

**T.C.
NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ÜÇLÜ BİLEŞİK YARIİLETKEN $AgIn_5S_8$ VE DÖRTLÜ
BİLEŞİK YARIİLETKEN $TlGaSeS$ TEK
KRİSTALLERİNDE ISIL UYARILMIŞ AKIM
ÖLÇÜMLERİ**

**Tezi Hazırlayan
Bekir SÜLÜNHAT**

**Tezi Yöneten
Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM**

**Fizik Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

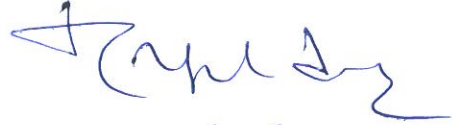
**Ağustos 2015
NEVŞEHİR**

Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM danışmanlığında **Bekir SÜLÜNHA**T tarafından hazırlanan “**Üçlü Bileşik Yarıiletken AgIn₅S₈ ve Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri**” adlı bu çalışma, jürimiz tarafından Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalında **Yüksek Lisans** tezi olarak kabul edilmiştir.

07/08/2015

JÜRİ

Başkan : Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM



Üye : Doç. Dr. Sezen AKSÖZ



Üye : Yrd. Doç. Dr. Mehmet IŞIK



ONAY:

Bu tezin kabulü Enstitü Yönetim Kurulunun 13.08.2015 tarih ve 2015/34-04 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

20.08.2015

Doç. Dr. Bayram DEVİREN

Enstitü Müdür V.



TEZ BİLDİRİM SAYFASI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada yer alan bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu ve bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.



Bekir SÜLÜNHAT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, her türlü maddi ve manevi desteğini esirgemeyen kıymetli ve çok değerli hocam Sayın Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM' a teşekkürlerimi sunarım.

Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Sayın Prof.Dr. Nizami GASANLY'a,

Atılım Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fizik Grubu öğretim üyesi Sayın Yrd. Doç Dr. Mehmet IŞIK'a

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünün tüm öğretim elemanlarına teşekkür ederim.

Başta mutluluk, huzur ve yardımlarını esirgemeyen değerli eşim Emine SÜLÜNHAT olmak üzere, her zaman büyük özveriyle yanımda olan arkadaşlarıma ve hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiğim annem İfakat SÜLÜNHAT, babam Mustafa SÜLÜNHAT ve tüm kardeşlerime çok teşekkür ederim.

ÜÇLÜ BİLEŞİK YARIİLETKEN $AgIn_5S_8$ VE DÖRTLÜ BİLEŞİK YARIİLETKEN $TlGaSeS$ TEK KRİSTALLERİNDE ISIL UYARILMIŞ AKIM ÖLÇÜMLERİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Bekir SÜLÜNHA

NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2015

ÖZET

$AgIn_5S_8$ tek kristallerinde ısıl uyarılmış akım (IUA) ölçümleri 10-70 K sıcaklık aralığında yapıldı. IUA verilerinin analizinden 5 meV'a yerleşmiş bir elektron tuzağı bulundu. Tuzakların aktivasyon enerjisi değişik yöntemler kullanarak hesaplandı ve sonuçlar birbiriyle uyumlu olduğu görüldü. Tuzakların yakalama tesir kesiti $2.2 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ ve konsantrasyonu $6.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Deneysel veriler ve teorik öngörüler yavaş yavaş yeniden tuzaklama modelini doğrulamaktadır.

$TlGaSeS$ tek kristallerinde yük taşıyıcı tuzakları IUA ölçümleriyle çalışıldı. 12 meV'a yerleşmiş hol tuzağı ile 13, 20 ve 50 meV'a yerleşmiş elektron tuzakları bulundu. Değişik yöntemler kullanılarak tuzak parametreleri hesaplandı ve sonuçlar birbiriyle uyumluydu. $TlGaSeS$ tek kristallerine iyon ekme tekniği ile oda sıcaklığında azot iyonları ekildi ve IUA ölçümleriyle etkisi incelendi. 6 meV'a yerleşmiş sığ elektron tuzağı ile 0.80 eV'a yerleşmiş derin hol tuzağı bulundu. Elektron ve hol tuzak merkezlerinin tuzak parametreleri hesaplandı.

Anahtar Kelimeler: $AgIn_5S_8$ ve $TlGaSeS$ tek kristalleri, IUA, Tuzak merkezleri.

Tez Danışman: Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM

Sayfa Adeti: 84

**THERMALLY STIMULATED CURRENT MEASUREMENTS IN TERNARY
COMPOUND SEMICONDUCTOR AgIn_5S_8 AND QUATERNARY COMPOUND
SEMICONDUCTOR TlGaSeS SINGLE CRYSTALS**

(M. Sc. Thesis)

Bekir SÜLÜNHAT

**NEVŞEHİR HACI BEKTAŞ VELİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES**

August 2015

ABSTRACT

Thermally stimulated current measurements (TSC) were carried out on as-grown AgIn_5S_8 single crystals. The investigations were performed in temperatures ranging from 10 to 70 K with heating rate of 0.2 K s^{-1} . The analysis of the data revealed the electron trap level located at 5 meV. The activation energies of the traps have been determined using various methods of analysis, and they agree with each other. The calculation for these traps yielded $2.2 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ for capture cross section and $6.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ for the concentration. It was concluded that in this center retrapping was negligible, as confirmed by the good agreement between the experimental results and the theoretical predictions of the model that assumes slow retrapping.

Charge carrier traps in TlGaSeS single crystals were studied by thermally stimulated current measurements. Experimental evidences were found for the presence of hole trapping center located at 12 meV from valance band and electron trapping center located at 13, 20, 50 meV from conduction band. The trap parameters have been calculated using various methods of analysis, and these agree well with each other. TlGaSeS single crystals have been implanted by ion implantation technique. The samples were bombarded at room temperature by nitrogen ion. The effect of N implantation was studied by thermally stimulated current measurements. Experimental evidences were found for the presence of electron trapping center and hole trapping center with activation energy of 6 meV and 0.80 eV, respectively. The trap parameters have been calculated for electron and hole trapping centers.

Key Words: AgIn_5S_8 and TlGaSeS single crystals, TSC, Trapping centers.

Tez Danışman: Doç. Dr. Tacettin YILDIRIM

Page Number: 84

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY SAYFASI	i
TEZ BİLDİRİM SAYFASI	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vi
TABLOLAR LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLER LİSTESİ	xi
RESİMLER LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	xv
1. BÖLÜM	
GİRİŞ	1
2. BÖLÜM	
GENEL BİLGİLER	4
2.1. Yarıiletkenler.....	4
2.1.1. Bant teorisi	4
2.1.2. Yarıiletkenlerde katkılama	5
2.1.3. Kristal kusurları.....	7
2.1.3.1. Noktasal kusurlar.....	7
2.1.3.2. Çizgisel kusurlar.....	7
2.1.3.3. Düzlemsel kusurlar.....	8
2.2. Mobilite	8
2.3. Sürüklenme Akımı	12
2.4. İletkenlik.....	12

2.5.	Özdirenç	12	
2.6.	Isıl Uyarılmış İşlemler.....	14	
2.7.	Isıl Uyarılmış Akım.....	14	
2.7.1	Isıl uyarılmış akım sürecindeki geçişler.....	14	
2.7.2	Teorik yaklaşım.....	16	
2.7.2.1.	Yavaş yeniden tuzaklama.....	18	
2.7.2.2.	Hızlı yeniden tuzaklama.....	19	
2.7.3	Eğri fit etme.....	20	
2.7.4	Başlangıçtaki artış yöntemi	22	
2.7.5	Pik şekli yöntemi	23	
2.8.	İyon Ekme Yöntemi	24	
3. BÖLÜM			
MATERYAL VE YÖNTEMLER			26
3.1.	Isıl Uyarılmış Akım (IUA) Ölçümleri.....	26	
3.1.1.	Üçlü bileşik yarıiletken $AgIn_5S_8$ tek kristallerinde IUA ölçümleri.....	26	
3.1.2.	Dörtlü bileşik yarıiletken $TlGaSeS$ ve $TlGaSeS:N$ tek kristallerinde IUA ölçümleri.....	28	
3.2.	Fotoiletkenlik Azalma Deneyleleri	29	
3.3.	Dörtlü Bileşik Yarıiletken $TlGaSeS$ Tek Kristallerine Azot İyonu Ekme İşlemi.....	30	
4.BÖLÜM			
BULGULAR VE TARTIŞMA			32
4.1.	Üçlü Bileşik Yarıiletken $AgIn_5S_8$ Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri.....	32	
4.1.1.	Aktivasyon enerjisinin bulunması.....	34	
4.1.1.1	Eğri fit etme yöntemi.....	34	

4.1.1.2	Başlangıçtaki artış yöntemi	35
4.1.1.3	Pik şekli yöntemi	35
4.1.2.	Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması	36
4.2.	Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinin Yapısı.....	38
4.3.	Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri.....	39
4.3.1.	Dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde elektron tuzak merkezleri için ısıl uyarılmış akım ölçümleri.	39
4.3.1.1	Eğri fit etme yöntemi.....	40
4.3.1.2	Başlangıçtaki artış yöntemi	42
4.3.2.	Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması.	43
4.3.3.	Dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde hol tuzak merkezleri için ısıl uyarılmış akım ölçümleri.....	45
4.3.3.1	Eğri fit etme yöntemi.....	45
4.3.3.2	Başlangıçtaki artış yöntemi.	46
4.3.3.3	Hol tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması.	47
4.4.	Azot Ekilen Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri.....	48
4.4.1.	Azot ekilen dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde elektron tuzak merkezleri için ısıl uyarılmış akım ölçümleri.....	49
4.4.1.1	Eğri fit etme yöntemi.....	50
4.4.1.2	Başlangıçtaki artış yöntemi	50
4.4.1.3	Pik şekli yöntemi.....	51

4.4.1.4	Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması	51
4.4.2.	Azot ekilen dörtdü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde hol tuzak merkezleri için ısı uyarılmış akım ölçümleri.	53
4.4.2.1	Eğri fit etme yöntemi.....	54
4.4.2.2	Başlangıçtaki artış yöntemi.	54
4.4.2.3	Pik şekli yöntemi.....	55
4.4.2.4	Hol tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması	55
5.BÖLÜM		
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....		59
KAYNAKLAR		60
ÖZGEÇMİŞ		67

TABLULAR LİSTESİ

Tablo 4.1.	AgIn ₅ S ₈ kristallerinde aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu	37
Tablo 4.2.	TlGaSeS kristallerinde IUA eğrisinden bulunan A, B ve C tuzak merkezleri için aktivasyon enerjisi (E_t), kaçmaya teşebbüs etme frekansı (ν), yakalama tesir kesiti (S_t) ve tuzak yoğunluğu (N_t). . .	43
Tablo 4.3.	TlGaSeS kristallerinde hol tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu	46
Tablo 4.4.	TlGaSeS:N kristallerinde elektron tuzaklarının aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu	53
Tablo 4.5.	TlGaSeS:N kristallerinde hol tuzaklarının aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu	56

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Çeşitli kristallerde mümkün olan enerji bantlarının doluluğu	5
Şekil 2.2.	Ayrık donör enerji hali ve İyonize olmuş bir donör halinin enerji-bant diyagramı	6
Şekil 2.3.	Ayrık akseptör enerji hali ve İyonize olmuş bir akseptör halinin enerji-bant diyagramının	6
Şekil 2.4.	Mobilitenin sıcaklıkla değişimi.	11
Şekil 2.5.	TL,IUA,DSGS ve IEES'nin arasındaki farkın şematik gösterimi. . .	14
Şekil 2.6.	IUA tekniği ile bant aralığındaki muhtemel elektronik geçişler (a)Banttan banda uyarılma, (b) ve (e) elektron ve hol tuzaklanması, (c) ve (f) elektron ve hol geçişi, (d) ve (g) indirekt-rekombinasyon, (h) direkt-rekombinasyon[57]	15
Şekil 2.7.	Pik şekli yönteminde kullanılan parametrelerin gösterimi..	23
Şekil 2.8.	İyon ekme cihazı..	24
Şekil 3.1.	Sandviç konfigürasyonuna sahip örneğin basit gösterimi	27
Şekil 3.2.	IUA deney düzeneği diyagramı	27
Şekil 3.3.	Fotoiletkenlik deney düzeneği.	29
Şekil 3.4.	TlGaSeS kristaline ekilen azot iyonlarının iyon ekme dozu, İyonların enerjisi ve derinliği.	31
Şekil 4.1.	AgIn ₅ S ₈ tek kristalinin negatif kutbu aydınlatıldığında elde edilen IUA.	33
Şekil 4.2.	AgIn ₅ S ₈ tek kristalinde elektron tuzaklarından kaynaklanan IUA. . .	33
Şekil 4.3.	AgIn ₅ S ₈ tek kristalinde IUA verilerine uygulanan teorik fit.	35
Şekil 4.4.	AgIn ₅ S ₈ tek kristalinde IUA değerlerinin 1000/T'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru.	36
Şekil 4.5.	AgIn ₅ S ₈ tek kristalinde fotoiletkenlik azalma eğrisi.	38

Şekil 4.6.	TlGaSeS kristalinin yapısı. (1) Tl ve Se(S) atomları arasındaki katman-içi bağlanmayı gösterir. (2) Ga ve Se (S) atomları arasındaki katmanlar arası bağlanmayı gösterir. I, II, III, IV ve V rakamları farklı atom düzlemlerini belirtmektedir.39
Şekil 4.7.	TlGaSeS tek kristalinin negatif kutubu aydınlatıldıktan sonra alınan IUA.40
Şekil 4.8.	TlGaSeS kristalinin IUA eğrisine monomoleküler şartlarda iki pik ile yapılan fit.41
Şekil 4.9.	TlGaSeS kristallerinde A ve B piklerine “thermal cleaning” işlemi yaptıktan sonra görünen C piki.42
Şekil 4.10.	TlGaSeS tek kristalinde IUA değerlerinin $1000/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafikleri ve fit yapılan doğrular.43
Şekil 4.11.	TlGaSeS tek kristalinde negatif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi.44
Şekil 4.12.	TlGaSeS tek kristalinin pozitif kutubu aydınlatıldıktan sonra alınan IUA.45
Şekil 4.13.	TlGaSeS tek kristalinde IUA verilerine uygulanan teorik fit.46
Şekil 4.14.	TlGaSeS tek kristalinde IUA değerlerinin $1000/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru.47
Şekil 4.15.	TlGaSeS tek kristalinde pozitif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi.48
Şekil 4.16.	TlGaSeS:N kristalinde elektron tuzaklarından kaynaklanan IUA.49
Şekil 4.17.	TlGaSeS:N kristalinde elektron tuzakları için IUA verilerine uygulanan teorik fit.50
Şekil 4.18.	TlGaSeS:N kristalinde IUA değerlerinin $1000/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru.51
Şekil 4.19.	TlGaSeS:N tek kristalinde negatif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi.52

Şekil 4.20.	TlGaSeS:N kristalinde hol tuzaklarından kaynaklanan IUA.	53
Şekil 4.21.	TlGaSeS:N kristalinde hol tuzakları için IUA verilerine uygulanan teorik fit	54
Şekil 4.22.	TlGaSeS:N kristalinde IUA değerlerinin $1000/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru.	55
Şekil 4.23.	TlGaSeS:N tek kristalinde pozitif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi.	57

RESİMLER LİSTESİ

Resim 3.1. Varian Model 200-DF4 İyon Ekme Sistemi	30
---	----

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

A	Alan
C	Sabit
DC	Doğru akım
E	Aktivasyon enerjisi
G	Fotoiletkenlik kazancı
IUA	Isıl uyarılmış akım
J	Elektron sürüklenme akım yoğunluğu
K	Kelvin
k	Boltzmann sabiti
L	Uzunluk
m_e^*	Elektron etkin kütle
m_h^*	Holl etkin kütle
m_o	Vakumda serbest bir elektronun kütlesi
N_t	Tuzak yoğunluğu
N_c	İletim bandındaki etkin durum yoğunluğu
n_t	Toplam elektron sayısı
S_t	Elektron tuzak merkezinin yakalama tesir kesiti
S_r	Rekombinasyon merkezlerinin yakalama tesir kesiti
T_0	Başlangıç sıcaklığı

T_l ve T_h	Maksimum akım değerinin yarı ykseklieine karşılık gelen sıcaklık değerleri
T_M	Maksimum sıcaklık
t_{tr}	Taşıyıcıların kontaklar arasındaki geçiş süresi
Q	Boşaltılmış yük miktarı
ρ	zdiren
σ	Yarıiletken maddenin iletkenliği
μ_p	Hollerin mobilitesi
μ_n	İletkenlik bandındaki elektronların mobilitesi
τ	Relaksiyon (durułma) zamanı
Ω	Ohm
μm	Mikrometre
β	Isıtma hızı
ν	Kaçmaya teşebbüs etme frekanssı

1.BÖLÜM

GİRİŞ

Üçlü bileşik yarıiletken AgIn_5S_8 tek kristalleri görünür ışık aralığında yüksek fotoiletkenliğe sahip [1,2], dolaylı bant aralığının 300 ve 96 K'de 1.8 eV ve 1.9 eV olması nedeniyle uzun süre büyük ilgi görmüştür. Bu enerji bantı değeri, fotovoltaiik güneş pili uygulamalarında kullanılabilir. AgIn_5S_8 kristalinin kızılötesi yansıma ve raman saçılma spektrumu araştırılmıştır [3-4]. Önemli elektriksel ve optik özellikleri vardır [5-12].

Kübik spinel yapıya sahip AgIn_5S_8 tek kristali hem katı hal fotovoltaiik hem de fotoelektrokimyasal uygulamalar [13-16] için potansiyel adaylardan biri olarak kabul edilir. Yarıiletkenlerin foto-elektronik özellikleri, genel olarak, yük tuzaklarının varlığından güçlü biçimde etkilenir. Örneğin; tuzak merkezleri, yük taşıyıcılarının mobilitesi ve yaşam süresini, dolayısıyla malzemenin fotoiletkenliğini azaltabilir. Serbest taşıyıcıların yoğunluğu ve böylece malzeme iletkenliği de tuzakların varlığından etkilenir. Tuzak merkezleri lüminesans verimliliğini de düşürür. Tuzak düzeyleri yarıkararlıdır ve yükleri uzun bir süre tutabilir. Tuzak seviyelerinden yükler optik ya da termal uyarılma ile serbest bırakılabilir. Bu nedenle kristalin katkılı olmasından ve kristaldeki yapısal kusurlardan dolayı, mevcut olan tuzak parametreleri hakkında bilgi sahibi olmak önemlidir. Genel olarak, Isıl Uyarılmış Akım (IUA) tekniği ile hatta tek bir IUA spektrumundan elde edilebilir.

Tuzak düzeyleri ile ilgili bazı niteliksel bilgilere rağmen, ölçülen pik şekillerinin ve pozisyonlarının ısıtma hızı, kinetik düzen ve tuzak doluluğu gibi çeşitli parametrelere bağlı olmasından dolayı bunun yorumlanması son derece karmaşıktır. Ayrıca, tuzak sistemi benzer derinliklere sahip çoklu düzeylerden oluşabilir veya enerji düzeylerinin sürekli dağılımından da oluşabilir. Bu, tuzak parametrelerinin doğru belirlenmesini zorlaştırmaktadır. S. Özdemir ve ark. [17], 80 K ve 300 K arasında geniş sıcaklık aralığında AgIn_5S_8 kristallerinde tuzak dağılımları araştırmışlar ve 90 K'de bir IUA piki bulmuşlardır. Sürekli olan tuzak dağılımının 40 meV'dan 120 meV'a Gauss dağılımı gösterdiği görülmüştür.

Katmanlı yarı iletken kristal TlGaSeS selenyum (sülfür) atomlarının yarısının sülfür (selenyum) atomları ile değiştirilmesi ile TlGaSe_2 ve TlGaS_2 'den meydana gelir.

Kristal örgü (0 0 1) düzlemine [18,19] paralel hizalanmış iki boyutlu katmanlara sahiptir. TlGaSeS'de Tl ve Se(S) atomları arasındaki bağlanma katmanlar arası bağlanmadır, buna karşılık Ga ve Se(S) arasındaki bağlanma katman içi bağlanmadır.

I. Güler ve ark [20], TlGaSeS kristalinin optik özelliklerini incelemiş ve oda sıcaklığında doğrudan bant aralığı enerjisini 2,58 eV, dolaylı bant aralığı enerjisini de 2.27 eV olarak bulmuşlardır. TlGaSe₂ ve TlGaS₂ kristallerinin optik ve fotoelektriksel özellikleri incelenmiştir [21–26]. Bu kristaller, 0.5–14.0 µm dalga boyu aralığında çift kırınım indisine ve spektrumun görünür aralığında yüksek fotohassasiyete sahip olmaları nedeniyle optoelektronik uygulamalar için yararlıdır [26].

TlBX₂ (burada B = Ga ve In; X = S veya Se) ile formüle edilen yarıiletken çalkogenitler yapısal özelliklerinden ve potansiyel optoelektronik uygulama alanlarından dolayı çok fazla ilgi görmekteler [27–29]. Bu katmanlı yarı iletken kristaller oda sıcaklığındaki C2/c uzay grubu monoklinik sisteme aittirler. Bu kristallerin örgüsü [001] yönüne dik düzenlenmiş iki boyutlu katmanların birbirini izlemesinden oluşur.

TlGaSe₂ tek kristalinin yapısal, optik ve elektriksel özellikleri birçok araştırmacı tarafından araştırılmıştır. Raman, Brillouin ve kızılötesi spektrumları [30–32], optik ve dielektrik özellikleri [33], soğurma spektrumları [34], karanlık elektriksel iletkenlik ve Hall ölçümleri [35] kristal üzerine yapılmış karakterizasyon çalışmalarından bazılarıdır. Daha önce, oda sıcaklığında In/TlGaSe₂ ve InSe/TlGaSe₂ bariyer yapılarında fotovoltajik bir etki ortaya çıkmıştır [36]. Optik dolaylı ve doğrudan bant aralık enerjilerinin sırasıyla 1.97 ve 2.26 eV olduğu bulunmuştur [37]. Malzemelerin optik ve elektriksel özelliklerinin kusurlar ve yabancı maddelerin var olmasından etkilendiği bilinmektedir.

A. F. Qasrawi ve ark. [38], TlGaS₂ kristallerinin optoelektronik ve elektriksel özelliklerini araştırmışlardır. Doğrudan ve dolaylı bant aralıklarını 2.25 eV ve 2.51 eV, dielektrik sabitini 6.25; kırılma indisini 2.5 olarak bulmuşlardır.

Optoelektronik aygıtların performansı üzerinde kusurların etkisi iyi bilinen bir konudur. LED'ler veya lazerler gibi optoelektronik cihazlarda kusurlar, kusur yoğunluğuna bağlı olarak iç kuantum verimliliğini düşüren hatta ışık oluşumunu imkânsız kılan ışınımsız rekombinasyon merkezleri gibi davranabilir.

Elektronik cihazlarda kusurlar, taşıyıcı mobilitesini düşüren saçılma merkezleri oluşturur ve böylece yüksek frekanslı işlemi engeller.

Yarı iletkenlerde tuzak merkezlerinin özelliklerini belirlemek için çeşitli deneysel yöntemler arasında Isıl Uyarılmış Akım (IUA) ölçümlerinin yapılması son derece kolaydır ve tuzak durumları ile ilgili detaylı bilgi sağlamaktadır [39–45].

IUA deneylerinde tuzaklar, uygun bir ışık kaynağı kullanarak düşük sıcaklıklarda taşıyıcıların banttan banta uyarılması ile doldurulur. Tuzaklanmış yük taşıyıcılar ısınma sonucu numunenin iletkenliği üzerinde geçici bir artışa neden olmaktadır. IUA ölçümü ile elde edilen IUA eğrisi incelenerek tuzak merkezleri hakkında bilgi elde edilir.

