

DEĐIŐİK YÖNTEMLERLE ELDE EDİLEN  
CdS'ÜN OPTİK VE ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

HALİL HARUN SÜVÜT

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**FİZİK Anabilim Dalı**

EYLÜL 2005

COMPARISON OF OPTICAL AND ELECTRICAL  
PROPERTIES OF CdS OBTAINED WITH  
DIFFERENT METHODS

HALİL HARUN SÜVÜT

**MASTER OF SCIENCE THESIS**

**Department of PHYSICS**

SEPTEMBER 2005

**DEĞİŞİK YÖNTEMLERLE ELDE EDİLEN  
CdS'ÜN OPTİK VE ELEKTRİKSEL  
ÖZELLİKLERİNİN KARŐILASTIRILMASI**

**HALİL HARUN SÜVÜT**

Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü YönetmeliĐi Uyarınca  
**FİZİK** Anabilim Dalı  
**KATIHAL FİZİĞİ** Bilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: **Doç. Dr. M. Celalettin BAYKUL**

**EYLÜL 2005**

Halil Harun SÜVÜT' ün YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “DEĞİŞİK YÖNTEMLERLE ELDE EDİLEN CdS'ÜN OPTİK VE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye : Doç. Dr. M. Celalettin BAYKUL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erol TAŞAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Ali ÇETİN

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

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU  
Enstitü Müdürü

## ÖZET

Yarıiletken ince film üretim tekniklerinden kimyasal püskürtme (SP), Magnetron sökme biriktirme (MS), Vakum altında buharlaştırma (VE), Metal organik kimyasal buhar çöktürme (MOCVD) ve Moleküler demet epitaksi (MBE) teknikleri, çalışma prensipleri, üretim süreçleri ve bu süreçlerin üretilen ince filmlerin fiziksel özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Yarıiletken ince filmlerin fiziksel özelliklerini oluşturan kristal yapı, film kalınlığı, optik ve elektriksel özellikler elektronik ve optoelektronik cihazların geliştirilmesinde ve kullanım alanlarının artmasında oldukça önemli bir yere sahiptir. Bu çalışmada beş farklı teknikle üretilmiş II-VI yarıiletken bileşiklerinin kristal yapı, iletkenlik tipi, mobilite, elektriksel öz direnç, ve yasak enerji aralık değerlerini gösteren tablolar oluşturulmuştur. Bu tekniklerle üretilen ince filmlerin optik ve elektriksel özellikleri ile üretim teknikleri arasındaki ilişki incelenmiştir.

Kimyasal püskürtme (SP), Magnetron sökme biriktirme (MS), Vakum altında buharlaştırma (VE), Metal organik kimyasal buhar çöktürme (MOCVD) ve Moleküler demet epitaksi (MBE) teknikleriyle üretilen II-VI yarıiletken bileşiklerinden CdS yarıiletken ince filmlerinin optik ve elektriksel özellikleri karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Günümüz teknolojisinde oldukça önemli bir yeri olan yarıiletken ince filmlerin optik ve elektriksel özelliklerinin ince film üretim tekniklerine kuvvetli bir şekilde bağlı olduğu belirlenmiştir.

## SUMMARY

The semiconductor thin film production techniques such as spray pyrolysis (SP), magnetron sputtering (MS), metalorganic chemical vapour depositon (MOCVD), vacuum evaporation (VE) and molecular beam epitaxy (MBE) and their principles, processes and the effect on the physical properties of produced thin films are examined in this research.

The physical properties of semiconductor thin films such as crystal structure, the thickness of the thin film and electrical and optical properties, have a significant role on the development of the electronic and opto-electronic devices and their usage. The tables showing the crystal structures, semiconductor types, mobilities, electrical resistivity, and band gaps of the II-VI compounds which are produced by five different techniques are provided in this research. The relationships between optical and electrical properties of thin films and techniques for productions have been studied.

The electrical and optical properties of different techniques such as CdS semiconductor thin films which were produced by Spray Pyrolysis (SP), Magnetron Sputtering (MS), Metalorganic Chemical Vapour Depositon (MOCVD), Vacuum Evaporation (VE) and Molecular Beam Epitaxy (MBE) have been compared and interpreted. It has been determined that the electrical and optical properties of semiconductor thin films highly depend on the production methods of thin films.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada beni yönlendiren, bilimsel katkılarını ve yardımlarını esirgemeyen, büyük sabır ve ilgi gösteren saygıdeğer hocam Doç. Dr. M. Celalettin BAYKUL'a en içten saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince yardım, destek ve dostluklarını esirgemeyen değerli arkadaşlarım Naim ÇINAR, Oktay DURSUN, Ömer ÖZCAN, Alper GÜLEÇ, Hadi ÇOLAKOĞLU, Cemalettin TÜRKMEN ve Nilgün ORHAN'a teşekkür ederim.

Bugünlere gelmemi sağlayan ve her zaman yanımda olan değerli aileme sonsuz hürmetlerimi ve teşekkürlerimi sunarım.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xii
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ .....</b>	<b>1</b>
1.1. Giriş .....	1
1.2. Yarıiletkenler .....	1
1.3. II-VI Bileşikleri.....	3
1.4. CdS Bileşiği .....	5
1.5. Amaç.....	7
<b>2. YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>8</b>
2.1. Giriş .....	8
2.2. Elektriksel İletkenlik Ve Mobilite .....	8
2.3. Metal Yarıiletken Kontaklar .....	12
2.3.1. Schottky engeli .....	15
<b>3. YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ.....</b>	<b>18</b>
3.1. Giriş .....	18
3.2. Temel Absorpsiyon.....	18
3.2.1. Absorpsiyon yöntemi ile yasak enerji aralığının belirlenmesi.....	22
3.3. İletkenliğin Sıcaklıkla Değişiminden Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi .....	26
<b>4. YARIİLETKEN İNCE FİLM ÜRETME TEKNİKLERİ .....</b>	<b>30</b>
4.1. Giriş .....	30
4.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemi .....	30



4.3. Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi .....	33
4.4. Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme Yöntemi.....	37
4.4.1. Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı (RHEED).....	39
4.5. Vakum Altında Buharlaştırma Yöntemi .....	41
4.6. Fiziksel Buhar Biriktirme .....	45
4.6.1 Magnetron Sökme Biriktirme Yöntemi .....	46
<b>5. SONUÇLAR .....</b>	<b>49</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ .....</b>	<b>51</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Metal-yarıiletken (n-tipi) ohmik kontağının enerji bant diyagramı ( $\Phi_m < \Phi_s$ )	12
2.2. Sığ tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği .....	14
2.3. Derin tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği .....	14
2.4. Schottky kontağında $\Phi - \chi$ grafiği.....	16
2.5. Bir metal ile <i>n</i> -tipi bir yarıiletken arasındaki doğrultucu potansiyel engeli ...	17
3.1. Yarıiletkenlerde temel absorpsiyon spektrumunu .....	19
3.2. CdTe için $\alpha - \hbar\omega$ grafiği .....	23
3.3. CdTe için $\alpha^{1/2} - \hbar\omega$ grafiği .....	24
3.4. Sıcaklığın tersine göre taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi (Polyakov, 1985) .....	26
3.5. <i>n</i> -tipi bir yarıiletkende olası geçişler (Polyakov, 1985) .....	27
3.6. İletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişimi (Polyakov, 1985) .....	29
4.1. Spray Pyrolysis tekniğinin şematik diyagramı .....	33
4.2. MBE Tekniğinde büyütme odasının şematik diyagramı .....	36
4.3. MOCVD Reaktörünün şematik diyagramı .....	39
4.4. RHEED yöntemi .....	41
4.5. Vacuum Evaporation yönteminin şematik diyagramı .....	44
4.6. Magnetron Sputtering sistemi şematik diyagramı .....	48

**ÇİZELGELER DİZİNİ**

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bazı II-VI bileşiklerine ait elektriksel özdirenç ve mobilite verileri .....	11
3.1. Bazı II-VI bileşiklerine ait iletkenlik türleri, bant aralıkları ve kristal yapı verileri.....	21

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
$n_n$	n-tipi yarıiletkende elektron konsantrasyonu
$V_{tr}$	Ohmik bölgeden SCL bölgesine geçiş voltajı
$V_{TFL}$	Tuzakların dolmasına karşılık gelen voltaj
$T$	Mutlak sıcaklık, Geçirgenlik
$E_d$	Donör enerji seviyesi
$N_d$	Donör konsantrasyonu
$E_a$	Aktivasyon enerjisi
$E_t$	Tuzak enerjisi
$k_B$	Boltzmann sabiti
$K$	Kelvin
$\lambda$	Dalgaboyu
$I/I_0$	Geçen ışığın şiddeti/Gelen ışığın şiddeti
$\nu$	Frekans
$h$	Planck sabiti
$\alpha$	Absorpsiyon katsayısı
$k$	Dalga vektörü,
$n_0$	Kırılma indisi
$nm$	Nanometre
$\epsilon$	Dielektrik sabiti
$E_F$	Yarıiletkenin fermi enerji seviyesi
$m_e^*$	İletim bandındaki elektronların etkin kütlesi
$m_p^*$	Valans bandındaki hollerin etkin kütlesi
$e$	Elektron yükü
$\mu_e$	Elektron mobilitesi
$\mu_h$	Hole mobilitesi
$\epsilon_0$	Boşluğun permitivitesi
$\epsilon_r$	Yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<u>Kısaltmalar</u>	<u>Açıklama</u>
SCL	Space Charge Limited
TFL	Trap Filled Limited
UHV	Ultra High Vacuum
RF	Radio Frequency
SP	Spray Pyrolysis
MBE	Molecular Beam Epitaxy
PBN	Pyrolytic Boron Nitride
BEP	Beam Equivalent Pressure
RHEED	Reflection High Energy Electron Diffraction
MOCVD	Metal Organic Chemical Vapor Deposition
WPE	Water Phase Epitaxy
LPE	Liquid Phase Epitaxy
LED	Light Emitting Diod
CAR	Continual Azimuthal Rotation
VE	Vacuum Evaporation
PVD	Physical Vapour Deposition
CVD	Chemical Vapour Deposition
PLD	Pulsed Laser Deposition
MS	Magnetron Sputtering

# 1. GİRİŞ VE AMAÇ

## 1.1. Giriş

Yarıiletken malzemeler elektronik ve optoelektronik cihazların üretiminde oldukça önemli bir yere sahiptirler. Temel taşıyıcı yarıiletken malzemelerin oluşturduğu aygıtlar arasında transistör, anahtar diyod, fotovoltaiik güneş pili, dedektör, silisyum doğrultucular ve termistörleri sayabiliriz. Bu aygıtlar devre elemanı olarak tek başlarına kullanılabilir veya entegre devrelerin bir parçası olabilirler. Günümüz teknolojisinde yarıiletken malzemeler yaygın olarak ışığın yayınlanmasını ve soğurulmasını gerektiren cihazlarda kullanılmaktadır. Bu cihazlarda kullanılan yarıiletken malzemelerin karakteristik özellikleri elektronik cihazların gelişmesinde oldukça önemlidir.

Gelişen bilim ve teknoloji yarıiletken ince filmlerin üretilmesinde birbirine alternatif olabilecek yeni üretim teknolojileri ortaya çıkarmış, halihazırda kullanılan üretim tekniklerini ve cihazlarını da modernize etmiştir. Günümüzde kaliteli ve istenilen özelliklere sahip yarıiletken malzemelerin üretim yöntemleri ve özelliklerinin incelenmesi üzerine pek çok çalışma yapılmaktadır.

## 1.2. Yarıiletkenler

Katılar elektriksel özelliklerine göre; iletkenler yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç grupta toplanır. Yarıiletkenler oda sıcaklığında  $10^{-2} \Omega \text{ cm}$ 'den  $10^9 \Omega \text{ cm}$ 'ye kadar sıcaklıkla hızlı değişen elektrik öz dirençleriyle sınıflandırılırlar.  $T=0 \text{ K}$ 'de saf yarıiletkenlerin çoğu yalıtkandır. Fakat yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki ısıl etkileşimle elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu tür materyaller yarıiletkenler olarak bilinir. Sıcaklık arttığında elektriksel öz direncin düşmesi yarıiletkenleri metallere ayıran önemli bir özelliktir (Kittel, 1996; Omar, 1975).

Periyodik tablonun IV. grup elementleri olan Ge ve Si en fazla bilinen yarıiletkenlerdir. IV. grup elementleri kovalent kristallerdir ve kovalent bağlanma ile atomlar birbirlerine bağlanırlar. Periyodik tablonun III. grup elementleriyle V. grup elementlerinden oluşan III-V bileşiklerinde de atomlar kovalent bağlanma ile bir arada tutulurlar. III-V bileşiklerine örnek olarak GaAs, GaP, InSb ve InAs verilebilir. III-V bileşikleri kübik (sphalerite) yapıda kristallenirler. Yarıiletkenlerin diğer önemli bir sınıfında II-VI bileşikleri oluşturur. II-VI bileşiklerinde bağlanma tipi iyonik ve kovalenttir. II-VI bileşikleri hem kübik hem de hegzagonal yapıda kristallenirler. Bu gruba örnek olarak CdS, CdZnS, ZnS ve CdSe verilebilir (Omar, 1975).

Bir yarıiletkende  $T=0\text{ K}^\circ$  sıcaklıkta tamamen dolu olan bir valans bandı ile bu banttandır yasak enerji aralığı kadar yukarıda tamamen boş olan bir iletim bandı vardır. Bu sıcaklıkta yarıiletken bir yalıtkan gibi davranır.  $T=0\text{ K}^\circ$  de bütün elektronlar valans bandında bulunduğu için herhangi bir elektriksel iletim gözlenmez. Sıcaklığın  $T=0\text{ K}^\circ$  den itibaren artmasıyla birlikte valans bandında bulunan elektronlar, iletim bandına çıkarlar ve geride hole adı verilen boşluklar bırakırlar. Valans bandında oluşan bu boşluklar diğer elektronlar tarafından doldurulur. Dolayısıyla hole ile elektron yer değiştirmiş olur. Böylelikle valans bandında holler iletim bandında elektronlar yer değiştirerek iletme katkıda bulunurlar. Sıcaklıktaki artışın devam etmesi halinde elektronların ve hollerin sayısı da hızla artar ve bu yarıiletkenlerde iletkenliğin sıcaklıkla birlikte büyümesi özelliğini açıklar (McKelvey, 1966).

Yarıiletkenlerde elektronlar ve holler genellikle serbest taşıyıcı veya taşıyıcı olarak adlandırılır. Birim hacimdeki taşıyıcıların yoğunluğu yarıiletkenler için önemli bir özellik olup yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini belirler (Omar, 1975; Streetman, 1980).

Yarıiletkenlerde taşıyıcı yoğunluğu yasak enerji aralığına, sıcaklığa ve taşıyıcıların etkin kütlelerine bağlıdır. Herhangi bir yarıiletken için yasak enerji aralığı, elektron ve hollerin etkin kütleleri sabit olarak kabul edildiğinde taşıyıcı yoğunluğu sadece sıcaklığa bağlıdır (McKelvey, 1966).

Saf bir yarıiletkende elektronların ve hollerin sayısı birbirine eşittir. Çünkü valans bandındaki bir hol sadece bir elektronun iletkenlik bandına çıkmasıyla oluşturulabilir. Yarıiletkenler üzerine yapılan bilimsel çalışmalarda bir çok uygulamada taşıyıcılardan sadece birinin baskın olduğu örneklere ihtiyaç duyulur. Yarıiletkenlere uygun katkı atomları enjekte edilerek sadece elektron veya hollerinde barındıran yarıiletkenler elde edilebilir (Omar, 1975; Hook ve Hall, 1999).

Bazı katkı maddeleri ve örgü bozuklukları bir yarıiletkenin elektrik özelliklerini çok şiddetli etkiler. Silisyum içine bor enjekte edildiğinde silisyumun oda sıcaklığındaki elektrik iletkenliğinin arttığı gözlenmiştir. Bileşik yarıiletkenlerde bileşiklerden birinin atom eksikliği de katkı maddesi gibi davranır. Bu tür yarıiletkenler kusurlu yarıiletkenlerdir. Elektron yoğunluğu, hol yoğunluğundan fazla ise bu tür yarıiletkenler n-tipi, hol yoğunluğunun daha fazla olduğu yarıiletkenler de p-tipi yarıiletken olarak adlandırılır (Neaman, 1997; Kittel, 1996; Smith, 1990).

Herhangi bir yarıiletken bir elektrik alan uygulandığı zaman holler elektrik alanla aynı yönde, elektronlar ise elektrik alanla zıt yönde hareket ederler. Yüklü parçacıkların sürüklenme hızlarının, elektrik alanın büyüklüğüne oranı yarıiletkenin mobilitasını verir (Mott ve Davis, 1971; Omar, 1975; Kittel, 1996).

### 1.3. II-VI Bileşikleri

II-VI yarıiletken bileşikleri periyodik tablonun II B grubu elementlerinden Cd, Zn ve Hg, VI A grubu elementleri (O, S, Te, Se) ile 12 tane bileşik oluştururlar. Periyodik tabloda yatay sıralar periyot, dikey sıralar grup olarak adlandırılırken yukarıdan aşağıya ve soldan sağa doğru gidildikçe atom numarası artar. Geçiş metalleri olarak adlandırılan B grubu elementleri esas olarak sertlikleri, yüksek yoğunlukları, iyi ısı iletkenlikleri ve yüksek erime-kaynama sıcaklıklarıyla tanınırlar. Özellikle sertlikleri nedeniyle saf halde ya da alaşım halinde yapı malzemesi olarak kullanılırlar. Geçiş elementlerinin hepsi, elektron dizilimlerinde en dışta her zaman d orbitalinde elektron taşırlar.



II-VI yarıiletken bileşiklerinden elde edilen diyot, transistör, güneş pilleri, foto iletkenler ve foto detektörler Si ve III-V bileşiklerinden GaAs'den yapılmış olanların alternatifi olarak tercih edilirler (Spanulescu, et al., 1986; Das, et al., 1988 Ruxandra, et al., 1998).

II-VI yarıiletken bileşiklerinin enerji bant aralığı 1,8-4 eV arasında değişmektedir. Bunun yanında 0,25 ve 1,47 eV değerlerinde enerji bant aralığına sahip bileşikler de bulunmaktadır. Bunlar HgSe, HgTe ve CdTe'dir. II-VI yarıiletken bileşikleri, kimyasal buhar depolama (CVD), Molecular demet epitaksi (MBE), Metal-Organik kimyasal buhar depolama (MOCVD), Vakumda buharlaştırma (VE), Spray Pyrolysis ve Sputtering gibi çeşitli metotlarla üretilebilmektedirler (Bhattacharyya, et al., 1996; Krishnakumar, et al., 1987; Ramailah, et al., 1998; Sze, 1981). II-VI yarıiletken bileşiklerinin kristalize yapısı hem kübik zincblende (sphalerite) hem de hegzagonal (Wurtzite) fazda olabilmektedir (Nag, 1980).

II-VI grup bileşiklerinden ZnS, ZnSe, ZnTe ve CdTe kübik zincblende fazda kristalize olurlar. Bu bileşiklerin kübik fazda kristallenmeleri nedeniyle etkin kütlelerinin ve bunun sonucu olarak da elektron mobilitelerinin izotropik olduğu gözlenmiştir.

$$\mu_n = \frac{e\tau_n}{m_n^*} \quad \mu_p = \frac{e\tau_p}{m_p^*} \quad (1.1)$$

Herhangi bir malzeme tüm yönlerde aynı optik karakteri gösteriyorsa, bir başka deyişle bir malzemenin tüm özellikleri tüm yönlerde aynıysa bu tür malzemelere izotrop malzeme denir.

Bunun tersine bir malzeme değişik yönlerde değişik optik özelliklere sahipse anizotrop malzeme adını alır.

Kübik sistemde kristallenmiş olan bileşikler optikçe izotropdur. Tüm hegzagonal, tetragonal, ortorombik, monoklinik ve triklinik sistemlerde kristallenmiş olan bileşikler optikçe anizotropurlar. ZnO, CdSe ve CdS gibi II-VI yarıiletken bileşikler ise genellikle hegzagonal (wurtzite) kristal yapısına sahip bileşiklerdir. Bu yarıiletken bileşiklerin etkin kütleleri ve elektron mobiliteleri anizotropik özellik gösterir. Bu da kübik yapıya sahip materyaller ile aralarındaki önemli bir farklılıktır. Mobilitedeki bu anizotropik durum hem deneysel hem de teorik çalışmalar ile belirlenmiştir (Nag, 1980).

