre daha geniş olmasından dolayı, pencere materyali olarak daha çok tercih edilir (Valkonen et al., 1998), (Borse et al., 2007), (Chavhan et al., 2008).

$Cd_{1-x}Zn_xS$; yüksek öz dirençli bir malzemedir. Öz direnç $Cd_{1-x}Zn_xS$ filmlerinde x'in artışıyla birlikte artış gösterir. Zn oranı arttıkça filmlerde iletkenlik azalır. Yapmış olduğumuz bu çalışmada, $Cd_{0,8}Zn_{0,2}S$ filminin öz direnci 7,207 $\Omega.cm$, elektriksel

iletkenlik değeri $0,138 (\Omega.cm)^{-1}$ iken, $Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ filminin öz direnci $7,619 \Omega.cm$, iletkenlik değeri de $0,131 (\Omega.cm)^{-1}$ 'dir. $CdZnS$ filmlerine, indiyum katkılanmasıyla öz direnç $2,4 \times 10^5 \Omega.cm$ değerinden, yaklaşık olarak $0,25 \Omega.cm$ ye kadar olan değerlere azaltılabilir. Ayrıca $CdZnS$ filmlerinin kalınlığı arttıkça, optik bant aralıklarında düşme görülmüştür. Sıcaklık arttıkça, E_g azalmıştır (Lee et al., 2003), (Lee et al., 2002), (Rafea et al., 2009), (Chavhan et al., 2008).

BÖLÜM 2

$\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ FİMLERİNİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Yarıiletken malzemelerin elektriksel özelliklerini saptamak için metal-yarıiletken kontaklar oluşturulur. Bu kontakların akım-voltaj karakteristiklerinden yararlanılarak o malzemenin öz direnç ve iletkenlik gibi çeşitli elektriksel özellikleri hakkında fikir edinilebilir (Türkmen, 2006). Bu kontaklar için Gümüş (Ag), Altın (Au), Bakır (Cu), Nikel (Ni) ve Alüminyum (Al) gibi metallerden birisi kullanılmaktadır. Bu malzemelerin iş fonksiyonları birbirinden farklıdır. Örneğin gümüş'ün iş fonksiyonu; (111), (100), (110) yüzey düzlemleri için sırasıyla 4,74 eV, 4,64 eV, 4,52 eV'tur (Nishiyama and Inoue, 2006), (Kittel, 1996), (Uda, 1998). Altın'ın iş fonksiyonu (111), (100), (110) yüzey düzlemleri için sırasıyla 5,31 eV, 5,47 eV, 5,37 eV'tur (Lide, 1997-1998). Bakır'ın iş fonksiyonu (111), (100), (110) yüzey düzlemleri için sırasıyla 4,94 eV, 4,59 eV, 4,48 eV'tur (Nishiyama and Inoue, 2006), (Kittel, 1996). Nikel'in iş fonksiyonu (111), (100), (110) yüzey düzlemleri için sırasıyla 5,35 eV, 5,22 eV, 5,04 eV'tur (Kittel, 1996). Alüminyum'un ise iş fonksiyonu (111), (100), (110) yüzey düzlemleri için sırasıyla 4,26 eV, 4,20 eV, 4,06 eV'tur (Nishiyama and Inoue, 2006).

2.1. Metal-Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklar üzerine ilk sistematik araştırmalar genellikle Braun'a atfedilir. Toplam direncin uygulanan voltajın polaritesine ve yüzey koşullarının detaylarına bağlı olduğu 1874 yılında Braun tarafından belirtilmiştir. 1904 yılından itibaren başlayarak da düzenleyici nokta kontaklar çeşitli pratik uygulamalarda yer almıştır. Bu ilk pratik uygulama metal-yarıiletken diyotudur. Bu diyotta, yarıiletken yüzeyine bir metalik tel dokundurularak kontak yapılmıştır (Tyagi, 1991), (Sze, 1981). Wilson, 1931 yılında katıların bant teorisine dayanan yarıiletkenlerin transport (taşıma) teorisini formüle etmiştir. Daha sonra bu teori metal-yarıiletken kontaklara uygulanmıştır. Schottky 1938 yılında, potansiyel engelinin kimyasal bir tabaka olmaksızın yalnız yarıiletkendeki kararlı uzay yüklerinden kaynaklanabileceğini öne sürmüştür. Bu düşünceden ortaya çıkan model Schottky engeli olarak adlandırılır.

Mott 1938 yılında, metal-yarıiletken kontaklar için Mott engeli olarak bilinen uygun teorik bir yöntem tasarlamıştır. Düzeltici metal-yarıiletken kontakların basit teorisi ve tarihsel gelişimi Henisch tarafından Düzeltici Yarıiletken Kontaklar olarak özetlenmiştir (Sze, 1981).

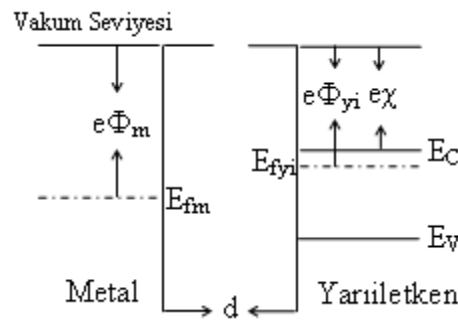
Metal-yarıiletken kontaklar hemen hemen tüm yarıiletken elektronik ve optoelektronik cihazların önemli parçasıdır. Özellikle metal-yarıiletken kontaklar alan etkili transistörlerin kapı elektrotlarında, yüksek elektron hareketli transistörlerde (HEMTs), metal-yarıiletken alan etkili transistörlerde (MOSFET), yüksek güçlü IMPATT osilatörlerin elektrotlarında, fotodedektörlerinde, güneş pillerinde ve mikrodalga uygulamalarında metal-yarıiletken kontaklar kullanılmaktadır (Sze, 1981), (Kim, 2007).

Metal-yarıiletken kontakların enerji bant diyagramı, yarıiletkenin iletkenlik tipine ve yarıiletken ile metalin iş fonksiyonuna bağlıdır. Yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olması durumuna göre iki şekilde metal-yarıiletken kontak yapısı oluşur (Wilson and Hawkes, 2000). Bu durum şekil 2.1 ve şekil 2.4'te verilmektedir.

2.1.1. Schottky Kontaklar

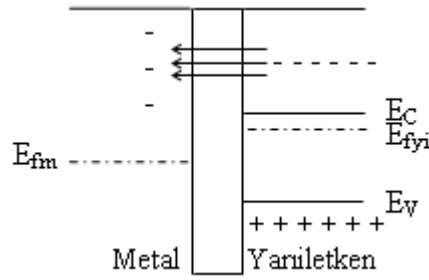
Schottky kontak yapısının meydana gelmesi için metal-yarıiletken kontak oluşturulmalıdır. Genellikle metal kontak yarıiletken üzerine vakum buharlaştırma yöntemiyle elde edilir. Schottky kontak olması için yarıiletken ve metal farklı iş fonksiyonlarına sahip olmalıdırlar. Burada bahsettiğimiz iş fonksiyonu ' $e\Phi$ ', bir katıdan bir elektronun Fermi enerji seviyesindeki ilk enerjiden vakum düzeyine çıkartmak için bir elektrona verilmesi gereken minimum enerji miktarı olarak tanımlanır (Wilson and Hawkes, 2000), (Sze, 1981). İş fonksiyonları farklı olduğu için birbirleriyle kontak yapılan malzemeler arasında yük geçişi sağlanır. Bu yük geçişi iş fonksiyonu küçük olan malzemeden, iş fonksiyonu büyük olan malzemeye doğru olur. Metal/n-tipi yarıiletken için Schottky kontak yapısı $e\Phi_m > e\Phi_{yi}$ şeklindedir.

Şekilde 2.1’de n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapılmadan önceki durum için n-tipi yarıiletkenin enerji diyagramı ile metalin enerji diyagramı görülmektedir. Bu durumda, metal ve yarıiletken arasında herhangi bir yük geçişi olmaz. Burada, yarıiletkenin iş fonksiyonu ($e\Phi_{yi}$), metalin iş fonksiyonu ($e\Phi_m$), yarıiletkenin elektron eğilimi ($e\chi$), yarıiletken ve metalin fermi enerji düzeyleri sırasıyla (E_{fyi}) ve (E_{fm}) ile gösterilmiştir (Tyagi, 1991), (Sze, 1981).



Şekil 2.1. n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapılmadan önceki n-tipi yarıiletken ve metalin enerji-bant diyagramı (Tyagi, 1991).

Şekil 2.2’de n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapıldıktan hemen sonraki enerji diyagramı gösterilmiştir. Metalle-yarıiletken arasındaki uzaklık azalmaya başlayıp bitişiklik olursa kontak oluşmuş olur. Metalin yarıiletkene kontaktı oluştuğunda yani metal yarıiletkene değme durumuna getirildiğinde, denge sağlanıncaya kadar yarıiletkenin iletkenlik bandındaki elektronlar metale geçerler ve böylece büyük bir çoğunluk taşıyıcı akışı oluştururlar. Bu elektronların geçişi iki malzeme arasındaki Fermi enerji seviyeleri eşitleninceye kadar devam eder. Böylece, yarıiletkenin elektron kaybetmesinden dolayı Fermi enerji seviyesi azalarak, metalin fermi enerji seviyesine eşit hale gelir (Gezci, 1992), (Tyagi, 1991).



Şekil 2.2. n-tipi yarıiletkenin üzerine, metal kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı (Gezci, 1991).