Yüksek lisans tezi olarak hazırlanan bu çalışmada; optiksel ve elektriksel öneme sahip yarıiletken AgIn_5S_8 , TlGaSeS ve azot ekilmiş TlGaSeS tek kristallerinde IUA ölçümleri alınarak tuzak merkezlerine ait parametreler tanımlanmaya çalışılmıştır.

2.BÖLÜM

GENEL BİLGİLER

2.1. Yarıiletkenler

İletkenlikleri metallere yalıtkanlar arasında olan maddelere yarıiletken denir [46]. Özdirençleri, oda sıcaklığında 10^{-2} ile 10^9 $\Omega.cm$ aralığında değişir. Bu aralık; iletkenlikleri 10^6 ($\Omega.cm$)⁻¹'den daha büyük iletkenliğe sahip olan iyi iletkenler ile iletkenlikleri 10^{-14} ile 10^{-20} ($\Omega.cm$)⁻¹ aralığında olan yalıtkanlar arasındaki bölgeye düşer. Yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık arttıkça özdirenç azalır, sıcaklık azaldıkça özdirenç artar ve mutlak sıfır noktasında yalıtkan özellik gösterir [47].

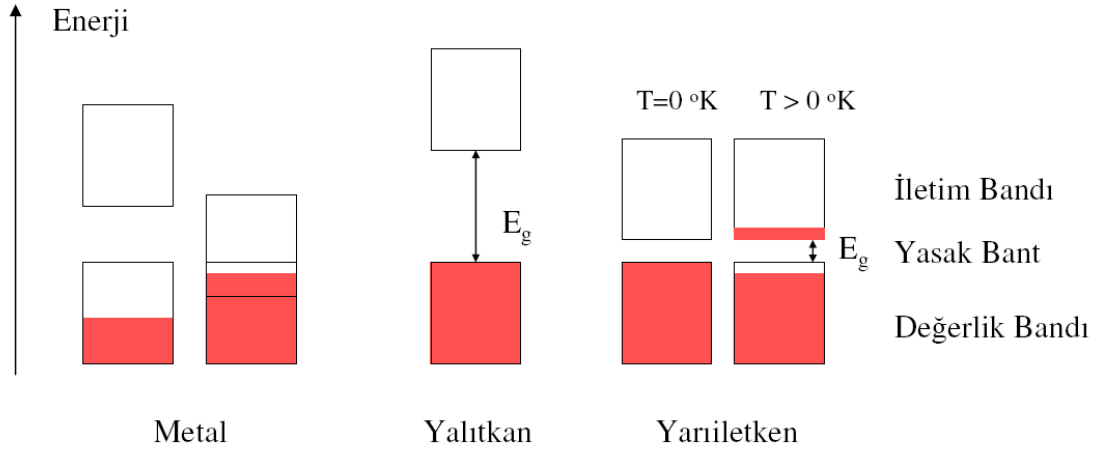
Elektronun birçok alanında teknolojik uygulamalara sahip olan yarıiletkenlerin, güneş pili, diyot, transistör ve tümeleşik devre elemanları gibi örnekleri vardır [48]. Ohm yasasına uymayan yarıiletkenler ışığa duyarlıdır. Tek yönde akım geçmesine izin veren doğrultucu devrelerde, lazer diyot (LDs) ve ışık yayan diyot (LED) gibi optoelektronik devre uygulamalarındaki devre elemanı yapımında kullanılırlar [49].

Yarıiletkenler genel olarak element yapıda ve bileşik yapıda olan yarıiletkenler olarak sınıflandırılabilir; elementel yapıda olanlar periyodik tablonun IV. grubunda yer alan yarıiletkenlerdir. Bunlar C, Si, Ge' dir. Bileşik yapıda olan yarıiletkenlere örnek olarak GaAs, GaP, InP, AlAs, ZnS, CdS, ZnSe, CdSe ve ZnO yarıiletken malzemeler gösterilebilir [46]. Katkılama işlemi yaparak yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özelliklerini değiştirebiliriz.

2.1.1. Bant Teorisi

Kristal örgüde potansiyel uzaklığın bir fonksiyonudur ve ortalama sabit bir değere sahiptir. Hareketi incelenen elektronların böyle periyodik bir alanda; dalgaların belirli seçilmiş yansıma durumları olacaktır. Bu durum enerjinin sürekli bir değişim göstermeyeceğini ve buna karşılık gelen enerji aralıklarının bulunması gerektiğini gösterir. Böylece kristal, yarı sürekli enerji spektrumu, yasaklanmış ve izinli enerji durumlarına karşılık gelen bantlara bölünür. Enerji aralıkları veya bant aralıkları terimleri yasaklanmış enerji aralıkları için kullanılır. Kristalin yalıtkan özellik göstermesi için yasaklanmış enerji bantlarının tümü ile dolu ya da boş olması gerekmektedir.

Kristalin metalik özellik göstermesi için, bantlardan bir veya daha çoğu kısmen doldurulmuş olması gerekmektedir. Bunların dışında bantların, birkaç tanesi çok az bir miktar dolu ya da boş ise bu tür bir kristal yarıiletken veya yarı metalik özeliğe sahiptir (Şekil 2.1) [50].



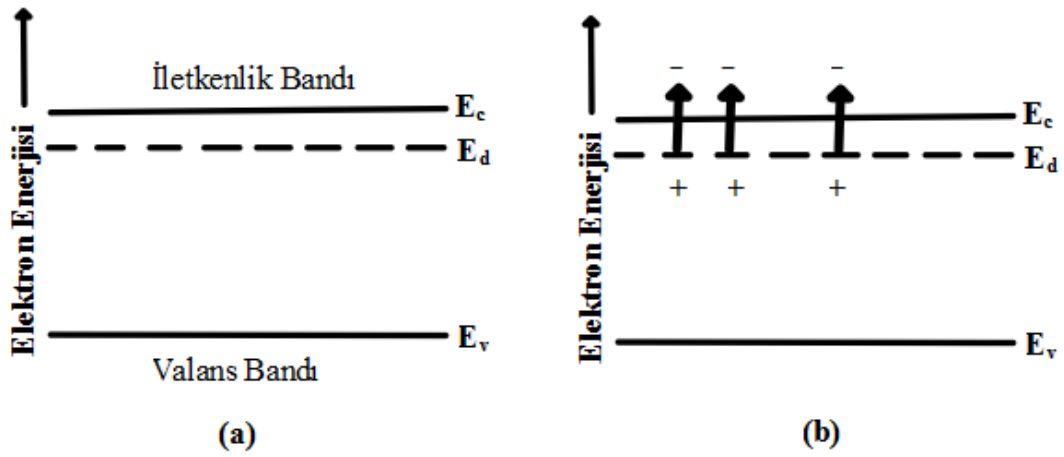
Şekil 2.1. Çeşitli kristallerde mümkün olan enerji bantlarının doluluğu

2.1.2. Yarıiletkenlerde katkılama

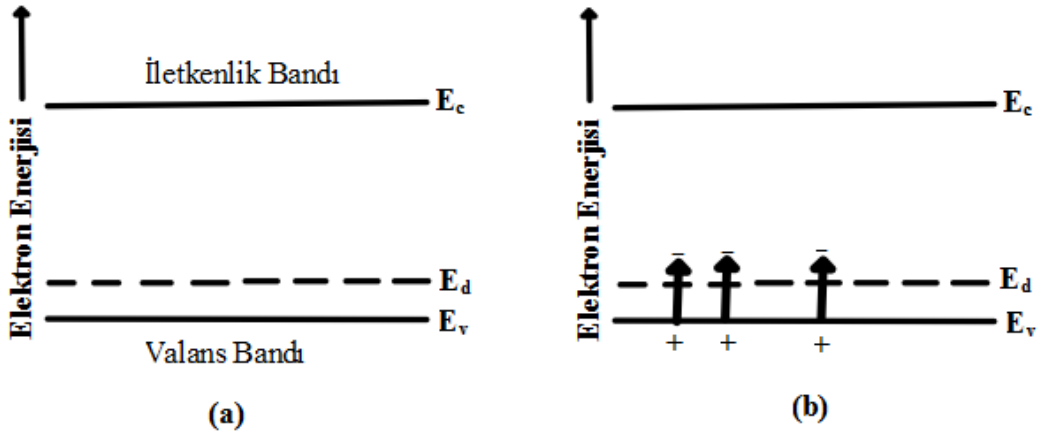
Yarıiletkenlerin elektriksel karakteristiklerini önemli ölçüde değiştirmek için özel katkı veya kirlilik atomlarının kontrollü ilavesi yapılabilir. Katkılanmış yarıiletkenler, yarıiletken devre elemanlarının fabrikasyonunda önemlidir. Si IV: grup bir elementtir ve 4 valans elektronuna sahiptir. V. grup bir element olan ve 5 valans elektronuna sahip fosfor (P)'un katkılındığını düşünelim. P, 4 elektronu Si atomlarıyla kovalent bağ yapacak ve fosfor atomuna daha gevşekçe bağlı beşinci elektron atomdan ayrılacaktır. Beşinci valans elektronu bir donör elektronu olarak adlandırılır. Eğer donör elektronu küçük bir termal enerji kazanırsa, geride pozitif yüklü bir fosfor iyonu bırakarak iletkenlik bandı içine çıkabilir. İletkenlik bandına bir elektron veren kirlilik atomları donör kirlilik atomu olarak adlandırılır. Donör kirlilik atomları, iletkenlik bandında elektron verebilirler. Bu şekilde elde edilen maddeler n-tipi yarıiletken olarak adlandırılır (Şekil 2.2).

Silisyuma kirlilik atomu olarak III. Grup bir elementi bor (B) katkılındığımızı düşünelim. III. grup element üç valans elektronuna sahiptir ve bunların hepsi Si'daki kovalent bağlanmaya katılır. Bir kovalent bağının biri boştur.

Eğer bir elektron bu boş pozisyonu işgal ederse bor atomunun net yük durumu şimdi negatif olacağından dolayı, bu elektronun enerjisi valans elektronunun enerjisinden daha büyük olacaktır. Bu III. Grup atom valans bandından bir elektron aldığı için akseptör kirlilik atomu olarak adlandırılır. Bu akseptör atomu, iletkenlik bandında holler oluşturabilir. Bu şekilde yapılan katkılama ile oluşan yarıiletken maddelere p-tipi yarıiletken maddeler denir (Şekil 2.3.) [46].



Şekil 2.2. a) Ayrık donör enerji hali ve b) İyonize olmuş bir donör halinin enerji-bant diyagramı



Şekil 2.3. a) Ayrık akseptör enerji hali ve b) İyonize olmuş bir akseptör halinin enerji-bant diyagramı

2.1.3. Kristal kusurları

Kristal yapıların atom veya molekül dizilimlerinde görülen çeşitli kusurlar vardır. Bu kusurlar kristallerde mükemmelliği bozan düzensizliklere sahiptirler. Temelde kristallerde oluşabilecek üç tip örgü kusuru vardır.

2.1.3.1. Noktasal kusurlar

Uzaydaki herhangi bir boyutta uzanmayan, yalnızca bir atomda veya o atomun çevresinde oluşan kusurlardır. Periyodik düzenden sapma sadece birkaç atomun civarında yerleşmişse, bu tür kusurlar nokta kusurlar olarak adlandırılır. Bir atomun eksik olduğu boşluk kusuru, bir atomun fazla olduğu ara yer kusuru ve atom büyüklüklerinin farklı olması birer noktasal kusurdur. İyonik kristal yapılarda zıt iyon çiftinin eksik olması Schottky kusuru, yer değiştirmiş iyonların olması ise Frenkel kusuru olarak adlandırılmaktadır

2.1.3.2. Çizgisel kusurlar

Dislokasyon olarak da adlandırılan çizgisel kusurlar, kristal yapıların atomsal dizilişlerinde bir çizgi boyunca görülen kusurlardır. Kenar ve vida dislokasyonu olmak üzere iki dislokasyon türünün yanında, bu iki türün bir arada görüldüğü karışık dislokasyonlar da vardır.

Bir kristal yapıya, yarım bir atom düzleminin girmesi sonucu uygulanan basınçla birlikte, düzlemin ucundaki atomlar basıncın etkisiyle sıkışırken, düzlemin yan kısımlarındaki atomlar ise açılmaya zorlanırlar. Bu durumda minimum enerjili denge konumlarından ayrılan atomların potansiyel enerjileri artar. Bu düzensizliğin merkezi olan doğru, kenar dislokasyonu olarak adlandırılır.

Kristal yapıdaki bir düzlem boyunca kısmen kayma şeklinde ötelenme sonucu gerçekleşen dislokasyonlara vida dislokasyonu denir. Vida dislokasyonu boyunca alt ve üst kısımlardaki atomlar denge konumlarından farklı bir konumda olduklarından birbirlerini tam olarak karşılayamazlar. Bu sebeple dislokasyon çizgisi boyunca artık kayna gerilmeleri bölgesi oluşur ve dolayısıyla potansiyel enerji artış gösterir.

2.1.3.3. Düzlemsel kusurlar

Kristal yüzeyleri ile çok kristalli yapılardaki kristal bireyleri arasında, iki boyutlu kusurlar olan düzlemsel meydana gelir. Düzlemsel kusurlar, yüzey kusurları ve tane sınırlarındaki kusurlar olmak üzere ikiye ayrılmaktadır.

Bir kristal bireyinin yüzeyinde bulunan atomlar kusurludur ve bireyin içindeki atomlara göre farklılık gösterir. Enerjisi daha yüksek olan yüzey atomları, içerideki atomlara göre daha zayıf bağlıdır. Yüzey atomlarına eklenecek atomlar sonucunda yüzey enerjisi adı verilen bir enerji oluşur.

Çok kristalli yapıları oluşturan kristal bireyleri arasında kusurlu bölgeler bulunmaktadır. Polikristal bir katıda iki kristal bölgesi arasındaki sınır tanecik sınırları olarak adlandırılır. Sıkı paketlenmiş ardışık yığılmalara sahip iki parça arasındaki sınır yığınsal kusurları ifade eder [51].

2.2. Mobilite

Her elektron her çarpışma arasında iletkenlik bandındaki kristalde serbestçe hareket eder. İki çarpışma arasındaki ortalama zamanı durulma zamanı olarak adlandırılır ve τ_n ile gösterilir. Bir yarıiletkendeki elektronlar için durulma zamanı; oda sıcaklığında elektronun 10 nm mertebesinde hareket edebileceği zamana karşılık gelen pikosaniyenin onda biri kadardır.

Çarpışmadan sonraki elektronların hareket doğrultusu rastgele olmasından dolayı çarpışma olayları izotropiktir.

İletkenlik bandındaki tüm elektronlar arasında $t=t_0$ 'da $n(t_0)$ tane elektron çarpışmaya maruz kalır. Şimdi bu elektron topluluğunun değişim durumlarını inceleyelim. $t>t_0$ 'da elektronların bazıları yeni çarpışmalara maruz kalmış olacaktır. Bu yüzden $t>t_0$ 'da henüz çarpışmaya maruz kalmamış daha az sayıda, $n(t)$, elektron vardır. Bu $n(t)$ elektronların sayısı aşağıdaki denkleme göre t ve $t+dt$ zaman aralığında dn kadar azalır.

$$dn = -\frac{1}{\tau_n} n(t) dt \quad (2.1)$$

Bu denklemde t_0 ve t arasında integral alınarak t_0 'dan beri çarpışmaya maruz kalmamış elektronların değişimi;

$$n(t) = n(t_0) \exp \left[-\frac{(t-t_0)}{\tau_n} \right] \quad (2.2)$$

dir.

Şimdide zamandan bağımsız bir elektrik alanın (E) bir elektron üzerine etkisini inceleyelim. m_e^* etkin kütesine sahip bir sözde (quasi) serbest parçacığın hareket denklemini (2.2) denklemini kullanarak ve etkin kütle izotropik olduğu farz edilerek t zamanında t_0 'dan beri çarpışma yapmamış bir elektronun hızı,

$$v(t) = v(t_0) - \frac{1}{m_e^*} q(t - t_0)E, \left\{ \int_{v(t_0)}^{v(t)} dV = \frac{-qE}{m_e^*} \int_{t_0}^t dt \right\} \quad (2.3)$$

t_0 'da $v(t_0)$ ortalama hızı sıfıra eşit olduğundan (izotropik çarpışma olayları başlangıç varsayımlarımızdan biridir.)

$$v(t) = -\frac{1}{m_e^*} q(t - t_0)E \quad (2.4)$$

yazılabilir.

Burada $v(t)$, t anındaki hız vektörüdür. Bu denklem (2.1) eşitliğinden t_0 'dan t 'ye kadar çarpışmadan serbestçe hareket eden, t ve dt zaman aralığında bir çarpışmaya maruz kalan, $-dn$ ($dn < 0$) elektronları için geçerlidir. (2.4) denkleminde t 'ye göre (veya $n(t)$ 'ye göre $n(t_0)$ 'dan 0'a kadar) t_0 'dan ∞ 'a kadar integral alınarak elektron topluluğunun v_{dn} ortalama sürüklenme hızı elde edilir. Örneğin elektrik alanın uygulanması sonucunda sürüklenme hızı;

(dn ve $n(t)$ yerine yazılırsa)

$$v_{dn} = \frac{1}{n(t_0)} \int_{n(t_0)}^0 \frac{-1}{m_e^*} q(t - t_0)E (-dn) \quad (2.5)$$

olur.

$$n(t) = n(t_0) \exp \left[-\frac{(t-t_0)}{\tau_n} \right] \quad (2.6)$$

eşitliği kullanılarak,

$$v_{dn} = \frac{1}{n(t_0)} \int_{n(t_0)}^0 \frac{-1}{m_e^*} q(t - t_0)E (-dn) \quad (2.7)$$

denklemini zamana göre integral alınan biçime dönüştürülebilir ve denklem;

$$v_{dn} = \frac{-q}{m_e^*} E \int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{\tau_n} (t - t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_n}} (dt) \quad (2.8)$$

elde edilir ve

$$\int_{t_0}^{\infty} \frac{1}{\tau_n} (t - t_0) e^{-\frac{t-t_0}{\tau_n}} (dt) = \tau_n \int_{t_0}^{\infty} \frac{t-t_0}{\tau_n} e^{-\frac{t-t_0}{\tau_n}} d\left(\frac{t-t_0}{\tau_n}\right) = \tau_n \int_0^{\infty} y e^{-y} dy = \tau_n \quad (2.9)$$

olduğundan sonuçta

$$v_{dn} = -\frac{q\tau_n}{m_e^*} E \equiv -\mu_n E \quad (2.10)$$

sonucu elde edilir. Burada μ_n iletkenlik bandındaki elektronların mobilitesi olarak adlandırılır. Mobilitenin birimi (hızın elektrik alana oranıdır, dolayısıyla mobilitayı birim elektrik alan başına taşıyıcıların sürüklenme hızı olarak tanımlayabiliriz) $\text{cm}^2(\text{volt})^{-1}\text{s}^{-1}$ dir. (2.10) eşitliği kullanılarak mobilite aşağıdaki eşitlikte verilir.

$$\mu_n = \frac{q\tau_n}{m_e^*} \quad (2.11)$$

Mobilite elektronların durulma zamanı ile doğru orantılı, etkin kütle ile ters orantılıdır. Mobilite durulma zamanı ile doğru orantılı olduğu için artan sıcaklıkla azalır, çünkü termal örgü titreşimleri veya fononlar artan sıcaklıkla artar. Benzer şekilde, kirlilikler ve kusurlar elektronların saçılmasına (çarpışmalara) neden olur ve bu yüzden mobilite artan kirlilik veya kusur konsantrasyonu ile azalır.

Benzer ifadeler valans bandındaki holler içinde yazılabilir, şöyle ki;

$$v_{dp} = -\frac{q\tau_p}{m_h^*} E \equiv \mu_p E \quad (2.12)$$

yazılabilir. Burada μ_p hollerin mobilitesi olup;

$$\mu_p = \frac{q\tau_p}{m_h^*} \quad (2.13)$$

ile verilir.

Elektron ve hollerin gerçek etkin kütleleri anizotropiktir ve mobilite skaler bir sayıdan ziyade bir tensörle temsil edilir. Silisyum, germanyum ve GaAs'de kübik simetriden dolayı etkin kütle için ancak skaler bir ifade kullanılabilir ve bu

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{m_l^*} + \frac{2}{m_t^*} \right) \quad (2.14)$$

ile verilir.

Burada m^* iletkenlik etkin kütlesi olarak adlandırılır. Silisyumda elektronların iletkenlik etkin kütlesi $m_e^* = 0,26m_0$ 'dır ve holler içinde $m_h^* = 0,37m_0$ olup m_0 vakumda serbest bir elektronun kütlesidir.

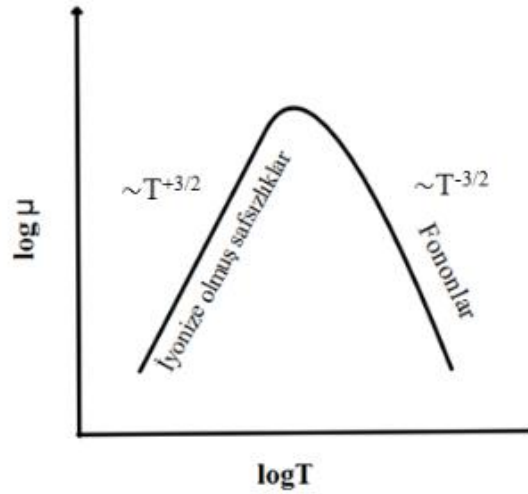
Mobilite elektronlar, fononlar ve kirlilikler arasındaki etkileşmelere bağlıdır. Elektronların fononlardan saçılmasının tamamen analizi, mobilitenin sıcaklığa bağlı aşağıdaki ifadesini verir.

$$\mu_T \propto T^{-3/2} \quad (2.15)$$

Ayrıca mobilitenin kirlilik konsantrasyonu N' 'ye bağlılığı ise

$$\mu_N \propto \frac{T^{3/2}}{N} \quad (2.16)$$

şeklindedir. Mobilitenin sıcaklıkla değişimi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4. Mobilitenin sıcaklıkla değişimi

Hem sıcaklık hem de kirliliklere bağlılığı birlikte dikkate alındığında mobilite ifadesi (2.17) denklemi ile verilebilir.

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu_T} + \frac{1}{\mu_N} \quad (2.17)$$

2.3. Sürüklenme Akımı

Şayet iletkenlik bandında elektron konsantrasyonu n ' ye eşit ise elektron sürüklenme akım yoğunluğu $J = -qnv_{dn}$ ile verilir yada (2.10) ifadesi kullanılarak;

$$J_n = -qnv_{dn} = q\mu_n nE \quad (2.18)$$

olur. Benzer şekilde hol sürüklenme akım yoğunluğu;

$$J_p = qp v_{dp} = q\mu_p pE \quad (2.19)$$

ile verilir. Homojen olarak katkılanmış bir yarıiletkenin elektriksel iletkenliği $\sigma(\Omega^{-1}cm^{-1})$, $J = \sigma E$ ve özdirenci $\rho(\Omega cm)$;

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p) \text{ ve } \rho = \frac{1}{\sigma} \quad (2.20)$$

ifadeleri ile verilir [51].

2.4. İletkenlik

$$J_{drf} = e(\mu_n n + \mu_p p)E \quad (2.21)$$

ile verilen sürüklenme akım yoğunluğu,

$$J_{drf} = e(\mu_n n + \mu_p p)E = \sigma E \quad (2.22)$$

olarak yazılabilir. Burada σ yarıiletken maddenin iletkenliğidir. İletkenlik $(\Omega - cm)^{-1}$ biriminde verilir ve mobilite ve elektron ve hol konsantrasyonlarının bir fonksiyonudur. Mobilitenin kirlilik konsantrasyonlarının fonksiyonu olduğunu yukarıda görmüştük, bu nedenle iletkenlik de kirlilik konsantrasyonunun karmaşık bir fonksiyonudur.