#### 1.4. CdS Bileşiği

Yarıiletken CdS bileşiği periyodik tablonun II.grup elementlerinden Cd ile VI grup elementlerinden S'den oluşan bir II-VI grubu bileşiktir. Özellikle güneş pilleri, fotodetektörler ve alan etkin transistörler gibi aygıtlarda istenen elektrik ve optik özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptir (Ebenezer, et al., 1988; Ruxandra, et al., 1998; Spalunescu, et al., 1986; Das, et al., 1988; Krishnakumar, et al., 1987; Karanjai, et al., 1987).

CdS filmlerinin elektrik ve optik özellikleri kübik ve hegzagonal fazda olmasına göre değişir. Düşük özdirence sahip CdS ince filmlerinin ucuz tekniklerle elde edilmesi fotovoltaiik uygulamalar için çok önemlidir (Martinez, et al., 1997; Vigil, et al., 1998).

CdS yarıiletken filmi, oda sıcaklığında geniş bir yasak enerji aralığına ve direk bant geçişine sahip n tipi bir fotoiletken yarıiletken malzemedir. CdS filminin yasak enerji aralığı değeri 2,42-2,5 eV arasında değişmektedir (Kittel, 1996; Chavez, et al., 1997; Nag, 1980; Blakemore, 1985; Das et al., 1988; Ruxandra, et al., 1998; Sahu, 1995).

Bu özelliklerinden dolayı CdS heteroeklem güneş pillerinde gelen ışınları toplayıp iletme sokan pencere materyali olarak tercih edilmektedir (Valyomana, et al., 1990; Kim, et al., 1993).

CdS dar bant aralığına sahip CuInSe<sub>2</sub> (1,01 eV), Cu<sub>2</sub>S (1,2 eV), InP (1,35 eV) ve CdTe (1,45 eV) gibi yarıiletkenler ile birlikte heteroeklem güneş pillerinin üretiminde kullanılmaktadır (Chavez, et al., 1997; Galloway, et al., 1999; Moreno, et al., 2000).

CdS ince filmlerindeki azınlık taşıyıcılarının ömrü güneş pillerinin üretiminde önemli bir parametredir. n-tipi yarıiletken materyallerde elektron yoğunlu hol yoğunluğundan büyük olacağından elektriksel iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazla olacaktır. Bu nedenle n-tipi yarıiletkenlerde elektronlara çoğunluk taşıyıcıları ( $n_n$ ) ve hollere ise azınlık taşıyıcıları ( $p_n$ ) denir (Sze, 1981; Smith, 1990).

Güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılacak malzemenin düşük özdirence sahip olması istenir. CdS yarıiletken ince filmlerinin özdirençleri  $10^4 - 10^8 \Omega \text{ cm}$  arasında değişmektedir. Yüksek özdirençli CdS filmleri tavlanarak yada katkılama yapılarak özdirençleri düşürülebilir. CdS ince filmleri H<sub>2</sub> atmosferi altında 450<sup>0</sup>C de tavlendiğinde özdirencin  $10^8 \Omega \text{ cm}$ 'den 50  $\Omega \text{ cm}$ 'ye düştüğü gözlenmiştir. Çinko veya indiyum katkılıandığında da filmlerin özdirençlerinin düştüğü gözlenmiştir (Hayashi, et al., 1988; Danaher, et al., 1985).

CdS ince filmleri hangi teknikle elde edilirse edilsin yüksek geçirgenlik ve yüksek elektriksel iletme sahip olmaları istenir. Yarıiletken CdS ince filmleri yüksek derecede kararlı hegzagonal faz ve kübik faz olmak üzere iki farklı yapısal faz içerir. X-ışını kırınım desenlerinden elde edilen örgü sabiti hegzagonal fazlı CdS için  $a=4,136 \text{ \AA}$  ve  $c=6,713 \text{ \AA}$ ; Kübik fazlı CdS için  $a=5,825 \text{ \AA}$  'dur. Literatürde hegzagonal ve kübik yapının yanı sıra karışık yapılı CdS filmlerinde üretildiği görülmektedir (Kittel, 1996; Vazquez luna, et al., 1999; Dawar, et al., 1991; Martinez, et al., 1997; Atay, 2001; Bhattacharyya, et al., 1996).

## 1.5. Amaç

Bu çalışmadaki amaçlardan biri yarıiletken ince film üretim tekniklerinden vakum altında buharlaştırma (VE), kimyasal püskürtme (SP), magnetron sökme biriktirme (MS), metal organik kimyasal buhar çöktürme (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) tekniklerinin yapıları, çalışma prensipleri, üretim süreçleri, ve bu süreçlerin ince filmler üzerine etkilerini incelemektir. Yukarıda ifade edilen beş farklı teknikte üretilmiş II-VI bileşiklerinin kristal yapıları, iletkenlik tipleri, mobiliteleri, elektriksel özdirençleri ve yasak enerji aralıklarını gösteren sonuçlardan yola çıkılarak üretilen filmlerin fiziksel özelliklerinin üretim tekniğine göre değerlendirilmesi ve bu tekniklerle elde edilen CdS yarıiletken ince filmlerinin elektriksel ve optiksel özelliklerinin karşılaştırılarak yorumlanması çalışmanın diğer bir amacını oluşturmaktadır.

## 2. YARIİLETKEN İNCE FİMLERİN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1. Giriş

Bir yarıiletken materyalin akım-voltaj karakteristiğinden yararlanarak o materyalin iletkenlik ve özdirenç gibi çeşitli elektriksel özellikleri hakkında bilgi edinilebilir. Bu amaçla akım ve voltaj değerleri için metal-yarıiletken kontaklar oluşturulmalıdır. Metal-yarıiletken kontaklar için metal elektrot ya da kontak materyali olarak adlandırılan farklı iş fonksiyonlarına sahip altın (4.70 eV), gümüş (4.31 eV), indiyum (4.09 eV), bakır (4.52 eV), alüminyum (4.20 eV) gibi metaller kullanılır (Bujatti, 1967). II-VI bileşiklerinden CdS ve CdSe, alüminyum ve indiyum metalleriyle ohmik kontak özelliği gösterirler (Meth, et al., 2004; Smith, 1954). CdTe ve ZnTe' ün iş fonksiyonları sırasıyla 5.5 eV ve 5.75 eV' dur (Ghosh, et al., 1994; Nishio, et al., 1999). Bu yüzden CdTe ve ZnTe, bir çok metalle ohmik kontaktırlar. Diğer II-VI bileşiklerinden ZnO, ZnS ve ZnSe' nin akım-voltaj değerleri için bu bileşiklerle ohmik kontak özelliği gösteren altın, indiyum, bakır gibi metaller kullanılmaktadır (Basak, et al., 2003; Fathy, et al., 2005; Park, et al., 1999).

### 2.2. Elektriksel İletkenlik Ve Mobilite

Yarıiletkenlerde elektrik akımına hem iletim bandındaki elektronlar (n) hem de valans bandındaki holler (p) katkıda bulunur. Elektronlar ve hollerin oluşturduğu akım yoğunluğu taşıyıcıların yükleriyle hızlarının çarpımına eşittir.  $\vec{E}$  elektrik alanı uygulanan bir yarıiletkende elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu  $\vec{J}$ ;

$$\vec{J} = p_e \vec{v}_e + p_h \vec{v}_h \rightarrow \vec{J} = -en\vec{v}_e + ep\vec{v}_h \quad (2.1)$$

burada  $-e$ ,  $n$ ,  $\vec{v}_e$  sırasıyla elektronun yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını;  $+e$ ,  $p$ ,  $\vec{v}_h$  sırasıyla holün yükünü, yoğunluğunu ve sürüklenme hızını belirtmektedir.

Yarıiletkene bir elektrik alan uygulandığı zaman elektronlar elektrik alanla zıt yönde, holler ise elektrik alanla aynı yönde hareket ederler. Elektronların ve hollerin sahip olduğu sürüklenme hızları, uygulanan elektrik alanın büyüklüğü ile orantılı olacaktır. Bu orantı sabiti mobilitedir. Bir başka deyişle mobilité birim elektrik alan başına yüklü parçacıkların hızıdır.

$$\mu_e = \frac{v_e}{E} \quad (2.2)$$

$$\mu_h = \frac{v_h}{E} \quad (2.3)$$

$\mu_e$  : elektron mobilitesi

$\mu_h$  : hol mobilitesi

Mobilité yarıiletkenin cinsine, saflığına ve sıcaklığına bağlıdır. Yarıiletkenlerde iyonlaşmış katkı atomlarının ve fononların bulunması serbest yüklerin ortalama serbest yollarını küçültür ve çarpışma sayısını artırır. Bu durum mobilitenin azalmasına sebep olur.

$\vec{E}$  elektrik alanı uygulanan bir yarıiletkente toplam akım yoğunluğu  $\vec{J}$ ,

$$\vec{J} = e(n\mu_e + p\mu_h)\vec{E} \quad (2.4)$$

şeklinde de yazılabilir. Elektriksel iletkenlik  $\sigma$  birim elektrik alan başına akım yoğunluğu olarak tanımlanır. Yani,

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2.5)$$

ile verilir. Bu denklemde (2.4) akım yoğunluğu ifadesi yerine yazılırsa elektronların ve hollerin oluşturduğu elektriksel iletkenlik  $\sigma$  ;

$$\begin{aligned}\sigma &= \sigma_e + \sigma_h \\ \sigma &= e (n \mu_e + p \mu_h)\end{aligned}\quad (2.6)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeye göre iletkenlik yük taşıyıcıların yoğunluğuna ve mobilitesine bağlıdır.

Sabit  $\vec{E}$  elektrik alanında birim hacimde  $n$  tane  $q = -e$  yüklü elektron varsa, akım yoğunluğu  $\vec{J}$ ;

$$\vec{J} = nq\vec{v} = ne^2\tau \vec{E} / m \quad (2.7)$$

olur. Bu ohm yasasıdır. Bu denklemde (2.5) ifadesi yerine yazılırsa elektriksel iletkenlik  $\sigma$ ;

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (2.8)$$

olur. Elektrik özdirenci  $\rho$  iletkenliğin tersi olarak tanımlanır ve ;

$$\rho = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (2.9)$$

ile ifade edilir. Taşınan yükün “ $ne$ ” yük yoğunluğuna orantılı olması beklenir;  $e/m$  çarpanı ivmeden gelir, çünkü bir elektrik alanda ivme  $e$  yüküyle doğru,  $m$  kütlesiyle ters orantılıdır.  $\tau$  zamanı elektrik alanın iki çarpışma arasında yük taşıyıcıya etki edebildiği zaman aralığıdır (Mott ve Davis, 1971; Omar, 1975; Kittel, 1996).

Materyal	S.P		MBE		MOCVD		VE		MS	
	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$	$\rho(\Omega\text{cm})$	$\mu(\text{cm}^2/\text{Vs})$
CdO	$10^{-3}$	23	-	-	$1.7 \cdot 10^{-1}$	200	$9.1 \cdot 10^{-4}$	-	$4.8 \cdot 10^{-4}$	64
CdS	$10^3-10^5$	35	$10^5$	65-380	-	-	$1.8 \cdot 10^{-1}$	7	$1.2 \cdot 10^6$	-
CdSe	-	-	-	-	-	-	$10^2$	32	-	-
CdTe	$10^7$	-	$10^6$	460	$10^5$	180	$5.4 \cdot 10^6$	-	$10^3-10^7$	-
ZnO	$0.2 \cdot 10^{-1}$	15.8	$1.6 \cdot 10^{-2}$	120	$4.6 \cdot 10^2$	43.4	$5.8 \cdot 10^{-1}$	7.15-9.1	$3.1 \cdot 10^{-2}$	3.67
ZnS	$10^4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZnSe	$5.6 \cdot 10^4$	0.53	$0.2 \cdot 10^{-1}$	200	$2 \cdot 10^{-1}$	500	$10^5$	-	-	-
ZnTe	$10^6$	-	$4.5 \cdot 10^2$	30	$1.9 \cdot 10^{-2}$	-	$2.5 \cdot 10^2$	0.1	-	-

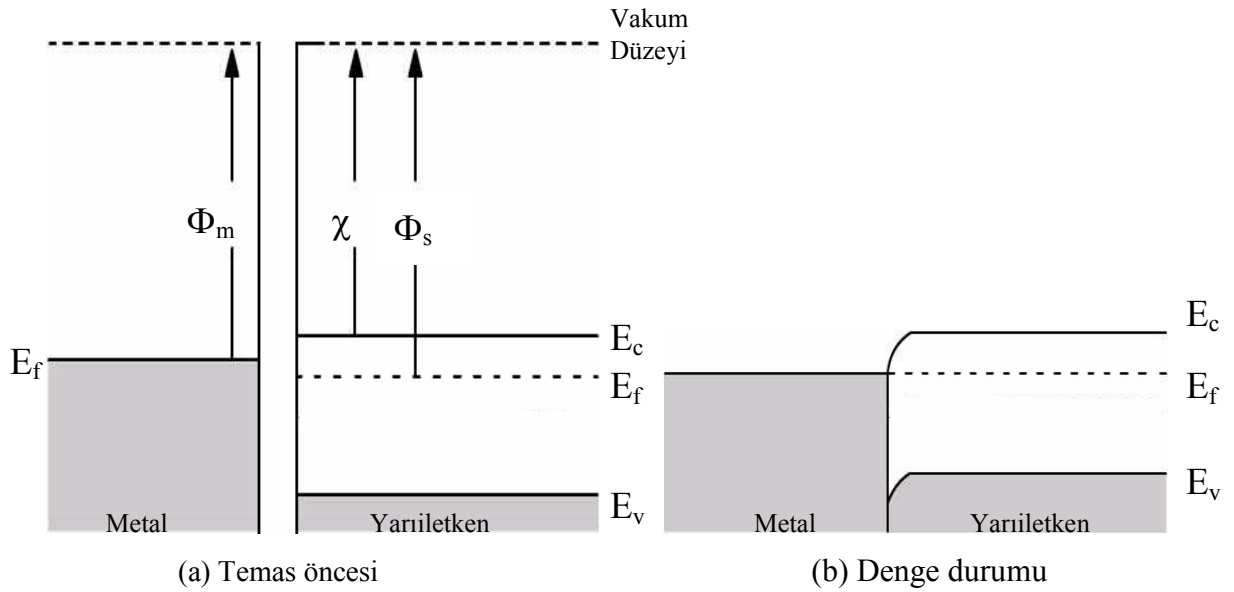
**Çizelge 2.1.** Bazı II-VI bileşiklerine ait elektriksel özdirenç ( $\Omega\text{cm}$ ) ve mobilite ( $\text{cm}^2/\text{Vs}$ ) verileri.



Çizelge 2.1.' de bazı II - VI bileşiklerinin elektriksel özdirençleri ve mobilite değerleri görülmektedir (Zaveryukhin, et al., 2003; Chul-Hwan, et al., 2005; Mandal, et al., 1999; Rizzo, et al., 2000; Reddy, et al., 2003; Bedir, vd., 2002; Zhao, et al., 2005; Cameron, et al., 1979; Kazukauskas, et al., 1999; Rajavel, et al., 1994; Iwata, et al., 2005; Katayama, et al., 2004; Ferreira, et al., 1994; Nuss, et al., 1989; Sato, et al., 2004; Konstantinos, et al., 1989; Buckley, et al., 1973; Muravjeva, et al., 1970; Jayatissa, 2003; Feng, et al., 1996; Bhosale, et al., 2005; Boone, et al., 1982; Bian, et al., 2004; Fath, et al., 2005; Bedir, vd., 2005; Demerchant, et al., 1996; He, et al., 2005; Eze, 2005; Ramaiah, et al., 2001; Lee, et al., 2003; Bicknell, et al., 1986; Ramamoorthy, et al., 2004; Depuydt, et al., 1989; Amin, et al., 2002; Niraula, et al., 2000).

### 2.3. Metal Yarıiletken Kontaklar

Metal-yarıiletken kontaklar yarıiletkenin iş fonksiyonunun metalin iş fonksiyonundan büyük veya küçük olmasına bağlı olarak iki farklı şekilde oluşturulabilir.(McKelvey, 1966; Sze, 1981)



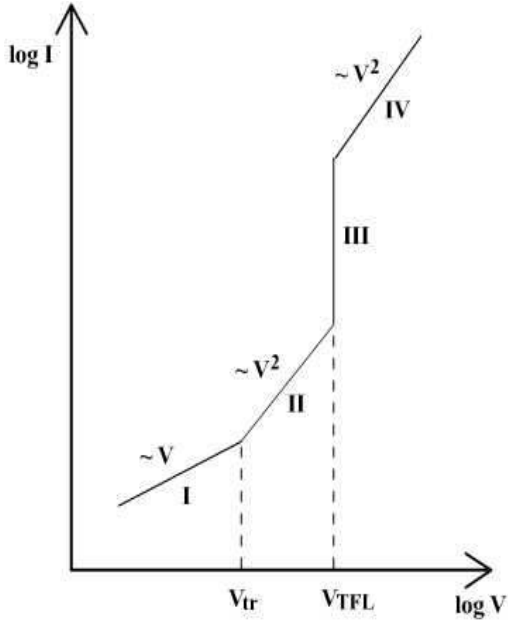
**Şekil 2.1.** Metal-yarıiletken (n-tipi) ohmik kontaktağının enerji bant diyagramı ( $\Phi_m < \Phi_s$ )

Şekil 2.1.' de Metal-yarıiletken (n-tipi) ohmik kontağının enerji bant diyagramı görülmektedir. Burada  $\Phi_m$  metalin iş fonksiyonunu,  $\Phi_s$  yarıiletkenin iş fonksiyonunu,  $\chi$  yarıiletken malzemenin elektron ilgisini (affinity),  $E_c$  ve  $E_v$  yarıiletken malzemenin iletim ve valans bantı düzeylerini göstermektedir. Malzemelerin Fermi enerji düzeyleri ise  $E_f$  ile gösterilmiştir. Yarıiletkenin iş fonksiyonu ( $\Phi_s$ ) metalin iş fonksiyonundan ( $\Phi_m$ ) büyük ise metal ve yarıiletken kontak durumuna getirildiğinde metalden yarıiletkene doğru bir elektron akışı oluşur ve yarıiletkenin ara yüzeyinde elektron yoğunluğu artar. Metal ara yüzeyinde ise elektronların bıraktığı boşluklardan kaynaklanan pozitif yükler artar. Yarıiletken ara yüzeyinde (akümülyasyon bölgesi) bulunan elektron yoğunluğu, yarıiletkenin elektron ihtiyacını karşılar. Bu özellikteki bir metal-yarıiletken kontak ohmik olarak adlandırılır (Bar Lev, 1993).

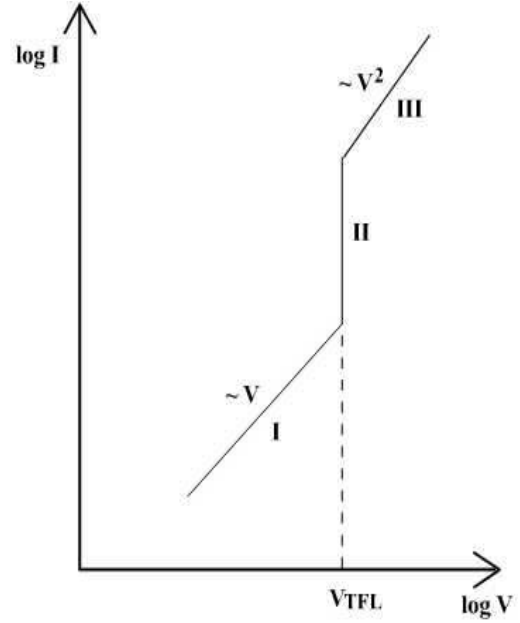
Ohmik kontak özelliğinin belirlenebilmesi için metal-yarıiletken-metal yapısının oluşturulması gerekmektedir. Ohmik kontak özelliği gösteren metal-yarıiletken-metal yapılarında SCL (Space Charge Limited) akımı gözlemlenmektedir. SCL akımının oluşması için yarıiletkene yeteri kadar taşıyıcının enjekte edilmesi gerekir. Kontak bölgesine bir elektrik alan uygulandığında, akümülyasyon bölgesinden yarıiletkene elektron enjekte edilir. Elektrik alan yeteri kadar büyükse SCL akımı gözlenir. SCL iletimi için kristal yapısındaki kusurluluk etkili olmaktadır.

