

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LANTANYUM DOPLU TlInS₂ TABANLI YARIİLETKENDE
POLARİZASYON EFEKTLERİ VE DERİN SEVİYELİ
DEFEKTLERİN PARAMETRELERİ

ELİF ORHAN KARGIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

GEBZE
2018

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

LANTANYUM DOPLU $TlInS_2$ TABANLI
YARIİLETKENDE POLARİZASYON
EFEKTLERİ VE DERİN SEVİYELİ
DEFEKTLERİN PARAMETRELERİ

ELİF ORHAN KARGIN
YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
PROF. DR. MİRHASAN SEYİTSOY

GEBZE
2018

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

**POLARIZATION EFFECTS AND DEEP-
LEVEL PARAMETERS OF THE TlInS_2
BASED SEMICONDUCTOR WITH
LANTANIUM DOPANT**

ELIF ORHAN KARGIN
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE
DEPARTMENT OF PHYSICS

THESIS SUPERVISOR
PROF. DR. MIRHASAN SEYITSOY

GEBZE
2018

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/01/2018 tarih ve 2018/02 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 02/02/2018 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Elif Orhan Kargın'ın tez çalışması Fizik Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mirhasan SEYİTSOY

ÜYE

: Prof. Dr. Savaş BERBER

ÜYE

: Prof. Dr. Kemal ÖZDOĞAN

Prof. Dr. Mirhasan Seyitsoy
Prof. Dr. Savaş Berber
Prof. Dr. Kemal Özdoğan

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

ÖZET

Lantanyum katkılı (yüksek hassasiyet ile-yüksek kaliteli üretilmiş) TlInS_2 ($\text{TlInS}_2\text{:La}$) ferroelektrik yarıiletken kristaller (Foton Yolu ile veya Foto- İndüklenmiş Geçici Akım Spektroskopisi) FİGAS yöntemi ile karakterize edilmiştir. Farklı safsızlık merkezleri belirlenmiş ve tanımlanmıştır. Kristallerin yapısında bulunan iç ve dış kusurların karakteristik parametrelerini belirleyebilmek için deneysel verilerin analizi yapılmıştır. Derin seviyeye yerleşmiş tuzakların yakalama tesir kesitleri ve (iyonlaşma-aktivasyon) enerji değerleri (farklı) ısıtma hızı metodu ile elde edilmiştir. Düşük sıcaklıklarda etkin olan (156K) ve aktivasyon enerjisi ile yakalama tesir kesiti sırası ile 0.29 eV ve $2.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$ olan derin enerji seviyesi tuzağı BTE43'ün lantan katkısından kaynaklandığı ortaya konulmuştur. FİGAS ölçümlerine göre derin seviye tuzak merkezi B5, $\text{TlInS}_2\text{:La}$ kristallerinin sahip olduğu uyumsuz faz bölgelerini içeren sıcaklık aralıklarında yapısal bozulmaya (düzensizleşmeye-düzen bozulmasına) bağlı çok büyük bir statik dielektrik sabite sahip olarak etkin hale gelmektedir. B5 için yapılan FİGAS simülasyonundan (modellemesinden) katkısız kristale özgü olan derin seviye tuzağının aktivasyon enerjisi 0.3 eV ve yakalama tesir kesiti ise $1.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Isıl Uyarılmış Akım, Piro-Akım, Katmanlı Yarıiletken, X-ışını Kırınımı, Enerji Dağılımlı X-ışını Spektrumu.

SUMMARY

TlInS₂ (TlInS₂: La) ferroelectric semiconducting crystals (PICTS-Photo-Induced Current Transient Spectroscopy) with lanthanum doping (high precision produced) are characterized by the TSDC method. Different impurity centers have been identified and defined. Experimental data were analyzed to determine the characteristic parameters of internal and external defects in the structure of the crystals. The trapping cross-sections and (ionization-activation) energy values of the traps settled at the deep level were obtained by the various heating rate method. It has been demonstrated that the deep energy level trap BTE43, which is active at low temperatures (156 K), is 0.29 eV and $2.2 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$, respectively, with activation energy and capture cross section order. According to the PICTS measurements, deep-level trap center B5 becomes active with a very large static dielectric constant due to the structural deterioration (disorder) in the temperature ranges including incommensurate phase regions of TlInS₂: La crystals. The activation energy of the deep level trap, which is specific for the pure crystal, from the PICTS simulation (modeled) for B5 was determined as 0.3 eV and the capture effect cross section was $1.8 \cdot 10^{-16} \text{ cm}^2$.

Key Words: Thermally Stimulated Current, Pirocurrent, Layered Semiconductors, X-ray Diffraction.

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren danışmanım Prof. Dr. Mirhasan SEYİTSOY'a gönülden teşekkür ederim.

Bütün çalışmam boyunca yanımda olan, bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan değerli arkadaşım Arş. Gör. Serdar GÖREN'e teşekkürü bir borç bilirim.

Elbette ki bana verdikleri destek ve gösterdikleri sabırdan dolayı aileme de yürekten teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımları dokunan ve isimlerini sayamadığım herkese de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. Teorik Yaklaşım	8
2.1. Yarıiletkenler	8
2.2. Band Yapısı	8
2.3. Yarıiletkende Kusurlar	9
2.3.1. Kristal Kusurlarının Sınıflandırılması	11
2.3.1.1. Düzlemsel Kusurlar	11
2.3.1.2. Çizgisel Kusurlar	12
2.3.1.3. Noktasal Kusurlar	12
2.4. Kusurların Etkileri	13
2.5. PICTS-Photo Induced Current Transients Spectroscopy	16
2.5.1. PICTS Yöntemi	16
2.6. Piroakım	28
2.7. TSDC Analizi	29
2.7.1. TSD Akımı	30
2.8. DLTS	31
3. DENEYSEL DETAYLAR	36
3.1. Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri	36
3.2. Deneysel Düzenek	36
4. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR	39
4.1. Tuzakların Karakterizasyonu	39

4.1.1. La Katkılı TlInS ₂ Kristalinde Alan-İndüklemeli Isıl Uyarılmış Depolarizasyon Etkileri	40
4.1.2. La katkılı TlInS ₂ kristalinin karanlık akım ölçümleri	58
4.2. Deneysel Sonuçların Analizi	60
5. SONUÇ	61
KAYNAKLAR	61
ÖZGEÇMİŞ	65

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve Açıklamalar

Kısaltmalar

∇	: Del operatörü
v_e	: Elektronun termal hızı
$\mathbf{E}$	: Elektrik alan vektörü
ε	: Dielektrik sabiti
Δn_c	: Serbest taşıyıcı yoğunluğunun değişimi
σ	: İletkenlik (IUA)
Δ	: Değişim
β	: Sabit ısıtma hızı
ν	: Tuzaktan kaçabilme ihtimal frekansı
μ	: Mobilite
τ	: Yaşam ömrü
Hz	: Hertz
eV	: Elektronvolt
F	: Kuvvet
T_m	: Pikin şiddetinin maksimum olduğu sıcaklık
N	: Tuzaklanmış elektronların yoğunluğu
n_t	: Toplam elektronların sayısı
n_c	: İletkenlik bandındaki serbest elektron yoğunluğu
T_l	: Pikin şiddetinin yarı yüksekliğine karşılık gelen düşük sıcaklık
n_0	: Tuzaklanmış elektronların ilk yoğunluğu
m_e^*	: Elektronun etkin kütlesi
T_h	: Pikin şiddetinin yarı yüksekliğine karşılık gelen yüksek sıcaklık
T_0	: IUA ölçümlerinde ışıkla uyarmanın yapıldığı düşük sıcaklık değeri
N_r	: Rekombinasyon merkezlerinin etkin yoğunluğu
N_C	: İletkenlik bandındaki taşıyıcıların etkin durum yoğunluğu
S_t	: Tuzağın etkin yakalama tesir kesiti

S_r	: Rekombinasyon merkezlerinin etkin tesir kesit alanı
Dk	: Dakika
G	: Soğurulan bir foton için uyarılabilen taşıyıcı sayısı
P	: Tuzaktan kaçma olasılığı
Q	: IUA ölçümlerinde ortaya çıkan toplam taşıyıcı yük değeri
L	: Numunenin kalınlığı
A	: Numunenin yüzey alanı (kristal katmanlarına dik yöndeki)
Sm	: Santimetre
M	: Metre
Mm	: Milimetre
H	: Manyetik alan vektörü
Sn	: Saniye
B	: Bor elementinin simgesi
E_i	: İletim bandı minimum enerji seviyesi
E_F	: Fermi enerji seviyesi
E_t	: Tuzağın aktivasyon enerjisi
E_v	: Valans bandının maksimum enerji seviyesi
K	: Boltzmann sabiti
N	: Tuzak yoğunluğu
T	: Sıcaklık
La	: Lantanyum elementinin simgesi
V	: Elektriksel potansiyel fark
EDX	: Enerji dağınımlı X-ışını spektroskopisi
FİGAS	: Foto-indüklenmiş geçici akım spektroskopisi
IUA	: Isıl Uyarılmış Akım
IUDA	: Isıl uyarılmış depolarizasyon akımı
KA	: Karanlık akım

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: T1InS ₂ kristalinin yapısı.	2
1.2: Bridgman-Stockbarger Tekniği.	3
1.3: T1InS ₂ kristalinin faz geçişleri diyagramı.	4
1.4: T1InS ₂ kristalinin katlara paralel 1 kHz frekansındaki sıcaklık grafiği.	6
2.1: p ve n tipi malzemelerdeki elektron ve hol tuzakları içi yakalama ve yayınlama süreçleri.	15
2.2: Isıl uyarılmış süreçlerde gerçekleşebilecek mümkün geçişler.	18
2.3: Geri dönüş olmadığı durumdaki geçişler.	19
2.3: Işık atımının zamana bağlı gösterimi	20
2.4: Işık atımı sonrası kaydedilen zamana bağlı akımın değişimi.	20
2.5: Foto akım sinyali örnekleme.	22
2.6: PICTS dalgaları analizi.	25
2.7: Arrhenius alanlarının 4 pik gösterimi	25
2.8: PICTS ölçüm sistemi kurulumu.	26
2.9: İdealize edilmiş 4 kapı PICTS sinyali analizi prensibini gösteren grafik.	28
2.10: TSDC analizi ölçüm sistemi.	30
2.11: Çoğunluk ve azınlık taşıyıcı tuzakları darbeleri geçici kapasite katılan zaman bağımlılıklar. Alt yarım enjeksiyon darbe dizisi. Üst yarım çoğunluk taşıyıcı darbe dizisi.	32
2.12: Bir çift-kanal kutu entegratörü kullanılarak hızlı algılama ilkesi.	34
2.13: Tipik spektrum ve Arrgenius	35
3.1: Isıl uyarılmış akım ölçümü süreçlerinin şematik gösterimi.	36
3.2: Ölçümlerin gerçekleştirildiği kapalı sistem bir helyum kompresör ile soğutulan kroyostat.	37
3.3: Yüksek voltaj uygulayabilen güç kaynağı.	37
3.4: Sıcaklık kontrolü için kullanılan Lakeshore 340 sıcaklık kontrol cihazı.	38
3.5: Ölçümlerde kullanılan Ilmvac vakum pompası.	38
3.6: Akım ölçümleri için kullanılan Keithley 6485 pikoampermetre	39

	La katkılı TIInS_2 kristalinin termal emisyon oranına karşılık gelen PICTS spektrası: (1) 2200 s^{-1} ; (2) 1350 s^{-1} ; (3) 770 s^{-1} ; (4) 408 s^{-1} ; (5) 213 s^{-1} ; (6) 108 s^{-1} ; ve (7) 54 s^{-1} . Spektra y eksenı boyunca kaymıştır ve elde edilen en yüksek değerli pike göre normalize edilmiştir.	
4.1:	La katkılı TIInS_2 kristalinde bulunan derin seviye tuzaklarındaki yük taşıyıcı emisyon oranının sıcaklığın bir fonksiyonu (T^2 düzeltmesini hesaba katılmıştır) olarak grafiği. Düz çizgiler deneysel verinin fitlenmesi ile oluşturulmuştur.	40
4.2:	La katkılı TIInS_2 kristalinin farklı şartlar altında kutuplandırılmasından sonra kaydedilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrileri. Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 300 V/cm 'lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 15 K/dk 'lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.	42
4.3:	Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 300 V/cm 'lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 20 K/dk 'lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.	44
4.4:	Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 5 kV/cm 'lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 20 K/dk 'lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.	45
4.5:	lm şekil 4.3.3'dekine benzer şekilde yapılmıştır fakat bu 77 K 'de elektrotlar kısa devre olarak bağlanmıştır.	46
4.6:	Kristalin, 77 K 'de 5 kV/cm 'lik alan altında kutuplandırıldıktan sonra sıcaklığa bağlı kaydedilen TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk 'dır.	47
4.7:	Soğutulurken sadece 300 K - 210 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm 'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk 'dır.	48
4.8:	Soğutulurken sadece 300 - 180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm 'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk 'dır.	49
4.9:	Soğutulurken sadece 290 - 180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm 'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk 'dır.	50

4.10:	Soğutulurken sadece 260-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	51
4.11:	Soğutulurken sadece 240-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	51
4.12:	Soğutulurken sadece 220-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır	52
4.13:	Soğutulurken sadece 220-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	53
4.14:	Soğutulurken sadece 190-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	53
4.15:	Soğutulurken sadece 170-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	54
4.16:	Soğutulurken sadece 140-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	55
4.17:	Soğutulurken sadece 120-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.	56
4.18:	La katkılı TiInS_2 kristalinin sıcaklığa bağlı karanlık akımı Arrhenius grafiğinde gösterilmiştir. Ölçüm katmanlara paralel yönde ve 10 V gerilim altında gerçekleştirilmiştir. Isıtma hızı 2 K/dk'dır.	57
4.19:	La katkılı TiInS_2 kristalinin sıcaklığa bağlı karanlık akımı Arrhenius grafiğinde gösterilmiştir. Ölçüm katmanlara paralel yönde ve 10 V gerilim altında gerçekleştirilmiştir. Isıtma hızı 2 K/dk'dır.	58

TABLÖLAR DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
1.1: La katkılı TlInS ₂ kristalinin sıcaklık, enerji değerlerini gösteren tuzak parametreleri.	6
2.1: La katkılı TlInS ₂ kristalinin emisyon oranı sonuçları.	24
5.1: La katkılı TlInS ₂ tuzak parametreleri.	44

1. GİRİŞ

TMX_2 kimyasal formülü ile ifade edilen kristal ailesi ($M = \text{In}$ veya Ga , $X = \text{S}$, Se , Te) talyum dikalkogenitler olarak bilinir ve sergiledikleri ilginç yapısal özellikleri, yüksek derecede anizotropi özellik göstermeleri, iletkenlikleri, fotoiletkenlik özellikleri ve optoelektronik cihazlarda kullanılabilme potansiyeli sayesinde araştırmacıların ilgisini çekmektedirler [1]. Bu kristal ailesinin üyeleri bir kısmı katmanlı (TlGaS_2 , TlGaSe_2 , TlInS_2) ve bir kısmı ise zincirli yapıya sahiptirler.

Oda sıcaklığında tabakalı TlInS_2 kristalleri monoklinik yapıya sahip ve uzay grupları C_{2h}^6 ferroelektriktirler [2, 3]. TlInS_2 kristal yapısı (001) yüzeyine paralel iki boyutlu tabakalar halinde oluşmuştur. Her birbirini takip eden tabaka bir önceki ile 90° açı yapacak şekilde yerleşmiştir. Yapısal [4-6], elektriksel [7-12] ve optik [7, 9, 13, 14] özelliklerine yönelik çalışmalara ek olarak uyumlu-uyumsuz faz geçişi ve hafıza etkisine yönelik incelemelerde referanslarda belirtilmiştir.

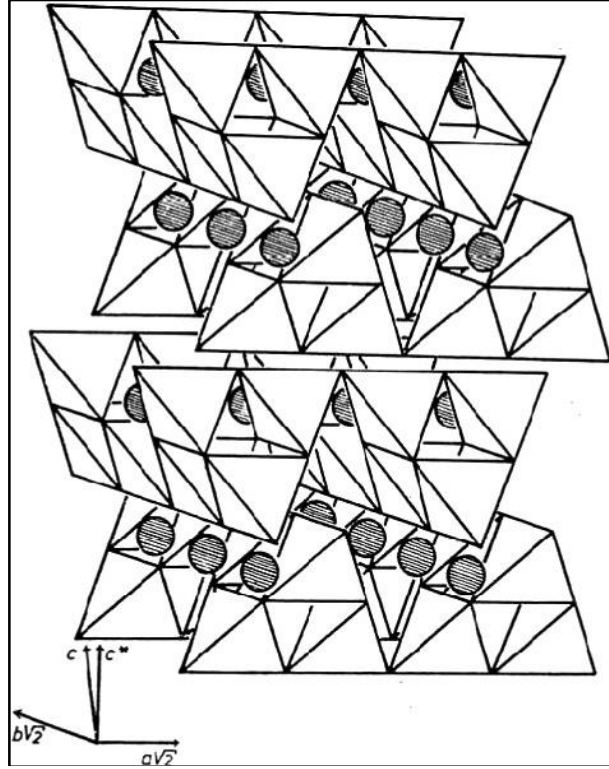
TlInS_2 kristalinin optik özellikleri üzerine yapılan çalışmalarda [7, 15, 16] TlInS_2 kristallerinin 300 K’de biri direk ve diğeri de indirek olmak üzere iki enerji aralığına sahip olduğu ortaya çıkarılmış ve bu enerji aralıklarının büyüklükleri sırası ile 2.23 ve 2.28 eV olarak belirlenmiştir.

Isıl uyarılmış akım (IUA) tekniği yüksek performanslı cihazların üretilmesinde faydalı olan kristallerdeki katkı ve kusur merkezleri hakkında bilgi edinmek için geniş çaplı olarak kullanılmıştır [17-21]. Ayrıca piro-akım ölçümleri ile de faz geçiş sıcaklık aralıklarına yönelik bilgi elde etmek için kullanılmıştır. Yapısal faz geçiş sıcaklığı civarında piro-elektrikliğin, dielektrikliğin, optik, akustik, termodinamik ve diğer özelliklerinin sıcaklığa göre değişimi çeşitli çalışmalarda incelenmişlerdir [22-30]. Lantanyum katkılı TlInS_2 kristallerinin FİGAS yani foto-indüklenmiş geçici akım spektroskopisi (PICTS-photo-induced current transient spectroscopy) tekniği ile tuzak merkezlerinin parametreleri elde edilmiştir [31].

TlInS_2 kristali üçlü talyum ailesinden, kalgojen grubundan yarıiletken katmanlı kristaldir. Kimyasal formülü $\text{A}_3\text{B}_3\text{C}_2^6$ şeklinde gösterilir [33]. Bu kristallerin elde edilme yöntemi Bridgman-Stockbarger teknoloji yöntemidir. Kırılgenlik ölçüsünde değerlendirilecek olursak oldukça kırılgenliği olan bir maddedir. Yüzeyleri yansıtıcı özelliği gösterir. Rengi turuncu-yeşil gibidir. Işığı geçirici bir özelliği vardır. Yoğunluğu ölçmek için pirometrik yöntemini kullanabiliriz. Yoğunluğu 5.64

gr/cm^3 olarak verilmektedir. Yarıiletken özellik gösterir. Fotoiletkenlik özelliklerini gösterir [15].

Katmanlı yapıya sahip TIInS_2 kristali şekilde görülür. Şekilde TI atomları katmanlar arası tetrahedrik boşluklarda yer alır. Önceki katın InS_4 tetrahedrik zincirleri, diğer katın zincirlerine diktir. TIInS_2 kristalinde TI ve In atomları 3A, S atomu ise 6A grubudur.



Şekil 1.1: TIInS_2 kristalinin yapısı.

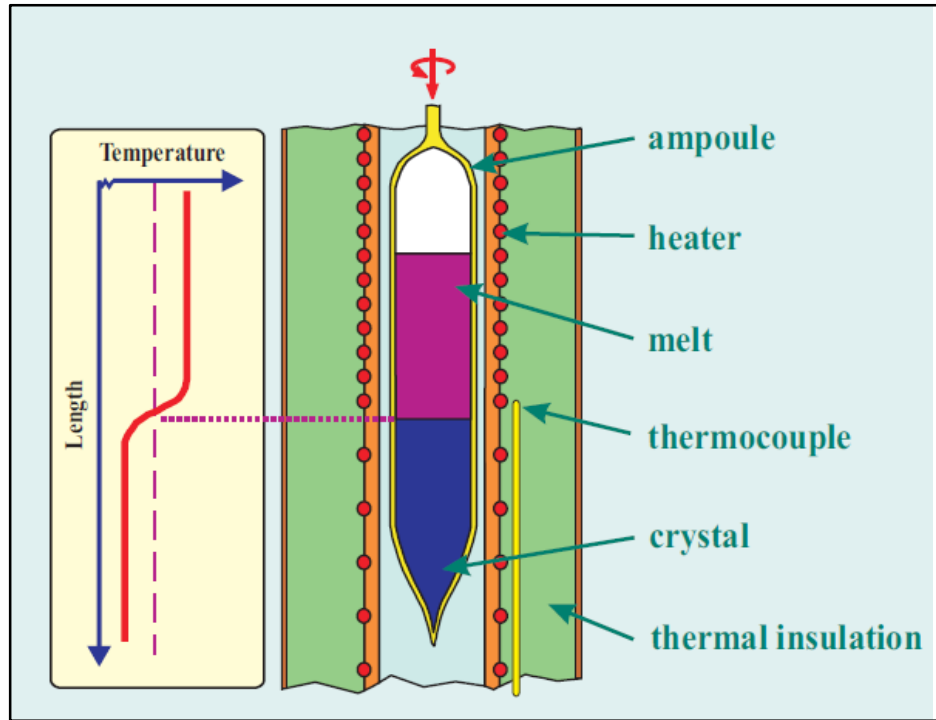
Enerji bant seviyesi $E_g = 2,1 \text{ eV}$ olarak verilmektedir. TIInS_2 katmanlı kristallerin deneysel verilerin toplanması ile fiziko kimyasal özellikleri kristal kimyasal karakterleri, elde etme yöntemleri, katkılama teknikleri ortaya çıkarılmıştır. Bu aile yarıiletken olmasından [15], geniş sıcaklığa bağlı dielektrik sabite sahip olmasından [24], yapısal faz geçişleri geçirmesinden fotoiletkenliği olmasından dolayı ilginçtir.

Bridgman-Stockbarger tekniği ile üretilen kristal, malzemenin özel tüpler içinde malzemenin erime noktasına kadar sıcaklığın çıkartılması, hızlı soğutulma ile kristalin elde edilmesine dayanır. Gerekli elementler kuartz ampul içine yerleştirilir. Bu ampulün şekli; uç kısmı ince, orta kısımdan boğumludur. Kristalleşmesi uç kısmından

başlar. Ampul difüzyon pompası yardımı ile 10^{-5} , 10^{-6} atm basınca kadar havası boşaltılıp vakum haline getirilir. Ampulde önce 950 °C civarı altında ön sentez yapılarak polikristal malzeme şekli oluşması sağlanır. Ön sentezden sonra ampul değişken (gradyent) sıcaklık alanına sahip fırına yerleştirilir. Fırındaki bölmelerin sıcaklık değerleri değişiktir. 1, 2, 3 bölme sırasıyla daha düşük sıcaklıklara sahiptir [33].

Ampul ilk önce yüksek sıcaklığa sahip bölüme yerleştirilir. Böylece maddenin erimesi beklenir. 1 veya 2 gün beklendikten sonra diğer bölmeye alınır. Bu işlem yapılırken özel mekanizma aracılığıyla saatte 1-2 mm hızla hareket ettirilir. Kristalleştirme, ampulün uç noktasından başlar ve kristalizasyon oluşur. Bu işlemlerden sonra bir diğer soğuk bölmeye alınır. Kristal basamaklı olarak tavlınır. Son işlemler ile birlikte süreç 5-6 gün sürer.

Bu şekilde en iyi kristaller elde edilir. Kullanılan maddelerin saflık dereceleri % 99,999999 altında değildir. Bu metot sabit sıcaklık fırında parçalı imersiyon yöntemi ile elde edilir [33].



Şekil 1.2: Bridgman-Stockbarger Tekniği

TlInS₂ kristali için sentez 6-8 saat sürer. Sıcaklık ise 760 °C civarındadır. Bileşimlerin erimesi titreşim ile sağlanırken maddeye homojenlik ve yoğunluk kazandırır. 2-3 saat hafif ıslak durumda bekletildikten sonra oda sıcaklığına alınır.

Oda sıcaklığında TlInS₂ kristalinin hücrelerinin monoklinik yapıda olduğu ortaya konulmuştu. Yüksek sıcaklıklarda TlInS₂ kristalleri yapılarının merkezi simetrisinde yapılan IR ve Raman saçılma deneyleri kristallerin piezoelektrik olmadığını doğrulamıştır [24].

Atomlar arası kuvvetlerin güçlü anizotropisinden dolayı TlInS₂ eş yapılı katmanlı kristallerin uzaysal geometrisi birim hücredeki katmanların sayısı birbirinden farklı polytypes'in büyük sayısı ile ifade edilir [24].

TlInS₂ katmanlı kristallerde faz geçişi yetmişli yıllarda araştırılmış ve birçok deneysel gözlem ve veriler ortaya çıkmıştır. Veriler sonucunda geçiş parametresinin uzaysal homojen olmayan dağılımının oranlı faz ferroelektrik faz olarak birbirini takip etmesi oldukça doğru bir şekilde yorumlanmıştır.

TlInS₂ katmanlı kristallerinde yapılan spektroskopik araştırmalarda örgü modlarının sıcaklık davranışında ortaya çıkan anormallikler gözlemlenmiştir ve faz geçişi olasılıkları belirlenmiştir. İlk yapılan deneysel çalışmalarda faz geçişi doğrulandı ve takip edilen çalışmalarda iki kristal için değerli bilgilere ulaşılmıştır. Kristaller için gözlemlenen temel faz geçiş özelliklerinin karakteristiği farklı deneysel ölçüm yöntemleri ile elde edilir.



Şekil 1.3: TlInS₂ kristalinin faz geçişleri diyagramı.

