

**TUZAKLI YAPILARDA ELEKTRİKSEL
İLETKENLİĞİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ**

Murat KARA
Yüksek Lisans Tezi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Ağustos-2005

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Murat Kara 'nın "Tuzaklı Yapılarda Elektriksel İletkenliğin Sıcaklıkla Değişimi". başlıklı Fizik Anabilim Dalındaki, Yüksek Lisans tezi 28/07/2005. tarihinde, aşağıdaki jüri tarafından Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

	Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	: Öğr.Grv.Dr. A.Şenol AYBEK
Üye	: Yard.Doç.Dr. Salih KÖSE
Üye	: Yard.Doç.Dr. Metin KUL

Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun
..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUZAKLI YAPILARDA ELEKTRİKSEL İLETKENLİĞİN SICAKLIKLA DEĞİŞİMİ

Murat KARA

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Öğr.Grv.Dr. A.Şenol AYBEK

2005, Sayfa 58

Bu çalışmada, ısıll yolla uyarılmış akım tekniği incelendi. Isıll yolla uyarılmış akım tekniği yarı iletkenlerdeki yük taşıyıcılarının belirlenmesinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Isıll yolla uyarılmış akım ölçümlerinden elde edilen bilgilerin incelendiği çeşitli teknikler vardır. Bunlar, dengemsi analiz, ısıtma hızı, pik şekli ve akımdaki ilk artış yöntemleridir. CdS yarı iletken filminin aktivasyon enerji değerleri akımdaki ilk artış ve pik şekli yöntemleri kullanılarak belirlenmiştir. Aktivasyon enerji değerlerinin 0,017-0,143 eV arasında yer aldığı hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Akımdaki İlk Artış Metodu, Aktivasyon Enerjisi , AS ve RC Metodları, Pik Şekli Metodu, TSC ve TL Yöntemleri

ABSTRACT**Master of Science Thesis****THE VARIATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY BY THE
TEMPERATURE IN STRUCTURE WITH TRAPS****Murat KARA****Anadolu University
Graduate School of Sciences
Physics Program****Supervisor: Dr. A. Şenol AYBEK****2005, 58 pages**

In this study, thermally stimulated current technique (TSC) was studied. Thermally stimulated current is a measurement technique widely used for the investigation of charge carrier traps in semiconductor materials. There are various of techniques for determining the trap parameters obtained from the TSC. These are quasiequilibrium analysis, heating rate, peak shape and initial rise methods. The Activation energies of CdS semiconductor films were determined from using initial rise and peak shape techniques. Various trapping levels at CdS films have been found to lie between 0,017 and 0,143 eV .

Keywords: Activation Energies of Traps, , AS and RC Methods, Initial Rise Method, Peak Shape Method, TSC and TL Methods.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın gerçekleşmesini sağlayan, bilimsel katkılarını gördüğüm ve tecrübelerinden yararlandığım, saygı değer hocam Öğretim Görevlisi Dr. Ahmet Şenol AYBEK'e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın her aşamasında yardım ve desteklerini esirgemeyen Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Katıhal Fiziği ABD Başkanı Öğretim Üyesi Prof.Dr. Muhsin ZOR'a, Yard.Doç.Dr. Metin Kul'a, ayrıca Fizik Bölümü Başkanlığına ve Katıhal Fiziği Anabilim Dalına teşekkürlerimi sunarım.

Yaşamım boyunca ihtiyaç duyduğum her an yardımına koşan canım annem Fatma KARA'ya ve canım babam Tevfik KARA'ya en içten sevgi, saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Murat KARA

Ağustos-2005

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	viii
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
1.1. Giriş	1
1.2. CdS Bileşiği	3
1.3. Amaç	6
2. YARIİLETKENLER	7
2.1. Giriş	7
2.2. Katılarda Bant Oluşumu	8
2.3. Bant Yapısı	10
2.4. Has (Intrinsic) Yarıiletkenler	11
2.5. Katkılı (Impurity) Yarıiletkenler	12
2.5.1. n-tipi Yarıiletkenler	12
2.5.2. p-tipi Yarıiletkenler	14
2.6. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik	17
3. TUZAKLI YAPILARDA SICAKLIĞA BAĞLI	
ELEKTRİKSEL İLETKENLİK	22
3.1. Giriş	22
3.2. Isıl Yolla Uyarılmış İletkenlik (Thermally Stimulated Conductivity, TSC)	22

3.2.1. Tek Moleküllü Birleşme (Monomolecular Recombination)	25
3.2.2. Hızlı Yeniden Tuzaklanma (Fast Retrapping)	26
3.2.3. Intermediate Retrapping	27
4. BİR BOYUTLU SİSTEMDE TAŞIYICILARIN TUZAKLANMASI	28
4.1. Giriş	28
4.2. Sabit Aralık ve Değişken Aralık Modelleri	28
5. AUTO-SEPARATION (AS) VE RECONSTRUCTION (RC) METODLARI	33
5.1. Giriş	33
5.2. AS ve RC Metodları	33
6. ISIL YOLLA UYARILMIŞ AKIM İLE AKTİVASYON ENERJİLERİNİN BELİRLENMESİ	35
6.1. Giriş	35
6.2. Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi Yöntemleri	37
6.2.1. Dengemsi Analiz Yöntemi	37
6.2.2. Isıtma Hızı Yöntemi	38
6.2.3. Eğri Uyumu Yöntemi	39
6.2.4. Pik Şekli Yöntemi	40
6.2.5. Akımdaki İlk Artış Yöntemi	41
7. CdS YARIİLETKEN BİLEŞİĞİ İÇİN ÇEŞİTLİ YÖNTEMLERLE HESAPLANAN TUZAK ENERJİ DEĞERLERİ	44
7.1. Giriş	44
7.2. Akımdaki İlk Artış Metodundan Hesaplanan Tuzak Enerji Değerleri	46
7.3. Pik Şekli Metodundan Hesaplanan Tuzak Enerji Değerleri	47
8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	49
KAYNAKLAR	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Elmas kristalinde enerji bantlarının oluşumu (McKelvey 1966)	9
2.2. Has bir yarıiletkenin (a) $T=OK$ 'de (b) $T>OK$ 'de şematik enerji bant diyagramı (McKelvey 1966)	10
2.3. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi	11
2.4. P atomu katkılanan n-tipi Si kristali ve iletim elektronunun oluşumu (Smith 1990)	13
2.5. n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı	14
2.6. Si kristaline Ga atomu katkılanması (Neamen 1997)	15
2.7. p-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı	16
2.8. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri	17
2.9. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişimi.....	21
4.1. Sabit aralık modeli (Fixed distance model)	30
4.2. Değişken aralık modeli (Variable distance model)	30
5.1. Naphthacene katkılı Anthracene kristalinde sonuçları özetleyen enerji diyagramı	34
6.1. Bir tek tuzak seviyesine sahip materyal için TSC eğrisi (Chen ve Kirsh 1981)	35
6.2. İki farklı tuzak enerji seviyesine sahip materyal için TSC eğrisi (Aydınlı ve ark 2003)	36
6.3. $\log I$ 'nın $(1/T)$ 'ye karşı grafiği	42
7.1. CdS yarıiletken filminin TSC eğrisi (Zor ve ark 2004)	44
7.2. CdS yarıiletken filminin TSC eğrisine, Gaussian enerji dağılımına uygun eğri uydurma tekniği uygulanarak elde edilen pikler	45
7.3. CdS yarıiletken filmi için akım $\alpha 1000/T$ grafiği	46

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
2.1. Çeşitli yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki mobiliteleri (Omar 1975 ve Lide 1998)	18
7.1. CdS yarıiletken filminin akımdaki ilk artış ve pik şekli yöntemlerine göre hesaplanan tuzak enerji değerleri.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

E_t	:	Tuzak enerji seviyesi
E_c	:	İletim bandının minumum enerji seviyesi
E_v	:	Valans bandının maksimum enerji seviyesi
E_g	:	Yasak enerji aralığı
E_H	:	Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisi
E_F	:	Yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
E_{Fi}	:	Has yarıiletkenin Fermi enerji seviyesi
E_a	:	Akseptör enerji seviyesi
E_d	:	Donör enerji seviyesi
I	:	Akım şiddeti
J_{TSC}	:	Isıl yolla uyarılmış akım yoğunluğu
J	:	Akım yoğunluğu
N_c	:	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_v	:	Valans bandındaki etkin durum yoğunluğu
N_n	:	Boş elektron tuzaklarının yoğunluğu
N_A	:	Akseptör yoğunluğu
N_D	:	Donör yoğunluğu
P	:	Kaçış olasılığı
T_m	:	Pik sıcaklığı
T_o	:	Tuzakların doldurulduğu mutlak sıcaklık
T	:	Mutlak sıcaklık
e	:	Elektron yükü
eV	:	Elektron volt
h	:	Planck sabiti
k	:	Boltzman sabiti
m_e^*	:	İletim bandındaki elektronların etkin kütlesi
m_p^*	:	Valans bandındaki hollerin etkin kütlesi
n	:	İletim bandındaki elektron yoğunluğu
n_t	:	Tuzak yoğunluğu
n_m	:	$T=T_m$ sıcaklığındaki serbest elektron yoğunluğu

n_i	:	Has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu
P	:	Valans bandındaki hol yoğunluğu
β	:	Isıtma hızı
ϵ_r	:	Yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti
σ	:	Elektriksel iletkenlik
σ_m	:	$T=T_m$ sıcaklığındaki elektriksel iletkenlik
σ_i	:	Has yarıiletkenler için elektriksel iletkenlik
σ_k	:	Katkılı yarıiletkenler için elektriksel iletkenlik
σ_n	:	elektron yakalama etkin kesiti
σ_p	:	Hol yakalama etkin kesiti
σ_R	:	Birleşme etkin kesiti
ν	:	Kaçış frekansı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

1.1. Giriş

Yarıiletken materyallerde tuzak parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan ısıll yolla uyarılmış akım (thermally stimulated current, TSC), termoluminesans (thermoluminescence, TL), ısıll yolla uyarılmış elektron yayılımı (thermally stimulated electron emission, TSEE), ısıll yolla uyarılmış depolarizasyon akımı (thermally stimulated depolarization current, TSDC), ısıll yolla kütle değişimi (thermogravimetry, TG) ve ısıll yolla kütle değişim hızı (derivate thermogravimetry, DTG) yöntemleri bilinen en önemli yöntemlerdir (Lewandowski ve ark 1990; Topic ve Katovic 1994; Aranguren ve ark 2003; Chen ve Kirsh 1981).

Vakum altında bulunan bir yarıiletken yeteri kadar düşük bir sıcaklıkta tutulduğunda yarıiletkende bulunan serbest yükler yarıiletkenin yasak enerji aralığında bulunan tuzaklar tarafından hapsedilir. Tuzaklanmış taşıyıcılar bu düşük ısıll enerji ve dolayısı ile düşük sıcaklıkta dışarıdan uyarı olmaksızın serbest kalamazlar. Aydınlatma ile uyarı yapıllp, aydınlatma kaldırıldıktan sonra numune sabit ısıllma hızıyla ısılltır. Taşıyıcılar bu ısıll etki ile serbest kalabilir ve tuzaklardan ayrıllarak TL üretebilirler veya bir elektrik alan altında bir akıma katkıda bulunabilirler ki bu da TSC olarak isimlendirilir. Akımın sıcaklığa bağıll olarak değişimi sıcaklık arttıkça bir thermally stimulated glow (TSG) eğrisi veya bir TSC eğrisidir. Bu eğrilerin tepe noktaları tuzak enerji seviyesine, tuzaklanma etkin kesitine (capture-cross section) ve ısıllma oranına bağılldır ve bu yüzden ısıllma oranının değişmesi ile tuzak parametreleri belirlenebilir. TSC için akımdaki ilk artışlar eksponansiyel olduğundan tuzaklanmış taşıyıcıların ısıll olarak serbest kalmalarının olasılığı büyür ve akıma katkıda bulunan serbest taşıyıcılar artar. Diğer taraftan pikin maksimum sıcaklık değerinden sonra sıcaklık artırılmaya devam edilirse tuzaklanmış yüklerin sayısı azalacağından serbest taşıyıcıların azalmasıyla akım azalarak sıfıra geri döner. Vakum altında ve yeteri kadar düşük bir sıcaklıkta tutulan numune aydınlatılarak elektronlar veya holler tuzaklanırsa ve eğer bu yükler sıcaklığın arttırılmasıyla iletim bandına veya valans bandına

geçerlerse numunenin iletkenliğinde doğrudan bir artış olur. İletkenlikte gözlenen bu artış TSC eğrisinde bir pik olarak gözlenir.

TL, yarıiletken veya yalıtkan gibi katı bir numunemin düşük bir sıcaklıkta aydınlatılıp ısıtılmasından sonra gözlenir. Aydınlatma X ışınları, parçacık bombardımanı ve UV ışınları ile yapılmaktadır.

Radyasyon yoluyla numune tarafından absorplanan enerjinin bir kısmı ısıtma süresince salınır. Aydınlatma ile elektronlar, valans bandından iletkenlik bandına uyarılırlar. Uyarılan elektronların çoğu çok kısa bir zaman sonra ($\sim 10^{-8}$ s) valans bandına geri döner. Aydınlatma süresince kaydedilen bu geçişler TL'de artışa neden olur. İletkenlik bandından valans bandına doğru olan bu geçişlerden bazıları yasak enerji aralığı bölgesinde bulunan tuzaklar tarafından yakalanır. Tuzaklanan her bir elektron valans bandında bulunan bir hol ile birleşebilir. Bu olay elektron-hol birleşmesi olarak isimlendirilir. Valans bandı tamamen elektronlarla dolu olduğunda tuzaklanmış elektronun valans bandına doğrudan geçişi mümkün değildir. Bununla birlikte tuzaklanmış elektron (veya hol) ısı uyarılma sonucunda iletim bandına (veya valans bandına) geçebilir. Sonuç olarak kristal içinde tuzaklanmış yükler zıt işaretlileri ile birleşirler. Mümkün olan birleşme yeri, birleşme merkezi olarak adlandırılır. Eğer aydınlatma sonucunda birleşmeler varsa numune ısıtıldıkça TL pikleri gözlenir.

Bir numunenin TSEE ölçümleri için numune vakum ortamında bulunan bir elektroda bağlanır. Tüp içindeki diğer bir elektrot numuneden belli bir uzaklıkta bulunur. Numune TSC ve TL metotlarında olduğu gibi bir T_0 sıcaklığında x-ışınları veya UV ışınları gibi ışınlarla aydınlatılır. İki elektrot arasına bir potansiyel fark uygulandıktan sonra numunenin bağlı bulunduğu elektrotta potansiyel düşmesi oluşur. Numune ısıtılırken devreden geçen akım ölçülür ve kaydedilir. Aydınlatma süresince elektronlar tuzak enerji seviyelerindeki tuzaklar tarafından tuzaklanır ve bu elektronlar ısıtma sonucunda tuzaklardan kurtulmaya başlayınca numuneden salınırlar ve ivmelenerek pozitif elektroda giderler. Bu durum TSC ve TL piklerine benzer bir TSEE piki meydana getirir. TSEE pikinin şekli de TSC ve TL piklerindeki gibi, elektron tuzaklama seviyeleri hakkında bilgi verir. TSEE ve TSC arasındaki en önemli fark TSEE'de numuneden sadece elektronların salınabilmesi, buna karşılık hollerin salınamamasıdır. Bu durumda aynı anda yapılan TSEE ve TSC (veya TL) ölçümleri ile elektron ve holler

arasındaki serbest hareketler ayırt edilebilir. TSEE metodunun önemli dezavantajı ise numune yüzeyinde meydana gelebilecek oksitlenme, su buharı gibi oluşumlardır.

TSDC yönteminde T_0 sıcaklığında polarize edilmiş numune ısıtma süresince depolarize edilir ve bu durumda akım ölçülerek kaydedilir. Bu metodun deneysel sistemi, TSC metodunun deneysel sistemine benzerdir. Numunenin ön ısıtma işlemi yüklerin tuzaklanmasını amaçlamaz, fakat elektrik polarizasyonlarına neden olur. Bu işlem, numune yüksek sıcaklıktan düşük sıcaklığa soğutulurken dışarıdan bir elektrik alan uygulanarak gerçekleştirilir. T_0 sıcaklığında elektrik alan ortadan kaldırılır ve numunenin elektrotları hassas bir akım dedektörüne bağlanır. Elektrik alanın ortadan kaldırılmasıyla polarizasyonun tamamı ortadan kalkmaz. Bu polarizasyon, dipolar kusurlara veya düzgün olmayan yük dağılımına neden olur. Eğer numune ısıtılarak sıcaklık yükseltirse, taşıyıcılar tuzaklardan ayrılmaya başlar veya yük çiftleri (dipoller) serbest olarak dönmeye başlarlar. Bu hareket denge durumuna kadar devam eder. İlk TSDC çalışmaları Bucci ve grubu tarafından yapılmıştır. Bucci ve grubu dipol hareketlerine neden olan akım-sıcaklık değişimlerinin TL'de elde edilen akım-sıcaklık değişimleriyle aynı olduğunu ortaya koymuşlardır. Bu nedenle TL pikleri için geliştirilen yöntemler TSDC pikleri için de kullanılabilir. TSDC eğrisinden elde edilen bilgiler kristalin dielektrik sabitinin hesaplanmasında kullanılmaktadır.

TG eğrisi, numunenin kütlesinin artması veya azalmasıyla değişir. Bu yöntemde numunenin kütlesi gazların adsorpsiyonu ve buharın absorpsiyonu ile artar, numunenin süblimleşmesi ve kimyasal olarak numuneden gazın salınması ile azalır. Bu kütle değişimlerinden yararlanılarak TG eğrisi, bu eğrinin sıcaklığa veya zamana göre birinci türevi alınarak DTG eğrisi elde edilir. DTG eğrisi pik tarafından belirlenen kütledeki, kayıp ve kazancı ortaya koyar (Chen ve Kırsh 1981).

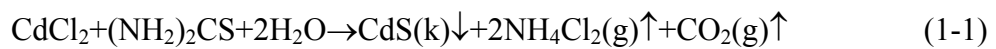
1.2. CdS Bileşiği

Kadmiyum sülfür (CdS) yarıiletken bileşiği periyodik tablonun II.grup elementlerinden olan Cd ve VI.grup elementlerinden olan S'den oluşan bir II-VI

grubu bileşiktir. CdS filmlerinin tek kristali ya kübik (zinblend) fazda ya da hekzagonal (wurtzite) fazda kristalize olur (Kobayashi ve ark 1979; Spanulescu ve ark 1986; Krishkumar ve ark 1987; Karanjai ve Dasgupta 1987; Ebenezer ve ark 1988; Das ve Sahu 1988; Lozada-Morales ve Zelaya-Angel 1996; Özsan ve ark 1996; Bhattacharyya ve Carter 1996; Cui ve Xi 1996; Pal ve ark 1997; Martinez ve ark 1997; Ileperume ve ark 1998; Ramaiah ve ark 1998; Ricolleau ve ark 1998; Al-Kuhaimi 1998; Ray ve ark 1998 ve Palofox ve ark 1998). Bu filmlerin polikristali her iki fazda da kristalize olabilir.