Kristaller saf halde bulunmadıklarından yapılarında kusurlar ve safsızlıklar bulunur. Bu safsızlıkların enerji seviyeleri yasak enerji aralığında yer alarak elektron tuzakları gibi davranırlar. İletim bandında bulunan elektronlar bu seviyelere düşerek yakalanırlar. Tuzaklar Fermi enerji seviyesinin üstünde ise sığ tuzak (shallow trap), Fermi enerji seviyesinde veya altında ise derin tuzak (deep trap) olarak adlandırılırlar. Bu durumda SCL iletimi sığ tuzaklar ve derin tuzaklar için farklı olmalıdır (Lampert and Mark, 1970; Kao and Hwang, 1979).

Bir yarıiletken materyalin akım-voltaj (I-V) karakteristiği  $I \propto V^m$  ifadesine göre  $m = 1$  için ohmik,  $m = 2$  için Space Charge Limited (SCL) iletim özelliği gösterir.



**Şekil 2.2.** Sığ tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği



**Şekil 2.3.** Derin tuzaklı SCL iletimi için I-V karakteristiği

Sığ tuzaklı SCL iletimi için Şekil 2.2.' de 1. bölge ohmik akıma karşı gelen durumdur. Bu bölgede akım Ohm kanununa uyar ve düşük voltajlarda kristal içine enjekte edilen serbest taşıyıcıların sayısı ihmal edilebilir. 2. bölgede voltaj arttırıldığından enjekte edilen taşıyıcıların sayısı kristal içerisindeki serbest taşıyıcıların sayısından daha fazla olur. Bu bölgede tuzaklar etkili olup serbest taşıyıcılar boş tuzaklar tarafından yakalanmaktadır. 1. bölgeden 2. bölgeye geçiş voltajı  $V_{tr}$  ile gösterilir. Bu bölgede akım  $V^2$  ile değişir. 3. Bölgede voltaj daha da arttırıldığında, SCL akımındaki artışla beraber tuzaklar dolmaya başlar. Uygulanan voltaj belirli bir değere ulaştığında bütün tuzaklar doldurulur. Tuzakların tamamının dolmasına karşılık gelen voltaj  $V_{TFL}$  (Trap-filled-limited) olarak adlandırılır.

4. bölgede Fermi enerji seviyesi tuzak enerji seviyesine yaklaşır. Akım trap-free square yasasına uyar.

Şekil 2.3.' de derin tuzaklı SCL iletimi için akım-voltaj I-V grafiği görülmektedir. Tuzak enerji seviyeleri derin ise, Fermi enerji seviyesinde ya da Fermi

enerji seviyesinden daha aşağıda ise I-V grafiğinde ohmik bölgeden sonra TFL bölgesi gelir (Lampert and Mark, 1970; Kao and Hwang, 1979; Atay, 2001).

Yarıiletken materyallerin iletkenliğinin ve elektriksel öz direncinin belirlenmesinde dört nokta uç, Vander Pauw ve iki nokta uç gibi yöntemler kullanılmaktadır. İki nokta uç tekniği ile ölçüm yapabilmek için incelenecek yarıiletken malzeme üzerine iki metal kontak oluşturulur. Metal-yarıiletken-metal yapılar oluşturulurken, iki metal kontak arasında kalacak olan yarıiletken bölge alüminyum folye ile kapatılarak maskelenir. Açıkta kalan kısımlara genellikle vakumda buharlaştırma yöntemi kullanılarak metal kontaklar oluşturulur. Bir güç kaynağı vasıtasıyla potansiyel fark uygulanarak malzeme içerisinden bir akım geçirilir. Devreye bir ampermetre bağlandığında uygulanan voltaj değerlerine karşılık gelen akım değerleri ölçülebilir.

( $\rho$ ) Öz direnç değeri:

$$\rho = \frac{\Delta V}{\Delta I} \times \frac{wt}{L} \quad (2.10)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Bu ifade de;  $t$  numunenin kalınlığını,  $w$  her bir kontakın genişliğini,  $wt$  numunenin kesit alanını,  $\Delta V$  ve  $\Delta I$  sırasıyla voltaj ve akım değişimlerini ve  $L$  ise iki kontak arasındaki uzaklığı göstermektedir.

### 2.3.1. Schottky Engeli

Bir yarıiletken ile bir metal temas ettirildiğinde, metalin iş fonksiyonu ( $\Phi_m$ ) yarıiletkenin iş fonksiyonundan ( $\Phi_s$ ) daha büyük bir değerde ise yarıiletken içinde bir engel tabakası oluşur ve bu tabakadaki taşıyıcı yoğunluğu son derece azalır. Bu engele sönüm tabakası da denir. Schottky engelini meydana gelmesi için metal yarıiletken kontak oluşturulmalıdır. Genellikle metal kontak yarıiletken üzerine vakum buharlaştırma yöntemiyle elde edilir. Şekil 2.5.de metalle temas eden  $n$  tipi bir

yariletken görülmektedir. Şekil 2.5. deki gibi bir metal-yariletken kontak oluşturulduğunda yariletkendeki elektronlar metale engelden tünelleyerek geçeceklerdir. Bu durumda yariletkenin fermi enerji seviyesi metale göre düşer ve iki materyalin fermi enerji seviyeleri eşitlenir. Fermi enerji seviyeleri çakıştığında yariletkenin iletim ve valans bant sınırları Şekil 2.5.c' deki gibi Fermi enerji seviyesine doğru kavis çizeceklerdir. Yariletken malzemede yüzeyden itibaren potansiyelin  $\phi_0$ ' a eşit olduğu kalınlık  $x_b$  ile ifade edilir.  $x_b$ , Gauss yasasının türev formundan başlayıp sınır koşulları da göz önünde bulundurularak iki defa integral uygulanarak elde edilir. Verici yoğunluğu  $n$  olan bölge için Poisson denklemi yazılırsa;

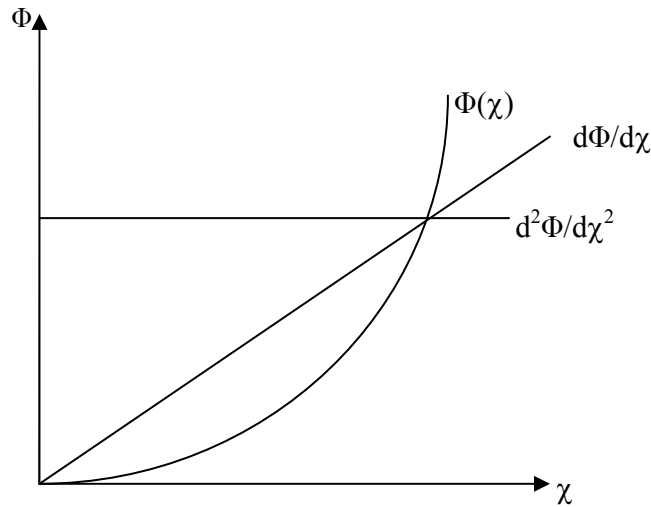
$$(SI) \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{D} = ne / \varepsilon_0 \quad (2.11)$$

olur. Elektrostatik potansiyel enerji denklemi;

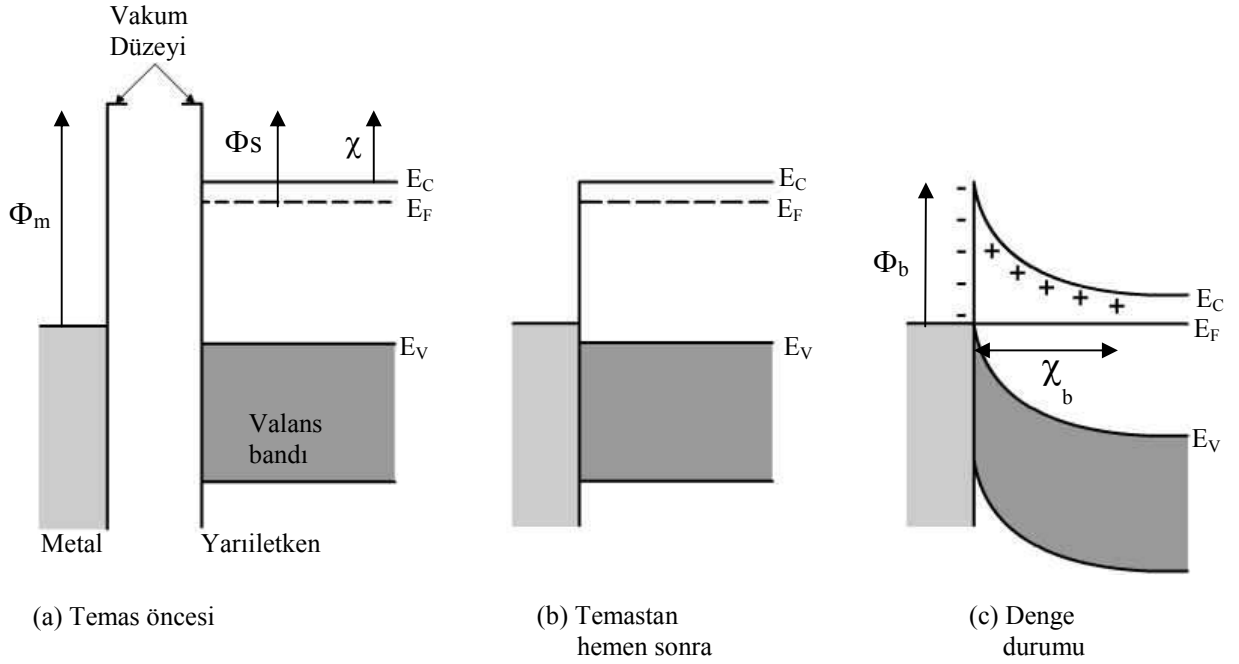
$$(SI) \quad d^2 \phi / dx^2 = - ne / \varepsilon \varepsilon_0 \quad (2.12)$$

olup çözümü doğrudan yazılabilir;

$$(SI) \quad \phi = -(ne / 2\varepsilon \varepsilon_0) x^2 \quad (2.13)$$



Şekil 2.4. Schottky kontağında  $\Phi - \chi$  grafiği



**Şekil 2.5.** Bir metal ile  $n$ -tipi bir yarıiletken arasındaki doğrultucu potansiyel engeli.

Burada  $x$  koordinatının orijini kesişimin sağ ucunda seçilmiştir. Metal ile temas noktası  $-x_b$  de olup, sağ tarafa göre potansiyel enerji farkı  $-e\phi_0$  olur. Buradan engelin genişliği hesaplanabilir;

$$(SI) \quad x_b = \sqrt{2\epsilon\epsilon_0|\phi_0|/ne} \quad (2.14)$$

Bu inceleme metal-yarıiletken kesişimine oldukça basit bir bakış açısidir (Kittel, 1996).

### 3. YARIİLETKEN İNCE FİLMLERİN OPTİK ÖZELLİKLERİ

#### 3.1. Giriş

Bir yarıiletkenine gönderilen elektromagnetik ışınım ile yarıiletkenlerdeki elektronların etkileşimleri sonucunda kırılma, yansıma, geçirgenlik ve Absorpsiyon gibi bir çok optik olay meydana gelir (Mott and Davis, 1971; Askeland, 1998).

Yarıiletkenlerin hem yasak enerji aralığının hem de bant tipinin belirlenmesinde yaygın olarak optik Absorpsiyon yöntemi kullanılır. Yarıiletken malzemeye gelen ışınların bir kısmı Absorplanırken, bir kısmı da malzemedan geçmektedirler. Dolayısıyla Absorpsiyon ve geçirgenlik katsayıları ölçülebilmektedir. Bu ölçümlerin sonucu olarak yarıiletkenlerin karakteristik özelliklerinden birisi olan yasak enerji aralığı ( $E_g$ ) belirlenebilmektedir.

#### 3.2. Temel Absorpsiyon

Yarıiletken malzemenin valans bandındaki bir elektronun malzemeye gelen ışından bir foton absorplayarak iletim bandına geçmesi sonucu temel Absorpsiyon olayı meydana gelir. Temel Absorpsiyon olayının gerçekleşmesi için yarıiletken malzeme üzerine düşen fotonların enerjisinin ( $h\nu$ ) yarıiletkenin yasak enerji aralığına ( $E_g$ ) eşit veya daha büyük olması gerekir.

Frekansı  $\nu$  olan bir fotonun enerjisi  $h\nu$  ise,  $h\nu \geq E_g$  olmalıdır. Yarıiletken malzeme üzerine, enerjisi  $h\nu > E_g$  olan fotonlar düşürülürse malzemenin özelliklerine göre Absorpsiyon olayı gözlenir. Kalınlığı  $x$  olan herhangi bir materyale elektromanyetik dalga gönderildiğinde absorpsiyon;

$$I=I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.1)$$

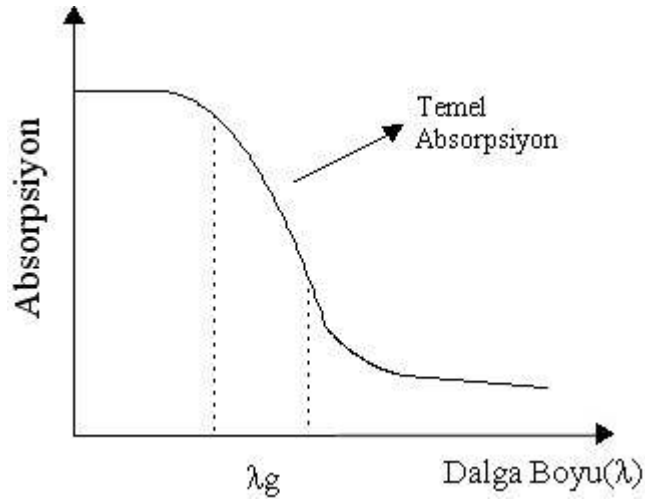
bağıntısı ile verilir. Burada;

$I$ , kalınlığı  $x$  olan materyalden geçen elektromanyetik dalganın şiddeti,

$I_0$ , materyale gelen elektromanyetik dalganın şiddeti

$\alpha$ , lineer Absorpsiyon katsayısını göstermektedir (Streetman, 1980; Sze, 1981; Omar, 1975).

Bir yarıiletken malzeme için temel absorpsiyon spektrumu Şekil 3.1.' de görülmektedir. Bu spektrumda yarıiletken malzeme  $\lambda_g$  dalga boyundan küçük dalga boylarında kuvvetli bir absorplayıcı, büyük dalga boylarında ise absorpsiyonun düşük yani yüksek derecede geçirgen olduğu görülmektedir. Bu iki bölgeyi ayıran sınır temel absorpsiyon sınırı olarak adlandırılır.



**Şekil 3.1.** Yarıiletkenlerde Temel Absorpsiyon Spektrumu

Yarıiletkenlerde temel absorpsiyon sınırında direk bant geçişi ve indirek bant geçişi olmak üzere iki tür geçiş vardır (Mott and Davis, 1971).



Direk bant yapısına sahip yarıiletkenin iletim bandının alt sınırı ile valans bandının üst sınırı enerji-momentum uzayında  $k=0$ 'dır. Direk bant geçişte valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için bir fotonun absorplanması gerekir. Bu geçişte enerji ve momentum korunur. GaAS, CdS, CdSe, ZnS ve InSb gibi materyaller direk bant yapısına sahiptirler (Nag, 1980).

Silisyumda (Si) olduğu gibi iletim bandının alt sınırı ile valans bandının üst sınırı enerji-momentum uzayında  $k=0$ 'da değildir. Bu tür bantlara indirek bant adı verilir. Bu bantlar arasındaki geçiş de indirek bant geçişi olarak adlandırılır. İndirek geçişte valans bandındaki bir elektronun iletim bandına geçebilmesi için bir fononun absorpsiyonu veya emisyonu gerekir (Pankove, 1971; Mott and Davis, 1971; Kittel, 1996).

Materyal	İletkenlik Tipi	Kristal Yapı	S.P	MBE	MOCVD	VE	MS
CdO	n	Kübik	2.26	2.4	2.3	2.33	2.43
CdS	n	Kübik- Hegzagonal	2.39	2.42	2.42	2.42	2.43
CdSe	n	Kübik- Hegzagonal	1.65	1.75	1.77	1.68	-
CdTe	n	Kübik- Hegzagonal	1.47	1.55	1.55	1.55	1.45
ZnO	n	Hegzagonal	3.3	3.37	3.44	3.28	3.27
ZnS	n	Kübik- Hegzagonal	3.56	3.7	3.65	3.60	3.60
ZnSe	n	Kübik- Hegzagonal	2.70	2.7	2.68	2.72	2.45
ZnTe	p	Kübik	-	2.26	2.26	2.26	-

**Çizelge 3.1.** Bazı II-VI bileşiklerine ait iletkenlik türleri, bant aralıkları ve kristal yapı verileri.

Çizelge 3.1.' de bazı II-VI bileşiklerinin iletkenlik türleri, kristal yapıları ve yasak enerji aralık değerleri görülmektedir (Bhosale, et al., 2005; Ashour,2005; Elango, et al., 2000; Boone, et al., 1982; Panatarani, et al., 2004; Ebothe, et al., 2005; Bedir, vd., 2005; Senthil, et al., 2000; Murali, et al., 2004; Lalitha, et al., 2005; Dakhel, 2003; Lakshimi, et al., 2003; Venkatachalam, et al., 2005; Ibrahim, et al., 2004; Zahn, et al., 1994; Ashrafi, et al., 2001; Makino, et al., 2004; Rohatgi, et al., 1991; Chen, et al., 1998; Ichine, et al., 2000; Maksimov, et al., 2001; Olinda, et al., 2003; Li, et al., 2004; Federov, et al., 1998; Tan, et al., 2005; Zhang, et al., 2003; Li, et al., 1994; Traversa, et al., 2004; Dewei, et al., 2003; Hernandez, et al., 2002).

### 3.2.1. Absorpsiyon yöntemi ile yasak enerji aralığının belirlenmesi

Enerji spektrumu bölgeleri  $\hbar\omega = \Delta E_0$  ' ken soğurma katsayısının sıfır olmasını engeller. Ellion, Dexter, McLean, et al.' in hesaplamaları doğrudan izinli bant geçişleri için aşağıdaki sonuçları verir;

$$\alpha = \frac{2\Pi e^2}{m_0^2 c \omega n} \left( \frac{2m_{red}^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} |P_{mn}(0)|^2 (E_1^{ex})^{1/2} \frac{e^z}{\sinh z} \quad (3.2)$$

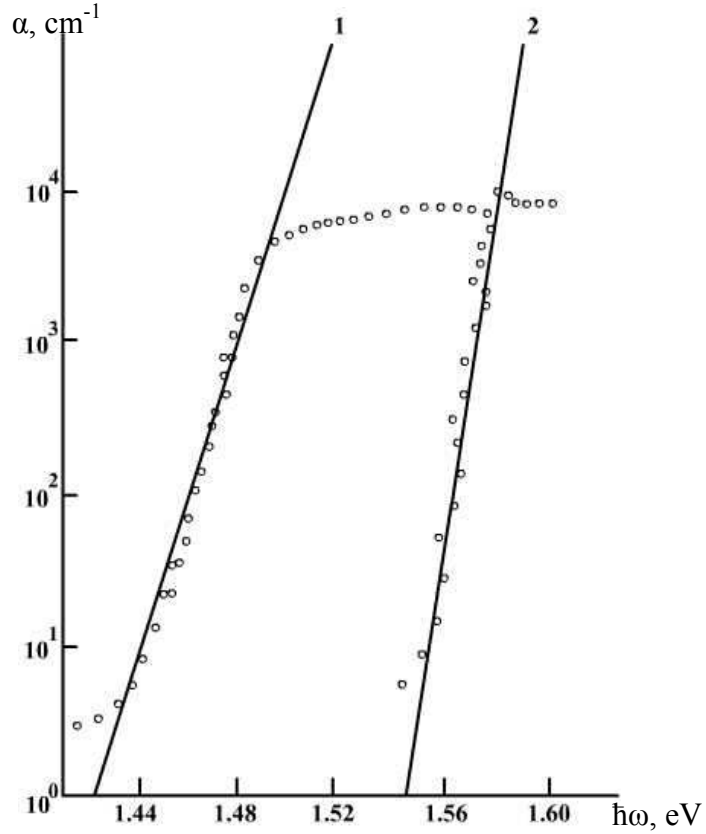
$$z = \Pi \sqrt{\frac{E_1^{ex}}{\hbar\omega - \Delta E_0}} \quad (3.3)$$

$\hbar\omega \rightarrow \Delta E_0$  için,

$$\alpha(\Delta E_0) = \frac{4\Pi e^2}{m_0^2 c \omega n} \left( \frac{2m_{red}^*}{\hbar^2} \right)^{3/2} |P_{mn}(0)|^2 (E_1^{ex})^{1/2} \quad (3.4)$$

$\hbar\omega = \Delta E_0$  için exciton iyonizasyon enerjisi  $E_1^{ex}$  ne kadar yüksek ise  $\alpha$  da o kadar yüksek olur.