TlInS₂ kristalinde sadece ferroelektrik faz değil sıcaklık düştükçe ferroelektrik fazdan önce ölçeksiz faz meydana gelmiştir [24]. Böylece TlInS₂ kristalinin faz geçiş diyagramı şekildeki gibi olur.

Faz geçişinin başlangıcı sıcaklığın azalmasıyla nötron kırınımı kullanılarak geliştirildi. Kristalde 216 K, 202K - 195 K ve 170 K aralıklarında faz geçişlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra oransız faz bulunduğu ve oransız ötelemenin dalga vektörü 216 K den düşük sıcaklıklarda meydana gelmiştir.

$\sigma = 0,015$ oransızlık parametresi ölçeksizlik değeri karakterize eder. Ölçeksizlik dalga vektörü katlara paralel yönde $K_c = (0;0;0,25)$ olur. Bu durumun yeniden yapılanması $T_c = 200$ K sıcaklık bölgesinde olur [33].

Bu durumda elemanter hücre parametresi 4 katına çıkarmak demektir. Bu sıcaklık değeri, oransız ve oranlı faz arasındaki faz geçiş noktasıdır. Bu sıcaklıkta oranlı faz ferroelektrik özelliklidir. Uygun olmayan ferroelektrik faz ise ara oransızlık durumundan meydana gelir.

σ değerinin bütün oransız faz bölgesinde sabit kalması $T_c = 200$ K sıcaklığında sıfıra eşit olmalıydı ancak bu durum gerçekleşmedi. 200 K ve 216 K sıcaklıklardaki büyüklükler histerizis içermez. Mesela 170 K sıcaklığında ortalama 30 K sıcaklık histerizisi bulunduğundan, 1 tip faz geçişi olarak isimlendirilmiştir.

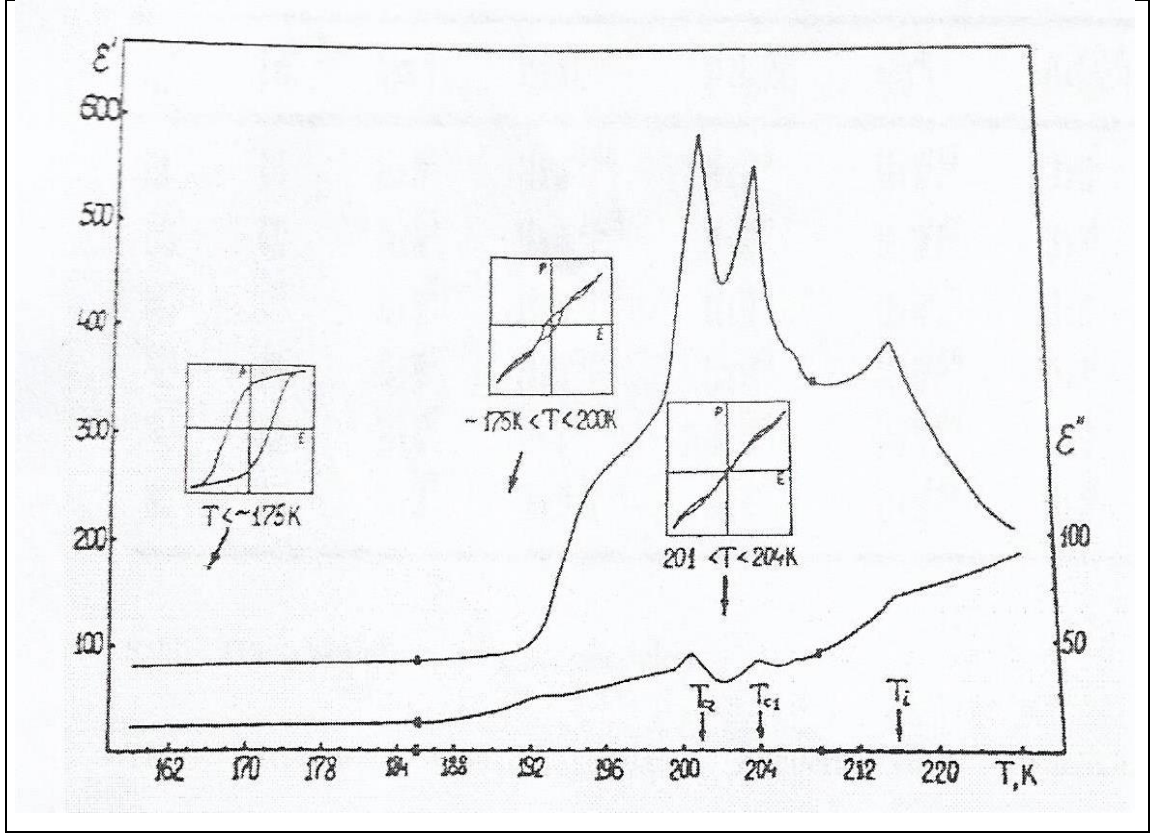
TIInS_2 katmanlı kristallerin en önemli özelliklerinden birisi orta kademe tipli faz geçişi (örnek olarak yerdeğiştirme ve "düzen – düzensiz" tiplerinin arasındaki faz geçişleri) için Curie sabitinin yaklaşık 10^{-3} katsayısıyla bağlantılı olmasıdır ve çokça sayıda, karakterler TIInS_2 için sıcaklık noktaları farklı teknolojik alanlar için seçilmiştir [22].

TIInS_2 kristalindeki faz geçişlerinin fenomolojik teorileri deneyler ile uyumludur. Bu yüzden fiziksel niceliklerin anormalliklerini incelemek için bilimsel literatürdeki temel teorik fikirlere bakılmalıdır.

İlk olarak orta kademedeki oransız faza sahip bağımlı ferroelektrik modelinin kapsamındaki TIInS_2 katmanlı kristallerindeki yapısal faz geçişlerinin sırasının fenomolojik teorisinin gelişmesini gösteren çalışmalarla incelenebilir.

Modülasyon dalga vektörü $k_i = \sigma (a^* + b^*) + 0,25c^*$ olan orta kademe oransız faz ve oranlı ferroelektrik faz, kristalografik c eksenine boyunca birim hücre parametresinin dörtlenmesi ile karakterize edilmektedir.

Şekil 1.3’de gösterilen faz geçişlerinin ardışıklığı daima komplike bir şekilde ortaya çıkarmıştır [25]. 201 K ve 204 K dielektrik sabit piki, 207 K de dielektrik sabitinin bir anomalisi gözlenmiştir. 196 K civarında ise dielektrik sabitinin davranışı gözlenmiştir. 201 ve 204 K arasında antipolar histerizis döngüleri ortaya çıkmıştır. [33].



Şekil 1.4: TIInS₂ kristalinin katlara paralel 1 kHz frekanstaki ϵ ve ϵ' sıcaklık grafiği.

Grafikte 170 K ve 200 K arası kristal ferroelektrik fazdadır. Antipolar düzen gözlenir. 2 polar alt örgü birbiri ile etkileşir ve farklı sıcaklık aralığında bulunurlar. Örgülerin biri ferroelektrik, diğeri antipolar alt örgülerdir [33].

Tablo 1.1: TIInS₂ tuzak parametreleri.

T_m (K)	E(ev)	$N_t(cm^{-3})$	$S(T) (cm^3)$	$S(T=T_m)(cm^2)$	$v(T)(s^{-1})$	$v(T = T_m)(s^{-1})$
93.8	0.11	$6,6 \cdot 10^{16}$	$1,1 \cdot 10^{-18} T^{1.43}$	$1,6 \cdot 10^{-21}$	$5,8 \cdot 10^2 T^{0.57}$	$7,8 \cdot 10^3$
124.8	0.22	$2,0 \cdot 10^{17}$	$1,8 \cdot 10^{-18} T^{-0.15}$	$8,8 \cdot 10^{-19}$	$1,0 \cdot 10^3 T^{1.85}$	$7,6 \cdot 10^6$
142.2	0.25	$3,3 \cdot 10^{17}$	$1,9 \cdot 10^{-18} T^{-0.10}$	$1,1 \cdot 10^{-18}$	$1,0 \cdot 10^3 T^{1.90}$	$1,3 \cdot 10^7$
152.9	0.26	$9,6 \cdot 10^{16}$	$2,0 \cdot 10^{-18} T^{-0.56}$	$1,2 \cdot 10^{-19}$	$1,1 \cdot 10^3 T^{1.44}$	$1,5 \cdot 10^6$
174.5	0.29	$2,3 \cdot 10^{17}$	$1,1 \cdot 10^{-18} T^{-0.15}$	$1,0 \cdot 10^{-19}$	$6,0 \cdot 10^2 T^{1.54}$	$1,7 \cdot 10^6$
194.9	0.30	$4,0 \cdot 10^{17}$	$2,0 \cdot 10^{-18} T^{-1.03}$	$8,7 \cdot 10^{-21}$	$1,1 \cdot 10^3 T^{0.97}$	$1,8 \cdot 10^5$

TIInS₂ kristalinde numunenin 800 K ve 300 K arasında spektrumlar sabit bir ısıtma hızında kaydedilir. Spektrum pikleri, kompleks yapı ile ilgili çeşitli yakalama seviyesi olduğunu ortaya koyar. Sıcaklıklar değiştiğinde ise TIInS₂ tuzakları monomoleküler kinetik olduğunu bize gösterir. Yakalama parametreleri, bir araya gelen altı ayrı konsantrasyon ile enerji derinliği, sıcaklık bağımlılığı, frekans faktörü ve yakalama kesiti olarak ayrı ayrı hesaplanmış olur.

TIInS₂ kristalleri tuzaklar yakalama kesitleri, enerji derinlikleri konsantrasyonları, sıcaklığa bağlı değerleri TSC tekniği ile incelenmiştir. Yakalama kesitinin sıcaklık bağımlılığı 1.43 ve 0.1 aralığındadır. Bu çalışmada $6,6 \cdot 10^{16}$ dan $4,8 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 'e kadar olan konsantrasyonlarda yaklaşık sıcaklıklar 93.8 K, 124.8 K , 142.2 K, 152.9 K, 174.5K, 194.9 K sıcaklık değerlerinde yaklaşık enerjiler 0.11ev, 0.22 ev, 0.25 ev, 0.26 ev, 0,29 ev 0.30 ev değerlerini 6 pikle göstermiş olur. Kristalin farklı katmanlarını düşünürsek yüksek konsantrasyonlarda, tuzaklar alt bölümlere kayar. Tüm bu çalışmalar 80 ile 300 K arasındaki sıcaklık değerlerinde ölçüldü ve her bir enerji değeri, yakalama kesiti, frekansı, konsantrasyonu farklı değerlerde alınmıştır. Ayrıca 200 K altındaki sıcaklıklar ferroelektrik fazlı bölgede olduğu tespit edilmiştir.

Tüm bu sonuçlar altında görünüyor ki kusurlar düşük yakalama kesiti ile birlikte güçlü sıcaklık değerlerinde gözlemlenmektedir.

2. TEORİK YAKLAŞIM

2.1. Yarıiletkenler

Valans bandında 4 elektron olan maddelerdir. Dirençleri ise iletken direncinden yüksek, yalıtkan direncinden düşüktür. İletken ve yalıtkan arasında bulunurlar. Dış etken olmadığı sürece iletkenlik özelliği göstermezler. Böylece dış etki ile iletken özelliği kazandırılırken, dış etki kaldırıldığında ise yalıtkan olurlar. Bu özelliği, yarıiletken maddenin kullanışlılığını artırmıştır.

Yarıiletkenler bileşik ya da elementtir. Aynı zamanda kristal yapıdadır. Atomları belirli bir sıra ile dizilmesinin yanı sıra monokristal ya da polikristal olabilir.

2.2. Band Yapısı

Katılar elektriksel iletim durumuna göre en genel olarak metal ve yalıtkanlar olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Metal uygulanan elektrik alan ile elektrik akımının meydana geldiği bir malzeme iken yalıtkanda uygulanan elektrik alana rağmen bir elektrik akımı meydana gelmez. Bağ yapmamış izole bir atomundaki durumun aksine katılarda elektronlar bir enerji bandında yer alırlar. Tamamen dolu veya boş bir bandda elektrik akımı meydana gelmez. Kristalde meydana gelen elektrik akımı serbest elektronların enerji bandlarındaki hareketinden kaynaklanır. Valans band, bir katının band yapısında mutlak sıfırda elektronlarla dolu en yüksek enerjiye sahip band iletkenlik bandı ise izinli olan en düşük enerjiye sahip band olarak tanımlanabilir. Yarıiletkenlerde mutlak sıfırda valans bandı tamamen dolu iken iletkenlik bandı tamamen boştur.

Bu kavramlar iletken, yarıiletken ve yalıtkanları ayırt etmemizi sağlayan temelleri ortaya koyar. Yalıtkan bir malzemede elektronların durumunu belirten enerji bandları tamamen elektronlarla doldurulmuştur ve bu bandların üzerindeki bandlar ise tamamen boştur. Dolu ve boş bandlar arasındaki enerji aralığı diğer malzemelere göre geniştir. Bu yüzden öyle ki sıcaklık arttırılmasına rağmen dolu olan en sonuncu bandın en üstünden boş olan bandın en altına termal olarak gerekli miktar elektron uyarılamaz.

Eğer valans ve iletim bandı arasındaki ΔE enerji aralığı küçükse kayda değer bir miktar elektron bu aralığı aşarak iletim bandına uyarılabilir. Küçük sayıdaki bu serbest elektronlar iletim bandında elektrik akımının gerçekleşmesini sağlar. Termal olarak

iletkenlik bandına uyarılan elektronların valans bandında bıraktıkları boş elektronik durumlar hol olarak isimlendirilir. Valans bandındaki bu holler sayesinde elektrik akımı valans bandında hol iletimi ile taşınır. Bu tip malzemelere yarıiletken denir. Elektriksel iletkenliği sınırlı miktardaki hol ve elektron yoğunluğundan dolayı metallerden çok daha küçüktür ve güçlü bir şekilde sıcaklığa bağlıdır. Termal uyarılma olasılığı artan sıcaklıkla beraber artar. Aynı zamanda yarıiletkenlerin elektriksel iletkenliği ΔE enerji aralığının bir fonksiyonudur [32].

2.3. Yarıiletkende Kusurlar

Farklı malzemeler için değişen elektrik iletkenliği için basit bir açıklama enerji band grafiği üzerinden verilebilir. Dolu bir bandda uygulanan elektrik alana rağmen her bir pozitif hız vektörüne sahip elektrona karşılık negatif hız vektörüne sahip bir elektron bulunacağı için net bir yük taşınım elde edilemez. Elektrik iletkenliği kusursuz yalıtkanlarda veya yarıiletkenlerde dolu olan valans bandından termal olarak uyarılıp boş olan bir üstteki banda yani iletim bandına geçen elektronlar sayesinde gerçekleşir. Yasak enerji bandı genellikle band aralığı olarak isimlendirilir. Band aralığı birkaç elektron volt veya daha fazla ise oda sıcaklığında iletim bandına uyarılabilmiş elektronların sayısı elektriksel iletkenlik yönünden yok denebilecek kadar azdır. Böyle malzemeler yalıtkan olarak isimlendirilir. Yarıiletkenlerde ise band aralığı elektron volt mertebelerinde veya daha azdır böylece önemli miktarda yük taşıyıcısı termal olarak uyarılabilir. Bu şekilde elde edilen elektriksel iletkenlik değeri yalıtkanlardan daha yüksek fakat metallerden çok daha düşük olur.

Yarıiletken malzemelerin özellikleri, malzemede bulunan kusurların sonucudur. Bu kusurlardaki küçük bir fiziksel değişiklik; kimyasal varyasyonlara, malzemenin elektriksel özelliklerinin değişmesi ile birlikte bu malzemedan yapılmış cihazların performanslarını da etkiler. Yarıiletken kusurlar, bu malzemedan yapılmış detektörlerin algılama özelliğini değiştirir. Bazı durumlarda da noktasal kusurlar, yani enerji bandının ortasına yakın olan noktasal kusurlar, cihazların bozulmasına sebep olur.

Yüksek performanslı detektör geliştirmek, kusursuz bir kristali gerektirir. Malzemelerin ve bu malzemedan yapılan cihazların performansı, malzemede bulunan kusurlara bağlıdır. Bu açıdan bakıldığında kusurların incelenmesi, yüksek performanslı detektörler ve cihazların yapılmasına yardımcı olur.

Kusur içermeyen bir yarıiletkenin modern elektronik devrelerde çok sınırlı bir kullanımı vardır. Yarıiletkende bulunabilecek çok küçük bir miktar safsızlık ona istenilen elektronik özelliğin kazandırılmasını sağlar. Kusurların önemi malzemeye, kusur tipi ve özelliğine bağlıdır. Yoğunluk ve elastik sabiti gibi bazı özellikler kusur yoğunluklarının büyüklüğü ile orantılıdır. Böyle durumlarda eğer kusur yoğunluğu düşük ise etki de az olmaktadır. Malzemenin rengi, elektronik ve optik özellikleri gibi özellikleri göz önüne alınırsa kusur miktarlarındaki küçük bir değişim bile malzemenin bu gibi özelliklerinde çok önemli oranda değişime neden olabilmektedir. Bu açıdan yarıiletken cihazlara istenilen özelliğin kazandırılmasını sağlayan kusurların karakteristiklerinin belirlenmesi, cihazların tasarımı ve yapımında çok önemli bir rol oynamaktadır.

Yarıiletkenlerin elektriksel ve optik özellikleri;

- i) Katkısız kristalin kimyasal bileşenlerinin bilinmesi ile kristalin kendine özgü özellikleri olan band aralığı ve taşıyıcıların etkin kütlelerinin belirlenebilir.
- ii) Örgü kusurları (boşluk ve arayer kusurları ve birlikte bulundukları kusur grupları) malzemenin band aralığında elektron durumlarının ortaya çıkmasına neden olur. Bu tip kusurlar, kristal büyütülürken hangi termal aşamalardan geçtiğine bağlı olarak istemsiz olarak yapıda bulunabileceği gibi iyon implantasyonu gibi kristalin enerjili parçacıklara istemli olarak maruz bırakılması ile de oluşturulabilir.
- iii) Safsızlıklar band aralığında elektron durumlarının oluşması ile gözlenebilir. Bu elektron durumları bandlardan birinin kenarına yakın veya band aralığının merkezine yakın bir durum meydana gelebilir. Bu kusurlar istemli olarak kristalin büyütülmesi sırasında veya büyütüldükten sonra veya istemsiz olarak büyütülmenin herhangi bir aşamasında kirliliklerin yapıya dâhil olmasıyla oluşabilir.
- iv) Malzemenin boyutları yük taşıyıcılarının de Broglie dalga boyuyla orantılı olduğunda yapıdaki elektronların enerji seviyeleri için kuantum boyutu etkileri baskınlaşır.

Safsızlıkların çok küçük miktarı bile yarıiletken malzemelerin özellikleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Çoğu yarıiletkenlerin karakterizasyonunda önemli olan kusur ve safsızlıkların küçük yoğunluklarının belirlenmesi ve neden oldukları elektriksel etkilerinin ölçülmesidir. Prensipde yarıiletken malzemelerin katkılardan kaynaklanan elektronik özelliklerinin yapısal ve kimyasal özelliklerine yönelik

kapsamlı bir değerlendirme ile öngörülebileceği düşünülebilir fakat birçok nedenden bu dolayı mümkün değildir.

2.3.1. Kristal Kusurlarının Sınıflandırılması

Noktasal kusur kristal düzeninin izole bir alanda bozulduğu kusur türüdür. Katkılı ve katkısız olmak üzere iki çeşidi vardır.

2.3.1.1. Düzlemsel Kusurlar

Başka deyişle alan kusurları olarak da bilinen düzlemsel kusurlar iki boyutludur. Mikroskobik ve atomik düzeyde kusurların varlığı her zaman ihtimaldir. Düzlemsel kusurlar 3'e ayrılır.

Tane sınırı kusurları, polikristallerde iki kristal aynı yönde ve bir noktadan büyürler. Birbirlerine aniden birleştirme oluştururlar. Bir bölge diğerine göre atomlarının farklı düzenlemelere sahip olmasından dolayı aralarındaki tane sınırı adlı kusur oluşur [34].

İkiz kusurlar, kristal kafesi ayna görüntüsü boyunca birleşerek ikiz kristal kusurları oluşturur. Şekilde şematik olarak gösterilmiştir. Yani ABABAB mükemmel bir düzenleme ise bitiş kısmına ayna konmuş gibi bir görüntü ile ikiz kusurları ile birlikte yeni düzenleme ABABABBABABA olur.

İstifleme kusurlar, kristalin büyümesi, sırasında kusur oluşur. Ya da eksik olduğunda istifleme faylar görülür. Kusurlara atomik düzeyde bakıldığında bu hatalara neden olan atom, aralık olduğunu fark eder.

Böyle bir aralıkta, birçok atom, boşluklara yayılırsa ikiz hatalar oluşturabilirler. Mesela ABABABAB yığın desene sahip kristal düşünelim. Kusur oluştuğunda desen ABCABCABCABC olur. İstifleme sırasında 3 katmanlı kristal istifleme hatalarına neden olur ve ABABABAB orijinal hale gelir. Kurtarma katmanları bir sayıdan sonra orijinale dönerse desen ABCABCABCABC olur [34].

2.3.1.2. Çizgisel Kusurlar

Tek boyutlu veya dislokasyon kusurlarda denir. Kristal yapısında bazı atomlar orijinal pozisyonun dışına çıkarak farklı kristallere dönüşür. İki ana tip çizgisel kusur vardır.

Kenar dislokasyonu, ilave atomlu bir düzlem, düzenli bir kristal içine konulduğunda kusur, şekildeki gibi kenarları çıkık görünür.

Ekstra düzlem sonunda atomları bağlayan duruma ise çizgi çıkığı hattı denir. Komşu atomlara, mevcut atomların bağları değişerek başka konumdan dislokasyon transferi olur.

Vida dislokasyonu, atomları taşımak, bir yerden bir yere aktarma olaylarında vida dislokasyonu görünür. Kusur oluşumu, üst kısmı dik olarak hareket etmesiyle gözlenir. Vida dislokasyonu, kopuk atom bağların sayısı, kenar çıkıklarına nispeten daha azdır.

2.3.1.3. Noktasal Kusurlar

Kristalin elektrik, optik, ısı ve termal manyetik özelliklerini etkileyen kusurlardır. Farklı türleri olup aşağıda inceleyelim [34]:

Boşluk kusurları, atom kristal kafes sisteminden eksik olduğunda boşluk kusurları oluşur. Dolayısıyla pozisyonlar, bir yerden başka bir yere hareket edebilir. Sıcaklık ve basınca bağlıdır.

Noktasal kusurlar iki türlü olabilir. Bunlar; kendi kendine noktasal ve öz noktasal bozukluklardır. İkinci kusur çeşidi detektör ve cihazlar üzerinde etkisi daha fazladır.

Yer değiştirme kusurları, bu kusur çeşidine yabancı maddeler sebep olur. Örgü noktaların düzenli atom ile değiştirdiğinizde bu kusurlar oluşur.

Frenkel kusurları, bu kusur çeşidine boşluk – noktasal çifti sebep olur.

Anti – alan kusur, bir kafes sisteminde bir atom diğer farklı bir konuma sahip olduğu zaman oluşan bir kusurdur. “a” ve “b” atom pozisyonlarına sahip bir atom uyarılmış ise “b” ve “a” şekline geldiğinde anti-site kusurları oluşur.

Karmaşık kusurlar, tüm bu kusurların birleştirilmiş şeklidir. Aktif donor, akseptör veya nötr karmaşık çift yapmak için bir olasılık her zaman vardır.

2.4. Kusurların Etkileri

Kusurlar yarıiletken malzemelerin optik ve elektronik özelliklerini etkileyen elektronik olarak aktif oldukları çeşitli roller üstlenmektedirler.

Donör ve akseptör: Temel olarak donör iyonlaştığında elektron kaybetmiş olup pozitif yüklü hale geçen akseptör ise iyonlaştığında elektron alıp negatif yüklü hale geçen kusur olarak tanımlanabilir [34]. Birçok durumda donör kusuru sahip olduğu fazla elektronu iletkenlik bandına iletir ek elektron veya akseptör kusuru için de elektron eksikliğini valans bandından aldığı elektronla tamamlayıp valans bandında hol oluşturması ile tanımlanabilir. Bu tip kusurların varlığı serbest yük taşıyıcılarının yoğunluğunu etkilediği için malzemenin iletkenliğini değiştirir. Bu kusurlarla ilgili önemli parametreler, yoğunlukları ve donör veya akseptör iyonizasyon enerjileridir.

Tuzak: Bir elektron (elektron tuzağı) veya hol (hol tuzağı) yakalayabilen ve diğer tür bir taşıyıcı ile rekombine olmadan önce, bu yük taşıyıcısının küçük bir termal iyonizasyon enerji ile en yakınındaki banda termal olarak uyarılabildiği kusurlardır. Bu kusurların varlığı yük taşıyıcılarının band kenarlarına yakın durumlarda bulunabilmesine imkân verir. Tuzakların önemli parametreleri yoğunlukları ve tuzaklanmış taşıyıcıların iyonlaşma enerjisidir [34].

Rekombinasyon merkezi: Sahip olduğu yüksek iyonlaşma enerjisi nedeniyle yakalanan bir elektron veya holün diğer tür bir yük taşıyıcısı ile rekombine olma ihtimalinin termal olarak banda uyarılma ihtimalinden daha yüksek olduğu kusur türüdür. Rekombinasyon merkezlerinin varlığı serbest taşıyıcıların yaşam süresinin kısalmasına neden olur. Bu kusurların önemli parametreleri ise yoğunlukları ve elektron ve hol için yakalama tesir kesitleridir.

Rekombinasyon merkezleri neden oldukları etkileri ve böylece üstlendikleri rollere göre özel isimler alırlar. Bunlar;

- i) Duyarlılık merkezleri; azınlık yük taşıyıcıları için büyük yakalama tesir kesitine sahip iken çoğunluk yük taşıyıcıları için çok daha küçük yakalama tesir kesitine sahiptir ve böylece çoğunluk yük taşıyıcılarının yaşam süresi artar bu nedenle de fotoiletkenlik büyük oranda arttırılmış olur [34].
- ii) Yok etme merkezleri; çoğunluk yük taşıyıcıları için büyük yakalama tesir kesitine sahiptir ve bu yüzden de çoğunluk yük taşıyıcılarının yaşam süresi ve fotoiletkenlik büyük ölçüde azalır.

iii) Zehir merkezleri; ışımasız geçişler için büyük yakalama tesir kesitine sahiptirler. Bu merkezler ışımalı yakalama tesir kesitine sahip merkezler ile yarış halindedir ve lüminesans etkinliğini düşürürler [34].