CdS yarıiletken filmi, vakumda buharlaştırma, RF sputtering, spray-pyrolysis ve kimyasal buhar depolama gibi çeşitli yöntemlerle elde edilir (Hayashi ve ark 1988; Dawar ve ark 1990; Touskova ve ark 1992; Sahu 1995 ve Oumous ve Hadiri 2001).

CdS yarıiletken filmi, püskürtme yöntemiyle en kolay elde edilen yarıiletken tabakalardan biridir. CdS formundaki yarıiletken filmlerin elde edilmesinde $CdCl_2$ ve tioüre veya N-N dimetil tioüre kullanılır. Çözeltiler aynı oranda karıştırılıp ısıtılan taban üzerine püskürtüldüğünde, açığa çıkan Cd ve S atomları sıcak taban üzerinde bileşerek CdS filmini oluştururlar. CdS filmi ilk olarak 1966'da Skartman ve Chamberlin tarafından püskürtme yöntemiyle elde edilmiştir. Isıtılan taban üzerine püskürtülen $CdCl_2$ ve $CS(NH_2)_2$ karışım çözeltisinin kimyasal reaksiyonu,



şeklindedir (Ma ve ark 1977; Krunks ve ark 1986; Krishkumar ve ark 1987; Bougnot ve ark 1986; Das ve Ghosh 1989; Brown ve Bates 1990 ve Ramaiah ve ark 1998).

CdS bileşiğinin elektriksel özellikleri, elektronik devrelerde potansiyel uygulamaları sebebiyle önemli yer tutar. CdS filminin, fotovoltaik devrelerde yüksek potansiyele sahip olduğu söylenebilir.

CdS filmi yaygın olarak güneş pillerinde tercih edilmektedir. Yarıiletken CdS ince filmlerindeki azınlık taşıyıcıların ömrü, güneş pillerinin dizaynında baskın bir parametredir (Sze 1981). Güneş pillerinin verimliliğinin %10 civarında

olduğu bilinmektedir. CdS filmleri güneş pillerinde pencere materyali olarak kullanılmaktadır (Kim ve ark 1993).

CdS silisyuma nazaran daha kuvvetli absorplayıcı bir madde olduğundan, ışık kısa mesafede absorplanabilir. Bu özellik CdS'li pillerin silisyumdan yapılmış olanlara nazaran daha ince olmalarını gerektirir. CdS filmi, silisyum pillerde olduğu gibi eriyikten büyütme tekniği ile elde edilebilir ve daha sonra p-tipi bakır atomu ile katkılanarak güneş pili olarak kullanılabilir.

CdS filmlerinin direkt bant geçişine sahip oldukları belirtilmektedir (Kazmerski ve ark 1972; Das ve Sahu 1988; Kim ve ark 1993; Özsan ve ark 1996; Pal ve ark 1997; Chavez ve ark 1997; Günal ve Parlak 1997; Ramaiah 1998 ve Ruxandra ve Antohe 1998). CdS filminin oda sıcaklığındaki yasak enerji aralığı değeri 2,42-2,5eV arasında değişmektedir (Nag 1980; Blakemore 1985; Kittel 1986; Das 1993; Kim ve ark 1993; Sahu 1995; Martinez ve ark 1997; Chavez ve ark 1997; Lide 1998; Ileperuma ve ark 1998 ve Jackson ve Schröter 2000, Mahdavi ve ark 2005, Ximello-Quiebrasa 2005). CdS bileşiklerinin oda sıcaklığındaki iletkenlik değerleri 1×10^{-4} - $1 \times 10^2 (\Omega \cdot \text{cm})^{-1}$ arasında (Kazmerski ve ark 1972; Ma ve Bube 1977; Drozdawa ve ark 1991; Touskova ve ark 1992; Günal ve Parlak 1997; Ruaxandra ve Antohe 1998; Ramaiah ve ark 1998; Al-Kuhaimi 1998; Palafox ve ark 1998; Guillen ve ark 1998; Bilgin 1998; Penthkar ve ark 1999; Su ve Choy 2000; Zinoview ve Angel 2001; Narayanan ve ark 2001 ve Rishova ve Rishov 2001), mobilite değerleri 1×10^{-1} - $90 \text{cm}^2/\text{Vs}$ arasında (Kazmerski ve ark 1972; Ma ve Bube 1977; Nag 1980; Günal ve Namikoğlu 1990; Dawar ve ark 1991; Günal ve Parlak 1997 ve Ruaxandra ve Antohe 1998), serbest taşıyıcı yoğunluk değerleri 10^{15} - 10^{20}cm^{-3} arasında (Kazmerski ve ark 1972; Dawar ve ark 1991; Chavez ve ark 1997; Günal ve Parlak 1997; Ruaxandra ve Antohe 1998; Maedo ve ark 1998; Mahmoud ve ark 2000; Chenthamarai 2000; Ullrich ve ark 2001; Schon ve ark 2001 ve Alcober ve Bilmes 2002), tuzak enerji seviyesi 0,2-0,8eV arasında (Partain 1988; Ruxandra ve Antohe 1998 ve Alcober ve Bilmes 2002) ve tuzak yoğunluğu 10^{14} - 10^{18}cm^{-3} arasında (Partain 1988; Ruxandra ve Antohe 1998 ve Alcober ve Bilmes 2002) değişmektedir.

1.3. Amaç

Bu çalışmada, yarıiletken materyallerde materyalin yasak enerji aralığında yer alan tuzakların, sıcaklığa bağlı olarak elektriksel iletkenlik üzerine etkilerini incelemek ve CdS yarıiletken filminin daha önce elde edilmiş akım-sıcaklık verilerini akımdaki ilk artış, Gaussian eğri uyumu ve pik şekli yöntemlerine uygulayarak bazı tuzak parametrelerini

2. YARIİLETKENLER

2.1. Giriş

Yarıiletkenlerin tarihi Edmond Becquerel ve Faraday'a kadar uzanır. 1839'da Edmond Becquerel, aynı elektrolit içine batırılmış iki elektrottan biri üzerine ışık düşürüldüğü zaman elektrotlar arasında bir potansiyel farkın meydana geldiğini gözlemiştir. 1883 yılında, Faraday gümüş sülfatın direncinin sıcaklık ile değişim katsayısının negatif olduğunu keşfetmiştir. 1920'li yıllara doğru galen (PbS) dedektörler hizmete girdi. 1923'de Schottky kuru redresörlerin teorisini yayınladı ve bu teori yarıiletkenlerin teorik incelenmesinde ilk adım oldu (Oral 1979).

Yarıiletkenler, fiziksel özellikleri bakımından, iletkenlerden yalıtkanlara kadar uzanan bölgeyi kapsayan geniş bir bölgede bulunan ve çok çeşitli uygulama alanlarına sahip materyallerdir. Yarıiletkenlerle 1920'li yıllardan beri çalışılmakta olmasına karşın, 1940'larda transistörün icat edilmesiyle yarıiletkenler hayata girmiştir. Bu icat ve buna bağlı gelişen cihazlar nedeniyle, yarıiletkenler katıhal fiziğinde en çok çalışılan konu olmuştur.

Katılar elektriksel ve optik özelliklerine göre; metaller, yarıiletkenler ve yalıtkanlar olmak üzere üç grupta toplanır. Yarıiletkenler $T=0K$ 'de yalıtkanlardır. Fakat yasak enerji aralıkları öyle bir değere sahiptir ki, ısı uyarılmayla erime noktalarının altındaki sıcaklıklarda elektriksel iletkenlik gösterirler. Bu tür materyaller yarıiletkenler olarak bilinir. Yarıiletken ve yalıtkan arasında kesin bir ayırım yoktur. Ancak yarıiletkenlerin en önemli özelliğinin yasak enerji aralıklarının $4eV$ 'tan az olduğu söylenir (Ashcroft ve Mermin 1976). Metallerin (gümüş, bakır vs.) özdirençleri 10^{-8} - $10^{-3}\Omega.cm$ arasında değişirken endüstriyel iyi yalıtkanlar (mika, yağlar, plastik maddeler) için özdirenç 10^8 - $10^{20}\Omega.cm$ arasında değişim gösterir. Bu iki grup arasında yer alan ve özdirençleri 10^{-3} - $10^8\Omega.cm$ arasında değişen materyaller ise yarıiletkenlerdir. Bununla beraber, özdirencin değeri yarıiletkenleri tanımlamak için yeterli değildir. Saf halde yarıiletkenler bir (0 K sıcaklıkta) yalıtkan gibi davranır. Aksine saf olmayan birçok yarıiletken, bazı

metalik iletkenler kadar iletkenlerdir. Sıcaklık yükseldiği zaman öz direncin küçülmesi yarıiletkenleri metallere ayıran bir özelliktir (Oral 1979).

Periyodik tablonun IV.grup elementleri olan Ge ve Si en önemli yarıiletkenlerdir. Bu grupta olan elmas yapısındaki karbon yalıtkandır ($E_g=5,5\text{eV}$). Gri kalay ise yarıiletkenidir. Çünkü yasak enerji aralığı çok küçüktür. IV.grup elementleri kovalent kristallerdir ve atomlar kovalent bağlanma ile bir arada tutulurlar.

Teknolojide oldukça önemli bir yeri olan yarıiletken materyallerin ince ayrıntılar dışında fiziksel özellikleri birbirlerine benzer. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği, sıcaklığa oldukça bağlıdır. Sıcaklık yükseldiğinde, bir yarıiletkenin öz direncinin küçülmesi onun en belirgin özelliğidir. Bu özellik öz direnci esas olarak fonon saçılmasından ileri gelen, metallere göre tamamen farklıdır.

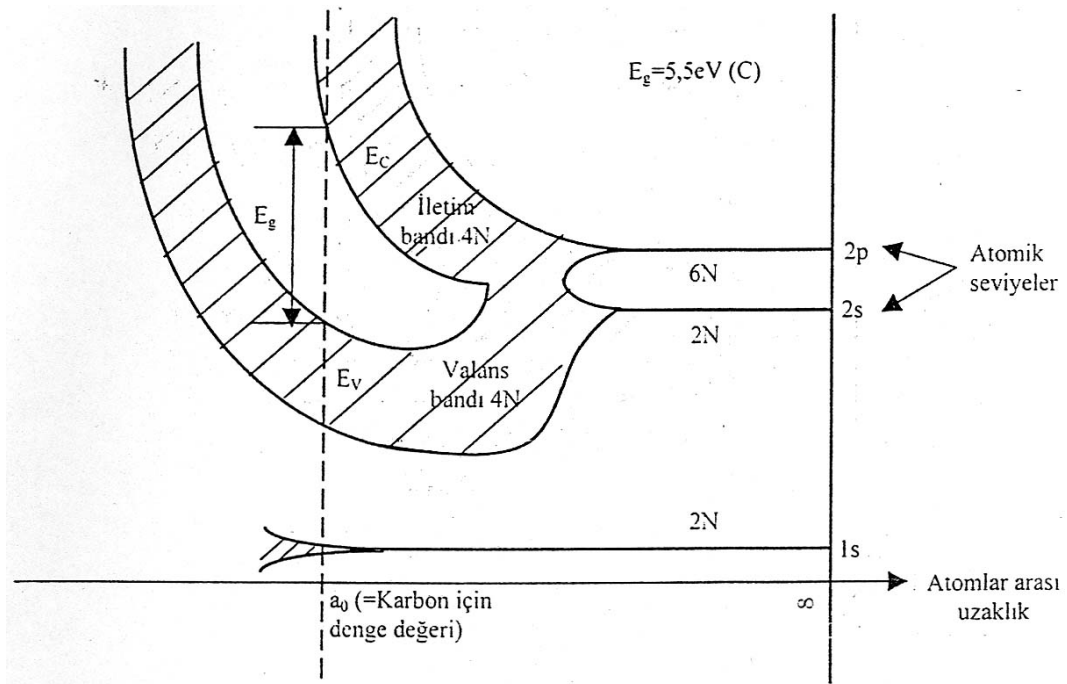
Yarıiletkenlere uygun katkı maddesi katıldığında ise öz direnç küçülür. Metallerde ise yarıiletkenlerin aksine, saflık arttıkça öz direnç küçülür (Dikici 1993).

2.2. Katılarda Bant Oluşumu

Yarıiletkenlerin bant yapısını anlamak için birbirine benzeyen atomların bir katıyı oluşturacak şekilde bir araya geldiklerinde neler olacağını bilmek gerekir. Kristallerde, atomlar periyodik diziler halinde yerleşmişlerdir. Atomların bu şekilde bir arada olmasını aralarında bulunan bazı kuvvetler sağlamaktadır. Kristal örgü içerisinde atomlar birbirlerine çok yakın bulunmalarından dolayı son yörüngelerindeki elektron dalgaları birbirlerini kuvvetli bir biçimde etkilemektedir. Bu son yörüngelerdeki etkileşimler sonucunda, farklı enerji değerlerine sahip bir takım yarılmalar meydana gelir. Bu enerji seviyeleri arasındaki fark $\sim 10^{-19}\text{eV}$ civarındadır (Seeger 1982).

Yarıiletkenlerdeki elektron ve hol iletiminin fiziksel mekanizması Şekil 2.1.'den anlaşılabilir. Yarıiletkenlere karbon, germanyum ve silikon örnek olarak verilebilir. Bu maddeler elmas yapısında kristaller oluştururlar. Şekil 2.1. elmasın enerji bant yapısını göstermektedir. Şekil çizilirken kullanılan diğer

nicelik atomlar arası boşluktur. Bir kristalde N tane izole edilmiş atom olduğunda, $2s$ ve $2p$ atomik seviyeler ilk olarak enerji bantlarına doğru genişler. Atomlar arası mesafe azaldıkça bu bantlar daha da genişler ve sonunda kesişirler. Atomlar arası mesafe daha da küçülürse, bu oluşan geniş ve tek bant tekrar iki banda ayrılır. $2s$ ve $2p$ 'nin ilk durumlarındaki gibi oluşan bu son durumda her enerji bandı $4N$ durumu içerir. Denge durumu olan atomlar arasında a_0 mesafesinde, bu bantlar ΔE genişliğindeki bir yasak enerji aralığı ile birbirinden ayrılmışlardır. Karbonun elektronik yapısı $1s^2 2s^2 2p^2$ şeklinde olduğundan dolayı, $4N$ valans elektronu vardır. Bu elektronlar aşağıdaki iki bandı doldurmak için yeterlidir. Böylelikle kristalin valans bandı oluşur. Yukarıdaki bant iletim bandı olmaktadır. Ayrıca Şekil 2.1.'den anlaşılacağı gibi ΔE , basıncın bir fonksiyonu olacaktır. Hidrostatik gibi yöntemlerle uygulanan basıncın etkisiyle atomlar arası mesafenin azalmasıyla, ΔE artar (McKelvey 1966).

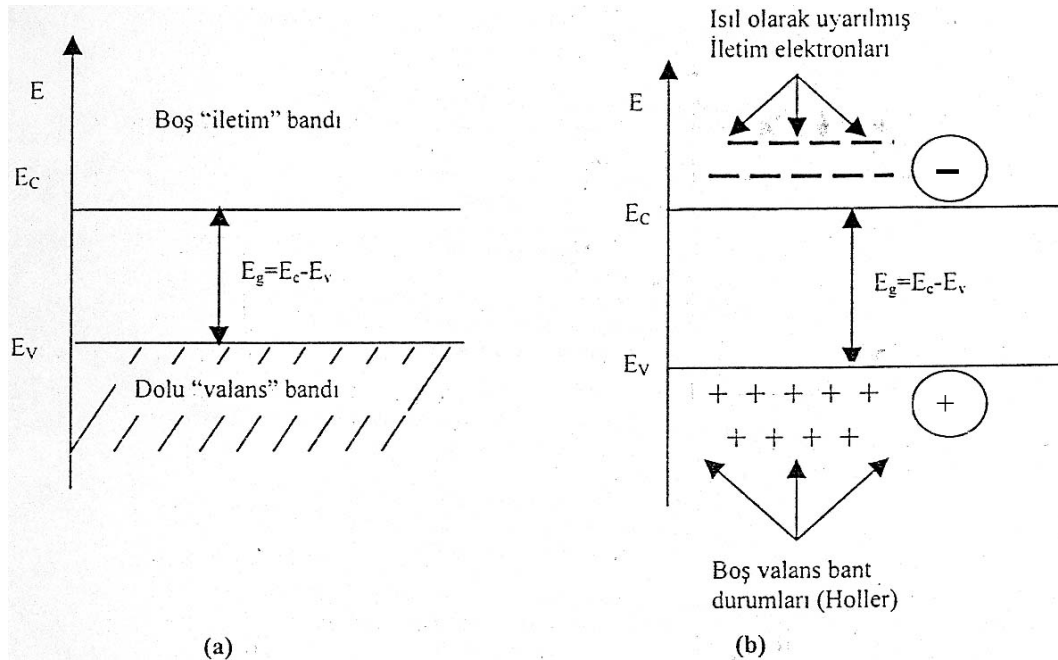


Şekil 2.1. Elmas kristalinde enerji bantlarının oluşumu (McKelvey 1966)

2.3. Bant Yapısı

Bir yarıiletkende $T=0K$ sıcaklıkta elektronik durumları tamamen dolu olan bir valans bandı ile bu banttın yasak enerji aralığı kadar yukarıda tamamen boş olan bir iletim bandı vardır. $T=0K$ 'de yarıiletkenin bütün elektronları valans bandında bulunduğu için elektriksel iletim gözlenmez ve bu sıcaklıkta yarıiletken mükemmel bir yalıtkan gibi davranır (Şekil 2.2.a). Sıcaklık $T=0K$ 'den itibaren yükseltirse, elektronlar, yasak enerji aralığını geçerek, iletim bandına geçerler ve geride hol adı verilen boşluklar bırakırlar. Bu hol valans bandındaki başka bir elektron tarafından doldurulur. Dolayısıyla hol ile elektron yer değiştirmiş olur. Yani pozitif yüklü olan hole valans bandı içinde hareket etmiş olur. Böylece yarıiletkenlerde, iletim bandında elektronlar, valans bandında holler hareket ederek iletme katkıda bulunurlar. Sıcaklığın daha da artmasıyla elektronlar ve hollerin sayısı hızla artar ve bu yarıiletkenlerin önemli özelliklerinden biri olan iletkenliğin sıcaklıkla büyümesi özelliğini açıklar (McKelvey 1966 ve Dikici 1993).

