

**T.C.**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CBD YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ KATKILI**

**VE KATKISIZ CdS İNCE FİLMLERİN**

**ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN**

**BELİRLENMESİ**

**Utku CANCI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**ANABİLİM DALI**

**GEBZE**

**2009**

**T.C.**

**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**CBD YÖNTEMİYLE HAZIRLANMIŞ KATKILI  
VE KATKISIZ CdS İNCE FİLMLERİN  
ELEKTRİKSEL VE OPTİK ÖZELLİKLERİNİN  
BELİRLENMESİ**

**Utku CANCI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**ENERJİ SİSTEMLERİ**

**ANABİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI**

**Prof. Dr. Mehmet Alaittin HASTAOĞLU**

**GEBZE**

**2009**



## YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.06.2009 tarih ve 2009-13 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 24.06.2009 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Utku CANCI'nın tez çalışması Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

### JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. M. Alaittin HASTAOĞLU *M. Alaittin Hastaoğlu*

ÜYE

: Doç. Dr. Ahmet ALTINDAL

*Ahmet Altındal*

ÜYE

: Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN

*Alp Er Konukman*

### ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.06.2009 tarih ve 2009-13 sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

## ÖZET

**TEZİN BAŞLIĞI:** CBD Yöntemiyle Hazırlanmış Katkılı Ve Katkısız CdS İnce Filmlerin Elektriksel Ve Optik Özelliklerinin Belirlenmesi.

**YAZAR ADI:** Utku CANCI

II-VI bileşik yarıiletkenler arasında kadmiyum sülfür (CdS) geniş bir band aralığına, yüksek optik absorblama katsayısına sahiptir ve ucuzdur. Böylece birçok optoelektronik aygıtın üretiminde örneğin n-cam katmanlı güneş pillerinde kullanılmaktadır. Ayrıca, CdS ince filmlerin az miktarlarda katkıları ve ısı işlemleri, yapısal, elektriksel ve optik özellikleri büyük oranlarda değiştirilebilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı CdS ince filmler son zamanlarda sıkça ilgilenilen konulardandır.

Yapılan bu çalışmada, kimyasal banyo yığıma (CBD) yöntemiyle hazırlanan katkısız ve katkılı CdS ince filmlerinin elektriksel alternatif akım ve doğru akım (a.c. ve d.c.) özellikleri 302-413 K sıcaklık aralığında incelenmiştir. Optik özellikleri, 300-1100 nm aralığındaki dalga boylarında, karanlık ve 50–4000 lüks aydınlanma şiddeti aralığında incelenmiştir. Katkılı ve katkısız filmler IDT üzerine, başlangıç maddesi olarak CdS kullanılarak CBD metoduyla kaplanmıştır. Filmlerin kristal yapı analizi X-Işını Kırınımı cihazı (XRD) kullanılarak incelenmiştir. Filmlerin doğru akım iletkenlik özellikleri,  $\pm 1$  V voltaj aralığında ve 302-413 K sıcaklık aralığında,  $3 \times 10^{-3}$  mbar vakum ortamında, karanlıkta ölçülmüştür. Filmlerin a.c. iletkenliği de aynı koşullarda 40 Hz ile 100 kHz aralığında gerçekleştirilmiştir.

Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, kimyasal banyo yığıma metodu ile hazırlanan katkılı ve katkısız CdS ince filminin d.c. iletim mekanizmasının Arrhenius tipine uyduğu görülmüştür. Filmlerin a.c. iletim mekanizması ise Reider modeli ile açıklanmıştır. Ayrıca filmlerin fotoiletkenliklerinin, dalga boyu ve aydınlanma ile değiştiği gözlemlenmiştir.

## SUMMARY

**THESIS TITLE** : The investigation of electrical and optic properties of chemical bath deposition derived doped and undoped CdS thin film.

**AUTHOR'S NAME** : Utku CANCI

CdS is a direct wide band gap ( $\sim 2.4$  eV) II-IV family of compound semiconductors which has high optical absorption coefficient and low cost. It can, thus, be used in the fabrication of optoelectronic devices, such as n-window layer of solar cells. Also, doping CdS thin film in little quantity with hot prosses made large changes in caharacterization of CdS film such as structural, electrical and optic properties. Due to these properties CdS has recently been focus of great interest.

In this work, the electrical (d.c. and a.c.) properties of Chemical Bath Deposition (CBD) derived doped and undoped CdS films were investigated in a wide range of temperature (302 – 413 K). Optical properties of CdS were studied researched in 300–1100 nm wavelength range and under dark and under 50 – 4000 lux luminescence range. Doped and undoped films were deposited on IDT by the chemical bath deposition (CBD) method using CdS as a starting material. XRD analysis was used for investigation of the crystalline structure of the films. Direct current conductivity properties of the films were measured between voltages of -1 V and + 1V, temperature range of 302 – 413 K, under vacuum of  $3 \times 10^{-3}$  mbar, in dark. Alternating current conductivity measurements of the films were performed in the frequency range of 40 Hz – 100 KHz.

As a result of this work, it was observed that, direct current charge transport mechanism of doped and undoped CdS films prepared by chemical bath deposition, obeys Arrhenius model and a.c. conduction mechanism of the films is consistent with the prediction of Reider model. Also it was observed that the photoconductivity of the films changes by the wave length under illumination.

## TEŞEKKÜR

Tezimin planlanmasında emeği geen hocam Sayın Prof. Dr. Mehmet. Alaittin HASTAOĞLU'na, tezimin hazırlanması esnasında benden hiçbir yardımını esirgemeyen, hiçbir sorumu yanıtısz bırakmayan değerli hocam Sayın Doç. Dr. Ahmet ALTINDAL'a ve yardımlarından dolayı Yrd.Doç. Dr. Fatih DUMLUDAĞ'a çok teŗekkür ederim.

Tezi yaptığım süre boyunca hiçbir zaman desteklerini esirgemeyen manevi anlamda hep yanımda olan arkadaşlarım Onur MATUR, Nesrin ATMACA, Filiz KAYADİBİ, Gülay GÜNDAY, Sevilay UÇAR ve Dođan AKCAN'a teŗekkür ederim.

Maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teŗekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER DİZİNİ

|                                                        | <b><u>SAYFA</u></b> |
|--------------------------------------------------------|---------------------|
| ÖZET                                                   | iv                  |
| SUMMARY                                                | v                   |
| TEŞEKKÜR                                               | vi                  |
| İÇİNDEKİLER DİZİNİ                                     | vii                 |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ                         | ix                  |
| ŞEKİLLER DİZİNİ                                        | xi                  |
| 1. GİRİŞ                                               | 1                   |
| 2. GENEL BİLGİLER                                      | 4                   |
| 2.1 Kimyasal Banyo Yığma Metodu (CBD)                  | 4                   |
| 2.2 CdS'ün Kristal Yapısı                              | 5                   |
| 2.3 Doğru Akım (D.C.) İletkenlik Mekanizması           | 8                   |
| 2.3.1 Tünelleme Model                                  | 9                   |
| 2.4 Alternatif Akım (A.C.) İletim Mekanizmaları        | 11                  |
| 2.5 Fotoiletkenlik                                     | 15                  |
| 2.5.1 Fotoiletkenlik Mekanizması                       | 16                  |
| 2.5.2 Katkılı Fotoiletkenlerin Kinetiği                | 19                  |
| 2.5.3 Katkısız Fotoiletkenlerin Kinetiği               | 20                  |
| 2.5.4 Kadmiyum Sülfürde Fotoiletkenlik                 | 22                  |
| 2.6 X-Işınları Difraksiyonu                            | 24                  |
| 3. DENEYSEL KISIM                                      | 27                  |
| 3.1 Katkılı ve Katkısız CdS ince filmlerin büyütülmesi | 27                  |
| 3.2 İnterdijital Elektrot (IDT) Yapısının Hazırlanması | 29                  |
| 3.2.1 Taban Malzemesinin Seçilmesi ve Temizlenmesi     | 29                  |
| 3.2.2 Metal Kaplama İşlemi                             | 29                  |
| 3.2.3 Fotorezist Kaplama                               | 31                  |

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| 3.2.4 Pozlama ve Banyo                                  | 31 |
| 3.2.5 Metal Aşındırma                                   | 32 |
| 3.3 Filmlerin A.C. ve D.C. Elektriksel Özellikleri      | 32 |
| 3.4 Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi         | 33 |
| 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN BULGULAR          | 35 |
| 4.1 Yapısal Analizlerden Elde Edilen Bulgular           | 35 |
| 4.2 D.C. Ölçümlerden Elde Edilen Bulgular               | 37 |
| 4.2.1 Katkısız CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları   | 37 |
| 4.2.2 Pb Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları | 39 |
| 4.2.3 Zn Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları | 41 |
| 4.2.4 Se Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları | 42 |
| 4.2.5 In Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları | 44 |
| 4.3 A.C. Ölçümlerden Elde Edilen Bulgular               | 45 |
| 4.3.1 Katkısız CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları   | 45 |
| 4.3.2 Pb Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları | 49 |
| 4.3.3 Zn Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları | 53 |
| 4.3.4 Se Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları | 55 |
| 4.3.5 In Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları | 58 |
| 4.4 Fotoiletkenlik Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular   | 62 |
| 4.4.1 Aydınlanma Şiddetine Bağlı Ölçüm Bulguları        | 62 |
| 4.4.2 Dalga Boyuna Bağlı Ölçüm Bulguları                | 64 |
| 5. TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRMELER                         | 67 |
| KAYNAKLAR                                               | 70 |
| ÖZGEÇMİŞ                                                | 73 |

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| <u>Simgeler</u> | <u>Açıklama</u>                                                       |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $A$             | Kesit alan                                                            |
| $C$             | Kapasitans                                                            |
| CBD             | Chemical bath deposition (kimyasal banyo yığma) hareketliliği         |
| CBH             | İlişkilendirilmiş Engel Hoplama                                       |
| CPE             | Sabit faz elemanı                                                     |
| $E_0$           | Donor seviyeleri ile minimum iletim bandı arasındaki enerji farkı     |
| $E_0'$          | Akseptör seviyeleri ile maksimum valans bandı arasındaki enerji farkı |
| $E_A$           | Aktivasyon enerjisi                                                   |
| $E_F$           | Fermi enerjisi                                                        |
| $E_g$           | Yasak enerji aralığı                                                  |
| $F$             | Alan şiddeti                                                          |
| $G$             | Kazanç                                                                |
| $g(E_F)$        | Fermi yüzeyindeki durum yoğunluğu                                     |
| $g_k$           | Karanlık iletkenliği                                                  |
| $h$             | Elektrot kalınlığı                                                    |
| $I$             | Akım                                                                  |
| IDT             | İnter Dijital Transduser                                              |
| $k_B$           | Boltzman sabiti                                                       |
| $l$             | Elektrotların örtüşme uzunluğu                                        |
| $L$             | Malzemenin uzunluğu                                                   |
| $m^*$           | Elektronun etkin kütlesi                                              |
| $n$             | Elektrot çifti sayısı                                                 |
| $n_0$           | Denge durumundaki elektron konsantrasyonu                             |
| $N_d$           | Donor yoğunluğu                                                       |
| $N_t$           | Merkezlerin yoğunluğu                                                 |
| $P_0$           | Denge durumundaki boşluk konsantrasyonu                               |
| $Q$             | Elektron boşluk çifti sayısı                                          |
| QMT             | Kuantum Mekaniksel Tünelleme                                          |
| $r$             | Hoplama uzaklığı hızı                                                 |

|            |                                                  |
|------------|--------------------------------------------------|
| $R$        | Yüzeyin güç yansıtma katsayısı                   |
| $r_0$      | Polaron yarıçapı                                 |
| $R_s$      | Empedansın gerçel kısmı                          |
| $V$        | Voltaj                                           |
| $X$        | Empedansın sanal kısmı                           |
| XRD        | X-Işını Spektroskopisi                           |
| $Z$        | Empedans                                         |
| $\lambda$  | Dalga boyu                                       |
| $\Delta_0$ | Siteler arasındaki enerji farkı                  |
| $v_F$      | Fermi hızı                                       |
| $\eta$     | Kuantum verimi                                   |
| $\mu$      | Elektronların hareketliliği                      |
| $\sigma$   | İletkenlik                                       |
| $\tau$     | Durulma zamanı                                   |
| $\tau_F$   | Fermi yüzeyindeki bir elektronun çarpışma süresi |
| $v$        | Taşıyıcıların ısı hızı                           |
| $\omega$   | Açısal frekans                                   |

## ŞEKİLLER DİZİNİ

| <u>Şekil</u>                                                                                                | <u>Sayfa</u> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 2.1.Kimyasal banyo yığma metodunun, Chemical Bath Deposition blok diyagramı                                 | 5            |
| 2.2. CdS bileşiğinin bant aralığı                                                                           | 6            |
| 2.3. CdS bileşiğinin hegzagonal kristal yapısı                                                              | 7            |
| 2.4.CdS bileşiğinin kübik kristal yapısı                                                                    | 7            |
| 2.5. Eley tarafından önerilen tünelleme modeli                                                              | 9            |
| 2.6. Yarıiletkenlerde elektronun geçişi                                                                     | 16           |
| 2.7. CdS yarıiletkeninde enerji seviyeleri diyagramı                                                        | 22           |
| 2.8. CdS’ de fotoakımın ışık şiddetine bağlılığı                                                            | 24           |
| 2.9. X-ışını kırınımıyla kristal yapısının belirlenmesi                                                     | 25           |
| 3.1. Interdijital elektrotların eldesindeki işlem basamakları                                               | 30           |
| 3.2. Filmlerin a.c. ve d.c. elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzenek          | 33           |
| 3.3. Filmlerin dalga boyuna bağlı fotoiletkenlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzenek | 34           |
| 4.1a.Tavlanmamış katkısız CdS filmin XRD spektroskopisi                                                     | 36           |
| 4.1b.Tavlanmış katkısız CdS filmin XRD spektroskopisi                                                       | 36           |
| 4.2. Katkısız CdS filmin 302 K ve 413 K’de ölçülen I-V karakteristikleri                                    | 38           |
| 4.3. Katkısız CdS filmde d.c. İletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi                                    | 39           |
| 4.4. Pb katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığı ve 326 K’de ölçülen I-V karakteristiği                        | 40           |
| 4.5. Pb katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi                             | 41           |
| 4.6. Zn katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığı ve 413 K’de ölçülen I-V karakteristiği                        | 42           |
| 4.7. Se katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi                             | 43           |

|                                                                                                                  |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.8. In katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi                                  | 44 |
| 4.9. Katkısız CdS filmde frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı                                         | 46 |
| 4.10. Katkısız CdS filmde 10, 50, 80 ve 100 kHz sabit frekanslarında ölçülen iletkenliklerin sıcaklıkla değişimi | 47 |
| 4.11. Katkısız CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği                                               | 48 |
| 4.12. Katkısız CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda kapasite değerleri                                                | 49 |
| 4.13. Pb katkılı CdS ince filminin frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı                               | 50 |
| 4.14. Pb katkılı CdS'de $s(T)$ parametresinin sıcaklıkla değişimi                                                | 51 |
| 4.15. Pb katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ölçülen empedans değerlerinin frekansa bağlılığı                | 52 |
| 4.16. Zn katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği                                             | 54 |
| 4.17. Zn katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ölçülen empedans değerlerinin frekansa bağlılığı                | 55 |
| 4.18. Se katkılı CdS'ün gösterilen frekanslardaki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi                          | 56 |
| 4.19. Se katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklardaki kapasite değerleri                                            | 57 |
| 4.20. Se katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği                                             | 58 |
| 4.21. In katkılı CdS ince filminin frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı                               | 59 |
| 4.22. In katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği                                             | 59 |
| 4.23. In katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda frekansın fonksiyonu olarak ölçülen kapasite değerleri          | 60 |
| 4.24. 40 ve 100 kHz sabit frekanslarında ölçülen iletkenliklerin katkı türüne göre sıcaklıkla değişimi           | 61 |
| 4.25. Katkısız CdS filmin farklı aydınlanma şiddetlerindeki I-V karakteristiği                                   | 63 |
| 4.26. Pb katkılı CdS filmin farklı aydınlanma şiddetlerindeki I-V karakteristiği                                 | 63 |
| 4.27. Katkısız CdS ince filminin dalga boyuna bağlı iletkenlik grafiği                                           | 65 |
| 4.28. Zn katkılı CdS ince filmin dalga boyuna bağlı iletkenliği                                                  | 66 |

# 1. GİRİŞ

Yarıiletken ince filmler birçok elektronik ve optoelektronik devre elemanlarının tabanı olarak oldukça geniş bir alanda uygulama bulmaktadır. Bu yarıiletkenler arasında II-VI bileşik yarıiletkenler özel bir yere sahiptir. CdS'ün uzun ömürlü ve oldukça kararlı olması ve gerek elektriksel gerekse optiksel ve manyetik özelliklerinin katkılama ile büyük oranda değiştirilebilmesi gibi nedenlerden dolayı üzerinde en çok çalışılan II-VI bileşik yarıiletkenlerdir [Badera et al. 2008]. Bugün CdS ince filmler dalga klavuzlarından [Agarwal et al, 2005] mantık kapılarına [Ma et al. 2007], güneş pillerinden [Rawichhandran and Philominathan, 2008; Albor-Aguilera et al, 2009] termoelektronik [Mohanchandra and Uchil, 1997] ve ince film alan etkili transistörlere [Schön and Batlog, 2001] kadar oldukça geniş bir alanda kullanılmaktadır.

Güneş pili uygulamalarında kullanılan CdS ince filmlerden beklenen en önemli özelliklerden bazıları, taşıyıcı yoğunluğunun  $10^{16}$  taşıyıcı/cm<sup>3</sup> mertebesinde olması, geçirgenlik katsayısının yüksek olması, taşıyıcı birleşme oranının düşük olması ve birlikte kullanılacağı diğer malzemelere uyumlu olması sayılabilir. CdS ince filmlerin gerek elektriksel, gerek optik ve gerekse yapısal özellikleri birincil olarak, filmlerin hazırlanma koşullarına ve yöntemine bağlıdır. CdS ince filmlerin oluşturulmasında moleküler demet epitaksi [Ozanyan et al. 1996], metal organik kimyasal buharlaştırma [Chou and Rohatgi, 1994], ısı buharlaştırma [Iacomini et al. 2007] ve fiziksel buhar yığılma [Birkmire et al. 1992] gibi yöntemler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemlerle oldukça kaliteli CdS filmlerin elde edilebilmesine rağmen bu yöntemlerin hemen hepsi oldukça pahalı sistemleri ve özel çalışma koşulları gerektirmektedir. Bunun dışında özellikle geniş yüzeylerin CdS ile kaplanmak istenmesi durumunda bu yöntemler elverişli değildir. Bunlar arasında CBD tekniği ucuz, basit ve geniş alanlarda uygulanabiliyor olmasından dolayı tercih edilen ve en yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

CdS ince filmlerin CBD yöntemi ile büyütülmesi sulu bir çözelti içerisinde Cd<sup>2+</sup> ve S<sup>2-</sup> iyonlarının kontrollü bir şekilde serbest hale geçirilmesi ve daha sonra bu

iyonların, sulu çözelti içerisine daldırılan taşıyıcı (substrate) üzerine uygun bir şekilde yığılması esasına dayanır. Bu şekilde elde edilen CdS ince filmlerin yapısal ve optik özelliklerinin kullanılan Cd kaynağının özelliklerine çok bağlı olduğu görülmüştür [Khallaf et al. 2008].

Optik uygulamalar için CdS ince filmler elde etmek amacıyla şimdiye kadar Cd kaynağı olarak Kadmiyum Sulfat [Dona and Herrero, 1992; Metin ve Esen, 2003], Kadmiyum Asetat [Oladeji and Chow, 1997; Kaur et al. 1980], Kadmiyum Nitrat [Nagao and Watanable, 1968; Nakanishi, 1994] gibi kadmiyum kaynakları yaygın olarak kullanılmıştır. Ancak Cd kaynağı olarak Kadmiyum Klorür'ün kullanıldığı çalışma sayısı oldukça sınırlıdır.

Bunun dışında, fotovoltaiik uygulamalar için uygun özellikteki CdS ince filmlerin elde edilmesi amacıyla oldukça farklı yöntemler kullanılmasına rağmen elde edilen filmlerin, karakterizasyonlarının yapılarak, optimum çalışma koşullarının belirlenmesi konusunda ciddi bir eksiklik olduğu görülmektedir. Oysa aktif malzemesi CdS'den oluşan bir aygıtın yüksek verimle çalışabilmesi, hazırlanan CdS ince filmlerin, elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesine büyük oranda bağlıdır. Bu nedenle CdS filmleri gerek potansiyel uygulama alanlarının belirlenmesi gerekse aranan malzeme olup olmadığının söylenebilmesinin tek koşulu, CdS filmlerin, uygulanan bir zamandan bağımsız doğru akım (d.c.) ve zamana bağlı alternatif akım (a.c.) olan elektrik alan altındaki davranışının belirlenmesidir. Filmlerin zamandan bağımsız elektrik alan altındaki davranışların belirlenmesinde, bir elektrot yapısı üzerine hazırlanan ince filmlerin sıcaklık, aydınlanma şiddeti ve benzeri dış etkilerin fonksiyonu olarak akım gerilim karakteristiklerinin ölçülmesi esasına dayanır. Filmlerin zamanla değişen bir elektrik alan altındaki davranışının (a.c.) belirlenmesinde ise yaygın olarak kullanılan teknik, empedans spektroskopisi yöntemidir. Bu yöntem uygulanan elektrik alanın frekansa bağlı olarak iletkenlik, kapasite, empedans gibi büyüklüklerin yine farklı sıcaklık ve aydınlatma koşullarında ölçülmesi esasına dayanır. Bu yöntemle yük iletim mekanizması, kimyasal reaksiyon mekanizması, dipol davranışları ve dielektrik sabiti hakkında bilgi edinmek mümkündür [Jose et al. 1996].

Bu yüksek lisans tez çalışmasında, başlangıç maddesi olarak  $\text{CdCl}_2$  kullanmak suretiyle katkılı (Se, Pb, In ve Zn) ve katkısız CdS ince filmler hazırlanmıştır. Filmler, kimyasal banyo yığma metoduyla, inter dijital transduserler üzerine hazırlanmıştır. Hazırlanan bu filmlerin öncelikli olarak yapısal analizlerini yapabilmek için XRD ölçümleri yapılmış, elektriksel iletim mekanizmalarını anlamak için a.c. ve d.c. elektriksel ölçümleri yapılmış ve optik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla da farklı dalga boylarında ve farklı aydınlanma şiddetlerinde fotoiletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Filmlerin doğru akım iletkenlik özellikleri,  $\pm 1$  V voltaj aralığında 50 mV'luk artışlarla sıcaklığa bağlı olarak (katkısız ve katkılı filmler için 302-413 K),  $3 \times 10^{-3}$  mbar vakum ortamında, karanlıkta ölçülmüştür. Filmlerin alternatif akım iletkenliği de aynı koşullarda 40 Hz ile 100 kHz aralığında gerçekleştirilmiştir. Optik özellikleri, 300-1100 nm aralığındaki dalga boylarında, karanlık ve 50-4000 lüks aydınlanma şiddeti aralığında incelenmiştir. Yapılan bu ölçümlerle oluşan bulgular sonucunda hazırlamış olduğumuz katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin d.c. elektrik iletim mekanizmasının ısı uyarılmış taşıyıcılar tarafından sağlandığı, a.c. elektrik iletim mekanizmasının Reider modeline uyduğu belirlenmiştir. Aynı zamanda yapılmış olan fotoiletkenlik ölçümlerinden Pb katkılamanın CdS filmi 300 nm ile 1100 nm dalga boyu arasındaki ışığa duyarsız hale getirdiği görülmüştür. CdS ince filmlerin ışık duyarlıklarının katkı malzemesinin türüne bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. In katkılamanın karanlık akımında 65 kat, Se katkılamanın 180 kat Zn katkılamanın ise 2100 kat değişim oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca filmlerin 300 lüks, 1000 lüks, 2100 lüks ve 4000 lüks aydınlanma şiddeti altındaki I-V karakteristikleri ölçülmüştür. Bu ölçümlerde Pb katkılı CdS dışındaki filmlerde I-V karakteristiklerinin eğiminin artan aydınlanma şiddeti ile arttığı görülmüştür.

## 2. GENEL BİLGİLER

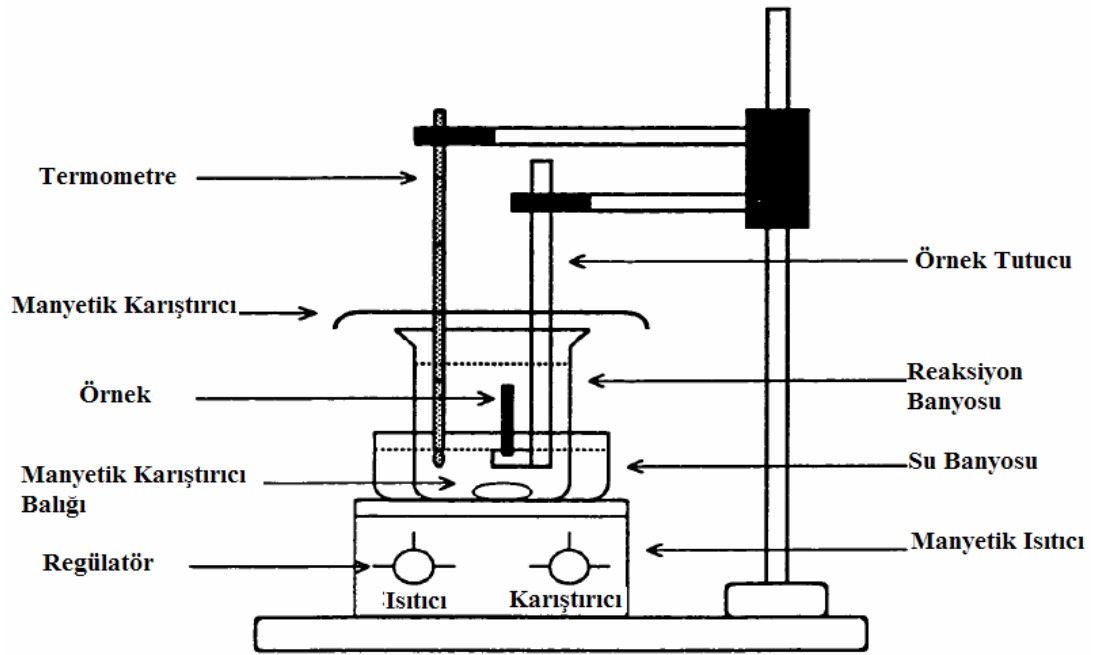
Bu bölümde, CdS'ün kristal yapısı ile katkılı, katkısız CdS filmlerde gözlenen yük iletim mekanizmaları, optik (fotoiletkenlik) ve kimyasal banyo yığma yöntemi (CBD), hakkında bilgi verilecektir.

### 2.1 Kimyasal Banyo Yığma Metodu (CBD)

Bu çalışmada kullandığımız Kimyasal Banyo Yığma (CBD) metodu, blok diyagram olarak Şekil 2.1' de verilmiştir. Bu sistem esas olarak, bir ısıtıcı magnetik karıştırıcı, bir su banyosu, magnetik karıştırıcı balığı, bir reaksiyon banyosu, alttaş ve alttaş tutucusu, bir sıcaklık ölçeri ve bir de pH metreden oluşmaktadır. Kaplaması yapılacak çözeltinin sıcaklığı hot-plate'in sıcaklık ayarlama düğmesi kullanılarak ayarlanacaktır.