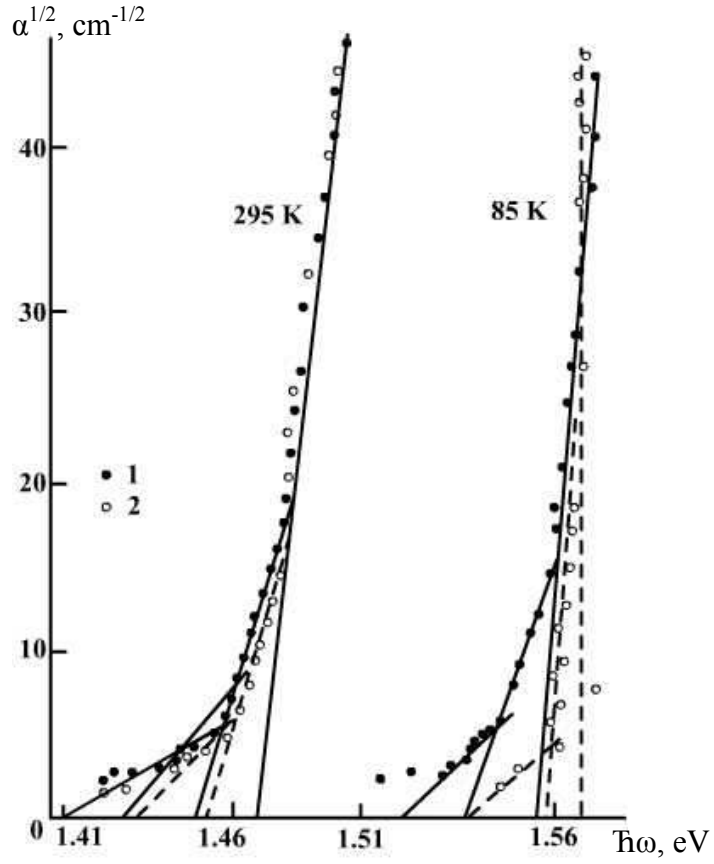
$E_1^{ex} \rightarrow 0$  için,  $\alpha(\Delta E_0) \rightarrow 0$ 'dır, ve  $\alpha(\omega)$ 'nin denklem (3.2) bağılılığı,  $\alpha \sim (\hbar\omega - \Delta E_0)^{1/2}$ . Doğrudan engellenen geçişler için tesbit edilen düzeltmeler benzerdir.



Şekil 3.2. CdTe için  $\alpha - \hbar\omega$  grafiği (Kriev, 1978)

Exciton geçiş modelinde fundamental bandın iyi tanımlanmış uzun dalga sınırları olmalıdır. Aslında uzun dalga sınırı aşağı yukarı  $\hbar\omega < \Delta E_0$  değerindedir.

Şekil 3.3.'de bir çok düz çizgi bölgesi  $\alpha^{1/2}(\hbar\omega)$  grafiğinde net olarak görülmektedir. Değeri  $\alpha^{1/2}=0$  olarak alınır, enerjinin 0.021 eV'lik aralıklara bölünmüş hali elde edilir. Bu değer boylamsal optik fonon'un enerjisine yakındır. Bu excitonlarla etkileşen fononların soğurma eşiğinin oluşmasında etkili olduklarını göstermektedir. Dolaylı geçişler için,  $\alpha^{1/2}=0$  grafiği içinde sadece iki düz çizgi bölmesi gözlenir.



Şekil 3.3. CdTe için  $\alpha^{1/2}$ -  $\hbar\omega$  grafiği (Kriev, 1978)

Çoğu katıda exciton-fonon bant geçişleri için, iç soğurma bant sınırı örgüsü geniş bir sahada  $\alpha$  için Urbach denklemleri ile tanımlanabilir;

$$\alpha(\hbar\omega) = \alpha_0 e^{-\frac{\sigma(\hbar\omega - E_0)}{kT}} \quad (3.5)$$

Urbach denkleminin  $E_0$  parametresi exciton soğurma bandı enerjisi maximumu ile ilintilidir,  $\alpha_0$  parametresi exciton bandının maximumunda soğurma sabitinin değeri ile uyudur.  $\sigma$  parametresinin değerleri 1-3 arasındadır.  $\sigma$ 'nin sıcaklıkla bağlantısı, fundamental bant genişliği sıcaklığının değişimini tanımlar.

1. Eğer seçim kuralları sağlanıyorsa ;

$$k_2 = k_1 + g \text{ yada } k_2 \cong k_1. \quad (3.6)$$

ışığın soğurulması işleminde elektron geçişleri direk yada dikey olarak nitelendirilir;

$$k_2 \cong k_1 + K_{\text{phon}} \quad (3.7)$$

durumunda ise geçişler indirektir yada dikey değildir.

2. Direk ve indirek geçişler için iç bant eşiğini belirten denklemler;

$$\hbar \omega_{im} = \Delta E_0^O, \quad (3.8)$$

$$\hbar \omega_{im} = (\Delta E_0^T \pm \hbar \omega_{\text{phon}}) \quad (3.9)$$

3. İç soğurma eşiğine yakın olan  $\alpha$  katsayısı, farkının  $r$ 'inci gücüyle orantılıdır;

$$\alpha \sim (\hbar \omega - \Delta E_0)^r = (\hbar \omega - \hbar \omega_{im})^r \quad (3.10)$$

direk izinli için  $r = 1/2$ , direk yasaklı için  $3/2$ , indirek izinli için  $2$  ve indirek yasaklı için  $3$ 'dür.

4. İç soğurma elektron hol çiftinin oluşmasıyla sonuçlanır.

Işık sayesinde oluşturulan elektron ve holler arası Coulomb etkileşimi, içbağ soğurması için iç eşiğin dokusunu değiştirir, sonuçta (3.8) ve (3.9) ile tanımlanan band sınırındaki soğurma katsayısı sıfır olmaz.

5. İç soğurma ışığın çabuk zayıflaması ile sonuçlanır, fotonun ana serbest yolu  $l_{\text{photon}} \hbar \omega > \hbar \omega_{im}$  için  $10^{-5}$ - $10^{-6}$  nın katlarındadır.

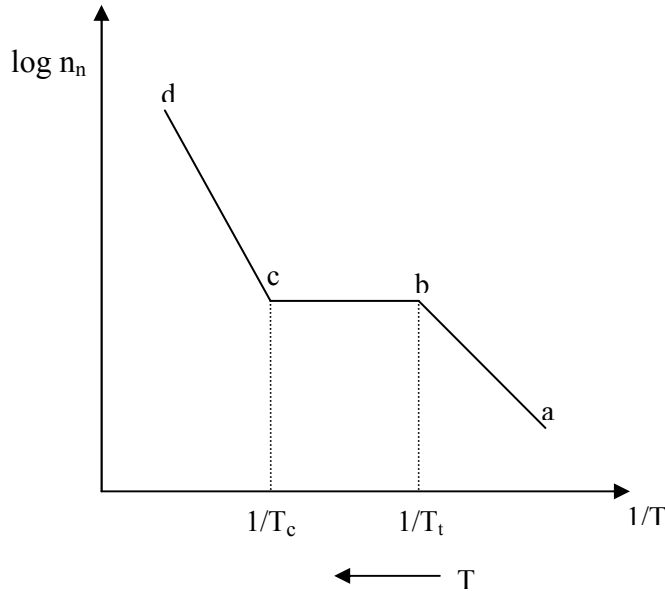
### 6. Pertürbasyon operatörü

$$\hat{W} = -\frac{1}{c}(Aj) = \frac{ie\hbar}{m^*c}(A\nabla) \quad (3.11)$$

formundadır (Kriev, 1978).

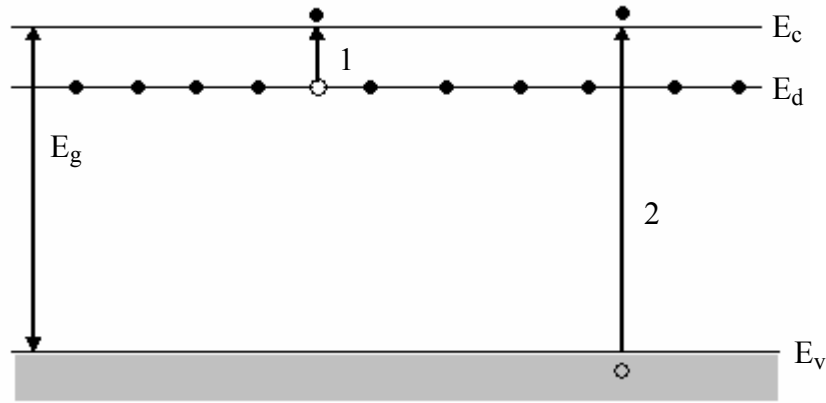
### 3.3. İletkenliğin Sıcaklıkla Değişiminden Yasak Enerji Aralığının Belirlenmesi

Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenlik, sıcaklık ve aydınlatma gibi büyüklüklere bağlı olarak değişir.  $T=0 \text{ K}^\circ$  de saf yarıiletkenlerin çoğu yalıtkandır. Fakat yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki mutlak sıfırdan daha yüksek sıcaklık değerlerinde serbest yük taşıyıcıları oluşur ve elektriksel iletim sağlanır. Serbest yük taşıyıcılarının konsantrasyonu sıcaklığa bağlıdır ve has yarıiletkenler için sıcaklıktaki bir artış serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunda eksponansiyel hızlı bir artış olarak kendini gösterir. Sıcaklığın tersine göre serbest yük taşıyıcı konsantrasyonunun grafiğinin eğimi yarıiletkenin yasak enerji aralığını verir (Polyakov, 1985; Bar-Lev, 1993).



**Şekil 3.4.** Sıcaklığın tersine göre taşıyıcı konsantrasyonunun değişimi (Polyakov, 1985).

Has yarıiletkenlerde olduğu gibi katkılı yarıiletkenlerde de elektron ve hol olarak bilinen yük taşıyıcılarının konsantrasyonu sıcaklığa bağlı olarak değişir. Şekil 3.4.' de n-tipi bir yarıiletken için  $\log n_n=f(1/T)$  eğrisi görülmektedir. Mutlak sıfır sıcaklıkta n-tipi yada p-tipi bir yarıiletkenin iletim bandında hiçbir taşıyıcı yoktur. n-tipi bir yarıiletken için, sıcaklığın artmasıyla birlikte iletim elektronları has iletimi oluşturan elektronlardan daha önce oluşur. Bunun sebebi donör seviyesi  $E_d$ 'den iletim bandına bir elektronun çıkması için gerekli enerjinin, valans bandından iletim bandına elektron geçişi için gerekli enerjiden daha küçük olmasıdır. Şekil 3.5.' de n-tipi bir yarıiletken için olası geçişler görülmektedir. Şekil 3.5.' de 1 ile gösterilen geçişte oluşan elektronlar iletim bandına ilk çıkan elektronlardır (Polyakov, 1985).



**Şekil 3.5.** n-tipi bir yarıiletkende olası geçişler (Polyakov, 1985)

Sıcaklığın daha da artırılmasıyla birlikte iletim bandına ulaşan safsızlık elektronlarının sayısı hızla artarken, donör seviyelerinde kalan elektronların sayısı azalır. Sıcaklık,  $T_t$  (tükenme sıcaklığı) seviyesine ulaştığında donör seviyesinden bütün elektronlar iletim bandına geçmiş olurlar (Şekil 3.4.' de ab bölgesi).

Şekil 3.4.' de b noktasında yarıiletkenin donör konsantrasyonu ( $N_d$ ) iletim elektronlarının konsantrasyonuna eşit olur. Donör konsantrasyonu ve Aktivasyon enerjisi büyük olduğunda, tükenme sıcaklığı yüksek sıcaklıklara doğru kayar. Şekil 3.4.' de bc bölgesi,  $T > T_t$  durumunda oluşur. Bu bölgede serbest elektronların sayısı geniş bir sıcaklık aralığında hemen hemen sabit kalır. Termal örgü titreşimlerinin enerjisinin valans elektronlarını uyarmak için hala yeterli olmaması ve safsızlık seviyelerinin



tamamen tükenmesi bu duruma yol açar. Bu sıcaklık aralığında serbest taşıyıcı konsantrasyonu  $n_n \cong N_d$  olur. Sıcaklığın artmasıyla birlikte valans bandından iletim bandına elektronların geçişi hızlanır. Şekil 3.4.' de cd bölgesinde temel absorpsiyon olayı gerçekleşir. Bu durum Şekil 3.5.' de 2 ile gösterilmiştir.

$T_c$  sıcaklığı has yarıiletkenliğe geçiş için kritik sıcaklığı göstermektedir. Bu bölgede  $T > T_c$  için has taşıyıcı konsantrasyonu hızlı bir şekilde artmaya başlar. Bu durumda  $n_n \cong n_i$  olur. Kritik sıcaklık değeri yasak enerji aralığı  $E_g$  ve katkılama seviyesi  $N_d$ 'ye bağlı olarak değişir.

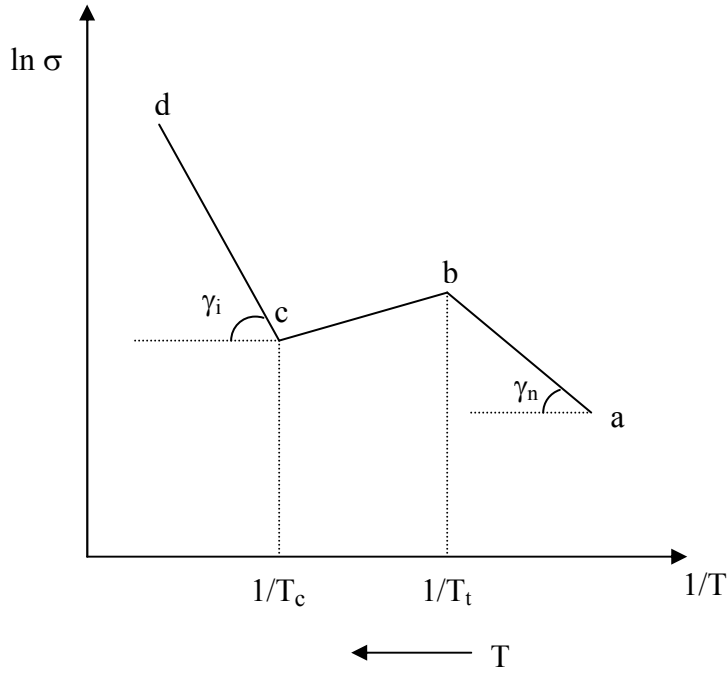
Düşük sıcaklıklarda atomların termal titreşimleri ihmal edilebilecek kadar düşüktür ve iletkenlik safsızlık atomlarının iyonlaşması sonucu oluşur. Yüksek sıcaklıklarda ise iletkenlik termal titreşim enerjisi ile sağlanır. Yarıiletkenlerde taşıyıcıların mobilitesi yüksek sıcaklıklarda  $\sim T^{-3/2}$  ile orantılı olarak azalır ve düşük sıcaklıklarda  $\sim T^{3/2}$  ile orantılı olarak artar (Polyakov, 1985; Streetman, 1980).

Genel olarak bir yarıiletkenin iletkenliği, yüksek sıcaklıklarda ve düşük sıcaklıklarda sırasıyla yasak enerji aralığına ve aktivasyon enerjisine bağlı olarak ifade edilen iki terimden oluşur. Buna göre toplam iletkenlik, eşitlik (3.12) 'de görüldüğü gibi has terim ve katkı teriminin toplamı olarak ifade edilir.

$$\sigma_{top} = \sigma_{oi} \exp\left(\frac{-E_g}{2k_B T}\right) + \sigma_{oe} \exp\left(\frac{-E_a}{k_B T}\right) \quad (3.12)$$

Burada  $E_g$  yarıiletkenin yasak enerji aralığını,  $E_a$  safsızlık atomlarının aktivasyon enerjisini,  $\sigma_{oi}$  ve  $\sigma_{oe}$  sıcaklığa zayıf olarak bağlı sabitleri göstermektedir. Denklemden birinci terim yüksek sıcaklıklarda baskın olan has iletkenliği ve ikincisi ise düşük sıcaklıklarda önemli olan katkı iletkenliği göstermektedir.

Sıcaklığa bağlı olarak herhangi bir terim ihmal edildiğinde bu eşitlik hem  $E_g$  hem de  $E_a$ 'nın belirlenmesi için kullanılır.



Şekil 3.6. İletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişimi (Polyakov, 1985).

Şekil 3.6. 'de iletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişim grafiği şematik olarak verilmektedir. Grafiğin  $ab$  ve  $cd$  bölgelerinin eğimleri kullanılarak eşitlik (3.13) ve (3.14)' de ifade edildiği gibi safsızlık atomlarının aktivasyon enerjisi ve yarıiletkenin yasak enerji aralığı hesaplanabilir.

$$\tan \gamma_n = \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta(1/T)} \cong \frac{-E_a}{kB} \quad (3.13)$$

$$\tan \gamma_i = \frac{\Delta \ln \sigma}{\Delta(1/T)} \cong \frac{-E_g}{2kB} \quad (3.14)$$

Burada  $k_B$  Boltzmann sabiti ve  $T$  mutlak sıcaklıktır (Omar, 1975; Atay, 2001; Polyakov, 1985).

## 4. YARIİLETKEN İNCE FİLM ÜRETME TEKNİKLERİ

### 4.1. Giriş

Yarıiletken ince filmler taban olarak kullanılan bir materyal üzerine başka bir malzemenin çok ince katmanlar halinde çöktürülmesi ile elde edilen, kalınlıkları  $100\text{\AA}$  ile birkaç  $\mu\text{m}$  arasında değişen malzemelerdir. Teknolojik ve bilimsel olarak önemi gittikçe artan yarıiletken ince filmleri elde etmek için çok çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Yarıiletken filmler kimyasal buhar çöktürme, vakum altında buharlaştırma, epitaksiyel, Magnetron Sputtering, kimyasal püskürtme, elektro çöktürme ve kimyasal banyo çöktürme gibi birçok farklı teknikle üretilmektedir (Sze, 1981; Palafox, et al., 1998; Krishnakumar, et al., 1987).

Bilimde ve teknolojideki gelişmeler yeni üretim tekniklerinin ortaya çıkmasına, diğer tekniklerinde gelişmesine imkan vermektedir. Son yıllardaki bilimsel çalışmalar özellikle manual kontrolü devre dışında bırakan tamamen bilgisayar tabanlı, basit ve ekonomik tekniklerle daha düşük boyutlu, kompleks ve kaliteli malzemelerin üretimi ve incelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

### 4.2. Kimyasal Püskürtme Yöntemi

Kimyasal Püskürtme (Spray Pyrolysis) tekniği elde edilecek ince film için belirli molaritelerde hazırlanan çözeltilerin belirli hacimlerde karıştırılarak ısıtılan tabanlar üzerine püskürtülmesiyle yarı iletken filmlerin üretilmesini sağlayan bir kimyasal çöktürme tekniğidir (Afify, et al., 1991; Vigil, et al., 2000).

Bu teknikle CdS, ZnS, ZnSe, CdSe, CdZnS, CdAlS gibi ikili ve üçlü bileşiklerin yanı sıra fotovoltaiik heteroeklem güneş pilleri de elde edilebilmektedir.