Kristal yapıdaki katıların bant yapısı, kristalin içerisindeki serbest bir elektronun ya da serbest bir holün davranışı hakkında bilgi verir. Böylece, bir katının bant yapısının bilinmesi, o katının elektriksel ve optik özellikleri hakkında bilgi vermesi açısından oldukça önemlidir (Sze 1981).



Şekil 2.2. Has bir yarıiletkenin (a) $T=0K$ 'de (b) $T>0K$ 'de şematik enerji bant diyagramı (McKelvey 1966)

2.4. Has (Intrinsic) Yarıiletkenler

Bir yarıiletken materyalde, valans bandındaki bir elektron ısı uyarılmayla iletim bandına çıkarsa valans bantta bir hole oluşur. Bu nedenle iletim bandındaki her bir elektrona bir hole karşılık gelir. Bu tür yarıiletken materyallere has (intrinsic) yarıiletkenler denir. Bu nedenle has yarıiletkenin valans bandındaki hol yoğunluğu, iletkenlik bandındaki elektron yoğunluğuna eşittir (Omar 1975).

Mutlak sıfır sıcaklıkta bir katının elektronlarının Pauli ilkesine uygun olarak bütün enerji seviyelerini doldurması durumunda en üstteki seviyeye E_F Fermi enerji seviyesi denir. Has yarıiletkenlerde Fermi Enerji seviyesi,

$$E_F = \frac{1}{2} E_g + \frac{3}{4} kT \left(\ln \frac{m_h^*}{m_e^*} \right) \quad (2-1)$$

ifadesiyle verilir. Burada;

E_g , yasak enerji aralığı

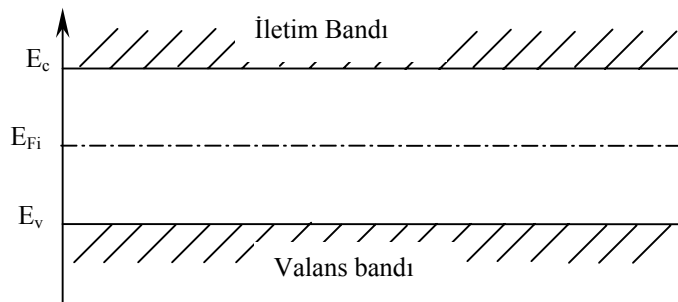
m_p^* , valans bandındaki hollerin etkin kütlesi

m_e^* , iletim bandındaki elektronların etkin kütlesi

k , Boltzman sabiti

T , mutlak sıcaklığı göstermektedir (McKelvey 1966).

Denklemin sağ tarafındaki 2.terim birincinin yanında ihmal edilirse, has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi Şekil 2.3.'te görüldüğü gibi yasak enerji aralığının ortasında yer alır.



Şekil 2.3. Has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi (0K)

Has yarıiletkenlerde iletim bandındaki elektron yoğunluğu (n) valans bandındaki hol yoğunluğuna (p) eşit ve çarpımları sabit olup

$$n=p \quad (2-2)$$

$$n.p=n_i(T) \quad (2-3)$$

ile verilir. Bu yasaya mass-action yasası denir (Sze 1981). Burada n_i , has yarıiletkenler için taşıyıcı yoğunluğu,

$$n_i(T) = 2 \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2-4)$$

ifadesiyle verilir. Verilen bir yarıiletken için yasak enerji aralığı ve etkin kütleler hemen hemen sabit olarak kabul edildiği zaman toplam taşıyıcı yoğunluğu n_i sadece sıcaklığa bağlıdır.

2.5. Katkılı (Impurity) Yarıiletkenler

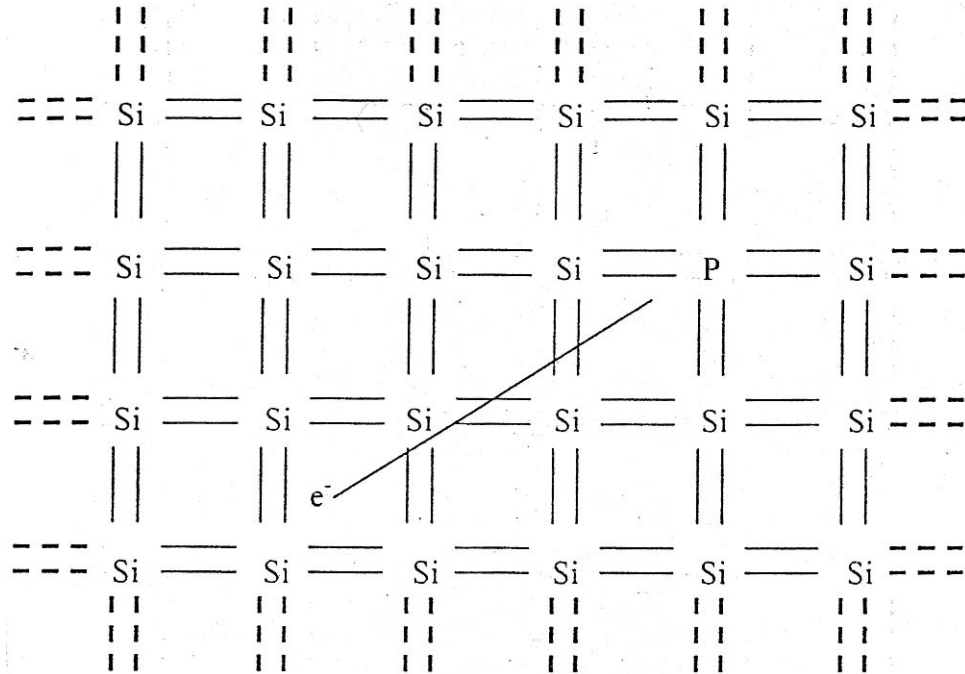
Saf bir yarıiletkende elektron ve hol konsantrasyonları eşittir, çünkü valans bandındaki bir hol sadece bir elektronun iletkenlik bandına uyarılmasıyla oluşturulabilir. Pratikte önemli olan bir çok uygulamada taşıyıcılardan sadece birinin bulunduğu örneklere ihtiyaç duyulur. Uygun safsızlıkların yarıiletkene katılmasıyla, sadece elektronlar veya holleri içinde bulunduran yarıiletkenler hazırlanabilir. Bazı katkılama, yarıiletkenin elektriksel iletkenliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Yarıiletkenler katkılama işleminden sonra n-tipi ya da p-tipi özellik gösterirler (Omar 1975 ve Hook ve Hall 1999).

2.5.1. n-tipi yarıiletkenler

Saf yarıiletken olan silisyum (Si) ve germanyum (Ge)'a katılan katkı atomları bu yapıların özelliklerine etki eder. Silisyum ve germanyum, elmas

yapıda kristalleşir. IV.grup elementi olan silisyum ve germanyum'a belirli yöntemlerle V.grup elementlerinden herhangi birisinin (As, Sb, N, vs.) katkılanmasıyla n-tipi yarıiletken elde edilir. Şekil 2.4.'te silisyum kristaline fosfor (P) atomunun katkılanması görülmektedir. Silisyumun son yörüngesinde dört valans elektronu ve katkı elementi olan fosforun beş valans elektronu vardır. Kristal içerisinde fosfor atomunun dört elektronu silisyum atomunun dört elektronu ile kovalent bağ yapar. Fosfor atomunun beşinci elektronu fosfor atomuna zayıf bir kuvvetle bağlıdır. Bu beşinci elektron ortamdaki ısı enerjisi ile kolayca iyonlaşabilir ve bir ekstra iletim elektronu ortaya çıkar. Fosfor atomu ise dört komşu Si atomu tarafından sıkı bir bağla bağlı olduğu için hareketsizdir.

Elektron yoğunluğu yüksek olduğundan fazla olan yarıiletkenlere n-tipi yarıiletken denir. Kristale katkılanan atomlara elektron verici anlamında donör ve katkılanan atomların bulunduğu enerji seviyesine de donör enerji seviyesi denir. Şekil 2.5.'de n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı gösterilmektedir (Neaman 1977 ve Smith 1990).



Şekil 2.4.P atomu katkılanan n-tipi Si kristali ve iletim elektronunun oluşumu (Smith 1990)

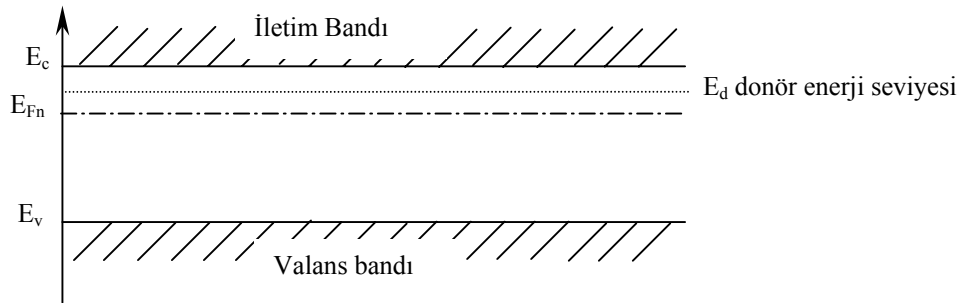
Katkılı yarıiletkende donör enerji seviyesi

$$E_d = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_e^*}{m_e} \right) E_H \quad (2-5)$$

bağıntısı ile verilir. Bu denklemde;

ϵ_r , yarıiletkenin bağıl dielektrik sabiti

E_H , Hidrojen atomunun iyonlaşma enerjisidir (13,6eV)



Şekil 2.5.n-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı

n-tipi yarıiletkenlerde donör atomunun iyonlaşması ile donör enerji seviyesinden iletim bandına çıkan elektronlara karşılık valans bandında holler oluşmaz. Donör yoğunluğuna bağlı olarak, n-tipi yarıiletken materyallerde elektron yoğunluğu hol yoğunluğundan büyük olacağından, elektriksel iletkenliğe elektronlardan gelen katkı daha fazla olacaktır. Bu nedenle, n-tipi yarıiletkenlerde elektronlar çoğunluk taşıyıcıları (n_n) ve holler ise azınlık taşıyıcıları (p_n) dir (Smith 1990).

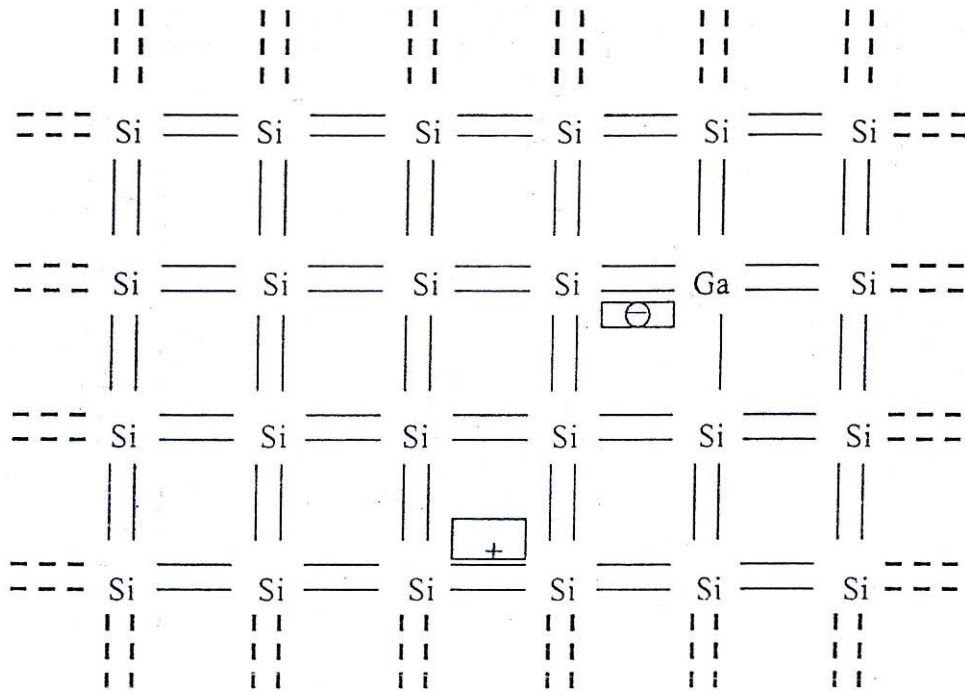
2.5.2. p-tipi yarıiletkenler

Germanyum veya silisyum yarıiletkenine; B, Al, Ga veya In gibi üç değerlikli elementler katkılanırsa, bu elementler ana yarıiletkendeki atomların örgü noktalarına yerleşirler. Şekil 2.6.'daki gibi silisyum tarafından işgal edilmiş olan bir örgü noktasına galyum (Ga) atomunun geçtiği kabul edilsin. Galyum, üç

değerlikli olduğu için; onu saran dört silisyum atomu ile yapacağı dört kovalent bağdan birinde bir elektron eksik kalır. Bu eksiklik bir başka bağdan ayrılan elektron tarafından doldurulur. Böylece elektronun ayrıldığı yerde bir hol oluşur. Sonuçta, elektron kazanan galyum atomu, Ga^- iyonu haline geçer. Oluşan hol, kristal içinde serbestçe hareket edebilir durumdadır. Sonuç olarak; silisyum yarıiletkenine üç değerlikli Ga atomunun uygun oranlarda katkılanmasıyla, yarıiletkendeki hol konsantrasyonu istenen seviyeye çıkarılabilir.

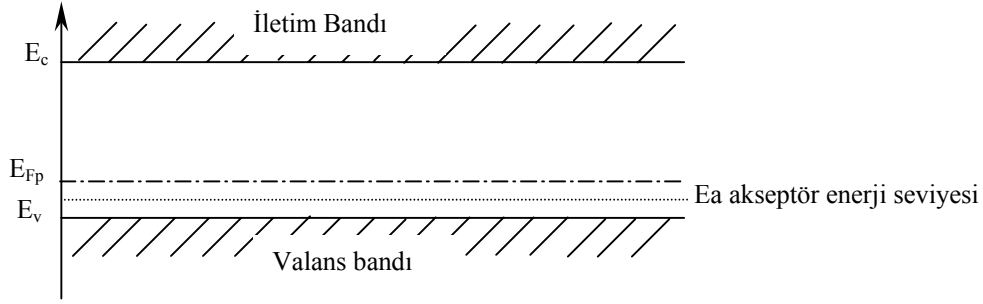
Üç değerlikli katkı atomu tetrahedral bağı tamamlayabilmek için bir elektron kabul etmek zorunda olduğundan, buna akseptör (alıcı) denir.

Akseptör eksi yüklü ve oluşan hol artı yüklü olduğundan, bunlar arasındaki bağlanma enerjisi, vericilerde olduğu gibi hesaplanır. Bu enerji $0,01eV$ basamağındadır ve bütün akseptörler oda sıcaklığında iyonlaşır.



Şekil 2.6.Si kristaline Ga atomu katkılanması (Neamen 1997)

Akseptör enerji seviyesi, valans bandının üstünde yer almaktadır. Bu durum Şekil 2.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. p-tipi bir yarıiletkenin enerji bant diyagramı

Akseptör enerji seviyesi, akseptör atomu tarafından bir holün verilmesi için gerekli enerjiye eşittir. Akseptör iyonlaştığında, yani, bir elektron valans bandından holün bulunduğu yeri dolduracak şekilde uyarıldığında, hol valans bandının en üst enerji seviyesine düşer ve serbest bir taşıyıcı haline gelir. Bu yüzden iyonlaşma olayı, enerji diyagramında elektronun yukarıya doğru çıkışı, holün ise aşağı inişi olarak temsil edilebilir (Dikici 1993).

Donör enerji seviyelerine benzer olarak akseptör enerji seviyeleri,

$$E_a = \left(\frac{1}{\epsilon_r} \right)^2 \left(\frac{m_p^*}{m_p} \right) E_H \quad (2-6)$$

bağıntısı ile verilmektedir.

Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin yeri has yarıiletkenlerdeki durumdan daha farklıdır. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesinin yeri yasak enerji aralığında, katkı atomlarının cinsine ve yoğunluğuna göre değişir. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi,

$$E_F = E_{Fi} + kT \sinh^{-1} \left(\frac{N_D - N_A}{2n_i} \right) \quad (2-7)$$

ifadesiyle verilir. Burada;

N_D , donör yoğunluğu

N_A , akseptör yoğunluğu

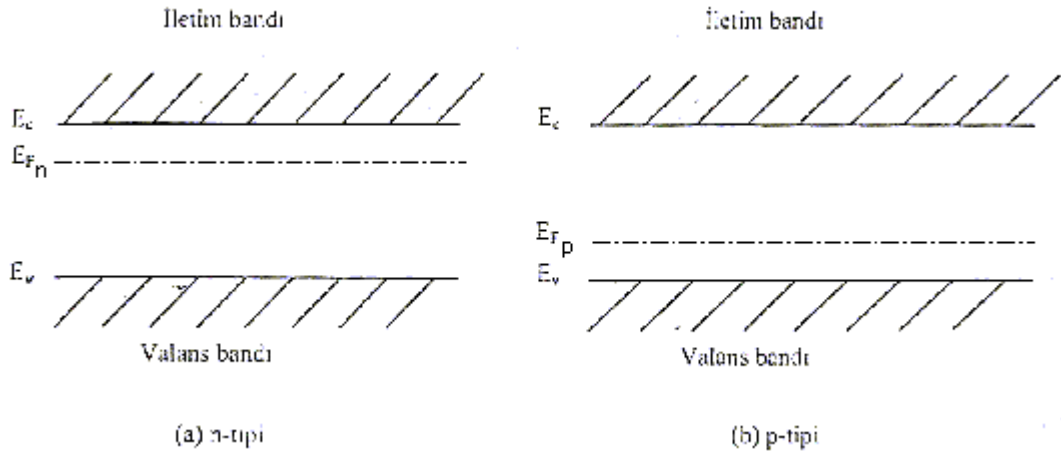
E_{Fi} , has yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyesi'dir.

Bu ifadeye göre katkılı yarıiletkende Fermi enerji seviyesi, $(N_D - N_A)$ net katkı yoğunluğuna bağlı olarak, n-tipi yarıiletkende iletim bandına, p-tipi yarıiletkende valans bandına daha yakındır. Şekil 2.8.'de bu durum gösterilmektedir.

Katkılı yarıiletkenlerde, aynı yarıiletken materyal için, n-tipi veya p-tipi durumuna göre,

$$n_n p_n = n_p p_p = n_i^2(T) \quad (2-8)$$

bağıntısı vardır. Belirli bir sıcaklıkta elektron ve hol yoğunluklarının çarpımı sabit, fakat toplamları farklıdır. Taşıyıcıların yoğunluğu uygun katkılama yapılarak birbirlerine göre arttırılabilir veya azaltılabilir (Omar 1975).