Kimyasal Banyo Yığma Yöntemi, çözeltideki filmi oluşturacak iyonların reaksiyonunun yavaşlatılması esasına dayanmaktadır. Temizlenmiş cam alt tabanlar, hazırlanmış çözelti içerisinde belirli bir zaman daldırılarak camın yüzeyinde ince filmler oluşturulur. İnce filmi hazırlamak için kullanılan teknikler (Isıl Buharlaştırma, Metal Organik Kimyasal Buharlaştırma, Kimyasal Püskürtme, Elektro Depolama ve Moleküler Demet Epitaksi vb.) arasında Kimyasal Banyo Yığma Yöntemi (CBD) maliyeti en ucuz ve en basit olan bir yöntemdir

Chemical Bath Deposition sisteminde film kalitesine ve filmin kalınlığına etki eden parametreleri sırasıyla, çözeltinin pH değeri, sıcaklığı ve reaksiyon zamanı, çözücü konsantrasyonu, kullanılan katalizörlerin yapısı ve konsantrasyonu, tavlama sıcaklığı ve süresi, kurutma ve kurutma atmosferi gibi sıralayabiliriz.



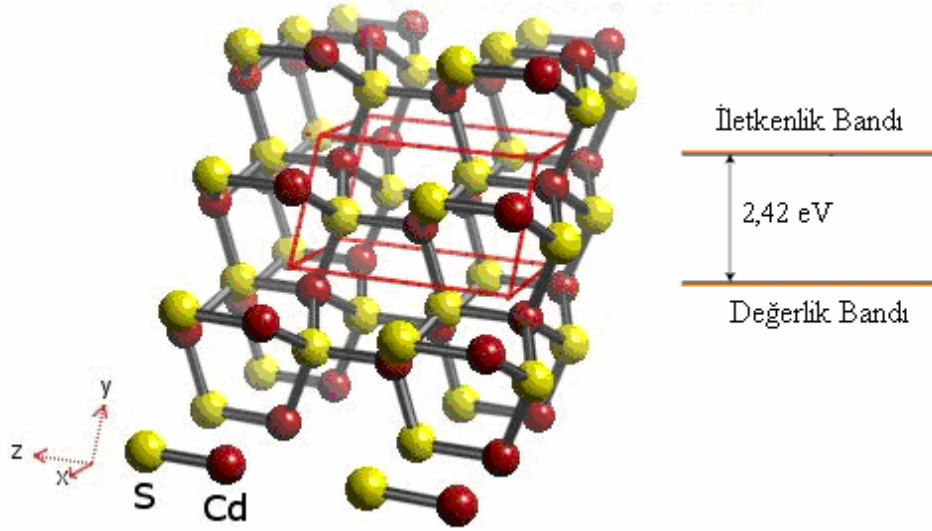
Şekil 2.1. Kimyasal banyo yığma metodunun blok diyagramı

## 2.2 CdS'ün Kristal Yapısı

CdS yarıiletken malzeme olarak fotovoltaiik uygulamalarda son 50 yıldır araştırılan en önemli malzemelerden biridir. CdS ilk olarak 1950'lerde %6 verimlilikle  $\text{Cu}_x/\text{CdS}$  heteroeklemli ince filmlerde incelenmiştir. II. grup elementleri ile VI. grup elementlerinden oluşan II-VI bileşik yarıiletkenlerinden olan CdS, kübik ve hegzagonal yapıda olabileceği gibi yapısında her iki türü de bulundurabilen bileşiklerdendir [Enriquez and Mathew, 2003]. Doğrudan bant geçişli ve n tipi fotoiletken yarıiletken malzeme olup hazırlanan ince filmlerinde optik geçirgenlik kayıplarından kaçınılabilen elektromagnetik spektrumun görünür bölgesinde yer alan dalga boyunun oda sıcaklığında 2,42 eV olan yasak enerji aralığına karşılık geldiği ve seçilen malzemeye göre düşük ya da yüksek öz dirençleri ve elektriksel iletkenlikleri nedeniyle dar bant aralığı ile iletim ve valans bandları ile taşıyıcı uyumluluğunun yanı sıra yüksek absorbsiyon katsayısına ve kolay ohmik kontak yapısına sahip, CdTe (1,45 eV), InP (1,35 eV),  $\text{Cu}_2\text{S}$  (1,2 eV) ve  $\text{CuInSe}_2$  (1,01 eV) gibi yarıiletkenlerle üretilen heteroeklem

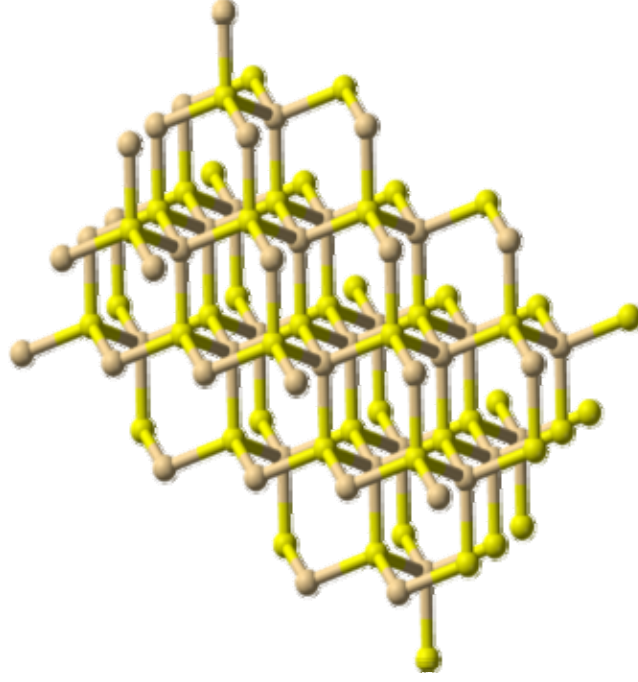
güneş pilleri için düşük maliyetli ve ışığa duyarlı polikristal pencere materyalidir [Özkan, 2007].

Kadmium sülfid, hegzagonal ( $a = b \neq c; \alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$ ), kübik ( $a = b = c; \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ) eksen ve açılarına sahip iki kristal yapıda bulunur.

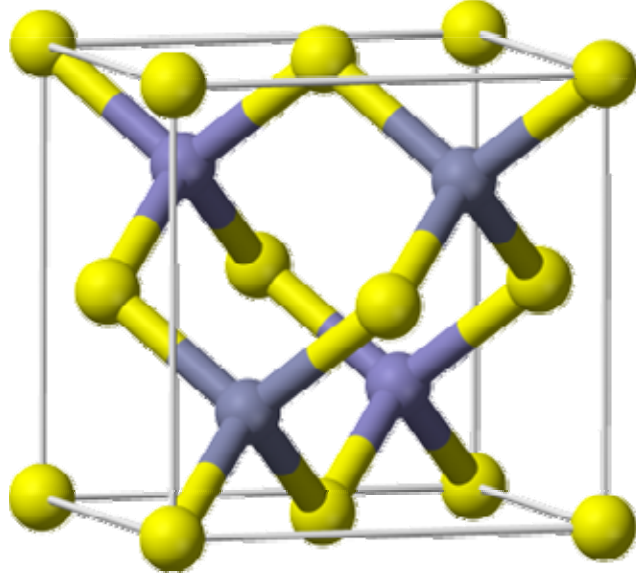


Şekil 2.2. CdS bileşiğinin bant aralığı [<http://en.wikipedia.org/wiki/CdS>]

Elde edilen filmlerin kompozisyonu kullanılan çözeltideki Cd oranına ve tuzların konsantrasyonuna bağlıdır. CdS filmlerinin elde edilmesinde farklı teknikler kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları; Isısal buharlaştırma "Thermal Evaporation-EP", Kimyasal Çöktürme "Chemical Bath Deposition-CBD", Epitaksiyel "Molecular Beam



Şekil 2.3. CdS bileşiğinin hegzagonal kristal yapısı [<http://en.wikipedia.org>]



Şekil 2.4. CdS bileşiğinin kübik kristal yapısı [<http://en.wikipedia.org/wiki/CdS>]

Epitaxiel-MBE", Kimyasal Püskürtme "Spray Pyrolyses-SP", Kimyasal Vakum Altında Çöktürme "Electrochemical Deposition-ECD", "rf-sputtering" olup bu filmlerin üretilmesinde bilinen bazı yöntemlere bağlı olarak Sinterleme ile Ekrana Baskı "Screen Printing with Sintering-SPWS" da farklı bir yöntem olarak düzlemsel

ya da ohmik kontaklı veya her iki tür kontaklı materyal üretmek için uygundur [Enriquez and Mathew, 2003; Abou-Ras et al. 2005] .

## 2.3 Doğru Akım (D.C.) İletkenlik Mekanizması

Serbest elektron modeline göre doğru akım (d.c.) iletkenliği  $\sigma_{d.c.}$ ,

$$\sigma_{dc} = \frac{ne^2\tau_F}{m^*} \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir [Kao and Huang, 1981]. Bant modeline göre ise (d.c.) iletkenliği

$$\sigma_{dc} = \frac{1}{3}e^2v_F\tau_Fg(E_F) \quad (2.2)$$

ile ifade edilir [Kao and Huang, 1981]. Bu ifadelerde,  $n$  iletim elektronlarının konsantrasyonu,  $\tau_F$  Fermi yüzeyindeki bir elektron için ortalama iki çarpışma arasında geçen serbest süre,  $m^*$  elektronun etkin kütlesi,  $v_F$  Fermi hızı,  $g(E_F)$  de Fermi yüzeyindeki durum yoğunluğudur. Denklem (2.1) ile Denklem (2.2) karşılaştırıldığında iletkenlik, serbest elektron modelinde serbest elektron konsantrasyonu ile, bant modelinde ise durum yoğunluğu  $g(E_F)$  ile belirlenir. Gerçekte, serbest elektron modelinin gösterdiği iletkenlik ifadesi (Denklem (2.1)) bant teorisinin özel bir durumudur.

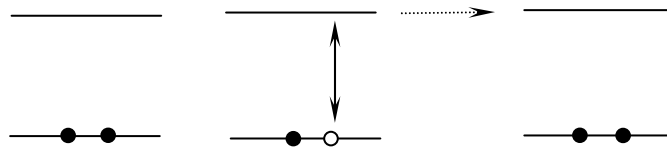
Tek elektron yaklaşımı olarak bilinen bant modelinin gösterdiği iletkenlik ifadesi, periyodik potansiyelde bulunan bir elektron ve elektron-örgü etkileşmelerinin küçük bir pertürbasyonu olarak alınabilen varsayımlardan elde edilir. Bu varsayımlar taşıyıcı hareketliliğinin  $100 \text{ cm}^2/\text{V.s'}$  den daha büyük olduğu durumlarda geçerlidir [Kao and Huang, 1981]. Oysa taşıyıcı hareketliliğinin  $100 \text{ cm}^2/\text{V.s'}$  den daha küçük olduğu ve yük taşıyıcılarının ortalama serbest yolunun ısı elektronların dalga boyundan daha küçük olduğu durumlarda elektron örgü etkileşmeleri çok kuvvetlidir.

Çoğu organik yarı iletkenlerde taşıyıcı hareketliliği çok küçüktür. Bu elektron-örgü etkileşmelerinin küçük bir pertürbasyonu olarak alınamadığı için bant modeli

kabullünün geçersiz sayılmasına neden olur. Yani, bant modeli yük hareketliliğinin  $100 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ' den daha büyük olduğu durumlarda uygulanabilir. Bu durumda, serbest taşıyıcıların ortalama serbest yolları örgü sabitinden büyüktür ve elektron belirli bir molekül civarında “yerelleşmiş bir elektron” değildir. Taşıyıcı hareketliliğinin  $100 \text{ cm}^2/\text{V.s}$ ' den daha küçük olduğu malzemelerde yük taşıyıcıları, farklı etkilerden dolayı örgünün belirli bir sitesine yerleşir ve bu tür malzemelerde elektriksel iletim tünelleme veya hoplama mekanizmalarından birisi ile gerçekleşir.

### 2.3.1 Tünelleme Model

İlk defa Eley [Gutmann and Lyons, 1967] tarafından öne sürülen tünelleme mekanizması kuantum mekaniksel bir işlemdir ve iki aşamada gerçekleştiği varsayılır. Birinci aşamaya göre; başlangıçta taban durumunda bulunan, bir molekülüne ait iki elektron tarafından işgal edilmiş olan bir orbital örneğin  $N/2$ 'inci orbital, bir boşluk ve  $(N/2 + 1)$ 'in  $\pi$  orbitalinde bir elektron oluşturmak için molekülün ısı veya ışık kullanılarak uyarılmasıdır. İkincisi de molekülün uyarılma sonucu  $(N/2 + 1)$ 'inci  $\pi$  orbitalin de oluşan bu elektronun birinci aşamada anlatılan molekülünün komşusu olan moleküldeki aynı orbitale, moleküller arasındaki potansiyel engelinden tünelleme ile geçmesidir. Bu aşamalar Şekil 2.5' de gösterilmiştir.



**Şekil 2.5.** Eley tarafından önerilen tünelleme modeli [Gutmann and Lyons, 1967]

Başlangıçta taban durumuna bulunan bir elektron  $\Delta E$  kadar enerji alarak bulunduğu orbitalde bir boşluk bırakarak  $(N/2 + 1)$ 'inci uyarılmış seviyesine çıkar ve oradan tünelleme yaparak komşu moleküle geçer. Bu modelde uyarılmış elektronun spini dikkate alınmaz. Bir molekülün uyarılmış hali singlet veya triplet olabilir ve enerji spine bağlıdır. Ayrıca bu modelde tünelleme esnasında enerjinin korunduğu kabul edilir. Bant modelinde moleküller arasındaki potansiyel engelin açık tanımlı

bir ifadesi olmadığından kristal dalga fonksiyonu tek tek moleküllerin dalga fonksiyonundan oluşturulur. Bununla beraber uyarılmış bir elektronun birkaç moleküler uzaklığa kadar tünelleme yoluyla gidebileceği kabul edilir. Bu bakımdan, potansiyelin tüm kristal boyunca periyodik olarak değişmesi ve potansiyel engelinin genişliğinin  $10 \text{ \AA}$  ' den daha küçük olması durumunda tünelleme modeli bant modeli olarak düşünülebilir [Kao and Huang, 1981].

Bir reaksiyonun olabilmesi için reaksiyona giren atomların, moleküllerin veya iyonların birbirleriyle çarpışmaları ve ayrıca çarpışan taneciklerin belli bir enerjiye sahip olmaları gerekir. Dolayısıyla bir reaksiyonun hızı derişime, sıcaklığa ve basınca bağlıdır. Arrhenius' a göre her molekül çarpışınca reaksiyon vermez, ancak minimum enerjisi aktivasyon enerjisine ( $E_A$ ) eşit olan moleküller çarpışınca reaksiyon verebilirler. Reaksiyon için gerekli aktivasyon enerjisine sahip moleküllerin sayısı da sıcaklıkla artar.

d.c. iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi lineer ise Arrhenius tipi davranış gösterir. Bu davranışı gösteren bir numunenin elektriksel iletkenliği

$$\sigma_{dc} = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_A}{k_B T}\right) \quad (2.3)$$

ile verilmektedir. Burada  $E_A$  aktivasyon enerjisi,  $\sigma_0$  pre-eksponansiyel faktör,  $k_B$  Boltzman sabiti ve  $T$  (K) sıcaklıktır [Bilen ve ark.2005] .

## 2.4 Alternatif Akım (A.C.) İletim Mekanizmaları

Eğer, a.c. ve d.c. iletkenlik birbirinden bağımsız mekanizmalar sayesinde gerçekleşiyorsa toplam iletkenliği,

$$\sigma_T(\omega, T) = \sigma(0, T) + \sigma(\omega, T) \quad (2.4)$$

şeklinde yazılabilir. Burada  $\sigma(0, T)$  d.c. iletkenlik ve  $\sigma(\omega, T)$  ise a.c. iletkenliktir. Kovalent veya iyonik bağlı düzensiz (amorf) katı, moleküler katılar gibi oldukça çeşitli bir malzeme grubu için, iletkenliğin frekansa bağlılığı,

$$\sigma(\omega, T) = A(T)\omega^{s(T)} \quad (2.5)$$

şeklindedir. Burada  $\omega$  açısal frekans,  $A$  ve  $s$  ise sıcaklığa bağlı parametrelerdir. İletkenliğin frekansa bu şekildeki bağlılığını açıklamak için Kuantum mekaniksel tünelleme (QMT), ilişkilendirilmiş engel hoplama (CBH) veya büyük polaron tünellemesi gibi birçok model geliştirilmiştir [Altındal ve ark. 2005] .

Kuantum mekaniksel tünelleme modeli, sıcaklıkla doğrusal olarak değişen bir iletkenlik ve sıcaklıktan bağımsız  $s$  parametresini önerir. Bu model frekansın üssü olan  $s$  parametresinin değerinin,

$$s = 1 + \frac{4}{\ln(\omega\tau_0)} \quad (2.6)$$

ifadesi ile verilebileceğini ve değerinin sıcaklıktan bağımsız olması gerektiğini söyler. Burada  $\omega$  açısal frekans ve  $\tau_0$  taşıyıcıların karakteristik durulma zamanını gösterir. QMT modeli, elektronların fonon katkılı tünellenmesi esasına dayanır ve frekansın üssü olan  $s$  parametresinin sabit ve 0.8' e eşit olması gerektiğini söyler.

İletkenliğin frekansa bağıllığını açıklamak için geliştirilen diğer bir model de bağlaşımlı engel hoplama (CBH) modelidir. Bu model Elliott [Elliott, 1971] tarafından geliştirilmiştir ve iletkenliğin, yük taşıyıcılarının iki siteyi ayıran engelden hoplaması sayesinde gerçekleştiğini varsayar. Bu model 1. dereceden yaklaşımla a.c. iletkenliğin,

$$\sigma(\omega, T) = \frac{\pi^2 N^2 \varepsilon}{24} \left( \frac{8q^2}{\varepsilon W_{OB}} \right)^6 \frac{\omega^s}{\tau_0^\beta} \quad (2.7)$$

şeklinde ifade edilebileceğini öngörür. Bu modelde frekansın üssü olan  $s$  parametresi ise,

$$s = 1 - \beta = 1 - \frac{6k_B T}{W_{OB}} \quad (2.8)$$

ifadesi ile verilir. Burada  $\varepsilon$  dielektrik sabiti,  $W_{OB}$  optik bant aralığı,  $\tau_0$  karakteristik durulma zamanı,  $q$  elektron yükü,  $k_B$  Boltzman sabiti ve  $N$  kusur durumlarının yoğunluğunu ifade eder. Sıcaklığa bağlı a.c. iletkenlik farklı bir olarak,

$$\sigma(\omega, T) = ab^{T/Q} \quad (2.9)$$

şeklinde yeniden yazılır. Burada  $b = 1/\omega\tau_0$ ,  $a$  sıcaklıktan bağımsız diğer parametreleri ve  $Q = W_{OB} / 6k_B$  ifadeleri anlamına gelir.

Denklem  $\sigma(\omega, T) = ab^{T/Q}$  'ye göre  $b$  ve  $Q$  sıcaklıktan bağımsız olduğunda  $T$ 'ye karşı çizilen  $\ln \sigma(\omega, T)$  grafiğinin eğimi sabit olmalıdır. CBH modeli, QMT modelinin aksine, sıcaklığa bağlı bir  $s$  parametresi öngörmektedir.

Denklem (2.9) ifadesine göre a.c. iletkenliğin sıcaklıkla doğrusal olarak artması beklenir. Ancak, çoğu durumda ölçülen a.c. iletkenliğin sıcaklığa bağıllığının incelenmesinde iletkenliğin artan sıcaklıkla doğrusal olarak artmadığı görülür.

Dolayısıyla, sadece  $s$  parametresinin sıcaklıkla değişimine bakarak iletkenliğin hangi modele uygun olarak gerçekleştiğini söylemek mümkün değildir. Aynı zamanda, sabit bir frekanstaki iletkenliğin sıcaklıkla değişimine de bakmak gerekir.

Sabit bir frekans değeri için iletkenlik artan sıcaklıkla doğrusal olarak artmıyorsa bu iletim mekanizmasının CBH modelinin öngörülerıyla uyumlu olmadığı anlamına gelir. Bu durumda, iletim mekanizmasını açıklamak için Reider [Reider, 1979], Eliot tarafından öne sürülen modeli geliştirerek, engellerin üzerinden sıçramayı esas alan hem farklı site enerjilerine, uzunluğuna hem de birbiri arasındaki uzaklığı içeren, bir sıçrama modeli önerisiyle açıklamıştır. Elliot, sadece enerjileri eşit iki site arasındaki sıçramayı göz önünde bulundurmıştır. Siteler arasındaki enerji farklılıklarını hesaba kattığımızda ( $\Delta_0$ ), a.c. iletkenlik,

$$\sigma(\omega, T) = T \tanh\left(\frac{\Delta_0}{2k_B T}\right) \frac{\omega^s}{\tau_0^\beta} \quad (2.10)$$

şekline dönüşür. Bu ifade tamamıyla Elliot'un bulmuş olduğu ifadeyle aynı sonucu vermekte fakat farklı olarak  $T \tanh\left(\frac{\Delta_0}{2k_B T}\right)$  ifadesiyle çarpılmaktadır. Böylece site enerjilerinin çeşitliliği onların modeli dâhilinde sıcaklığa bağlı iletkenlik artışını içermektedir.

Son zamanlarda, Long [Long, 1982] a.c. iletkenliğin baskın olarak polaron tünnelemesi sayesinde gerçekleştiğini öne süren bir model geliştirmiştir. Bu model büyük polaronları göz önüne alır ve bu durumda komşu sitelerinin potansiyellerinin üst üste binmesinin mümkün olabileceğini varsayar. Bu durumda, polaron sıçrama enerjisi,

$$W_H = W_{HO} \left(1 - \frac{r_0}{R_\omega}\right) \quad (2.11)$$

ile ifade edilir. Burada  $W_{HO}$  maksimum aktivasyon enerjisi,  $r_0$  polaron yarıçapı ve  $R_w$  tünelleme uzaklığıdır. Yüksek sıcaklıkla bağıntılı olarak polaron tünellemesi için durulma zamanı,

$$\tau = \tau_{op} \exp\left(\frac{W_H}{K_B T}\right) \exp(2\alpha R_w) \quad (2.12)$$

ile verilir. Burada  $\tau_{op}$  optiksel fonon frekansı mertebesine,  $\alpha$  yerleşmiş elektron dalga fonksiyonlarının asimtotik bozulum sabitini ifade etmektedir. Büyük polaron tünellemesinin örtüşmesi sebebiyle oluşan a.c. iletkenlik

$$\sigma(\omega) = \frac{\pi^4}{12} q^2 (k_B T)^2 N^2(E_F) \frac{\omega R_w^4}{2\alpha k_B T + W_{HO} r_0 / R_w^2} \quad (2.13)$$

ifadesi ile verilir. Burada,  $\alpha$  yerleşmiş uzunluğunun tersi,  $E_F$  ise Fermi seviyesi olup, frekansa bağlı hoplama uzaklığı,

$$R_w = (4a)^{-1} \left[ \ln\left(\frac{1}{\omega \tau_0}\right) - \frac{W_{HO}}{k_B T} \right] + \left\{ \ln\left[\left(\frac{1}{\omega \tau_0}\right) - \frac{W_{HO}}{k_B T}\right]^2 + 8a \frac{W_{HO} r_0}{k_B T} \right\}^{1/2} \quad (2.14)$$

ile verilir. Frekansın üssü olan  $s$  hem sıcaklığa hem de frekansa bağlıdır ve  $s$ ,

$$s = 1 - \frac{4 + 6(W_{HO} r_0' / k_B T R_w')^2}{R_w' (1 + W_{HO} r_0' / k_B T R_w'^2)^2} \quad (2.15)$$

şeklinde verilir. Burada  $R_0' = 2aR_0$  ve  $r_0' = 2ar_0$  olmak üzere sırasıyla, indirgenmiş tünelleme uzaklığı ve indirgenmiş polaron yarıçapıdır. Optimum sıçrama uzunluğu,

$$R_w'^2 + \left\{ \frac{W_0}{k_B T} + \ln(\omega \tau_0) \right\} R_w' - \frac{W_0 r_0'}{k_B T} = 0 \quad (2.16)$$

Bu modelden anlaşılacağı üzere,  $r_0$ 'ın büyük değerleri için  $s$  artan sıcaklıkla azalır.  $r_0$ 'ın küçük değerleri için  $s$ , belirli bir sıcaklıkta minimum değere düşer ve daha sonra artan sıcaklıkla artar.

## 2.5 Fotoiletkenlik

Fotoiletkenlik, ışık absorpsiyonu sonucu maddenin iletkenliğindeki değişimdir. Bir yarıiletken yeterince kısa dalga boylu bir ışık ile aydınlatıldığı zaman valans bandından iletim bandına geçişler olur ve bunun sonucunda yarıiletkenin iletkenliği artar. Bu olaya fotoiletkenlik denir. Bu olayın (fotoiletkenlik) gözlemlenmesi için gerekli olan koşul ise;

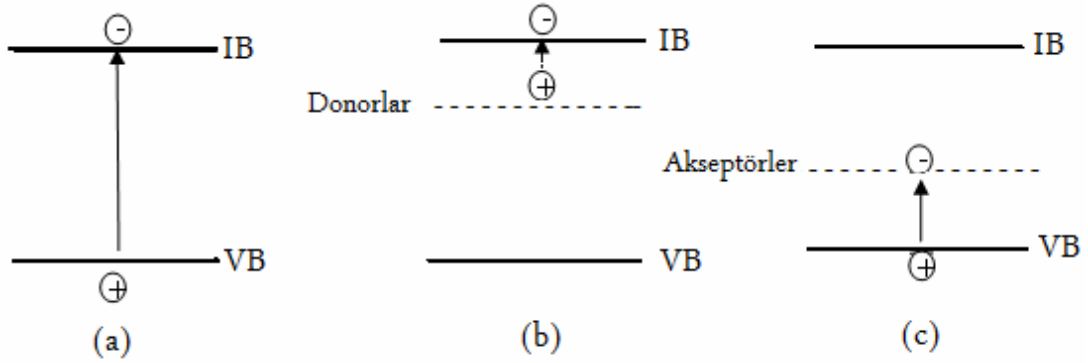
$$h\nu > E_g \quad (2.17)$$

şeklindedir. Burada  $h$  Planck sabiti,  $\nu$  gelen ışının frekansı,  $E_g$  yasak enerji aralığıdır.

Gerçekte Denklem (2.17) yalnızca doğrudan geçişler için geçerlidir. Eğer, iletim bandının minimumu ve valans bandının maksimumu aynı dalga vektörü değerinde oluşmazsa bu durumda fotoiletkenlik fonon yardımcı geçişlerle mümkün olabilir. Denklem (2.17)'nin her durumda geçerli olmadığına diğer bir açıklaması da şöyle yapılabilir; ışık absorpsiyonunda bir elektron boşluk çifti oluşur. Şayet bu elektron ve boşluğun her ikisi de serbest ise bunların her ikisi de iletkenliğe katkıda bulunur. Ancak, elektron boşluk çiftinin birleşmeye bağlı olduğu eksiton durumlarının varlığından dolayı her oluşan elektron boşluk çifti iletkenliğe katkıda bulunmaz. Bu elektron boşluk çifti titreşimlerden dolayı serbest hale geçerek iletkenliğe katkıda bulunabilir. Buraya kadar bahsedilen durumdan çıkarılacak özet şudur. Absorpsiyon sonucu serbest elektronlar ve boşluklar oluşur ve bunların her ikisi de iletkenliğe katkıda bulunur. Buna katkısız fotoiletkenlik denir [van der Ziel, 1968].