Elde edilen filmlerin özellikleri farklı parametrelere göre değişir. Bunlar püskürtülen çözelti miktarı, taban sıcaklığı, püskürtme hızı, tabanın cinsi, püskürtme süresi, püskürtme başlığı (spray head) ile taban arasındaki mesafe, taşıyıcı gazın cinsi, akış hızı ve kullanılan çözeltinin molaritesidir (Krishnakumar, et al., 1987).

Kimyasal Püskürtme tekniğinde taban materyali olarak genellikle silikonlu ve payreks camlar, titanyum, tungsten, alüminyum gibi metallerin yanı sıra seramik ve polimer malzemeler de kullanılmaktadır (Sze, 1981; Fang, et al., 1987).

Kimyasal Püskürtme tekniğinde püskürtme kabini  $1 \times 1 \times 1$  m<sup>3</sup> ebatlarında ve ahşap veya paslanmaz çelikten yapılmaktadır. Kabinin altında püskürtme esnasında oluşan atık gazlar içi su dolu kapalı bir kap içerisinden geçirilerek laboratuvar dışına temizlenmiş olarak atılmaktadır.

Püskürtme başlığı taşıyıcı gazın yardımıyla çözeltinin parçalanmasını ve bir osilatör yardımıyla da damlacıkların daha iyi atomize olmasını sağlar. Püskürtme başlığı genellikle pyrex camdan veya paslanmaz çelikten yapılmaktadır.

Pyrex camdan yapılan püskürtme başlığının çözelti çıkış kısmı zamanla aşınmaya bağlı olarak bozular. Püskürtme başlığında çıkış kısmının düzgünlüğünü kaybetmesi püskürtme konisinin bozulmasına buna bağlı olarak da üretilen filmlerin fiziksel özelliklerinin olumsuz yönde etkilenmesine sebep olur. Bir osilatör ile birlikte kullanılan ultrasonik püskürtme başlığının ağız kısmının geometrisi cam püskürtme başlığına göre çok daha düzgün olmasına rağmen püskürtme sonrası temizlenmediği takdirde tortu oluşmaktadır. Bu nedenle çözeltinin geçtiği hortumda ve püskürtme başlığında oluşan tortuları önlemek için her püskürtme sonunda çözeltinin geçtiği hortum ve püskürtme başlığı saf su geçirilerek temizlenmelidir.

Kimyasal Püskürtme tekniğinde önemli parametlerden biri de püskürtme hızıdır. Püskürtme hızı; sisteme gönderilen toplam çözelti miktarının, püskürtme zamanına bölünmesiyle hesaplanabilir. Püskürtme hızı sistemde içinden çözelti geçen bir akış hızı ölçer (flow-meter) (1-20ml/dk) vasıtası ile de ölçülmektedir. Püskürtme hızının fazla

olması taban sıcaklığının kontrolünü zorlaştırmakta, film yüzeylerinde tortu oluşturmaktadır. Bu durum üretilen filmlerin fiziksel özelliklerini değiştirmektedir.

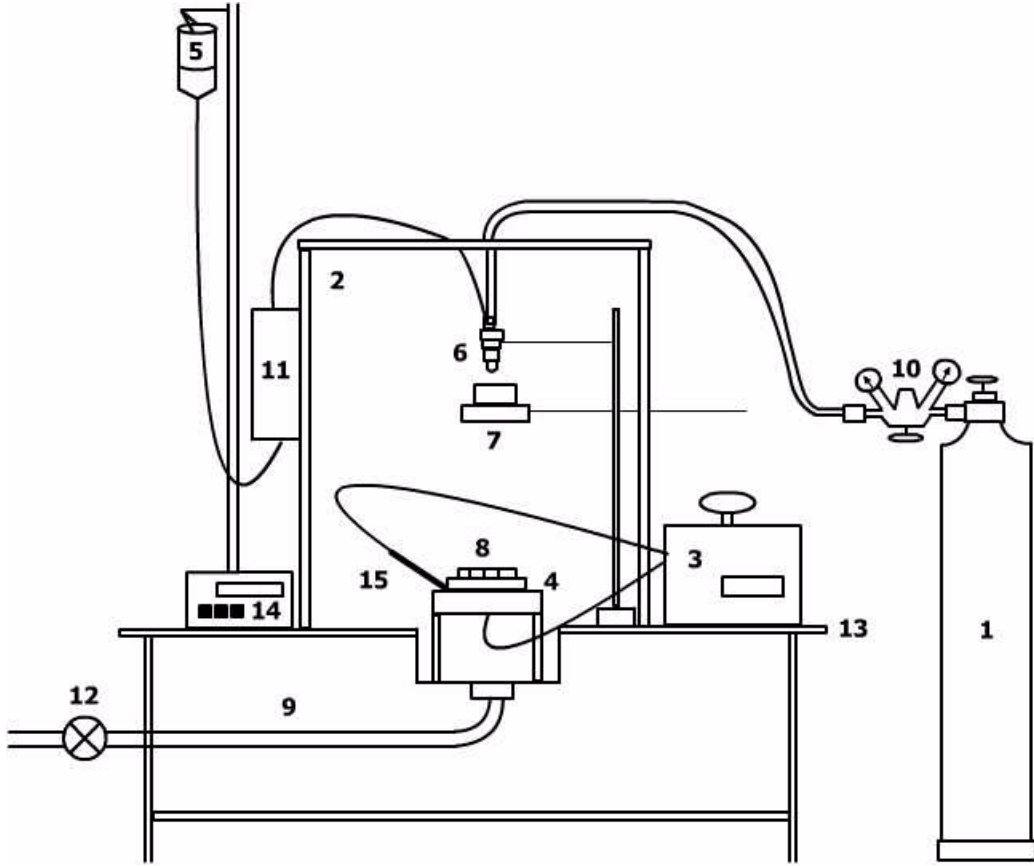
Taban sıcaklığı bir ısıtıcı (5 kW) yardımıyla kontrol edilmekte, tabanlarının yüzey sıcaklığını ölçmek için kromel-alümel veya demir konstantan termokupl kullanılmaktadır. Kimyasal Püskürtme tekniğinde taban sıcaklığının çok iyi kontrol edilmesi gerekir. Yüksek veya düşük taban sıcaklıkları filmlerin kalınlıklarını ve taban yüzeylerine tutunmasını etkilemektedir. Tabanların yüzey sıcaklığının ölçülmesinde termokupl ile taban arasındaki teması sağlamak için çok az miktarda indiyum konulmaktadır.

Tabanlara ısı transferini sağlamak için  $15 \times 15 \times 2 \text{ cm}^3$  ebatlarında içerisinde rezistans bulunan bakır blok veya bronz blok kullanılmaktadır. Bu blokların üzeri zamanla oksitlenmekte ve yapılan temizlik sonucu kütlelerinde azalma olmaktadır. Bu durum da taban ısısının homojen olarak dağılmasını engellemektedir. Bu yüzden bu bloklar zamanla değiştirilmelidir.

Kimyasal Püskürtme tekniğinde taban ile püskürtme başlığı arasındaki mesafe elde edilen filmlerin fiziksel özelliklerini etkileyen bir başka parametredir. Bu uzaklık genellikle 30-40 cm arasında değişim göstermektedir. Bu mesafenin daha kısa tutulması kalın filmlerin ve taban yüzeyinde tortuların oluşmasına neden olur. Yüksek sıcaklıklarda ise erken buharlaşmadan dolayı tabana ulaşan damlacıkların sayısı ve tabana tutunma azalacaktır. Bu yüzden yüksek taban sıcaklıklarında bu mesafenin azaltılması gerekmektedir.

Püskürtme başlığına gelen çözeltiyi atomize etmek için belirli basınçlarda azot gazı veya hava taşıyıcı gaz olarak kullanılır.

Kimyasal Püskürtme tekniği karmaşık aletler içermeyen kısa zamanda daha geniş yüzeyli ( $\text{cm}^2$  mertebesinde) ince filmlerin elde edilmesini sağlayan ekonomik ve basit bir tekniktir (Afify, et al., 1991; Atay, 2001).



**Şekil 4.1.** Spray Pyrolysis tekniğinin şematik diyagramı.

Şekil 4.1.'deki şematik diyagramda (1) taşıyıcı gaz tüpünü, (2) püskürtme odasını, (3) ısıtıcıyı, (4) bakır bloğu, (5) çözelti kabını, (6) püskürtme başlığı (spray-head), (7) püskürtme başlarken ve sona erdiğinde damlaları engelleyen sürgü sistemi (shutter), (8) pyrex cam tabanları, (9) atık taşıyıcı tüp boru, (10) taşıyıcı gaz ve püskürtme gazı göstergelerini, (11) akış hızı ölçeri (flow-meter), (12) vantilatörü, (13) masayı, (14) osilatörü, (15) termokuplı göstermektedir.

### 4.3. Moleküler Demet Epitaksi Yöntemi

Moleküler Demet Epitaksi (MBE), 1970'lerde yüksek kaliteli yarıiletken ince film üretmek için geliştirilmiştir. O zamandan bu yana kolay kontrol edilebilir olması, düşük ısıda işlem görmesi ve tam doping kontrolü gibi avantajları nedeniyle hassas

elektronik, optoelektronik ve mikrodalga cihazların gelişiminde önemli bir sistem olarak kullanılmaktadır.

MBE sisteminde yarıiletken malzemeyi oluşturan elementin moleküler yada atomik yapıdaki demeti ince film oluşturmak amacıyla ısıtılmış kristal yapıdaki bir taban üzerine biriktirilir. Daha basit bir anlatımla ısıtılmış taban yüzeyine ulaşan her atomun yüzeyde hareket edip uygun bir yer bularak yeni bir kristal kafes oluşturmak için yeterli zamanı vardır.

Tipik bir MBE sistemi üç ana bölümden oluşur. Yükleme odası, hazırlık tampon odası ve büyütme odası. Yükleme odası, diğer vakum odalarındaki bütünlüğü muhafaza ederek numunenin vakum odasına getirilmesinde ve vakum odasından çıkarılmasında kullanılır.

Hazırlık tampon odası, numunenin hazırlanmasında ve su ve benzeri kirliliklerden ısıtılarak ilk sistem içi temizliğinin yapılmasında kullanılan birimdir.

Büyütme odası, yarıiletken ince filmin büyütüldüğü yerdir. Sistemde yarı iletken malzemeyi oluşturan elementten moleküler yapıda demet sağlayan yayılma hücreleri (effusion cells) yada diğer bir adıyla Knudsen hücreleri bulunur. Üretilecek yarıiletken malzeme kaynağı olan bu hücreler için gaz yayılımı düşük ve 1400 °C'de kimyasal durağanlığa sahip Pyrolytic Boron Nitride (PBN) kullanılır.

Sistemde yarıiletken malzeme kaynağı hücrelerin karşısındaki shutterlar, ısıtıcılar ve diğer bileşenler için Molybdenum ve Tantalum kullanılır. Numuneler CAR (Continual Azimuthal Rotation) olarak bilinen rotasyonel manyetik bir tutucu üzerine yüklenirler. Isıtılan tabanlar rotasyonel manyetik tutucu yardımıyla döndürülerek üretim homojenliği sağlanır.

Sistemde CO<sub>2</sub> ve H<sub>2</sub>O gibi istenmeyen gazları numunenin ve yarıiletken malzeme kaynağı olan hücrelerin etrafındaki “cryopanel”ler emerek temiz bir üretim ortamı sağlar.

Epitaksiyel gelişim, yarıiletken ince film üretmek için gerekli olan katı kaynak malzemeleri içeren ısıtılmış hücreler içinde başlar. Kaynak olarak sadece ultra saf maddeler kullanılır. Taban, manyetik olarak bağlantılı ve transfer çubuğu ile büyütme odasındaki numune tutucu ve ısıtıcıya taşınır. Her bir yarıiletken malzeme kaynağı, birbirinden bağımsız olarak kaynak materyalin atomlarının termoiyonik yayılma yoluyla arzu edilen malzeme akısı oluşuncaya kadar ısıtılır.

Çok yüksek vakumda (UHV) serbest atomların ortalama serbest yol uzunluğu çok fazladır ve diğer atomlarla çarpışmalar sık olmaz. Kaynaktan gelen atomlar taban materyali ile çarpışana kadar düz bir çizgi üzerinde hareket ederler. Hücrelerden bilgisayarla kontrol edilen bir aralıktan geçerek, belirli zamanlarda gelen atomlar vakum ortamındaki taban üzerine gönderilerek büyütme yapılır. Hücrelerin sıcaklıklarında yapılan değişiklikler akış yoğunluğunu değiştirmeyi sağlar. Buharlaştırma hücrelerinin önündeki shutterların bilgisayar yardımıyla açılıp kapanma süreleri yaklaşık 0,1 s'dir.

MBE'de tipik gelişim oranı bir tekil katman için yaklaşık (1-5s) arasındadır. Yavaş olmasına rağmen materyal bileşiminde ani değişikliklere izin verir.

Kalınlık kontrolü, kaynak hücreleriyle karşılıklı yerleştirilmiş bir iyon göstergesiyle sağlanmıştır.

MBE'de kullanılan değişik dahili teknikler bulunur. Büyüme oranlarının ölçülmesinde kullanılan metotlardan ilki demet eşdeğer basınç metodudur (Beam Equivalent Pressure).

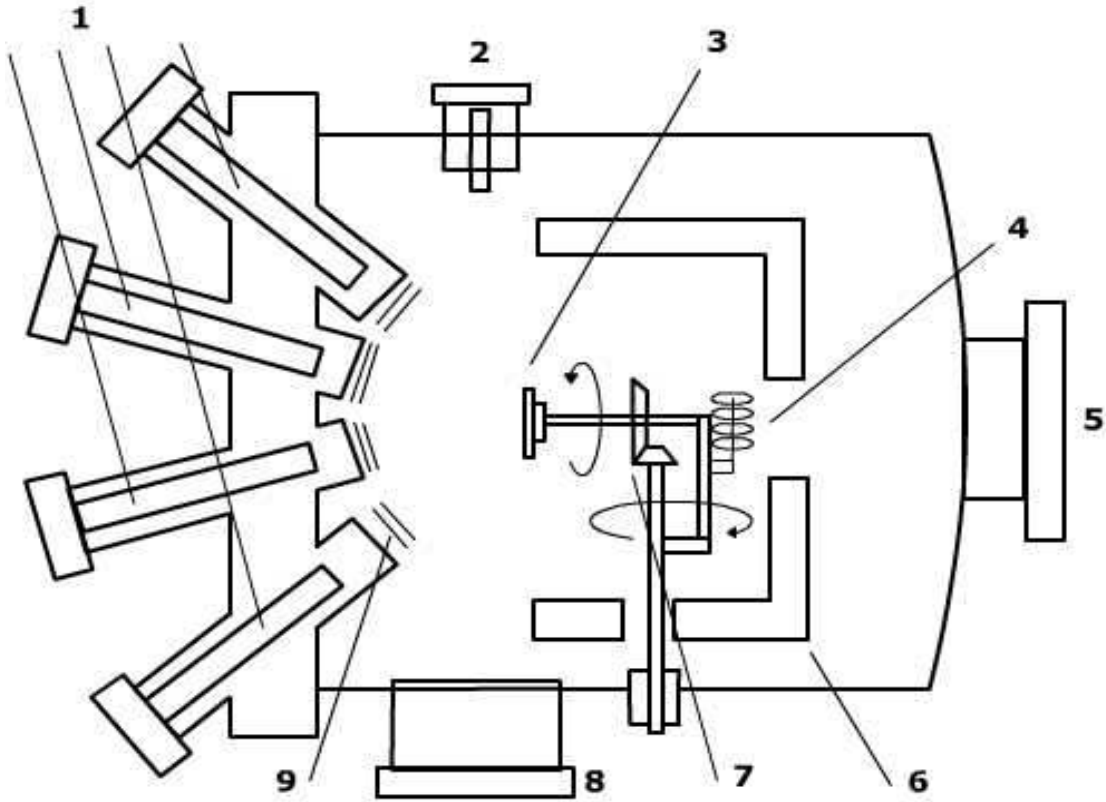
Demet eşdeğer basınç metodu ölçülmekte olan malzemenin ve sistemin geometrisi, iyonlaşma verimi gibi faktörlere bağlıdır.

MBE ile kristal büyütmede dahili kontrol için en kullanışlı aletlerden biri Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı (RHEED)'dir. Bu teknik; büyüme süresince yüzey büyütme oran kalibrasyonu, yüzeyden oksit çıkışının gözlenmesi, tabaka sıcaklığının kontrolü, yüzey atomlarının düzenlenmesinin gözlenmesi ve büyüme



kinetiği hakkında bilgi sağlaması nedeniyle bu sistemde kullanılan önemli bir tekniktir. MBE’de büyütme oranı saniyede birkaç Angstrom ( $\text{\AA}$ ) mertebesindedir.

Sistem iki şekilde temizlenir; 1000 – 1250 °C’ye kadar ısıtmak suretiyle oksit çözünür ve diğer yüzeye yapışan maddeler uzaklaştırılır yada düşük enerjili soygaz demeti kullanılabilir (Rinaldi, 2002; Cameron, et al, 1979; Khino, et al., 2000; Kazukauskas, et al., 1999; Ashrafi, et al., 2001; Ramamoorthy, et al.,2004).



**Şekil 4.2.** MBE Tekniğinde büyütme odasının şematik diyagramı.

Şekil 4.2.’deki şematik diyagramda 1. Kaynak Hücrelerini 2. RHEED 3. Örnek Bloğu/Taban Isıtıcıyı 4. BEP sayacı 5. Tampon Bölgeye Geçiş 6. Kryopaneli 7. Rotasyonel Manyetik Tutucuyu 8. Florasan Ekranı 9. Shutterları göstermektedir.

#### 4.4. Metal Organik Kimyasal Buhar Çöktürme Yöntemi

Metal organik kimyasal buhar çöktürme (MOCVD) yöntemi, 1960'lı yıllardan beri yüksek kaliteli yarıiletken ince filmler üretmek için kullanılmaktadır. MOCVD sistemi geliştirilmeden önce Water Phase Epitaxy (WPE), Liquid Phase Epitaxy (LPE) gibi sistemler kullanılmıştır.

İnce atom katmanlarını tabanlar veya uygun yarıiletken tabakaların üzerine çökertilmesiyle belirli optik ve elektrik özellikleri olan, hassas kalınlıklarda bir çok katman oluşturulabilir. MOCVD kullanılarak elde edilen yarıiletken ince filmler fotodetektörler, lazerler, LED'ler, güneş pilleri, yüksek hızlı transistörler gibi bir çok elektronik ve fotonik devrelerde kullanılmaktadır. Bunlar hem optik hem de kablosuz telekomünikasyon sistemleri için önemli bileşenlerdir.

MOCVD tekniğinde öncüler olarak da adlandırılan metal-organik bileşikler oldukça önemli bir yere sahiptir. Metal organik bileşikler (trimetil galyum, trimetil alüminyum gibi) taşıyıcı gaz içinde reaktöre gönderilir. Reaktöre gönderilen bu moleküller sıcak bir taban veya yarıiletken tabaka üzerinden geçirilirler. Isı molekülleri parçalar ve istenen atomların tabaka tabaka yüzey üzerinde depolanmasına neden olur. Kompleks organik gazın bileşimini değiştirerek kristalin özelliklerini neredeyse atomik boyutta değiştirmek mümkündür.

Yüksek kalitede yarıiletken katmanlar (milimetrenin milyonda biri kadar ince) ve bu katmanların taban ile tam olarak uyum gösteren kristal yapıları oluşturulabilir.