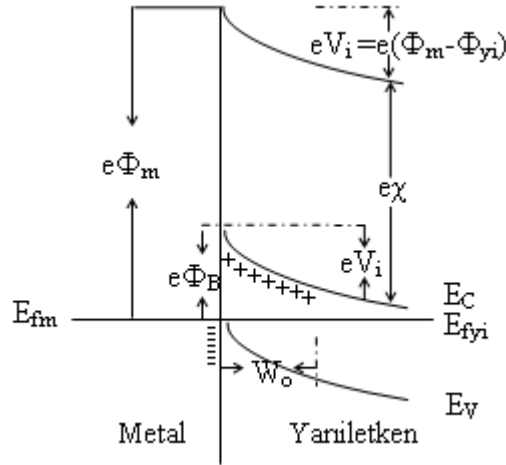
Şekil 2.3'te n-tipi yarıiletken ile metal kontağın denge durumundaki şekli verilmiştir. Denge durumuna geldiğinde yük akışı durur. Yarıiletkenden metale doğru elektronların akmasından dolayı, bu elektronlar arkalarında pozitif yüklü iyonlaşmış donör atomları bırakır. Bu pozitif yüklü iyonlaşmış donör atomları, yarıiletken tarafındaki W_o 'ın (kıtık tabakası) kalınlığı kadar genişler. Yarıiletken ara yüzeyi pozitif, metal ara yüzeyi de negatif yüklendiğinden, yarıiletkenden metale doğru bir elektrik alan oluşur. Yarıiletken tarafında iletkenlik ve valans bant sınırları Fermi enerji seviyesine göre kavis çizerler, bu metalin ve yarıiletkenin iş fonksiyonu arasındaki farka eşittir. Bu ifade $V_i = (\Phi_m - \Phi_{yi})$ şeklinde ifade edilir. Burada V_i potansiyel farkıdır ve bu değer doğru besleme voltajı (build-in voltage) olarak da adlandırılır. Metal-yarıiletken arasında, yük geçişinin sonucunda, düzeltme (rectifying) olarak adlandırılan bu olay esnasında Schottky engel yüksekliği oluşur. Bu yarıiletken malzemedeki elektronların, metal yüzeyinde taşıyıcısız bir bölgeyle ve negatif bir duvarla karşılaşması demektir (Boylestad and Nashelsky, 2004). Meydana gelen bu engel yüksekliği $e\Phi_B$ ile gösterilmiştir.

$$e\Phi_B = e(\Phi_m - \chi) \quad (2.1)$$

Engel yüksekliği basit olarak, metalin iş fonksiyonu ile yarıiletkenin elektron eğilimi (affinity) arasındaki farka eşittir. Engel yüksekliği ifadesi, diğer bir şekilde aşağıdaki formülle de ifade edilebilir.

$$e\Phi_B = eV_i + (E_C - E_{fyi}) \quad (2.2)$$

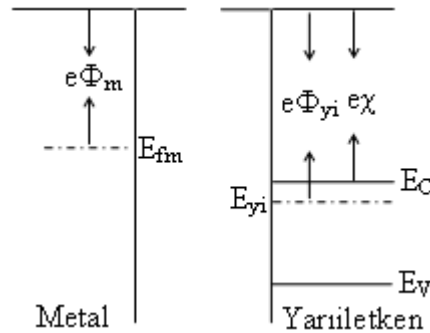
Burada eV_i , kontak potansiyel farkını; E_C , yarıiletkenin iletkenlik bandı düzeyini; E_{fi} , yarıiletkenin fermi enerji düzeyini göstermektedir (Tyagı, 1991), (Sze, 1981).



Şekil 2.3. n-tipi yarıiletken ile metalin kontak denge durumu enerji-bant diyagramı (Tyagı, 1991).

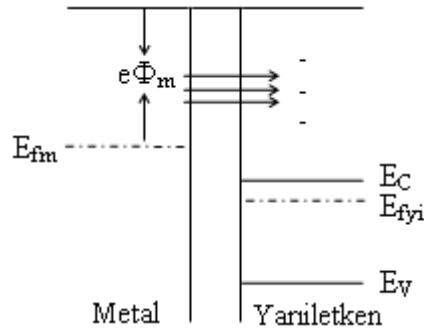
2.1.2. Ohmic Kontaklar

Metal/n-tipi yarıiletken için ohmic kontak yapısı $e\Phi_{yi} > e\Phi_m$ şeklindedir. Metalin iş fonksiyonu, yarıiletkenin iş fonksiyonundan küçüktür. Şekil 2.4'te n-tipi bir yarıiletken ile metalin, kontak oluşturmada önceki durum için enerji diyagramı verilmiştir. Bu şekilde görüldüğü üzere, metal ve yarıiletken arasında bir yük geçişi olmaz ve dolayısıyla bir akım da gözlenmez (Tyagı, 1991).

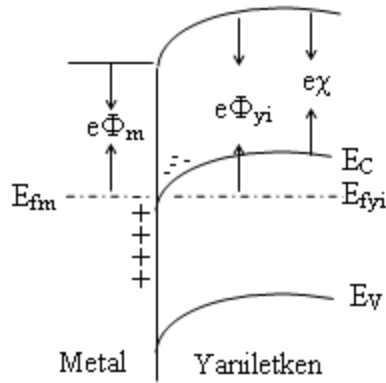


Şekil 2.4. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak oluşturmada önceki enerji-bant diyagramı (Tyagı, 1991).

Şekil 2.5'te yarıiletken ile metalin kontaktı oluştuğunda, yük akışı metalden yarıiletkenin iletkenlik bandına doğru olur. Bu durumda yarıiletkenin ara yüzeyinde elektron yoğunluğu artar. Yarıiletken tarafında negatif yüklerin yoğunluğundan dolayı yığılma yani akümülyasyon (accumulate) bölgesi oluşur. Yarıiletkende kıtlık tabakası (depletion region) ohmic kontakta oluşmaz. Çünkü metalden yarıiletkene doğru elektron akışı olduğundan, yarıiletkende elektron azalması meydana gelmez. Metal tarafında ise elektronların bıraktığı boşluklardan dolayı pozitif yük yoğunluğu artar. Metal bölgesinde elektron sayısının azalmasından dolayı fermi enerji seviyesi değişmez, buna karşın yarıiletken bölgesinde elektron sayısındaki artıştan dolayı yarıiletkenin fermi enerji seviyesi yukarı doğru kayarak metal ile yarıiletkenin Fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Sonuçta da yarıiletkenin enerji bantları daha fazla kıvrılarak kavislenir. Şekil 2.6'da yarıiletken ile metalin denge durumu verilmiştir. Ohmic kontak, metalden yarıiletkene gelen serbest taşıyıcılara bir engel oluşturmaz. Ohmic kontakın direnci yarıiletkenin direncine bağlıdır ve ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Bu özelliklere sahip metal-yarıiletken kontak yapılarına ohmic kontak adı verilir. Ohmic kontaklar düzeltici olmayan (nonrectifying) kontaklardır (Sze, 1981), (Tyagi, 1991).



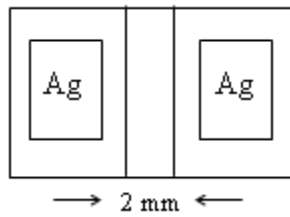
Şekil 2.5. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak yapıldıktan sonraki enerji-bant diyagramı.



Şekil 2.6. n-tipi yarıiletken ile metalin ohmic kontak denge durumu enerji-bant diyagramı (Tyagi, 1991).

2.2. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Filmlerinde Metal-Yarıiletken Yapılarının Oluşturulması

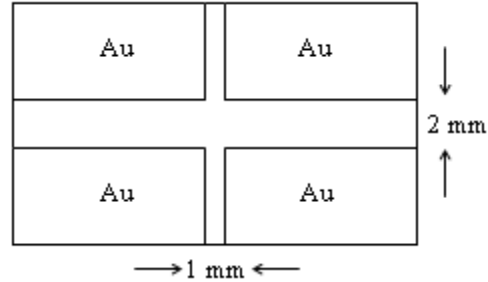
Ultrasonik Sprey Piroлиз yöntemi ile elde edilmiş olan $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin elektriksel özelliklerini belirleyebilmek için öncelikle metal-yarıiletken yapıların oluşturulması gerekmektedir. Yapılan çalışmada filmlere, Gümüş (Ag) ve Altın (Au) ile kontak yapılmıştır. Şekil 2.7’de görüldüğü gibi, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerine, gümüş ile kontak yapılmıştır. Metal kontakların arası 2 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.7. Ag/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ metal-yarıiletken-metal yapılarının şematik görünüşü.

Au/ $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ kontakları da incelenmiştir. Yüksek Vakumda Buharlaştırma yöntemi ile 10^{-5} torr basınçta, altın buharlaştırılarak $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerine altın kontaklar yapılmıştır. Bu işlem Leybold’un LH Heraeus 300 Univex ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin üzerine altın buharlaştırılmıştır. Bu filmlerin üzerine buharlaştırılan altın filminin kalınlığı 2000 Å’dur. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin kalınlığı ise ~ 1 µm’dir. Yapmış olduğumuz kontakların I-V ve C-V

karakteristiklerini ve elektriksel özdirencini bulmak için Hewlett Packard 4192A LF Impedance Analyzer cihazı kullanılmıştır.



Şekil 2.8. Au/Cd_{1-x}Zn_xS metal-yarıiletken-metal yapılarının şematik görünüşü.

