

**T.C.**  
**KAFKAS ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**FİZİK ANABİLİM DALI**

**KİMYASAL DEPOLAMA YÖNTEMİ İLE MoSe<sub>2</sub> İNCE FİLMLERİN  
ALINMASI VE FİZİKSEL ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Özer BOZDOĞAN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Hasan MAMMADOV**

**EYLÜL-2009**

**KARS**

T.C. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Özer BOZDOĞAN'ın Prof. Dr. Hasan MAMMADOV'un danışmanlığında yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "Kimyasal Depolama Yöntemi İle MoSe<sub>2</sub> İnce Filmlerin Alınması Ve Fiziksel Özelliklerinin Araştırılması" adlı bu çalışma, yapılan tez savunması sınavı sonunda jüri tarafından Lisansüstü Eğitim Yönetmeliği uyarınca değerlendirilerek oy birliği ile kabul edilmiştir.

.../.../...

**Adı-Soyadı**

**İmza**

Başkan	: Prof.Dr. Hasan MAMMADOV	.....
Üye	: Prof.Dr. Mevlüt KARABULUT	.....
Üye	: Prof.Dr. Hacali NECEFOĞLU	.....

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun ...../...../.....  
gün ve ...../.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdullah DOĞAN

Enstitü Müdürü

## ÖNSÖZ

Bu çalışma Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmada Kimyasal Banyo Depolama (CBD) tekniği kullanılarak Silisyum (Si), Galyum selenit (GaSe) ve cam alttabanları üzerinde oluşturulan MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin akım gerilim, fotoiletkenlik ve soğurma değerleri alınarak numunelerin farklı özelliklerine bakılmıştır. Akım gerilim ölçümleri Kafkas Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü'nde, soğurma spektrumu ölçümleri Kafkas Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Biyoloji Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümleri Ankara Maden Teknik Arama (MTA)'da gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmanın her aşamasında bana destek veren danışman hocam sayın Prof.Dr. Hasan MAMMADOV, bölüm başkanımız sayın Prof.Dr. Mevlüt KARABULUT'a, Arş. Gör. Hüseyin ERTAP'a, yüksek lisans öğrencileri Murat DÖNMEZ'e, M.Şah YURTÇİÇEK'e ve Tarık BAYDAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca soğurma ölçümü için biyokimya laboratuvarını bize açan sayın Yrd. Doç. Dr. Aysel GÜVEN'e ve yüksek lisans öğrencisi Kadir ALKIŞ'a da teşekkürlerimi sunarım.

Kars-2009

Özer BOZDOĞAN

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖNSÖZ</b> .....	i
<b>ÖZET</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>SİMGELER ve KISALTMALAR</b> .....	vi
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	vii
<b>RESİMLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xiii
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. YARIİLETKENLER</b> .....	3
2.1 Yarıiletkenlerde Optik Soğurma.....	5
2.2 Optik Soğurmanın Deneysel Ölçülmesi.....	8
2.3 Fotoluminesans.....	18
2.4 Heteroeklemler.....	21
2.4.1 Yüksek Derecede Uyumsuz Kafes Sistemleri İçin Van Der Waals Epitaksi.....	24
2.4.2 Tabakalı Maddeler Arasında Van Der Waals Epitaksi.....	25
2.4.3 Bitmiş Yüzey Üzerindeki Eğilmiş Bağların Van Der Waals Epitaksisi.....	26
2.4.4 Organik Materyallerin Van Der Waals Epitaksisi.....	27
2.4.5 Tabakalanmış Olan Materyal Alt Tabakalar Üzerindeki Küçük Moleküler Yapılı Kristallerin Seçimli Yapımı.....	28
<b>3. İNCE FİLMLER</b> .....	29
3.1 Geleceğin Enerji Kaynağı İnce Film Fotovoltaik Güneş Pilleri.....	29
3.2 Günümüz Güneş Pili Teknolojisi.....	30
3.2.1 Monokristal silisyum güneş pilleri.....	31
3.2.2 Polikristal silisyum güneş pilleri.....	31
3.2.3 İnce film silisyum güneş pilleri.....	32
3.3 İnce Film Depolama Teknikleri.....	33
3.4 Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi (CBD).....	34
3.5 İnce Film Büyümesine Etki Eden Faktörler.....	36
3.5.1 Taban sıcaklığının etkisi.....	36
3.5.2 Çözelti pH'ının etkisi.....	36
3.5.3 Alt tabanın etkisi.....	37
3.5.4 MoSe <sub>2</sub> ince filminin optik ve elektrik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar.....	38
<b>4. MATERYAL VE METOT</b> .....	43
4.1 Na <sub>2</sub> SeSO <sub>4</sub> Çözeltisinin Hazırlanması.....	43
4.2 Alt tabanların Temizlenmesi.....	43
4.3 Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi Kullanılarak MoSe <sub>2</sub> İnce Filmlerinin Büyütülmesi.....	43
4.3.1 Çözeltinin hazırlanması.....	46
4.3.2 2.grup MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	50
4.3.3 3.grup MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	51
4.3.4 4.grup MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	52
4.3.5 6.grup MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	53
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	55
5.1 MoSe <sub>2</sub> İnce Filminin Kalınlığının Belirlenmesi.....	55
5.2 MoSe <sub>2</sub> İnce Filminin İletkenlik Tipinin Tayin Edilmesi.....	55



5.3 MoSe <sub>2</sub> İnce Filmlerinin Optik Soğurması .....	57
5.4 MoSe <sub>2</sub> İnce Filminin Morfolojik Özellikleri .....	78
5.5 MoSe <sub>2</sub> İnce Filminin Yapısal Özellikleri .....	79
5.6 MoSe <sub>2</sub> İnce Filminin Elektriksel Özellikleri .....	82
5.7 GaSe-MoSe <sub>2</sub> Heteroeklemlerinin Fotoelektrik Özellikleri .....	91
<b>6. SONUÇ</b> .....	<b>96</b>
<b>7. KAYNAKLAR</b> .....	<b>97</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b> .....	<b>100</b>

## ÖZET

Optoelektronik ve fotoelektronik farklı alanlarında kullanılışı olan  $MX_2$  (M-Mo, Mn, W), (X-Se, S, Te) ince filmlerinin farklı büyütme yöntemlerinden Kimyasal Banyo Depolama (CBD) yöntemi vakum gerektirmeyen normal ortamda ince filmler oluşturulmasında daha büyük imkana sahiptir. Bu yöntemle  $MoSe_2$  ince filmleri amonyum molibden, tartarik asit, hidrazin hidrat, sodyum selenosülfat kimyasal çözeltileri kullanılarak cam, Si tabanları ve tabakalı GaSe kristal tabanları üzerinde büyütülerek yapısal, elektriksel ve optik özellikleri araştırıldı.

Mikroskop camı üzerinde 27 °C sıcaklıkta büyütülen  $MoSe_2$  ince filminin X- ışınları yapı analizinden (XRD) amorf yapıda olduğu görüldü. Düzenli kristal tabanlar üzerinde büyütülen  $MoSe_2$  ince filmlerinin ise polikristal yapılı olduğu belirlendi. Büyütülen  $MoSe_2$  ince filminin yüzey morfolojisinin taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelenmesi sonucunda film yüzeyinin adacıklar (denritler) biçiminde olduğu görüldü. Alınan  $MoSe_2$  ince filminin EDX araştırılması sonucunda  $Mo_{0,31}Se_{0,97}$  bileşiği olduğu belirlendi.  $MoSe_2$  ince filmlerinde Se fazlalığı olduğu görüldü.  $MoSe_2$  ince filmler düzenli yapılı taban üzerinde büyütüldüğünde elektriksel iletkenliğinin  $10^{-4} \Omega^{-1}cm^{-1}$  ve amorf cam alt taban üzerinde ise  $10^{-6} \Omega^{-1}cm^{-1}$  olduğu görüldü. Cam üzerinde büyütülen  $MoSe_2$  ince filminin soğurma spektrumlarından  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  grafiğinde uzun dalga boyu sınırı 1,1 eV'den başladığı ve dik lineer bölgenin 1,4 eV'de  $h\nu$  eksenini kestiği görüldü. Bu, yasak bant aralığının  $E_g=1,4$  eV olduğunu belirler. GaSe tabanı üzerinde büyütülen  $MoSe_2$  ince filminin soğurma spektrumunun  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  grafiğinin üç bölgeden oluştuğu belirlendi. Kuyruk  $h\nu \geq 1,1$  eV,  $MoSe_2$ 'ye ait dik artış  $h\nu \geq 1,4$  eV ve GaSe kristaline ait dik artışın  $h\nu=1,95$  eV olan bölgelerden oluştuğu belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Kimyasal Banyo Depolama (CBD),  $MoSe_2$ , İnce Film, Optiksel Özellikler, Yapısal Özellikler, Elektriksel Özellikler.

## ABSTRACT

The Chemical Bath Deposition Technique (CBD) does not require vacuum environment and is one of the growth techniques for the  $\text{MX}_2$  thin films (M=Mo, Mn, W and X= Se,S,Te) that have applications in different fields in optoelectronics and photoelectronics.  $\text{MoSe}_2$  thin films were grown by this technique on glass, Si and layered GaSe substrates using chemical solutions of ammonium molybdenum, tartaric acid, hydrazine hydrate and sodium selenosulphate and their structural, optical and electrical properties were investigated.

The X-ray diffraction analysis (XRD) showed that the  $\text{MoSe}_2$  films grown on microscope glass at 27 °C were amorphous. The  $\text{MoSe}_2$  thin films grown on ordered crystal substrates were found to be polycrystalline. The investigation of the surface morphology of  $\text{MoSe}_2$  films by Scanning Electron Microscope (SEM) showed that the surface of the films were in the form of dendrites. From the EDX analysis, the composition of the film was determined to be  $\text{Mo}_{0.31}\text{Se}_{0.97}$  which shows that the amount of selenium is higher in the film composition. The conductivity of the  $\text{MoSe}_2$  films grown on the GaSe crystals was measured to be  $10^{-4} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  while the conductivity of films grown on glass substrate was measured to be  $10^{-6} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$ . In the graph of  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  of the absorption spectrum of  $\text{MoSe}_2$  thin films grown on glass substrate, the long wavelength tail of the spectrum started from 1.1 eV and the linear part of the spectrum was found to intersect the  $h\nu$  axis at 1.4 eV which indicate that the band gap of the film is 1.4 eV. The  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  graph of the absorption spectrum of  $\text{MoSe}_2$  thin film grown on GaSe substrate was found to consist of three regions. The tail started at  $h\nu \geq 1.1$  eV while the part of the spectrum due to  $\text{MoSe}_2$  started at 1.4 eV and the third region belonging to GaSe crystal started at 1.95 eV.

**Key Words:** Chemical Bath Deposition (CBD),  $\text{MoSe}_2$ , Thin Film, Optical Properties, Structural Properties, Electrical Properties.

## SİMGELER ve KISALTMALAR

### 1. Simgeler

$E_F$  : Fermi enerjisi

$E_g$  : Yasak enerji aralığı

$\lambda$  : Dalga boyu

$\alpha$  : Soğurma katsayısı

R : Yansımaya katsayısı

T : Geçirgenlik

$\nu$  : Frekans

$k_B$  : Boltzman sabiti

h : Planck sabiti

c : Işık hızı

$\rho$  : Özdirenç

M : Molar

m : kütle

$M_A$  : molekül ağırlığı

$\Omega$  : fonon frekansı

### 2. Kısaltmalar

CBD : Kimyasal Banyo Depolama

XRD : X- ışını kırınımı

EDX : Enerji dağıtıcı X-ışını

SEM : Taramalı elektron mikroskobu

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1 Üç farklı tip materyal için enerji diyagramları.....	4
Şekil 2.1.1 Parabolik bant yapılı yarıiletkenlerde direk optik geçiş .....	6
Şekil 2.1.2 Parabolik bant yapılı yarıiletkenlerde dolaylı geçiş.....	7
Şekil 2.2.1 Optik soğurmanın şematik gösterimi .....	8
Şekil 2.2.2 a) Direk geçişler ve optik soğurma spektrumu b) Dolaylı optik geçişler ve optik soğurma spektrumu .....	11
Şekil 2.2.3 Soğurma spektrumunda yasak bant aralığı .....	14
Şekil 2.2.4 InSb kristalinde yasak bant aralığının yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi .....	15
Şekil 2.2.5 Ge kristali için dolaylı soğurma spektrumu .....	15
Şekil 2.2.6 Si için $\alpha^{1/2} - h\nu$ grafiği .....	18
Şekil 2.3.1 Fotolüminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematik gösterimi .....	20
Şekil 2.4.1 Heteroeklem kesişimlerde üç türlü bant kıyısı kayması .....	22
Şekil 2.4.2 Birbiriyle temas etmeyen iki yarıiletkende bant kıyıları.....	22
Şekil 2.4.1.1 Heteroepitaksiyel filmin yüzeyi üzerine sarkan bağlar.....	24
Şekil 3.4.1 $\text{Mo}^{+4}$ ve $\text{Se}^{-2}$ iyonlarının alt taban üzerinde $\text{MoSe}_2$ bileşiği oluşturması .....	34
Şekil 5.2.1 Yarıiletkenlerde (a) sıcaklığın (b) elektron konsantrasyonunun dağılımı ...	56
Şekil 5.2.2 Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik tipini ölçme devresi.....	57
Şekil 5.3.1 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş $\text{MoSe}_2$ ince filminin (4.grup 1 nolu numune) toplam soğurma spektrumu .....	59
Şekil 5.3.2 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş $\text{MoSe}_2$ ince filminin (4.grup 1 nolu numune) soğurma spektrumu .....	60
Şekil 5.3.3 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş $\text{MoSe}_2$ ince filminin (4.grup 1 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	61
Şekil 5.3.4 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş $\text{MoSe}_2$ ince filminin (4.grup 2 nolu numune) toplam soğurma spektrumu .....	62
Şekil 5.3.5 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş $\text{MoSe}_2$ ince filminin (4.grup 2 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	63

<b>Şekil 5.3.6</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (3.grup 3 nolu numune) toplam soğurma spektrumu. ....	65
<b>Şekil 5.3.7</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (3.grup 3 nolu numune) soğurma spektrumu. ....	66
<b>Şekil 5.3.8</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filmin (3.grup 3 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	67
<b>Şekil 5.3.9</b> 27 °C’de 9 saat süreyle iki kez daldırılarak yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune) toplam soğurma spektrumu. ....	68
<b>Şekil 5.3.10</b> 27 °C’de 9 saat süreyle iki kez daldırılarak yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune) soğurma spektrumu. ....	69
<b>Şekil 5.3.11</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	70
<b>Şekil 5.3.12</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.....	71
<b>Şekil 5.3.13</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune) soğurma spektrumu.....	72
<b>Şekil 5.3.14</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	73
<b>Şekil 5.3.15</b> 60 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune) toplam soğurma spektrumu. ....	74
<b>Şekil 5.3.16</b> 60 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune) soğurma spektrumu. ....	75
<b>Şekil 5.3.17</b> 60 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	75
<b>Şekil 5.3.18</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (3.grup 8 nolu numune) toplam soğurma spektrumu. ....	76
<b>Şekil 5.3.19</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (3.grup 8 nolu numune) $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$ grafiği.....	77
<b>Şekil 5.4.1</b> Elektrodeposition yöntemiyle büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü.....	78
<b>Şekil 5.4.2</b> CBD yöntemiyle büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü.....	79

<b>Şekil 5.5.1</b> Cam üzerinde CBD yöntemi ile büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin XRD spektrumu.....	80
<b>Şekil 5.5.2</b> CBD yöntemi ile büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin EDX spektrumu.....	80
<b>Şekil 5.6.1</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerine büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin farklı sıcaklıklarda I-V karakteristiği.....	83
<b>Şekil 5.6.2</b> 27 °C’de cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin 56 V’de aktivasyonu.....	83
<b>Şekil 5.6.3</b> Saf GaSe kristal tabanın sandiviç lehiminin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.....	84
<b>Şekil 5.6.4</b> Saf GaSe kristal tabanın 0,6 V’de aktivasyonu.....	84
<b>Şekil 5.6.5</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filmin (3.grup) sandiviç lehiminin farklı sıcaklıktaki I-V karakteristiği.....	85
<b>Şekil 5.6.6</b> 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filmin (3.grup) 0,6 V’de aktivasyonu.....	86
<b>Şekil 5.6.7</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filmin (6.grup) paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.....	87
<b>Şekil 5.6.8</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin (6. grup) paralel lehimlerde 60 V’de aktivasyonu.....	87
<b>Şekil 5.6.9</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si tabanı üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.....	88
<b>Şekil 5.6.10</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si tabanı üzerine büyütülen MoSe <sub>2</sub> ince filminin 3 V’de aktivasyonu.....	89
<b>Şekil 5.6.11</b> Si tabanında paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği.....	90
<b>Şekil 5.6.12</b> Si tabanında 2 V’de aktivasyonu.....	90
<b>Şekil 5.7.1</b> Ölçüm için yapılan paralel lehimli ince film numunesi.....	91
<b>Şekil 5.7.2</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin farklı sıcaklıkta ışıқта ve karanlıktaki I-V karakteristikleri.....	92
<b>Şekil 5.7.3</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin 300 K’de ışıқта ve karanlıkta I-V karakteristiği.....	93
<b>Şekil 5.7.4</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin 248 K’de ışıқта ve karanlıktaki I-V karakteristiği.....	93

<b>Şekil 5.7.5</b> 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin 239 K’de ışıkta ve karanlıktaki I-V karakteristiği.....	94
<b>Şekil 5.7.6</b> Bant aralığından taşıyıcı geçişleri.....	94



## RESİMLER DİZİNİ

<b>Resim 2.1</b> Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 Sistemi.....	21
<b>Resim 4.3.1</b> Elektromagnetik ısıtıcı üzerinde çözeltilerin çözünmesi.....	45
<b>Resim 4.3.1.1</b> 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi.....	46
<b>Resim 4.3.1.2</b> 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi ile 5 ml'lik tartarik asit çözeltisinin karışımı.....	46
<b>Resim 4.3.1.3</b> 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi ve 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisinin karışımı.....	47
<b>Resim 4.3.1.4</b> 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi, 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisi, ve 20 ml'lik sodyum selenosülfat çözeltisinin karışımı.....	47
<b>Resim 4.3.1.5</b> 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi, 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisi, 20 ml'lik sodyum selenosülfat çözeltisi ve 35 ml'lik saf suyun karışımı.....	48
<b>Resim 4.3.1.6</b> Elektromagnetik karıştırıcı üzerinde çözeltimiz.....	48
<b>Resim 4.3.1.7</b> Çözeltinin beherler içerisine eklenmesi.....	49
<b>Resim 4.3.1.8</b> Elektromagnetik ısıtıcı üzerindeki yağ banyosu.....	49
<b>Resim 4.3.2.1</b> 3 mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	51
<b>Resim 4.3.3.1</b> 2 mikroskop camı, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	52
<b>Resim 4.3.4.1</b> 4 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 4 adet Si ve 4 GaSe (0,01 Ge) üzerine büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	53
<b>Resim 4.3.5.1</b> 3 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 3 adet GaSe (0,05Sn katkılı), ve 3 adet Si üzerine büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filmleri.....	54
<b>Resim 5.3.1</b> 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin(4. grup 1 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.....	59

<b>Resim 5.3.2</b> 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin(4. grup 2 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.....	61
<b>Resim 5.3.3</b> 80 °C sıcaklıkta 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe <sub>2</sub> ince filminin (3. grup 3 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.....	64
<b>Resim 5.6.1</b> İnce filmlerin akım gerilim değerlerinin ölçüldüğü deney seti.....	82

## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 5.1.1.....	81
--------------------	----

## 1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojideki ilerlemeler bilim adamlarını yeni keşiflere yöneltmiştir. Özellikle ince film malzemelerindeki ve gereçlerindeki hızlı değişim; yeni işlemlerin, malzemelerin ve teknolojilerin gelişimi için yeni fırsatlar yaratmaktadır [1]. Elektronik teknolojisindeki gelişmeler yarıiletkenlerin özelliklerinin bilinmesiyle mümkün olmuştur [2].

Yarıiletken teknolojisi, son 25 yıl içinde gösterdiği inanılmaz gelişme ile bugünkü ekonomik ve sosyal yaşantının ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. Bundan dolayı çeşitli uygulamalardaki ince filmlerin, önceden bilinen fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirmek ve bu alandaki ilerlemeyi artırmak için birçok deney yapılmıştır. Yapılan bu deneysel çalışmaların sonuçları ise ince film sistemlerinin gelişmesine olanak sağlamıştır. Yarıiletken ince filmlerin özelliklerinin daha iyi bilinmesiyle teknolojik gelişmeler hız kazanmıştır [2].

Günümüzde ince film teknolojisi ve bu filmlerin özelliklerinin araştırılması, araştırma dallarının başında gelmektedir. Bu yarıiletken ince filmlerin ilginç karakteristikleri ve ilgili uygulamaları yüzey morfolojisi, tanecik büyüklüğü, kristalleşme, yasak enerji aralığı ve öz direnç gibi faktörler nedeniyle etkin hale gelmektedir. Parçacık büyüklüğünün değişmesi elektronların tuzaklanma derecesini değiştirir ve yarıiletkenin elektronik yapısını özellikle de yasak enerji aralığını etkilemektedir [2]. Son yıllarda nanometre büyüklüğünde özellikle ince film formatında yarıiletken yapıda malzeme üretimi kayda değer bir ilgi alanına sahiptir. Güneş pilleri, süper kapasitörler, fotovoltajik araçlar ve elektrokromik pencerelerde kullanılan materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kontrolünün sağlanabilirliği, yarıiletken ince film ve nanoteknolojisini içeren çalışmalara olan ilgiyi artıran nedenlerden biridir. Çeşitli yöntemler ile elde edilen yarıiletken ince filmler, katıların yapısı ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmada, entegre devreleri, optik ile ilgili aletler, anahtarlama ve manyetik bilgi depolayan aletler gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Başta güneş enerjisi sistemleri olmak üzere, elektronik ve optoelektronik devre elemanlarında

kullanılan yarıiletken ince filmlerin optik, elektrik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi teknoloji açısından büyük önem arz etmektedir.

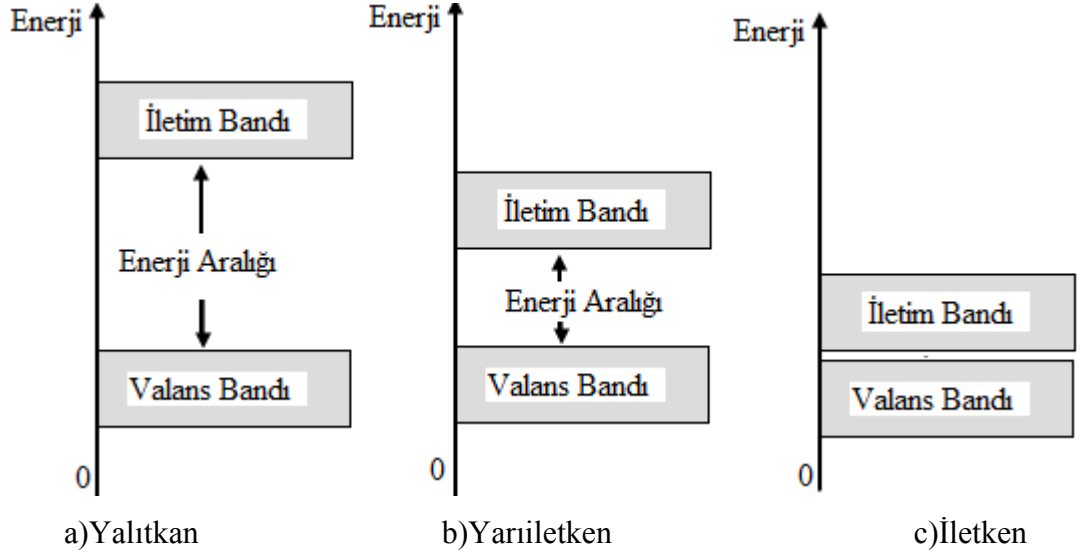
İnce filmler, alt tabanların yüzeyine kaplandığında onlara tek başına sağlayamadıkları birçok özelliği kazandırdıklarından dolayı optik, elektronik, manyetik, kimyasal ve mekanik alanlarını ilgilendiren endüstrilerde ileri teknoloji malzemeleri olarak kullanılmaktadırlar. Ayrıca çok katmanlı üretildiklerinde hacim özelliklerinden tamamen farklı bir şekilde, yeni malzemeler gibi davrandıklarından elektronik devre elemanları olarak kullanılabilirler [2].

## 2. YARIİLETKENLER

Yarıiletkenler, katıların en ilginç ve önemli sınıfını oluşturur. Bunlar, metallere yalıtkanlara uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir olaylar zincirini sergilerler ve geniş uygulama alanlarına sahiptirler.

Yarıiletkenlerin en önemli özelliği, bir yasak enerji aralığına sahip olmaları ve içlerine katılan uygun katkı atomlarıyla elektriksel iletkenliklerinin önemli ölçüde değiştirilebilmesidir. Bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği, sıcaklığa sıkıca bağlıdır. Sıcaklık yükseltildiğinde, bir yarıiletkenin öz direncinin küçülmesi onun en belirgin özelliğidir. Bu özellik, öz direnci esas olarak foton saçılmasından gelen, metallereki durumdan tamamen farklıdır. Yarıiletkenler, yalıtkan ve metallere elektrik ve optik özellikleri bakımından ayrılmaktadırlar.

Maddenin atomları kristal örgü yapısını oluşturacak şekilde birbirine yaklaştıkça, atomlar arasındaki etkileşim bir atomun belli bir yörüngesindeki elektronların komşu bir atomun aynı yörüngesindeki elektronlardan biraz daha farklı enerji düzeyine sahip olması sonucunu doğurur. Bu durum valans elektronları için mümkün olan enerji durumlarına ilişkin ayırık düzeylerin Şekil 2.1’de görüldüğü gibi bantlara yarılmaları durumunu ortaya çıkarır. Bu halde elektronların bulunabileceği sınırlı düzeyler (bantlar) mevcuttur [3,4].



Maddelerin iletken, yalıtkan veya yarıiletken olarak sınıflandırılmasında enerji bantları oldukça etkindir. Şekil 2.1’den görüldüğü gibi enerji aralığı bir yalıtıkanda çok geniştir ve serbest elektronlar valans bandından iletkenlik bandına geçemezler. Dolayısıyla iletkenlik bandı çok az sayıda serbest elektron içerir. Bir iletkende ise valans bandı ile iletkenlik bandı birbirine girmiştir. Dolayısıyla harici bir enerji uygulanmaksızın valans elektronların çoğu iletkenlik bandına geçebilir. Şekil 2.1 dikkatlice incelendiğinde yarıiletken bir maddenin enerji aralığının, bir yalıtıkana göre daha dar olduğu görülür.

0 K veya mutlak sıfırda yarıiletken malzemenin tüm valans elektronları valans bandında bulunur. Ancak, bu elektronlar oda sıcaklığında iletkenlik bandına geçebilecek yani silisyum için 1,12 eV, germanyum için 0,67 eV’lik yasak enerji aralığını aşabilecek enerjiye sahip olacaklardır. Germanyum için belirgin olarak daha düşük olan bu enerji değeri silisyumla kıyaslandığında oda sıcaklığında bu malzemede neden daha fazla taşıyıcı olduğunu açıklamaktadır. Yalıtkanlar için yasak enerji aralığının ortalama değeri 5 eV’den büyüktür. Dolayısıyla oda sıcaklığında çok az elektron gerekli enerjiyi alarak iletkenlik bandına çıkabilir. Bu nedenle büyük bir yük akışı veya akım sağlayacak fazla serbest taşıyıcı yoktur [3].

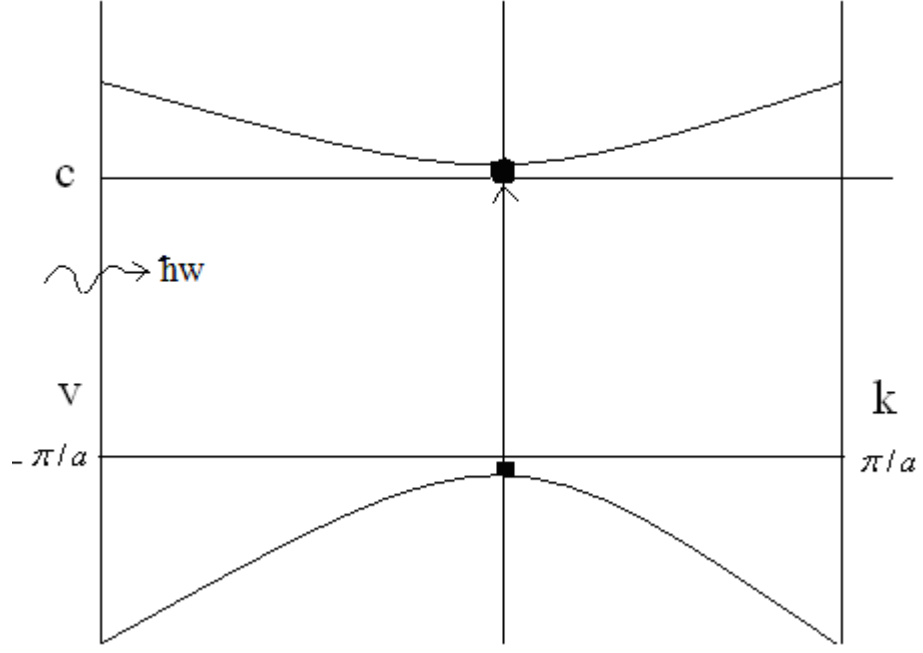
## 2.1 Yarıiletkenlerde Optik Soğurma

Katıların bant teorisinden bilindiği gibi kristaldeki elektronlar elektron yörüngelerinin bulunmadığı yasak enerji bölgeleriyle ayrılmış enerji bantları içerisinde yer alırlar. Bu enerji aralıkları bant potansiyeli ile elektronların etkileşmesi sonucu oluşur. İzinli enerji bantları tamamen dolu veya tamamen boş ise kristal bir yalıtkan gibi davranır. Çünkü elektronlar bir elektrik alanında hareket edemezler. Bir veya daha çok bant yarı dolu ise kristal bir metal gibi davranır. Bir veya daha çok bant zayıf oranlarda dolu veya boş ise kristal bir yarı metal veya yarıiletken olur. Yarı serbest elektron modeline göre kristalde elektronların zaman içinde kararlı durumu  $(\vec{k} + \vec{G})^2 = K^2$  durağan dalgalar biçiminde olur. Durağan  $\psi(+)$  ve  $\psi(-)$  dalgaları elektronların farklı bölgelerde yığılmalarına yol açar ve bu iki dalga farklı potansiyel enerjiye sahiptir. Bu da yasak enerji aralığının kaynağıdır. Bu durağan dalgalar arasında enerji farkının  $E_g = U$  olduğunu biliyoruz.

$U(r) = U \cos \frac{2\pi\vec{r}}{a}$  kristal potansiyeli Fourier bileşenin katsayısıdır. Bu kristal potansiyeli atomların ve kristal yapının türüne bağlıdır. Kristallerde serbest atomun her bir enerji düzeyinde bir bant oluşur. Bu bantların yapısı  $\varepsilon(K)$ , bant teorisine göre hesaplanır. Yarıiletken kristallerde en son dolu ve boş bantlar arasında bir yasak bant aralığı  $E_g(X, T)$  oluşur. Bu bantlar arasındaki elektron geçişleri onların yapısı hakkında geniş bilgiler içerir.

X-ışınlarında, optik fotonların soğrulması vb. spektrumların araştırılması, yarıiletken bant yapısının tayininde önemlidir. Bunlardan optik soğurma, yarıiletkenlerin yasak bant aralığının tayininde, elektron geçişlerinin doğru ve dolaylı, izinli ve izinsiz olmasının tayininde önemli yöntemlerden biridir. Yasak bant aralığının doğru tayini optik soğurmadır [4,5]. Şekil 2.1.1'de direk optik geçiş verilmiştir.

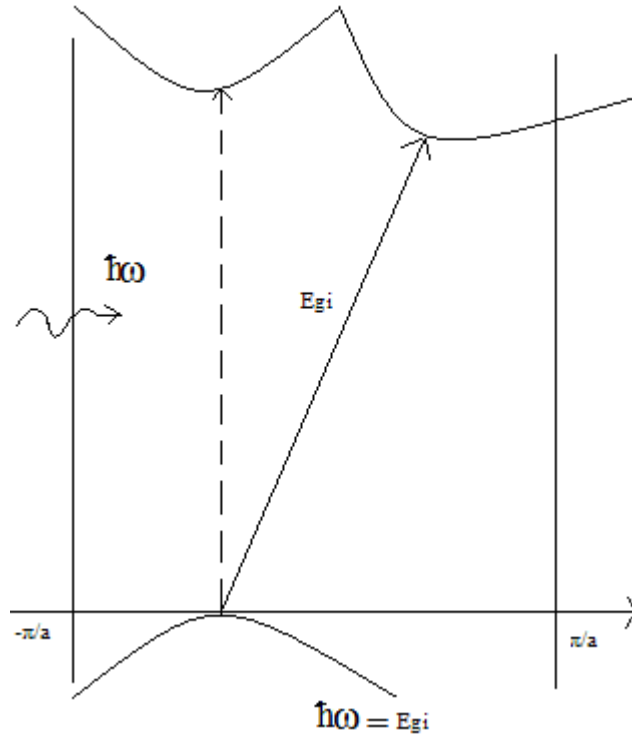




Şekil 2.1.1 Parabolik bant yapılı yarıiletkenlerde direk optik geçiş [5].

Optik soğurma zamanı bir foton soğrulduğunda bir boşluk ve bir serbest elektron oluşur.  $\hbar\omega_g = E_g$  foton enerjisi olduğunda valans bandının üst kıyısından elektron bir foton soğurarak iletkenlik bandının alt kıyısına geçer [5]. Bu geçişte  $\hbar\omega = E_g$ ,  $K_h, K_e + \hbar K_f = 0$  olur. Bu geçişe direk geçiş, soğurmaya ise doğrudan soğurma denir.