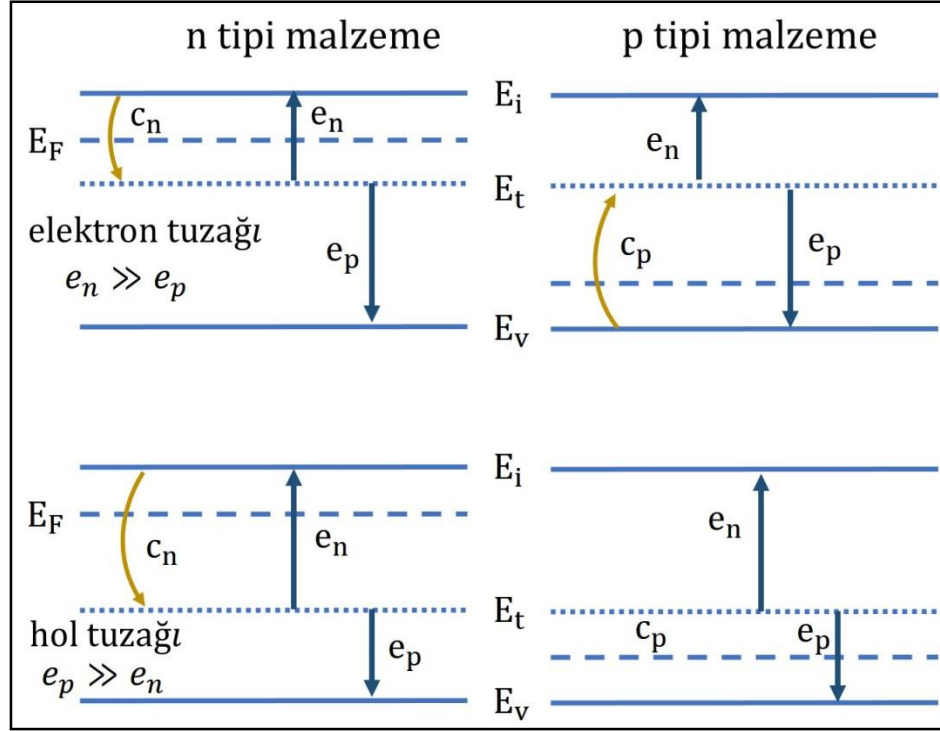
Optik Yakalama Merkezleri: Kusurda yer alan bir elektron valans bandından iletkenlik bandına, kusura veya kusurun taban durumundan uyarılmış durumuna foto-uyarma ile çıkabilir. Bu şekilde kusur, yarıiletkenin katkısız optik yakalamasına katkıda bulunur. Önemli parametreleri optik tesir kesiti ve foto-uyarma özelliği olan kusurların yoğunluğudur [34].

Saçılma Merkezleri: Kristalin periyodikliğinin bozduğu için serbet taşıyıcıların mobilitelerini belirlerken (göz önüne alındığında) saçılma merkezleri olarak davranan kusurlardır. Önemli parametreleri saçılma tesir kesitleri ve kusur yoğunluklarıdır.

Bu tanımlamaların hepsi fonksiyoneldir, yani aynı kusur donör, elektron tuzağı, holler için rekombinasyon merkezi, optik yakalama merkezi veya saçılma merkezi rolünü üstlenebilir. Bir sıcaklık aralığında ve foto-uyarma durumunda tuzak olarak davranan kusur farklı bir durum altında rekombinasyon merkezi olarak tanımlanabilir.

Isıl Uyarılmış İşlemler: Isıl uyarılmış işlemler malzemenin belirli özelliklerinin kontrollü bir ısıtma süreci ile belirli bir düşük sıcaklıktan itibaren ısıtılması ile ölçülmesini içeren bir takım süreçleri kapsamaktadır. Bu işlemlerin bazılarında araştırılan etki, malzemenin ısıtılmadan hemen önce ışık uygulanmasından sonra ortaya çıkarılır. Bu yöntemlerden en çok bilinenleri ısıl uyarılmış akım, ısıl ışıltama, ısıl uyarılmış elektron yayınlama, derin seviye geçici spektroskopisi ve ısıl uyarılmış depolarizasyon akımı ölçümleri olarak sıralanabilirler.

Isıl uyarma işlemlerinde ölçüm sonucu, ölçülen niceliğin sıcaklığın bir fonksiyonu olarak elde edildiği bir ısıtma eğrisidir. Farklı ısıl uyarma işlemlerinde kullanılan denklemler benzer olduklarından, farklı IUİ'de elde edilen ısıtılma eğrileri aynı matematiksel metotlarla analiz edilebilmektedir.



Şekil 2.1: p ve n tipi malzemelerdeki elektron ve hol tuzakları içi yakalama ve yayınlama süreçleri.

Tuzak enerjisi ve Fermi seviyesi E_t ve E_F 'dir. E_i ve E_v iletkenlik bandı ve valans bandı kenarlarıdır. c_n ve c_p elektron ve hol yakalama ve e_n ve e_p ise elektron ve holun tuzaktan kurtulma oranını belirtmektedir.

Isıl uyarılmış işlemlerde malzeme kontrollü bir şekilde ısıtılırken belirli bir fiziksel büyüklük sürekli olarak kaydedilir. Eğer değişen parametreler ölçülüp malzemenin sıcaklığının veya zamanın bir fonksiyonu olarak kaydedilirse sonuç olarak elde edilen eğri malzemedeki gerçekleşen süreçler hakkında bilgi verebilir. Bu metotların her birinde, malzemenin sıcaklığı düşük bir T_0 sıcaklığından belirli bir oranda artırılır ve malzeme ile ilgili fiziksel bir büyüklük kaydedilir. Ölçümün sonucu ise ölçülen IUI'de mekanizmalar farklı olsa da elde edilen grafikler ilginç bir şekilde benzerdir. Tipik bir ısıtım değişim grafiği bir veya daha fazla pik veya basamak şekilli grafik içerir ve bunlar belirli bir ısıtım olarak aktive olmuş bir mikroskobik süreç ile ilişkilidir. Mikroskobik süreçlerle ilgili parametreleri piklerin sayısı, şekli ve pozisyonundan ve bütün eğrinin ısıtım hızına ısıtım öncesindeki uyarılmasına ve bunun gibi işlemlere olan bağlılığından elde edilebilir [20].

2.5. PICTS-Photo Induced Current Transients Spectroscopy

FİGAS-Foto İndüklenmiş Geçici Akım Spektroskopisi (PICTS-Photo-Induced Current Transient Spectroscopy) TSC yönteminin yüksek sıcaklıklarda karanlık akımın artışından dolayı düşük performans ve düşük hassasiyet gibi dezavantajları vardır. Bu zayıflıklar tuzaklardan kaynaklanan akım geçici analizine tekrarlı DLTS oran penceresi tekniği uygulanarak aşılabılır. Böyle bir ölçümü gerçekleştirebilmek için taranan sıcaklık aralığında tuzakların tekraren doldurulması gereklidir. Malzemenin, enerjisi bant aralığından büyük olan fotonlara sahip ışıqla uyarılması ile tuzakları doldurmak için gerekli taşıyıcılar oluşturulur. Tuzak bölgeleri tarafından yakalanan elektronlar ve holler uygulanan ışıqlın kapatılmasının ardından termal salınma ile serbest kalır ve bu yükler bir geçici akım oluşturur [35].

2.5.1. PICTS Yöntemi

PICTS uygulaması ilk olarak Hurtes ve arkadaşları tarafından 1978 'de tanıtıldı. PICTS yönteminin varyasyonları da daha sonradan Fairman ve arkadaşları (1979) ve Yoshie ve Kamihara (1983) tarafından tanıtıldı. Bu metot, DLTS'nin benzer kavramıdır ve akımın ölçülmesini içerir. DLTS ise elektrik uyarma ile kullanılır ve geçici kapasite ölçer. Ayrıca optik geçici akım spektroskopisi olarak da bilinir. Yüksek dirençli malzemelerin derin seviyelerini karakterize etmek için uygun olan tek fotoelektronik yöntem olmuştur [35].

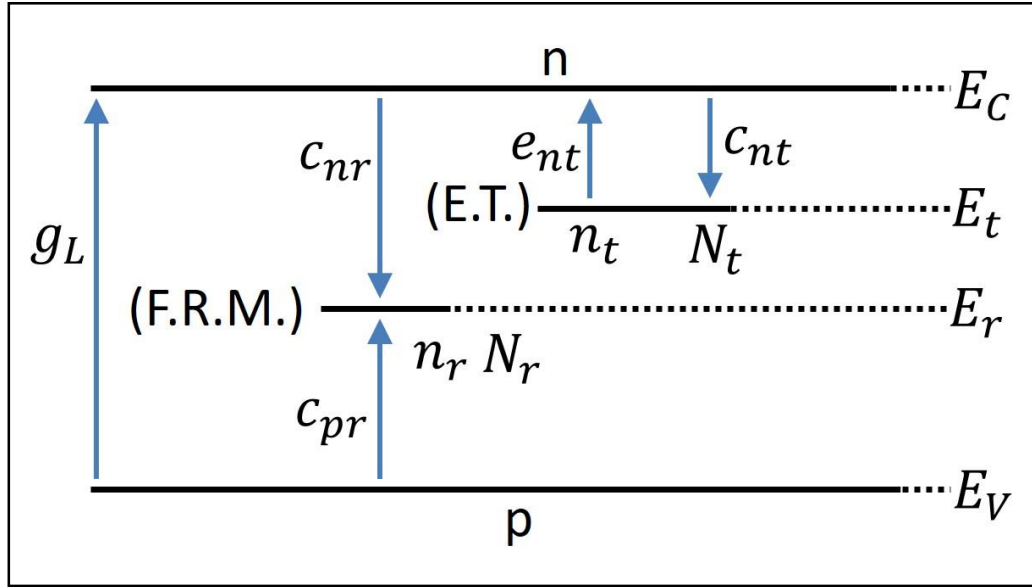
PICTS ölçümü, geniş sıcaklık aralığında, örnek, periyodik bir ışıql pulsasyonu ile aydınlatılır. Bununla birlikte özellikle 300 K üzerindeki sıcaklıklarda sonuç belirsiz olduğu da bir gerçektir. Numune boyunca akan akım, hızlı bir akım yükselticisi ile izlenir. Işıql kapalı ve açık olduğunda, böyle bir ölçümde yer alan bilgileri yorumlamak, bu iki aşamalı davranışı ayırmak için yararlı bir tekniktir. Aydınlatma başladığında serbest taşıyıcılar, örnek iletkenliğinin artırılması ve akımın hızlanmasında önemli bir rolü vardır.

Fotoakım artışında ilk seviyelerin yakalama oranları ile ilgili bir eğrilik derin seviyelerde serbest taşıyıcıların hepsi yavaşlar. Kararlı duruma ulaşıldığında taşıyıcıların fotojenerasyonları oranı, rekombinasyon oranına eşit olur [35].

Işık kapatıldığında ise ölçülen akım iki kısma ayrılır. Birinci kısım, banttan banda, Shockley-Okuma-Hall ve Auger süreçleri de dahil olmak üzere, taşıyıcı rekombinasyon nedeniyle çok hızlı bir düşüş olur. İkinci kısımda ise aydınlatma aşamasında ele geçirildi ve taşıyıcıların emisyonu ile ilgili daha yavaş bir geçicidir.

Şimdi, PICTS teorik temelini ve mikrobilgisayar kontrollü PICTS sistem tasarımını inceleyelim:

Tek bir elektron yakalama seviyesi olan bir bant aralığı modeli ele alalım;



Şekil 2.2: Isıl uyarılmış süreçlerde gerçekleşebilecek mümkün geçişler.

Şekil 2.2'deki E_t , E_c , E_v ve F.R.C. sırası ile elektron tuzağı, iletim bandı, valans bandı ve hızlı rekombinasyon merkezlerinin enerji seviyeleridir. Geçiş parametreleri ise, e_{nt} elektronların emisyon oranı, c_{nt} ve c_{nr} tuzak seviyesi ve rekombinasyon merkezi için elektron yakalama katsayıları, c_{pr} boşluklar için yakalama katsayılarıdır. Şekil 2.1'deki g_L foto-uyarı tarafından üretilen elektron-boşluk çiftleri oranıdır. n , p , n_t ve n_r , yine sırası ile elektron ve boşluk yoğunlukları ile tuzağa yakalanan ve rekombinasyon yapan elektron yoğunluklarıdır [35].

$$\frac{dn}{dt} = g_L + e_{nt} \cdot n_t - C_{nt} \cdot n \cdot (N_t - n_t) - C_{nr} \cdot n \cdot (N_r - n_r) = 0 \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'in sağ tarafındaki oran iletkenlik yoğunluğunu belirtmektedir.

$$\frac{dn_t}{dt} = C_{nt} \cdot n \cdot (N_t - n_t) - e_{nt} \cdot n_t = 0 \quad (2.2)$$

Denklem 2.2'nin sol tarafındaki ifade tuzak yoğunluğudur ve zamana bağlı değişmediği için bu oran sifıra eşitlenir.

$$e_{nt} = e_{nt}^t + e_{nt}^0 \quad (2.3)$$

Denklem 2.3'deki e_{nt}^t ve e_{nt}^0 sırası ile termal ve ışığın altında emisyon oranıdır.

$$C_{nt} = S_{nt} \cdot v_{thn} \quad (2.4)$$

Buradaki S_{nt} yakalama tesir kesiti ve v_{thn} elektronun termal hızıdır.

$$n_t = \left\{ \frac{g_L \cdot \tau_n \cdot C_{nt} / e_{nt}}{(g_L \cdot \tau_n \cdot C_{nt} / e_{nt}) + 1} \right\} \cdot N_t \quad (2.5)$$

Boşlukların emisyon oranı ve yüksek dirençli malzemenin karanlıkta serbest taşıyıcı yoğunlukları ihmal edildi. Elektron yoğunluğunu Denklem 2.5'de ki gibi ifade ederiz Buradaki τ_n ise,

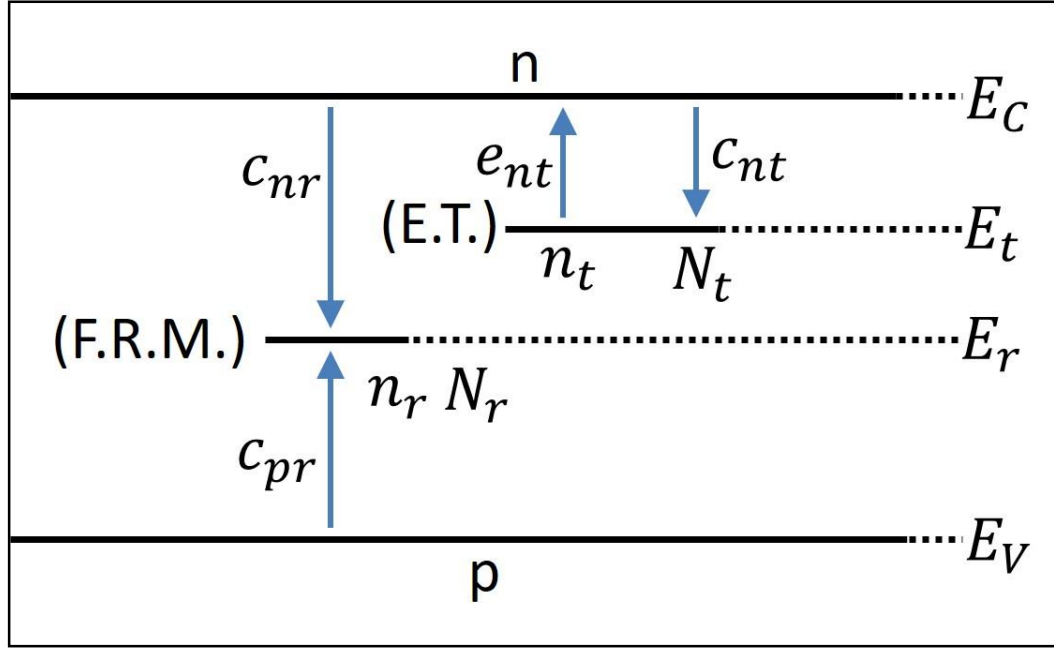
$$\tau_n = (C_{nr} \cdot (N_r - n_r))^{-1} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilir.

Işık uyguladığımızda elektron sayısı değişir ve yoğunluk zamana göre sabit kalmaz ve Denklem 2.2'de eşitliğin sol tarafındaki oran 0 olmaz. Geri dönüş olmadığı durumdaki geçişler Şekil 2.2'de gösterilmiştir [35].

İletkenlik bandındaki elektronların yoğunluğu şeklinde verilir. Elektron yoğunluğunun zaman göre değişimi aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{dn}{dt} = e_{nt}^t \cdot n_t - C_{nr} \cdot n \cdot (N_r - n_r) \quad (2.7)$$



Şekil 2.3:Geri dönüş olmadığı durumdaki geçişler.

Yukarıdaki eşitlikte serbest elektron ömrü sabiti τ_n yerine yazılırsa,

$$\frac{dn_t}{dt} = -e_{nt}^t \cdot n_t \quad (2.8)$$

ve n_t 'yi yerine yazarsak,

$$\frac{n}{\tau_n} + \frac{dn}{dt} = n_{t0} \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (2.9)$$

Elde ederiz. Denklem 2.9'daki n_{t0} ışıkla uyarılmadan önce tuzak elektronların yoğunluğudur. Bu ifadedeki n/τ_n 'e göre dn/dt çok küçüktür. Bu yüzden dn/dt ihmal edilebilir. Böylece ışıkla uyarılmış durumda iletkenlik bandında elektron yoğunluğu Denklem 2.10'daki gibi ifade edilir [35].

$$n = n_{t0} \cdot \tau_n \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (2.10)$$

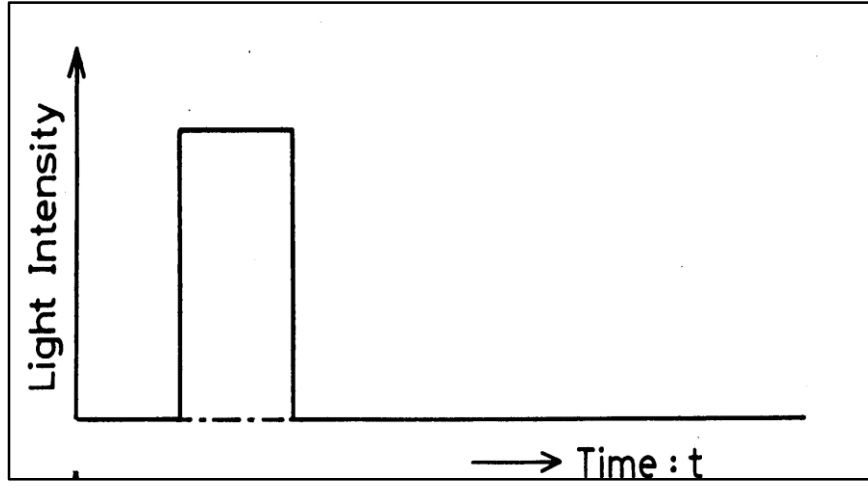
Geçici akım denklemi

$$i(t) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n \quad (2.11)$$

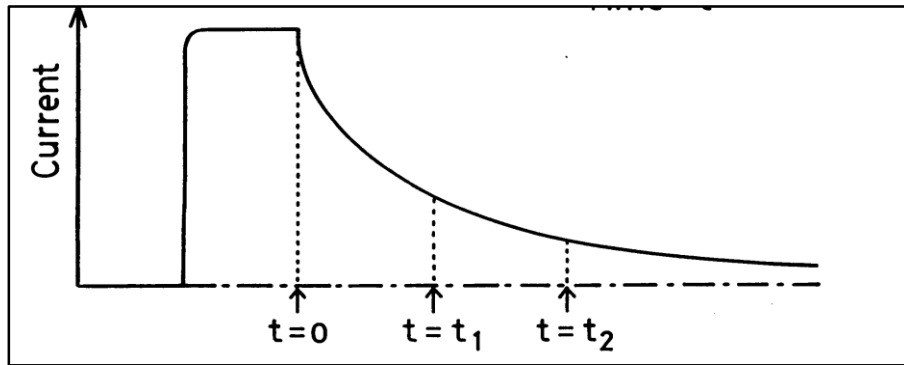
şeklinde ifade edilebilir ve Denklem 2.10 ile gösterilen n değeri yerine yazılırsa,

$$i(t) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n_{t0} \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (2.12)$$

ifadesine ulaşılır. Buradaki $\mu_n(T)$ elektron mobilitesi, q electron yükü, $A(\lambda)$ etkin tesir kesiti, T sıcaklık, uygulanan ışık atımının ve E uygulanan elektrik alanın büyüklüğüdür [35].



Şekil 2.3: Işık atımının zaman bağı gösterimi.



Şekil 2.4: Işık atımı sonrası kaydedilen zamana bağı akımın değışimi.

$$I_n(T) = \frac{1}{K(T)} \cdot (i(t_1) - i(t_2)) \quad (2.13)$$

t_1 ve t_2 şekilde gösterildi.

$$= e_{nt}^t \cdot (\exp(-e_{nt}^t \cdot t_1) - \exp(-e_{nt}^t \cdot t_2)) \quad (2.14)$$

Burada sabit:

$$K(T) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n_{t0} \quad (2.15)$$

$$e_{ntm}^t = S_{nt} \cdot V_{thn} \cdot N_c \cdot g^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{(E_c - E_t)}{kTm}\right) \quad (2.16)$$

e_{ntm}^t denklemimizde termal emisyon oranını gösterir. T_m sıcaklıkta PICTS spektrumu maksimum pik yapar.

$$i(T) = \mu_n(T) \cdot \tau_n(T) \cdot A(\lambda) \cdot q \cdot E \cdot n_{t0} \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-e_{nt}^t \cdot t) \quad (2.17)$$

Tek değişken olduğu için buna göre türev alırsız.

$$\begin{aligned} \frac{d \ln(T)}{de_{nt}^t} &= (1 - t_1 \cdot e_{nt}^t \cdot \exp(-t_1 \cdot e_{nt}^t) - (1 - t_2 \cdot e_{nt}^t) \cdot \exp(-t_2 \cdot e_{nt}^t)) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (2.18)$$

$E_c - E_t$: aktivasyon enerjisidir. Aslında PICTS temel tekniği, DLTS'deki kapasitans ölçümünün aksine uyarım darbesinin sönmesinde sonraki t_1 ve t_2 aralıklı foto-akımı ölçer. Foto-akım ısıya karşı farklı durumlarda pikler verir ve

$$\Delta I(T) = \frac{1}{I_0} i(t_1) - i(t_2) \quad (2.19)$$

olur. Taşıyıcıların emisyon oranı, oran penceresi ile t_1 , t_2 tarafından eşleşir. Buradan da anlıyoruz ki t_1 ve t_2 emisyon oranıyla ilgilidir. Hareketliliğinden μ , serbest taşıma ömrü t_0 ve sıcaklık bağımlılığı ile

$$I(t) = \frac{C_{q\mu\nu}}{\tau^{-1} - \nu} \cdot \frac{N}{1 + \left(\frac{\nu}{\beta}\right)} \left[\exp(-\nu t) - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] + i_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (2.20)$$

denklemini elde etmiştik. Şimdi ise PICTS ile sıcaklık bağımlılığını ortadan kaldırma ve sinyali normalleştirme ile PICTS dalgaları analizi yapalım [35].

$\Delta I(T)$ normalize PICTS sinyalidir

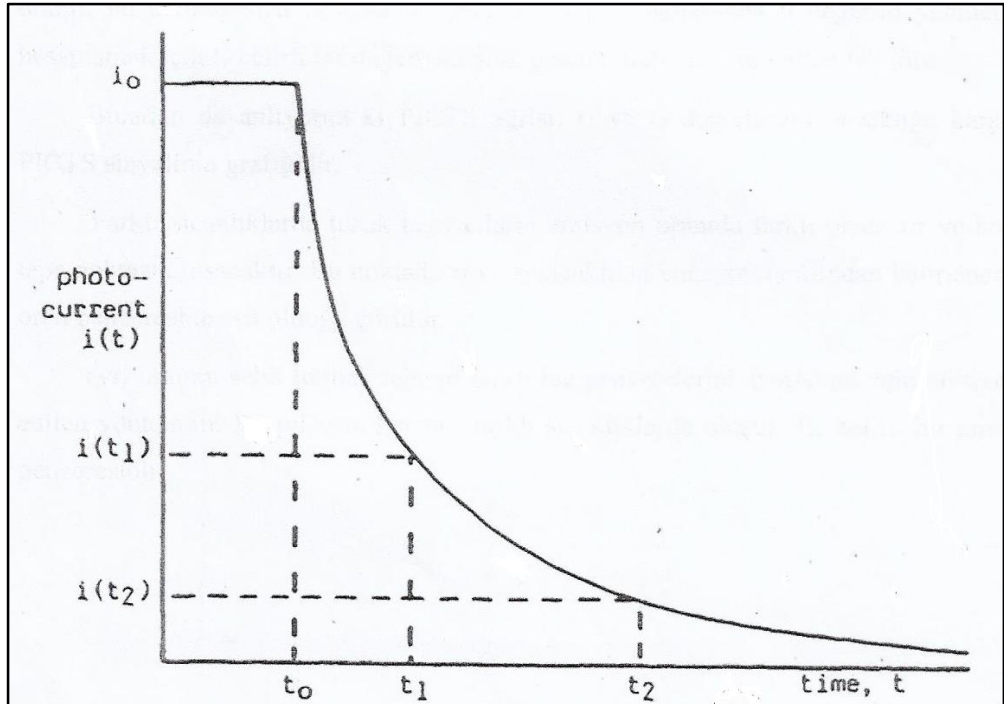
$$I_0 = C_{quv} \cdot I_0 \cdot \alpha \cdot r \quad (2.21)$$

I_0 uyarım yoğunluğu ve α ise absorpsiyon sabitidir

$$\Delta I(T) = \frac{N \cdot v}{I_0 \alpha [\exp(-vt_1) - \exp(-vt_2)]} \quad (2.22)$$

Denklemini ile de ifade edilir. v burada thermal emission rate 'dir.

$$e_{ntm}^t = S_{nt} \cdot V_{thn} \cdot N_c \cdot g^{-1} \cdot \exp\left(-\frac{E_c - E_t}{kTm}\right) \quad (2.23)$$



Şekil 2.5: Foto akım sinyali örnekleme

v , thermal emission rate, v sıfıra denk olan

$$\frac{d\Delta l(T)}{dv} = (l - t_1 \cdot v) \cdot \exp(-v \cdot t_1) - (l - t_2 \cdot v) \cdot \exp(t_2 \cdot v) \quad (2.24)$$

Buradan;

$$\exp[-v(t_2 - t_1)] = (l - t_1 \cdot v)/(l - t_2 \cdot v) \quad (2.25)$$

t_1 ve t_2 'nin özel her bir değeri yukarıdaki denklemden yinelemeli prosedür kullanılarak hesaplanabilir.