2.3. Cd_{1-x}Zn_xS Yarıiletken Filmlerinin Özdirenç Ve İletkenlikleri

Cd_{1-x}Zn_xS ince filmlerinin özdirenç ve elektriksel özelliklerin belirlenmesi için iki uç, dört uç ve Van der Pauw teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Cd_{1-x}Zn_xS ince filmlerinin özdirenç ve elektriksel iletkenliklerinin ölçülmesiyle bu filmlerin elektriksel özellikleri araştırılmıştır. Cd_{1-x}Zn_xS, ince filmlerinin elektriksel özdirençleri, oda sıcaklığında ve karanlık ortamda, iki uç tekniği kullanılarak ölçülmüştür. Metal ile Cd_{1-x}Zn_xS arasında belli değerlerde voltaj uygulanmıştır. Bu voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri ölçülmüştür ve I-V karakteristiği elde edilmiştir. Elde edilen I-V karakteristiğinden direnç değerleri elde edilmiştir. Numunelerimizin özdirenç (ρ) değerlerini hesaplayabilmek için,

$$\rho = R \frac{A}{L} \quad (2.3)$$

matematiksel ifadesi kullanılmıştır (Boylestad and Nashelsky, 2004). Bu ifade; şekil 2.9’da gösterildiği gibi A, malzemenin kesit alanını; L, iki kontak arasındaki uzaklığı; ρ , özdirenci göstermektedir. Dolayısıyla malzemenin elektriksel özdirenci,

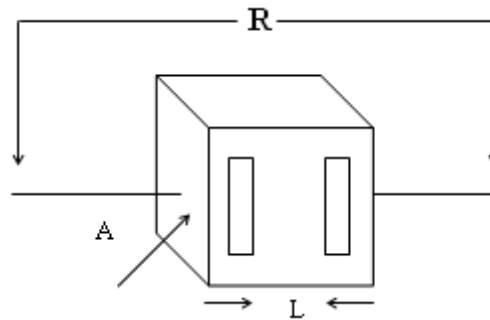
$$R = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2.4)$$

$$A = W.t \quad (2.5)$$

olmak üzere,

$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta I} \frac{W \cdot t}{L} \quad (2.6)$$

ifadesinden elde edilir. Burada, W her bir kontağın genişliği, t filmin kalınlığıdır.



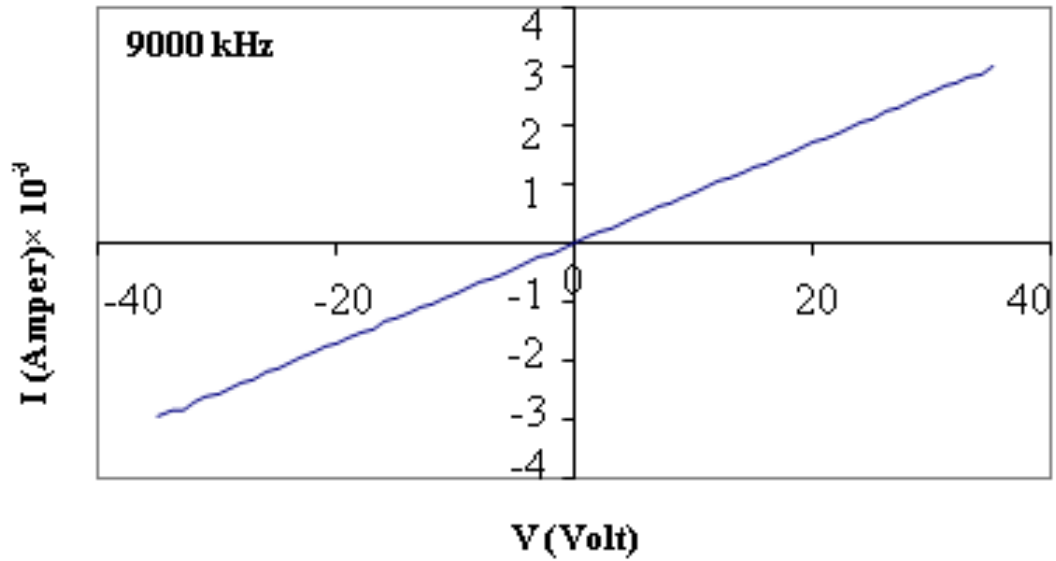
Şekil 2.9. İki uç metoduyla, öz direnci elde edilecek malzemenin şematik gösterimi (Boylestad and Nashelsky, 2004).

2.4. $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ Filmlerinin Akım – Voltaj Karakteristikleri

$\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin karanlıkta, oda sıcaklığındaki akım-voltaj karakteristikleri Hewlett Packard 4192A LF Impedance Analyzer cihazı kullanılarak elde edilmiştir. İki uç metodunu uygulayarak önce gümüş kontaklar oluşturulup -35 ile +35 volt arasındaki değerlere karşılık gelen akım değerleri ölçülmüştür. Bu değerlerden yararlanılarak her film için ayrı ayrı akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiştir. Her bir film için öz direnç ve elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiştir. Diğer aşamada ise vakum altında buharlaştırma tekniği ile altın kontak yapılmıştır. Daha sonra, oda sıcaklığında ve karanlıkta iki uç metodu kullanılarak -0,50 ile +0,95 volt değerleri arasında akım değerleri ölçülmüştür. Bu değerlerden yararlanılarak her film için ayrı ayrı akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiştir. Bu akım- voltaj karakteristiklerinden yararlanılarak da yine her bir film için öz direnç ve elektriksel iletkenlik değerleri belirlenmiştir.

2.5. Ag / Cd_{1-x}Zn_xS Filmlerinin Akım –Voltaj Karakteristikleri

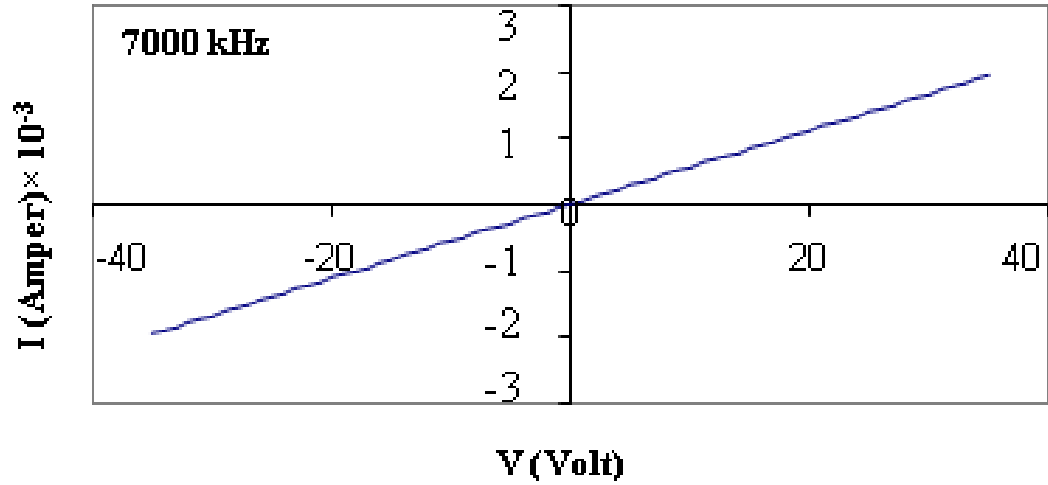
Ag/CdS filminin 9000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.10’da görülmektedir. Bu filmde, -35 V’tan başlayıp +35 volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-2,97 \times 10^{-3}$ A ile $3,01 \times 10^{-3}$ A arasında değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan CdS filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu görülmüştür. Gümüş kontak, CdS filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. Ohmic kontak için metal tarafındaki elektronlar, yarıiletkenin iletkenlik bandına geçmiştir. Kontakın direncinin hesaplanması için grafiğin eğiminden faydalanılmıştır. Denklem 2.6 ifadesi kullanılarak 20 Volttaki $1,70 \times 10^{-3}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri CdS filmi için $4,70 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak bulunmuştur.



Şekil 2.10. Ag/CdS filmine ait 9000 kHz’deki akım-voltaj karakteristiği.

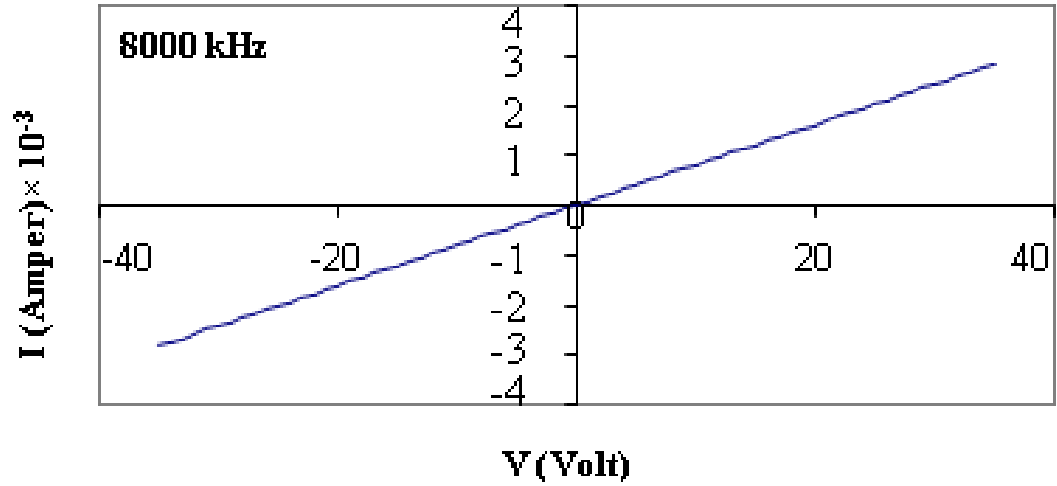
Ag/Cd_{0,8}Zn_{0,2}S filminin 7000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.11’de görülmektedir. Bu filmde, -35 V’tan başlayıp +35 volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-1,96 \times 10^{-3}$ A ile $1,95 \times 10^{-3}$ A arasında değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan Cd_{0,8}Zn_{0,2}S filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu

görülmüştür. Gümüş kontak, $\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{S}$ filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. 20 Volttaki $1,11 \times 10^{-3}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri $\text{Ag}/\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{S}$ filmi için $7,207 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak hesaplanmıştır.