Dolaylı soğurma Si, Ge gibi yarıiletkenlerde gerçekleşmektedir. Böyle yarıiletkenlerde valans bandının maksimumu ve iletkenlik bandının minimumu farklı  $\vec{k}$  değerlerinde olur. Valans bandının maksimumu  $\vec{k} = 0$ 'da, iletkenlik bandının minimumu ise (111) doğrultusunda bir  $\vec{k}$  noktasındadır. Şekil 2.1.2'de dolaylı optik geçiş verilmiştir.



Şekil 2.1.2 Parabolik bant yapılı yarıiletkenlerde dolaylı geçiş [5].

$\hbar\omega_g = E_g^i$  enerjili bir foton soğrulurken elektron iletkenlik bandının minimumuna çıkabilir. Enerji ve momentum korunumu;  $-\pi/a$

$$\Delta\varepsilon = E_g^i = \hbar\omega \text{ ve } \hbar\Delta\vec{k} = \hbar\vec{k}_f \quad (2.1.1)$$

olur. 1 eV enerjili bir foton için dalga boyu  $10^{-6}$  m'dir ve böylece atomlar arası  $R$ -mesafesinden çok daha büyüktür. Fotonun momentumu  $h/\lambda$ , bir iletkenlik bandı elektronunun momentumu  $h/a$ 'dan çok daha küçüktür. Enerjileri  $E_g^d$  ve  $E_g^i$  arasında olan fotonlar soğrulurken bir ek momentum kaynağına ihtiyaç vardır. Fononlar bu momentum kaynağını sağlar.

Bir yarıiletkenin soğurma spektrumu, enerji aralığının belirlenmesine olanak sağlar. Bant aralığı ve elektron enerjilerinin sıcaklığa bağımlılığı bu yolla ölçülebilir. Sıcaklığa bağımlılığın artması, atomlar arası uzaklığı ve örgü potansiyelini değiştirir. Yine elektron enerjileri, sıcaklıkla uyarılmış örgü titreşimlerinin etkisiyle değişir.

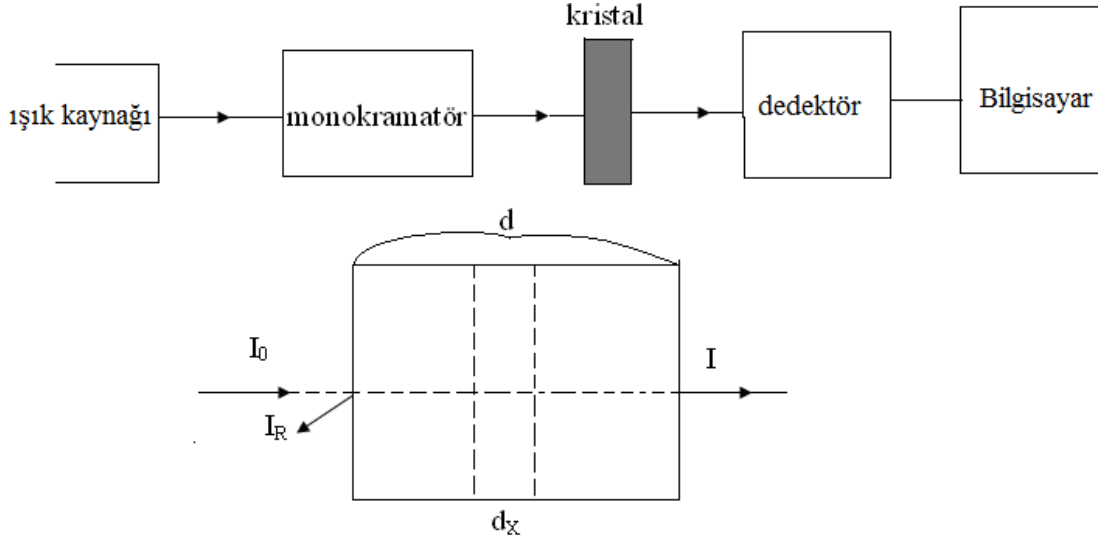
$$\vec{k}_{foton} = \vec{k}_c + \vec{k}_{fonon} \approx 0 \Rightarrow \hbar\omega = Eg + \hbar\Omega \quad (2.1.2)$$

$$\vec{k}_{fonon} \approx -\vec{k}_c \quad (2.1.3)$$

Bant kıyıları arasındaki soğrulma için eşik enerjisi  $\hbar\omega = Eg + \hbar\Omega$  olup,  $\Omega$   $\vec{k}_{fonon} \approx -\vec{k}_c$  dalga vektörlü fononun frekansıdır. Yüksek sıcaklıklarda, ortamda var olan fononlar bir fotonla birlikte soğrulabilirler ve bu geçişin eşik enerjisi  $\hbar\omega = Eg + \hbar\Omega$  olur [4,5].

## 2.2 Optik Soğurmanın Deneysel Ölçülmesi

Optik soğurma deney sistemi şematik olarak aşağıda verilmiştir.



Şekil 2.2.1 Optik soğurmanın şematik gösterimi.

Burada kristal üzerine normal olarak gelen optik ışığın şiddeti  $I_0$ , yansıyan ışığın şiddeti  $I_R$  ve geçen ışığın şiddeti ise  $I$  olarak gösterilmektedir. Optik soğurmada yansımaya katsayısı ise,

$$R = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2 \quad (2.2.1)$$

Olarak verilir. Burada  $n$ , kırılma indisidir. Örneğin; cam üzerine normal düşen ışık için yansımaya katsayısı,

$$R = \left( \frac{1,5 - 1}{1,5 + 1} \right)^2 = \frac{(0,5)^2}{(2,5)^2} = \frac{0,25}{6,25} \approx 0,04 \quad (2.2.2)$$

olur. Aynı zamanda  $R = \frac{I_R}{I_0}$ , dalga boyuna bağlı olur.  $R(\hbar\omega)$ ,  $R(\lambda)$  yansımaya spektrumudur. Bu spektrum kristalin bant yapısı hakkında bilgi verir. Örnekten geçen ışının şiddetinin  $dx$  kalınlığında azalması;  $-dI = \alpha I dx$  olur. Burada  $\alpha$  soğurma katsayısıdır.

$$\int_{I_0 - RI_0}^I \frac{dI}{I} = -\int_0^d \alpha dx \Rightarrow I = I_0(1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.2.3)$$

olarak tanımlanır. Bu olay Buger yasası olarak da tanımlanır.

$$R \approx 0, \quad I = I_0 e^{-\alpha d} \Rightarrow \alpha \cdot d = \ln \frac{I_0}{I} \Rightarrow \alpha = \frac{1}{d} \ln \frac{I_0}{I} \quad (2.2.4)$$

olur ve  $\frac{I_0}{I} = e$  olduğunda  $\alpha = \frac{1}{d}$  olur.  $\alpha \cdot d = 1$  gelen ışık şiddetinin  $\frac{I_0}{I} = e = 2,73$  kat azalması için ışının geçtiği kalınlıktır. Bu soğurma katsayısına eşittir.  $d_1$  ve  $d_2$  kalınlıklı numunede  $\alpha \cdot d \approx 1$

$$\frac{I_1}{I_0} = T_1(h\nu) = e^{-\alpha d_1} \quad (2.2.5)$$

$$\frac{I_2}{I_0} = T_2(h\nu) = e^{-\alpha(h\nu)d_2} \quad (2.2.6)$$

$$\left. \begin{array}{l} \ln T_1 = -\alpha \cdot d_1 \\ \ln T_2 = -\alpha \cdot d_2 \end{array} \right\} \alpha(d_2 - d_1) = \ln T_1 - \ln T_2 \quad (2.2.7)$$

$$\alpha(h\nu) = \frac{\ln(T_1/T_2)}{d_2 - d_1} \quad (2.2.8)$$

Bu iki kalınlık yöntemiyle soğurma spektrumunun ölçülmesidir. Buradan basit yöntemlerle soğurma spektrumu ölçülebilir. Soğurmaya dahili fotoefekt gibi de bakabiliriz. Yarıiletken kristallerde fotonların soğrulması  $\hbar\omega = E_g^d$  olduğunda gerçekleşir. Aksi halde foton soğrulmaz. Deneysel ölçtüğümüz soğurma spektrumu bant yapısındaki kritik noktalar arasında gerçekleşir. Parabolik bant yapılı kristallerde soğurma spektrumu  $\alpha(\hbar\omega)$  aşağıda Şekil 2.2.2.a'da gösterildiği gibi olur. Soğurma doğrudan bant aralıklı kristallerde;

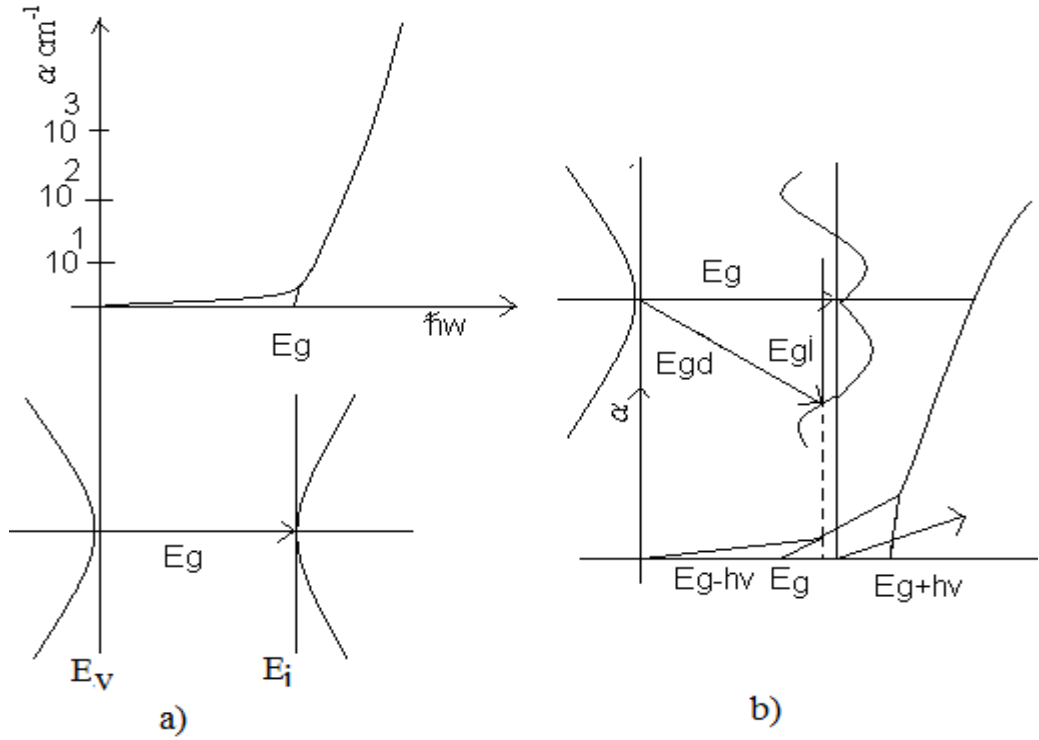
$$\hbar\omega = E_g \quad \text{ve} \quad \hbar\vec{k}_h = \hbar\vec{k}_e \quad (2.2.9)$$

enerjide başlar. Bu direkt geçişte soğurma spektrumudur.

Dolaylı optik geçişlerde ise;

$$\hbar\omega = E_g \pm \hbar\Omega; \quad \hbar\vec{k}_f = \hbar\vec{k}_e + \hbar\vec{k}_{fonon}; \quad \vec{k}_{fonon} = \vec{k}_c + \vec{k}_{fonon} \approx 0 \quad (2.2.10)$$

olur.



Şekil 2.2.2 a) Direk geçişler ve optik soğurma spektrumu b) Dolaylı optik geçişler ve optik soğurma spektrumu.

Fonon, kristal momentumun kaynağı olarak elektron geçişinde momentum korunumunu sağlar. Görüldüğü gibi optik soğurma spektrumunda kristaldeki fononların enerjilerinden farklı yönlerde ölçümlerle fonon spektrumu belirlenebilir. Öyle ki, kızıl ötesi bölgedeki optik soğurma spektrumundan, *IR* ölçümlerinden veya saçılmasından ve nötron inelastik saçılmalarından da kristallerin fonon spektrumları ölçülebilir. Optik, akustik dallardaki fonon frekanslarının toplam kipleri ölçülür. Kristal dahilinde soğrulan fotonların sayısı  $N$ , soğrulan atom sayısı ile belirlenir.  $\sigma$  bir foton için soğurma kesit alanıdır.  $l_f = (\sigma N)^{-1}$  fotonların kristal dahilinde ortalama serbest yoludur. Birim uzunluktaki fotonların soğrulma ihtimali;

$$\alpha = \frac{1}{l_f} \quad (2.2.11)$$

olur. Kristalde  $N_i$  sayıda ve  $\sigma_i$  kesit alanlı soğurma merkezi olduğunda;  $\alpha_i(\omega) = \sigma_i N_i$  olur.

$$\alpha(\omega) = \sum_i \alpha_i(\omega) = \sum_i \sigma_i(\omega) N_i \quad (2.2.12)$$

Elektromanyetik dalga ile elektronların etkileşmesi sonucu enerji ve momentum korunuyor.

$$\bar{E}' = E + \hbar\omega \quad (2.2.13)$$

$$\bar{p}' = \bar{p} + \hbar\bar{n} \quad (2.2.14)$$

Yarıiletkenlerde fotonların soğrulması 5 şekilde olur. Bantlar arası soğrulma direkt olduğunda soğrulan  $h\nu$  fotonu elektronun valans bandından iletkenlik bandına geçmesi için kullanılır.

$$h\nu = E_c(k) - E_v(k) = E_c(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_e^*} - E_v(0) + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_h^*} = \Delta E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_r^*} \quad (2.2.15)$$

$$m_r^* = \frac{m_e^* m_h^*}{m_e^* + m_h^*}; E_g = E_c(0) - E_v(0) \quad (2.2.16)$$

$$\alpha = \frac{1}{l_f} = \frac{1}{\tau_f \nu_f} = g(\nu) \cdot \frac{\bar{n}}{c}; g(\nu) = \frac{1}{\tau_f} \quad (2.2.17)$$

birim zamanda fotonun soğrulma ihtimalidir.  $\nu_f = \frac{c}{\bar{n}}$  fotonun kristaldeki hızı,  $\bar{n}$  kristalin kırınım indisi,  $c$  ışık hızıdır. Fotonun enerjisi  $h\nu$  ve  $h(\nu + d\nu)$  enerjileri arasında olduğunda enerjisinin soğrulma ihtimali, elektronun  $p(\nu)$  geçiş ihtimali valans bandında  $-E_g - E'$  ve  $-E_f - E'$  -d  $E'$  enerji aralığındaki  $N(E')$  kuantum durumu sayısı;

$$g(\nu)d\nu = 2P(\nu)N(E')dE' \quad (2.2.18)$$

olur. Bu formüldeki 2 katsayısı ışığın iki kutuplanması ile ilgilidir. Valans bandında kuantum durum yoğunluğu;

$$N(E') = \frac{4\pi}{h^3} (2m_h^*)^{3/2} .E^{1/2} \quad (2.2.19)$$

$$g(\nu).d\nu = \frac{8\pi}{h^3} c.P(\nu)E^{1/2} dE' = \frac{2}{\pi^2} .P(\nu)k^2 dk \quad (2.2.20)$$

$$g(\nu) = \frac{2}{\pi^2} .P(\nu)k^2 \frac{dk}{d\nu} = \frac{2(2m_r^*)^{3/2}}{\pi\hbar^2} P(\nu)(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.2.21)$$

İzinli direk geçişlerde  $K=0$  ve  $p(\nu)$  sabit kalmaktadır.

$$\alpha = g(\nu) \frac{\bar{n}}{c} = \frac{2\pi(2m_r^*)^{3/2}}{c\pi\hbar^2} P(\nu)(h\nu - E_g)^{1/2} = B(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (2.2.22)$$

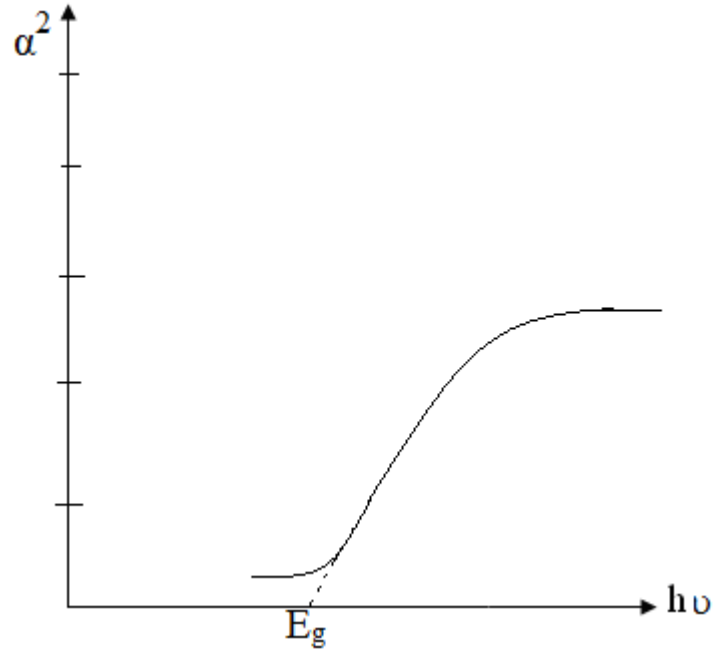
$$B = \frac{2\pi(2m_r^*)^{3/2}}{c\pi\hbar^2} P(\nu) \approx \text{sabit olur.} \quad (2.2.23)$$

İzinli optik geçiş, valans bandı atomların  $s$  yörüngesinden oluştuğu zaman ve iletkenlik bandının  $p$  yörüngesinden oluştuğu zaman gerçekleşir. İletkenlik ve valans bantlarının maksimum ve minimumları  $\vec{k} = 0$  olduğunda bu geçişler izinli yani doğrudan geçişler gibi tanımlanır. Eğer valans bandı  $s$  yörüngelerinden iletkenlik bandı ise  $d$  yörüngelerinden oluştuğunda geçişler yasak direkt geçişler gibi tanımlanır. Yarıiletkenlerde izinli doğrudan soğrulma katsayısı;

$$\alpha_{id} = B(h\nu - E_g)^{1/2} \Rightarrow \alpha^2 \sim h\nu \quad (2.2.24)$$

gibi olur.





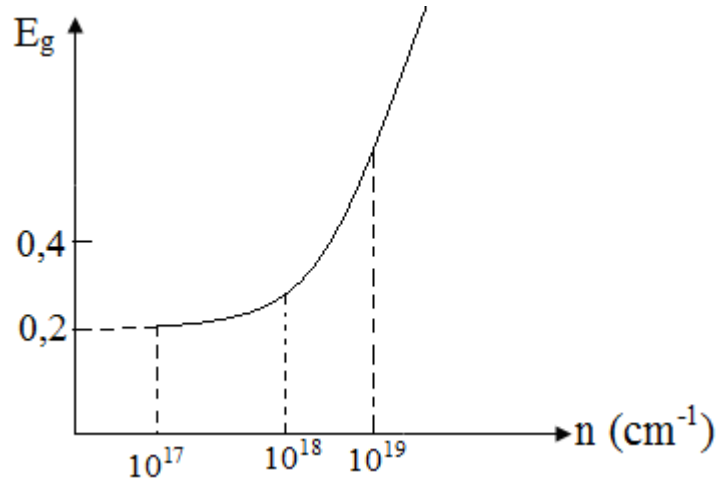
Şekil 2.2.3 Soğurma spektrumunda yasak bant aralığı [4].

Soğurma spektrumu Şekil 2.2.3'te gösterildiği gibi olur. Yasak geçişlerde, ( $\Delta l \neq 1$ )  $P(\nu) \sim k^2 = c(h\nu - E_g)$  olduğunda bantlar arası direk yasak geçişlerde soğurma katsayısı;

$$\alpha_{yd} = c(h\nu - E_g)^{3/2}, \quad (2.2.25)$$

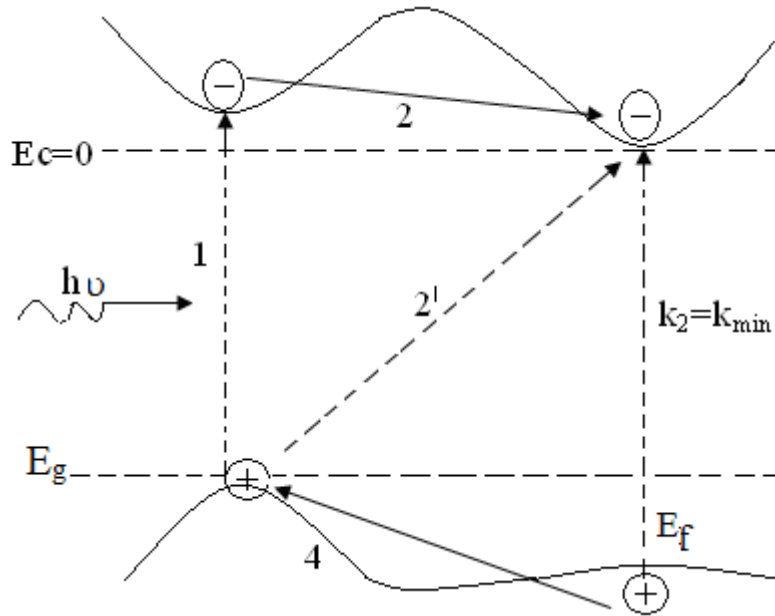
gibi olur.

InSb için geçişler izinli ve doğrudan olduğu için yasak bant aralığının yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi Şekil 2.2.4'te gösterildiği gibidir. Bu kristalde optik soğurmada bulunan yasak bant aralığı yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlı olmakta ve n arttığında artmaktadır.



Şekil 2.2.4 InSb kristalinde yasak bant aralığının yük taşıyıcı yoğunluğuna bağlı değişimi.

Dolaylı soğurma spektrumunda;



Şekil 2.2.5 Ge kristali için dolaylı soğurma spektrumu [5].

Elektronun dolaylı 2 geçişi için fonon soğrulur veya uyarılır.

$$h\nu = E_g - E_f \text{ veya } h\nu = E_g + E_f \quad (2.2.26)$$

Soğurma katsayısı  $\alpha = \alpha_a + \alpha_e$ ,  $\alpha_a \rightarrow$  fonon soğrulması ve  $\alpha_e \rightarrow$  fonon uyarılmasına bağlı toplamlardan oluşur.

$$\left. \begin{aligned} \alpha_a &= 0 & h\nu < E_g - E_f \\ \alpha_e &= 0 & h\nu < E_g + E_f \end{aligned} \right\} \text{ olur.} \quad (2.2.27)$$

Elektronun 3→4 geçişi gerçekleşebilir. Enerjinin korunumu;

$$h\nu = E_g + E + E' \mp E_f. \quad (2.2.28)$$

$$E_m = h\nu - E_g \mp E_f \quad \text{ olur.} \quad (2.2.29)$$

$dE'$  enerji aralığı için valans bandında durum sayısı;

$$N(E')dE' = \alpha' E'^{1/2} dE' = a'(h\nu - E_g - E \mp E_f)^{1/2} dE' \quad (2.2.30)$$

$a' \rightarrow$  sabittir;  $dE' = h d\nu$

$$N_c(\nu)d\nu = N(E')N(E)dEdE' = aa'E^{1/2}E'^{1/2}dEdE' \quad (2.2.31)$$

$$N(\nu)d\nu = aa'h d\nu \int_0^{E_m} (h\nu - E_g - E \mp E_f)^{1/2} E^{1/2} dE \quad (2.2.32)$$

$$= aa'h d\nu \int_0^{E_m} (E_m - E)^{1/2} E^{1/2} dE \quad (2.2.33)$$

$$= AE_m^2 d\nu \quad \text{ olur.} \quad (2.2.34)$$

$N_p$  sayılı  $E_f$  enerjili fononlar için;  $N_f = \frac{1}{e^{\frac{E_f}{k_B T}} - 1}$  fonon soğurulması ile olan optik

soğurma;

$$\alpha_a \cdot \nu \cdot N(\nu) \cdot N_p \cdot P(\nu) = \frac{B(h\nu - E_g + E_f)^2}{e^{\frac{E_f}{k_B T}} - 1} \quad (2.2.35)$$

$$(h\nu > E_g - E_f) \quad (2.2.36)$$

$$\alpha_a = 0 \quad (h\nu \leq E_g - E_f) \quad (2.2.37)$$

Fononların uyarılma ve soğrulma olasılıkları oranı  $\frac{N_f + 1}{N_f}$  olduğundan dolayı soğrulma fonon salınımı ile gerçekleşirse;

$$\alpha_a = B(h\nu - E_g - E_f)^2 (N_f + 1) = \frac{B(h\nu - E_g - E_f)^2}{1 - e^{-\frac{E_f}{k_B T}}} \quad (2.2.38)$$

$$h\nu > E_g + E_f \quad (2.2.39)$$

$$\alpha_e = 0, \quad h\nu < E_g + E_f. \quad (2.2.40)$$

$$\alpha = \alpha_a + \alpha_e = B \left[ \frac{(h\nu - E_g + E_f)^2}{e^{\frac{E_f}{k_B T}} - 1} + \frac{(h\nu - E_g - E_f)^2}{1 - e^{-\frac{E_f}{k_B T}}} \right] \quad (2.2.41)$$

$$h\nu > E_g + E_f \quad (2.2.42)$$

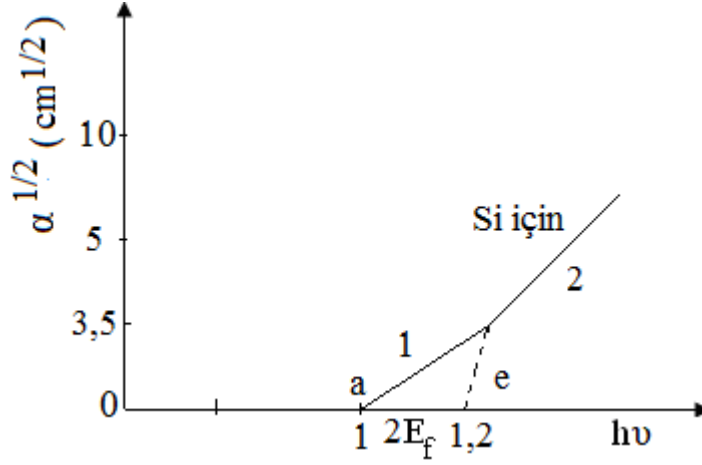
olur. Bu sonucu kısaca;

$$\alpha = B \frac{(h\nu - E_g + E_f)^2}{e^{\frac{E_f}{k_B T}} - 1} \quad (2.2.43)$$

$$E_g - E_f < h\nu \leq E_g + E_f \quad (2.2.44)$$

$$\alpha = 0; h\nu \leq E_g - E_f \quad (2.2.45)$$

şeklinde yazabiliriz.  $\alpha^{1/2} \sim h\nu$  soğurma sonuçları grafiği Şekil 2.2.6'da görüldüğü gibi lineer bölgeden oluşur.  $h\nu = E_g + E_f$  (1 eğrisi) ve  $h\nu = E_g - E_f$  (2 eğrisi)



Şekil 2.2.6 Si için  $\alpha^{1/2} - h\nu$  grafiği.

$1 \rightarrow \alpha_a^{1/2}$  }  
 $2 \rightarrow \alpha_e$  } eğrilerinin x-eksenini kestiği yerlerdir.  $a_e = 2E_f$  olur. Eğer direk geçiş

$k_1 = 0$  yasaksa ondan dolayı yasak soğrulma spektrumunda;

$$\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g \pm E_f)^3 \quad (2.2.46)$$

gibi olur.  $\alpha_{izinli}^{1/2} \sim 10^4 - 10^5 \text{ cm}^{-1}$  olursa  $\alpha_{yasak}^{1/2} \sim 10^{-1} - 10^3 \text{ cm}^{-1}$  olur. Bu optik

soğrulmadan Ge ve Si için fonon enerjilerinin 0,027–0,034 eV ve 0,016–0,083 eV olduğu bulunmuştur.

### 2.3 Fotoluminesans

Bir numune, yasak bant aralığına eşit ya da daha yüksek enerjili bir optik kaynak (lamba, lazer vb.) kullanılarak uyarıldığında, malzeme üzerine gelen fotonlar malzeme tarafından soğrulur. Numunenin uyarılması sonucunda, valans bandında bulunan elektron yeterli enerjiyi alıp valans bandında bir boşluk bırakarak iletkenlik bandına geçer. Böylece elektron-boşluk çifti (e-h) oluşmuş olur. Uyarılma neticesinde üst enerji seviyelerine çıkan elektronlar, temel enerji seviyelerine dönerken bir foton salarak

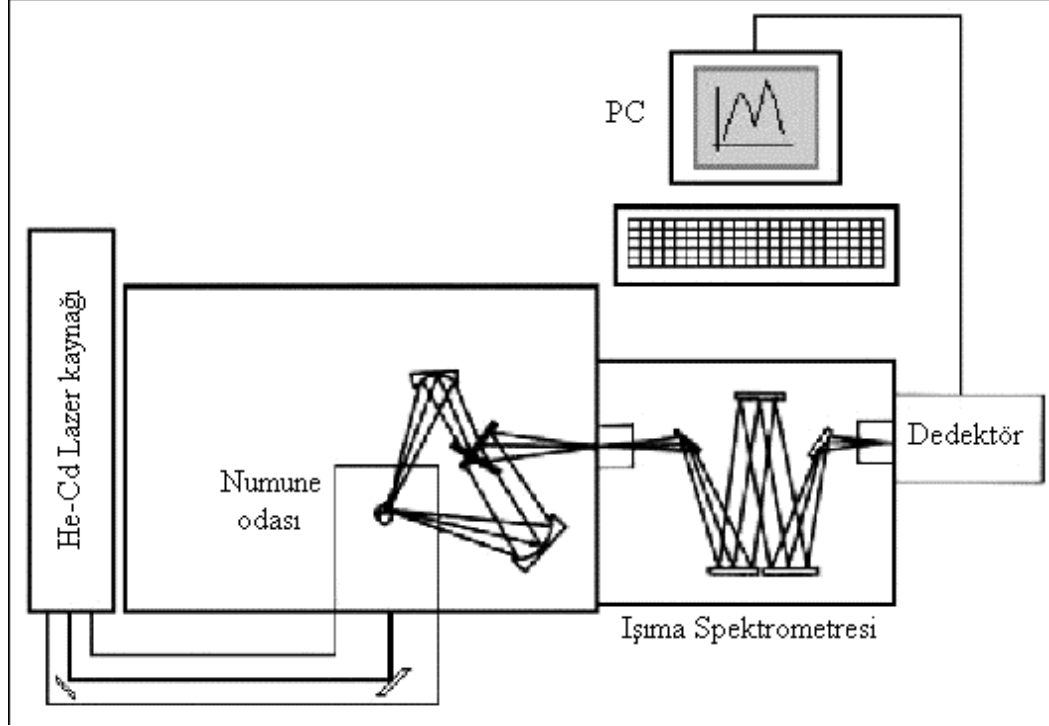
(ışımali geçiş) geçiş yaptığında bu olaya “fotolüminesans” adı verilir. Fotolüminesans olayında numune uygun bir kaynak kullanılarak aydınlatılır. Daha sonra numuneden çıkan ışık (foton), ışıma spektrometresi tarafından toplanarak dedektöre aktarılır. Şekil 2.3.1’de görüldüğü gibi dedektöre gelen optik sinyal, elektriksel sinyale çevrilir ve bilgisayar tarafından değerlendirilir. Numuneden gelen ışığın bu şekilde toplanarak, ışık şiddetinin dalga boyuna ya da foton enerjisine karşı grafiği çizilerek analiz edilir [6].

Fotolüminesans spektrumundan numuneyle ilgili;

- Yasak bant aralığı ( $E_g$ )
- Alaşım yarıiletkenler için alaşım kompozisyonu tayini
- Ara yüzey pürüzlülüğü
- Malzeme kalitesi
- Katkı ve safsızlık atomlarının türü

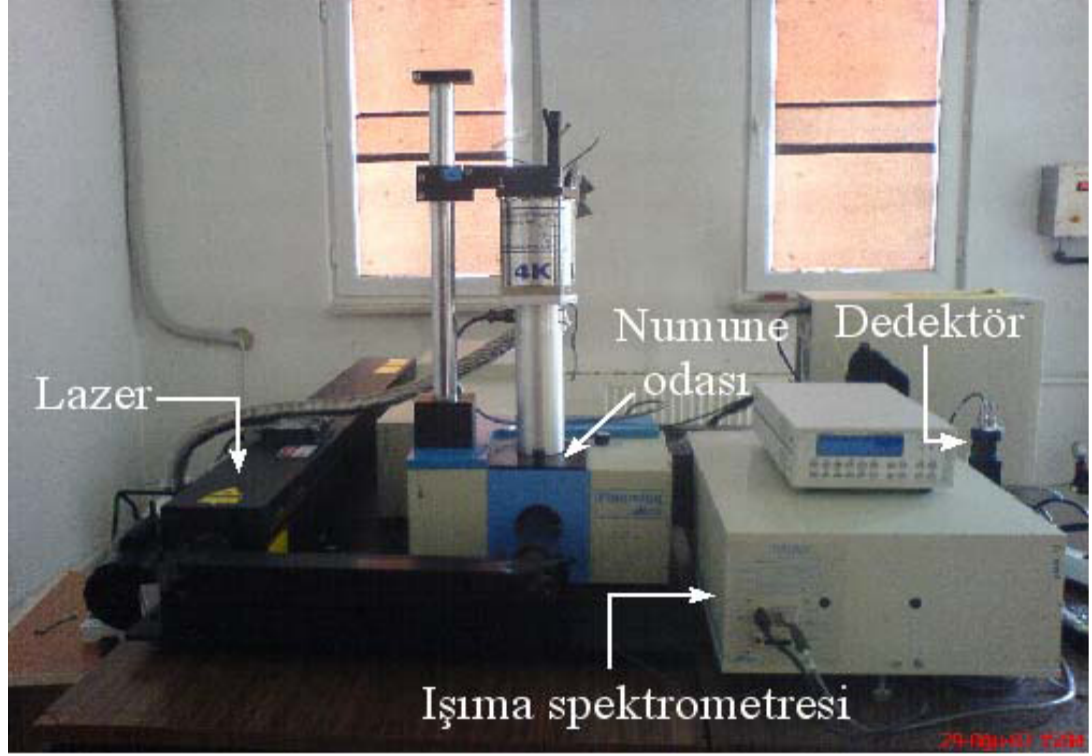
gibi bilgiler elde edilebilir. Fotolüminesans olayında numunenin uyarılması için kullanılan kaynaklar numunenin özelliklerine göre seçilir. Kaynak seçiminde önemli olan asıl parametreler, kaynağın numuneyi uyaracak enerjiye ve şiddete sahip olmasıdır. Kullanılan kaynağın enerjisi, numunenin yasak enerji aralığına eşit ya da büyük ( $h\nu \geq E_g$ ) olmalıdır. Şiddeti ise elektron-boşluk geçişi taşıyıcı yoğunluğu üzerinde farklı bir fonksiyonel bağlılığa sahip olduğundan kontrol edilebilir olmalıdır. Fotolüminesans ölçümü, sağladığı avantajlardan ötürü numunelerin optik karakterizasyonunda yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Bu teknikte, numune boyutu ve kalınlığı için bir sınırlama olmadığından ölçüm için numune hazırlanması gerekmez. Bu sebepten dolayı, bu teknik incelenecek numuneye ve numune yüzeyine zarar vermez. İncelenecek malzemenin sisteme yerleştirelmesi oldukça basit olduğundan, hızlı bir tekniktir. Fotolüminesans ölçümleri sıcaklığa karşı oldukça duyarlıdır, fakat basınç değişimine karşı duyarsızdır. Ölçümler düşük ve yüksek sıcaklıklarda yapılabilir. Düşük sıcaklıklarda yapılan fotolüminesans ölçümlerinde fonon ve saçılma etkileri daha az olacağından daha temiz bir spektrum elde edilir. Yüksek sıcaklıklarda yapılan ölçümlerde de malzemenin devrede kullanımı sırasında ısınmaya bağlı performans değişimini anlamak amacıyla inceleme yapılır. Buna karşın oda sıcaklığında yapılan

çoğu fotoluminesans ölçümleri pek çok araştırma için yeterlidir. Fotoluminesans tekniğinde; malzemeden yayılan ışık incelendiği için kullanılan yarıiletken malzemeler direk bant geçişli yarıiletken olmalıdır. Şekil 2.3.1’de fotoluminesans ölçümlerinde gerçekleşen olaylar şematik olarak gösterilmektedir [6].