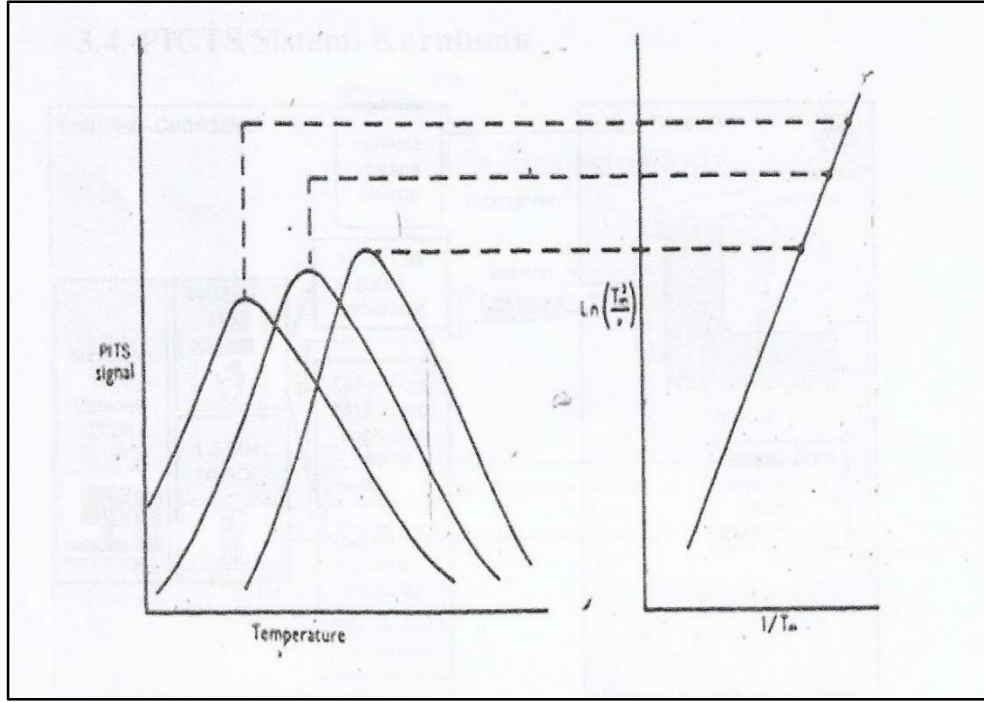
Tablodan t_1 'in belirli bir değeri v ' nün ilgili değeri listelenir ve $t_1/t_2 =$ sabit oranlı, bu denklemden hesaplanır. Şekilde, gerekli olduğunda v değerini yeniden hesaplamak için t_1 belirli bir değere karşılık gelen v bulmak için kullanılabilir [36].

Buradan da anlıyoruz ki PICTS eğrisi, t_1 ve t_2 değerlerinin sıcaklığa karşı PICTS sinyalinin grafiğidir.

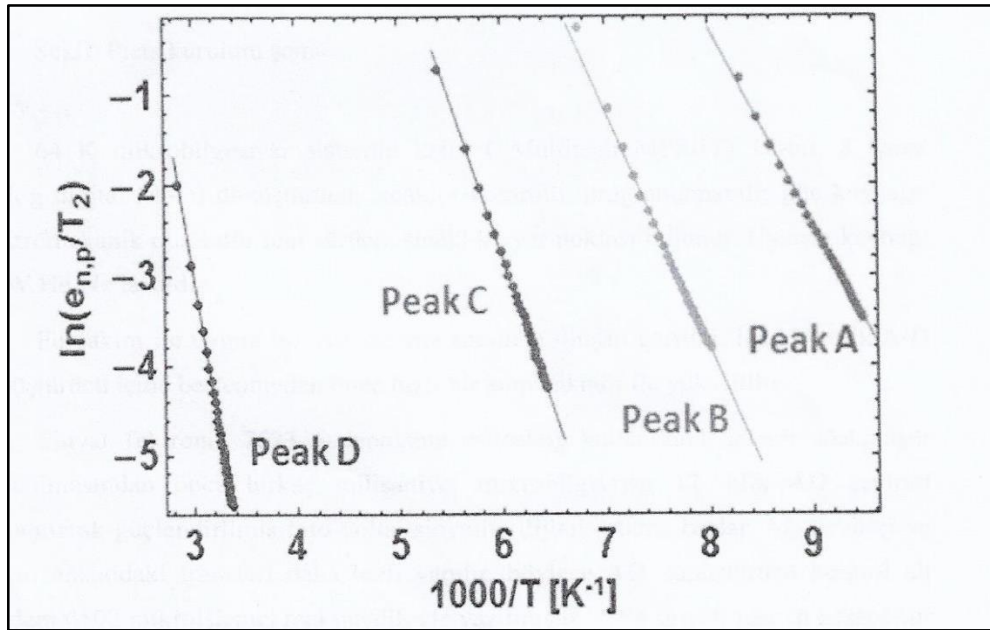
Farklı sıcaklıklarda tuzak taşıyıcıların emisyon oranı da farklı olacaktır ve bir tepe noktası oluşacaktır. Bu noktada t_1 ve t_2 sıcaklıkta emisyon tarafından belirlenen oran penceresine eşit olduğu görülür. t_1/t_2 oranını sabit tutmak için ve farklı hız pencerelerini ayarlamak için tavsiye edilen yöntemdir. Bu piklerin her biri farklı sıcaklıklarda oluşur, T_n , belirli bir oran penceresidir [36].

Tablo 2.1: Emisyon oranı $v(s^{-1})$, $t_2/t_1=5$ ile birlikte farklı sonuçlar.

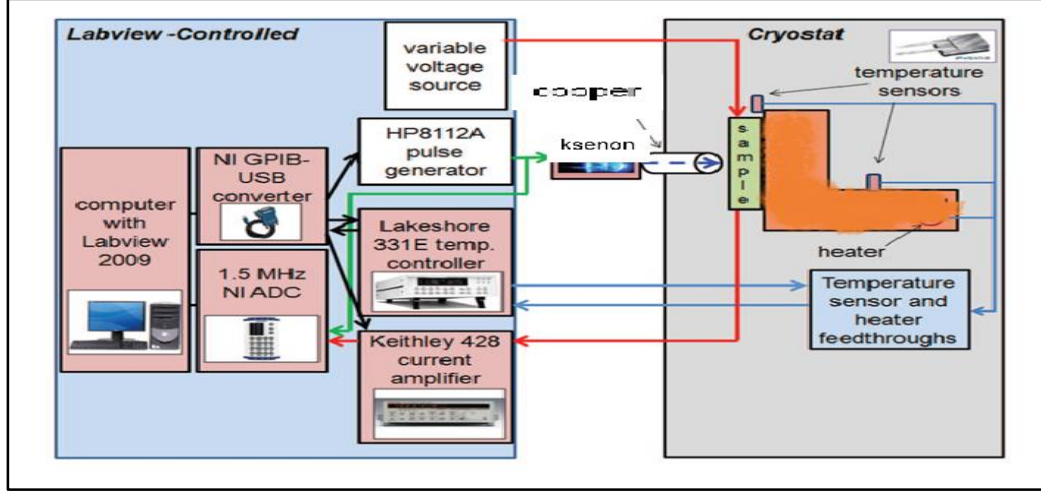
DELAY TIME	EMISSION RATE
0.005	211.47
0.006	176.06
0.007	151.48
0.008	132.30
0.009	117.71
0.010	105.24
0.011	95.58
0.012	87.53
0.013	80.95
0.014	75.74
0.015	69.82
0.016	66.15
0.017	61.67
0.018	58.35
0.019	55.18
0.020	52.12
0.021	50.16
0.022	47.29
0.023	45.49
0.024	43.77
0.025	42.09



Şekil 2.6: PICTS dalgaları analizi.



Şekil 2.7: Arrhenius alanlarının 4 pik gösterimi.



Şekil2.8: PICTS ölçüm sistemi kurulumu.

64 K mikrobilgisayar sistemin kalbi (Multitech MPFIIT) 12-bit, 8 kanal analog digital (A-D) dönüştürücü, sıcaklık kontrolü, programlanabilir güç kaynağı, elektromekanik obtüratör için sürücü, sıcaklık ayar noktası bulunur. Uyarım kaynağı 1mW He-Ne lazerdir.

Fotoakım ile uygun bir yük direnci arasında oluşan gerilim, ilk 12 bitlik A-D dönüştürücü içine beslenmeden önce hızlı bir amplifikatör ile yükseltilir.

Sinyal Tektronix 7623 A depolama osiloskop kullanılarak izlenir. Deklanşör kapatılmasından önce birkaç milisaniye, mikrobilgisayar 12-bitlik AD çevirici kullanılarak güçlendirilmiş foto voltaj sinyalini dijital ortama başlar. AD çevirici ve mikro arasındaki transferi daha hızlı yapılır, böylece AD dönüştürücü kontrol alt yordam 6502 mikroişlemci makine dilinde yazılmıştır. PICTS sinyali hemen hesaplanır ve sonuç, bir dizi içinde depolanır. Yeni bir sıcaklık ayar noktası, sıcaklık kontrolü gönderilir ve son sıcaklığa ulaşınca kadar olaylar dizisi tekrar edilir. Sıcaklık ayar noktası arasındaki aralık yazılım aracılığıyla değiştirilebilir. Deneyin sonunda da PICTS verileri otomatik olarak bir diskete aktarılır. Bu disket, 9- track manyetik teyp için Alberta Amdahal üniversitesi 5870 bilgisayara transfer edilir. Şimdi biz sistemdeki bileşenlerin işlevlerinden konuşalım.

Giriş-çıkış fonksiyonu (I/O) yönetim kurulu mikro ve sıcaklık kontrolörü, programlanabilir güç kaynağı ve elektromekanik deklanşör sürücüsü gibi harici cihazlar arasında arabulucu görevindedir. I/O kurulu, 16 farklı cihazı kontrol edebiliriz. Teorik anlamı ise 16 kontrol hattı demektir. Uygulamada, bazı cihazlar 1 kontrol hattı gerekir.

Sıcaklık kontrolü mikro-bilgisayar sıcaklık ayar noktasından yapılır. Bu noktanın görevi numunenin sıcaklığı düzenlenmesini sağlamaktır. Bir diğer görevi ise termal dengeyi sağlar, termal tepki önlemek için örnek bir sıcaklık kademeli bir artış sağlanmasıdır. Sıcaklık sensörü bakır-konstantan termokulp ve sıcaklık regülasyonu aralığı 80- 395 K.

Oda sıcaklığı altındaki deneysel ölçümde, iyi bir ısı ayarı için iyi bir faktör örneği soğuması için sıvı azot akış hızını kontrol etme yeteneği de vardır.

Programlanabilir güç kaynağı, düşük direnç malzemelerinde gereklidir. Bir yük direnci fotoakım nedeniyle gerilim düşüşü elde edilebilir ve böylece örnek seri halde bağlanır. Yük direnci boyunca ortaya çıkan ön gerilim voltajı $R_{load}/(R_{sample}+R_{load})$ oranına bağlıdır. Numunenin direnç yükü veya $R_{sample} \gg R_{load}$ çok daha büyük ise, ozaman yük karşısında görünen $(R_{load}V_{bias}/R_{sample})$ küçük olacak. Yüksek sıcaklıklarda direnç azalacak ve R_{sample} büyük kısmı yük direncine algılanır böylece R_{load} çok büyük olur. Bu sorunu önlemek için, büyük kapasitör C_{load} DC gerilimi süzmek için çıkışa bağlanır. $v = Q/C_{load}$. Burada Q kapasitör boyunca şarj değişimidir. Tüm bunlarda kesin doğru ölçüm yapılabilir gerçeği yoktur. AD dönüştürücüde aşırı yükleme zararlı olduğundan sürekli bozulmalar olacaktır.

Analog Dijital dönüştürücü (AD), 20 ms'lik bir dönüşüm süreli 12-bitlik bir dönüştürücüdür. (Analogue Devices DAS 1128). 16 giriş 8 diferansiyel girişlerine bağlanır. Tam ölçek aralığı 2,5 MV, çözünürlük veren 5,12 V olarak belirlenmiştir. Mikrobilgisayar sıcaklığının takip ve sinyal dijital ortama aktarmak için bu AD dönüştürücü kullanılır. Bu AD çevirici için arayüzü mikroyuvası 4 bulunur. Apple II'tl veri yolu için tasarlanmıştır. Bu yüzden tüm Apple II'tl mikrobilgisayar ve uyumlular için kullanılabilir.

Elektromekanik sürgülü kapak sistemi, (A.W Vincent Associates Inc) bir sürücü (SD10) ve bir kapak (262) içerir. Deklanşör sürücü mikro tarafından tetiklenir ve pozlama süresi deklanşör sürücüsünün ön panelinden ayarlanabilir. Bu pozlama süresi, kinetik dengeyi sağlamak için 200 ms olarak belirlenmiştir.

Amplifikatör, 0,8 mHz DC bir bant genişliğine sahip. Yükseltici kazancı 87,7 152,6 veya 219,3 ' e ayarlanır. Mikrogürültü, amplifikatöründe bir RC filtresi ile azaltılır. Uygun koruyu ve sistemdeki bileşenlerin topraklamada mikrogürültü azaltma önemi büyüktür. (W. Siewert tarafından dizayn edildi).

AD çevirici ve Apple Soft Basic ile yazılmış bir ana program kontrol etmek için bir makine dili oluşur. makine dili alt program noktalarının herhangi bir sayı dijitalize

etmek için yeniden yazılabilir. Gecikme döngüsü uzunluğu (veri noktalarındaki) ayarlanabilir.

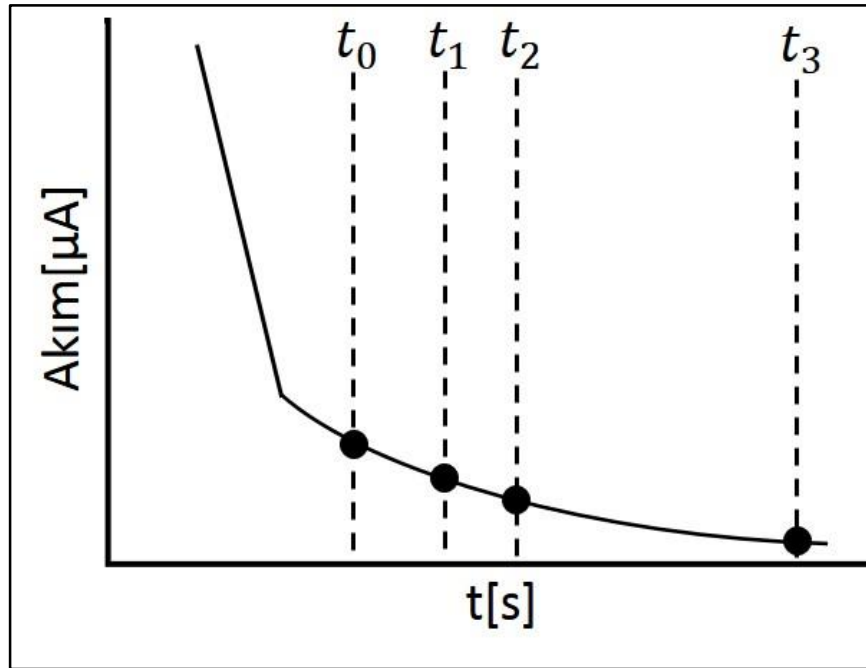
İdealize edilmiş 4 kapı PICTS sinyali [37] denklemi:

$$\Delta i(T) = i(t_1) - i(t_2) \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} S_{iki\ kapı}(T) &= I(T, t_1) - I(T, t_2) \\ &= B(T)e_n(T) \cdot (\exp(-e_n(T)t_1) - \exp(-e_n(T)t_2)) \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$S_{dört\ kapı}(T) = \frac{I(T, t_1) - I(T, t_2)}{I(T, t_0) - I(T, t_3)} = \frac{\exp(-e_n(T)t_1) - \exp(-e_n(T)t_2)}{\exp(-e_n(T)t_0) - \exp(-e_n(T)t_3)} \quad (2.28)$$

$$e_{n,maksimum} = \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{t_2 - t_1}{t_1 - t_0}\right) \quad (2.29)$$



Şekil 2.9: İdealize edilmiş 4 kapı PICTS sinyali analizi prensibini gösteren grafik.

2.6. Piroakım

Piroelektrik olay malzemedeki polarizasyonun sıcaklık ile bağılılığı olarak tanımlanır. Piroelektrik krsital için ise deneylerde alınan polarizasyon değişiminin sıcaklık değişimi ile orantılıdır. Piroelektrik olay sıcaklık değişimi ile gözlemlenebilen bir olaydır. Bunun aksine piroelektrik kristaller kendiliğinden oluşan bir polarizasyonu vardır. Ferroelektrik kristal ise uygulanan bir elektrik alanla beraber polarizasyonu yön değiştiren bir özelliğe sahiptir.

Piroakım ölçümü yapılırken karanlık akım ölçümündeki kontaklara ve kaplamalara sahip olur. Soğutulma işlemi ise bilgisayar kontrollü ısıtma ünitesi ile kreostat içinde olur. (Lakeshore D340). Elektrik alan, soğutma işlemi esnasında kristale uygulanır. Böylece sıcaklığa bağlı olan akım değişimi rahatlıkla ölçülebilir. Soğutma işlemi sırasında uygulanan elektrik alan, ölçüm sırasında uygulanmaz. Elektrik alan yerine belli dalga boylarında ışık uygulanabilir. Böylece farklı fiziksel özellikler daha kolay şekilde araştırılabilir. TIInS_2 kristalinin böylece piroakım ölçümleri sonucunda ne gibi değişiklikler olabileceğini görmüştür. Bu deneyde TIInS_2 kristali ısı beklemeye tabii tutulmuştur. Bu kristalin piroelektrik özellikleri ölçümlerinde quasitativ metot kısa devre rejiminde kullanılmıştır. Sıcaklık 12 K/mm ısıtma hızında yapılmıştır. Keithley bu akım ölçümünde 485 piko ampermetre ölçüm cihazı kullanmıştır. Sıcaklık değişimi ise burada 77- 300 K arasındadır.

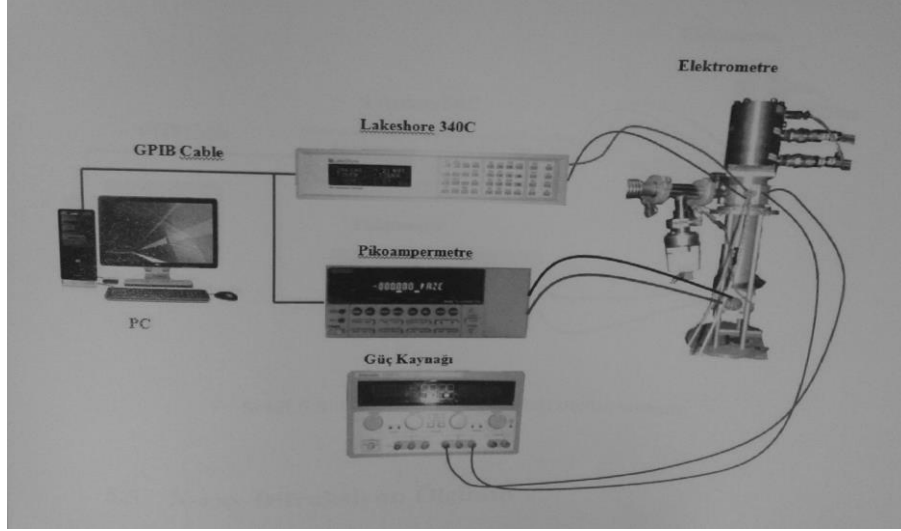
2.7. TSDC Analizi

TSDC malzemedeki polarizasyonun sıcaklık ile bağılılığı ile tanımlanır. Kristal için ise deneylerde alınan polarizasyon değişiminin sıcaklık değişimi ile orantılıdır. TSDC sıcaklık değişimi ile gözlemlenebilen bir olaydır. Bunun aksine bu kristaller kendiliğinden oluşan bir polarizasyonu vardır. Ferroelektrik kristal ise uygulanan bir elektrik alanla beraber polarizasyonu yön değiştiren bir özelliğe sahiptir [34].

TSDC analizi ölçümü yapılırken karanlık akım ölçümündeki kontaklara ve kaplamalara sahip olur. Soğutulma işlemi ise bilgisayar kontrollü ısıtma ünitesi ile kreostat içinde olur. (Lakeshore D340). Elektrik alan, soğutma işlemi esnasında kristale uygulanır. Böylece sıcaklığa bağlı olan akım değişimi rahatlıkla ölçülebilir. Soğutma işlemi esnasında kullanılan elektrik alan, ölçüm sırasında uygulanmaz.

Elektrik alan yerine belli dalga boylarında ışık uygulanabilir. Böylece farklı fiziksel özellikler daha kolay şekilde araştırılabilir. TIInS_2 kristalinin böylece piroakım ölçümleri sonucunda ne gibi değişiklikler olabileceğini görmüştür. Bu deneyde TIInS_2

kristali ısı beklemeye tabi tutulmuştur. Bu kristalin piroelektrik özellikleri ölçümünde quasistatik metot kısa devre rejiminde kullanılmıştır. Sıcaklık 15 K/mm ısıtma hızında yapılmıştır. Keithley bu akım ölçümünde 485 piko ampermetre ölçüm cihazı kullanmıştır. Sıcaklık değişimi ise burada 77-300 K arasındadır.



Şekil 2.10: TSDC analizi ölçüm sistemi.

2.7.1. TSD Akımı

Bu bölümde TiInS_2 kristalinin oransız fazda ısı bekleme öncesi ve sonrası kısa devre rejiminde quasistatik metot ile piroelektrik özellikler araştırılmıştır. Bu metodun kullanılma sebebi, kristalin hacminde $[I_p(T)]$ piro cevap bilgilerinin sağlanabilmesidir. Şekilde TiInS_2 kristalinde kısa devre akımının sıcaklığa bağlılığı ön kutuplanma ölçülerek gösterildi. Sinyalimiz $I_p(T)$ $T = 98 \text{ K}$ 'de max sıcaklıktır. Bu sıcaklıktaki maximumluğun sebebi ferroelektrik fazdaki faz geçişidir. Noktalı kısım kristalin piroakım sorunlarını gösterir. Termal olarak uyarılan süreçlerin akım sinyalinin sıcaklığı bağlılığı, ısı bekleme sonrası tamamen değişmiştir.

98 K civarında oluşan pik ısı beklemeye tabi tutulmuş durumda kendi katları şeklinde azalmıştır. Burada 93 K sıcaklık değerinde küçük bir pik oluşmuştur. 100–135 K sıcaklık bölgesinde piroelektrik akım değerleri negatif olur. TiInS_2 kristalinin oransız fazda ısı beklemeye tabi tutulması piroelektrik akımın sadece oransız faz bölgesindeki sıcaklık etrafında değil bu bölgeden uzak noktalarda bulunan sıcaklık bölgelerinde değişime sebebiyet verir. Kristalde gözlenen TSDC, uygulanan voltaja ters yönde oluşan iç elektrik alanıdır.

2.8. DLTS

1974 yılında, D.V. Lang, Bell laboratuvarlarında Derin Seviye Geçici Spektroskopisi (DLTS), karakterize etmek için güçlü bir teknik önerdi [38].