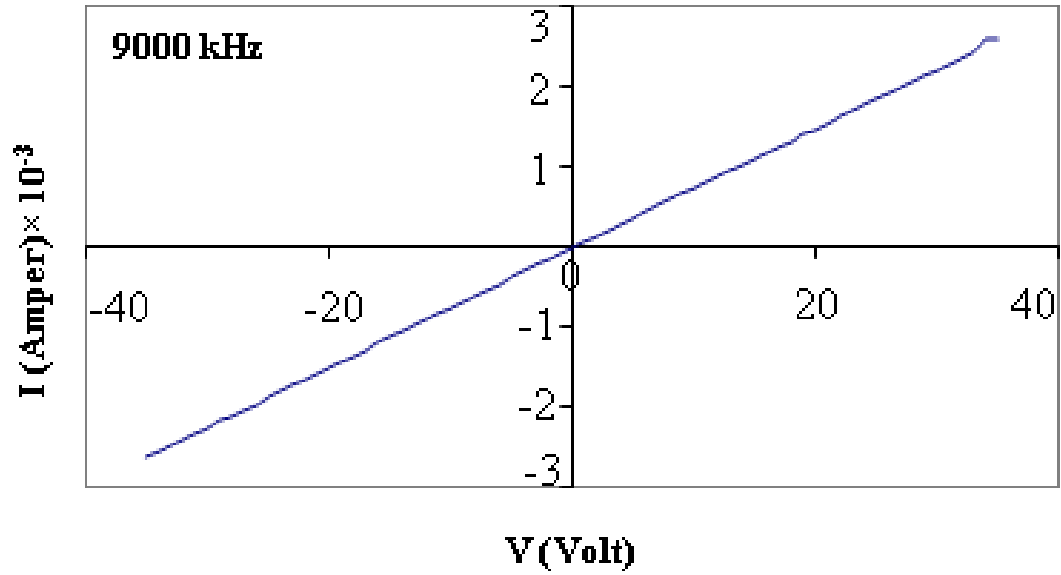
Şekil 2.11. $\text{Ag}/\text{Cd}_{0,8}\text{Zn}_{0,2}\text{S}$ filmine ait 7000 kHz'deki akım voltaj karakteristiği.

$\text{Ag}/\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{S}$ filminin 8000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.12'de görülmektedir. Bu filmde, -35 V'tan başlayıp +35 volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-2,83 \times 10^{-3}$ A ile $2,83 \times 10^{-3}$ A arasında değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{S}$ filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu görülmüştür. Gümüş kontak, $\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{S}$ filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. 20 Volttaki $1,60 \times 10^{-3}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri $\text{Ag}/\text{Cd}_{0,6}\text{Zn}_{0,4}\text{S}$ filmi için $5 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak hesaplanmıştır.



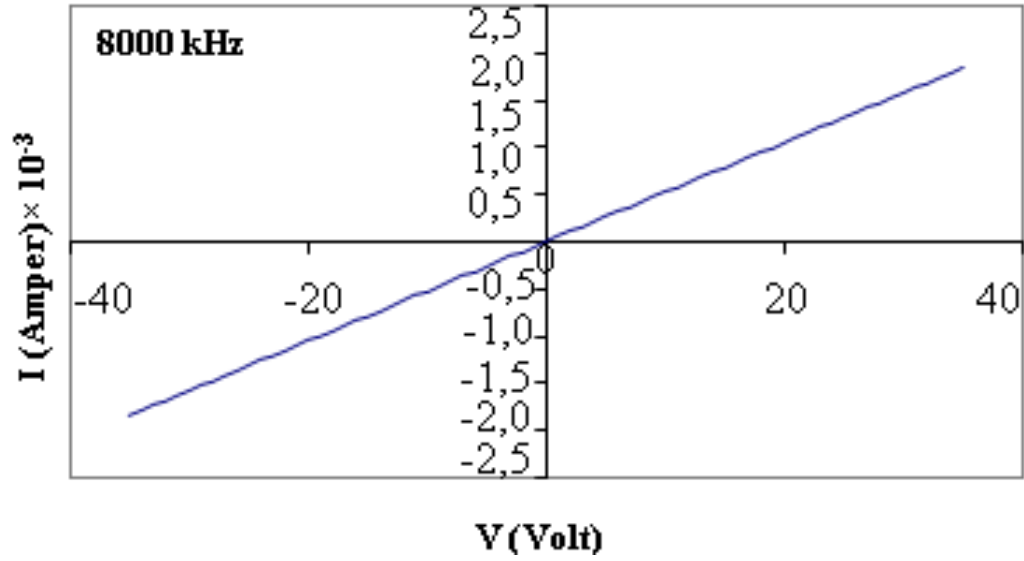
Şekil 2.12. Ag/Cd_{0.6}Zn_{0.4}S filmine ait 8000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.

Ag/Cd_{0.4}Zn_{0.6}S filminin 9000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.13'te görülmektedir. Bu filmde, -35 V'tan başlayıp +35 Volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-2,61 \times 10^{-3}$ A ile $2,60 \times 10^{-3}$ A arasında değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan Cd_{0.4}Zn_{0.6}S filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu görülmüştür. Gümüş kontak, Cd_{0.4}Zn_{0.6}S filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. 20 Volttaki $1,48 \times 10^{-3}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri Ag/Cd_{0.4}Zn_{0.6}S filmi için 6,08 Ω .cm olarak hesaplanmıştır.



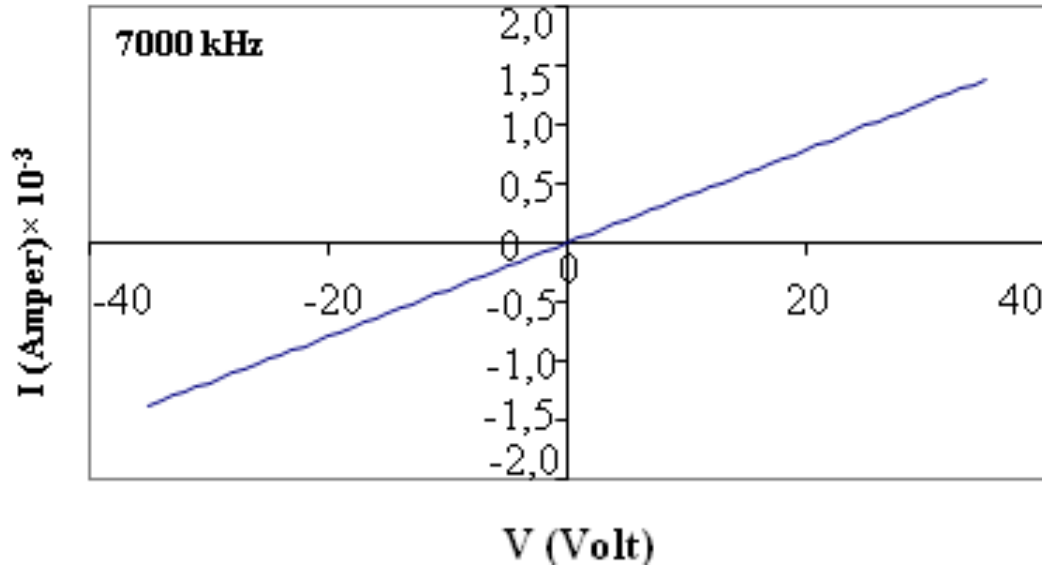
Şekil 2.13. Ag/Cd_{0,4}Zn_{0,6}S filmine ait 9000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.

Ag/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filminin 8000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.14'te görülmektedir. Bu filmde, -35 V'tan başlayıp +35 Volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-1,84 \times 10^{-3}$ A ile $1,84 \times 10^{-3}$ A arasında değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu görülmüştür. Gümüş kontak, Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. 20 Volttaki $1,05 \times 10^{-3}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri Ag/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filmi için $7,619 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.14. Ag/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filmine ait 8000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.

Ag/ZnS filminin 7000 kHz de oda sıcaklığında ve karanlıkta ölçülmüş olan akım-voltaj karakteristiği şekil 2.15'te görülmektedir. Bu filmde, -35 V'tan başlayıp +35 Volta kadar değişen voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri elde edilmiştir. Bu akım değerleri $-1,38 \times 10^{-3}$ A ile $1,39 \times 10^{-3}$ A değerleri değişmektedir. Gümüş ile kontak yapılan ZnS filminin bu grafikte ohmic kontak yapıda olduğu görülmüştür. Gümüş kontak, ZnS filminde engelsiz bir yapı oluşturmuştur. 20 Volttaki $7,89 \times 10^{-4}$ A akım değerine karşılık gelen öz direnç değeri Ag/ZnS filmi için $11,40 \Omega \cdot \text{cm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 2.15. Ag/ZnS filmine ait 7000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.

Gümüş ile kontak yapılarak akım-voltaj karakteristikleri çizilmiş olan Ag/Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin tümünün ohmic kontak olduğu görülmüştür. Akım değerleri elde edilirken, hem ileri hem ters yönde voltaj uygulanmıştır. Filme uygulanan voltaj değerleri arttıkça, akım değerleri de artış göstermiştir. Lineer karakteristikler elde edilmiştir.