Şekil 2.3.1 Fotoluminesans ölçümlerinde gerçekleşen olayların şematik gösterimi [6].

Resim 2.3.1’de numunelerin optik karakterizasyonunda kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 cihazının resmi görülmektedir. Bilgisayar, dedektör, 325 nm dalgaboylu 50 mW güç çıkışlı He-Cd lazer ve ışınma spektrometresi sistemin temel elemanlarıdır [6].



Resim 2.3.1 Fotoluminesans ölçümlerinde kullanılan Horiba Jobin Yvon Fluorolog-3 Sistemi [6].

## 2.4 Heteroeklemler

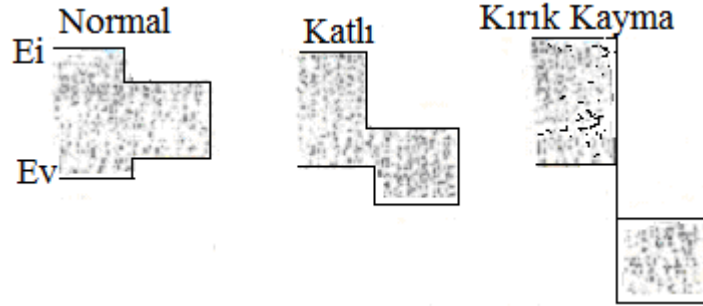
Heterojen yapıli yarıiletkenler, iki veya daha çok farklı yarıiletken yapının ortak bir kristal yapıda uyum içinde üretilmesiyle elde edilir. Bu yapılar yarıiletken kesişim devreleri yapımında yeni bir serbestlik getirir. Çünkü kesişimde hem iletkenlik ve valans bantlarının kayması hem de katkı oranları ayarlanabilir. Bu serbestliğe bakarak gelecekteki birçok yarıiletken bileşimin heterojen yapıda olacağı öngörülebilir. Heterojen yapı tek kristaldeki atom merkezlerinin doluluk türünün arakesitte değıştığı bir yapı olarak da görülebilir. Örnek olarak; arakesitin bir tarafında Ge ve diğere tarafında GaAs olabilir. Her iki örgü sabiti de  $5,65 \text{ \AA}$ 'dur. Bir taraf elmas yapısında, diğere taraf kübik çinko sülfid yapısındadır. Her iki yapı da dörütlü kovalent bağlardan oluşur ve sanki tek bir kristalmiş gibi birbirine uyumlu olur. Arakesit civarındaki mekanik gerilme enerjisini azaltmak için az sayıda kusurlar olabilir. Fakat bant aralıkları farklıdır ve heterojen yapıların ilgi odağı olmasının nedeni bu farktır. 300 K sıcaklıkta Ge için bant aralığı 0,67 eV ve GaAs için 1,43 eV'dir. Valans ve iletkenlik bantlarının birbirine göre alabileceğı konumlar Şekil 2.4.1'de gösterilmiştir [4]. Bu konuda yapılan hesaplamalar germanyumun valans bandının üst ucu  $E_v$ , GaAs'dekinden



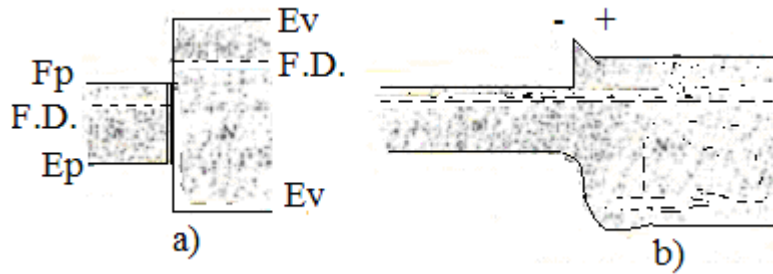
0,42 eV daha yukarıda olduğunu göstermektedir. Fakat iletkenlik bandı tabanı  $E_c$ , GaAs'dekinden 0,35 eV aşağıda olduğundan Şekil 2.4.1'deki sınıflandırmaya göre bu kaymalar normal olurlar. Bant kıyısı kaymaları elektronlar ve boşluklar için zıt etkili engeller oluştururlar. Hatırlanacağı üzere, enerji bant diyagramlarında elektronlar dibeye indikçe, boşluklar ise üste çıktıkça enerjileri azalır. Normal bant kıyısı kaymasında potansiyel engel, hem elektronları hem de boşlukları geniş aralıklı taraftan geniş aralıklı tarafa dar aralıklı taraftan dar aralıklı tarafa iter [4].

Heterojen yapılarda kullanılan diğer yarıiletken çiftleri arasında AlAs/GaAs, InAs/GaSb, GaP/Si ve ZnSe/GaAs sayılabilir. Kesişimin iki tarafındaki örgü uyumunu % 0,1 ile % 1,0 arasına getirebilmek veya özel aygıtların gerektirdiği enerji bant aralıklarını oluşturmak için farklı element alaşımları kullanılır [4].

İletkenlik bantları arasında büyük fark olan ve normal kaymalı n tipi iki yarıiletken göz önüne alalım. Şekil 2.4.1'de iletkenlik bant kıyısı daha yüksek olan n-tipi malzeme büyük N harfiyle gösterilirse, buna n-N türü bir kesişim adı verilir. Kesişim içindeki elektron iletim özellikleri Schottky engelindekine benzer özellikler gösterir [4].



Şekil 2.4.1 Heteroeklem kesişimlerinde üç türlü bant kıyısı kayması [4].



Şekil 2.4.2 Birbiriyle temas etmeyen iki yarıiletkente bant kıyıları [4].

Şekil 2.4.1’de yasak bantlar taralı olarak gösterilmiştir. Normal kaymaya örnek olarak GaAs/(Al,Ga)As, kırık kaymaya örnek olarak da GaSb/InSb heteroeklem keşişimleri gösterilebilir.

Şekil 2.4.2.a’da iletkenlik bant kıyıları  $E_c$  ve valans bant kıyıları  $E_v$  ile mutlak ölçekte gösterilmiştir. Mutlak ölçek birbirinden sonsuz uzaktaki iki yarıiletkenin referans alınmasıdır. Her iki numunenin Fermi düzeyleri, verici atom yoğunlukları ve bant yapıları ile belirlenmiş olur. Şekil 2.4.2.b’de ise aynı iki yarıiletkenden yapılan heteroeklem keşişiminde her iki bölge arasında difüzyon dengesi vardır. Buna göre Fermi düzeyi konumdan bağımsız olmalıdır ve bunu sağlamak için N bölgesinden n bölgesine elektron aktarılır. Bunun sonucu olarak N tarafında pozitif verici iyon tabakası oluşur [4].

Arakesit bölgesinden uzakta her iki yarıiletken de nötr olmalıdır. Ancak bir dış meyil voltajı yokluğunda net elektron iletiminin sıfır olması isteniyorsa, katkılanma oranıyla tayin edilen her iki Fermi düzeyi eşit olmalıdır. Bu iki koşul, keşişimden uzakta iletkenlik bant kıyısı enerjilerini belirler. Şekil 2.4.2.b ile verilen bir bant kaymasının arakesitte birleşme şeklinin (ortamdaki malzemeye bağlı) ve uzaktaki bant kıyısı enerjilerinin (Fermi düzeyine bağlı) birlikte sağlanabilmesi, Şekil 2.4.2’de gösterildiği gibi bantların ara kesit yakınında eğrilmeleri ile mümkündür. Gerekli bant eğrilmesi, N den daha aşağıdaki n bölgesine ileten elektronların yol açtığı uzay yükü ile sağlanır. Bu yük iletimi, N bölgesinde pozitif bir verici yük tabakası bırakır ve bu tabaka Poisson denkleminde göre ikinci türevi pozitif yani yukarı yönde eğri bir bant kıyısı oluşturur. n bölgesinde ise, elektron fazlalığı nedeniyle negatif bir uzay yükü oluşur. Bu negatif tabaka iletkenlik bant kıyısında negatif bir eğrilik yarıçapı yani aşağı yönde eğri verir. Arakesite n tarafından yaklaşıldığında bant bir bütün olarak aşağı eğrilir. Bu davranış bilinen p-n keşişiminden farklıdır. Bu kuyu şeklindeki bant kıyısı heterojen yapılarda yeni fiziksel olayların gözlenmesinin temelini oluşturur [4].

Alçak  $E_c$  olan n bölgesindeki katkılanma oranı önemsenmez bir değere düşürüldüğünde, elektronca zengin tabakadaki verici iyon sayısı iyice azalır. Bu elektronların devingenliği sadece örgü saçılmalarıyla kısıtlanmış olup, sıcaklık düşürüldüğünde bu

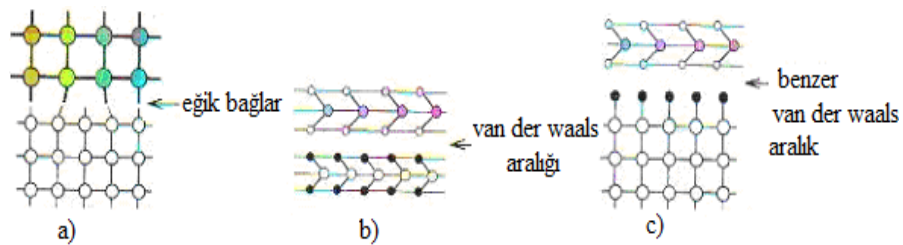
örgü saçılımları da hemen azalır. GaAs / (Al, Ga)As de düşük sıcaklıklarda  $2 \times 10^6 \text{cm}^2/\text{Vs}$  kadar yüksek devingenlik değerleri ölçülmüştür.

N tarafındaki yarıiletkenin kalınlığı, bu bölgedeki yük tabakası kalınlığından daha küçük değere indirilirse, bu bölgedeki az devingen elektronlar tümüyle yok olurlar. Bu durumda, arakesite paralel doğrultudaki elektrik iletkenliği tümüyle n tarafındaki devingenliği yüksek elektronlar tarafından sağlanacaktır. Bu elektronların yoğunluğu N tarafındaki verici iyon yoğunluğuna eşit, fakat onlardan potansiyel engeliyle ayrılmıştır. Bu tür devingenliği yüksek sistemler; iki boyutlu elektron gazı incelemelerinde, alçak sıcaklıklarda ve alan etkili hızlı transistörler yapımında kullanılırlar [4].

#### 2.4.1 Yüksek Derecede Uyumsuz Kafes Sistemleri İçin Van Der Waals Epitaksi

Son zamanlarda; ince kalınlıklı olan atomar tabakalı heteroeklemler moleküler beam epitaksi ve diğer epitaksiyel büyütme teknikleri ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Fakat şimdiye kadar maddelerin sınırlı kombinasyonlarından dolayı sadece iyi bir heteroepitaksiyel büyütme mümkündür. Doymuş maddelere, sert kafes eşleşmesi şartından dolayı kısıtlama gelir [7].

Şekil 2.4.1.1.a'da temiz alttaban yüzeyine sarkan bağlar belirlemektedir. İyi bir kafes eşleşmesi olmadan iyi bir heteroepitaksiyel filmlerin büyütülmesini oluşturan maddeler filmin oluşumunu güçlükle yapar. Ancak, temiz yüzey üzerine sarkan bağlar Şekil 2.4.1.1.b' de görülmektedir.



Şekil 2.4.1.1 Heteroepitaksiyel filmin yüzeyi üzerine sarkan bağlar [7].

Epitaksiyel büyütme Van der Waals kuvveti üzerinden gerçekleşmektedir. Van der Waals epitaksi ile geniş bir örgüye sahip olan dengeli büyümüş heteroyapılı maddeler

arasında uyumsuzluk olabileceği beklenebilir. Ani ara yüzeyde küçük miktardaki eksiklikten dolayı Van der Waals epitaksi de sarkık bağların var olduğu beklenebilir. Bu nedenle atomik tabakanın kalınlığı ile iyi bir heteroyapı özellik hazırlamak için Van der Waals epitaksi en üstün tekniklerden biri olarak görülür [7].

#### **2.4.2 Tabakalı Maddeler Arasında Van Der Waals Epitaksi**

İlk Van der Waals epitaksiyel büyütülmesi selenyum ve tellür arasında gözlemlendi. Bunlar bir boyutlu maddelerdir. Van der Waals epitaksi için en uygun maddeler tabaka geçiş metali dihalojen bileşiği tabakalı bileşiklere örnek olabilir. Bu tabakalı kristal yapılı geçiş metallerinin birim tabakası halojen atomları arasında sandviç biçiminde yerleştirilir. Bir tabakadaki atomlar güçlü kovalent bağ ile birbirine bağlıdır. Oysa tabakalar sadece zayıf Van der Waals kuvveti ile birbirine bağlıdır. Bu nedenle yapışık paralel tabakalar ile onların yapışık yüzeyleri bağlar sarkmadan bölünürler. Bu gibi yüzey üzerinde tabakalı maddelerin büyütülmesi Van der Waals kuvvetleri yardımıyla kafes eşleşmesinin gevşemesi sonucuna bağlı olduğu umulur.  $HfS_2$  gibi yalıtkanlar,  $MoS_2$  ve  $MoSe_2$  gibi yarıiletkenler ve bu gibi  $NbS_2$  ve  $NbSe_2$  gibi süperiletken bileşikler vardır.  $TX_2$  arasındaki heteroyapıyı oluşturan maddeler kullanılarak birçok çeşidinin üretimi farklı bir olasılıktır [7].

$MoS_2$  üzerine büyütülmüş  $NbSe_2$  ince filmi hakkında yüksek enerjili elektron kırınımı yöntemi ile bilgi edinilmiştir.  $MoS_2$  üzerine büyütülmüş  $NbSe_2$  ince filmi ara yüzeyi aniden değiştirmesine rağmen kafes sabitesi azaltılarak alttaban üzerine dizilir. Ara yüzeydeki bir materyalden diğer materyale hızlı değişim Van der Waals epitaksi ile büyüyen birçok ince heteroyapı şeklinde, tarama tünel açma spektroskopisinde yalnızca bir özelliğe neden olur. Bu yapı farklı kafes büyümeler ile iki materyalin yan yana yer alan tabakalarının etkileşimi ile açıklanabilir. Modülasyonun gözlemlenen periyodundan, büyümüş olan filmin kafes büyümesi % 0,1 sınırı içinde kendi hacim değeriyle uyum içinde olduğu sonucu çıkarılmıştır. Aynı zamanda, yapının modülasyon analizinden büyüyen filmin kristal uyuşmasından bağın eğilmesinin 0,01 derece olduğu görülmüştür [7].

Van der Waals epitaksi, çok farklı kristal yapıları sahip olan tabakalı materyaller arasında bile mümkündür.  $\text{MoSe}_2$  ve  $\text{NbSe}_2$  büyümesi bir çeşit mika olan mikanın bölünmüş yüzeyinde denenmiştir. Mika tabakalı bir materyal olmasına rağmen,  $\text{TX}_2$ 'den daha karmaşık bir kristal yapısı vardır ve onun kafes büyümesi  $\text{TX}_2$ 'nin % 50' sinden daha büyüktür. Buna rağmen, iyi  $\text{MoSe}_2$  veya  $\text{NbSe}_2$  tabakaları Van der Waals epitaksi ile mika üzerinde başarılı bir şekilde büyütülmüştür. Benzer bir yolla, yarıiletken tabakalı bir materyal çeşidi olan GaSe,  $\text{MoS}_2$  üzerinde geliştirilip büyütülmüştür.  $\text{MoSe}_2$ 'nin bölünmüş bir yüzeyinde bir alttabaka GaSe film büyütülmüştür. Benzer biçimdeki tabaka GaSe filmi  $\text{MoSe}_2$ 'nin ayrıştırılmış yüzeyinde büyütülür. Buna rağmen alttabakanın ve büyümüş filmin atomik şekillerinde görüldüğü gibi, aslında büyük kafes uyumsuzlukları var olmaktadır. Bu olaylardan Van der Waals epitaksinin herhangi bir tabakalı materyallerin kristal yapılarının ve kafesin diğer kafes üzerinde olma olasılığı vardır [7].

#### **2.4.3 Bitmiş Yüzey Üzerindeki Eğilmiş Bağların Van Der Waals Epitaksisi**

Şimdiye kadar Van der Waals epitaksi, onların kristal yapıya sahip oldukları gerçek Van der Waals doğasının benzeri bir veya iki boyutlu materyalleri arasındaki heteroepitaksiyel büyümeyi sınırlandırmıştır. Eğer yaygın olarak kullanılan üç boyutlu materyaller uygulanabilirse uygulanan alan büyük ölçüde genişletilecektir. Yukarıda da bahsedildiği gibi üzerinde tabakalanmış bir materyalin iyi heteroepitaksiyel büyümesini önleyen sıradan bir materyalin temiz yüzeyleri üzerine eğilmiş bağlar görünmektedir. Van der Waals epitaksiyel büyüme Şekil 2.4.1.1'de görüldüğü gibi eğik bağlara rağmen yüksek sıcaklıklarda da iyi gerçekleşmektedir. GaAs yüzey (111) eğik bağlara rağmen  $520\text{ }^\circ\text{C}$ 'de S atomlarının epitaksiyel büyütülmesi için en iyi adaydır.  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_x$  işlenmiş olan GaAs (111) yüzeylerinde  $\text{MoSe}_2$  veya  $\text{NbSe}_2$ 'nin epitaksiyel büyümesi başarılı bir şekilde denenmiştir. Selenyum atomları GaAs üzerindeki yüzey asılı bağları iyi bir tamamlayıcı olarak da kullanılabilir. Bu, GaAs'in büyüme boşluğunu çevreleyen selenyum buharıyla otomatik olarak tamamlanan yüzey asılı bağlarının GaSe alt tabakasında GaSe'nin heteroepitaksiyel şeklinde geliştirilebileceğini kanıtlamıştır. GaAs'deki GaSe film gelişimi GaAs için çok iyi bir etkisizleştirici olarak çalışmaktadır ve kaplanmamış GaAs yüzeyinden daha uzun güçlü lazer ışığı saçmasının altında

yüksek kaldığı GaSe ile kaplanmış olan GaAs'in fotoluminesans yoğunluğu bulunmuştur. Epitaksiyel GaAs'deki kuantum çizgileri ve kuantum çukuru gibi iyi modüle edilmiş yapılar için iyi bir koruma filmi olarak da yararlı olabileceği düşünülmektedir [7].

Silisyum alttabakasındaki epitaksiyel büyüme için Van der Waals epitaksi, hidrojen veya döteryum atomlarıyla birlikte yüzey asılı bağların tamamlaması da mümkün hale gelmektedir. H-bitimli Silisyum (111) alttabakasında heteroepitaksiyel olarak büyüdüğü ortaya çıkmıştır. Diğer benzer üç boyutlu alttabaka materyali de  $\text{CaF}_2$ 'dir. F atomlarıyla kaplanmış olan  $\text{CaF}_2$  yüzeyi onun aktif olmayan durgun haliyle sonuçlanmaktadır. Bu durgun hal, üzerinde tabakalanmış olarak bulunan materyali Van der Waals epitaksi için uygundur.  $\text{CaF}_2$ 'nin 12 eV kadar yasak bant aralığına sahip olduğu ve onun Van der Waals epitaksi için iyi bir saydam alttabaka olabildiği belirtilir [7].

#### **2.4.4 Organik Materyallerin Van Der Waals Epitaksisi**

Van der Waals epitaksinin ince organik materyal filmlerinin heteroepitaksiyel büyümesi için potansiyel uygulamaya sahip olduğu görülmektedir. Çünkü birçok organik materyal Van der Waals kuvveti ile kristalize olur.  $\text{MoS}_2$  ile kaplı yüzeyde Cu-phthalocyonine gelişmiştir. Pb-phthalocyonine dikdörtgen kafesler oluştururken, Cu ve VO-phthalocyonine moleküller de  $\text{MoS}_2$  ile kaplanmış yüzeylerde kare kafesleri oluşturuyor. Bu kafeslerin azalımları, üç çeşit alan oluşumuyla sonuçlanan  $\text{MoS}_2$ 'nin hegzagonal kafesi ile dizilmektedir. Selenyum bitimli GaAs yüzeyinde geliştirilebilen kaliteli metal phthalocyoninenin epitaksiyel filmlerinin olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bunlar asılı bağ bitişinin aynı zamanda organik materyallerin Van der Waals gelişimi için de uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır [7].

$\text{C}_{60}$ 'ın iyi bir epitaksiyel filmi  $\text{MoS}_2$  ve GaSe ile kaplanmış olan yüzünde geliştirilmektedir.  $\text{C}_{60}$  molekülü alanında açık aktif bağ bulunmadığı için  $\text{C}_{60}$  sadece Van der Waals kuvveti ile elde edilen her molekül içinde bir moleküler kristal oluşturmaktadır.  $\text{MoS}_2$  ve  $\text{C}_{60}$  arasındaki üç faktörün çok büyük kafes uyumsuzluğu olmasına rağmen  $\text{MoS}_2$ 'deki  $\text{C}_{60}$ 'ın iyi epitaksiyel gelişimi Van der Waals epitaksinin

tüm kullanım avantajlarıyla karşılanmaktadır. Bu sonuçlar, Van der Waals epitaksinin birçok organik materyali için umut verici bir epitaksiyel büyüme olacağını belirtmektedir [7].

#### **2.4.5 Tabakalanmış Olan Materyal Alt Tabakalar Üzerindeki Küçük Moleküler Yapılı Kristallerin Seçimli Yapımı**

Son zamanlarda, küçük yapıların çeşitleri başarılı bir şekilde imal edilmiştir. İnorganik yarıiletken materyallerin kullanımı gelişmiştir. Fakat organik küçük yapılar, organik filmler için geleneksel taş baskı yöntemlerinin zorluklarından dolayı kapsamlı olarak yapılamamıştır. Bir ince tabakanın alttabakalı filmi, tek tabakalı basamaklarla çevrelenmiş olan küçük ölçülü delikleri veya olukları oluşturmak için bir  $\text{MoS}_2$  alttabakasında geliştirilmiş olan yarıiletken  $\text{GaSe}$ 'yi birleştirmektedir. AFM gözlemi  $\text{C}_{60}$  moleküllerinin  $180\text{ }^\circ\text{C}$ 'lik alttabaka sıcaklığında sadece açık bir  $\text{MoS}_2$ 'nin küçük bölgelerde geliştiğini belirtmektedir.  $\text{C}_{60}$  molekülleri bu delikleri ve olukları doldurur ve küçük ölçülü  $\text{C}_{60}$  oluşturulabilen çok köşeli şekillerle yer edindir. Bu seçmeli büyüme metodu, oluşturulan şekillerle moleküler kristallerin küçük yapılarını üretmek için bir STM veya AFM ile yapılan küçük ölçülü örneklemelerle birleştirilebilir [7].

Sonuç olarak, Van der Waals ara yüz kullanımı şiddetli bir şekilde, genellikle de heteroepitaksiyel büyümede karşılaşılan kafes uyum durumunu kolaylaştırdığını göstermiştir. Bu inorganikten organiğe geçen materyaller farklı tür materyallerden oluşan yeni farklı yapıların yapımı için yeni bir yol açmıştır. Ara yüzün Van der Waals hali aynı zamanda organik küçük yapıların seçmeli gelişimlerini mümkün kılmıştır [7].

### 3. İNCE FİLMLER

Günümüz teknolojisinin temelini yarıiletken ince filmler oluşturmaktadır. İnce filmler, farklı üretim teknikleri kullanılarak kaplanacak malzemenin atomlarının ya da moleküllerinin, bir taban üzerine ince bir tabaka halinde oluşturulan ve kalınlıkları tipik olarak 1 µm civarında olan yarıiletken malzemelerdir [8].

Bu çalışmada, Kimyasal Banyo Depolama (CBD) yöntemi kullanılarak MoSe<sub>2</sub> ince filmleri farklı tabanlar üzerinde büyütüldü ve fiziksel özellikleri araştırıldı.

Yarıiletken ince filmler, katıların yapısı ve fiziksel özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmada kullanılmaktadır. Başta güneş enerjisi sistemleri olmak üzere, elektronik ve optoelektronik devre elemanlarında kullanılan yarıiletken ince filmlerin optik, elektrik ve yapısal özelliklerinin incelenmesi teknoloji açısından önem arz etmektedir.

Güneş pilleri ve fotovoltaik araçlarda kullanılan materyalin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin kontrolünün sağlanabilirliği, güneş pilleri teknolojisinde de ne kadar önemli olduğunu göstermektedir. Bu nedenle güneş pilleri için oluşturulacak ince filmlerin alınması yöntemleri ve bu yöntemlerden ucuz ve yapılması basit olan CBD yöntemi bu bölümde ele alındı.

#### 3.1 Geleceğin Enerji Kaynağı İnce Film Fotovoltaik Güneş Pilleri

Güneş 6000 °T sıcaklığında bir siyah cisime eşdeğer bir radyasyon kaynağıdır. Dünya uzaklığında bu 1350 W/m<sup>2</sup> değerinde bir enerji yoğunluğu değerindedir. Dünya'ya düşen güneş ışınlarının yaklaşık % 30'u geri yansıdığından, Dünya'nın yıllık olarak Güneş'ten aldığı enerji 700 x 10<sup>n</sup> MWh mertebesindedir. Bu enerjinin yaklaşık binde biri fotosentez yoluyla bitkilerde depolanır, kalan enerji ısıya dönüşerek çeşitli atmosferik olayları yaratır. Dünya'ya düşen Güneş enerjisi Dünya enerji tüketiminin en az yirmi bin katına eşittir. Demek ki, Güneş'in bize gönderdiği enerjinin çok ufak bir kısmını bize faydalı enerji türlerine dönüştürebilsek, nükleer enerji gibi riskli kaynaklara başvurmadan veya fosil yakıtları ile çevremizi kirletmeden Dünya'nın enerji



sorununu çözebiliriz. Güneş enerjisini faydalı enerji türlerine çevirmek için pasif toplayıcılar, tuz gölleri, odaklanmış aynalar ve benzeri birçok yöntem var ise de, bunların içinde güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine çeviren fotovoltaik güneş pilleri uygulama alanı en geniş olan ve gelecek için en çok ümit veren yöntemdir[9].

Güneş pillerinin elektrik enerjisi kaynağı olarak yaygınlaşmasında şu üstünlükleri rol oynamaktadır:

- a) Bir iletim hattına gerek kalmadan enerjiye ihtiyaç duyulan her yerde üretilebilir.
- b) Modüler yapıdadır, hemen kurulabilir, değişen ihtiyaca göre gücü artırılabilir veya azaltılabilir.
- c) Yakıt ikmaline veya bakıma ihtiyaç yoktur.
- d) Sessiz ve temizdir, çevreyi kirletmez.
- e) Uzun ömürlüdür, 20 yıldan fazla bir süre kullanılabilir.
- f) Hafif yapısı nedeniyle taşınabilir, portatif cihazlarda güç kaynağı olarak kullanılabilir.
- g) Direk Güneş ışığı şart değildir, bulutlu havalarda bile ışık şiddeti ile orantılı olarak elektrik akımı üretir.

Buna karşılık güneş pillerinin en önemli eksiği genellikle bir enerji depolama sistemine (aküye) ihtiyaç duymasıdır. Akü teknolojisinde de önemli gelişmeler kaydedilmiş ve hiçbir bakım gerektirmeyen problemsiz aküler üretilmeye başlanmıştır. Güneş pillerinin yaygınlaşmasını frenleyen en önemli faktör fiyattır. Ancak aşağıda inceleyeceğimiz teknolojik gelişmeler sayesinde güneş pillerinin kuruluş maliyeti 1960'lı yıllardaki 1000 Dolar/Watt düzeyinden bugün 7 Dolar/Watt düzeyine inmiştir. 1990 için hedef 2 Dolar/Watt'dı [9].

### **3.2 Günümüz Güneş Pili Teknolojisi**

Güneş pilleri bizde fazla tanınıp uygulanmamakla beraber Dünya'da 1950'li yıllardan beri kullanılmaktadır. İlk uygulama uzay uydularında olmuştur ve hemen bütün uzay uyduları ile ay modülleri elektrik enerjisi kaynağı olarak güneş pillerini kullanmışlardır. Fiyatların düşmesi ile 1970'li yıllarda güneş pilleri yeryüzünde de gittikçe artan uygulama alanları bulmaya başlamıştır. Bunlar arasında uzak telekomünikasyon

tesislerini, TV transpozerlerini, deniz fenerlerini, sinyalizasyon ve seyrüsefer işaretlerini sayabiliriz. Ayrıca Amerika'da her birinin kurulu gücü 1 MW'ın üstünde 3 adet (en büyüğü 6,5 MW) güneş pili santrali da doğrudan enterkonnekte şebekeye elektrik üretmektedir. Güneş pilleri bazı ülkelerde tüketim pazarına da girmiş dağ ve kır evlerinin elektrifikasyonunda, teknelerde, karavanlarda, su pompalarında kullanılmaya başlanmıştır. Çok küçük güçlerde olmakla beraber herkesçe bilinen en yaygın uygulama alanı ise güneş pili ile çalışan sayısal saatler ve hesap makineleridir. Bugün güneş pillerinde üç kuşak teknolojiye söz etmek mümkündür [9].

### **3.2.1 Monokristal silisyum güneş pilleri**

Czochralski yöntemi ile büyütülen yaklaşık 10 cm çaplı 100-150 cm uzunluğunda ve % 99,9999 saflıktaki Si kristal kütüğünden yaklaşık 3 mm kalınlığında dilimler kesilerek elde edilir. Dilimin bir tarafı p, diğer tarafı n-tipi katkılanır. Elektrik toplayıcı gümüş hatlar serigrafî yoluyla basılır ve böylece güneş pili hücreleri elde edilir. Daha sonra gerekli sayıda hücre seri bağlanıp bir panele dizilerek bir güneş pili modülü oluşturulur. Bu modül genellikle 12 V aküleri şarj edebilecek gerilim ve akım değerindedir [9].

### **3.2.2 Polikristal silisyum güneş pilleri**

Güneş pillerindeki yüksek enerji sarfiyatını ve dolayısıyla üretim maliyetlerini azaltmak amacıyla tek bir kristal büyütme yerine, geniş dikdörtgen kalıplara, yüksek saflıkta eritilmiş silisyum döküp, katılma sürecini kontrol etmek yoluyla polikristal silisyum hücreleri üretilmeye başlanmıştır. Başka bir yöntemle de polikristal silisyum, şeritler halinde elde edilmektedir. Bu yöntemlerle elde edilen polikristal güneş pillerinin maliyetleri bir miktar düşük olmakla beraber, verimlerinin ve düşük ışık şiddetlerindeki performanslarının monokristal güneş pillerine göre daha yetersiz olduğu görülmektedir. Örneğin, 12 V akü şarjı için bir monokristal güneş pili modülünde tipik olarak 30 ila 36 adet güneş pili hücresi seri bağlanırken, aynı güç ve gerilimdeki bir polikristal hücre için, 40 adet hücrenin seri bağlanmasına gereksinim duyulmaktadır. Böylece üretimde

elde edilen bir miktar maliyet indirimi, fazla hücre kullanma gereksinimi nedeniyle kaybedilmektedir [9].

### 3.2.3 İnce film silisyum güneş pilleri

Ortaçağdaki simyagerlerin Bakır'dan Altın yapma çabaları gibi bugün de yeryüzünde binlerce bilim adamı düşük maliyetle ışıktan elektrik üretecek sihirli maddenin peşindedir. Ancak günümüzün araştırmacıları bir yerde de çabalarında başarıya ulaşmış sayılırlar. Bizi hedefe ulaştıracak bu buluş ince film silisyum'dur. İnce film silisyum güneş pilleri cam, paslanmaz çelik veya plastikten bir düz yüzey üzerinde oluşturulan yaklaşık 1 mikron kalınlığında silisyum-hidrojen alaşımı ince bir film tabakasından oluşur. Malzeme ve enerji gereksinimi monokristal ve polikristal teknolojilerine göre çok daha düşük olduğu gibi seri üretime son derece uygundur[9].

Maliyet indirimini sağlayan faktörler şunlardır:

- a) Kullanılan silisyum miktarında yaklaşık bin kat azalma.
- b) Elde yapılan hücrelerarası bağlantılar yerine tümleşik devre teknolojisi ile ve otomatik olarak yapılan ara bağlantılar.
- c) Silisyum kristalleri eritme için ihtiyaç duyulan yüksek enerji tüketimine gerek kalmaması.