Şekil 2.8. Katkılı yarıiletkenlerde Fermi enerji seviyeleri

2.6. Mobilite ve Elektriksel İletkenlik

Yarıiletkenlerde sıkça kullanılan önemli bir nicelik ise mobilitedir. Bir yarıiletkene elektrik alan uygulandığında, elektron ve hollerin sürüklenme hızları, elektrik alanın büyüklüğüyle orantılıdır ve bu orantı sabiti mobilitedir. Yani, birim elektrik alan başına düşen yüklü parçacığın sürüklenme hızı mobilite olarak adlandırılır. Yarıiletkenlerdeki elektron ve hol mobiliteleri aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$\mu_e = \frac{e\tau_e}{m_e^*} = \frac{V_e}{E} \text{ (elektronlar için)} \quad (2-9)$$

$$\mu_h = \frac{e\tau_h}{m_h^*} = \frac{V_h}{E} \text{ (holler için)} \quad (2-10)$$

Burada;

τ_e , elektronun yarı ömrünü

τ_h , holün yarı ömrünü

V_e , elektronun sürüklenme hızını

V_h , holün sürüklenme hızını,

E , uygulanan elektrik alanı göstermektedir.

Mobilite, yarıiletkenin cinsine, saflığına ve sıcaklığa bağlıdır. İyonize katkı atomlarının ve fononların bulunması, serbest yüklerin ortalama serbest yollarını küçültür ve çarpışma sayısını artırır. Bu durum mobilitenin azalmasına neden olur. Elektronun yarı ömrü büyük ve etkin kütlesi küçük olduğunda mobilitesi büyük olur (Omar 1975). Çizelge 2.1.'de oda sıcaklığında bazı yarıiletkenlerin elektron ve hol mobiliteleri verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çeşitli yarıiletkenlerin oda sıcaklığındaki mobiliteleri (Omar 1975 ve Lide 1998)

Kristal	Mobilite ($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	
	Elektron	Hol
C	1800	1600
Si	1350	475
Ge	3900	1900
GaAs	8500	400
InSb	80000	750
CdS	350	40
CdSe	600	---
CdTe	1200	50
ZnS	180	5(400°C)

İletkenlerde elektrik akımına sadece elektronlar katkıda bulunurken, yarıiletkenlerde elektrik akımına hem elektronlar hem de holler katkıda bulunurlar. n-tipi bir yarıiletkene elektrik alanı uyguladığımız zaman, elektronlar elektrik alanın tersi yönünde hareket ederek net bir elektrik akımı oluştururlar. Bu elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_e = \frac{ne^2\tau_e}{m_e^*} \quad (2-11)$$

ile verilir. Burada;

Denklem (2-9), (2-10) ve (2-11) birleştirilirse, iletkenlik,

$$\sigma_e = ne\mu_e \text{ (elektronlar için)} \quad (2-12)$$

$$\sigma_h = pe\mu_h \text{ (holler için)} \quad (2-13)$$

bulunur. Denklemden de görüldüğü gibi elektriksel iletkenlik, taşıyıcı yoğunluğu ve mobilite ile orantılıdır.

Elektrik alan uygulanan bir yarıiletkende, elektronların ve hollerin oluşturduğu toplam akım yoğunluğu olan J,

$$J = J_e + J_h = e(n\mu_e + p\mu_h)E \quad (2-14)$$

ile verilir. Elektriksel iletkenlik, birim elektrik alan başına akım yoğunluğu olarak tanımlandığından,

$$\sigma = \frac{J}{E} \quad (2-15)$$

şeklinde yazılır. Bu eşitlik (2-14) ile kıyaslandığında, elektriksel iletkenlik,

$$\sigma = e(n\mu_e + p\mu_h) \quad (2-16)$$

şeklinde yazılır. Has yarıiletkenler için $n=p=n_i$ olduğundan, (2-16) denklemi yeniden yazılırsa

$$\sigma_i = en_i(\mu_e + \mu_h) \quad (2-17)$$

ve (2-4) denkleminde verilen n_i ifadesi (2-17) denkleminde yerine yazılırsa

$$\sigma_i = 2e(\mu_e + \mu_h) \left(\frac{kT}{2\pi\hbar^2} \right)^{3/2} (m_e^* m_h^*)^{3/4} e^{-\frac{E_g}{kT}} \quad (2-18)$$

elde edilir. Eksponansiyel terimin dışındakiler σ_{oi} ile gösterilirse, has yarıiletken için elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_i = \sigma_{oi} e^{-\frac{E_g}{2kT}} \quad (2-19)$$

şeklinde bir bağıntı olarak elde edilir.

Katkılı yarıiletkenlerde ise elektriksel iletkenlik,

$$\sigma_k = \sigma_{ok} e^{-\frac{E_k}{kT}} \quad (2-20)$$

şeklinde yazılabilir. Burada;

E_k , katkı atomlarının enerji seviyesini

σ_{ok} , yarıiletkene bağlı bir sabiti göstermektedir.

Genelde bir yarıiletken için toplam elektriksel iletkenlik σ ,

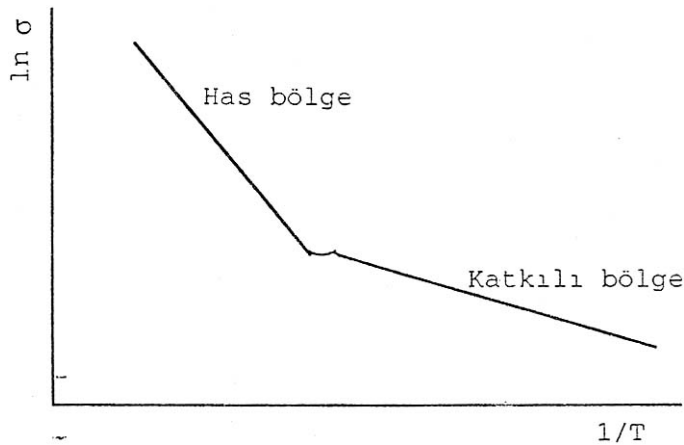
$$\sigma = \sigma_{oi} e^{-\frac{E_g}{2kT}} + \sigma_{ok} e^{-\frac{E_k}{kT}} \quad (2-21)$$

biçiminde yazılabilir.

Yüksek sıcaklıklarda ilk terim etkili olur ve yarıiletken has yarıiletken özelliği taşır. Ancak düşük sıcaklıklarda ikinci terim etkili olur ve katkılı bölgeye geçiş olur.

Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişimi Şekil 2.9.'da görülmektedir.

Oda sıcaklığından düşük sıcaklıklarda elektronlar donör enerji seviyelerinden iletim bandına veya valans bandından akseptör enerji seviyelerine geçerler. Valans bandından iletim bandına elektronların geçişi azdır. Normal sıcaklık bölgesinde iletkenlikteki artış katkı atomlarından kaynaklanmakta ve bu bölge katkılı bölge olarak adlandırılmaktadır (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Yarıiletkenlerde elektriksel iletkenliğin sıcaklığın tersine göre değişimi

Sıcaklık arttıkça donör enerji seviyelerindeki elektronlar tükenebilir veya akseptör enerji seviyeleri doyabilir. Çünkü bu enerji seviyeleri iletim veya valans bandının herhangi birinden daha az enerji seviyesi bulundurlar. Bu durumda iletkenlik sıcaklığa karşı duyarsız olur ve iletkenlikte durgunluk dönemi başlar (Şekil 2.9).

Daha yüksek sıcaklıklarda yeterli ısı enerjisi nedeniyle çok sayıda elektron valans bandından iletim bandına geçerler. Katkı atomlarının taşıyıcı yoğunluğunda bir artış olmayacağından iletim bu bölgede yarıiletkenin yapısal özelliği olan has iletkenliktir (Şekil 2.9).

3. TUZAKLI YAPILARDA SICAKLIĞA BAĞLI ELEKTRİKSEL İLETKENLİK

3.1. Giriş

Yarıiletken materyallerde tuzak parametrelerinin belirlenmesinde ve taşınım mekanizmalarının ayrıntılarıyla anlaşılmasında kullanılan en önemli yöntemlerden biri, ısı yolla uyarılmış akım (thermally stimulated current, TSC) yöntemidir. TSC yöntemi, materyali düşük sıcaklığa kadar soğuttuktan sonra tuzakların doldurulması ve ardından materyali sabit bir hızla ısıtarak, tuzaklar boşalırken ısı yolla uyarılmış akımın kaydedilmesi temeline dayanır. Kaydedilen TSC eğrilerinden yararlanarak tuzak parametreleri hesaplanabilir (Lewandowski ve ark 1990; Topic ve Katovic 1994; Pavlovic ve ark 2003; Aranguren ve ark 2003; Chen ve Kırsh 1981; Milnes 1973; Micocci ve ark 1996).

3.2. Isıl Yolla Uyarılmış İletkenlik (thermally stimulated conductivity, TSC)

Bir n-tipi yarıiletkende bir grup elektron tuzağının iletkenlik bandının ΔE (eV) kadar altındaki bir E_t enerji seviyesinde yerleştiği düşünülüğünde ($\Delta E = E_c - E_t$), T sıcaklığında, tuzaklanmış bir elektronun tuzaktan iletkenlik bandına geçme olasılığı P,

$$P = v \exp(-\Delta E/kT) \quad (3-1)$$

denklemleriyle verilir (Pamplin 1979). Burada v kaçış veya geçiş frekansı olarak adlandırılırken,

$$v = N_c \langle V_{th} \sigma_n \rangle \quad (3-2)$$

eşitliğiyle verilir. Burada;

N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğu

V_{th} , elektronların ısı hızı

σ_n , elektron yakalama etkin kesiti'dir.

Bir yarıiletken materyalin TSC eğrisini elde etmek için, numune T_0 sıcaklığına kadar soğutulur ve bu sıcaklıkta numune aydınlatılarak tuzaklanmış elektronların sayısı n_{t0} artırılır. Aydınlatma ortadan kaldırılarak numune sabit bir ısıtma hızında ısıtılır. Yani,

$$\beta = \frac{dT}{dt} \quad (3-3)$$

işlemi gerçekleştirilir. Isıtmaya başladıktan t kadar zaman sonra, serbest elektron yoğunluğunun değişim oranı,

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{n}{\tau_e} - \frac{dn_t}{dt} \quad (3-4)$$

denklemleriyle verilir. Sağdaki ilk terim, serbest elektronların birleşmelerinin oranını, ikinci terim ise tuzaklanmış elektron yoğunluğunun değişim oranını gösterir ve

$$\frac{dn_t}{dt} = -n_t \nu \exp(-\Delta E/kT) + n(N_n - n_t) < V_{th} \sigma_n > \quad (3-5)$$

ifadesiyle verilir. Bu ifadede sağdaki ilk terim, tuzaklanmış elektronlardan ısı olarak kurtulanların oranını gösterir. Sağdaki ikinci terim ise serbest elektronlardan yeniden tuzağa düşenlerin oranını gösterir (Pamplin 1979).

Pek çok teori τ_e 'nin $n/\tau_e > dn/dt$ olacak şekilde kısa olduğu kabulü üzerine kurulmuştur. (3-4) ve (3-5) denklemlerinin bu kabul ile genel çözümüyle $n(t)$ elde edilir ve buradan da TSC ifadesi,

$$\begin{aligned} \sigma(T) &= e\mu_e n = -e\mu_e \tau_e \frac{dn_t}{dt} = -e\mu_e \tau_e \beta \frac{dn_t}{dT} \\ &= \frac{e\mu_e \tau_e N_c \langle V_{th} \sigma_n \rangle}{1 + \tau_e N_c \langle V_{th} \sigma_n \rangle} n_{to} \exp \left(-\frac{\Delta E}{kT} - \frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T \frac{N_c \langle V_{th} \sigma_n \rangle \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right) dt}{1 + \tau_e N_c \langle V_{th} \sigma_n \rangle} \right) \end{aligned} \quad (3-6)$$

biçiminde verilebilir. Burada;

N_n , boş elektron tuzaklarının yoğunluğu

V_{th} , elektronların ısı hızı

σ_n , elektron yakalama etkin kesiti

n_{to} , T_0 sıcaklığında tuzaklanmış elektronların yoğunluğudur.

(3-6) denkleminde sıcaklık zamanla,

$$T(t) = T_0 + \beta t \quad (3-7)$$

biçiminde lineer olarak değişmektedir. Saunders ve Jewitt $\sigma(T)$ 'nin maksimum olduğu sıcaklıkta $\mu_e(T)$, $\tau_e(T)$, $N_c(T)$, $V_{th}(T)$ ve $\sigma_n(T)$ olduğunu, yani bu parametrelerin sıcaklığa bağlı olduklarını buldular. Sıcaklığa bağlı olan bu nicelikler enerji bant yapısına, taşıyıcı saçılmasına ve birleşme süreçlerine bağlıdır ve materyalden materyale değişirler (Pamplin 1979).

$\mu_e(T)$, $\tau_e(T)$, $N_c(T)$, $V_{th}(T)$ ve $\sigma_n(T)$ parametrelerinin sıcaklığa olan bağımlılıklarının,

$$\begin{aligned} \mu_e(T) &= AT^{-b} \\ \tau_e(T) &= B \\ N_c(T) &= CT^{3/2} \\ V_{th}(T) &= DT^{1/2} \\ \sigma_n(T) &= ET^{-a} \end{aligned} \quad (3-8)$$

biçiminde olacağı farz edilmektedir. Burada A, B, C, D, E, a ve b sabitlerdir. $T=T_m$ sıcaklığında pik gözlenir ve $d\sigma/dt=0$ olur. Böylece,

$$\frac{\Delta E}{kT_m} = \ln\left(\frac{T_m^2}{\beta}\right) + \ln\left(\frac{kN_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle}{\Delta E}\right) - \ln(1 + \tau_e N_n \langle V_{th}\sigma_n \rangle) \quad (3-9)$$

denklemini $\Delta E > kT_m$ durumları için yazılır (Pamplin 1979).

Bir materyalde tuzaklar farklı özelliklerden birine sahip olabilir. Bunlar monomoleküler tuzaklanma, hızlı yeniden tuzaklanma ve intermediate yeniden tuzaklanma özelliklerine sahip tuzaklardır.

3.2.1. Tek molekülü birleşme (monomolecular recombination)

Tek molekülü birleşme durumunda yeniden tuzaklanma veya hızlı yeniden tuzaklanma yoktur ve $\tau_e N_n \langle V_{th}\sigma_n \rangle \ll 1$ olduğu kabul edilir. Bu durumda (3-6) denklemini,

$$\sigma(T) = e\mu_e \tau_e N_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle n_{to} \exp\left[-\frac{\Delta E}{kT} - \frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T N_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right) dT\right] \quad (3-10)$$

eşitliğine ve (3-9) denklemini,

$$\frac{\Delta E}{kT_m} = \ln\left(\frac{kT_m^2 N_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle}{\beta \Delta E}\right) \quad (3-11)$$

eşitliğine indirgenmiş olur. (3-11) denkleminde yola çıkılarak $1/T_m$ 'e göre

$\ln\left(\frac{T_m^2}{\beta}\right)$ grafiği çizilebilir ve bu grafikten yararlanarak ΔE ve buradan da σ_n

değerleri bulunabilir (Pamplin 1979).

3.2.2. Hızlı yeniden tuzaklanma (fast retrapping)

Bu durumdaki birleşme başlıca bimoleküler yapılar için geçerlidir. Burada tuzaklanmış elektronlar ile serbest elektronların ısı dengede oldukları kabul edilmektedir ve $\tau_e N_n \langle V_{th} \sigma_n \rangle \gg 1$ 'dir. Böylece (3-6) denklemi,

$$\sigma(T) = \frac{e\mu_e N_c}{N_n} n_{t0} \exp \left[-\frac{\Delta E}{kT} - \frac{1}{\beta \tau_e N_n} \int_{T_0}^T N_c \exp \left(-\frac{\Delta E}{kT} \right) dT \right] \quad (3-12)$$

eşitliğine indirgenir. Bu eşitlik σ_n 'i içermez ve bu denklemin belirttiği eğriden σ_n belirlenemez. Böer (1958), birleşme etkin kesiti olan σ_R 'nin,

$$V_{th} \sigma_R = \frac{\Delta E}{kT_m} \cdot \frac{\beta}{n_m T_m} \quad (3-13)$$

denklemleriyle verilebileceğini gösterdi. Burada n_m , $T=T_m$ sıcaklığında serbest elektronların yoğunluğudur. (3-5) denkleminde $\frac{dn_t}{dt} = 0$ yazarak eğride pik belirlenir ve ΔE 'nin belirlenmesi için,

$$\frac{\Delta E}{kT_m} = \ln \left(\frac{N_c}{n_m} \right) + \ln \left(\frac{n_t}{N_n n_t} \right) \quad (3-14)$$

denklemleri yazılır. Fermimsi enerji seviyesinin tuzak enerji seviyesi ile çakıştığı zaman pikin ortaya çıktığı farz edilir. $\frac{n_t}{N_n}$ oranı 1/2 olduğu zaman (3-14) denklemi,

$$\frac{\Delta E}{kT_m} = \ln \left(\frac{N_c}{n_m} \right) \quad (3-15)$$

denkleminde indirgenir. Böylece $1/T_m$ 'e göre $\ln(n_m)$ grafiği çizilebilir ve bu grafiğin eğiminden ΔE belirlenir (Pamplin 1979).

3.2.3. Intermediate retrapping

Garlick ve Gibson (1948), yeniden tuzaklanmanın veya birleşmenin eşit olasılıkta olduğu bir serbest elektron durumu düşündüler ve TSC için,

$$\sigma(T) = \frac{e\mu_e\tau_e N_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle n_{to}^2 \exp(-\Delta E/kT)}{N_n \left[1 + \frac{N_c \langle V_{th}\sigma_n \rangle}{N_n \beta} n_{to} \int_{T_0}^T \exp(-\Delta E/kT) dT \right]^2} \quad (3-16)$$

eşitliğini verdiler (Pamplin 1979). Burada, bimoleküler yapılarıdaki birleşme için T_m n_{to}/N_n oranına bağlıdır, ancak tek moleküllü yapılarıdaki birleşmeler için T_m , n_{to}/N_n oranından bağımsızdır (Pamplin 1979).

Buraya kadar numunede tek bir tuzak enerji seviyesi olduğu düşünülür. Daha fazla sayıda tuzak enerji seviyesi olduğunda, bunları belirlemek için bir bilgisayar programına ihtiyaç vardır, çünkü iki veya daha fazla sayıda tuzak enerji seviyesi olursa TSC karmaşık olur ve tuzak parametrelerinin belirlenmesi zorlaşır. Bu durumun en belirgin nedenleri şunlardır;

- 1- Tuzaklar tek bir enerji seviyesinde olmayıp dağılmış olabilirler,
- 2- Isıl yolla uyarılmış birleşmenin kinetik süreçleri sadece τ_e ile belirlenemez. τ_e kullanılabilse dahi τ_e 'nin T 'ye, n 'ye ve n_t 'ye bağımlılığı ve diğer parametreler bilinemeyecektir.
- 3- TSC'ye hem elektronlar hem de holler katkıda bulunurlar. TSC'de bu iki tip taşıyıcıdan herhangi birinin rolünü önemsemek doğru olmaz (Pamplin 1979).