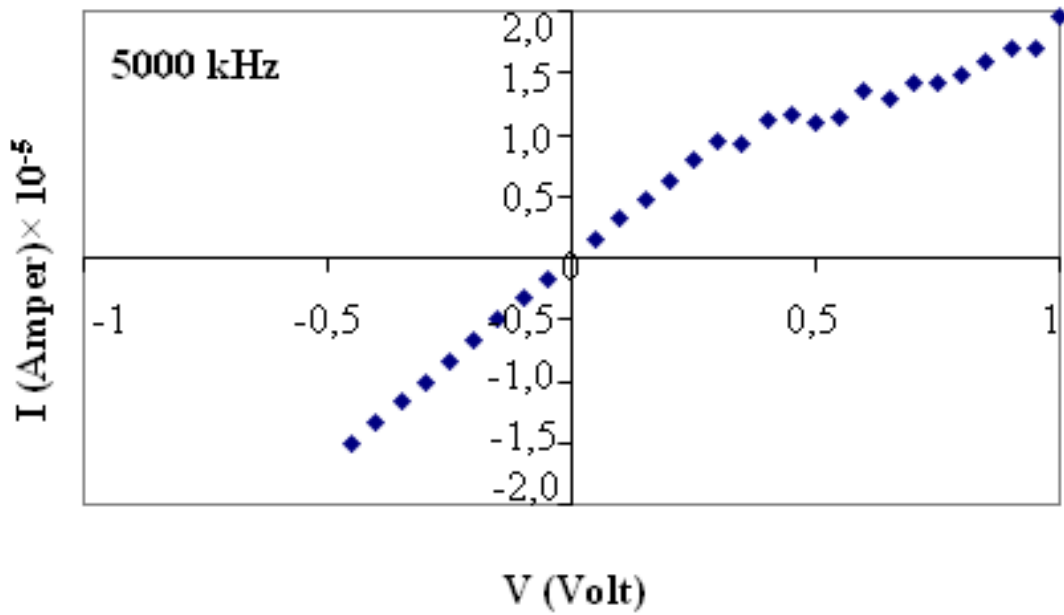
Ag/Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinden elde edilen akım-voltaj karakteristiklerinden yararlanılarak, öz direnç değerleri elde edilmiştir. Bu öz direnç değerlerini kullanarak filmlerin elektriksel iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Çizelge 2.1'de Ag/Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin öz direnç ve elektriksel iletkenlik değerleri verilmektedir. Filmlerin öz direnç (ρ) değerleri 4,70 – 11,40 $\Omega \cdot \text{cm}$ aralığında ve iletkenlik (σ) değerleri 0,087 - 0,212 ($\Omega \cdot \text{cm}$)⁻¹ arasında değişmektedir. Hesaplarını yaptığımız tüm Ag/Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin öz direnç değerlerinin literatürde belirtilen (10^{-2} - $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$) sınırları içerisinde yer aldığı gözlemlenmiştir. Çinko elementinin filmlerdeki konsantrasyonu arttıkça, öz direnç değerlerinde artış görülmüştür, fakat bu artış düzgün değildir.

Çizelge 2.1. Ag/Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin hesaplanan öz direnç ve iletkenlik değerleri, kontaklar arası mesafeler ve film kalınlıkları.

Materyal	L (mm)	ρ ($\Omega.cm$)	σ ($\Omega.cm$) ⁻¹	Filmin Kalınlığı (μm)
CdS	2	4,70	0,212	1
Cd _{0,8} Zn _{0,2} S	2	7,207	0,138	1
Cd _{0,6} Zn _{0,4} S	2	5	0,2	1
Cd _{0,4} Zn _{0,6} S	2	6,08	0,164	1
Cd _{0,2} Zn _{0,8} S	2	7,619	0,131	1
ZnS	2	11,40	0,087	1

2.6. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S Filminin Akım – Voltaj Karakteristikleri

Cd_{0,2}Zn_{0,8}S ince filmlerinin yüzeyleri Yüksek Termal Vakum Buharlaştırma Yöntemi (High Thermal Vacuum Evaporation Technique) kullanılarak altın ile kaplanmıştır. Daha sonra, iki uç metodu kullanılarak, oda sıcaklığında, karanlıkta -0,50 ile +0,95 Volt arasındaki değişen değerler de filmler için akım-voltaj karakteristikleri elde edilmiştir. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S yarıiletken ince filminin -0,50 ile +0,95 Volt arasındaki değerleri için I-V grafiğini çizdiğimizde, bu filmlerin Schottky kontak yapısı gösterdiği görülmüştür. Şekil 2.16'da 5000 kHz de alınan Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filminin akım-voltaj grafiği verilmiştir. Düşük dirençli kontaklarda I-V grafiği lineerliğe yakın bir görünüm gösterebilir (Kosyachenko et al., 2006).



Şekil 2.16. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filmine ait 5000 kHz'deki akım-voltaj karakteristiği.

Schottky kontaklarının en önemli fiziksel özelliklerinden olan idealite faktörü (n), değerini hesaplamak için deneysel akım-voltaj (I-V) karakteristikleri kullanılır. Ancak direnç çok büyük ve yüzey durumları yeterince yüksek ise I-V karakteristikleri ideal durumdan sapmalar gösterir (Karataş ve Altındal, 2004).

Schottky kontaklar için, I-V karakteristiği en genel durum göz önüne alınırsa akım-voltaj durumu aşağıdaki denklemle verilir (Dağdelen ve Aydoğdu, 2006).

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eV_D}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (2.7)$$

Burada, V_D diyot üzerine düşen voltajı, k Boltzmann sabitini, e elektrik yükünü, T Kelvin cinsinden sıcaklığı ve I_0 ise ters doyum akımını göstermekte olup,

$$I_0 = A^* A T^2 \exp\left(-\frac{e\phi_B}{kT}\right) \quad (2.8)$$

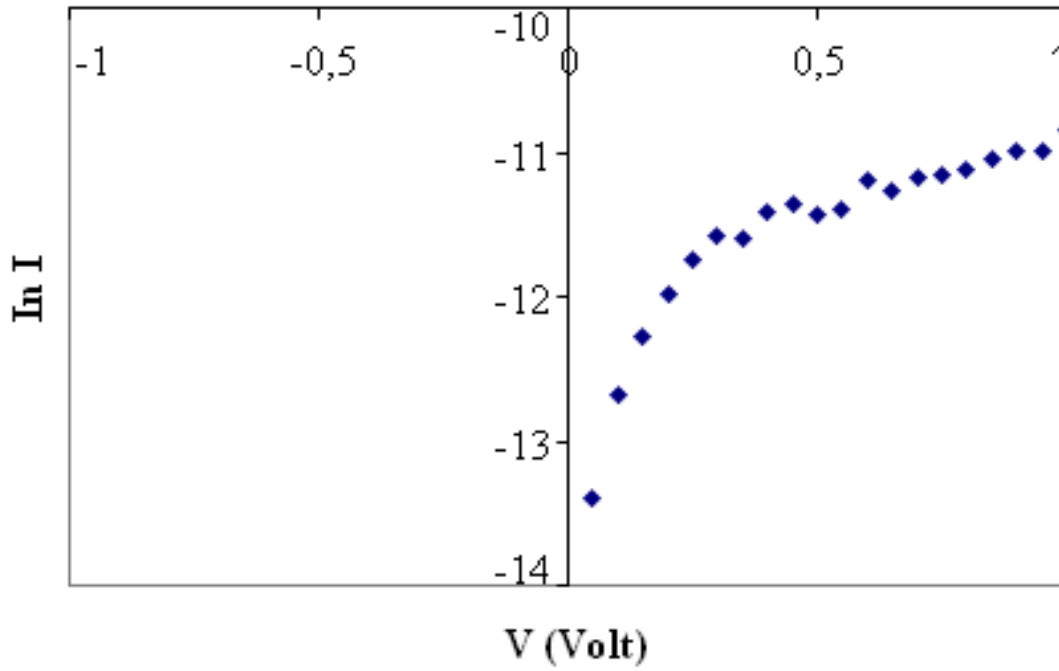
ifadesiyle verilir. Burada A diyot alanını, A^* Richardson sabitini, ϕ_B Schottky engel yüksekliğini göstermektedir. Denklem (2.7)'nin her iki tarafının logaritması alındığında denklem aşağıdaki ifadeye dönüşür.

$$\ln I = \ln I_0 + \left(\frac{e}{nkT}\right)V_D \quad (2.9)$$

Bu denklemin lineer kısmının eğimi $\tan \theta = \frac{d \ln I}{dV} = \frac{e}{nkT}$ eşitliğini vereceğinden, (n) için,

$$n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln I} \quad (2.10)$$

şeklinde yazılarak, idealite faktörü ifadesi elde edilir (Karataş ve Altındal, 2004).



Şekil 2.17. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S filmine ait ln I-V değişim karakteristiği.

Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S kontak yapısının idealite faktörü, Şekil 2.17’de verilen ln I-V karakteristiği kullanılarak, $n = \frac{e}{kT} \frac{dV}{d \ln I}$ denkleminde yararlanılarak 2,65 olarak bulunmuştur. Bu denklemden $\frac{kT}{e}$ 300 °K deki termal potansiyel ifadesi olup bu değer, 0,0259 Volt’ tur.

Schottky engel diyotları, p-n eklemli diyotlara göre daha avantajlıdır. Örneğin, ideal bir Schottky engel diyotunda idealite faktörü (n); 1,02-1,15 arasındadır, bu oran p-n eklemli diyotların idealite faktöründen daha küçüktür. Bu ideal diyotta, şekil 2.16'da yukarıdaki salınım, dikey eksene ne kadar yakınsa, diyot o ölçüde ideal olur. Bu yüzden Schottky engel diyotları düşük voltajlı, yüksek akım doğrultucu aygıtlarda tercih edilir. Bunun yanı sıra; yüksek ters akım nedeniyle oluşan yüksek voltajlı ve düşük akım uygulamalarında kullanıma uygun değildir. Ayrıca Schottky engel diyotlarının üretimi daha kolaydır (Tyagi, 1991).

İdeal bir Schottky diyotunun idealite faktörü 1,02-1,15 arasında değer alır. İdealite faktörünün 1'den büyük olmasının nedeni, diyotun ideal durumdan sapma gösterdiğinin belirtisidir. Bu durum diyotun arayüzey durum yoğunluğunun yüksek miktarda olmasına, ara yüzey tabakasının kalınlığına, dirence, arayüzeyde meydana gelen elektrik alandan dolayı Schottky engelinde oluşan düşme ile uzay-yük bölgesindeki jenerasyon-rekombinasyon akımların meydana gelmesine ve kıtlık (depletion) bölgesinde elektron-hol çiftinin birleşimine (rekombinasyon) atfedilir (Karataş and Altındal, 2004), (Tyagi, 1991). Ayrıca idealite faktörünün 2'den büyük olması Schottky aygıtlarının ara yüzeylerindeki oksitten kaynaklanmaktadır (Patel et al., 1999).