İnce film silisyum teknolojisi uzun bir süredir laboratuvar düzeyinde biliniyor ve dünya çapında yüzlerce araştırmacının konusunu oluşturuyordu. Fakat laboratuvarlarda elde edilen numunelerde gözlenen, zamanla güneş ışığında bozulma olayının nedenleri anlaşılamiyor ve önlemleri bulunamıyordu. Ancak bu sorunlar da artık çözülmüş ve 1984 yılından beri geniş yüzeyli ince film silisyum güneş pillerinin ticari olarak üretimine başlanmıştır.

Şu anda yaklaşık % 5 -6 verimli, 30x30 cm boyutlu yaklaşık 5 W gücünde modüller üretilmekte. 1986 yılında yaklaşık 20 W gücünde, % 7-8 verimli daha büyük modüllerin

üretilmesi planlanıyordu. 1990 yılında ise monokristal teknolojisi ile aynı verim ve güçte fakat fiyat olarak en az yarı maliyette modüller üretmekti.

İnce film silisyum güneş pillerinin bir avantajı da çok düşük ışık şiddetlerinde bile akım üretebilmesi. Güneş pili elektronik hesap makinalarının floresan lamba ışığında bile çalışabildiği herkesin bildiği bir olaydır. İnce film silisyum güneş pilleri ışık dalga boyu olarak mor renklere daha hassastır. İnce film tabanı olarak şeffaf plastik veya cam kullanıldığında mor ışıkları süzen, kırmızı ışıkları ileten saydam güneş pilleri elde edilmektedir. Gelecekte saydam güneş pillerinin binalarda elektrik üretiminde kullanılması tasarlanmaktadır [9].

### **3.3 İnce Film Depolama Teknikleri**

İnce filmlerin üretimi için kullanılan teknikleri iki ana başlık altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi fiziksel teknikler, ikincisi ise kimyasal tekniklerdir. Fiziksel tekniklerde filmi oluşturacak malzeme, bir hedef kaynaktan taban malzeme yüzeyine doğru hareket eder. Bu metot metal filmler gibi tek bileşenli filmlerin üretiminde yaygın bir şekilde kullanılır. Fiziksel tekniklerin altında, hem buharlaştırma hem de bir etki işlemiyle gaz halinde çökeltmenin yapıldığı vakum da buharlaştırma ve püskürtme yöntemleri sayılabilir. Kimyasal reaksiyonları içeren kimyasal tekniklerde ise, çoğunlukla bileşenler taban malzemenin yüzeyinde veya çevresinde bir reaksiyona maruz kalmaktadır. İnce filmlerin oluşumunda; Vakum Buharlaştırma, Sprey Püskürtme, Titreşimli Elektron Depolama, Elektron Depolama, Titreşimli Lazer Depolama, Moleküler Işın Epitaksi, Modifiye Kimyasal Banyo Depolama, Kimyasal Banyo Depolama... gibi yöntemler kullanılmaktadır [10-12].

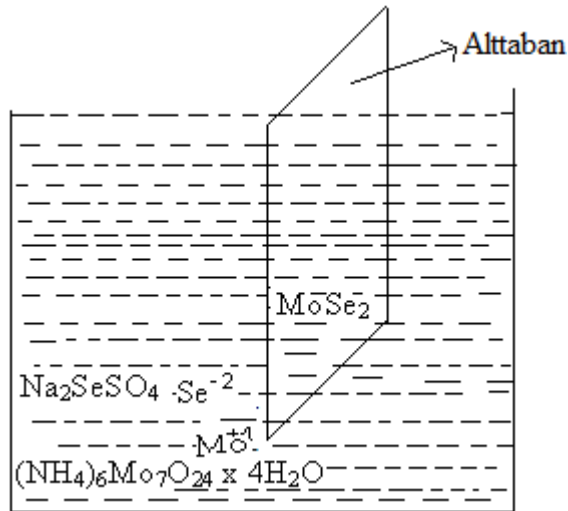
MoSe<sub>2</sub> ince filmlerini büyötmek için, bölümümüzde sahip olduğumuz imkânlar dâhilinde ve amacımıza uygun olması, pratik olması, fazla zaman kaybına sebep olmaması, maliyetinin düşük olması, büyüme boyunca çözelti konsantrasyonu, sıcaklık ve çözelti pH'ı gibi parametrelerin kolaylıkla kontrol edilebilmesine imkân veren bir teknik olması sebebiyle CBD tekniğinin kullanılmasına karar verilmiştir.

### 3.4 Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi (CBD)

CBD yöntemi, belirli sıcaklıklarda filmi oluşturacak çözelti iyonlarının alttaban üzerinde yavaş bir şekilde oluşmasına dayanan bir yöntemdir. Çözeltinin sıcaklık ve pH değerleri büyütülecek filmin kalınlığını etkilerler. CBD yöntemi ile geniş bir bölgede ucuz bir maliyetle film elde edilebilir. Aynı zamanda çözeltideki madde miktarının çözünürlük çarpanlarının belirlenmesi ile üretilen filmlerin yapısı ayarlanabilir. CBD yönteminin ilk yapılışı 1884 yılında J.E. Reynolds tarafından PbS'nin depolanması ile olmuştur [13].

Sülfat yokluğunda CBD yöntemi, bir alkali metalin kalgonit kaynağını, metal iyonlarını ve eklenen temel alkali metallerini kapsar. Metal iyonları, pH'ın düşük veya yüksek olması nedeniyle depolamada önemli bir unsur olarak kullanılır. Bu şartlar altında alkalın çözelti içerisindeki  $S_2$  iyonları düşük konsantrasyonlarda tamponlanırlar.

CBD yöntemi ile teknolojiye yararlı metaller ve bunların bileşimi olan filmler üretilmiştir. Alttabanlar üzerindeki filmler, alttabanların yüzeyleri ile çözelti içerisinde bulunan madde miktarının fazlalığı tarafından belirlenir. Bu yöntemin temelinde elektroliz olayı vardır. Bu yöntem Şekil 3.4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 3.4.1  $Mo^{+4}$  ve  $Se^{-2}$  iyonlarının alttaban üzerinde  $MoSe_2$  bileşiği oluşturması.

Elektrolizde olduğu gibi Mo ve Se saf suda iyonlara ayrılır. Daha sonra içeriye daldırılmış, temizlenmiş cam alttaban veya Si, GaAs, GaSe gibi kristal tabanlar üzerinde  $\text{Mo}^{+4}$  ve  $\text{Se}^{-2}$  iyonları  $\text{MoSe}_2$  bileşimini oluşturur.

Kimyasal Banyo Depolama (CBD) yöntemiyle alttaban üzerinde ince filmin oluşması maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1) Alttaban ile etkileşecek olan maddenin atomlarının hız bileşenleri alt tabanla normale düşer ve fiziksel olarak alt tabanın yüzeyine soğurulurlar.

2) Soğurulmuş atomlar başlangıçta alttaban ile ısısal dengede değildir ve alttabanın yüzeyine doğru hareket ederler. Bu işlem sırasında birçoğu birbirleriyle etkileşmeye girer ve kümeler oluşur.

3) Kümeler ya da çekirdek olarak isimlendirilen düzenlenme termodinamik olarak kararlı değildir ve depolama parametrelerine bağlı olarak bir zaman sonra yüzeyden ayrılma eğilimindedir. Eğer yüzeyden ayrılmaya başlamamış soğurulmuş türler çarpışma yaparsa kümenin büyüklüğü artmaya başlar. Belirli bir kritik büyüklüğe ulaştıktan sonra küme termodinamik olarak kararlı olmaya başlar. Kararlı, kimyasal olarak soğurulmuş, kritik büyüklüklü çekirdek oluşumunu içeren bu basamak çekirdek evresi olarak adlandırılır.

4) Kritik çekirdek, bir çekirdek doyurma yoğunluğuna ulaşıncaya kadar sayısı kadar büyüklüğü bakımından da büyür. Büyütülmüş çekirdekler adalar olarak adlandırılır. Çekirdek yoğunluğu ve ortalama çekirdek büyüklüğü; türlere etki eden enerji, etkinin oranı, soğurma aktivasyon enerjisi, ayrılma, ısısal difüzyon, sıcaklık ve alttabanın kimyasal doğası gibi parametrelere bağlıdır.

5) Film oluşumu için bundan sonraki evre birleşme evresidir. Bu evre, küçük adaların birbirleriyle yüzey alanını küçültmek üzere birleşmeye çalıştıkları evredir. Büyük adaları oluşturma eğilimi “topluluk” olarak adlandırılır ve topluluk soğurulmuş türlerin yüzeydeki mobilitesini iyileştirir. Örneğin, alttaban sıcaklığını artırarak bu iyileştirme

sağlanabilir. Bazı durumlarda yeni çekirdeğin oluşumu bir birleşme sonucu temiz bir alanda meydana gelebilir.

6) Daha büyük adalar kaplanmamış altlıkların delikleriyle ve kanalların ayrılmasıyla birlikte büyür. Bu evredeki filmlerin yapısı tümüyle sürekli film deliklerinin ve kanalların doldurulması şartıyla sürekli olmayan ada tiplerinden gözenekli ağ tiplerine kadar değişir. Büyütme işlemi çekirdeğin bir statiksel üretimine dayandırılarak yüzey difüzyonunun üç boyutta taneciklerin büyütülmesinin kontrol edilmesi, bir ağ yapısının oluşturulması ve sürekli bir film vermesi için bunun en sonunda doldurulması olarak özetlenebilir [8].

### **3.5 İnce Film Büyümesine Etki Eden Faktörler**

#### **3.5.1 Taban sıcaklığının etkisi**

CBD yönteminde kontrol edilebilir ve büyüme işleminde de son derece etkili olan parametrelerden birisi taban sıcaklığıdır. CBD metodunda çözeltiler bir sıcaklık kontrol ünitesinin üzerinde yer almaktadır ve bu sayede taban sıcaklığı istenilen seviyeye ayarlanabilmektedir. Uygun taban sıcaklığının seçimi son derece önemlidir. Çözeltilere uygun bir taban sıcaklığı uygulanması sonucunda iyonlara belli bir kinetik enerji kazandırılmaktadır. Bu sayede iyonların difüzyon hızları arttığı için taban malzeme yüzeyine tutunmaları daha kolay olmakta ve daha az sürede ve daha düşük daldırma sayılarıyla daha kaliteli ince filmler elde edilmektedir. Taban sıcaklığının fazla olması durumunda iyonların aşırı difüzyonu sonucunda taban yüzeyinde bir anda birikme olacağından dolayı film taban yüzeyinde tortu şeklinde birikecektir [2].

#### **3.5.2 Çözelti pH'ının etkisi**

CBD yönteminde filmlerin büyümesinde etkili olan parametrelerden birisi de çözeltilerin pH'ıdır. pH bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini tarif eden bir ölçü

birimidir.  $pH = -\log [H^+]$  olup çözelti içerisindeki hidrojen iyonun eksi logaritması olarak verilir. pH hidrojen iyonunun aktivitesi cinsinden bir asit veya bazın derecesini ifade etme yoluyla ihtiyaç duyulan niceliksel bilgiyi sağlar. pH  $[H^+]$  iyonu ile  $[OH^-]$  iyonlarının konsantrasyonlarının doğrudan oranına bağlıdır. Eğer  $H^+$  konsantrasyonu  $OH^-$  konsantrasyonundan fazla ise çözelti asidik; yani pH değeri 7'den düşüktür. Eğer  $OH^-$  derişimi  $H^+$  konsantrasyonundan fazla ise çözelti bazik; yani pH değeri 7'den büyüktür. Eğer  $OH^-$  ve  $H^+$  iyonlarından eşit miktarlarda mevcutsa, madde 7 pH değerine sahip olmak üzere nötrdür. Asit ve bazlar her biri serbest hidrojen ve hidroksil iyonlarına sahiptirler. Belli koşullarda ve belli bir çözeltide hidrojen ve hidroksil iyonlarının ilişkileri sabit olduğu için, birini tespit etmek diğerini bilmek ile mümkündür. Bu anlamda, pH tanımsal açıdan hidrojen iyonu aktivitesinin seçici bir ölçümü olsa da, hem alkalinite hem de asitliğin bir ölçüsüdür. pH logaritmik bir fonksiyon olması açısından, pH değerindeki bir birimlik değişim hidrojen iyon derişimindeki on katlık değişime karşılık gelir [2].

Çözeltiler hazırlanırken pH'ları en uygun seviyeye ayarlanmalıdır. Bu amaçla kullanılacak tampon çözeltiler pH'ın sabit kalmasını sağlayacaktır. Çözeltilerin pH'ı ayarlanırken eklenen çözeltilerin özgün çözeltinin konsantrasyonunu değiştirmemesine dikkat edilmelidir. Uygun pH seçimi film büyümesinde son derece önemlidir [2].

### **3.5.3 Alttabanın etkisi**

Elde edilecek filmin özellikleri alttabanın temizliği ile yakından ilgilidir. Çünkü alttaban üzerindeki kirlenmeler oluşacak filmin yapısına etki eder. Buda bizim iyi bir sonuç almamızı engelleyebilir. Bu nedenle alttabanlar hazırlanırken temiz olmalarına dikkat edilir.



### 3.5.4 MoSe<sub>2</sub> ince filminin optik ve elektrik özellikleri üzerinde yapılan çalışmalar

Milnes, A., Feucht, D.L. tarafından yapılan bir çalışmada MoSe<sub>2</sub> ince filmin yasak bant aralığı,  $I=I_0.e^{-\alpha.d}$  ve  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  ölçümlerinden  $E_g=1,16$  eV bulunmuştur.  $a=b=0,329$  nm,  $c=1,212$  nm'dir ( $a=b=3,285$  Å,  $c=12,94$  Å) [12].

ULUTAŞ, C. tarafından yapılan çalışmada MoSe<sub>2</sub> ince filmin yasak bant aralığı,  $E_g= 1,14$  eV bulunmuştur [13].

Mallouky, A. and Bernede, J.C. ve EL-Mahalawy, S.H. and Evans, B.L. tarafından yapılan çalışmalarda 303–603 K aralığında;

$$\sigma = \sigma_0 \exp(E_A / K_B T) \quad (3.5.3.1)$$

için  $E_A= 0,57$  eV bulunmuştur [14,15].

$\ln(\sigma T^{-1})$ 'den,

$$\sigma = T^{-1/2} \exp\left(-\frac{E_g/2 + e_T}{K_B T}\right) N^* > N, \quad (3.5.3.2)$$

$\log(\sigma T^{1/2}) \sim 1/T$  den,

$$\sigma = T^{-1/2} \exp\left(-\frac{Y_B}{K_B T}\right) N^* < N \quad (3.5.3.3)$$

Delphine, S. M., Jayachandran, M., Sanjeeviraja, C. tarafından yapılan çalışmada  $E_A=0,71-0,86$  eV ve eT- tuzak enerji durumu (trapped energy state) için  $eT(eV) = 0,365-0,21$  eV bulunmuştur. YB- engel yüksekliği (barrier height);  $YB=0,123-0,11$  eV değerleri bulunmuştur [16].

Koma, A. tarafından yapılan çalışmada CBD yöntemiyle oluşturulmuş MoSe<sub>2</sub> ince filmi n- tipi olarak bulunmuştur. Yapılan araştırmada E<sub>f</sub> =1,43 eV, elektriksel iletkenlik ise  $\sigma=10^{-4} \Omega^{-1}m^{-1}$  olarak ölçülmüştür [17].

MoSe<sub>2</sub>, WSe<sub>2</sub>... gibi geçiş metal bileşikleri güneş enerjisini verimli olarak elektrik enerjisine çeviren hücrelerde kullanılabilen bileşiklerdirler [18].

Optik soğurma;

$$\alpha = \left(\frac{A}{h\nu}\right)(h\nu - E_g)^n \quad (3.5.3.4)$$

formülüne göre hesaplanmıştır. İzinsiz direk geçiş için n=3/2, indirek geçiş için n=2 ve direk izinli geçişte n=1/2 olması beklenir.  $\alpha \sim 10^4 \text{ cm}^{-1}$  direk bant geçişli E<sub>g</sub>=1,43 eV olduğu gösterilmiştir [19].

Sharma, C.N., et al., Caillat, T., et al., Rao, C.N., Horak J., et al., Zhao, Ohtaki, et al. tarafından yapılan çalışmalarda da MoSe<sub>2</sub> ince filminin n-tipi iletkenliğe sahip olduğu görülmüştür [20-24].

Deshpande, M.P., et al., tarafından yapılan çalışmada termoelektrik etkilerden MoSe<sub>2</sub> ince filminin daha öncede olduğu gibi n-tipi olduğu görülmüştür [26].

Hankare, P.P., et al. tarafından yapılan çalışmada alkalın ortamında amonyum molibden, hidrazin hidrat ve sodyum selenosülfat çözeltilerinden MoSe<sub>2</sub> ince filmi oluşturulmuştur [25].

Hankare, P.P., et al. tarafından yapılan çalışmada aktivasyon enerjisi E<sub>A</sub>=0,058 eV bulunmuştur. T=300-525 K aralığında elektriksel iletkenlik ise  $\rho=5,01.10^4 - 4,67.10^2 \Omega\text{cm}$  azalmıştır [29].

Delphine, S. M., et al. tarafından yapılan çalışmada kalınlık T=360 K'de filmin kalınlığı 0,4 µm ve T= 200 K'de depolanan filmin kalınlığı maksimum olmuştur. Tanecik boyutu scherrer formülünden yararlanılarak 275 Å olarak bulundu [28].

X-ışını kırınım (XRD) analizi sonucu (100) (103) (105) (200) (204) yansıma saçılmalarına göre MoSe<sub>2</sub> filmlerinin örgü sabitleri a=3,325 Å ve c=12,92 Å olan hekzagonal yapılı mikro kristallerden oluştuğu gösterilmiştir. Scherrer formülüne göre kristal nanoparçacıkların 224 Å ölçekte olduğu görülmüştür.

Optik soğurma; denklem 3.5.3.4 bağıntısında, n=2 direk bant aralıklı yarıiletkenlerde gözlenir. MoSe<sub>2</sub> ince filminin soğurma spektrumundan soğurmanın enerji ile  $((ah\nu)^2 - h\nu)$  değiştiği görülür. Bu lineer bölge uzantısı, h<sub>0</sub> eksenini 1,43 eV'de keser. Bu daha önce de Koma, A., tarafından alınan sonuçla uyumludur [17].

MoSe<sub>2</sub> filminin iletkenliği 300 K'de  $4,144.10^{-2} \Omega^{-1}cm^{-1}$  ve 500 K'de  $5,525.10^{-2} \Omega^{-1}cm^{-1}$  olurken aktivasyon yüksek sıcaklıkta E<sub>A</sub>=0,605 eV ve düşük sıcaklıklarda  $10^3/T = 4-2,5$  aralığında E<sub>A</sub>=0,005 eV bulunmuştur.

CBD yöntemiyle büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin soğurması 800-1100 nm aralığında görülür.

Joseph Sahaya Anond, T., et al., tarafından yapılan çalışmada tabakalı MoSe<sub>2</sub> filmleri elektrosentez yöntemiyle oluşturularak araştırılmıştır [27].

Delphine, S. M., et al. ve Hankare, P.P., et al. tarafından yapılan çalışmalarda MoSe<sub>2</sub> ince filminin bant aralığının E<sub>g</sub>=1,43 eV olduğu gösterilmiştir [16,25].

Polikristal MoSe<sub>2</sub> ince filminin indirek bant aralıklı E<sub>g</sub>=1,17 eV yarıiletken olduğu görülmüştür. Önceki'te Kristallerin parçacık büyüklükleri 75 – 300 nm olmuştur.

Elektron depolanarak oluşturulan MoSe<sub>2</sub> ince filminin XRD analizi sonucu örgü sabitleri a=b=3,291 Å ve c=12,97 Å olan hekzagonal yapıya sahip parçacıklardan oluştuğu görülmüştür.

Kristallerin tanecik boyutları (103) (104) (100) (110) piklerinin FWHM- lerinden 75 – 90 nm boyutlarında oldukları belirlenmiştir. Açık havada 100 – 200 °C’de tavlama MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin XRD spektrumundaki piklerinin azda olsa şiddetlerinin arttığını göstermiştir.

Hankare, P.P., et al ve Joseph Sahaya Anond, T., et al., tarafından yapılan çalışmalarda  $(\alpha h\nu)^2 - h\nu$  grafiğinden optik soğurma spektrumunun yasak enerji aralığı E<sub>g</sub>=1,17 eV olarak bulunmuştur. Böyle sonuç E<sub>g</sub>=0,25 eV elektron depolama yöntemiyle alınmış MoSe<sub>2</sub> için başka bir çalışmada da alınmıştır [25,27].

Delphine, S. M., et al. tarafından yapılan çalışmada polikristalik düzenli MoSe<sub>2</sub> ince filmi (pulsed elektro deposition technique) oluşturulmuştur. Oluşturulan MoSe<sub>2</sub> ince filminin kristal yapısı örgü sabitleri a=b=0,3285 nm ve c=1,294 nm olan hekzagonal kristal olduğu bulunmuştur [28].

Delphine, S. M., et al. tarafından yapılan çalışmada kalınlığı 0,7 µm olan MoSe<sub>2</sub> için optik soğurma spektrumundan indirek geçişli olduğu ve yasak bant aralığı E<sub>g</sub>=1,16 eV olarak bulunmuştur. MoSe<sub>2</sub> filminin elektriksel öz direncinin 303 – 623 K arasında  $4,5 \cdot 10^4 - 0,1 \cdot 10^4 \Omega \text{cm}$  azaldığı ve  $\sigma = \sigma_0 \exp(-E_A / K_B T)$ ’ye bağlı olarak değiştiği görülmüştür. Aktivasyon enerjisi ise E<sub>A</sub>=0,57 eV olarak bulunmuştur. Bu bölgede yapışma düzeyinin enerji konumu;

$$\sigma = T \exp\left(-\frac{E_g/2 + \ell_T}{K_B T}\right) N^* > N \quad (3.5.3.5)$$

bağlantısının deneysel sonuçlarından  $(\log(\sigma T))^{1/2} \sim 1/T$  grafiğinden) e<sub>T</sub>=0,325 – 0,201 eV olarak bulunmuştur. Buna paralel olarak deneysel sonuçların,

$$\sigma \approx T^{-1/2} \exp\left(-\frac{\ell_T}{K_B T}\right) N^* \ll N \quad (3.5.3.6)$$

durumunda engel yükseklikleri için 0,123 – 0,162 eV aralığında değişen değerler alınmıştır [28].

Kuartz, cam üzerinde MoSe<sub>2</sub> filmleri CBD yöntemi ile oluşturulmuştur. Büyütölen kristallerin yapısı a=b=3,325 Å, c=12,92 Å hekzagonal olmuştur. Scherrer yöntemi ile parçacıkların büyüklüğü 124 Å civarında ölçölmüştür. Soğurma spektrumundan direk bant aralığı E<sub>g</sub>=1,43 eV, oda sıcaklığında iletkenlik ise  $\sigma=10^{-2} \Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  olarak bulunmuştur. Mikro bölgelerden saçılma E<sub>a</sub>=0,605 eV bulunmuştur [25].

## **4. MATERYAL VE METOT**

### **4.1 Na<sub>2</sub>SeSO<sub>4</sub> Çözeltisinin Hazırlanması**

Selenyum kaynağı olarak Na<sub>2</sub>SeSO<sub>4</sub> çözeltisi kullanıldı. Bu çözeltiyi elde etmek için 5gr selenyum (Se) ile molekül ağırlığı 126,04 gr/mol olan sodyum sülfitten (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) 15gr alınarak karıştırıldı ve çözeltinin hacmi saf su ile 200 ml'ye tamamlandı. Daha sonra çözelti karıştırılıp iyice çözüldükten sonra 10 saatlik süre ile 90 °C'de fırına bırakıldı. Çözelti 10 saatin sonunda fırından çıkarıldı ve oda sıcaklığında soğumaya bırakıldı. Soğuyan çözelti süzme kâğıdı ile süzülerek selenyum tozlarından temizlendi.

### **4.2 Alt tabanların Temizlenmesi**

Çalışmalarda taban malzemesi (substrate) olarak Si, kristal GaSe ve 76mm x 26mm x 1mm boyutlarında cam tabanlar kullanıldı. Cam temizleme işlemi düzgün ve sistemli bir şekilde yapıldı. Çözeltide kullanılan beherler, pipetler asitten geçirildikten sonra saf sıcak deterjanlı suda yıkandı. Ardından yine sıcak saf suda yıkandı ve son olarak ılık saf suda durularak fırında kurutuldu. Cam alttabanlar kromik asitte kaynatıldı, sonra saf sıcak deterjanlı sudan geçirildi. Tekrar saf suda durularak fırında kurutuldu. Silisyum alt tabanı ise asetonla temizlendi ve ardından saf sudan geçirilerek normal ortamda kurumaya bırakıldı.

### **4.3 Kimyasal Banyo Depolama Yöntemi Kullanılarak MoSe<sub>2</sub> İnce Filmlerin Büyütülmesi**

Molibden diselen ince filmlerini oluşturmak için; amonyum molibden, tartarik asit, hidrazin hidrat ve sodyum selenosülfat gibi kimyasal maddelerin çözeltileri kullanıldı. Her çözelti saf su ile hazırlandı. Molibden diselen ince filmlerin depolanması için sodyum selenosülfat bir selenyum kaynağı olarak kullanıldı.

MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin büyütülmesi için, molibden (Mo<sup>+4</sup>) iyonları için kaynak çözelti olarak % 99 saflıkta amonyum heptamolybdate [(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub> x 4H<sub>2</sub>O] (M<sub>A</sub>=1235,86 g/mol) kristali kullanıldı. Selenyum (Se<sup>-2</sup>) iyonları için kaynak olarak selenyum (Se) ve sodyum sülfat Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub> (M<sub>A</sub>=126,04 g/mol) kristalinden elde edilen 0,25 N olan Na<sub>2</sub>SeSO<sub>4</sub> çözeltisi kullanıldı. Ortamın pH'ını düzenlemek için tartarik asit [C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>6</sub>] (M<sub>A</sub>=150,09 g/mol) çözeltisi kullanıldı.

MoSe<sub>2</sub> ince filmini oluşturmak için gerekli olan çözeltiler maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- 1) 0,2 M'lık amonyum molibden çözeltisi
- 2) 1 M'lık tartarik asit çözeltisi
- 3) % 10'luk hidrazin hidrat çözeltisi
- 4) 0,25 N'lik sodyum selenosülfat çözeltisi
- 5) Saf su

Çözeltiler aşağıdaki formülden yararlanılarak ihtiyaca göre yeterli miktarlarda hazırlandı.

$$M=n/v, n=m/M_A \quad (9.3.1)$$

a) 0,2 M 50 ml'lik molibden çözeltisi için;

$$M=n/v, 0,2=n/0,05 \text{ ise } n=0,01 \text{ mol}$$

$n=m/M_A$ , 0,01 mol= $m/1235,86$  gr/mol olduğundan  $m=12,3586$  gr bulunur. Amonyum heptamolybdate % 99 saflıkta olduğundan;  $m=12,3586$  % 99'u  $m=12,2350$  gr olur. 12,2350 gr molibden tuzu saf su ile 50 ml'ye tamamlanır.

b) 1M 50 ml'lik tartarik asit çözeltisi için;

$$M=n/v, 1=n/0,05, n=0,05 \text{ mol}$$

$n=m/M_A$ , 0,05 mol  $=m/150,09$  gr/mol olduğundan  $m=7,5045$  gr bulunur. Tartarik asit %99,5 saflıkta olduğundan;  $m=7,5045\%99,5$ 'i  $m=7,4669$  gr olur. 7,4669 gr tartarik asit tuzu saf su ile 50 ml'ye tamamlanır.

c) % 10'luk hidrazin hidrat çözeltisi için;

% 80.  $V_1=\% 10.100$  ise  $V_1=12,5$ ml

% 10'luk hidrazin hidrat çözeltisi için; % 80'lik hidrazin hidrattan ( $N_2H_5OH$ ) 12,5 ml'lik alınarak üzerine toplam hacim 100 ml olacak şekilde saf su ilave edilir.

Elde edilen çözeltiler elektromanyetik ısıtıcı üzerinde Resim 4.3.1'de görüldüğü gibi 5 dakika bekletilerek çözünmesi sağlanır. Daha sonra iyi çözülmüş olan bu çözeltilerden ince film oluşturmak için yeterli miktarlarda karıştırılarak ince film büyütme işlemi gerçekleştirilir.



**Resim 4.3.1** Elektromagnetik ısıtıcı üzerinde çözeltilerin çözünmesi.



### 4.3.1 Çözeltinin hazırlanması

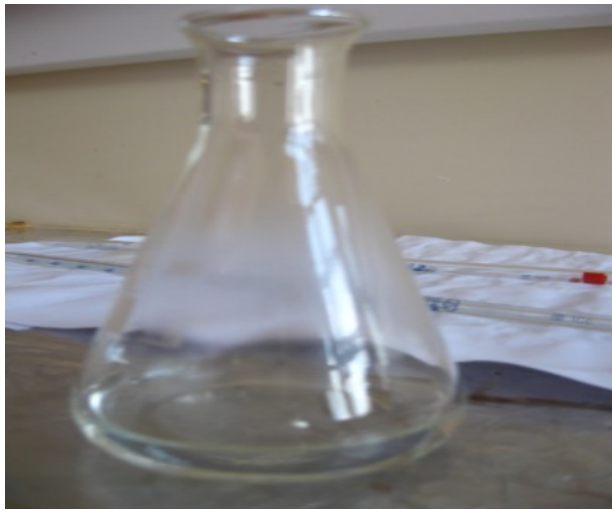
100 ml'lik beher içerisinde çözeltinin hazırlanması maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

1. İlk önce hazırlanan amonyum molibden çözeltisinden 10 ml alınarak 100 ml'lik beher içerisine aktarıldı. (Resim 4.3.1.1)



**Resim 4.3.1.1** 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi.

2. 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi üzerine 5 ml tartarik asit çözeltisi eklendi. (Resim 4.3.1.2)



**Resim 4.3.1.2** 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi ile 5 ml'lik tartarik asit çözeltisinin karışımı.

3. Bu iki çözelti karışımının üzerine 10 ml hidrazin hidrat çözeltisi eklendiğinde çözeltinin rengi önce sarı sonra giderek bordo oldu. (Resim 4.3.1.3)



**Resim 4.3.1.3** 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi ve 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisinin karışımı.

4. Daha sonra bu üç çözelti karışımının üzerine sodyum selenosülfat çözeltisinden 20 ml eklendiğinde çözeltinin rengi koyu bordo oldu. (Resim 4.3.1.4)



**Resim 4.3.1.4** 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi, 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisi ve 20 ml'lik sodyum selenosülfat çözeltisinin karışımı

5. Toplam hacim 80 ml olacağından dolayı bu dört karışımın üzerine 35 ml saf su eklendiğinde çözeltinin rengi açık bordo oldu. (Resim 4.3.1.5)



**Resim 4.3.1.5** 10 ml'lik amonyum molibden çözeltisi, 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi, 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisi, sodyum selenosülfat çözeltisi ve 35 ml'lik saf suyun karışımı.

6. Çözelti oluşturulduktan sonra homojen dağılımın gerçekleşmesi için manyetik karıştırıcıya konularak 5 dakika bekletildi. (Resim 4.3.1.6)



**Resim 4.3.1.6** Elektromanyetik karıştırıcı ile çözeltinin karıştırılması.

7. Çözelti 10 ml'lik beherlere konularak içine cam, Si ve GaSe alttabanları yerleştirildi.  
(Resim 4.3.1.7)



**Resim 4.3.1.7** Çözeltinin beherler içerisine eklenmesi.

8. MoSe<sub>2</sub> ince filminin alınması için beherler yağ banyosu içinde elektromanyetik ısıtıcı üzerine bırakıldı (Resim 4.3.1.8).



**Resim 4.3.1.8** Elektromanyetik ısıtıcı üzerindeki yağ banyosu.

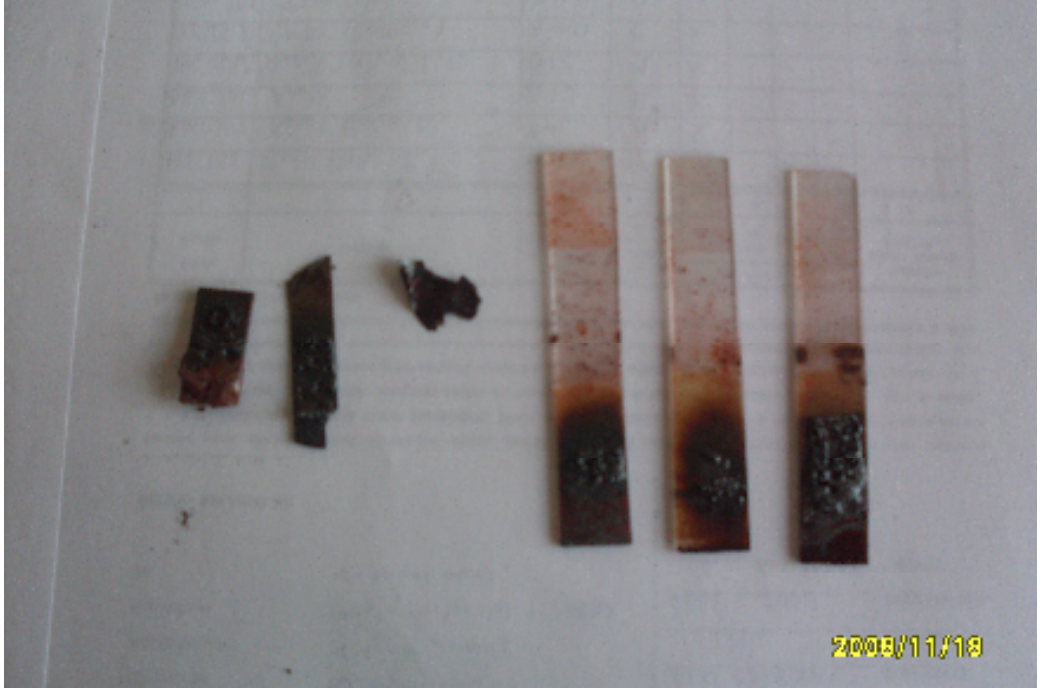
#### 4.3.2 2.grup MoSe<sub>2</sub> ince filmleri

2. grup MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin büyütülmesi için 80 ml'lik çözelti aşağıdaki gibi hazırlandı.