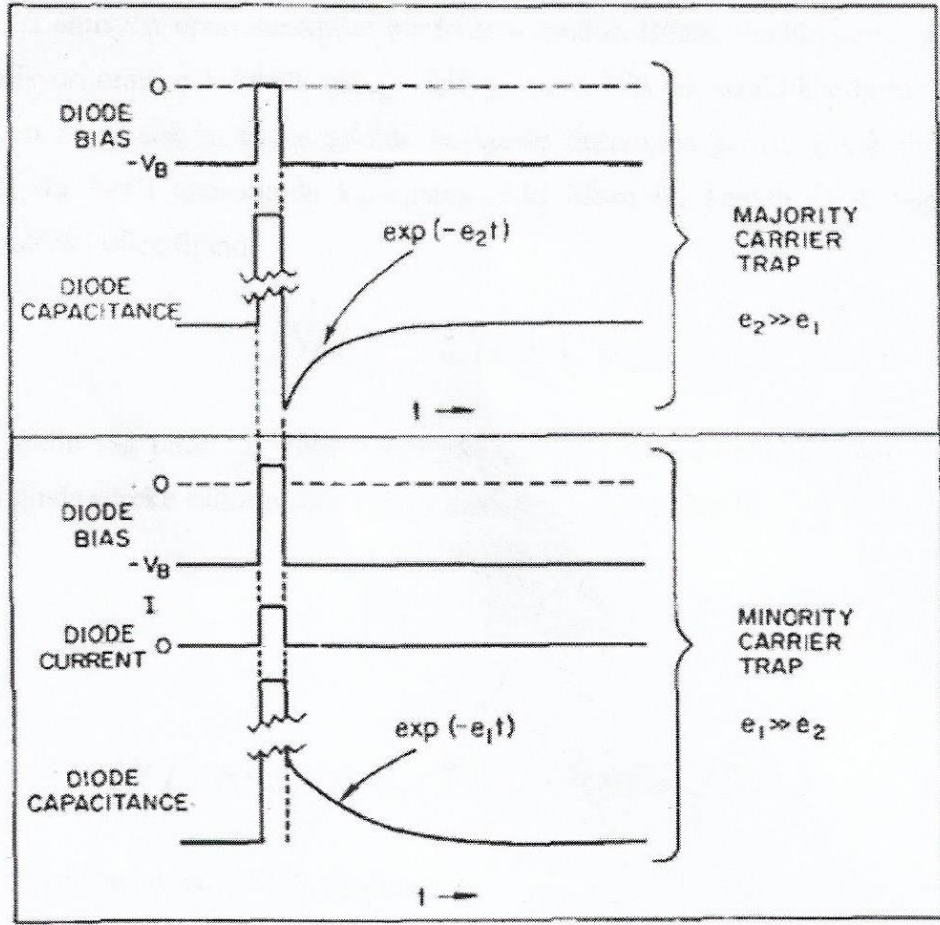
Bu yapılan DLTS deneyinde, p-n eklemli veya Schottky diyodu tüketim bölgesinde, kapasitans zamanın bir fonksiyonu olarak alınır. Tükenmesi, bölge genişliği, kapasite başlangıçta sabit tutulur. Daha sonradan uygulamalı bir değişiklik modüle edilir. Başlangıçta diyod tükenmesi bölgeyi boşaltmak için ters taraflıdır. Sonra bir anlık ön darbe uygulanır. Bu süre zarfında çoğunluk taşıyıcı tuzakları doldurularak çoğunluk taşıyıcılar eskiden tüketilmiş bölgeye girmek için izin verir [38]. Kavşak ileri darbesi sırasında azınlık taşıyıcı tuzakları doldurur. Darbenin sonunda, örnek, ters duruma döner ve en ısı emisyon oranı olan bir karakteristik zaman sabiti $\tau_n = 1/en$ ile elektron salınımı başlar.

C_∞ kararlı durum kapasite, ΔC üslü genliği olduğu

$$C(t) = C_\infty - \Delta C \exp\left(\frac{-t}{\tau_n}\right) \quad (2.30)$$

tarafından ifade edilen bir kapasite geçici neden olur.

Tuzak konsantrasyonu kapasite tepe yoğunluğu tespit edilebilir ve taşıyıcıların polarite kapasite değişikliği işareti bulunabilir. Bu işaret mevcut tuzakları çeşitlerinin göstergesidir. DLTS'de geçici sinyal yakalamanın çoğunluk ve azınlık tip taşıyıcı yakalama göstergesidir.



2.11: Çoğunluk ve azınlık taşıyıcı tuzakları darbeli geçici kapasite katılan zaman bağımlılıkları. Alt yarım enjeksiyon darbe dizisi. Üst yarım çoğunluk taşıyıcı darbe dizisi.

Şekilde de görüldüğü gibi pozitif bir genliği geçici azınlık taşıyıcı tuzak varlığını gösterir. Negatif bir genlik ise geçici çoğunluk tuzak varlığını gösterir. Bu çoğu teknikler tuzak türlerini ayırt edemezler. Bu da kapasite ölçümü için önemli bir avantajdır.

DLTS etkinliğinde parametreler deneysel olarak tutarlı bir şekilde yer almaktadır. Deneysel kapasitans geçici ön gerilim darbe sonunda geçen süre t_1 ve t_2 iki farklı anlarda örneklenir. $(t_1 - t_2)$ zaman aralığı olarak kabul edilebilir. Sıcaklık değişikliği, taşıyıcı emisyon oranı t_1 ve t_2 emisyon oranı tarafından belirlenen sıcaklığa kadar değişir. Bu sıcaklıkta bir tepe sıcaklık eğrisi kapasitans üretilecektir.

Isı emisyon oranı sıcaklığın bir fonksiyonudur. Düşük sıcaklıklarda, yavaş ısı emisyon oranı çok küçük olduğu için gevşetir. Yüksek sıcaklıklarda hızlı ısı emisyon

oranı çok hızlı bir şekilde başlangıç durumuna getirir. Çıkış sinyali, sadece iki farklı zamanlarda kapasitans farkı ölçen iki kanallı yük vagonu entegratörü beslendiğinde

$$S(T) = C(t_1) - C(t_2) \quad (2.31)$$

şeklin sağ tarafında gösterildiği gibi pik elde etmek mümkün olur. Zirve sıcaklığında sürekli salınım süresi en ile ilgili S(T) ayırt edilebilir.

$$\frac{dS(t)}{de_n(t)} = 0 \quad (2.32)$$

$$S(T) \propto \exp(-en(T)t_1) - \exp(-en(T)t_2) \quad (2.33)$$

Formülünden yukarıdaki eşitlikten

$$e(T_{pik}) = \ln \frac{\frac{t_1}{t_2}}{(t_1 - t_2)} \quad (2.34)$$

çıkarılır. Farklı termal aktivasyon enerjileri, belirli bir aralık emisyon tuzakları için ayrı ayrı çözülebilir.

Şekilde de termal emisyon oranı sıcaklık bağımlılığı ile

$$en = \gamma T^2 6nae^{-Enq/k_B T} \quad (2.35)$$

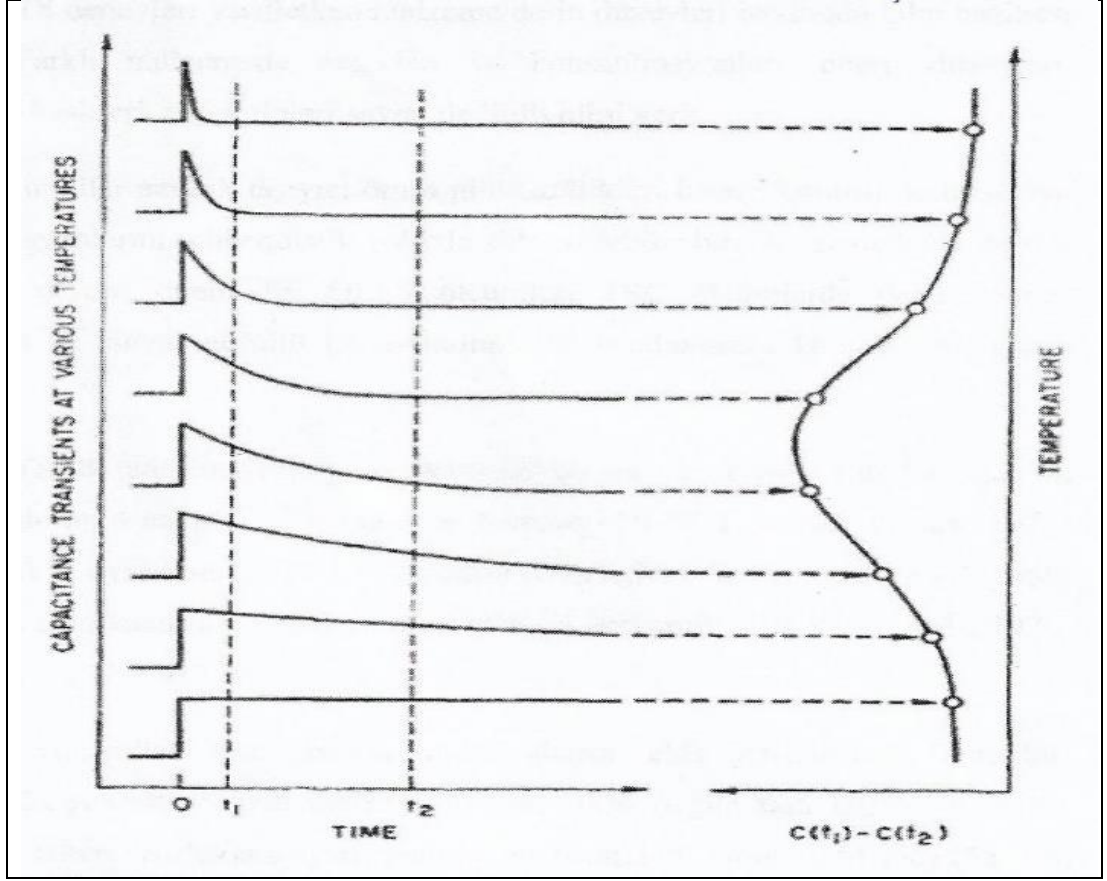
(elektron tuzağı emisyon oranı) şekilde düz bir çizgi oluşur.

Burada;

$$\gamma = 2\sqrt{3} \cdot m \cdot c \cdot (2\pi)^{3/2} k_B^2 \cdot m \cdot h^{-3} \quad (2.36)$$

(açık kesit yakalama)

E_n ; derin seviyenin termal aktivasyon enerjisi $(E_c - E_t) + \Delta E \sigma$, kafes titreşim değişim yerine). Bu parametreler kusurların imzası olarak bilinir.

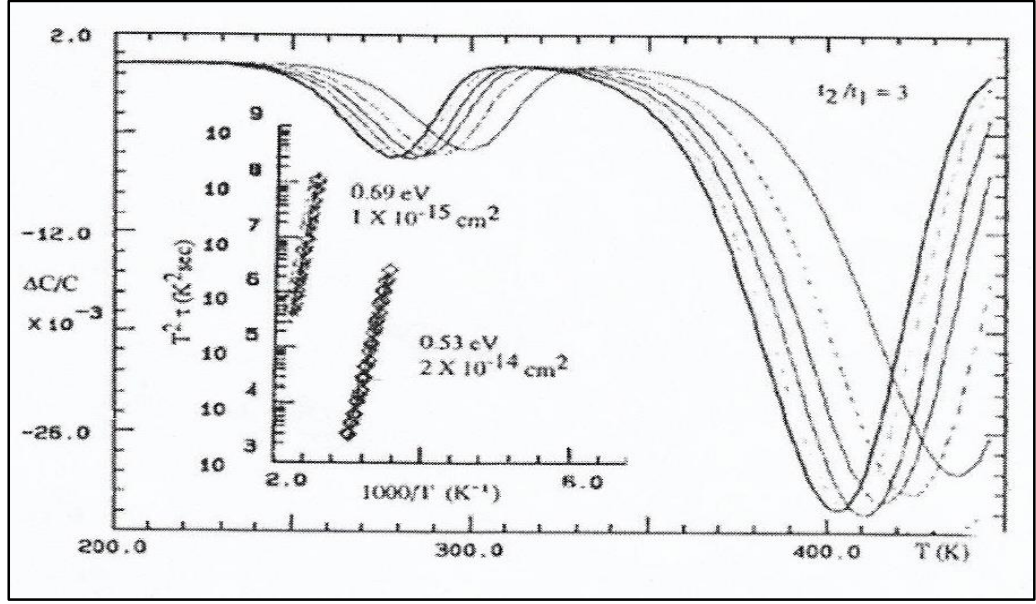


Şekil 2.12: Bir çift-kanal kutu entegratörü kullanılarak hızı algılama ilkesi.

DLTS deneyleri yarıiletken malzeme derin düzeyleri hakkında bilgi hazinesi gibidir. Farklı malzemede tuzakları ve konsantrasyonları, enerji düzeyleri, yakalama kesitleri, tuzak tipleri sayısı ile ilgili bilgi verir.

Bu bilgiler azınlık taşıyıcı ömrü gibi özellikleri hassas kontrol derin seviye konsantrasyonlarını mühendislik yoluyla elde edilebilir birçok yarıiletken cihazlar için son derece önemlidir. DLTS ölçümleri TSC ölçümlerde daha yüksek hassasiyet ve sinyal gürültü kasyonlarının yol ortalamasını kolaylaştırır.

DLTS ilk tanıtılması bu yana, deneysel birçok varyasyonu sunulmuştur. Bu değişikliklerin örnekleri, elektron ışın taraması DLTS yanında, foto uyarılmış DLTS ve mevcut veya iletkenlik DLTS.



Şekil 2.13: Tipik spektrum ve Arrgenius.

bu yöntemler söz konusu materyallerin elde edilmesinde sorunları azaltılmada yüksek dirençli malzemeler için etkili değil. Yani DLTS, etkin bir Schottky temas zorluklara yarı yalıtım malzemeleri tatbik edilemez. Bu yüzden elektrik uyarım özellikle fotoğraf kaynaklı geçici spektroskopisi ile gerçekleştirilir.

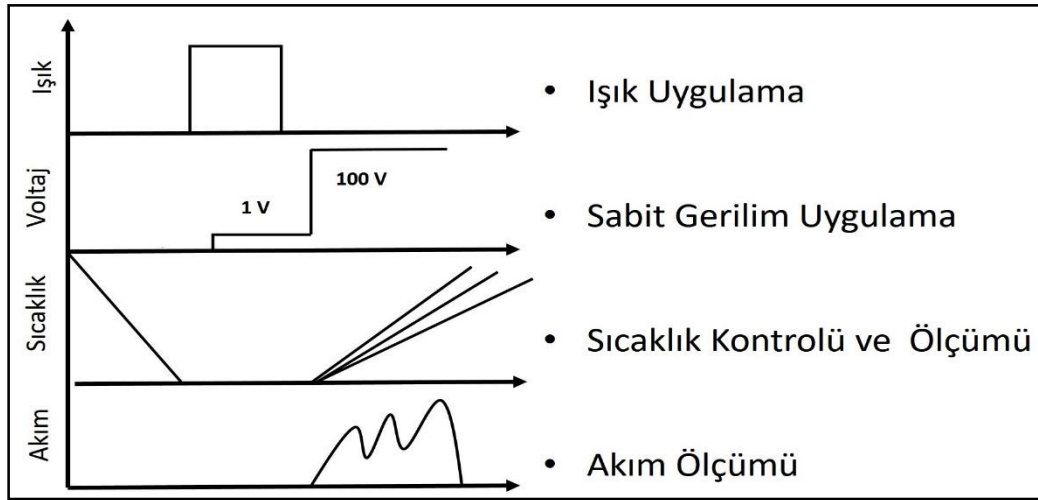
3. DENEYSEL DETAYLAR

Bu bölümde ölçümlerin gerçekleştirilebilmesini sağlayan cihazlar ve yapılan ölçümlerin aşamaları tanıtılacaktır.

3.1. Isıl Uyarılmış Akım Ölçümleri

Isıl uyarılmış akım (IUA) ve piro-akım (PA) ölçümleri soğutma Sumitomo Cryagenics model bir Helyum pompası kapalı sistem kroyastad ile sağlanmaktadır. Deneyler Ilmvac model bir vakum pompası ile 10^{-3} mbar mertebelerindeki basınç altında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan helyum pompası ile kroyastad ölçüm odacığının sıcaklığı 15 K değerine kadar inilebilmektedir. IUA ölçümleri 15 -300 K sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. IUA ölçümleri 100 V gerilim uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ön gerilim değeri ise 1 V olarak belirlenmiştir. Şekil 3.3 IUA deneylerinde ışık ve elektriksel gerilimin hangi sürelerle uygulandığı ve süreçlere ilişkin uygulama aşamaları şematik olarak gösterilmiştir.

PA ölçümleri ise 5-10 kV/sm elektrik alan uygulayarak yapılmıştır.



Şekil 3.1: Isıl uyarılmış akım ölçümü süreçlerinin şematik gösterimi.

3.2. Deneysel Düzenek

Deney ortamı ve ölçümlerde kullanılan cihazlar aşağıdaki gibi görsel özellikleri ve şematik gösterimleri ile yer almaktadır. Deneylerde akım ölçümü için Keithley

6485 model bir pikoampermetre pirocurrent ölçümlerinde ise yüksek gerilim değerleri uygulayabilen bir güç kaynağı kullanılmıştır. Sıcaklık kontrolü için ise Lakeshore 340 sıcaklık kontrol cihazı kullanılmıştır ve kristalin üzerine yerleştirildiği tutucu üzerinden sıcaklık kontrolü pt100 sensörü ile sağlanmıştır. Bilgisayar kontrollü veri toplama işlemi bir kişisel bilgisayar ve Labview programı ile sağlanmıştır.

Şekil 3.2: Ölçümlerin gerçekleştirildiği kapalı sistem bir helyum kompresör ile



soğutulan kroyostat.



Şekil

Yüksek voltaj uygulayabilen güç kaynağı.

3.3:



Şekil 3.4: Sıcaklık kontrolü için kullanılan Lakeshore 340 sıcaklık kontrol cihazı.



Şekil 3.5: Ölçümlerde kullanılan Ilmvac vakum pompası.

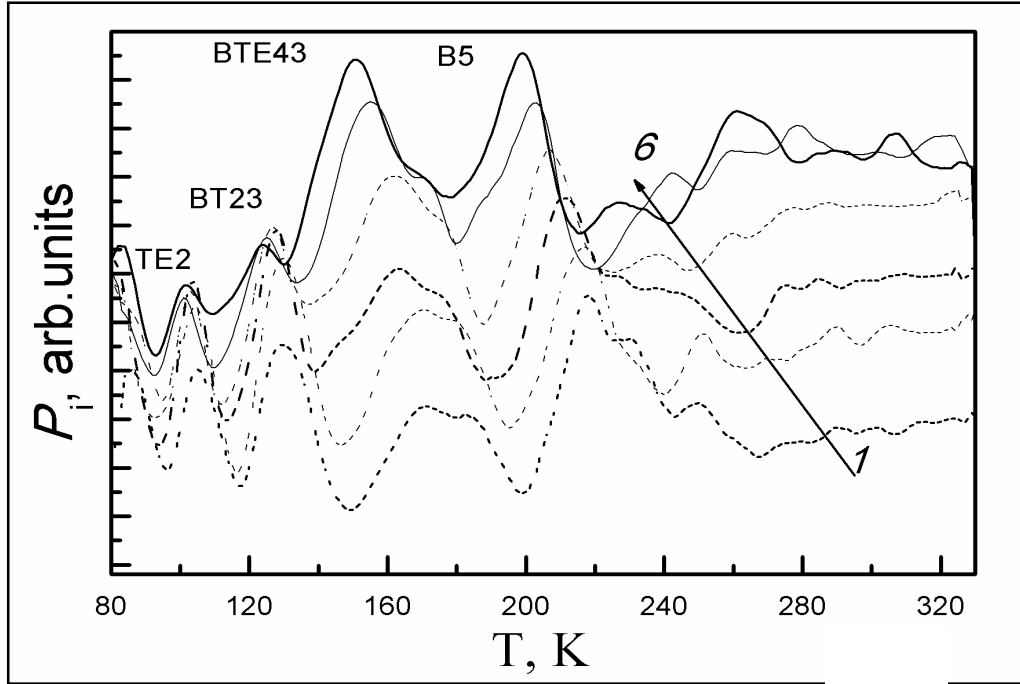


Şekil 3.6: Akım ölçümleri için kullanılan Keithley 6485 pikoampermetre.

4. DENEY SONUÇLARI VE YORUMLAR

4.1. Tuzakların Karakterizasyonu

Şekil 4.1 La katkılı TlInS_2 kristalinin tipik bir FİGAS'ını göstermektedir. Spektra eğrisinin, ayırt edilebilir bir maksimuma sahip kuyuya benzer şekillere (eğrilere-yapılara) sahip kısmı TlInS_2 kristalinin faz geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklık bölgesinde gözlenmiştir.



Şekil 4.1: La katkılı TlInS_2 kristalinin termal emisyon oranına karşılık gelen PICTS spektrası: (1) 2200 s^{-1} ; (2) 1350 s^{-1} ; (3) 770 s^{-1} ; (4) 408 s^{-1} ; (5) 213 s^{-1} ; (6) 108 s^{-1} ; ve (7) 54 s^{-1} . Spektra y eksenı boyunca kaymıştır ve elde edilen en yüksek değeri pıke göre normalize edilmiştir.

FİGAS tekniği kullanılarak La katkılı ve katkısız TlInS_2 kristalinde çok sayıda kusur tespit edilmiştir [13]. Gözlenen bu kusurların çoğunun TlInS_2 kristalinin ana yapı örgüsünün sahip olduğu yerel kusurlar olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada gözlenen kusur yüklenme etkileri farklı şekillerde katkılanmış TlInS_2 kristali ile yapılmış önceki çalışmalarla elde edilen bulgularla karşılaştırılabilir.

Bu yüzden kusurların isimlendirilmesinde aynı harflendirme kullanılmıştır. Katkılı ve katkısız TlInS_2 kristallerinde bulunan bu kusurların etkilerini kıyaslamaya yönelik yapılan bir çalışmada BTE43 derin seviye tuzağının katkılama sonucu olduğu ortaya konulmuştur. Ayrıca La safsızlıkları ile katkılanmış TlInS_2

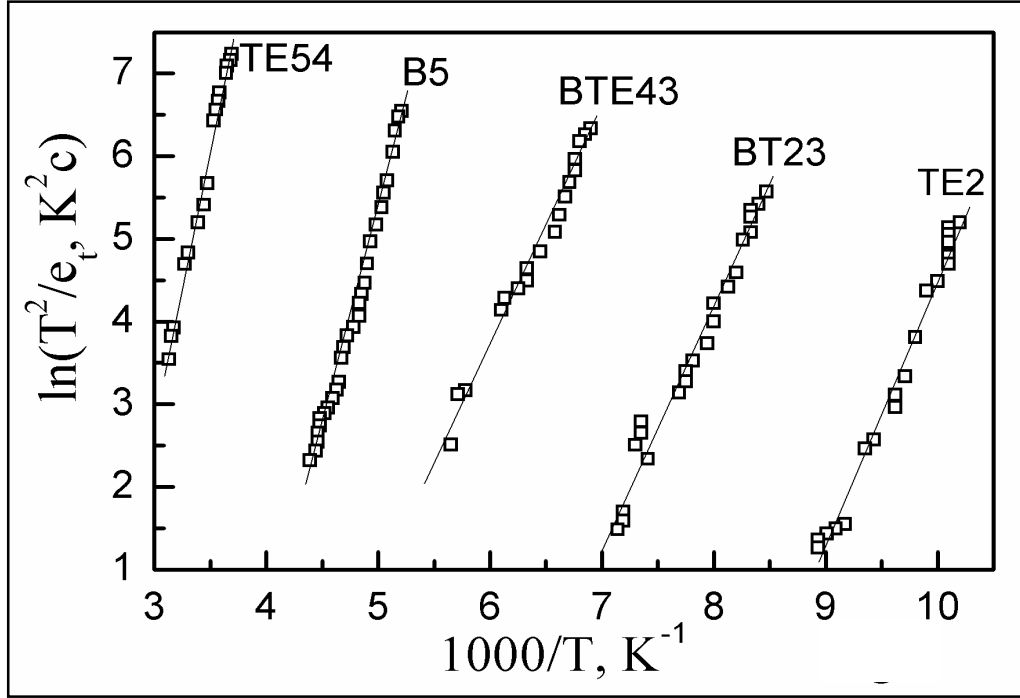
kristallerinde gözlenen (bulunan bu kusurun) BTE43 derin seviye kusurunun ortak bir kökeni olduğunu düşündürmektedir.

Kaydedilmiş spektra setinde maksimum değerin elde edildiği sıcaklık pozisyonundaki kayma farklı karakteristik relaksasyon zamanlarına karşılık gelir (belirtir) ve ışıkla uyarma ile doldurulmuş kusurlardan termal aktivasyon ile yayınlamasına kıyasla daha iyidir. PICTS tekniği ile merkezlerde (elektron veya hol) tuzaklanmış taşıyıcıların yük işaretini belirlemek mümkün değildir. Çoğunluk yük taşıyıcılarını yakalayan tuzak merkezlerinin çoğunlukla geniş bant aralığına sahip yüksek dirençli yarıiletkenlerde gözleendiği için tespit ettiğimiz kusurların yine bu şekilde kusurlar olduğunu kabul ediyoruz (öneriyoruz) [14].

Tespit edilen tuzakların termal yayınlanma oranının sıcaklık bağılılığı Şekil 2'de gösterilmiştir. Arrhenius eğrisi ($\ln \frac{T^2}{e_t}$ ne karşı $10^3/T$ grafiği) ile elde edilen en iyi fitlerle kusurların aktivasyon enerjisi ve yakalama tesir kesitleri hesaplanmıştır. σ_t değerlendirilirken hollerin etkin kütlesi $0.14 m_0$ olarak kabul edilmiştir [15]. Tablo 1'de tuzakların hesaplanmış aktivasyon enerjileri E_t ve etkin yakalama tesir kesiti σ_t değerleri gösterilmiştir. Ayrıca tablo 4.1'deki ilk kolonda, tuzaklardan kaynaklanan sinyallerin tespit edildiği sıcaklık aralıkları ($\Delta_0 T$) gösterilmiştir.

4.1.1. La Katkılı TlInS₂ Kristalinde Alan-İndüklemeli Isıl Uyarılmış Depolarizasyon Etkileri

IUDA, iki elektrot arasına yerleştirilmiş yüksek dirençli yarıiletken malzemedeki yüklü tuzak merkezleri tarafından oluşturulmuş alan indüklenmiş depolarizasyon akımını işaret eder. IUDA metodunda kristal farklı sıcaklık aralıklarında uygulanan bir dış elektrik alan altında kutuplandırılmıştır. Bu kutuplanma bir ilk sıcaklıktan yeteri kadar düşük bir sıcaklığa kadar soğutulması ile termal enerjiden kaynaklanan depolarizasyonu önlemek "dondurulmuştur".



Şekil 4.2: La katkılı TlInS_2 kristalinde bulunan derin seviye tuzaklarındaki yük taşıyıcı emisyon oranının sıcaklığın bir fonksiyonu (T^2 düzeltmesini hesaba katılmıştır) olarak grafiği. Düz çizgiler deneysel verinin fitlenmesi ile oluşturulmuştur.