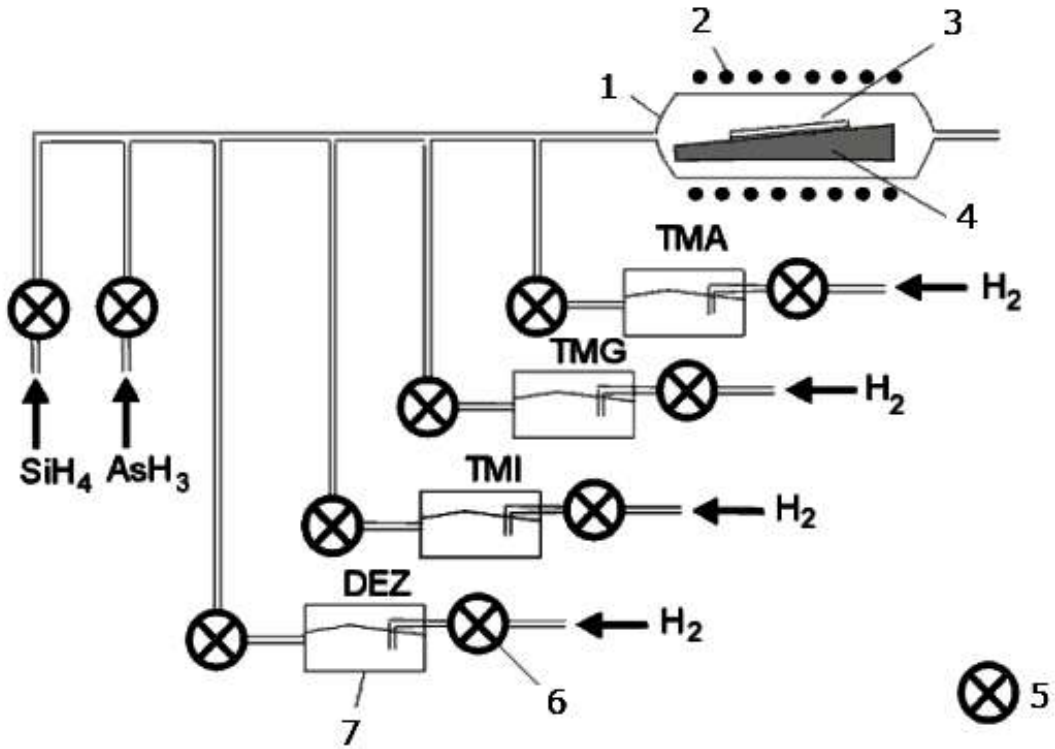
Sistem yaklaşık  $10^{-9}$  Torr'da film geliştirilebilir niteliktedir. MOCVD reaktörü genel olarak dört bölmeden oluşur. Load-lock bölümü bütün sistemi açmadan taban materyalini hızlıca koyma ve değiştirme imkanı vermektedir. Analiz bölümünde büyütme sonrası film kristalliğini hızlıca tespit etmeyi sağlayan yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı (RHEED) sistemi, diğer bir bölmede ise transfer tüpü ve su soğutmalı kılıf bulunmaktadır. Transfer tüpüyle örnekler üretim bölgesinden vakum altındaki

analiz bölmesine taşınabilmektedir. Bütün sistem bilgisayar tabanlı olarak kontrol edilebilmektedir.

MOCVD reaktöründe bölmeler arasındaki geçiş valfleri sistemin izolasyonunu sağlar. Transfer tüpü boyunca kritik noktalara yerleştirilen kameralar numune manipulasyonu ve transferine yardımcı olur. Kimyasal reaksiyon ve film yüzeyinin mikroskopik detaylarının ötesinde, bir reaktör bölmesinde makroskopik taşıma konusu başarılı ince film oluşumu için en önemli faktörlerden birisidir. Gaz akışı (taşıyıcı gazlar ve reaktantların karışımı) davranışları ve katman oluşturma hızı reaktörün geometrisinden, termo-akış koşullarından, operasyon yönteminden ve sıralı kontrolden etkilenebilir. Bu yüzden reaktör dizaynı ve işlem optimizasyonu kadar taşıma konusu da oldukça önemlidir.

MOCVD teknolojisi GaAs, AlGaAs, InP, InGaP, InSb, GaN.. ve CdTe, HgCdTe, ZnSe, ZnTe.. gibi bir çok III-V ve II-VI bileşikleri üretmek için kullanılmıştır. Bu teknoloji LED'lerin ve mavi lazerlerin günümüzdeki gelişimi açısından oldukça önemlidir.

Özellikle III-V bileşiklerinin MOCVD kullanılarak yapılan üretimi fundamental fizik çalışmaları ve yarıiletken cihaz tasarımında kullanılan malzeme çeşitliliğini son 10-15 yılda büyük ölçüde artırmıştır. MOCVD tekniğiyle kompozisyon değişimleri atomik seviyeye sınırlı quantum kuyuları, quantum kabloları ve noktaları (dots) üretilebilir. MOCVD yarıiletken yapılarda düşük boyutluluk ve bant yapısında değişikliklere izin vermesi nedeniyle cihaz tasarımında esnekliği artırır. (Gao, et al., 2005; Lever, et al., 2004; Metz, et al., 2002; Tan, et al., 2005; Zhang, et al., 2003)



Şekil 4.3. MOCVD Reaktörünün şematik diyagramı.

MOCVD reaktörünün şematik diyagramında 1. Reaksiyon Odasını 2. RF İndüksiyon Isıtıcısını 3. Tabanı 4. Grafit Platformu 5. Valfi 6. Kütle akış kontrolörünü 7. Bubbları göstermektedir.

#### 4.4.1. Yüksek enerjili elektron yansıma kırınımı (RHEED)

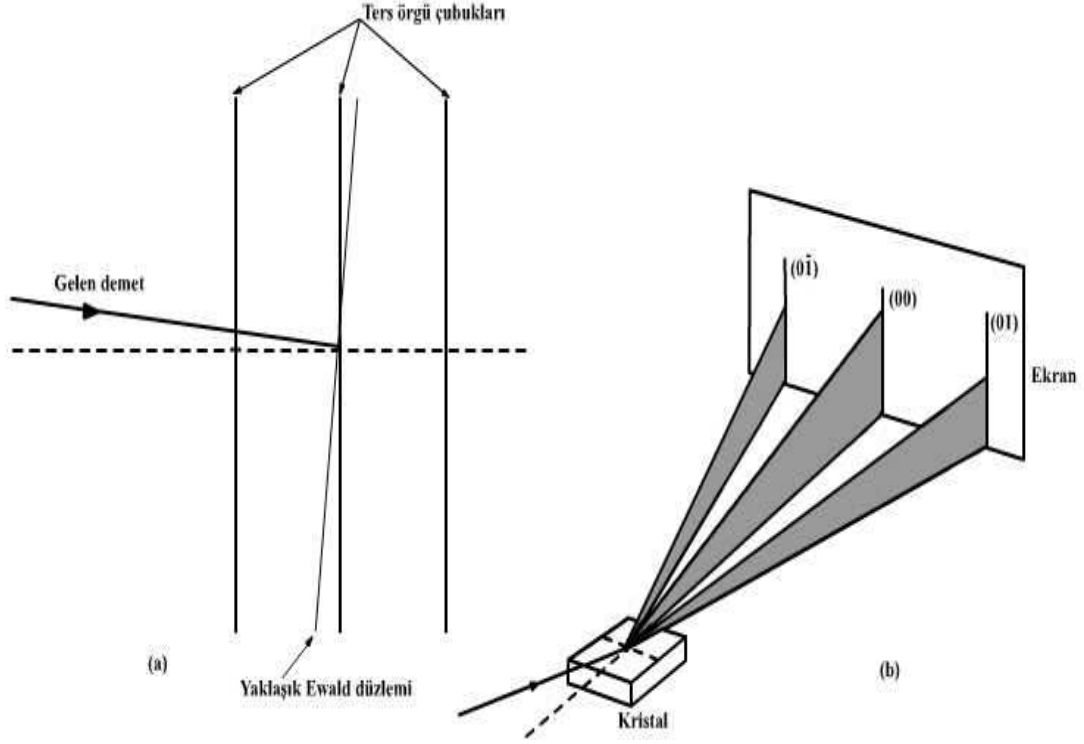
Bu yöntemde yüksek enerjili bir elektron demeti kristal yüzeyini sıyrarak açıda gönderilir. Gelen dalga vektörünün yüzeye normal bileşeni küçük olacak şekilde geliş açısı ayarlanır. Böylece elektron demetinin kristal içine girmesi azaltılır, kristal yüzeyinin rolü artırılır.

Elektronlar, CAR'a bakan bir elektron tabancasından gönderilir. Yansıyan ve kırılan elektronlar, fosfor ekrana çarptıklarında çok açık bir şekilde ışın yayınlarlar. Şekil 4.4.'de işlem basitleştirilmiş şekilde gösterilmiştir.

Daire şeklinde bir taban ile başladığında elektronlar çok fazla saçılmazlar ve yoğun bir demet olarak kaydedilirler. Materyal yüzey üzerine depolandıkça, atomlar epitaksiyal gelişim adaları oluştururlar ve kirlilik düşer, yansıtıcılık azalır. Depolama süreci devam ettikçe yüzey üzerinde materyaller oluşur, adalar birleşir, yeni dairesel yüzeyler oluşur ve orijinal taban yeni oluşan materyaller arasında boşluklar olarak kalır.

Daha çok materyal oluştuğça, boşluklar dolar ve yansıtıcılık tekrar yükselir. Gerçekte yansıtıcılık yüksek bir değere ulaşmaz çünkü depolama işlemi rastgeledir ve yüzey başlangıçtaki parlak taban görünüşünü tam olarak tekrar kazanamaz. Yansıtıcılıktaki dalgalanmalar görüntülenerek, epitaksiyal materyalin oluşum oranı ve kalınlığı tahmin edilebilir.

100 keV enerjili elektronlar için Ewald küresinin  $k$  yarıçapı  $\approx 10^3 \text{ \AA}^{-1}$  olup, en kısa ters ağ vektörü olan  $2\pi/a \approx 1 \text{ \AA}^{-1}$  değerinden çok büyüktür. Buna göre, esas kırınım bölgesinde Ewald küresi yaklaşık düzlemsel olur. Ters ağ çubuklarının bu yaklaşık düzlem küre yüzeyi ile kesişme noktaları, yüzeyi sıyrarak gelen demet önünde sıralar halinde dizilmiş olur (Kittel, 1996).



**Şekil 4.4.** RHEED yöntemi. (a) da yüksek enerjili elektron demeti kristal yüzeyini sıyrarak açıda geldiği için Ewald küresi yarıçapı o kadar büyük olur ki küre yüzeyi yaklaşık düzlem alınabilir. (b) de düzlem bir ekranda kırınım saçakları görülmektedir.

#### 4.5. Vakum Altında Buharlaştırma Yöntemi

Vakum altında termal buharlaştırma çalışmaları Edison'un 1884 tarihli akkor halde termal buharlaştırma ve film oluşturma patentiyle ortaya çıkmasına rağmen bu yöntem hiçbir uygulamada kullanılmamıştır. O dönemde kaynağın ısıtılması kullanılan vakum malzemelerine zarar verecek nitelikteydi. 1887'de Nahrwold vakumda süblimasyon yoluyla platin film oluşumunu açıkladı ve vakumda termal buharlaştırma yöntemini film oluşturmak için kullanan ilk bilim adamı oldu. 1917 yılında ise Stuhlman vakumda ayna oluşturmak için akkor gümüş kablo kullanarak, gümüş çöktüğünü açıkladı.

Termal buharlaştırma, vakum ortamında maddenin ısıtılarak buhar basıncının yükselmesiyle madde yüzeyinden ayrılan atom ve molekülerin taban yüzeyine tutunması işlemidir. Buharlaşma sıvı (erime noktasının üstünde) yada katı (süblimleşme) bir yüzeyden olabilir.

Sistem tepkime kavanozu, mekanik ve difüzyon pompaları, yüksek akım düşük voltajlı bir devre ve bir plazma jeneratöründen oluşur.

Kaplanacak malzeme tepkime kavanozunun içine yerleştirilir. Daha sonra basınç  $5 \times 10^{-5}$  Torr'un altına düşürülür. Basıncı çift pompa kullanarak  $1 \times 10^{-5}$  Torr veya daha düşük bir seviyeye indirmek mümkündür. Argon, Nitrojen gibi bir soygaz veya oksijen verilerek ve 5000 Volt uygulanarak bir plazma oluşturulur. İyonlaşmış gaz sistem tepkime kavanozu ve taban yüzeyine yapışmış artıkların temizlenmesini sağlar.

Daha sonra kaynak malzeme altında direnç ısıtma sistemi bulunan buharlaştırma sepetinin içine yerleştirilir. Kaynak malzeme buharlaşana kadar yüksek akım (100-120 A) uygulanır. Bölme düşük basınçta olduğu için kaynak malzemeden ayrılan atom ve moleküller bölmenin üst tarafında bulunan hareket halindeki tabana ulaşır ve film oluşum süreci başlar. Güç değiştirilerek 10-50 Å/s'lik bir hızla çökeltme sağlanır. Vakum moleküllerin bölmede serbestçe yol almasını sağlamak için gereklidir ve buharlaşan malzeme bütün yüzeylerde yoğunlaşır. Bu prensip bütün buharlaşma teknolojileri için geçerlidir, sadece kaynak malzemeyi ısıtma yöntemi değişiklik gösterir. Kaynak malzemeyi ısıtma türüne göre iki tür buharlaştırma yöntemi vardır; e-beam buharlaştırma ve dirençli buharlaştırma. E-beam buharlaştırmada bir elektron demeti kaynak maddeye yönlendirilerek lokal ısınma ve buharlaştırma sağlanır.

Dirençli buharlaştırma yönteminde ise kaynak maddeyi barındıran bir platform (Tungsten, Tantalum yada molybdenum) yüksek akım geçirilerek elektriksel yolla ısıtılır ve maddenin buharlaşması sağlanır. Bir çok madde kullanılacak yöntem konusunda faz geçişi özelliklerine bağlı olarak sınırlayıcı niteliktedir. Alüminyumun dirençli ısıtma ile buharlaştırılmasının zorluğu buna örnek olarak verilebilir.

Vakum altında buharlaştırma yöntemiyle;

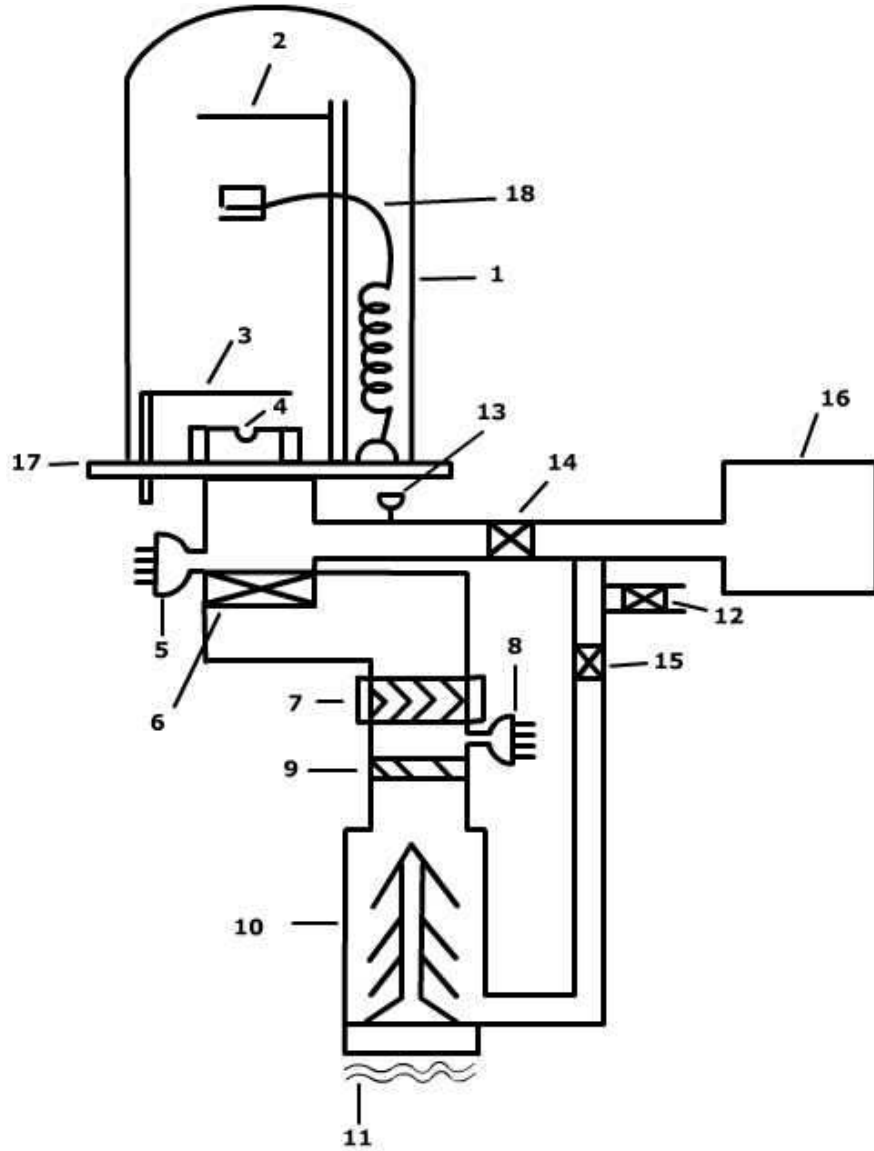
- Yüksek saflıkta kaynak kullanılarak yüksek saflıkta kaliteli filmler üretilebilir.
- Kaynak malzemenin yüksek saflıkta katı malzeme olması üretim öncesi herhangi bir işleme tabi tutulmaması bu yöntemin avantajlarından biridir.
- Taban üzerine maske uygulanarak film oluşum bölgelerinin belirlenmesine olanak sağlar.
- Çökeltme hızı, takibi ve kontrolü nispeten kolaydır.
- Ucuz üretim tekniklerinden biridir.

Vakum altında buharlaştırma yönteminin dezavantajları;

- Yüksek hacimli vakum bölmelerinde kaynak malzeme ve taban arasında belirgin bir uzaklık olması gerekir.
- Film özelliklerini kontrol etmek için sınırlı sayıda işlem değişkeni vardır.
- Düzgün sabitleme yapılmadığında veya kaynak ve taban arası mesafe yüzünden kötü yüzey kaplama ve geniş alanlarda düzensiz film kalınlığına neden olur.
- Bir çok bileşik ve alaşımlar güçlüklerle oluşturulabilir.
- Kaynak malzemeler buharlaştırma sepetiyle tepkimeye girerek oluşan filmin fiziksel özelliklerini değiştirecek nitelikte bozulmalara yol açabilir. Bir çok madde, özellikle metal oksitler bu yolla buharlaştırılmazlar. Buharlaştırma sepetinin yapıldığı malzeme (Tungsten, Tantalum yada molybdenum) metal oksitlere göre daha düşük sıcaklıkta erir. Bu yüzden taban üzerinde Zirconium Oksit katmanı yerine Tungsten bir tabaka oluşabilir.

Vakumda buharlaştırma yöntemiyle, optik izolasyon kaplamalar, iletken filmler, korozyon engelleyici kaplamalar, fiberoptik sensör deneylerinde kullanılan çok özel yansıtma özelliklerine sahip aynalar üretilebilir. Bu teknikle aynı zamanda çok kalın 1mm'lik MCrAlY gibi uçak motorlarında kullanılan ısıya dayanıklı kaplamalar da yapılabilir (Mattox, 1998; Kim, et al., 1993; He, et al., 2005; Feng, et al., 1996; Eze, et al., 2005).





**Şekil 4.5.** Vacuum Evaporation yönteminin şematik diyagramı

Şekil 4.5.' deki şematik diyagramda 1. Tepkime kavonozu (Bell Jar) 2. Yonga Tutucusu 3. Shutter 4. Buharlaştırma Teknesi 5. İyonizasyon vakum sayacı 6. Yüksek Vakum Subabı (büyük valf) 7. Sıvı Nitrojen Soğutma Kapanı 8. İyonizasyon vakum sayacı 9. Su Soğutmalı Siper 10. Diffüzyon pompası 11. Diffüzyon pompası ısıtıcısı 12. Pirani vakum sayacı (Roughing, Foreline) 13. Hava Giriş Menfezi 14. Roughing subabı 15. Foreline subabı 16. Mekanik (Roughing) pompası 17. Ana plaka 18. Su soğutmalı kristal kalınlık monitörünü göstermektedir.

#### 4.6. Fiziksel Buhar Biriktirme

Buhar biriktirme işlemleri genellikle iki grup altında toplanır;

- 1.Fiziksel Buhar Biriktirme (PVD)
- 2.Kimyasal Buhar Biriktirme (CVD)

Fiziksel buhar biriktirme, temelde farklı yöntemlerle (buharlaştırma, söktürme veya lazer ablasyonu ile) üretilen kaynak buharın, film oluşturmak için bir yüzey üzerine yoğunlaştırılması işlemidir.