Sıcaklık artışı ile idealite faktörü değerinde azalma görülmüştür. Bu durum, malzemelerin arayüzeylerindeki kusurların azalmasından kaynaklanmış olabilir (Hazra and Basu, 2005), (Weichsel, 2006), (Yakuphanoglu et al., 2007).

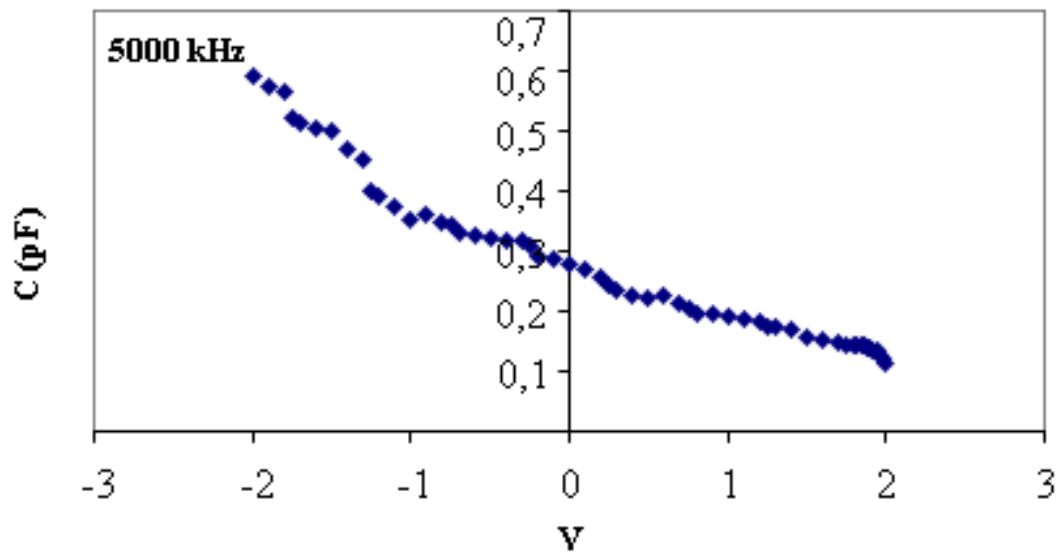
CdTe-CdS güneş pillerinde, filmlerin I-V karakteristiklerinde non-ohmic yapı görüldüğünden, bu durum Schottky engelli diyotlara atfedilir. Bu davranış, güneş pilinin kontak direncini yükseltir ve güneş pilinin performansının azalmasına neden olur. Schottky engel yüksekliğinin giderilmesi, güneş pilinin yüzeyine Te'yi etching yöntemiyle zenginleştirilerek sağlanır. Bu da iletkenliğin artmasına ve kontak direncinin düşmesini sağlar (Bätzner et al., 2000).

Schottky kontak olan p-Si/steel feeder (çelik besleme ünitesi) yapısında, p-Si üzerine alüminyum katkısı artırıldığında, Schottky engeli azalır. Bu durumda düzeltici kontak, ohmic kontağa dönmüştür ve kontak direnci ihmal edilebilecek kadar

düşmüştür. Çoğunluk taşıyıcılar kolaylıkla metalden yarıiletken tarafına doğru geçmişlerdir. (Kunieda and Ojima, 2000).

2.7. Au / $\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ Filminin Kapasitans-Voltaj Karakteristikleri

Kapasitans-Akım ölçümleri, oda sıcaklığında, karanlıkta -2 V ile +2 Volt arasındaki değişen değerler de Au/ $\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ filmi için C-V karakteristiği elde edilmiştir. Şekil 2.18’de 5000 kHz de alınan Au/ $\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ filminin kapasitans-voltaj grafiği verilmiştir.



Şekil 2.18. Au/ $\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ filmine ait C-V değişim karakteristiği.

Grafikte düşük voltajlarda elektronların yüklenmesinden dolayı, Schottky diyotunun kapasitansı artarken, yüksek voltajlarda kapasitans değerlerinde azalma olmuştur (Mohanta and Choudhury, 2005).

Metal-yarıiletken kontak yapısı oluştuğunda, yarıiletkendeki elektronların metale geçmesiyle yarıiletkende elektronların azalmasından kaynaklanan bir kıtlık bölgesi (depletion region) meydana gelir. Bu kıtlık bölgesindeki yüklerin gerilime bağlı değişimi bize kıtlık bölgesinin kapasitansını (C) verir. Bu kıtlık bölgesinin genişliği,

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{eN_d} \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{e} \right)} \quad (2.11)$$

ile verilir. Bu ifade de, ε_s yarıiletkenin dielektrik sabitini, N_d taşıyıcı konsantrasyonunu, V_{bi} engel potansiyelini, V uygulanan gerilimi, $\frac{kT}{e}$ termal potansiyeli göstermektedir. Metal-yarıiletken kontak olduğu zaman yük geçişlerinden dolayı bir elektrik alan meydana gelmektedir. Bu elektrik alan aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$|E(x)| = \frac{eN_D}{\varepsilon_s} (W - x) = E_m - \frac{eN_D}{\varepsilon_s} x \quad (2.12)$$

Bu yük geçişlerinden dolayı oluşan uzaysal yük dağılımının meydana getirdiği potansiyel ise şu şekildedir.

$$V(x) = \frac{eN_D}{\varepsilon_s} \left(Wx - \frac{1}{2} x^2 \right) - \Phi_{Bn} \quad (2.13)$$

$x=0$ iken, maksimum elektrik alan, aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$E_m = E(x=0) = \sqrt{\frac{2eN_D}{\varepsilon_s} \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{e} \right)} = \frac{2(V_{bi} - V - kT/e)}{W} \quad (2.14)$$

Yarıiletkenin birim alandaki uzaysal yükler Q_{sc} değişimi aşağıdaki şekilde yazılır.

$$Q_{sc} = eN_D W = \sqrt{2q\varepsilon_s N_D \left(V_{bi} - V - \frac{kT}{e} \right)} \quad \text{C/cm}^2 \quad (2.15)$$

Kıtlık bölgesinin birim alanının kapasitansı C olarak verildiğinde aşağıdaki denklemle ifade edilir.

$$C \equiv \frac{|\partial Q_{sc}|}{\partial V} = \sqrt{\frac{e\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V - kT/q)}} = \frac{\varepsilon_s}{W} \quad \text{F/cm}^2 \quad (2.16)$$

Bu denklemden aşağıdaki denklem elde edilir.

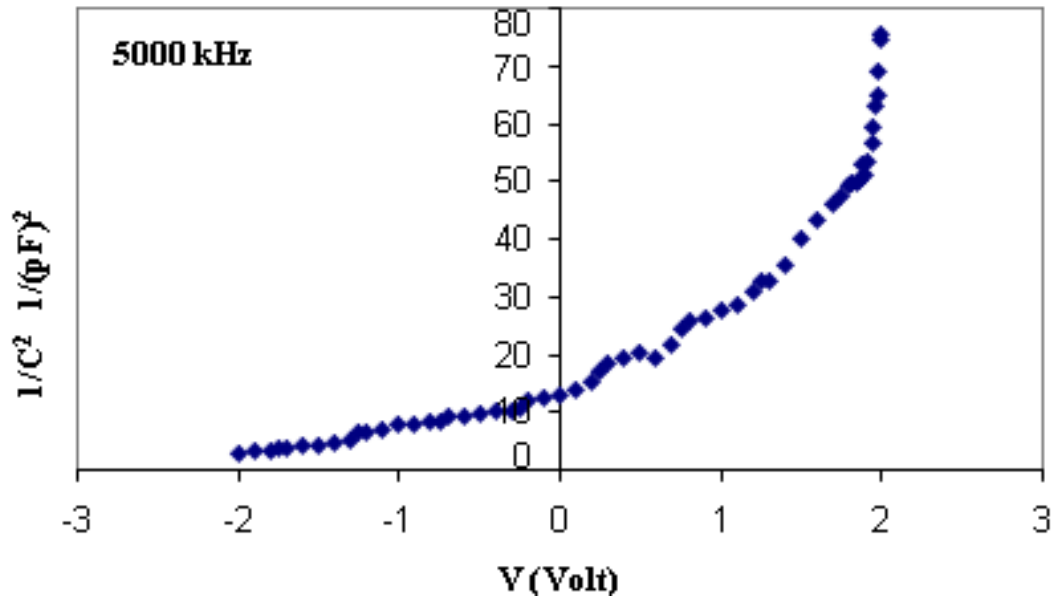
$$\frac{1}{C^2} = \frac{2(V_{bi} - V - kT/e)}{e\epsilon_s N_D} \quad (2.17)$$

$$-\frac{d(1/C^2)}{dV} = \frac{2}{e\epsilon_s N_D} \quad (2.18)$$

Sonuç olarak bu denklemlerden aşağıda verilen serbest taşıyıcı konsantrasyonu (N_d) denklemi elde edilir (Sze, 1981).

$$N_d = \frac{2}{e\epsilon_s} \left[-\frac{1}{d(1/C^2)/dV} \right] \quad (2.19)$$

(N_d) kıtlık bölgesindeki çoğunluk serbest taşıyıcı yük yoğunluğunu ifade eder. Kapasitans-Voltaj ölçümlerinden şekil 2.19'da verilen grafik elde edilmiştir. Buradan $1/C^2$ nin V 'ye göre değişiminden taşıyıcı konsantrasyonu elde edilir.