2.5. Özdirenc

İletkenliğin tersi özdirençtir, ρ ile gösterilir ve ohm-cm birimindedir. Özdirenç denklemini

$$\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{1}{e(\mu_n n + \mu_p p)} \quad (2.23)$$

şeklinde yazabiliriz.

Şimdi (2.22) denklemini yeniden

$$\frac{I}{A} = \sigma \left(\frac{V}{L} \right) \quad (2.24a)$$

olarak veya

$$V = \left(\frac{L}{\sigma A} \right) I = \left(\frac{\rho L}{A} \right) I = IR \quad (2.24b)$$

şeklinde yazabiliriz. Denklem (2.24b) bir yarı iletken için Ohm kanunudur. Direnç, yarıiletkenin geometrisi yanı sıra öz direncin veya iletkenliğin bir fonksiyonudur.

Eğer $N_a \gg n_i$ olan $N_a (N_d = 0)$ akseptör katkı konsantrasyonlu ve elektron ve hol mobilitenin aynı büyüklük mertebesinde olduğu bir p-tipi yarıiletken göz önüne alırsak, bu durumda iletkenlik aşağıdaki ifadeyle verilir;

$$\sigma = e(\mu_n n + \mu_p p)E \approx e\mu_p p \quad (2.25)$$

Eğer aynı şekilde tamamen iyonizasyonu kabul edersek, bu durumda denklem (2.25)

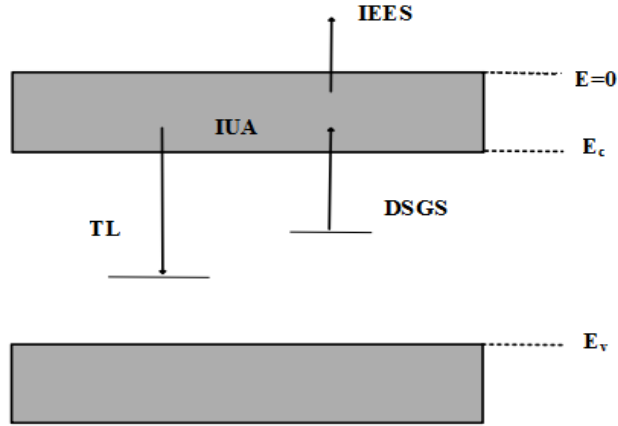
$$\sigma \approx e\mu_p N_a \approx \frac{1}{p} \quad (2.26)$$

şekline dönüşür. Bir katkılı yarıiletken için iletkenlik ve öz direnç çoğunluk taşıyıcı parametrelerin öncelikli fonksiyonudur.

Bir özel katkı konsantrasyonu için sıcaklığın fonksiyonu olarak bir yarı iletkenin iletkenliğini ve taşıyıcı konsantrasyonunu çizebiliriz. Bununla birlikte, mobilite sıcaklığın bir fonksiyonudur bu yüzden iletkenlik bu aralıkta sıcaklıkla değişir. Daha yüksek sıcaklıklarda, asal taşıyıcı konsantrasyonu artar ve iletkenlikle birlikte elektron konsantrasyonu baskın olmaya başlar. Daha düşük sıcaklık aralığında, freze-out oluşmaya başlar, yani elektron konsantrasyonu ve iletkenlik azalan sıcaklıkla azalır [46].

2.6. Isıl Uyarılmış İşlemler

Kristal örneği radyasyon ya da ısı gibi dış etkenlerle uyarılmak mümkündür. Isıl uyarılmış işlemler, örneğin ısıtıldığı ve bazı özelliklerinin sıcaklığın bir fonksiyon olarak ölçüldüğü fiziksel yöntemlerdir. Bu ölçüm, zaman ya da sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçülen büyüklüğün eğrisidir. Bu eğrinin analizi, maddenin değişik özelliklerini anlamak için fizik ve kimyanın birçok alanında kullanılır. [52]:Isıl uyarılmış işlemleri şekil 2.5'te gösterdiği gibi ısıl ışıltama (Termolüminesans, TL), ısıl uyarılmış akım (IUA), ısıl uyarılmış elektron salınımı (IUES), derin seviyelerin geçici spektroskopisi (DSGS) olarak sayabiliriz.



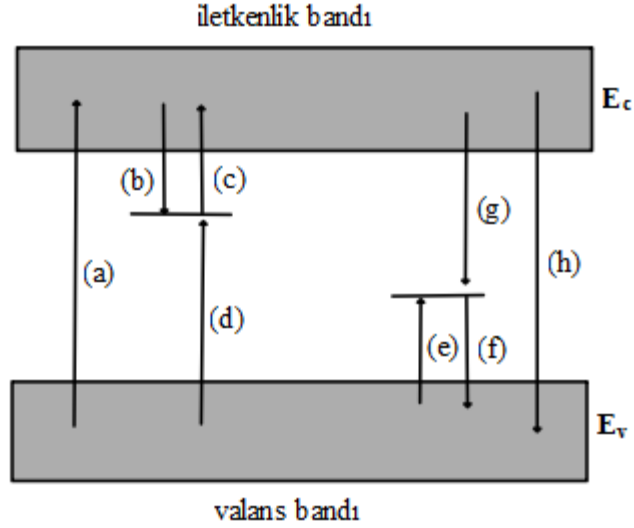
Şekil 2.5. TL,IUA,DSGS ve IUES'nin arasındaki farkın şematik gösterimi [39]

2.7. Isıl Uyarılmış Akım

2.7.1. Isıl uyarılmış akım sürecindeki geçişler

Isıl uyarılmış akım (IUA, TSC) yöntemi, kristaldeki safsızlık ve kusur merkezleri hakkında bilgi elde etmek için geniş ölçüde kullanılır. Bu yöntemde, düşük sıcaklıklarda tuzak merkezleri doldurulmuş örnek, kontak noktaları vasıtasıyla voltaj uygulanarak ısıtılır. Örnek doğrusal olarak ısıtılırken, oluşan geçici elektrik akımları sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülür. Ortaya çıkan eğriye ısıl uyarılmış akım eğrisi denir, genellikle pikler halinde olur ve bant aralığındaki derin ve sığ tuzak seviyeleri hakkında bilgi verir.

Bant aralığındaki muhtemel elektronik geçişler IUA deneylerindeki temel olaylardır. IUA deneylerindeki bu geçişler Şekil 2.6’da gösterilerek aşağıda açıklanmıştır.



Şekil 2.6. IUA tekniği ile bant aralığındaki muhtemel elektronik geçişler (a)Banttan banda uyarılma, (b) ve (e) elektron ve hol tuzaklanması, (c) ve (f) elektron ve hol geçişi, (d) ve (g) indirekt-rekombinasyon, (h) direkt-rekombinasyon [57]

I. Geçiş (a) valans bandı elektronunun iletim bandına banttan banda uyarılmasıdır. Bu geçiş, valans bandı elektronuna dış bir kaynak tarafından yeterli enerji verildiği zaman gerçekleşir.

II. Geçiş (b) ve (e) sırasıyla elektron ve hol yakalama olarak adlandırılır. İletim ve valans bantlarındaki uyarılmış elektronlar ve holler kendi başlangıç bantlarına dönecekler. Bu dönüş sırasında elektronların ve hollerin bazıları tuzak merkezlerinde tuzaklanırlar.

III. Geçiş (c) ve (f) elektron ve hol geçişi olarak adlandırılır. Yakalama merkezlerinde elektron ve hollere yeterli enerji verildiğinde sırası ile iletim ve valans bantlarına uyarılırlar.

IV. Geçiş (g) ve (d) dolaylı rekombinasyon mekanizmalarıdır. Bu geçişler, iletim ve valans bantlarında sırası ile serbest elektronların ve hollerin yakalama merkezlerindeki ters işaretli yük taşıyıcısı ile rekombine olduğu zaman gerçekleşir.

V. Geçiş (h) iletim bandında yük taşıyıcısının valans bandında ters işaretli yük taşıyıcısı ile yeniden birleştirilmesi şeklinde tanımlanmış doğrudan rekombinasyondur.

IUA yöntemi, basitçe şöyle açıklanabilir: Düşük bir başlangıç sıcaklığında; elektronlar, bir çeşit radyasyon yardımıyla valans bandından iletkenlik bandına uyarılır (geçiş a). İletkenlik bandındaki elektronların çoğu kısa bir sürede temel enerji düzeyine tekrar döner (geçiş h). Uyarılmış bazı elektronlar, boşluk, arayer ve safsızlık atomları gibi örgü kusurlarıyla ilgili tuzaklama merkezleri tarafından tuzaklanır (geçiş b). Tuzak merkezi tarafından tuzaklanmış valans bandındaki bir elektronun yerinde bir hol meydana gelir. Bu holler de hol tuzak merkezlerinde tuzaklanır (geçiş e). Yeterli enerji verildiğinde bu tuzaklanmış elektronlar (deşikler, holler), iletkenlik (valans) bandına geri döner (geçişler c ve f). Isıl uyarılmış işlemlerde örneğe verilen enerji, ısı enerjisidir. İletkenlik bandına uyarılan elektronlar, örneğin iletkenliğinde geçici bir artışa neden olur. Bu artış, örneğin IUA eğrisinde bir pik olarak gözlenir. Piklerin analizi, aktivasyon enerjisi ve bu merkezlerdeki elektronların yoğunluğu gibi tuzaklama seviyelerinin bazı özellikleri hakkında bilgi verir.

2.7.2. Teorik yaklaşım

Bir elektronun E aktivasyon enerjisine sahip tuzak seviyesinden iletkenlik bandına (geçiş c) T sıcaklığında geri dönme olasılığını 2.27 eşitliği ile verebiliriz.

$$P = \nu \exp(-E/kT) \quad (2.27)$$

ν , kaçmaya teşebbüs etme frekansıdır ve k , Boltzmann sabitidir. Bir yarı-iletkende ν , şu ifade (2.28) ile tanımlanır:

$$\nu = N_c \nu_e S_t \quad (2.28)$$

S_t , yakalama kesit alanıdır. N_c , iletim bandındaki etkin durum yoğunluğudur. ν_e , iletim elektronlarının ısı hızıdır. N_c ve ν_e , şu şekilde gösterilir:

$$N_c(T) = 2 \left(\frac{kTm_e^*}{2\pi h^2} \right)^{2/3} \quad (2.29)$$

$$\nu_e(T) = \sqrt{\frac{3kT}{m_e^*}} \quad (2.30)$$

m_e^* , elektronun etkin kütesidir.

Doldurulmuş tuzakların yoğunluğu (n) temel olarak, tuzaklardan geçişlere ya da tuzaklara olan geçişlere bağlıdır. Bu muhtemel geçişler ve teorik açıklamalarını şöyle verebiliriz [52]:

Uyarılma (geçiş c): Tuzak merkezinden iletkenlik bandına geçiş, dolu tuzakların yoğunluğunu belirler. Yoğunluğun değişim hızı, n ile doğru orantılıdır ve (2.31) ile verilir:

$$\frac{dn}{dt} = -nv \exp(-E/kT) \quad (2.31)$$

Yeniden tuzaklanma: Uyarılma geçişine ek olarak, yeniden tuzaklamayı (geçiş b) da hesaba katmalıyız. Yeniden tuzaklanmanın olasılığı, hem iletim bandındaki serbest elektronların yoğunluğuna n_c , hem de işgal edilmemiş tuzakların yoğunluğuna ($N - n$) bağlıdır. N , tüm tuzakların yoğunluğudur. Tuzaklanmış elektronların değişim hızıyla ilgili ikinci bir denklem şöyledir:

$$\frac{dn}{dt} = n_c(N - n)S_t v_e \quad (2.32)$$

2.31 ve 2.32 denklemleri birleştirilerek 2.33 eşitliği yazılabilir.

$$\frac{dn}{dt} = n_c(N - n)S_t v_e - nv \exp(-E/kT) \quad (2.33)$$

İletkenlik bandına uyarılmış bir elektron, ya tuzaklanabilir ya da bir hol ile yeniden birleşebilir. Rekombinasyon hızı n_c/τ 'dur. τ , yeniden birleşim ömrü [58] olarak açıklanır. Böylelikle, serbest elektron yoğunluğunun değişim hızı n_c

$$\frac{dn_c}{dt} = -\frac{n_c}{\tau} - \frac{dn}{dt} \quad (2.34)$$

Denklem 2.33 ve 2.34'in çözümü için, iki temel varsayım öne sürülmüştür.

2.7.2.1. Yavaş yeniden tuzaklama

Randall ve Wilkins [54] tarafından öne sürüldüğü üzere, yeniden birleşim hızına göre bir yük taşıyıcısının yeniden tuzaklanması durumu ihmal edilebilir ve iletim bandına geçen elektron, bir deşik (hol) ile çabucak yeniden birleşir. “Birinci derece kinetik” olarak da bilinen bu varsayım, aşağıdaki eşitsizliklerle ifade edilir:

$$\frac{n_c}{T} \gg n_c(N - n)S_t v_e \quad (2.35)$$

ve

$$\left| \frac{dn_c}{dt} \right| \ll \left| \frac{dn}{dt} \right| \quad (2.36)$$

2.35 ve 2.36 eşitliklerini kullanarak, 2.33 eşitliği:

$$\frac{dn}{dt} \approx n v \exp(-E/kT) \quad (2.37)$$

ve

$$\frac{dn}{dt} \approx -\frac{n_c}{T} \quad (2.38)$$

$T = T_0 + \beta t$ doğrusal ısıtma fonksiyonunu ve 2.37 eşitliği integre edilerek 2.39 eşitliği elde edilir.

$$n = n_0 \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - \int_{T_0}^T \frac{v}{\beta} \exp(-E/kT) dT \right\} \quad (2.39)$$

n_0, T_0 başlangıç sıcaklığında tuzaklanmış elektron yoğunluğudur. Denklem 2.34 ve 2.35 denklem 2.33’de yerine yazılırsa:

$$n_c = n_0 T v \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - \int_{T_0}^T \frac{v}{\beta} \exp(-E/kT) dT \right\} \quad (2.40)$$

elde edilir. Isıl uyarılmış iletkenlik σ , 2.41 eşitliği gibi yazılabilir:

$$\sigma = n_c e \mu = n_0 T v e \mu \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - \int_{T_0}^T \frac{v}{\beta} \exp(-E/kT) dT \right\} \quad (2.41)$$

τ , serbest bir elektronun ömrüdür, μ elektronun mobilitesi, β ısıtma hızı ve T_0 başlangıç sıcaklığıdır. Isıl uyarılmış akım, 2.41a eşitliği ile tanımlanır:

$$I = n_0 T v e \mu \left(\frac{V}{L} \right) A \exp \left\{ -\frac{E}{kT} - \int_{T_0}^T \frac{v}{\beta} \exp(-E/kT) dT \right\} \quad (2.41a)$$

V , uygulanan voltajdır. A ve L ise sırasıyla örneğin alanı ve uzunluğudur.

2.7.2.2. Hızlı yeniden tuzaklama

Haering ve Adams (1960), iletim elektronları ve tuzaklanmış elektronlar arasındaki ısı denge için gereken zamanın yeniden birleşim ömründen [55] daha kısa olduğu durumu ele aldı. Toplam elektron sayısı n_t ile gösterilirse:

$$n_t = n + n_c \quad (2.42)$$

Yazılabilir ve şu varsayım kullanılarak:

$$N \gg N_c \exp(-E/kT) \quad (2.43)$$

yeniden hızlı tuzaklama işlemi için, tüm elektronların değişim hızı 2.44 eşitliğiyle verilebilir:

$$\frac{dn_t}{dt} = \frac{n_c}{T} = -\frac{n_t}{T} \left(\frac{N_c}{N} \right) \exp \left(-\frac{E}{kT} \right) \quad (2.44)$$

n ve n_c , sırasıyla tuzaklardaki ve iletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğudur. N ve N_c ise sırasıyla tuzak seviyelerinin yoğunluğu ve iletkenlik bandındaki etkin durumların yoğunluğudur. τ , yeniden birleşim ömrüdür. Denklem 2.44'in çözümü:

$$n = n_0 \exp \left[-\frac{1}{\beta} \int_{T_0}^T \frac{N_c}{N_T} \exp(-E/kT) dT \right] \quad (2.45)$$

Isıluyarılmış akım ise:

$$I = \left(\frac{V}{L} \right) A \frac{N_c \mu}{N} e n_0 \exp \left[-\frac{E}{kT} - \frac{N_c}{N \beta T} \int_{T_0}^T \exp(-E/kT) dT \right] \quad (2.46)$$

eşitliğiyle verilir.

2.7.3. Eğri fit etme

(i) Yavaş yeniden tuzaklama: Birinci derece kinetiğe sahip tuzakların IUA eğrisi, 2.41a denklemi ile açıklanır. V , μ ve τ nün, IUA deneyinin sıcaklık aralığında sıcaklık değişiminden bağımsız olduğu kabul edilirse, 2.41a denklemi, [59] yeniden yazılabilir.

$$I = \left(\left(\frac{V}{L} \right) A \right) A_0 \exp \left\{ -t + B' \int_{t_0}^t \exp(-t) t^{-2} dt \right\} \quad (2.47)$$

$t = E/kT$, A_0 ve B' sabitlerdir:

$$A_0 = n_0 T e \mu v \quad \text{ve} \quad B' = \frac{v E t}{\beta k} \quad (2.48)$$

n_0 , tuzakların başlangıçtaki yoğunluğudur. Denklem 2.47'de kısmi integrasyon ile integral alınır, yakınsak bir sonsuz seri açılımı elde edilir:

$$I = \left(\left(\frac{V}{L} \right) A \right) A_0 \exp[-t - B' \{ \exp(-t) t^{-2} - 2 \exp(-t) t^{-3} + 3 \times 2 \exp(-t) t^{-4} \dots \}_{t_0}^t] \quad (2.49)$$

t değeri, pratikte büyük bir değer olduğundan dolayı, yaklaşım yaparak sonsuz seriyi şu şekilde yazabiliriz:

$$I \approx \left(\left(\frac{V}{L} \right) A \right) A_0 \exp[-t - B' \exp(-t) t^{-2}] \quad (2.50)$$

$$I \approx I_0 + \left(\left(\frac{V}{L} \right) A \right) A_0 \exp[-t - B' \exp(-t) t^{-2}] \quad (2.51)$$

I_0 , t_0 'daki değerdir. Denklem 2.51'in türevi alınır ve eğrinin maksimumunu bulmak için türev sıfıra eşitlenirse:

$$t = t_m = \frac{E t}{k T_m} \quad (2.52)$$

ve

$$B' = \exp(t_m) \frac{t_m^3}{t_m + 2} \quad (2.53)$$

yazılabilir.

(ii) Hızlı yeniden tuzaklama: Haering ve Adams'ın, ikinci derece kinetiği için verdiği denklem 2.46'e $t = E/kT$ 'i yerleştirerek, [60] (2.54) elde edilir:

$$I = \left(\frac{V}{L}\right) AC \exp \left[-t + d \int_{t_0}^t \exp(-t) t^{-7/2} dt \right] \quad (2.54)$$

olduğunda

$$C = \frac{N_c e \mu n_0}{N} \text{ ve } D = \frac{N_c E^{5/2}}{N \beta T^{*3/2} k^{5/2} \tau} \quad (2.55)$$

Denklem 2.53'de kısmi integralleme ile sürekli integral alındığında, yaklaşım şunu verir:

$$I \approx C \exp \left[-t - D \exp(-t) t^{-7/2} \right] \quad (2.56)$$

Maksimumunda t^* 'nin değerini bulmak için denklem 2.56'in türevi alınıp sıfıra eşitlenirse, D^* değerini bulunur:

$$D^* = \frac{\exp(t^*) t^{*9/2}}{t^* + 3.5} \quad (2.57)$$

D^* , D 'nin kullanılmış yaklaşımın limitlerindeki değeridir.

Eğrilerin eş zamanlı analizi için, fit edilen fonksiyon şöyle verilir:

$$I(T) = \sum_{i=1}^n I_i(T) \quad (2.58)$$

$I_i(T)$, sırasıyla denklemler 2.51 ve 2.56 kullanılarak yavaş ve hızlı yeniden tuzaklama için hesaplanan her bir pikin eğrilerin verdiği katkidir. n ise hesaplamada kullanılan tuzakların toplam sayısıdır.

IUA eğrisine fit yapıldığında pikler için E_t ve T_m değerleri bulunur. Yavaş ve hızlı yeniden tuzaklama süreçlerinde denklem (2.53) ve (2.57) kullanılarak B' ve D^* hesaplanabilir. Birinci derece kinetiği için, denklem (2.48) kullanılarak kaçmaya teşebbüs etme frekansı ν hesaplanabilir. Böylece, ν değeri ve denklem (2.59) kullanılarak, tuzakların kesit yüzeyi hesaplanır:

$$S_t = \frac{\nu}{N_c \nu_{th}} \quad (2.59)$$

N_c , iletkenlik bandındaki etkin durum yoğunluğudur. v_{th} ise serbest bir elektronun ısı hızıdır.

Tuzakların yoğunluğu (2.60) eşitliği kullanılarak hesaplanabilir.

$$N_t = \frac{Q}{ALeG} \quad (2.60)$$

Burada; Q , bir IUA deneyi sırasında salınan yük miktarını temsil eder ve IUA eğrisinin altındaki alan kullanılarak hesaplanabilir. e , elektronik yüküdür ve G de fotoiletkenlik (ışıl iletkenlik) kazancıdır ve bu değer her bir soğurulmuş foton için örnek üzerinden geçen elektronların sayısına eşittir. Fotoiletkenlik kazancı eşitlik (2.61) kullanılarak hesaplanabilir [53].

$$G = \frac{\tau}{t_{tr}} = \frac{\tau\mu V}{L^2} \quad (2.61)$$

τ , taşıyıcının ömrüdür. t_{tr} , taşıyıcının elektrotlar arasındaki geçiş süresidir. μ ise taşıyıcının mobilitesidir.

2.7.4. Başlangıçtaki artış yöntemi

Garlick ve Gibson [56], bu yöntemi ilk defa 1948'de ileri sürdü. Bu yöntem, yeniden birleşim kinetiklerinden bağımsız olduğu için IUA eğrisinin analizinde önemlidir. (2.42) ve (2.47) denklemlerindeki birinci ve ikinci derece integraller, sıcaklık yükselirken tuzaklar boşalmaya başladığında çok küçük değere sahiptirler. Bu nedenle, integrallerdeki üslü değerler, sürecin bu sıcaklık aralığında 1'e çok yaklaşır. Böylece akım denklem (2.62)'daki gibi yazılabilir:

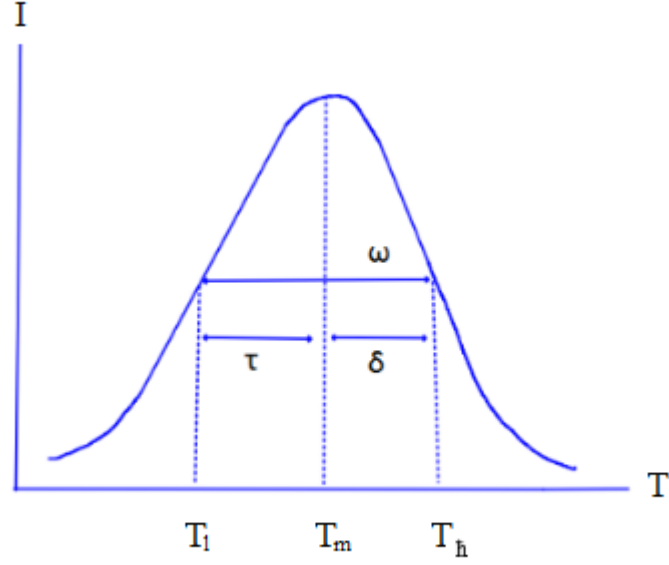
$$I = C \exp(-E_t/kT) \quad (2.62)$$

Burada, C sabittir. IUA eğrisinin ilk kısmı analiz edildiğinde, I/T 'nin bir fonksiyonu olan (I) grafiği bize (E_t/kT) eğimine sahip düz bir doğru verir.