PVD işlemleri üç ana süreçten oluşur. Bunlardan birincisi buhar fazı üretimidir. Malzeme buhar haline, buharlaştırma, söktürme, lazer ablasyon, gazlar, buharlar vb. ile getirilir. İkinci adım buharın kaynaktan hedef tabana taşınması sürecidir. Moleküler akış, plazma yaratarak buhar iyonlaştırma yoluyla gerçekleştirilir. PVD işlemlerinde üçüncü basamağı taban üzerinde film geliştirme süreci oluşturur. Bu süreç kaynak buharın taban üzerinde yoğunlaşmasını ve gelişme süreci ile filmin oluşmasını kapsar. Bu üç basamağın bağımsız kontrol derecesi, biriktirme sürecinin çok yönlülüğünü veya esnekliğini belirler. PVD süreçlerinde bu üç basamak bağımsız olarak kontrol edilebilmekte ve böylece yapı, özellikler ve birikme oranı kontrolü ile büyük esnekliğe sahip olmaktadır. CVD süreçlerinde ise bu üç basamak taban üzerinde aynı anda meydana gelir ve birbirinden bağımsız olarak kontrol edilemez.

PVD teknikleri arasında en fazla kullanılanları, magnetron sputtering, pulslu lazer çökeltme (PLD), ark buharlaştırma ve termal buharlaştırmadır. Fakat her teknikte üretim ve çökeltme işlemleri bir biçimde farklılık gösterir ve her teknik için gerekli teçhizat özeldir.

PVD yöntemleri arasında bir değerlendirme yapabilmek için bir çok faktör göz önünde bulundurulmalıdır.

- Çökeltilecek maddenin türü,
- Çökeltme hızı,
- Maksimum çökeltme sıcaklığı, boyut ve şekil gibi taban kısıtlamaları,

- Tabana çökme adezyonu,
- Fırlatma gücü (çökme işleminde hız ve kalınlık dağılımında etkilidir, örneğin yüksek fırlatma gücü düzensiz şekildeki objeleri daha düzgün bir kalınlıkta kaplama imkanı sağlar),
- Kaplama maddesinin saflığı,
- Maliyet,
- Ekolojik değerlendirmeler,
- Depolama maddesinin miktarı.

PVD tekniklerinin uygulamaları, dekoratif uygulamalardan, yüksek sıcaklık süperiletken filmlere kadar çok geniş bir skaladadır. PVD elektroplating ve bazı boyama işlemlerine göre daha az miktarda zararlı atık ürettiği ve daha az zararlı malzeme kullandığı için tercih edilmektedir.

PVD tekniklerinde numune kalınlıkları Angstromdan milimetreye kadar değişebilir. Elektron demeti ısıtmalı kaynakların geliştirilmesi ile yüksek biriktirme oranları (25  $\mu\text{m}/\text{dk}$ ) elde edilmektedir. Çok sayıda inorganik materyaller (metaller, alaşımlar, bileşikler ve karışımlar gibi) kadar bazı organik materyaller de PVD teknolojileri kullanılarak üretilir.

PVD tekniklerinin bazı dezavantajları da mevcuttur. Vakum altında termal buharlaştırma gibi spesifik teknolojilerde halka şeklinde kaplamayı imkansız kılması gibi kısıtlamalar vardır. Bazı PVD teknolojileri çok yüksek sıcaklık ve vakumda çalışır ve fazla sıcaklık yüklemelerine karşı bir su soğutma sistemine ihtiyaç vardır. Bir çok PVD tekniğinin maliyeti oldukça yüksektir.

#### 4.6.1 Magnetron Sökme Biriktirme Yöntemi

Sökme veya söktürme kaynak hedefe fırlatılmış enerjistik parçacıkların hedef yüzeyinden atom veya molekül çıkartması ile sonuçlanan momentum transferi olayıdır. Bu teknikte öncelikle  $10^{-4} - 10^{-7}$  torr mertebesinde bir vakum ortamı oluşturulmalıdır.

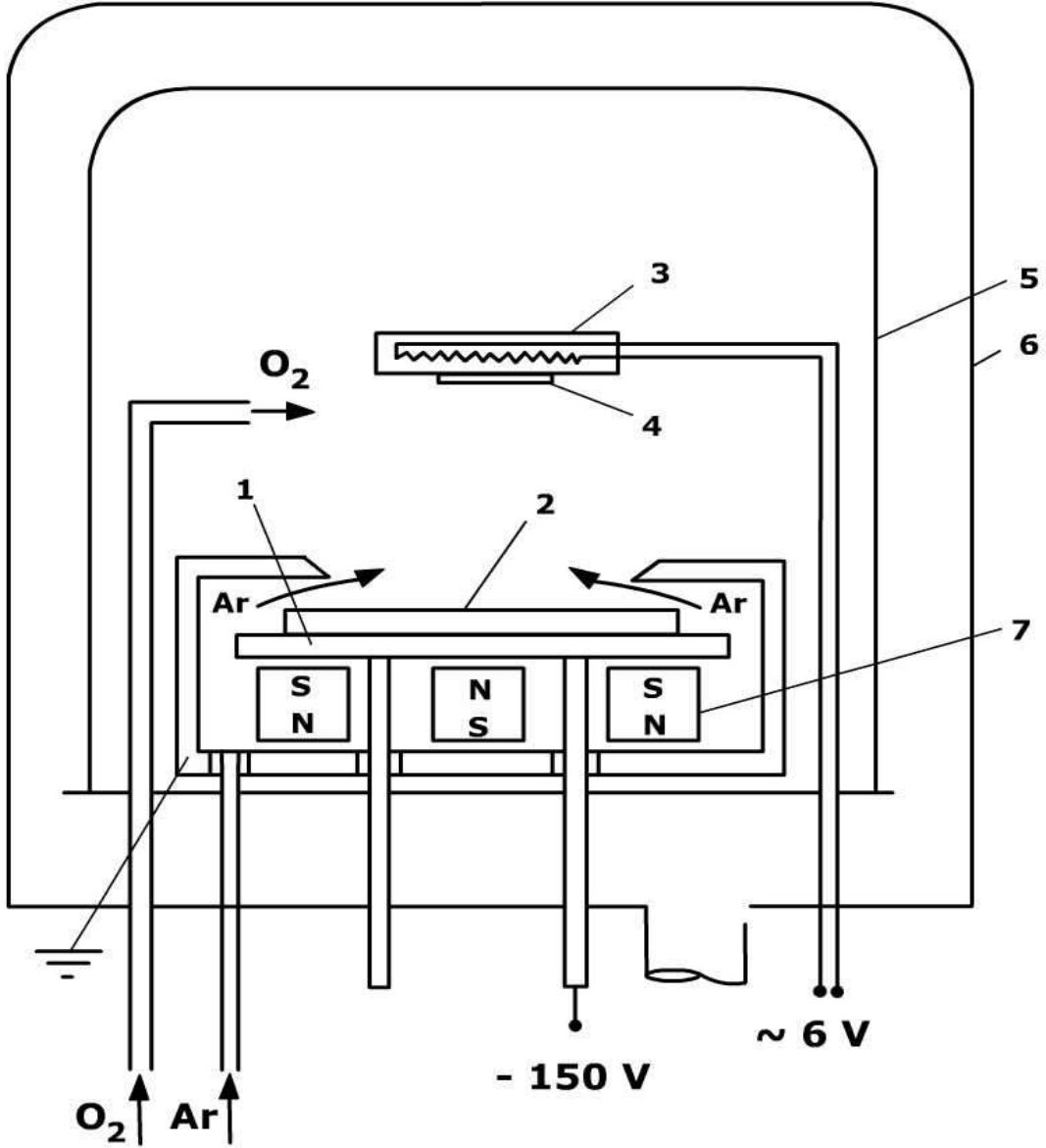
Kaynak malzeme ve taban materyali vakum odasına yerleştirilir ve basınç istenen değerlere ulaşıncaya ortama Argon gibi bir soygazın kontrollü akışı sağlanır.

Sistemde kaplanacak kaynak malzemesi yani hedef (katot) negatif voltaj kaynağına bağlı ve taban yüzeyi hedefi görecektir şekilde konumlandırılmıştır. Magnetrona güç verildiğinde, hedefe  $-300$  V yada daha düşük bir düzeyde negatif voltaj uygulanır. Bu negatif voltaj pozitif iyonları hedef yüzeyine belirli bir hızda çeker. Genellikle bir pozitif iyon bir katının yüzeyindeki atomlarla çarpıştığında bir enerji transferi meydana gelir. Bir yüzey atomu, ona transfer edilen enerji yüzey bağlanma enerjisinden (yaklaşık olarak süblimleşme ısısına eşittir) üç kat büyükse, söktürme işlemi gerçekleşmiş olur.

Magnetron sökme biriktirme (Magnetron Sputtering) sistemlerinde magnetron kaynaklar kullanılarak yaratılan manyetik alan plazma elektronlarının belirli bir eksende hareket etmesini sağlar. Bu durum plazmadan elektron sızıntısını engeller, bu sayede her elektron bir çok iyon üretir ve söktürme hızını üretim için uygun hale getirmiş olur.

Bir hedef atomunun söktürülmesi yüzeye yapılan iyon bombardımanının olası sonuçlarından sadece birisidir. Kaplanacak malzeme kaynağında ikinci önemli işlem hedef yüzeyinden ikincil elektronların yayılımıdır. Bu ikincil elektronlar yanma deşarjının (glow discharge) beslenmesini sağlar.

Magnetron sökme tekniklerinde hedef materyal DC gücün kullanılabilceği saf metallere, RF güç yada pulslu DC verilebilecek yarıiletken ve yalıtkanlara kadar değişebilir. Çökeltme sadece soygaz (nonreactive) yada reaktif (reaktif ve soygaz) deşarjda tek yada çoklu elementli hedeflerle yapılabilir (Mattox, 1996, 1998; Klenkow, 2000; Chul, et al., 2005; Hernandez, et al., 2002).



Şekil 4.6. Magnetron Sputtering sistemi şematik diyagramı

Bu şematik diyagramda (1) Katodu , (2) Hedefi , (3) Isıtıcıyı , (4) Tabanı, (5) Üretim Odasını, (6) Vakum Bölmesi Duvarını (7) Manyetik Sistemi göstermektedir.

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada yarıiletken ince film üretim tekniklerinden vakumda buharlaştırma (VE), kimyasal püskürtme (SP), magnetron sökme biriktirme (MS), metal-organik kimyasal buhar çöktürme (MOCVD) ve moleküler demet epitaksi (MBE) yöntemlerinin yapıları, üretim aşamaları, çalışma prensipleri ve üretilen filmlerin fiziksel özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir.

Bu tekniklerle üretilmiş II-VI bileşiklerinin iletkenlik türleri, kristal yapıları, özdirenç ve mobilite değerleriyle bant aralıklarını gösteren çizelgeler oluşturulmuştur. CdSe ve ZnS filmlerinin üretimi ve incelenmesi üzerine yapılan çalışmaların diğer II-VI bileşiklerine göre çok daha az olduğu tespit edilmiştir. II-VI bileşiklerinin MBE ve MOCVD teknikleriyle üretimi ve incelenmesi üzerine yapılan çalışmalar daha eski tarihlidir. Son yıllarda yapılan çalışmaların ise II-VI bileşiklerini de içinde barındıran kuantum kuyuları, LED'ler, nano teller, kuantum noktaları vb. üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. MBE ve MOCVD tekniklerinin yüksek vakum altında işlem görmeleri, büyütme oranı kalibrasyonu, tabaka sıcaklığının kontrolü, atomların tabaka tabaka yüzey üzerinde büyütülebilmesi ve bu hareketliliğin gözlenebilmesi diğer yöntemlere göre daha kaliteli ince filmlerin üretilmesine imkan vermektedir.

Kimyasal püskürtme, magnetron sökme biriktirme ve vakumda buharlaştırma tekniklerinde üretim sırasında filmlerin fiziksel özelliklerini kontrol etmek için sınırlı sayıda işlem parametresi vardır. Bu durum filmlerin fiziksel özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Çizelge 2.1'de bu yöntemlerle elde edilen II-VI bileşiklerinin özdirenç ve mobilite değerleri görülmektedir. Bu yöntemlerle üretilen CdS ince filmlerinin özdirenç değerleri oldukça yüksektir. Vakumda buharlaştırma yöntemi ile üretilen CdS filmlerinin özdirenci  $10^{-1}\Omega\text{cm}$ . gibi düşük sayılabilecek bir mertebede olması, diğer CdS filmlere göre film kalınlıklarının fazlalığından kaynaklanmaktadır. Film kalınlığının artmasıyla birlikte elektriksel özdirenç azalır. Yapılan çalışmalarda, vakumda buharlaştırma yöntemiyle üretilen CdS ince filmlerin özdirenç değerleri  $10^{-10}$ - $10^5\Omega\text{cm}$ . arasında değişmektedir.

Kimyasal püskürtme, vakumda buharlaştırma ve magnetron sökme biriktirme yöntemleriyle elde edilen polikristal CdS filmlerinde özdirenç ve mobilitenin, örgü kusurları ve taneler arası engellerin varlığından olumsuz yönde etkilendiği belirlenmiştir. MBE ve MOCVD ile elde edilen filmlerin mobiliteleri diğer yöntemlerle elde edilen filmlere göre oldukça yüksektir. Diğer üç yöntemle oluşturulan filmlerde mobilitenin düşük olmasının, akseptör gibi tuzakların tuzaklamasından ve sıcaklıktan kaynaklandığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.1’de II-VI bileşiklerine ait kristal yapı, iletkenlik tipi ve yasak enerji aralık değerleri görülmektedir. CdS ince filminin yasak enerji aralıkları tüm yöntemlerde birbirine yakın değerdedir. Yapılan çalışmalarda magnetron sökme biriktirme ve kimyasal püskürtme teknikleriyle elde edilen CdS filmlerinin bant aralık değerlerinin geniş bir skalaya (2,32-2,56 eV) sahip olduğu görülmüştür. MBE ve MOCVD dışındaki yöntemlerle elde edilen II-VI bileşiklerinde film kalınlığının artmasıyla optik absorpsiyon eğrisinin daha yüksek dalga boylarına doğru kaydığı belirlenmiştir. Bu beş farklı yöntemle elde edilen CdS filmlerinin bant aralığı sıcaklık, film kalınlığı, örgü kusurları ve sistemden kaynaklanan kirlilikler gibi parametrelere bağlıdır. Özellikle MBE ve MOCVD dışındaki yöntemlerle üretilen filmler daha sonra tavlama yapılarak ve katkılama yapılarak özellikleri incelenmiştir. Bu üç yöntemle üretilen CdS filmlerinin farklı sıcaklıklarda tavlama yapılarak yasak enerji aralıklarının tane büyüklüğü ile birlikte arttığı gözlenmiştir.

Bu yöntemlerde filmlerin fiziksel özelliklerini üretim sırasında kontrol etmek için sınırlı sayıda değişkenin olması, filmlerin elektrik, optik ve yapısal özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluk, katkılama ve tavlama gibi işlemlerle giderilmeye çalışılmaktadır. CdS ve diğer II-VI yarıiletken bileşiklerinin elektrik, optik ve yapısal özelliklerinin film üretim tekniğine ve üretim sürecinde bu özellikleri etkileyen parametrelerin kontrolüne kuvvetlice bağlı olduğu belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Afify, H.H., Nasser, S.A. and Demian, S.E., 1991, Influence of substrate temperature on the structural, optical and electrical properties of ZnO thin films prepared by spray pyrolysis, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2, 152-156.
- Afify, H.H., Terra, F.S. and Momtaz, R.S., 1996, Substrate temperature effects on the tin Oxide films prepared by spray pyrolysis, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 7, 149-153.
- Ashrafi, A.B.M.A., Ok, Y.W. and Seong, T.Y., 2001, Single-crystalline rocksalt CdO layers grown on GaAs(001) substrates by molecular-beam epitaxy, *Applied Physics Letters*, 79, 470-473.
- Ashour, A., 2003, Physical properties of Spray Pyrolysed CdS Thin Films, *Turk Journal Phys.*, 27, 551-558.
- Askeland, D.R., 1998, *Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri*, (Çev. M. Erdoğan), Cilt2, Nobel Yayın Dağıtım Ltd. Şti., Ankara, 712s.
- Amin, N., Yamada, A. and Konagai, M., 2002, Effect of ZnTe and CdZnTe alloys at the back contact of 1  $\mu\text{m}$  thick CdTe thin film solar cells, *Japanase Journal of Applied Physics Part1-Regular Papers Short Notes&Review Papers*, 41, 2834-2841.
- Atay, F., 2001,  $\text{Cd}_{1-x}\text{Ni}_x\text{S}$  filmlerinin elektriksel, optiksel, yapısal, ve yüzeysel özelliklerinin incelenmesi, *Doktora Tezi*, Eskişehir, 145s.
- Bar-Lev, A., 1993, *Semiconductor and electronic devices*, Prentice Hall International Ltd., New York, 469p.
- Basak, D., Amin, G., Malik, B., Paul, G.K., and Sen, S.K., 2003, Photoconductive UVdetectors on sol-gel-synthesized ZnO films, *Journal of Crystal Growth*, 256, 73-77.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Bedir, M., Kayalı, R. ve Öztaş, M., 2002, Effect of the Zn concentration on the characteristic parameters of  $Zn_xCd_{1-x}S$  thin films developed by Spraying Pyrolysis method under the Nitrogen Atmosphere, Turk. J. Phys., 26, 121-126.
- Bedir, M., Öztaş, M., Bakkaloğlu, Ö.F. ve Ormancı, R., 2005, Investigations on structural, optical and electrical parameters of spray deposited ZnSe thin films with different substrate temperature, Eur. Phys. J.,(B), 45, 465-471.
- Bhosale, C.H., Kambale, A.V., Kokate, A.V. and Rajpure, K.Y., 2005, Structural, optical and electrical properties of chemically sprayed CdO thin films, Materials Science and Engineering,(B), 122, 67-71.
- Bhattacharyya, D. and Carter, M.J., 1996, Effect of substrate on the structural and optical properties of Chemical-Bath deposited CdS Films, Thin Solid Films, 288, 176-181.
- Bian, J.M., Li, X.M., Zhang, C.Y., Chen, L.D. and Yao, Q., 2004, Synthesis and characterization of two-layer-structured ZnO p-n homojunctions by ultrasonic spray pyrolysis, Applied Physics Letters, 84, 3783-3785.
- Bicknell, R.N., Giles, N.C. and Schetzina, J.F., 1986, Growth of high mobility n-type CdTe by photoassisted molecular beam epitaxy, Appl. Phys. Lett., 49, 1095-1097.
- Blackmore, J.S., 1985, Solid state physics, Cambridge University Press, Cambridge.
- Buckley, R.W. and Woods, J., 1973, Variations in the resistivity of evaporated films of cadmium sulphide, J. Phys. D: App. Phys., 6, 1084-1089.
- Bujatti, M., 1967, CdS Metal barriers from photovoltage measurements, Brit. J. Appl. Phys., 1, 581-584.
- Boone, J.L., Van Doren, V.P., Berry, A.K., 1982, Deposition of CdTe by spray pyrolysis, Thin Solid Films, 87, 259-264.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Cameron, D.C., Duncan, W. and Tsang, W.M., 1979, The structural and electron transport properties of CdS grown by molecular beam epitaxy, *The Solid Films*, 58, 61-66.
- Chavez, H., Jordan, M., McClure, J.C, Cush, G. and Singh, V.P., 1997, Physical and electrical characterization of CdS films deposited by vacuum evaporation, solution growth and spray pyrolysis, *Journal of Materials Science: Materials Electronics*, 8, 151-154.
- Chen, Y., Bagnall, D.M., Koh, H.J., Park, K., Hiraga, K. and Zhu, Z., 1998, Plasma assisted molecular beam epitaxy of ZnO on c-plane sapphire: Growth and characterization, *Journal of Applied Physics*, 84, 3912-3918.
- Chul-Hwan, C. and Seon-Hyo, K., 2005, effects of post-annealing-temperature on structural, optical and electrical properties of ZnO and Zn<sub>1-x</sub>Mg<sub>x</sub>O films by reactive RF magnetron sputtering, *Journal of Crystal Growth*, 283, 170-179.
- Das, B.N. and Sahu, S., 1988, High temperature photoconductivity of chemically deposited CdS thin film, *Journal of Materials Science Letters*, 7, 151-152.
- Dakhel, A.A., 2003, Structural and optical properties of evaporated Zn oxide, Ti oxide and Zn-Ti oxide films, *Appl. Phys.,(A)*, 77, 677-682.
- Daraber, W.J., Lyons, L.E. and Morris, G.C., 1985, Some properties of thin films of chemically deposited cadmium sulphide, *Solar Energy Materials*, 12, 137-148.
- Dawar, A.L., Shishodia, P.K., Chauhan, H., Kumar, A. and Mathur, P.C., 1991, Fabrication of Low Resistive CdS Thin Films, *Thin Solid Films*, 201, L1-L5.
- Demerchant, J. and Cocisera, M., 1996, Properties of ZnTe containing impurities introduced during spray pyrolysis, *Journal of the Electrochemical Society*, 143, 4054-4059.
- Depuydt, J.M., Haase, M.A., Cheng, H. and Potts, J.E., 1989, Electrical characterization of p-type ZnSe, *Appl. Phys. Lett.*, 55, 11.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Dewei, M., Zhizhen, Y., Lei, W., Jingyun, H. and Binghui, Z., 2003, Deposition and characteristics of CdO films with absolutely(200)-preferred orientation, *Material Letters*, 58, 128-131.
- Ebenezer, E., Murali, K.R., Chockalingam, M.J. and Venkateson, V.K., 1988, Electrical properties of Vacuum annealed CdS Films, *J. Mater. Sci.*, 23, 3861-3863.
- Ebothe, J., Hichou, A.E. and Troyon, M., 2005, Cathodoluminescent behaviour of sprayed ZnS specimens, *Thin Solid Films*, 487, 54-57.
- Elango, T., Subramanian, V., Murali, K.R., 2000, Characteristics of spray-deposited CdSe thin films, *Surface and Coatings Technology*, 123, 8-11.
- Eze, F.C., 2005, oxygen partial pressure dependence of the structural properties of CdO thin films deposited by a modified reactive vacuum evaporation process, *Materials chemistry and Physics*, 89, 205-210.
- Fang, P.H., Wu, X. and Kinnier, J. H., 1987, Metallic glass substrates for thin film solar cells, *Solar Cells*, 22, 159-161.
- Fathy, N. and Ichimura, M., 2005, Photoelectrical properties of ZnS thin filter deposited from aqueous solution using pulsed electrochemical deposition, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 87, 747-756.
- Federov, D.L., Denisov, E.P., Tenishev, L.N., Chernyhov, M.B., Kuznetsov, P.I. and Yakushcheva, G.G., 1998, Excitations in heteroepitaxial CdSe/CdS structures, *Physics of the Solid State*, 40, 816-818.
- Ferreira, S.O., Sitter, H., Faschinger, W. and Brunthaler, G., 1994, Growth of highly doped p-type ZnTe layers on GaAs using a nitrogen DC plasma cells, *Journal of Crystal Growth*, 140, 282-286.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Feng, L., Mao, D., Tang, J., Collins, R.T. and Trefny, J.U., 1996, The structural optical and electrical properties of vacuum evaporated cu-doped ZnTe polycrystalline thin films, *Journal of Electronic Materials*, 25, 9.
- Galloway, S.A., Edwards, P.R. and Durose, K., 1999, Characterization of thin film CdS/CdTe solar cells using electron and optical beam induced current, *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 57, 61-74.
- Gao, Q., Buda, M., Tan, H.H. and Jagadish, C., 2005, Room temperature Operation of InGaAsN Quantum dot Layers Grown by MOCVD, *Elektrochemical Solid State Letters*, 8, 657.
- Ghosh, B., Purakayastha, S., Datta, P.K., Miles, R.W., Carter, M.J., and Hill, R., 1995, Formation of a stable ohmic contact to CdTe thin films through the diffusion of P from Ni-P, *Semicond. Sci. Technol*, 10, 71-76.
- Hayashi, T., Nishikura, T., Suzuki, T. and Ema, Y., 1988, Formation and properties of In-doped high-conductivity CdS film, *J. Appl. Phys.*, 64, 3542-3550.
- He, Z., Zhao, G., Weng, W., Du, P., Shen, G. and Han, G., 2005, The difference between the transverse and in-plane resistivity of vacuum evaporated cadmium sulfide (CdS) thin films, *Vacuum*, 79, 14-18.
- Herrandez, H.C., Contreras, G.P., Aguilar, J.H., Morales-Acevedo, A., Vidal-Larramendi, J. and Vigil, O.G., 2002, CdS and CdTe large area thin films processed by radio-frequency planar magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 403-404, 148-152.
- Hook, J.R. and Hall, H.E., 1999, *Katıhal Fiziği*, (Çev. F. Köksal), Literatür Yayıncılık, İstanbul.
- Ibrahim, A.A., El-Sayed, N.Z., Kaid, M.A., Ashour, A., 2004, Structural and electrical properties of evaporated ZnTe thin films, *Vacuum*, 75, 189-194.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)