Şekil 2.19. Au/Cd_{0.2}Zn_{0.8}S filmine ait $1/C^2$ -V değişim karakteristiği.

$1/C^2$ nin V 'ye göre grafiğinin, lineer bölgenin eğiminden yararlanılarak, taşıyıcı atomlarının konsantrasyonu hesaplanarak bulunur (Karataş ve Altındal, 2004). Bu grafikten elde edilen değerler denklemde yerine yazılmıştır. $Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ için ϵ_s değeri 4,53 alınmıştır (Salem, 2002). $Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ için çoğunluk serbest taşıyıcı yoğunluğu $8,21 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ bulunmuştur. Schottky diyotlarının çoğunda, çoğunluk serbest taşıyıcı konsantrasyonu 10^{15} cm^{-3} ile 10^{17} cm^{-3} arasındadır (Tyagi, 1991). Literatürde alınan diğer sonuç Au/CdS için taşıyıcı konsantrasyonu $8,25 \times 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ 'tür (Patel et al., 1999). Diğer bir veride maximum konsantrasyon $3,5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ve $4 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 'tür (Grün et al., 1999).

Schottky kontaklarının önemli fiziksel özelliklerinden biri olan Schottky engel yüksekliğini (Φ_B) bulmak için, deneysel C-V karakteristiği kullanılır. $1/C^2$ nin V 'ye göre grafiği çizilerek, bu eğrinin doğrusal kısmının eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği belirlenir (Patel et al., 1999). Literatürde CdS 'nin altın ile kontak yapıldığı durum için engel yüksekliği 0,78 eV olarak verilmiştir. ZnS için ise bu değer, 2 eV'tur. Bizim, $Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S$ kontak yapısı için bulduğumuz engel yüksekliği 1,3 eV'tur. Bulduğumuz değer, literatürde verilmiş olan değerlerle uyum içindedir. Ayrıca denklem 2.1 kullanılarak teorik olarak bulduğumuz engel yüksekliği 1,31 eV'tur. Elde edilen deneysel ve teorik sonuçlar uyum içindedir (Sze, 1981).

Schottky engel yüksekliğinin sıcaklıkla arttığı görülmektedir. Engel yüksekliğinin artması, muhtemelen yüksek sıcaklıkta ara durumlardaki azınlık yük taşıyıcıların çoğalmasıyla birlikte, tükenme tabaka genişliğinin artmasından dolayıdır (Hazra and Basu, 2005).

3. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, Ultrasonik Sprey Piroлиз yöntemiyle üretilmiş olan n-tipi $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin elektriksel özellikleri incelenmiştir. Bu özelliklerin belirlenebilmesi için öncelikle metal-yarıiletken yapıları oluşturulmuştur. Filmlere Gümüş ve Altın ile kontak yapılmıştır. Gümüş ile kontaktı yapılan $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin; oda sıcaklığında, iki uç tekniği kullanılarak -35 volt'tan başlayarak +35 volta kadar değişen voltaj değerlerinde akım-voltaj karakteristikleri çizilmiştir. Bu karakteristiklerden $\text{Ag}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin tümünün ohmic kontak olduğu görülmüştür. $\text{Ag}/\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin öz direnç ve elektriksel iletkenlik değerleri hesaplanmıştır. Bu filmlerin öz dirençlerinin hesaplanmasında I-V karakteristiklerinden yararlanılmıştır. Filmlerin öz direnç değerleri 4,70 – 11,40 $\Omega\cdot\text{cm}$ arasındadır. Bulunan öz direnç değerlerinin literatür de yer alan değerler içerisinde yer aldığı görülmüştür. Bu karakteristiklerden uygulanan voltajın artmasıyla beraber akım değerlerinde de artış görülmüştür. Ayrıca filmlerde çinko konsantrasyonunun artmasıyla birlikte, öz direnç değerlerinde de artış olmuştur. Çinko oranının artmasıyla filmlerin elektriksel iletkenlik değerleri azalmıştır.

Diğer bir aşamada ise $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin üzerine vakumda buharlaştırma yöntemi ile 10^{-5} torr basınçta, altın buharlaştırılarak altın kontaklar yapılmıştır. Altın ile kontaktı yapılan $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ filmlerinin oda sıcaklığında, iki uç tekniği kullanılarak -0,50 ile +0,95 Volt arasındaki değişen değerlerde voltaj verilip, akım-voltaj karakteristikleri çizilmiştir. Elde edilen karakteristiklerden $\text{Au}/\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ filminin Schottky kontak yapısı gösterdiği belirlenmiştir. Akımın $\ln$ değeri alınarak, voltaj değerlerine karşı grafiği çizilmiştir ve çizmiş olduğumuz grafikten idealite faktörü (n) 2,65 bulunmuştur. Bu diyotun ideal olmamakla birlikte doğrultucu özellik gösterdiği görülmüştür. Bu tür yarıiletken-metal malzemelerle yapılan diyotların uygun şartlarda üretilip, kullanılacak amaca ve devre performansına uygun diyotlar oluşturulacağı söylenilebilir. $\text{Au}/\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ filmi için kapasitans ölçümleri alınmıştır ve Kapasitans-Voltaj grafiği çizilmiştir. Buradan $1/C^2$ 'nin V'ye göre grafiği çizilerek, bu eğrinin doğrusal kısmının eksenini kestiği noktadan engel yüksekliği belirlenmiştir. $\text{Au}/\text{Cd}_{0,2}\text{Zn}_{0,8}\text{S}$ yarıiletken filmi için, Schottky engel yüksekliği ($e\Phi_B$) 1,3 eV bulunmuştur. Bu elde edilen değer, hem

teorik hem de deneysel sonuçla birbirini desteklemiştir. Au/Cd_{0,2}Zn_{0,8}S için bulduğumuz engel yüksekliği, literatür de yer alan CdS ve ZnS filmleri için elde edilmiş olan değerler içerisinde yer aldığı görülmüştür. Kapasitans-Voltaj grafiğinden yararlanılarak elde edilen $1/C^2$ 'nin V'ye göre grafiğinden yararlanılarak serbest taşıyıcı yük yoğunluğu $8,21 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur. Bu değer literatür de verilen değerlerle uyum içindedir.