Bu yöntemi sınırlayan bir durum analiz edilen pikin ilk yükseliş kısmında üst üste gelen piklerin olmasıdır.

2.7.5. Pik şekli yöntemi

Pik şekli yönteminde, tuzağın aktivasyon enerjisi, şu üç parametre ile ilişkilendirilir (Şekil 2.7): $\tau = T_m - T_l$, $\delta = T_h - T_m$, $w = T_h - T_l$, burada T_m maksimum akıma karşılık gelen sıcaklık, T_l ve T_h sırasıyla yarı yüksekliğe karşılık gelen sıcaklıklardır [52].



Şekil 2.7. Pik şekli yönteminde kullanılan parametrelerin gösterimi

Tuzağın aktivasyon enerjisi aşağıdaki eşitliklerden hesaplanabilir:

$$E_t = \frac{[1.51 + 3.0(\mu_g - 0.42)]kT_m^2}{\tau} - [1.58 + 4.2(\mu_g - 0.42)]2kT_m \quad (2.63)$$

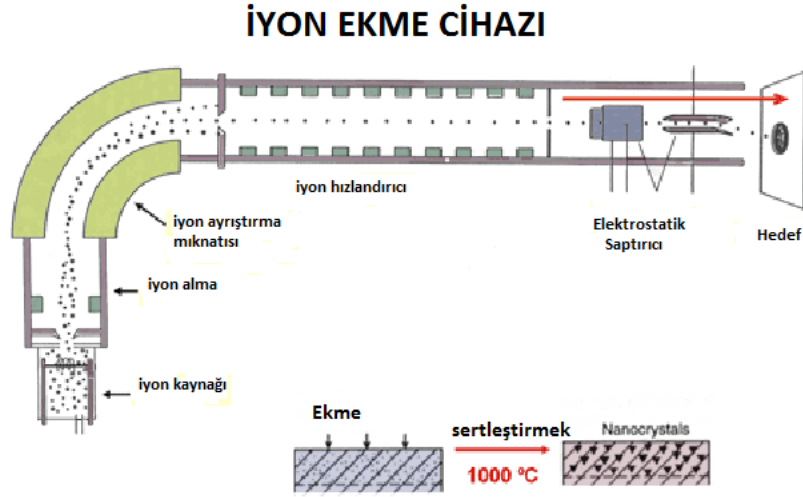
$$E_\delta = [0.976 + 7.3(\mu_g - 0.42)]kT_m^2/\delta \quad (2.64)$$

$$E_w = [2.52 + 10.2(\mu_g - 0.42)]kT_m^2/w - 2kT_m \quad (2.65)$$

Burada $\mu_g, \delta/w$ oranına eşittir. 1960 yılında, Halperin ve Braner kinetik dereceyi belirlemek için μ_g değerini kullanmayı önerdiler. μ_g değerleri, Chen ve Kirsh [52] tarafından sırasıyla birinci ve ikinci derece kinetikler için 0,42 ve 0,52 olarak hesaplanmıştır. Pik şekli yöntemi birden çok eğri içeren pik üzerinde birden fazla tepe noktası içerdiğinden uygulanamaz. Bu durumda diğer pikler ısıl temizleme (thermalcleaning) ile arındırılabilir [72].

2.8. İyon Ekme Yöntemi

İyon demet implantasyonu bir malzemenin içine zorla farklı türde iyonekerek maddenin fiziksel ve elektronik özelliklerini değiştiren bir yöntemdir. Bu teknik 1940 yılında, ManhattanProjesi (2) kapsamında OakRidge Ulusal Laboratuvarı'nda geliştirildi (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. İyon ekme cihazı

Bu teknik ortaya çıkmaya başladığından itibaren malzemelerin işlenmesinde çok çeşitli uygulamalar geliştirildi. 1970 li yıllarda iyon ekmenin yarıiletkenler, metaller, izolatörler ve seramik gibi ürünlerin elektriksel özelliklerini modifiye edilmesinde ve yenilenmesinde bu teknik çok popülerdir.

Son yıllarda entegre devrelerinin içindeki transistörlerinin küçültülmesinin devam etmesi iyon ekme işleminin bilgisayar chiplerinin üretilmesinde standart hale geldi.

Tipik bir iyon ekme cihazının içerisinde iyonların hızlanmasını ve yeterli hıza ulaştıktan sonra hedef malzemeye istenilen derinlikte nüfuz etmesini sağlayan iyon odası bulunur. Bu teknik küçük implant parçacıklarının maddenin elektriksel yada fiziksel özelliklerinin büyük değişikliklerine neden olan yarıiletkenler gibi malzemelerde en iyi şekilde uygulanır.

1) iyonlar içerisinde elektriksel değişim olan atomlardır. Normalde atomlar nötr haldedir. Çekirdek içerisinde proton sayıları ile elektron sayıları eşittir. Fakat bazı ortak durumlarda atomlar bazı elektronlarını kaybeder bazılarını da negatif yada pozitif olarak alır.

2) iyon implantasyonu; atom bombası yapılırken farklı uranyum izotopları ayrıştırılırken keşfedildi.

İyon implantasyonu malzeme boyutunda herhangi bir değişime neden olmadan malzemenin en dış tabakalarının yapı ve bileşimine değiştiren bir işlemdir. İşlem göreceğ malzeme, genelde vakum altında iyonlarla bombardıman edilir. İyonlar kristal kafesteki atomların yer deęiőtirmesine ve yapısal kusurların oluşumuna neden olarak malzeme yüzeyine girerler. Ayrıca, yeni örgü parametrelili bileşikler oluşturmak üzere bazı matriks atomlarıyla reaksiyona girerler. İyon implantasyonu ve diğer yüzey işlem yöntemleri arasındaki farklılık implante edilen elementlerin yüzey üzerinde değil, yüzeyden içeride olmalarıdır. İyon implantasyonunda yüzey, 1500 km/s hızlarda iyonlarla bombardıman edilir. İyonlar yüzeye nüfuz eder ve yüzeyi yeniden alaőımlandırarak yüzeyin en dış tabakasında kalırlar. İyon implantasyonu pek çok durumda ve düşük sıcaklık prosesi olması, kaplamadaki gibi soyulma probleminin olmaması, bitmiş yüzeyin bozulmaması, şekil ve boyutsal hassasiyetin değişmemesi, etkinliği ve düşük maliyeti gibi pek çok nedenle optimum bir yüzey işlemdir [62].

3.BÖLÜM

MATERYAL VE YÖNTEMLER

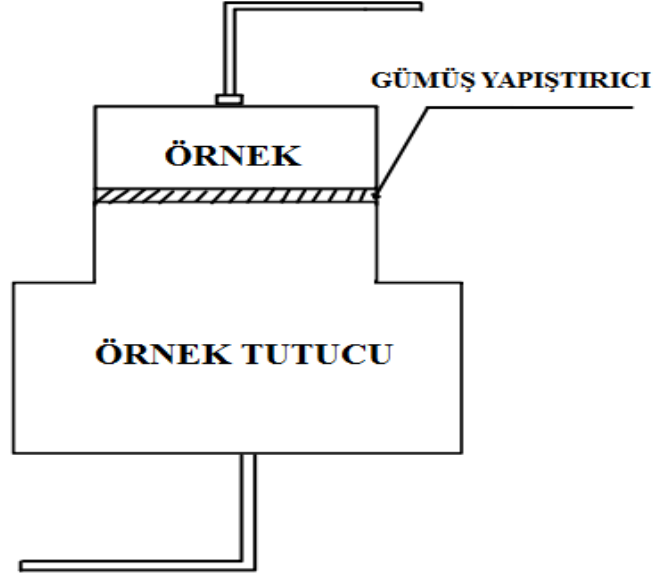
3.1. Isıl Uyarılmış Akım (IUA) Ölçümleri

Bir IUA deneyinde, tuzaklar düşük sıcaklıklarda uygun bir ışık kaynağı kullanılarak taşıyıcıların banttan banda uyarılmasıyla doldurulur. Bu yük taşıyıcıları, iletkenlik yada valans bandına uyarılmak için yeterli miktarda termal enerji verilene kadar tuzak merkezlerinde kalır. Bu yük taşıyıcıları, termal olarak iletkenlik (valans) bandına uyarıldığında, örneğin iletkenliğinde geçici artışa neden olurlar. IUA piklerinin analizinde kolaylık sağlaması amacıyla, ısıtma hızının genellikle sabit olması istenilir. IUA ölçümleri, iyon ekme işlemleri ve fotoiletkenlik azalma deneyleri Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fizik Bölümünde yapılmıştır.

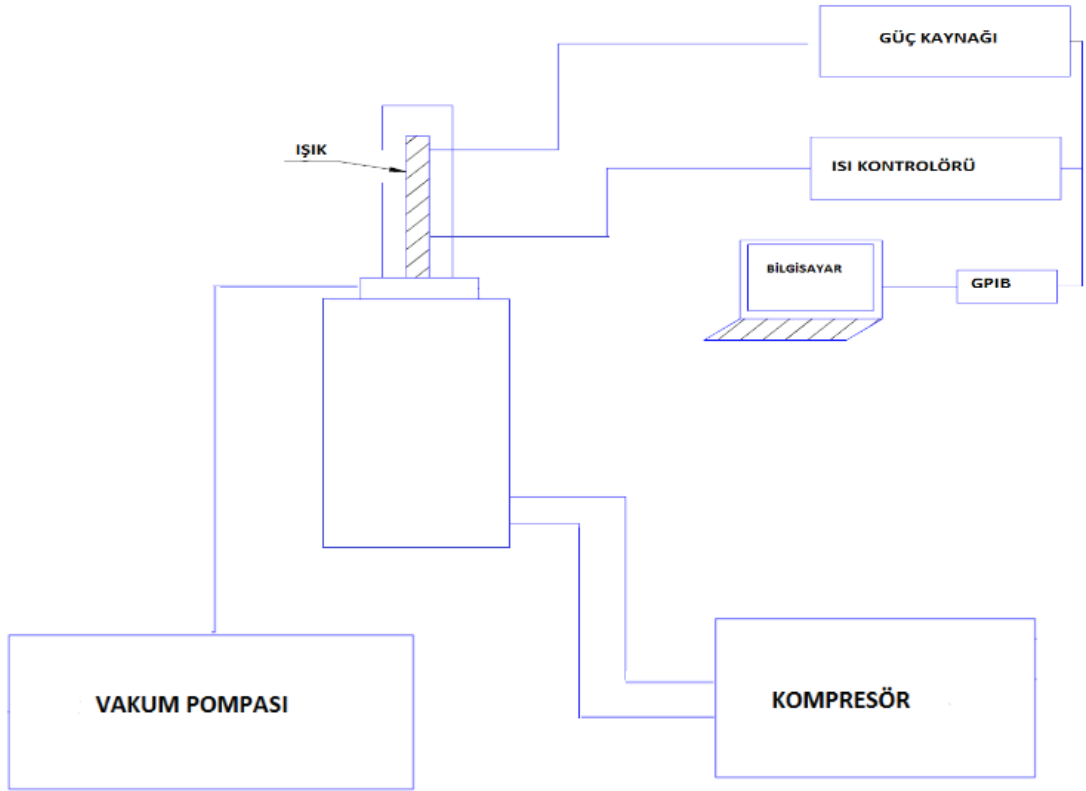
3.1.1. Üçlü bileşik yarıiletken $AgIn_5S_8$ tek kristallerinde IUA ölçümleri

Bridgman yöntemiyle büyütülen $AgIn_5S_8$ tek kristalleri üzerinde IUA ölçümleri yapıldı. Kullanılan örnek $4,0 \times 5,0 \times 1,5 \text{ mm}^3$ boyutlarındadır. Hot probe (sıcak uç) tekniği ve Hall ölçümleri ile $AgIn_5S_8$ örneğinin n-tipi iletkenlik gösterdiği bulunmuştur. Elektriksel kontaklar, sandviç geometrisine uygun olarak gümüş yapıştırıcı kullanılarak örnek yüzeyine yapıldı. Sandviç konfigürasyonunda, elektrotlardan biri küçük bir gümüş yapıştırıcı damlasıyla kristalin ön yüzeyine tutturuldu. Daha sonra örnek, diğer yüzeyinden örnek tutucu üzerine iletim sağlayan gümüş yapıştırıcıyla sabitlendi. Örnek tutucu, devre bağlantısı için kroystata yerleştirildi. Sandviç geometrisinde elektronlar kristal içerisinden c -eksenine paralel yönlü akar. Sandviç geometrisinin basit şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

IUA ölçümleri 10 ile 70 K sıcaklık aralığında Advanced Research Systems'in kapalı-döngü helyum kroystatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Lake-Shore 331 ısı kontrolörüyle 0,2 K/s sabit bir ısıtma hızı elde edilmiştir. Keithley 228A voltaj/ akım kaynağıyla ve IUA ölçümleri için Keithley 6485 pikoampermetre kullanılmıştır. Sistemin sıcaklık ve akım hassasiyeti sırasıyla yaklaşık 10mK ve 2 pA'dır. IUA deney düzeneğinin görünüşü Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Sandviç konfigürasyonuna sahip örneğin basit gösterimi



Şekil 3.2.IUA deney düzeneği diyagramı

Yeterince düşük sıcaklıklarda, termal salınım olasılığı ihmal edilebilir düzeyde olduğunda, taşıyıcılar 2.6 eV'lik tepe noktasına sahip ışık yayan diyot yardımıyla uyarılır. Uyarma kaynağı kapatılarak bekleme süresi geçtiğinde, DC alanı örnek üzerine uygulanır ve sıcaklık sabit hızda artırılır. IUA, denge karanlık akımını aştığında elde edilen akımdır. AgIn₅S₈ kristalindeki tuzaklar doldurulurken 10 K sıcaklığında 300 s aydınlatma süresi seçilmiş ve kontaklar arasına 0.1 V potansiyel uygulanmıştır. Bekleme süresi 60 s seçilmiştir. IUA okunurken kontaklar arasına uygulanan potansiyel ise 1 V'dur.

3.1.2. Dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS ve TlGaSeS:N tek kristallerinde IUA ölçümleri

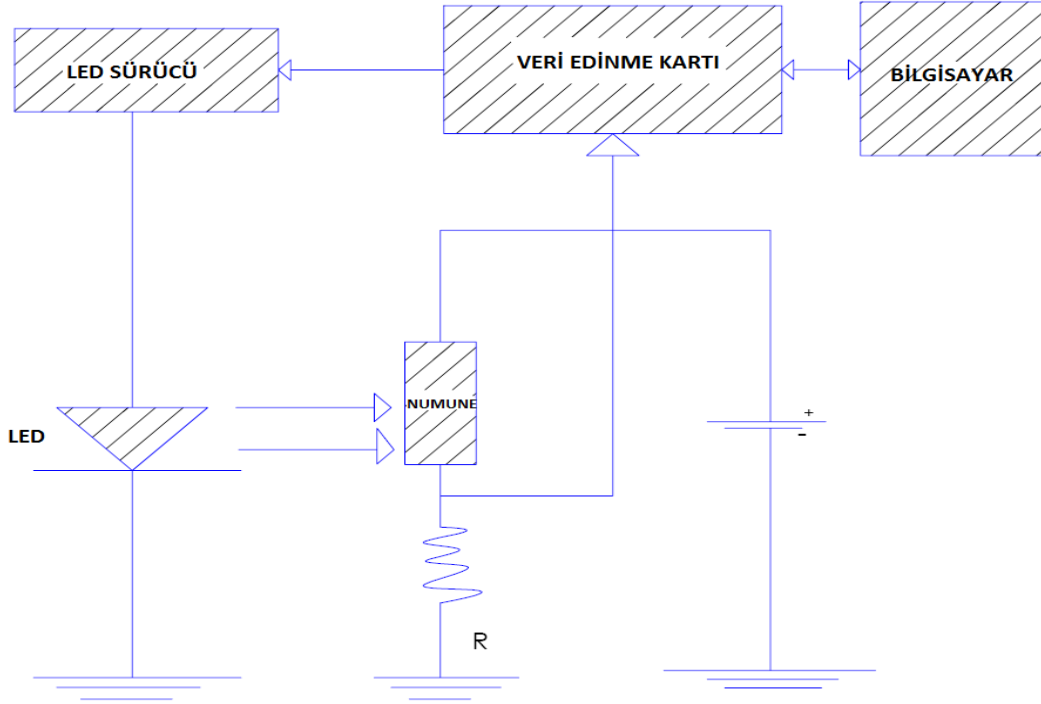
Bridgman yöntemiyle büyütülen TlGaSeS ve azot ekilmiş TlGaSeS:N tek kristalleri üzerinde IUA ölçümleri yapıldı. Büyütülen kristaller kırmızı görünümlü ve ayrılan katmanlar ayna parlaklığındaydı. Kullanılan örnek TlGaSeS 4.0 x 5.0 x 1.5 mm³ boyutlarında ve TlGaSeS:N ise 9.5 x 6.0 mm² boyutlarındadır. Elektriksel kontaklar, sandviç geometrisine uygun olarak gümüş yapıştırıcı kullanılarak örnek yüzeyine yapıldı. Sandviç konfigürasyonunda, elektrotlardan biri küçük bir gümüş yapıştırıcı damlasıyla kristalin ön yüzeyine tutturuldu. Daha sonra örnek, diğer yüzeyinden örnek tutucu üzerine iletim sağlayan gümüş yapıştırıcıyla sabitlendi. Örnek tutucu, devre bağlantısı için kroystata yerleştirildi. Sandviç geometrisinde elektronlar kristal içerisinde *c*-eksenine paralel yönlü akar. Sandviç geometrisinin basit şematik gösterimi Şekil 3.1'de verilmiştir.

IUA ölçümleri TlGaSeS kristalinde elektron tuzakları için 10-160 K sıcaklık aralığında; hol tuzakları için 10-100 K sıcaklık aralığında yapıldı. Advanced Research Systems'in kapalı-döngü helyum kroystatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. IUA, elektron ve hol tuzakları için Lake-Shore 331 sıcaklık kontrolörüyle 0.8 K/s sabit bir ısıtma hızı elde edilerek alınmıştır. Her iki tuzak içinde tuzaklar doldurulurken 10 K sıcaklığında 600 s aydınlatma süresi seçilmiş ve kontaklar arasına 1 V potansiyel uygulanmıştır. Bekleme süresi 60 s seçilmiştir. IUA okunurken kontaklar arasına uygulanan potansiyel ise 100 V'dur. TlGaSeS:N örneğinde elektron ve hol tuzakları için 10-250 K sıcaklık aralığında IUA ölçümleri alındı. Isıtma hızı 0.3 K/s seçildi. Aydınlatma sıcaklığı 10 K, aydınlatma süresi 600 s ve aydınlatma esnasında kontaklara 1 V gerilim uygulandı. Bekleme süresi 60 s ve sıcaklık artırılırken kontaklar arasına 100 V gerilim uygulandı. Deneyde Keithley 228A voltaj/ akım kaynağı ve IUA ölçümleri için Keithley 6485 pikoampermetre

kullanılmıştır. Sistemin sıcaklık ve akım hassasiyeti sırasıyla yaklaşık 10 mK ve 2 pA'dır. IUA deney düzeneğinin görünüşü Şekil 3.2'de verilmiştir.

3.2. Fotoiletkenlik Azalma Deneyleri

Taşıyıcı ömrü, ısıl iletkenlik azalma deneylerinden belirlenir. Bu deneylerde, iki elektrot örneğin karşıt yüzeylerine gümüş yapıştırıcıyla tutturulur. Temas noktalarından biri, "NI USB-6211 yüksek performans USB veri toplama cihazı" tarafından kontrol edilen, yüksek etkinliğe sahip kısa atımlı LED tarafından aydınlatılmıştır. Sinyal bilgisayara gönderilir ve daha sonra, fotoakım azalma zamanını incelemek için analiz edilir. Fotoakım azalma deneyi düzeneğinin görünümü Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 3.3. Fotoiletkenlik deney düzeneği

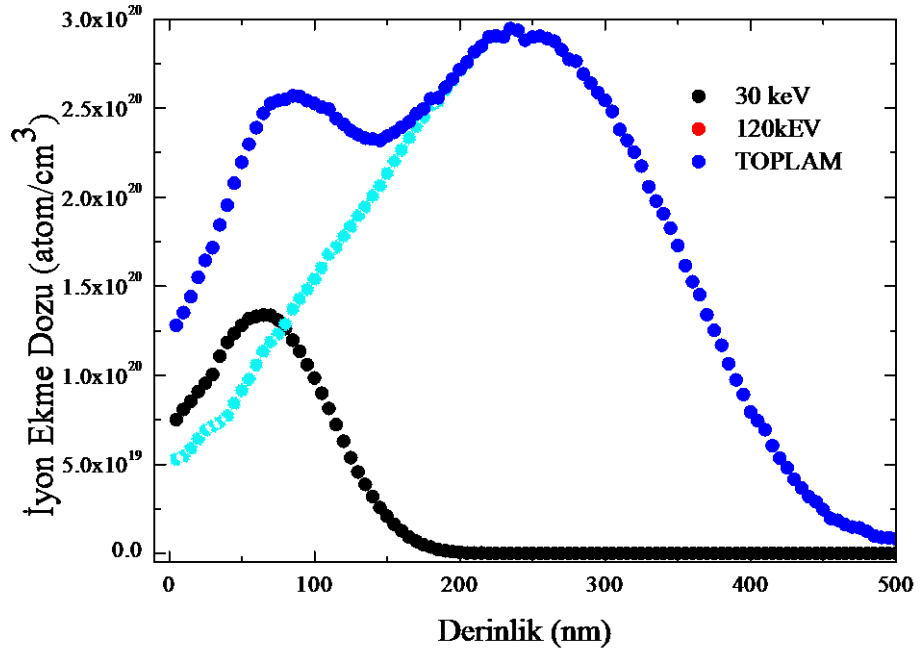
Fotoiletkenlik azalma deneyleri yapılırken AgIn_5S_8 kristalinin kontakları arasında $V_2= 1$ V, TlGaSeS kristalinin kontakları arasında $V_2= 10$ V ve TlGaSeS:N kristallerinin kontakları arasında $V_2= 30$ V gerilim uygulandı.

3.3. Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerine Azot İyonu Ekme İşlemi

TlGaSeS tek kristallerine azot iyonu ekme işlemi Resim 3.1’de görülen Varian Model 200-DF4 iyon ekme sistemiyle yapıldı. Örnek, 30 keV ile 120 keV enerji ve 1×10^{16} iyon/cm²doza sahip azot iyonlarıyla oda sıcaklığında bombardıman edildi. Azot ekme işleminden sonra TlGaSeS kristali, azot ile ilgili ekilmiş merkezleri aktive etmek için, argon gazı ortamında 300 °C’de 45 dakika tavlama işlemine tabi tutuldu. Şekil 3.4’te ekilen azot iyonlarının TRIM programı kullanılarak hesaplanan örneğe nüfuz derinliği gösterilmiştir.