- a) 0,2 M molibden çözeltisinden 10 ml.
- b) 1 M tartarik asid çözeltisinden 5 ml.
- c) % 10 hidrazin hidrat çözeltisinden 10 ml.
- d) 0,25 N sodyum selenosulfat çözeltisinden 20 ml.
- e) saf sudan 35 ml.

Çözeltinin hazırlanması sürecinde gerçekleşen tepkimelerden dolayı çözeltide değişik renkler gözlemlendi. 10 ml'lik molibden çözeltisine 5 ml'lik tartarik asit çözeltisi eklediğimizde çözeltinin renginin değişmediği gözlemlendi. Ancak bunların üzerine % 10'luk 10 ml'lik hidrazin hidrat çözeltisi ilave edildiğinde çözeltinin renginin sarımsı ve daha sonra giderek koyu bordo olduğu gözlemlendi. Daha sonra bu çözeltilerin üzerine 20 ml'lik sodyum selenosülfat çözeltisi eklendiğinde karışımın tepkimeye girdiği ve çözelti renginin açıldığı gözlemlendi. Elde edilen bu çözeltiye 35 ml'lik saf su ilave edildiğinde çözeltinin rengi tam olarak bordo oldu.

Elde edilen bu çözelti manyetik karıştırıcı üzerinde 5 dakika bekletildikten sonra beherler içerisine dik olarak bırakılan temiz alttabanların üzerlerine eklendi. Alttaban olarak 3 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) kullanıldı. Filmi oluşturmak için içerisinde alttaban olan beherler, içerisinde yağ olan 500 ml'lik behere yerleştirildi. 60 °C 'de 3 saat yağ banyosunda bırakıldı. Resim 4.3.2.1'de 3 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülen ince filmler görülmektedir. Oluşan filmin kalınlığı 0,4 µm olarak belirlendi.



**Resim 4.3.2.1** 3 mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmleri.

### 4.3.3 3.grup MoSe<sub>2</sub> ince filmleri

3. grup MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin büyütülmesi için 80 ml'lik çözelti aşağıdaki gibi hazırlandı.

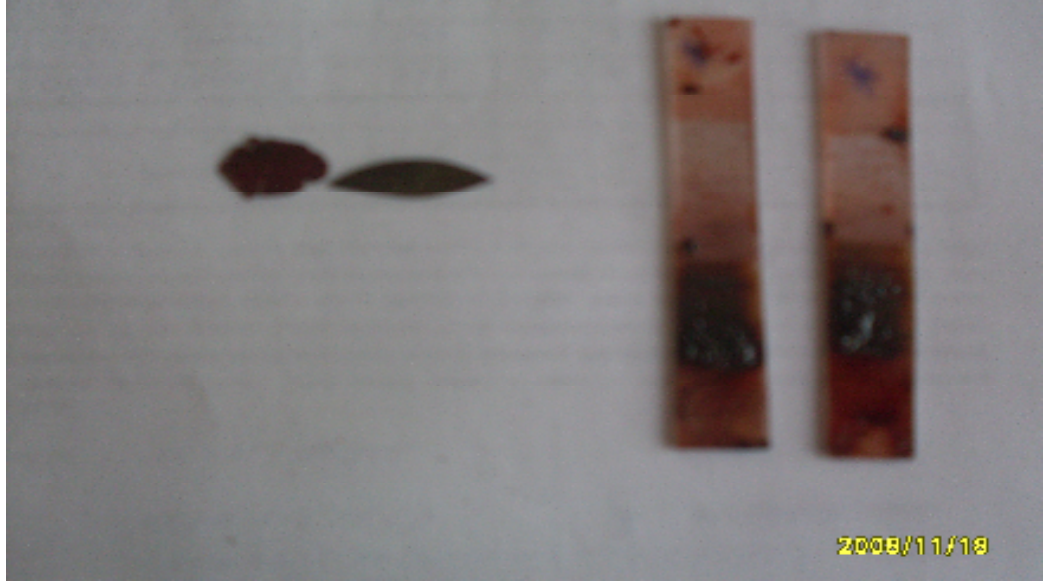
- 0,2 M molibden çözeltisinden 10 ml.
- 1 M tartarik asid çözeltisinden 5 ml.
- % 10 hidrazin hidrat çözeltisinden 10 ml.
- 0,25 N sodyum selenosulfat çözeltisinden 20 ml.
- saf sudan 35 ml.

Bir önceki grup (2.grup) için hazırlanan çözeltilerde görülen tepkimeler ve bu tepkimeler sürecindeki renkler bu grup için hazırlanan çözeltilerde de gözlemlendi.

Elde edilen bu çözelti manyetik karıştırıcı üzerinde 5 dakika bekletildikten sonra beherler içerisine dik olarak bırakılan temiz alttabanların üzerlerine eklendi. Alttaban olarak 2 adet mikroskop camı, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) kullanıldı. Filmi oluşturmak için içerisinde alttaban olan beherler, içerisinde yağ olan 500 ml'lik behere



yerleştirildi. 80 °C sıcaklıkta 3 saat yağ banyosunda bırakıldı. Resim 4.3.3.1’de 2 adet mikroskop camı, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülen ince filmler görülmektedir. Oluşan filmin kalınlığı 0,4 µm olarak belirlendi.



**Resim 4.3.3.1** 2 mikroskop camı, 1 adet Si ve 1 adet GaSe (saf) üzerine büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmleri.

#### 4.3.4 4.grup MoSe<sub>2</sub> ince filmleri

4. grup MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin büyütülmesi için 120 ml’lik çözelti aşağıdaki gibi hazırlandı.

- 0,2 M molibden çözeltisinden 15 ml.
- 1 M tartarik asid çözeltisinden 7,5 ml.
- % 10 hidrazin hidrat çözeltisinden 15 ml.
- 0,25 N sodyum selenosulfat çözeltisinden 30 ml.
- saf sudan 52,5 ml.

2.grup için hazırlanan çözeltilerde görülen tepkimeler ve bu tepkimeler sürecindeki renkler bu grup için hazırlanan çözeltilerde de gözlemlendi.

Elde edilen bu çözelti manyetik karıştırıcı üzerinde 5 dakika bekletildikten sonra beherler içerisine dik olarak bırakılan temiz alttabanların üzerlerine eklendi. Alttaban

olarak 4 adet mikroskop camı, 4 adet Si, 4 adet GaSe (0,01Ge katkı), 1 adet iletken cam kullanıldı. Filmi oluşturmak için içerisinde alttaban olan beherler, içerisinde yağ olan 500 ml'lik behere yerleştirildi. 27 °C sıcaklıkta 9 saat yağ banyosunda bırakıldı. Resim 4.3.4.1'de büyütülen ince filmler görülmektedir. Oluşan filmin kalınlığı 0,55 µm olarak belirlendi.



**Resim 4.3.4.1** 4 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 4 adet Si ve 4 GaSe (0,01Ge katkı) üzerine büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmleri.

#### 4.3.5 6.grup MoSe<sub>2</sub> ince filmleri

6. grup MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin büyütülmesi için 120 ml'lik çözelti aşağıdaki gibi hazırlandı.

- 0,2 M molibden çözeltisinden 15 ml.
- 1 M tartarik asid çözeltisinden 7,5 ml.
- % 10 hidrazin hidrat çözeltisinden 15 ml.
- 0,25 N sodyum selenosulfat çözeltisinden 30 ml.
- saf sudan 52,5 ml.

2.grup için hazırlanan çözeltilerde görülen tepkimeler ve bu tepkimeler sürecindeki renkler bu grup için hazırlanan çözeltilerde de gözlemlendi.



Elde edilen bu çözelti manyetik karıştırıcı üzerinde 5 dakika bekletildikten sonra beherler içerisine dik olarak bırakılan temiz alttabanların üzerlerine eklendi. Alttaban olarak 3 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 3 adet Si ve 3 adet GaSe (0,05 Sn katkı) kullanıldı. Filmi oluşturmak için içerisinde alttaban olan beherler, içerisinde yağ olan 500 ml'lik behere yerleştirildi. 27 °C sıcaklıkta 9 saat yağ banyosunda bırakıldı. Aynı numuneler tekrar 27 °C sıcaklıkta 9 saat yağ banyosunda bırakılarak iki daldırma yapıldı. Resim 4.3.5.1'de büyütülen ince filmler görülmektedir. İki kez daldırmadan dolayı oluşan filmin kalınlığı 1,1 µm olarak belirlendi.



**Resim 4.3.5.1** 3 adet mikroskop camı, 1 adet iletken cam, 3 adet GaSe (0,05 Sn katkı) ve 3 adet Si üzerine büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmleri.

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

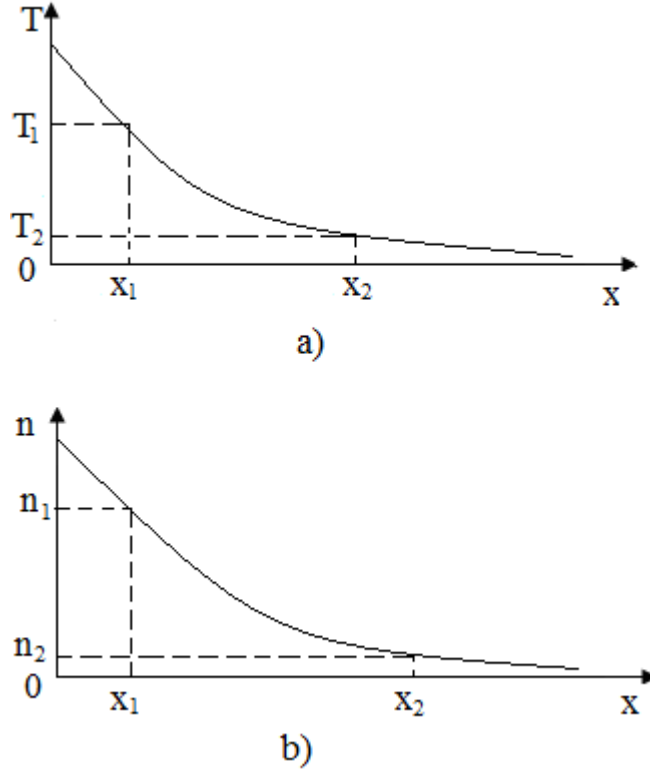
### 5.1 MoSe<sub>2</sub> İnce Filminin Kalınlığının Belirlenmesi

CBD yöntemi ile büyütülen ince filmin kalınlıkları elipsometre, hava kaması yöntemi ve depolanan filmin miktarı kullanılarak farklı yöntemlerle belirlenebilir. Eğer ölçülen büyüme oranı malzemenin örgü parametresini aşarsa, çözeltide homojen bir çökeltme meydana gelebilir. MoSe<sub>2</sub> ince filmi, sıcaklığa ve zamana bağlı olarak 27 °C sıcaklıkta 9 saat'te bir daldırma sayısında yaklaşık 0,55 µm'lik bir kalınlığa sahip olmaktadır [25]. Eğer 80 °C sıcaklıkta 3 saat'te bir daldırma yapılırsa yaklaşık 0,4 µm'lik bir kalınlığa sahip olmaktadır [29].

### 5.2 MoSe<sub>2</sub> İnce Filminin İletkenlik Tipinin Tayin Edilmesi

Yarıiletkenlerin iletkenlik tipini (n-tipi veya p-tipi) bulmak için, birkaç yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan biri Hall olayı yardımıyla Hall sabitinin ( $R_H$ ) işaretinin belirlenmesidir. Donor veya n-tipi yarıiletken için Hall sabitinin işareti negatiftir. Akseptör veya p-tipi yarıiletken için Hall sabitinin işareti pozitiftir. Termoelektrik ölçümlerden daha basit yöntemle yarıiletkenin iletkenlik tipi belirlenebilir. Önce, yarıiletkenlerde termoelektrik olayını göz önüne alalım. Yarıiletken (örneğin n-tipi yarıiletken) homojen olmayacak şekilde ısıtıldığında elektronların konsantrasyonu daha sıcak bölgede artarken x-ekseninin pozitif yönünde elektronların konsantrasyon gradyenti oluşmakta ve bu nedenle elektronlar daha sıcak bölgeden daha soğuk bölgeye doğru hareketlenmektedirler (Şekil 5.2.1.b). n-tipi yarıiletkende elektronların daha sıcak bölgeden soğuk bölgelere difüzyonu neticesinde, daha sıcak bölgede pozitif hacimsel yük (pozitif yüklü donör iyonlarından oluşmuş) ve daha soğuk bölgede elektron konsantrasyonunun fazlalığından oluşmuş negatif yük meydana gelmektedir. Böylece, sıcaklık gradyenti şartında ısınan yarıiletkende,  $x_1$  ve  $x_2$  noktaları arasında termal elektromotor kuvveti (TEMK) oluşmaktadır. Eğer yarıiletkenin bu noktaları kapalı devre haline getirilirse, bu durumda devreden termoelektrik akım geçecektir. p-tipi yarıiletkende tam tersine, pozitif yüklü boşlukların daha sıcak bölgeden daha soğuk

bölgeye difüzyonu nedeniyle, daha sıcak bölgede hacimsel negatif elektrik yükü oluşmaktadır [2].



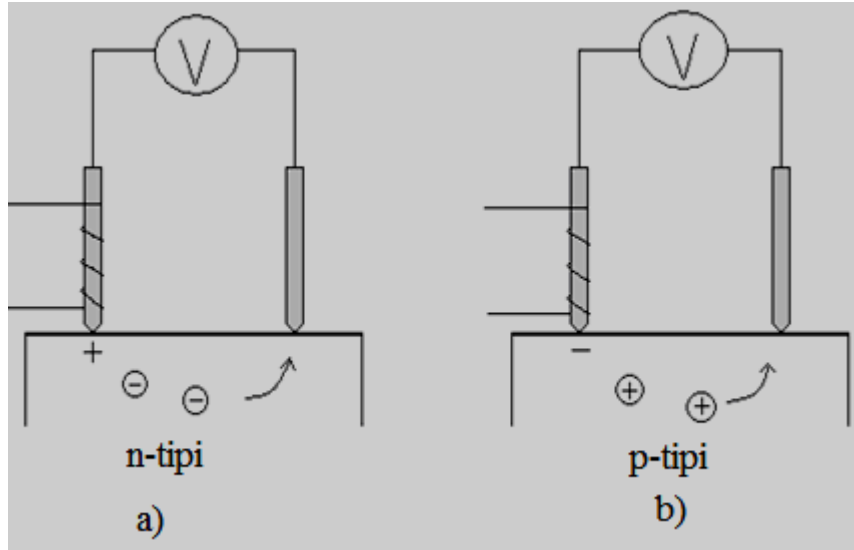
Şekil 5.2.1 Yarıiletkenlerde (a) sıcaklığın (b) elektron konsantrasyonunun dağılımı [2].

Böylece, sıcaklık gradyenti şartında ısınan yarıiletkende, kapalı devre termoelektrik akım oluşmaktadır. n-tipi yarıiletkende, elektronlardan oluşmuş akım ve p-tipi yarıiletkende, boşluklardan oluşmuş akım daha sıcak bölgelerden daha soğuk bölgeler yönünde hareket etmektedir. n-tipi yarıiletkende daha sıcak bölgenin elektrik kutbu pozitif, p-tipi yarıiletkende ise daha sıcak bölgenin elektrik kutbu negatiftir [2].

Şekil 5.2.2’de termal elektromotor kuvveti yöntemiyle yarıiletkenin yük taşıyıcılarının tipini bulmak için kullanılan devreler gösterilmektedir. Bu yöntemde iki prob uç kullanılır. Probonun biri ( $T_1$ ) ısıtılmakta (yaklaşık 200–300 °C ye kadar) ikinci ucunun sıcaklığı ( $T_2$ ) oda sıcaklığında tutulmaktadır. n-tipi yarıiletkende elektronlar daha sıcak ( $T_1$ ) uç civarından, oda sıcaklığında ( $T_2$ ) tutulan ucun yönünde hareketlenmektedirler. Neticede, daha sıcak ucun civarındaki yarıiletken bölgesinin elektrik kutbu pozitif ve

bu işaret devredeki voltmetre ile kaydedilmektedir (Şekil 5.2.2.a). p-tipi yarıiletken ise tersine, daha sıcak ucun elektrik kutbu negatif olmaktadır (Şekil 5.2.2.b). Deneysel ölçümlerde, yarıiletken örneklerin iletkenlik tipini bulmak için, öncelikle belirli tipe sahip yarıiletkenin TEMK ölçümü ile devredeki voltmetrenin kalibrasyonu yapılır ve daha sonra incelenen örneğin tipi belirlenir [2].

TEMK yöntemiyle düşük özdirençli katkı yarıiletkenlerin tipini belirlemek daha uygundur. Asal yarıiletkenlerin iletkenlik tipi daha yüksek mobilitesi olan yük taşıyıcılarının (elektronların) mobilitesi ile belirlenmektedir [2].



Şekil 5.2.2 Termal EMK yöntemiyle (a) n-tipi (b) p-tipi yarıiletkenin iletkenlik tipini ölçme devresi [2].

Bu çalışmada büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin iletkenlik tipinin tayini iki prob yöntemi kullanılarak yapıldı. Yapılan ölçümler sonucunda MoSe<sub>2</sub> ince filminin n-tipi bir yarıiletken olduğu belirlendi.

### 5.3 MoSe<sub>2</sub> İnce Filmlerinin Optik Soğurması

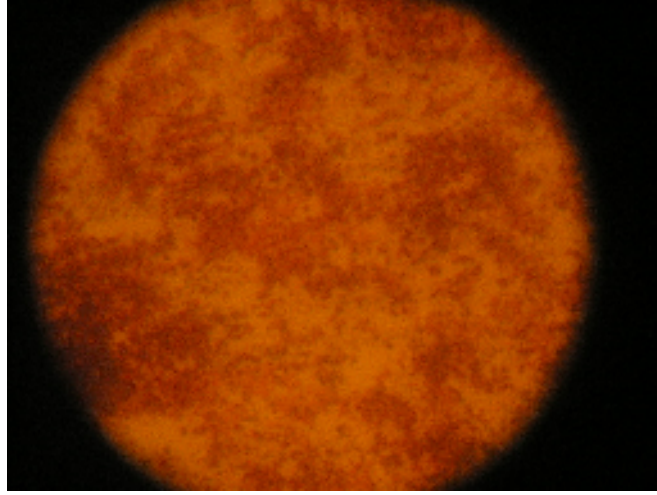
Burada cam, GaSe ve amorf Si tabanlar üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin optik soğurmalarının deneysel ölçümlerinin sonuçları ve yorumları verilmiştir. Soğurma spektrumu ölçümlerinde UV probe version 2.31 UV–1800 serili spektrometre ve T60 UV/VIS spektrometresi kullanıldı.

UV-1800 serili spektrophotometre ile yapılan ölçümlerde ilk önce her iki kuveze boş camlar konuldu. Basseline correction yapılarak boş camlar spektrophotometreye tanıtıldı. Daha sonra ikinci kuvezdeki boş cam alınarak yerine üzerinde MoSe<sub>2</sub> bulunan numune bırakıldı. 190 nm – 1100 nm arasında numunenin soğurma spektrumu ölçüldü. Diğer alttaban üzerindeki MoSe<sub>2</sub> numuneleri de aynı şekilde ölçüldü.

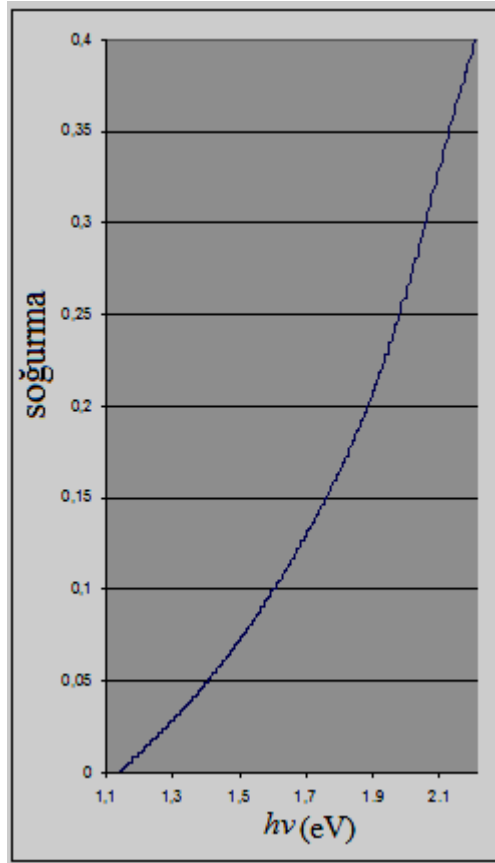
T60 UV/VIS spektrometre ile yapılan ölçümlerde ilk önce birinci kuveze boş cam bırakıldı ve basseline correction yapılarak boş cam spektrometreye tanıtıldı. Daha sonra spektrometre birinci kuvezdeki boş cama ayarlandı ve boş cam ölçüldü. Sonra ikinci kuveze üzerinde MoSe<sub>2</sub> olan numune bırakıldı ve spektrometre ikinci kuveze ayarlandı. 190 nm – 1100 nm arasında numunenin soğurma spektrumunun ölçümü yapıldı. Ölçülen boş camın spektrumu numunenin spektrumundan çıkarılarak filmlerin soğurma spektrumları elde edildi. Diğer alttaban üzerindeki MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin soğurma spektrumları da aynı şekilde ölçüldü.

Toplam soğurmadan ( $ABS=f(h\nu)$ ),  $\alpha(h\nu)=(1/d)ABS(h\nu)$  elde edildi. Burada d filmin kalınlığıdır. Sonra alınan sonuçlar optik soğurma teorisine uygun olarak incelendi. Optik soğurma bantlar arası direk geçişle belirlendiğinde  $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$  grafiği lineer olur. Bu grafiğin uzantısının  $h\nu$  eksenini kestiği enerji değeri direk yasak bant aralığına eşit olur. Eğer optik soğurma bantlar arası indirek geçişli olduğunda  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  grafiği lineer olur. Bu grafiğin uzantısının enerji eksenini kestiği indirek yasak bant aralığını belirler.

Cam üzerinde CBD yöntemi ile oluşturulan 4.grup ince filmlerin yüzeylerinin Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda incelenmesi sonucunda (Resim 5.3.1) örneğin adacıklardan oluşan yüzeye sahip olduğu gözlemlendi. Mikroskop camı üzerinde büyütülmüş 4.grup 1 nolu MoSe<sub>2</sub> ince filmin soğurma spektrumu Şekil 5.3.1’de verilmiştir.

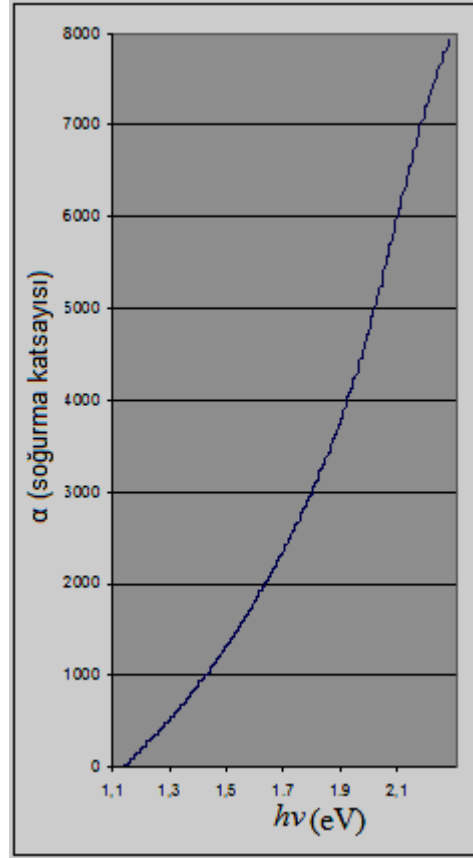


**Resim 5.3.1** 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 1 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.

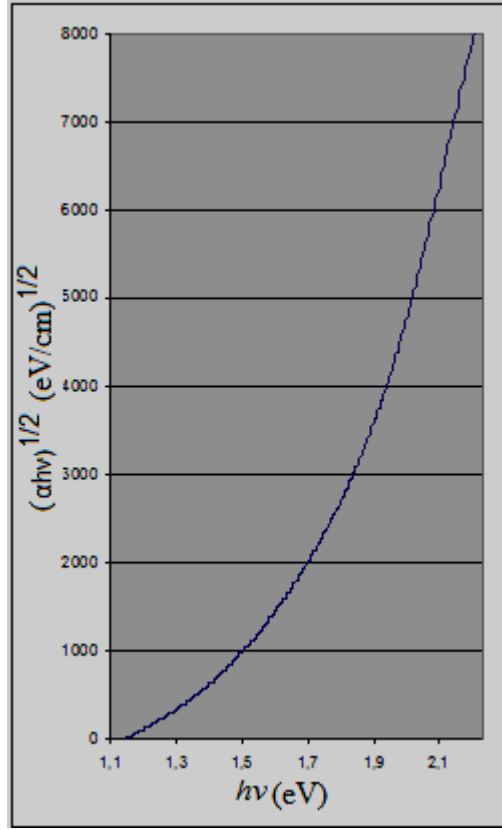


**Şekil 5.3.1** 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 1 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.

Bu 4. grup örneklerde daldırma sıcaklığı 27 °C ve film büyütme süresi 9 saat olarak alınmıştır. Burada filmin kalınlığı 0,55 µm olarak belirlenmiştir. Buradan  $\frac{ABS(h\nu)}{d} = \alpha(h\nu)$  formülüne göre soğurma katsayısının spektrumu Şekil 5.3.2’de verilmiştir.  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği ise Şekil 5.3.3’de verilmiştir.

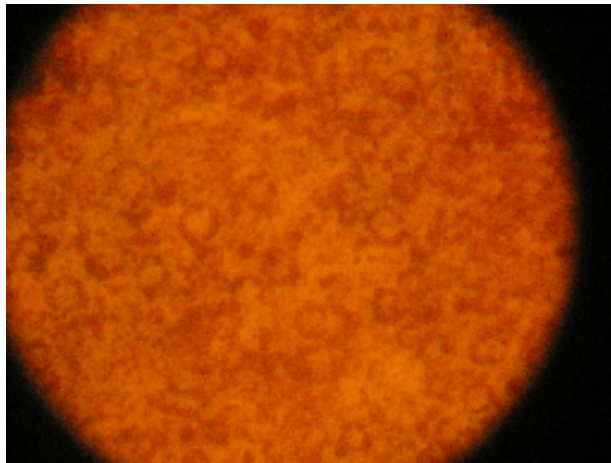


Şekil 5.3.2 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 1 nolu numune) soğurma spektrumu.



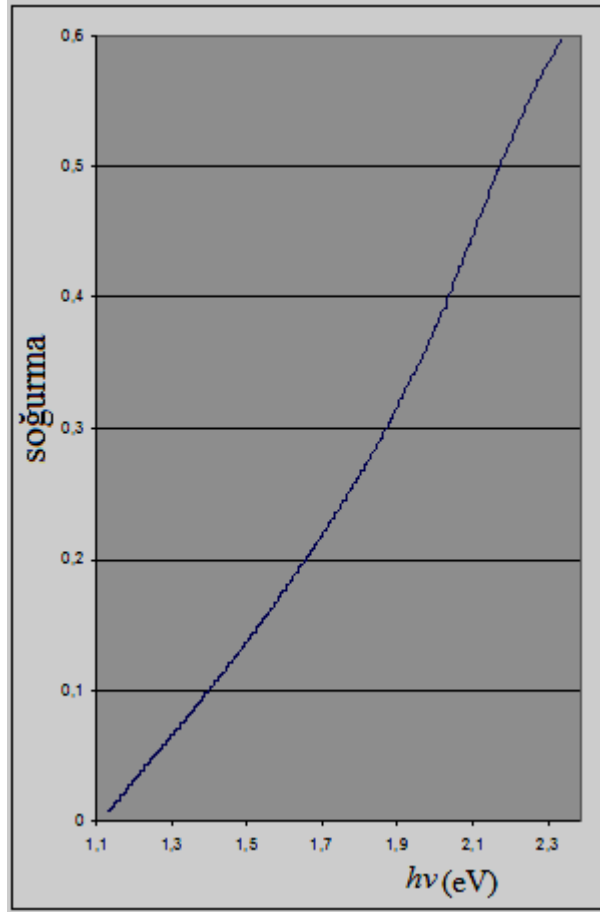
Şekil 5.3.3 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 1 nolu numune)  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği.

Buna paralel olarak 4. grup 2 nolu örneğin yüzeylerinin Nikon Coolpix 8800 mikroskofta incelenmesi sonucunda (Resim 5.3.2) adacıklardan (denrit) oluşan yüzeye sahip olduğu gözlemlendi. Bu örneğin toplam soğurma spektrumu Şekil 5.3.4’te ve Şekil 5.3.5’te verilmektedir.

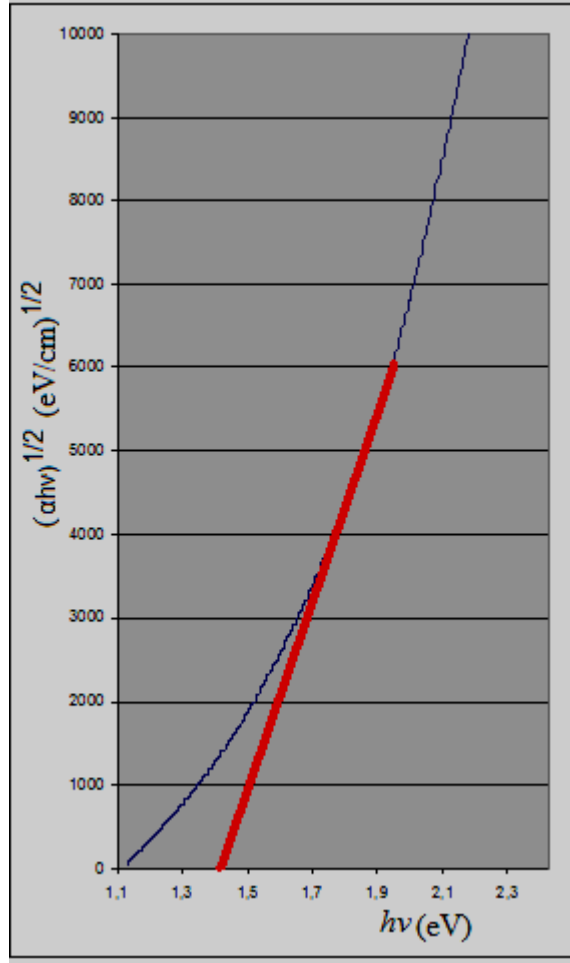


Resim 5.3.2 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 2 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.





Şekil 5.3.4 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 2 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



Şekil 5.3.5 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 2 nolu numune)  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği.

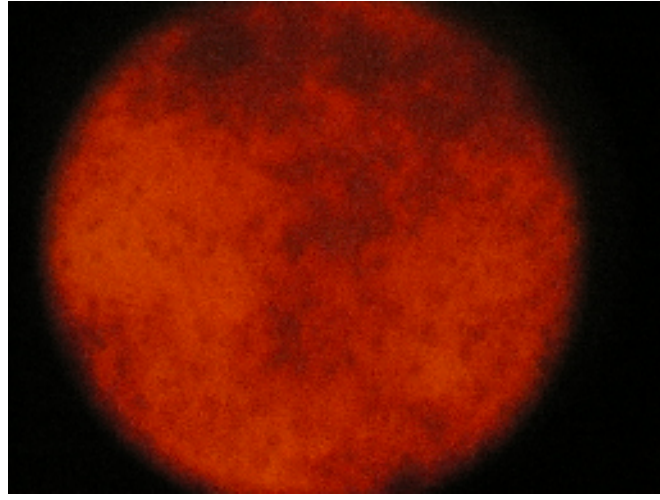
Deneysel verilerin analizinden cam taban üzerinde oluşturulan MoSe<sub>2</sub> ince filminin soğurma kuyruğunun bantlar arası indirek geçişlere bağlı olduğu sonucuna varıldı. Bu filmlerde bantlar arası indirek geçiş için  $E_{gi}=1,4$  eV olduğu belirlendi. Aynı zamanda indirek geçişler için karakteristik olan kuyruktan  $E_{gi}- h\nu_f < E_{gi} < E_{gi} + h\nu_f$  fonon enerjisinin 20 meV olduğu hesaplandı. Soğurma katsayısına göre  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  ve  $(\alpha h\nu)^2 \sim h\nu$  grafikleri çizildi. Bu grafiklerden  $(\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu$  grafiğinin lineer bölgesinin daha geniş olduğu görüldü. Bu da MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinde optik soğurmada bantlar arası dolaylı geçişlerin gerçekleştiğini göstermektedir.

MoSe<sub>2</sub> ince filmleri farklı sıcaklık ve sürelerde büyütülerek optik soğurmaları incelendi. Daha önce yapılan birçok araştırmada CBD yöntemi ile büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinde dolaylı optik geçişler belirlenmiştir. Bu çalışmalarda dolaylı optik

soğurmadan yasak bant aralığı için  $E_g=1,16$  eV, doğrudan optik soğurmadan yasak bant aralığı  $E_g=1,43$  eV bulunmuştur [28,29].

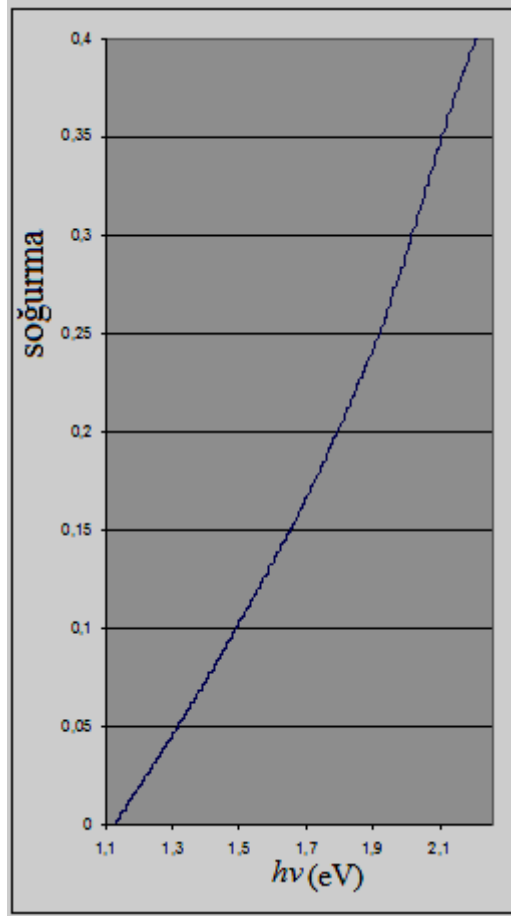
Farklı durumlarda büyüttüğümüz MoSe<sub>2</sub> ince filmleri için yasak bant aralıkları  $E_g=1,4$  eV olmuştur. Bu sonuç yukarıda verilen araştırmaların sonuçları ile uyumludur.