Daha sonra ise alan kapatılır ve kristal denge polarizasyonuna ulaşana kadar bir süre tavllanır (sıcaklıkta beklenir) [16]. Son olarak bir elektrometreye kısa devre olarak bağlanmış kristal sabit bir ısıtma hızı ile ısıtılır. IUDA spektrası, elektrometre ile kaydedilmiş akım verisinin sıcaklığın fonksiyonu olarak grafik haline getirilmesi ile oluşturulur. Spektroda bulunan çeşitli pikler kristalde gerçekleşen farklı süreçlere (yükli kusurların veya dipol merkezlerinin depolarizasyonu, yüklerin salınması, faz geçişi ile ilgili polarizasyon değişimi) işaret etmektedir. Bu sebeple depolarizasyon fenomeni yükli kusur merkezleri ve kristal içerdiği safsızlıklardan kaynaklanan yüklerin yönelimi veya kristal içindeki göçlerinin (yer değişimi) bir sonucudur. Şekil 4.3'dan Şekil 4.4'e kadar farklı sıcaklık değişim hızlarının lantanyum katkılı TlInS_2 tek kristalinde gözlenen ısıtılmış depolarizasyon akımına (I_d) olan etkileri gösterilmektedir. Veriler kristalin farklı elektrik alanlar altında aynı sürede (zaman aralığı) soğutulması ile elde edilmiştir. Oluşturulan IUDA farklı ısıtma hızları altında ölçülmüştür. Şekil 4.3. La katkılı TlInS_2 kristalinin 300 V/cm dc alan altında kutuplandırılmasının ardından kaydedilen IUDA tepkisinin (cevabının) bir kısmını göstermektedir. Kristal oda sıcaklığından 77 K' e kutuplayıcı alan altında

soğutulmuştur. Isıtma hızı ise 15 K/dk olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.3'deki IUDA spektrası iki bölgeye ayrılabilir.

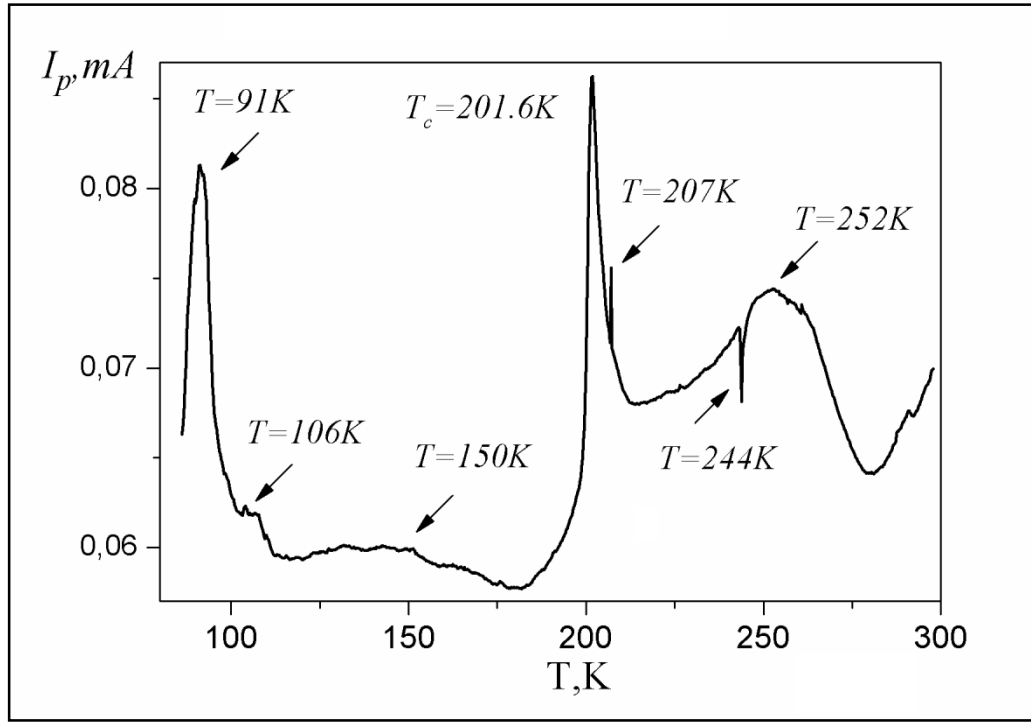
Tablo 4.1. La katkılı TlInS₂ kristalinin tuzak parametreleri.

Kusur	$\Delta_0 T$	E_t	σ_t
	K	eV	cm ²
TE2	98-115	0.2	2.2×10^{-14}
BT23	115-135	0.25	5.7×10^{-13}
BTE43	145-181	0.3	5.0×10^{-15}
B5	190-229	0.29	4.9×10^{-16}
TE54	270-320	0.57	1.0×10^{-13}

Düşük sıcaklık bölgesi üç pik içerir: Biri 91 K civarında ve keskindir ve yaklaşık 106 ve 150 K civarında düzleşmiş pikler bulunmaktadır. T_c ve 250 K sıcaklık aralığındaki yüksek sıcaklık bölgesinde ise çeşitli pikler gözlenmektedir. T_c sıcaklığında IUDA' da görülen keskin pik ise düzenli faz geçişinin Curie noktasında spontan polarizasyonun artışı ile ilişkilidir. Ayrıca ek olarak La katkılı TlInS₂ kristalinin IUDA sinyalinde düzensiz faz bölgesinin içindeki 207 K sıcaklığında kayda değer bir pik gözlenmektedir.

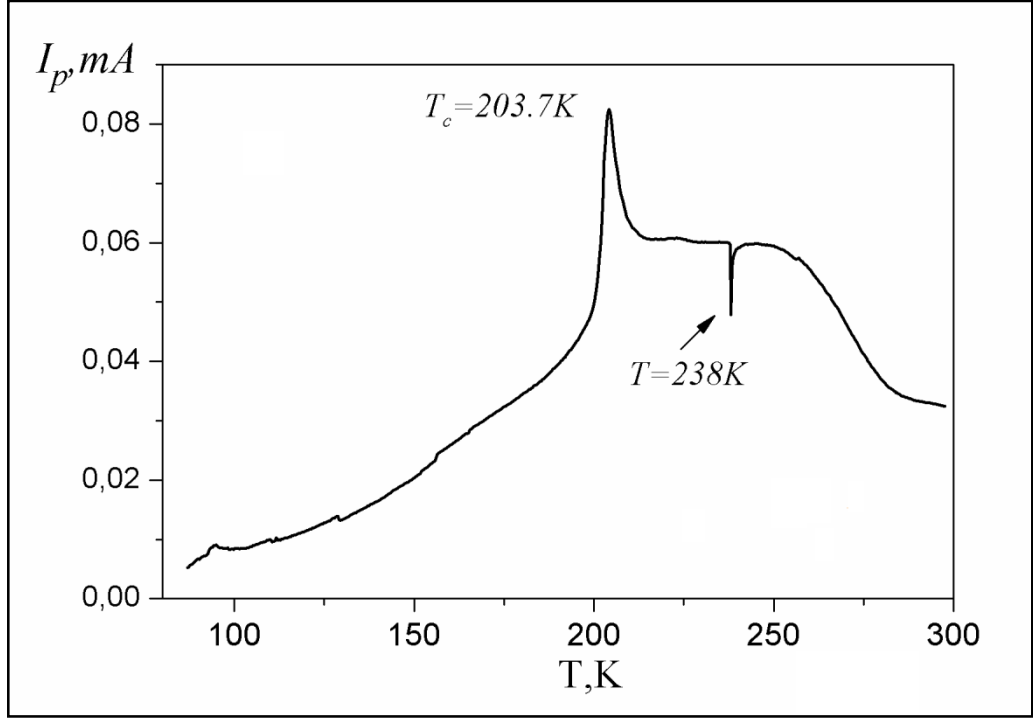
5. ve 17. referansta belirtildiğine göre 207 K civarındaki faz geçişi düzensiz faz modülasyonu ile etkileşen içsel kusurlardan kaynaklanmaktadır. Faz geçişi, kusurların DC'lerin yeni bir topolojik dizilimine neden olacak şekilde bazı pertürbasyonlara neden olması ile ortaya çıkar. T_i sıcaklığından yüksek sıcaklıklarda piklerin ortaya çıkışı faz geçişi ile bağlantılı olduğu düşünülmez. Bunlar, yüklü bazı kusurların ısısal depolarizasyon fenomeni ile ilgili olabilirler. IUDA sinyalinin 244 K civarında işaret değiştirdiğine dikkat çekmek gerekir.

Şekil 4.4 ve 4.5'de benzer başlangıç koşullarında gerçekleştirilmiş bir IUDA ölçümünün grafiği oluşturulmuştur fakat bazı farklılıklar gözlenmiştir. Şekil 4.4'de kristalin uygulanan 300 V/cm değerindeki alan altında kutuplandırıldıktan sonra ölçülen I_d akımının sıcaklık bağılılığı gösterilmiştir. Isıtma hızı 20 K/dk olarak sabit tutulmuştur. Şekil 4.4'den görülebileceği gibi düşük sıcaklık bölgesinde I_d(T) eğrisinde hiçbir pik oluşmamaktadır.



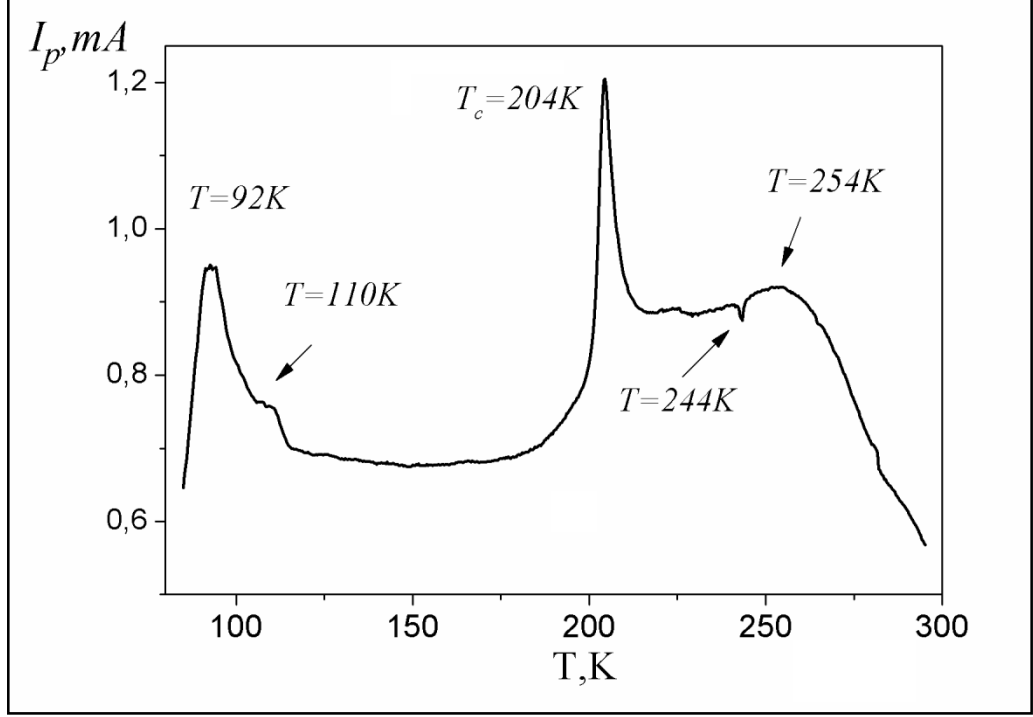
Şekil 4.3: La katkılı TlInS₂ kristalinin farklı şartlar altında kutuplandırılmasından sonra kaydedilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrileri. Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 300 V/cm’lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 15 K/dk’lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.

IUDA eğrisinin maksimumu Curie noktası yakınında, 203.7 K sıcaklığında gözlenmiştir ve negatif işaretli keskin bir pik de 238 K civarında kaydedilmiştir. Şekil 4.3’de görülen, 250 K civarındaki geniş pik ısıtma hızı arttıkça daha da belirsizleşmektedir. Açıkça belirtmek gerekir ki Şekil 4.4’deki IUDA spektra eğrisinin şekli Şekil 4.3’de gösterilen IUDA spektra eğrisinin şeklinden önemli ölçüde farklıdır. IUDA spektrasının ısıtma hızına, kutuplama zamanına, kristale uygulanan kutuplayıcı dc elektrik alanın yoğunluğuna, kutuplayıcı alanın uygulandığı sıcaklık aralığına ve v.s. gibi durumlara karşı oldukça hassas olduğunu belirtmek önemlidir [16].



Şekil 4.4: Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 300 V/cm’lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 20 K/dk’lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.

Şekil 4.5 La katkılı $TlInS_2$ kristalinin 5 kV/sm alan altında kutuplandırıldıktan sonraki IUDA spektrasının sıcaklıkla ilişkisini göstermektedir. Sıcaklık değişim hızı 20 K/dk olarak sabitlenmiştir. Kristalin 5 kV/sm’lik dış alan altında kutuplandırıldığında, IUDA sinyali belirgin bir şekilde daha yüksek (güçlü) olarak elde edilmiştir. 5 kV/sm’lik dc alan altında kutuplandırılmış La katkılı $TlInS_2$ kristali ile elde edilmiş IUDA sinyal değerleri Şekil 4.3’dekinden 20 kat büyüktür ve niteliksel olarak Şekil 4.3’de gösterilen eğriye benzemektedir. Şekil 4.5’den görülebildiği gibi IUDA sinyal yoğunluğu (şiddeti) ölçüm öncesinde kristale uygulanan kutuplayıcı alanın büyüklüğü ile güçlü bir şekilde ilişkilidir.

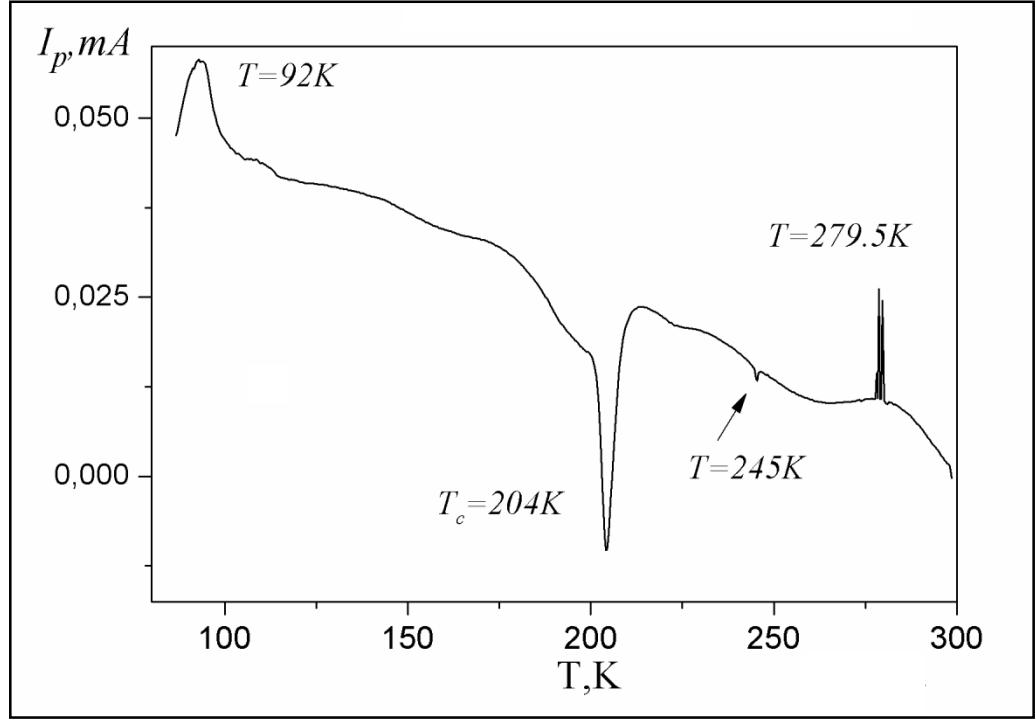


Şekil 4.5. Kristal oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 5 kV/cm’lik bir elektrik alan altında soğutulması. TSDC 20 K/dk’lık sabit ısıtma hızı ile ölçülmüştür.

Bilindiği gibi IUDA eğrilerinin analizi, bütün depolarizasyon süreçlerine bağlı olan toplam relakse yük (Q) baz alınarak gerçekleştirilir ve aşağıdaki denklem yardımı ile hesaplanır:

$$Q = - \int_{t_1}^{t_2} I_d(t) dt = - \frac{dt}{dT} \int_{T_1}^{T_2} I_d(T) dT \quad (4.1)$$

Denklemdaki t ; zamanı, T ; sıcaklığı ve dt/dT ; ısıtma hızıdır. Sıcaklık arttırıldığı için dt/dT oranı pozitif değerlidir. Kristale uygulanan voltajın işaretinin toprağa göre pozitif olduğu göz önünde bulundurulursa, akım pozitif değerli ise bu akımın heteroyük (elektrotun zıt işaretlisi olacak şekilde) ve eğer akım negatif değerli ise bu sefer de bu akımın homoyük tarafından üretildiği kabul edilebilir.



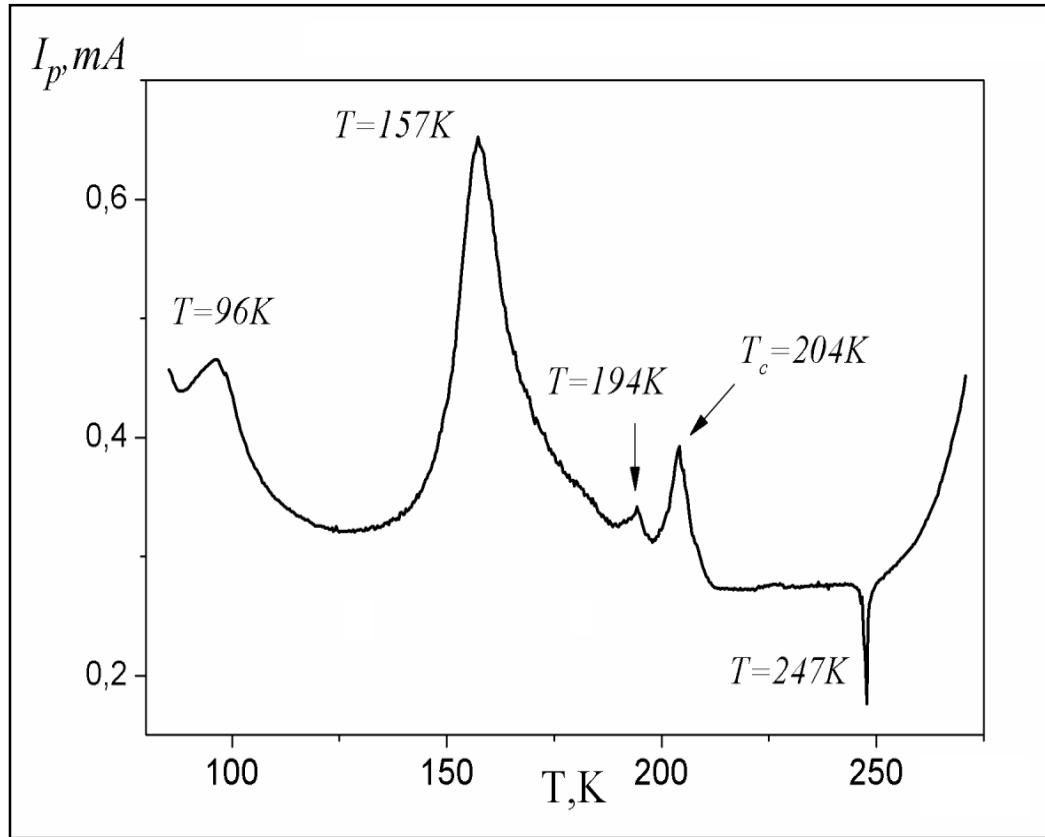
Şekil 4.6. Ölçüm Şekil 4.5'dekine benzer şekilde yapılmıştır fakat bu 77 K'de elektrotlar kısa devre olarak bağlanmıştır.

La katkılı TiInS_2 ferroelektrik yarıiletken kristalinin ön gerilim alanındayken ki ilk polarizasyonundan sonra hetero ve homoyüklerden kaynaklanan iç elektrik alana, geçici artık uzay yüklerinin kristalin hacim bölgesinde birikebildiği kadar elektrotlara (yüzey elektrik alanı) doğrudan komşu bölgelerdeki tuzak seviyelerinde de birikmeleri neden olabilir [18, 19]. Kristalin hacim bölgesindeki homoyükler tarafından oluşturulmuş bir iç elektrik alanın yönü uygulanan alanın yönüne zıttır. Kısa devre tekniğini kullanarak La katkılı TiInS_2 kristalinin hacim bölgesinde oluşan iç elektrik alanlardan IUDA sinyalini ayırabiliriz. Oda sıcaklığından 77 K sıcaklığına kadar 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırılan kristalin, yüzeyinde "donmuş" olan iç elektrik alanı gidermek için iki elektrot birbirine kısa devre olarak bağlanır ve 10 dakika kadar bu şekilde bekletilir. IUDA spektrası kristal, 77 K'den 300 K'e kadar sabit 200 K/dk'lık ısıtma hızı ile ısıtılırken elde edilen verilerle oluşturulur. Elde edilen bulgular Şekil 4.6'de gösterilmiştir. Şekilden IUDA sinyalinin 92 K civarında maksimum olduğu bir sıcaklık noktasına sahip olduğu görülebilir. Sonrasında ise artan sıcaklıkla beraber bir düşüş görülmektedir. Curie noktasına yaklaşıırken IUDA sinyali hızlıca azalır ve yaklaşık 204 K (T_c) sıcaklığında bir pik yaparak negatif olmaktadır.

Şekil 4.6'de 245 K civarında ters çevrilmiş bir pik ve 280 K' de ise belirgin bir pik görülmektedir.

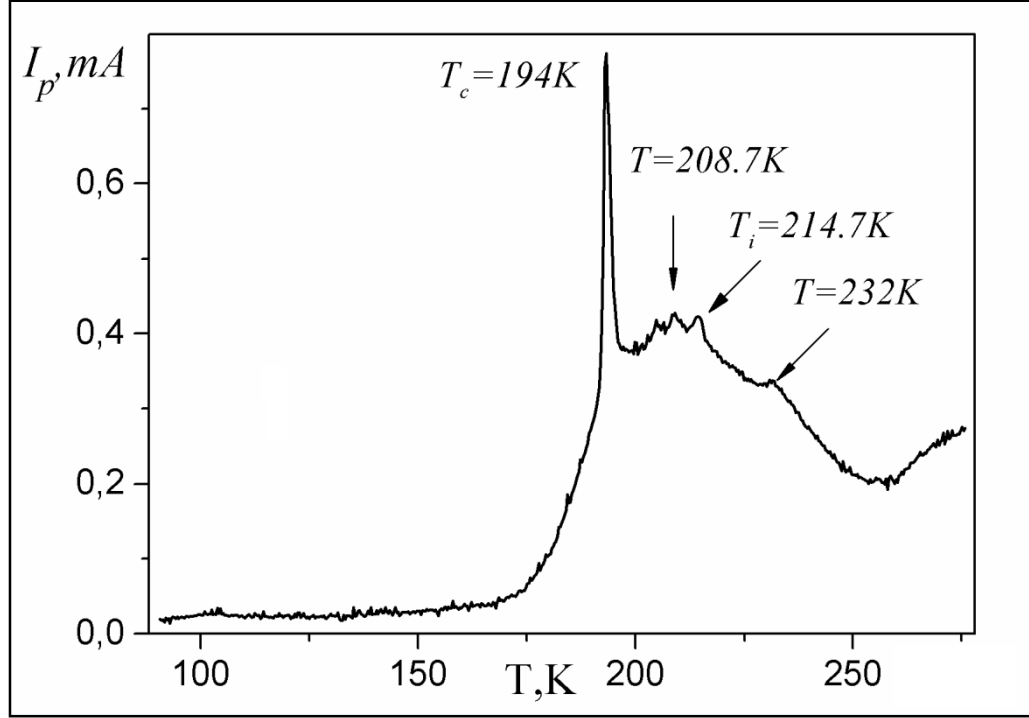
Şekil 4.7 La katkılı TlInS_2 kristalinin 77 K'de 5 kV/cm büyüklüğündeki dc elektrik alan altında yaklaşık 10 dakika kadar kutuplandırılmasında sonra kaydedilen IUDA spektrasının sıcaklıkla ilişkisini göstermektedir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.7' ten görülebileceği gibi farklı kutuplandırma koşullarına tabi tutulan La katkılı TlInS_2 kristalinin IUDA spektrasının sıcaklığa bağlı davranışında prensipsel olarak bir fark yoktur. Tek farklılık 157 K ve 194 K civarındaki normal yönlü piklerdir. Kristal, farklı sıcaklık aralıklarında bir elektrik alanı altında kutuplandırıldıktan sonra $I_d(T)$ eğrisi üzerinde benzer piklerin gözlenmesi ilgi çekicidir. Bu fazladan piklerin ortaya çıkışı kristalin kutuplandırılması sürecinde indüklenen ek polarizasyondan kaynaklanıyor olması mümkündür.

Şekil 4.8, 210-300 K sıcaklık bölgesinde 5 kV/sm büyüklüğündeki bir dc elektrik alan altında kutuplandırılmış La katkılı TlInS_2 kristalinin IUDA spektrasının sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değişimini göstermektedir.



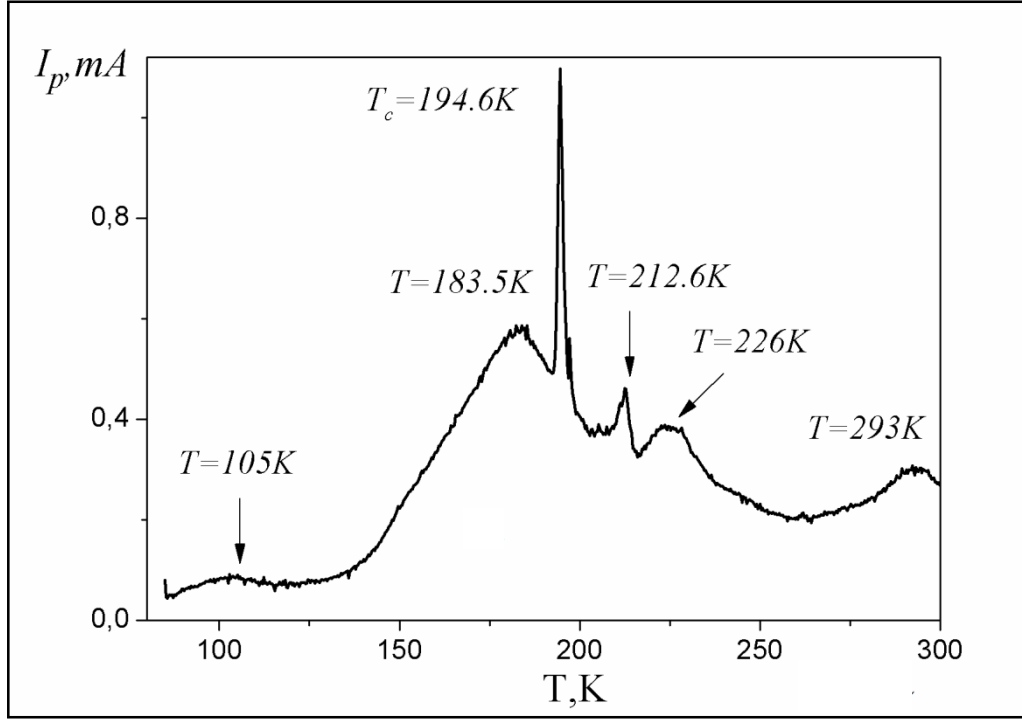
Şekil 4.7: Kristalin, 77 K'de 5 kV/cm'lik alan altında kutuplandırıldıktan sonra sıcaklığa bağlı kaydedilen TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.