Resim 3.1. Varian Model 200-DF4 İyon Ekme Sistemi



Şekil 3.4. TlGaSeS kristaline ekilen azot iyonlarının iyon ekme dozu, İyonların enerjisi ve derinliği

4.BÖLÜM

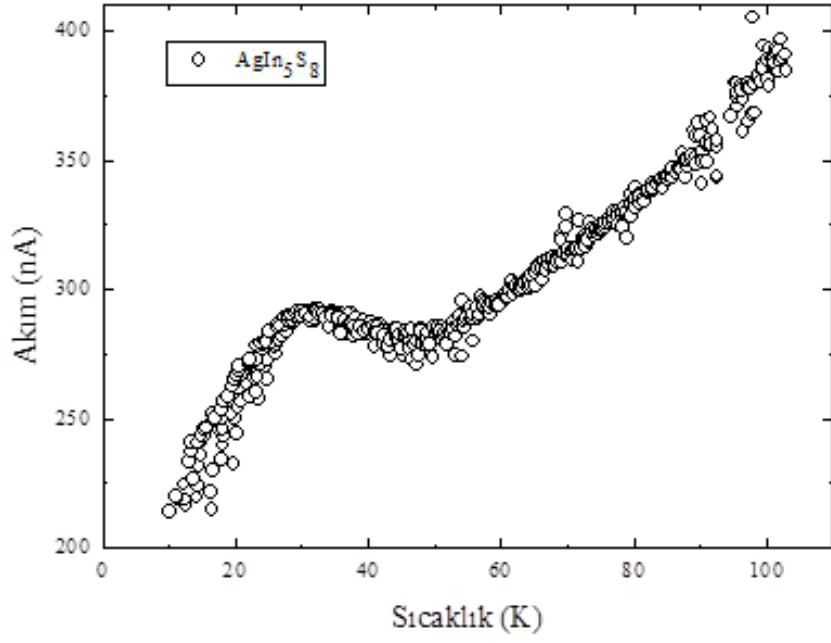
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümün ilk kısmında, üçlü yarıiletken bileşik AgIn_5S_8 tek kristallerinde ısıl uyarılmış akım ölçümlerinin deneysel bulguları ve farklı yöntemler kullanılarak hesaplanan tuzak parametreleri sonuçları literatür karşılaştırmaları ile birlikte verildi. İkinci kısmında ise, katmanlı yapıya sahip dördü yarıiletken bileşik TlGaSeS kristalinin yapısı ve ısıl uyarılmış akım ölçümlerinin deneysel bulguları, son kısımda azot ekilmiş TlGaSeS tek kristallerinde ısıl uyarılmış akım ölçümlerinin deneysel bulguları incelendi.

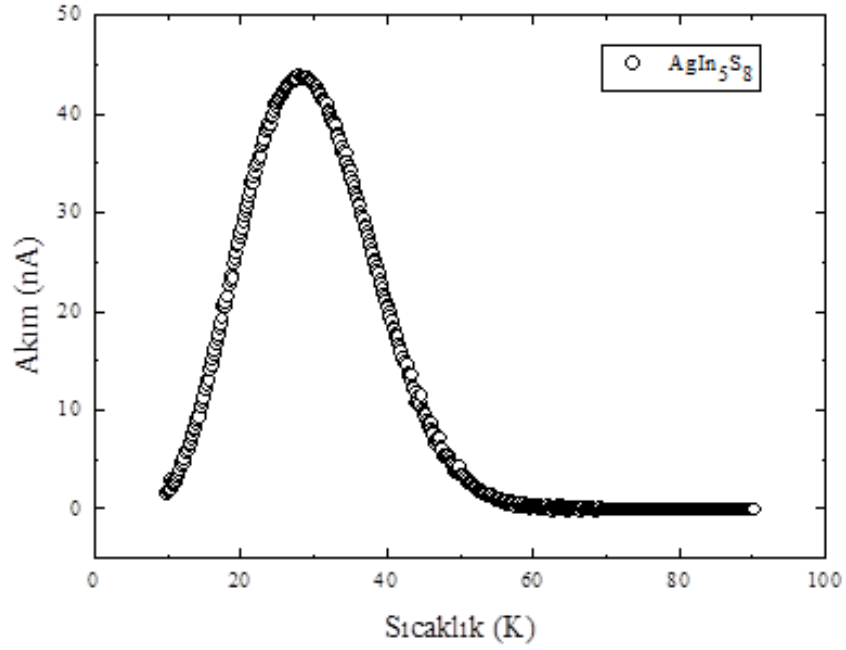
4.1. Üçlü Bileşik Yarıiletken AgIn_5S_8 Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri

Bridgman yöntemiyle büyütülen AgIn_5S_8 tek kristallerinde ısıl uyarılmış akım (IUA) ölçümleri 0.2 K.s^{-1} ısıtma hızı ile 10-70 K sıcaklık aralığında kontaklar arasına 1 V potansiyel uygulanarak alındı. IUA piki, 10 K sıcaklığında örneğin negatif kutupları arasına 0.1 V potansiyel fark uygulanıp ışık yayan diyot (LED) ile 300 s aydınlatıldığında elde edildi ve bekleme zamanı 60 saniyeydi. Böylece tuzak merkezleri elektron tuzaklarına atfedilebilir. Çünkü, örnek yüzeyi aydınlatıldığında her iki taşıyıcı tipi elektron ve holler oluşur. Uygulanan alana bağlı olarak taşıyıcıların bir çeşidi örnek içine doğru sürüklenir; diğer taşıyıcı çeşidi uygulanan elektrik alan nedeniyle kutup bölgesinde toplanır ve sadece tuzaklanan taşıyıcılar örnek içine sürüklenen yük taşıyıcılarıdır. Elektron tuzaklarından ileri gelen IUA piki Şekil 4.1 ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Şekil 4.2’deki IUA piki Şekil 4.1’deki deneysel IUA verilerinden hesaplanmıştır. IUA deneysel verilerinden elektron tuzak merkezlerinden ileri gelen akım piki olmadığı durumdaki veriler çıkarılarak Şekil 4.2’deki IUA piki bulunmuştur. Bu pikin maksimum sıcaklık değerine ($T_m = 28.3 \text{ K}$) karşılık gelen maksimum IUA değeri 43.69 nA ’dir.



Şekil 4.1. AgIn₅S₈ tek kristalinin negatif kutbu aydınlatıldığında elde edilen IUA



Şekil 4.2. AgIn₅S₈ tek kristalinde elektron tuzaklarından kaynaklanan IUA

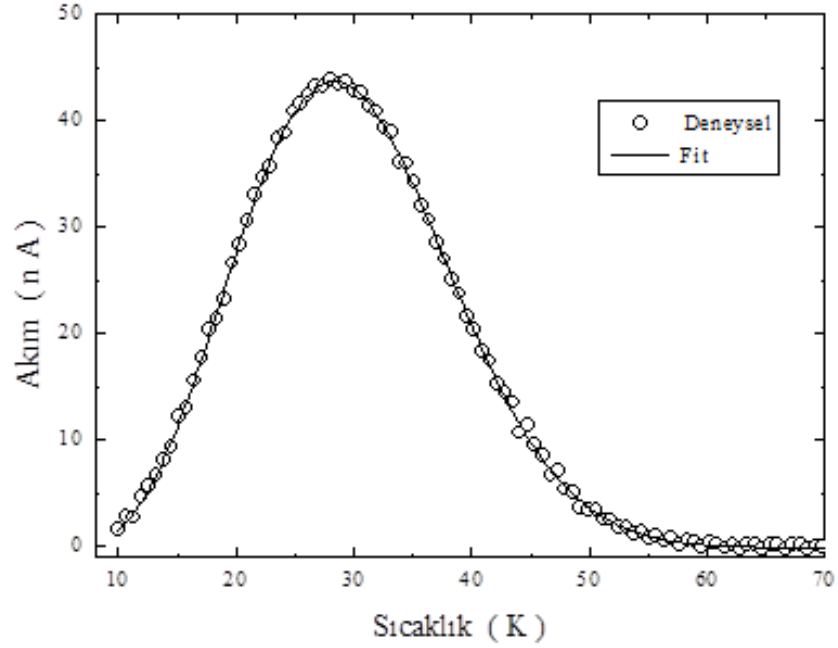
4.1.1. Aktivasyon enerjisinin bulunması

IUA verilerinin analizi için tuzaklama merkezlerinin hangi çeşit kinetiğe sahip olduğunun belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle, tuzaklama merkezlerinin yakalama tesir kesitlerinin (S_t) ve rekombinasyon merkezlerinin yakalama tesir kesitlerinin (S_r) karşılaştırılmasına ihtiyaç vardır. Monomoleküler işlem için ($S_t \ll S_r$) yavaş yeniden tuzaklanma meydana gelir. Yavaş yeniden tuzaklanma durumunda, tuzak merkezlerinden ısısal olarak uyarılmış elektronların holler ile rekombinasyon ihtimali tuzak merkezleri tarafından yeniden tuzaklanma ihtimalinden çok daha büyüktür. Bu durumda elektronlar ile doldurulmuş tuzak merkezlerinin konsantrasyonu IUA pikinin yerini ve şeklini etkilemez. $S_t \gg S_r$ ise hızlı yeniden tuzaklanma meydana gelir. Bu durumda elektronların büyük miktarı rekombinasyon meydana gelmeden önce tuzak merkezleri tarafından da yakalanır. Böylece IUA pikinin konumu ve şekli doldurulmuş tuzak merkezlerinin konsantrasyonuna bağlı olur. Bu çalışmamızda Şekil 4.2'deki IUA piki için yavaş yeniden tuzaklanma ve hızlı yeniden tuzaklanma prosesleri değerlendirilmiş ve deneysel veriler ile en uygun prosesin monomoleküler işlem olduğu sonucuna varılmıştır.

IUA eğrisinden tuzaklama parametrelerini bulmak için birçok metot vardır. Burada deneysel IUA verilerinin analizi için eğri fit etme yöntemi, başlangıçtaki artış yöntemi ve pik şekli yöntemi kullanılmıştır.

4.1.1.1.Eğri fit etme yöntemi

Şekil 4.2'deki deneysel IUA spektrumuna denklem (2.41a) kullanılarak ve tuzak merkezlerinin monomoleküler kinetiğe sahip olduğu düşünülerek fit etme işlemi yapıldı. Deneysel veriler ile teorik yaklaşımın birbiri ile çok iyi uyum gösterdiği görüldü ve aktivasyon enerjisi 5 meV olarak bulundu. Bu sonuçtan AgIn_5S_8 tek kristalindeki IUA ölçümlerinde elektronların yeniden tuzaklanmasının ihmal edilebileceğini söyleyebiliriz. Deneysel IUA grafiğine uygulanan fit etme yöntemi Şekil 4.3'te Teorik Fit olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.3. AgIn₅S₈ tek kristalinde IUA verilerine uygulanan teorik fit

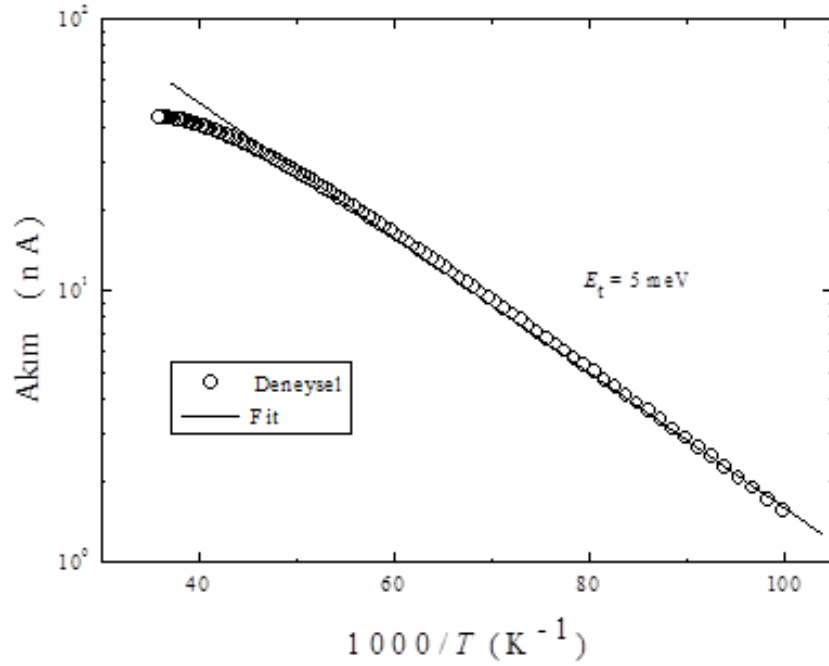
4.1.1.2. Başlangıçtaki artış yöntemi

Başlangıçtaki artış yöntemi, bütün rekombinasyon kinetikleri için geçerlidir. Sıcaklık artışıyla birlikte tuzaklar boşalmaya başladığında IUA'nın $\exp(-E_v/kT)$ ile orantılı olduğu yorumuna dayanır [63, 64]. IUA'nın $1/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafiği çizilirse fit edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanabilir. Şekil 4.4'te görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi hesaplanarak 5 meV bulunmuştur.

4.1.1.3. Pik şekli yöntemi

Pik şekli yönteminde aktivasyon enerjisi $\tau = T_m - T_l$, $\delta = T_h - T_m$, $w = T_h - T_l$ and $\mu_g = \delta/w$ parametreleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada T_m maksimum pik sıcaklığı T_l ve T_h maksimum akım değerinin yarı yüksekliğine karşılık gelen sıcaklık değerleridir. (2.63, 2.64 ve 2.65) denklemleri kullanılarak bu yöntemle aktivasyon enerjisi 6 meV olarak bulunmuştur [63].

Eğri fit etme yöntemi, Başlangıçtaki artış yöntemi ve Pik şekli yöntemiyle bulunan aktivasyon enerjileri Tablo 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. AgIn₅S₈ tek kristalinde IUA değerlerinin 1000/T'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru

4.1.2. Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması

Eğri fit etme yöntemiyle aktivasyon enerjisi 5 meV olarak bulundu ve IUA akım eğrisinin maksimum pik sıcaklığı 28.3 K'dir. Denklem (2.48) ve (2.53). kullanılarak B sabiti ve kaçmaya teşebbüs etme frekansı hesaplanabilir. Kaçmaya teşebbüs etme frekansı $\nu = 0.11 \text{ s}^{-1}$ olarak bulundu. Yakalama tesir kesiti $S_t = \frac{\nu}{N_c \nu_{th}}$ denklemi kullanılarak $2.2 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı (Tablo 4.1).Yakalama tesir kesitinin bu küçük değeri IUA eğrisine uyguladığımız monomoleküler kinetik yorumunu doğrular niteliktedir.

Tuzakların yoğunluğu $N_t = \frac{Q}{A_{LeG}}$ denklemi yardımıyla hesaplanabilir [65, 66].Burada IUA ölçümleri esnasında boşaltılmış yük miktarı olan Q'nun değeri ve IUA eğrisinin altındaki alandan bulunabilir.Fotoiletkenlik kazancı olan G ise fotoiletkenlik azalma deneyinden yararlanarak elde edilebilir [67]. Fotoiletkenlik azalma deneyinde örnek üzerine ışık düşürüldüğünde electron-hol çiftleri meydana gelir ve örneğin iletkenliği değişir. Örneğe uygulanan elektrik alan akıma neden olan electron ve hollerin zıt yönlerde

hareket etmesine neden olur. Yük taşıyıcıları, rekombine olana kadar ya da kontaklarda toplanana kadar devrede hareketine devam eder. Fotoiletkenlik kazancına elektronların holler ile rekombine olmadan önce devrede bir kaç kez dolaşmaları sebep olur. Devrede dolaşan elektron akıma katkıda bulunur. Fotoiletkenlik kazancı $G = \frac{\tau}{t_{tr}} = \frac{\tau\mu V_2}{L^2}$ denkleminde bulunabilir [68]. Burada τ , taşıyıcı yaşam süresi; t_{tr} , taşıyıcıların kontaklar arasındaki geçiş süresidir.

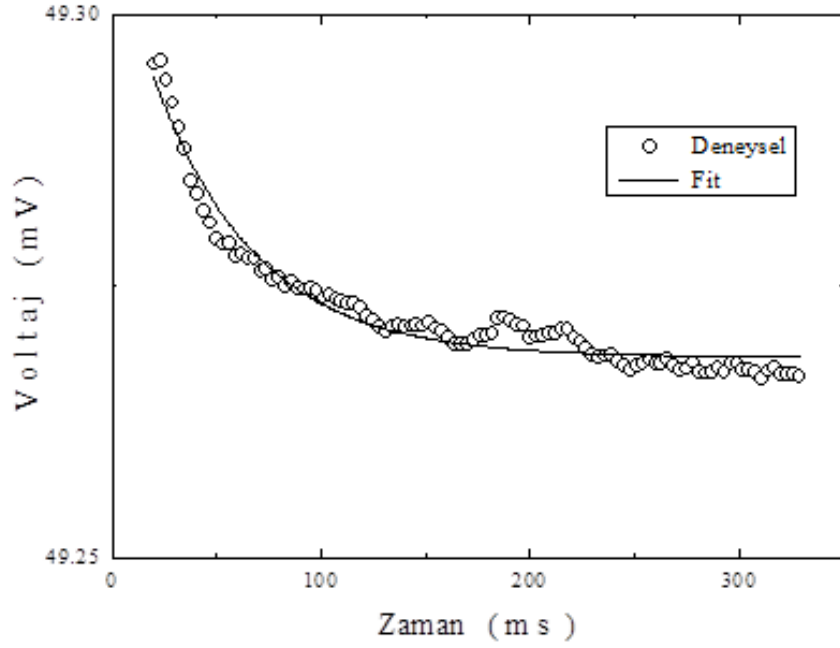
Taşıyıcı yaşam süresi τ , fotoiletkenlik azalma deneylerinden bulunur. Bu deneyde sandviç geometriye göre örneğin her iki yüzeyine omik kontaklar yapıldı. Dijital sinyal üreticisi tarafından kontrol edilen yüksek verimli mavi LED ile ekli kontak aydınlatıldı. Fotoakım, bir hızlı akım-voltaj dönüştürücüsü ile yükseltildi. Sinyal bir hızlı dijital voltmetre ile kaydedildi ve bilgisayara taşındı. Kaydedilen veriler fotoakım azalma zamanını tanımlamak için analiz edildi.

Aydınlatma ışığı kapatıldıktan sonra $t=t_0$ akımın azalması yaklaşık olarak üsteldir. Taşıyıcı yaşam süresi çıkış voltaj eşitliği $V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ ile bulunabilir. V_0 , $t = \infty$ iken voltaj değeridir. C bir sabittir. Fotoiletkenlik azalma deneyine ait grafik Şekil 4.5'te verilmiştir.

$V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ denklemi Şekil 4.5'e fit yapılarak taşıyıcı yaşam süresi $\tau = 48 \text{ ms}$ bulundu. Buna karşılık gelen fotoiletkenlik kazancı, $V_2=1 \text{ V}$ ve $\mu=77 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ alınarak $G=164$ olarak hesaplandı. Buradan tuzakların yoğunluğu $N_t=6.1 \times 10^{12}\text{cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur (Tablo 4.1).

Tablo 4.1. AgIn₅S₈ kristallerinde aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu

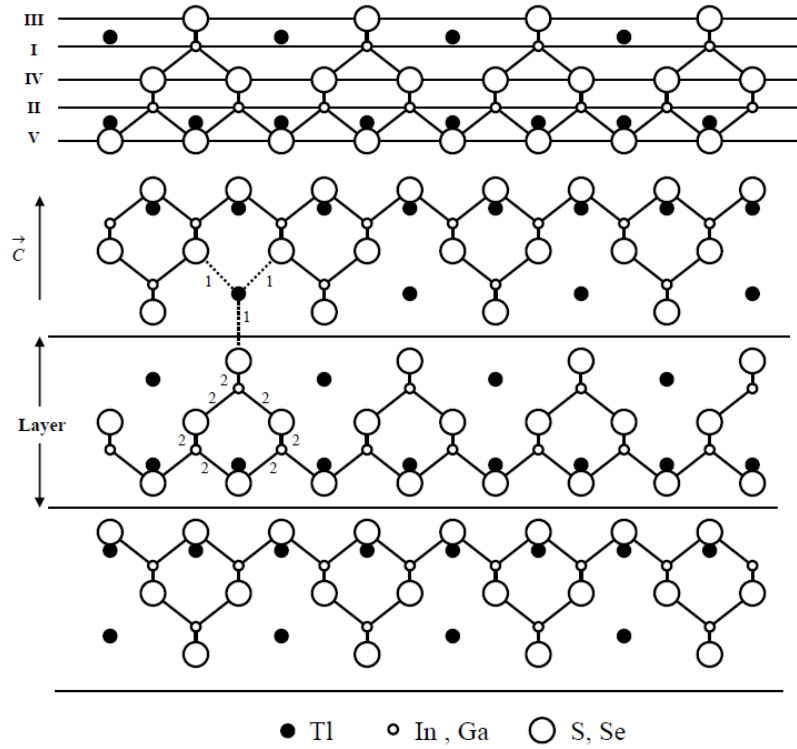
Pik maksimum sıcaklığı $T_m(\text{K})$	E_t (meV)			S_t (cm ²)	ν (s ⁻¹)	N_t (cm ⁻³)
	Eğri fit etme yöntemi	Başlangıçtaki yükseliş yöntemi	Pik şekli yöntemi			
28.3	5	5	6	2.2×10^{-25}	0.11	6.1×10^{12}



Şekil 4.5. AgIn₅S₈ tek kristalinde fotoiletkenlik azalma eğrisi

4.2. Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinin Yapısı

Katmanlı yapıya sahip TlGaSeS kristali, TlGaSe₂ ve TlGaS₂ kristallerinde Selenyum (Kükürt) atomlarının yarısının Kükürt (Selenyum) atomlarıyla yer değiştirmesi ile oluşur. Kristal örgü iki boyutludur ve (001) düzlemine paralel dizilmiştir. Şekil 4.6'da görüldüğü gibi TlGaSeS kristalinde Tl ve Se (S) atomları katman içi bağlanmaya sahipken Ga ve Se (S) atomları katmanlar arası bağlanmaya sahiptir [69].



Şekil 4.6. TlGaSeS kristalinin yapısı. (1) Tl ve Se(S) atomları arasındaki katman-İçi bağlanmayı gösterir. (2) Ga ve Se (S) atomları arasındaki katmanlar arası bağlanmayı gösterir. I, II, III, IV ve V rakamları farklı atom düzlemlerini belirtmektedir.

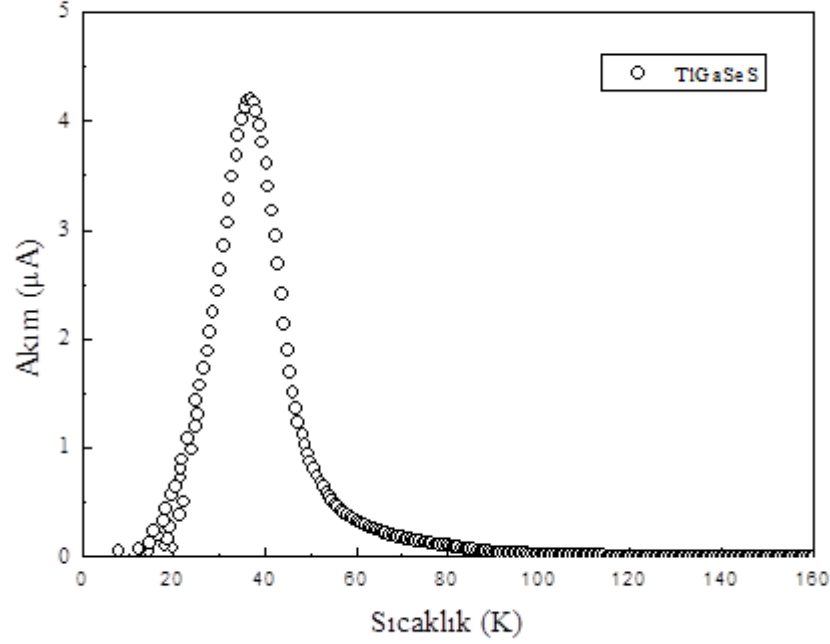
4.3. Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri

Bu kesimde, TlGaSeS yarıiletken kristallerinde alınan IUA ölçümlerinin bulguları verilmektedir. Kristal'in negatif ve pozitif kontaktarı mavi ışık yayan LED ile aydınlatıldığında, her iki durumda da IUA piki elde edildi. Bölüm 4.1'de açıklandığı gibi negatif kontak aydınlatıldığında ölçülen IUA pikinin elektron tuzaklarından, pozitif kontak aydınlatıldığında ölçülen IUA pikinin de hol tuzaklarından kaynaklandığı bilinmektedir. Takip eden bölümlerde IUA piklerini kullanarak bu tuzak merkezlerinin parametreleri incelenmektedir.