4. BİR BOYUTLU SİSTEMDE TAŞIYICILARIN TUZAKLANMASI

4.1. Giriş

TL ve TSC'nin kuramsal tanımı genellikle birleşme merkezleri ve tuzakların benzer uzaysal dağılımlı oldukları farz edilerek yapılır. Tuzaklar ve birleşme merkezleri arasındaki uzaysal korelasyonun değişik tiplerinde ise Monte Carlo metodlarına başvurulur. Bir boyutlu sistemlerde TL ve TSC'nin hesabı için Monte Carlo tekniği kullanılır. Burada, enerji diyagramının aktif derin tuzak seviyelerinden meydana geldiği farz edilmektedir. Yani tuzaklar deney süresince boş değildir ve birleşme merkezleridir (Mandowski 2001).

4.2. Sabit Aralık ve Değişken Aralık Modelleri

Tek tip taşıyıcıların geçişleri olan tuzaktan kurtulma (D_i), tuzaklanma (T_i) ve birleşme (R_s) için birim zamandaki olasılık yoğunlukları,

$$D_i = v_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad i=1 \dots p \quad (4-1)$$

$$T_i = A_i(N_i - n_i) \quad i=1 \dots p \quad (4-2)$$

$$R_s = B_s m_s \quad s=1 \dots r \quad (4-3)$$

ifadeleriyle verilir. Burada;

E_i , aktivasyon enerjileri

v_i , frekans faktörleri

n_i , aktif tuzaklarda tuzaklanan elektronların yoğunluğu

m_s , birleşme merkezlerinde tuzaklanan hollerin yoğunluğu

N_i, m_s 'e karşılık gelen tuzak durumları yoğunluğu

A_i , tuzaklanma olasılıkları

B_s , birleşme olasılıkları'dır.

(4-1), (4-2) ve (4-3) numaralı denklemler, p tane yarılmış tuzak seviyelerinden ve r tane birleşme merkezlerinden meydana gelen sistem için yazılmıştır (Mandowski 2001).

TSC ve TL'de T sıcaklık değerleri zamanla denklem (3-7)'de verildiği gibi lineer olarak değişir.

TSC ve TL akım yoğunlukları,

$$J_{TSC} = \gamma m_c \quad (4-4)$$

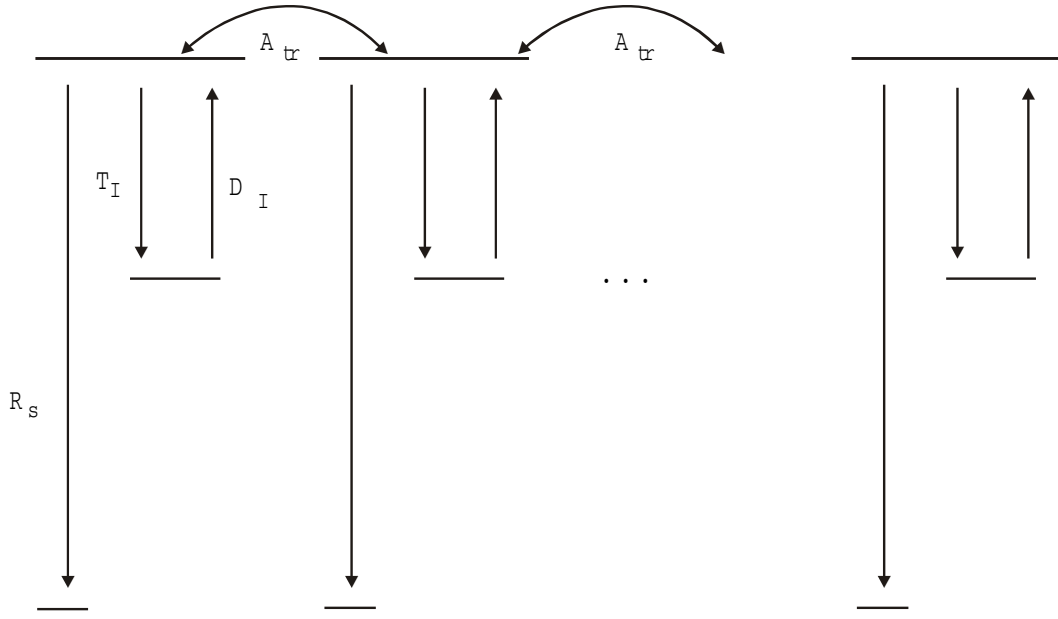
$$J_{TSC}^{(s)} = -\frac{\alpha dm_s}{dt} \quad (4-5)$$

biçimlerinde ifade edilir. Burada γ ve α sabitlerdir.

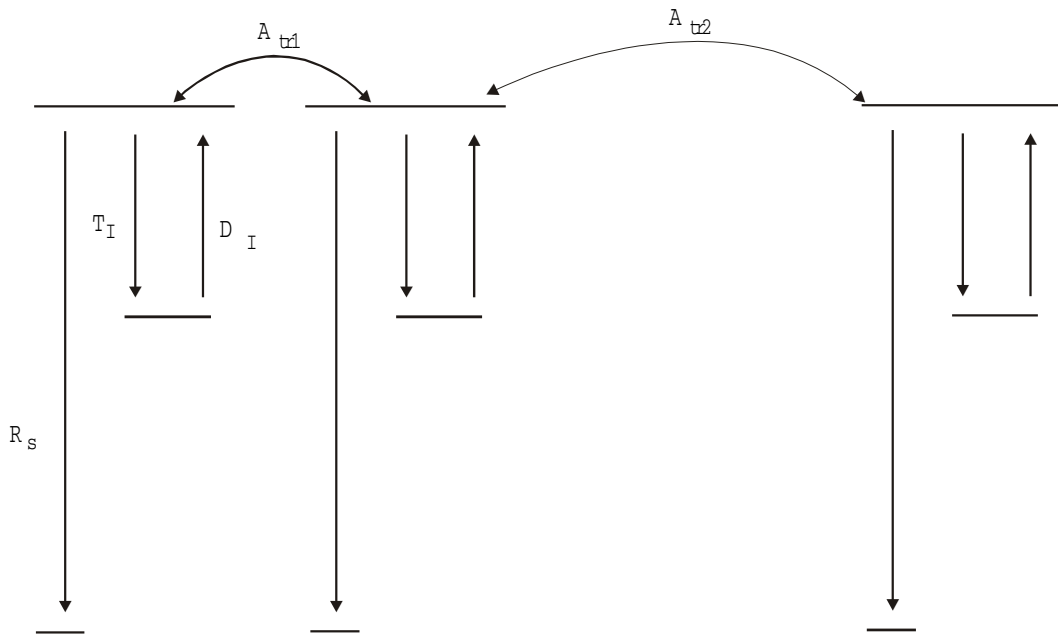
Monte Carlo tekniği kullanılarak sistemdeki tüm taşıyıcılar için her bir geçişin zamanı hesaplanır. Her bir zaman en düşük zamanla şekillenen tek bir geçişi meydana getirir ve sonra hesaplamalar tekrarlanır (Mandowski 2001).

Bir katı yüksek enerji yayılımına maruz kaldığında tuzaklar ve birleşme merkezleri her biri bir boyutlu yapı gösteren yollar boyunca yerleşirler. Böyle bir durumda taşıyıcıların tuzaklanmasını (T_i), tuzaktan kurtulmasını (D_i) ve birleşmesini (R_s) gösteren sabit aralık modeli (Fixed distance model) ve değişken aralık modeli (Variable distance model) şekil 4.1. ve şekil 4.2.'de gösterilmiştir (Mandowski 2001).

Burada hol-elektron çiftlerinin meydana getirildiği ve bir boyutlu yollar boyunca yerleştikleri farz edilmektedir. Her bir hol-elektron çifti ortak bir uyarılma durumuna sahiptir. Tuzaktan kurtulma (D_i), tuzaklanma (T_i) ve birleşme (R_s) olasılıkları(4-1), (4-2) ve (4-3) numaralı denklemlerle ifade edilir. Çünkü bir tuzakta bir elektron ve holden daha fazla yoktur. Tuzaklanma ve birleşme olasılıkları olan A_i ve B_s sabittir veya tuzak dolu ise sıfırdır. Uyarılabilir durum-



Şekil 4.1. Sabit aralık modeli (Fixed distance model)



Şekil 4.2. Değişken aralık modeli (Variable distance model)

daki elektronlar ısıll yolla uyarılarak komşu gruplara doğru harekete geçirilebilirler. Bu durumda geçiş olasılığı,

$$A_{tr} = v_{tr} \exp\left(-\frac{E_{tr}}{kT}\right) \quad (4-6)$$

eşitliğiyle verilebilir. Isıl yolla uyarı olmadığı zaman A_{tr} sabit olur. Fiziksel olarak bu, bir potansiyel engelini aşmaya veya iki yarı kararlı durum arasındaki tünellemeye benzetilebilir. E_{tr} , iki komşu durum arasındaki potansiyel engel yüksekliğini ifade eder. Genelde v_{tr} katsayısı, tuzak seviyeleri arasındaki d mesafesine,

$$v_{tr} = v_o \exp\left(-\frac{d}{d_o}\right) \quad (4-7)$$

biçiminde bağlıdır. Burada v_o ve d_o sabitlerdir.

Şekil 4.1.'de gösterilen sabit aralık modelinde (Fixed distance model) tuzak seviyeleri arasındaki d mesafesi aynıdır. Bu nedenle v_{tr} sabittir. Isıl yolla uyarı söz konusu olduğunda geçiş olasılığı (4-7) numaralı denkleme göre değişir. Isıl yolla uyarı olmadığına ise v_{tr} sabit olduğundan A_{tr} 'de sabit olur. Şekil 4.2.'de gösterilen değişken aralık modelinde (Variable distance model) ise geçiş olasılıkları yol boyunca değişebilir. Tuzak seviyeleri arasındaki d mesafesi arttıkça (4-8) denkleme göre v_{tr} azalır. Böylece (4-7) denklemini gereği geçiş olasılığı olan A_{tr} azalır. Benzer biçimde tuzak seviyeleri arasındaki d mesafesi azaldıkça (4-8) denkleme göre v_{tr} artar. Böylece (4-7) denklemini gereği geçiş olasılığı olan A_{tr} artar.

Değişken aralık modeli (Variable distance model) için yapılmış hesaplamalar neticesinde değişken geçiş olasılıklarında, bazı lokalize hol-elektron çiftlerinin beraber birleşerek küme biçimi aldıkları dikkati çekmiştir. Hol-elektron çiftleri arasında ayrılma olduğu zaman, yol boyunca yine çeşitli büyüklükte kümeler oluşmaktadır. Bu yüzden bulunan TSC ve TL eğrisi bir, iki, üç veya daha

fazla sayıda hol-elektron çiftlerinden gelen çeşitli eğrilerin bir toplamı olmaktadır. Neticede ortaya çıkan pik genellikle geniş olmakta ve iç yapı ile ilgili bilgi vermemektedir. Kümelenmiş sistemlerde ayrı ayrı birleşme merkezlerinin ve tuzakların olduğu bulunmuştur. Örnek olarak tuzak enerji seviyeleri $0,9\text{eV}$ değerinden ibaret olan sistem için hesaplamalar yapılmıştır. Kolaylık sağlamak için tüm hesaplamalarda aktif tuzakların aynı aktivasyon enerjili ve aynı frekans faktörlü olduğu, birleşme merkezlerinin dahi aynı parametrelere sahip olduğu farz edilmiştir. Klasik kinetik modellere göre böyle bir sistem tek bir pik vermelidir. Ama elde edilen eğrilerde küçük kümeleri meydana getiren birkaç tane pik ayırt edilmektedir. Büyük kümeler için ise bu ayırım kolay olmamakta ve eğrinin biçimi bozulmuş bir görünüm almaktadır (Mandowski 2001).

Katılardaki ısı uyarımıyla elektron salıverme olgusu oldukça karmaşıktır. Homojen olmayan yapılarda çok açık zorluklar vardır. Olağan üstü tuzaklanma kinetikleriyle karşı karşıya kalınır. Bu, yaygın bir durumdur. Örnek olarak radyasyon dedektörleri verilebilir. Bu dedektörlerde tuzaklar, iyonize olmuş radyasyonun yolları boyunca yerleşmişlerdir (Mandowski 2001).

5. AUTO-SEPARATION VE RECONSTRUCTION METODLARI

5.1. Giriş

TSC metodu, organik maddelerde taşınım mekanizmalarını ayrıntılarıyla anlamak için kullanışlı bir metoddur. TSC metodundan yararlanılarak tuzak parametreleri hakkında bilgi sahibi olunabilir. Pek çok araştırmacı tuzak parametrelerinin değerlerini doğru olarak bulmak için çalışmıştır. Ancak, deneysel olarak bulunan çeşitli şekillerdeki bileşik eğrilerinden, bu parametrelerin doğru değerlerine ulaşamamıştır. Bunun üzerine tuzak parametrelerini doğru olarak tespit edebilmek için AS (Auto-Separation) ve RC (Reconstruction) metodları geliştirilmiştir (Maeta ve ark 2001).

5.2. AS ve RC Metodları

AS metodu, bir tek soğutma-ısıtma süreci neticesinde ortaya çıkan ve birden fazla sayıda pik içeren bir bileşik eğrinin ayrılmasında ve bilinmeyen parametrelerin doğru olarak belirlenmesinde kullanılan bir metoddur (Maeta ve ark 2001).

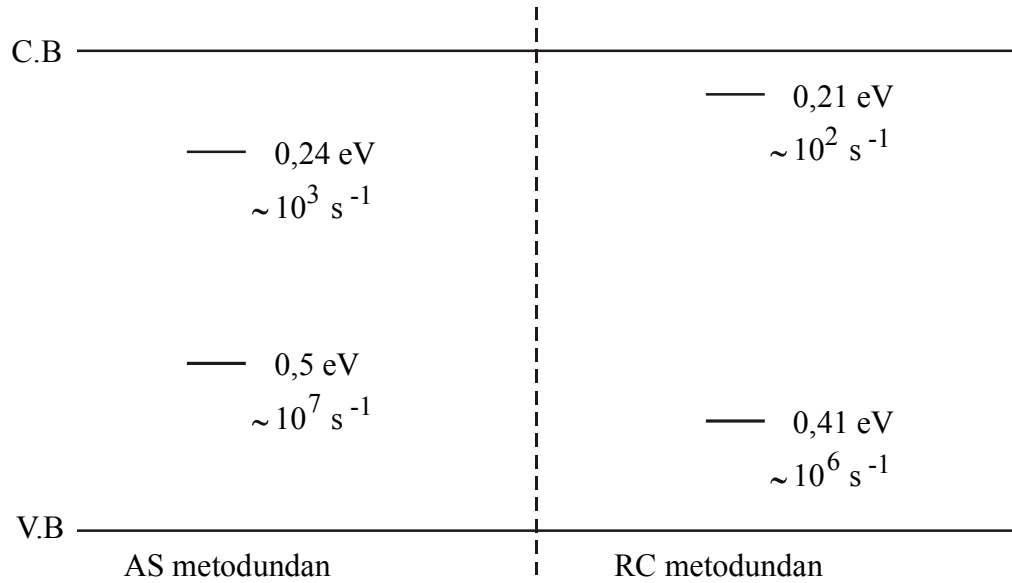
RC metodunda ise kısmî olarak tekrar edilen soğutma ve ısıtma süreçleri neticesinde kısmî eğriler elde edilir. Elde edilen bu kısmî eğrilerden yola çıkılarak kısmî eğrilerin bilinmeyen kısımları elde edilerek TSC eğrileri ortaya çıkarılır (Maeta ve ark 2001).

AS metodunda olduğu gibi RC metodunda da tuzak parametrelerinin değerleri doğru olarak tespit edilebilir. AS ve RC metodlarına dayalı hesaplamalar bir bilgisayar programından yararlanılarak yapıldığından doğruluk oranları çok yüksektir (Maeta ve ark 2001).

AS ve RC metodları ile yapılan çalışmalar neticesinde bir tuzak edici durumun az enerji aralıklı, her biri pek çok durumda bağımsızca davranan yarılmış enerji seviyelerinden ibaret olması gerektiği ve yarılmış bir durumdan başka bir yarılmış duruma, yük transfer süreçleri yoluyla dolaylı taşınım mekanizmalarının gerçekleşebileceği öne sürülmüştür (Maeta ve ark 2001).

Organik bir yarıiletken olan naphthacene katkılı anthracene kristallerde elde edilen deneysel bilgi üzerine bu metodlar uygulanarak şu sonuçlara ulaşılmıştır: AS metodundan naphthacene katkılı anthracene kristalinde saflığı bozan naphthacene katkısının $0,5\text{eV}(10^7\text{s}^{-1})$ değerinde bir hol tuzağı ve $0,21\text{eV}(10^2\text{s}^{-1})$ değerinde de bir elektron tuzağı meydana getirdiği anlaşılmıştır. RC metodundan ise naphthacene katkılı anthracene kristalinde saflığı bozan naphthacene katkısının $0,41\text{eV}(10^6\text{s}^{-1})$ değerinde bir hol tuzağı ve $0,21\text{eV}(10^2\text{s}^{-1})$ değerinde de bir elektron tuzağı meydana getirdiği anlaşılmıştır. Ancak AS metodundan bulunan $0,5\text{eV}$ değeri ile RC metodundan bulunan $0,41\text{eV}$ değeri arasında $0,09\text{eV}$ değerinde bir fark vardır. Bu durumun nedeni yarılmış durumun enerji genişliğinin $0,01\text{eV}$ değerinden $0,1\text{eV}$ değerine kadar uzanıyor olması olarak açıklanmıştır (Maeta ve ark 2001).

Naphthacene katkılı anthracene kristalinde elde edilen deneysel bilgi üzerine AS ve RC metodları uygulanarak elde edilen sonuçlar Şekil 5.1.'de özetlenmiştir (Maeta ve ark 2001).