Şekilde bazı piklerin sıcaklıkları gösterilmiştir. Beklenilmedik bir şekilde, $T < T_c$ sıcaklık bölgesinde hiç bir pik gözlenmemektedir. Şekilden görülebildiği gibi IUDA'nın maksimum olduğu sıcaklığa karşılık gelen T_c sıcaklığı önceki verilerle kıyaslandığında küçük bir miktar daha düşüktür.



Şekil 4.8. Soğutulurken sadece 300 K-210 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.

Şekil 4.8'de oklarla gösterilen 208 K ve 215 K civarındaki iyi tanımlanmış küçük (zayıf) pikler düzensiz fazın içindeki T_i sıcaklığındaki akım eğrisinde görülen anomalilere karşılık gelmektedir [19]. Fakat belirtmek gerekir ki düzensiz faz, tersinme simetrisinin merkezini içerdiği için bu faz bölgesinin içerisinde ortalama polarizasyonun sıfır olması gerekir [10,11]. Bu şu anlama gelmektedir; dış elektrik alan altında kutuplama sürecinde düzensiz faz içinde, hizalanmış polarizasyon indüklenmez. Bu sonuçlar, elektrik alan ve düzensiz faz içindeki hizalanmış polarizasyon arasında bir bağlantının varlığını desteklemektedir. Düzensiz faz içindeki korunan (saklanan-tutulan) polarizasyona esas katkıların kusurlardan geldiğini düşünüyoruz. Bu sonuçlar diğer deneysel bulgularla beraber daha sonra tartışılacaktır.

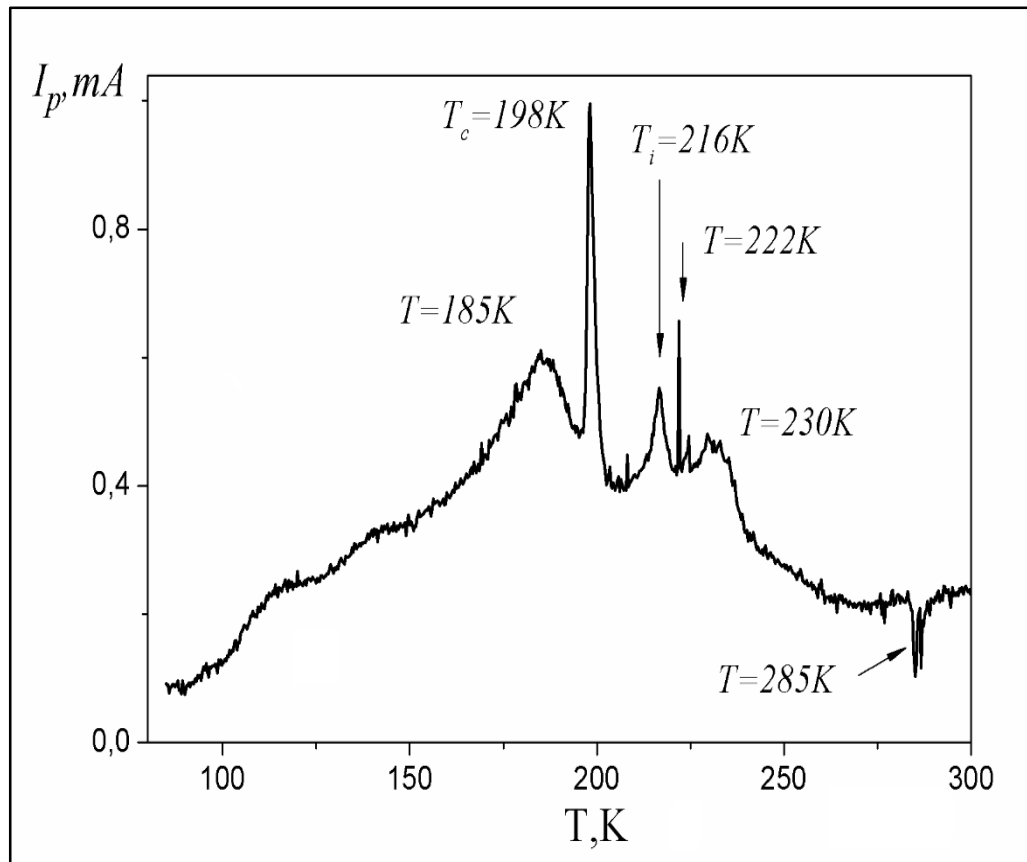


Şekil 4.9 Soğutulurken sadece 300-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

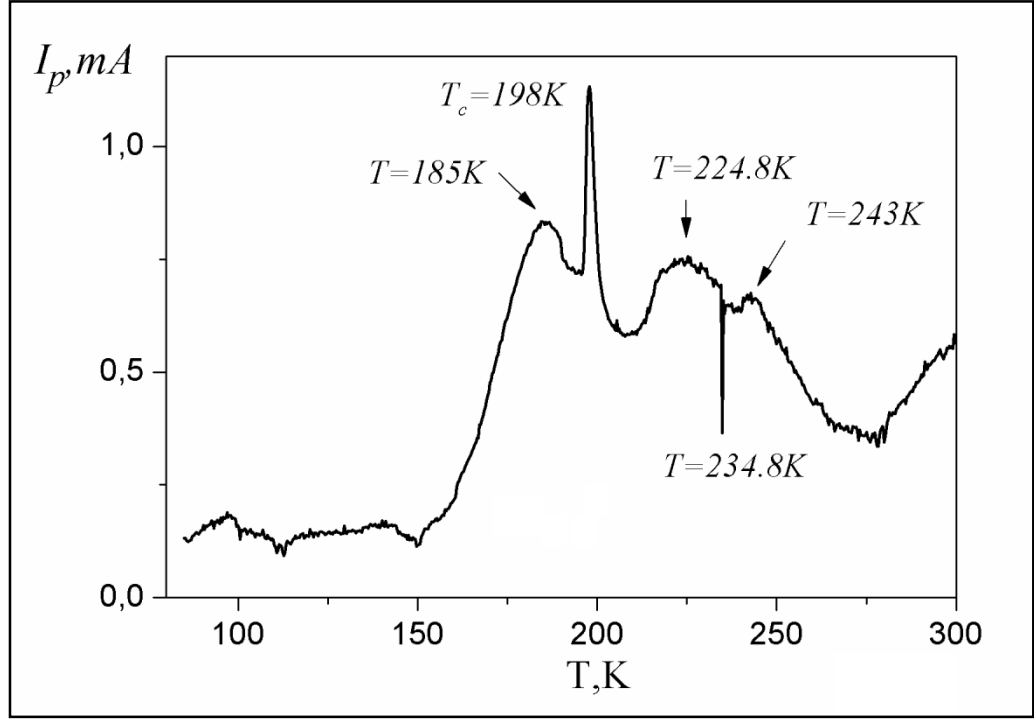
Şekil 4.9’dan 4.4.13’e kadar La katkılı TIInS₂ kristalinin farklı sıcaklık bölgelerinde kutuplandırıldıktan sonra kaydedilen, sıcaklığın bir fonksiyonu olarak oluşturulan tipik IUDA eğrilerinin bir seti gösterilmektedir. Kutuplandırma sıcaklık bölgeleri, TE54 ve B5 (Tablo 1) tuzaklarının aktif olduğu sıcaklık aralıkları ile uyumlu olarak seçilmiştir.

Daha önceki ölçümlerde olduğu gibi kristal, 5 kV/cm büyüklündeki elektrik alan ile kutuplandırılmıştır. Sıcaklık sıvı nitrojen sıcaklığından oda sıcaklığına kadar 20 K/dk’lık sabit ısıtma hızı ile ısıtılmıştır.

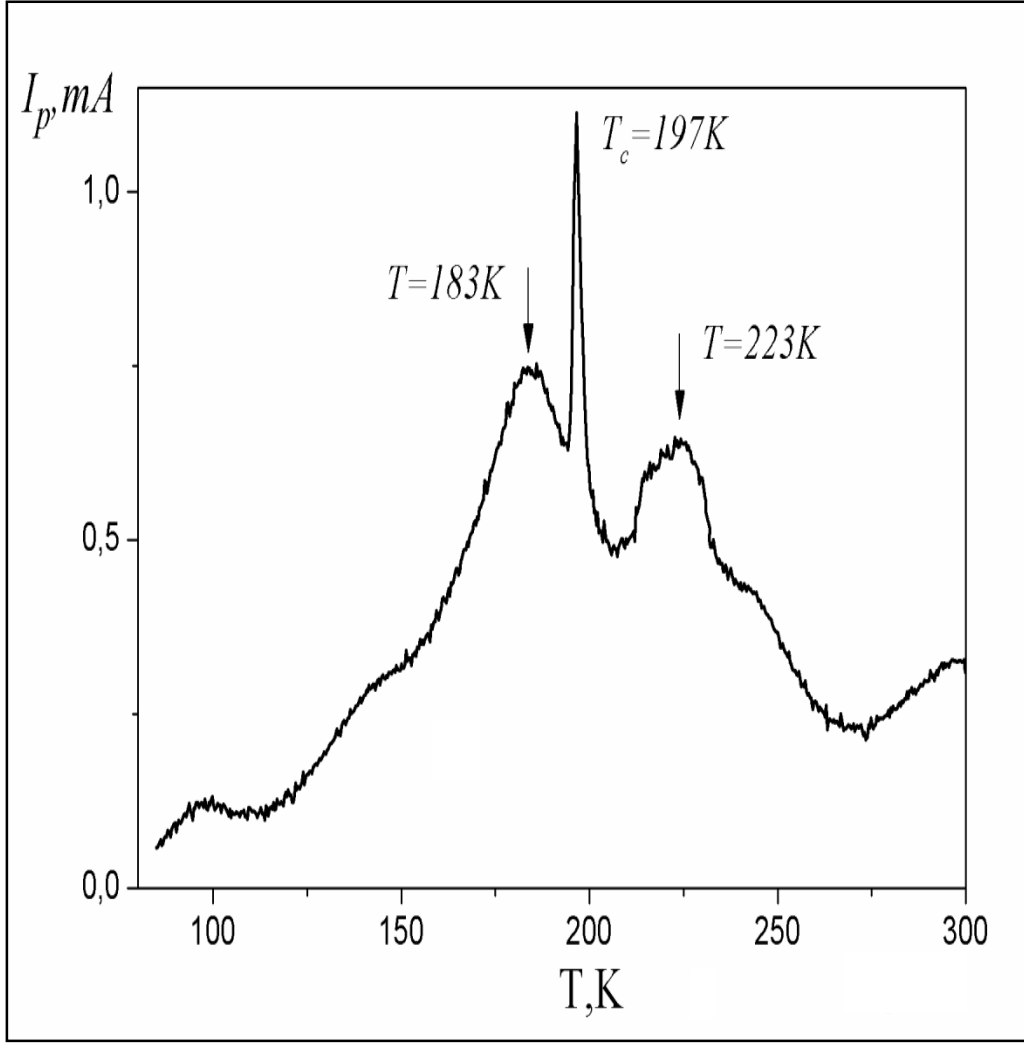
Şekil 4.9'daki bütün eğriler kutuplanma rejimlerine bağlı olarak farklı özellikler göstermektedirler. Curie geçişi noktasında $I_d(T)$ eğrisinin sıra dışı bir maksimumu bütün eğrilerde açıkça tanımlanmıştır. T_c sıcaklığında $I_d(T)$ eğrisinin maksimumuna karşılık gelen sıcaklık 190 ve 198 K arasındaki sıcaklık bölgesinde gözlenmiştir. Şekil 4.9'daki $I_d(T)$ eğrisi belirgin bir şekilde diğerlerinden farklıdır. Kural olarak, yaklaşık 100 K sıcaklığındaki zayıf bir pik ve 180 K'de güçlü bir pik olmak üzere iki ana pik bütün eğrilerde gözlenmiştir. Ayrıca $I_d(T)$ eğrisinin 220-240 K sıcaklık aralığında değiştirilmiş (modifiye) şekil ve sıcaklık pozisyonlarına sahip ek anomalileri bütün eğrilerde (ölçümlerde) kaydedilmiştir.



Şekil 4.10. Soğutulurken sadece 290-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.



Şekil 4.11. Soğutulurken sadece 260-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

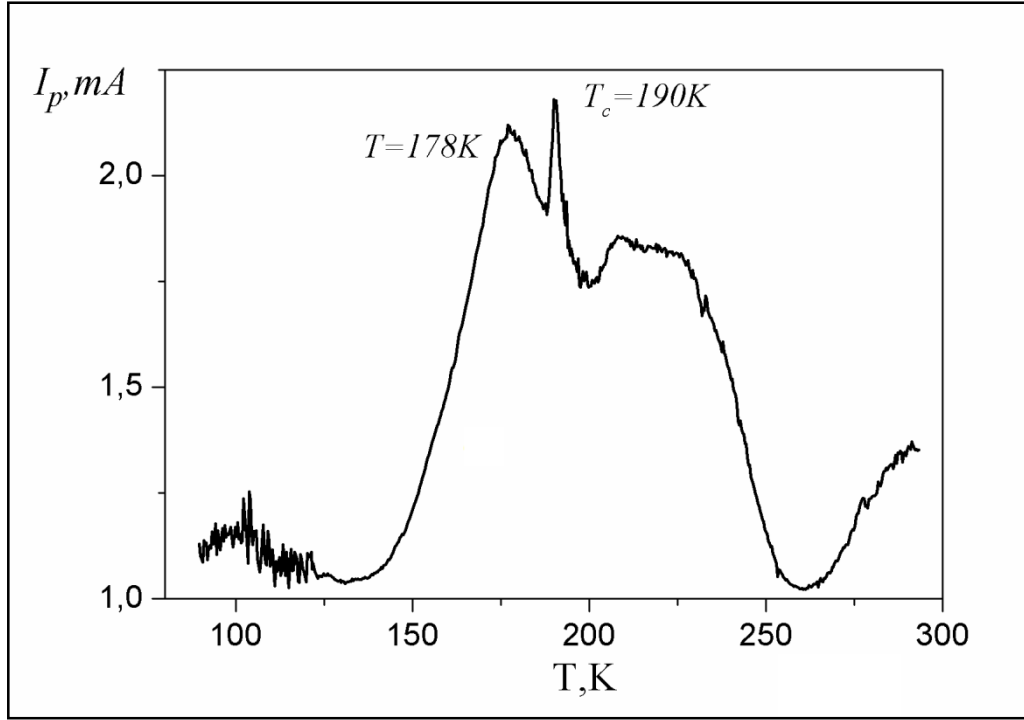


Şekil 4.12. Soğutulurken sadece 240-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 sırası ile 220-80 K ve 190-80 K sıcaklık aralıklarında soğutulurken 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırılan La katkılı $TlInS_2$ kristalinin IUDA spektrasının sıcaklığa bağlı grafiğidir. Kristalden IUDA, 20 K/dk’lık sabit ısıtma hızı ile elde edilmiştir. Buradaki sıcaklık aralıkları B5, BTE43, BT23 ve TE2 (Tablo 4.1) derin seviye kusurlarının termal aktivasyon aralıkları (termal aktivasyon sıcaklık aralıkları) ile ilişkilidir.

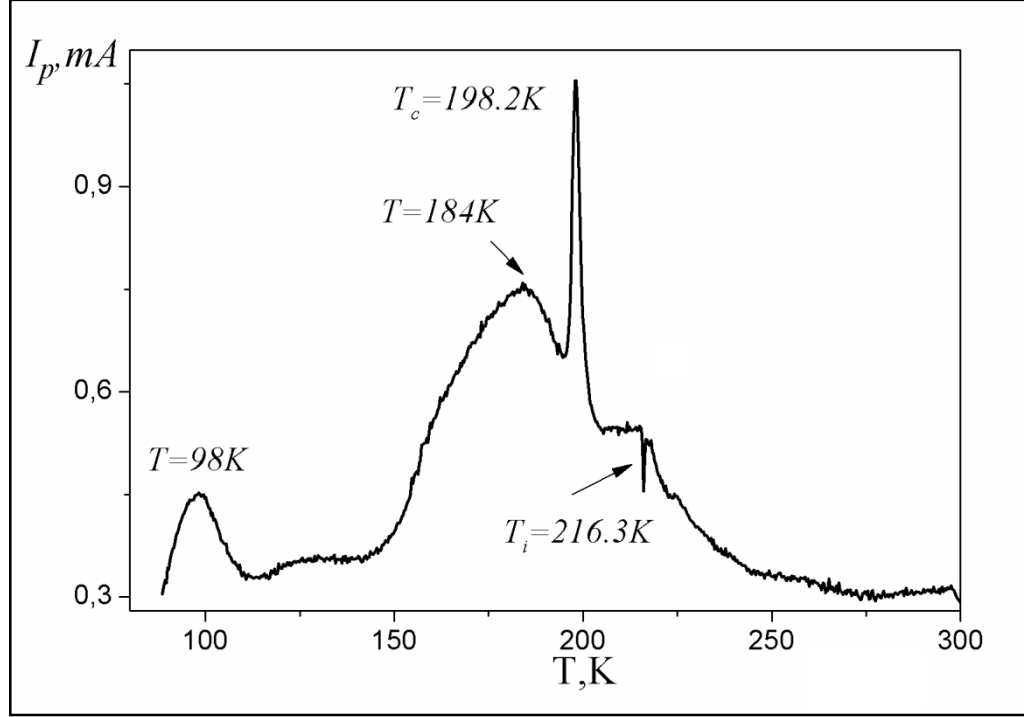
B5 derin seviye kusurunun termal aktivasyonunun gerçekleştiği sıcaklık aralığı, La katkılı $TlInS_2$ kristalinin sahip olduğu bir dizi yapısal faz geçişi sıcaklık bölgelerini içerir. Bu durum, kusurların La katkılı $TlInS_2$ kristalinin sahip olduğu yapısal faz geçişleri üzerine etkileri ile ilgileniliyorsa göz önünde bulundurulmalıdır. Buradaki önemli nokta B5 kusurunun elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra dipol

moment kazanması zorunluluğudur. Böyle bir durumda kristalde ortaya çıkan kuazi-statik iç elektrik alan, 190-220 K sıcaklık aralığında aktif olan yüklü B5 kusurundan kaynaklanmaktadır.



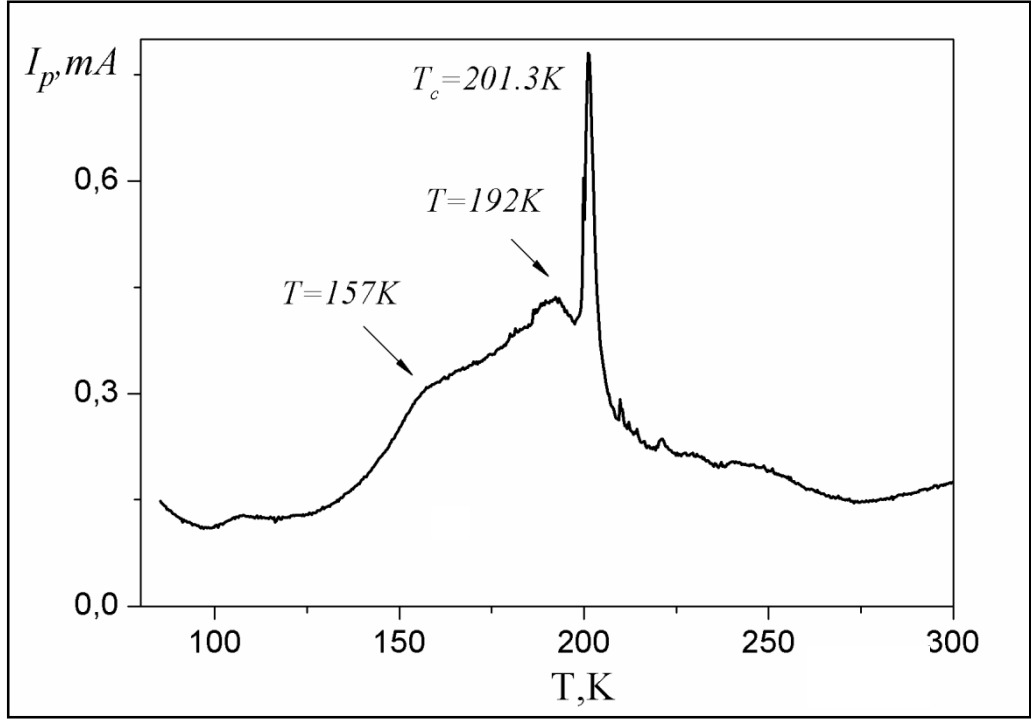
Şekil 4.13. Soğutulurken sadece 220-180 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

Uygulanan kutuplayıcı dış elektrik alana paralel olan bu alan, IUDA ölçümü boyunca düzensiz fazda bulunan.



Şekil 4.14. Soğutulurken sadece 220-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

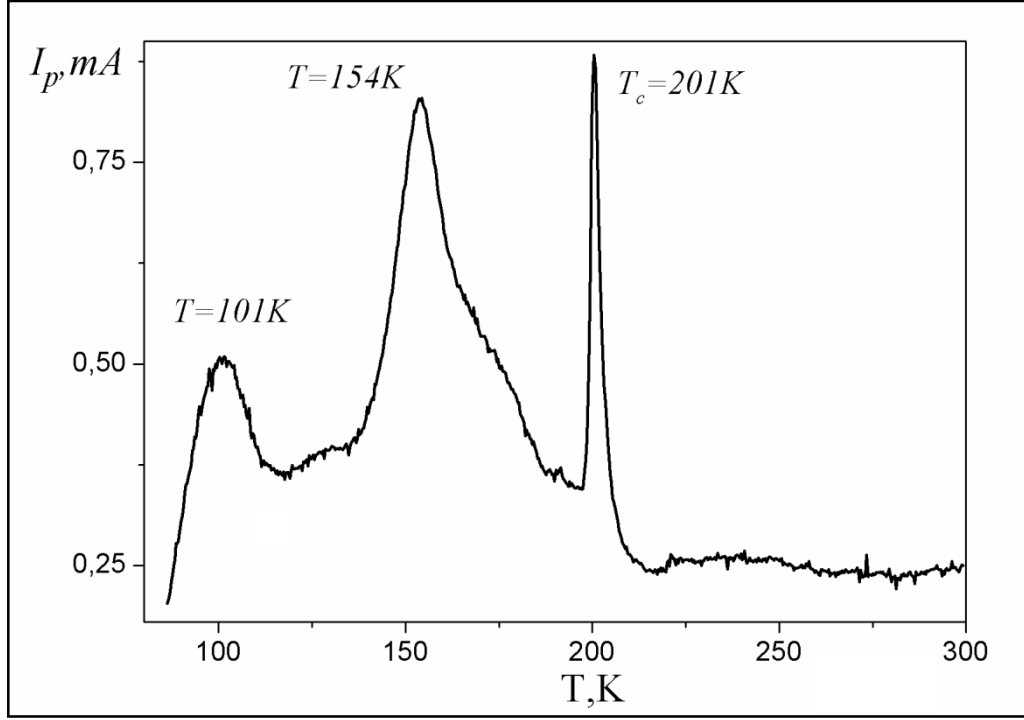
Şekil 4.14'deki IUDA eğrisi 185 K sıcaklığında sıra dışı bir davranış göstermektedir. Ayrıca T_i sıcaklığında zıt yönlü keskin bir pik gözlenmiştir. Bu gözlem, B5 kusuru tarafından biriktirilmiş uzay yüklerinin, dış elektrik alanın işaretinden bağımsız olarak zıt kutuplanma yönelimlerinin tercih edildiği güçlü bir imprint (iz) iç elektrik alana neden olduğu şeklindeki kabulü baz alınarak yorumlanabilir.



Şekil 4.15. Soğutulurken sadece 190-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk'dır.

Ek olarak belirtmek gerekir ki, elektriksel olarak aktif farklı kusurların La katkılı TlInS_2 kristali içinde farklı iç elektrik alanlara neden olduğu açıktır. Böyle durumlar Şekil 4.14. ve 4.15'de gösterilmiştir. Eğer yük taşıyıcıları, BTE43, BT23 ve TE2 gibi diğer tuzak seviyeleri tarafından yakalanırsa, bu iyonlardan (taşıyıcı kapmış olan BTE43, BT23 ve TE2 tuzak seviyeleri) kaynaklanan iç elektrik alan ile kristalin kutuplanmasının düzensiz faz bölgesinde kaydedilen IUDA sinyaline herhangi bir katkısı olmaz.