Katkılı fotoiletkenlik de ise sadece tek tip yük taşıyıcıları vardır. Şimdi, donör verici seviyelerinin bulunduğu bir yarıiletken düşünelim ve  $E_0$ , donör seviyeleri ile

iletim bandının minimumu arasındaki enerji farkı olsun. Düşük sıcaklıklarda tüm elektronlar donör seviyelere bağlıdır ve malzemenin iletkenliği küçüktür. Şayet bu malzeme enerjisi  $h\nu > eE_0$  koşulunu sağlayan bir ışıkla aydınlatılacak olursa donör seviyelerindeki elektronların iletim bandına geçişinden dolayı malzemenin iletkenliği artacaktır (Şekil 2.6b)



Şekil 2.6 Yarıiletkenlerde elektronun geçişi

Derin akseptör seviyelerinin bulunduğu bir yarıiletkende eğer  $h\nu > eE'_0$  ise ( $E'_0$  : Akseptör seviyeleri ile valans bandının maksimumu arasındaki enerji farkı olmak üzere) düşük sıcaklık durumunda fotoiletkenlik gözlemlenebilir (Şekil 2.6c)

Katkısız ve katkılı fotoiletkenlik arasındaki en önemli fark katkılı durumundan ışığın absorpsiyonu çok daha şiddetlidir. Katkılı durumda ışığın penetrasyon derinliği 1000 Angstrom civarındadır. Dolayısıyla, fotoiletkenlik yüzeye çok yakın ince bir tabaka ile sınırlıdır. Katkısız iletkenlik durumunda ise absorpsiyonu safsızlık yoğunluğu ile orantılıdır. Dolayısıyla ışığın penetrasyon derinliği çok daha fazladır.

### 2.5.1 Fotoiletkenliğin Mekanizması

Şimdi denge durumundaki elektron konsantrasyonu  $n = n_0$  ve boşluk konsantrasyonu  $p = p_0$  olan bir yarıiletken düşünelim. Şayet elektron ve boşlukların hareketliliği sırasıyla  $\mu_n$  ve  $\mu_p$  ise bu malzemenin karanlık iletkenliği  $\sigma_k$ ,

$$\sigma_k = e(n_0\mu_n + p_0\mu_p) \quad (2.18)$$

ile verilir. Öncelikle katkısız fotoiletkenliği inceleyelim. Malzemenin  $h\nu$  enerjili bir ışıqla düzgün olarak aydınlatıldığını düşünelim, şayet malzemenin üzerine düşen ışıqlın gücü  $E$ , yüzeyin güç yansıtma katsayısı  $R$  ve elektron boşluk oluşma işleminin kuantum verimi de  $\eta$  olsun. Bu durumda birim saniyede oluşan elektron boşluk çifti sayısı  $Q$

$$Q = \eta \frac{E(1-R)}{h\nu} \quad (2.19)$$

ile verilir. Bu şekilde oluşan elektron ve boşlukların ömrü sırasıyla  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  ise kararlı duruma ilave olunan elektron ve boşluk sayıları sırasıyla  $\Delta N$  ve  $\Delta P$  olabilir:

$$\Delta N = Q\tau_n \quad \Delta P = Q\tau_p \quad (2.20)$$

Genelde  $\tau_n$  ve  $\tau_p$   $Q$ 'ya dolayısıyla  $E$ 'ye bağlı olacaktır.  $\tau_n$  ve  $\tau_p$  kararlı durumdaki elektron ve boşluk ömürleridir. Yalıtkan bir fotoiletken durumunda  $\Delta N$  ve  $\Delta P$ , toplam taşıyıcı sayılarına karşılık gelirken, yarıiletken fotoiletken durumunda  $\Delta N$  ve  $\Delta P$  karanlık ortamdaki taşıyıcı sayıları  $N_0$  ( $N_0 = n_0 AL$ ) ve  $P_0$  ( $P_0 = p_0 AL$ ) ilave olunan elektron ve boşluk sayılarıdır. Burada  $A$  fotoiletken maddenin kesit alanı  $L$  de uzunluğudur. Absorbsiyon sonucu ilave olunan bu taşıyıcıların sayısı malzemenin iletkenliğini nasıl etkileyecektir? Bunu anlamak için karanlık iletkenliğe bakılır. Karanlık ortamdaki iletkenlik  $g_k$

$$g_k = \sigma_k \frac{A}{L} = e \left\{ \frac{N_0}{AL} \mu_n + \frac{P_0}{AL} \mu_p \right\} \frac{A}{L} = \frac{e(N_0\mu_n + P_0\mu_p)}{L^2} \quad (2.21)$$

ile verilir. Dolayısıyla absorpsiyon sonucu iletkenlikteki değişim  $\Delta g$

$$\Delta g = \frac{e(\Delta N\mu_n + \Delta P\mu_p)}{L^2} = \frac{eQ(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p)}{L^2} \quad (2.22)$$

olacaktır (bu, yalıtkan fotoiletkenler için malzemenin gerçek iletkenliğini ifade eder).

Genelde, hem elektronlar hem de boşluklar hareketli olduklarından her ikisi de akıma katkıda bulunur. Ancak gerek elektron ve boşlukların hareketliliğinin gerekse ömürlerinin farklı olmasından dolayı  $\mu_n \tau_n$  ve  $\mu_p \tau_p$  farklı büyüklükte olacaktır. Dolayısıyla iletkenlik artışına büyük katkı  $\mu \tau$  çarpımının büyük olduğu taşıyıcılardan gelecektir. Şayet malzemeye bir  $V$  gerilimi uygulanmışsa düşen ışıktan dolayı akımdaki değişim  $\Delta I$

$$\Delta I = V \Delta g = \frac{eV(\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p)Q}{L^2} \quad (2.23)$$

Duyarlılığı yüksek bir fotoiletken için  $\mu_n \tau_n + \mu_p \tau_p / L^2$  kısmı büyük olmalıdır. Bu ya hareketliliğin ya da kararlı durumdaki taşıyıcı ömrünün büyük olması anlamına, ya da her ikisinin de büyük olması anlamına gelir. Dolayısıyla da  $L$  'nin küçük olması gerekir. Bu özellikle, karanlık akımı düşük olan malzemeler için önemlidir.

Kararlı durum ömrü ile birlikte göz önünde bulundurulması gereken diğer iki parametre taşıyıcıların sürüklenme zamanı ve dielektrik durulma zamanıdır. Şimdi kısaca bu zaman sabitlerinin işin içerisine nasıl girdiklerine bir bakalım. Önce sürüklenme zamanı  $\tau_s$  'nin etkisine bakalım. İletkenliğe büyük katkının tek tür taşıyıcılardan geldiği  $L$  uzunluğundaki bir maddeyi göz önüne alalım. Sürüklenme zamanı  $\tau_s$

$$\tau_s = \frac{L}{\mu_s} = \frac{L}{\mu F} = \frac{L^2}{\mu V} \quad (2.24)$$

olarak tanımlanır. Burada  $\mu_s$  sürüklenme hızı,  $\mu$  hareketlilik,  $F$  alan şiddeti ve  $V$  uygulanan gerilimdir. Bu ifadenin Denklem (2.23)'nin eşdeğerinde yerine yazılmasıyla

$$I = \frac{e\mu V}{L^2} Q = eQ \frac{\tau}{\tau_s} \quad (2.25)$$

bulunur. Burada  $\tau$  taşıyıcı ömrüdür. Bu ifade, oluşturulan tüm taşıyıcıların toplanması durumunda akımın  $eQ$ 'ya eşit olacağını söyler.  $\tau/\tau_s$  oranına kazanç denir ve  $G$  ile gösterilir. Fotoiletkenlik birçok yalıtkan ve yarıiletken malzemede gözlemlenmesine rağmen bunların hepsi teknolojik önemde değildir. Teknolojik öneme sahip fotoiletkenler PbS, PbSe, PbTe, CdS ve InSb sayılabilir [van der Ziel, 1968].

### 2.5.2 Katkılı Fotoiletkenlerin Kinetiği

Derin donar seviyelerinin bulunduğu bir  $n$  tip fotoiletken alalım. Fotoiletkenlik için kinetik denklem,

$$\frac{dn}{dt} = a(N_d - n) - bn^2 + q \quad (2.26)$$

şeklinde verilir. Burada  $n$  taşıyıcıların durum yoğunluğu,  $N_d$  donör yoğunluğu,  $q$  fotoelektronların oluşum hızı  $a$  ve  $b$  de birer sabittir. Kararlı durumda karanlık akıma yukarıdaki ifadede  $q = 0$  ve  $\frac{dn}{dt} = 0$  konarak bulunur. Bu yapılara

$$a(N_d - n) - bn^2 = 0 \quad \text{veya} \quad n = n_0 = -\frac{a}{2b} + \left( \frac{a^2}{4b^2} + \frac{aN_d}{b} \right)^{1/2} \quad (2.27)$$

şayet az bir ışığın düşmesine izin verilecek olursa, elektron yoğunluğundaki artış,  $\Delta n$ , denge durumundaki yoğunluğu  $n_0$  karşılaştırıldığında küçüktür ve foto cevap doğrusaldır. Şimdi kararlı hal için denklem,

$$-a\Delta n - 2bn_0\Delta n + q = 0 \quad , \quad \Delta n = \frac{q}{a + 2bn_0} = q\tau \quad (2.28)$$

olacaktır. Görüleceği gibi cevap  $q$  ile doğrusal olarak değişmektedir ve ilave olunan taşıyıcıların kararlı hal ömrü  $1/(a + 2bn_0)$ 'dır. Şayet gönderilen ışık  $n \gg n_0$  olacak kadar şiddetli ise bu durumda kararlı hal denklemi yaklaşık olarak,

$$-bn^2 + q = 0 \quad \text{veya} \quad n = \left(\frac{q}{b}\right)^{1/2} \quad (2.29)$$

olarak yazılabilir. Bu durumda açıktır ki akım ışık şiddetinin karekökü ile değişir. Sonuç olarak katkılı fotoiletkenlik durumunda düşük ışık şiddeti için doğrusal bir cevap elde edilirken ışık şiddetinin yüksek olması durumunda doğrusal olmayan bir cevap elde edilir [van der Ziel, 1968].

### 2.5.3 Katkısız Fotoiletkenlerin Kinetiği

Bu kısımda; doğrudan yok olmuş, yok olma merkezleri vasıtasıyla yok olma ve azınlık taşıyıcılarının tuzaklanması olmak üzere üç farklı durumu göz önüne alınmalıdır. Doğrudan yok olma durumunda kinetik denklem

$$\frac{dn}{dt} = g_0 - \rho n^2 + q \quad (2.30)$$

olarak yazılır. Burada sağdaki ilk terim elektron boşluk çiftinin kendiliğinden oluşan hızı, ikinci terim elektron boşluk çiftinin yok olma hızı, son terim ise dış oluşum hızını temsil eder. Bu ifadede donör ve akseptör seviyelerinin olmadığı kabul edilmiştir. Bundan sonraki tartışma katkılı durumdakine benzer şekilde yapılabilir. Yani  $\Delta n = \Delta p \ll n_0$  ise cevap doğrusal,  $n \gg n_0$  ise cevap doğrusal değildir.  $n \gg n_0$  durumunda kendiliğinden oluşum ihmal edilir ve kararlı hal denklemi,

$$-\rho n^2 + q = 0, \quad n = \left(\frac{g}{\rho}\right)^{1/2} \quad (2.31)$$

olur ve akım şiddetinin kareköküyle değişir. Şayet yok olma yok olma merkezleri vasıtasıyla gerçekleşiyorsa kinetik denklem;

$$\frac{dn}{dt} = -vs_1(N_t - n_t)n + \nu_{01} \exp\left(-\frac{eE_1}{kT}\right)n_t + q \quad (2.32)$$

$$\frac{dp}{dt} = -vs_2n_tp + \nu_{02} \exp\left(-\frac{eE_2}{kT}\right)(N_t - n_t) + q \quad (2.33)$$

olur. Burada  $N_t$  merkezlerin yoğunluğu,  $n_t$  tuzaklanmış elektron yoğunluğu,  $v$  taşıyıcıların ısı hızı,  $s_1$  ve  $s_2$  sırasıyla merkezlerin elektron ve boşlukları yakalama tesir kesiti  $\nu_{01}$  ve  $\nu_{02}$  titreşim frekansları,  $E_1$  iletim bandı ile merkez arasındaki enerji farkı,  $E_2$  de merkez ile valans bandı arasındaki enerji farkıdır. (2.32) ve (2.33) Denklemlerindeki ısı oluşumu temsil eden terim ihmal edilecek olursa, bu denklemden kolayca çözülebilir. Bu yapılara kararlı hal için;

$$-vs_1(N_t - n_t)n + q = 0 \quad \text{ve} \quad -vs_2n_tp + q = 0 \quad (2.34)$$

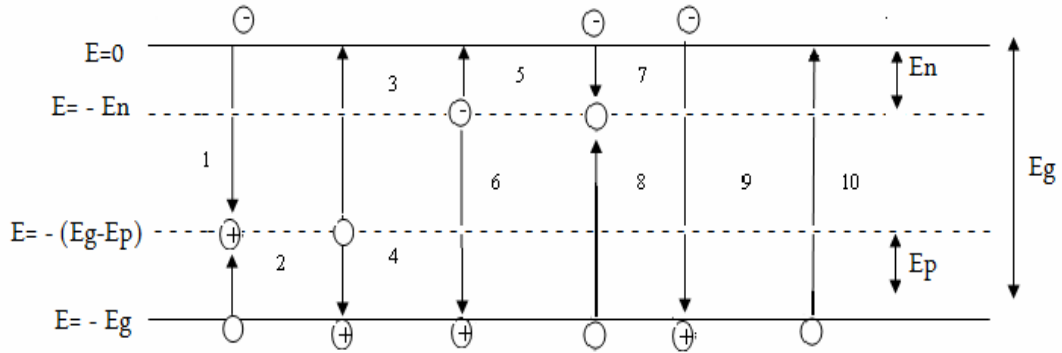
$$n = \frac{q}{vs_1(N_t - n_t)}, \quad p = \frac{q}{vs_2n_t} \quad (2.35)$$

bulunur.  $n_t \ll N_t$  olduğu sürece  $n$ ,  $q$  ile doğrusal olarak değişir,  $n_t$  karanlık durumda tuzaklanmış elektron yoğunluğu  $n_{t0}$  ile karşılaştırılabilir. Merkezde ise,  $p$   $q$  ile doğrusal olarak değişir. Sonuçta düşük ışık şiddetleri için daima doğrusal bir bağıntı elde edilir [van der Ziel, 1968].

Tuzaklanmış azınlık taşıyıcı durumu basittir. Çoğunluk taşıyıcı sayısındaki artış hızı  $q$  ile orantılıdır. Dolayısıyla cevap oldukça geniş bir ışık şiddeti aralığında doğrusaldır. Ancak çok yüksek ışık şiddetlerinde tuzaklanmış azınlık taşıyıcılar çoğunluk taşıyıcıları için yok olma (birleşme) merkezi görevi yapmaya başlar. Bu gerçekleştiğinde, çoğunluk taşıyıcı yoğunluğu  $q$ 'dan daha yavaş artar ve cevap lineer olmaktan çıkar.

### 2.5.4 Kadmiyum Sülfürde Fotoiletkenlik

CdS'de gözlemlenen fotoiletkenlik durumu daha karmaşıktır. CdS durumunda orta şiddetteki ışık için, birleşme rolü oynayan elektron tuzakları vardır. Ancak yüksek ışık şiddetlerinde yine birleşme merkezi görevi yapan boşluk tuzakları vardır. Enerji seviyeleri diyagramı Şekil 2.7' de gösterilmiştir.



Şekil 2.7. CdS yarıiletkeninde enerji seviyeleri diyagramı

CdS yarıiletkeninde aşağıdaki durumlar oluşabilir,

- 1- Bir serbest elektron ve boşluğun birleşmesi
- 2- Tuzaklanmış bir boşluğun ısı olarak bırakılması
- 3- Isıl veya optik olarak serbest bir elektronun oluşumu, geride tuzaklanmış bir boşluk bırakılması
- 4- Serbest bir boşluğun tuzaklanması
- 5- Tuzaklanmış bir elektronun ısı olarak serbest bırakılması
- 6- Serbest bir boşluk ile tuzaklanmış bir elektronun birleşmesi
- 7- Serbest bir elektronun tuzaklanması
- 8- Serbest bir boşluğun ısıl veya optik olarak oluşumu, geride tuzaklanmış bir elektron bırakılması
- 9- Serbest bir elektron ile serbest bir boşluğun doğrudan birleşmesi
- 10- Serbest bir elektron boşluk çiftinin oluşumu

Gerçek durumda yukarıdaki proseslerin bazıları önemsizdir. Doğrudan birleşme olasılığının küçük olmasından dolayı 9 no.lu proses önemsizdir. Şayet  $(E_g - E_n)$  ve  $(E_g - E_p)$  çok büyük ise ısı işlemler olan 3, 8 ve 10 numaralı işlemlerin ihtimali çok küçüktür. 3, 8 ve 10 no.lu optik işlemler fotoiletkenlik durumu için önemlidir. 2 ve 5 no.lu işlemler malzemenin infrared bir ışıkla aydınlatılması durumunda gözlemlenen işlemlerdir.

Şimdi 9, 10 numaralı işlem vasıtasıyla her saniye oluşan elektron boşluk çifti oluşmak üzere ve 3, 8 ve 9 numaralı işlemlerin göz ardı edilmesiyle fotoiletkenlik için denklemler,

$$\frac{dn}{dt} = -\nu_{s_1} P_t n + \nu_{05} \exp\left(-\frac{eE_n}{kT}\right) n_t - \nu_{s_7} n (N_t - n_t) + q \quad (2.36)$$

$$\frac{dn_t}{dt} = -\nu_{05} \exp\left(-\frac{eE_n}{kT}\right) n_t + \nu_{s_1} n (N_t - n_t) - \nu_{s_6} n_t p \quad (2.37)$$

$$\frac{dp_t}{dt} = -\nu_{s_1} P_t n - \nu_{02} \exp\left(-\frac{eE_p}{kT}\right) (P_t - p_t) + \nu_{s_4} p (P_t - p_t) \quad (2.38)$$

$$\frac{dp}{dt} = \nu_{02} \exp\left(-\frac{eE_p}{kT}\right) (P_t - p_t) - \nu_{s_4} p (P_t - p_t) - \nu_{s_6} n_t p + q \quad (2.39)$$

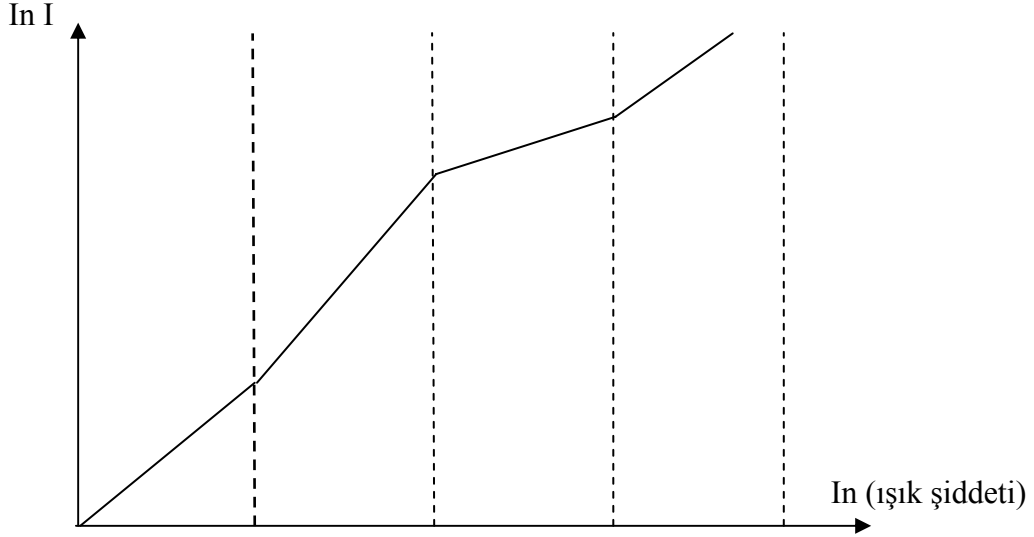
olarak yazılabilir. Burda  $s_1, s_4, s_6$  ve  $s_7$  sırasıyla 1, 4, 6 ve 7 no.lu prosesler için yakalama tesir kesiti;  $\nu_{02}$  ve  $\nu_{05}$  ise 2 ve 5 no.lu prosesler için titreşim frekansıdır.

Denge koşulu şöyle yazılır,

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dn_t}{dt} = \frac{dp_t}{dt} = \frac{dp}{dt} = 0 \quad (2.40)$$

CdS'de derin seviyeler, genelde boşluk, tuzak görevi görür. Dolayısıyla  $s_1 \ll s_4$  ve diğer merkezler birleşme merkezi rolü oynar ( $s_6 \cong s_7$ ). Tüm bu bilgilerin

birlikte değerlendirilmesinden, CdS' de fotoakımın ışık şiddetine bağlılığının Şekil 2.8'de görüldüğü gibi olması beklenir [van der Ziel, 1968].



Şekil 2.8. CdS' de fotoakımın ışık şiddetine bağlılığı

## 2.6 X-Işınları Difraksiyonu

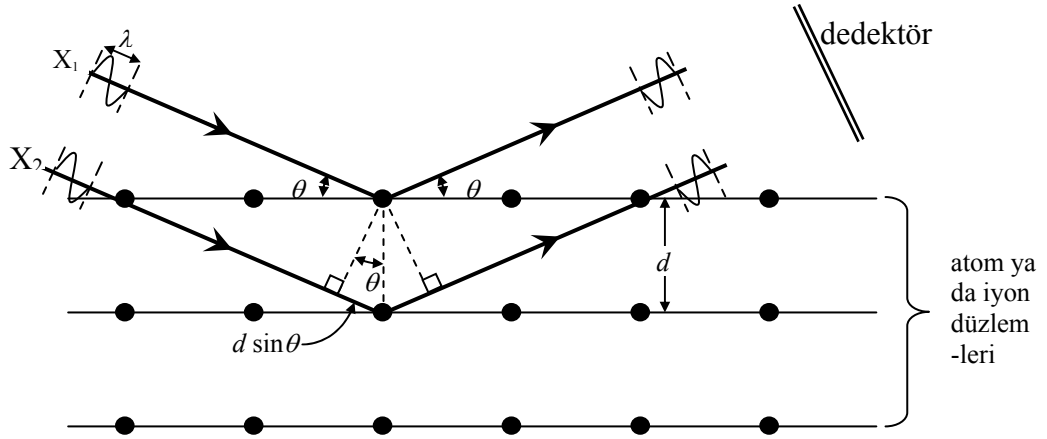
X-ışınları 1895 yılında Alman fizikçi Röntgen tarafından keşfedilmiştir. Bu ışınlar oldukça kısa dalga boylu elektromanyetik dalgadırlar. Elektrik alanda hızlanmış elektronların ( $E = 20-80$  keV) cismin atomları ile çarpışması sonucunda, elektronların kinetik enerjisi elektromanyetik dalga enerjisine dönüşür. Bu tür çarpışmalarda, atomun iç kabuğunda yerleşen elektron dışarı atılır, onun yerine daha üst kabuklardan başka bir elektron geçer. Bu geçiş sırasında elektronlar hangi kabuktan hangi kabuğa geçiş yapıyorsa o kabuğa bağlı belli dalga boylarında karakteristik bir ışın yayınlırlar; bu ışınlar X-ışınları denir. X-ışınlarının dalga boyu  $\lambda$ ,  $10^{-3}-10$  nm aralığında değişmektedir [Caferov, 1998].

Eğer atomun K-kabuğundaki elektron, dıştan gelen hızlı elektronla çıkarılır ve boşalan yere atomun bir üst L-kabuğundan elektron geçerse bu geçiş  $K_{\alpha}$  geçişi olarak tanımlanır. Böyle geçişlerin neticesinde, atomu karakterize eden, belirli dalga boylu X-ışınları oluşmaktadır. Örneğin bakır (Cu), kobalt (Co) ve demir (Fe) atomlarının

$K_\alpha$  karakteristik X-ışınlarının dalga boyu sırasıyla 0.1540 nm, 0.1789 nm ve 0.1936 nm'dir [Caferov,1998].

Makroskopik nesneleri görünür ışık yardımıyla gözle görebiliriz. Ancak bir kristaldeki atom, iyon ya da moleküllerin nasıl istiflendiğini görmek için çok kısa dalga boylu ışığa ihtiyaç vardır. X-ışınlarının dalga boyunun ( $\lambda = 10^{-3}-10$  nm) katotların örgü parametrelerine  $a \approx 0.3-1$  nm yakın olması nedeniyle, X-ışınları kırınım olayı kristalik yapıya sahip katılarda gerçekleşmektedir ve bu olay kristallerin örgü parametresini ölçmek için kullanılmaktadır. Bir X-ışınları demeti atomlarla karşılaştığında, X-ışınları atomun elektronları ile etkileşir ve demet yeniden yayılır, kırınıma uğrar ya da bütün yönlerde saçılır [Caferov, 1998].

Kristal yapıları katılarda, X-ışınları kırınımının temeli Bragg kanunu ile verilmektedir [Caferov, 1998]. X-ışını verileri Bragg ve Bragg tarafından 1912'de önerilen geometrik model Şekil 2.9 ile açıklanabilir. Burada monokromatik (tek dalga boylu) X-ışını demetinin  $X_1$  ve  $X_2$  ile gösterilen iki ışını çizilmiştir.  $X_1$  dalgası, kristaldeki atom ya da iyon düzlemlerinden birinden yansırken,  $X_2$  dalgası bu düzlemin altındaki bir sonraki düzlemden yansımaktadır [Petrucchi and Harwood, 1994].



**Şekil 2.9** X-ışını kırınımıyla kristal yapısının belirlenmesi [Caferov, 1998]

$X_2$  dalgası  $X_1$ 'den daha fazla yol almaktadır. Bu fazla yol  $2d\sin\theta$  'ya eşittir. Eğer  $X_1$  ve  $X_2$  dalgaları birbirlerini güçlendirir, yani dalga maksimum ve minimumları çakışırsa, saçılma şiddeti en büyük olmaktadır. Bunun sağlanması için,  $X_2$  dalgasının aldığı fazla yol, X-ışını dalga boyunun tam katı olmalıdır

$$2d_B \sin \theta = n_B \lambda \quad (2.41)$$

Burada  $\lambda$  kristal örgüsüne düşen X-ışınlarının dalga boyu,  $\theta$  örgüye düşen X-ışınları ile örgünün yüzeyi arasındaki açı,  $d_B$  kristaldeki atomlar arası mesafe ve  $n_B$  yansıma derecesidir [Petrucchi and Harwood,1994].

Saçılan X-ışınlarının en şiddetli olduğu gelme açısı ölçülür ve X-ışınının dalga boyu da bilinirse, atom düzlemleri arasındaki uzaklık hesaplanabilir. Kristalin çeşitli yönlerinden X-ışınları uygulanarak atom büyüklükleri, aralarındaki boşluklar ve kristalin çeşitli yönlerindeki elektron yoğunlukları bulunabilir. Kısacası X-ışınları kırınımı ile bir kristalin yapısını belirleyebiliriz [Caferov, 1998; Petrucci, 1994].

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

Bu bölüm, kimyasal banyo yığma yöntemiyle hazırlanan katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin hazırlanması esnasında kullanılan çözeltiler ile elde edilen filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzeneklerin tanıtılmasına ayrılmıştır.