3.grup 3 nolu numunenin yüzeyi de diğer filmlere benzer olarak adacıklardan oluşmaktadır (Resim 5.3.3).

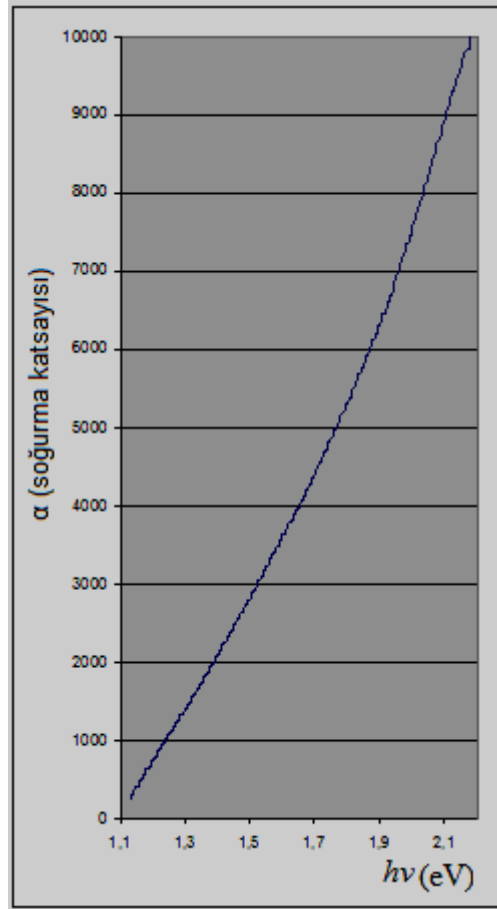


**Resim 5.3.3** 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (3.grup 3 nolu numune) Nikon Coolpix 8800 mikroskobunda çekilmiş görüntüsü.

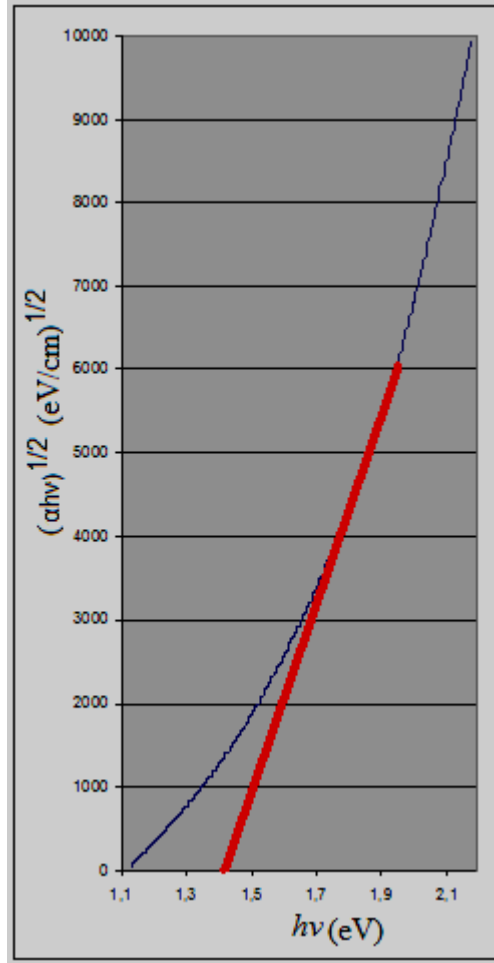
Bu numuneye ait soğurma spektrumları Şekil 5.3.6’da, Şekil 5.3.7’de ve Şekil 5.3.8’de verilmektedir.



Şekil 5.3.6 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (3.grup 3 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



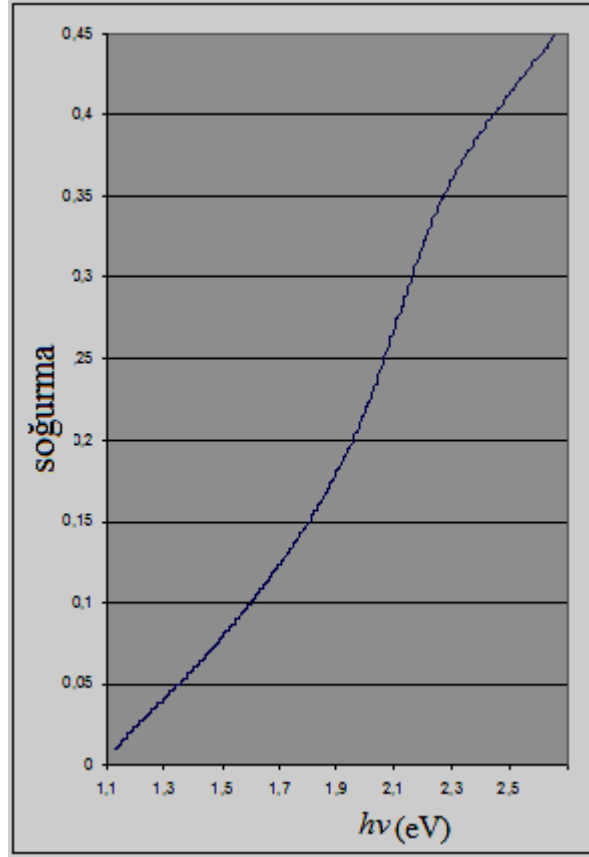
Şekil 5.3.7 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (3.grup 3 nolu numune) soğurma spektrumu.



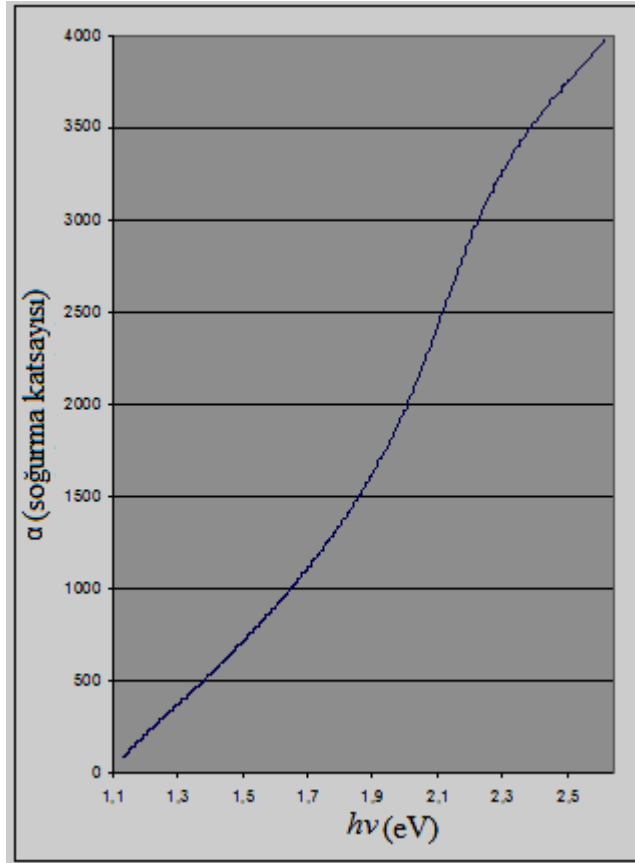
Şekil 5.3.8 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmin (3.grup 3 nolu numune)  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği.

Görüldüğü gibi yüksek sıcaklıkta 80 °C büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin soğurma spektrumunun eğimi daha dik olmaktadır. Yinede dolaylı geçiş sınırı yasak bant aralığı  $E_g=1,4$  eV bulunmuştur. Uzun dalga boyu kuyruğu bir önceki grup MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinde olduğu gibi 1,1 eV’de başlamaktadır.

Benzer şekilde yukarıdaki gruplara paralel olarak 6.grup 2 nolu örneğin soğurma spektrumları Şekil 5.3.9’da, Şekil 5.3.10’da ve Şekil 5.3.11’de verilmektedir.

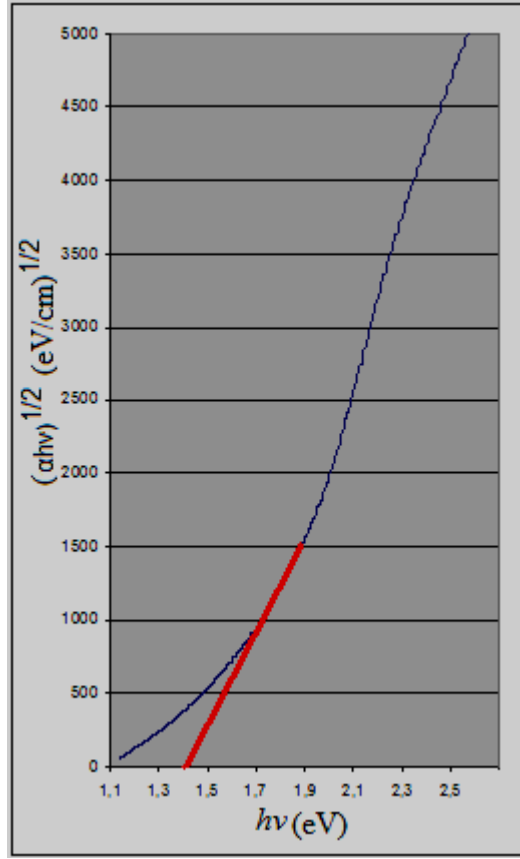


Şekil 5.3.9 27 °C'de 9 saat süreyle iki kez daldırılarak yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



Şekil 5.3.10 27 °C’de 9 saat süreyle iki kez daldırılarak yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune) soğurma spektrumu.





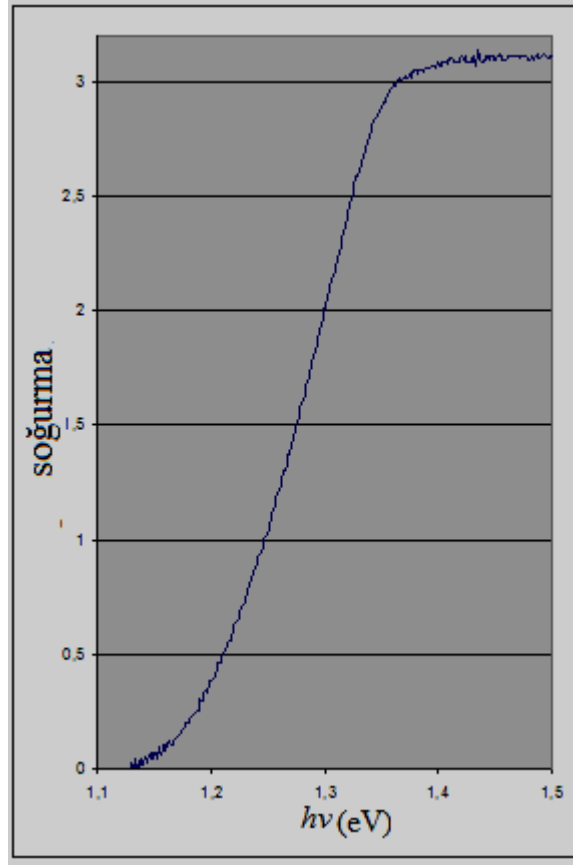
Şekil 5.3.11 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (6.grup 2 nolu numune)  $(\alpha hv)^{1/2} - hv$  grafiği.

Cam üzerinde büyütülen tüm örneklerin soğurma spektrumlarının analizi, CBD yöntemiyle alınmış MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin iletkenlik ve valans bantları arası geçişlerinin indirek olduğunu göstermektedir. Bütün gruptaki örnekler için  $E_{id} = 1,4$  eV olduğu görülmektedir. Yapılan literatür taramalarında ise direk geçişler için yasak bant aralığı  $E_g = 1,43$  eV olduğu görülmektedir [10,17,27,29].

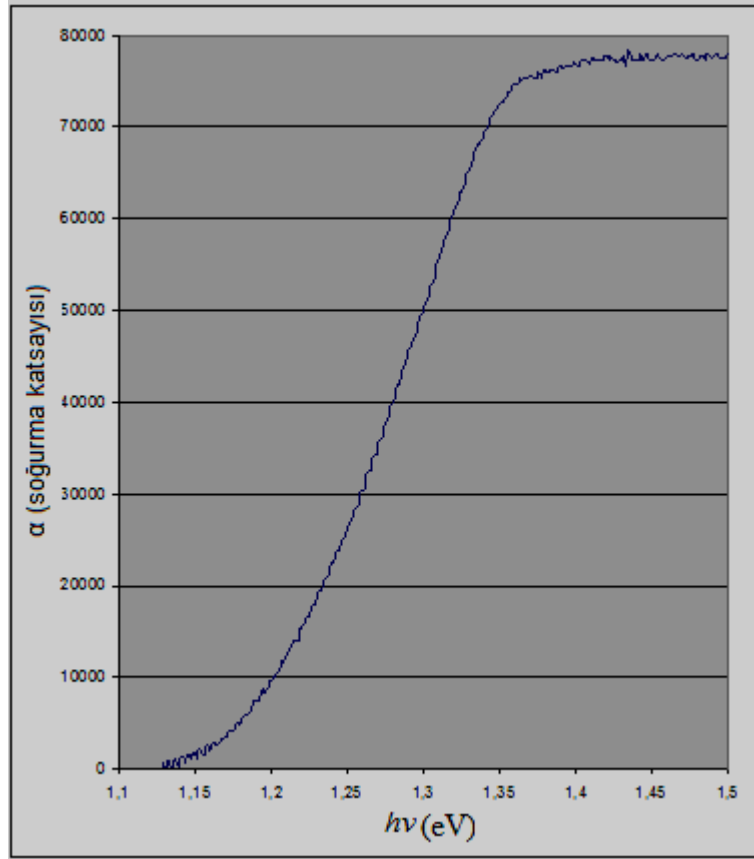
Amorf silisyum tabanı üzerinde CBD yöntemiyle farklı MoSe<sub>2</sub> ince filmleri oluşturularak elektriksel, fotoelektrik ve optik özellikleri araştırıldı. Bilindiği gibi Si bazında oluşturulan fotovoltaik etkiye sahip olan farklı eklemler ve aygıtların güneş çeviricileri gibi geniş kullanım alanları vardır.

Oluşturulan Si- MoSe<sub>2</sub> eklemine optik soğurmasından spektrumun beyaz ışın bölgesini daha fazla kapsadığı görülmektedir. Si taban üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmin

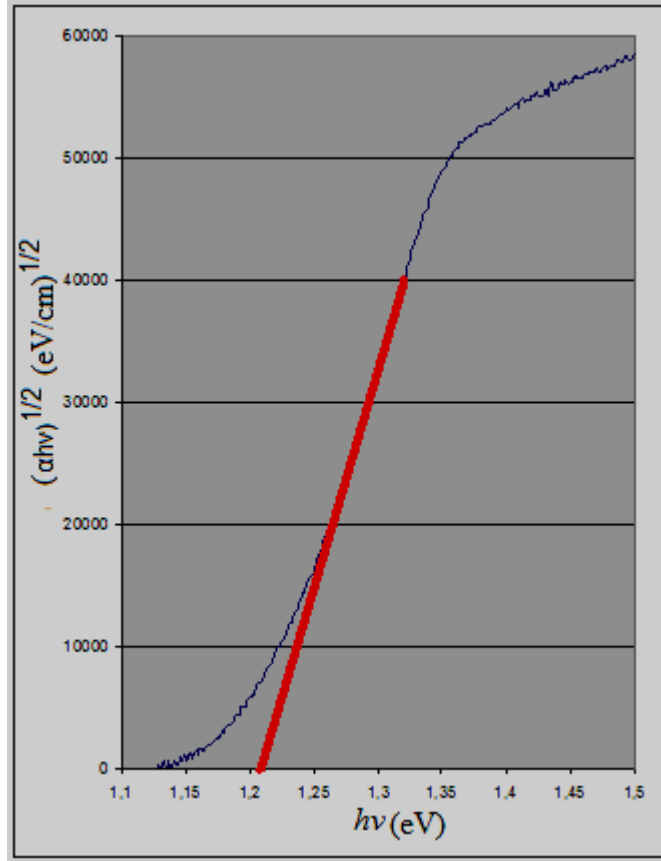
karakteristik soğurma spektrumları Şekil 5.3.12’de, Şekil 5.3.13’de ve Şekil 5.3.14’de verilmektedir.



Şekil 5.3.12 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



Şekil 5.3.13 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune) soğurma spektrumu



Şekil 5.3.14 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si alt tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (4.grup 9 nolu numune)  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği

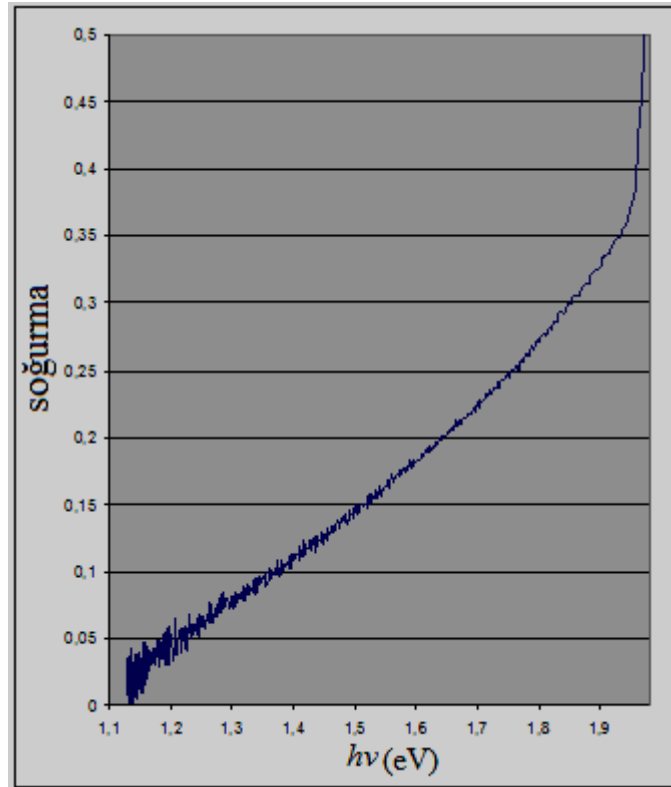
Soğurma spektrumun  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  analizinden de görüldüğü gibi soğurma Si için karakteristik olan 1,15 eV’den başlayarak  $h\nu=1,3$  eV enerjili fotonların MoSe<sub>2</sub> katkısı ile soğrulması devam etmektedir.

Mükemmel kristalite yapıya sahip olan GaSe taban üzerinde MoSe<sub>2</sub>, PbS, MnS, GaS, GaTe, InS, InSe filmlerinin farklı yöntemlerle oluşturularak araştırılması büyük öneme sahiptir. Bu kesişimler farklı spektrum bölgelerinde güneş enerjisini elektrik enerjisine çeviren aygıtların oluşumunda etkili olabilir.

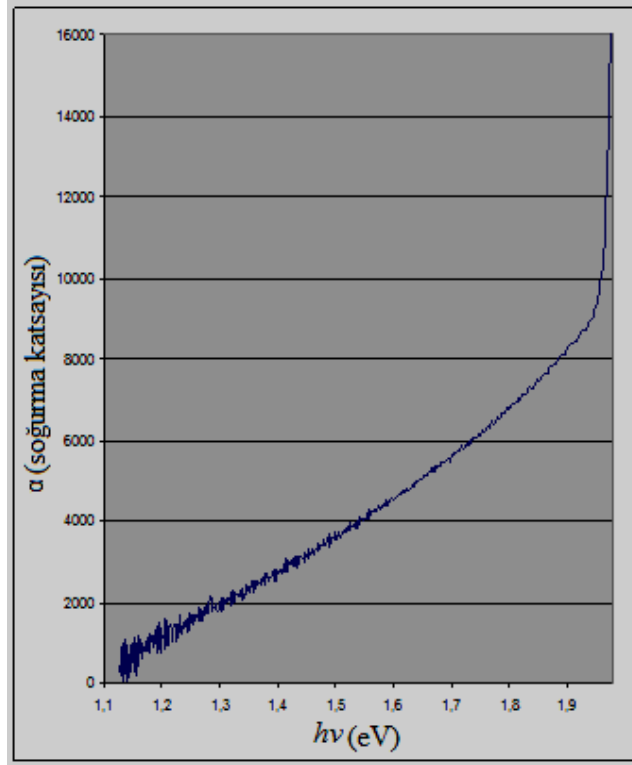
Bu tabakalı kristaller (GaSe gibi) üzerinde büyütülen ince filmlerin yapısı tabakalı yapıyı devam ettirebilir. Bu tür yaklaşımlar Markwell, D.R. et al. ve Lyons, E.H. et al. tarafından yapılan çalışmalarda verilmiştir [30,31].

Hekzagonal yapılı yarıiletken ile kübik hücreli yarıiletkenlerin heteroeklem oluşturması  $a_{\text{küb}} = \sqrt{2} \cdot a_{\text{hcp}}$  ve  $nC^4$  eksenini (111) düzlemine dik olduğunda gerçekleşir [33].

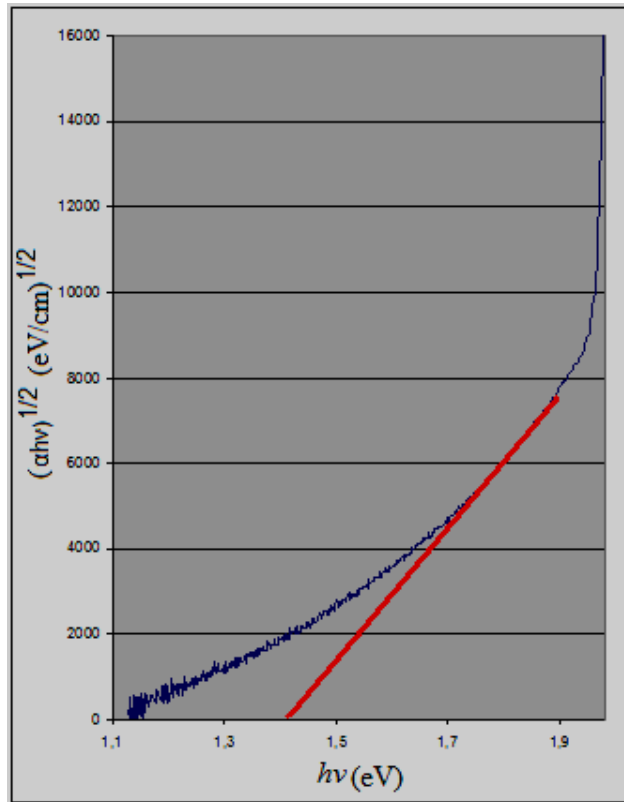
Bu yapılarda tabakalar arası Van der Waals bağı, tabakalar içinde ise kovalent bağ etkili olur. Örneğin, GaSe taban üzerinde oluşturulan ince filmlerin kesişimde Van der Waals kuvveti etkili olur. Paralel olarak bu sistemler alttaban GaSe'de olduğu gibi farklı optoelektronik aygıtların yapımında da kullanılabilir. Aynı zamanda bu heteroeklemler kesişiminde kuantum kuyusu oluşabilir. Farklı sensörler yapımı içinde belirli imkanlara sahip olan GaSe tabanı üzerinde çok sayıda ince filmler sistemi, heteroeklemler oluşturulabilir. Bu çalışmada GaSe tabanı üzerinde CBD yöntemi ile MoSe<sub>2</sub> - GaSe - MoSe<sub>2</sub> heteroeklemi oluşturuldu. MoSe<sub>2</sub>,  $a=3,325 \text{ \AA}$ ,  $c=12,92 \text{ \AA}$  örgü sabitli hcp yapıya sahip olduğundan CBD yöntemi ile oluşturulan GaSe- MoSe<sub>2</sub> heteroekleminin kolay olması beklenir. Şekil 5.3.15'te, Şekil 5.3.16'da ve Şekil 5.3.17'de GaSe- MoSe<sub>2</sub> heteroekleminin soğurma spektrumu verilmektedir.



Şekil 5.3.15 60 °C'de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



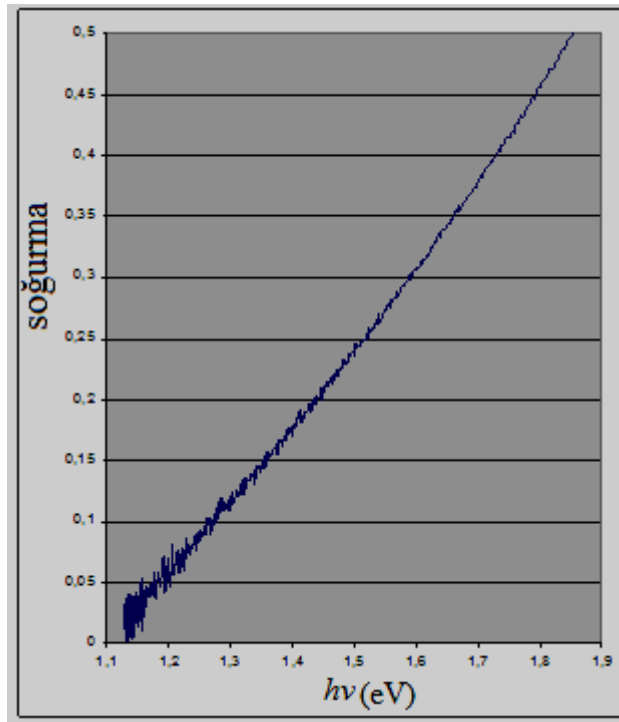
Şekil 5.3.16 60 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune) soğurma spektrumu.



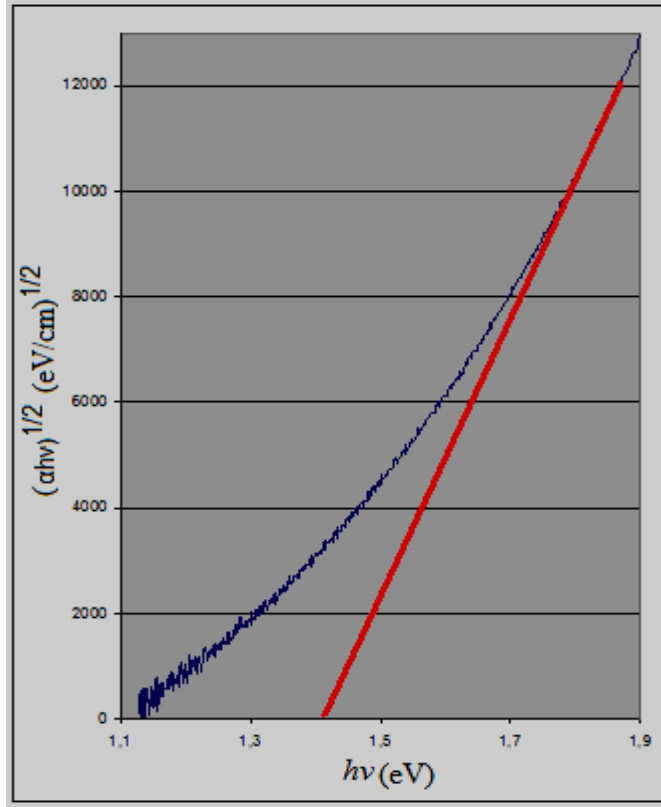
Şekil 5.3.17 60 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (2.grup 8 nolu numune)  $(\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiği.

Saf GaSe kristalinin soğurma spektrumu ile kıyaslandığında Şekil 5.3.17’de soğurma spektrumunun (GaSe- MoSe<sub>2</sub> sisteminin) iki bölgeden oluştuğu görülmektedir. Birinci bölge MoSe<sub>2</sub> için karakteristik olan  $h\nu=1,4$  eV sınırına sahip olan bölge. İkinci bölge ise  $h\nu=1,95$  eV’den başlayan  $h\nu=2,02$  eV’de maksimum olan GaSe tabanı için karakteristik olan bölgedir. 2.ci bölgeden hcp yapılı GaSe kristali üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin GaSe üzerinde benzeri yapıda kristalleştiği düşünülmektedir. Bu nedenle soğurma net olarak MoSe<sub>2</sub> kristali için karakteristik olan  $h\nu=1,4$  eV enerjiden başlamaktadır. Soğurma spektrumunun analizinden  $((\alpha h\nu)^{1/2} - h\nu$  grafiğinden) yasak bant aralığının  $h\nu=1,4$  eV olduğu belirlenmiştir.

3.grup 8 nolu GaSe –MoSe<sub>2</sub> örneğinin soğurma spektrumları Şekil 5.3.18’de ve Şekil 5.3.19’da verilmiştir.



Şekil 5.3.18 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (3.grup 8 nolu numune) toplam soğurma spektrumu.



Şekil 5.3.19 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin (3.grup 8 nolu numune)  $(\alpha hv)^{1/2} - hv$  grafiği.

Deneysel verilerin analizinden, GaSe –MoSe<sub>2</sub> heteroeklemlerinde soğurma oranıyla  $(\alpha hv)^{1/2} - hv$  ve bu filmlerde soğurmanın indirek geçişle belirlendiği görülmektedir. Deneysel sonuçlardan görüldüğü gibi cam taban üzerinde CBD yöntemiyle oluşturulmuş MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin soğurma spektrumu indirek geçişler için karakteristik olmaktadır.

Joseph Sahaya Anond, T. et al. tarafından yapılan çalışmada açıkça görülmektedir [27]. Aynı zamanda amorf Si taban üzerinde oluşturulan MoSe<sub>2</sub> filmi için de soğurma spektrumunun indirek geçişe daha yakın olduğu görülmektedir. Bu MoSe<sub>2</sub> – Si ekleminde MoSe<sub>2</sub> filminin soğurma kuyruğu  $h\nu=1,2$  eV’den başlamaktadır. Yani daha düşük enerjili bölgeden başlamaktadır.

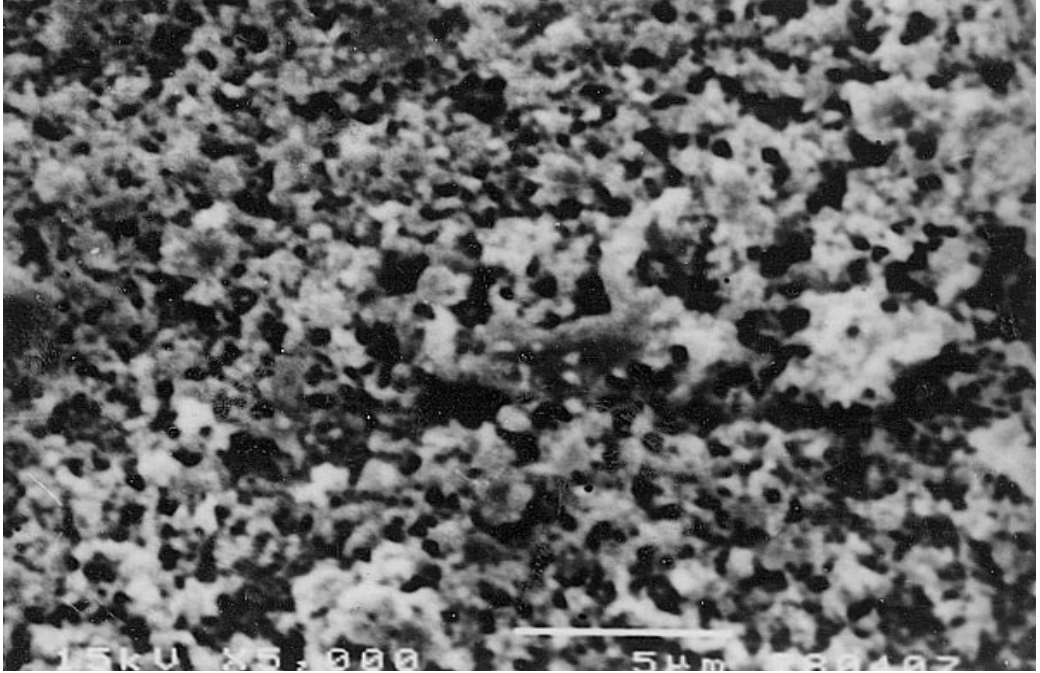
Kristal GaSe tabanı üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> için indirek geçişin daha karakteristik olduğu görülmektedir [17].



#### 5.4 MoSe<sub>2</sub> İnce Filminin Morfolojik Özellikleri

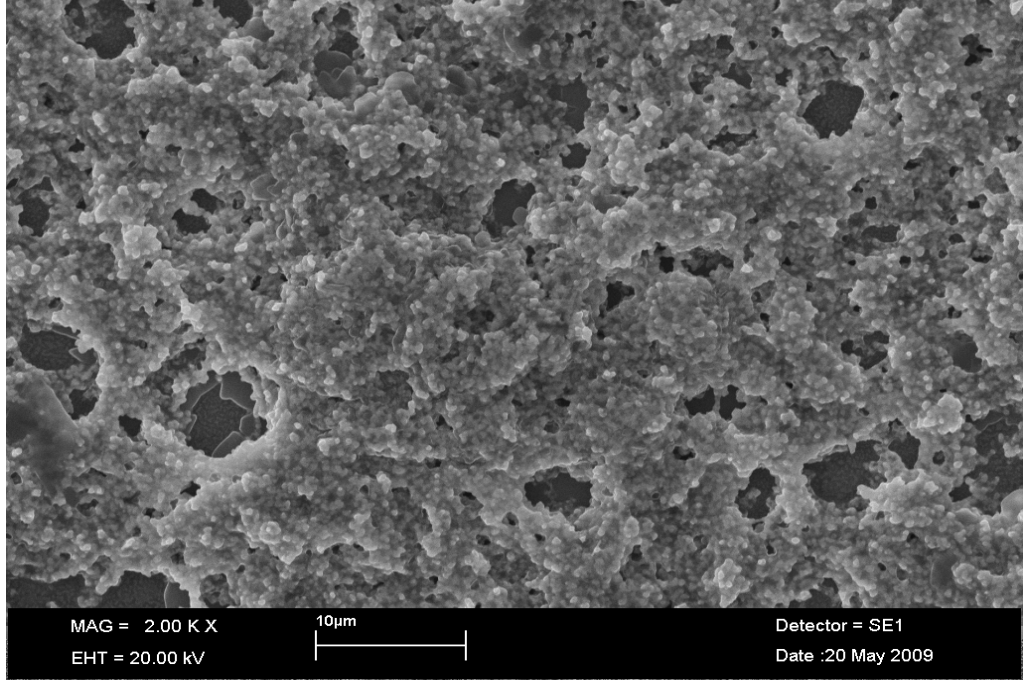
İnce filmlerin morfolojik özelliklerini belirlemek için kullanılan yöntemlerinden biri de taramalı elektron mikroskopudur (SEM). Taramalı Elektron Mikroskopunda (SEM) görüntü, yüksek voltaj ile hızlandırılmış elektronların numune üzerine odaklanması, bu elektron demetinin numune yüzeyinde taratılması sırasında elektron ve numune atomları arasında oluşan çeşitli girişimler sonucunda meydana gelen etkilerin uygun algılayıcılarda toplanması ve sinyal güçlendiricilerinden geçirildikten sonra bir katot ışınları tüpünün ekranına aktarılmasıyla elde edilir. Modern sistemlerde bu algılayıcılardan gelen sinyaller dijital sinyallere çevrilip bilgisayar monitörüne verilmektedir [33].