4.3.1. Dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde elektron tuzak merkezleri için ısı uyarılmış akım ölçümleri

Şekil 4.7'de TlGaSeS kristalinin negatif kutupları arasına 1 V potansiyel uygulayarak mavi LED ile 10 K sıcaklığında 600 s aydınlatıldıktan sonra ve 60 s bekledikten sonra

0.8 K/s ısıtma hızı ile 160 K sıcaklığa kadar alınmış IUA ölçümlerinin grafiği görülmektedir.

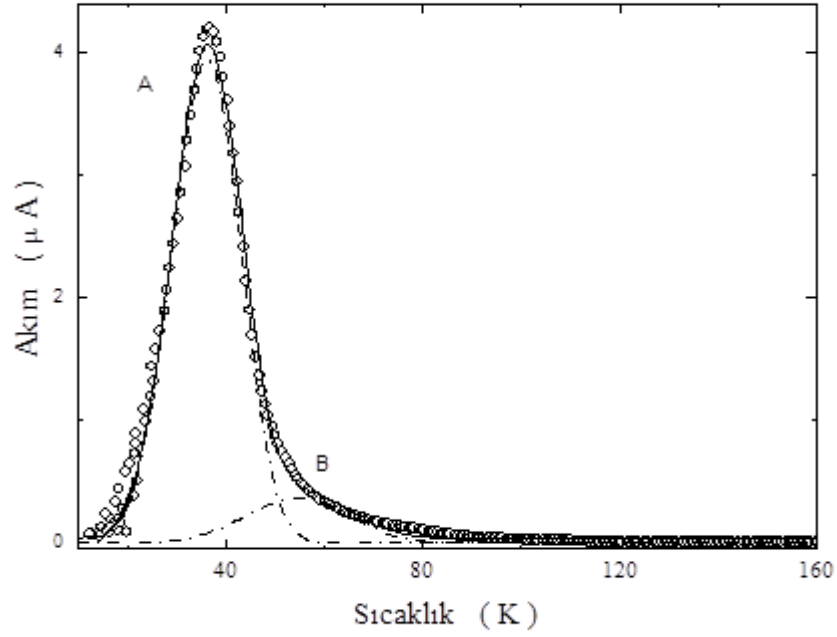


Şekil 4.7. TlGaSeS tek kristalinin negatif kutubu aydınlatıldıktan sonra alınan IUA

Şekil 4.7’de görülen IUA eğrisini kullanılarak elektron tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu hesaplanabilir.

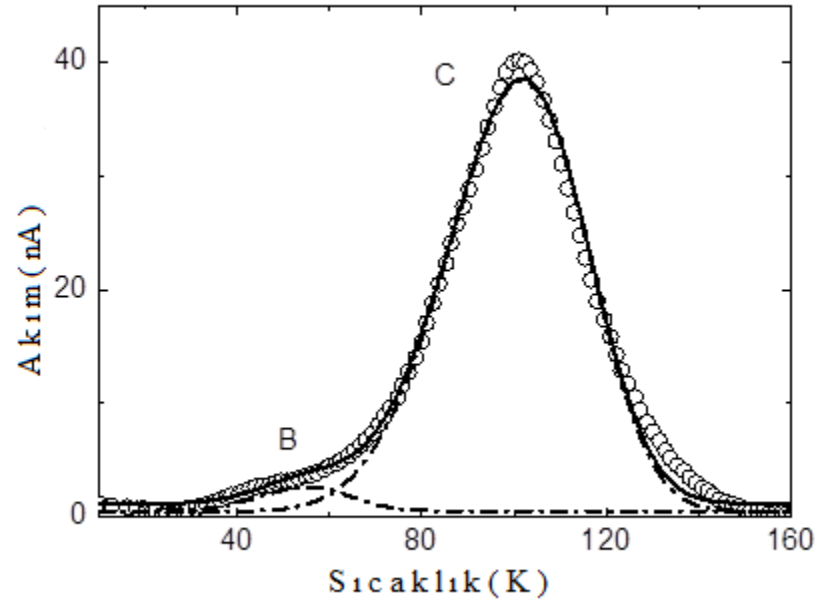
4.3.1.1.Eğri fit etme yöntemi

Şekil 4.7’deki IUA eğrisine monomoleküler şartlarda (2.41a) denklemini tek pik ile fit ettiğimizde başarılı olmadı. Bu nedenle iki pik ile fit yapma yolu denendi ve başarılı oldu. Şekil 4.8’de iki pik ile fit yapılmış IUA eğrisi görülmektedir.



Şekil 4.8. TlGaSeS kristalinin IUA eğrisine monomoleküler şartlarda iki pik ile yapılan fit

Şekil 4.8'e yapılan fit ile A ve B piklerinin aktivasyon enerjileri $E_A=13$ meV, $E_B=20$ meV olarak bulundu. Daha sonra, IUA'a katkıda bulunan yeni tuzak merkezlerinin olup olmadığını araştırmak için, bu piklere ısıl temizleme işlemi uygulandı. Isıl temizleme işlemi şu şekilde uygulanmaktadır: Örnek 10 K'e kadar soğutuldu ve LED ile 600 s aydınlatıldı. 60 s bekleme zamanından sonra 0,8 K/s ısıtma hızıyla A pikinin maksimumu olan $T_m=55$ K'e kadar sıcaklık artırılarak durduruldu. Böylece A ve B piklerinden sorumlu tuzak merkezleri boşaltıldı. Daha sonra, kristal (örnek) 10 K'e tekrar soğutuldu ve aynı ısıtma hızıyla yeniden ısıtıldı. Yüksek şiddetli A ve B piklerinin sönme olması bize daha küçük şiddetteki pikleri gözleme imkânı vermektedir. Şekil 4.9'da daha küçük şiddetteki C piki görülmektedir.



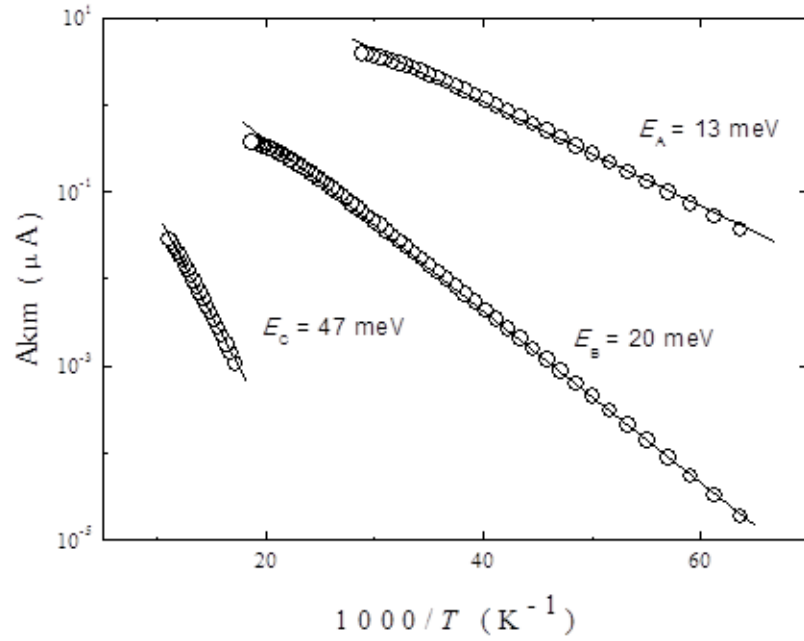
Şekil 4.9. TlGaSeS kristallerinde A ve B piklerine “thermal cleaning” işlemi yaptıktan sonra görünen C piki

Şekil 4.9’da görüldüğü gibi B piki C pikinden çok daha küçük olduğundan (yaklaşık 10 kat) C piki tek başına fit edilememektedir. Bu pike iki pik ile fit etme yöntemi uygulandığında diğer piklerde olduğu gibi daha başarılı sonuç alınmıştır. Bu fit etme işleminde de B pikinin aktivasyon enerjisi $E_B=20$ meV olarak bulundu. C pikinin aktivasyon enerjisi ise $E_C=50$ meV olarak bulunmuştur (Tablo 4.2.).

A, B ve C eğrileri ile temsil edilen tuzak merkezlerine yavaş yeniden tuzaklanma yorumu ile yapılan teorik fitler deneysel verilerle iyi uyum göstermektedir. Bu da bize TlGaSeS kristalindeki bu tuzak merkezlerinde yeniden tuzaklanma işleminin meydana gelmediği veya ihmal edilebilir seviyede olduğu sonucunu vermektedir.

4.3.1.2. Başlangıçtaki artış yöntemi

Bölüm 4.1.1.2 de açıklandığı gibi sıcaklığın başlangıç kısmındaki veriler kullanılarak fit edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplandı. A, B ve C pikleri için $1000/T$ ’ye karşı çizilen akımın yarılogaritmik grafiği Şekil 4.10’da görülmektedir. Başlangıçtaki artış yöntemiyle A, B ve C piklerinin aktivasyon enerjileri $E_A=13$ meV, $E_B=20$ meV ve $E_C=47$ meV olarak bulunmuştur (Tablo 4.2).



Şekil 4.10. TlGaSeS tek kristalinde IUA değerlerinin $1000/T$ 'ye göre yarılogaritmik grafikleri ve fit yapılan doğrular

Tablo 4.2. TlGaSeS kristallerinde IUA eğrisinden bulunan A, B ve C tuzak merkezleri için aktivasyon enerjisi (E_t), kaçmaya teşebbüs etme frekansı (ν), yakalama tesir kesiti (S_t) ve tuzak yoğunluğu (N_t)

Pik	T_m (K)	E_t (meV)		ν (s^{-1})	S_t (cm^2)	N_t (cm^{-3})
		Eğri fit etme yöntemi	Başlangıçtaki artış yöntemi			
A	36.3	13	13	3.9	3.3×10^{-24}	1.8×10^{13}
B	55.0	20	20	2.8	1.0×10^{-24}	2.4×10^{12}
C	101.8	50	47	9.9	1.1×10^{-23}	3.8×10^{11}

4.3.2. Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması

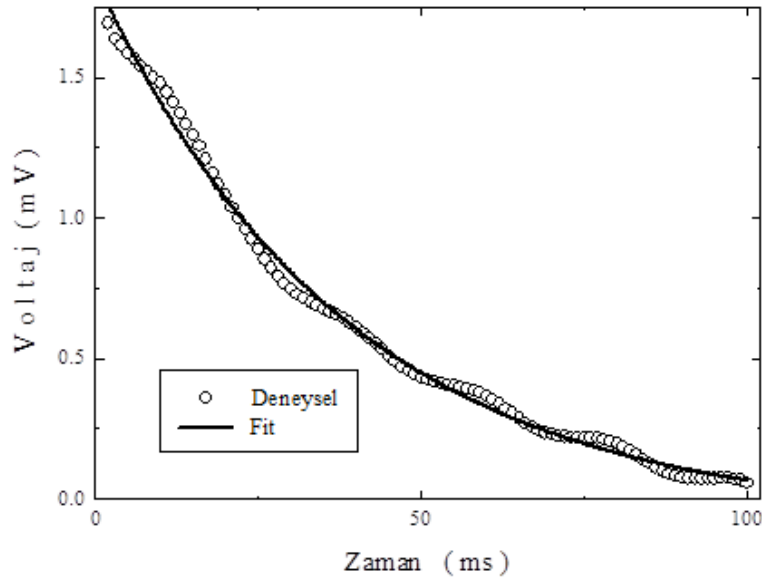
Eğri fit etme yöntemi ve Başlangıçtaki yükselme yöntemleriyle A, B ve C tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjileri bulundu. IUA eğrisinin maksimum pik sıcaklıkları elde edildi (Tablo 4.2.). Denklem (2.48) ve (2.53). kullanılarak B sabiti ve kaçmaya teşebbüs etme frekansı hesaplanabilir.

Kaçmaya teşebbüs etme frekansları A piki için $\nu = 3.9 \text{ s}^{-1}$, B piki için $\nu = 2.8 \text{ s}^{-1}$ ve C piki için $\nu = 9.9 \text{ s}^{-1}$ olarak bulundu. Yakalama tesir kesiti $S_t = \frac{\nu}{N_c \nu_{th}}$ denklemi kullanılarak A piki için $3.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$, B piki için $1.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ve C piki için $1.1 \times 10^{-23} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı (Tablo 4.2). Yakalama tesir kesitlerinin bu küçük değerleri IUA eğrisine uyguladığımız monomoleküler kinetik yorumunu doğrulamaktadır.

Bölüm 4.1.2 de anlatılan tuzakların yoğunluğunun hesaplanması yapıldı.

Aydınlatma ışığı kapatıldıktan sonra $t=t_0$ akımın azalması yaklaşık olarak eksponansiyeldir. Taşıyıcı yaşam süresi çıkış voltaj eşitliği $V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ ile bulunabilir. V_0 , $t = \infty$ iken voltaj değeridir. C bir sabittir. Fotoiletkenlik azalma deneyine ait grafik Şekil 4.11’de verilmiştir.

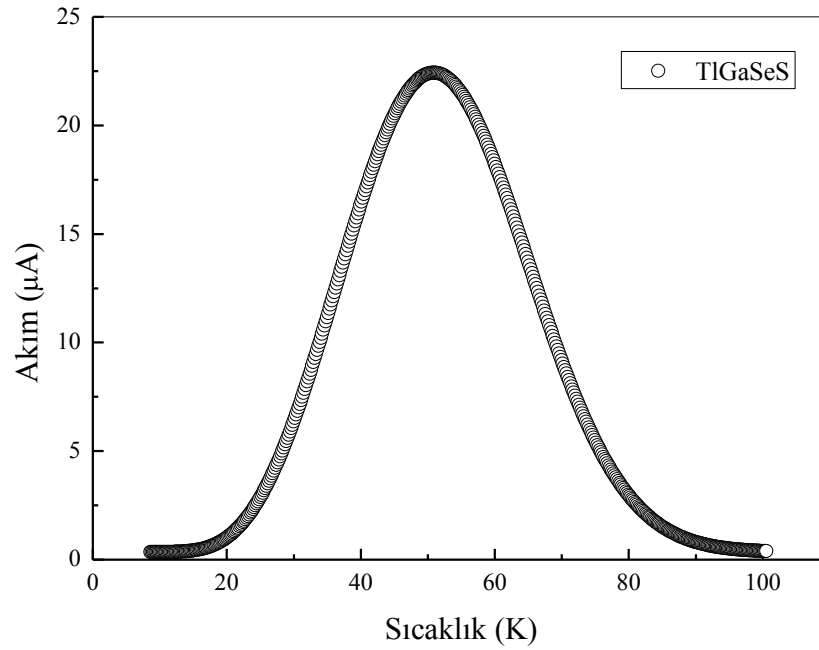
$V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ denklemi Şekil 4.11’e fit edilerek taşıyıcı yaşam süresi $\tau = 3,8 \times 10^{-2} \text{ s}$ olarak bulundu. Buna karşılık gelen fotoiletkenlik kazancı, $V_2=10 \text{ V}$ ve $\mu=61 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ alınarak $G=3622$ olarak hesaplandı. Buradan A, B ve C merkezlerinin tuzak yoğunlukları 1.8×10^{13} ; 2.4×10^{12} ve $3.8 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu (Tablo 4.2).



Şekil 4.11. TlGaSeS tek kristalinde negatif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi

4.3.3. Dörtlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde hol tuzak merkezleri için ısı uyarılmış akım ölçümleri

Şekil 4.12’de TlGaSeS kristalinin pozitif kutupları arasına 1 V potansiyel uygulayarak mavi LED ile 10 K sıcaklığında 600 s aydınlatıldıktan sonra ve 60 s bekleme zamanından sonra 0,8 K/s ısıtma hızı ile 100 K sıcaklığa kadar alınmış IUA ölçümlerinin grafiği verilmektedir.



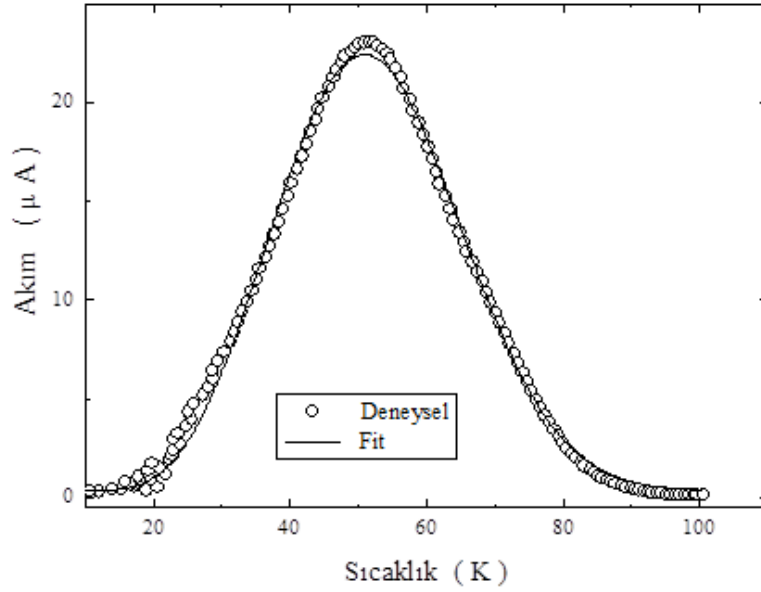
Şekil 4.12. TlGaSeS tek kristalinin pozitif kutubu aydınlatıldıktan sonra alınan IUA

Şekil 4.12’de görülen IUA eğrisini kullanılarak elektron tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu hesaplanabilir.

4.3.3.1. Eğri fit etme yöntemi

Şekil 4.12’deki deneysel IUA eğrisine denklem (2.41a) kullanılarak ve tuzak merkezlerinin monomoleküler kinetiğe sahip olduğu düşünülerek fit etme işlemi yapıldı. Deneysel veriler ile teorik yaklaşımın birbiri ile çok iyi uyum gösterdiği görüldü ve aktivasyon enerjisi 12 meV olarak bulundu (Tablo 4.3). Bu sonuçtan TlGaSeS tek

kristalindeki IUA ölçümlerinde elektronların yeniden tuzaklanmasının ihmal edilebileceğini söyleyebiliriz. Deneysel IUA grafiğine uygulanan fit etme yöntemi Şekil 4.13'te Teorik Fit olarak gösterilmiştir.



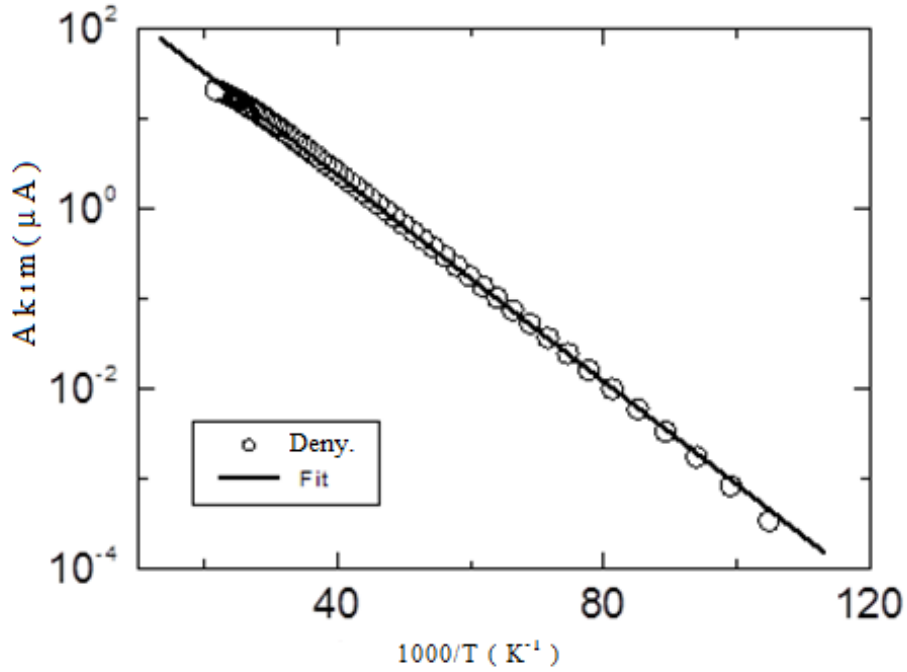
Şekil 4.13. TI GaSeS tek kristalinde IUA verilerine uygulanan teorik fit

4.3.3.2. Başlangıçtaki artış yöntemi

Bölüm 4.1.1.2 de anlatılan yöntemlerle fit edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplanabilir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi hesaplanarak 12 meV bulunmuştur (Tablo 4.3).

Tablo 4.3. TI GaSeS kristallerinde hol tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu

Pik maksimum sıcaklığı $T_m(K)$	E_t (meV)		S_t (cm ²)	ν (s ⁻¹)	N_t (cm ⁻³)
	Eğri fit etme yöntemi	Başlangıçtaki yükseliş yöntemi			
50.9	12	12	-	8.9×10^{-26}	2.0×10^{14}



Şekil 4.14. TIGaSeS tek kristalinde IUA değerlerinin 1000/T'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru

4.3.3.3. Hol tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması

Eğri fit etme yöntemi ve başlangıçtaki artış yöntemleriyle hol tuzaklarının aktivasyon enerjisi 12 meV olarak bulundu ve IUA akım eğrisinin maksimum pik sıcaklığı 50,9 K'dir. Denklem (2.48) ve (2.53). kullanılarak B sabiti ve kaçmaya teşebbüs etme frekansı hesaplanabilir. Kaçmaya teşebbüs etme frekansı $\nu = 0.32 \text{ s}^{-1}$ olarak bulundu. Yakalama

tesir kesiti $S_t = \frac{\nu}{N\nu_{th}}$ denklemi kullanılarak $8.9 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı (Tablo

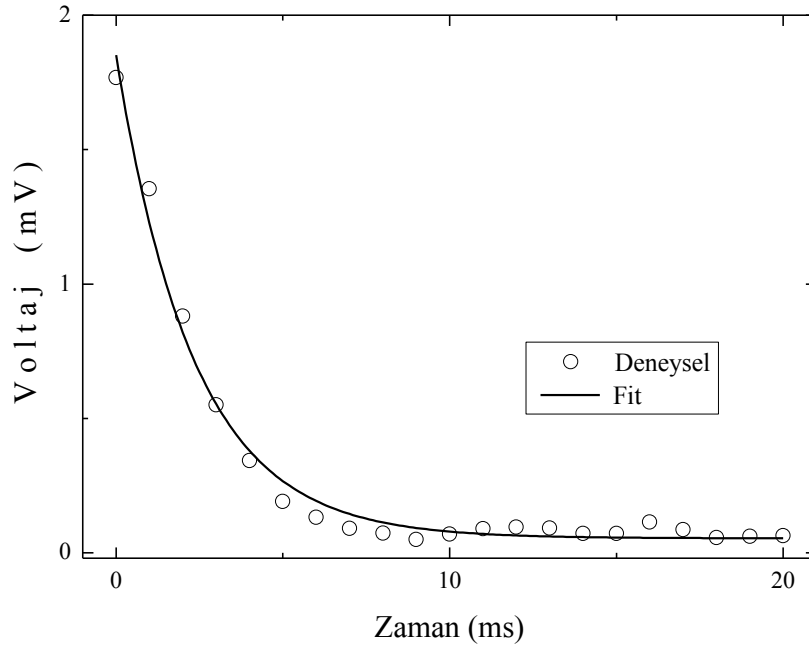
4.3).Yakalama tesir kesitinin bu küçük değeri IUA eğrisine uyguladığımız monomoleküler kinetik yorumunu doğrulamaktadır.

Bölüm 4.1.2 de anlatılan tuzakların yoğunluğunun hesaplanması yapıldı.

Aydınlatma ışığı kapatıldıktan sonra $t=t_0$ akımın azalması yaklaşık olarak eksponansiyeldir. Taşıyıcı yaşam süresi çıkış voltaj eşitliği $V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ ile

bulunabilir. V_0 , $t = \infty$ iken voltaj değeridir. C bir sabittir. Fotoiletkenlik azalma deneyine ait grafik Şekil 4.15'te verilmiştir.