#### 3.1 Katkılı Ve Katkısız CdS İnce Filmlerin Büyütülmesi

Gerek katkılı gerekse katkısız CdS ince filmler başlangıçta, 75x25x1 mm boyutlarındaki mikroskop camları üzerine büyütülmüştür. Yüzeyi katkılı ve katkısız CdS ince filmlerle kaplanacak olan mikroskop camları önce, aşağıdaki işlem basamaklarından geçirilmek suretiyle temizlenmiştir:

- Deiyonize su (DI) ile ovarak yıkama
- Aseton ile yıkama
- Ultrasonik temizleme (Aseton içerisinde)
- DI- su ile durulama
- Kuru Azot ile kurutma
- 100 °C’de kurutma

Gerek katkılı gerekse katkısız CdS ince filmleri büyütmek için başlangıç malzemesi olarak CdCl<sub>2</sub> kullanılmıştır. Katkısız CdS ince filmlerin büyütülmesindeki işlem basamakları şöyledir: 0.2 M ve 10 mL CdCl<sub>2</sub> (0.36 gr) çözeltisi hazırlandı (DI su da). Bu çözelti bir manyetik karıştırıcının üzerinde oda sıcaklığında ve ağzı kapalı bir kapta 2 saat süreyle karıştırıldı. Bu esnada, bir başka ağzı kapalı kap içerisine yine 0.2 M ve 10 mL hacminde tioüre (NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub>CS (0.15 gr) çözeltisi hazırlandı. Bu çözeltide başka bir manyetik karıştırıcının üzerinde oda sıcaklığında 2 saat süreyle karıştırıldı. 2 saatlik sürenin sonunda CdCl<sub>2</sub> çözeltisi 100 mL’lik bir behere alındı. Bu çözeltinin (CdCl<sub>2</sub>) içerisine bir pH metre (Ph 330i, WTW 82362 Weilheim) yerleştirilerek çözeltinin pH’ı sürekli olarak gözlemlendi. Bu çözeltinin başlangıçtaki pH’ı 5.3 olarak ölçülmüştür. Daha sonra, çözeltinin pH’ı 10 oluncaya kadar çözeltiye, %25 amonyak ilave edildi. Çözeltinin pH’ı 10’a ayarlandıktan sonra

önceden temizlenmiş olan mikroskop camları bu çözeltinin içerisine daldırılarak çözelti ısıtılmaya başlandı. Çözeltinin sıcaklığı 60 °C'ye ulaştığında tioüre çözeltisi CdCl<sub>2</sub> çözeltisine ilave edildi. Karıştırılan çözeltiler kaynayınca kadar ısıtılmaya devam edildi. Kaynama başladıktan hemen sonra ısıtıcı kapatılarak CdCl<sub>2</sub> + Tioüre çözeltisi oda sıcaklığına soğutuldu. Daha sonra camlar çıkartılıp DI su ile temizlendi. Bu işlemlerin sonucunda camların oldukça homojen, turuncu renkte bir film ile kaplanmış olduğu gözlemlendi. Bu filmler, yapısal analizleri (XRD) yapılmak üzere saklandı.

Çalışmalarımızda, katkı türünün CdS ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerine etkisini incelemek amacıyla Zn, Pb, In ve Se katkılanmış CdS ince filmler hazırlanmıştır. CdS ince filmlerin Zn, Pb, In ve Se ile katkılanmalarındaki işlem basamakları ise şöyledir: Katkılı CdS ince filmlerin hazırlanmasında da başlangıç maddesi olarak yine 0.2 M CdCl<sub>2</sub> çözeltisi kullanılmıştır. Katkılanacak her bir malzeme türü için ayrı bir CdCl<sub>2</sub> ve tioüre çözeltisi hazırlanmıştır. Daha sonra katkılanacak malzemelerin çözeltisi hazırlanmıştır. Katkı maddelerinin çözeltilerinin hazırlanmasında; Zn katkılamak için Çinko asetat Zn(O<sub>2</sub>CCH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, Indiyum katkılamak için Indiyum klorür InCl<sub>3</sub>, Kurşun katkılamak için Kurşun nitrat Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>, selenyum katkılamak için de Selenüre SeO<sub>2</sub> kullanılmıştır. Katkı maddelerinin yukarıdaki başlangıç maddeleri kullanılarak hazırlanan 0.2 M konsantrasyonundaki çözeltileri yaklaşık 2 saat süreyle oda sıcaklığında karıştırılmıştır. Daha sonra, katkı oranının her bir katkı türü için aynı olmasına özen gösterilerek, her bir katkı maddesi çözeltisinden aynı miktarda, 0.5 mL alınarak CdCl<sub>2</sub> çözeltisine karıştırılmıştır. Bu çözeltide yaklaşık olarak 1 saat süreyle karıştırıldıktan sonra katkılı CdS ince filmler hazırlanmıştır. Katkılı CdS ince filmlerde katkısız CdS filmlerin hazırlanmasında benzer olarak hazırlanmıştır. Deneylerimiz sonucunda altlık malzemesinin (mikroskop camları) yüzeyinin oldukça düzgün bir şekilde CdS ile kaplandığı görülmüştür.

Gerek katkılı gerekse katkısız CdS ince filmler bir yüksek sıcaklık fırınında 1 saat süreyle 300 °C'de ısıtılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Hazırlanan ince filmlerin, yapısal karakterizasyonları X-ışınları kırınım cihazı (XRD, Rigaku D/Max/2200/PC ULTIMA 2) ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümler 10° ve 90° aralığında monokromatik Cu-Ka radyasyonu ile gerçekleştirilmiştir.

## 3.2 İnterdijital Elektrot (IDT) Yapısının Hazırlanması

Katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin elektriksel ve optik özelliklerinin belirlenebilmesi için filmlerin bir elektrot yapısı üzerine hazırlanması gerekmektedir. Bu çalışmada elektrot yapısı olarak interdijital elektrot yapısı kullanılmıştır. IDT elektrot yapısı yine cam taşıyıcılar üzerine fotolitografi tekniği ile oluşturulmuştur. IDT elektrot yapılarının imalindeki işlem basamakları sırasıyla aşağıda açıklanmıştır. Şekil 3.1 bu elektrot yapısının eldesindeki işlem basamaklarını şematik olarak göstermektedir.

- Taban malzemesinin seçilmesi ve temizlenmesi
- Metal kaplama işlemi
- Fotorezist kaplama
- Pozlama ve banyo
- Metal aşındırma

### 3.2.1 Taban Malzemesinin Seçilmesi Ve Temizlenmesi

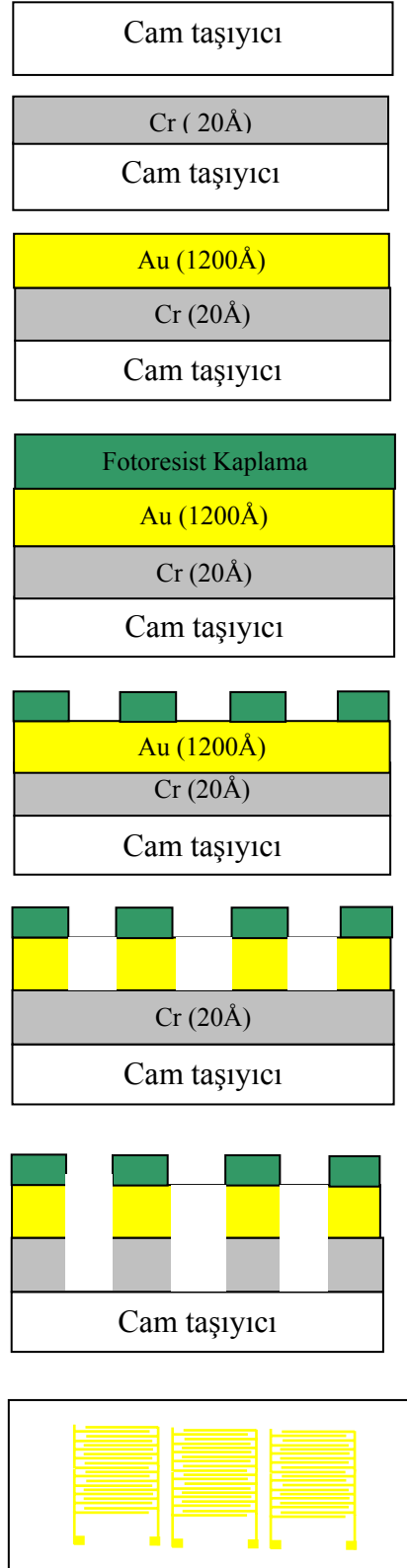
Taban malzemesi olarak kullanılan 75x25x1 mm boyutlarındaki mikroskop camları aşağıdaki işlemlerden geçirilmek suretiyle temizlenmiştir.

- Deiyonize su ve sıvı deterjan ile 5 dakika yıkama
- Sodyum bikromat dehidrat ile 5 dakika yıkama
- Deiyonize su ile 1 dakika durulama
- Ultrasonic Cleaner'da asetonla 1 dakika banyo
- Ultrasonic Cleaner'da de-iyonize su ile 3 dakika durulama
- Sıcaklığı 95°C ye ayarlanmış etüv de 30-35 dakika kurutma

### 3.2.2 Metal Kaplama İşlemi

Metal kaplama işlemi ısı buharlaştırma yöntemiyle gerçekleştirilmiştir (EDWARDS Model 500 Kaplama Sistemi). Temizlenen camlar sadece bir yüzeyi kaplanacak şekilde bir örnek tutucuya monte edildi. Önce 20 Å kalınlığında Cr daha

sonra da 1200 Å kalınlığında Au ısıtılarak buharlaştırılmak suretiyle camların bu yüzeyleri üzerine kaplanmıştır.



**Şekil 3.1.** Interdijital elektrotların eldesindeki işlem basamakları

### 3.2.3 Fotorezist Kaplama

Fotorezist kaplama işlemi sarı ışık altında ve ışığa pozitif direnç gösteren fotorezist kullanılarak yapılmıştır. Kaplama işlemi spin-coating ince film kaplama cihazıyla, gerçekleştirilmiştir. Cihazdaki örnek tutucuya lamın metal kaplı olmayan yüzeyi yerleştirilerek örnek tutucunun üzerindeki delikli kısımdan vakum yapılarak lamın tutucu üzerinde emniyetle tutunması sağlanmıştır. Sonra lamın metal kaplı olan yüzeyine bir pipet vasıtasıyla fotorezist malzeme damlatılmış ve cihaz belli bir devirde çalıştırılmıştır. Bunun sonucunda fotorezist malzemenin metal kaplı lamın yüzeyine ince düzgün ve pürüzsüzce kaplanması sağlanmıştır. Kaplanan fotorezist 80°C’de 25-30 dakika süreyle kurutulmuştur.

### 3.2.4 Pozlama ve Banyo

Pozlama işleminde hemen her tür transduser için kritik olan, maske ile taban malzemesi arasındaki temasın iyi olmasıdır. Maske ile taban malzemesi arasında kalan küçük boşluklarda kırılma olayından dolayı, daha geniş alanların pozlanmasına neden olur. Bu ise, düzensiz pozlanan bu bölgelerde IDT yapının kısa devre oluşturmaya sebep olur. Ayrıca bu işlemde önemli diğer bir hususta kullanılan ışık kaynağının ışıma süresi ve şiddetidir.

Pozlama işlemi, IDT yapısındaki maskenin fotorezist kaplı lam yüzeyine dikkatli bir şekilde yerleştirilmesi ve 3-5 dakika süreyle 500 W’lık bir ultraviyole ışık kaynağına maruz bırakılması suretiyle gerçekleştirilmiştir. Optimum pozlama süresi kullanılan fotoreziste ve ışık kaynağının şiddetine bağlı olarak değiştiğinden, bu süre deneme yanılma yoluyla bulunmuştur.

Pozlama işlemi bittikten sonra, IDT yapısındaki filmin saydam bölgelerinden geçen ışığın etkisiyle bozulan fotorezist bölge %6’lık NaOH çözeltisinde 3-5 dakika süreyle banyolama işlemine tabii tutulduktan sonra IDT yapısının lam yüzeyinde belirginleştiği gözlenmiştir.

### 3.2.5 Metal Aşındırma

Pozlama işleminden geçirilen kaplı lamlarda, önce üstteki Au tabakası özel bir Au aşındırma çözeltisi kullanılarak aşındırıldı. Daha sonra Cr tabakasını aşındırmak için de 60-70°C ye kadar ısıtılmış % 37' lik HCl kullanılmıştır. Böylece IDT yapısı elde edilmiştir.

IDT elektrot yapıları bu şekilde oluşturulduktan sonra, hem katkılı hem de katkısız CdS ince filmler bu kez IDT elektrot yapıları üzerine hazırlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan filmler, yapısal, elektriksel ve optik özellikleri belirlenmek üzere saklanmıştır.

### 3.3 Filmlerin A.C. Ve D.C. Elektriksel Özellikleri

Alternatif akım (a.c.) ve doğru akım (d.c.) elektriksel karakterizasyon, sentezlenen malzemelerdeki yük iletim mekanizmalarının aydınlatılması ve dolayısıyla potansiyel uygulama alanlarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Tez çalışmamız sırasında elde edilen katkılı ve katkısız CdS ince filmlerdeki yük iletim mekanizmalarının aydınlatılması ve filmlerin potansiyel uygulama alanlarının belirlenmesi amacıyla filmlerin a.c. ve d.c. elektriksel özellikleri sıcaklığa bağlı olarak incelenmiştir. Bu amaçla, IDT yapıları üzerine hazırlanmış olan ince filmler alüminyum bir altlık üzerine sabitlenmiştir. Daha sonra filmler,  $3 \times 10^{-3}$  mbar'lık vakum seviyesine inebilen alüminyumdan yapılmış bir chamber'a yerleştirilmiştir. Gerek d.c. gerekse a.c. ölçümler 302 K ve 413 K sıcaklık aralığında ve karanlık ortamda yapılmıştır.

Filmlerin doğru akım (d.c.) elektriksel özellikleri 302 K ve 413 K sıcaklık aralığındaki 9 farklı sıcaklık değeri için akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Filmlerin I-V karakteristikleri Keithley 617 model programlanabilir Elektrometre ile voltajın -1 V ile +1 V aralığındaki değerlerinde ölçülmüştür.

Filmlerin alternatif akım (a.c.) elektriksel özellikleri, 40 Hz ile  $10^5$  Hz arasındaki frekans değerlerinde ve yine aynı sıcaklık aralığında Keithley 3330 Model LCZ metre kullanılarak belirlenmiştir. Bu ölçümlerde, ince filmlerine 100 mV genlikli bir sinyal uygulanmış ve 40 Hz-100 kHz aralığında frekansa bağlı olarak, sanal empedans-Reel empedans ( $X - R_s$ ) iletkenlik frekans ( $\sigma_{a.c} - f$ ) kapasite frekans ( $C - f$ ) ölçümleri yapılmıştır. Filmlerin a.c. elektriksel özellikleri de  $3 \times 10^{-3}$  mbar'lık vakum altında ve karanlık ortamda ölçülmüştür. Tüm ölçümler, IEEE-488 kartı ile bilgisayar kontrollü ölçüm sistemiyle yapılmıştır. Şekil 3.2'de, filmlerin a.c. ve d.c. elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzeneği göstermektedir.



Şekil 3.2. Filmlerin a.c. ve d.c. elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzenek

### 3.4 Filmlerin Optik Özelliklerinin Belirlenmesi

Katkılı ve katsız CdS ince filmlerin optik özellikleri, dalga boyuna bağlı olarak foto iletkenlik ölçümleri ve ışık şiddetine bağlı olarak akım-gerilim karakteristikleri ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Filmlerin foto iletkenlik özellikleri 300 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığında vakumsuz ve karanlık oda koşullarında ölçülmüştür. Foto iletkenlik ölçümlerinde ışık kaynağı olarak Xenon lamba istenilen dalga boyunu elde etmek için de bir monokromatörden (Horiba Jobin Yvon, iHR 550 model)

faýdalanılmıştır. Işık şiddetinin filmlerin akım gerilim karakteristiklerine etkisini belirlemek içinde 21 watt'lık bir halojen lamba kullanılmıştır. Bu ölçümlerde optik penceresi bulunan alüminyum'dan yapılmış bir chamber kullanılmıştır. Ölçümler vakum ortamında ( $1.10^{-3}$  mbar) ve 5 farklı şiddetteki ışık için yapılmıştır. Şekil 3.3'de, filmlerin dalga boyuna bağlı fotoiletkenlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzeneği gösterilmektedir.



Şekil 3.3. Filmlerin dalga boyuna bağlı fotoiletkenlik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan deneysel düzeneği

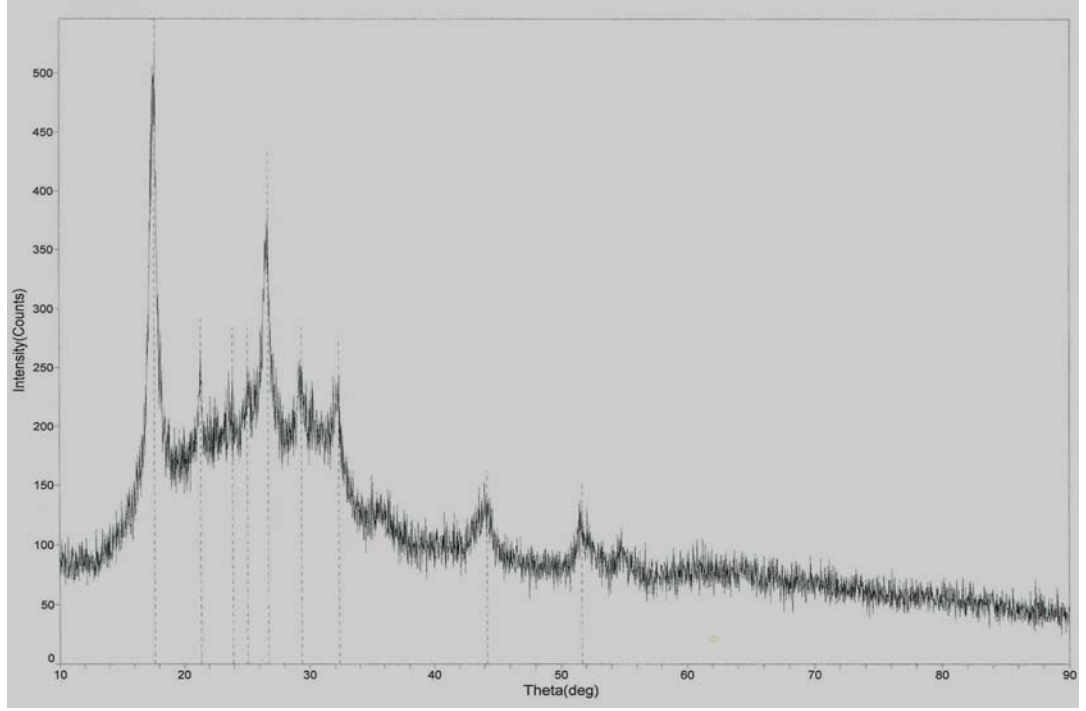
## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDAN ELDE EDİLEN BULGULAR

Bu bölümde katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin d.c. ve a.c. elektriksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak incelenmesinden elde edilen bulgularla filmlerin, optik (foto iletkenlik ve aydınlanma şiddetine bağlı akım-gerilim ölçümleri) özelliklerinin belirlenmesine yönelik ölçümlerden elde edilen bulgular sunulacaktır.

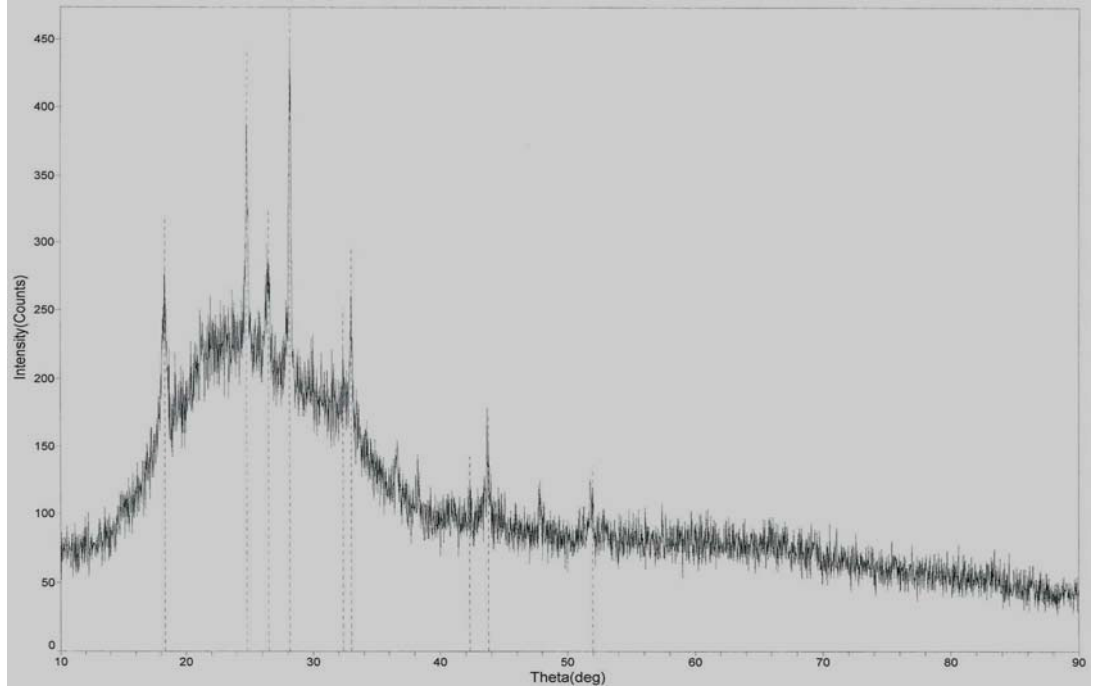
### 4.1 Yapısal Analizlerden Elde Edilen Bulgular

Katkılı ve katkısız CdS filmlerin kristal yapılarını belirlemek amacıyla filmlerin XRD spektrumları alınmıştır. Şekil 4.1'de tavlınmamış ve 300 °C'de tavlınmış katkısız CdS'ün 10° ile 90° arasında alınan XRD spektrumu gösterilmiştir. Tavlınmamış CdS'de 2θ'nın 26.74 ° değerinde gözlemlenen pikin Hawleyite CdS 'ün 111 düzlemlerindeki yansımalar, 44.221° değerinde gözlemlenen pikin Hawleyite CdS 'ün 220 düzlemlerindeki yansımalar, 54.818° değerinde gözlemlenen pikin Hawleyite CdS 'ün 222 düzlemlerindeki yansımalar karşılık geldiği sonucuna varılmıştır. Filmin 300 °C'de tavlınmasıyla tavlınmamış filmde gözlemlenmeyen fazlardan bir pikin çıktığı ve mevcut piklerin konumlarında bazı kaymaların olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.1b). Yine Şekil 4.1b'den görüleceği gibi, tavlama ile filmin fazında değişimler olduğu görülmüştür. Tavlınmış CdS filmin XRD spektrumundaki 19.148° değerinde gözlemlenen pikin kadmiyum sülfat hidroksite ait olduğu, 26.499° değerinde gözlemlenen pikin Greenockite CdS 'ün 002 düzlemlerindeki yansımalar, 28.161° değerinde gözlemlenen pikin Greenockite CdS'ün 101 düzlemlerindeki yansımalar, 43.789° değerinde gözlemlenen pikin Greenockite CdS 'ün 110 düzlemlerindeki yansımalar, 47.844° değerinde gözlemlenen pikin Greenockite CdS 'ün 103 düzlemlerindeki yansımalar ve, 51.983° değerinde gözlemlenen pikin Greenockite CdS 'ün 112 düzlemlerindeki yansımalar karşılık geldiği sonucuna varılmıştır.

Pb, Zn ve Se katkılamanın CdS ince filmlerin XRD spektrumlarını dolayısıyla kristal yapılarını fazlaca etkilemediği görülmüştür.



Şekil 4.1a. Tavlanmamış katkısız CdS filmin XRD spektroskopisi



Şekil 4.1b. Tavlanmış katkısız CdS filmin XRD spektroskopisi

## 4.2 D.C. Ölçümlerden Elde Edilen Bulgular

Gerek katkılı gerekse katkısız filmlerin d.c. elektriksel özellikleri, ortamdaki gaz molekülleri ile nemin etkisini ortadan kaldırmak için vakum ortamında ve karanlıkta -1 volt ile +1 volt aralığında sıcaklığa bağlı olarak (302K - 413K) akım-gerilim (I-V) karakteristikleri ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Filmlerin d.c. iletkenlikleri ölçülen I-V karakteristiklerinden

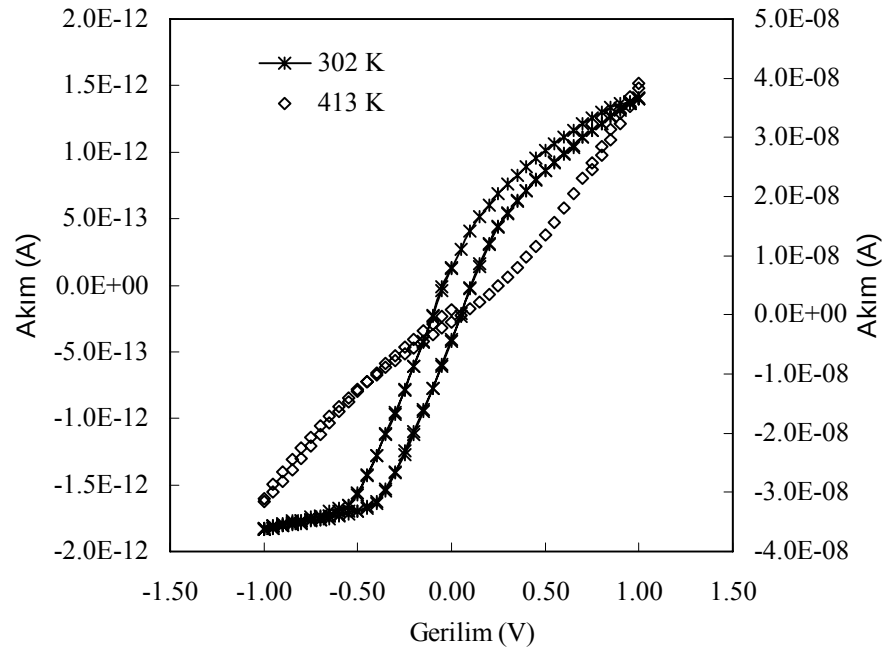
$$\sigma_{d.c} = \frac{I}{V} \frac{d}{(2n-1) l.h} \quad (4.1)$$

ifadesi kullanılarak hesaplanmıştır. Burada,  $I$  ölçülen akım,  $V$  uygulanan gerilim,  $d$  inter dijital elektrotlar arasındaki mesafe,  $n$  elektrot çifti sayısı,  $l$  elektrotların örtüşme uzunluğu,  $h$ 'de elektrotların kalınlığıdır.