4. KAYNAKLAR DİZİNİ

- Alvarez, F.J., Di Lalla, N. and Lamagna, A., 1997, Thin film CdS/CdTe solar cells prepared by electrodeposition using low cost materials, Anaheim CA, 3, 459-462.
- Bacaksız, E. and Cevik, U., 2006, K shell fluorescence yield of Cd and Zn in $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ thin films, Chem. Phys. Letters, 427, 132-136.
- Baldacchini, G., 2002, Colored LiF: an optical material for all seasons, J. of Luminescence, 100, 333-343.
- Baykul, M.C. and Balcioglu, A., 2000, AFM and SEM studies of CdS thin films produced by an ultrasonic spray pyrolysis method, Microelectronic Engineering, 51- 52, 703-713.
- Baykul, M.C., Rüzgar, H., Arman, E., Baş, Y. and Bütün, V., 2010, Structural and optical properties of CdS nanocrystals grown in water-soluble diblock copolymer, Physica Status Solidi (C), 7, 423-426.
- Baykul, M.C. and Orhan, N., 2009, Band alignment of $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_x\text{S}$ produced by spray pyrolysis method, Thin Solid Films, 518, 1925-1928.
- Bätzner, D.L., Wendt, R., Romeo, A., Zogg, H. and Tiwari, A.N., 2000, A study of the back contacts on CdTe/CdS solar cells, Thin Solid Films, 361-362, 463-467.
- Benkabou, F., Aourag, H., Certier., M., 2000, Atomistic study of zinc-blende CdS, CdSe, ZnS, and ZnSe from molecular dynamics, Materials Chem. and Phys., 66, 10-16.
- Borse, S.V., Chavhan, S.D. and Sharma R., 2007, Growth, structural and optical properties of $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ alloy thin films grown by solution growth technique (SGT), J. of Alloys and Compounds, 436, 407-414.
- Boudine, B., Sebais, M., Halimi, O., Alliouche, H., Boudrioua, A. and Mouras, R., 2004, Structural and optical properties of CdS nanocrystals embedded in NaCl single crystals, Catalysis Today, 89, 293-296.
- Boylestad, R. and Nashelsky, L., 2004, Elektronik elemanlar ve devre teorisi, (Çev. M.EB.), Milli Eğitim Basımevi İstanbul, 1-10 s.
- Chavhan, S.D., Senthilarasu, S. and Lee, S.H., 2008, Annealing effect on the structural and optical properties of a $\text{Cd}_{1-x}\text{Zn}_x\text{S}$ thin film for photovoltaic applications, Appl. Surface Science, 254, 4539-4545.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chen, K., Yang, Y., Sa, Q., Shi, L. and Zhao, H., 2008, Suspension polymerization stabilized by triblock copolymer with CdS nanoparticles, *Polymer*, 49, 2650-2655.
- Dağdelen, F. and Aydoğdu, A., 2006, Ni / n-tipi yarıiletken kompleks / Ag diyotların elektronik özelliklerinin belirlenmesi, *Science and Eng. J of Firat Univ.*, 18 (3), 291-295.
- Daranfed, W., Aida, M.S., Hafdallah, A. and Lekiket, H., 2009, Substrate temperature influence on ZnS thin films prepared by ultrasonic spray, *Thin Solid Films*, 518, 1082-1084.
- Elgamel, H.E.A. and Gobrecht, J., 2001, A simple and efficient process for fabricating high efficiency polycrystalline silicon ribbon solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 65, 561-564.
- Enríquez, J.P. and Mathew, X., 2003, Influence of the thickness on structural, optical and electrical properties of chemical bath deposited CdS thin films, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 76, 313-322.
- Estela Calixto, M., Tufino-Velázquez, M., Contreras-Puente, G., Vigil-Galán, O., Jiménez-Escamilla, M., Mendoza-Perez, R., Sastré-Hernández, J. and Morales-Acevedo, A., 2008, Study of chemical bath deposited CdS bi-layers and their performance in CdS/CdTe solar cell applications, *Thin Solid Films*, 516, 7004-7007.
- Farag, A.A.M., Yahia, I.S., Fadel, M., 2009, Electrical and photovoltaic characteristics of Al/n-CdS Schottky diode, *Int. J. of Hydrogen Energy*, 34, 4906–4913.
- Gezci, S., 1992, Katılmal fiziği, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası Gümüşsuyu, 35-37, 352-356, 402-405, 476 s.
- Goetzberger, A. and Hebling, C., 2000, Photovoltaic materials, past, present, future, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 62, 1-19.
- Goudarzi, A., Aval, G.M., Sahraei, R. and Ahmadpoor, H., 2008, Ammonia-free chemical bath deposition of nanocrystalline ZnS thin film buffer layer for solar cells, *Thin Solid Films*, 516, 4953-4957.
- Grün, M., Storzum, A., Hetterich, M., Kamilli, A., Send, W., Walter, Th., Klingshirn, C., 1999, Chlorine doping of cubic CdS and ZnS grown by compound source molecular-beam epitaxy, *J. of Crystal Growth*, 201-202, 457-460.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Hazra, S.K. and Basu S., 2005, ZnO p-n junctions produced by a new route, Solid-State Electronic, 49, 1158-1162.
- Karataş, Ş. ve Altındal, Ş., 2004, İdeal olmayan schottky diyotlarının temel parametrelerinin akım-voltaj (I-V) karakteristiklerinden hesaplanması, KSU. J. of Science and Engineering, 7(2), 20-25.
- Kim, D.J., Yu, Y.-M., Lee, J.W. and Choi, Y.D., 2008, Investigation of energy band gap and optical properties of cubic CdS epilayers, Applied Surface Science, 254, 7522-7526.
- Kim, D.M., Kim, D.H. and Lee, S.Y., 2007, Characterization and modeling of temperature-dependent barrier heights and ideality factors in GaAs schottky diodes, Solid-State Electronics, 51, 865-869.
- Kittel, C., 1996, Introduction to solid state physics, John Wiley & Sons, New York, 7-10, 15, 44-58, 97, 121-122, 139-141, 157-159, 385-397, 395 p.
- Kosyachenko, L.A., Mathew, X., Motushchuk, V.V. and Sklyarchuk, V.M., 2006, Electrical properties of electrodeposited CdTe photovoltaic devices on metallic substrates: study using small area Au-CdTe contacts, Solar Energy, 80, 148-155.
- Kunieda, M. and Ojima, S., 2000, Improvement of EDM efficiency of silicon single crystal through ohmic contact, Precision Engineering, 24, 185-190.
- Kwok, H.L. and Chau, Y.C., 1980, Carrier density and mobility in $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ chemically sprayed films, Thin Solid Films, 66, 303-309.
- Lee, J., 2005, Comparison of CdS films deposited by different techniques: Effects on CdTe solar cell, Appl. Surface Science, 252, 1398-1403.
- Lee, J.H., Song, W.C., Yang, K.J. and Yoo, Y.S., 2002, Characteristics of the CdZnS thin film doped by indium diffusion, Thin Solid Films, 416, 184-189.
- Lee, J., Yi, J. and Yang, K., 2003, Effect of boron doping on the properties of chemically deposited CdS films, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 543-546.
- Lee, J.H., Song, W.C., Yi, J.S. and Yoo, Y.S., 2003, Characteristics of the CdZnS thin film doped by thermal diffusion of vacuum evaporated indium films, Solar Energy Materials and Solar Cells, 75, 227-234.
- Lide, D.R., 1997-1998 Handbook of chemistry and Physics, Editor-in-Chief CRC Press Boca Raton Newyork 78TH Edition.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lips, K., Fuhs, W., Finger, F., 2002, Recombination currents in microcrystalline silicon solar cells studied by electrically detected magnetic resonance, Photovoltaic Specialists Conference, 1166-1169.
- McKelvey, J.P., 1996, Solid state and semiconductor physics, Harper International Edition New York, 260-262, 478-483 p.
- Millman, J. and Halkias, C. C., 1967, Electronic Devices and Circuits, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, Newyork, 49,50,68 p.
- Mohanta, D. and Choudhury, A., 2005, Frequency dependent electrical properties of nano-CdS/Ag junctions, The European Phys. J. B, 45, 63-68.
- Moore, D. and Wang, Z.L., 2006, Growth of anisotropik one-dimension ZnS nanostructures, J. of Materials Chemis., 16, 3898-3905.
- Naumov, A.V., Semenov, V.N. and Goncharov, E.G., 2001, Properties of CdS films prepared from thiourea complexes of cadmium salts, Springer, 37, 539-543.
- Nag, B.R., 1980, Electrontransport In Compound Semiconductors, Springer Verlag Berlin Heildelberg, New York.
- Nishiyama, H. and Inoue, Y., 2006, PEEM study of work function changes in Cu, Au and Pd metal surfaces with surface acoustic wave propagation, Surface Science, 600, 2644-2649.
- Oktik, Ş., 2001, Güneş-elektrik dönüşümleri, fotovoltaik güneş gözeleri ve güç sistemleri, Tübitak Matbaası, 10, 21-22, 34 s.
- Oladeji, I.O., Chow, L., 2005, Synthesis and processing of CdS/ZnS multilayer films for solar cell application, Thin Solid Films, 474, 77-83.
- Orhan, N., 2006, Cd_{1-x}Zn_xS filmlerinin optik ve yapısal özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 3-5, 10, 14-15 s.
- Pal, U., Silva-González, R., Martínez-Montes, G., Gracia-Jiménez, M., Vidal, M.A. and Torres, Sh., 1997, Optical characterization of vacuum evaporated cadmium sulfide films, Thin Solid Films, 305, 345-350.
- Patel, B.K., Nanda, K.K. and Sahu, S.N., 1999, Interface characterization of nanocrystalline CdS/Au junction by current-voltage and capacitance-voltage studies, J. of Appl. Phys., 85, 3666-3670.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pradhan, B., Sharma, A.K. and Ray, A.K., 2007, Conduction studies on chemical bath-deposited nanocrystalline CdS thin films, *J. of Crystal Growth*, 304, 388-392.
- Rafea, M.A., Farag, A.A.M. and Roushdy, N., 2009, Structural and optical characteristics of nano-sized structure of $Zn_{0.5}Cd_{0.5}S$ thin films prepared by dip-coating method, *J. of Alloys and Compounds*, 485, 660-666.
- Ren, T., Lei, Z., Luan, G., Luan, G., Jia, G., Zhang, J., Yu, R. and Li, C., 2006, Fabrication of CdS-ZnS layered thin films by hydrothermal seeded growth method, *Thin Solid Films*, 513, 99-102.
- Salem, A.M., 2002, Structure, refractive-index dispersion and the optical absorption edge of chemically deposited $Zn_xCd_{(1-x)}S$ thin films, *Appl. Phys. A*, 74, 205-211.
- Solymar, L. and Walsh, D., 1988, Lectures on the electrical properties of materials, Oxford Science Publications New York, 159-161, 187, 212-218 p.
- Sze, M.S., 1981, Physics of semiconductor devices, John Wiley & Sons, New York, 15, 30-31, 245-291 p.
- Tyagi, M.S., 1991, Introduction to semiconductor materials and devices, John Wiley & Sons, 263-291 p.
- Türkmen, C., 2006, Kimyasal biriktirme yöntemi ile CdS, ZnS ve PbS yarıiletken nano yapıların üretilmesi ve karakterizasyonu Doktora Tezi, ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 53 s.
- Uda, M., Nakamura, A., Yamamoto, T. and Fujimoto, Y., 1998, Work function of polycrystalline Ag, Au and Al, *J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 88-91, 643-648.
- Uda, M., Nakamura, Y., Yamamoto, T., Kawasaki, M., Nakamura, A., Saito, T. and Hirose, K., 1998, Successive change in work function of Al exposed to air, *J. of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, 88-91, 767-771.
- Ximello-Queibras, J.N., Contreras-Puente, G., Rueda-Morales, G., Vigil, O., Santana-Rodríguez, G. and Morales-Acevedo, A., 2006, Properties of CdS thin films grown by CBD as a function of thiourea concentration, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90, 727-732.
- Valkonen, Mika.P., Lindroos, S. and Leskelä, M., 1998, $Cd_xZn_{1-x}S$ solid solution thin films, CdS thin films and CdS/ZnS multilayer thin films grown by SILAR technique, *Appl. Surface Science*, 134, 283-291.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Yacobi, B. G., 2003, Semiconductor Materials, Kluwer Academic / Plenum Publishers, New York 233 Spring Street, New York, New York 10013, 145-147 p.
- Yakuphanoglu, F., Tugluoglu, N. and Karadeniz S., 2007, Space charge-limited conduction in Ag/p-Si schottky diode, Physica B, 392, 188-191.
- Yoo, Y.-Z., Chikyow, T., Ahmet, P., Jin, Zheng-Wu., Kawasaki, M. and Koinuma, H., 2002, Comparison of hexagonal ZnS film properties on c- and a-sapphires, J. of Crystal Growth, 237-239, 1594-1598.
- Weichsel, C., Pagni, O., van Wyk, E. and Leitch, A.W.R., 2006, Temperature-dependent capacitance studies of palladium/zinc oxide schottky diodes, Superlattices and Microstructures, 39, 1-7.
- Wilson, J. and Hawkes, J.F.B., 2000, Optoelektronik, (Çev. İ. Okur), Değişim Yayınları Adapazarı, 43-64, 84-85, 291 s.