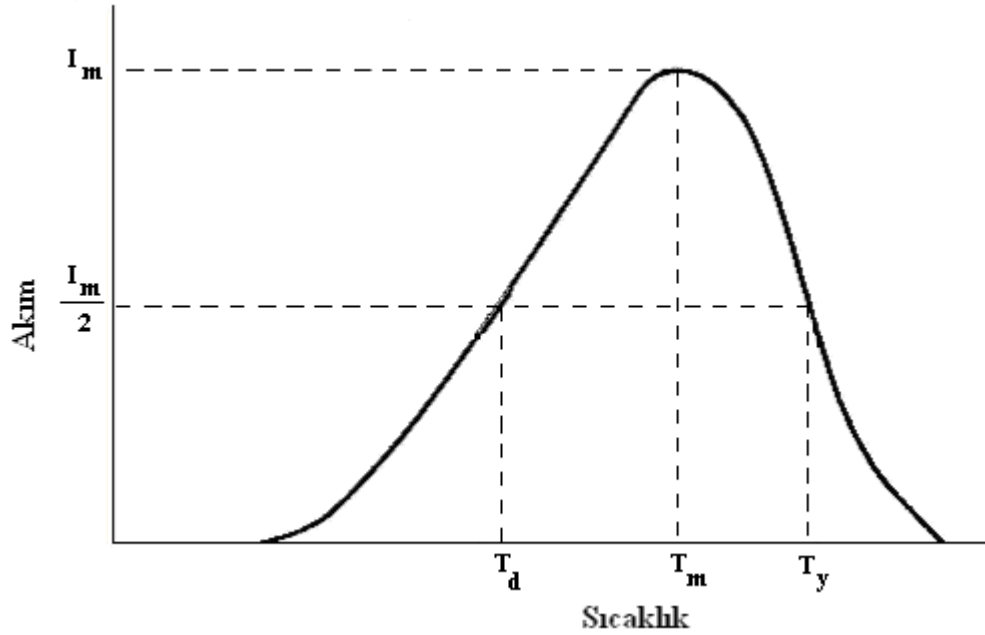


Şekil 5.1. Naphthacene katkılı Anthracene kristalinde sonuçları özetleyen enerji diyagramı

6. ISIL YOLLA UYARILMIŞ AKIM İLE AKTİVASYON ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ

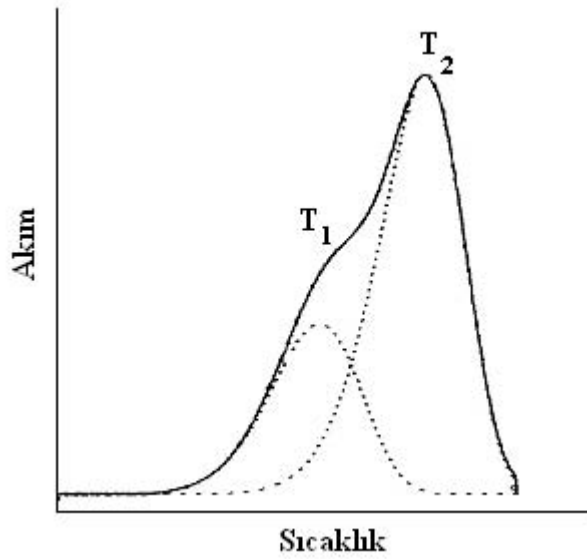
6.1. Giriş

Isıl yolla uyarılmış akım (TSC) yöntemi farklı deney şartlarında yarıiletkenlerdeki safsızlıkların, kusurların enerji seviyeleri ve bu enerji seviyeleri arasındaki elektronik geçişler hakkında bilgi elde etmek için kullanılan yöntemlerden biridir. Isıl yolla uyarılmış akım yöntemi, materyali düşük sıcaklığa kadar soğuttuktan sonra tuzakların, numune aydınlatılarak (UV, x-ışınları gibi), doldurulması ve sonra materyali sabit bir hızla ısıtarak, bu tuzaklar boşalırken ısıl yolla uyarılmış akımın gözlenmesi temeline dayanır. Yasak enerji aralığındaki belli bir tuzak merkezinin enerji seviyesi tuzakların boşaldığı sıcaklıkla ilgilidir. Gözlenen akım pikine katkısı olan tuzakların sayısı depolanmış yüklerin miktarına bağlıdır (Milnes 1973 ve Micocci ve ark 1996). Şekil 6.1.'de tek bir tuzak enerji seviyesine sahip materyal için ısıl yolla uyarılmış akımın sıcaklığa göre değişimi görülmektedir. Bu eğriden yararlanarak tuzak enerji seviyesinin aktivasyon enerjisi hesaplanabilir.



Şekil 6.1. Bir tek tuzak enerji seviyesine sahip materyal için TSC eğrisi (Chen ve Kirsh,1981)

Eğer materyalde iki farklı tuzak enerji seviyesi varsa, ısı yolla uyarılmış akımın sıcaklığa göre değişimi Şekil 6.2.'deki gibi olacaktır.



Şekil 6.2. İki farklı tuzak enerji seviyesine sahip materyal için TSC eğrisi (Aydınlı ve ark 2003)

Materyalde ikiden fazla tuzak enerji seviyesi varsa, her bir tuzak enerji seviyesine karşılık bir pik olmalıdır. Bu durumda tuzak enerji seviyelerine karşılık gelen aktivasyon enerjilerini belirlemek için pikleri birbirinden ayırmak gerekir. Bu amaçla ısı temizleme (thermal cleaning) adı verilen bir yöntem uygulanmaktadır (Zor ve ark 2004 ve Kul 2004).

Isıl temizleme işleminde, tam bir TSC eğrisi elde edildikten sonra numune tekrar soğutulur ve düşük sıcaklıkta aydınlatılarak tuzaklar tekrar doldurulur. Sıcaklık tekrar arttırılarak ısıtma işlemi T_1 ve T_2 arasındaki bir sıcaklıkta T_1 'e yakın bir değerde durdurulur (Şekil 6.2). Bu şekilde birinci tuzak düzeyindeki tuzakların boşalması sağlanmış olur. Numune tekrar soğutulur ancak, ışınlama yapılmadan sıcaklık, aynı artış hızı ile, tekrar arttırılır. Akımdaki yeni artış ikinci tuzak seviyesinde yer alan tuzaklardan kaynaklanan taşıyıcılar tarafından belirlenir. Bu akım, ısı temizleme işlemine başlamadan önceki tam bir TSC akımından çıkarılırsa, T_1 civarında yer alan ayrılmış pik elde edilir. Pikleri ayırma işlemi tamamlandıktan sonra elde edilen her bir TSC eğrisinden, her bir tuzak

enerji seviyesine karşılık gelen aktivasyon enerjisi ve tuzak yoğunluğu hesaplanabilir (Micocci ve Tepore 1996).

6.2. Aktivasyon Enerjisinin Belirlenmesi Yöntemleri

TSC eğrilerini kullanarak tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjilerini belirlemek için önerilen pek çok yöntem vardır. Fakat en çok kullanılanları dengemsi analiz, ısıtma hızı, eğri uyumu, pik şekli ve akımdaki ilk artış yöntemleridir (Milnes 1973; Micocci ve Tepore 1996; Lee ve ark 1992; Gasanly ve ark 2001; Yüksek ve ark 2003; Topic ve Katovic 1994; Topic ve ark 2003; Saryga 1999; Gasanly ve ark 2002). Bu bölümde bu yöntemler incelenecektir.

6.2.1. Dengemsi analiz yöntemi

Dengemsi analiz yönteminde aşağıdaki yaklaşımlar kabul edilir:

- materyaldeki birleşimler dikkate alınan enerji seviyesinden salınan taşıyıcıların tekrar tuzaklanmasını içerir,
 - enerji seviyesi başlangıçta tamamen doldurulmuştur,
 - denge, iletim bandı ve tuzak arasında kurulmuştur, öyle ki Fermi Enerji seviyesi sıcaklık artışı boyunca tanımlanabilir,
 - pik akımı Fermi seviyesi tuzak seviyesini kestiği zaman meydana gelir.
- Bu yaklaşımlar altında tuzakların aktivasyon enerjisi,

$$E_t = kT_m \ln \left[\frac{N_c e \mu}{\sigma_m} \right] \quad (6-1)$$

ifadesiyle verilir. Burada;

T_m , TSC pikine karşılık gelen mutlak sıcaklık (Şekil 6.1)

σ_m , T_m sıcaklığındaki iletkenlik'tir.

Parantezdeki terim, materyalin özelliklerinden belirlenir. Bu durumda (6-1) denklemi,

$$E \propto AkT_m \quad (6-2)$$

biçiminde yeniden yazılabilir. A sabitinin değeri genellikle 21-28 arasındadır. Düşük sıcaklık pikleri için (6-1) denklemini kullanmak uygun değildir. Sıcaklık artış hızıyla TSC pikindeki değişime bağlı olarak bazı hatalar olmasına rağmen (6-1) denklemi TSC çalışmalarında sıkça kullanılır (Lee ve ark 1992; Staryga 1999).

6.2.2. Isıtma hızı yöntemi

Sıcaklık artış hızı değiştirildiği zaman TSC pikleri yer değiştirir ve TSC pikine karşılık gelen T_m sıcaklığı ve sıcaklık artış hızı β arasındaki bağıntı,

$$\frac{E_t}{kT_m} = \ln\left(\frac{T_m^4}{\beta}\right) + \ln\left(\frac{N_c V_{th} k \sigma_c}{E}\right) \quad (6-3)$$

ile verilir. Burada;

σ_c , katkı seviyesinin yakalama etkin kesiti

E, aktivasyon enerjisi'dir.

$1/T_m$ 'ye karşı $\ln(T_m^4 / \beta)$ 'nin grafiği bir doğru verir. Bu doğrunun eğimi,

$$\text{eğim} = \frac{E_t}{2.303k} \quad (6-4)$$

olur. Bu eğimden katkı seviyelerinin aktivasyon enerjileri E_t hesaplanır (Lee ve ark 1992).

6.2.3. Eğri uyumu yöntemi

Yeniden tuzaklanmanın olmadığı, iletim bandının altında E_t tuzak seviyeli farklı tuzak serilerinin TSC eğrisi,

$$\sigma = n_t e \tau \mu \nu \exp \left[-\frac{E_t}{kT} - \int_{T_0}^T \frac{\nu}{\beta} \exp \left(-\frac{E_t}{kT} \right) dT \right] \quad (6-5)$$

ifadesiyle tanımlanır. Burada;

n_t , başlangıçta dolu tuzakların yoğunluğu

τ , serbest elektronların ömrü

T_0 , tuzakların doldurulduğu mutlak sıcaklık

ν , tuzaklanan elektronların yakalanma frekansı' dır

Eğer ν frekansı T sıcaklığından bağımsızsa ve TSC eğrisinin sıcaklık aralığını aşarsa, μ ve τ 'nun sıcaklıkla değişimi ihmal edilebilir. Bu durumda (6-5) denklemini yeniden,

$$\sigma = A \exp \left[-t + B \int_{T_0}^T \exp(-t) t^{-2} dt \right] \quad (6-6)$$

biçiminde yazılır. Burada;

$$t = E_t / kT \quad (6-7)$$

olup A ve B sabitleri,

$$A = n_t \tau e \mu \nu \quad (6-8)$$

$$B = \nu E_t / \beta k \quad (6-9)$$

biçiminde ifade edilirler. Eğer (6-6) denkleminin türevi alınır ve seriye açılırsa iletkenliğin yaklaşık değeri,

$$\sigma \cong A \exp(-t - B \exp(-t)t^{-2}) \quad (6-10)$$

ile verilen serideki ilk terime eşittir. Bu eşitlik,

$$\sigma \cong \sigma_0 + A \exp(-t - B \exp(-t)t^{-2}) \quad (6-11)$$

olarak ifade edilebilir. Burada σ_0 , t_0 'a karşı gelen σ değeridir. Eğer (6-11) denkleminin türevi alınır ve TSC eğrisinin $t=t_m=E_t/kT_m$ 'de meydana gelen maksimumunu bulmak için sıfıra eşitlenirse B sabiti,

$$B = \exp(t_m) \frac{t_m^3}{t_m + 2} \quad (6-12)$$

olarak bulunur. TSC spektrumundaki pikleri eş zamanlı olarak analiz etmek için tüm piklerin iletkenliğe katkılarını içeren uyum fonksiyonu için,

$$\sigma_{toplam} = \sum \sigma_m \quad (6-13)$$

ifadesi kullanılır. Burada σ_m (6-10) denkleminde hesaplanan her bir pikin katkısını ve m tuzakların sayısını ifade eder. Deneysel ve (6-11) denklemi yardımıyla elde edilen teorik TSC eğrileri uyumu dikkate alınarak tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjileri belirlenir (Gasanly ve ark 2001; Gasanly ve ark 2002).

6.2.4. Pik şekli yöntemi

Christodoulides'e göre ısı yolla uyarılmış akımın pik değerine karşı gelen T_m sıcaklığı ile akımın pik değerinin yarısına karşı gelen T_d sıcaklığının (Bkz. Şekil 6.1) ölçülmesi gerekir. Christodoulides'e göre tuzakların aktivasyon enerjisi,

$$E_t = \frac{T_d T_m}{7940(T_m - T_d)} - \frac{T_d}{14866} \quad (6-14)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlik özellikle küçük pikler için daha kullanışlıdır (Topic ve Katovic 1994; Topic ve ark 1994; Gasanly ve ark 2002).

Halperin ve Braner'e göre yavaş yeniden tuzaklanma (slow retrapping) durumu için tuzakların aktivasyon enerjisi,

$$E_t = kT_m^2 / \delta \quad (6-15)$$

eşitliği ile verilirken, hızlı yeniden tuzaklanma (fast retrapping) durumu için tuzakların aktivasyon enerjisi,

$$E_t = 2kT_m^2 / \delta \quad (6-16)$$

eşitliği ile verilir. Burada;

$$\delta = T_y - T_m \quad (6-17)$$

ile verilir (Chen ve Kırsh 1981).

6.2.5. Akımdaki ilk artış yöntemi

İlk olarak Garlick ve Gibson tarafından kullanılan akımdaki ilk artış yöntemi sıcaklık artarken tuzakların boşalmaya başlaması yaklaşımına dayanır. Bu durumda ısı yolla uyarılmış akımın sıcaklığa göre değişimi,

$$I = I_0 \exp(-E_t/kT) \quad (6-18)$$

bağıntısı ile verilmektedir. Burada;

I , ısı yolla uyarılmış akım

I_0 , ısı yolla uyarılmış akımın en düşük değeri

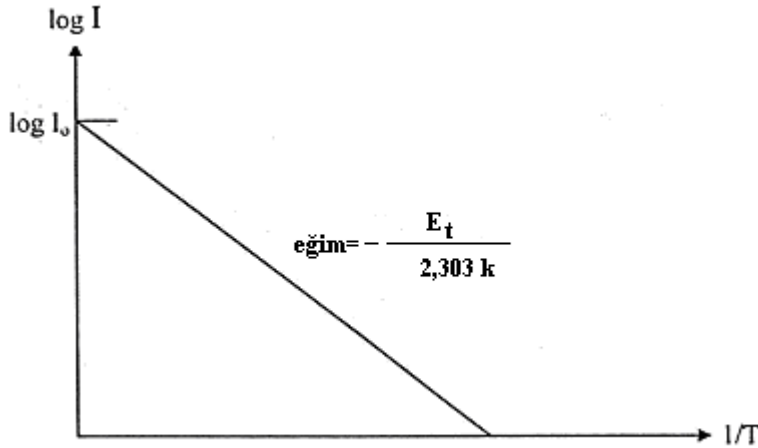
(6-18) denkleminin doğal logaritması alınırsa,

$$\ln I = \ln I_0 - \frac{E_t}{kT} \quad (6-19)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntı,

$$\log I = -\frac{E_t}{2,303 k} \left(\frac{1}{T} \right) + \log I_0 \quad (6-20)$$

biçiminde de yazılabilir. Bu denklem $y=mx+b$ şeklinde bir doğrunun denklemdir. $\log I$ 'nın $(1/T)$ 'ye karşı grafiği düz bir doğru olacaktır ve bu doğrunun y-eksenini kestiği nokta $\log I_0$ 'dır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. $\log I$ 'nın $(1/T)$ 'ye karşı grafiği

Bu grafikteki doğrunun eğimi,

$$\text{Eğim} = -\frac{E_t}{2,303k} \quad (6-21)$$

olup bu eşitlikten faydalanılarak tuzakların aktivasyon enerjisi E_t bulunabilir (Millnes 1973; Pascoe 1978; Kao ve Hwang 1979; Sze 1981; Kittel 1986; Mortimer 1989).

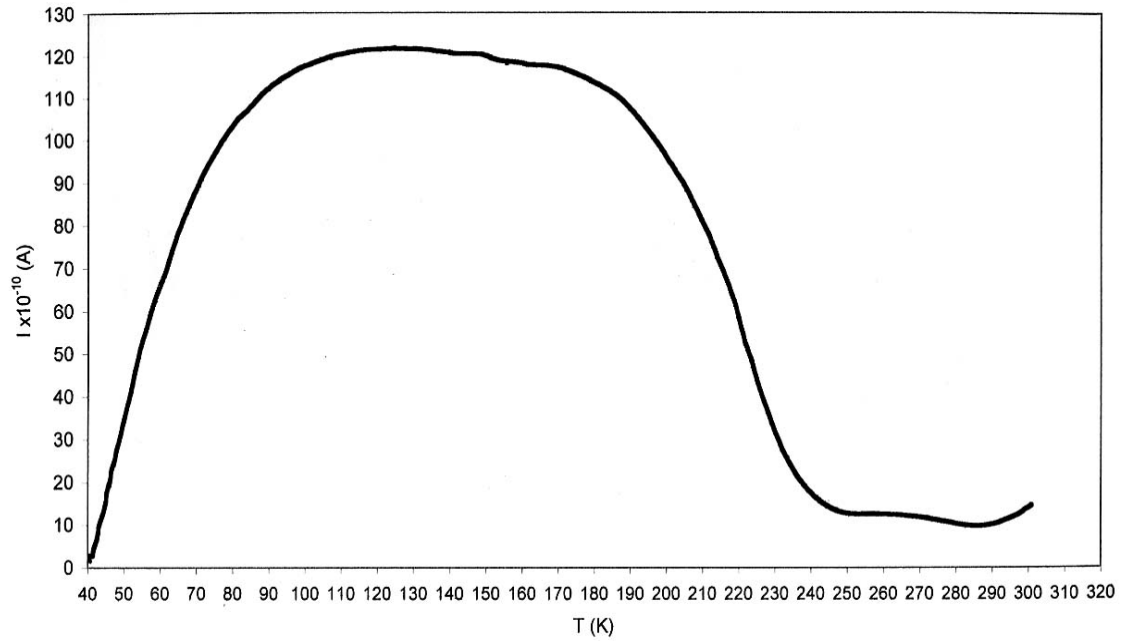
Yüksek akımlarda lineerlikten sapma belli bir sıcaklığı aştıktan sonra meydana gelir. Bu durumda ısıl yolla uyarılmış akım için verilen eksponansiyel ifade geçerlidir (Micocci ve Tepore 1996; Gasanly ve ark 2002; Yüksek ve ark 2003).