### 4.2.1 Katkısız CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları

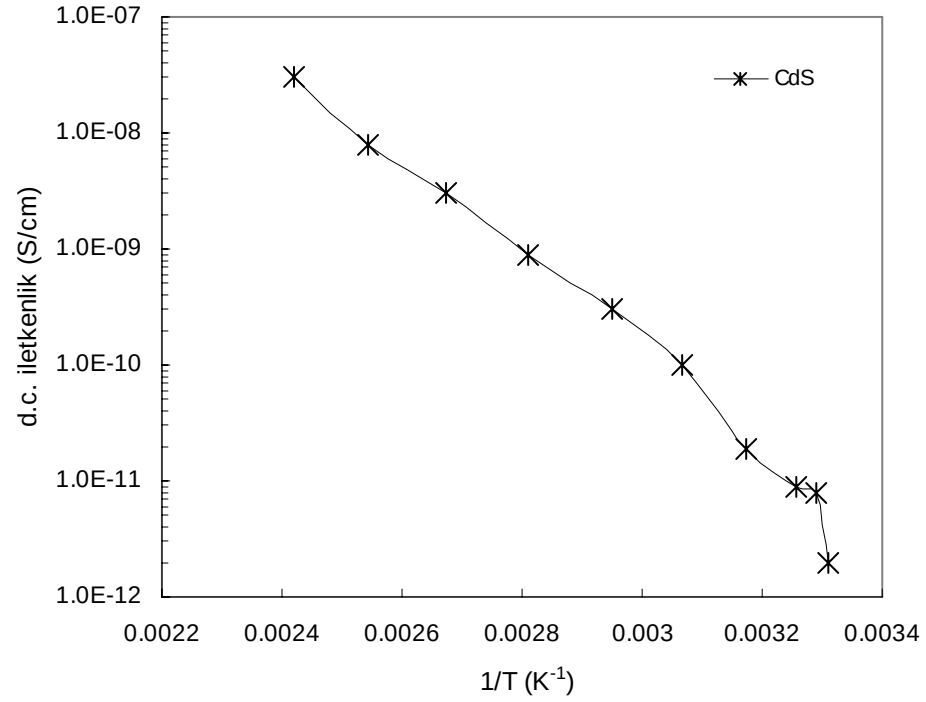
Katkısız CdS filmin d.c. iletkenliği 302 K ile 413 K arasındaki 9 farklı sıcaklıkta ölçülmüştür. Bu örneğin oda sıcaklığında + 1 V ile -1 V arasında ölçülen akım-gerilim karakteristiğinde akım, gerilimin +0.25 V ile -0.4 V arasındaki değerleri için doğrusal olarak değişirken +0.25 V'dan büyük değerleri ve -0.4 V'dan daha küçük değerleri için bir doyum durumuna ulaşma eğiliminde olduğu görülmüştür. I-V karakteristiğinin doğrusal olduğu -0.4 V ile +0.25 V aralığında histeresis etkisi gözlemlenirken bu aralık dışındaki gerilim değerlerinde histeresis etkisi gözlemlenmemiştir.

Akımın, uygulanan gerilimin +0.25V'dan büyük -0.4 V'dan da küçük değerleri için doyum durumuna gitme eğilimi diğer sıcaklıklardaki ölçümlerde gözlemlenmemiştir. Artan sıcaklıkla, 356 K'e kadarki sıcaklıklarda, I-V karakteristiklerinin tek eğimli bir doğrudan oluştuğu gözlemlenmiştir. 356 K'den sonra ise I-V karakteristiğinin diyodik bir davranış sergilediği görülmüştür. Oda sıcaklığında gözlemlenen akımdaki doyuma gitme eğilimi ve yüksek sıcaklıklarda gözlemlenen diyot davranışı Şekil 4.2' de gösterilmiştir



Şekil 4.2. Katkısız CdS filmin 302 K ve 413 K’de ölçülen I-V karakteristikleri

Katkısız CdS ince filmde, iletkenliğin sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde iletkenliğin artan sıcaklıkla arttığı görülmüştür. Bu filmde oda sıcaklığındaki (302 K) iletkenlik değerinin  $2 \times 10^{-12}$  S/cm iken 413 K’deki iletkenliğinin yaklaşık olarak on bin kat artarak  $3 \times 10^{-8}$  S/cm değerine ulaştığı görülmüştür. Bu filmde ölçülen d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi ( $\ln \sigma_{dc} - 1/T$ ) Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Katkısız CdS filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi

Şekil 4.3' den açıkça görülebileceği gibi d.c. iletkenliğin sıcaklıkla,

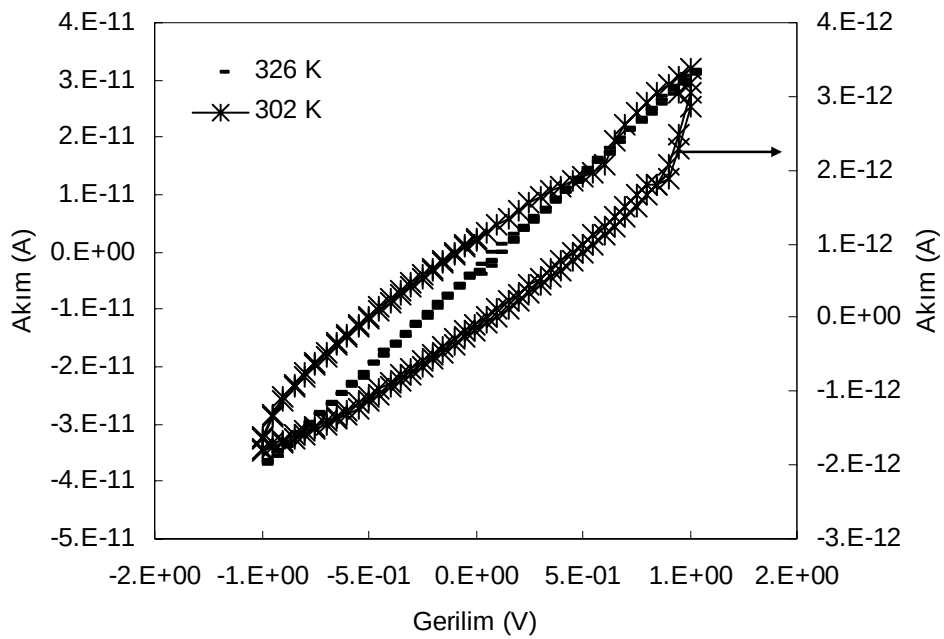
$$\sigma_{d.c.} = \sigma_0 \exp(E_A / kT) \quad (4.2)$$

bağıntısına uygun olarak değiştiği görülmüştür. Bu ifadede,  $\sigma_0$  bir sabit,  $E_A$  ısıt uyarım enerjisi,  $T$  sıcaklık,  $k$  da Boltzmann sabitidir. Denklem (4.2) ve Şekil 4.3'ün eğiminden yararlanarak aktivasyon enerjisi hesaplanmış ve, katkısız CdS'ün aktivasyon enerjisi 0.86 eV olarak bulunmuştur.

#### 4.2.2 Pb Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları

Pb Katkılı CdS filmin d.c. iletkenlikleri, 302 K ile 413 K arasındaki 9 farklı sıcaklıkta ölçülen I-V karakteristiklerinden, Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır. Pb katkılamanın, CdS ince filmlerin d.c. iletkenliklerini fazlaca etkilemediği görülmüştür (katkısız CdS ince filmin oda sıcaklığındaki iletkenliği  $2.0 \times 10^{-12}$  S/cm iken Pb katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığındaki iletkenliğinin  $2.1 \times 10^{-12}$  S/cm'dir).

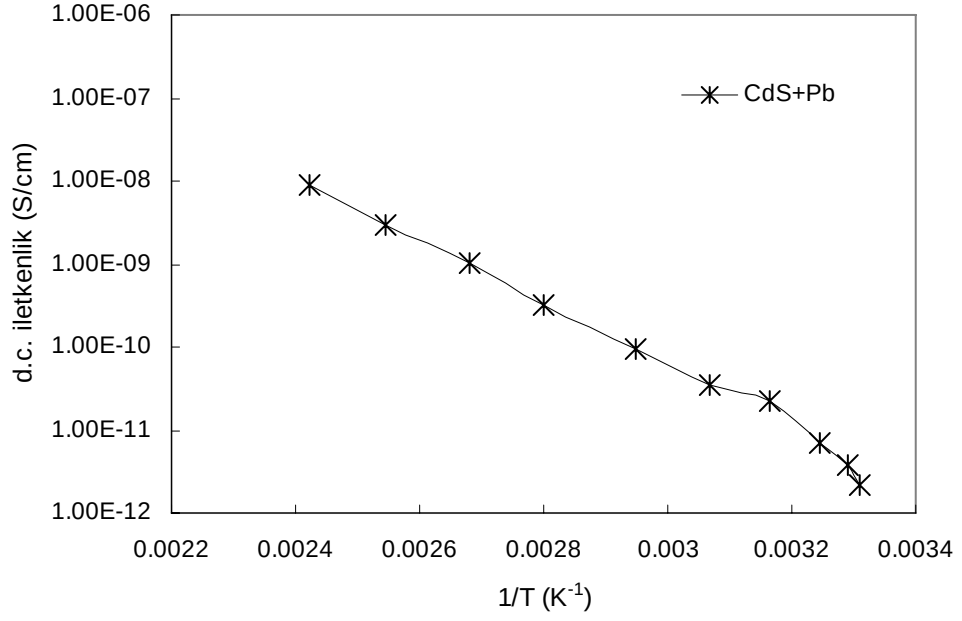
Pb katkılama ile, katkısız CdS'ün oda sıcaklığındaki I-V karakteristiğinde gözlemlenen akımdaki doyuma gitme durumunun ortadan kalktığı görülmüştür. Pb katkılı CdS ince filmlerin oda sıcaklığındaki I-V karakteristiğinde büyük oranda histeresis etkisi gözlemlenirken artan sıcaklıkla histeresis genişliğinin azaldığı ve 326 K'den sonra histeresis etkisinin tamamen ortadan kalktığı görülmüştür. Pb katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığı ve 326 K'de ölçülen I-V karakteristikleri Şekil 4.4'de gösterilmiştir. Şekil 4.4'den açıkça görüleceği gibi artan sıcaklıkla histeresis etkisi ortadan kalkarken I-V karakteristiğinin eğimi de artmaktadır.



Şekil 4.4. Pb katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığı ve 326 K'de ölçülen I-V karakteristiği

Pb Katkılı CdS filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin incelenmesinde  $(\ln \sigma_{dc} - 1/T)$  grafiğinin katkısız CdS filmin davranışına benzer bir davranış gösterdiği bulunmuştur. Yine bu ölçümlerden, Pb katkılamanın iletkenlikteki artış oranını azalttığı görülmüştür. Katkısız filmde 302 K ile 413 K'deki iletkenlik değerleri arasında yaklaşık on bin kat fark var iken Pb katkılı filmde, aynı sıcaklıklardaki iletkenlikler arasındaki farkın yaklaşık olarak beş bin kat olduğu görülmüştür. Bu filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklığın tersiyle değişimi Şekil 4.5'de verilmiştir. Şekil 4.5'in incelenmesinden görülecektir ki, Pb katkılı filmin  $(\ln \sigma_{dc} - 1/T)$  grafiği, negatif

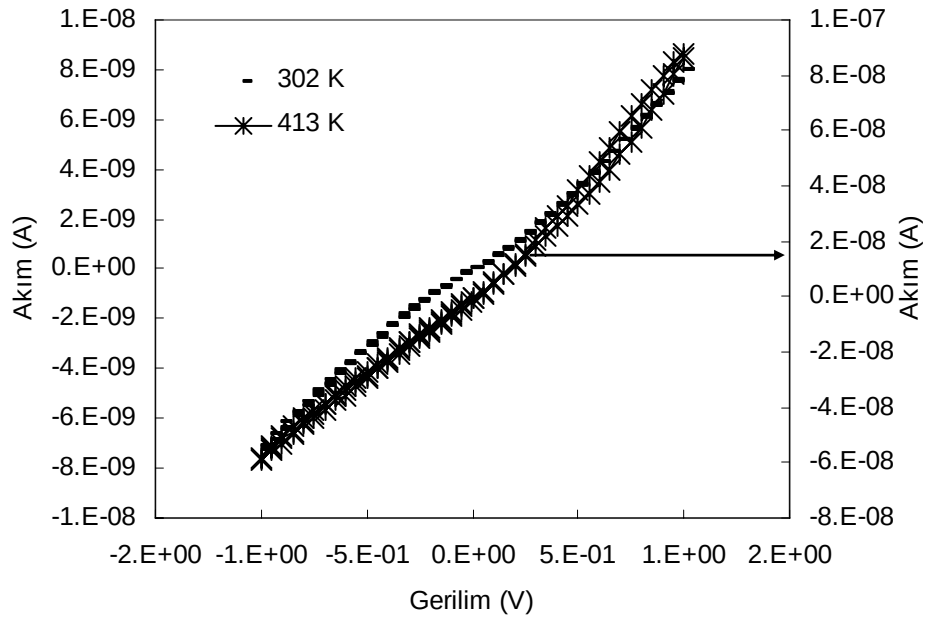
eğimli bir grafik oluşturmakta ve iletkenlik artan sıcaklıkla birlikte artmaktadır. Bu grafiğin eğiminden faydalanılarak ve Denklem 4.2 kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerji değeri 0.77 eV olarak bulunmuştur.



Şekil 4.5. Pb katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi

#### 4.2.3 Zn Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları

Zn katkılı CdS filmin d.c. iletkenliği de yine aynı sıcaklık aralığında (302 K ile 413 K arasında) +1 V ile -1 V arasındaki voltaj değerlerinde ölçülen I-V karakteristiklerinden hesaplanmıştır. Zn katkılamanın CdS'ün iletkenliğinde büyük oranda artışa neden olurken ( $10^3$  kat) iletkenliğin sıcaklığa duyarlılığını azalttığı görülmüştür. Katkısız filmlerde bu fark  $10^4$  kat, Pb katkılı filmlerde ise  $10^3$  kat iken Zn katkılı filmde bu farkın sadece 10 kat olduğu gözlemlenmiştir. Zn katkılı CdS ince filmlerin hemen her sıcaklıktaki I-V karakteristiklerinin diyot davranışına benzer bir davranış sergilediği görülmüştür. Sıcaklığın Zn katkılı CdS ince filmlerin I-V karakteristiklerine etkisini göstermek için bu filmin en düşük (302 K) ve en yüksek sıcaklıkta (413 K) ölçülen I-V karakteristikleri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Burada her iki sıcaklıktaki I-V karakteristiği tam olarak doğrusal olmayan, diyot davranışına benzer, bir eğriden oluşmaktadır.



Şekil 4.6. Zn katkılı CdS ince filmin oda sıcaklığı ve 413 K’de ölçülen I-V karakteristiği

Yine aynı şekilden görüleceği gibi en düşük ve en yüksek sıcaklıklardaki iletkenlik değerleri arasındaki fark 10 kat civarındadır. Zn katkılı filmin I-V karakteristiklerinde, incelenen sıcaklık aralığındaki hiçbir sıcaklık değeri için histeresis etkisi gözlemlenmemiştir.

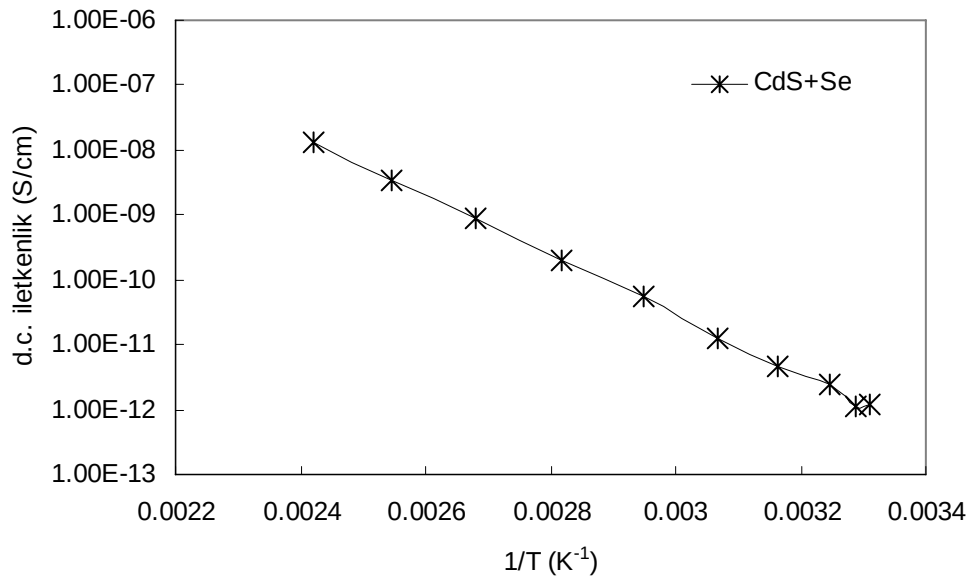
Zn Katkılı CdS filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin incelenmesinde  $\ln \sigma_{dc} - 1/T$  grafiğinin, katkısız ve Pb katkılı CdS ince filmlerde olduğu gibi negatif eğimli bir doğrudan oluştuğu görülmüştür. Bu grafiğin eğiminden yararlanılarak Zn katkılı CdS filminin d.c. aktivasyon enerjisi 0.21 eV olarak hesaplanmıştır.

#### 4.2.4 Se Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları

Çalışmalarımızda katkı malzemesi olarak kullandığımız malzemelerden birisi de güneş pillerinin yapımında en sık kullanılan malzemelerden olan Se’dur. Kimyasal banyo yığma metoduyla hazırlanan Se katkılı CdS ince filmin d.c. elektriksel özellikleri de diğer filmlerle aynı sıcaklık ve gerilim aralığında

incelenmiştir. Se katkılamanın CdS ince filmlerin d.c. iletkenliklerini fazlaca etkilemediği gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda katkısız CdS ince filmde akımın doyuma gitme eğilimi Se katkılı filmlerde de gözlemlenmiştir. Ancak, yüksek sıcaklıklarda katkısız CdS filmlerde gözlenen diyodik davranış Se katkılı filmde gözlemlenmemiştir. Se katkılı CdS ince filmin düşük sıcaklıklardaki I-V karakteristiklerinde histerisis etkisi gözlemlenirken artan sıcaklıkla histerisis genişliğinin azaldığı ve 316 K'den sonra histerisis etkisinin ortadan kalktığı görülmüştür. Se katkılı CdS ince filminin 302 K'deki iletkenliği  $1.0 \times 10^{-12} \text{ S/cm}$  histerisis etkisinin ortadan kalktığı 326 K'deki iletkenliği ise  $1.3 \times 10^{-11} \text{ S/cm}$  olarak hesaplanmıştır ve artan sıcaklıkla birlikte iletkenliğin de arttığı gözlemlenmiştir.

Se Katkılı CdS filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin incelenmesinde,  $\ln \sigma_{dc} - 1/T$  grafiğinin negatif eğimli ideal bir doğru olduğu gözlemlenmiştir. Se katkılı CdS için aktivasyon enerjisi  $\ln \sigma_{dc} - 1/T$  grafiği ve Şekil 4.7'nin eğiminden faydalanarak hesaplanmış ve değeri 0.91 eV olarak bulunmuştur.

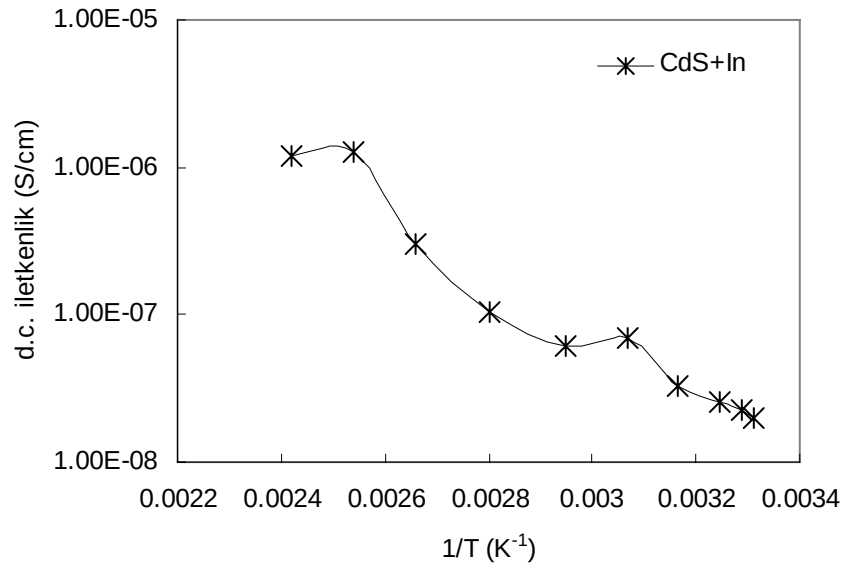


Şekil 4.7. Se katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi

#### 4.2.5 In Katkılı CdS İnce Filminin D.C. Ölçüm Bulguları

In katkılanmasıyla CdS ince filmlerin d.c. elektriksel iletkenliklerinin yaklaşık olarak  $10^4$  kat arttığı gözlemlenmiştir. In katkılı CdS düşük sıcaklıklarda diyod özelliğine benzer bir davranış gösterirken, yüksek sıcaklıklarda, 357 K'den sonraki sıcaklıklarda, ohmik bir davranış göstermektedir. In katkılı CdS filmin oda sıcaklığındaki iletkenliği  $2.02 \times 10^{-8} \text{ S/cm}$ , 394 K'deki iletkenliği de  $1.27 \times 10^{-6} \text{ S/cm}$  olarak bulunmuştur. Katkısız CdS filmle karşılaştırıldığında, In katkılamanın en düşük ve en yüksek sıcaklıklardaki iletkenlik değerleri arasındaki farkın yüz kat civarında olduğu bulunmuştur.

In katkılı CdS filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklıkla değişiminin incelenmesinde iletkenliğin, sıcaklığa yaklaşık olarak Arrhenius tipi bir bağıllık gösterdiği bulunmuştur. In katkılı CdS filmin d.c. iletkenliğinin sıcaklığın tersiyle değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülen d.c. iletkenlik değerlerinden In katkılı CdS film için aktivasyon enerji değeri 0.40 eV olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.8. In katkılı CdS ince filmde d.c. iletkenliğin sıcaklığın tersi ile değişimi

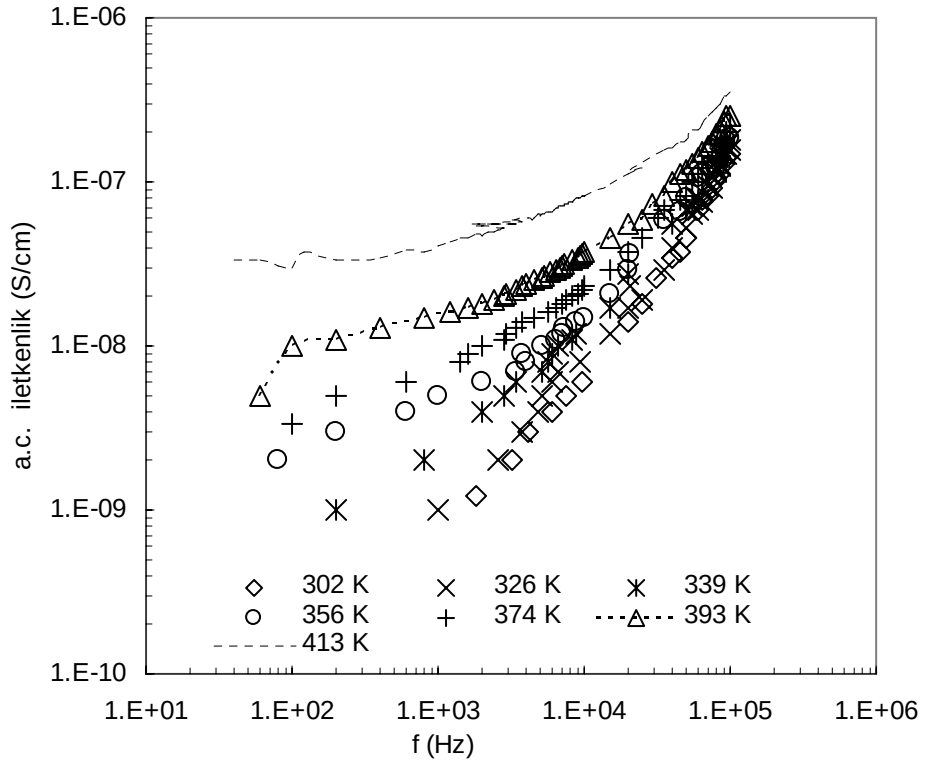
### 4.3 A.C. Ölçümlerden Elde Edilen Bulgular

Bu bölüm, katkılı ve katkısız CdS ince filmlerde 40 Hz ile  $10^5$  Hz frekans aralığında ve değişik sıcaklıklarda gerçekleştirilen iletkenlik ( $\sigma_{a.c.}$ ), seri kapasite ( $C_s$ ), empedansın sanal ( $X$ ) ve gerçek kısımları ( $R$ ) ile empedans ( $Z$ ) ölçümlerinden elde edilen bulgularla, frekansa bağlı a.c. iletkenlik ölçümlerinden hesaplanan frekansın üssü olan  $s$  parametresinin sıcaklıkla değişiminden elde edilen bulgulara ayrılmıştır.

#### 4.3.1 Katkısız CdS Filminin A.C. Ölçüm Bulguları

Hazırlanan katkısız CdS filmin, 40- $10^5$  Hz frekans ve 302 K ile 413 K sıcaklık aralığında iletkenlik ( $\sigma_{ac}$ ), seri kapasite ( $C_s$ ), empedansın sanal ( $X$ ) ve gerçek kısımları ( $R$ ) ile empedans ( $Z$ ) ölçümleri yapılmıştır. Katkısız CdS ince filmin değişik sıcaklıklarda ölçülen iletkenliğinin frekans ile değişimi Şekil 4.9’da gösterilmiştir.

Bu şekilden de görülebileceği gibi düşük sıcaklıklardaki ölçümlerde özellikle düşük frekanslardaki iletkenlik değerleri, kullanılan LZO metrenin ölçüm aralığı dışında kaldığı için ölçülememiştir. Artan sıcaklıkla düşük frekanslardaki iletkenlik değerleri de ölçülebilir hale gelmiştir. Şekil 4.9’dan açıkça görülebileceği gibi katkısız CdS ince filmin a.c. iletkenliği, hemen her frekans değeri için artan sıcaklıkla artmaktadır. Artan sıcaklıkla iletkenlikteki artışın, düşük frekanslar için daha fazla olduğu yüksek frekanslarda ise iletkenliğin sıcaklıkla daha yavaş arttığı görülmüştür.