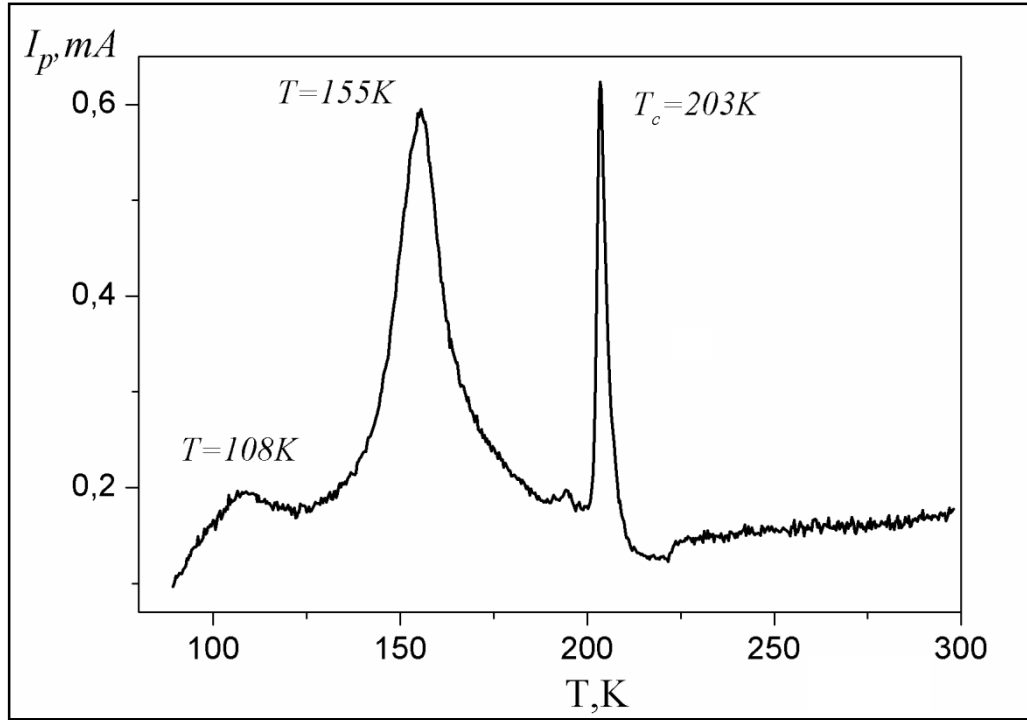
La katkılı TlInS_2 kristalinde bulunan BTE43, BT23 ve TE2 kusurlarının elektriksel aktivasyonu ve bu kusurlar tarafından yakalanmış yüklü taşıyıcılardan kaynaklanan imprint iç elektrik alanının oluşumu, kristalin uyumlu ferroelektrik fazda bulunduğu sırası ile 170-80 K, 140-80 K ve 120-80 K gibi farklı sıcaklık aralıklarında soğutulurken uygulanan 5 kV/cm'lik dc elektrik alan ile kutuplandırılmasından sonra gerçekleştirilen IUDA ölçümleri ile test edilmelidir (Tablo 4.1 ve Şekil 4.8'e bakınız). Şekil 4.16' deki IUDA ölçümü yine 20 K/dk ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.16. Soğutulurken sadece 170-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

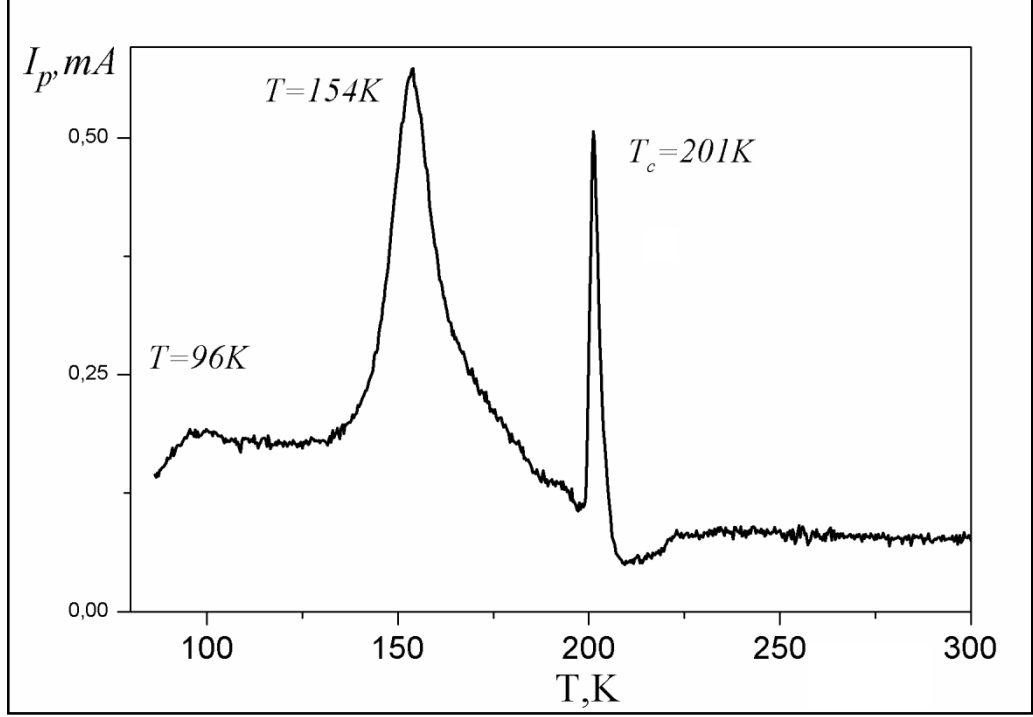
Şekil 4.16’den görülebileceği gibi IUDA spektrasında benzer değişimler gözlenmiştir. 155 K civarında $I_d(T)$ eğrisindeki geniş pik, La katkılı TlInS_2 kristalinin farklı sıcaklık aralıklarındaki elektriksel polarizasyonundan sonra ortaya çıkmıştır. 155 K sıcaklığındaki geniş pik, $I_d(T)$ eğrisinin Curie sıcaklığındaki keskin piki ile kıyaslanabilir.

Kristali kutuplandırılan dış elektrik alan Curie noktasında uygulanmamış olmasına rağmen 155 K civarındaki ve T_c yakınındaki IUDA sinyalindeki geniş alanlı anomalilerin yönü aynıdır. Bu iç elektrik alanın ve 155 K civarındaki geniş anomali BTE43 kusurlarından kaynaklanıyor olabilir. BTE43 olarak isimlendirilen kusurlar La dipollerinin tavlanması ile aktifleşmiş olabilir çünkü bu tip kusurlar katkısız TlInS_2 tek kristalleri ile yapılmış PICTS ölçümlerinde gözlenmemiştir [13].



Şekil 4.17. Soğutulurken sadece 140-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

Şekil 4.16'deki deneysel sonuçlar BT23 derin seviye kusurunun termal aktivasyonuna karşılık gelen 115-135 K sıcaklık aralığında IUDA sinyalinde belirgin bir değişim olmadığını göstermektedir. Fakat 100 K civarındaki IUDA sinyalindeki anomali Şekil 4.16'deki bütün eğrilerde ve Şekil 4.3-4.7' ye kadar olan grafiklerin çoğunda bulunmaktadır. Dış elektrik alan ile aktifleşen yüksek iyonizasyon tesir kesitine sahip TE2 derin seviye merkezinin, kristalden elde edilen IUDA sinyalinin kaynağı olduğuna inanılmaktadır.

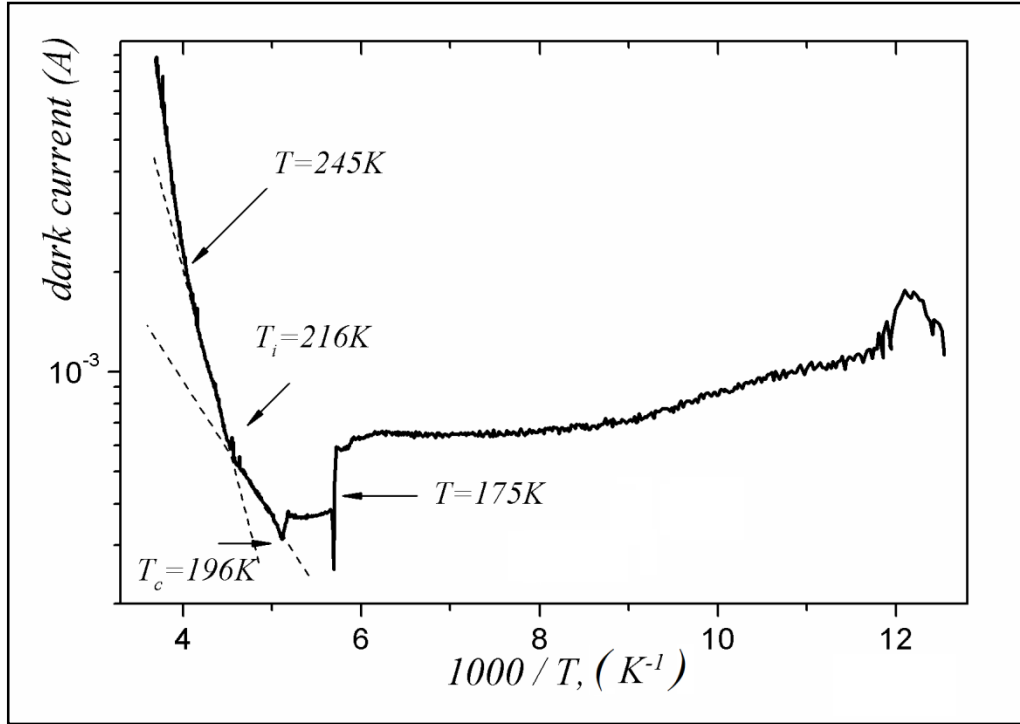


Şekil 4.18. Soğutulurken sadece 120-80 K sıcaklık aralığında uygulanan 5 kV/cm’lik dc elektrik alan altında kutuplandırıldıktan sonra elde edilen sıcaklığa bağlı TSDC eğrisi. Isıtma hızı 20 K/dk’dır.

4.1.2. La katkılı TlInS₂ kristalinin karanlık akım ölçümleri

Yukarıda anlatılan polarizasyon prosedürü uygulandıktan sonra kristal elektrometreye kısa devre olacak şekilde bağlanırsa polarize durumdan denge durumuna termal olarak aktive edilmiş geçişler boyunca akım pikleri gözlenir ve metot termal uyarılmış depolarizasyon akımı olarak isimlendirilir. Akım ölçümü sırasında kristal ısıtılırken dc bir voltaj kaynağı sisteme bağlanırsa, kaydedilen akım yarıiletkendeki safsızlık enerji seviyelerinden termal olarak aktive olan taşıyıcılardan kaynaklanan normal dc elektriksel iletimdir.

Şimdiye kadar elde edilen bulguların ışığında, FİGAS tekniği ile ortaya çıkarılan derin seviye kusurlarının aktive oldukları sıcaklık aralıkları ile La katkılı TlInS₂ tek kristalinin polarizasyon özellikleri arasında bir bağlantı olduğu sonucuna varılabilir. Yüklü olan bu derin seviye tuzakları kristalin bant aralığında karanlık akım özelliklerini önemli ölçüde değiştirmesi gereken elektronik durumlar indükler.



Şekil 4.19. La katkılı TIInS₂ kristalinin sıcaklığa bağlı karanlık akımı Arrhenius grafiğinde gösterilmiştir. Ölçüm katmanlara paralel yönde ve 10 V gerilim altında gerçekleştirilmiştir. Isıtma hızı 2 K/dk'dır.

Şekil 4.19'da, 300-77 K sıcaklık aralığında elde edilen standart iki prob metodu kullanılarak elde edilen karanlık akım ölçümleri gösterilmiştir. Aynı kontak yapısı direncin sıcaklık davranışını incelemek için de kullanılmıştır. Ölçümler 2 K/dk'lık sabit ısıtma hızı ile gerçekleştirilmiştir.

La katkılı TIInS₂ kristalinin karanlık akım iletkenliği aktivasyon tipi sıcaklık bağımlılığı sergiler.

Karanlık akımın sıcaklığa bağlı grafiğinde 175 K'de geniş bir basamak benzeri termal anomali gözlenmiştir. Diğer taraftan faz geçişinin Curie sıcaklığı olan 196 K'de küçük bir termal anomali kaydedilmiştir. Curie noktasında ve 175 K'deki anomalinin karakteristik özelliği karanlık akım eğrilerini andırmasıdır veya daha genel olarak kristal kutuplandırılması sırasında gözlenen alan indüklenmiş ısıl uyarılmış akım davranışına benzemesidir.

Ek olarak T_i sıcaklığında ve 245 K yakınlarında karanlık akım eğrisinde değişimler gözlenmiştir. Bu durum faz geçişi sırasında gerçekleşen taşıyıcı aktivasyon enerjisindeki değişim olarak yorumlanabilir. 0.25, 0.58 ve 0.72 eV aktivasyon enerjilerine sahip birbirinden ayrı sırası ile 196-216 K, 216-245 K ve 245-300 K üç sıcaklık aralığı tespit edilmiştir. Bu sıcaklık bölgelerindeki safsızlık aktivasyon

enerjileri Arrhenius bağıntısı ile hesaplanmıştır. Hesaplanan bu enerji değerleri daha önce yapılan FİGAS ölçümleri ile uyumludur. Bu yüzden La katkılı TlInS₂ kristalinden kaydedilen karanlık akım uyumsuz faz bölgesinin içinde ve uyumsuz faz geçişi noktası T_i sıcaklığının üzerinde büyük ölçüde B5 ve TE54 intrinsic kusur merkezleri tarafından kontrol edildiği sonucuna varılabilir. Bu sonuçlardan açıkça B5 derin seviye kusur merkezinin, La katkılı TlInS₂ kristalindeki ara (orta seviye-ara durumlu) bir uyumsuz fazın ortaya çıktığı sıcaklık aralığındaki yapısal değişimleri yansıttığı kabul edilebilir. Düşük sıcaklıklardaki karanlık akım ne TE2 ve BT23 yerel derin seviyelerinden ne de La safsızlığından kaynaklanan BTE43 kusur merkezinden taşıyıcıların uyarılmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir çünkü böyle bir süreç çok daha büyük aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyar.

4.2. Deneysel Sonuçların Analizi

TE2, BT23, BTE43, ve TE54 olarak isimlendirilen intrinsic tuzak sevipleri, La katkılı TlInS₂ kristali ile gerçekleştirilen FİGAS ölçümlerinde tespit edilmiştir. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi $10^3/T$ ye bağlı olarak oluşturulan $\ln \frac{T^2}{e_t}$ Arrhenius eğrileri yardımı ile kusurların aktivasyon enerjileri belirlenmiştir. Tuzakların termal aktivasyon enerjileri ve yakalama tesir kesitleri Arrhenius eğrinden elde edilmiş ve Tablo 4.1'de özetlenmiştir (derlenmiştir).

Katkılı ve katkısız TlInS₂ kristalleri ile yapılan önceki çalışmalarda tespit edilen çeşitli derin ve sığ seviye tuzaklarının aktivasyon enerjileri, yakalama tesir kesitleri ve tuzakların türü (hol veya elektron) gibi veriler 13 ve 20-24 referanslarında yer almaktadır.

5. SONUÇ

La katkılı TiInS_2 ferroelektrik yarıiletkeninde iç elektrik alanlardan kaynaklanan yüklü derin seviye tuzak merkezlerine bağlı olarak ısıtılarak depolarizasyon fenomeni incelenmiştir. Gerçekleştirilen PICTS ölçümleri ile La katkılı TiInS_2 kristalinde beş derin tuzak seviyesi gözlenmiştir. Bu seviyelerden dördü katkısız kristalde de gözlemlendiği için baz kristale ait kusurlar olarak tanımlanmıştır. Bütün derin seviye merkezlerinin aktivasyon enerji ve tesir kesit değerleri belirlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda aktifleşen ($T < 150$ K) ve La katkısından kaynaklanan BTE43 tuzaklarının parametreleri ise şöyledir; aktivasyon enerjisi 0.29 eV ve tesir kesiti ise $2.2 \times 10^{-14} \text{ cm}^2$ 'dir.

La katkılı TiInS_2 kristalinin kutuplanmış özelliklerine her bir yüklü tuzaktan kaynaklanan katkı TSDC spektra çalışmalarından belirlenmiştir. TSDC spektrasında Curie noktasının üzerinde görülen pikler, aktivasyon enerjisi ve tesir kesiti sırası ile 0.3 eV ve $1.8 \times 10^{-16} \text{ cm}^2$ olan yüklü B5 derin seviyesinden kaynaklanan iç elektrik alanının etkisi altında kristalin kendiliğinden polarizasyonu sonucu oluşmaktadır. Çok büyük ve kararlı dielektrik sabitine sahip IC faz ortamı B5 derin kusurunun iyonlaşmasından sorumludur. Bu sonuca ise B5 kusurunun termal aktivasyon bölgesi ile orta seviyeli IC fazının sıcaklık bölgesinin örtüşmesi ile varılmıştır.

155 K sıcaklığı civarındaki TSDC piki BTE43 derin seviye kusuru ile ilişkilidir. Bu pik La katkılı TiInS_2 kristalinin ferroelektrik fazının piroelektrik özellikleri ile ilişkili değildir çünkü pik 170 K sıcaklığından düşük sıcaklıklarda (Curie sıcaklığının yeterince altında) önceden elektrik alan uygulanması sonucu tespit edilebilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Panich A. (2008), “Electronic Properties and Phase Transitions in Low-Dimensional Semiconductors”, *Journal of Physics Condensed Matter*, 20(29), 293202.
- [2] Ibragimov T., Aslanov I., (2002), “Peculiarities of Second-Harmonic Generation in TlInS₂ Crystals”, *Solid State Communications*, 123(8), 339-341.
- [3] Alekperov O., Nadzhafov A., (2009), “Polytypes of Monoclinic TlInS₂”, *Inorganic Materials*, 45(1), 7-12.
- [4] Hahn H., Wellmann B., (1967), “Über ternäre Chalkogenide des Thalliums mit Gallium und Indium”, *Naturwissenschaften*, 54(2), 42-42.
- [5] Kalkan N., Papadopoulos D., Anagnostopoulos, A. N., Spyridelis J., (1993), “Structural and Photoelectronic Properties of Thallium Indium Sulphide”, *Materials Research Bulletin* 28(7), 693-707.
- [6] Mangalam M. J., Rao K. N., Ranganajan N., Siddiqi M. I. A., Suryanarayana C. V., (1969), “Studies on Thin Polycrystalline Layers of Thallium Selenide”, *Japanese Journal of Applied Physics*, 8(10), 1258.
- [7] Halias M., Anagnostopoulos A., Kambas K., Spyridelis J., (1989), “On the Non-Linear Properties of TlInX₂ (X= S, Se, Te) Ternary Compounds”, *Physica B: Condensed Matter*, 160(2), 154-160.
- [8] Halias M. P., Anagnostopoulos A. N., Kambas K., Spyridelis J., (1992), “Electrical and Optical Properties of as-Grown TlInS₂, TlGaSe₂ and TlGaS₂ Single Crystals”, *Materials Research Bulletin*, 27(1), 25-38.
- [9] Qasrawi A., Gasanly N., (2003), “Photoelectronic, Optical and Electrical Properties of TlInS₂ Single Crystals”, *Physica Status Solidi (a)*, 199(2), 277-283.
- [10] Özdemir S., Süleymanov R., Civan E., (1995), “Electrical Conductivity in Layered Semiconductor TlInS₂ with Incommensurate Phase”, *Solid State Communications*, 96(10), 757-761.
- [11] Patane A., Balkan N., (2012), “Semiconductor Research: Experimental Techniques”, Vol. 150, Springer Science & Business Media.
- [12] Qasrawi A., Gasanly N., (2004), “Investigation of Carrier Scattering Mechanisms in TlInS₂ Single Crystals by Hall Effect Measurements”, *Crystal Research and Technology*, 39(5), 439-447.

- [13] Qasrawi A., Gasanly N., (2006), "Optical Properties of TlInS₂ Layered Single Crystals Near the Absorption Edge", *Journal of Materials Science*, 41(11), 3569-3572.
- [14] El-Nahass M., Sallam M., Al-Wahab A. A., (2009), "Optical and Photoelectric Properties of TlInS₂ Layered Single Crystals", *Current Applied Physics*, 9(2), 311-316.
- [15] Guseinov G. D., Mooser E., Kerimova E. M., Gamidov R. S., Alekseev I. V., Ismailov M. Z., (1969), "On Some Properties of TlInS₂ (Se₂, Te₂) Single Crystals", *Physica Status Solidi (b)*, 34(1), 33-44.
- [16] Bakirov M. Y., Zeinalov N. M., Abdullayeva S. G., Gajiyev V. A., Gojayev E. M., (1982), "Electroabsorption in TlInS₂", *Solid State Communications*, 44(2), 205-207.
- [17] Skorikov V. M., Chmyrev V. I., Zuev V. V., Larina E. V., (2002), "Thermally Stimulated Currents in Semiconductors: Analysis of Rate Equations for a Single-Level Model and Thermally Stimulated Currents in Si< P, Au", *Inorganic Materials*, 38(8), 751-780.
- [18] Tanaka K., Choo C. K., Sumi S., Kamitani Y., Fujii T., Satoh K., Fukuda K., Nakata R., Yoshimune M., Yoshinaga Y., (2002), "C60/Zelite Semiconductor Electrode and the Gas Sensing", *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(16), 4155-4161.
- [19] Borchì E., Bruzzi M., Pirolo S., Sciortino S., (1998), "A Method of TSC Analysis of Shallow Levels Applied to Silicon", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31(24), L93.
- [20] Chen R., Kirsh Y., (2013), "The Analysis of Thermally Stimulated Processes", 1st Edition, Elsevier.
- [21] Bube R. H., (1992), "Photoelectronic Properties of Semiconductors", 1st Edition, Cambridge University Press.
- [22] Seyidov M. Y., Odrinskii A. P., Suleymanov R. A., Acar E., Mammadov T. G., Alieva V. B., (2014), "Piroelectric Properties and Structural Defects of a Layered TlInS₂ Crystal Doped with Lanthanum", *Physics of the Solid State*, 56(10), 2028-2034.
- [23] Suleimanov R. A., Seidov M., Salaev F. M., Mikailov F. A., (1993), "Model of a Sequence of Structural Phase Transitions in a Layer TlInSi₂ Crystal", *Physics of the Solid State*, 35(2), 177-180.
- [24] Allakhverdiev K. R., Akhmed-zade N. D., Mamedov T. G., Mamedov T. S., Seidov Y. (2000), "Peculiar Behaviors of TlInS₂ and TlGaSe₂ Layered Crystals Near Phase Transitions in Constant Electric Field", *Fizika Nizkikh Temperatur*, 26(1), 76-83.

- [25] Suleimanov R. A., Seidov M., Salaev F. M., Mamedov T. S., (1992), “Dielectric Anomaly Observed in the Transition to an Incommensurate Phase in a Layer TlInS_2 Crystal”, Soviet Physics. Solid State, 34(6), 975-976.
- [26] Suleimanov R., Seidov M., Salaev F., (1991), “Elastic Properties of TlInS_2 and TlGaSe_2 Layer Crystals”, Soviet Physics Solid State, 33(6), 1010-1012.
- [27] Ilisavskii Y. V., Sternin V. M., Suleimanov R. A., Salaev F. M., Seidov M., (1991), “Ultrasonic Investigations of Phase Transitions in TlInS_2 and TlGaSe_2 Layered Crystals”, Soviet Physics: Solid state, 33(1), 57-60.
- [28] Babaev S. S., Mammadov T. G., Mikailov F. A., Salehli F. M., Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., (2005), “The Effect of Impurities on the Phase Transitions in the Ferroelectric Semiconductors TlInS_2 and TlGaSe_2 ”, Journal of Physics: Condensed Matter, 17(12), (1985).
- [29] Gadzhiev B., Seidov M. Y., Abdurakhmanov V., (1996), “Incommensurate-Incommensurate Phase Transition in the Sequence of Structural Phase Transitions in a Layered TlInS_2 Crystal”, Physics of the Solid State, 38, 1-6.
- [30] Gadzhiev B., Seidov M. Y., Abdurakhmanov V., (1995), “Low-Temperature Singularities of Elastic Moduli of Layered TlInS_2 Crystal”, Low Temperature Physics, 21, 950-953.
- [31] Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., Odrinsky A. P., Nadjafov A. I., Mammadov T. G., Samadli E. G., (2011), “Photoinduced Current Transient Spectroscopy of TlInS_2 Layered Crystals Doped with Er, B, and Tb Impurities”, Japanese Journal of Applied Physics, 50(5S2), 05FC08.
- [32] McKelvey J.P., (1966), “Solid State and Semiconductor Physics”, 1st Edition, Harper & Row.
- [33] Bakış Y., (2005), “Katmanlı TlInS_2 Kristalinin Dielektrik Spektroskopisi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [34] Çoşkun E., (2003), “ TlGaSe_2 Kristalinin Isıl Uyarılmış Akım Yöntemi ile İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gebze Teknik Üniversitesi.
- [35] Yoshie O., Kamihara M., (1983), “Photo-Induced Current Transient Spectroscopy in High-Resistivity Bulk Material. I. Computer Controlled Multi-Channel PICTS System with High-Resolution”, Japanese Journal of Applied Physics, 22(4R), 621.
- [36] Yoshie O., Kamihara M., (1983), “Photo-Induced Current Transient Spectroscopy in High-Resistivity Bulk Material. II. Influence of Non-Exponential Transient on Determination of Deep Trap Parameters”, Japanese Journal of Applied Physics, 22(4R), 629.

- [37] Balland J. C., Zielinger J. P., Tapiero M., Gross J. G., Noguet C. (1986), "Investigation of Deep Levels in High-Resistivity Bulk Materials by Photo-Induced Current Transient Spectroscopy. II. Evaluation of Various Signal Processing Methods", *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19(1), 71.
- [38] Blondeel A., Clauws P., (1999), "Photoinduced Current Transient Spectroscopy of Deep Defects in N-Type Ultrapure Germanium", *Journal of Applied Physics*, 86(2), 940-945.
- [39] Seyidov M. Y., Suleymanov R. A., Mikailzade F. A., Kargin E. O., Odrinsky A. P., (2015), "Characterization of Deep Level Defects and Thermally Stimulated Depolarization Phenomena in La-Doped TlInS₂ Layered Semiconductor", *Journal of Applied Physics*, 117(22), 224104.

ÖZGEÇMİŞ

Elif Orhan Kargın 29.01.1989 tarihinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Kocaeli’ de tamamladı.2007 yılında Ondokuzmayıs Üniversitesi Ortaöğretim Fizik Öğretmenliği’ ne girdi.2012 yılında lisans eğitimini tamamlayarak mezun oldu. Aynı yıl Gebze Teknik Üniversitesi Fizik Anabilim Dalı’ na kabul edildi ve Gebze Teknik Üniversitesi’nde Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans yapmaktadır. Evli ve bir çocuk annesidir. Özel bir okulda müdürlük yapmaktadır.