7. CdS YARIİLETKEN BİLEŞİĞİNİN ÇEŞİTLİ YÖNTEMLERLE HESAPLANAN TUZAK ENERJİ DEĞERLERİ

7.1. Giriş

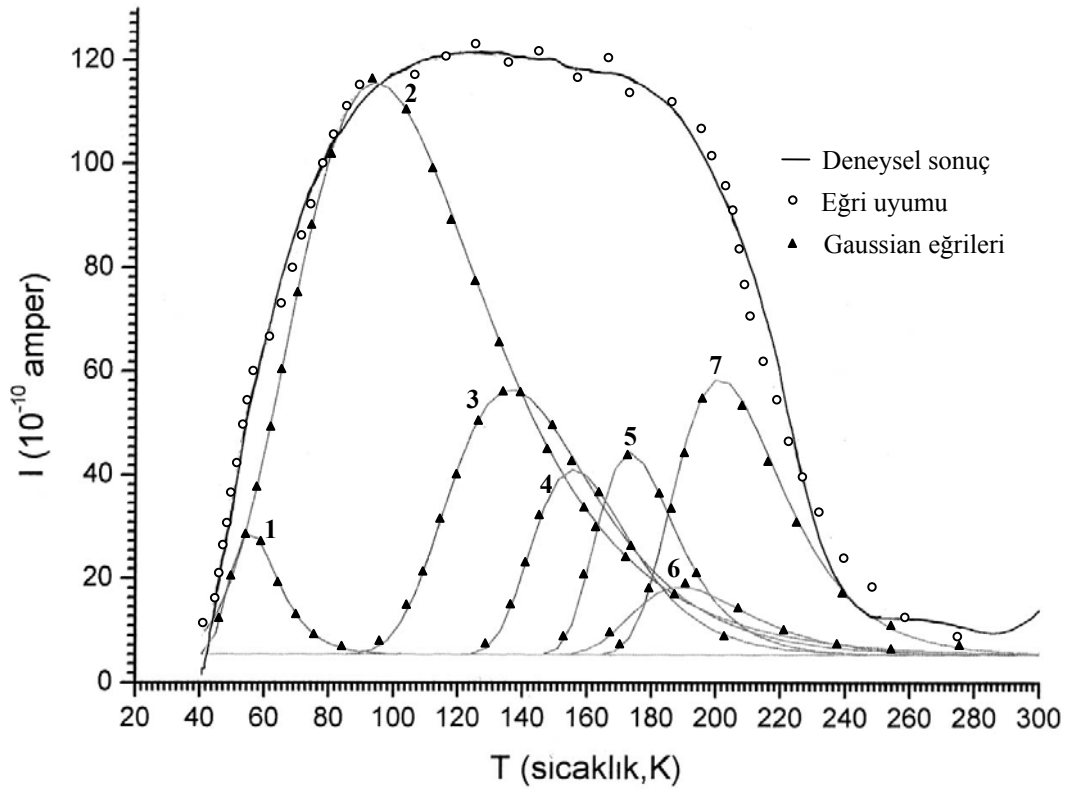
TSC eğrilerini kullanarak tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjilerini belirlemek için önerilen pek çok yöntem vardır. Fakat en çok kullanılanları dengemsi analiz, ısıtma hızı, eğri uyumu, pik şekli ve akımdaki ilk artış yöntemleridir (Milnes 1973; Micocci ve Tepore 1996; Lee ve ark 1992; Gasanly ve ark 2001; Yüksek ve ark 2003; Topic ve Katovic 1994; Topic ve ark 2003; Saryga 1999; Gasanly ve ark 2002).

Bu çalışmada, Zor ve ark (2004) tarafından yapılan çalışmada elde edilen CdS yarıiletken filmine ait TSC verileri kullanılarak, CdS yarıiletken filmdeki tuzak enerji seviyelerinin değerleri belirlenmiştir. Şekil 7.1.'de CdS yarıiletken filminin akım-sıcaklık eğrisi verilmiştir. Bu grafikte sıcaklığın 40-300K aralığında, akımın 1×10^{-10} - 130×10^{-10} A aralığında değiştiği görülmektedir.



Şekil 7.1. CdS yarıiletken filminin TSC eğrisi (Zor ve ark 2004)

Şekil 7.1.'deki pikle Şekil 6.1.'deki pik karşılaştırıldığında, Şekil 7.1.'deki pikin birçok pikin birleşiminden meydana geldiği söylenebilir, çünkü Şekil 6.1.'deki pike göre daha geniş bir piktir. Bu durum CdS yarıiletken filminin birden fazla tuzak enerji seviyesine sahip olduğunun bir kanıtıdır.



Şekil 7.2. CdS yarıiletken filminin TSC eğrisine, Gaussian enerji dağılımına uygun eğri uydurma tekniği uygulanarak elde edilen pikler

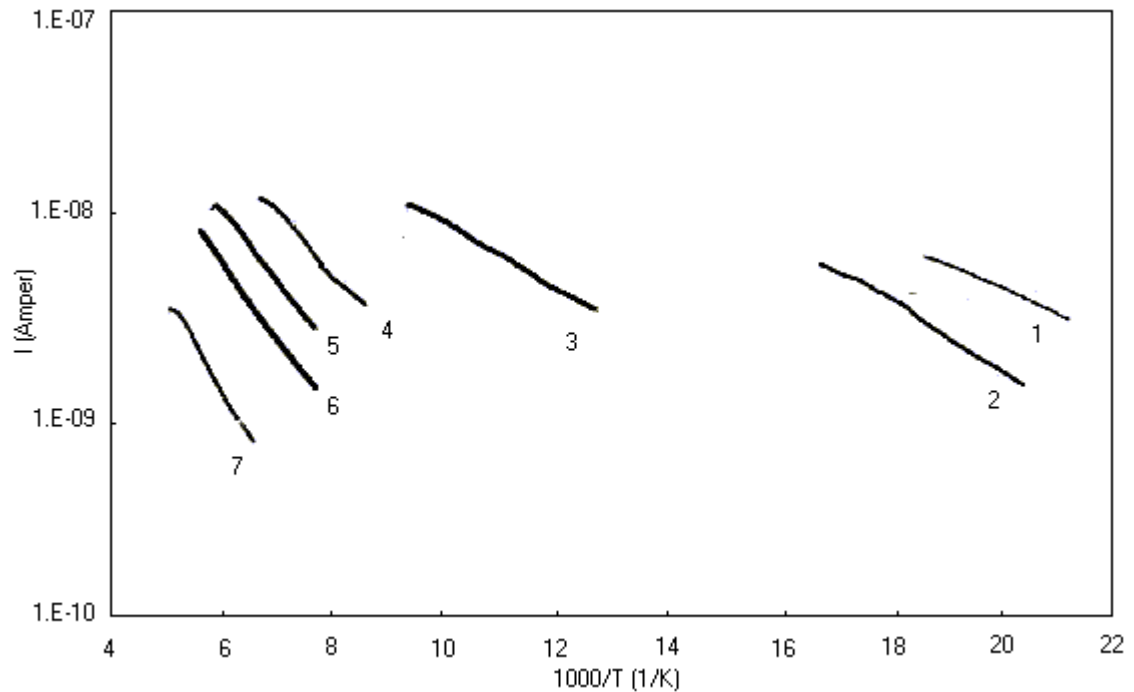
Şekil 7.1.'de verilen TSC eğrisine, Gaussian enerji dağılımına sahip eğri uydurma tekniği uygulanarak bileşik eğrinin yedi ayrı pikten meydana geldiği belirlenmiş ve bu pikler Şekil 7.2.'de gösterilmiştir. Bu durum CdS yarıiletken filminde yedi farklı tuzak enerji seviyesi olduğunu gösterir. Ayrıca birden farklı enerji seviyelerinin varlığı CdS yarıiletken filmine ısıl temizleme işlemi uygulanarak da belirlenebilir.

CdS yarıiletken filmdeki tuzak enerji seviyelerini belirlemek için akımdaki ilk artış ve pik şekli yöntemleri kullanılmıştır.

7.2. Akımdaki İlk Artış Metodundan Hesaplanan Tuzak Enerji Değerleri

CdS yarıiletken filmine ait aktivasyon enerji değerleri Bölüm 6.2.5.'te ifade edildiği gibi akımdaki ilk artış yöntemi kullanılarak belirlenebilir. Akımdaki ilk artış yöntemi kullanılarak tuzak enerji seviyelerini belirleyebilmek için yarıiletken filme Bölüm 6.1.'de anlatılan ısı temizleme işlemi uygulanır. Isıl temizleme işleminden sonra birleşik pik kendisini oluşturan piklere ayrılmış olur. Ayrılmış her bir pike akımdaki ilk artış metodu uygulanarak tuzak enerji değerleri hesaplanır.

Şekil 7.3.'te CdS yarıiletken filmine ısı temizleme işlemi uygulandıktan sonra elde edilen verilerden çizilen akım $\alpha 1000/T$ değişimleri verilmiştir. Şekil 7.3.'te verilen akım $\alpha 1000/T$ değişimleri CdS yarıiletken filminin yedi farklı tuzak enerji seviyesini göstermektedir. Bu eğrilerin eğimleri tuzak enerji seviyelerinin değerleriyle orantılıdır. Şekil 7.3.'te verilen eğrilerden ve (6-18)'den (6-21)'e kadar olan denklemlerden yararlanarak tuzak enerji seviyeleri hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 7.1.'de "Isıl temizleme işleminden sonra akımdaki ilk artış yöntemine göre hesaplanan E_t değerleri" sütununda verilmiştir.



Şekil 7.3. CdS yarıiletken filmi için akım $\alpha 1000/T$ grafiği

Akımdaki ilk artış yöntemi Şekil 7.2.'de verilen teorik Gaussian eğrilerine uygulanarak tuzak enerji değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan tuzak enerji değerleri Çizelge 7.1.'de "Gaussian eğrilerine akımdaki ilk artış yöntemi uygulanarak hesaplanan E_t değerleri" sütununda verilmiştir.

7.3. Pik Şekli Metodundan Hesaplanan Tuzak Enerji Değerleri

Isıl yolla uyarılmış akım eğrisinden yararlanarak bir yarıiletkendeki tuzak enerji seviyeleri pik şekli yöntemiyle belirlenebilmektedir. CdS yarıiletken filmindeki tuzak enerji seviyeleri, filmin TSC eğrisine pik şekli yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Şekil 7.2.'de verilen CdS yarıiletken filminin teorik Gaussian eğrilerine pik şekli metodu uygulanmış ve yedi farklı tuzak enerji değerleri (6-14), (6-15), (6-16) ve (6-17) denklemleri yardımıyla hesaplanmıştır. Hesaplanan tuzak enerji değerleri Çizelge 7.1.'de "Gaussian eğrilerine pik şekli yöntemi uygulanarak bulunan E_t değerleri yavaş yeniden tuzaklanma ve hızlı yeniden tuzaklanma" sütunlarında verilmiştir.

Çizelge 7.1. CdS yarıiletken filminin akımdaki ilk artış ve pik şekli yöntemlerine göre hesaplanan tuzak enerji değerleri.

	Isıl temizleme işleminden sonra akımdaki ilk artış yöntemine göre hesaplanan E_t değerleri (eV).	Gaussian eğrilerine akımdaki ilk artış yöntemi uygulanarak hesaplanan E_t değerleri (eV).	Gaussian eğrilerine Pik şekli yöntemi uygulanarak bulunan E_t değerleri (eV). Yavaş yeniden tuzaklanma	Gaussian eğrilerine Pik şekli yöntemi uygulanarak bulunan E_t değerleri (eV). Hızlı yeniden tuzaklanma
1.Pik	0,019	0,0195	0,017	0,034
2.Pik	0,022	0,0210	0,020	0,040
3.Pik	0,048	0,0440	0,040	0,0800
4.Pik	0,080	0,0820	0,08	0,160
5.Pik	0,110	0,1000	0,121	0,242
6.Pik	0,122	0,1200	0,133	0,266
7.Pik	0,140	0,1280	0,143	0,286

Çizelge7.1’de verilen tuzak enerji değerleri incelendiğinde, CdS yarıiletken filminde tuzakların yedi ayrı tuzak enerji seviyesinde eksponansiyel olarak dağıldığı ve akımdaki ilk artış ve pik şekli yöntemlerine göre hesaplanan tuzak enerji değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Pik şekli yöntemine göre yavaş yeniden tuzaklanma ve hızlı yeniden tuzaklanma durumlarına göre hesaplanan tuzak enerji değerleri verilmiştir. Bu değerlerden yavaş yeniden tuzaklanma durumuna göre hesaplanan tuzak enerji değerlerinin akımdaki ilk artış (ısıtılma temizleme işleminden sonra) ve teorik akımdaki ilk artış (Gaussian eğrilerine uygulanan) yöntemleriyle hesaplanan tuzak enerji değerlerine uygun olduğu görülmektedir. Bu durumda CdS yarıiletken filmindeki tuzakların yavaş yeniden tuzaklanma özelliğine sahip olduğu söylenebilir.

8. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yarıiletken materyallerde bulunan çeşitli kristal kusurlarının (safsızlık atomları, grainler, boşluklar gibi), yarıiletkenin elektriksel özelliklerini etkilediği bilinmektedir. Kristal kusurları yarıiletkende akıma katkıda bulunan serbest taşıyıcılar için bir tuzak gibi davranmaktadır. Bu tuzaklar yarıiletkenin yasak enerji aralığında bir enerji seviyesinde olabileceği gibi, bir enerji aralığında da yer alabilmektedirler. Tuzak enerji seviyelerinin ve tuzak tiplerinin bilinmesi yarıiletkenin özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynar.

Bu çalışmada, yarıiletken materyallerde tuzak parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan TSC, TL, TSEE, TSDC, TG ve DTG yöntemleri tanıtılmış, yarıiletkenlerle ilgili temel ve genel bilgiler verilmiştir.

Tuzaklı yapılarda sıcaklığa bağlı elektriksel iletkenlik ifadesi verilerek bazı özel durumlar incelenmiştir.

Bir boyutlu sistemde taşıyıcıların tuzaklanması, tuzaktan kurtulması ve birleşmesi, sabit aralık ve değişken aralık modelleri için açıklanmıştır.

Tuzak parametrelerini doğru olarak tespit edebilmek için kullanılan AS ve RC metodları üzerinde durulmuştur.

Isıl yolla uyarılmış akım ile aktivasyon enerjilerinin belirlenmesi yöntemlerinden olan dengemsi analiz yöntemi, ısıtma hızı yöntemi, eğri uyumu yöntemi, pik şekli yöntemi ve akımdaki ilk artış yöntemleri açıklanmıştır.

CdS yarıiletken filmindeki tuzak enerji seviyelerini belirlemek için akımdaki ilk artış, eğri uyumu ve pik şekli yöntemleri kullanılmıştır. CdS yarıiletken filminin TSC eğrisinden filmin farklı tuzak enerji seviyelerine sahip olduğu belirlenmiştir. Farklı tuzak enerji seviyelerini belirlemede kullanılan yöntemlerden biri de CdS filminin akım ~ sıcaklık verilerine eğri uydurma yöntemini uygulamaktır. Eğri uydurma yöntemi Orijin 6.0 bilgisayar programında yapılmış ve en iyi uyumun "Gaussian dağılımına" sahip eğri uyumunda olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemde de CdS filminin yedi ayrı tuzak enerji seviyesine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu yöntemde en iyi uyumun Gaussian dağılımına sahip durumda sağlanması, tuzak enerji seviyelerinin eksponansiyel dağılıma sahip olduğu düşüncesini kuvvetlendirmektedir.

Isıl temizleme işleminden sonra elde edilen piklere ve eğri uydurma yönteminde elde edilen piklere akımdaki ilk artış yöntemi uygulanarak CdS yarıiletken filmindeki tuzak enerji seviyeleri hesaplanmış ve her iki yöntem sonunda hesaplanan değerlerin birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Eğri uydurma tekniği ile elde edilen eğrilere ayrıca pik şekli yöntemi uygulanmıştır. Pik şekli yönteminde yavaş ve hızlı yeniden tuzaklanma durumlarına göre tuzak enerji seviyeleri hesaplanmıştır. Bu hesaplamada yavaş yeniden tuzaklanma durumu için belirlenen tuzak enerji değerlerinin akımdaki ilk artış yöntemiyle belirlenen değerlere yakın olduğu tespit edilmiştir.

CdS yarıiletken filminin serbest taşıyıcılar için tuzaklı bir yapıya sahip olduğu, tuzakların yasak enerji aralığında iletim bandının 0,017-0,143eV altında bulunduğu ve tuzakların yavaş yeniden tuzaklanma özelliğine sahip olduğu düşünülmektedir.

Zor ve ark (2004), ısıll yolla uyarılmış akım ile tuzak derinliği ölçümü isimli bilimsel araştırma projesinde, CdS yarıiletken filmindeki farklı tuzak seviyelerinin aktivasyon enerjilerini, akımdaki ilk artış yöntemini kullanarak hesaplamış ve tuzak enerji değerlerinin 0,024-0,108 eV arasında değiştiğini bulmuşlardır.

Bundan sonraki çalışmalarda, fotoiletkenlik deneyleri yapılarak fotoiletkenlik kazanç hesabı yapılırsa, yarıiletkenin tuzak yoğunluğu belirlenebilir. Yine fotoiletkenlik deneylerinden yararlanarak, taşıyıcıların ömrü hesaplanabilir. Eğri uyumu yöntemi kullanılarak, tuzakların etkin yakalama kesitleri belirlenebilir.

KAYNAKLAR

AL-KUHAIMI, S.A., *Influence of Preparation Technique on the Structural Optical and Electrical Properties of Polycrystalline CdS Films*, Vacuum, vol:**51**, 3, 349-355, (1998).

ALCOBER, C. ve BİLMES, A.S., *Potential Distribution at the Semiconductor Thin Film Electrolyte Interface with High Density of Grain Boundaries*, Thin Solid Films, **405**, 55-63, (2002).

AYDINLI, A., GASANLY, N.M. ve AYTEKİN, S., *Trap levels in layered semiconductor Ga₂SeS*, **132**, 857-861, (2004).

ARANGUREN, G., HERNANDEZ, E., LOPEZ PESCADOR, A., DURANTE RINCON ve MAXIMA LEON, *Thermally Stimulated Current and Electrical Resistivity in CuIn₃Se₅*, Materials Letters, **58**, 573-577, (2003).

BHATTACHARYYA, D. ve CARTER, M.J., *Effect of Substrate on the Structural and Optical Properties of Chemical-Bath-Deposited CdS Films*, Thin Solid Films, **288**, 176-181, (1996).

BLAKEMORE, J.S., *Solid State Physics*, Cambridge University press., Cambridge, (1985).

BİLGİN, V., *Ultrasonik Spray-Pyrolysis Tekniği ile Farklı Taban Sıcaklıklarında Elde Edilen CdS Filmlerinin Bazı Fiziksel Özelliklerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1998).