Şekil 4.9. Katkısız CdS filmde frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı

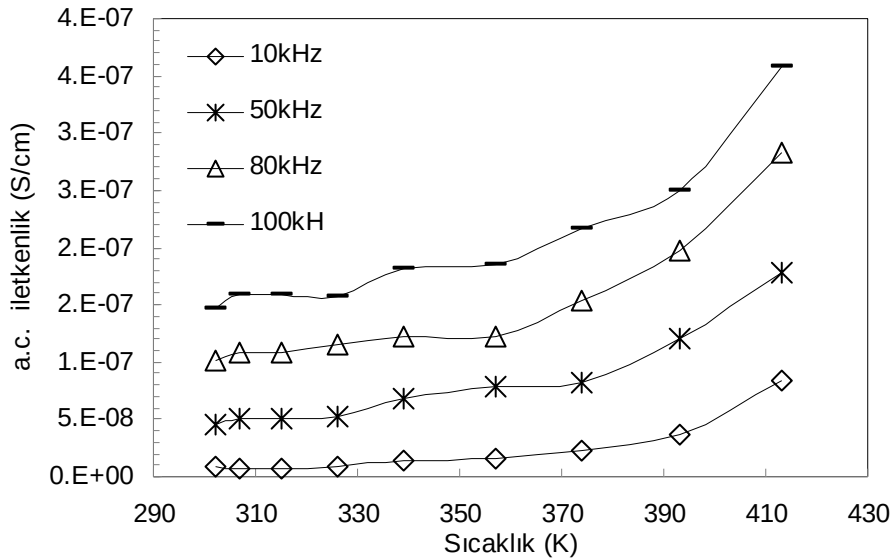
A.C. iletkenliğin frekansa bağlılığının incelenmesinde, 302 K ile 339 K arasındaki sıcaklık değerleri için a.c. iletkenlik frekans ile doğrusal olarak değişirken 339 K'den daha yüksek sıcaklıklar için iletkenliğin frekansa bağlılığın farklı eğimlere sahip iki bölgeden oluştuğu görülmüştür. Bu bölgeler, düşük frekans bölgesindeki neredeyse frekanstan bağımsız bir iletkenliğin gözlemlendiği “düşük frekans bölgesi” ve iletkenliğin kuvvetle frekansa bağlı olduğu “yüksek frekans bölgesi” dir. Yine bu ölçümlerde, iletkenliğin kuvvetle frekansa bağlı olmaya başladığı frekans değerinin artan sıcaklıkla yüksek frekanslara doğru kaydığı görülmüştür. Bu ölçümlerden, hemen her sıcaklıktaki a.c. iletkenliğin frekansa bağlılığı,

$$\sigma = A(T)\omega^{s(T)} \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebileceği görülmüştür. Burada,  $A(T)$  ve  $s(T)$  sıcaklığa bağlı parametreler  $\omega$  da açısal frekanstır. Filmler deki elektriksel yük iletim mekanizmalarını aydınlatmak amacıyla her bir sıcaklıkta ölçülen frekansa bağlı

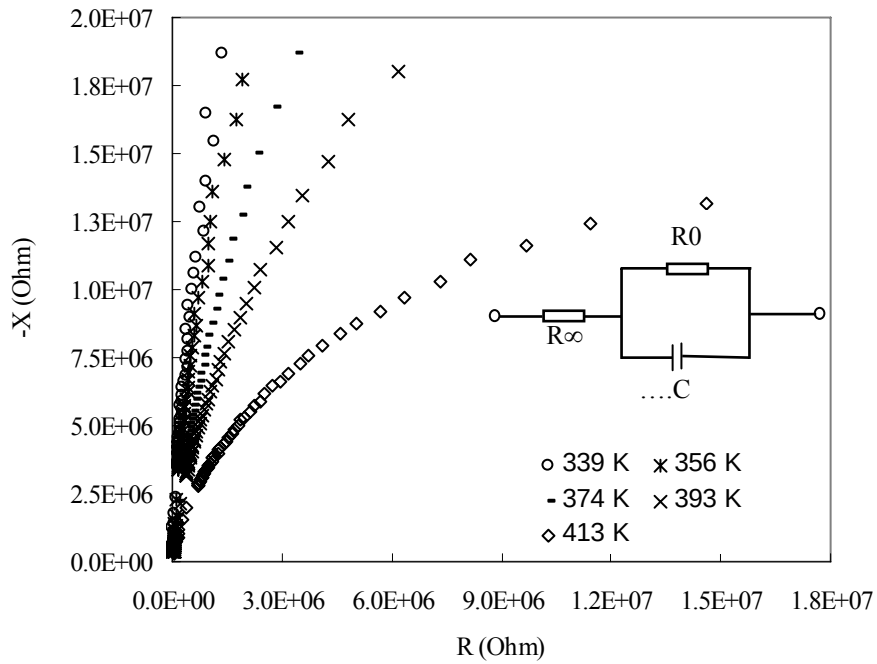
iletkenlik grafiğinin (Şekil 4.9) yüksek frekans bölgesindeki doğrusal kısmının eğiminden frekansın üssü olan  $s(T)$  parametresi hesaplanmış ve katkısız CdS film için  $s(T)$  parametresinin artan sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Hesaplamalar,  $s(T)$  parametresinin oda sıcaklığında ki değerinin 1.22 iken 413 K'deki değerinin ise 0.54 değerine indiğini göstermiştir.

Katkısız CdS filmin sabit frekanslarda (10 kHz, 50 kHz, 80 kHz ve 100 kHz) iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim incelenmiş ve bu değişimin iki farklı bölgeden oluştuğu görülmüştür (Şekil 4.10). Bu bölgelerin iletkenliğin, sıcaklıkla daha yavaş arttığı düşük sıcaklık bölgesi ve iletkenliğin sıcaklıkla çok daha hızlı arttığı yüksek sıcaklık bölgelerinden oluştuğu görülmüştür. Örneğin 80 kHz sabit frekansında ölçülen iletkenliğin sıcaklığa bağlılığında oda sıcaklığı ile yaklaşık 353 K sıcaklık aralığında bu grafiğin eğimi  $4 \times 10^{-10}$  iken 353 K ile 413 K aralığındaki kısmının eğiminin  $3 \times 10^{-9}$  olduğu görülmüştür. 80 kHz sabit frekansında gözlenen iletkenliğin sıcaklığa bu şekilde bağlılığı diğer sabit frekanslardaki (10 kHz, 50 kHz, ve 100 kHz) ölçümlerde de gözlemlenmiştir.



Şekil 4.10. Katkısız CdS filimde 10, 50, 80 ve 100 kHz sabit frekanslarında ölçülen iletkenliklerin sıcaklıkla değişimi

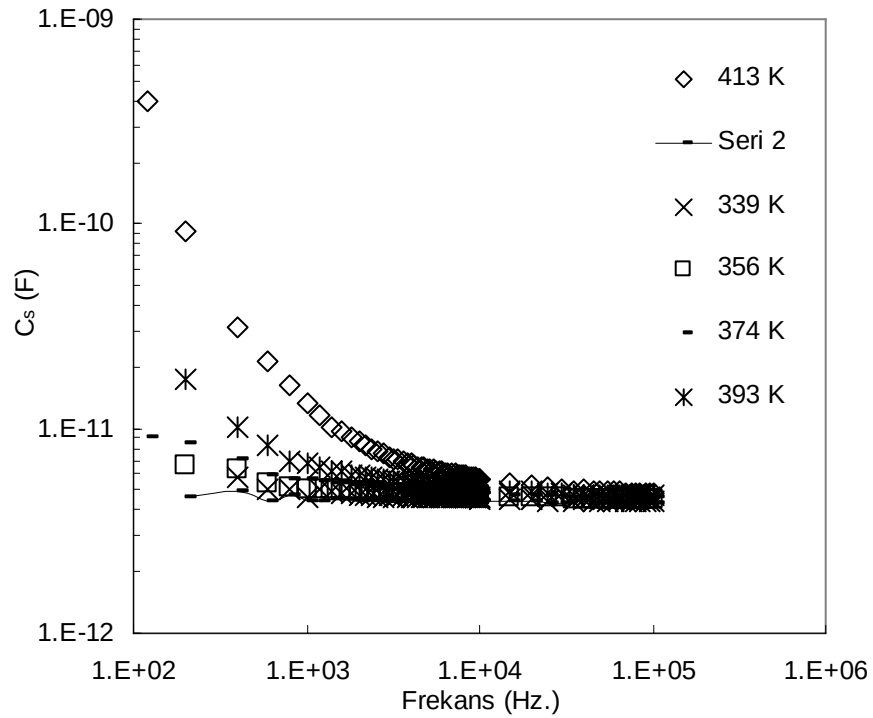
Katkısız CdS filmin empedansının sanal ve gerçek kısımlarının frekansa bağıllığının incelenmesinde değişimin hemen her sıcaklık değeri için yarım daireler oluşturma eğilimindeki eğrilerden oluştuğu görülmüştür. Katkısız CdS'ün 339 K ile 413 K arasındaki beş farklı sıcaklık değerinde ölçülen R-X grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Buradan açıkça görüleceği gibi artan sıcaklıkla bu eğriler yarım daireye daha da yaklaşmaktadır. Empedansın sanal kısmının gerçek kısmına karşı grafiğinde ki (Nyquist çizimi) bu tamamlanmamış yarım daire şeklindeki spektrum, empedansın daha ziyade kapasitif olduğunu göstergesidir. Bu durumda IDT filminden oluşan sistem, Şekil 4.11'in içerisinde gösterildiği gibi bir eşdeğer devreyle temsil edilebilir. Bu durumda, eşdeğer devredeki seri direnç elektrotların yüzey direnci ve bağlantı kablolarından kaynaklanan kayıpları,  $C$  yapının toplam kapasitesini,  $R_0$  direnci de CdS filmin direncini temsil eder.



Şekil 4.11. Katkısız CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği

Katkısız CdS ince filmin farklı sıcaklıklardaki kapasite değerlerinin frekansın fonksiyonu olarak ölçülmesinde; hemen her sıcaklık değeri için kapasitenin düşük frekanslarda artan frekansla hızla azalırken yüksek frekanslarda ise frekanstan

bağımsız olduğu görülmüştür. Ölçülen kapasite değerlerinin sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde ise iki farklı bölge gözlemlenmiştir. Birinci bölge diyebileceğimiz düşük frekans bölgesinde kapasite artan sıcaklıkla artarken yüksek frekans bölgesinde (ikinci bölge) nerdeyse sıcaklıktan bağımsız olduğu görülmüştür (Şekil 4.12).

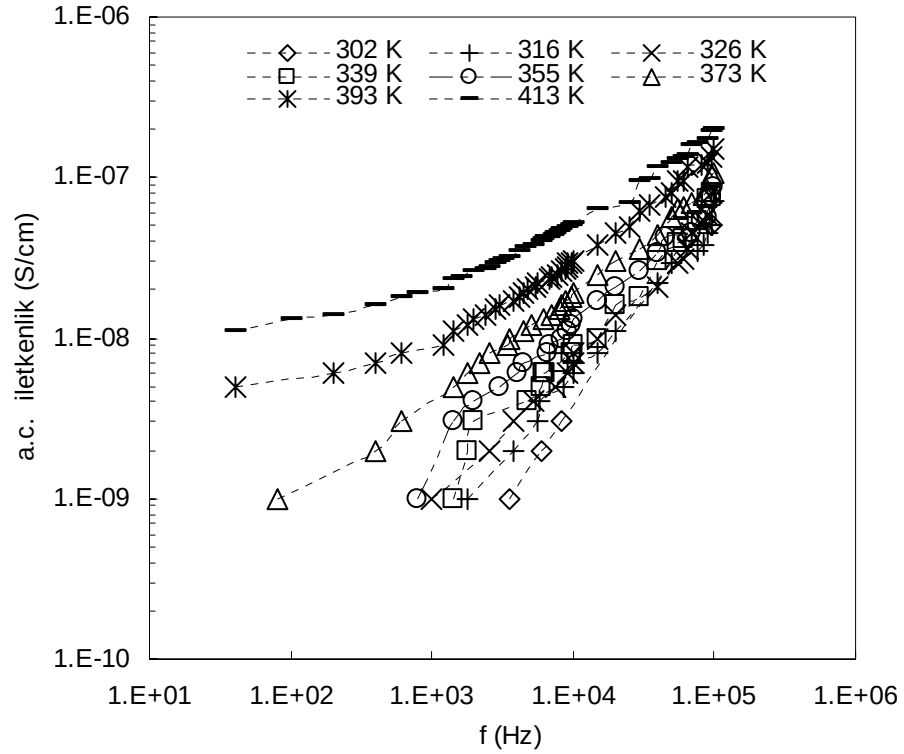


Şekil 4.12. Katkısız CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda kapasite değerleri

#### 4.3.2 Pb Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları

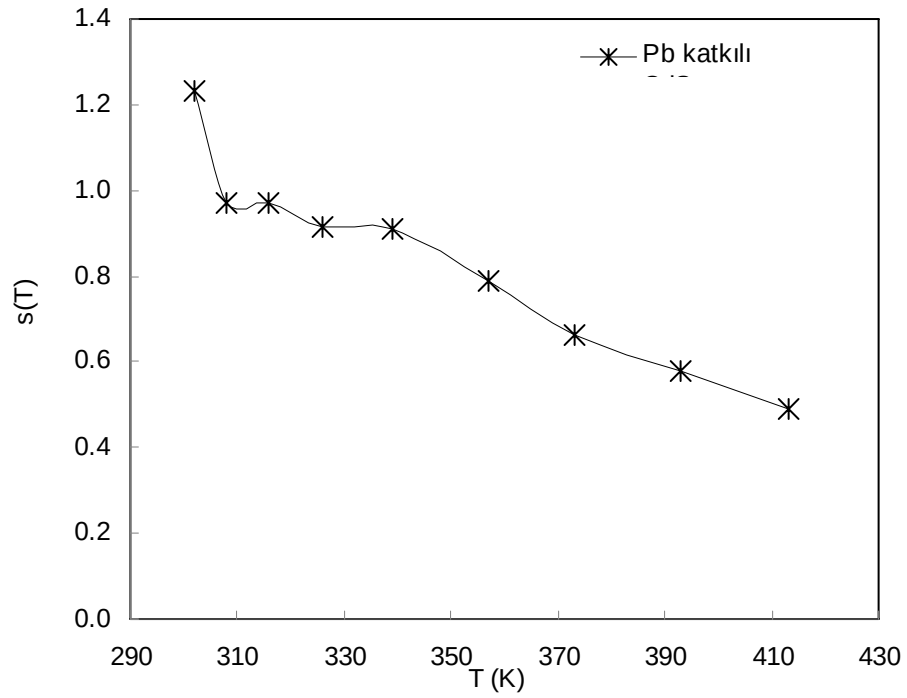
Pb katkılı CdS ince filminin a.c. iletim mekanizmasının anlaşılması ve iletim mekanizmasının hangi parametrelere bağlı olduğunu belirlemek amacıyla, sıcaklığa ve frekansa bağlı iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. Bu ölçümlerden, Pb katkılamanın CdS ince filmlerin iletkenliklerinde bir düşüşe neden olduğu görülmüştür. Pb katkılı CdS'ün 302 K ile 413 K sıcaklık aralığında ve 40 Hz-100kHz frekans aralığında gerçekleştirilen iletkenlik ölçümlerinden elde edilen bulgular Şekil 4.13'de

sunulmuştur. İletkenliğin, 302-373 K sıcaklık aralığında, artan frekans ile doğrusal olarak artarken, 393-413 K aralığında iletkenliğin özellikle düşük frekanslar için neredeyse frekanstan bağımsız olduğu, yüksek frekanslarda ise iletkenliğin kuvvetle frekansa bağlı hale geldiği görülmüştür.



Şekil 4.13. Pb katkılı CdS ince filminin frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı

Bu şekilden de görülebileceği gibi düşük sıcaklıklardaki ölçümlerde özellikle düşük frekanslardaki iletkenlik değerleri, kullanılan LZC metrenin ölçüm aralığı dışında kaldığı için ölçülememiştir. Artan sıcaklıkla düşük frekanslardaki iletkenlik değerleri de ölçülebilir hale gelmiştir. Pb katkılı filmin a.c. iletkenliklerinin sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde, düşük frekanslarda iletkenlik artan sıcaklıkla hızla artarken yüksek frekanslarda iletkenliğin artış hızının azaldığı görülmüştür. Şekil 4.13'deki grafiklerin eğiminden,  $\sigma = A(T)\omega^{s(T)}$  denklemi kullanılarak  $s(T)$  parametreleri hesaplanmıştır. Pb katkılamanın CdS filmin hesaplanan  $s(T)$  parametrelerinin büyüklüğü ve sıcaklığa bağlılığı üzerinde fazlaca etkisinin olmadığı görülmüştür (katkısız CdS'de  $s(T)$  parametresi 1.22 ile 0.54 arasında değişirken Pb katkılı CdS'de 1.23 ile 0.49 arasında değişmektedir). Pb katkılı CdS'de  $s(T)$  parametresinin sıcaklıkla değişimi Şekil 4.14'de gösterilmiştir.

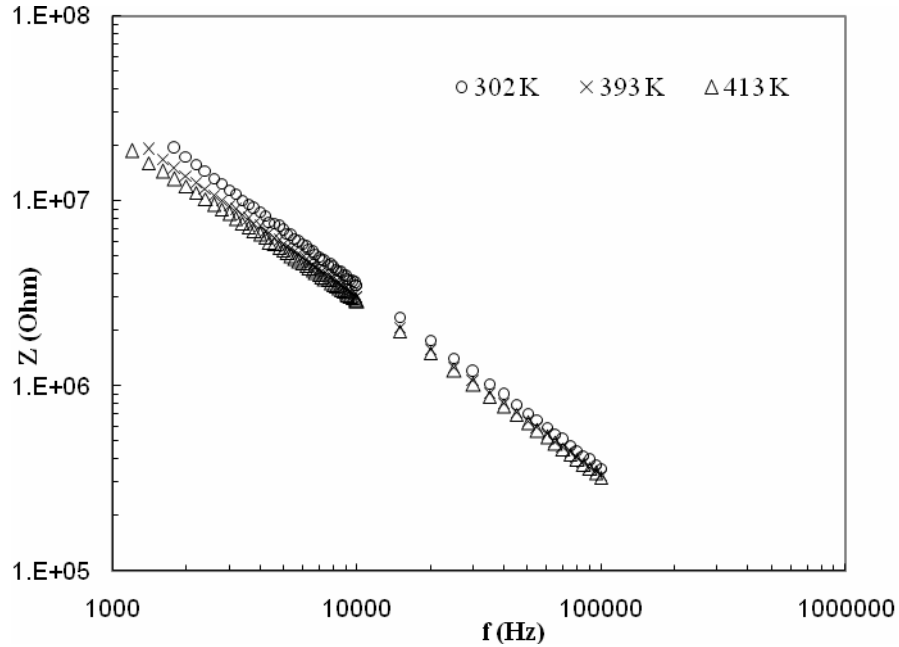


Şekil 4.14. Pb katkılı CdS’de  $s(T)$  parametresinin sıcaklıkla değişimi

Şekil 4.14’den açıkça görüleceği gibi  $s(T)$  parametresi artan sıcaklıkla nerdeyse doğrusal olarak azalmaktadır. Pb katkılı CdS filmin sabit frekanslardaki iletkenlik değerlerinin sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde katkısız CdS filmde olduğu gibi iki farklı bölge gözlemlenmiştir. Bu bölgelerin yine katkısız CdS filmde olduğu gibi, oda sıcaklığı ile 353 K arasındaki iletkenliğin nispeten daha yavaş arttığı düşük sıcaklık bölgesi ile 353 K ile 413 K arasındaki iletkenliğin daha hızlı arttığı yüksek sıcaklık bölgesinden oluştuğu gözlemlenmiştir.

Pb katkılı CdS filmin empedans (empedansın gerçek kısmının sanal kısmına karşı değişimi) ölçümlerinin, katkısız CdS filmde olduğu gibi, yarım daireler oluşturma eğilimindeki eğrilerden oluştuğu görülmüştür. Dolayısıyla, Pb katkılı CdS kaplı IDT’den oluşan sistem katkısız CdS ile benzer bir eşdeğer devre ile gösterilebileceği sonucuna varılmıştır. Bu ölçümlerde ayrıca, Pb katkılanmanın özellikle empedansın sanal kısmında bir artışa neden olduğu görülmüştür. Yani, aynı sıcaklık değerinde ölçülen R-X eğrilerinin yarıçapının Pb katkılanmış filmde daha büyük olma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. Pb katkılı CdS’ün farklı

sıcaklıklarda ölçülen frekansa bağlı empedans değişimleri Şekil 4.15’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Pb katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ölçülen empedans değerlerinin frekansa bağlılığı

Şekil 4.15’den açıkça görüleceği gibi her sıcaklık değeri için empedans artan frekansla doğrusal olarak azalmaktadır. Şekil 4.15’deki negatif eğimli doğruların eğimi sırasıyla, -0.99, -0.95 ve -0.92 olarak hesaplanmıştır. Bu da göstermektedir ki  $\ln f - \ln Z$  grafiklerinin eğimi -1’e çok yakındır ve artan sıcaklıkla az da olsa azalmaktadır.  $\ln f - \ln Z$  grafiklerinin eğiminin -1’e çok yakın olması film içerisindeki elektronik davranışların kapasitif etkilerinin daha dominant olduğunun göstergesidir.

Pb katkılı CdS filmin kapasitesinin yine değişik sıcaklıklarda frekansa bağlı olarak incelenmesinde, hemen her sıcaklık için kapasite değerlerinin düşük frekanslarda artan frekansla hızlı bir şekilde azalırken yüksek frekanslarda neredeyse frekanstan bağımsız hale geldiği görülmüştür. Yine bu ölçümlerde, düşük frekans kapasite değerlerinin artan sıcaklıkla hızlı bir şekilde artarken yüksek frekanslarda ise bu artışın oldukça az olduğu ve hemen-hemen tüm sıcaklıklar için kapasite değerinin aynı bir değere gitme eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir.

### 4.3.3 Zn Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları

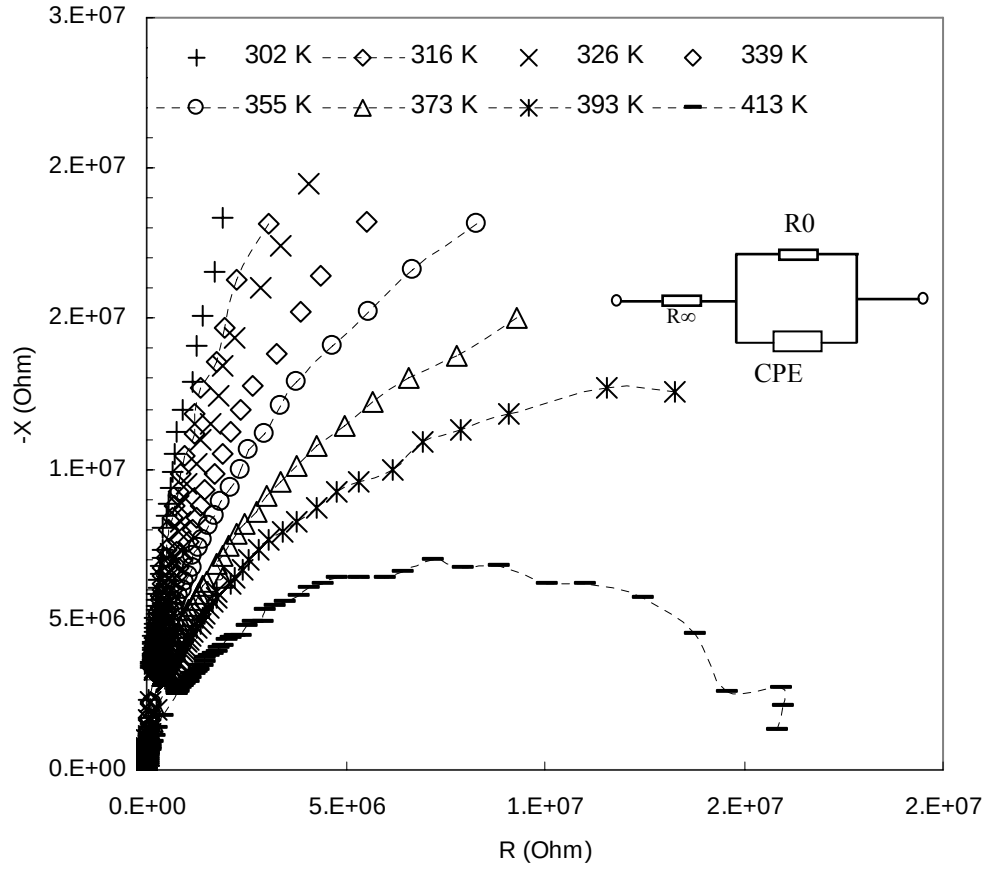
Zn katkılı CdS ince filmlerde de a.c. ölçümler (iletkenlik, kapasite, empedans gibi) yine aynı sıcaklık ve frekans aralıklarında gerçekleştirilmiştir. Zn katkılı CdS filmin değişik sıcaklıklarda ölçülen iletkenliklerinin frekansa bağılılıklarının katkısız CdS filminkine benzediği görülmüştür. Zn katkılamanın CdS filmin düşük frekans iletkenlik değerlerinde bir artış oluştururken yüksek frekans iletkenlik değerlerinde az da olsa bir azalmaya neden olduğu görülmüştür. Gerek katkısız gerekse Pb katkılı CdS filmlerin yüksek sıcaklıktaki ölçümlerinde gözlenen iletkenliğin frekansa bağılılığındaki farklı iki bölge davranışı bu filmde de gözlemlenmiştir. Yani, yüksek sıcaklıklarda a.c. iletkenlik frekansın düşük değerleri için nerdeyse frekanstan bağımsız iken yüksek frekanslarda kuvvetle frekansa bağlı hale gelmektedir. Zn katkılı CdS filmde de düşük sıcaklıklarda düşük frekans iletkenlikleri ölçülememiştir. Artan sıcaklıkla düşük frekanslardaki iletkenlik değerleri de ölçülebilir hale gelmiştir.

Zn katkılı CdS filmde değişik sıcaklıklarda frekansa bağlı olarak yapılan iletkenlik ölçümlerinde iletkenliğin artan frekansla arttığı görülmüştür. Ayrıca, artan frekansla iletkenlikteki artışın düşük ve yüksek frekans bölgelerinde ayrı hızlarda olduğu görülmüştür. Düşük frekanslarda iletkenlik daha yavaş artarken yüksek frekanslarda daha hızlı artmaktadır. a.c. iletkenliğin sıcaklığa bağılılığının incelenmesinde ise iletkenliğin artan sıcaklıkla arttığı, iletkenlikteki artışın, düşük frekanslar için daha fazla olduğu yüksek frekanslarda ise iletkenliğin sıcaklıkla daha yavaş arttığı görülmüştür. Ölçülen a.c. iletkenlik değerlerinden hesaplanan frekansın üssü olan  $s(T)$  parametresinin de artan sıcaklıkla azaldığı, 302 K’de 0.66 iken 413 K’de 0.33’e indiği görülmüştür.

Zn katkılı CdS’ün sabit frekanslarda ölçülen iletkenliklerinin sıcaklığa bağılılığının katkısız ve Pb katkılı CdS filmlerin davranışına benzediği görülmüştür.

Şekil 4.16 Zn katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ve  $40\text{-}10^5$  Hz frekans aralığındaki ölçülen empedansın sanal ve gerçek kısımlarının değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğin düşük sıcaklıklarda (302 K ile 393 K) yarım daire oluşturma

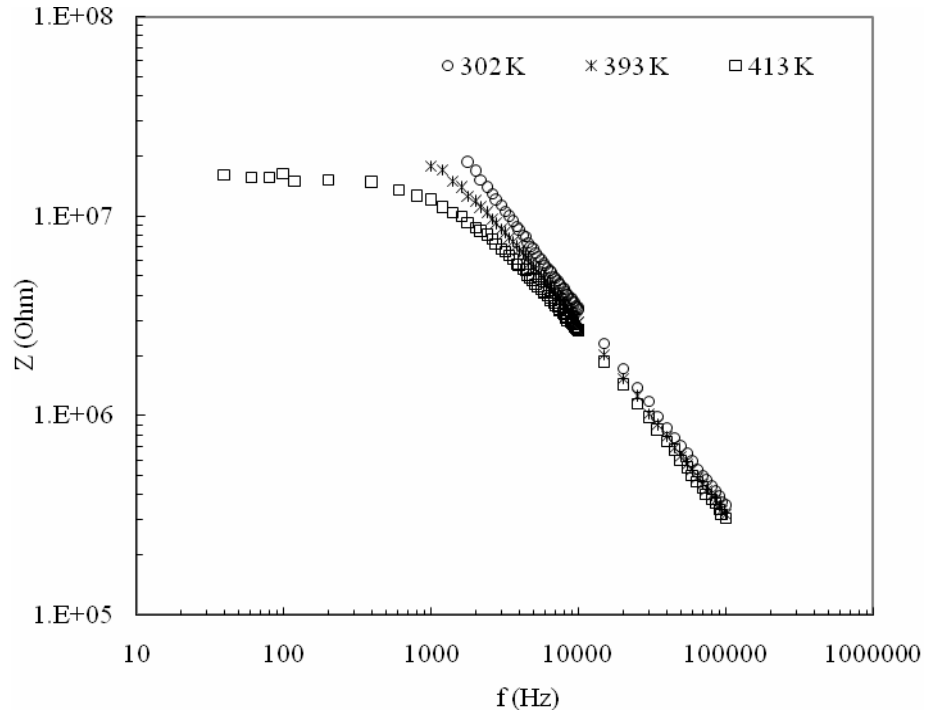
eğilimindeki eğrilerden oluşurken, 413 K'deki karakteristiğinin de üstten bastırılmış bir yarım daire şeklinde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.16. Zn katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği

Bu şekilde bastırılmış yarım daire şeklindeki empedansın gerçek kısmının sanal kısmına karşı grafikleri durumunda eşdeğer devredeki C kapasitörünün yerine bir sabit faz elemanı (CPE) bağlanmalıdır.