CBD yönteminden farklı olarak Elektrodposition yöntemiyle büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü Şekil 5.4.1’de görüldüğü gibidir [27].



Şekil 5.4.1 Elektrodposition yöntemiyle büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü [27].

Bu çalışmada cam üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü LED 440 COMPUTER CONTROLLED DİGİTAL cihazı kullanılarak elde edildi. Bu SEM görüntüsü Şekil 5.4.2’de verilmektedir.



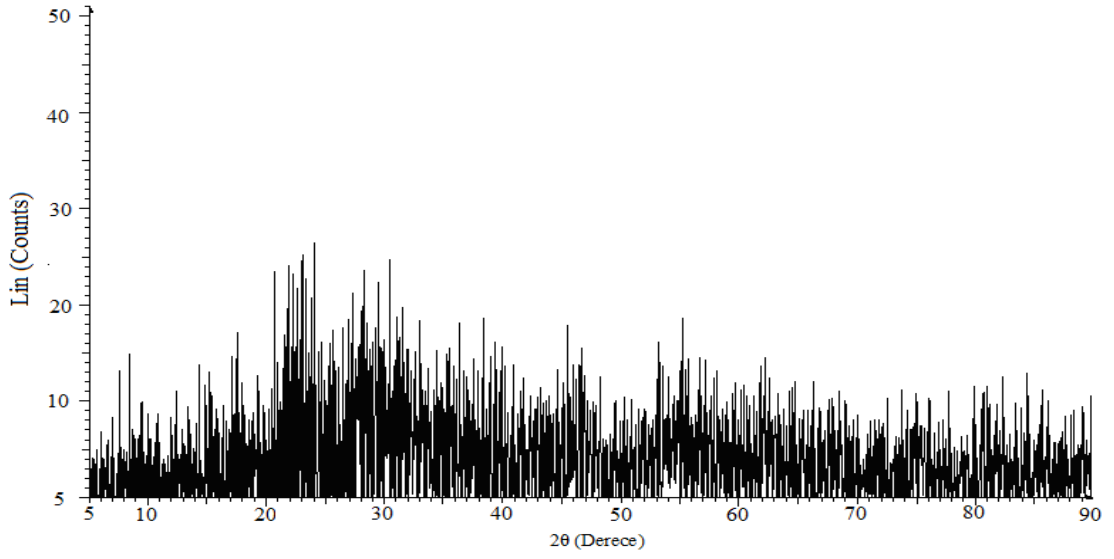
Şekil 5.4.2 CBD yöntemiyle büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin SEM görüntüsü.

Joseph Sahaya Anond, T., et al. tarafından yapılan çalışmada büyütülen ince film daha çok kopuk adacıklardan oluşmuştur [27]. Fakat CBD yöntemiyle büyüttüğümüz ince filmin daha sürekli ve yüzeyi kapladığı görülmektedir.

Bu çalışmada büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin 10 µm'den büyük MoSe<sub>2</sub> bölgelerinden oluştuğu görülmektedir. Bu parçacıklar, denrit bölgelerden farklı ölçekli nanoparçacıklardan oluşmaktadır.

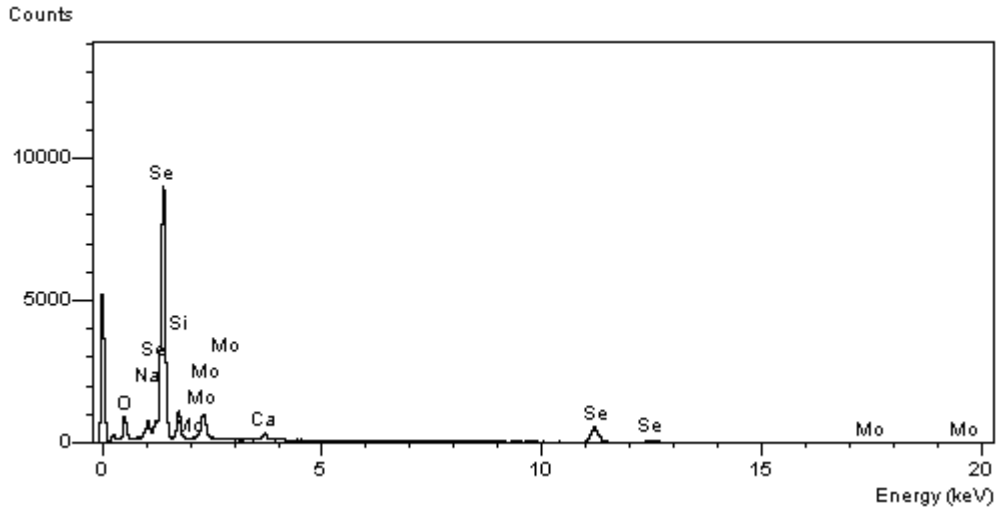
### 5.5 MoSe<sub>2</sub> İnce Filminin Yapısal Özellikleri

İnce filmlerin yapı analizleri için X-ışını kırınım metodu (XRD) kullanılmıştır. Ölçümler için BRUKER AX5D8 ADVANCE MODEL cihazı kullanılmıştır. Cam üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> yarıiletken ince filminin yapı analizinden de görüldüğü gibi MoSe<sub>2</sub> yarıiletken ince filminin amorf yapıya sahip olduğu görülmektedir. X-ışını kırınım sonucu Şekil 5.5.1'de verilmiştir. Alınan XRD spektrumu büyüttüğümüz filmlerin amorf yapıya yakın bir yapıda olduğunu göstermektedir.



Şekil 5.5.1 Cam üzerinde CBD yöntemi ile büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin XRD spektrumu.

Yapılan EDX analizi sonucu Mo<sup>+4</sup> ve Se<sup>-2</sup> iyonlarının hangi oranlarda birleştiğine bakılmıştır. Bu EDX spektrumu Şekil 5.5.2’de verilmektedir.



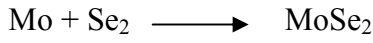
Şekil 5.5.2 CBD yöntemi ile büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin EDX spektrumu.

Filmdeki atomların oranları Çizelge 5.5.1’de verilmektedir. Çizelge 5.5.1’den görüldüğü gibi Se atomlarının fazla oranda dahil olduğu görülmektedir. Bu Se fazlalığının ince filmlerin amorf yapıda büyümelerinde belirleyici olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 5.5.1 Elementlerin atomik yüzdeleri

Elmt.	Spect.	Inten.	Std.	Element	Sigma	Atomic
	Type	Corrn.	Corrn.	%	%	%
O K	ED	0,734	0,77	18,28	0,35	47,96
Na K	ED	1,335	0,94	2,75	0,10	5,02
Si K	ED	0,609	1,04	6,42	0,14	9,60
Se L	ED	0,796	0,99	60,56	0,38	32,19
Mo L	ED	0,627	1,04	11,98	0,32	5,24
Total			100.00		100.00	

MoSe<sub>2</sub> yapısında Mo ve Se atomlarının hangi oranlarda birleştiği aşağıda verilmektedir.



96 gr Mo ile 158 gr Se (2 Se) birleşerek 254 gr bileşik oluştururlar. Buradan 254 gr MoSe<sub>2</sub> bileşiğinde 96 gr Mo var ise 100 gr bileşikte 37,8 gr Mo atomu bulunur.

254 gr MoSe<sub>2</sub> bileşiğinde 158 gr Se var ise 100 gr bileşikte 62,2 gr Se atomu bulunur.

Buradan MoSe<sub>2</sub> bileşiğinde % 37,8 oranında Mo atomu, % 62,2 oranında da Se atomu olduğu görülür.

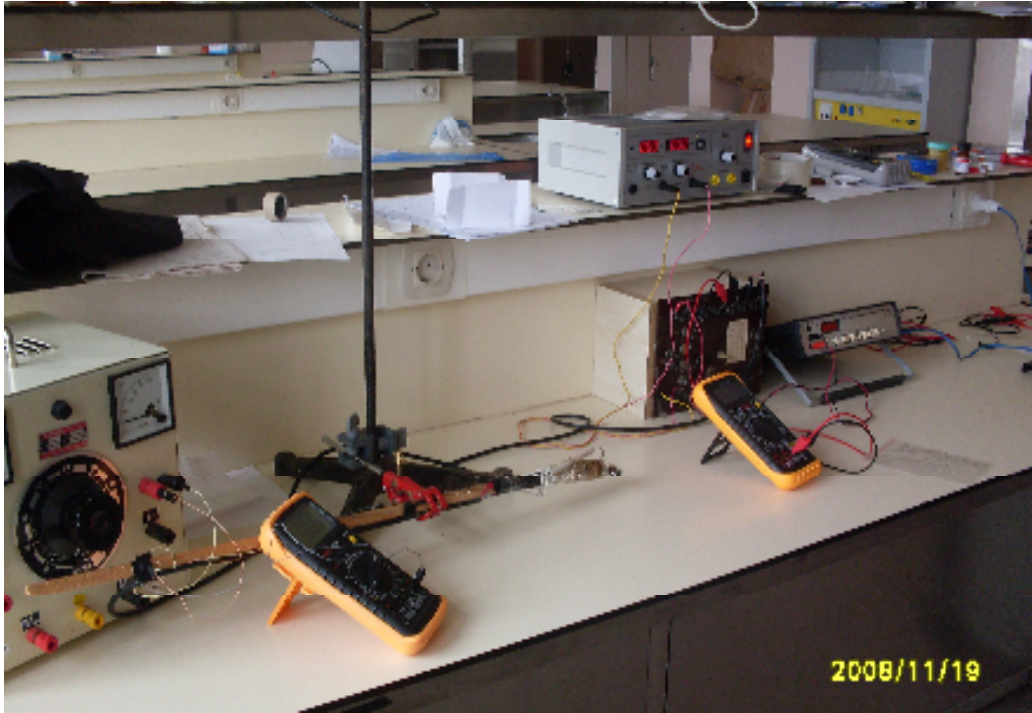
Bu çalışmadaki sonuçlarda, Çizelge 5.5.1'de % 11,98 oranında Mo atomu, % 60,56 oranında ise Se atomu olduğu görülmüştür.

1 molünde % 37,8 oranında Mo var ise, % 11,98 oranda 0,31 mol Mo vardır.

1 molünde % 62,2 oranında Se var ise, % 60,56 oranda 0,97 mol Se vardır. Dolayısıyla MoSe<sub>2</sub> bileşiği Mo<sub>0,31</sub>Se<sub>0,97</sub> oranında elde edilmiş oldu. Bu da Se atomunun Mo atomundan 3 kat fazla olduğunu gösterir. Yani oluşan bileşiğin MoSe<sub>2</sub>+Se biçiminde oluştuğu anlaşılmaktadır.

## 5.6 MoSe<sub>2</sub> İnce Filminin Elektriksel Özellikleri

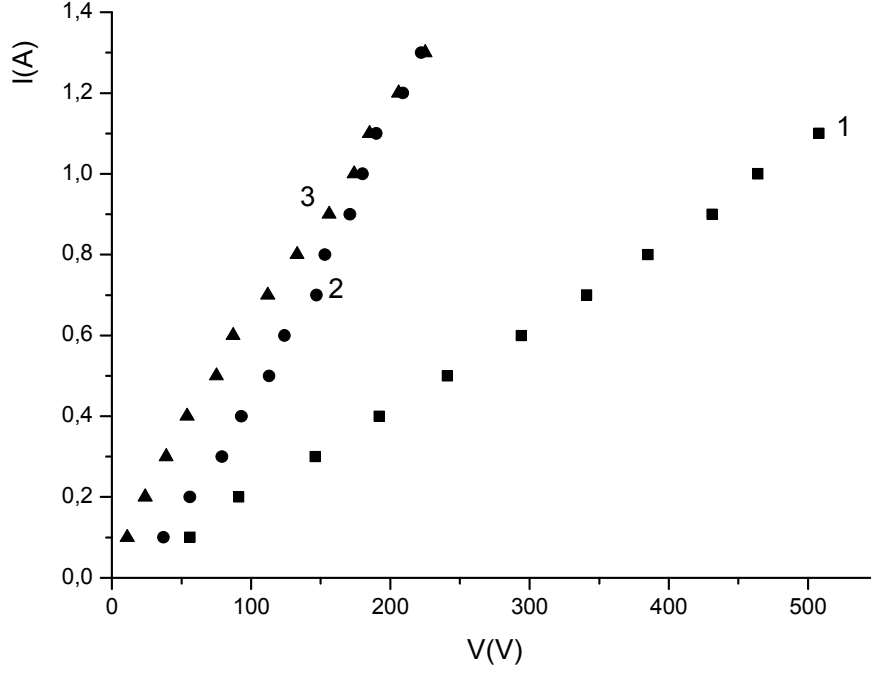
Bu kısımda, hem alttaban olarak kullanılan malzemenin hem de büyütülen filmlerin elektriksel özellikleri verilecektir. İlk önce saf haldeki cam, GaSe ve Si alttabanların birer parçasının paralel ve sandiviç olarak akım gerilim karakteristikleri ölçüldü. Daha sonra bu tabanların diğer parçaları üzerinde MoSe<sub>2</sub> ince filmi büyütülerek paralel ve sandiviç geometride akım gerilim karakteristikleri ölçüldü ve sonuçlar karşılaştırıldı. Farklı tabanlar üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin normal, karanlık, beyaz ışık ortamındaki ve farklı sıcaklıklardaki akım gerilim ölçümleri yapıldı. Ölçümler için kullanılan düzenek Resim 5.6.1’de verilmiştir. Aşağıdaki şekillerde farklı alttabanların ve bunlar üzerine büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin akım gerilim karakteristikleri görülmektedir.



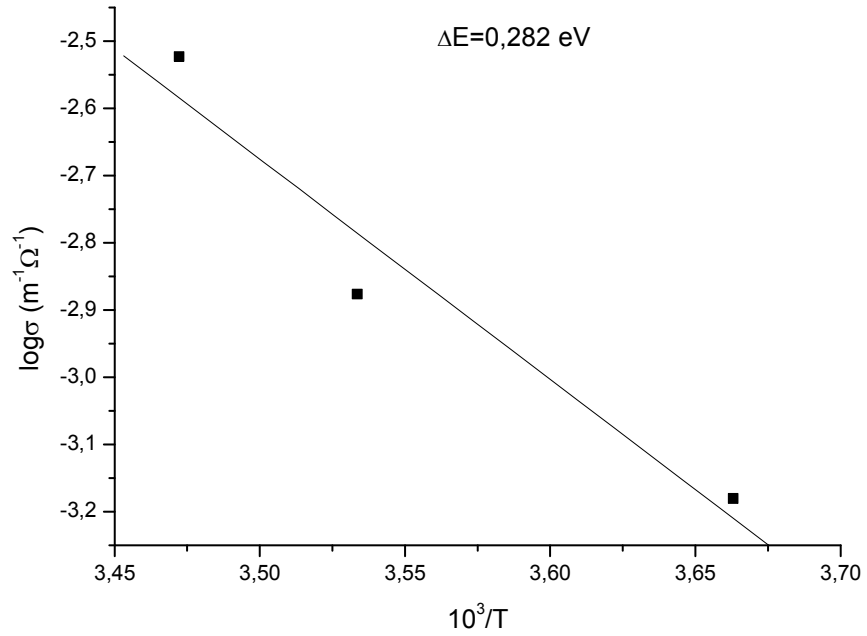
**Resim 5.6.1** İnce filmlerin akım gerilim değerlerinin ölçüldüğü deney seti.

Cam üzerinde 27 °C sıcaklıkta 9 saat süre ile büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin I-V karakteristiği Şekil 5.6.1’de verilmiştir. Lehimler MoSe<sub>2</sub> ince filme paralel yapılmıştır. Şekilden akım gerilim karakteristiğinin lineer olduğu görülmektedir. Şekil 5.6.2’de verilen  $\log\sigma \sim 10^3/T$  grafiğinden iletkenlik için aktivasyonun enerjisi  $E_a=282$  meV

bulundu. Deneysel sonuçlardan MoSe<sub>2</sub> ince filminin iletkenliğinin  $\sigma \sim 10^{-3,4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} - 10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  değerleri arasında olduğu bulunmuştur.

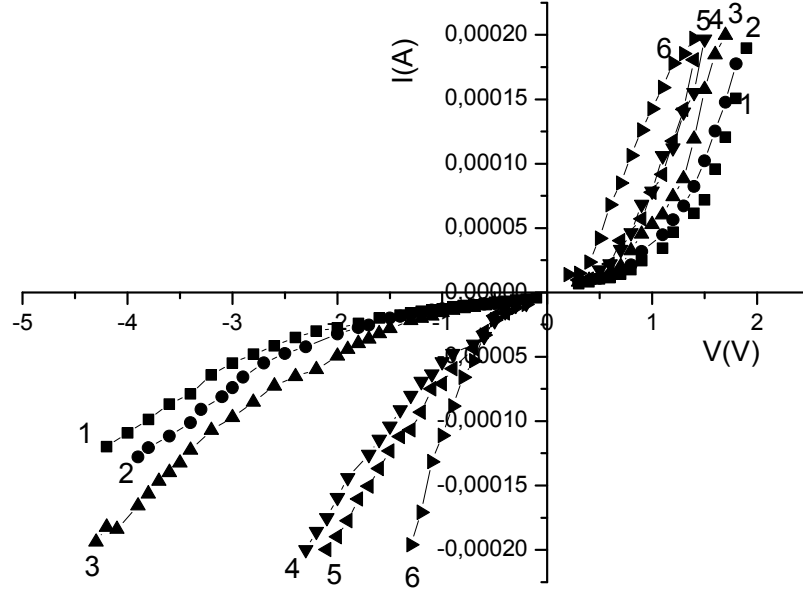


Şekil 5.6.1 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda cam üzerine büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin farklı sıcaklıklarda I-V karakteristiği. (1: 273K, 2: 283K, 3: 288K)

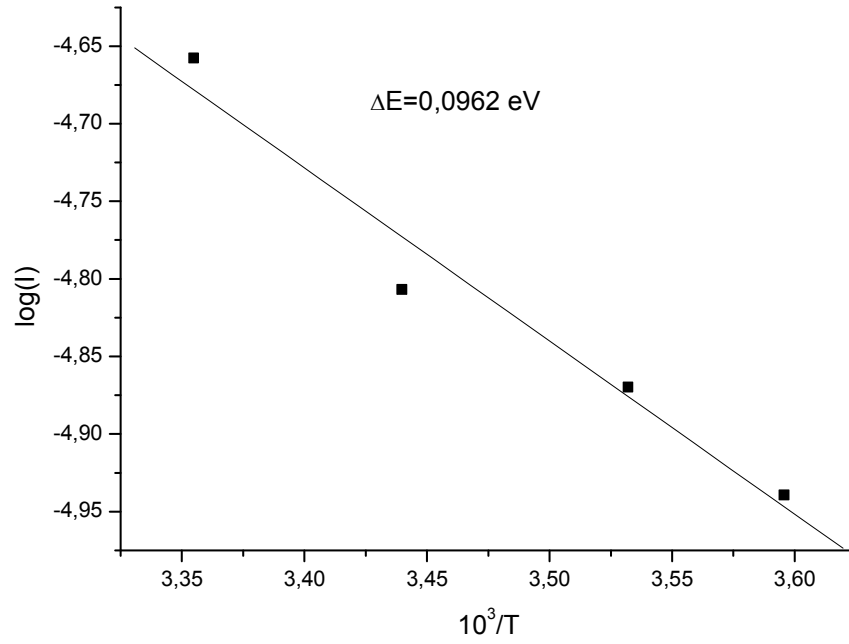


Şekil 5.6.2 27 °C’de cam üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin 56 V’de aktivasyonu.

Alttaban olarak kullanılan saf GaSe kristali üzerinde sandviç lehimler yapılarak I-V karakteristiği ölçülmüştür. Ölçüm sonuçları Şekil 5.6.3'te verilmektedir.



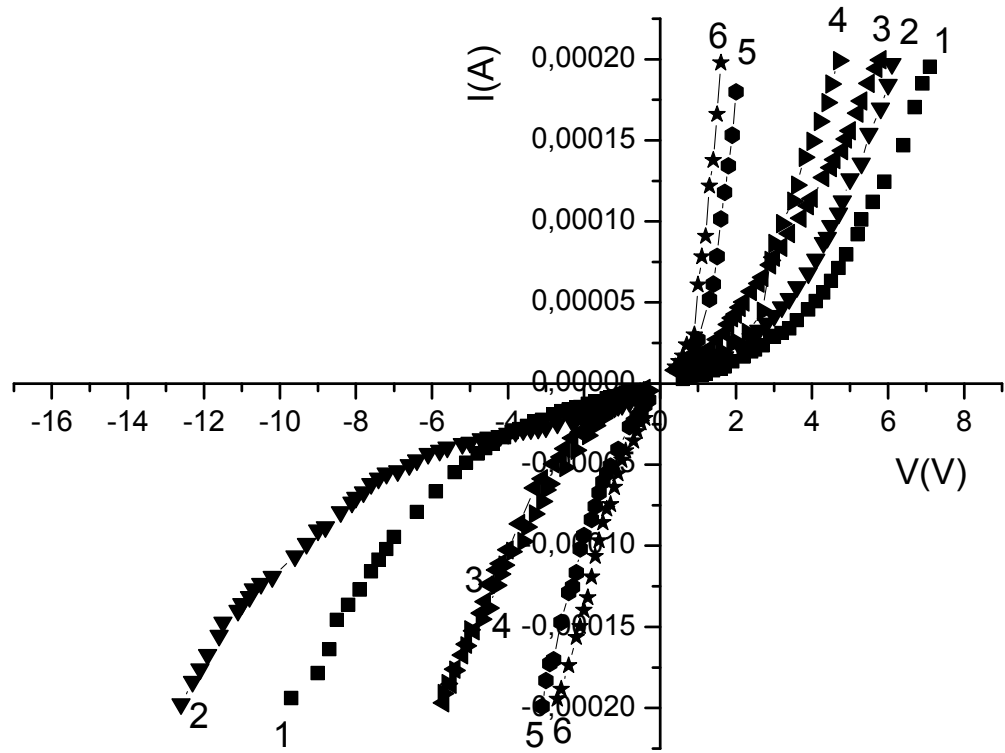
Şekil 5.6.3 Saf GaSe kristal tabanın sandviç lehiminin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği (1: 278K, 2: 283K, 3:291K, 4: 298K, 5:308K, 6:315K ).



Şekil 5.6.4 Saf GaSe kristal tabanın 0,6 V'de aktivasyonu.

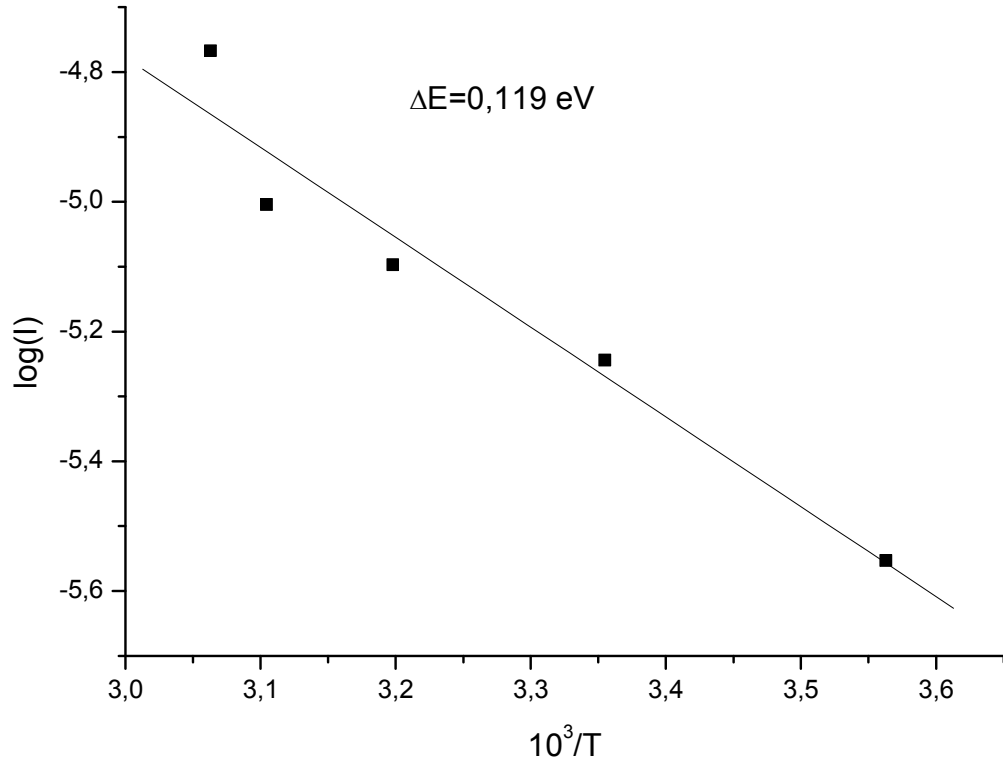
I-V karakteristiğinin Ag-GaSe-Ag heteroeklemlerinde asimetrik olduğu görüldü. Bu I-V karakteristiklerinin farklı sıcaklıklarda ölçülen değerlerinden aktivasyon enerjisi  $E_a=96,2$  meV bulundu ( Şekil 5.6.4).

Bir önceki kısımda I-V karakteristikleri verilen saf GaSe kristallerden tabanlar hazırlanarak bu tabanlar üzerinde büyütülen  $\text{MoSe}_2$  filmlerinin elektriksel özellikleri araştırıldı. Ag-  $\text{MoSe}_2$ -GaSe-Ag şeklinde sandviç lehimler arası akım  $\text{MoSe}_2$ -GaSe kesişimine dik olarak geçmektedir. Bu filmin I-V karakteristiği Şekil 5.6.5'te verilmektedir.



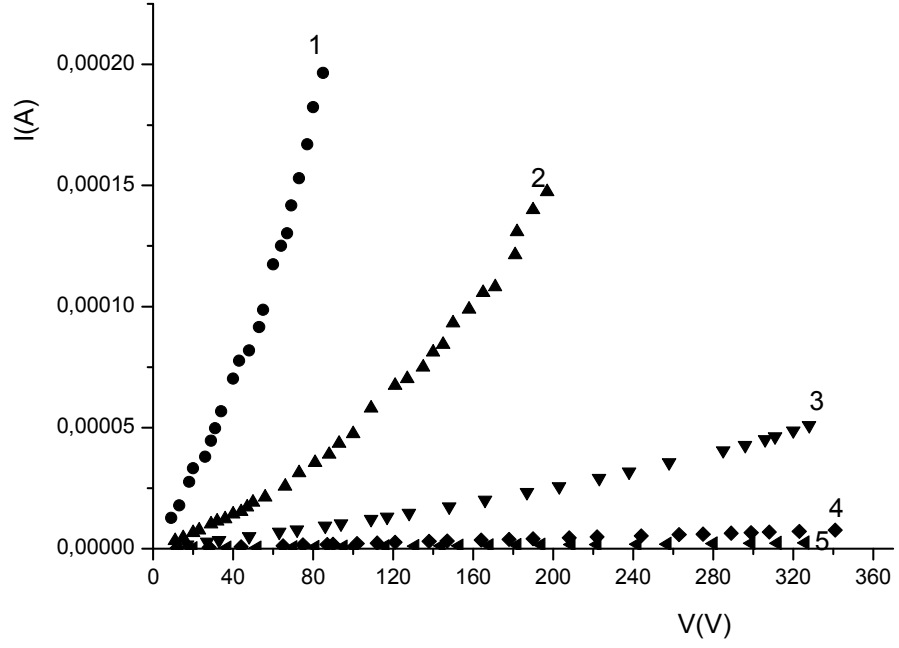
Şekil 5.6.5 80 °C'de 3 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen  $\text{MoSe}_2$  ince filmin (3.grup) sandviç lehiminin farklı sıcaklıktaki I-V karakteristiği (1: 281K, 2: 298K, 3: 305K, 4: 313K, 5: 323K, 6: 326K).



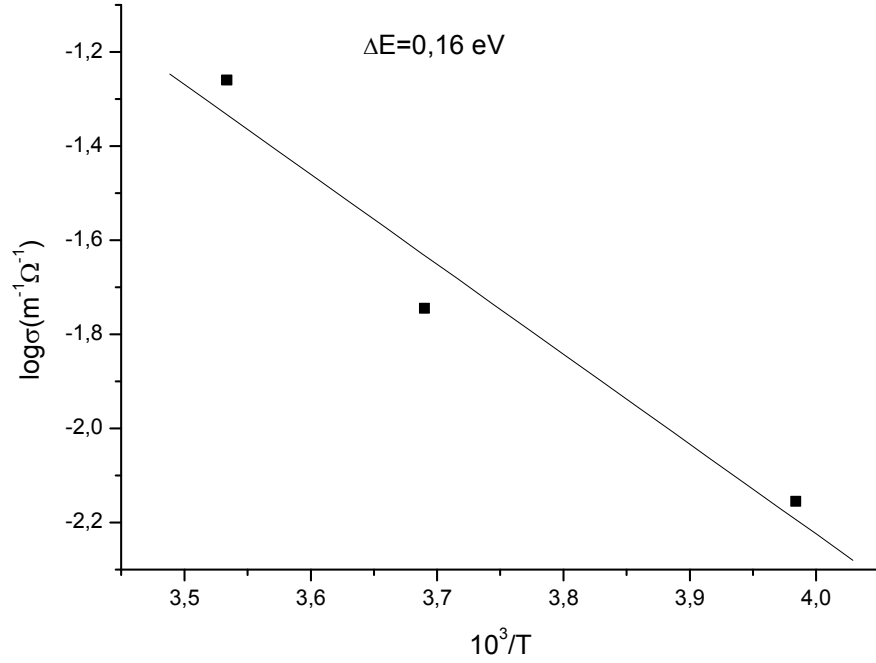


Şekil 5.6.6 80 °C’de 3 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmin (3.grup) 0,6 V’de aktivasyonu

MoSe<sub>2</sub>-GaSe kesişimindeki akım gerilim karakteristikleri farklı sıcaklıklarda ölçülerek aktivasyon enerjileri bulundu. Şekil 5.6.6’da görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi  $E_a=0,119$  eV olarak bulunmuştur. Bu değer GaSe taban için bulunan değerden daha büyüktür. Bunun nedeninin MoSe<sub>2</sub>-GaSe kesişimindeki potansiyel engel olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, MoSe<sub>2</sub>-GaSe heteroekleminde lehimler GaSe tabanı üzerindeki MoSe<sub>2</sub> ince filmine paralel olarak yapıldığında I-V karakteristikleri simetrik olmaktadır. Bu Şekil 5.6.7’de verilen sonuçlardan daha net görülmektedir. Bu geometride iletkenliğin aktivasyonu için  $E_a=0,16$  eV bulundu ki bu sandiviç lehimde bulunan  $E_a=0,267$  eV değerinden küçüktür (Şekil 5.6.8). Bu farkın MoSe<sub>2</sub>-GaSe kesişimindeki potansiyel engelden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. GaSe taban üzerindeki MoSe<sub>2</sub> ince filminin iletkenliği  $\sigma=10^{-1}-10^{-2}\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$  arasında olup bu değer cam üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmin iletkenlik değeri ile kıyaslandığında daha büyük olduğu görülmektedir.



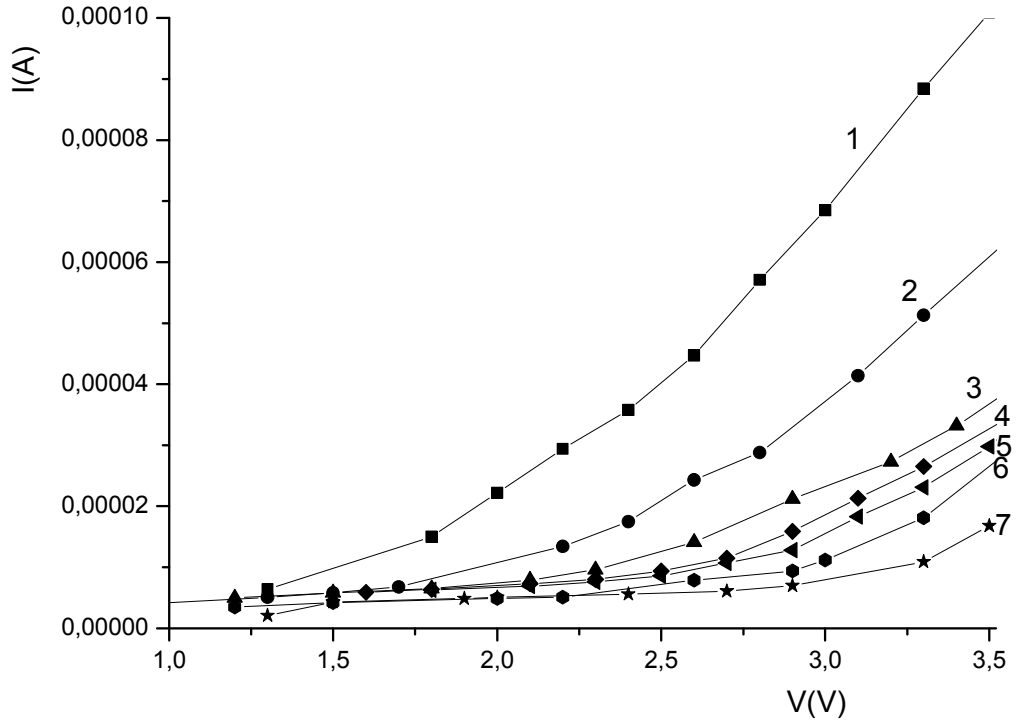
**Şekil 5.6.7** 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen  $\text{MoSe}_2$  ince filmin (6.grup) paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği (1: 313K, 2: 301K, 3: 300K, 4: 283K, 5: 271K).