BOUGNOT, J., DUCHEMIN, S. ve SAVELLI, M., *Chemical Spray Pyrolysis of CuInSe₂ Thin Films*, Solar Cells, **16**, 221-236, (1986).

BROWN, J.B., ve BATES, C.W., *Similarities in the Chemical Mechanisms of CuInSe₂ and CdS Thin Film Formation by Chemical Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, 188, 301-305, (1990).

CHAVEZ, H., JORDAN, M., McCLURE, J.C., LUSH, G. ve SINGH, V.P., *Physical and Electrical Characterization of CdS Films Deposited by Vacuum Evaporation Solution Growth and Spray pyrolysis*, J.Mater. Sci.: Mater.Elec., **8**, 151-154, (1997).

CHEN, R. ve KIRSH, Y., *Analysis of Thermally Stimulated Processes*, Pergamon Press, Oxford, 1-7, (1981).

CHENTHAMARAI, S., JAYARAMAN, D. ve SUBRAMANIAN, C., *Nucleation Kinetics of Cadmium Sulphide Thin Film CVD Technique*, Materials Chemistry and Physics, **63**, 2, 163-166, (2000).

CUI, H.N. ve XI, S.Q., *The Fabrication of Dipped CdS and Sputtered ITO Thin Films for Photovoltaic Solar Cells*, *Thin Solid Films*, **288**, 325-329, (1996).

DAS, B.N. ve GHOSH, S., *On the Photoconductivity of Painted and Sintered Cadmium Sulphide Thin Film*, *J.Mater.Sci.Letters*, **9**, 1449-1450, (1989).

DAS, B.N. ve SAHU S., *High Temperature Photoconductivity of Chemically deposited Cadmium Sulphide Thin Film*, *J.Mater. Sci. Letters*, **7**, 151-152, (1988).

DAS, S.K., *Variation of Properties of Electrodeposited CdS/CdTe Solar Cells Deposited on to Different Transparent Conducting Oxide Substrates*, *Thin Solid Films*, **226**, 259-264, (1993).

DAWAR, A.L., SHISHODIA, P.K., CHAUHAN, G., KUMAR, A. ve MATHUR, P.C., *Fabrication of Low Resistive CdS Thin Films*, *Thin Solid Films*, **201**, L₁-L₅, (1991).

DAWAR, A.L., SHISHODIA, P.K., CHAUHAN, G., KUMAR, A. ve MATHUR, P.C., *Growth of High-Mobility CdS Thin Films*, *J.Mater.Sci.Letters*, **9**, 547-548, (1990).

DİKİCİ, M., *Katıhal Fiziğine Giriş*, Ondokuz Mayıs Üniv. yayınları, Samsun, (1993).

DROZDAWA, A., KARSUNSKAYA, N.E., MARKEVICH, I.V., SHUL'GA, E.P. ve SHEINKMAN, M.K., *Formation of Structure Responsible for the Anomalous Temperature Dependence of the Conductance of the (001) Face of CdS Crystals*, *Sov. Phys. Semicond*, **25**, (9), 383-385, (1991).

EBENEZER, E., MURALI, K.R., CHOCKALINGAM, M.J. ve VENKATESAN, V.K., *Electrical Properties of Vacuum annealed CdS Films*, *J.Mater.Sci.*, **23**, 3861-3863, (1988).

GASANLY, N., M., AYDINLI, A. ve SALİHOĞLU, Ö, *Thermally Stimulated Current Observation of Trapping Centers in Undoped GaSe Layered Single Crystals*, *Cryst. Res. Technol.*, **36**, 3, 295-301, (2001).

GASANLY, N.M., AYDINLI, A. ve YÜKSEK, N.S, *Thermally Stimulated Currents in n-InS Single Crystals*, *Materials Research Bulletin*, **38**, 699-704, (2003).

GEDİK, E., *CdS Yarıiletken Bileşiğinin Spray Pyrolysis Yöntemi ile Elde Edilmesi ve Bazı Fiziksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2002).

GUILLEN, C., MARTINEZ, M.A. ve HERRERO, J., *Accurate Control of Thin Film CdS Growth Process by Adjusting the Chemical Bath Deposition Parameters*, *Thin Solid Films*, 335, 37-42, (1998).

GÜNAL, I. ve NAMIKOĞLU, H., *On the Temperature Dependence of the Intergain Barriers in Polycrystalline CdS Thin Films*, Thin Solid Films, **185**, 1-7, (1990).

GÜNAL, I. ve PARLAK, M., *Current Transport Mechanisms in Low-Resistive CdS Thin Films*, J.Mater. Sci.Mater.Elec., **8**, 9-13, (1997).

HAYASKI, T., NISHIKURA, T., SUZUKI, T. ve EMA, Y., *Formation and Properties of In Doped High-Conductivity CdS Film*, J.Appl. Phys., **64**, (7), 3542-3550, (1988).

HOOK, J.R. ve HALL, H.E., *Katıhal Fiziği*, (Çeviri; F.KÖKSAL), Literatür Yayıncılık, İstanbul, (1999).

ILEPERUMA, O.A., VITHANA, C., PREMARATNE, K., AKURANTHILAKA, S.N., MCGREGOR, S.M., DHARMADASA, I.M. *Comparison of CdS Thin Films Prepared by Different Techniques for Applications in Solar Cells as Window Materials*, J.Mater. Sci.:Mater.in Elec., **9**, 367-373, (1998).

JAKCSON, K.A. ve SCHROTER, W., *Handbook of Semiconductor Technology*, vol:1, Wiley-VCH Verlag, Germany, (2000).

KAO, K.C. ve HWANG, W., *Electrical Transport in Solids*, Pergamon Press, Manitoba, Canada, (1979).

KARANJAI, M.K. ve DASGUPTA, D., *Preparation and Study of Sulphide Thin Films Deposited by the Dip Technique*, Thin Solid Films, **305**, 345-350, (1987).

KAZMERSKI, L.L., BERRY, W.B. ve ALLEN, C.W., *Role of Defects in Determining the Electrical Properties of CdS Thin Films*, I.Grain Boundaries and Surfaces, J.Appl. Phys., **43**, 8, 3515-3521, (1972).

KIM, S.Y., KIM, D.S., AHN, B.T. ve IM, H.B., *Structural, Electrical and Optical Properties of In-Doped CdS Thin Films Prepared by Vacuum Evaporation*, Thin Solid Films, **229**, 227-231, (1993).

KITTEL, C., *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley&Sons, Inc., USA, (1986).

KOBAYASHI, T., SUSAKI, K. ve TANIGUCHI, S., *Preparation and Semiconductive Properties of Rock Salt Type Solid Solution Systems $Cd_{1-x}M_xS$ ($M=Sr, Ca, Mg, Pb, Sn$)*, J.Phys. Chem. Solids, **40**, 781-785, (1979).

KRISHNAKUMAR, R., SUBRAMANIAN, V., RAMPRAKASH, Y., ve LAKSHMANAN, A.S., *Thin Film Preparation by Spray-Pyrolysis for Solar Cells*, Materials Chemistry and Physics, **15**, 385-395, (1987).

KRUNKS, M., MELIKOV, E. ve SORK, E., *Formation of CdS Films by Spray Pyrolysis*, Thin Solid Films, **145**, 105-109, (1986).

KUL, M., *Cd(In₂S₃)S Yariletken Filmlerinin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniv., Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (1996).

KUL, M., *Isıl Yolla Uyarılmış Akım ile Aktivasyon Enerjilerinin Belirlenmesi*, Fen Fakültesi Dergisi, Anadolu Üniv., Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, sayı:8, 25-36, Eskişehir, (2004).

LEE, Y.H., KANG, T.W. ve KIM T.W., *Thermally Stimulated Current of Si-ion-Implanted GaAs*, J.Appl.Phys., **71**, 11, 5419-5422, (1992).

LEWANDOWSKI, A. C., McKEEVER, S. W. S., CANTWELL, E. ve ALDRIDGE, J., *Trapping Parameters in CdTe Single Crystals Determined by Thermally Stimulated Conductivity*, J. Appl. Phys., **68**, 5, 2196-2205, (1990).

LIDE, D.R., *CRC Handbook of Chemistry and Physics 78th Edition*, CRC Press., New York, (1998).

LOZADO-MARALEZ, R. ve ZELEYA-ANGEL, O., *Photoluminescence analysis of CdS Thin films under Phase Transition*, Thin Solid Films, **281-282**, 386-389, (1996).

MA, Y.Y. ve BUBE, R.H., *Properties of CdS Films Prepared by Spray-Pyrolysis*, J. Electrochem. Soc.: Solid State Science and Technology, **124**, 1430-1435, (1977).

MAEDO, H.H., KAMESHIMA, Y. Ve KAWAZOE, H., *Novel n-Type Conducting Amorphous Chalcogenide CdSIn₂S_x an Extension of Working Hypothesis for Conducting Amorphous Oxides*, J. Non-Crystalline Solids, **227-230**, 2, 804-809, (1998).

MAETA, S., KAMINATI, Y., YOSHIURA, M. Ve NUKUTO, T., *Behavior of the Discrete Energy States*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **8**, 461-467, (2001).

MAHDAVI, S.M., IRAJI ZAD, A. ve TILAKI, R.M., *The effect of target annealing temperature on optical and structural properties and composition of CdS thin films prepared by pulsed laser*, *Optical materials*, **27**, 1583-1586, (2005).

MAHMOUD, S.A., IBRAHIM, A.A. ve RIAD, A.S., *Physical properties of thermal coating CdS Thin Films Using a Modified Evaporation Source*, Thin Solid Films, **372**, 144-148, (2000).

MANDOWSKI, A., *Charge Carrier Trapping in a One-Dimensional System*, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, **8**, 1007-1010, (2001).

MARTINEZ, J.L., MARTINEZ, G., TORRES DELGADO, G., GUZMAN, O., DEL-ANGEL, P., ZELAYA ANGEL, O. ve LOZADO-MORALES, R., *Cubic CdS Thin Films Studied by Spectroscopic Ellipsometry*, J. Mater. Sci.: Mater.Elec., **8**, 399-403, (1997).

MCKELVEY, J.P., *Solid State and Semiconductor Physics*, Harper ve Row Press., New York, (1966).

MICOCCI, G. ve TEPORÉ, A., *Determination of Electron Traps in Tin Disulphide Crystals by Thermally Stimulated Current Measurements*, J. Appl. Phys., **80**, 2, 894-897, (1996).

MILNES, A.G., *Deep Impurities in Semiconductors*, A.Wiley Interscience Publications, USA, (1973).

MORTİMER, C. E., *Modern Üniversite Kimyası*, (Çev. T. Altınata, H. Akçay, G. Nişli, H. Anıl, H. Avcıbaşı, D. Balköse, S. Çelebi, E. Henden, M. Toprak, D. Tosçalı ve B. Yenigül), Çağlayan Kitabevi Yayınları, İstanbul, (1989).

NAG, B.R., *Electron Transport in Compound Semiconductors*, Spinger Verlag, NewYork, (1980).

NARAYANAN, K.L., RAJARAMAN, R., VALSAKUMAR, K.P., VIJAKUMAR, K.P. ve NAIR, K.G.M., *Irradiation-Induced persistent Photoconductivity in CdS Films Prepared by Chemical Bath Deposition*, Optical Materials, **17**, 355-358, (2001).

NEAMEN, D.A., *Semiconductor Physics and Devies*, Irwin Book Team, (1997).

OMAR, M.A., *Elementary Solid State Physics*, Addison-Wesley Publishing Company Inc., Menlo Park, California, (1975).

ORAL, M., *Güneş Pilleri*, Ege Üniversitesi yayınları, İzmir, (1979).

OUMOUS, H. ve HADIRI, H., *Optical and Electrical Properties of Annealed CdS Thin Films Obtained from a Chemical Solution*, Thin Solid Films, **386**, 87-90, (2001).

ÖZSAN, M.E., JOHNSON, D.R., SADEGHI, M., PETER, L.M., SIVAPATHASUNDARAM, D., GOODLE, G., FURLANG, J.M., ve SHINGLETON A.A., *Optical and Electrical Characterization of CdS Thin Films*, J.Mater.Sci.: Mater.Elec., **7**, 119-126, (1996).

PAL, U., SİLVA-GONZÁLEZ, R., MARTİNEZ-MONTES, G., GRAZCİA, JİMENEZ, M., VİDAL, M.A. ve TORRES, S.H., *Optical Characterization of Vacuum Evaporated Cadmium Sulfide Films*, Thin Solid Films, **305**, 345-350, (1997).

PALAFIX, A., ROMERO-PAREDES, G., MALDONADO, A., ASOMOZA, R., ACOSTA, D.R. ve PALACIOS-GOMEZ, J., *Physical Properties of CdS and CdS:In Thin Films Obtained by Chemical Spray over Different Substrates*, Solar Energy Materials and Solar Cells, **55**, 31-41, (1998).

PAMPLIN B.R., *Spray Pyrolysis of Ternary and Quaternary Solar Cells Materials, Progress in Crystal Growth and Characterization*, Pergamon Press Ltd., Great Britain, (1979).

PARTAIN, L.D., *Space-Charge-Limited-Current Diode Model for Cu_xS/CdS Solar Cells and Their Degradation*, J. Appl. Phys., **63**, 1762-1767, (1988).

PASCOE, K.J., *Properties of Materials for Electrical Engineers*, John Wiley and Sons, Toronto, (1978).

PETHKAR, S., PATIL, R.C., KHER, J.A. ve VIJAYAMOHANAN, K., *Deposition and Characterization of CdS Nanoparticle/Polyaniline Composite Films*, Thin Solid Films, **349**, 105-109, (1999).

RAMAIAH, K.S., RAJA, V.S. ve SHARON, M., *Optical and Structural Investigations on Spray Deposited CdS Films*, J.Mater. Sci.: Mater. In Elec., **9**, 261-265, (1998).

RAY, S.C., KARAJAI, M.K. ve DASGUPTA, D., *Deposition and Characterization of $Zn_xCd_{1-x}S$ Thin Films Prepared by the Dip Technique*, Thin Solid Films, **322**, 117-122, (1998).

RICOLLEAU, L., AUDINAT, L., GANDAÏS, M. Ve GACAÏN, T., *Epitaxial Growth of ZnS on CdS in CdS/ZnS Nanostructures*, Thin Solid Films, **336**, 213-217, (1998).

RISHOVA, M. ve RISHOV, M., *XPS Profile Analysis on CdS Thin Film Modified with Ag by an Exchange*, Applied Surface Science, **181**, 1-2, 68-77, (2001).

RUXANDRA, V. ve ANTOHE, S., *The Effect of the Electron Irradiation on the Electrical Properties of Thin Polycrystalline CdS Layers*, J. Appl., Phys., **84**, 2, 727, (1998).

SAHU, S.N., *Chemical Deposition of CdS Films, Structure, RBS, PIXE, Optical and Photoelectrochemical Solar Cell Studies*, J. Mater. Sci. Elec., **6**, 43-51, (1995).

SCHON, J.H., SCHENKER, O. ve BATLOGG, B., *Solution Processed CdS Thin Films Transistors*, Thin Solid Films, **385**, 271-274, (2001).

SEEGER, K., *Semiconductor Physics in Introduction*, (1982).

SEZGİN, Y., *Spray Pyrolysis Yöntemi ile Elde Edilen CdZnS Yarıiletken Bileşiminin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2002).

SMITH, W.T., *Principles of Materials Science and Engineering*, McGraw-Hill Inc., USA, (1990).

SPANULESCU, I., SECĂREANU, I., BĂLTĂTEANU, N., ABDI, I.Z. ve KHALASS, T., *Effect of Electron Irradiation on Electrophysical Properties of CdSe and CdS Thin Films*, Thin Solid Films, **143**, 1-6, (1986).

STARYGA, E., *Structure and Some Electrical Properties of Amorphous Diamond-like Carbon Films*, Chaos, Solitons&Fractals, **10**, 12, 2075-2086, (1999).

SU, B. ve CHOY, K.L., *Electrostatic Assisted Aerosol Jet Deposition of CdS CdSe and ZnS Thin Films*, Thin Solid Films, **361-362**, 102-106, (2000).

SU, B. ve CHOY, K.L., *Microstructure and Properties of the CdS Thin Films Prepared by Electrostatic Spray Assisted Vapour Deposition (ESAVD) Method*, Thin Solid Films, **359-362**, 160-164, (2000).

SZE, S.M., *Physics of Semiconductor Devices*, Harper ve Row Press, New York, (1981).

TOPIC, M. ve KATOVIC, Z., *Investigation of β Relaxation in Novolac Phenol-formaldehyde Resin by use of Thermally Stimulated Depolarization Current*, Polymer, **35**, 25, 5536-5540, (1994).

TOPIC, M., VALIC, S., GALLOT, Y. ve MUSIC, S., *Investigation of Relaxations in Polystyrene-polyoxyethylene Copolymer by Thermally Stimulated Current*, Thermochemica Acta, **400**, 205-211, (2003).

TOUSKOVA, J., KINDL, D. ve KOVANDA, T., *Preparation and Fundamental Properties of CdS-CdTe Heterojunctions*, Thin Solid Films, **214**, 92-98, (1992).

ULLRICH, B., SAKAI, H. ve SEGAWA, Y., *Optoelectronic Properties of Thin Film CdS Formed by Ultraviolet and Infrared Pulsed-Laser Deposition*, Thin Solid Films, **385**, 220-224, (2001).

XIMELLO-QUIEBRASA J.N., CONTRERAS-PUENTEA G., RUEDA-MORALES, G., VIGILA, O., SANTANA-RODRIGUEZ, G., MORALES-ACEVEDO, A., *Properties of CdS thin films grown by CBD as a function of thiourea concentration*, Solar energy Materials & Solar Cells, Article in press, (2005).

YÜKSEK, N. S., GASANLY, N.M. ve ÖZKAN, H., *Thermally Stimulated Current Analysis of Shallow Levels in TlGaS₂ Layered single crystals*, Semiconductor Science and Technology, **18**, 834-838, (2003).

ZINOVIEV, K.V. ve ANGEL, O.Z., *Materials Science Communication Influence of Low Temperature Thermal Annealing on the Dark Resistivity of Chemical Bath Deposited CdS Films*, *Materials Chemistry and Physics*, **7**, 100-102, (2001).

ZOR, M., *Spray Pyrolysis ile Elde Edilen AgInS₂ Bileşiminin Bazı Fiziksel Özellikleri*, Doçentlik tezi (yayımlanmamış), Ankara, (1982).

ZOR, M., KUL, M., AYBEK, A.Ş., AKSAY, S., ILICAN, S., ÇAĞLAR, Y., ÇAĞLAR, M., GÜRCAN, Y. ve TURAN, E., *Isıl Yolla Uyarılmış Akım ile Tuzak Derinliği Ölçümü*, *Bilimsel Araştırma Projesi*, Proje No:011056, Anadolu Üniv., Eskişehir, (2004).