Ölçülen empedans değerlerinin frekansa bağlılığının incelenmesinden de açıkça görüleceği gibi (Şekil 4.17)  $\ln f - \ln Z$  grafiğinin eğimi 413 K dışındaki sıcaklıklar için -1'e çok yakın bir değer iken 413 K'de eğim yaklaşık olarak -0.5 değerindedir.  $\ln f - \ln Z$  grafiğinde eğimin -0.5 civarında olması devrede bir CPE elemanının bulunduğu göstergesidir.



Şekil 4.17. Zn katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ölçülen empedans değerlerinin frekansa bağlılığı

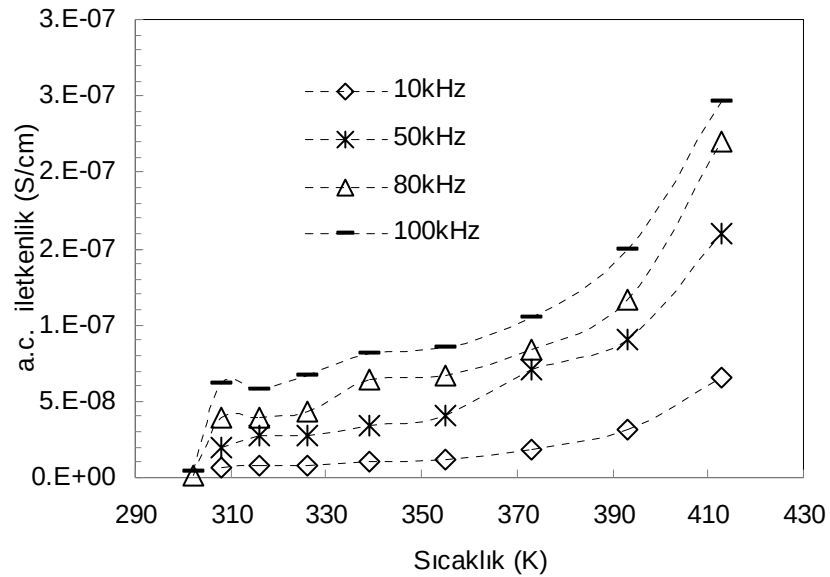
Zn katkılı CdS filmin kapasitesinin sıcaklığa ve frekansa bağlı olarak incelenmesinde elde edilen sonuçların katkısız CdS filminkine benzediği yani kapasitenin, artan sıcaklıkla arttığı ve artan frekansla da azaldığı görülmüştür. Yüksek frekanslardaki kapasite değerlerinin de sıcaklıktan bağımsız olarak frekansa bağlı olmadıkları gözlemlenmiştir.

#### 4.3.4 Se Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları

Se katkılı CdS filmin, 6 farklı sıcaklık için 40 Hz ile  $10^5$  Hz frekans aralığında iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. 308 K ile 393 K aralığındaki sıcaklıklar için, iletkenliğin artan frekansla doğrusal olarak arttığı yüksek sıcaklıklarda ise iletkenliğin frekansa bağıllığının düşük ve yüksek frekans bölgesi olmak üzere iki farklı bölgeden oluştuğu gözlemlenmiştir. Düşük frekans bölgesinde a.c. iletkenlik artan frekansla yavaş da olsa bir miktar artarken, yüksek frekans bölgesinde iletkenlik artışı kuvvetle frekansa bağlı hale gelmiştir. Her bir sıcaklık değeri için, ölçülen frekansa bağlı iletkenlik değerlerinden frekansın üssü olan  $s(T)$  parametresi

hesaplanmış ve Se katkılı CdS film içinde,  $s(T)$  parametresinin artan sıcaklıkla azaldığı görülmüştür. Hesaplamalar  $s(T)$  parametresinin değerinin 0.90 ile 0.50 arasında değiştiğini göstermiştir.

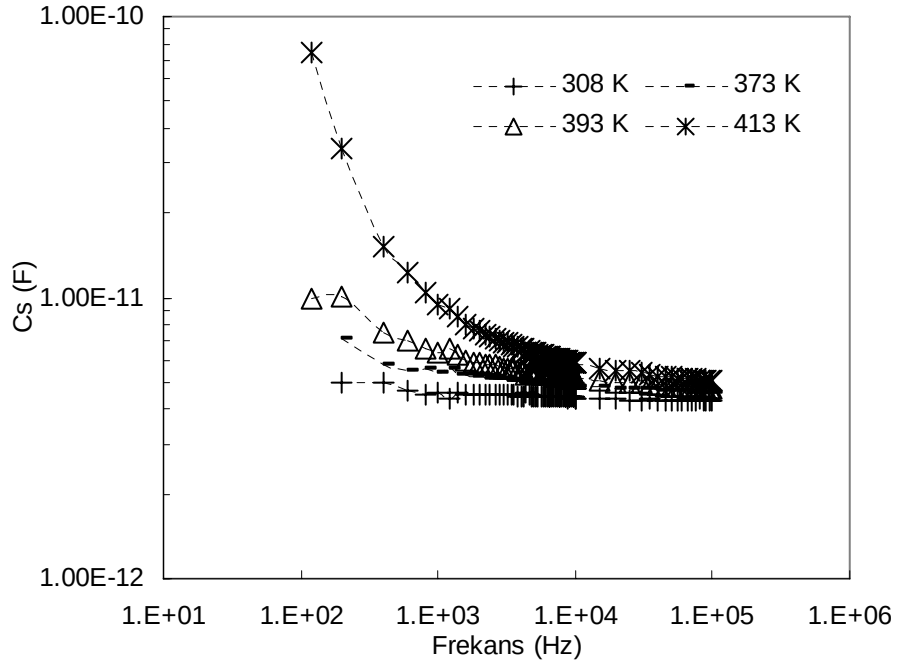
Se katkılı CdS filmin 10 kHz, 50 kHz, 80 kHz ve 100 kHz sabit frekanslarındaki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim incelenmiş ve elde edilen bulgular Şekil 4.18’de gösterilmiştir. Bu ölçümlerde her bir sabit frekanslardaki iletkenliğin sıcaklıkla değişiminin iki farklı eğime sahip bölgeden oluştuğu görülmüştür. İletkenlik yaklaşık olarak 373 K’e kadar ki sıcaklık değerleri için yavaş bir şekilde artarken 373 K’den daha yüksek sıcaklıklarda iletkenliğin artış hızının yükseldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.18. Se katkılı CdS’ün gösterilen frekanslardaki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişimi

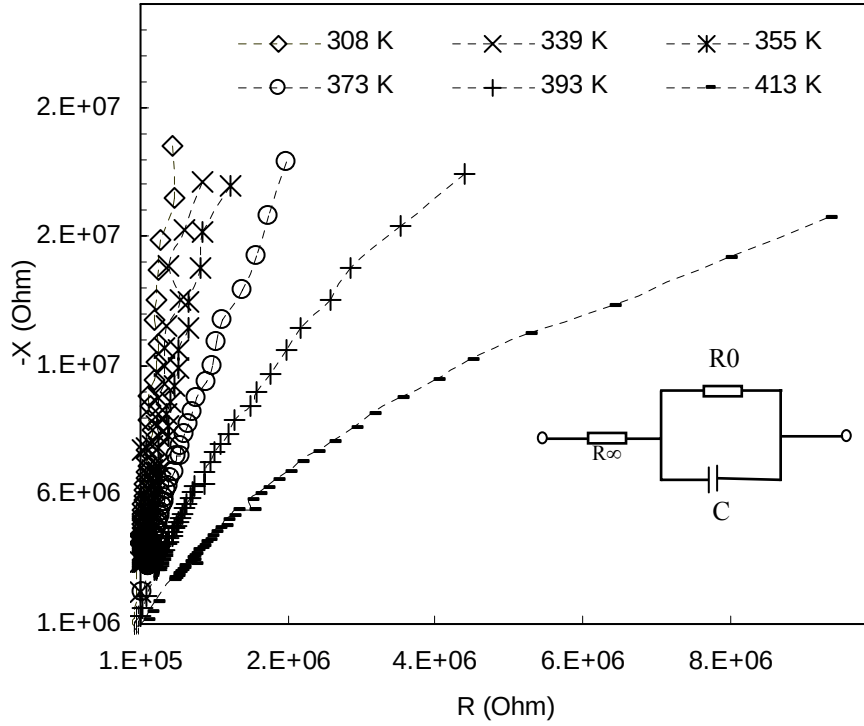
Se katkılı CdS ince filmin kapasitesinin frekansa bağıllığı 308 K ile 413 K arasındaki farklı sıcaklık değerlerinde ölçülmüş ve elde edilen sonuçlar Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Şekildeki ölçüm sonuçlarından görülmektedir ki kapasite değerleri, düşük frekanslarda artan frekansla hızla azalırken yüksek frekanslarda neredeyse frekanstan bağımsız hale gelmektedir. Bu davranış, ölçüm yapılan tüm sıcaklıklarda gözlemlenmiştir. Kapasitenin sıcaklığa bağıllığının incelenmesinde, hemen her frekans değeri için kapasitenin artan sıcaklıkla yükseldiği bulunmuştur. Kapasitedeki

artış miktarının düşük frekanslarda daha büyük olduğu yüksek frekanslarda ise artışın azaldığı görülmüştür.



Şekil 4.19. Se katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklardaki kapasite değerleri

Se katkılı CdS filmin empedansının sanal ve gerçekte kısımlarının frekansa bağlılığının incelenmesinde değişimin, 308 K ile 355 K sıcaklıkları arasında doğrusal olduğu 373 K ile 413 K sıcaklıkları aralığında tamamlanmamış daire oluşturma eğilimindeki eğrilerden oluştuğu gözlemlenmiştir (Şekil 4.20). Bu şekildeki empedans spektrumu, gösterildiği gibi paralel bağlı bir direnç ile bir kondansatöre seri olarak bağlanmış bir dirençten oluşan, bir eşdeğer devre ile gösterilebilir. Ayrıca, henüz tamamlanmamış olan yarım dairelerin yarıçapları artan sıcaklıkla azalma eğilimindedir.



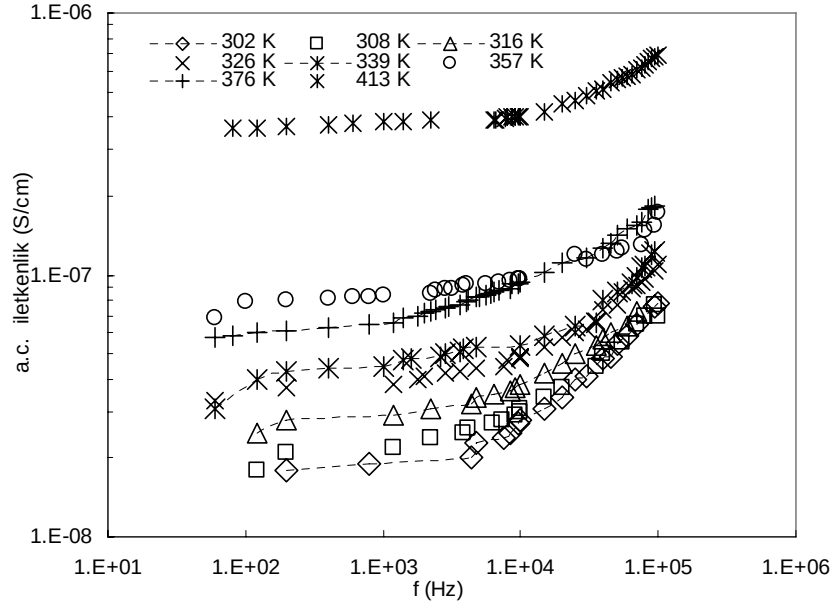
Şekil 4.20. Se katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği

#### 4.3.5 In Katkılı CdS İnce Filminin A.C. Ölçüm Bulguları

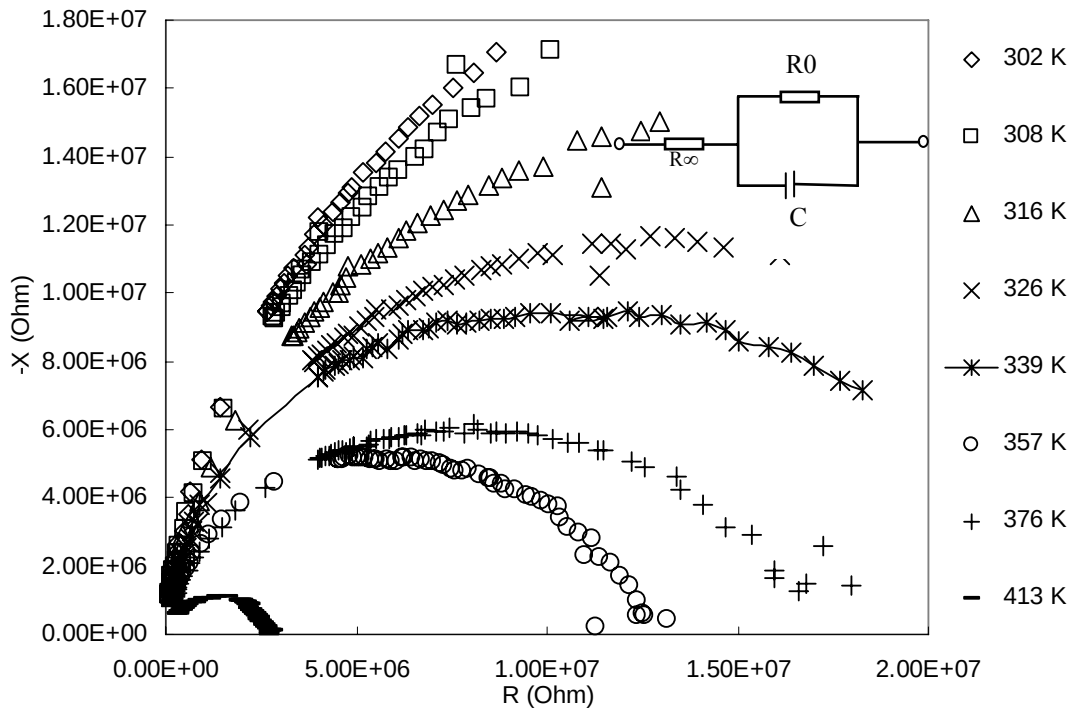
In katkılı CdS filmin 302 K ile 413 K sıcaklık aralığında ki 8 farklı sıcaklıkta ölçülen iletkenliğinin frekansla değişimi Şekil 4.21'de gösterilmiştir. Bu filmin a.c. iletkenliğinin frekansa bağlılığının incelenmesinde, genel olarak iki farklı frekans bölgesi gözlemlenmiştir. Bu bölgelerden düşük frekans bölgesinde a.c. iletkenlik artan frekansla yavaş ya da olsa bir miktar artarken, ikinci bölge olan yüksek frekans bölgesinde iletkenliğin frekansla daha hızlı artmaya başladığı gözlemlenmiştir. a.c. iletkenliğin sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde ise, iletkenliğin artan sıcaklıkla arttığı, iletkenlikteki artışın düşük frekanslar için daha fazla olduğu; yüksek frekanslarda ise iletkenliğin sıcaklıkla daha yavaş arttığı görülmüştür. Ölçülen a.c. iletkenlik değerlerinden hesaplanan frekansın üssü olan  $s(T)$  parametresinin de artan sıcaklıkla azaldığı, 302 K'de 0.35 iken 413 K'de 0.16'ya indiği görülmüştür.

In katkılı CdS filmin 10 kHz, 50 kHz, 80 kHz ve 100 kHz sabit frekanslarındaki iletkenliklerinin sıcaklıkla değişim incelenmiş ve her bir sabit

frekanslardaki iletkenliğin sıcaklıkla değişiminin iki farklı eğime sahip farklı iki bölgeden oluştuğu görülmüştür. İletkenlik yaklaşık olarak 373 K'e kadar ki sıcaklık değerleri için yavaş bir şekilde artarken 373 K'den daha yüksek sıcaklıklarda iletkenliğin artış hızının arttığı gözlemlenmiştir.



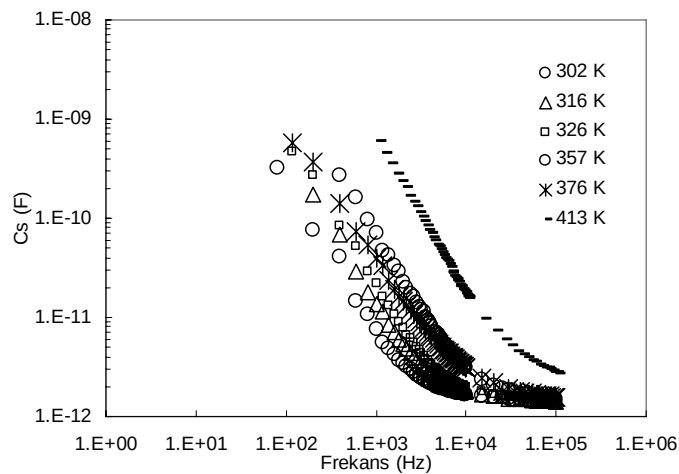
Şekil 4.21. In katkılı CdS ince filminin frekansa bağlı iletkenliğin sıcaklığa bağlılığı



Şekil 4.22. In katkılı CdS'ün gösterilen sıcaklıklarda ölçülen R-X grafiği

Şekil 4.22’de In katkılı CdS filmin farklı sıcaklıklarda ve  $40\text{-}10^5$  Hz frekans aralığında ölçülen empedansın sanal ve gerçek kısımlarının değişimi gösterilmiştir. Bu grafiğin düşük sıcaklıklarda (302 K ile 376 K arası) aşağı doğru eğilme eğiliminde olan dairesel eğrilerden oluştuğu görülmüştür. Bu şekildeki empedans spektrumu, gösterildiği gibi paralel bağlı bir direnç ile bir kondansatöre seri olarak bağlanmış bir dirençten oluşan bir eşdeğer devre ile gösterilebilir. Ayrıca sıcaklığın filmin empedans spektrumu üzerindeki etkisi açık bir şekilde görülmektedir. Yani, sıcaklık arttıkça düşük sıcaklıklardaki eğriler yarım dairelere dönüşmektedir. Bu yarım dairelerin yarıçapı da artan sıcaklıkla azalmaktadır. Bu durumda yapıyı temsil eden elektriksel eşdeğer devredeki kondansatör bir sabit faz elemanı ile değiştirilmelidir.

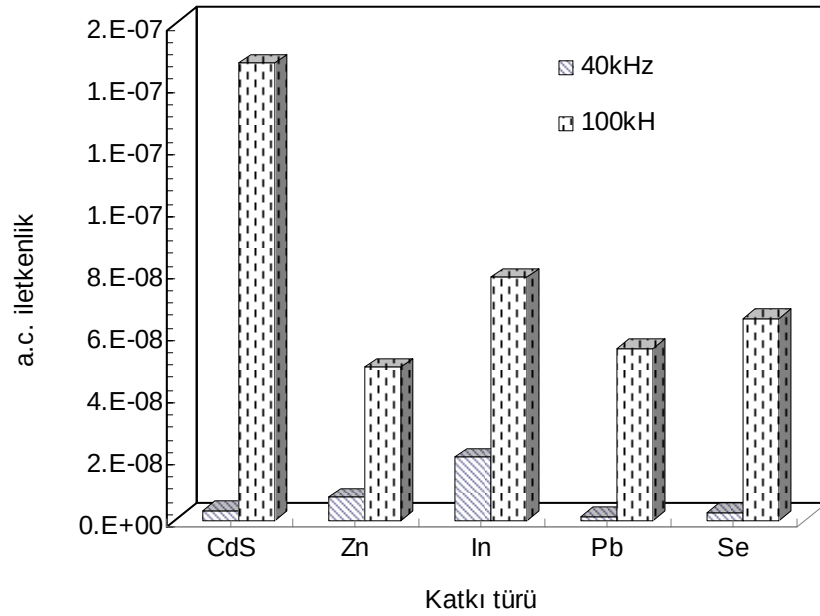
In katkılı CdS filmde farklı sıcaklıklarda frekansın fonksiyonu olarak yapılan kapasite ölçümlerinden elde edilen bulgular Şekil 4.23’de sunulmuştur. Bu şekilden açıkça görülmektedir ki kapasite, artan frekansla hızla azalmakta daha sonra kapasitedeki düşüş hızı azalarak sabit bir değere gitme eğilimi göstermektedir. Kapasite değerlerinin bu şekilde frekans bağıllığı ölçülen tüm sıcaklıklarda gözlemlenmiştir. In katkılı CdS’de ölçülen kapasite değerlerinin sıcaklığa bağıllığının incelenmesinde ise kapasitenin, artan sıcaklıkla arttığı ve kapasitedeki bu artışın düşük frekanslarda daha büyük iken yüksek frekanslarda daha az arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.23. In katkılı CdS’ün gösterilen sıcaklıklarda frekansın fonksiyonu olarak ölçülen kapasite değerleri

Katkı türünün CdS filmlerin d.c. elektriksel iletkenliklerine etkisinin topluca değerlendirilmesinde Se ve Pb katkılamanın CdS filmin gerek düşük sıcaklıklardaki gerekse yüksek sıcaklıklardaki d.c. iletkenliklerini fazlaca etkilemediği oysa Zn ve In katkılamanın hem düşük sıcaklıklardaki hem de yüksek sıcaklıklardaki d.c. iletkenliklerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Katkılı ve katkısız CdS filmlerin a.c. özelliklerinin belirlenmesine yönelik yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçların topluca değerlendirilmesinde, katkı malzemesinin CdS filmin a.c. iletkenliği üzerindeki etkisinin düşük frekans ve yüksek frekanslar için farklı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.24 katkı türünün düşük (4000 Hz) ve yüksek ( $10^5$  Hz.) frekanslarda oda sıcaklığında ölçülen a.c. iletkenlikleri üzerindeki etkisini göstermektedir. Düşük frekanslarda In ve Zn katkısı CdS filmin a.c. iletkenliğinde bir artışa neden olurken Pb ve Se katkısının a.c. iletkenlikte bir azalmaya neden olmaktadır. Yüksek frekanslarda ise, tüm katkı türleri CdS filmin a.c. iletkenliğinde bir azalmaya neden olmaktadır.



Şekil 4.24. 40 ve 100kHz sabit frekanslarında ölçülen iletkenliklerin katkı türüne göre sıcaklıkla değişimi

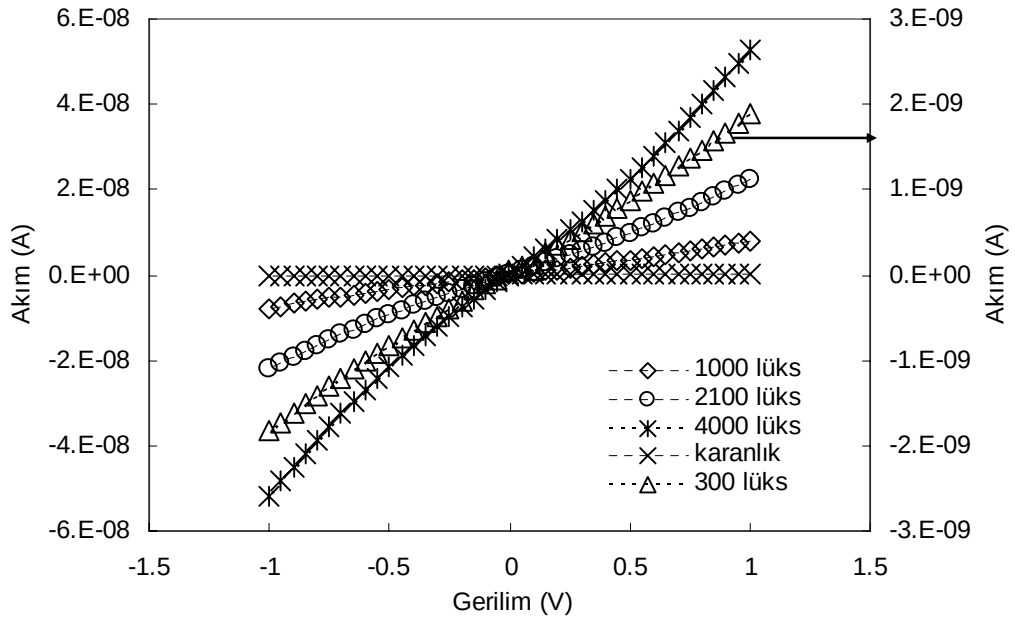
## 4.4 Fotoiletkenlik Ölçümlerinden Elde Edilen Bulgular

Bu bölüm, CBD yöntemiyle hazırlanan katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin karanlık ve değişik aydınlanma şiddetlerindeki iletkenlik ölçümlerinden elde edilen bulgularla dalga boyuna bağlı olarak ölçülen iletkenlik ölçümlerinden elde edilen bulguların sunulmasına ayrılmıştır. Katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin iletkenlikleri 4 farklı ışık şiddeti için ölçülmüştür (300 lüks, 1000 lüks, 2100 lüks, 4000 lüks). Işık şiddetinin filmlerin d.c. iletkenliklerine etkisi oda sıcaklığında ve atmosfer koşullarında I-V karakteristikleri ölçülmek suretiyle belirlenmiştir. Gelen ışığın CdS filmlerin d.c. iletkenliklerine etkisi (foto iletkenlik ölçümleri) ise 300 nm ve 1100 nm dalga boyları arasında dalga boyu-iletkenlik ölçümleri yapılmak suretiyle belirlenmiştir. Aşağıda bu iki grup ölçümlerden elde edilen sonuçlar kısaca verilmiştir.