$V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ denklemi Şekil 4.15'e fit edilerek taşıyıcı yaşam süresi $\tau = 2.3 \times 10^{-3}$ s bulundu. Buna karşılık gelen fotoiletkenlik kazancı, $V_2=50$ V ve $\mu=61$ $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ alınarak $G=1096$ olarak hesaplandı. Buradan tuzakların yoğunluğu $N_t=2.0 \times 10^{14}$ cm^{-3} olarak bulunmuştur (Tablo 4.3).



Şekil 4.15. TlGaSeS tek kristalinde pozitif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi

4.4. Azot Ekilen Dörtlü Bileşik Yarıiletken TlGaSeS Tek Kristallerinde Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri

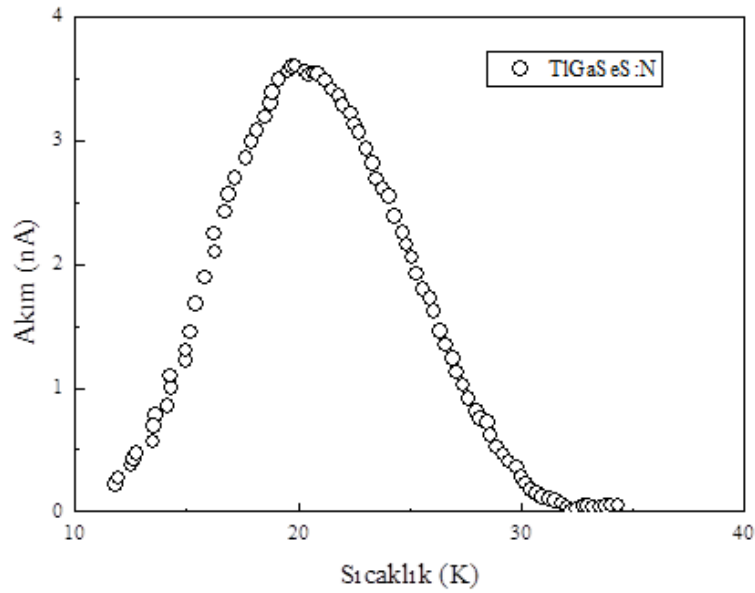
Bu kesimde, 1×10^{16} iyon/ cm^2 doz ile 120 keV enerjiye sahip azot iyonlarıyla bombardıman edilerek azot ekilmiş TlGaSeS kristallerinde IUA ölçümlerinin sonuçları ve bulguları verilmektedir.

TlGaSeS kristalinin negatif ve pozitif kontakları mavi ışık yayan LED ile aydınlatıldığında, her iki durumda da IUA piki elde edildi. LED ile 10 K sıcaklığında aydınlatılarak tuzakların doldurulması esnasında kontakların uçları arasına 1 V'luk

potansiyel uyulandı. Aydınlatma süresi 10 dk, bekleme zamanı 60 s seçildi. 0,3 K/s ısıtma hızı ile akım değerleri okunurken kontaklar arasına 100 V gerilim uygulandı. IUA ölçümleri 10-250 K sıcaklık aralığında gösterildi. TlGaSeS kristaline azot ekme işleminden sonra argon gazı ortamında 300 °C’de 45 dakika ekme işlemi sırasında oluşan hasarları ortadan kaldırmak ve ekilmiş azot atomlarını aktive etmek için tavlama işlemi yapıldı. Bölüm 4.1’de açıklandığı gibi negatif kontak aydınlatıldığında ölçülen IUA pikinin elektron tuzaklarından, pozitif kontak aydınlatıldığında ölçülen IUA pikinin de hol tuzaklarından kaynaklandığı bilinmektedir. Takip eden bölümlerde IUA piklerinden tuzak merkezlerinin parametreleri incelenmektedir.

4.4.1. Azot ekilen dörütlü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde elektron tuzak merkezleri için ısıtılmış akım ölçümleri

Elektron tuzaklarından ileri gelen IUA piki Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şekil 4.16’daki IUA piki deneysel IUA verilerinden hesaplanmıştır. IUA deneysel verilerinden elektron tuzak merkezlerinden ileri gelen akım piki olmadığı durumdaki veriler çıkarılarak Şekil 4.16’daki IUA piki bulunmuştur. Bu pikin maksimum sıcaklık değerine ($T_m = 20$ K) karşılık gelen maksimum IUA değeri 3.60 nA’dır.

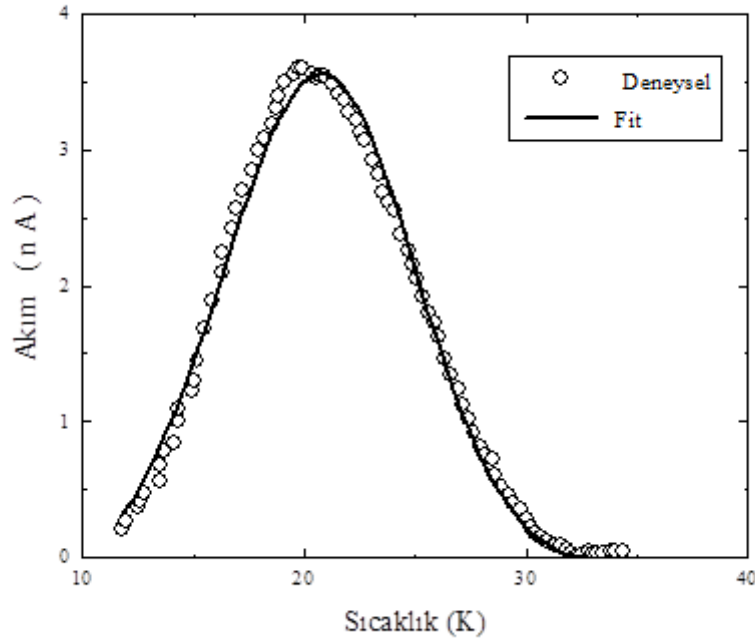


Şekil 4.16. TlGaSeS:N kristalinde elektron tuzaklarından kaynaklanan IUA

Şekil 4.16’da görülen IUA eğrisinden elektron tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu hesaplanabilir.

4.4.1.1.Eğri fit etme yöntemi

Şekil 4.16’daki deneysel IUA eğrisine denklem (2.41a) kullanılarak ve tuzak merkezlerinin monomoleküler kinetiğe sahip olduğu düşünülerek fit etme işlemi yapıldı. Deneysel veriler ile teorik yaklaşımın birbiri ile çok iyi uyum gösterdiği görüldü ve aktivasyon enerjisi 6 meV olarak bulundu. Bu sonuçtan TlGaSeS tek kristalindeki IUA ölçümlerinde elektronların yeniden tuzaklanmasının ihmal edilebileceğini söyleyebiliriz. Deneysel IUA grafiğine uygulanan fit etme yöntemi Şekil 4.17’de Teorik Fit olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.17. TlGaSeS:N kristalinde elektron tuzakları için IUA verilerine uygulanan teorik fit.

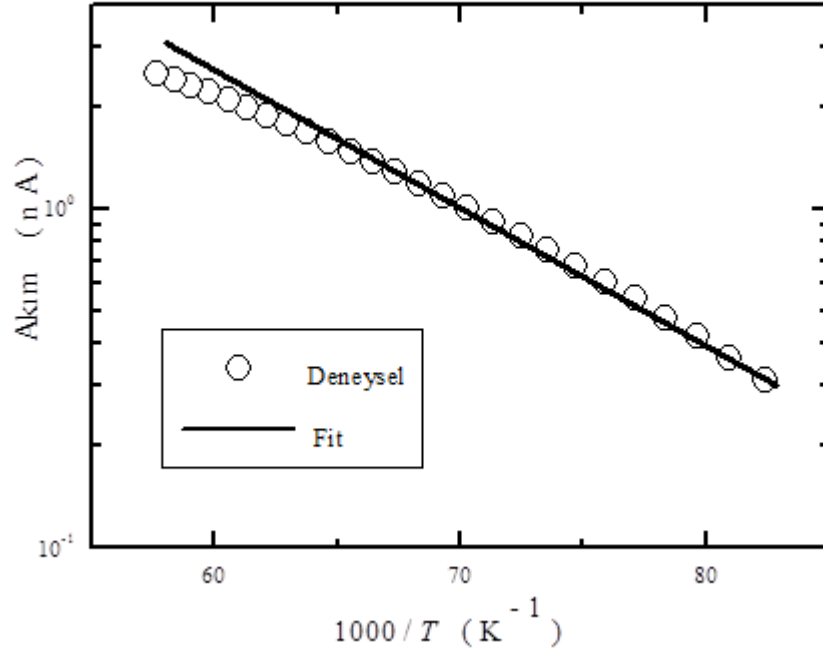
4.4.1.2.Başlangıçtaki artış yöntemi

Bölüm 4.1.1.2 de açıklandığı gibi sıcaklığın başlangıç kısmındaki veriler kullanılarak fit edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplandı. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi hesaplanarak 7 meV bulunmuştur.

4.4.1.3. Pik şekli yöntemi

Pik şekli yönteminde aktivasyon enerjisi $\tau = T_m - T_l$, $\delta = T_h - T_m$, $w = T_h - T_l$ and $\mu_g = \delta/w$ parametreleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada T_m maksimum pik sıcaklığı T_l ve T_h maksimum akım değerinin yarı yüksekliğine karşılık gelen sıcaklık değerleridir. (2.63, 2.64 ve 2.65) denklemleri kullanılarak bu yöntemle aktivasyon enerjisi 9 meV olarak bulunmuştur.

Eğri fit etme yöntemi, Başlangıçtaki artış yöntemi ve Pik şekli yöntemiyle bulunan aktivasyon enerjileri Tablo 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.18. TlGaSeS:N kristalinde IUA değerlerinin 1000/T’ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru

4.4.1.4. Elektron tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması

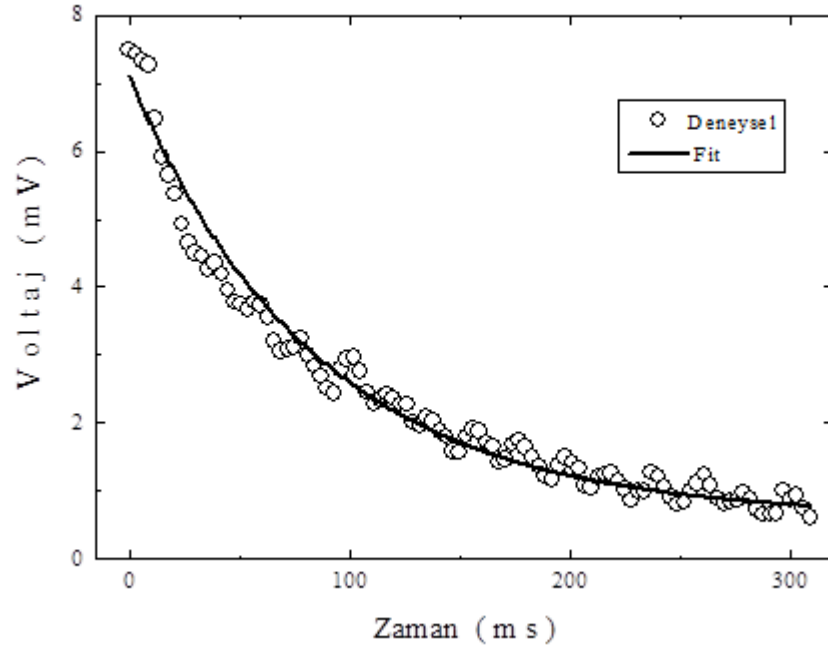
Eğri fit etme yöntemi, başlangıçtaki artış yöntemi ve pik şekli yöntemleriyle elektron tuzaklarının aktivasyon enerjisi 6, 7 ve 9 meV olarak bulundu ve IUA akım eğrisinin maksimum pik sıcaklığı 20 K’dir. Denklem (2.48) ve (2.53). kullanılarak B sabiti ve kaçmaya teşebbüs etme frekansı hesaplanabilir. Kaçmaya teşebbüs etme frekansı $\nu = 1.1$

s^{-1} olarak bulundu. Yakalama tesir kesiti $S_t = \frac{V}{N_c v_{th}}$ denklemi kullanılarak $3.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı (Tablo 4.4). Yakalama tesir kesitinin bu küçük değeri IUA eğrisine uyguladığımız monomoleküler kinetik yorumunu doğrulamaktadır.

Bölüm 4.1.2 de anlatılan tuzakların yoğunluğunun hesaplanması yapıldı.

Aydınlatma ışığı kapatıldıktan sonra $t=t_0$ akımın azalması yaklaşık olarak eksponansiyeldir. Taşıyıcı yaşam süresi çıkış voltaj eşitliği $V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ ile bulunabilir. V_0 , $t = \infty$ iken voltaj değeridir. C bir sabittir. Fotoiletkenlik azalma deneyine ait grafik Şekil 4.19'da verilmiştir.

$V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ denklemi Şekil 4.19'a fit edilerek taşıyıcı yaşam süresi $\tau = 8.4 \times 10^{-2} \text{ s}$ bulundu. Buna karşılık gelen fotoiletkenlik kazancı, $V_2=30 \text{ V}$ ve $\mu_e=61 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ alınarak $G=151$ olarak hesaplandı. Buradan tuzakların yoğunluğu $N_t=5.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur (Tablo 4.4).



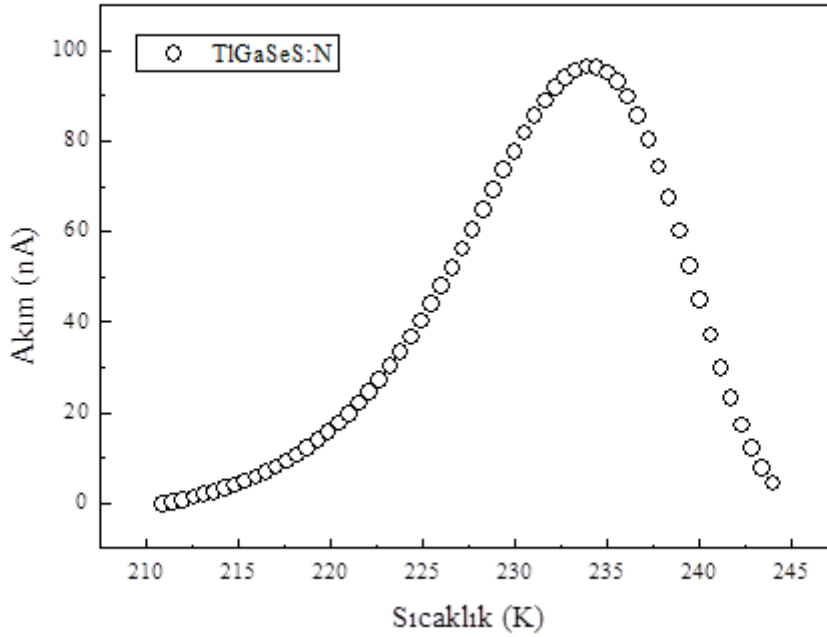
Şekil 4.19. TIGaSeS:N tek kristalinde negatif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi

Tablo 4.4. TlGaSeS:N kristallerinde elektron tuzaklarının aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu

Pik maksimum sıcaklığı $T_m(K)$	E_t (meV)			S_t (cm ²)	ν (s ⁻¹)	N_t (cm ⁻³)
	Eğri fit etme yöntemi	Başlangıçtaki yükseliş yöntemi	Pik Şekli yöntemi			
20	6	7	9	$3,0 \times 10^{-24}$	1,1	$5,6 \times 10^{11}$

4.4.2. Azot ekilmiş dörtdü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde hol tuzak merkezleri için ısı uyarılmış akım ölçümleri

Hol tuzaklarından ileri gelen IUA piki Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Şekil 4.20’deki IUA piki, deneysel IUA verilerinden hesaplanmıştır. IUA deneysel verilerinden elektron tuzak merkezlerinden ileri gelen akım piki olmadığı durumdaki veriler çıkarılarak Şekil 4.20’deki IUA piki bulunmuştur. Bu pikin maksimum sıcaklık değerine ($T_m = 234$ K) karşılık gelen maksimum IUA değeri 96.22 nA’dır.

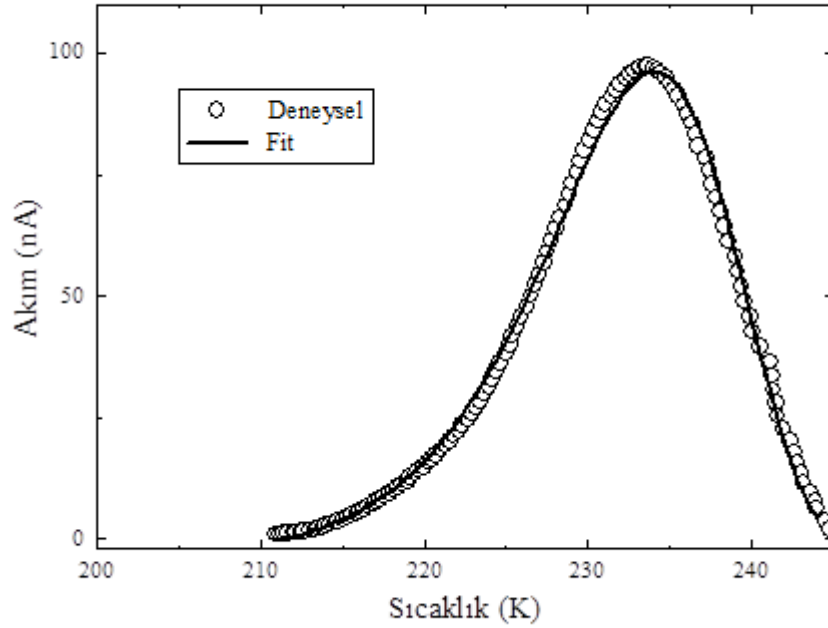


Şekil 4.20. TlGaSeS:N kristalinde hol tuzaklarından kaynaklanan IUA

Şekil 4.20’de görülen IUA eğrisinden elektron tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu hesaplanabilir.

4.4.2.1.Eğri fit etme yöntemi

Şekil 4.20’deki deneysel IUA eğrisine denklem (2.41a) kullanılarak ve tuzak merkezlerinin monomoleküler kinetiğe sahip olduğu düşünülerek fit etme işlemi yapıldı. Deneysel veriler ile teorik yaklaşımın birbiri ile çok iyi uyum gösterdiği görüldü ve aktivasyon enerjisi 0.80 eV olarak bulundu. Bu sonuçtan TlGaSeS tek kristalindeki IUA ölçümlerinde elektronların yeniden tuzaklanmasının ihmal edilebileceğini söyleyebiliriz. Deneysel IUA grafiğine uygulanan fit etme yöntemi Şekil 4.21’de Teorik Fit olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.21. TlGaSeS:N kristalinde hol tuzakları için IUA verilerine uygulanan teorik fit

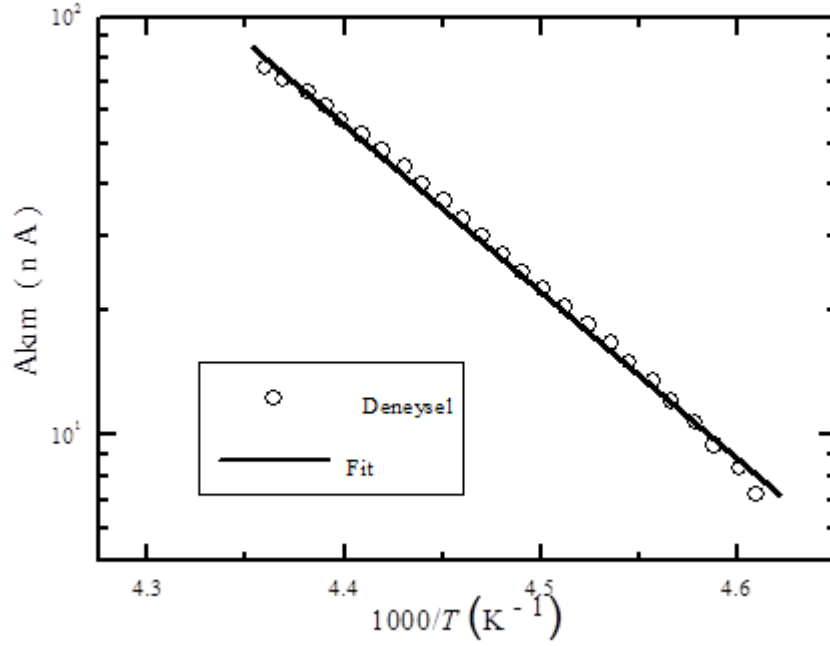
4.4.2.2.Başlangıçtaki artış yöntemi

Bölüm 4.1.1.2 de açıklandığı gibi sıcaklığın başlangıç kısmındaki veriler kullanılarak fit edilen doğrunun eğiminden aktivasyon enerjisi hesaplandı. Şekil 4.22’de görüldüğü gibi aktivasyon enerjisi hesaplanarak 0.80 eV bulunmuştur.

4.4.2.3. Pik şekli yöntemi

Pik şekli yönteminde aktivasyon enerjisi $\tau = T_m - T_l$, $\delta = T_h - T_m$, $w = T_h - T_l$ and $\mu_g = \delta/w$ parametreleri kullanılarak hesaplanabilir. Burada T_m maksimum pik sıcaklığı T_l ve T_h maksimum akım değerinin yarı yüksekliğine karşılık gelen sıcaklık değerleridir. (2.63, 2.64 ve 2.65) denklemi kullanılarak bu yöntemle aktivasyon enerjisi 0.83 eV olarak bulunmuştur.

Eğri fit etme yöntemi, Başlangıçtaki artış yöntemi ve Pik şekli yöntemiyle bulunan aktivasyon enerjileri Tablo 4.5’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. TIGaSeS:N kristalinde IUA değerlerinin 1000/T'ye göre yarılogaritmik grafiği ve fit yapılan doğru

4.4.2.4. Hol tuzak merkezleri için yakalama tesir kesiti ve tuzak yoğunluklarının bulunması

Eğri fit etme yöntemi, başlangıçtaki artış yöntemi ve pik şekli yöntemleriyle hol tuzaklarının aktivasyon enerjisi 0.80, 0.80 ve 0.83 eV olarak bulundu ve IUA akım eğrisinin maksimum pik sıcaklığı 234 K'dir. Denklem (2.48) ve (2.53). kullanılarak B sabiti ve kaçmaya teşebbüs etme frekansı hesaplanabilir. Kaçmaya teşebbüs etme frekansı

$\nu = 3.0 \times 10^{11} \text{ s}^{-1}$ olarak bulundu. Yakalama tesir kesiti $S_t = \frac{\nu}{N_v \nu_{th}}$ denklemi kullanılarak

$2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$ olarak hesaplandı (Tablo 4.5). Yakalama tesir kesitinin bu küçük değeri IUA eğrisine uyguladığımız monomoleküler kinetik yorumunu doğrulamaktadır.

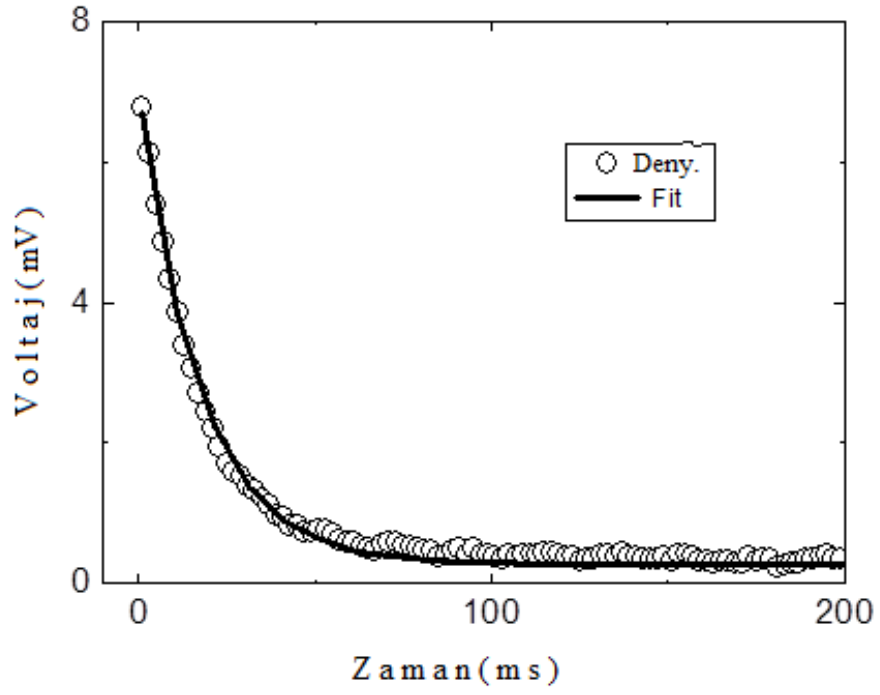
Bölüm 4.1.2 de anlatılan tuzakların yoğunluğunun hesaplanması yapıldı.