- Iwata, K., Tampo, H., Yamada, A., Fons, P., Matsubara, K., Sakurai, K., Ishizuka, S. and Niki, S., 2005, Growth of ZnO and device applications, *Applied Surface Science*, 244, 504-510.
- Jayastissa, H.A., 2003, Preparation of gallium-doped ZnO films by oxidized ZnS films, *Semicond. Sci. Technol.*, 18, 27-30.
- Kao, K.C. and Hwang, W., 1979, Electrical transport in solids, international series in the Science of the Solid State, Pergamon Press, Cilt14, 663p.
- Karanjai, M.K. and Dasgupta, P., 1987, Preparation and study of sulphide thin films deposited by the dip technique, *Thin Solid Films*, 305, 345-350.
- Katayama, K. and Nakanura, T., 2004, Degradation mechanism limiting the lifetime of ZnSe-based white light-emitting diodes, *Journal of Applied Physics*, 95, 3576-3581.
- Kazukauskas, V., Grün, M., Petillon, S., Storzum, A. and Klingshirn, C., 1999, Experimental observation of two-dimensional electron gas in the CdS quantum wells of CdS/ZnSe heterostructures, *Applied Physics Letters*, 74, 395-397.
- Kim, S.U., Kim, D.S., Ahn, B.T. and Im, H.B., 1993, Structural, electrical and optical properties of In-doped CdS Thin Films prepared by vacuum evaporation, *Thin Solid Films*, 229, 227-231.
- Kittel, C., 1996, *Katılmal Fiziğine Giriş*, (Çev. B. Karaoğlu), Bilgi Tek Yayınları, İstanbul, 434s.
- Khino, K., Kariya, H., Suzuki, N., Ueyama, K., Kitagama, M. and Kobayashi, H., 2000, Molecular beam epitaxy and optical properties of ZnCdS/ZnMgS quantum wells on GaP, *Journal of Crystal Growth*, 214, 135-139.
- Konstantinos, P., Cheng, G.D., Lu and Jensen, K.F., 1989, *Applied Physics Letters*, 54, 353-355.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Kolenkow, R., 2000, Magnetron sputtering of thin films, Intevac VSD, Santa Clara, CA.
- Kireev, P.S., 1978, Semiconductor Physics, Mir Publisher, Moscow.
- Lalitha, S., Sathyamoorthy, R., Senthilarasu, S. And Subbarayan, a., 2005, Influence of CdCl<sub>2</sub> treatment on structural and optical properties of vacuum evaporated CdTe thin films, Solar Energy Materials&Solar Cells.
- Lakshimi, N., Madhusudhana, N.R., Venugopal, R., Reddy, D.R. and Raddy, B.K., 2003, Formation of mixed phases and mutual chemical analogs in ZnTe-CdS films, Materials Chemistry and Physics, 82, 764-770.
- Lampert, M.A. and Mark , P., 1970, Current injection in solids, Academic Press, USA, 347p.
- Lee, J.H., Lim, D.G. and Yi, J.S., 2003, Electrical and optical properties of CdTe films prepared by vacuum evaporation with close spacing between source and substrate, Solar Energy Materials&Solar Cells, 75, 235-242.
- Lever, P., Buda, M., Tan, H.H. and Jagadish, C., 2004, Characteristics of MOCVD-Grown Thin p-clad InGaAs Quantum-Dot Layers, IEEE Photonics Technology Letters, 16, 2589-2591.
- Li, X., Timothy, A., Gessert and Timothy, C., 2004, The properties of cadmium tin oxide thin-film compounds prepared by linear combinatorial synthesis, Applied Surface Science, 223, 138-143.
- Li, J.W., Chiang, J.D., Su, Y.K. and Yokoyama, M., 1994, The preparation of ZnS thin films on an indium tin oxide glass substrate by LP-MOCVD, Journal of Crystal Growth, 137, 421-426.
- Makino, T., Andre, R., Gerard, J.M., Romestain, R., Dang, L.S., Bartels, M., Lischka, K. And Schikora, D., 2004, Time domain investigation on excitonic spectral diffusion in CdSe quantum dots grown on vicinal surface GaAs substrates, Solid State Communications, 130, 63-66.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Maksimov, O. and Tamargo, M.C., 2001, Direct-to-indirect band gap crossover for the  $\text{Be}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Te}$  alloy, *Applied Physics Letters*, 79, 782-784.
- Mattox, D.M., 1996, Surface effects on the growth, adhesion and properties of reactively deposited hard coatings, *Surf. Coat. Technol.*, 81, 8.
- Mattox, D.M., 1998, *Handbook of PVD processing*, William Andrew Publishing-Noyes Publications.
- Martinez, J.L., Martinez, G., Torres-Delgado, G., Guzman, O., Del Angel, P., Zebya Angel, o. and Cozada-Morales, R., 1997 Cubic CdS thin films studied by spectroscopic ellipsometry, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 8, 399-403.
- Mandal, S.K., Chaudhuri, S. and Pal, A.K., 1999, Optical properties of nanocrystalline ZnS films prepared by high pressure magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 350, 209-213.
- Metz, A.W., Ireland, J.R., Ni, J., Poeppelmeier, K.R., Kannewurf, C.R. and Marks, T.J., 2002, New low-Melting Cadmium precursors for the Detailed study of Texture Effects in MOCVD Derived CdO Thin-films, *Materials Research Society Symposium, Texture and Microstructure in Electronic and Magnetic Films*, 721, 165-170.
- Meth, J.S., Zane, S.G., Nunes, G., 2004, Dual insulated-gate field-effect transistors with Cadmium sulfide active layer and a laminated polymer dielectric, *Applied Physics Letters*, 84, 15, 2922-2924.
- McKelvey, J.P., 1966, *Solid state and semiconductor physics*, Harper&Row Ltd., London, 512p.
- Muravjeva, K.K., Kalinkin, I.Q., Aleskovsky, V.B. and Bogomolov, N.S., 1970, *Thin Solid Films*, 5, 7-14.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Murali, K.R., Srinivasan, K. and Trivedi, D.C., 2004, Structural and photoelectrochemical properties of CdSe thin films deposited by the vacuum evaporation technique, *Materials Science and Engineering,(B)*, 111, 1-4.
- Moreno, L.C., Sandino, J.W., Hernandez, N. and Gordillo, G., 2000, PH effect on the deposition of CdS on ZnO and SnO<sub>2</sub>F substrates by CBD method, *Phys. Stat. Sol.(B)*, 289-292.
- Mott, N. and Davis, E., 1971, *Electronic processes in non-crystalline materials*, Clarendon Press, London, 438p.
- Nag, B.R.,1980, *Electron transport in compound semiconductors*, Springer-Verlag, Berlin Heildelberg, New York, 461p.
- Neaman, D.A., 1997, *Semiconductor physics and devices*, Richard D. Irwin, a Times Mirror Higher Education Group, Inc. Company, USA, 618p.
- Niraula, M., Mochizuki, D., Aoki, T., Nakanishi, Y. And Hataraka, Y., 2000, Low temperature growth and n-type doping of CdTe by the remote-plasma assisted MOCVD method, *Vacuum*, 59, 678-685.
- Nishio, M., Guo, Q., and Ogawa, H., 1999, Ohmic contacts to p-type ZnTe using electroless Pd, *Thin Solids Films*, 343-344, 508-511.
- Nuss, M.C., Kisker, D.W., Smith, P.R. and Harvey, T.E., 1989, Efficient generation of 480 fs electrical pulses on transmission lines by photoconductive switching in metalorganic chemical vapor deposited CdTe, *Applied Physics Letters*, 54, 57-59.
- Omar, M.A., 1975, *Elementary solid state physics: Principles and applications*, Addison-Wesley Publishing Company, USA, 669p.
- Olinda, C., Monteiro, Trindade, T., park, J.h., Brien, P.O., 2003, The LP-MOCUD of CdS/Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> bilayers using single-molecule precursors, *Materials Letters*, 58, 119-122.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Panatarani, C.I., Lenggoro, W. and Okuyama, K., 2004, The crystallinity and the photoluminescent properties of spray pyrolyzed ZnO phosphor containing  $\text{Eu}^{2+}$  and  $\text{Eu}^{3+}$  ions, *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 65, 1843-1847.
- Pankove, J.I., 1971, *Optical processes in semiconductors*, Princeton Press, New Jersey.
- Pankove, J.I., 1975, *Optical process in semiconductors*, Dover, New York, 35.
- Palafox, A., Romero-parades, G., Maldonado, A., Asomoza, R., Acosta, D.R. and Palacios-Gomez, J., 1998, Physical properties of CdS and CdS:In thin films obtained by chemical spray over different substrates, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 55, 33-41.
- Park, M.R., Anderson, W.A., Jeon, M., And Luo, H., 1999, Ohmic contacts to n-type and p-type ZnSe, *Solid-State Electronics*, 43, 113-121.
- Polyakov, A.M., 1985, *Semi-conductors made simple*, Mir Publishers Moscow, Russia, 240p.
- Rawaiah, K.S., Raja, V.S. and Sharon, M., 1998, Optical and structural investigations on spray deposited CdS Films, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 9, 261-265.
- Rajavel, D., Conte, A. and Summers, C.J., 1994, Pyrolysis characteristics of iodine precursors for gas source n-type doping of II-VI compounds, *Journal of Crystal Growth*, 140, 327-335.
- Ramaiah, K.S., Su, V.K., Chang, S.J., Juang, F.S., Ohdaira, K., Shiraki, Y., Liu, H.P., Chen, I.G. and Bhatnagar, A.K., 2001, Characterization of Cu doped CdSe thin films grown by vacuum evaporation, *Journal of Crystal Growth*, 224, 74-82.
- Ramamoorthy, K., Jayachandran, M., Sankaranarayanan, K., Misra, P., Kukreja, L.M. and San Jee Viraja, C., 2004, Development of a novel high speed (electron mobility) epi-n-ZnO thin films by L-MBE for III-V opto-electronic devices, *Current Applied Physics*, 4, 679-684.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Reddy, K.T.R., Shanthini, G.M., Johnston, D. and Miles, R.W., 2003, Highly transparent and conducting CdO films grown by chemical spray pyrolysis, *Thin Solid Films*, 427, 397-400.
- Rizzo, A., Tagliente, M.A., Caneve, L. and Scaglione, S., 2000, The influence of the momentum transfer on the structural and optical properties of ZnSe thin films prepared by r.f. magnetron sputtering, *Thin Solid Films*, 368, 8-14.
- Rinaldi, F., 2002, Basic of Molecular Beam Epitaxy, Annual Report, University of Ulm.
- Ruxandra, V. and Antohe, S., 1998, The effect of the electron irradiation on the electrical properties of thin polycrystalline CdS layers, *J. Apply. Phys.*, 84, 722-733.
- Rohatgi, A., Sudharsanan, R., Ringel, S.A. and Macdougall, M.H., 1991, Growth and process optimization of CdTe and CdZnTe polycrystalline films for high efficiency solar cells, *Solar Cells*, 30, 109-122.
- Sahu, S.N., 1995, Chemical deposition of CdS Films, structure, RBS, PIXE, optical and photoelectrochemical solar cell studies, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 6, 43-51.
- Sato, D., Kashiwaba, V., Haga, K., Watanabe, H., Zhang, B.P. and Segawa, U., 2004, Effect of ZnD buffer layer prepared by rf sputtering on heteroepitaxial growth of high-quality ZnO films, *Vacuum*, 74, 601-605.
- Senthil, K., Mangalaraj, D., Narayandass, K.S. and Adachi, S., 2000, Optical constants of vacuum-evaporated cadmium sulphide thin films measured by spectroscopic ellipsometry, *Materials Science and Engineering,(B)*, 78, 53-58.
- Smith, W.F., 1990, Principles of materials science and engineering, McGraw-Hill, Inc., USA, 864p.
- Smith, R.W., 1954, Properties of Ohmic Contacts to Cadmium Sulfide Single Crystals, *Phys. Rev.*, 97, 1525.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Spanulescu, I., Baltateanu, N., Abdi, I.Z. and Khalass, J., 1986, Effect of electron irradiation on electrophysical properties of CdSe and CdS Thin Films, *Thin Solid Films*, 143, 1-6.
- Subramanian, V., Ramprakash, Y., Lakshmanan, A.S., 1988, Thin Film preparation by spray-pyrolysis for solar cells, *Materials Chemistry and Physics*, 15, 385-395.
- Streetman, B.G., 1980, *Solid state electronics devices*, Second Edition, Prentice-Hall Inc., 07632, 461p.
- Sze, S.M., 1981, *Physics of semiconductor devices*, John Wiley&Sons Inc., USA, 868p.
- Tan, S.T., Chen, B.J., Sun, X.W., Hu. X., Zhang, X.H. and Chua, S.J., 2005, Properties of polycrystalline ZnO thin films by metal organic chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth*, 281, 571-576.
- Traversa, M., Lovergine, N., Prete, P., Yoshino, K., Luccio, T.D., Scalia, G., Morales, P. and Mancini, A.M., 2004, Effects of substrate treatment and growth conditions on structure, morphology and luminescence of homoepitaxial ZnTe deposited by metalorganic vapor phase epitaxy, *Journal of Applied Physics*, 96, 1230-1237.
- Valyomano, A.G., Vijayakumar, K.P. and Purushothaman, C., 1990, Effect on annealing temperatures on the electrical transport properties of spray-pyrolysed CdS Films, *Journal of Materials Science Letters*, 9, 1025-1027.
- Vazquezluna, J.G., Zehe, A. And Zelaya-Angel, O., 1999, Chemical CdS thin film deposition influenced by external electric and magnetic fields, *Cryst. Res. Technol.*, 34, 949-958.
- Venkatachalam, S., Mangalaraj, D., Narayandass, K.S., Kim, K. And Yi. J., 2005, Structure, optical and electrical properties of ZnSe thin films, *Physica,(B)*, 358, 27-35.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam ediyor)**

- Vigil, O., Zelaya-Angel, O., Rodriguez, U. and Morales-Acevedo, A., 1998, Electrical characterization of chemically deposited CdS thin films under magnetic field application, *Phys, Stat, Sol.(A)*, 167, 143-150.
- Vigil, O., Vaillant, L., Cruz, F., Santana, G., Morales-Acevedo, A. and Contreras-Puente, G., 2000, Spray pyrolysis deposition of cadmium-zinc oxide thin films, *thin solid films*, 261-362,
- Zahn, D.R.T., Kudlek, G., Rossow, U., Hoffmann, A., Broser, I. And Richter, W., 1994, Phase transition from the cubic to the hexagonal modification in thin CdS films on InP(110), *Adv. Mater. Opt. Electron.*, 3, 11-14.
- Zaveryukhin, B.N., Mirsagatov, S.A., Zaveryukhira, N.N., Volodarski, V.V. and Zaveryukhina, E.B., 2003, Cadmium Telluride Thin-film detectors of Nuclear Radiation, *Technical Physics letters*, 29, 959-962.
- Zhang, X.T., Liv, Z., Leung, Y.P., Li, Q. and Hark, S.K., 2003, Growth and luminescence of zinc-blende-structured ZnSe nanowires by metal-organic chemical vapor deposition, *Applied Physics Letters*, 83, 5533-5535.
- Zhao, J.L., Li, X.M., Bian, J.M., Yu, W.D. and Zhang, C.Y., 2005, Growth of nitrogen-doped p-type ZnO films by spray pyrolysis and their electrical and optical properties, *Journal of Crystal Growth*, 280, 495-501.