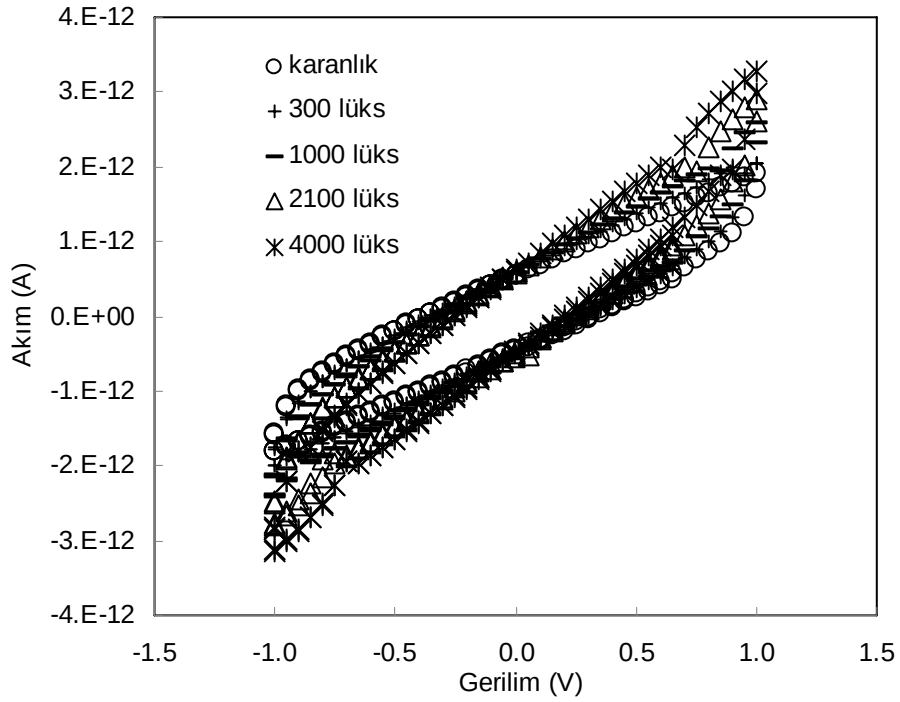
### 4.4.1 Aydınlanma Şiddetine Bağlı Ölçüm Bulguları

Gerek katkılı gerekse katkısız CdS ince filmlerin özellikle güneş pili olarak kullanılıp-kullanılamayacaklarını belirlemek amacıyla ışık şiddetinin filmlerin d.c. iletkenliklerine etkisi belirlenmiştir. Şekil 4.25 aydınlanma şiddetinin katkısız CdS filmin d.c. iletkenliği üzerine etkisini göstermektedir. Aydınlanma şiddeti arttıkça filmin I-V grafiğinin eğimi de artmaktadır. Karanlık ortamda ölçülen I-V grafiği eğimi  $2 \times 10^{-11}$  iken aydınlanma şiddetinin (4000 lüks) olduğu durumdaki eğim  $5 \times 10^{-8}$  olmuştur.

CdS filmlerin d.c. iletkenliklerinin aydınlanma şiddetine bağlı olarak değişimlerinin katkı maddesinin türüne oldukça bağlı olduğu gözlemlenmiştir. Aydınlanma şiddetinin In ve Pb katkılanmış CdS filmlerin d.c. iletkenlikleri üzerinde fazlaca bir etkisi olmazken, Se ve Zn katkılanmış filmlerin d.c. iletkenliklerinin aydınlanma şiddetine oldukça duyarlı hale geldiği görülmüştür. Katkısız CdS filmde 4000 lüks aydınlanma şiddetindeki iletkenliğin karanlık ortamdaki iletkenliğin 2500 katı olduğu gözlemlenirken bu oranın sırasıyla In, Pb, Se ve Zn katkılanmış filmlerde 1.8 kat, 1.5 kat, 1333 kat ve 25000 kat olduğu görülmüştür.



Şekil 4.25. Katkısız CdS filmin farklı aydınlanma şiddetlerindeki I-V karakteristiği



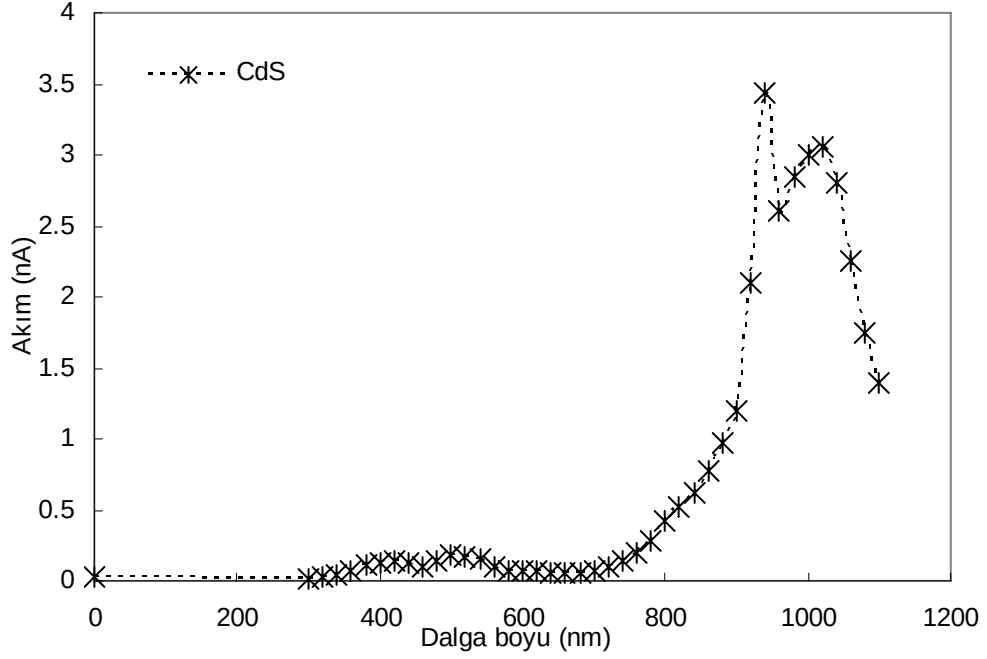
Şekil 4.26. Pb katkılı CdS filmin farklı aydınlanma şiddetlerindeki I-V karakteristiği

Bu sonuçlar açıkça göstermektedir ki aydınlanma şiddetine en duyarlı film Zn katkılı CdS filmidir. Filmlerin aydınlanma şiddetine bağlı olarak yapılan

I-V ölçümlerinde Pb katkılı CdS ince filminin her şiddetteki aydınlanma koşulunda ölçülen I-V karakteristiklerinde histeresis etkisi gözlemlenirken (Şekil 4.26) diğer filmlerde bu etki görülmemiştir. Pb katkılı filmde gözlemlenen histeresis genişliğinin aydınlanma şiddetine bağlı olmadığı görülmüştür.

#### 4.4.2 Dalga Boyuna Bağlı Ölçüm Bulguları

Gerek katkılı gerekse katkısız CdS ince filmlerin en duyarlı olduğu dalga boyunu belirlemek amacıyla filmlerde 300 nm ile 1100 nm dalga boyu aralığındaki ışık için foto iletkenlik ölçümleri yapılmıştır. İncelenen filmlerden katkısız CdS'ün 300 - 1100 nm dalga boyu aralığındaki ışığa tutulması durumunda iletkenliğindeki değişim Şekil 4.27'de gösterilmiştir. CdS filmin karanlık ortamdaki iletkenliği iletkenliği 0.03 nA iken film üzerine ışık düşürülmeye başlandığında akım artmakta ve 420 nm dalga boyunda 0.14 nA değerine ulaşmaktadır. Daha sonra artan dalgaboyu ile akım bir miktar azalarak 460 nm'de 0.105 nA değerine düşmektedir. Bu dalga boyundan sonra akım tekrar artarak 500 nm'de 0.182 nA değerine çıkmakta sonra tekrar azalarak 660 nm'de 0.054 nA değerine düşmektedir. 660 nm'den sonra akım tekrar artarak 940 nm'de maksimum değeri olan 3.43 nA değerine ulaşmaktadır. Bu noktadan sonra akım bir miktar azalarak 960 nm'de 2.6 nA değerine inmektedir. Bu dalga boyundan sonra tekrar artarak 1000 nm'de 3 nA değerine çıkmakta sonrada 1100 nm'de 1.4 nA değerine inmektedir. Katkısız CdS'ün iletkenliğinin dalga boyuna bağlı olarak incelenmesinde, iletkenliğin yukarıda belirtildiği gibi, 420, 500, 940 ve 1000 nm dalga boyundaki ışığa maksimum duyarlık gösterdiği bu dört maksimum arasında da en büyük iletkenlik değişiminin 940 nm dalga boyundaki ışıkta gerçekleştiği gözlemlenmiştir.



Şekil 4.27. Katkısız CdS ince filminin dalga boyuna bağlı iletkenlik grafiği

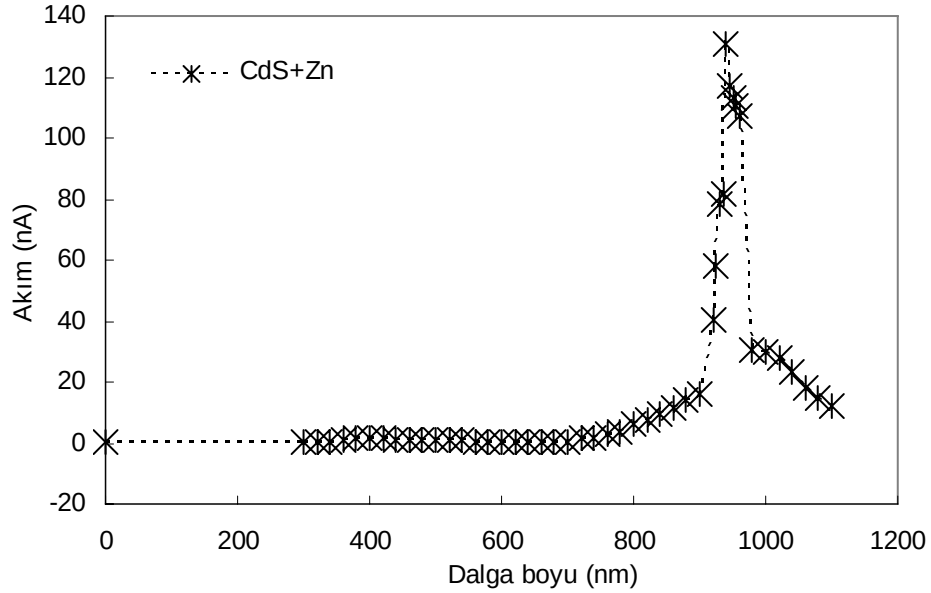
Katkı malzemesinin türüne bağlı olarak CdS filmlerde gözlemlenen foto iletkenlik davranışının büyük ölçüde değişimler gösterdiği görülmüştür. Ölçüm alınan dalga boyu aralığındaki (300-1100 nm) ışığın Pb katkılı CdS filimin iletkenliğinde hiçbir değişim oluşturmadağı gözlemlenmiştir.

In katkılı CdS filmde ise aynı dalga boyu aralığındaki ışığın iletkenlikte sürekli bir artışa neden olduğu ve iletkenliğin karanlık ortamdaki değeri ile 1100 nm ışık altındaki iletkenliği arasındaki farkın yaklaşık olarak 65 kat olduğu gözlemlenmiştir.

Se katkılanmış CdS filmde ise ölçülen  $\lambda$ -dc iletkenlik karakteristiğinin 400 ve 940 nm’de olmak üzere iki tane maksimumu bulunduğu görülmüştür. 940 nm’de gözlemlenen maksimumun 400 nm’ dekinden 12 kat karanlık ortamdaki iletkenlik değerinden de yaklaşık olarak 180 kat daha büyük olduğu görülmüştür.

Işık duyarlılığının en büyük olduğu katkı türünün Zn olduğu görülmüştür. Zn katkılı CdS filmin oda sıcaklığında dalga boyuna bağlı iletkenlik ölçümlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 4.28’de gösterilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi Zn katkılı filmde akım değeri 400, 500 ve 940 nm dalga boylarında maksimum yapmaktadır.

Akımın bu dalga boylarındaki değerleri sırasıyla 1.74 nA, 1.3 nA ve 42.54 nA olarak belirlenmiştir. Zn katkılı filmde maksimum akım değerinin gözlemlendiği 940 nm’deki akım değerinin karanlık ortamdaki akım değerinden yaklaşık olarak 2100 kat daha fazla olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.28. Zn katkılı CdS ince filmin dalga boyuna bağlı iletkenliği

In, Pb, Zn ve Se katkılamanın CdS ince filmlerin foto iletkenlik özellikleri üzerine etkisinin topluca değerlendirilmesinde şu sonuçlar elde edilmiştir.

Pb katkılamanın CdS filmi 300 nm ile 1100 nm dalga boyu arasındaki ışığa duyarsız hale getirdiği görülmüştür.

CdS ince filmlerin ışık duyarlıklarının katkı malzemesinin türüne bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. In katkılamanın karanlık akımında 65 kat, Se katkılamanın 180 kat Zn katkılamanın ise 2100 kat değişim oluşturduğu sonucuna varılmıştır.

## 5.TARTIŞMA VE DEĞERLENDİRMELER

Kimyasal banyo yığma (CBD) metoduyla katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin d.c. ve a.c. elektriksel özelliklerinin sıcaklığa bağlı olarak incelenmesinden elde edilen bulgularla filmlerin, optik (foto iletkenlik ve ışık şiddetine bağlı akım-gerilim ölçümleri) özelliklerinin belirlenmesine yönelik ölçümlerden elde edilen bulguların değerlendirilmesiyle aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Katkılı ve katkısız CdS ince filmleri için 302-413 K sıcaklık aralığında yapılan  $I-V$  ölçümlerinden, katkısız CdS film ve Pb katkılı CdS film için düşük sıcaklıklarda histerisis etkisi görüldüğü ve bu etkinin yüksek sıcaklıklarda kaybolduğu görülmüştür. Düşük sıcaklıklarda gözlemlenen histresis etkisinin derin tuzak seviyelerinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Se, In ve Zn katkılı CdS filmler için histerisis durum, hiçbir sıcaklıkta gözlemlenmemiştir.

Katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin d.c. iletkenliklerinin sıcaklığa bağlılıklarının incelenmesinde,  $\ln \sigma_{dc} - 1/T$  grafiklerinin eğiminin, katkı türüne bağlı olarak az da olsa değiştiği gözlemlenmiştir. Başlangıç malzemesi olarak kullandığımız CdS ince filmin sıcaklığa bağlı ölçülen d.c. iletkenliğini, Se ve Pb katkılamanın çok fazla etkilemediği fakat Zn ve In katkılamanın büyük oranda etkilediği belirlenmiştir. Se, In, Pb, Zn katkılı filmlerin aktivasyon enerjileri sırasıyla 0.91 eV, 0.40 eV, 0.77 eV ve 0.21 eV olarak hesaplanmıştır Bu sonuçlara göre d.c. elektriksel iletim mekanizmasının katkılanan madde türüne bağlı olarak değiştiği söylenebilir. Sıcaklığa bağlı d.c. iletkenlik ölçümler sonucunda oluşturulan  $\ln \sigma_{dc} - 1/T$  grafiğinin eğiminin, hem katkılı hem de katkısız CdS ince filmler için lineer bir doğru oluşturduğu gözlemlenmiş ve d.c. elektriksel iletim mekanizmasının Arrhenius tipi bir davranış gösterdiği belirlenmiştir.

Filmlerin a.c. elektriksel iletkenliklerinin frekansa ve sıcaklığa bağlılığının incelenmesinde filmlerin, a.c. elektriksel özelliklerinin genel anlamda aynı olduğu gözlemlenmiştir. Katkılı ve katkısız CdS filmler için artan sıcaklıkla ve artan frekansla a.c. iletkenlik, artış göstermiştir. Her bir film için sıcaklığa bağlı sabit frekans değerlerinde (10-50-80-100kHz) ölçülen a.c. elektriksel iletkenlikler, iki

farklı eğime sahip iki farklı bölge oluşturmıştır. Düşük sıcaklık değerlerinde iletkenlikteki artış değeri az olurken (düşük sıcaklık bölgesi), yüksek sıcaklık değerlerinde her bir sabit frekans için iletkenlik değeri fazlaca artış göstermiştir (yüksek sıcaklık bölgesi). Filmlerin a.c. elektriksel iletkenliklerinin frekansa bağlılığında da yine iki farklı bölge gözlemlenmiştir. Bunlar, düşük frekans değerlerinde neredeyse frekanstan bağımsız (düşük frekans bölgesi) iletkenliğin, yüksek frekans değerlerinde kuvvetle frekansa bağlı (yüksek frekans bölgesi) iletkenliğin gözlemlendiği bölgelerdir. a.c. iletkenlik davranışlarından elde edilen bulgulara göre, her bir filmin iletkenliğinin sıcaklıkla doğru orantılı olarak arttığı görülmüştür. Bu da ısı olarak uyarılmış taşıyıcıların iletkenliğe bir katkı sağladığı şeklinde yorumlanmıştır. Aynı zamanda katkılı ve katkısız CdS filmler için sıcaklığa bağlı olan  $s$  parametresinin değeri artan sıcaklıkla azalmıştır.  $s$  parametresinin sıcaklığa bu şekilde bağlılığı CBH modelinin öngörülerıyla uyumlu olmasına rağmen sabit frekanstaki iletkenliğin sıcaklıkla değişiminin CBH modelinin öngörülerıyla uyuşmadığı görülmüştür. Dolayısıyla, çalışmalar sonucunda elde edilen verilerin topluca değerlendirilmesinden katkılı ve katkısız filmlerde a.c. yük iletim mekanizmasının Reider tarafından geliştirilen model ile açıklanabileceği sonucuna varılmıştır.

Katkılı ve katkısız CdS filmlerin değişik sıcaklıklarda kapasitelerinin frekansla değişimlerinin ölçülmesinde tüm filmler için kapasite değerlerinin, artan frekansla azaldığı ve sabit bir frekans değeri için artan sıcaklıkla kapasitenin arttığı görülmüştür. Artan frekansla kapasitedeki azalmanın, yük taşıyıcıların hareketliliğinin yüksek frekanslarda frekans değişimlerini takip edememesinden kaynaklandığı şeklinde açıklanmıştır. Kapasite değerlerinin sıcaklıkla artması ise, filmin dielektrik özelliklerinin artan sıcaklıkla değişmesi şeklinde yorumlanmıştır.

Katkılı ve katkısız CdS ince filmlerin farklı sıcaklıklarda ölçülen empedans değerlerinin katkı türüne ve sıcaklığa kuvvetle bağlı olduğu görülmüştür. Katkısız CdS, Se ve Pb katkılı CdS filmlerde hemen her sıcaklık için elde edilen  $R-X$  grafiklerinin yarım daire oluşturma eğiliminde olduğu, In ve Zn katkılı CdS filmlerde düşük sıcaklık değerlerinde yarım daire oluşturma eğilimi, yüksek sıcaklık değerlerinde de  $R-X$  grafiklerinin yarım dairelerden oluştuğu ve bu yarım dairelerin yarıçapının artan sıcaklıkla azaldığı gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, düşük

sıcaklıklarda ya da her sıcaklıkta gözlemlenen yarım daire oluşturma eğiliminde ki empedans spektrumları filmin davranışının kapasitif olmasıyla, yüksek sıcaklıklardaki (In, Zn) yarım daireler şeklindeki spektrumlarda filmdeki yük iletiminin yüzeyden daha ziyade hacimsel özellikleri ile açıklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Aynı zamanda empedans spektrumlarının kapasitif olma durumlarını  $\ln f$  -  $\ln Z$  grafiklerinin eğiminin yaklaşık olarak -1 olmasıyla da açıklayabiliriz.

In, Pb, Zn ve Se katkılamanın CdS ince filmlerin foto iletkenlik özellikleri üzerine etkisinin topluca değerlendirilmesinde şu sonuçlar elde edilmiştir. Pb katkılamanın CdS filmi 300 nm ile 1100 nm dalga boyu arasındaki ışığa duyarsız hale getirdiği görülmüştür. CdS ince filmlerin ışık duyarlıklarının katkı malzemesinin türüne bağlı olarak değiştiği bulunmuştur. In katkılamanın karanlık akımında 65 kat, Se katkılamanın 180 kat, Zn katkılamanın ise 2100 kat artışa sebep olmuştur. Katkılama ile iletkenlikteki bu artış, katkı atomlarının CdS'ün band aralığında oluşturduğu enerji seviyelerine yorumlanmıştır.

Filmlerin iletkenliklerinin aydınlanma şiddetine bağlı olarak yapılan ölçümlerinde, tüm filmler için iletkenliğin artan aydınlanma şiddeti ile artışı görülmüştür. İletkenlikteki bu artış foto elektron konsantrasyonun aydınlanma şiddeti ile artışına bağlanmıştır. Katkısız CdS filmde 4000 lüks'deki aydınlanma şiddetindeki iletkenliğin karanlık ortamdaki iletkenliğin 2500 katı olduğu gözlemlenirken bu oranın sırasıyla In, Pb, Se ve Zn katkılanmış filmlerde 1.8 kat, 1.5 kat, 1333 kat ve 25000 kat olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar açıkça göstermektedir ki aydınlanma şiddetine en duyarlı film Zn katkılama ile elde edilen filmidir. Filmlerin Aydınlanma şiddetine bağlı olarak yapılan I-V ölçümlerinde Pb katkılı CdS ince filminin her şiddetteki aydınlanma koşulunda ölçülen I-V karakteristiklerinde histeresis etkisi gözlemlenirken diğer filmlerde bu etki görülmemiştir.

Sonuç olarak, CdS ince filmlerin oldukça basit ve ucuz bir yöntem olan CBD yöntemiyle hazırlanması başarılmıştır. Bu yöntemle hazırlanan katkılı ve katkısız CdS filmlerin optik özelliklerinin incelenmesinde Zn katkılı CdS filmin özellikle 900-110 nm dalga boyu aralığındaki ışığa oldukça duyarlı olduğu dolyısıyla, Zn katkılı CdS ince filmlerin güneş pili olarak oldukça büyük bir potansiyele sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

## KAYNAKLAR

Abou-Ras, D., G. Kostorz, A. Romeo, D. Rudmann, A. N. Tiwari (2005). 'Structural and Chemical Investigations of CBD- and PVD-CdS Buffer Layers and Interfaces in Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>-Based Thin Film Solar Cells', *Thin Solid Films*, **480-481**, 118-123.

Agarwal, R., C. J. Barrelet, C. M. Lieber (2005). 'Lasing in Single Cadmium Sulfide Nanowire Optical Cavities', *Nano Lett.* **5**, 917-920.

Albor-Aguilera, M. L., M.A. Gonzales-Trujillo, A.Gruz-Orea, M.Tufino-Valezquez (2009). 'Thermal and Optical Properties of Polycrystalline CdS Thin Films Deposited by the Gradient Recrystallization and Growth (GREG) Technique Using Photoacoustic Methods', *Thin Solid Films*, **517**, 2335.

Altındal, A., Ş. Abdurrahmanoğlu, M. Bulut, Ö. Bekaroğlu (2005). 'Charge Transport Mechanism in Bis(Double-Decker Lutetium(III) Phthalocyanine) (Lu<sub>2</sub>Pc<sub>4</sub>) Thin Film', *Synthetic Metals*, **150**, 181-187.

Badera, N., Godbole, B., S.B. Srivastava, P.N. Vishwakarma, L.S. Chandra, D. Jain, M. Gangrade, T. Shripathi, V.G. Sathe and V. Ganesan (2008). 'Quenching of Photoconductivity in Fe Doped CdS Thin Films Prepared by Spray Pyrolysis Technique', *Applied Surface Science*, **254**, 7042-7048.

Bilen, B., Y. Skarlatos, G. Aktas (2005). 'Frequency-Dependent Conductivity in As<sub>2</sub>Se<sub>3</sub> and As<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> Thin Films', *Journal of Non-Crystalline Solids*, **351**, 2153-2158.

Birkmire, R. W., B.E. McCandless, S.S. Hegedus (1992). 'Effects of Processing on CdTe/CdS Materials and Devices', *International Journal of Sustainable Energy*, **12**, 145-154.

Caferov, T. (1998), Yarıiletken Fiziği-1, Yıldız Teknik Üniversitesi Basım-Yayın Merkezi, İstanbul, Türkiye, 161-164.

Chou, C., H. A. Rohatgi (1995), J Electron. Mater **24**, 1443-1449.

Dona, J., J. Herrero (1992), J. Electrochem. Soc. **139**, 2810.

Elliott, S. R. (1971), Philos.Mag. B **36**, 1291.

Enriquez, J. P., X. Mathew (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.

Gutmann, F., L. E. Lyons (1967). 'Organic Semiconductors', *Wiley*, 425-427.

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Greenockite-3D-balls.png>

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hawleyite-3D-balls.png>

Iacomì, F., M. Purica, E. Budianu, P. Prepelita and D. Macovei (2007). 'Structural Studies on Some Doped CdS Thin Films Deposited by Thermal Evaporation' *Thin Solid Films*, **515**, 6080–6084.

Jesse, F., R. Zhou, M. Haimbodi and D. Everhart (1996), *Sensors and Actuators B* **35-36**, 176–182.

Kao, K. C., W. Huang (1981), *Electronical Transport in Solids*, Pergamon Press, New York **314–315**.

Kaur, I., D. Pandya, K. Chopra (1980), *J. Electrochem. Soc.* **127**, 943.

Khallaf, H., İsaiah O. Oladeji, Guangyu Chai, Lee Chow (2008). 'Characterization of CdS Thin Films Grown by Chemical Bath Deposition Using Four Different Cadmium Sources', *Thin Solid Films*, **516**, 7306-7312.

Long, R. (1982). 'Frequency-Dependent Loss in Amorphous Semiconductors', *Advances in Physics*, **553–637**, 1460-6976.

Ma, R. M., L. Dai, H.B. Huo, W.J. Xu, G.G. Qin (2007), *Nano Lett.* **73**, 300.

Metin, H. and R. Esen (2003). 'Annealing Effects on Optical and Crystallographic Properties of CBD Grown CdS Films', *Semicond. Sci. Technol.* **18**, 647-654.

Mohanchandra, K. P., J. Uchil (1997), *Thin Solid Films* **124**, 305.

Nagao, M., S. Watanabe, Japan J. (1968), 'Solution-Grown CdS Layers for Polycrystalline-Thin-Film Solar Cells', *Appl. Phys.* **7**, 684.

Nakanishi, T., K. (1994), Ito, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* **35**, 171.

Oladeji, I., L. Chow (1997), *J. Electrochem. Soc.* **144**, 2342.

Ozanyan, K. B., J.E. Nicholls, L. May, J.H.C. Hogg, W.E. Hagston, B. Lunn, D.E. Ashenford (1996), *Solid State Commun* **99**, 407.

- Özkan, Ş. (2007). ‘Ultrasonik Kimyasal Püskürtme Tekniği Elde Edilen CdS Filmlerin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi’, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Doktora Tezi.
- Petrucci, R. H., W. S. Harwood (1994), Genel Kimya-II, Palme Yayıncılık, Ankara, Türkiye, **462-463**
- Ravichhandran, K., P. Philominathan (2008), Solar Energy **82**, 1062–1066.
- Reider, G. (1979). ‘Frequency-Dependent Dielectric Behavior of Amorphous Silicon Thin Films’, *Phys. Rev. B* **20 (2)**, 607-615.
- Schön, J. H., O. Schenker and B. Batlog (2001) ‘Solution Processed CdS Thin Film Transistors’, *Thin Solid Films*, **385**, 271-274.
- van der Ziel, A. (1968), Solid State Physical Electronics 2nd Ed, Prentice-Hall, **12**, 287.

## ÖZGEÇMİŞ

10.07.1981 yılında Artvin’de doğdum. İlkokul, ortaokul ve lise öğrenimimi Artvin’de tamamladım. 2000-2004 yılları arası Marmara Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümünde lisans tahsilimi tamamladım. 2007 yılı güz döneminde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü (Makine Mühendisliği Bölümü), Enerji Sistemleri Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimime başladım.

Yüksek Lisans öğrenimim süresinde 2008 yılının Ağustos ayında Türk Fizik Derneği’nin düzenlediği 25. Uluslararası Fizik Kongresi’nde, “Kimyasal banyo yığma metoduyla hazırlanan çinko sülfür ince filmlerin sıcaklığa bağlı elektriksel özellikleri” isimli çalışmayı sundum. Ve bu çalışmama, U.Canci, F.Dumludağ, M.Alaittin Hastaoğlu, A.Altındal (2009). ‘Temperature dependency of electrical properties of chemical bath deposited ZnS thin film’, BPL, 16,161051, dergisinde yayımlandı.