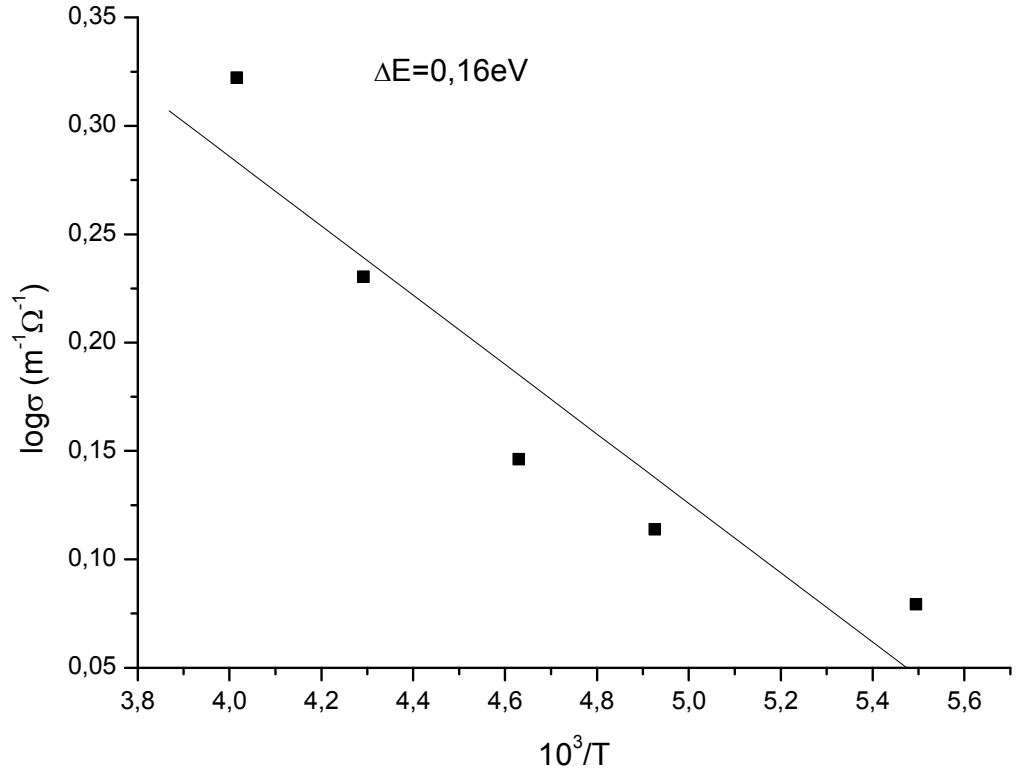
**Şekil 5.6.8** 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe kristali üzerine büyütülen  $\text{MoSe}_2$  ince filminin (6. grup) paralel lehimlerde 60 V'de aktivasyonu.

Şekil 5.6.9’da Si taban üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin Ag-paralel lehimleri arasındaki akım gerilim karakteristiği farklı sıcaklıklarda verilmiştir. Bu sonuçlardan aktivasyon enerjisi, E<sub>a</sub>=160 meV olarak bulundu (Şekil 5.6.10).

Şekil 5.6.12’de Si üzerindeki örneğin iletkenliğinin  $\sigma=0,1-0,35 \Omega^{-1}\text{m}^{-1}(10^{-3} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1})$  olduğu görülmektedir.

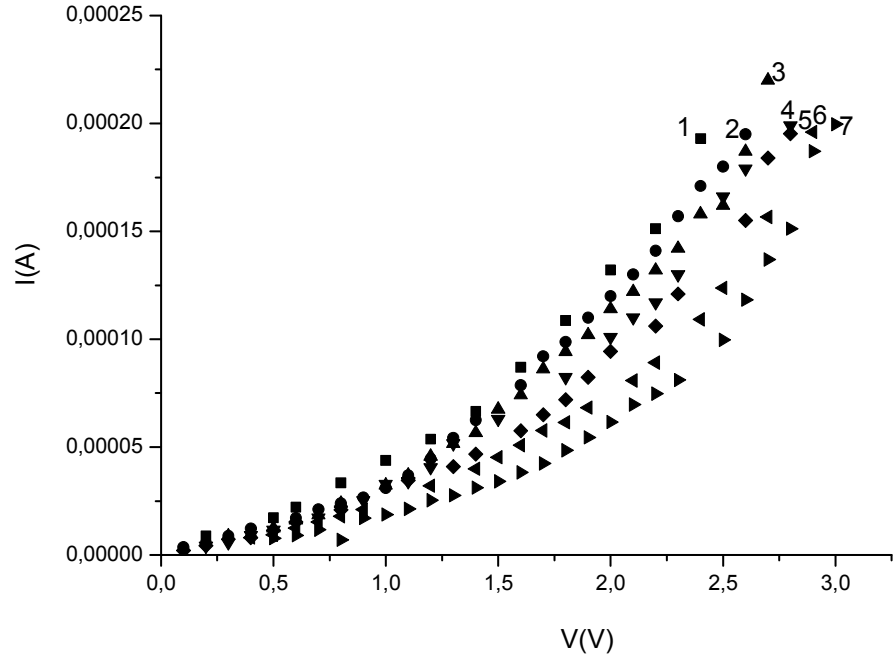


Şekil 5.6.9 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si tabanı üzerine büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği. (1: 300K, 2: 280K, 3: 264K, 4: 233K, 5: 216K, 6: 182K, 7: 162K)

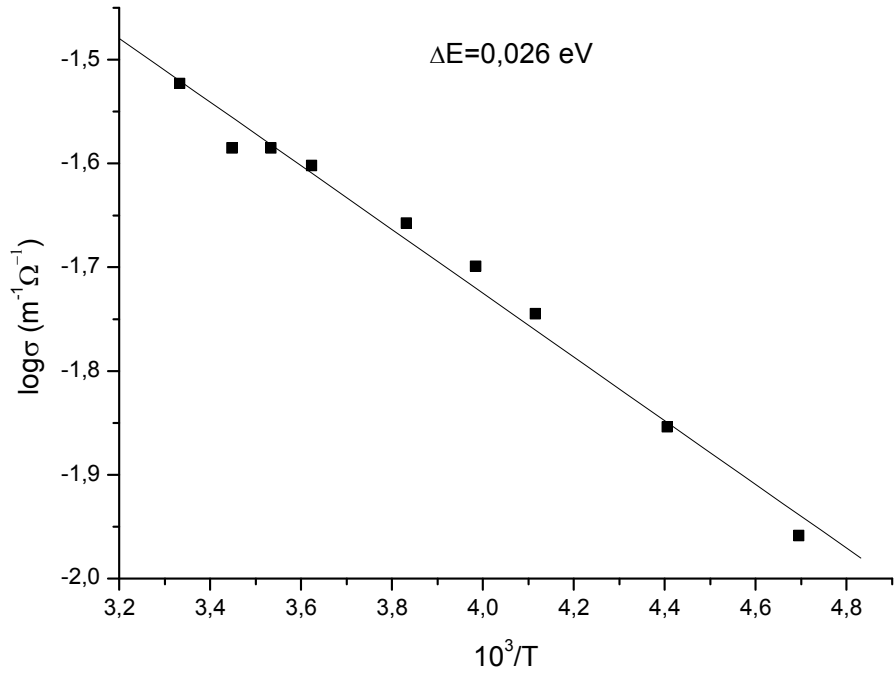


Şekil 5.6.10 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda Si tabanı üzerine büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin 3 V’de aktivasyonu.

Si tabanının aynı lehimlerde I-V karakteristikleri şekil 5.6.11’de verilmiştir. Aktivasyon sonuçları ise Şekil 5.6.12’de verilmiştir.



Şekil 5.6.11 Si tabanında paralel lehimlerinin farklı sıcaklıklardaki I-V karakteristiği. (1: 300K, 2: 290K, 3: 276 K, 4: 261K, 5: 251K, 6: 243K, 7: 227K)



Şekil 5.6.12 Si tabanında 2 V'de aktivasyonu.

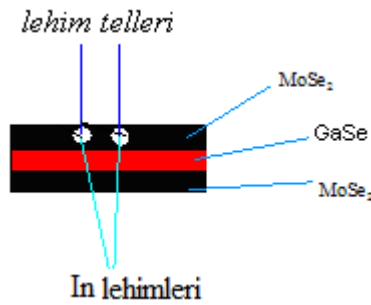
## 5.7 GaSe-MoSe<sub>2</sub> Heteroeklemlerinin Fotoelektrik Özellikleri

GaSe tabanlar üzerinde CBD yöntemiyle büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmlerin elektriksel ve fotoelektrik özellikleri de 77-400 K aralığında deneysel olarak ölçülmüştür.

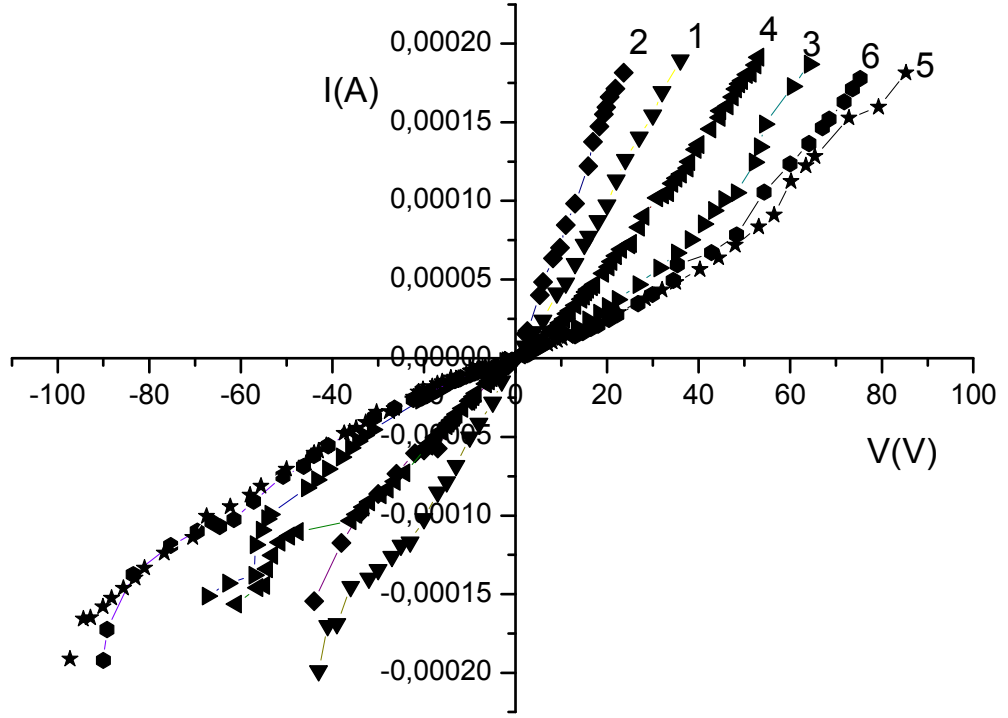
Kristal GaSe tabanı üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filmi daha fazla polikristaliktir. Her iki bileşiğin kristal yapıları benzerdir. GaSe yapısında Se-Se-Ga-Ga-Se-Se şeklinde atomar düzlemlerde, tabakalardan oluşan 4 atom düzlemi bir GaSe tabakası paketi oluşturuyor. Bu paketler arası etkileşme Van der Waals bağı ile olmaktadır. MoSe<sub>2</sub> bileşiğinde Se-Mo-Se-Mo-Se iki Se ve bir Mo atomar bir paket oluşturur ve bu paket Se-Mo-Se şeklinde uzayda tekrarlanır.

Her iki bileşik de hcp yapıya sahip olduğundan GaSe- MoSe<sub>2</sub> kesişiminde Van der Waals kuvveti bağlayıcı kuvvet olmaktadır. Bu, Van der Waals heteroeklemi gibi tanımlanır [17]. Bu sistemin yapısal özellikleri XRD, EDX, AFM yöntemleri ve optik soğurma spektrumları ölçülerek araştırılmıştır. MoSe<sub>2</sub>'nin kendi yapısını ve örgü sabitini koruduğu görülmüştür.

Ölçümlerde kullanılan GaSe- MoSe<sub>2</sub> heteroeklemi bazında oluşturulmuş örnek üzerinde paralel lehimler şematik olarak Şekil 5.7.1'de verilmiştir. Bu örneğin akım gerilim karakteristikleri farklı durumlarda Şekil 5.7.2'de verilmiştir.

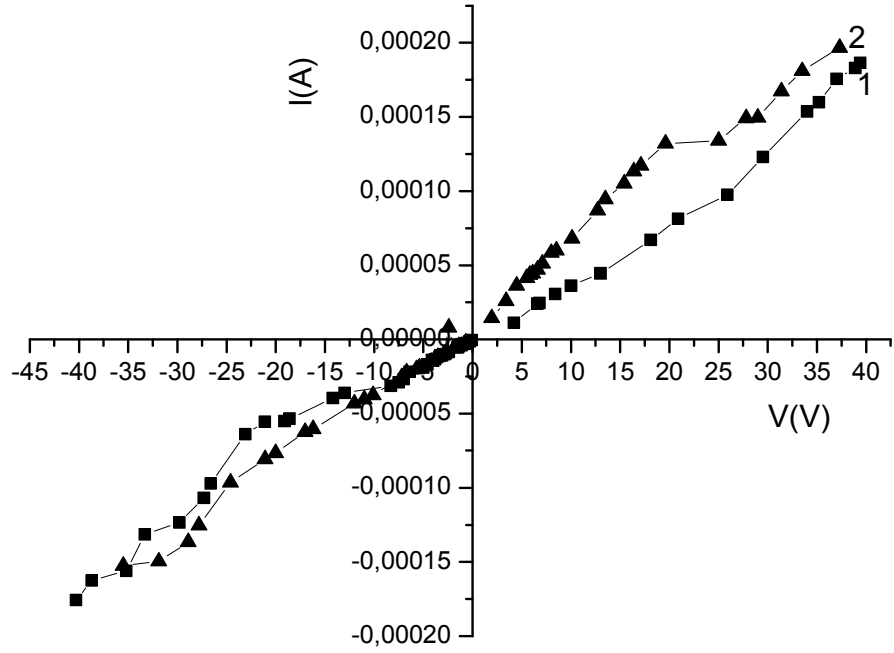


Şekil 5.7.1 Ölçüm için yapılan paralel lehimli ince film numunesi

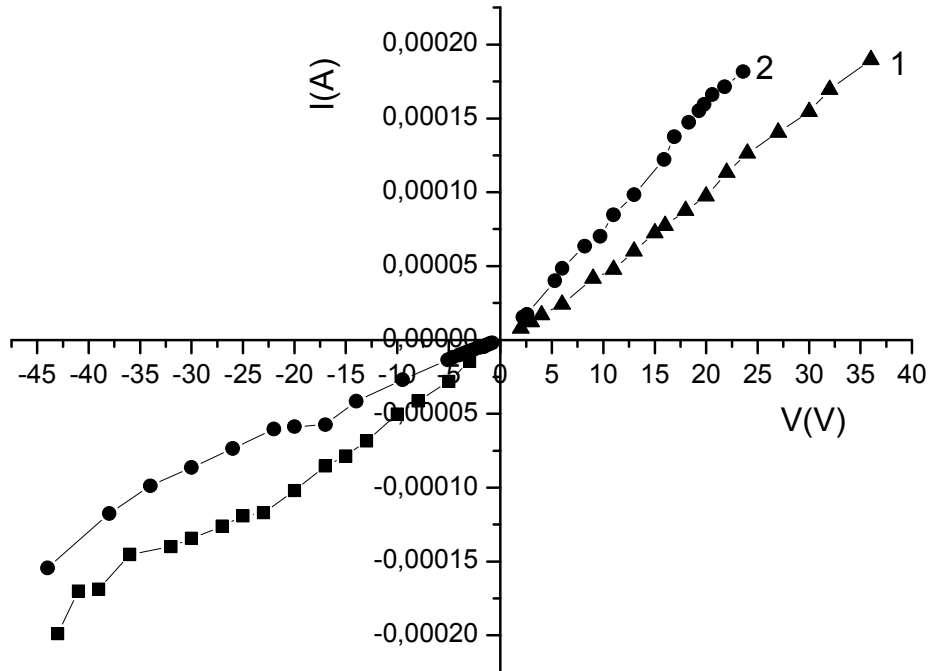


**Şekil 5.7.2** 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin farklı sıcaklıkta ışıktaki ve karanlıktaki I-V karakteristikleri. (1: 248 K ışıklı ortam, 2: 248 K karanlık ortam, 3: 239 K ışıklı ortam, 4: 239 K karanlık ortam, 5: 228 K ışıklı ortam, 6: 228 K karanlık ortam).

Bu I-V karakteristiklerinin farklı sıcaklıklarda karanlık ve beyaz ışıktaki davranışları Şekil 5.7.3, Şekil 5.7.4 ve Şekil 5.7.5’te verilmiştir.

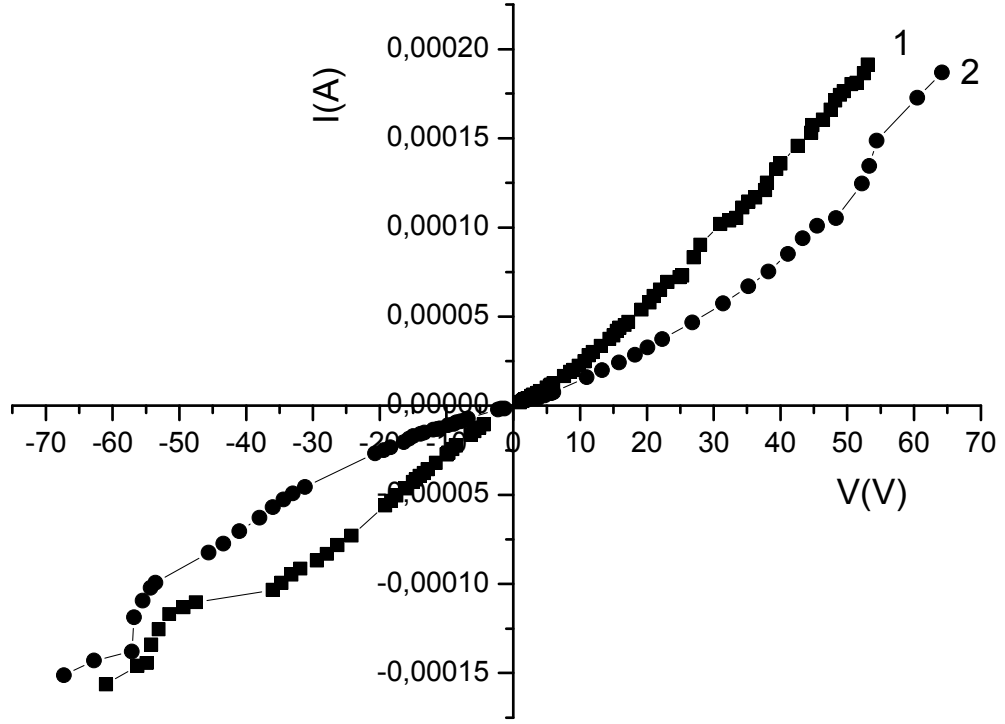


Şekil 5.7.3 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin 300 K’de ışıkta ve karanlıkta I-V karakteristiği. (1: 300 K ışıklı ortam, 2: 300 K karanlık ortam).



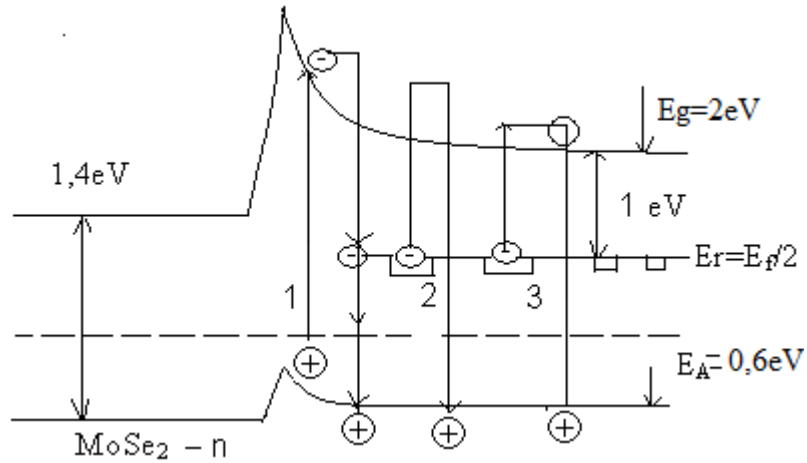
Şekil 5.7.4 27 °C’de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin 248 K’de ışıkta ve karanlıktaki I-V karakteristiği. (1: 248 K ışıklı ortam, 2: 248 K karanlık ortam).





Şekil 5.7.5 27 °C'de 9 saat yağ banyosunda saf GaSe üzerinde büyütülmüş MoSe<sub>2</sub> ince filminin 239 K'de ışıktaki ve karanlıktaki I-V karakteristiği. (1: 239 K ışıklı ortam, 2: 239 K karanlık ortam).

Tüm I-V karakteristiklerinde ışığın etkisiyle iletkenliğin küçüldüğü gözlemlendi.



Şekil 5.7.6 Bant aralığından taşıyıcı geçişleri

Farklı sıcaklıklardaki akım gerilim grafiğinden (I-V) iletkenliğin sıcaklığa bağlı değişimi ( $\log \sigma \sim 10^3/T$ ) araştırıldı.

Bulunan aktivasyon enerjisi, akseptör düzeyi enerjisine ( $E_A$ ) ve hızlı rekombinasyon merkezlerinin derinliğine ( $E_r$ ) eşit olur.

Jenerasyon-rekombinasyon sonucu ışık etkisindeki iletkenlik, karanlık ortamdaki iletkenlikten düşük olmaktadır. Bu, farklı sıcaklıklarda görülmektedir. In-MoSe<sub>2</sub>-GaSe-In heteroekleminin karanlık ve ışıklı iletkenliğinin sabit sıcaklık değişiminden karanlık için  $\log I \approx 10^3/T$ 'den  $E_r \approx 1,0$  eV ve ışık ortamında ise  $E_s \approx E_A = 0,6-0,34$  eV arasında olduğu bulundu. Bu düzeylerin yavaş ve hızlı rekombinasyon merkezleri olduğunu düşünüyoruz. Kesişimde oluşan tuzaklar da negatif iletkenliğe katkıda bulunuyor.

Alınan deneysel verilere göre GaSe-MoSe<sub>2</sub> sisteminin tahmini enerji diyagramı şematik olarak Şekil 5.7.6'da verilmektedir. Bu çizimde negatif fotoiletkenliği açıklayan jenerasyon ve rekombinasyon süreçleri çizilmiştir.

Görüldüğü gibi ışının uyarması sonucu oluşan holler MoSe<sub>2</sub> - GaSe sınırındaki potansiyel engelde elektronlardan uzayca ayrılarak potansiyel çukurlarda tuzaklanır. Yavaş rekombinasyon merkezlerinde tuzaklanan elektronlar ışının etkisiyle iletkenlik bandına uyarılır ve sonradan hızlı s- rekombinasyon ( $\frac{\sigma_r}{\sigma_s} \approx 10^6-10^{10}$ ) merkezlerinden valans bandındaki boşluklarla rekombine edilirler. Sonuçta boşlukların yoğunluğu azalır. Bu nedenle iletkenlik de azalır. Dolayısıyla ışık ortamındaki akım karanlık ortamdaki akımdan az olur. Bu durumda negatif fotoiletkenlik gerçekleşir. Doğal olarak bu olaya MoSe<sub>2</sub> - GaSe heteroeklem (sınırında) kesişimindeki katkı, kusur düzeyleri de katkıda bulunur. Akım gerilim karakteristiklerindeki simetriklik kontak engellerinin simetrik olduğunu gösteriyor. MoSe<sub>2</sub> ve GaSe sınırlarında oluşan derin katkı kusur merkezleri negatif fotoiletkenliğin oluşumunda yeterince katkıda bulunduğunu düşünmekteyiz.

## 6. SONUÇ

Bu çalışmada, CBD yöntemiyle MoSe<sub>2</sub> ince filmleri farklı tabanlar üzerinde büyütüldü ve bu filmlerin yapısal, morfolojik ve optik özellikleri araştırıldı. Pratik ve ucuz olduğu için tercih edilen CBD yöntemiyle 14 grup film büyütüldü.

Film büyütme işlemi düşük ve yüksek sıcaklıklarda yapıldı. En iyi sonucun oda sıcaklığında (27 °C) olduğu görüldü. Yüksek sıcaklıkta (80 °C) üretilen ince filmlerin ise yüzeyinde tortuların oluştuğu görüldü.

Mikroskop camı üzerinde 27 °C sıcaklıkta büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin X- ışınları yapı analizinden (XRD) amorf yapıda olduğu görüldü. Düzenli kristal tabanlar üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinin polikristalite yapıya yakın olduğu belirlendi.

Büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin yüzey morfolojisi taramalı elektron mikroskopunda (SEM) incelendi. MoSe<sub>2</sub> ince film yüzeyinin adacıklar (denritler) biçiminde olduğu görüldü. Alınan MoSe<sub>2</sub> ince filminin EDX araştırılması sonucunda MoSe<sub>2</sub> ince filmlerinde Se fazlalığı belirlendi.

MoSe<sub>2</sub> ince film düzenli yapı taban üzerinde büyütüldüğünde elektriksel iletkenliğinin  $10^{-4} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$ , amorf cam alt taban üzerinde büyütüldüğünde ise elektriksel iletkenliğinin  $10^{-6} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1}$  olduğu görüldü.

Cam üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin soğurma spektrumlarından  $((\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu)$  uzun dalga boyu sınırının 1,1 eV'den başladığı ve dik lineer bölgenin 1,4 eV'de  $h\nu$  eksenini kestiği görüldü. Bu, bantlar arası geçişin-yasak bant aralığının  $E_g=1,4$  eV olduğunu gösterdi.

GaSe tabanı üzerinde büyütülen MoSe<sub>2</sub> ince filminin soğurma spektrumunun  $((\alpha h\nu)^{1/2} \sim h\nu)$  grafiği) iki bölgeden, MoSe<sub>2</sub>'ye ait dik artış  $h\nu \geq 1,4$  eV ve GaSe kristaline ait dik artışın  $h\nu=1,95$  eV'den oluştuğu belirlendi.

## 7. KAYNAKLAR

- [1] Kılınç, T., “ $Zn_{1-x}Fe_xS$  İnce filmlerin fiziksel özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçüimam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, (2006)
- [2] Kundakçı, M., “ $In_2S_3$ , CdS ve  $In_{1-x}Cd_xS$  Yarıiletken ince filmlerin silar metodu ile büyütülmesi ve karakterizasyonu” Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2007)
- [3] Atsam A., InSe İnce Filmlerin Silar Yöntemiyle Büyütülmesi ve Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2006
- [4] KITTTEL, C., “Yarıiletken kristaller”, Katihal Fiziğine Giriş, 6. Basım, Bekir Karaoğlu, Güven Kitap Yayın Dağıtım LTD.ŞTİ. 142,396-398 (1996)
- [5] HOOK, J.R., HALL, H.E., “Yarıiletkenler”, Katihal Fiziği, 1. Basım, Prof.Dr. Fevzi Köksal, Prof.Dr. Mustafa Altunbaş, Prof.Dr. Muharrem Dinçer, Yrd. Doç.Dr. Engin Başaran, Literatür Yayıncılık,147-149 (1999)
- [6] Çörekçi, S., “Grup III-V bileşik yarıiletkenlerde AFM yüzey karakterizasyonu” Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2008)
- [7] Koma, A., “Van der Waals epitaxy for highly lattice-mismatched systems”, Journal of Crystal Growth 201/202 (1999) 236-241
- [8] Kavgacı, M., “Kimyasal banyo yöntemi ile üretilen  $XSe(X=Zn,Cu,Mn)$  ince filmlerinde XRF ölçümleri”, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçüimam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, (2007)
- [9] Şahin, S., “ Geleceğin enerji kaynağı ince film fotovoltaik güneş pilleri” [http://www.emo.org.tr/ekler/e05d6f828574fbc\\_ek.pdf?dergi=167](http://www.emo.org.tr/ekler/e05d6f828574fbc_ek.pdf?dergi=167) (Erişim tarihi: 8.03.2009)
- [10] Sakurai, G.M., Tada, H., Saiki, K., Korea, A., Funasaka, H., Kişimoto, Y., “Epitaxial growth of  $C_{60}$  and  $C_{70}$  films on GaSe (0001) and  $MoS_2$  (0001) surfaces” Chemical Physics Letters 208(1993) 425-430
- [11] Forrest, S.R., Burrows, P.E., “Growth modes of organic semiconductor thin films using organic molecular beam deposition: epitaxy, van der Waals epitaxy, and quasi-epitaxy”, Supramolecular science 4(1997), 127-139
- [12] Milnes, A., Feucht, D.L., “Heterojunctions and Metal-Semiconductor Junctions”, Academic Pres, N.Y.4(1972)

- [13] ULUTAŞ, C., “Kimyasal Depolama Yöntemi İle MnS İnce Filmlerin Elde Edilmesi Ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2004)
- [14] Mallouky, A. and Bernede, J.C., “Characterization of MoSe<sub>2</sub> thin films” *Thin Solid Films*, 158 (1988), 285-298
- [15] EL-Mahalawy, S.H. and Evans, B.L., *Phys. Stat. Sol. (b)* **79** (1977), p. 713.
- [16] Delphine, S. M., Jayachandran, M., Sanjeeviraja, C., “Pulsed electrodeposition and characterization of molybdenum diselenide thin film”, *Materials Research Bulletin*, 40 (2005) 135-147
- [17] Koma, A., “Molecular beam epitaxial growth of organic thin films”, *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 30 (1995) 129-152
- [18] Pramanik, P., Bhattacharya, S., “Deposition of molybdenum chalcogenide thin films by the chemical deposition technique and the effect of bath parameters on these thin films”, *Materials Research Bulletin*, 25 (1990) 15-23
- [19] Delphine, S. M., Jayachandran, M., Sanjeeviraja, C., *Mater. Chem. Phys.* 8 (2003) 78.
- [20] Sharma, C.N., Pandya, D.K., Sehgal, H.K., Chopra, K.L., “Electroless deposition of epitaxial Pb<sub>1-x</sub>Hg<sub>x</sub>S films” *Thin Solid Films* 59 (1979) 157-164
- [21] Caillat, T., Carle, M., Pierrat, P., Scherrer, H., Scherrer, S., “Thermoelectric properties of (Bi<sub>x</sub>Sb<sub>1-x</sub>)<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> single crystal solid solutions grown by the T.H.M. method” *Journal of Physics and Chemistry of Solids.* 53 (1992) 1121-1129
- [22] Rao, C.N., “Modern Aspects of Solid State Chemistry”, Plenum press, New York, 1970, p. 531
- [23] Horak J., Cermak, K., Koudelka, L., “Energy formation of antisite defects in doped Sb<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> and Bi<sub>2</sub>Te<sub>3</sub> crystals” *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 47 (1986) 805-809
- [24] Zhao, Ohtaki, B.R., Luo, R.H.L., Flesner, L.D., “Electrical resistivity and microstructures of sputtered Cu<sub>x</sub>Mo<sub>6</sub>S<sub>8</sub> films” *Thin Solid Films* 110 (1983) 185-192
- [25] Hankare, P.P., Patil, A.A., Chate, P.A., Garadkar, K.M., Sahte, D.J., Manikshete, A.H., Mulla, I.S., “Characterization of MoSe<sub>2</sub> thin film deposited at room temperature from solution phase”, *Journal of Crystal Growth* 311 (2008) 15–19

- [26] Deshpande, M.P., Gupta, S.K., Ajay Agarwal, Agarwal, M.K., “Transport and optical property measurements in indium intercalated molybdenum diselenide single crystals grown by DVT technique” *Synthetic Metals*, 123 (2001) 73-81
- [27] Joseph Sahaya Anond, T., Sanjeeriraja, C., Jayachandran, M., “Preparation of layered semiconductor (MoSe<sub>2</sub>) by Electrosynthesis”, *Vacuum* 60 (2001) 431
- [28] Delphine, S. M., Jayachandran, M., Sanjeevirajaa, C., “Pulsed electrodeposition and characterization of molybdenum diselenide thin film”, *Materials Research Bulletin* 40 (2005) 135–147
- [29] Hankare, P.P., Chate, P.A., Delekar, S.D., Bhuse, V.M., Asabe, M.R., “Structural and opto-electrical properties of Molybdenum diselenide thin films deposited by chemical bath method”, *Journal of Crystal Growth* 291 (2006) 40–44
- [30] Markwell, D.R., and Halt, M.L., *J. Electrochem. Soc.* 101 (1957), p. 652
- [31] Lyons, E.H., “Electronic Configuration in Electrodeposition from Aqueous Solution”, *J. Electrochem. Soc.*, Volume 101, Issue 8, pp. 410-414 (1954)
- [32] [http://host.nigde.edu.tr/hytem/YAYINLAR/ELEKTRON%20TARAMALI%20M%C4%B0KROSKOP%20\\_SEM.pdf](http://host.nigde.edu.tr/hytem/YAYINLAR/ELEKTRON%20TARAMALI%20M%C4%B0KROSKOP%20_SEM.pdf)27. (Erişim tarihi: 10.04.2009)

## **ÖZGEÇMİŞ**

Adı Soyadı : Özer BOZDOĞAN

Doğum Yeri : KOZAN

Doğum Tarihi : 17.11.1982

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Kozan Endüstri Meslek Lisesi Elektronik Bölümü /1997-2000

Lisans : Kafkas Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü/2002-2006

Yüksek Lisans: Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Bölümü Katı Hal

Fiziği Anabilim Dalı/2006-2009