Aydınlatma ışığı kapatıldıktan sonra $t=t_0$ akımın azalması yaklaşık olarak eksponansiyeldir. Taşıyıcı yaşam süresi çıkış voltaj eşitliği $V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ ile bulunabilir. V_0 , $t = \infty$ iken voltaj değeridir. C bir sabittir. Fotoiletkenlik azalma deneyine ait grafik Şekil 4.23’de verilmiştir.

$V = V_0 + C \exp(-\frac{t}{\tau})$ denklemi Şekil 4.23’e fit edilerek taşıyıcı yaşam süresi $\tau = 8.4 \times 10^{-2} \text{ s}$ bulundu. Buna karşılık gelen fotoiletkenlik kazancı, $V_2=30 \text{ V}$ ve $\mu_n=18 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ alınarak $G=10$ olarak hesaplandı. Buradan tuzakların yoğunluğu $N_t=2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulunmuştur (Tablo 4.5).

Tablo 4.5. TlGaSeS:N kristallerinde hol tuzaklarının aktivasyon enerjisi, yakalama tesir kesiti, kaçmaya teşebbüs etme frekansı ve tuzak yoğunluğu

Pik maksimum sıcaklığı $T_m(\text{K})$	E_t (eV)			S_t (cm ²)	ν (s ⁻¹)	N_t (cm ⁻³)
	Eğri fit etme yöntemi	Başlangıçtaki yükseliş yöntemi	Pik Şekli yöntemi			
234	0.80	0.80	0.83	2.3×10^{-15}	3.0×10^{11}	2.1×10^{13}



Şekil 4.23. TI GaSeS:N tek kristalinde pozitif kutuplu yüzey aydınlatıldığında alınan fotoiletkenlik azalma eğrisi

5.BÖLÜM

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Kübik spinel yapıya sahip üçlü bileşik yarıiletken AgIn_5S_8 tek kristallerinde ısıl uyarılmış akım ölçümleri (IUA) alındı. Maksimum pik sıcaklığı $T_m=28.3$ K'e yerleşmiş bir elektron tuzak merkezi olduğu açığa çıkarıldı. Bu sığ tuzak merkezinin monomoleküler işleme sahip olduğu tesbit edildi. Eğri fit etme yöntemi, başlangıçta yükselme yöntemi ve pik şekli yöntemi kullanılarak aktivasyon enerjisi 5 meV olarak hesaplandı ve bu üç yöntemle elde edilen aktivasyon enerjisinin birbiriyle uyumlu olduğu görüldü. Elektron tuzak merkezinin yakalama tesir kesiti $S_t=2.2 \times 10^{-25} \text{ cm}^2$ ve tuzak yoğunluğu $N_t=6.1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Yakalama tesir kesitinin bu küçük değeri monomoleküler kinetik yorumunu doğrulamaktadır.

Katmanlı yapıya sahip dördü bileşik yarıiletken TlGaSeS tek kristallerinde de IUA ölçümleri alındı. Bu kristallerde elektron ve hol tuzak merkezleri olduğu bulundu. Elektron tuzak merkezlerinin maksimum sıcaklık değerleri $T_{mA}=36.3$ K, $T_{mB}=55.0$ K ve $T_{mC}=101.8$ K olan IUA pikleri (A, B ve C pikleri) elde edildi. Isıl temizleme işlemi uygulayarak C piki açığa çıkarıldı. Bu üç tuzak merkezinin aktivasyon enerjisi eğri fit etme yöntemi ve başlangıçtaki artış yöntemiyle $E_A=13$ meV, $E_B=20$ meV ve $E_C=50$ meV olarak hesaplandı. Farklı yöntemlerle bulunan aktivasyon enerjisi sonuçları birbiriyle uyumluydu. A, B ve C tuzak merkezlerinin yakalama tesir kesiti $S_{tA}=3.3 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$, $S_{tB}=1.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ ve $S_{tC}=1.1 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ olarak; tuzak yoğunlukları da $N_{tA}=1.9 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, $N_{tB}=2.9 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ve $N_{tC}=2.9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı.

Hol tuzak merkezi için alınan IUA ölçümlerinden maksimum sıcaklığı $T_m=50.9$ K sıcaklığa yerleşmiş IUA piki elde edildi. Eğri fit etme ve başlangıçtaki artış yöntemleri kullanılarak aktivasyon enerjisi 12 meV olarak hesaplandı. Bu tuzak merkezinin yakalama tesir kesiti $S_t=8.9 \times 10^{-26} \text{ cm}^2$, tuzak yoğunluğu da $N_t=2.0 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$ olarak bulundu. Elektron ve hol tuzakları için hesaplanan yakalama tesir kesiti değerlerinin çok küçük olduğu görülmektedir. Bu sonuç, yavaş yeniden tuzaklanma prosesini doğrular niteliktedir.

TlGaSeS kristallerine azot ekerek IUA ölçümleri alındı. IUA ölçümlerinden kristalde maksimum sıcaklığı $T_m=20$ K'e yerleşmiş elektron tuzağı ve maksimum sıcaklığı $T_m=234$

K'e yerleşmiş hol tuzak merkezleri olduğu bulundu. Elektron tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjisi eğri fit etme, başlangıçtaki yükseliş ve pik şekli yöntemleri kullanılarak aktivasyon enerjileri 6 meV, 7 meV ve 9 meV olarak hesaplandı. Hol tuzak merkezlerinin aktivasyon enerjileri de yine aynı yöntemleri kullanarak 0.80 eV, 0.80 eV ve 0.83 eV olarak bulundu. Elektron tuzak merkezlerinin yakalama tesir kesiti $S_t=3.0 \times 10^{-24} \text{ cm}^2$ tuzak yoğunluğu $N_t=5.6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$; hol tuzak merkezlerinin yakalama tesir kesiti $S_t=2.3 \times 10^{-15} \text{ cm}^2$, tuzak yoğunluğu da $N_t=2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ olarak hesaplandı. Buradan her iki tuzak merkezi içinde yakalama tesir kesitinin küçük değerleri tuzak merkezlerinin monomoleküler kinetiğe sabip olduğu sonucunu teyit etmektedir.

KAYNAKLAR

1. Usujima, A., Takeuchi, S., Endo, S., Irie, T., “Optical and Electrical Properties of CuIn_5S_8 and AgIn_5S_8 Single Crystals”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 20 (7), L505, 1981.
2. Qasrawi, A.F., Kayed, T.S., Ercan, I., “Fabrication and some physical properties of AgIn_5S_8 thin films”, *Mater. Sci. Eng B – Adv.*, 113 (1), 73, 2004.
3. Gasanly, N.M., Magomedov, A.Z., Melnik, N.N., Salamov, B.G., “Raman and Infrared Studies of AgIn_5S_8 and CuIn_5S_8 Single Crystals”, 177, K31, 1993.
4. Sinha, M.M., Ashdhir, P., Gupta, H.C., Tripathi, B.B., February 1 *Phys. Status Solidi.(b)*, 187(2), s. K33-K36, 1995.
5. Delgado, G.E., Mora, A.J., “Structural characterization of the semiconductor chalcogenide system Ag-In-VI (VI = S, Se, Te) by X-ray powder diffraction”, *Chalcogenide Lett.*, 6 (12), 635, 2009.
6. Orlova, N.S., Bodnar, I.V., Kudritskaya, E.A., “Crystal Growth and Properties of the CuIn_5S_8 and AgIn_5S_8 Compounds”, *Cryst. Res. Technol.*, 33 (1), 37, 1998.
7. Qasrawi, A.F., Gasanly, N.M., Crystal Data, “Electrical Resistivity, and Hall Mobility of n-Type AgIn_5S_8 Single Crystals”, *Cryst. Res. Technol.*, 36 (4), 457, 2001.
8. Lee, S.J., Kim, J.E., Park, H.Y., “Optical Absorption of Co^{2+} in AgIn_5S_8 and CuIn_5S_8 Spinel Crystals”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42 (1), 3337, 2003.
9. Lin, L.H., Wu, C.C., Lee, T.C., “Growth of Crystalline AgIn_5S_8 Thin Films on Glass Substrates from Aqueous Solutions”, *Cryst. Growth Des.*, 7 (12), 2725, 2007.
10. Yao, P., Wei, D., Zhao, X., Kang, S.Z., Li, X., Mu, J., “Facile Preparation of AgIn_5S_8 Pompon-like Microspheres with High Visible Light Photocatalytic Activity”, *Adv. Mater. Res.*, 239, 3302, , 2011.
11. Damaskin, I.A., Pyshkin, S.I., Radautsan, S.I., Tezlevan, V.E., “Photoconductivity of TlGaSe_2 layered single crystals”, *J. Exp. Theor. Phys. Lett.*, 18, 142, 1973.

12. Gasanly, N.M., Serpenguzel, A., Aydinli, A., Gurlu, O., Yilmaz, I., “Donor-acceptor pair recombination in AgIn_5S_8 single crystals”, *J. Appl. Phys.*, 85 (6), 3198, 1999.
13. Cheng, K.W., Wang, S.C., “Influence of chelating agents on the growth and photoelectrochemical responses of chemical bath-synthesized AgIn_5S_8 film electrodes”, *Sol. Energy Mater Sol.*, 93 (3), 307, 2009.
14. Bodnar, I.V., Kudritskaya, E.A., Polushina, I.K., Rud, V.Yu., Rud, Yu.V., “Physical properties of $\text{Cu}_x \text{Ag}_{1-x} \text{In}_5 \text{S}_8$ single crystals and related surface-barrier structures”, *Semiconductors.*, 32 (9), 933, 1998.
15. Bodnar, I.V., Gremenok, V.F., Rud, V.Yu., Rud, Yu.V., “Production and investigation of $\text{AgIn}_5\text{S}_8 / (\text{InSe}, \text{GaSe})$ heterojunctions”, *Semiconductors.*, 33 (7), 740, 1999.
16. Lai, C.H., Chiang, C.Y., Lin, P.C., Yang, K.Y., Hua, C.C., Lee, T.C., “Surface-Engineered Growth of AgIn_5S_8 Crystals”, *ACS Appl. Mater. Interfaces.*, 5 (9), 3530, 2013.
17. Ozdemir, S., Bucurgat, M., Firat, T., “Characteristics of traps in AgIn_5S_8 single crystals”, *Journal of Alloys and Compounds.*, 611, 7-10, 2014.
18. Muller, D., Hahn, H., Anorg, Z., “Electrical and optical properties of as-grown TlInS_2 , TlGaSe_2 and TlGaS_2 single crystals”, *Allg. Chem.*, 438, 258, 1978.
19. Yee, K.A., Albright, A., “Bonding and structure of gallium thallium selenide GaTlSe_2 ”, *J. Am. Chem. Soc.*, 113, 6474, 1991.
20. Guler, I., Gasanly, N.M., “Optical Properties of TlGaSeS Layered Single Crystals”, *J. Korean Phys. Soc.*, 51 (6), 2031, 2007.
21. Hantias, M., Anagnostopoulos, A., Kambas, K., “Electrical and optical properties of as-grown TlInS_2 , TlGaSe_2 and TlGaS_2 single crystals”, *J. Spyridelis, Mater. Res. Bull.*, 27 (1), 25, 1992.
22. Ashraf, I.M., Abdel-Rahman, M.M., Badr, A.M., “Photoconductivity of TlGaSe_2 layered single crystals”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 36 (2), 109, 2003.

23. Kato, A., Nishigaki, M., Mamedov, N., Yamazaki, M., Abdullaeva, S., Kerimova, E., Uchiki, H., Lida, S., “Optical properties and photo-induced memory effect related with structural phase transition in TlGaS₂”, *J. Phys. Chem. Solids.*, 64, 1713, 2003.
24. ElNahass, M.M., Sallam, M.M., Rahman, S.A., Ibrahim, E.M., “Optical, electrical conduction and dielectric properties of TlGaSe₂ layered single crystal”, *Solid State Sci.*, 8 (5), 488, 2006.
25. Grivickas, V., Bikbajevs, V., Grivickas, P., April, *Phys. Status Solidi (b)*, 243 (5), s. R31-R33, 2006.
26. Allahverdiev, K.R., “Two-photon absorption in layered TlGaSe₂, TlInS₂, TlGaS₂ and GaSe crystals”, *Solid State Commun.*, 111 (5), 253, 1999.
27. Yee, K.A., Albright, A., “Bonding and structure of gallium thallium selenide GaTlSe₂”, *J. Am. Chem. Soc.*, 113, 6474, 1991.
28. Kalkan, N., Kalomiros, J.A., Haniyas, M., Anagnostopoulos, A.N., “Optical and photoelectrical properties of the TlGaS₂ ternary compound”, *Solid State Commun.*, 99 (6), 375, 1996.
29. Kalomiros, J.A., Kalkan, N., Haniyas, M., Anagnostopoulos, A.N., Kambas, K., “Optical and photoelectric properties of TlGaSe₂ layered crystals”, *Solid State Commun.*, 96 (8), 601, 1995.
30. Henkel, W., Hochheimer, H.D., Carlone, C., Werner, A., Ves, S., Von Schnering, H.G., “High-pressure Raman study of the ternary chalcogenides TlGaS₂, TlGaSe₂, TlInS₂, and TlInSe₂”, *Phys.Rev.*, B26, 3211, 1982.
31. Abdullaev, G.B., Allahverdiev, K.R., Nani, R.Kh., Salaev, E.Yu., Sardarly, R.M., April, 16, *Phys. Status Solidi(a)*, 34(2), s., K115-K117, 1976.
32. Gasanly, N.M., Akinoglu, B.G., Ellialtioglu, S., Laiho, R., Bakhyshov, A.E., “Elastic coefficients in TlGa(S_{1-x}Se_x)₂ and TlIn_xGa_{1-x}S₂ layer mixed crystal by Brillouin scattering”, *Physica B.*, 192 (4), 371, 1993.

33. Yoon, C.S., Kim, B.H., Cha, D.J., Kim, W.T., “Electrical and Optical Properties of TlGaSe₂ and TlGaSe₂:Co Single Crystals”, *Jpn.J.Appl.Phys.*, 32 (3), 555, 1993.
34. Yoon, C.S., Chung, S.J., Nam, S.J., Kim, W.T., *Cryst.Res.Technol.*, 31(1), 229, 1996.
35. Qasrawi, A.F., Gasanly, N.M., “Hall effect, space-charge limited current and photoconductivity measurements on TlGaSe₂ layered crystals”, *Semicond. Sci. Technol.*, 19 (3), 505, 2004.
36. Rud, Y., Rud, V., Lida, S., Yamazaki-Morohashi, M., Uchiki, H., Mamedov, N., “Photovoltaic Effect in TlInS₂-, TlGaSe₂- and TlGaS₂-based Barrier Structures”, *Inst. Phys.Conf.Ser.*, 152, 967, 1998.
37. Gasanly, N.M., “Coexistence of indirect and direct optical transitions, refractive indices, and oscillator parameters in TlGaS₂, TlGaSe₂, and TlInS₂ Layered Single Crystals”, *J.KoreanPhys.Soc.*, 57 (1), 164, 2010.
38. Qasrawi, A.F., Gasanly, N.M., “Optoelectronic and electrical properties of TlGaS₂ single crystal”, 202 (13), 2501-2507, 2005.
39. Chen, R., McKeever, S.W.S., “Thermally Stimulated Electron Emission”, *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*, WorldScientific., Singapore, s.11-13, 23 1997.
40. Kitis, G., Chen, R., Pagonis, V., May, *Phys. Status Solidi(a)*, 205 (5),s. 1181-1189, 2008
41. Skorikov, V.M., Chmyrev, V.I., Zuev, V.V., Larina, E.V., “Thermally Stimulated Currents in Semiconductors: Analysis of Rate Equations for a Single-Level Model and Thermally Stimulated Currents in Si<P,Au>”, *Inorg. Mater.*, 38 (8), 751, 2002.
42. Fang, Z.Q., Claflin, B., Look, D.C., “Effects of Annealing in N(2) Ambient on Traps and Persistent Conduction in Hydrothermally Grown ZnO”, *J. Appl. Phys.*, 103, 073714, 2008.
43. Wrobel, J.M., Guban´ski, A., Płaczek-Popko, E., Rezmer, J., Becla, P., “Thermally stimulated current in high resistivity Cd_{0.85} Mn_{0.15} Te doped with indium”, *J. Appl. Phys.*, 103 (6), 063720, 2008.

44. Schafferhans, J., Baumann, A., Deibel, C., Dyakonov, V., “Trap distribution and the impact of oxygen-induced traps on the charge transport in poly(3-hexylthiophene)”, *Appl. Phys. Lett.*, 93 (9), 093303, 2008.
45. Schmechel, R., Von Seggern, H., May 3, *Phys. Status Solidi(a)*, 201 (6), s. 1215-1235, 2004.
46. Neaman, A. D., Yarıiletken Fiziği (Çeviri: Sağlam M., Ateş A.), *Aktif yayınevi*, İstanbul, pp.11, 180-181, 224-228, 2012.
47. Dikici, M., Katıhal Fiziği, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, pp. 82, 307, 2013.
48. Yıldırım, T., “Yarıyalıtkan ve N-tipi GaAs Kristallerinin Yakın Bant Kenarı Bölgesinde Optik Soğurma Olaylarının İncelenmesi”, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Erzurum, 1999.
49. Yıldırım, T., Gür, E., Tüzemen, S., Bilgin, V., Köse, S., Atay, F., Akyüz, İ., “Wide-bandgap modification of polycrystalline ZnO using Sn Component on the basis of developing quantum-well hetero-structure” , *Physica E*, 27, 290-295, 2005.
50. İnternet: “İletken, Yarıiletken, Yalıtkan: Bant Yapıları”
http://www.acikders.org.tr/pluginfile.php/1073/mod_resource/content/1/Bolum-12.pdf
51. Aydoğan, Ş., Katıhal Fiziği, *Nobel yayın dağıtım*, Ankara, pp. 124-126, 246-250, 2011.
52. Chen, R., Kirsh, Y., “Thermally Stimulated Polarization Currents”, Analysis of Thermally Stimulated Processes 1st ed., *Pergamon Press, Oxford*, New-York, s.366, 1981.
53. Bube, R., “Amorphous semiconductors”, Photoelectronic Properties of Semiconductors 1st ed., *Cambridge University Press*, Cambridge, s.216-232, 1992.
54. Randall, J.T., Wilkins, M.H.F., “The phosphorescence of various solids”, Proc. Roy. Soc. 1st ed., *Oxford University Press*, London, A184, s. 366-390, 1945.

55. Haering, R.R., Adams, E.N., “Theory and Application of Thermally Stimulated Currents in Photoconductors”*Phys. Rev.*,117, 451, 1960.
56. Nicholas, K.H., Woods, J., “The evaluation of electron trapping parameters from conductivity glow curves in cadmium sulphide”,*Brit. J. Appl. Phys.*,15 (7), 783, 1964.
57. McKeever, S.W.S., “Energy bands and localized levels:crystalline materials”, Thermoluminescence of solids 1st ed., *Cambridge University Press*, Cambridge,s.20-21, 1985.
58. Markey, B.G., McKeever,S.W.S., “Deep level characterization of seeded physical vapor transport grown ZnSe”,*Physica Status Solidi.*,138 (1),225-240, 1993
59. Yuksek, N.S., Gasanly,N.M.,Ozkan, H., “Thermally stimulated current analysis of shallow levels in TlGaS₂layered single crystals”, *Semicond. Sci. Technol.*,18 (9), 834, 2003.
60. Cowell, T.A.T., Woods, J., *Brit.* “The evaluation of thermally stimulated current curves”, *J. Appl. Phys.*,18 (8), 1047, 1967.
61. Serpi, A., “Trap distribution in ZnIn₂S₄from photoconductivity analysis”, *J. Phys. D: Appl. Phys.*,9 (13), 1881, 1976.
62. İnternet: “Ion Implation Method”
http://www.vanderbilt.edu/exploration/print/pdfs/news/news_shutter2.pdf
63. Micocci, C., Rizzo, A., Tepore, A., “Trapping center parameters in indium selenide single crystals by thermally stimulated current measurements”, *J. Appl. Phys.*54, 1924,1983.
64. Yıldırım, T., Gasanly, N.M., “Shallow trapping center parameters in as-grown AgIn₅S₈ crystals determined by thermally stimulated current measurements”, *Crys. Res. Technol.*, 44(12), 1267-1271, 2009.

65. Schafferhans, J., Baumann, A., Deibel, C., Dyakonov, V., “Trap distribution and the impact of oxygen-induced traps on the charge transport in poly(3-hexylthiophene)”, *Appl. Phys. Lett.*, 93 (9), 093303, 2008.
66. Manfredotti, C., Murri, R., Quirini, A., Vasanelli, L., “Photoelectronic properties of n-GaSe”, *Phys. Status Solidi A*, 38, 685, 1976.
67. Gasanly, N.M., Ozkan, H., Mogaddam, N.A.P., “Thermally stimulated currents in layered semiconductor $Tl_4In_3GaS_8$ ”, *Semicond. Sci. Technol.* 21, 1250, 2006.
68. Bube, R., “Photoelectronic properties of semiconductors”, *Cambridge University Press*, Cambridge, s. 21, 1992.
69. Yıldırım, T., Sülünhat, B., Gasanly, N.M., “Low temperature thermally stimulated current measurements in N-implanted TlGaSeS layered single crystals”, *Materials Science in Semiconductor Processing*, 34, 121-125, 2015.
70. Yıldırım, T., Gasanly, N.M., “Thermally stimulated current observation of trapping centers and their distribution in as-grown TlGaSeS layered single crystals”, *Materials Chemistry and Physics*, 118, 32-36, 2009.
71. Yıldırım, T., Gasanly, N.M., “Thermally stimulated current measurements in as-grown TlGaSeS layered single crystals”, *Current Applied Physics*, 9, 1278-1282, 2009.
72. Işık, M., “Thermally stimulated current study of traps distribution in beta – $TlInS_2$ layered crystals” *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University* s.17-30, Ankara, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

Bekir SÜLÜNHAT 1980 yılında Kayseri’de doğdu. İlk ve orta öğrenimini Kayseri’de tamamladı. 1998’de kazandığı Erciyes Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden 2002 yılında mezun oldu. 2010 yılında Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Ana Bilim Dalında Yüksek Lisansa başladı ve şu an devam etmektedir. Evli olup 2 çocuk babasıdır. Sivas Sultan Murat Anadolu Lisesinde Fizik Öğretmenliği yapmaktadır.

Bildiği Yabancı Dil: İngilizce (Yds Puanı:70)

Bilimsel Çalışmalar:

- 1) Yıldırım, T., Sülünhat, B., Gasanly, N.M., “Low temperature thermally stimulated current measurements in N-implanted TlGaSeS layered single crystals” *Materials Science in Semiconductor Processing.*, 34, 121-125, 2015.
- 2) Yıldırım, T., Sülünhat, B., “Thermally stimulated current measurements in N implanted TlGaSeS layered single crystals, BP 9, 24-27 August 2015, kabul edildi”

Adres: Ali baba mah. Çayboyu cad. 58050 Merkez / Sivas

Telefon: 0 346 211 11 11

e-posta : bsulunhat38@gmail.com